

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
İŞLETME ENSTİTÜSÜ**

**ÜRÜN ÇEŞİTLİLİĞİNİN ÜRETİM SÜRECİNE
ETKİSİNİN SİSTEM DİNAMİĞİ İLE
MODELLENMESİ: BİR OTOBÜS ÜRETİM SİSTEMİ
ÜZERİNDE UYGULAMA**

DOKTORA TEZİ

Zafer DOĞRUYOL

Enstitü Anabilim Dalı: İşletme Fakültesi

Enstitü Bilim Dalı : Üretim Yönetimi ve Pazarlama

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Samet GÜNER

Kasım- 2021

Zafer DOĞRUYOL tarafından hazırlanan “Ürün Çeşitliliğinin Üretim Sürecine Etkisinin Sistem Dinamiği ile Modellenmesi: Bir Otobüs Üretim Sistemi Üzerinde Uygulama” başlıklı bu tez, 24/11/ 2021 tarihinde Sakarya Üniversitesi Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği'nin ilgili maddeleri uyarınca yapılan Tez Savunma Sınavı sonucunda başarılı bulunarak, jürimiz tarafından Doktora Tezi olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Doç. Dr. Samet GÜNER

Sakarya Üniversitesi

Jüri Üyeleri:

Prof. Dr. Erman COŞKUN

Bakırçay Üniversitesi

Doç. Dr. Samet GÜNER

Sakarya Üniversitesi

Doç. Dr. Halil İbrahim CEBECİ

Sakarya Üniversitesi

Doç. Dr. İhsan Hakan SELVİ

Sakarya Üniversitesi

Doç. Dr. Hakan Murat ARSLAN

Düzce Üniversitesi

 SAKARYA ÜNİVERSİTESİ	T.C. SAKARYA ÜNİVERSİTESİ İŞLETME ENSTİTÜSÜ TEZ SAVUNULABİLİRLİK VE ORJİNALLİK BEYAN FORMU	Sayfa : 1/1
--	---	-------------

Öğrencinin

Adı Soyadı	:	Zafer DOĞRUYOL
Öğrenci Numarası	:	166D04001
Enstitü Anabilim Dalı	:	İŞLETME
Enstitü Bilim Dalı	:	ÜRETİM YÖNETİMİ VE PAZARLAMA
Programı	:	☐ YÜKSEK LİSANS ☒ DOKTORA
Tezin Başlığı	:	ÜRÜN ÇEŞİTLİLİĞİNİN ÜRETİM SÜRECİNE ETKİSİNİN SİSTEM DİNAMİĞİ İLE MODELLENMESİ: BİR OTOBÜS ÜRETİM SİSTEMİ ÜZERİNDE UYGULAMA
Benzerlik Oranı	:	%8

İŞLETME ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜNE,

☐ Sakarya Üniversitesi İşletme Enstitüsü Lisansüstü Tez Çalışması Benzerlik Raporu Uygulama Esaslarını inceledim. Enstitünüz tarafından Uygulama Esasları çerçevesinde alınan Benzerlik Raporuna göre yukarıda bilgileri verilen tez çalışmasının benzerlik oranının herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edileceği muhtemel durumda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi beyan ederim.

04/11/2021
İmza

☐ Sakarya Üniversitesi İşletme Enstitüsü Lisansüstü Tez Çalışması Benzerlik Raporu Uygulama Esaslarını inceledim. Enstitünüz tarafından Uygulama Esasları çerçevesinde alınan Benzerlik Raporuna göre yukarıda bilgileri verilen öğrenciye ait tez çalışması ile ilgili gerekli düzenleme tarafımda yapılmış olup, yeniden değerlendirilmek üzere@sakarya.edu.tr adresine yüklenmiştir.

Bilgilerinize arz ederim.

04/11/2021
İmza

Uygundur

Danışman
Unvanı / Adı-Soyadı: Doç. Dr. Samet GÜNER
Tarih:04-11-2021
İmza:

☐ KABUL EDİLMİŞTİR ☐ REDDEDİLMİŞTİR EYK Tarih ve No:	Enstitü Birim Sorumlusu Onayı
---	--------------------------------------

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR/ TANIMLAR	iv
TABLO LİSTESİ	v
ŞEKİL LİSTESİ	vi
ÖZET	viii
ABSTRACT	ix

GİRİŞ	1
-------------	---

BÖLÜM 1: ÜRÜN ÇEŞİTLİLİĞİ VE ÜRETİM SİSTEMİNE ETKİSİ.....	6
--	----------

1.1. Kitlesele Üretimden Kişiselleştirilmiş Üretime	6
1.2. Ürün Çeşitliliğinin Gereğesi ve Avantajları	8
1.3. Ürün Çeşitliliğinin Süreçlere Etkisi	9

BÖLÜM 2: ÜRETİM SİSTEMLERİNDE KARMAŞIKLIK.....	15
---	-----------

2.1. Karmaşıklık Tanımı ve Kavramsal Çerçeve	15
2.1.1. Karmaşık Sistemler	15
2.1.2. Karmaşıklığın Sınıflandırılması	16
2.2. Karmaşıklığın Boyutları	17
2.3. İç ve Dış Karmaşıklık	18
2.4 Ürün Çeşitliliğinin Karmaşıklığa Etkisi/ Yarattığı Zaman Baskısı	19
2.5 Çeşitlilik Kaynaklı Karmaşıklığın Yönetilmesi	22
2.5.1 Ürün Çeşitliliğinin Optimizasyonu	24
2.5.2 Ürün Modülerleştirme	25
2.5.3 Ürün Platformları	25
2.5.4 Diğer Uygulamalar	26

BÖLÜM 3: OTOMOTİV ÜRETİM SÜREÇLERİNDE ÇEŞİTLİLİK NEDENLİ KARMAŞIKLIK	27
---	-----------

3.1 Otomotiv Sektöründe Ürün Çeşitliliği ve Kitlesele Özelleştirme/ Kişiselleştirme	27
3.2 Otomotiv Üretim Sistemlerinde Çeşitliliğinin Neden Olduğu Karmaşıklık	28

3.3 Otobüs ve Binek Araç Üretimindeki Yöntem ve Yaklaşım Farklılıkları.....	30
3.4 Otobüs Üretim Sürecinde Karmaşıklık	31
3.5. Literatürün Genel Değerlendirmesi ve Araştırma Boşluğu	37

BÖLÜM 4: ARAŞTIRMANIN YÖNTEMİ..... 39

4.1 Araştırmanın Amacı ve Kapsamı	39
4.2 Vaka Şirketi ve Problem Tanımı.....	40
4.2.1 İşletme Hakkında Genel Bilgiler.....	40
4.2.2 Vaka Şirkette Üretim ve Montaj Süreci	41
4.2.3 Vaka Şirketin Sipariş Alma Yaklaşımı	42
4.2.4 Problem Tanımı	44
4.2.5 Vaka Şirkette Karmaşıklık Yönetim Uygulamaları	47
4.3. Sistem Dinamiği Yaklaşımı	49
4.4. Nedensel Döngü Diyagramı.....	51
4.5. Modelin Doğrulanması.....	52
4.6. Vaka Şirkette Araştırma Verisinin Toplanması ve Grup Çalışması	54
4.7. Karmaşıklığın Ölçülmesi	55
4.7.1 Alternatif ölçüm yönteminin amacı	55
4.7.2 Entropi.....	55
4.7.3. TOPSIS	58

BÖLÜM 5: ANALİZ VE BULGULAR..... 61

5.1 Nedensel Döngü Diyagramının Oluşturulması	61
5.2. Model Haritasının Oluşturulması.....	63
5.2.1. Tasarım Süreci	66
5.2.2. Üretim Süreci	69
5.3. Modelin Varsayımları	72
5.4. Bulgular.....	73
5.5. Modelin Geçerliliğinin Test Edilmesi.....	77
5.5.1 Doğrudan Yapı Testleri.....	78

5.5.3 Davranış Örüntü Testleri.....	82
5.6. Sistem Karmaşıklığının Ölçümü	83
5.6.1. TOPSIS için Karmaşıklık Faktörlerinin Belirlenmesi	83
5.6.2 Entropi ile Kriter Ağırlıklarının Belirlenmesi.....	86
5.6.3. TOPSIS ile Sistem Karmaşıklığının Sıralanması	87
SONUÇ VE ÖNERİLER.....	91
KAYNAKÇA	95
ÖZGEÇMİŞ.....	111



KISALTMALAR/ TANIMLAR

AMI	: Ortalama Karşılıklı Bilgi endeksi.
ATO	: Assembly to Order, Sipariş Üzerine Montaj.
B2B	: “Business to Business”, “Şirketten Şirkete yapılan ticaret.
B2G	: “Business to Government”, İşletmeden devlete yapılan ticaret.
BOM	: “APL, Araç Parça listesi Malzeme listesi”, tüm bölümlerin seviyesini ve tanım
CLD	: Causal Loop Diagram.
EP	: “Eksik Parça”, araçların montaj operasyonu esnasında hat yanında olmayıp araca takılamayan parçalar.
ETO	: “Engineering to Order” sipariş üzerine mühendislik çalışması
FTA	: Federal Transit İdaresi
JIT	: “Just in Time”, Tam Zamanında Üretim.
MS	: Mühendislik Sistemleri.
MTO	: “Manufacture to Order”, Siparişe Göre Üretim.
MTS	: “Manufacture to Stock”, Stoklama için Üretim.
NDD	: Nedensel Döngü Diyagramı
OICA	: “International Organization of Motor Vehicle Manufacturers”, Uluslararası Motorlu Araç Üreticileri Organizasyonu.
SILS	: “Sequence-In-Line Supply”, Sıralı Tedarik.
VMI	: “Vendor Managed Inventory”, Tedarikçi tarafından yönetilen envanter.

TABLO LİSTESİ

Tablo 1 : Üretim Yöntemleri Arasındaki Farklar	8
Tablo 2 : Karmaşıklık Derecesine Göre Teknik Sistemler	16
Tablo 3 : Sistemlerin Karmaşıklık Açısından Sınıflandırılması	17
Tablo 4 : İç ve Dış karmaşıklık Faktörleri	19
Tablo 5 : Otomotiv Endüstrisinde Karmaşıklık Seviyesi.....	30
Tablo 6 : Vaka Şirkette Üretimi etkileyen Çeşitlilik Kaynaklı Sorunlar	46
Tablo 7 : Sistem Dinamiği Modelinin Dört Yapı Elemanı ve Tanımları.....	49
Tablo 8 : İş Yüküne Göre Tasarım Yükü Endeks Değerleri	67
Tablo 9 : Karmaşıklık Faktörleri ile İlgili Literatür	84
Tablo 10: Çalışmada Kullanılan Karmaşıklık Faktörleri	85
Tablo 11: Karar Matrisi.....	86
Tablo 12: Normalize Karar Matrisi	86
Tablo 13: Entropi Değerleri	87
Tablo 14: Entropi ve Sapmanın Değerleri	87
Tablo 15: Kriterlerin Ağırlık Değerleri.....	87
Tablo 16: Normalize Edilmiş Karar Matrisi	88
Tablo 17: Ağırlıklı Normalize Matris	88
Tablo 18: İdeal ve Negatif-İdeal Değerler	89
Tablo 19: İdeal ve Negatif-İdeal Değerlere Uzaklık	89

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1 : Çalışmanın Akışı	5
Şekil 2 : Kitlesele Kişiselleştirme.....	7
Şekil 3 : Dizayn Hatalarının Ürün Oluşturma Aşamalarına Göre Etkisi.....	13
Şekil 4 : Zaman Baskının Tasarım ve Üretim Süreçlerine Etkisi	21
Şekil 5 : Toplam Zaman Baskısı ve Performans Arasındaki İlişki.....	22
Şekil 6 : Optimum Ürün Çeşitliliğinin Kararlaştırılması.....	23
Şekil 7 : Optimum Çeşitlilik İçin Gelir ve Maliyet Dengesi.	24
Şekil 8 : Araç Üretim Şirketi İçin Ürün Tasarım Süreci	32
Şekil 9 : Tasarım değişikliklerin zaman içindeki etkisi.....	33
Şekil 10: Pozitif ve Negatif Kayma (drift)	35
Şekil 11: Vaka Şirket Kitlesele Kişiselleştirme yaklaşımı	42
Şekil 12: Vaka Şirket Sipariş Alma ve Gerçekleştirme Süreci	43
Şekil 13: Vaka Şirketinde Satış Hacmine Göre Çeşitliliğin artışı	44
Şekil 14: Vaka Şirketi Satışı Gerçekleşen Araç Kod Sayısı/ Değişikliklerin Tanımı	45
Şekil 15: Vaka Şirketin Eksik parça probleminin nedenleri.....	47
Şekil 16: Üretim Süreci Model	50
Şekil 17: Ürün- Stok Akış Diyagramı	50
Şekil 18: Örnek Nedensel Döngü Diyagramı	52
Şekil 19: Vaka Şirket NDD İlk Taslak Çalışması	62
Şekil 20: Nedensel Döngü Diyagramı	63
Şekil 21: Model Haritası.....	64
Şekil 22: Model Haritasının Stella Programında görülmesi	65
Şekil 23: Tasarım Süreci Modeli	66
Şekil 24: Üretim Süreci Modeli.....	70
Şekil 25: Tedarik Süreci Modeli.....	71
Şekil 26: Tasarım Yükünün Üretim Verimliliğine Etkisi.....	73
Şekil 27: Tedarik Zinciri Kaynaklı Eksik Parça (Ünite Başına Kayıp Zaman).....	74
Şekil 28: Stoktaki Kalem Sayısı	75
Şekil 29: Tedarikçiye Açılan Sipariş Sayının Ürün çeşitliliği ile Değişimi	76
Şekil 30: Kalite Kaynaklı Kayıp Zaman- Araç Bazlı	77
Şekil 31: Tasarım Yüğü Verim Eğrisi ile Gerçek- Model Kıyaslama.....	79
Şekil 32: Tedarik Zinciri Kaynaklı EP Nedenli Kayıp Zaman.....	79

Şekil 33: Vaka Şirketi Kalite Kayıpları Model/ Gerçek Kıyaslama.....	80
Şekil 34: Tedarikçiye verilen sipariş sayısının Model/ Gerçek mukayesesi	80
Şekil 35: Karmaşıklık Faktörleri Özet Çıkartım.....	85



Tezin Başlığı: Ürün Çeşitliliğinin Üretim Sürecine Etkisinin Sistem Dinamiği ile Modellenmesi: Bir Otobüs Üretim Sistemi Üzerinde Uygulama

Tezin Yazarı: Zafer Doğruyol

Danışman: Doç. Dr. Samet Güner

Kabul Tarihi: 24. 11.2021

Sayfa Sayısı: ix (ön kısım) + 111 (tez)

Anabilim Dalı: İşletme

Bilim Dalı: Üretim Yönetimi ve Pazarlama

Son birkaç on yılda tüketici ilgisinin seri üretimden kişiselleştirilmiş ürünlere doğru yönelmesinin sonucu, üreticilerin pazara sunduğu ürün çeşidi sayısı önemli ölçüde artmıştır. Otomotiv sektörü de bu akımdan etkilenmiş ve müşterilerin daha kısa teslim süresinde daha kişiselleştirmiş ürünlere talepleri artmış ve sonucunda yüksek çeşitliliğe ve üretim sistemlerinde karmaşıklığa neden olmuştur. Artan ürün çeşitliliği işletmeler için bir rekabet avantajı olabilirken, üretim sürecinde karmaşıklığa ve ek maliyetlere de yol açabilmektedir.

Otomotiv sektöründe karmaşıklık ile ilgili yapılan çalışmalar binek otomobil grubu üzerinde yoğunlaşmıştır. Ancak üretim süreçleri, ürüne ilişkin yapısal farklılıklar ve üretim hacmi açısından binek otomobillerden farklılaşan otobüs üretim sistemleri büyük ölçüde göz ardı edilmiştir. Bu tez çalışması, ürün çeşitliliğinin otobüs üretim sistemlerinde neden olduğu karmaşıklık ölçmek, çeşitliliğin üretim, tasarım ve tedarik süreçlerine etkilerini ortaya koymak ve çeşitliliğinin etkin bir şekilde yönetilmesini sağlamak amacıyla bir yöntem ortaya koymayı amaçlamaktadır.

Diğer yandan, literatürde karmaşıklık ölçen çalışmaların üretim sürecinin kısıtlı bir bölümünü ele aldığı görülmektedir. Bu durum, problemin dar bir perspektiften değerlendirilmesine neden olmaktadır. Bu çalışma, üretim sistemindeki karmaşıklık daha fazla boyutu dikkate alarak ve daha kapsamlı bir şekilde incelemeyi amaçlamaktadır. Böylece, ürün çeşitliliğinin neden olduğu karmaşıklığın üretim, tasarım ve tedarik süreçlerine etkileri daha bütüncül bir bakış açısıyla sunulabilecektir.

Bu amaçla bir otobüs üretim sistemi “Sistem Dinamiği” yaklaşımı kullanılarak modellenmiştir. Karmaşık süreçlerin çözümlenmesinde geleneksel yöntemlerin yetersiz kalması, dinamik yapıyı kuşatabilme ve problemlere deneysel olarak cevap verebilme kabiliyeti, sistem dinamiği yaklaşımını bu çalışma için uygun kılmıştır. Oluşturulan model, problemlerin benzersizliği ve yaygınlaştırılabilirliği için esnek tasarlanmıştır. Model, çeşitliliğin artışı ile düşen verim ve bozulan KPI'lara ait değerleri de sunmaktadır. Ayrıca, sistem dinamiği modelinin çıktıları çok kriterli karar verme teknikleri ile analiz edilerek ürün çeşitliliğindeki artışın üretim sürecinde neden olduğu karmaşık ortaya konmuştur.

Önerilen modelin, çeşitliliğin yarattığı karmaşıklık kontrol etme ve çeşitliliğin yönetilmesi noktasında işletmelere yardımcı olması ve uygun eylemlerin seçilmesine katkı sağlaması beklenmektedir.

Anahtar Kelimeler: Ürün çeşitliliği, sistem dinamiği, karmaşıklık, tasarım yükü, karmaşıklık, verimlilik.

Title of the Thesis: Modeling the Effect of Product Diversity on the Production Process with System Dynamics: Application on a Bus Production System

Author: Zafer Doğruyol

Supervisor: Assoc. Prof. Samet Güner

Date: 24.11.2021

Np: ix (front part) + 111 (thesis)

Department: Business

Subfield: Production Management and Marketing

The result of the shift of consumer attention from mass production to personalized products in the last few decades has significantly increased the number of product variants that manufacturers offer to the market. The automotive industry has also been affected by this trend, and customers' demands for more personalized products with shorter delivery times have increased, resulting in high diversity and complexity in production systems. Studies on complexity in the automotive sector were generally carried out in automobile group enterprises, but the processes, operational, product structural, production number difference and low operating density made the bus sector less visible in the studies of this product group. This study was organized in order to partially eliminate the lack of studies in the literature on complexity in bus operation. In addition, it makes the study different from other studies carried out under the title of complexity, since it examines the effect of time constraint on the design process and other processes.

The "System Dynamics" approach was applied in the study due to the inadequacy of traditional methods in the analysis of complex processes, the ability to encompass the dynamic structure and to respond to problems experimentally. The model makes it possible to decide on the appropriate assortment at an early stage by gaining insight into the dynamic behavior of the system through system dynamics modeling. The model has been designed flexibly so that it can be disseminated, and also presents the values of decreased yield and deteriorated KPIs with the increase in diversity. The results of the model were confirmed with the "Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution". The model outputs are different depending on the strategic priorities of the companies or the risk appetite of the managers, and the relevant decisions depend on the foresight of the manager.

Therefore, although this proposed model does not provide a definitive method for all other companies regarding the approaches that can be chosen to control the complexity created by diversity, it can make a very important contribution to understanding complexity and choosing appropriate actions. Due to the multifaceted nature of this industry, the impact and consequences of complexity are clearly visible in key businesses, but suppliers and related small businesses in the value chain that work with these companies and get their share of complexity can benefit from this model.

Keywords: Product variety, System Dynamics approach, complexity, design department load, complexity.

GİRİŞ

Teknolojik değişimin yoğun bir şekilde yaşandığı günümüz dünyasında, pazarın küreselleşmesi, serbest bilgi akışı, tedarik zincirinin küresel yapıya uygun olarak genişlemesi ve buna bağlı olarak maliyetlerin düşmesi hemen hemen tüm sektörlerde yoğun bir rekabete neden olmuştur. Bu rekabet ortamı şirketleri pazar payını artırmak için ürünlerini kişiselleştirmeye, ürün çeşitliliğini arttırmaya teşvik etmektedir (Scavarda vd., 2009). Bunun yanında yasal gereksinimler, pazar niş i yaratmak, kısalan ürün ömür döngüsü gibi nedenler de çeşitliliğin artmasına neden olmaktadır.

Firmalar, pazarın parçalanması sonucu, karlılığını daha düşük hacimli niş ürünlerle arttırırken, zamanla artan ve çok şeffaf olamayan ürün çeşitliliğinin yarattığı kaotik girdaba düşebilmektedir (Jetin, 2018; Osgood, 2017). Yapılan araştırmalar, çeşitliliğinin artışı ile süreçlerin tutarlılığının azaldığını, belli bir eşikten sonra hemen hemen tüm süreç performanslarında düşüşe neden olduğunu ve çeşitlilik nedeniyle artan karmaşıklığın doğrudan işgücünü yani verimliliği ve ürün kalitesini etkilediğini ortaya koymaktadır (Götzfried, 2013). Otomotiv pazarındaki bölünme yeni ve farklı modellerinin sayısında önemli ölçüde artışa neden olmaktadır (Nazir ve Shavarebi, 2019). Bu sektördeki yüksek çeşitlilik, zaten karmaşık olan otomotiv üretim hatlarını daha da karmaşık hale getirmektedir. Sonuçta, şirketler için faydalarından istifade etmek istedikleri çeşitliliğin yarattığı karmaşıklığın zorluklarıyla da mücadele etmek, şirketlerin başarısı için önemli bir hale gelmiştir.

Tezin Amacı: Değişen pazar ve rekabet şartları, pazarda büyüme ve karlılık sağlamayı amaçlayan şirketlerin stratejik yaklaşımları çeşitliliği teşvik etse de çeşitliliğin yarattığı kazanç ve kayıplar arasındaki gerekli kombinasyonu oluşturacak kararların alınması gerekmektedir (Lancaster, 1990). Bu çalışma, ürün çeşitliliğindeki artışın sistemin diğer süreçlerine etkisini modellemeyi ve bu sayede etkilenen ana süreç göstergelerindeki değişimi ölçmeyi ve çeşitliliğin optimizasyonu konusunda yönetime bir enstrüman sağlamayı bu sayede çeşitliliğin avantajları üzerine odaklanılırken getirebileceği olası yıkıcı zararlarını minimize etmek amacı ile gerekli aksiyonların planlanması, alınması için veri seti oluşturmayı amaçlamaktadır. Konu örnek bir vaka çalışması üzerinden, müşteri talebinde yaşanan değişikliklerin ve ürün çeşitliliğinin neden olduğu zaman

baskısının diğer performans göstergelerine etkisine ilişkin şu sorularda cevap vermeyi hedeflemektedir:

- 1- Ürün çeşitliliğindeki bir artış, üretim karmaşıklığını nasıl etkilemektedir?
- 2- Bu durumda işletmeler ürün çeşitliliğini ne kadar artırmalıdır?

Tezin Önemi: Son yıllarda şirketler teknolojik yenilikler, belirsiz pazar dinamikleri, değişen müşteri gereksinimleri, teslimat süreleri, yasal ürün yükümlülüğü ve çevresel gereksinimler gibi birçok değişkeninin getirdiği zorlayıcı etkiye maruz kalmaktadır. Şirketlerin rekabet avantajı sağlamak için gerçekleştirdiği ürün çeşitliliğinin artırılması gibi çabalar iç dinamiklerdeki karmaşıklığı arttırmaktadırlar (Pine, 1993). Bu nedenle, artan karmaşıklığın etkilerinin öngörülmesi ve azaltılması ve değişimlerle başa çıkmak konusunda yapılacak çalışmalar önem kazanmaktadır.

Bu çalışma, bir üretim tesisinde ürün çeşitliliği sonucu oluşan üretim karmaşıklığını ortaya koyarak bir ölçüm modeline dâhil edilmesi ile üretim ortamlarına sahip işletmelerde karar birimleri için hedeflerin daha gerçekçi ve uygulanabilir olarak belirlenmesine imkân sağlayacaktır.

Çalışmanın bir diğer önemi de uygulama alanından kaynaklanmaktadır. Otomotiv sektöründeki karmaşıklıkla ilgili araştırmaların çoğunun, genellikle binek otomobil fabrikasındaki operasyonlar temelinde hazırlandığı görülmektedir. Her ne kadar otomobil ve otobüs, otomotiv sektörünün benzer üretimleri gibi görülse de bu iki ürünün üretim sistemleri arasında yapısal, operasyonel, üretim yöntemleri ve ayrıca üretim miktarları, müşteri beklentileri, pazar rekabeti ve pazarlama yöntemleri açısından önemli farklılıklar vardır. Ayrıca kısa serili ticari araç veya benzer türde üretim yapan işletmelerde, değişen müşteri taleplerine sunulan ürünler için yoğun tasarım gayreti gerektirmektedir. Bu çalışmada çeşitliliğin yanında müşteriye bağlı ürün farklılaşması nedeni ile tasarım miktarı ve rekabet nedeni ile azalan tasarım süreleri nedeni ile oluşan karmaşıklığın şirketin üretim, stok, gibi organizasyonel birimlerin üzerine getireceği karmaşıklık etkisi modellenerek anlaşılmaya çalışılmıştır.

Tezin Literatüre ve Uygulamaya Katkısı: Çalışmanın literatüre dört temel katkısı olması beklenmektedir. Birinci katkı, her ne kadar literatürde ürün çeşitliliğinin üretim süreçlerine etkisini ölçmeyi amaçlayan çalışmalar yapılmış olsa da pek çoğu üretim sisteminin çok kısıtlı bir parçasına odaklanmıştır. Bu çalışmada üretim sistemi bir bütün

olarak değerlendirilerek, önerilen sistem dinamiği modeli ile daha kapsamlı bir bakış açısı sunulmuştur. İkinci katkı, literatürde ürün çeşitliliğinin diğer süreçlere etkisini ölçmeyi amaçlayan farklı yöntemler kullanılmışsa da yöntemlerin doğası gereği probleme kısmi bir çözüm getirebilmişlerdir. Bu çalışmada, literatürdeki diğer çalışmalardan farklı olarak, sistem dinamiği yaklaşımı benimsenmiştir. Üçüncü katkı, geliştirilen sistem dinamiği modeli sayesinde ürün çeşitliliği ile üretim karmaşıklığı arasındaki ilişki ortaya koyulabilmektedir. Dördüncü ve son olarak, üretim sistemlerindeki karmaşıklığı ölçmek amacıyla çok kriterli karar verme tekniklerine dayalı bir yöntem önerilmiştir.

Ayrıca, çalışma kapsamında geliştirilen sistem dinamiği modelinin uygun ürün çeşitliliğinin belirlenerek üretim sistemi performansının iyileştirilmesi noktasında uygulamaya da katkı sunması beklenmektedir. Nitekim bir otobüs üretim sistemi üzerinde yapılan uygulama çalışması, önerilen modelin çeşitlilik ile verimlilik arasındaki ilişkiyi doğru bir şekilde açıklayabildiğini göstermiştir. Geliştirilen model her ne kadar bir otobüs imalat işletmesi için tasarlanmış olsa da zaman baskısı ve ürün çeşitliliği ile mücadele eden diğer kısa serili üretim sistemlerine de uygulanabilir niteliktedir.

Otobüs üretiminde süreçlerin ve ürünün yapısal, operasyonel, yönetim şekli itibari ile , farklı hem üretim adedi işletme yoğunluğunun düşük olması bu ürün veya üretim grubuna ait çalışmalarda Otobüs sektörünü az görünür kılmıştır. Bu çalışma sorunlar veya konularla ilgili çalışmada kitlesel üretime güzel bir örnek olan binek otomobil üretiminden farklı olarak daha fazla emek yoğun üretim, ürün mimarisine daha fazla dokunulabilen bir yapı olması nedeni ile otomobil üretiminde karmaşıklık başlığı altında yapılan diğer çalışmalardan farklı kılmaktadır.

Bu araştırmanın önemli bir katkısı da bir kısa serili üretim firmasında çeşitlilik nedenli karmaşıklıkta dinamik davranışına ilişkin sistem dinamiği modellemesi ile iç-görü elde ederek uygun ürün çeşitliliğine erken aşamada karar verebilir.

Ayrıca bu çalışma Otobüs üretiminde karmaşıklık ölçümü için yapılan ve farklı sektörde bile olsa zaman kısıtının tasarım süreci üzerinde ve akabinde diğer süreçleri etkisi konusunda bu kapsamdaki ilk çalışmalardan biridir.

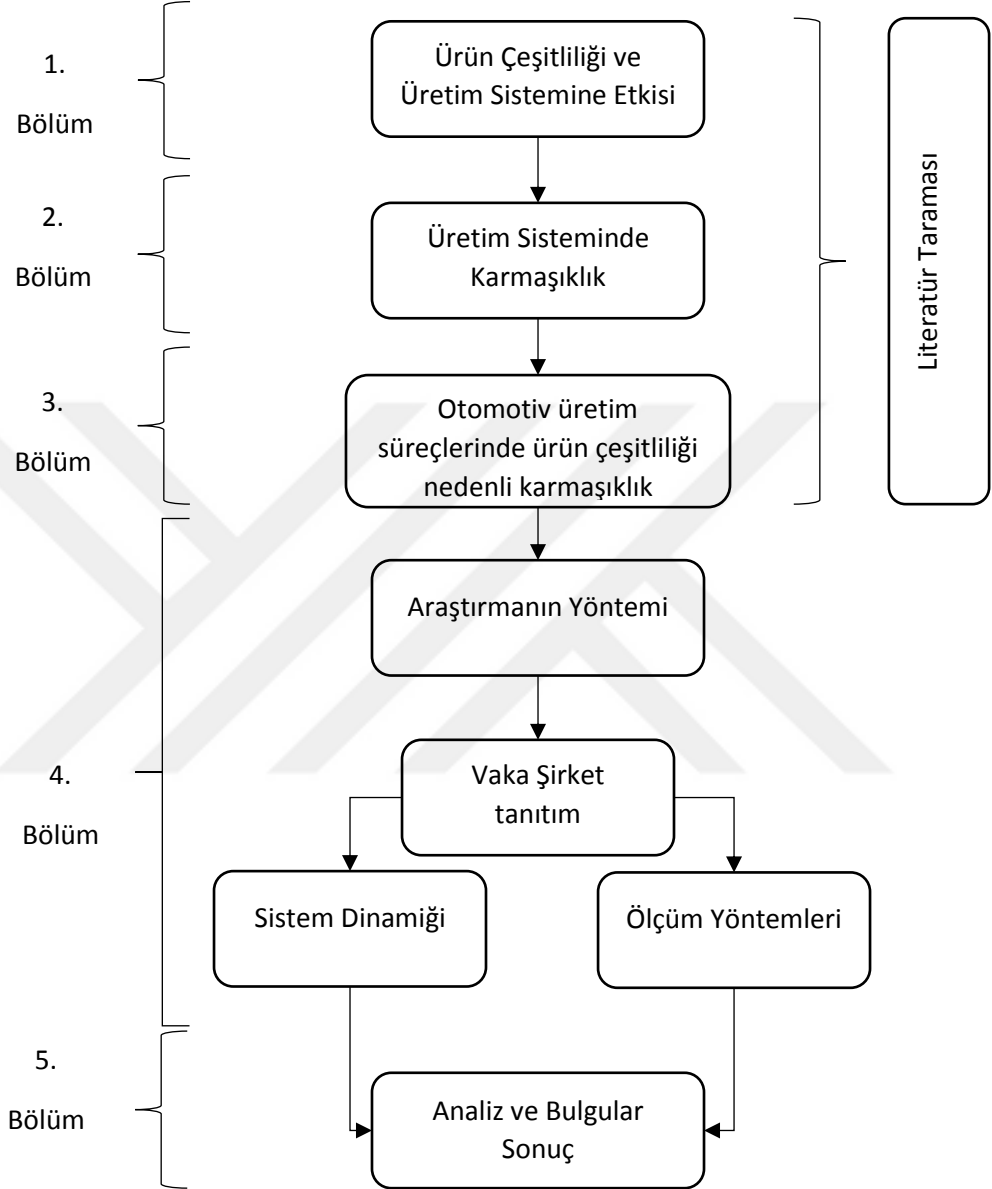
Tezin Organizasyonu: Çalışma beş bölümden oluşmaktadır ve çalışmanın akışı Şekil 1’de gösterilmiştir.

İlk bölümde kitlesel üretimden kişiselleştirilmiş üretime geçiş sürecinden bahsedilmiş, ürün çeşitliliğin gerekçeleri ve işletmelere sağladığı avantajlar tartışılmış, aynı zamanda ürün çeşitliliğinin neden olduğu problemler ve karmaşıklık değerlendirilmiştir. İkinci bölümün odak noktası ise üretim sistemlerinin karmaşıklığıdır. Bu bölümde karmaşık sistemler tanımlanmış ve karmaşıklığın farklı boyutları tartışılmıştır. Ürün çeşitliliğinin tasarım departmanında neden olduğu zaman baskısı ve bunun işletme üzerindeki olumsuz etkileri değerlendirilmiş ve karmaşıklığı yönetmek için önerilen yöntemler ele alınmıştır. Çalışmanın üçüncü bölümü otobüs üretim sistemlerindeki ürün çeşitliliğini ve bunun neden olduğu karmaşıklığı konu edinmiştir, ayrıca çeşitliliğin tasarım sürecine etkisi ve özellikle otobüs ana üretim süreçlerinde ve tasarımındaki başarısızlıkların diğer süreçlere etkileri araştırılmıştır.

Dördüncü bölümde araştırmanın yöntemi ve metodolojisi ele alınmıştır. Uygulamanın yapılacağı vaka şirket tanıtılmış ve araştırma problemi tanımlanmıştır. Çalışmada kullanılacak sistem dinamiği yaklaşımı ve karmaşıklığın ölçümü için kullanılacak entropi ve çok kriterli karar verme teknikleri, çalışmanın kısıtları ve varsayımları bu bölümde anlatılmıştır. Çalışmanın uygulaması beşinci bölümde yapılmış, vaka şirketine özgü sistem dinamiği modeli kurulmuş ve ürün çeşitliliğine bağlı olarak üretim sisteminin karmaşıklığı ölçülmüştür.

Tezin Kısıtları: Çalışmanın kısıtları olarak araştırmaya konu olan Vaka şirketine özgü model oluşturma sürecinde hem işletmenin bilgilerinin gizliliği nedeni ile açıklanamayacak bilgilere net olarak ulaşamaması nedeni model haritasına bazı süreçler dâhil edilmemiştir. Bu nedenle çalışmada operasyonel verilere odaklanılarak ürün çeşitliliğinin verimliliğe etkisi dikkate alınmış ancak maliyetlerdeki ve gelirdeki etkisi dikkate alınmamıştır, örneğin stokta kalacak parça sayısı ve maliyeti ve yaratılacak yeni ürün için yatırım gereksinimi gibi. Ayrıca karmaşıklığın yüksek derecede etkilediği satış sonrası, müşteri memnuniyeti ve envanter sistemleri, ürün çeşitliliğinin sağladığı gelir artışı ile neden olduğu maliyetler çalışmanın kapsamının çok genişlemesi nedeni ile araştırma modeline dâhil edilmemiştir.

**Ürün Çeşitliliğinin Üretim Sürecine Etkisinin Sistem Dinamiği ile
Modellenmesi: Bir Otobüs Üretim Sistemi Üzerinde Uygulama**



Şekil 1: Çalışmanın Akışı

BÖLÜM 1: ÜRÜN ÇEŞİTLİLİĞİ VE ÜRETİM SİSTEMİNE ETKİSİ

Kitlesel üretimin öncüsü Henry Ford, montaj hattını keşfederek üretim dünyasında bir çığır açtı ve kitlesel üretimin temel ilkesini “Otomobil üretiminin ideal yolu, benzer ürünler yapmaktır” şeklinde açıklamıştır. Fordizm olarak adlandırılan bu yöntem 20. yüzyılda bir devrim yaratmış, üretimin artması ile düşen birim maliyet beklentisi, yüksek ölçekli tüketici talebini standart ürün ve yeteneksiz işgücü ile rekabet avantajı elde edilmesi amaçlanmıştır (Bekmezci, 2018). Günümüzde ise, “her bireyin istek ve ihtiyaçları birbirinden farklıdır” yaklaşımı ve buna bağlı artan rekabet nedeniyle kitlesel üretim yerini kişiselleştirilmiş ve özelleştirilmiş üretime bırakmaya başlamıştır.

1.1. Kitlesel Üretimden Kişiselleştirilmiş Üretime

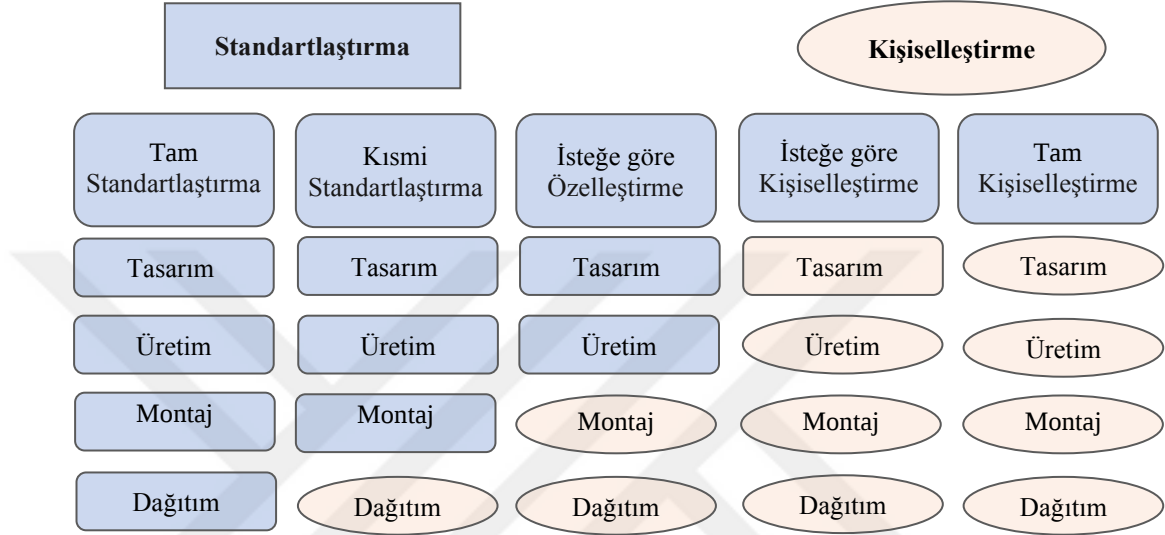
İşletmelerde kişiselleştirilmiş üretimin kitlesel üretime göre belirgin bir rekabet avantajı sağlayacağı görüşü belirginleşmiştir (Pine, 1993). Kitlesel kişiselleştirilmiş veya özelleştirilmiş üretimde beklenen, müşterinin tasarım süreciyle bütünleşmesi ve benzersiz ürünlerin istenen miktarda istenen nitelikte ürünleri uygun bir fiyatla sunmaktır (Pine, 1993). Bu noktada, üretimin büyük ölçekli gerçekleşmesi ile maliyet tasarrufu sağlayan ancak ürün çeşitliliği az ve esnekliği düşük olan Kitlesel Üretim, (KÜ) yaklaşımının yanında, Kitlesel Kişiselleştirme, (KK) ve Kitlesel Özelleştirme, (KÖ) kavramları ön plana çıkmıştır.

Kitlesel Kişiselleştirme, (KK), tasarım sürecinde açık bir ürün mimarisi ile müşteri-üretici iş birliğiyle yenilikçi ürünlerin üretildiği sistemlerdir (Hu, 2013). Kitlesel kişiselleştirmede ürünün müşterinin bireysel isteklerine göre uyarlanması neticesinde seçeneklerin artması ürün çeşitliliğinin artmasına yol açacaktır. Bu sistemler için pek çok sınıflandırma geliştirilmiş olsa da (Lampel ve Mintzberg, 1996) tarafından yapılan ve Şekil 2’de gösterilen değer zincirinin basitleştirilmiş bir görüşü yaygın olarak kullanılmaktadır.

Kitlesel Özelleştirme, (KÖ) yaklaşımı ise, özelleştirilmiş ürünler ile, müşteriye ürünle ilgili belirlenmiş seçenekler sunarak, işletmelerin rekabetçi pazarlarda farklılaşma stratejisi olarak tanımlanabilir (Kabasakal vd., 2017). Bu yaklaşım temel ürün mimarisi oluşturulurken müşterilerin tercih edecekleri montaj kombinasyonlarını seçmelerine

imkân tanır. Esnek ve yeniden yapılandırılabilir üretim sistemleri ve kombinasyonel montaj sayesinde yüksek

çeşitlilik yakalanır ve böylece kapsam ekonomisi sağlanmış olur. Piller (2018), kitlesel özelleştirmenin son yıllarda neredeyse seri üretim maliyetiyle özdeşleştirilmiş ürünler sunmaya çalışan yaygın bir üretim paradigması haline geldiğini ifade etmiştir.



Şekil 2: Kitlesel Kişiselleştirme

Kaynak: (Lampel ve Mintzberg, 1996)

KÜ, KK ve KÖ yaklaşımları arasındaki fark, temelde hedefler, müşteri katılımı, üretim sistemi ve ürün yapısından kaynaklanmaktadır. Kişiselleştirme ve özelleştirmede yaklaşım olarak müşterinin ortak amacına hizmet ettiği varsayılrsa da müşteri ihtiyaçlarının temelinde farklılaşabilir. Özelleştirme, ürününün müşterinin gereksinim duyduğu ihtiyaçlara göre düzenlemesi iken, kişiselleştirmede ise ürünün müşterinin bireysel isteklerine göre uyarlanmasıdır, (Kabasakal vd., 2017). Bu yapılar arasındaki temel farklar ve belli başlı üretim yöntemleri Tablo 1’de gösterilmiştir.

Tablo 1’den görüleceği gibi kitlesel üretim ile kişiselleştirme zıt uçlar olarak tanımlanmıştır. Diğer yandan kitlesel özelleştirmenin seri üretim ve kişiselleştirme arasında melez bir stratejiyi temsil ettiğini düşünülebilir (Götzfried, 2013). Esasında özelleştirme stratejilerinden hangisinin daha uygun olduğunun işletme ile ilgili bir konu olup kitlesel özelleştirme, kişiselleştirmeye kıyasla, ürün çeşitliliği nedeni ile değer zincirinde oluşan süreç karmaşıklığı ile başa çıkma konusunda daha avantajlı gözükmetedir (Götzfield, 2013).

Tablo 1: Üretim Yöntemleri Arasındaki Farklar

	Kitlesel Üretim (KÜ)	Kitlesel Özelleştirme (KÖ)	Kitlesel Kişiselleştirme (KK)
Amaç	Ölçek ekonomisi	Kapsam ekonomisi	Değer farklılaşması
Müşteri Katılımı	Satınalma	Seçme	Dizayn
Ürün Yönetimi	Adanmış Üretim	Yapılandırılabilir Üretim	Talep Üzerine Üretim
Ürün Yapısı	Ortak Parça	Ortak parça Özelleştirilmiş Parça	Ortak parça Özelleştirilmiş Parça Kişiselleştirilmiş Parça

Kaynak: (Doukas ‘dan 2017) uyarlanmıştır.

1.2. Ürün Çeşitliliğinin Gerekçesi ve Avantajları

Günümüzde firmalar performans artışı için stratejilerini pazar gereksinimlerine uygun hale getirmelerinin önemini kavramışlardır (Cohen, vd., 2019). Bu kapsamda, firmalar rekabet seviyesini arttırmak ve düşük büyüme oranlarına bir çözüm olması amacıyla, getireceği ilave ekonomik maliyete bakmaksızın, stratejik olarak ürün çeşitliliğini arttırmayı tercih etmektedir (Suthikarnnarunai, 2008; Vogel ve Lasch, 2018). Yaratılan bu çeşitlilik ekonomik açıdan firmalar için kritik bir başarı faktörü olarak değerlendirilebilir (Cooper, 2019). Ancak şirketlerin, pazardaki heterojen müşteri gereksinimlerine cevap vermek amacıyla müşterilerine sundukları farklı ürün sayısı, çeşitliliğini de arttırmaktadır (Fisher, vd., 1995 ve Ramdas, 2003).

Çeşitlilik her ne kadar işletmelerde karmaşıklığı arttıran ve olumsuz çağrışımlar uyandıran bir unsur olarak gözüксе de günümüzde şirketlere rekabet avantajı sağlamada yararlarının oldukça fazla olduğu görülmekte bu nedenle şirketler tarafından önemsenmekte ve dikkate alınmaktadır. Quelch ve Kenny (1995), Kirca (2020), çeşitliliğin bir firma için rakipler karşısında farklılık yaratma ve rekabet baskısını azaltma konusunda etkisinin olduğunu belirtmişlerdir. Ürün çeşitliliği sayesinde ürün çekiciliğinin artacağını bunun da şirketin pazarda daha rekabetçi konuma geleceğini ortak bir görüştür (Bednar ve Modrak, 2017; Fisher vd., 1995, Lyons vd., 2020; Ramdas, 2003; Sanderson ve Uzumeri, 1997).

Lyons vd., (2020), çeşitliliğin şirket için yaratacağı pazar avantajının, süreçlerde yaratacağı sorunlardan daha fazla yarar getireceğini ifade etmiştir. Ürün kişiselleştirme,

maliyet artışına neden olsa bile satın alma kararlarında istedikleri özelliklerin sunulması müşteriler için ürünleri ilgi çekici yapmaktadır (Lyons vd., 2020). Kişiselleştirilmiş ürünler, her ne kadar firma için pazar parçalanmasına yol açıyor olsa da bu ürünler pazarda özel ürün muamelesi göreceği ve yaratacağı talep nedeni ile ölçek ekonomisinde olduğu gibi yüksek sayıda müşteriye ulaşmak mümkün olabilir (Kirca vd., 2020).

1.3. Ürün Çeşitliliğinin Süreçlere Etkisi

Ürün çeşidi, pazara sunulacak farklı ürün ailesinin en az bir karakteristik özelliği diğer ürünlere göre farklılık gösteren bitmiş ürünlerdir (Lechner ve Wagenitz, 2011). Literatürde ürün çeşitliliğinin sağladığı faydaların yanı sıra, çeşitliliğin yarattığı sorunlar ile ilgili çalışmalar da oldukça yoğun bir yer tutmaktadır. Yapılan çalışmalarda, ürün çeşitliliğinin yüksek talep belirsizliği yarattığı ve bu nedenle talep tahmininde sorunlara neden olduğu ifade edilmiştir (Fisher vd. 1995; Kirca vd., 2020; Randall ve Ulrich, 2001). Ürün çeşitliliğinin neden olduğu parça sayısındaki artışın daha karmaşık tedarik süreçleri ve daha geniş bir tedarikçi tabanı gerektirecektir (Um vd., 2017). Götzfried (2013), bir şirketin rekabet avantajını sürdürebilmesi için yeni ürünler ve ürün çeşitleri oluşturmada düşük kaynak kullanım becerisi olsa da çeşitliliğin getireceği negatif yükler, ürün hatlarında müşteri gereksinimlerini karşılamada standart üretimde olduğu kadar kalite yönü ile doğru ürün sağlayamayacağını ifade etmiştir. Schleich, Schaffer ve Scavarda (2007), ürün çeşit artışının neden olduğu ölçek ekonomisinin azalmasının tedarik zinciri faaliyetlerinin çoğunda bileşen fiyatları, temin süreleri ve envanter (stok) seviyeleri üzerinde olumsuz etkiler yaratacağını belirtmiştir. Schuh ve Schwenk (2001), araştırmalarında değer zincirinin belirli bölümlerindeki çeşitliliğe dayalı karmaşıklık etkileri kategorisine üretim, kalite, lojistik süreçlerindeki etkilerine ilaveten dağıtım (pazarlama, ürün dağıtımı, tahmin doğruluğu), ve satış sonrası (yedek parça stoklama veya ürün servis eğitimi gibi) konularını da eklemiştir.

Literatür tarama desteği ile ürün çeşitliliğinin ve neden olduğu karmaşıklığın işletme süreçlerine etkisi altı başlık altında toplanabilir:

Maliyet: Çeşitliliğin böldüğü sipariş büyüklüğünün neden olduğu düşük hacimli üretim şirketin ölçek ekonomisinden uzaklaşmasına ve maliyet artışına neden olur (Bednar ve Modrak, 2015; Makumbe, Seering ve Rebentisch, 2009). Bu durum otomotiv endüstrisi için de geçerlidir (Schleich, Schaffer ve Scavarda, 2007). Keuper (2003), Çeşitliliğin

yarattığı karmaşıklığın maliyetle olan etkisini, iki başlıkta ele almıştır, direkt maliyetler (ürün tasarım, test maliyetleri, gibi) ve sonradan ortaya çıkan maliyetler (eğitim, satış sonrası maliyetleri, çeşitlilik edeni ile yaratılan ürünlerin mevcut ürünlerin pazar payını alması gibi).

Uygulayıcılar ve araştırmacılar gelirin yükseltilmesi amacı ile ürün çeşitlendirmesini arttırmak veya ölçek ekonomisi arasında, optimal bir çeşitlilik amaçlasa bile bunun teorik bir değer olduğu ve pratikte gerçek bir değer ortaya koymanın zor olduğunu savunmaktadırlar. Bu tür uygulamalarda gelirler ve maliyetler arasındaki değişimin pratikte ve gerçekte çok farklı olduğu görüldüğünden, firmaların kendilerine has bir strateji belirlemeleri gerekmektedir (Abdelkafi, 2008).

Üretim: Ürün çeşitliliğindeki artış imalat ve montaj için daha farklı operasyonlar ve daha fazla işlem gerektirir. Ayrıca üretim veya montaj hattında işçilik sürelerini artar, işlem yapılacak öge sayısında artışa neden olur bir üründen diğerine daha sık geçilmesi nedeniyle ve buna bağlı olarak üretim hatlarındaki yapılması gereken sık düzenlemeler eğitim gereksinimleri nedeni ile üretim performansı kötüleşir ve verimlik azalır (Guimaraes vd., 1999). Thonemann ve Bradley (2002), bunların yanında çeşitliliğin getirdiği karmaşıklığın yarattığı tasarım, kalite ve diğer konularla ilgili sorunlardan gelen kayıplar ve verim kaybının yanında üretim alanında da sorunları izlemek, çözmek için daha fazla denetim gerektirir şeklinde yorumda bulunmuştur. Sonuçta, çeşitlilik artışının üretim hattında yaratacağı sorunlar nedeni ile ürünlerin teslim süresi uzarken, kalite seviyesinde düşüşler ortaya çıkar (Bednar ve Salanci, 2016).

Tedarik zinciri ve stok seviyesi: Otomotiv sektöründeki dinamik iş ortamında, gelişmiş bir tedarik zinciri, şirketin rekabette farklılaştırmasına yardımcı olacak kritik bir unsurdur. Ancak ürün çeşitliliğinin artışı ile tedarikçilerden temin edilecek mamul, yarı mamul ve parça sayısının artışı daha fazla tedarikçi ile çalışma gerekliliği doğurmaktadır bu durum yalın tedarik zinciri kavramına ile çelişmektedir. Çeşitliliğin yarattığı daha fazla tedarikçi ile çalışma gerekliliği aynı zamanda stok miktarları, stok bedeli, parça temini için verilen sipariş sayısında, bunların tedarik süresinde, dâhili lojistik sayısında artış gerektirir, (Szmelter ve Woźniak, 2015).

Fisher ve Ittner (1999), Fujimoto vd. (2003) ve Schleich, Schaffer ve Scavarda, (2007), çeşitliliğin etkisi ile artan parça sayısı, stoklama politikalarında değişiklik yapılması

gerekliliğini bunun planlama faaliyetlerine ilave yükler ayrıca daha uzun proses zamanlarını, montaj hattı kurulum süreleri, ürün teslimat zamanları gerektireceğini belirtmiştir. Crippa vd. (2010) deneysel çalışmasında yeni ürün serisinin piyasaya sürülmesinden sonra, genel olarak şirket performanslarında bir düşüş meydana geldiğini, buna bağlı olarak malzeme ihtiyaç planlama doğruluğunun standart hedef olan %95 yerine %75 olduğunu, ayrıca malzeme eksikliği (EP¹, eksik parça) durumunun da 2 yıl içinde ciddi oranda yükseldiğinden bahsetmiştir. Yine pek çok araştırmacı ürün çeşitliliğinden kaynaklanan işletme içi değişkenliğin tanımlı işlemlerde sorun çıkartacağını, ayrıca hem parça hem de ürün stok seviyelerini arttıracaklarını vurgulamıştır (Closs vd., 2010, Fisher ve Ittner, 1999, Martin ve Ishii, 1997). Ürün çeşitliliğinin artışı ile ürünlerdeki parça sayısı, standart ürüne göre oluşan proses farklılıkları, tedarikçilerde veya müşteride yarattığı standart dışı uygulamalarda da artış gözlemlenmektedir (Götzfried, 2013).

Tasarım: Şirketleri ürün çeşitliliğini genişletmeye teşvik eden birçok neden vardır, Scavarda vd. (2009), bu konuda ürün çeşitliliğini pazar payını artırmak için geçerli bir yöntem olduğunu belirtmiştir. Ancak çeşitliliği yaratma aşamasında tasarım, en fazla etkilenen süreçlerden biridir. Vogel ve Lasch (2015), çalışmasında otomotiv veya mühendislik gibi teknik endüstrilerde ürün geliştirme sürelerine uyumun, ürün kalitesi, ürün geliştirme maliyetlerinin en önemli özelliği olduğunu ayrıca ürün ömrünün kısılmasına bağlı olarak tasarım sürelerinin de kısılması ve sonucunda işletmeleri aynı kaynaktan daha fazla çıktı beklentisine soktuğunu belirtmiştir.

Yeni ürün çıkartmanın neden olduğu ürün çeşitliliğinin getirdiği zaman baskısı, tasarım faaliyetlerinde öngörülemez hatalara ve sonuç olarak birleşik karmaşıklığa neden olur (Vega, 2012). Ceglarek ve Shi (1995) ve Shalon, vd. (1992), havacılık ve otomotiv endüstrilerindeki tüm tasarım değişikliklerinin %67-70'inin ürün-boyut değişimindeki değişikliklerle (tasarım) ilişkili olduğunu vurgulamıştır. Bu durumda yeni tasarımlar için tanımlanan zaman aralığı kısıtından, tasarım departmanı çalışanları üzerinde zaman baskısını arttırmakta ve tasarım sürecinde daha fazla tasarım sorunlarına neden olmaktadır (Baer ve Oldham, 2006).

¹ EP üretim veya montaj aşamasında elde mevcut olamayan parçalardır. Bu eksik parçaların sonradan takılması mümkün değilse hat duruşuna neden olur, sonradan takılması mümkün ise EP olarak kaydedilip parça temininden sonra monte edilir.

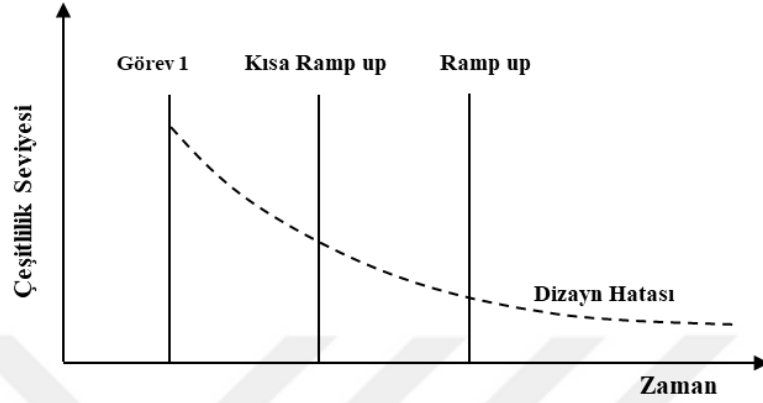
Ürün çeşitliliği artışı, Ar-Ge, tasarım grubu, prototipleme veya yeni ürün tasarım aktiviteleri nedeni ile kaynak gereksinimi ihtiyacı ve karmaşıklık artar ve bu durum tasarım ve bunu takip eden ilgili diğer süreçleri de etkiler. Baldwin ve Clark (2000), karmaşıklığın toplam tasarım kararı sayısı ile orantılı olduğunu belirtirken, (Varela vd., 2012) ise tasarım karmaşıklığını, bir ürünü oluşturan bileşenler arasındaki ilişkilerin gerçekleştirilmesindeki zorluk derecesi ve beklenen işlevsel gereksinimler olarak tanımlamıştır. Modrak vd. (2016), karmaşıklık kaynaklarından en önemlilerinden birinin ürün mimarisi kaynaklı olduğunu ifade etmiştir.

Bazı tasarım kaynaklı hataların görünürlüğü düşük olması, bir kısım tasarım sorunlarının çözümünü montaj hattında veya teslimat süresinden hemen önce ve hatta lansman aşamasından sonra, yani araçlar montaj hattından ayrıldıktan sonra, gerçekleştirilmesini gerektirmektedir. Müşteriye ait özel ürün talepleri, müşteri tarafından verilen tanımlar ve üretim bu istekler çerçevesinde üretilir veya mümkün olduğu takdirde mevcut ürün bu talebe göre Modifiye edilir. Bu nedenle, müşteri talebine uygun tasarım karmaşık bir tasarım sürecinin yanında karmaşık bir dokümantasyon sürecini de beraberinde getirir. Bu tasarım sürecinin en önemli dokümantasyon unsurlarından biri olan BOM, (Araç Parça listesi, APL ürünü oluşturan tüm unsurları, bu unsurlar arasındaki ilişkiyi ve bu unsurların bileşenlerini, özelliklerini içeren ürünün ağaç yapısında bir formatta tanımlanmasını sağlayan, ERP üzerinden diğer bölümler ile etkileşim içerisinde olan yapı) hatalarının diğer süreçlere önemli etkileri olmaktadır.

Tasarım ve ürün geliştirme, bir şirketin karmaşıklığı üzerinde en büyük etkiye sahiptir. Bu nedenle, karmaşıklık stratejisi geliştirmek için tasarım kaynaklı karmaşıklığın süreçler üzerindeki etkisini bilmek tasarım yapan üretim firmalarında daha fazla önem kazanmaktadır. Şekil 3’de dizayn hatalarının ürün oluşturma aşamalarına göre etkisinin büyüklüğü gösterilmektedir.

Suh (2007), diğer süreçlere etkisi nedeni ile ürün tasarım karmaşıklığının minimum seviyede tutulmasını önermektedir. Kişiselleştirilmiş ürünlerin süreçlere olumsuz etkisi değer zinciri boyunca artarak bu etkilerin azaltılması yönünde gerekli çaba da süreç boyunca artış göstermektedir. Ayrıca literatürde ürün tasarım sürecindeki sorunların diğer süreç performansları üzerindeki olumsuz etkilerini inceleyen birçok çalışma mevcuttur. Adler (1995), tasarım hatalarının, satış sonrası problemlerin ve ürün geri çağırma

sebeplerinin en önemli nedenlerinden biri olduğunu belirtmiştir. Benzer şekilde Vakharia vd. (1996), tasarım değişikliğinin sadece üretimde değil aynı zamanda stok, satın alma ve birçok destek fonksiyonlarında da ciddi verimsizliklere neden olacağından bahsetmiştir.



Şekil 3: Dizayn Hatalarının Ürün Oluşturma Aşamalarına Göre Etkisi

Kaynak: (Tech-Clarity, Inc., 2015)'den uyarlanmıştır.

Ürün Geliştirme: Ürün geliştirme, bir pazarda bir fırsatın algılanmasıyla başlayan ve pazara mevcut bir üründen geliştirilen yeni bir ürünün eklenmesiyle biten bir görevler dizisidir. Ürün geliştirmenin başarısı üç teknik ile tahmin edilmektedir: gelişme zamanı, ürün kalitesi ve maliyetidir (Meybodi, 2020). Geliştirme zamanı, bir geliştirme ekibinin bir geliştirme çabasını tamamlamak için gereken zaman aralığını değerlendirmek için kullanılır. Bir yıldan az bir sürede çok az ürün geliştirilebilirken, çoğu ürünün geliştirmesi üç ila beş yıl arasında ve bazıları on yıla kadar sürebilir (Meybodi, 2020).

Satış Sonrası: çeşitliliğin yarattığı sorunların görüldüğü önemli alanlardan biri de satış sonrasıdır. Çeşitlilik nedeni farklılaşan ürünler için tutulan yedek parça stoklarında önemli miktarda artış olur (Adler, 1995). Satış sonrası en önemli sorunların biri de tasarım ve üretim kalite sorunları nedeni ile garanti giderlerinin artışıdır.

Kalite: Çeşitlilik artışı, beraberinde kalite faaliyetlerinde ilave yönetsel takip, raporlama ve kaynak gerektirecektir (Antani, 2014). Nitekim (Fisher, Jain ve MacDuffie, 1995), çeşitliliğin artışı ile üretim adetlerinin azalmasının istatistiksel süreç kontrolünün uygulanmasında neden olduğu zorluklardan bahsetmektedir. Nitekim pek çok araştırmacı, çeşitliliğin yarattığı karmaşıklığın daha fazla kalite kusurlarına, onarım ve yeniden çalışmaya ve bunlara bağlı olarak verimlilik düşüşüne neden olacağını

belirtmiştir (Fisher, Jain ve MacDuffie, 1995; Fisher ve Ittner, 1999; Ramdas, 2003; Zhu vd., 2008).

Sonuç olarak, çeşitliliğin yarattığı karmaşıklık şirket içindeki tüm işlevsel alanlara ve operasyonel süreçlere yayılır (ürün geliştirme, lojistik, üretim, pazarlama, satış, vb.), ancak rekabetçi olmak anlamında tolere edilen çeşitliliğin belli seviyeden sonra diğer süreçlerde de bozucu etkisi olmaktadır. Schleich vd., (2007), ürün çeşitliliğinin süreçlerde genellikle hemen belirgin olmayan bozulmalara neden olacağını belirtmişlerdir. Roy vd. (2011), otomotiv ve benzer üst düzey karmaşık ürünlerin üretimini yapan endüstriler için ürün çeşitliliğinden kaynaklanan karmaşıklık yönetiminin önemli olduğunu vurgulamıştır. Efthymiou vd. (2012), çalışmasında, karmaşıklık ile hız arasında içsel bir bağlantı olduğunu ve çoğu durumda, artan talepler neticesi yükselen üretim hızının daha yüksek bir karmaşıklığa neden olduğunu belirtmiştir.

BÖLÜM 2: ÜRETİM SİSTEMLERİNDE KARMAŞIKLIK

Literatürde üretim karmaşıklığı ile ilgili birçok tanıma rastlamak mümkündür. Üretim karmaşıklığı sistemdeki bileşen, farklı işlem sayısı ve değişkenliklerden önemli derecede etkilenmektedir. Kısaca bir üretim sisteminde ürün çeşitliliği üründeki parça sayısı, standart ürüne göre oluşan proses farklılıkları veya müşterin talep ettiği standart dışı uygulamaları karmaşıklık nedenleri olarak kabul edebiliriz.

2.1. Karmaşıklık Tanımı ve Kavramsal Çerçeve

Analiz edilmesi veya çözümlenmesi zor olan, basitçe koordine edilemeyen, çeşitli derecelerde birbirlerine bağlı olan kısımlardan veya varlıklardan oluşan sistemler karmaşık, karışık, komplike veya sofistike olarak ifade edilebilir (Simpson ve Simpson, 2011). Karmaşıklık göstergesi olarak sadece sistemde yer alan bileşen sayısının yanında bu bileşenlerin birbiri ile olan ilişki sayısı ve bu ilişkilerin niteliği sistemin karmaşıklığının ölçüsüdür, (Flood ve Carson, 2013; Magee ve Weck, 2002). Grassberger (1991), karmaşık sistemlerin öngörülemez olduğunu vurgulamış, bileşenler ve bunlar arasındaki ilişkiler hakkında yeterli bilgi verildiğinde dahi karmaşık sistemlerin davranışlarının formüle edilmesinin zor olacağını ifade etmiştir. Kinsner (2010), benzer bir ifade kullanarak karmaşık sistemlerde yapı, analitik yöntemde olduğu gibi yönetilebilir birimlere, yani bileşenlerine ayrılrsa bile tüm sistem hakkında net bilgi edinmenin zor olduğunu belirtmiştir.

2.1.1. Karmaşık Sistemler

Sistem bilimi, geniş kaynaklardan oluşan fikirleri ortak bir sistem teması altında paylaşmak amacı ile oluşmuş bütüncü bir disiplindir. Günümüzde yaşamı etkileyen sayısız sistemlere örnek verilebilir: ondalık sayı sistemi, silah sistemleri, gibi yaşamımızın hemen hemen her alanında bir sistemle karşılaşırız. Cilliers (1999), sistemlerin doğrusal olmayan ilişki kümelerinden oluştuğunu ve çevreleri ile etkileşimde bulunduğunu ifade etmiştir. Bu sistemlerin karmaşıklığı, bileşenlerinin çokluğu ve bu bileşenler arasındaki ilişkisel yönlerin birleşimidir (Ladyman ve Lambert, 2013; Siegenfeld ve Bar-Yam, 2020).

Doğrusal olmayan sistemler küçük bir neden karşısında büyük değişikliklere sebebiyet verebilirler (Kinsner 2010). Ekinci (2016), karmaşık sistemlerin ihmal edilebilir etkileşimleri olan çok sayıda bileşene sahip olması durumunda, bileşenlerin birbiri ile etkileşimi düşük seviyede olacağından, yapının analizi için indirgemeci yaklaşımın kullanılabileceğinden bahsetmiştir. Sunderraman (1998), değerlendirmesinde sistem doğasının doğrusal olmaması nedeni ile karmaşıklık düşüncesinin, bilimsel yönetim doğası ile çeliştiğini vurgulamıştır. Buna ek olarak Grassberger (1991), karmaşık sistemlerin öngörülemez olduğunu vurgulayarak, bileşenler ve bunların arasındaki ilişkiler hakkında yeterli bilgi verildiğinde dahi karmaşık sistemlerin davranışlarının formüle edilmesinin zor olacağını ifade etmiştir.

2.1.2. Karmaşıklığın Sınıflandırılması

Literatürde, karmaşıklığın tanımlanmasında olduğu gibi sınıflandırılmasında da farklı tanımlara rastlamak mümkündür. Konu ile ilgili çoğu bilim insanı fizikçilerin çalışmalarına dayanan bir sistem sınıflandırması benimsemişlerdir. İlk sistem sınıflandırma şeması olan “Genel Sistem Teorileri”, (Boulding, 1956) çalışmasını genişleten (Von Bertalanffy, 1968) tarafından yapılmıştır. Miller (1986), çeşitli yaşam sistemlerini tanımlarken, üçüncü bir yaklaşımda (Hubka ve Eder, 1988) tarafından yapıldı. İleri Araştırma Enstitüsü'nden Steven Wolfram'ın dört "evrensellik sınıfı" sınıflandırması ile geliştirdiği bu sistem Santa Fe Enstitüsü'nden (Langton, Minar ve Burkhart, 1995) tarafından genel davranışlarına göre sistemleri dört sınıfa ayırarak kategorize etmiştir, Tablo 2.

Tablo 2: Karmaşıklık Derecesine Göre Teknik Sistemler

Karmaşıklık Düzeyi	Teknik Sistem	Özellikler	Örnekler
I (basit)	Parça.	Montaj işlemleri yapılmadan üretilen temel unsur.	Cıvata, pul, yay, somun.
II	Ön montajlı alt grup, mekanizma,	Basit sistemden daha yüksek işlevleri yerine getirebilen sistem.	Vites kutusu, diferansiyel, fren mekanizması.
III	Makine, Aparat, Cihaz.	Alt gruptan, kendi başına işlev gören, parçalardan oluşan sistem.	İşleme tezgâhı, araç, elektrik motoru.
IV	Tesis, Karmaşık makine ünitesi.	Bir dizi işlevi gerçekleştiren, bir bütün oluşturan makine ve parçalardan oluşan karmaşık bir sistem.	Isıl işlem tesisi, seri imalat tezgâh parkı

Kaynak: (Hubka ve Eder 1988).

Tablo 2’de bahsi geçen dört sınıf, sistemin davranışına dayanır ve bu davranış Tablo 3’de tanımlanmıştır. Sınıf I sistemler hızla bir noktaya hareket eder ve orada sabit kalır, sistem dengededir. Sınıf II sistemler belirli sayıda durumlar arasında salınır ve sistem kısmen dengededir. Sınıf III sistemler sabit bir yapısı olmayan, karışık ve tam kaotiktir. Sınıf IV sistemler “kaosun kenarında”, olarak adlandırılırlar, oluşturulan modellerin çözümlenmesi çok zordur.

Tablo 3: Sistemlerin Karmaşıklık Açısından Sınıflandırılması

	Sınıf	İfade	Açıklama	Tanım
Düşük	I	Statik Denge	Hızla dengeye geri dönüş Yüksek entropi	Düzenli
Değişkenlik Seviyesi	II	Dinamik Denge	Sınırlı son durumlar arası salınım	Düzenli
	III	Dengeye Yakın	II. durumun daha geniş uç durumları	Karmaşık
Yüksek	IV	Dengeden Uzak	Kaotik sınıf	Kaotik

Kaynak: (Kleveland, 1994. P 6-7), modifiye edilmiştir.

Bilimsel olarak birçok karmaşıklık türü sunulmasına rağmen, bunların tek bir sistem içinde bilimsel olarak modellenmesi genellikle karışıklığa yol açar (Light ve Clarke, 2021).

2.2. Karmaşıklığın Boyutları

Literatürde karmaşıklığın farklı boyutları tanımlanmışsa da temel de iki boyutu olduğundan bahsedilebilir: Statik (çeşitlilik) ve dinamik (değişkenlik) (Park ve Kremer, 2013). Statik karmaşıklık, “sistemin yapısının bir işlevi, ilişkileri, düzenleri, bileşenlerin çeşitliliği ve etkileşimlerin gücü” olarak tanımlamaktadır (Frizelle ve Woodcock, 1995; Deshmukh, Talavage ve Barash, 1998). Örneğin, ürün sayısı, fabrika yapısına veya tasarımına bağlı sistem, makine sayısı, teklif edilecek ürünler, ekipmanın türü ve miktarı, dikey entegrasyon derecesi, kalite sistem tasarımı ve bakım planı, iç üretim karmaşıklığını etkileyen konulara örnektir. Dinamik karmaşıklık ise zaman içinde değişen sistemin belirsizliği ile ilgilidir (Deshmukh, Talavage ve Barash, 1998). Makine arızaları ve kalite hataları gibi tahmin edilemeyen olaylar, bir imalat sisteminde dinamik karmaşıklık unsurları olarak kabul edilebilecek iki örnektir.

Bu iki boyutun haricinde (Marti, 2007), statik ve dinamik karmaşıklık tanımını daha da genişleterek işlevsel, sinerji ve tasarım karmaşıklığından bahsetmiştir. ElMaraghy W. (2012), farklı araştırmacıların, farklı açılardan yaptığı fiziksel ve fonksiyonel çıkarımları sınıflandırarak, karmaşıklık tiplerini fiziksel alanda (i) statik ve (ii) dinamik, fonksiyonel alanda ise (i) zamandan bağımsız ve (ii) zamana bağımlı olarak tanımlamıştır.

2.3. İç ve Dış Karmaşıklık

Bir sistemde karmaşıklık, iç ve dış faktörlerin bir sonucudur. Nitekim çeşitlilikten kaynaklanan karmaşıklık faktörleri dış ve iç karmaşıklık arasındaki ilişkiyi de içerir (Götzfried 2013; Kohr, Budde ve Friedli, 2017; Schuh ve Schwenk, 2001).

İç karmaşıklık, dış taleplerin veya gereksinimlerin iç kaynaklarla ürünlere dönüştürme sürecinde yaşanır ve yalnızca bir tek süreci etkilemekten ziyade sistemdeki tüm süreçleri etkilemektedir. Yani sistem, iç süreçlerin hızlanması veya yeni bir değişik uygulamanın devreye girmesi gerektiğinde, sistemin standart çıktı/çıktılar ürettiği dönemlere göre olduğundan çok daha fazla karmaşıklığa maruz kalır. Götzfield (2013) ve Marti (2007), iç karmaşıklığın büyük bir yüzdesinin dış gereksinim değişikliğinden yani dış karmaşıklığın etkisi nedeniyle olduğunu belirtirken, bu görüşten farklı olarak (Wildemann, 1998), iç karmaşıklığın büyük ölçüde insanlarla ilgili olduğuna dikkat çekerek karmaşıklığın azaltılmasında iletişim ve içyapı konularının ele alınmasının etkili olacağını belirtmiştir. Wochner vd., (2016), iç karmaşıklık miktarının, kullanılabilecek ürün çeşitliliğine bağlı olarak kademeli olarak artacağını, yani ürün çeşidi ne kadar fazla ise toplam kapasitede azaltma veya süreçlerdeki dalgalanmanın o kadar fazla olacağını belirtmiştir.

Benzer şekilde otomotiv endüstrisindeki dış karmaşıklıkla ilgili birçok çalışmada dış etkilerin fonksiyonel departmanlara göre çok farklı olduğunu ortaya koymaktadır.

Götzfried, (2013), dış karmaşıklığın şirketleri üç düzeyde: (i) Ürün portföyü (çeşitlilik), (ii) ürün yapısı (mimari) ve (iii) değer zinciri süreçleri, olarak etkilediğini. Bliss (2000), ise dış karmaşıklığı; (i) talep karmaşıklığı, (ii) rekabetçi karmaşık, (iii) teknolojik karmaşıklık şeklinde üçe ayırarak ifade etmiştir. Marti (2007), şirketlerdeki karmaşıklığa toplumun etkisini de vurgulayarak, şirketi çevreleyen çevre, bilim ve kültürün yanı sıra politik, ekonomik ve hukuki konular gibi faktörleri de içeriğe eklemiştir. Coccia M. (2020); Haarhaus ve Liening, (2020), karmaşıklığın iç unsurlardan veya kararlardan

ziyade dış faktörlerden kaynaklandığını ve bu dış faktörlerin şirket tarafından kontrol edilmesinin oldukça zor olduğunu belirtmişlerdir.

Özetle, Marti (2007), çalışmasında bahsettiği gibi karmaşıklık, iç unsurlardan veya kararlardan ziyade dış paydaşlardan (müşteriler, tedarikçiler, dağıtıcılar ve düzenleyici kurumlar, firmanın iş ortakları) kaynaklanmaktadır. İç ve dış karmaşıklık faktörleri, Tablo 4’de özetlenen bir dizi faktör belirtilmiştir.

Tablo 4: İç ve Dış karmaşıklık Faktörleri

Dış Karmaşıklık Etmenleri	İç Karmaşıklık Etmenleri	İç /Dış Faktörlere Bağlı Karmaşıklık
Dış Karmaşıklık Sosyal ve Çevresel Baskılar Demografik değişim Nüfus artışı Değer değişimi Mevzuat/ Hükümet Düzenleme/ standartlar Siyasi Faktörler Küreselleşme Merkezi Olmayan ağlar Piyasa Güçlerinin Karmaşıklığı Pazar Talep oynaklığı Global rekabet Müşteri Gereksinimleri Sıfır hata Kısa teslimat süreleri Özel gereksinimler	İç Karmaşıklık Tasarım Müşteri gereksinimleri Yeni Ürün Tasarım araçları Test doğrulama Ürün yapısı BOM derinliği Komponent sayısı Ürün karmaşıklığı Üretim aktiviteleri Organizasyon Hiyerarşik seviye Planlama Global tedarik Üretim Hattı Karışıklığı Ürün yapısı Üretim teknolojisi	İç /Dış Faktörler Teknoloji Teknolojik değişiklikler Yeni teknoloji kullanılabilirliği Ürün değişkenliği Sapma Artan çeşitlilik Kalite problemleri Ürün modifikasyonları Talep Sipariş girişleri Sipariş miktarı Sipariş gecikmeleri

Kaynak: Giessmann (2010)’dan uyarlanmıştır

Bu bilgiler ışığında dış faktörler müşteri, rakipler ve teknolojik gelişmelerden kaynaklanan ürün değişkenliği (değişim sıklığı, çeşit) konusunda somutlaşmaktadır. Bununla birlikte, mevcut araştırmalarda dış karmaşıklığın iç karmaşık üzerinde büyük bir etkisi olduğu vurgulanmaktadır.

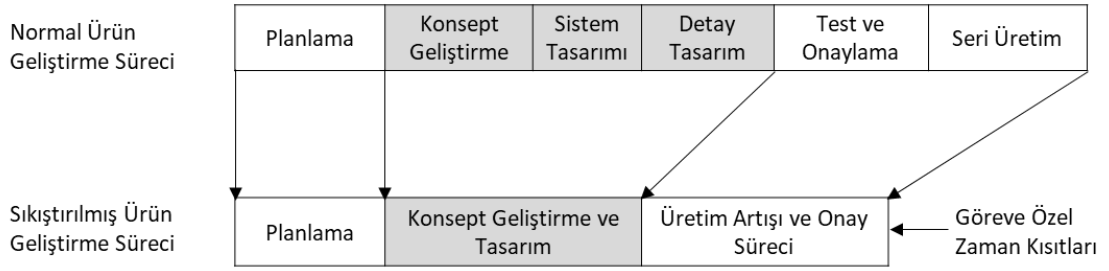
2.4 Ürün Çeşitliliğinin Karmaşıklığa Etkisi/ Yarattığı Zaman Baskısı

Son yıllarda, üretim sistemlerinin yanı sıra ve tüketici talebine gittikçe daha fazla ürün seçeneği yani kitlesel kişiselleştirme konseptleri ile cevap verilme gerekliliği maliyet ve ürünün ortaya konma zamanında kısalma beklentisi sonucu karmaşık artmaktadır (Efthymiou vd., 2015).

Lechner ve Wagenitz (2011), ürün çeşitliliğini “pazara veya müşterilere sunulacak farklı ürün ailesinin en az bir karakteristik özelliği diğer ürünlere göre farklılık gösteren bitmiş üründür” şeklinde ifade etmiştir. Götzfried (2013), ürün çeşitliliğinin, farklı ürün yaratmanın yanında ürünleri oluşturan aktif detay parçaların sayısında da bir artışa neden olduğunu, (Novak ve Eppinger, 2001; Verna, vd., 2021) ise karmaşıklığın üründeki bileşen sayısı, bu bileşenlerin etkileşimlerinin kapsamı ve ürün yeniliğinin bir derecesi olduğunu belirtmiştir. Son yıllarda şirketlerin, tüketicilerin gittikçe artan daha farklı ürün seçeneği talebini yani kitlesel özelleştirme konseptlerini karşılama gerekliliği, ürün ortaya koyma süresinde kısalma ve sonucunda artan çeşitlilik ve iş yükü nedeni ile de karmaşıklığa neden olmaktadır (Efthymiou vd., 2015). Vega (2012), ürünlerdeki olası kombinasyon sayısının sürekli genişlemesi sonucu karmaşıklığın zamanın bir fonksiyonu olarak artacağını ve sonucunda kaotik bir duruma veya sistem hatalarına neden olacağını belirtmiştir.

Ürün çeşitliliğinin artması sonucu ürün yaşam döngüsü kısaltmakta (Fisher ve Ittner, 1999; Gonçalves, vd., 2021; Randall ve Ulrich, 2001), bunun sonucunda da ürün çeşitlendirmesi şirketlere ek yük getirmektedir (Jacobs ve Swink, 2011). Vega (2012), tasarım için gerekli olan süre istenen tasarım süresinden daha kısa bir süre için ayarlandığında, sistemde öngörülemeyen hatalara ve sonuç olarak birleşik karmaşıklığa neden olacağından bahsetmiştir. Günümüz rekabet şartlarında müşteriden gelen talep bildirimi gecikmiş olsa bile firmalar, teslimat süresi değişimi yerine mühendislik ve tasarım süresindeki zamanı kısaltmayı tercih etmektedirler. Bu da ürün teslimatında istenmeyen gecikmelere ve sistemde karmaşıklığa neden olmaktadır. Bazı şirketler müşterilerinin farklı ihtiyaçlarını kısa sürede karşılamak yerine ürün seçeneklerin sayısını artırma yoluyla çözüme gitmeye çalışırlar ve bu durum daha sonra aşırı düzeyde geniş bir ürün yelpazesi oluşmasına neden olmaktadır (Schuh vd., 2017).

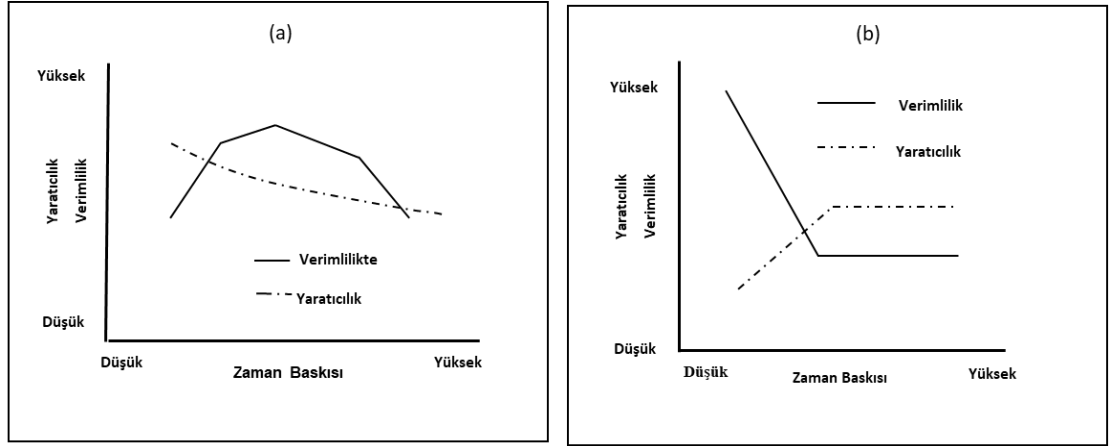
Özellikle otomotiv gibi karmaşık ürünlerin olduğu pazarda değişen koşullar, şirketleri ürün ve üretim süresini kısaltmaya zorlamaktadır Şekil 4’den de görüleceği gibi çeşitlendirme amaçlı pazara hızlı ve farklı ürün sunma kaygısı firmaları özellikle konsept geliştirme, sistem tasarımı ve detay tasarım konularında zaman olarak sıkıştırmakta ve firmalar bu üç süreci bir arada ele almak durumunda kalmaktadırlar.



Şekil 4: Zaman Baskının Tasarım ve Üretim Süreçlerine Etkisi

Stratejik olarak, otomotiv endüstrisi, yeni ürün ve üretim sistemi yönetimi olarak süreçlerinde karmaşık bir etkileşim içindedir (Mehr ve Lüder, 2019).

Kısaca karmaşıklık, olası ürün kombinasyon sayısının sürekli genişlemesine bağlı olarak kaynak kullanımında değişkenlik veya yetersizlik (zaman, insan, alan vs.) nedeni ile oluşan bir durumdur. Zaman baskısının karmaşıklık yaratması üzerinde etkisi fazla olmasına rağmen bu konuyu inceleyen az sayıda araştırma vardır. Zaman baskısı etkileriyle ilgili bazı çalışmalarda, zaman baskısının bireysel ve grup performansını artırdığı ancak yaratıcılığı azalttığını iddia edilmektedir. Andrews ve Smith, (1996), Hsiao, Wang ve Chen (2017) ve Kelly ve Karau, (1999, 2004) çalışmalarında algılanan zaman baskısı ile pazarlama fikirleri arasında negatif bir ilişki olduğunu göstermiştir. Amabile vd., (2002), yaptığı saha çalışmasında artan iş yükünün hem algılanan zaman hem de iş yükü baskısı üzerinde olumsuz bir etkisi olduğunu göstermiştir. Bu noktada Amabile vd., (2002), insanlar baskı altında oldukları zaman daha fazla çalıştığını ancak yaratıcı bilişsel işlevlerini yerine getirme gereksinimi olan daha akıllıca çalışmak için yeterli zamanları olmayacağını ifade etmiştir. Yani, Şekil 5’de görüldüğü gibi zaman baskısının artması çalışanların yaratıcılığı üzerinde sürekli bir düşme yaratırken verimlilikte önce yükselme sağlamasına rağmen zaman baskısının artması ile verimlilikte de düşmeye neden olmaktadır. Bu nedenle yaratıcı bilişsel süreci oluşturan tüm öğelerin ve verimliliğin zaman baskısından olumsuz etkileneceği söylenebilir. Benzer bir çalışma yapan (Baer ve Oldham, 2006), toplam zaman baskısı ve performans arasında ters U şeklinde bir ilişkinin varlığını göstermiştir Şekil 5 (a). Şekildeki grafikte verimliliğin zaman baskısı ile arttığını ancak yaratıcılığın zaman baskısı ile azaldığını göstermektedir Şekil 5 (b).

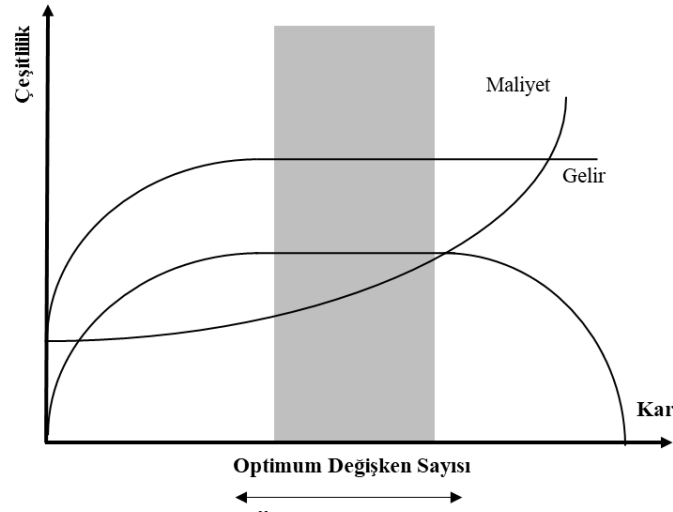


a: Deneyimsel Yaratıcı Zaman Baskısının Etkisi ve Yaratıcılık Desteği (Baer ve Oldham, 2006);
b: Zaman Baskısının Verimlilik ve Yaratıcılık Üzerindeki Etkisi (Amabile, 2002).

Şekil 5: Toplam Zaman Baskısı ve Performans Arasındaki İlişki

2.5 Çeşitlilik Kaynaklı Karmaşıklık Yönetilmesi

Çeşitlilik kaynaklı karmaşıklığın yönetilmesi, müşteri memnuniyetini artırırken tüm değer zinciri boyunca çeşitliliğin kontrol altına alınarak organizasyon verimliliğinin en yüksek düzeyde tutulması amacıyla ürün, süreç ve kaynaklarla ilgili faaliyetlerin tasarımı, geliştirilmesi ve kontrolüdür (Gembariski ve Lachmayer, 2017; Schuh vd., 2017). Çeşitliliğin yönetilememesi durumunda bir firmanın kârı uzun vadeli büyümeyi garanti altında alamayacağı gibi bu durum firmanın rekabet gücünü daha da kötüleştirebilir (Ramdas, 2003). Bu nedenle, şirketlerin karmaşıklık yönetim sistemleri kurarak çeşitlilik kaynaklı karmaşıklığın yarattığı fayda ve sorunlar dengesinin dikkate alarak kazancın artırılmasına odaklanması gerekmektedir. Çeşitliliğin yarattığı karmaşıklık, üretim şirketleri için yüzleşmek ve üstesinden gelmek zorunda oldukları en büyük görevlerden biridir (ElMaraghy H., vd., 2012). Firmalar bu süreçte stratejik olarak ürünlerini makul bir maliyet ve yüksek çeşitlilik seviyesinde tutmak için oluşan karmaşıklık sorununa en uygun çözüm karışımını bulmayı hedeflemek zorundadır. Şekil 6'da görüleceği gibi çeşitliliğin artışı optimum değişiklik sayısından sonra gelir artışında bir fark getirmezken değişikliğe bağlı olarak maliyetin arttığı gözlemlenebilir, beklendiği gibi gelir artışı yaratmayan çeşitlilik maliyet artışı ile şirket karında düşmeye neden olmaktadır.



Şekil 6: Optimum Ürün Çeşitliliğinin Kararlaştırılması

Kaynak: Alders (2007).

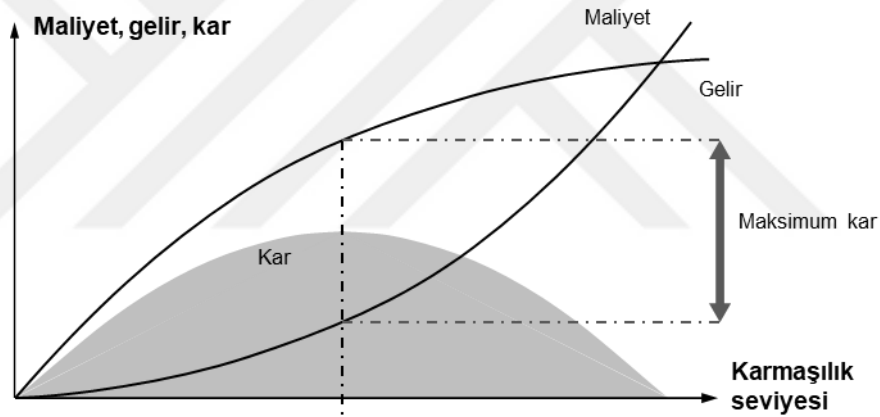
Literatürde bulunan karmaşıklık yönetim araştırmalarının çoğu karmaşıklığı yönetmenin yolunu “önlemek” ya da “azaltmak” olarak sınıflandırmıştır (Corbett, Brockelsby ve Campbell-Hunt, 2002; Kaluza, Bliem ve Winkler, 2006). Yetenek özelliği olarak karmaşıklığın gelişimi ve yönetimi nadiren tartışılmıştır. Bu konuda Suh (2007), karmaşıklığı işlevsel alanda tanımlanmış bir dizi işin gerçekleştirilmesinde belirsizliğin bir ölçüsü olarak tanımlanması gerektiği fikrini ortaya koyarak aşağıdaki işlemlerle bir sistemin karmaşıklığını azaltılabileceğini belirtmiştir. Bunlar: (i) unsurlar arasındaki bağımlılık sayısını en aza indirmek; (ii) zamandan bağımsız gerçek, hayali karmaşıklığı azaltmak; (iii) zamana bağlı kombinasyonel karmaşık bir sistemi zamana bağlı periyodik karmaşık bir sisteme dönüştürmek. Bu konuda (ElMaraghy H., vd., 2014), bu teorinin, imalat da dâhil olmak üzere sistemin tasarımında başarıyla uygulandığını belirtmiştir.

Karmaşıklık yönetiminde her ne kadar karar verme eyleminin, bir şirketin tüm seviyesinde, hat seviyesinden, yönetsel seviyeye, iş birimlerinden, şirket merkezine kadar yaygınlaştırılması gerekse de karar vermek tartışmasız üst düzey yönetimin en önemli görevidir (Garvin ve Roberto, 2001). Yönetim karar alma sürecinde piyasa değişkenliği, mücbir sebep, teknolojik ve mevzuat değişimleri, rakiplerin davranış belirsizliği, pazar davranışı ve buna bağlı fırsatlar, şirketin hedefleri ve stratejileri ürünler arasındaki geçişkenlik, kaynak ve zaman kısıtları gibi birçok faktör etkin rol alır. Bu nedenle karar verme, belirgin olmayan birçok unsurla karakterize olduğu için üst yönetimin en kritik görevlerinden birisidir. Yani kaynakların daha verimli kullanılabilmesi karar alma

aşamasının doğru yönetilmesi ile mümkündür (Mintzberg, 2009). Ürün çeşitliliği kaynaklı karmaşıklığın yönetilmesi amacı ile bazı yöntemler önerilebilir.

2.5.1 Ürün Çeşitliliğinin Optimizasyonu

Firmalar için esas olan ürün bazında ölçek ekonomisi ile düşük bir çeşitlilik yaratmaktır. Ancak bir diğer önemli husus da rekabet şartlarında çeşitlilikle rakiplerine üstünlük kurmaktır. Şirketler bu tanımlanan iki aşırı uç arasında, yüksek ölçek ekonomisi veya düşük ölçek ekonomisine sahiplik arasında çeşitli düzeylerde yer alırlar. Şekil 7’de görüleceği gibi çeşitlilik eksenini üzerinde, ürün çeşitliliği için maliyetin etkisinin gelirlerin ve karların azalmaya başlamasından daha önemli hale geldiği belirli bir noktayı bulmak için şirketler, maksimum karı sağlayan en uygun çeşitliliği sürekli olarak belirlemek zorunda kalırlar (Danne, 2009).



Şekil 7: Optimum Çeşitlilik İçin Gelir ve Maliyet Dengesi.

Kaynak: Bednar ve Modrak (2015); Matern, 2000; Kaiser (1995)

Çeşitlilikte optimizasyon, değişen pazar ve rekabet şartları nedeni ile ürün çeşitliliğinde optimum seviyesinin belirlenmesi çoğu şirket için çözümlenmesi gereken temel bir zorluktur. Bu zorluk çeşitlilikten elde edilen gelir ile oluşan kayıplar arasındaki gerekli kombinasyonun gerektirdiği stratejik kararların alınmasından kaynaklanmaktadır (Lancaster, 1990). Şirketler sürekliliklerini sağlayabilmek için kazançları ve maliyetlerini dengelemek durumundadır (Bednar ve Modrak, 2017).

Gelir eğrisini yükselten ürün farklılaştırmasını arttırmak veya maliyet eğrisini düşüren ölçek ekonomisi optimum noktanın bulunması amaçlanmış olsa bile uygulayıcılar ve

araştırmacılar, optimal çeşitliliğin teorik bir değer olduğunu ve pratikte ortaya koymanın zor olduğunu belirtmişlerdir (Abdelkafi, 2008). Bu konuda bazı genel uygulamalar firmalara karmaşıklığı azaltma konusunda destek olabilmektedir.

2.5.2 Ürün Modülerleştirme

Miguel ve Hsuan (2010), çalışmasındaki tanım ile ürün mimarisinde modül “birbirinin yerine kullanılabilir, standartlaştırılmış ara yüzlere sahip parçalar grubudur.” Ürün çeşitliliğinde, ürün yapısının (mimarisin) müşteriler tarafından gelen talepler doğrultusunda çeşitlendirme işleminin farklı modüllerle çözümlenmesinin karmaşıklığı azaltma yönünde önemli etkisi olduğu görüşü hâkimdir, (Lampón ve Rivo-López, 2021), modülerleştirme ile amaçlananın sadece tek ürüne ait mimarinin optimizasyonu ile sınırlı kalmayıp, bu uygulama ile portföyündeki ürün çeşitliliğinin genişletilmesi olduğunu belirtmiştir. Nihai ürün çeşitli sayıda modüllerden oluşabilir, modüller arasındaki arabirimlerin açık bir şekilde tanımlanmış olması, bağımsız tasarlanmış modülün nihai ürüne bağlanması kritik öneme sahiptir (Baldwin ve Clark, 2000).

Özetle, ürün modülerleştirme ile paylaşılan parçalar ve bileşenler ile şirketin, ürünleri aynı modülleri kullanarak, çeşitli ürünler sunması, parça veya modül bazında ölçek ekonomisini yakalamasına, ayrıca tasarım ve üretim karmaşıklığının azaltılmasına katkı sağlar. Bununla birlikte, modüler ürün mimarisi ile ilgili bazı eleştirilerde vardır. Baldwin ve Clark (2000), modülariteye uygun ürünlerin tasarımının daha zor olduğunu ve doğru modülerleştirme derecesinde ürün tasarlamak için yoğun çaba sarf edilmesi gerektiğini belirtmiştir.

2.5.3 Ürün Platformları

Ürün platformunu kavramı Robertson ve Ulrich (1998) tarafından ürünler arasında paylaşılan bir dizi ortak varlık olarak tanımlanmıştır. Platform oluşturmanın amacı, kısmen özelleştirilmiş bileşenlerle, parça, malzeme ve süreçlerde oluşturulan yüksek düzeyde bir ortaklıktır. Burada platform tanımındaki varlık ifadesi; bilgiyi, bileşenleri, süreçlerin (satış, üretim, satın alma vs.), yanında insanları da kapsamaktadır (Meyer ve Lehnerd, 1997). Marti (2007), çalışmasında ürün platformları sayesinde ürün çeşitlemelerinin verimli, hızlı, daha düşük maliyetle geliştirilmesi mümkün olur diye

ifade etmiştir. Platform, ürün düzeyinde faydalı olduğu kadar modül düzeyinde yani modül ve ürün portföyü oluşumunda da faydalıdır (Modrak vd., 2017).

Götzfeld (2013), platform oluşturma stratejilerinin özellikle otomotiv endüstrisinde, ürün oluşturma süreçlerinde ölçek etkilerini sağlamak için yaygın ve başarılı bir şekilde uygulandığını ifade etmiştir. Farklı bir görüş olarak (Modrak vd., 2017), platform seçeneği ile ilgili olarak, müşterilerin değişik talepleri karşısında bu önceden tanımlanmış platformların sınırlama oluşturacağı yönündedir.

2.5.4 Diğer Uygulamalar

Bliss, (2000), yeni süreç yönetim şekilleri için, yalın yönetim, iş süreci yeniden yapılanma ve değişkenlik yönetimi gibi yöntemlerin, karmaşıklık yönetim yöntemleri olarak değerlendirilebileceği önerisinde bulunmuştur. Yalın Üretim ilkelerinin uygulanması ile üretimin yalın hale getirilmesi gereksiz değişkenlik yaratan kaynakların belirlenmesine ve ortadan kaldırılmasına yardımcı olur. Bu konuda uygulanabilecek bazı üretim yöntemleri, siparişe göre üretim gibi müşteri siparişi alınana kadar üretime başlanmaz veya stok için üretim uygulaması ile yalın üretim ilkelerinin daha efektif olduğu kitle üretimi için uygulanabilir.

Schuh vd. (2017) esnek ve seçici müşteriler için sipariş üzerine montaj sistemleri ile (örneğin: koltuk cinsi, yerleşimi, müşteri tercihinine bağlı cam tipi vb.) düşük ürün stoku, yüksek ürün çeşitliliği ve hızlı ürün teslimatı elde etmelerini sağlanabileceğini belirtmiştir. Ayrıca diğer yalın yönetim uygulamaları, üretim veya montaj hattının günlük parça ihtiyacının sırayla teslim edildiği “JIT” malzeme akışı, satıcı tarafından yönetilen envanter “VMI”, sıralı tedarik “SIL” yöntemleri de karmaşıklığın yönetilmesi için önerilmektedir. Şirketin yeteneğine bağlı olarak kalite problemlerinin çözüm hızı, talep tahmininin doğruluğunu arttırma, tedarik edilen parçaların temin süresinin azaltılması, parça ortaklaştırma (aynı parçanın değişik ürünlerde kullanılması), tedarikçi performansının iyileştirilmesi, tedarikçilerle iş birliği entegrasyon ve Endüstri 4.0 gibi uygulamalarla da verimin artırılması mümkündür.

BÖLÜM 3: OTOMOTİV ÜRETİM SÜREÇLERİNDE ÇEŞİTLİLİK NEDENLİ KARMAŞIKLIK

Bir sistemin rastgeleliği ve unsurlar arasındaki bağılaşımını anlayarak sistemdeki karmaşıklıkla ilgili birçok sorun anlaşılabilir ve çözümü konusunda fikir geliştirilebilir (Ekinci ve Baykasoğlu, 2016). Özellikle otomotiv endüstrisi tarihinin en büyük değişimini yaşamaktadır ve araçlar önümüzdeki 10 yılda, geçmişte olduğundan daha fazla değişikliğe maruz kalacaktır (Szmelter ve Woźniak, 2015). Araç üretim sistemleri, araçların üstyapı ürün grubunda yer alması, çeşitliliğinin fazla olması ve üretim sürecindeki unsurlar arasındaki ilişkiler nedeniyle karmaşık sistemlerin özelliklerini gösterir. Bu nedenle otomotiv firmalarının, ürünlerini pazar gereksinimlerini karşılayacak şekilde uyarlaması, yani ürün portföyünü hızlandırılmış bir şekilde değiştirmesi ve çeşitlendirmesi gerekmektedir (Nazir ve Shavarebi, 2019). Bunun yanında değişen teknoloji ve yeni şirketlerin ortaya çıkmasıyla farklılaşan trendler bu devasa dönüşümü ilerletecektir.

Çeşitlilik nedeni ile oluşan karmaşıklık, üretim süreci ile ilişkili diğer süreçlerdeki belirsizlikler sistemlerdeki karmaşıklık seviyesi zamanla daha yüksek seviyeye taşıyabilir. Tüm bu gelişmelerle artan pazar parçalanmasının yarattığı rekabetçi ortamda, firmaların ürün çeşitliliğini ve sonucundaki karmaşıklığı yönetmek, otomotiv şirketlerinin başarısı için çok önemli bir hale gelmiştir (Schulze, Paul MacDuffie ve Täube, 2015).

3.1 Otomotiv Sektöründe Ürün Çeşitliliği ve Kitlese Özelleştirme/ Kişiselleştirme

Otomotiv sektöründe, standartlaştırılmış ürünlerin iş akışı olan montaj hatlarında seri olarak üretilmesindeki esas amaç, düşük çeşitlilik ve ürün bazında ölçek ekonomisi ile uygun maliyetli ürünü yaratmaktır. Bugün, çeşitlendirilmiş müşteri ihtiyaçlarına cevap verebilmek için şirketler, ürünlerinin özelleştirilmesine ve hatta kişiselleştirilmesine, dolayısıyla çeşitlendirilmesine, izin vermek zorunda kalmaktadır. Bununla birlikte yaşanan pazar parçalanmasına rağmen üretim sürecinde verimliliği sağlamak ve yüksek performans hedeflerine ulaşmak için ürün çeşitliliğinde optimal seviyeye karar vermek gerekmektedir (Jonsson vd., 2011). Bu piyasa koşulları, şirketin çalışma planında ve kaynak kullanımında ikilemler yaratmaktadır. Örneğin, bir birim işçilik zamanında, bir

birim standart ürün üretilebilirken müşteriden gelen talep nedeni ile ürünün farklı versiyonunu, seri üretim maliyetinde aynı sürede teslim edilmesi istenmesi gibi.

Kitlesel kişiselleştirme, tasarımın ürün geliştirme sürecinin ilk aşamasında maliyet etkin çözümleriyle ürün çeşitliliğinin gerçekleştirilmesidir (Tseng, Wang ve Jiao, 2017). Bunun için ise otomobil üreticileri tarafından yaygın olarak uygulanan üç temel strateji vardır: ürün tasarımı, bilgi sistemleri ve süreç tasarımı ve yönetimi (Brabazon ve MacCarthy, 2017).

Kitlesel üretimden kitlesel özelleştirmeye geçişte değerler dizisinin bir sonucu olarak, firmalar tarafından sunulmuş olan çeşitlerin sayısı son birkaç on yılda önemli ölçüde artmıştır. Örneğin, Avrupa’da üretilen araçların sadece motorları ile ilgili 1970’lerden günümüze, 110’dan fazla marka, 1900’den fazla model, 20000’den fazla motor, gövde, aktarma organları birleşimi ortaya çıkmıştır². Araçlarda güç paketi seçeneklerinin yanında ayrıca, araç iç mekân detay parça kombinasyonlarında birçok seçenek sunulmaktadır (koltuk kumaşı, iç trim rengi, ses düzeni gibi). Bu bağlamda, müşteriye yönelik bu tür kitlesel özelleştirme üretimin her alanında karmaşıklık sorununun arttırmasına neden olmaktadır (Bednar ve Modrak, 2014).

Her kitlesel özelleştirme, otomotiv sektörü için zaten karmaşık olan ürünün, yeni teknik gereksinimler ve tasarım ihtiyacıyla birlikte daha da karmaşılaşmasına neden olur (Bednar vd., 2017). Bunun yanında özelleştirme ve kişiselleştirmelerde, ürün yapısı ve yapısındaki bileşenlerinin birbiri ile uyum gerekliliği şirketlere ilave zorluklara neden olur, (Bonev, vd., 2015). Vogel ve Lasch, (2015), deneysel çalışmasında çeşitliliğinin otomotiv gibi teknik endüstrilerde yüksek zaman baskısı ve kısıtlı kaynaklar gibi çeşitli faktörlerin etkisi ile diğer sektörlere göre daha yüksek bir etkisi olduğunu belirtmiştir.

3.2 Otomotiv Üretim Sistemlerinde Çeşitliliğinin Neden Olduğu Karmaşıklık

Literatürde karmaşıklık konusu diğer birçok endüstrinin yanında otomotiv endüstrisi için de birçok araştırmacı için inceleme konusu olmuştur. Seçeneklerin çoğalması ile artan ürün çeşitliliğinin süreçler üzerinde yarattığı etki ile ilgili olarak (De Lima ve Zeltzer, 2016) yaptıkları literatür temelli çalışmada, çeşitlilik kaynaklı karmaşıklık unsurlarının şirket ve toplam değer zinciri üzerinde doğrudan bir katkısı olduğu belirtilmiştir.

² <https://www.teoalida.com/cardatabase/>, 1 August 2018

Çeşitliliğin yarattığı karmaşıklık şirket içindeki tüm işlevsel alanlara ve operasyonel süreçlere yayılır (ürün geliştirme, lojistik, üretim, pazarlama, satış, vb.). Ancak rekabetçi olmak anlamında tolere edilen çeşitliliğin, belli seviyeden sonra tüm diğer süreçlerde de hemen belirgin olmayan bozucu etkisi olmaktadır, (Schleich, Schaffer ve Scavarda, 2007). Jacobs ve Swink, (2011), çalışmalarında ürün çeşitlendirmesinin şirketlere ek yük getireceğini belirtmiştir. Otomotiv ve benzer üst düzey karmaşık ürünlerin üretimini yapan diğer endüstriler için ürün çeşitliliğinden kaynaklanan karmaşıklığın kontrol edilmesi oldukça önemlidir (Roy vd., 2011). Ürün çeşitliliğinin artmasının süreçleri etkilemesinin yanında yarattığı diğer bir sonuç da ürün yaşam döngüsünün kısalmasıdır (Fisher ve Ittner, 1999; Randall ve Ulrich, 2001). Bu durum öncelikli olarak tasarım ve diğer departmanlara ilave yük getirmektedir. Artan karmaşıklık seviyesi ile müşteri isteklerini karşılama isteğinin artmasına paralel olarak iç ve dış süreçlerde riskler artmaktadır. Ürün çeşitliliğinin artması, genel giderleri, imalat, ikmal sürelerini, tedarikçilerin ve bayilerin maliyetlerini, stokları arttırır. Böylece çeşitlilik artışının bir firmada hemen belirgin olmayan bozulmalarla neden olabileceği ve rekabet gücünü zayıflatabileceği görülmektedir (Ramdas, 2003). Pazara yeni ürünlerin sunulması şirket için önemli fırsatlar sağlayabilir ancak bu durumda bilgi üretmek ve sonuçları işletmek, yönetmek, tahmin etmek, sürdürmek veya iyileştirmek sistemlerin davranışlarıyla tutarlı bir şekilde yönetilmesi için daha fazla çaba gerekir (Szmelter ve Woźniak, 2015).

İç süreçlerde çeşitliliğin yarattığı karmaşıklık daha fazla kalite kusurlarına, onarım ve yeniden çalışma gereksinimi yaratırken, bunlara bağlı olarak da verimlilik düşüşüne neden olacaktır (Fisher ve Ittner, 1999; Ittner ve MacDuffie, 1995; Ramdas, 2003; Zhu vd., 2008). Ürün çeşitliliği, iş akış süreçlerinin kurulumunda, üretim maliyet seviyelerinde, teslimat zamanlarında artışlara neden olur. Ayrıca artan parça sayısı, stoklama politikalarında değişiklik, planlama faaliyetlerine de ilave yükler getirir (Bozarth vd., 2009; Fisher ve Ittner, 1999; Fujimoto vd., 2003; Schleich, Schaffer ve Scavarda, 2007), ürün çeşitliliğinin tedarikçi etkileşimlerinde de karmaşıklık yaratacağını belirtmiştir. Bu nedenle çeşitliliğin getirdiği maliyet artışı ve verimlilik kaybı dikkate alındığında, faydalar ve sorunlar arasında optimum kombinasyonunun bulunması gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Benzer şekilde otomotiv sektöründe de süreçler, müşterinin katılım seviyesine ve kapsamına göre değişmektedir. ElMaraghy vd. (2012)'nin sunduğu otomotiv endüstrisinde karmaşıklık seviyesi Tablo 5'de

gösterilmiştir. Buna göre karmaşıklık dört seviyede ortaya çıkmakta ve işletmenin iç ve dış süreçlerini etkilemektedir.

Tablo 5: Otomotiv Endüstrisinde Karmaşıklık Seviyesi

	Dış			İç			
Seviye	Satış & Pazarlama	Tedarikçi	Ekonomik	Proses	Ürün /Dizayn	Çalışanlar	Dâhili lojistik & stoklama
I	Değer zincirinde karmaşıklık yok	İhmal edilebilir etki	Ekonomik risk yok	İhmal edilebilir karmaşıklık	Tasarım değişikliği yok	Yeni beceri gerekli değil	Lojistik üzerinde etkisi yok
II	Artan ürün lansman süresi	Artan teslimat zamanı	Düşük ekonomik risk	Önemli karmaşıklık	Küçük ölçekli tasarım değişikliği	Yeni beceri gerekli	Artan stok seviyesi & lojistik
III	Geç yeni ürün lansmanı	Ekstra çaba, maliyet ve geç teslimat	Orta seviye ekonomik risk	Yüksek karmaşıklık	Kapsamlı tasarım değişikliği	Çoklu beceri gerektirir	Stok alanı ve ekstra stok gerektirir
IV	Sipariş iptali/ geri döndürülemez müşteri ilişkileri	Çok geç teslimat	Yüksek ekonomik risk	Süreçte kaos	Zorunlu yeni tasarım gerekli	Yetersiz beceri veya değişim	Ekstra stok alanı ve yatırım

Kaynak: ElMaraghy vd. (2012).

3.3 Otobüs ve Binek Araç Üretimindeki Yöntem ve Yaklaşım Farklılıkları

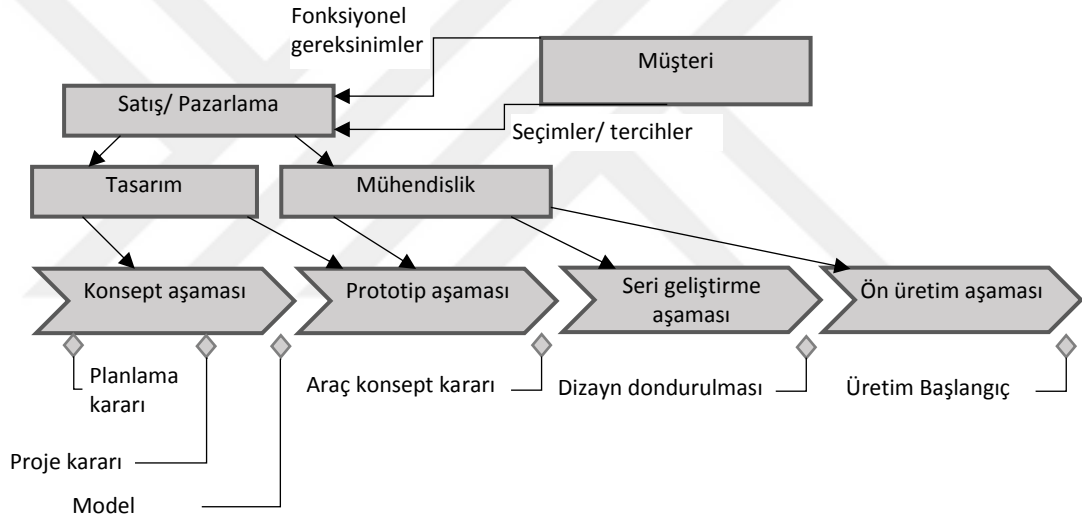
Otomotiv sektöründeki karmaşıklıkla ilgili araştırmaların çoğunun, genellikle binek otomobil üretimi temelindeki operasyonlar için hazırlandığı görülmektedir. Otomobil ve otobüs üretimi aynı sektörde görülmekle birlikte, yapısal, üretim yöntemleri, üretim miktarları, müşteri beklentileri, pazar rekabeti ve pazarlama yöntemleri açısından önemli farklılıklar vardır. Örneğin binek araç üretimi dünya toplam araç üretiminin yaklaşık %75'ini oluştururken, otobüs üretimi için bu oran %0,4'dür (OICA, 2018). Yani otobüs üretiminde, üretim adedinin binek araç üretiminden çok daha az olması, üretim yöntemi olarak daha az otomasyon gerektirmesi (emek yoğun olması), otobüs üretimini kitlesel üretime güzel bir örnek olan binek otomobil üretiminden farklı kılmaktadır. Bu nedenle, otobüs üretimini binek otomobil ile metal konstrüksiyon sektörü arasında bir noktaya yerleştirmek daha doğru olur.

Her ikisi de aynı sektörde gözükmelerine rağmen otomobil ve otobüs üretim sistemleri yapısal olarak oldukça farklıdır. OICA tanımına göre: otobüsler, sürücü koltuğuna ek olarak sekizden fazla koltuk içeren ve araçların sınırı 3,5 ila 7 ton arasında maksimum kütleye sahip olan yolcuların taşınması için kullanılan araçlardır. Yapısal farklılıklara örnek olarak, yüksek hacimde üretilen binek araçlarda gövde metal sac parçalarının presle şekillendirilmesi ve bunların bir araya getirilmeleri ile oluşur. Bu nedenle otomobil üretiminde üretim yöntemleri, teknolojileri nedeni ile gövde kalıplarında yapılabilecek değişiklik sayısı oldukça sınırlıdır, otomobil, modifiye etmek veya ara tasarım değişikliklerinde esnekliği oldukça küçüktür. Buna karşılık otobüs üretiminde tasarım değişikliklerini gerçekleştirmek, üretildiği sürece rijit tasarım yapısına sahip otomobil kadar zor, maliyetli ve süreç gerektiren bir uygulama değildir. Yapısal esneklik, otobüs üreticilerini değişik müşteri istek ve taleplerinde kısmi veya tam tasarım değişikliğine gidilerek kısa serili üretim gerçekleştirebilme imkanı sunar. Otobüs üretiminde seri üretimde kullanmış oldukları mevcut tasarım mimarisindeki gövde veya içyapı küçük modifikasyonlarla, tasarım değişikliği ile veya mevcut detay parçalar aynen kullanılarak tasarımda önemli bir avantaj elde edilir. Ayrıca otobüs için pazar ömrü binek otomobilden daha uzundur. Binek araçlar için bu süre özgün gövde mimarisinde yaklaşık 4-7 yıl iken otobüs sektöründe bu süre yaklaşık 7-14 yıldır (FTA, Federal Transit İdaresi, 2017). Otomotiv endüstrisinde üretim süreçlerinde estetik uyum ve uygunluğun, geometrik doğruluk ve boyutsal değişim kadar önemli faktörler olduğu yaygın olarak kabul edilmektedir.

3.4 Otobüs Üretim Sürecinde Karmaşıklık

Otomotiv sektöründe şirketlerin günümüzde artan karmaşıklıkla kendi yapıları ve çevreleriyle başa çıkma şekli önemli bir rekabet faktörü haline gelmiştir (ElMaraghy vd., 2012; Kirca vd., 2020; Pine, 1993). Bir tesis içindeki gövde şekilleri ve buna bağlı platformların sayısı arttıkça, çeşitler arasındaki geçişler nedeniyle, daha yüksek işçilik sürelerine ve hat kurulum maliyetlerine neden olmaktadır.

Yeni bir ürünün canlandırılma aşamasında, değişikliklerin birbiriyle ilişkili bileşenler arasında istenmeyen sonuçlara neden olması durumunda çalışmaların tekrar gözden geçirilmesi gerekebilir. Bu yineleme döngüsünden dolayı gecikmeler ve komplikasyonların ortaya çıkması kaçınılmazdır. ElMaraghy vd. (2012) dengesizleştirici faktörlerin birçoğunun tasarımıyla ilgili olduğunu ve bunların ürün yeniliği (yeni ürün geliştirme), ürün geliştirme (eski üründe iyileştirme ve geliştirme yapılması) gibi faaliyetlerden ortaya çıktığını açıklamıştır. Şekil 8’den görüleceği gibi müşteriden gelen tasarım talebinin geçtiği aşamalar ve tasarım ilk adımı olan konsept aşaması ve bu aşamada gerçekleştirilen model, planlama, proje kararlarının alınması ve bu kararlardan sonra gerçekleştirilecek prototip üretimi, denenmesi, seri üretim için yapılması gereken geliştirmeler ve ön seri için hazırlık aşamaları görülmektedir.



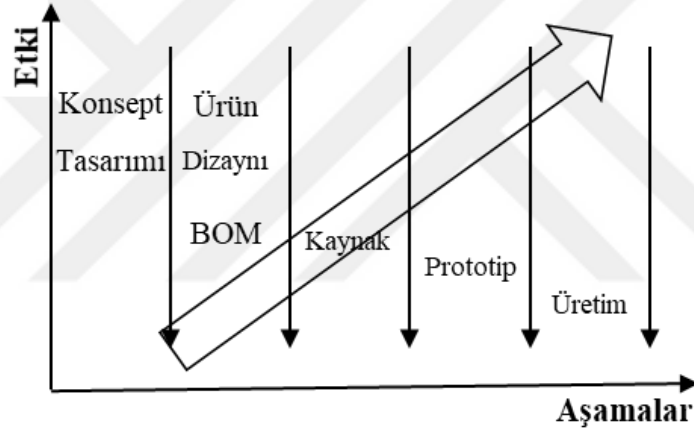
Şekil 8: Araç Üretim Şirketi İçin Ürün Tasarım Süreci

Kaynak: Kreimeyer (2009) ve Karayazı ve Cedimoğlu (2015)’den uyarlanmıştır.

Ürün tasarımıındaki hızlı değişim gereksinimi çok evreli üretim süreçlerinde karmaşıklığın artmasına neden olan en önemli sebeplerden biridir. Ayrıca hızlı tasarım aşamasının sonucunda çözülmesi gereken mühendislik hataları ile bu süreçler daha karmaşık hale gelir. Bu konuda ElMaraghy vd. (2012), ürün karmaşıklığının, işlerin çeşitliliği, türü ve ürünü oluşturma esnasında öngörülemeyen ve beklenmeyen mühendislik hatalarının giderilmesi faaliyetleri zaman kısıtı ile bunalmış tasarım sürecince bazı faktörleri dengesizlestirmesi nedeniyle sorunlara neden olduğunu belirtmiştir.

Modern üretim ve montaj sistemleri, ekipman yerleşim düzeninde olduğu gibi yapısal özellikleri de zaten karmaşık olan otomotiv üretim sürecini daha karmaşık hale getirmektedir. Bu nedenle üretim sistemini, yaşam döngüsü olan ve tasarlanması, yapılandırılması ve yönetilmesi gereken bir unsur olarak düşünmek gerekmektedir. Böyle bir unsorda artan karmaşıklık, ilgili bilgileri yakalamak ve sınıflandırmak, bilgi depolamayı ve almayı kolaylaştırmak, tasarım, işletme ve denetlemeyi kolaylaştırmak ve karar vermeyi desteklemek için parçalarda ve sistemlerde ortaklık ve benzerlikten faydalanma gereğini ortaya koymaktadır.

Yeni bir ürünün oluşturulma aşamasında tasarım değişiklikler nedeni ile ortaya çıkan komplikasyonların (ElMaraghy vd., 2012) etkisi değer zinciri boyunca artmaktadır Şekil 9.



Şekil 9: Tasarım değişikliklerin zaman içindeki etkisi

Kaynak: Tech-Clarity (2015)'den uyarlanmıştır

Karmaşıklığın otobüs üretimindeki ana fonksiyonlarındaki etkilerine bakacak olursak.

Tasarım: Zhang ve Luo (2007), müşteri memnuniyeti ile yakından ilişkili olan ürün maliyeti, kalitesi ve teslimat süresinin ürün tasarım ve geliştirme sürecinin bir çıktısı olduğu için tasarımın bu süreçleri etkileyen en önemli faktörlerden biri olduğunu belirtmiştir. Gerçekten de karmaşık ürünlerin, karmaşık ürün tasarım ve geliştirme süreçlerinin sonucu oluşabileceği göz önüne alındığında, tasarım karmaşıklığının anlaşılması, ürünün ve ürünlerle ilgili süreçlerin karmaşıklığının anlaşılmasına yardımcı olabileceği görülmektedir. Pahl ve Beitz (1996), tasarım için basitlik kuralı önererek sade tasarımın, karmaşık tasarıma tercih edilmesi gerektiğini savunmuştur. Ameri vd. (2008),

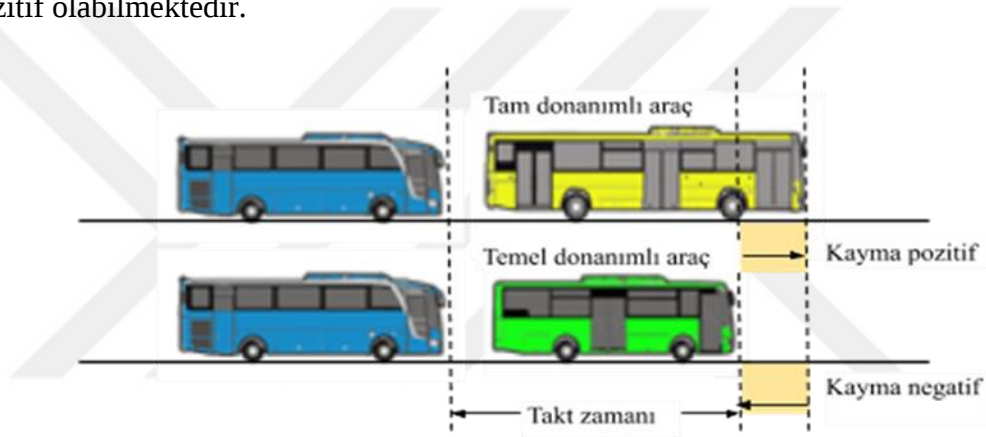
ürün tasarım sürecinde yapısal, işlevsel ve davranışsal olarak üç ana karmaşıklık boyutu belirlemiştir. Bunlara ek olarak Barclay ve (Dann, 2000), ürün yeniliği karmaşıklığını da eklemiştir.

Planlama: Üretim öncesi hazırlanan süreç planları ürün çeşitliliği nedeni ile yapılan değişiklikler: tüm planlama faaliyetlerini, ihtiyaç planlaması, talep yönetimi, iş önceliklendirme, personel veya ekipman ihtiyaç planlamasını olumsuz etkiler (Buergin vd., 2017; Chatras vd., 2015; Wochner vd., 2016). Nitekim, Karayazı ve Cedimoğlu (2015), bu çalışmaya da konu olan otobüs üretim sistemi üzerinde yaptıkları bir çalışmada: “Değişiklik gerektiren her ürün için ayrı bir ürün ağacı oluşturulmasının getirdiği yük nedeni ile meydana gelen karmaşıklık, yeni bileşen seçiminde veya bunların ilişkilendirilmesinde, ürün ağacı oluşturulması sürecinde hata yapılmasına neden olmakta ve bunların sonucu olarak ürün ağacında yanlış kodlanmış veya tekrarlayan bileşen tanımlanmasına yol açmaktadır.” ifadesini ortaya koymuştur.

Üretim/ montaj: Otobüs üretiminde, ürün çeşitliliği dışında, ürün geliştirme ve yeni ürün yaratma süreçlerinin karmaşıklığın oluşumu üzerinde derin bir etkisi vardır. Tasarım aşamasında, müşteri taleplerine göre tasarım değişikliği süreci hem tasarım hem de üretim işlemlerinde şeffaf değildir ve esasında büyük ölçüde karmaşıktır. Bu görüngü karmaşıklığın zaman içinde ve diğer süreçlerde büyümesine neden olmaktadır (Götzfried, 2013; Szmelter ve Woźniak, 2015). ElMaraghy, vd. (2014), üretim hattındaki karmaşıklığı, farklı parçaların elleçleme ve yerleştirme işlemleri sırasında zorluklara neden olan zorunlu fiziksel özellikler olarak tanımlamıştır. Üretim hattında parça ve seçenek çeşitliliğinin artması, tutarlı çevrim sürelerini etkileyerek işgücü üretkenliği ve ürün kalitesini etkilemektedir (Marcora vd., 2009; Webbink ve Hu, 2005). ElMaraghy ve Meselhy, (2009), çalışmasında kalitenin normalde kabiliyetlere göre tasarlandığını, ancak başarısının üretim sistemindeki çeşitlilikle (değişkenlikle) ters orantılı olduğunu ifade etmiştir.

Çeşitlilik kaynaklı karmaşıklık sorunlarının en önemlilerinden biri de seri üretimde hat dengelemesidir. Karma model montajında hat dengeleme, farklı modellerin farklı montaj işlem özellikleri sürüklenme ve model sıralama gibi yeni sorunlara yol açmaktadır. Çeşitlilik gösteren ürünlerin montaj süreleri farklılaşmakta, en fazla sayıda üretilecek araç tipine göre ayarlanan iş istasyonları farklı ürünlerin üretim hattına beslenmesi ile takt

süresi dengelenmesi, model, çeşit ve seçenek birleşimleri nedeniyle daha da zorlaşmaktadır. Montaj hattındaki bu tür karmaşıklığın üretim verimliliği üzerinde daha büyük bir olumsuz etkisi olmaktadır (Lalas vd., 2006). Benzer şekilde bu karmaşıklık üretim/montaj destek personelinin de karşı karşıya kaldığı görevleri (örneğin yeni aparat, fikstür yapımı, değişen imalat, montaj süreçlerin tekrar yapılandırması, parça muayenesi ve temini, kalite kusurları, hatalarının tashihi gibi) ve tedarikçilerle ilişkileri (örneğin malzeme teslimat planlanması, siparişlerinin hızlandırılması ve koordinasyonu) daha karmaşık hale gelmektedir. Hat dengelemenin ana hedeflerinden biri de benzer bir hedefe ulaşmak olsa da farklı montaj işlemlerine araçların işlem sürelerinin farklılığından dolayı sapmalar kaçınılmaz olmakta ve Şekil 10’da gösterildiği gibi, bu sapmalar negatif veya pozitif olabilmektedir.



Şekil 10: Pozitif ve Negatif Kayma (drift)

Kaynak: Keckl vd., (2016)

Ayrıca bu tür karma model montaj hatlarında genellikle bir iş rotasyonu problemi ile de karşı karşıya kalınmaktadır.

Karma model montaj hattında esnek iş gücünden faydalanarak dinamik bir hat dengelemesi sağlamak firma için bir avantaj sağlarken çalışanlar için de daha az monoton, tekrarlayan görevler ilgi çekici olabilir. Bunun yanı sıra çalışanların bu tür yetenek çeşitlendirmesi aynı zamanda üretim esnekliği gibi avantajları beraberinde getirir (Womack ve Jones, 2003).

Tedarik zinciri: Çeşitliliğin artışı parça ve ürün stok seviyesi, tedarikçiye açılan sipariş sayısı ve temin edilen malzeme süresini arttırırken, siparişlerin küçük partilere bölünmesi nedeni ile nakliye, parça fiyatlarında artışa neden olur. Ayrıca çeşitlilik şirket içinde dâhili

lojistik faaliyetlerinde artış ve ilave stok alanı temin etme zorunluluğu yaratır. Bozarth vd. (2009), çeşitliliğin tedarikçi etkileşimlerinde de karmaşıklık yaratacağını belirtmiştir. Karayazı ve Cedimoğlu (2015), çalışmalarında çeşitlilik artışı nedeni ile oluşan bileşen farklılıkları, her türev ürün için ayrı bir APL oluşturmasını gerektirmektedir. Bu durum MRP sürecinin yanında diğer süreçlerde de karmaşıklığa neden olacağını savunmuştur. Karayazı ve Cedimoğlu (2015) ayrıca, oluşan bu hatalar nedeni ile yanlış ve gereksiz parça siparişi verilmesiyle oluşan eksik parçaların ürünün eksik parça ile hattan çıkmasına, yanlış olarak sipariş edilen malzemelerin âtil stoklar oluşturduğunu, bazı durumlarda hattın durmasına veya tedarikçilerde oluşturduğu sorunlar nedeni ile parçaların geç tedarik edilmesine ve sonucunda ürün teslimatında gecikmenin yanında ürün kalitesizliğine de neden olacağını belirtmiştir.

Kaynak Gereksinimi: Çeşitliliğin yaratacağı sorunların çözümü için ilave kaynak enerji, işçi, alan vb. ihtiyacı olacaktır (Seha vd., 2017).

Kalite: Mamul veya parça üretimindeki çeşitlenme bu alanlarda daha fazla kalite kontrol noktası gerektirecek ve bu alanlardaki süreçlerinin kontrolü, izlenmesi, takibi, sorunların çözülmesi ve raporlanması ilave yönetsel çaba ve ayrıca kaynak gerektirecektir (Antani, 2014). Şekil 9'da görüldüğü gibi otomotiv sektöründe sorunların geç fark edilmesi, bu konuda ortaya konacak çaba ve maliyetin süreç sonlarına doğru hızla artacağını göstermektedir.

Satış Sonrası: Otomotiv sektöründe sorunların görüldüğü önemli alanlardan biri de satış sonrasıdır. Bu durumda satılmış, müşteri kullanımında olan veya bayilerde bulunan araçlar servislere veya üretim alanlarına geri çağrılarak araç için gerekli hata giderimleri yapılır. Geri çağırma oranları, bir otomobil üreticisinin sattığı araç sayısına göre ürettiği hatalı araç miktarını göstermektedir. Üreticilerin sanayi geri çağırma ortalama oranı 1985-2016 yılları arasında 1000 araç başına 1115 adettir (iseecars.com). Ahsan ve Gunavan, (2014) kapsamlı geri çağırımların büyük kısmının ürün tasarımındaki hatalardan, üretim hatalarından ve yanlış etiketlemeden kaynaklandığını belirtmiştir. Tasarım hatalarının satış sonrası problemlerinin ve araç geri çağırımların (recall) en önemli nedenlerinden biri olduğu, birçok araştırmacı tarafından vurgulanmıştır (Muralidharan vd., 2019). Beamish ve Bapuji'nin (2008) çalışmasında, araç geri çağırmada bildirilen bulguların çoğunun tasarım veya üretim problemlerinden

kaynaklandığını ve ayrıca tasarımla ilgili hata sayısının üretim hata sayısından daha fazla olduğunu ortaya koymuştur. 2010'daki Toyota araçların geri çağırılması bu durumun hatırlatıcı bir örneği olabilir ve bu çağırının nedeni ürüne ait üretim ile ilgili kalite sorunundan ziyade tasarım kaynaklı bir sorundur (Maruchek vd., 2011). Nitekim yeni satışı yapılan araçlarla ilgili olarak ilk 90 günde bildirilen sorunların yaklaşık üçte ikisi tasarımla ilgilidir (jdpower.com, 2013).

3.5. Literatürün Genel Değerlendirmesi ve Araştırma Boşluğu

Karmaşıklık yönetiminin amaçlarından biri her ne kadar organizasyonun karmaşıklığının diğer unsurlarında özellikle üretim sürecinde yarattığı etkilerin engellenmesi veya azaltılması olsa da ana amaç karmaşıklığı sıfır seviyesinde azaltmak değil, ürün çeşitliliğinin getirdiği ilave yükler olduğu gibi faydaları da dikkate alan optimum karmaşıklık seviyesini bulmaktır. Marti'nin (2007) belirttiği gibi, karmaşıklık tek başına kötülük unsuru değildir. Hem ürün çeşitlerinin yarattığı faydalar hem de neden oldukları ilave maliyetler, uygun değer kombinasyonu bulmak için birbirlerine göre ağırlıklandırılmalıdır (Marti, 2007).

Schuh vd. (2017), üretim karmaşıklığı ile ilgili yaptıkları çalışmada, literatürde doğrudan ele alınan dört karmaşıklık boyutu olduğunu belirlemiştir: ürün mimarisi, tedarik zinciri, üretim yapısı ve ürün portföyü. Araştırmacılar, literatürde ürün portföyü ve ürün mimarisi ile ilgili hemen hemen aynı oranda çalışma olduğunu, Tedarik zinciri konusunda daha az referans olduğunu, bununla birlikte üretim yapısı ile ilişkili yayın sayısının ise neredeyse iki katına yakın olduğunu göstermiştir. Bu bulgu, karmaşıklık yönetiminde üretim yapısının önemini göstermesi açısından önemlidir. Ancak yazarlar, karmaşıklık literatüründe bu boyutların beraberce ele alınmadığını, sadece bir veya birkaçına vurgu yapıldığını, bu nedenle de literatürün bütüncül bir bakış açısı sunmadığını belirtmiştir. Nitekim bundan önceki bölümlerde kapsamlı bir şekilde sunulan literatür incelemesi de Schuh vd. (2017)'nin bu iddiasını doğrular niteliktedir.

Bu çalışma, üretim sistemindeki karmaşıklığı daha fazla boyutu dikkate alarak ve daha kapsamlı bir şekilde incelemeyi amaçlamaktadır. Böylece, ürün çeşitliliğinin neden olduğu karmaşıklığın üretim, tasarım ve tedarik süreçlerine etkileri daha bütüncül bir bakış açısıyla sunulabilecektir.

Literatürdeki bir diğer önemli eksiklik ise, yapılan tüm çalışmaların binek otomobil sistemleri üzerinde yapılırken otobüs üretim sistemlerinin göz ardı edilmiş olmasıdır. Binek otomobil üretimi ile kıyaslandığında, otobüs üretimi pek çok yapısal, operasyonel ve yönetsel farklılıklar içermektedir. Bu çalışmada, kitlesel üretimden farklı olarak daha fazla emek yoğun üretim gerektiren, ürün mimarisine daha fazla dokunulabilen ve daha küçük hacimli üretim miktarları ile çalışan otobüs üretim sistemlerinin karmaşıklığının yönetimi incelenecektir. Böylece, kısa serili bir üretim sisteminde çeşitlilik nedenli karmaşıklığın dinamik davranışı sistem dinamiği ile modellenerek, uygun ürün çeşitliliğine erken aşamada karar verebilmesi amaçlanmaktadır. Ayrıca, her ne kadar literatürde zaman baskısının üretim süreçlerinde karmaşıklığa yol açabileceğini belirten çalışmalar olsa da (...), bu çalışma zaman baskısı ile karmaşıklık arasındaki ilişkiyi sistem dinamiği perspektifiyle ve bütüncül bir bakış açısı ile modelleyerek literatüre katkı sunmayı amaçlamaktadır.

BÖLÜM 4: ARAŞTIRMANIN YÖNTEMİ

Bu çalışmada otomotiv sektöründe çeşitli tipte kısa serili ticari araç üreten bir firmada ürün çeşitliliğinin yarattığı karmaşıklığın tasarım, tedarik ve üretim süreçlerine etkisini ortaya koyabilecek bir model geliştirilmesi amaçlanmıştır. Böylece rekabetin getirdiği ürün çeşitliliğinin neden olduğu yoğun tasarım gereksiniminin tasarım sürecine etkisi ve bunun sonucu olarak da organizasyonun diğer unsurlarında özellikle üretim sürecinde yarattığı etkilerin incelenmesi hedeflenmiştir. Çalışmanın yöntemine ilişkin detayları alt başlıklarda verilmiştir.

4.1 Araştırmanın Amacı ve Kapsamı

Çalışma kapsamında, literatürdeki daha önceki çalışmalara dayanarak çeşitlilik nedeni ile tasarım sürecinde oluşan olumsuzlukların üretim sürecine etkileri ortaya koyulmuş ve mevcut literatür, çeşitlilik ve tasarım kaynaklı karmaşıklığın üretim sistemindeki zaman baskısı etkisi dikkate alınacak şekilde genişletilmiştir. Ayrıca, çalışma kapsamında üretim sistemindeki karmaşıklığı ölçmek amacıyla çok kriterli karar verme tekniklerine dayalı bir model geliştirilmesi hedeflenmiştir. Çalışmada geliştirilecek model bir otobüs üretim işletmesi üzerinde uygulanmıştır. Böylece, vaka şirketi üzerinden ürün çeşitliliğindeki artışın üretim, tasarım ve tedarik süreçlerine etkisi ortaya koyulmuştur. Ürün çeşitliliğinin ve neden olduğu karmaşıklığın stok ve satış sonrası süreçlerine etkisinin sınırlı olması, modelin basitleştirilmesi ve bu süreçlerin bazı hassas verileri içermesi nedeniyle stok ve satış sonrası süreçleri araştırma kapsamı dışında tutulmuştur. Devam eden bölümde bir vaka olarak ele alınan bu işletme hakkında bilgiler verilecektir.

Araştırmada üç aşamalı bir yöntem takip edilmiştir. İlk aşamada araştırmaya konu olan vaka şirketi hakkında bilgi verilmiş, problem tanımı yapılmış, vaka şirkette üretim ve montaj süreci, sipariş alma yaklaşımı ve karmaşıklık yönetim uygulamaları incelenmiştir. İkinci bölümde sistem dinamiği, nedensel döngü diyagramı kavramlarına ve modelin doğrulanması yöntemi açıklanmıştır. Üçüncü aşamada araştırma verilerinin toplandığı grup çalışma yöntemleri, karmaşıklığın ölçme yöntemlerinde ise entropi ve TOPSIS'in uygulama yöntemleri açıklanmıştır.

4.2 Vaka Şirketi ve Problem Tanımı

Vaka şirket incelemesinde karar alma, karmaşıklığın yönetimi, karmaşıklık entegrasyonunun yanı sıra özellikle tasarım kaynaklı çeşitliliğin (portföy ve buna bağlı çeşitlilik) yarattığı karmaşıklığın ürün ve süreçler üzerindeki etki düzeylerinin anlaşılmasına çalışılmıştır. Bu nedenle, vaka şirketin iş ortamı, çevresi ve iş yapış şeklinin anlaşılması, karmaşıklığın itici güçleri ve karmaşıklık yönetimine genel yaklaşımı ile ilgili anlamlı sonuçlar çıkarmak için oldukça önemlidir.

4.2.1 İşletme Hakkında Genel Bilgiler

Bu tez çalışması kapsamında incelenen Vaka Şirket Türkiye'de yerleşik olup 60'lı yıllardan bu yana otomotiv sektöründe B2B (Business to Business) ve B2G (Business to Government) şeklinde müşterilerine ticari ve askeri araç çözümleri sunan, yaklaşık 2000 çalışanı ile ticari ve askeri araç tasarım, üretim ve pazarlamasını yürüten bir üretim tesisidir. Şirket yarattığı kendi teknolojisi, tasarım kabiliyeti ve müşterilerinin özel ihtiyaçlarını karşılamak için diğer önemli bir varlık olan esnek üretim ve yönetim becerilerini kullanma kabiliyetin ile piyasasında güçlü bir konuma gelmiştir. Bir üretim tesisinden oluşan bu işletme, Türkiye, Avrupa ve kısmen diğer bölgeler olmak üzere dünyanın çeşitli ülkelerine çeşitli tiplerde araç satışları yapmıştır. Son 10 yılda 132 adetten fazla yeni araç (yeni ürün) piyasaya sürmüştür. Türkiye ticari araç pazardaki arz fazlalığı ve yoğun bir rekabetin olduğu ortamda şirket, rekabetçi fiyat, çeşit arttırma ve yurt dışı satışlarla pazar genişletme stratejileri uygulamaktadır.

Son 10 yılda ISO 500 listesinde yer alan şirket, mevcut pazar şartlarında başarılı olmak için belirlediği rekabet öncelikleri: kalite ve performans yönü ile üstün ürün tasarımı, pazar şartlarına ve müşteri taleplerine hızlı cevap verebilme, geniş ürün yelpazesi, fiyat rekabeti ile yenilikçi ürünler tasarlama ve sunma stratejileridir. Bulunduğu pazarda 60 yıla yakın süredir faaliyet gösteren işletme, belirlediği bu stratejiler ile bu süre zarfında pazarın öncü şirketi durumuna gelmiştir. İşletmede geniş bir ürün portföyünün olmasının rekabet avantajı sağlamada önemli bir rolü olduğu düşünülmektedir. Gerçekten de pazar, rekabet şartları ve rakiplerin konumu düşünüldüğünde, ilave yeni modeller ile portföyünü sürekli olarak genişletmesi ve yenilemesi rekabet için zorunluluk halini almıştır.

İşletme, kısalan ürün ömürleri ve artan çeşitliliğin zorladığı ürün geliştirme ve tasarım süreçlerini sistematik olarak gerçekleştirdiği teknolojik yatırımlar ve teknik personele

verdiği önem sayesinde hızla gelişmiştir. Güçlü ve tecrübeli bir tasarım kadrosuna sahip olan Ar-Ge Departmanı, "Bilgisayar Destekli Tasarım", "Bilgisayar Destekli Mühendislik" yazılımları ve "Özel Test Cihazları" ile Ar-Ge çalışmalarına ayrılmış "Prototip Atölyeleri" ile desteklenmektedir.

4.2.2 Vaka Şirkette Üretim ve Montaj Süreci

Vaka şirkette bir otobüs üretim ve montaj hattında temel işlemler üç ana aşamada yapılmaktadır.

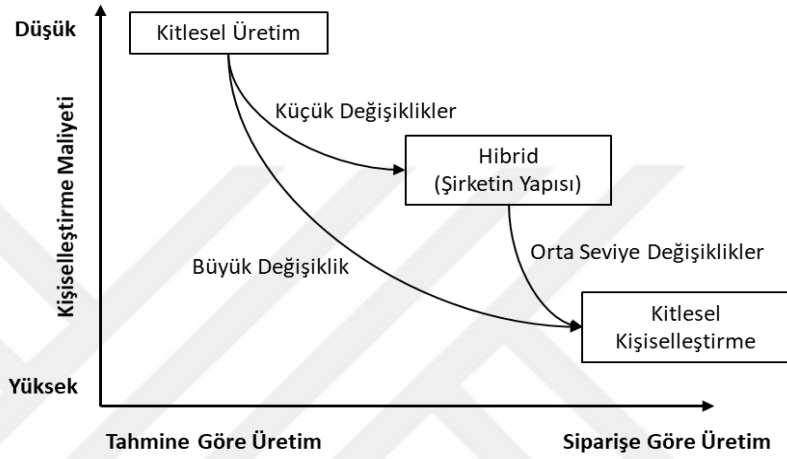
Aşama 1 (iskelet çatma, sac kaplama, boyama): Aracın alt (şase) ve üst ana gövdesini oluşturan iskelet, uygun boyutlarda kesilmiş metal profillerin fiktürde yerleştirilip kaynak işlemleri ile bir araya getirilmesi ile oluşur. Bu aşamadan sonra sac kaplama operasyonunda, iskelet üzerinde gereken alanlar sac panellerin profillere kaynatılması ile kaplanır. Sac kaplanmış gövde bir dizi temizlik operasyonundan geçtikten sonra astar boyama, son kat boyama, fırınlama ve rötuş işlemleri ile boyama süreci tamamlanır. Boyanmış gövdeler montaj hattına aktarılır.

Aşama 2 (montaj işlemleri): Montaj hattı trim montajı, şase montajı ve son montaj olmak üzere üç ana bölüme ayrılmıştır. Trim montajı aşamasında çoğunlukla kablolar ve borular, taban tahtaları, taban muşambası, camlar şoför konsolu, göstergeler, iç trimleme, koltuklar, araç tavan trimleri, elektrik kutuları monte edilir. Şase montajı güç grubu unsurlarının montajının gerçekleştirildiği alandır. Bu aşamada gövde üzerine motor ve aktarma organları bunlara ait detay unsurlar bağlanır (süspansiyon ve körükler, soğutma sistemi, radyatör ve ara soğutucu boruları gibi). Son montajda ise aracın güç aktarım unsurlarının işletilmesinde kullanılan yazılımlar yüklenir. Tüm elektrik devreleri ve hava sistemleri, motor ve diğer unsurların çalışması ile ilgili sorun olup olmadığı izlenir ve sıvı ve hava hatlarında kaçak kontrolü yapılır. Tüm bu aşamalardan geçen araç son kontrol ve yol testleri için son kontrol sürecine aktarılır.

Aşama 3 (Son Kontrol): Bu aşamada araçta yol öncesi kontroller ve gerekli ayarlar yapıldıktan sonra araç yol testine çıkartılır. Yol testinden sonra varsa eksiklikler giderilir. Kalite departmanının hem görsel hem de fonksiyonel kontrollerinden sonra onayları aldığı takdirde araç stok alanına alınır.

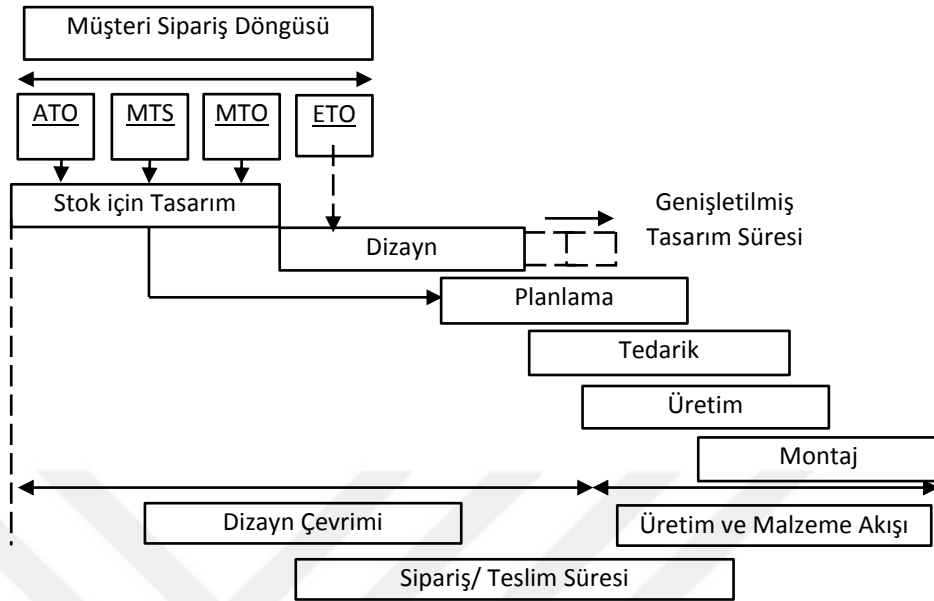
4.2.3 Vaka Şirketin Sipariş Alma Yaklaşımı

İşletmelerin sipariş alma yaklaşımları farklıdır ve bu nedenle uygulamada müşterin katılım noktalarının belirlenmesi oldukça zor ve değişkendir (Lampel ve Mintzberg, 1996). Vaka şirket otobüs üretiminde üretim ve tasarım altyapısı, müşterinin tasarıma herhangi bir noktada katılımına ve bu farklı müşteri gruplarının değişken taleplerine cevap verebilecek yapıdadır. Şekil 11’de Vaka Şirketin üretim stratejisi temsili olarak gösterilmiştir.



Şekil 11: Vaka Şirket Kitlesel Kişiselleştirme yaklaşımı

Vaka Şirketin sipariş karşılamada belirtilen iki uç nokta ile ilgili olarak: birinci uç noktada kitlesel üretimde düşük kişiselleştirme maliyeti, yüksek doğrulukta satış tahmini yapılabilirken ikinci uç nokta stratejisinde yüksek kişiselleştirme maliyeti, düşük satış tahmini yani siparişe göre üretim stratejisi belirgin olmaktadır. Vaka şirket bu iki uç nokta stratejinin arasında kendine hibrid bir strateji belirlemiştir. Vaka şirkette her kitlesel üretim grubunu temsil eden ürün gamı mevcut olup bu ürün gamında yapılan kısmi değişikliklerle hibrid bir strateji belirlenmektedir. Bunun yanında kitlesel üretim grubunda bulunan ürünlere uygulanan orta veya büyük seviye değişiklikler düşük hacimli müşteri isteklerine uygun özel ürünlerde sunabilmektedir. İşletmenin uyguladığı pazarlama yaklaşımı sonucu ortaya çıkan ürün çeşitliliği ile başa çıkma stratejisi kapsamında uygulamaya çalıştığı sipariş alma ve siparişi gerçekleştirme süreci Şekil 12’de görülmektedir.



Şekil 12: Vaka Şirket Sipariş Alma ve Gerçekleştirme Süreci

Şirket, Siparişe Göre Üretim (MTO) yönteminin yanında bazı standart ürün cinsleri için Stok için Üretim (MTS) yöntemini de uygulamaktadır. Bu gruptaki araçlar bayi veya pazarlama departmanının öngörüsü doğrultusunda hazırlanan altışar aylık planlar şeklinde takip edilir. Bu yöntem, yalın üretim ilkelerinin daha fazla efektif olduğu, standart seri üretim araçların üretimini kapsamaktadır. Ayrıca işletme, araç ve yarı mamul stok durumunun uygun olduğu durumlarda bazı müşterileri ile Sipariş Üzerine Montaj (ATO) seçeneğini de uygulamaktadır (örneğin koltuk cinsi, yerleşimi, müşteri tercihinine bağlı cam tipi vb.).

Bu yöntem, şirkete düşük ürün stoku ile yüksek derecede ürün çeşitliliği elde ederken hızlı ürün teslim etme fırsatını sağlamaktadır. ETO (sipariş üzerine mühendislik) ticari araçlar için bir özel müşteriler tarafından oluşturulan şartname veya ihale türü işlerde veya askeri araçlar için özel istek olduğu durumlarda yeni araç geliştirme veya mevcut ürünün farklılaştırılmasında uygulanır.

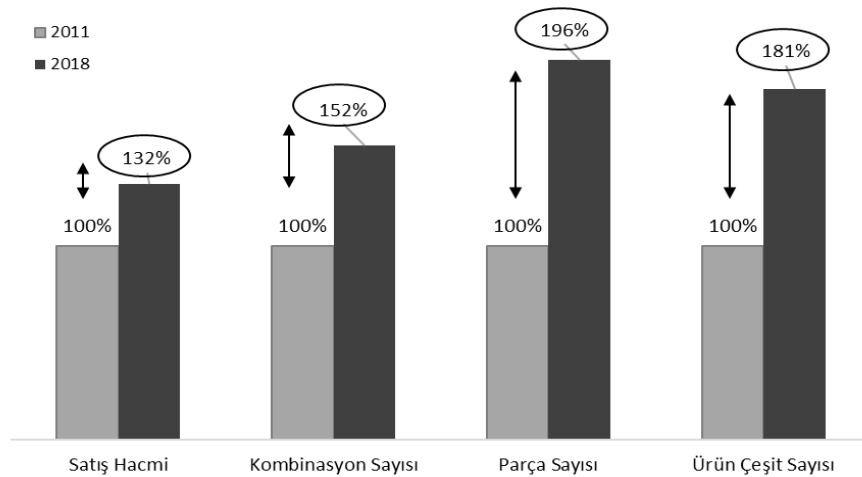
Ürünlerinin yaşam döngüsü süresi 8-14 yıl olan şirket, stratejisini 15 % ETO (sipariş üzerine mühendislik), 60 % MTO (siparişe göre üretim), 25 % ATO (sipariş üzerine montaj) olarak belirlemiş olmasına rağmen işletmede son 8 yıl içinde üretilen araçların yaklaşık %50'si aynı yıl içinde geliştirilmiştir. Bu yönüyle şirket stratejisi kitlesel kişiselleştirmeye yakın olarak tanımlanabilir. Şirket, stratejik olarak hibrid bir yapı

hedeflenmiş olsa da Şekil 11, yüksek seviyede kişiselleştirmiş ürün sunma eğilimindedir. Bu duruma uygun olarak işletme kendisi için doğru stratejiyi destekleyen etkili ve faydalı modeli uzun süre uygulayarak denemiş, test etmiş ve kullanmıştır.

4.2.4 Problem Tanımı

Vaka şirkette karmaşıklık sorunu rekabet ve pazar gereksinimleri nedeniyle sürekli genişleyen ürün portföyünün neden olduğu artan ürün çeşitliliği ve neticesindeki karmaşıklığın yarattığı sorunların sorgulanmasına neden olmuştur. Son yıllarda bu çeşitliliğin yarattığı karmaşıklık nedeni ile işletmenin stok seviyesinde, temin maliyetlerinde, araç üretim sürelerinde artış ve hemen hemen tüm süreç performanslarında, özellikle üretim verimliliğinde, düşüşe neden olmuştur.

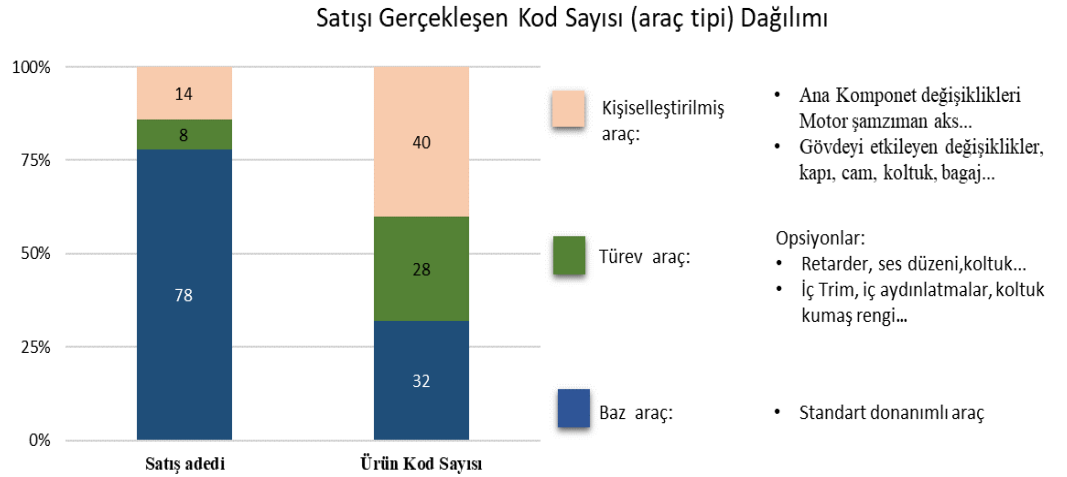
Vaka şirket, çeşitliliğin sağladığı itici gücün farkındadır. İşletmede ürün çeşitliliğindeki artışa neden olan üç faktör şunlardır: i. Geniş pazarlara hizmet etmek için küresel ve yasal gereksinimler (emisyon, yolcu güvenliğine ilişkin mevzuatlar); ii. lokal veya küresel pazar istekleri ile ürün varyantlarının çoğalması; iii. şirketin farklılaşma stratejisi olarak pazar nişi yaratmak amacıyla modellerde teknolojik ve görsel farklılıklar uygulaması, kişiselleşmeyi artırarak seçkin müşterilerin ilgisini çekmeyi amaçlamasıdır. Vaka Şirkette bu stratejinin bir sonucu olarak son on yıllık dönemde vaka şirketin ürün çeşit sayısı %181, parça sayısı %196, ürün kombinasyon sayısı %152 ve satış hacmi %138 artmıştır Şekil 13.



Şekil 13: Vaka Şirketinde Satış Hacmine Göre Çeşitliliğin artışı

Sipariş üzerine üretilen kitlesel kişiselleştirilmiş araç kodları son 4 yılda hızla artmıştır ve müşteri istekleri ve büyüme hedefleri doğrultusunda bu gruptaki kod sayısının (araç konfigürasyon sayısının) daha da artması beklenmektedir. Bu durumun ARGE, satın alma, üretim, satış sonrası departmanları ve tedarikçiler üzerinde ciddi etkileri olmaktadır.

Vaka Şirkette, bu konuda yapılan inceleme sonucunda, son beş yılda satışı gerçekleştirilen baz araçların (seri olarak üretilen, türev araçların türetildiği esas araç) kod sayısının (araç tipi) üretimi yapılan toplam ürün kod sayısının %32'si olduğu ve bu baz araçların satış adedinin toplam satış adedine oranının %78 olduğu tespit edilmiştir. Aynı perspektifte son 10 yılda, kişiselleştirilmiş (ısmarlama) araç tipi üretim sayısının aynı dönemde üretilen standart araç tipi sayısına oranı %68 iken bu gruptaki araçların toplam satışlara oranı sadece %22'de kalmıştır Şekil 14.



Şekil 14: Vaka Şirketi Satışı Gerçekleşen Araç Kod Sayısı/ Değişikliklerin Tanımı

Bu dönemde, çeşitliliğin getirdiği öngörülemezlik satış tahmin doğruluğunun azalmasına ve sık üretim planı değişikliği, yeni araçlar için acil tasarım gereksinimi yaratmaktadır. Sürekli sipariş değişikliğinin tedarik sürecinde yarattığı karmaşıklık kalite problemlerine, tedarikçi ret oranlarının artışına, geç veya hatalı temin edilen parçalar nedeni ile üretim hattında eksik parçaya ve teslimat gecikmelerine neden olmaktadır.

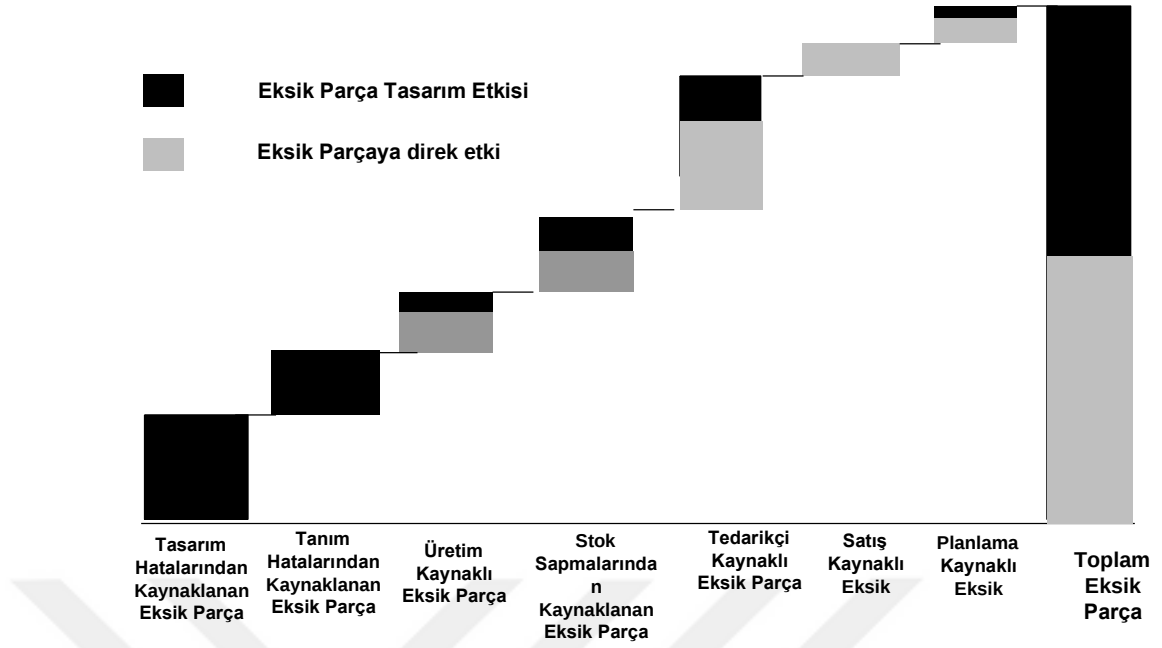
Vaka şirketteki önemli sorunlardan bir diğeri de uzun dönemli projelerin %35 oranında geç gerçekleşmesidir. Bunun en önemli nedeni projelerdeki gerekli iş yüküne karşın mevcut iş gücü ihtiyacın %43'ünü karşılamasıdır.

Bunun bir sonucu olarak vaka şirketinde ön önemli konularından biri olan eksik parça sorununun çok büyük ölçüde mühendislik departmanı, yani tasarım kaynaklı olduğu grup çalışmalarında verilerin değerlendirilmesi ile tespit edilmiştir. Bu sonuçlar ve bulgular Tablo 6’da özetlenmiştir. Üretim hattında eksik parçalı araç sayısının artması, buna bağlı ekstra işgücü gereksinimi üretim verimliliğini ciddi oranda etkilemektedir. Parça stok seviyesinin yükselmesi, stok çevrim hızının düşmesi, sıkça yeni bir BOM yaratma ihtiyacı, ürün teslimat gecikmesi çeşitliliğin vaka şirkete getirdiği ilave yükler olarak belirtilmiştir.

Tablo 6: Vaka Şirkette Üretimi etkileyen Çeşitlilik Kaynaklı Sorunlar

	Sorunlar	Sürece etkisi (%)
Tasarım kaynaklı sorunlar	Tasarım hatası (detay parça tasarım hatası)	Toplam Tasarımdaki hata oranı %2,6
	BOM hataları (Hatalı parça Tanımlama eksik, fazla veya yanlış)	Toplam BOM tanımlamalarındaki hata oranı %2,2
	Tasarım gecikmesi	Tasarımların planlanan tarihten geç tanımlama oranı %12,5
Tedarik zinciri sorunları	Hatalı sipariş	Toplam Siparişlerin %3,1
	Tedarikçi Ret	Yan sanayi Ret oranı: %3
	Sipariş gecikmesi	Tedarikçi teslimat gecikmesi: %10 (Bu oranın %4’ü tasarım kaynaklı)
	Stok devir hızı	Malzeme stok devir hızı %25 seviyelerinde ancak satış kaynaklı talep azalması ile kötüleşebilir.
	Stok hatası	Stokta bulunan parçaların kayıt ve realite farkı %11
Dâhili sorunlar		
Lojistik	Malzeme taşıma	Eksik parça nedeninin %2,2 si
Kalite Sorunları	Tasarım, mühendislik tanım eksikliği kaynaklı kalite hataları	Kalite hataları %8,1 Tasarım kaynaklı hatalarının toplam kalite hatalarına oranı %3,4
Planlama	Satış Planlama doğruluğu	Satış planlama doğruluğu %30

Vaka şirketin kendi yaptığı araştırmada üretim hattındaki verimlilik kaybına en büyük etkinin eksik parçalardan kaynaklandığı ve eksik parçanın oluşumuna en büyük katkının tasarım departmanından geldiği belirlenmiştir, Şekil 15.



Şekil 15: Vaka Şirketin Eksik parça probleminin nedenleri

Yapılan öngörülerin doğrulanması amacı ile vaka şirketin 2018-2019 yıllarında Avrupa pazarındaki rakip firmalarla yapılan kıyaslama çalışması incelenmiştir. Buna göre işletmede araç montaj süresinde rakiplere göre 8-12 gün, teslimat öncesi süreye göre ise 4-7 gün arasında gecikmeler söz konusu olmaktadır. Ayrıca işletmenin planlanan verimliliği kıyaslama kategorisindeki firmalara göre benzerlik gösterirken gerçeşmede ürünü %12 ila %25 arasında daha uzun sürede gerçeşletirdiğini göstermektedir. Vaka şirketin geçmiş analizlerinde dayanarak, üretim kayıplarının %33'ünün mühendislik sorunlarından (malzeme listesi uyumsuzlukları ve tasarım sorunları) kaynaklandığı görülmüştür.

Kıyaslamadan elde edilen bu bulgular hem çalışmanın kapsamından hem de grup çalışmalarından elde edilen sorunlu alanları işaret etmektedir. Gerçekten de grup çalışmasında eksik parça sorunlarının üretim ve ilintili süreçlerde en önemli husus olduğu belirlenmiş ve ayrıca çalışmanın hipotezinde belirtildiği gibi çeşitlilik kaynaklı sorunların özellikle üretim prosesi üzerinde yoğunlaştığı düşüncesini desteklemektedir.

4.2.5 Vaka Şirkette Karmaşıklık Yönetim Uygulamaları

Geçmişte vaka şirketinde yönetim, pazar gereksinimi, talebi veya şirket stratejik hedefleri doğrultusunda yeni ürün yaratma konularını hedefleyen projeler uygulamaya koymasına rağmen, bu projeler ürün, bileşen ortaklaştırma, süreç iyileştirme veya maliyet azaltma

programlarından farklı ve izole edilmiş bir şekilde yönetilmekteydi. Tasarım sürecinden ayrı olarak, iyileştirme projeleri adı altında gerçekleştirilen bu projeler, verilen hedeflere göre başarıya ulaşırsa da etkilerinin geç geri dönüşünden ve kapsamının dar olmasından dolayı sınırlı kaldı.

Vaka şirketin karmaşıklık yönetiminin odak sorusu, “optimal bir çözüm oluşturmak için projenin erken aşamalarında ne yapılmalı?” şeklinde ifade edilmektedir. Bu nedenle yönetim, ürün çeşitliliğinin avantajını şirketin farklılaştırıcı temel özelliği olan tasarım yeteneğini ve pazarda rekabet üstünlüğünü kaybetmeden, çeşitliliğin yarattığı karmaşıklığı yönetebilecek yöntemlerin araştırılması konusunda geniş tabanlı bir ekip görevlendirdi. Bu ekibin temel görevi, müşteriler için çeşitliliğin avantajlarını korurken öngörülmeven veya müşteri tarafından kabul edilmeyen ilave maliyet yüklerini yeni teknolojiler, süreç iyileştirmeleri veya tasarımda mükemmeliyet ile çözülmesidir.

Esneklik ve yeni ürün devreye alma hızı konusunda rakiplerine göre avantajlı olan vaka şirketinde ürün tasarımının en erken evrelerinde çeşitliliği azaltan kaldıraçlar (parça çeşitliliğinin azaltılması, modüler üretim gibi) araştırılmış ve ürün tasarımını hızlandıracak yöntemler tanımlanmıştır. Tasarım, üretim ve tedarik süreçlerinin birbirlerine olan etkisi ve iç lojistik ve tedarikçi süreçleri dâhil değişiklik kaynaklı karmaşıklığın sürdürülebilir bir şekilde yönetimi için sorumluluklar belirlenmiştir. Geliştirilen yöntemler, araçlar ve yaklaşımların tüm ürün gruplarında, üretim hatlarında ve önemli tedarikçiler de dâhil olmak üzere tüm süreçlerde yaygınlaştırılması esas alınmıştır.

İşletme, değişen müşteri ihtiyacına cevap vermek için ürünü (araç özelliklerini) farklılaştırırken, çeşitli yalın yönetim uygulamalarını da devreye almıştır. Bu amaçla tedarik süresi uzun parçalar için tedarikçilerde ara stoklar oluşturulması ile bu parçaların temin süresinin kısalması sağlanmıştır. Vaka şirketindeki yüksek bileşenli BOM (Bill of Materials) ve buna bağlı olarak satın alınacak binlerce bileşen nedeniyle, birkaç yüz doğrudan ve çok sayıda dolaylı tedarikçiden oluşan bir tedarik ağı koordine edilerek mümkün olduğu kadar, zamanında montaj (JIT) ve Sıralı Tedarik (SILS), tedarikçi tarafından yönetilen envanter (VMI) ayrıca Şirket içinde, JIT, esnek üretim sistemleri gibi uygulamalar da devreye alınmıştır.

4.3. Sistem Dinamiği Yaklaşımı

İşletme süreçlerinin modellenmesinde geleneksel problem çözme yöntemlerinin, yani doğrusal ve statik modelleme tekniklerinin kullanılması, sistemin dinamik, karmaşık yapısı ve sistem unsurlarının birbiri ile olan ilişkileri nedeni ile yetersiz kalmaktadır, (Forrester, 2007; Lane, 2007). Bu nedenle bu çalışmada kullanılacak modelleme aracının söz konusu dinamik yapıyı kuşatabilme ve problemlere hızlı bir şekilde deneysel olarak cevap verebilme gerekliliği, “Sistem Dinamiği” yaklaşımını gerekli kılmıştır. Sistem Dinamiği, varlıklar (simülasyon modelindeki her şeye varlık denir) arasındaki ilişkilerin, davranışını açıklamak için oluşturulan bir modelin matematiksel, mantıksal ve sembolik geçerli bir şekilde ifade edilmesini amacıyla gerçek dünya sisteminin bir yansıması veya taklidi olarak yapılan işlemdir (Wolak ve Johansson, 2019). Sistem dinamiği, sonucun ortaya çıkma süresi uzunsa, neden-sonuç zinciri belirsiz veya izlemesi zor ise, gerçek hayatta deney yapmanın maliyeti yüksekse bu sorunların üstesinden gelmenin pratik bir yoludur (Ekinci, 2015).

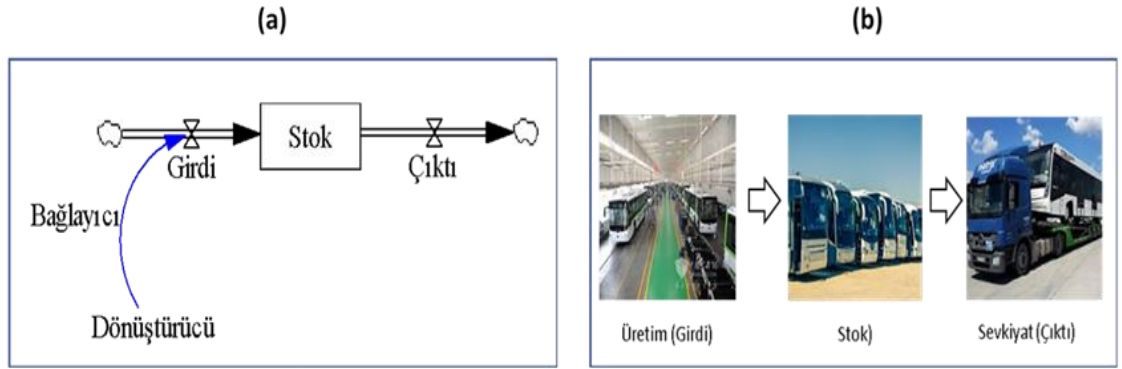
Sistem Dinamiği (SD): Bu yaklaşımında sistemi temsil eden model akışlar, seviyeler ve yardımcı diyagramlar vasıtasıyla oluşturulan uygun denklemler ve bağlantılar ile sağlanır. Stella yazılımında modellemede kullanılan dört ana yapı taşı (SD yapı taşları diğer yazılımlarda da benzer simgelerle temsil edilmektedir) Tablo 7’de tanımlanmıştır.

Tablo 7: Sistem Dinamiği Modelinin Dört Yapı Elemanı ve Tanımları.

Yapıtaşı	Tanım
Stok (Stock):	Biriken şeyleri, birikimli bir modelde biriken değişkenleri gösterir. Örnek: hesapta para birikmesi havuzda suyun birikimi, nüfus artışı vb.
Akış (Flow):	Stokun değerini değiştiren aktivitedir. Yönlü, birim zamanda stoka giriş ve çıkışı gösteren bir araçtır. Akış, stoku artırma veya azaltma yönünde etki eder.
Dönüştürücü (Convenyor):	Akışı yöneten bir araçtır. Modeli detaylandırabilmek ve daha anlamlı hale getirebilmek amacı ile akışa ilave edilen dönüştürücüler sayesinde daha ayrıntılı bilgiler tanımlanabilir. Sabit bir değer veya eşitlik taşır.
Bağlayıcı (Connector):	Girdileri veya bilgiyi iletir. Akışlar ve dönüştürücüler arasındaki bilgi aktarımını sağlar.

Kaynak: Sterman (2002).

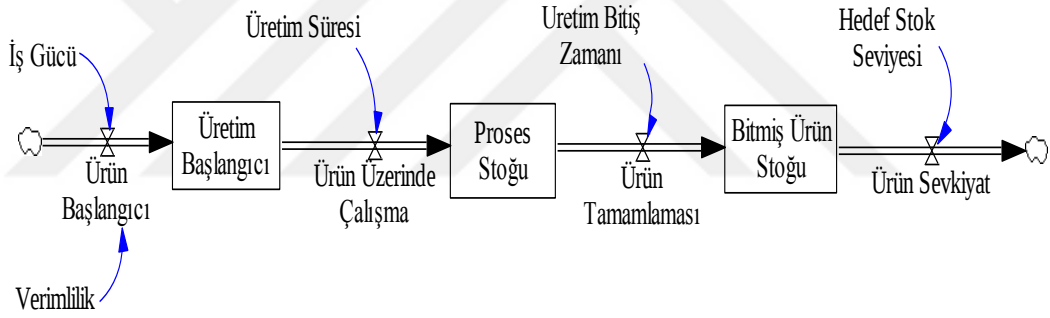
Şekil 16’da bir üretim süreci için tablo 7 ‘de belirtilen yapı elemanları ile basit bir modelleme haritası konmuş (a) ve gerçek hayatta temsil ettiği aksiyonlar resimlerle (b) ifade edilmiştir.



Kaynak: Sterman (2002). a; Genel SD gösterimi, b; Üretim akışı

Şekil 16: Üretim Süreci Model

Şekil 17’de bir üretim süreci için Ürün-stok akış süreci modellenmiştir. Oklarda dönüştürücü değerleri verilmektedir.



Şekil 17: Ürün- Stok Akış Diyagramı

Kaynak: Hinnes (1996).

Yukarıda açıklanan nedenlerle bu çalışmada, vaka şirketin stratejik ve dinamik süreçlerinin anlaşılmasında ve çözüm üretmesinde geleneksel problem çözme yöntemleri ile tam çözüme ulaşamadığı ve karmaşıklıkla ilgili ön kararlar almada yetersiz kaldığı görüldüğü için Sistem Dinamiği yönteminin kullanılmasına karar verilmiştir. Sistem dinamiği modelinin kurulması ve çalıştırılması aşamasında Stella yazılımı tercih edilmiştir. Bu yazılım (Adane ve Nicolescu, 2014; Çil vd., 2018; Ekinci, 2016) gibi çalışmalarda da kullanılmıştır. Bu yazılım kullanımı kolay ve sezgisel bir modelleme programı olup literatürde yaygın bir kullanım alanına sahiptir.

Sistem Dinamiği yaklaşımı uygulama aşamasında pek çok avantaj sunmaktadır. SD, işleyen bir sisteme müdahale etmeden sistemdeki değişiklikleri izleme fırsatı sunar ve analizi zor, karmaşık ve dinamik bir sistemi analiz etmeyi mümkün kılar. Zamanı sıkıştırarak uzun bir zaman süresi içinde ortaya çıkan olayların analizine izin verir. Çalışma zamanı genişletildiğinde de benzer analizler yapılabilir. Farklı değişkenlerin sistem üzerindeki etkisini ve değişkenler arasındaki etkileşimi anlayabilmek mümkündür ve “Ya eğer” senaryolarına cevap verilebilir (Johansson, 2002).

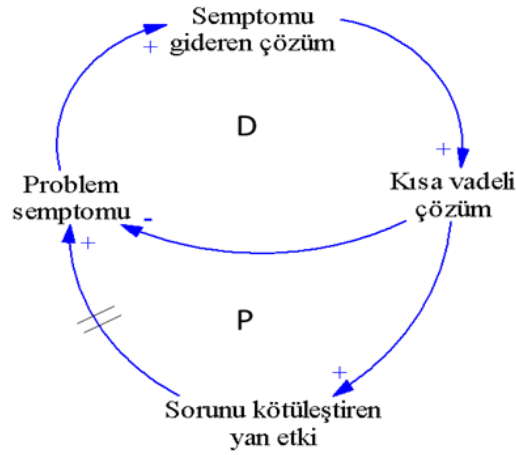
Diğer yandan Richardson, (1996, 2020) çalışmasında SD ‘nin dezavantajı ile ilgili olarak, model davranışını anlamak ve sonuçların analizi için tecrübe ve uygulama birikimi gerektirdiğinden bahsetmiştir. Sistem Dinamiği projeleri zaman alıcı ve maliyetli olabilir. Modelin kurulumu tecrübe gerektirir. Uygun olmayan modelleme süreci sonunda model yanlış çıktı verir (Johansson, 2002).

Sistem dinamiği modelini oluşturmada önce karmaşık bir sistemdeki değişkenler arasındaki neden-sonuç ilişkilerini anlamak ve görselleştirmek amacıyla Nedensel Döngü Diyagramı (NDD) oluşturulmalıdır.

4.4. Nedensel Döngü Diyagramı

Nedensel Döngü Diyagramı, NDD, dinamik bir sistem içindeki unsurların karşılıklı etkileşimlerini, ilişkilerini tanımlamaya yardımcı olan ve bu sistemin kendine ait davranışının kendi iç çevriminde unsurların birbiri ile nasıl etkileştiğini ve bu süreçteki neden-sonuç ilişkilerini inceleyen bir yöntemdir, (Çil vd., 2018).

Nedensel döngü diyagramları üç ana bileşenden oluşur. Birincisi, neden-sonuç ilişkileri ile ilişkilendirilmiş ve sistemin dinamiğine bağlı olarak diğer elemanları hem etkileyen hem de kendisi etkilenen değişkenlerdir. İkincisi, sistem içerisindeki değişkenlerin birbiri ile etkileşimini gösteren oklar. Üçüncüsü ise etkileşimin yönünü gösteren sembollerdir (+, -). Eğer iki değişken arasındaki etki ile tepki aynı yönde ise bu durum (+) ile gösterilir. Eğer etki artarken tepki azalıyorsa ya da etki azalırken tepki artıyorsa (-) sembolü kullanılır. NDD’deki “D” veya “B” ifadesi döngünün dengeleyici, “P” veya “R” ise pekiştirici olduğunu gösterir. Örnek bir NDD Şekil 18’de gösterilmiştir.



Şekil 18: Örnek Nedensel Döngü Diyagramı

4.5. Modelin Doğrulanması

Bir model, gerçeğin kısıtlı bir temsildir ve ancak karar vermede yararlı bir araç olarak hizmet ederse geçerlidir (Barlas ve Carpenter, 1990). Diğer bir tanımla, “biçimsel veya zihinsel modeller gerçek dünyayı sınırlı ölçüde temsil eden basitleştirilmiş örnekleri” olup, her modelleme kendine has, sezgisel ve benzersizdir (Sterman, 2002). Yani aslında tüm modeller, bütünü kısmen temsil etmekte ve büyük bir ihtimalle bütünü tam doğru olarak yansıtamamaktadır. Model, bir amaç için geliştirilmiştir bu nedenle “Bir modelin genelde mutlak olarak geçerli olması beklenemez”. Farklı amaçlar için üretilen modellerin geçerliliğini karşılaştırmak için bir evrensel standart mevcut değildir (Forrester, 1968). Bu nedenle sistem dinamiği modelindeki olası zayıflıkların (veya kusurların) bazı testlerle keşfedilmesi gerekir. Bu testlerin amacı modelin gerçek hayatla ilgili bağlantısını keşfetmek ve sonuçların gerçeğe ilişkisini doğrulamaktır.

Sistem dinamiği modellerinin koşullarını doğrulamak için birçok spesifik test geliştirmiştir (Barlas, 1996; Forrester ve Senge, 1980; Linnéusson vd., 2018). Bu testlerin amacı SD modelindeki olası zayıflıkların (veya kusurların) keşfedilmesidir. SD modelin doğrulanması için genellikle yapısal doğrulama ve davranış duyarlılığı testleri kullanılır. Validasyon ise sonuçların kabul edilmesi ile ilgili bir konudur ve model sonuçlarının kabulü için önemli olan modelin temsil edebilirliği ile ilgili açık bir bağlantısı vardır (Barlas, 1996). Bu çalışmada SD modelin doğrulanmasında literatürdeki birçok çalışmada da kullanılan, (Barlas, 1996) çalışması esas alınmıştır.

Barlas (1996), çalışmasında model validasyonu ile ilgili sunulan onaylama sürecini üç ana test başlığında göstermiştir:

- i. Doğrudan yapı testleri: modelin gerçek sistem bilgileri ile karşılaştırılması.
- ii. Yapıya yönelik davranış testleri: yapısal hataların bulunması, amacı ile simülasyonu kullanılması.
- iii. Davranış patern testleri: Gerçek sistemdeki davranış kalıplarını, modelin doğruluğu ölçüsünde genellemek.

Doğrudan yapı test aşamaları:

- Yapı-onay testi: Nitel verilerle, gerçek sistemin nasıl işlediğinin yorumlanmasıdır.
- Parametre onay testi: Modeldeki parametrelerin (sabitlerin) gerçek sistemle ne kadar uyum sağladığının değerlendirilmesi işlemidir.
- Aşırı koşul testi: her denklemden elde edilen sonuçların incelenerek hatalardan kaçınılması.
- Boyutsal tutarlılık testi: denklemin veya eşitliklerin için boyutsal analiz yapılması.

Yapıya yönelik davranış test aşamaları:

- Ekstrem durum testi: aşırı bir durumun benzer şekilde modelde de elde edilmesi.
- Davranış duyarlılığı testi: model davranışını etkileyen hassas parametrelerin gerçek sistemle benzerliği değerlendirir.
- Modifiye davranış tahmini: (geçmiş verileri mevcutsa uygulanabilir). Model, gerçek sistemde yapılan yapısal değişiklikler uygulanarak test edilir ve benzer sonuçların elde edilmesi model için geçerlilik oluşur.
- Sınır yeterlilik testi: Gerçek sistemin sınırları değiştirildiğinde davranışı da önemli ölçüde değişiyorsa modelin de bu değişiklikleri içermesi gerekir.
- Faz ilişki testi: Bazı değişkenler benzer özellik gösteriyor olabilir. Modelde bu şekilde gözlenen davranışın, benzer faz ilişkisinin gerçek sistemde olup olmadığını incelenir.

Davranış paterni test aşamaları: Sistem dinamiğinde modeller olay tahmininden ziyade, şablon tahmini (frekanslar, dönemler, trendler vb.) üzerinedir (Barlas, 1996). Davranış paterni testinde, model parametreleri değiştirilerek ve hangi parametrelerin oldukça hassas olduğunu gözlemlenir ve daha sonra bu davranışın gerçek sistemle eşleşip

eşleşmediğini karşılaştırır. Bu nedenle, model davranışının gerçek sistemle eşleştirilmesinde gerçek geçmiş performans verileri gereklidir.

4.6. Vaka Şirkette Araştırma Verisinin Toplanması ve Grup Çalışması

Ürün çeşitliliğinin üretim sistemi üzerindeki etkilerinin anlaşılması ve nedensel döngü diyagramının oluşturulması aşamasında vaka şirketinde görev yapan uzmanlarla kapsamlı görüşmeler yapılmıştır. Bu kapsamda, işletmenin ürün geliştirme, üretim, satınalma, planlama, tasarım, kalite ve metot departmanlarında görev yapan 29 uzman görüş belirtmiştir. Bu grup toplantılarıyla ürün çeşitliliğinin ve karmaşıklığın işletme süreçleri üzerindeki semptomlarının ne olduğu ve bunların işletme hedeflerini ve diğer departmanları ne şekilde etkilediği anlaşılmaya çalışılmıştır.

Grup çalışmaları iki ana aşamada yürütülmüştür. İlk aşamada, ürün çeşitliliğinin neden olduğu sorunlar, bu sorunların etkilediği departmanlar ve bu sorunların sınırları, etkileri ve şiddeti değerlendirilmiştir. Bu aşamada işletmenin sekiz farklı departmanı (ürün geliştirme, üretim, ARGE, ürün mühendisliği, satınalma, kalite, planlama, satış sonrası) ile odak grup oluşturulmuştur. Grup çalışması kapsamında süreleri 3-5 saat arasında değişen toplam 9 görüşme gerçekleştirilmiştir. Görüşmelerde, literatür incelemesi ile oluşturulan nedensel döngü diyagramı tartışılmış ve işletmeye özgü NDD oluşturulmuştur. Yine bu aşamada vaka şirketin ürün çeşitliliği ve karmaşıklık yönetimi konusundaki yaklaşımları hakkında geniş ölçekte ve daha ayrıntılı nitel bulgular elde etmek için üretim hattında incelemeler yapılmıştır. Ayrıca grup çalışmalarında, sorun çerçevesinin belirlenmesi aşamasında karasız kalınan konular için üretim, montaj hattının ilk seviye yöneticileri ile her biri yaklaşık 2 saat süren bir dizi görüşme gerçekleştirilmiştir.

İkinci aşamada ise ürün çeşitliliğinin neden olduğu sorunlarla (verimlilik kaybı ve kayıp süre analizleri vb.) ilgili firma kayıtlarından ve geçmiş karar tutanaklarından alınan veriler tartışılmıştır. Bu aşamada karmaşıklık faktörlerinin, çeşitli proseslere olan etkisi ile ilgili sonuçlar grup tarafından şirketin 10 yıllık verilerine dayanılarak değerlendirilmiştir. Ayrıca, araştırmaya destek olmak amacıyla, 2017-2018 yıllarında bir danışmanlık şirketi yardımıyla hazırlanan ve işletme problemlerine ilişkin pratik çözümler geliştirmek, karmaşıklığı azaltma ile ilgili yaklaşımlara ve karmaşıklık seviyelerinin tanımlanmasına yardımcı olan bir dizi endüstriyel kıyaslama çalışması

incelenmiştir. Yine bu aşamada, grup görüşmelerinde karmaşıklığın yarattığı sorunları içerdiği varsayılan en önemli 12 anahtar performans göstergelerinden (KPI) oluşan bir veri seti değerlendirmeye alınmıştır. Grup çalışmalarında toplanan verilerin güvenilirliği, hat amirleri ve tecrübeli operatörlerle 3 değişik saha çalıştay (toplam 7 saat), atölye verileri, şirket içi sunumlar ve dokümanlar ile arttırılmaya çalışılmıştır. Gerektiği durumlarda, yorumları tekrar doğrulamak için hat sorumluları ile tekrar görüşmeler yapılmıştır.

4.7. Karmaşıklığın Ölçülmesi

Sistem dinamiği modeli ile elde edilen bulgulara dayanarak, üretim sisteminde ürün çeşitliliğine bağlı karmaşıklık ölçülmüştür. Karmaşıklık ölçümünün amacı, sistemin karmaşıklığı hakkında bir fikir edinerek sistemin gelişimi ve sürekliliği açısından yeni stratejiler geliştirebilmektir (Rensburg, 2012). En uygun karmaşıklık ölçeği ve ölçüm yöntemi şirketlerin kendi stratejilerine göre uyarlanmalıdır (Greitemeyer ve Ulrich, 2006). Bu bölümde karmaşıklığın ölçülmesinde kullanılan iki temel yöntem olan entropi ve TOPSIS teknikleri tanıtılacaktır.

4.7.1 Alternatif ölçüm yönteminin amacı

Bu çalışmada uygulanan Sistem Dinamiği yöntemi ile elde edilen değerlerin çok kriterli karar verme yöntemlerinden biri olan TOPSIS yöntemi kullanılarak kriterler arasındaki ilişkilerin geçerliliği farklı bir yöntemle sıralanıp modelin ve hipotezin geçerliliğine farklı bir gözle daha bakılacaktır.

Bu yöntemde karmaşıklık faktörleri çalışma modeli esas alınarak: Proje süresi, Tasarım Yüğü, Tasarım Kaynaklı Kayıp zaman, Kalite Kaynaklı Kayıp zaman, Verimlilik, Tasarım ve Kalite Kaynaklı Kayıp zaman, Toplam Kayıp Zaman (Üretim), TZ kaynaklı Ünite Başına Kayıp zaman faktörleri ele alınmıştır. Ele alınan bu faktörler aşağıda karmaşıklık faktörleri başlığı altında literatürde yapılan çalışmalarda desteklenmesi amaçlanmıştır

4.7.2 Entropi

Bir sistemin karmaşıklığı genellikle “sistem tarafından üretilen bilgi miktarı” olarak ifade edilir (Lui vd., 2015). Sistemin karmaşıklığını, yani sistemi oluşturan unsurlar arasındaki

etkileşimlerin yapısını, sistemin yaratabileceği olası durumları tanımlayan bir olasılık dağılımı oluşturur. Entropinin işlevi bu tür olasılık dağılımlarını detaylandırmaktır (Toni vd., 2007). Entropi bir düzensizlik ölçüsüdür ve bir sistemde düzensizlik arttıkça entropisi de artar. Böylece entropi, sistemdeki rastgeleliği ve karmaşıklığı ölçmek için yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Gell-Mann ve Crutchfield, 2004).

Rudolf Clausius, 1865’de ilk kez “Entropi, “Yunanca "en-" (iç) ve "trope" (dönüşüm)” terimini ortaya attı. Rudolf Clausius termodinamik sistem kavramında ısı enerjisinin sistem sınırı boyunca kademeli olarak dağıtıldığı argümanını öne sürdü. Entropi, birim sıcaklık başına sistemin termal enerjisinin toplamının bir ölçüsüdür ve herhangi bir işlem yapamaz, çünkü entropi bir bozukluk ölçüsüdür. Başka bir deyişle, entropi, fiziksel sistemlerin bozukluğun ölçütüdür (Karcı ve Bilgiç, 2019). Bilgi sistemleri için entropi, bilgi içeriğinin öngörülemezlik ölçüsüdür. Entropinin yüksek olması karmaşıklığın işareti olsa da yüksek karmaşıklığın iyi veya kötü olduğunun göstergesi değildir. Örneğin, esnekliği hedefleyen bir firma için yüksek karmaşıklık başarı olarak kabul edilebileceği gibi, farklı bir firma için kaynakların verimsiz kullanımının bir göstergesi olabilir (Ekinci ve Baykasoglu, 2016).

Karmaşıklık ölçüm yöntemleri büyük ölçüde iki güçlü matematik teorisinin birinden türetilme yoluyla elde edilmektedir (Adami ve Cerf, 2000; Ruiz vd., 2011), bunlar: Shannon bilgi teorisi (Chaitin, G. J. 1969; Shannon, C. E. 1948) ve Kolmogorov karmaşıklığıdır (Kolmogorov, 1965).

Shannon entropisi bilgi analizinde kullanılan önemli ölçüm yöntemlerinden biridir verilerdeki belirsizliği ölçmeye yarar. 1948 yılında Claude E. Shannon "İletişimdeki Matematik" adlı makale ile sunmuş bugüne kadar birçok alanda kullanılmıştır. Bu yöntem bir dizi veri içindeki karakterlerin minimum kaç bit ile kodlanması gerektiğini ölçer. Kolmogorov’un karmaşıklığında ise bir sistemin karmaşıklığı, evrensel bir Turing makinesindeki bir programla minimum açıklama uzunluğu olarak tanımlanır. Bir sistemin çıktılarını ölçüp bunları bir dizi diziye kodlarsak, sistemin karmaşıklığı bu tür herhangi bir dizgede bulunan bilgilerle değerlendirilebilir; Kolmogorov karmaşıklığı, bu dizeyi oluşturmak için gereken bilgi miktarını ölçer. (Lui vd., 2015). Ayrıca Lui vd. (2015), Kolmogorov karmaşıklığının, ikili bir dizinin, entropisi ile yakından ilişkili olduğunu,

Kolmogorov karmaşıklığı için üst sınırlar tahmin edilebileceğini ve karmaşıklığın hesaplanamayacağını dikkat çekmiştir.

Kolmogorov karmaşıklığı ve Shannon entropisi kavramsal olarak farklıdır, Kolmogorov karmaşıklığı programın uzunluğuna ve Shannon entropisi ise olasılık dağılımlarına dayalıdır. Kolmogorov veya Shannon yaklaşımında da amaç 'bilgiyi' ölçmek için bir araç sağlamaktır ve bunun için her iki yöntemde aynı ölçüm birimini (bit) kullansa da aralarındaki ölçme yöntemi farklıdır (Sagot, 2013). Shannon yaklaşımında kodlama, kodlanacak nesnelerin bilinen kaynağın sonuçları olduğu varsayımıyla kaynağın özelliklerine göre yapılır, Kolmogorov yaklaşımında ise bir nesnenin kodlanması, onu oluşturan nesnenin sıkıştırılmış versiyonudur (Sagot, 2013). Sonuçta hem Kolmogorov'un "algoritmik bilgi" yöntemi hem de Shannon veri kümelerinin "entropisi" aynı bilgi kavramının farklı matematiksel şekilleridir (Sagot, 2013).

Uygulamada her iki yöntem de karmaşıklığın hesaplanması amacıyla kullanılmaktadır. Yöntemlerin büyük çoğunluğu Shannon entropisine dayanırken, Kolmogorov karmaşıklığı ve benzer yaklaşımlar da karmaşıklığın değerlendirilmesi için kullanılabilir (Efstathiou vd., 2002; Efstathiou vd., 2002; Zhang ve Efstathiou, 2006). Literatürde üretim ve tedarik sistemlerinin farklı karmaşıklık boyutlarını değerlendirmek amacıyla da entropi yöntemi kullanılmıştır (Frizelle ve Woodcock, 1995; Sivadasan vd. 2013; Zhu vd. 2008).

Yaygın kullanımına rağmen entropi ölçütlerine ilişkin eleştiriler de mevcuttur. Feldman ve Crutchfield, (1998), bir sistemin rastgeleliğini ve öngörülemezliğini ölçmenin, sistem davranışındaki korelasyon yapısını yeterince yakalayamayacağını ifade etmiştir. Aynı şekilde (Chryssolouris vd., 2013), imalat sistemlerinin karmaşıklık miktarının belirlenmesinde, performans göstergelerinin öngörülemeyeceğini, bu nedenle Kolmogorov karmaşıklığı kullanılmaması gerektiğini belirtmiştir. Başka bir görüşe göre, karmaşıklık ölçüsünde büyük sabitin olması durumunda belirli bir önemsiz olmayan dizi için Kolmogorov karmaşıklığının hesaplanmasını imkânsızdır (Ziv, 1997). Mann ve Crutchfield (2004) bir sistemin rastlantısallığını ölçmenin, sistemlerin karmaşıklığıyla bağlantılı tüm yönleri anlamak için yeterli olmadığını, dahası, bu miktarın genellikle hesaplanamaz olduğunu ve bu nedenle Kolmogorov karmaşıklığının birçok pratik problemde faydasız olduğunu ileri sürmüştür. Bunun yanında bazı araştırmacılar

Kolmogorov karmaşıklığının algoritmik entropinin daha güvenilir, ağ temsiline daha az bağımlı olması ve sezgisel insan karmaşıklığı anlayışıyla daha uyumlu olması nedeniyle Shannon entropisinden üstün olduğunu savunmaktadır (Morzy vd., 2017). Bu konudaki bazı çalışmalarda her iki sistemin zaaf noktalarını elimine etmek amaçlı ve daha genel bir karmaşıklık tanımı elde etmek için hem Kolmogorov karmaşıklığı hem de Shannon bilgi teorisini birleştirmişlerdir (Lui vd., 2015). Entropi yöntemlerinin bu dezavantajları nedeniyle, bu çalışmada üretim sisteminin karmaşıklığını ölçmek amacıyla çok kriterli karar verme tekniklerine dayalı bir yöntem kullanılmıştır.

4.7.3. TOPSIS

Entropi yöntemlerinin bahsedilen dezavantajları nedeniyle, bu çalışmada üretim sisteminin karmaşıklığını ölçmek amacıyla çok kriterli karar verme tekniklerine dayalı bir yöntem önerilmiştir. Bu yöntemde, karmaşıklık modelinde yer alacak değişkenlerin önem derecesini belirlemek amacıyla entropi kullanılacaktır. Bu yöntemde entropi, değişkenlerin homojenliğini ölçmek ve belirsizliği yüksek olan değişkenlere daha fazla ağırlık vermek amacıyla kullanılacaktır. İkinci aşamada ise TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) kullanılarak farklı ürün çeşitliliği seviyelerinde üretim sisteminin karmaşıklığı ölçülecektir.

TOPSIS uygulamasında kullanılacak olan değişken ağırlıklarının belirlenmesinde kullanılacak olan Entropi beş aşamada hesaplanır:

Aşama 1: Karar matrisinin oluşturulması

Yöntemin ilk aşaması karar alternatiflerinin belirlenmesi ve karar matrisinin oluşturulmasıdır. Bu matrisi m alternatif sayısını n ise parametre sayısını göstermek üzere $m \times n$ boyutundadır.

$$D = [d_{ij}] = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & \cdots & d_{1n} \\ d_{21} & d_{22} & \cdots & d_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{m1} & d_{m2} & \cdots & d_{mn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Aşama 2: Normalize edilmiş karar matrisi

Karar matrisindeki değişkenlerin karşılaştırılabilir olması için bir normalizasyon süreci gerekmektedir. Bu amaçla aşağıdaki formül kullanılır ve parametrelerin normalize değerleri belirlenir ($\tilde{d}_{ij}$):

$$\tilde{d}_{ij} = \frac{d_{ij}}{\sum_{i=1}^t d_{ij}} \quad \text{[2],J} \quad (2)$$

Aşama 3: Bilgi entropisi

Normalize karar matrisi oluşturulduktan sonra aşağıdaki formül ile bilgi entropisi (e_j) elde edilir: $k=1/\ln(m)$ olmak üzere

$$e_j = -k \cdot \sum_{j=1}^n P_{ij} \cdot \ln(P_{ij}) \quad i=1,2,\dots,m \quad j=1,2,\dots,n \quad (3)$$

Aşama 4: Entropiden sapmanın bulunması (farklılaşma derecesi)

Her bir parametrenin entropiden sapmasını bulmak için aşağıdaki formül kullanılır:

$$d_{ij} = 1 - e_j \quad j=1,2,\dots,n \quad (4)$$

Aşama 5: Ağırlığın bulunması

Son aşamada, her bir kriterin görel entropisini bulmak için aşağıdaki formül kullanılır:

$$W_j = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^n d_j} \quad (5)$$

Tüm kriterlerin ağırlık değerlerinin toplamı 1'e eşit olmalıdır ($\sum W_j = 1$).

TOPSIS altı aşamadan meydana gelir:

Aşama 1: Karar matrisinin oluşturulması

Entropi yönteminde olduğu gibi TOPSIS'te de öncelikle karar matrisi oluşturulmalıdır.

$$A = [a_{ij}] = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \cdots & a_{mn} \end{bmatrix} \quad (6)$$

Aşama 2: Normalize edilmiş karar matrisi

Karar matrisindeki değişkenlerin karşılaştırılabilir olması için bir normalizasyon işlemi gerçekleştirilir:

$$b_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m a_{ij}^2}} \quad (7)$$

Aşama 3: Ağırlıklı normalize matris

Normalize matristeki değerler, entropi yönteminde belirlenen ağırlıkları (E_j) ile çarpılarak ağırlıklandırılmış normalize matris elde edilir (v_{ij}).

$$v_{ij} = E_i \times b_{ij} \quad (8)$$

Aşama 4: İdeal ve negatif-ideal değerler

İdeal (fayda kriterleri ile ilişkili) çözümler bu adımda tanımlanır. Bunu yapmak için, ağırlıklı normalleştirilmiş karar matrisindeki her sütun için en iyi ve en kötü değerler bulunur.

Aşama 5: İdeal ve negatif-ideal değerlere uzaklık

En çok tercih edilen alternatif, ideal çözüme en yakın olan negatif-ideal çözümden ise uzak olan seçenek olmalıdır (Hwang ve Yoon, 1981). Tüm alternatiflerin ideal ve negatif ideal çözümlere olan uzaklığını ölçmek için n-boyutlu Öklid uzaklığı kullanılır (Hwang ve Yoon, 1981). Her bir alternatifin ideal değere uzaklığı (D_i^+) şu formül ile bulunur:

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^+)^2} \quad (9)$$

Her bir alternatifin negatif-ideal değere uzaklığı (D_i^-) şu formül ile bulunur:

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2} \quad (10)$$

Aşama 6: İdeal çözüme göreli yakınlık ve tercih sıralaması

Son olarak, göreli yakınlık indeksi (C_i^*) aşağıdaki formül ile hesaplanır:

$$C_i^* = \frac{D_i^-}{D_i^- + D_i^+} \quad (11)$$

Bu sayede bulguların ideal yani istenilen duruma yakınlığına göre sıralama yapılarak bulgular hakkında yorumda bulunmak mümkün olur.

BÖLÜM 5: ANALİZ VE BULGULAR

Literatürdeki diğer çalışmalardan da çıkartılabileceği gibi başarılı bir çeşitliliğin neden olduğu karmaşıklığı yönetmeye yönelik mevcut yaklaşımlara yapılacak bir genişletme araştırma görüşleri ile derinleştirilebilme ve daha bütünsel bir yaklaşım amacı ile bir model oluşturulmuş. Oluşturulan bu modelden elde edilen çıktılar ile ürün çeşitliliğinin ve zaman baskısının neden olduğu (veya olabileceği) üretim karmaşıklığı ölçülmüş ve değerlendirilmiştir.

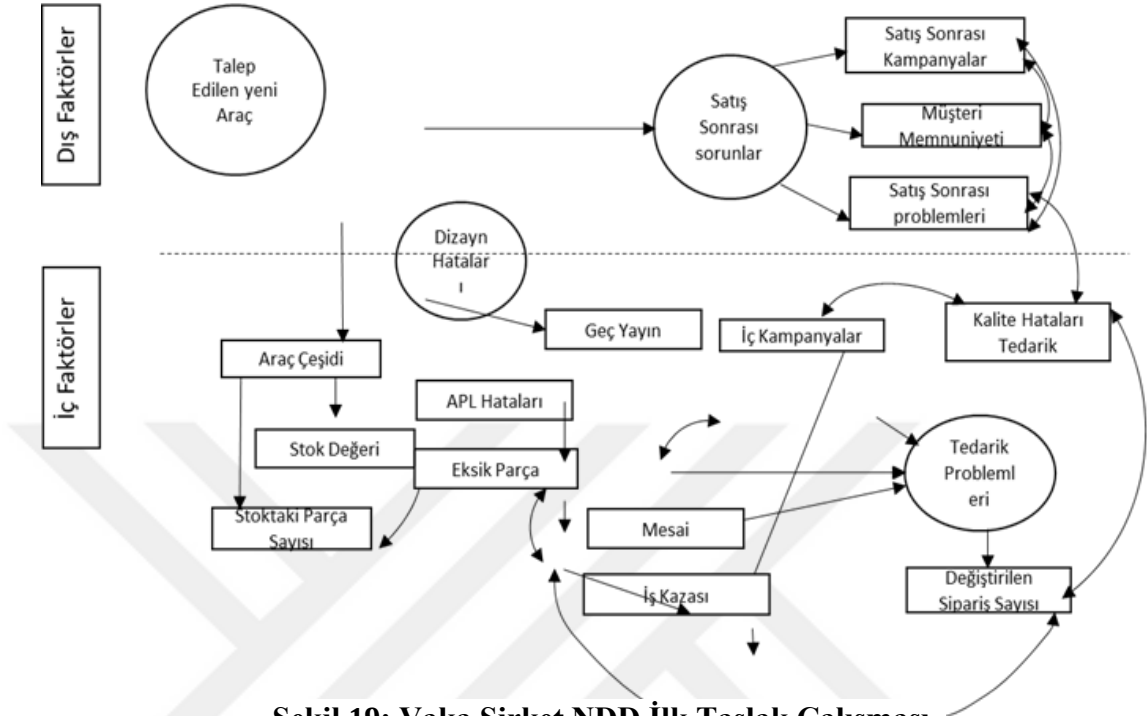
5.1 Nedensel Döngü Diyagramının Oluşturulması

Nedensel döngü diyagramı, bir sistemdeki tüm ilişkileri ve döngüleri bir arada gösteren sistemin geribildirim yapısını temsil eden en önemli bir araçtır. Sistemdeki neden sonuç ilişkilerini, bilgi geribildirimleri yönlü oklarla gösteren temelinde nedensellik olan bir mantık diyagramıdır ve buna neden-sonuç diyagramı da denir.

Vaka Şirkette nedensel döngü diyagramının oluşturulması amacıyla üretim ile direkt ilişkili olan farklı departmanlarda çalışan 29 uzmanın görüşleri alınmıştır. Uzmanlar ile yapılan toplantılarda farklı departmanların olaya farklı açılardan yaklaşıkları görülmüştür. Örneğin stok ve planlama departmanları artan çeşitliliğin stokta tutulan malzemenin çeşitliliğini artırarak elde tutulan stok miktarında artışa neden olduğunu, bununda karmaşıklığa neden olduğunu ifade etmiştir. Mühendislik ve AR-GE departmanları ise üretimdeki karmaşıklığın bir şekilde ürün üzerinde kalite zafiyeti yarattığını ve sonuçta satış sonrasında olumsuz etkilerinin ortaya çıktığını belirtmiştir. Bununla birlikte, artan ürün çeşitliliğinin yarattığı ve süreçleri en fazla etkileyen konunun, zamanında temin edilemeyen veya üretilmeyen parça probleminden kaynaklandığı anlaşılmıştır. Üretim ve montaj esnasındaki eksik parça (zamanında temin edilemeyen parça) probleminin tasarım, tedarik, planlama, kalite ve üretim süreçlerini etkilediği konusunda fikir birliğine varılmıştır.

İlgili departmanlardan oluşturulan uzmanların görüşleri neticesinde Vaka Şirketine ilişkin nedensel döngü diyagramı (NDD) ...gibi oluşturulmuş ve bu NDD 7 ayrı toplantıda 5 farklı değişikliğe uğramıştır. NDD bu son hali ve Türkiye’de SD konusunda çalışmalarda

bulunan iki akdemiysen ile tartışılmış önerileri doğrultusunda son halini almıştır. Şekil 19.



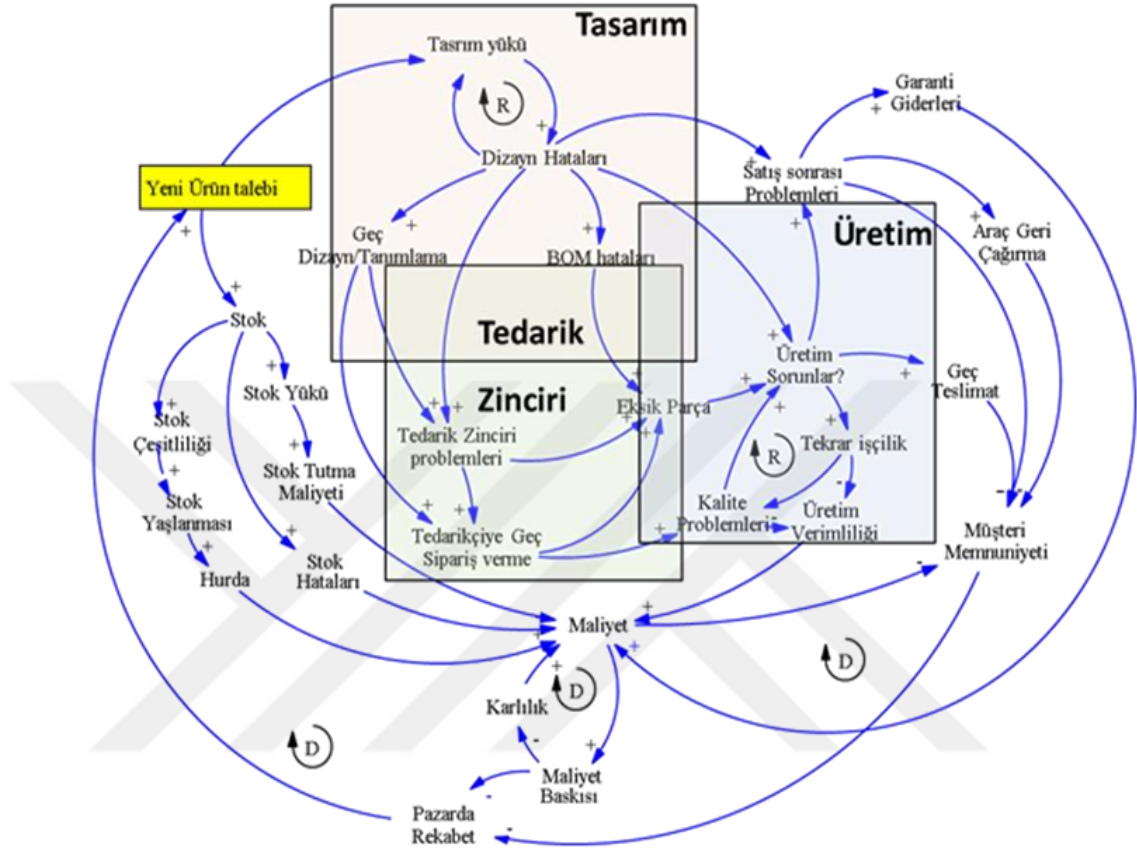
Şekil 19: Vaka Şirket NDD İlk Taslak Çalışması

Çalışmanın kapsamı doğrultusunda NDD tasarım, üretim ve tedarik zinciri olmak üzere 3 ana süreçte ele alınmıştır.

Tasarım süreci: Ürün tasarım sürecinde müşteri taleplerindeki farklılık ve ürün çeşitliliği tasarım yükünün artmasına neden olmaktadır. Artan tasarım yükü tasarım hatalarına ve BOM hatalarına sebebiyet vermesinin yanında diğer süreçleri de etkilemektedir.

Tedarik süreci: Tasarım kaynaklı geç tanımlamalar ve dizayn hataları nedeni ile tedarikçilere geç sipariş verme, BOM hataları nedeni ile hatalı sipariş verme veya hiç sipariş çıkmaması, dizayn hataları nedeni ile tedarik edilen ürünün kullanılamaması ve tekrar sipariş açılması neticesinde malzeme temininde gecikmeler yaşanabilir ve tedarikçilerde kalite sorunları baş gösterebilir (tedarikçilerle ilişkiler ve artan malzeme temin maliyetleri çalışmanın kapsamına alınmamıştır).

Üretim süreci: Üretim süreci hem tasarım hem de tedarik süreci kaynaklı sorunlardan etkilenmektedir. Üretim sürecinde bu hatalar en fazla üretim hatası olarak gözükmekte ve bu sorunların çözülmesi tekrar işçilikle yani verimlilik kaybı ile mümkün olmaktadır.



Şekil 20: Nedensel Döngü Diyagramı

5.2. Model Haritasının Oluşturulması

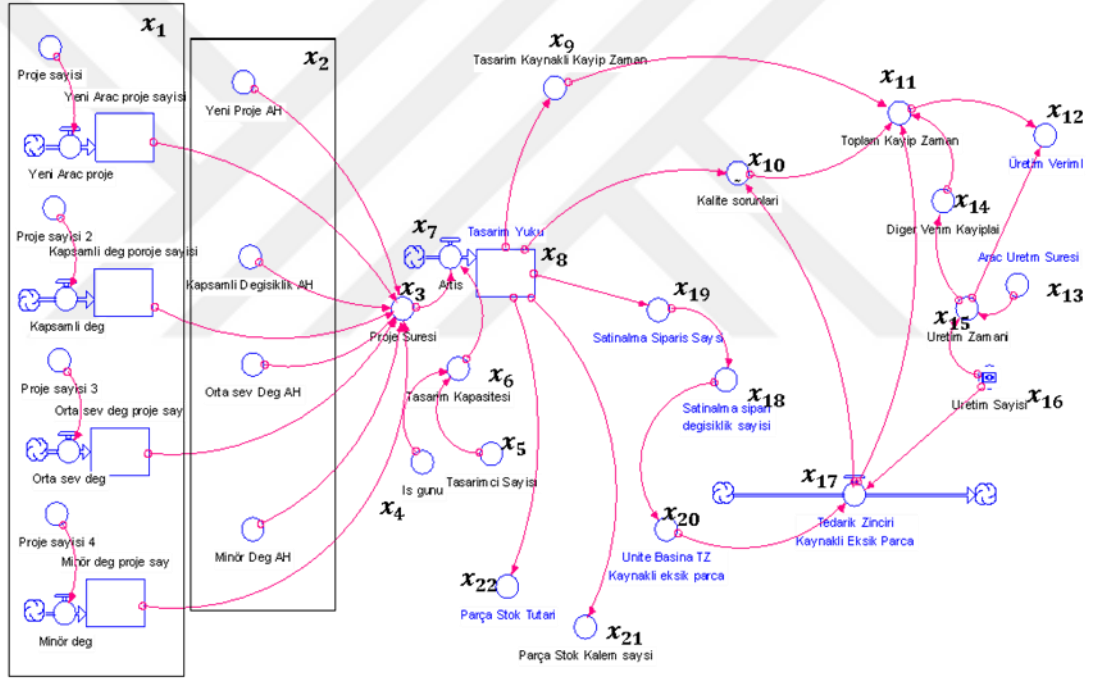
Nedensel Döngü Diyagramında gösterildiği gibi, model haritası üç ana bölüm: tasarım, üretim ve tedarik süreçleri baz alınarak oluşmuştur. NDD hazırlama sürecine benzer şekilde model mükemmelleştirme amacı ile değişikliklere uğramış NDD'nin de kesinleşmesi ile birlikte SD'ye final haline gelmiştir. Final SD modeli Türkiye'de bu konuda çalışmalarda bulunan NDD hakkında da yorumda bulunan akademisyenlerle tartışılmış ve önerileri doğrultusunda (minör değişiklik) yapılan değişikliklerden sonra SD Model haritasının bütünü, Şekil 20'de gösterildiği gibi final halini almıştır.

Model NDD'ye benzer şekilde tasarım, üretim ve tedarik zinciri olmak üzere 3 ana süreçte ele alınmıştır. Sistem Dinamiği (SD): sistemi temsil eden model akışlar, seviyeler ve regresyon vasıtasıyla oluşturulan uygun denklemler ve bağlantılar ile sağlanmıştır.

Yazılım olarak Stella kullanılmıştır. Sistem dinamiği modelinin kurulması ve çalıştırılması aşamasında yaygın bir kullanım alanına sahip Stella yazılımı tercih edilmiştir.

Sistem Dinamiği sayesinde SD, öngörülen değişikliklerin sistem üzerindeki etkisinin analiz edilmesi mümkün olmuştur. Ayrıca bu yazılım çalışma alanının tüm genişliğinde farklı değişkenlerin sistem üzerindeki etkisini ve değişkenler arasındaki etkileşimi anlayabilmeyi mümkün kılmıştır.

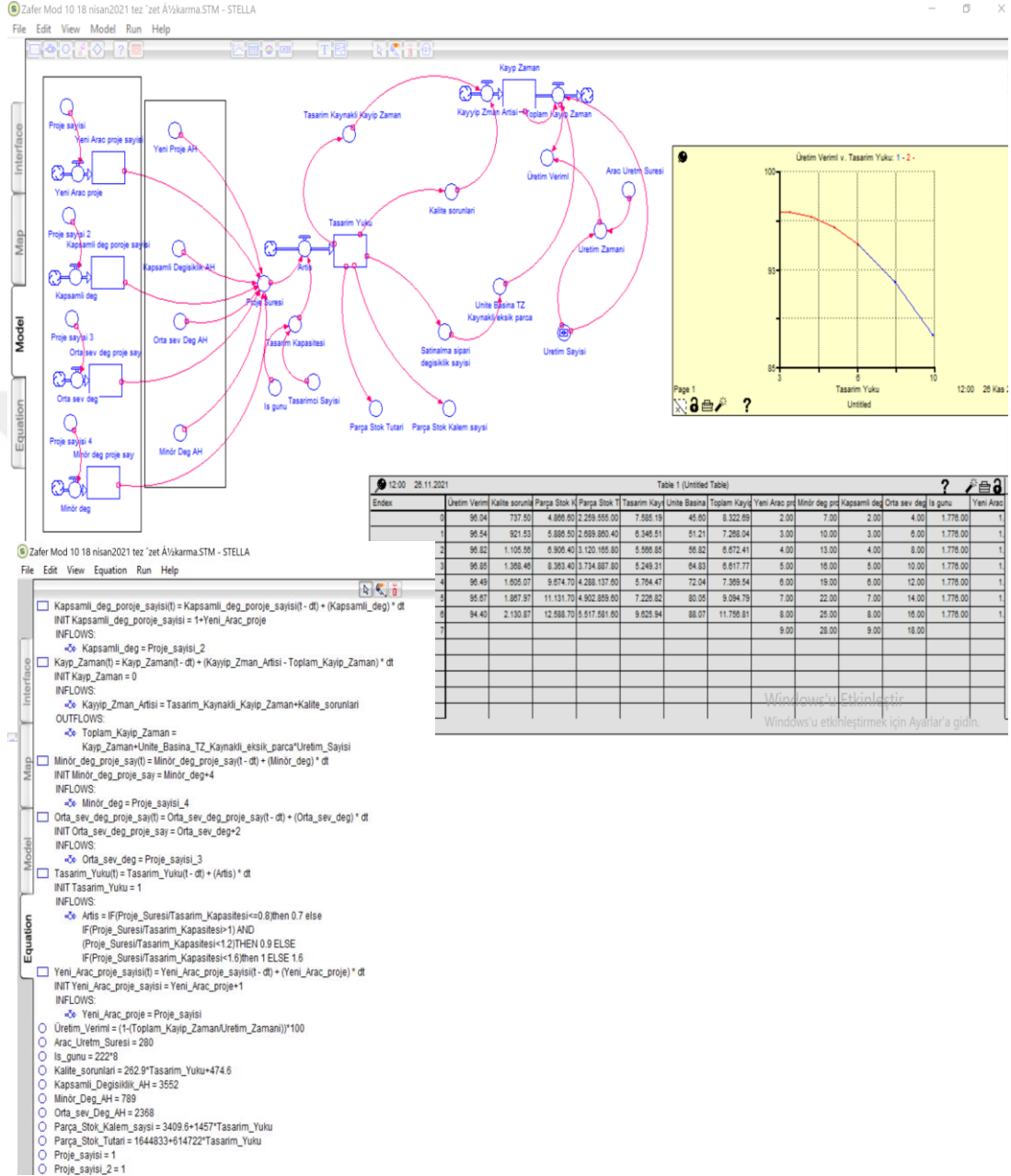
Nedensel Döngü Diyagramında gösterildiği gibi, model haritası üç ana bölüm baz alınarak oluşmuştur, bunlar: tasarım, üretim ve tedarik süreçleridir. Model haritasının bütünü Şekil 21’de gösterilmiştir.



Şekil 21: Model Haritası

Model yapısı ve gerçek firma arasındaki ilişkilerin nitel karşılaştırmaları modelin Vaka Şirkete ait problemin kavramsallaştırılmasında önemli bir yer tutmaktadır. Bu sayede model Vaka Şirket süreçler ilişkisini dinamik olarak ifade ederken sistemlerin ilişkisini ifade etmeyi kolaylaştıracaktır Şekil 22. Bu sayede karar vericiler her alternatif çözüm

için problemleri baştan sona kadar incelenmesini kapsayan sistematik bir çalışma sürecine girmek yerine model çıktılarını analiz edecektir.



Şekil 22: Model Haritasının Stella Programında görülmesi

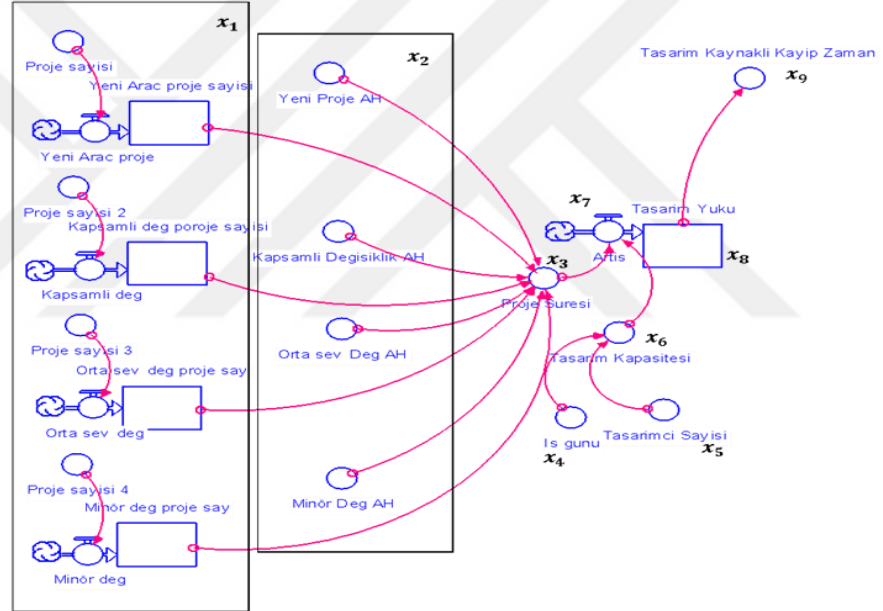
Modelin çalıştırılmasından sonra, karar vericilerin modelde bulunan her kritere ait çıktıları her set değerine göre rakamsal olarak görebildikleri gibi tercihlerine göre kriter eşlemeleri ile grafikler oluşturabilirler. Bu sayede model, seçenek çözümler sunarak karar alma aşamalarında karar alıcılara yarar sağlayacaktır.

Model çıktı tablosundan görüleceği gibi çoğu faktör çıktıların nicel ve aynı birim olması verimlilik dahil unsurlara ait değerlerin maliyet açısından değerlendirilmesini mümkün kılmaktadır.

Takip eden alt başlıklarda her bir süreç ayrı ayrı modellenecek ve modeldeki değişkenler tanımlanacaktır.

5.2.1. Tasarım Süreci

Tasarım süreci üzerinde çeşitliliğin etkisi ve bu etkilerin diğer süreçlerle olan ilişkiler aşağıdaki şekil 23’de gösterilmiştir. Vaka şirketinde, tasarım sürecindeki araç projeleri ve değişiklikler kapsamlarına göre dört ana gruba ayrılmıştır, bunlar: *Yeni araç, kapsamlı değişiklik, orta seviyeli değişiklik ve minör*



Şekil 23: Tasarım Süreci Modeli

değişiklik. Vaka şirketinde tasarım süreçleri kapsamlarına göre dört grupta incelenmektedir: yeni araç, kapsamlı değişiklik, orta seviyeli değişiklik ve minör değişiklik. Bu gruplandırmaya göre en önemli girdi olan tasarım yükü endekse çevrilerek modelin çalışması kolaylaştırılmıştır.

Tasarım Yükü Endeksinin Hesaplanması: Aşağıda örneği görülen Tasarım bölümü yıllık planında işler ve iş yükleri için açıklamalar da mevcuttur.

Vaka Şirketi, gerçekleştirecekleri tasarımları dört seviyede değerlendirmektedir. Bunlar:

1. Yeni araç, 2. kapsamlı değişiklik, 3. Orta seviye ve 4. minör değişiklik. Be

seviyelerdeki projeler süre bazında 1. yeni araç projeleri tamamen yeni bir aracı devreye almak veya bu kapsamda, 8 ay veya daha fazla süren ve tek bir proje olarak tasarım grup iş kapasitesinin yaklaşık %10-15 sini alan projelerdir. 2. Kapsamlı değişiklik projeleri, motor, güç aktarma organları veya gövdede kapsamlı değişiklikleri kapsayan 4-8 ay planlama süresi olan tasarım grubunun kapasitesinin %6-12 sini alan projelerdir. 3. Orta seviye projeler, araç içi veya güç paketinde çok kapsamlı olmayan değişiklik projeleridir. 2-4 ay arası planlama süresinde ve yaklaşık iş yükünün %3-6 ini alır. 4. Minör değişiklikler de 0-2ay arasında tamamlanabilen projelerdir İş yükünün %1-3 ini alır.

Grup çalışmasında, Vaka şirketin gerçekleşmiş 10 yıllık tasarım planlaması dikkate alınarak tasarım kapasitesi ve iş yükü oranına göre tasarım seviyelerine göre ağırlıklar belirlenmiş ve tablodaki sonuç elde edilmiştir. Model için gerçekleştirilecek Min. değer olarak %90 yani kapasiteye göre %90 çalışıldığı durum, maksimum ise %170 yani kapasitenin %70 üzerinde (Grup çalışmasında alınan karar ile: insanın fiziki olarak bir yıl boyunca mesaisini en fazla %70 arttırabileceği, %90 nin altındaki bir oranda ise firmanın eleman azaltacağı öngörüsü ile). Toplam İş Yükünün 90-170 aralığı 1 den 9 a kadar numaralanıp endeks olarak tanımlanmıştır.

Tablo 8: İş Yüküne Göre Tasarım Yükü Endeks Değerleri

T.İş Yükü	90	100	110	120	130	140	150	160	170
Endeks	1	2	3	4	5	6	7	8	9

Modelde Tasarım Yükü endeksi girilen proje sayılarına göre bulunan İş Yükü değerinin Tasarım Kapasitesine bölünmesi ile elde edilir.

Toplam İş Yükünün (ideal yük %115) İdeal olduğu durumda Tasarım Yük endeksi 3,6 elde edilmiştir. Endeksin 3,6 üzerinde olması tasarım grubunda daha fazla iş yükü olduğunu göstergesi olarak kabul edilir. Yani proje sayıları optimum değerde belirlenen proje sayılarının üzerinde arttıkça Tasarım yükü 9 a doğru veya daha az proje yapıldıkça tasarım yükü endeks değeri 1 e doğru yaklaşacaktır. Vaka Şirketin 10 yıllık uygulamalarında en verimli durumda Tasarım Yük endeksi 4,1 dir.

4 değişik Proje tipinden yıllık toplam 36 proje gerçekleştirilmektedir, (Bu proje sayıları, yıllık toplam harcanacak proje saat değeri aşmamak üzere kendi içinde değişebilmektedir).

Proje seviyelendirme (x_1): Modelde, Proje Sayısı bir sayaç değeri olup bu çalışmada tüm tasarım yükü aralıklarında (1-9) sıralı olarak 1 er değer atayarak eğri oluşturulması için

tasarlanmıştır. Değişikliğin ağırlığına göre atanan bu değerler proje değişim büyüklüğüne göre Vaka Şirketi tarafından tanımlanmış olan (x_2) Adam Saat (AH) değeri ile çarpılarak x_3 değeri bulunur. (Hesaplamanın söz konusu olduğu gerçek bir uygulamada x_1 ve x_2 değerleri için o yıl planlanan değerler girilerek öngörü hesaplama yapılabilir.)

Cari yıl için çalışma gün sayısı: (x_4): Yıllık ortalama çalışma günü sayısı.

Çalışan eleman sayısının ortalaması (x_5): Vaka Şirket Tasarım grubunda çalışan eleman sayısıdır, Modelde Vaka Şirketin 10 yıllık süreçte yıllık ortalama çalışan sayısı alınmıştır.

Tasarım kapasitesi: (x_6)

$$x_6 = x_4 * x_5 \quad (12)$$

bulunur.

Planlanan proje süresinin iş gücü kapasitesine oranı (x_7): tanımlanan projelere karşı iş gücü yeterliliğini gösterir.

$$x_7 = x_3/x_6 \quad \text{şeklinde hesaplanmaktadır} \quad (13)$$

Tasarım yükü (endeksi) (x_8): Tasarım Yükleri, (x_1) kolonunda bulunan proje tiplerine göre, (vaka şirketin 1 yılda gerçekleştirebileceği ortalama proje sayısı ve bunlara göre hesaplanan sayaç değeridir. Proje sayısı sayaç değeri olarak atanır, bu sayaç değeri ilgili projenin stok kutusunda modelin her çevriminde bu değer kadar 9 tasarım yükü endeksine kadar artar, (tasarım yükü endeksi için 9 değeri, Vaka Şirketin kaynaklarına göre ulaşabileceği son nokta, geçmiş datalardan teyit edilmiştir).

Tasarım yükü her çevrimde x_7 değerini bir önceki değere ekleyerek maksimum 9 değerini alıncaya kadar çevrim devam eder.

Tasarım Kaynaklı Kayıp Zaman (x_9): Tasarım departman yükünün neden olduğu zaman kaybını göstermektedir. Tasarım hataları, tasarımın gecikmesi, APL hatalarından kaynaklanan sorunlar bu kapsamdadır. Vaka şirketinin 10 yıllık verilerinden tasarım yükü

ve tasarım kaynaklı kayıp zaman üzerinde (regresyon analizi)³ yapıp aşağıdaki formül bulunmuştur.

$$x_9 = 468.39 \times x_8^2 - 3034.2 \times x_8 + 10151 \quad (14)$$

5.2.2. Üretim Süreci

Üretim süreci Şekil 24'deki gibi modellenmiştir. Modelde yer alan değişkenler aşağıda açıklanmıştır.

Kalite sorunları (x_{10}): Tasarım hataları veya tedarikçi kaynaklı parça hatalarından oluşan kayıp zamanı ifade eder. Bu çalışmada tedarikçi kaynaklı uygunsuzlukların tasarım nedenli olanları dikkate alınmıştır. Değerlerle ilgili yaklaşım Vaka şirketinin geçmiş 10 yıllık (x_2), ve (x_9), verilerine göre çoklu regresyon analizi yapıp aşağıdaki denklem bulunmuştur.

$$x_{10} = (0.2443 \times (x_2) - 3.571) + 0.03 \times (x_9) - 220 \quad (15)$$

Toplam kayıp zaman (x_{11}): Vaka şirketinin geçmiş yıllara 10 yıllık (x_2), (x_3), ve (x_9), ilişkin verilerine göre regresyon analizi yapıp aşağıdaki denklem bulunmuştur

$$x_{11} = x_{17} \times 0.06 + x_9 + x_{10} + x_{14} \quad (16)$$

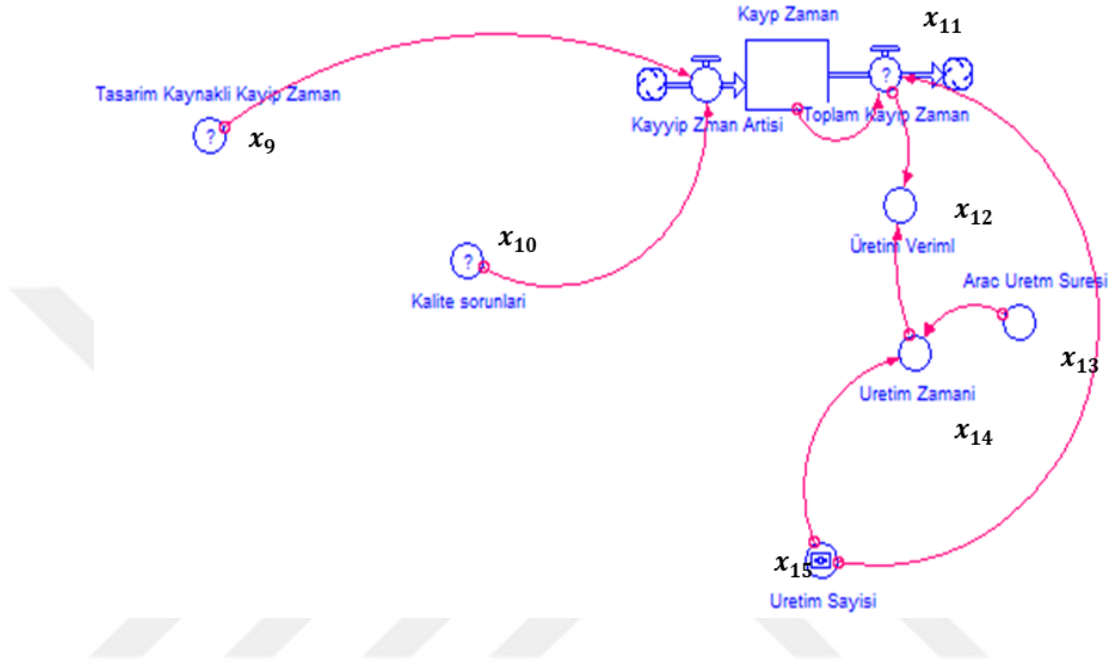
Üretim verimi (x_{12}): Üretim verimliliği, oluşturulan modelinin çıktısıdır. İki temel girdisi vardır bunlar toplam kayıp zaman (x_{11}) ve toplam üretim süresidir (x_{15}). Üretim verimliliği, tasarım sorunlarının giderilmesi için harcanan mesai veya ilave işgücü nedeni ile oluşan kayıp zamanın ürünlerin oluşturulması için gereken zamanla oranlanmasıdır. Yani kayıp zamanın harcanması gereken zamandır ve verimsizliği içerir Şekil 24. Modelde oluşturulan verimsizlik formülü Toplam kayıp zaman (x_{11})'in Üretim zamanı

³ Regresyon analizi; iki ya da daha fazla nicel değişken arasındaki ilişkiyi belirlemek için kullanılan analiz metodudur. Regresyon analizi bize değişkenler arasında ilişkinin var olup olmadığını, var olan ilişkinin yönünü (pozitif ilişki veya negatif ilişki), ilişkinin fonksiyonunu ve ilişkinin büyüklüğünü verir. Çalışmada iki değişken arasındaki ilişkide değişkenler arasında basit, linear bir ilişki (çıkıtı, girdinin birinci derecede bir fonksiyonu) olabileceği gibi daha karmaşık (logaritmik, quadratik veya kübik gibi) bir ilişki içerisinde de olabilir. Temsilde büyük bir fark yoksa “ne kadar basit o kadar iyi” yaklaşımı ile en uygun modeli belirlemek için 10 yıllık datası ile bu analizi artık analizi yapılmıştır.

Öncelikle linear ilişki seçilerek gerçekleştirilen analiz sonucu oluşturulan grafikte noktalar ile eğrinin uyumuna baktıktan sonra, denklemin lineer mi yoksa quadratikmi olduğuna karar vermek için Minitab artık analizinde, artıkların normallik testi açısından uygunluğu “Normal Probability Plot” grafiğinden ve “Versus Fits” grafiğinde artıkların 0 etrafında dağılımına “Histogram”, ayrıca “Versus Order” grafiğinde de bir trend bakarak değişkenler arasında basit doğrusal mı bir ilişkimi yoksa daha karmaşık ilişki olduğuna bakılarak karar verilmiştir.

(x_{14})'e bölümünün 1'den çıkartılması ve 100 ile genişletilmesi ile hesaplanmaktadır. Verimlilik, Formül 17 ile hesaplanmıştır:

$$x_{12} = \left[1 - \left(\frac{x_{11}}{x_{14}} \right) \right] \times 100 \quad (17)$$



Şekil 24: Üretim Süreci Modeli

Araç üretim süresi (x_{13}): Bir birim aracı üretilebilmek için tanımlanmış süredir. Bu modelde araç üretim süresi olarak 10 yıl boyunca üretilmiş olan araçlara ait üretim sürelerinin ortalaması alınmıştır. Modelin pratik uygulaması durumunda bu değer cari yıl içinde üretilmesi planlanan araç çeşitlerinin üretim sürelerinin ortalaması olarak alınmalıdır.

Üretim zamanı (x_{14}): Birim araç ortalama üretim süresinin yıllık araç üretim sayısı çarpılması ile elde edilen konu yıl için toplam üretim zamanıdır yani harcanması gereken tanımlı işgücü süresidir. Verimlilik hesabında önemli bir bileşendir. Formül 18 e göre hesaplanır.

$$x_{14} = x_{13} * x_{15} \quad (18)$$

Üretim sayısı (x_{15}): Hesaplamaya konu olacak yıl içerisinde üretilecek veya üretilmesi planlanan araç sayısıdır. Modelde üretim sayısı olarak Vaka Şirketin 10 yıllık üretim

İşletmenin on yıllık verileri kullanılarak, Satınalma sipariş değişiklik sayısı ile Ünite Başına Tedarik Kaynaklı Eksik Parça arasındaki ilişki regresyon analizi ile bulunmuştur.

$$59.8+0.00016*\text{Satinalma_sipari_degisiklik_sayisi} \quad (19)$$

Satın Alma Sipariş değişiklik Sayısı (x_{17}): Cari yıl içinde satın alma departmanı tarafından malzeme temini amacı ile tedarikçilere verilen siparişlerin gerek tasarım değişikliği gerekse tasarım hataları ve BOM hataları nedeni ile siparişlerdeki değişiklik sayısıdır. İşletmenin on yıllık verileri kullanılarak, tasarım yükü ile sipariş sayısı arasındaki ilişki regresyon analizi ile bulunmuştur:

$$x_{17} = x_{16} * x_{20} \quad (20)$$

Parça stok kalem sayısı (x_{18}): Yıl içerisinde yapılan araç üretimi içi tutulan parça stok kalem sayısının yıllık ortalamasıdır. Modelde vaka şirketin 10 yıllık ortalaması alınmıştır. Araç çeşidinin fazla olması üretilecek bu araçlar için tutulması gereken parça sayısının da fazlalığını ifade eder. Yapılan regresyon analizinde tasarım yükü ve elde tutulan parça stok sayısı arasındaki bağıntı şu şekilde bulunmuştur:

$$x_{18} = 8.6 * x_{19} - 297072,9 \quad (21)$$

Parça stok tutarı (x_{19}): Yıl içerisinde yapılan araç üretimi içi tutulan parçaların parasal tutarıdır. Modelde vaka şirketin 10 yıllık ortalaması alınmıştır ve tutar enflasyon etkilerinden arındırmak amaçlı o yılki ortalama € cinsinden hesaplanmıştır. Yapılan regresyon analizinde tasarım yükü ve elde tutulan parça stok tutarı arasındaki bağıntı şu şekilde bulunmuştur:

$$x_{19} = 3409,6 + 1457 * x_8 \quad (22)$$

5.3. Modelin Varsayımları

Model haritasının oluşturulması sırasında bazı varsayımlar kabul edilmiştir. Model çalıştırılmasında Vaka Şirketin yıllık otobüs üretim miktarı ve araç çeşidi 10 yıllık ortalama sabit olarak alınmıştır. Modelde, yıllık araç çeşidi 30, otobüs üretim miktarının ise 800, kabul edilmiştir. Modelin pratik uygulamasında hesaplamaya konu olacak değerler o yıl için planlanan sayılar olmalıdır.

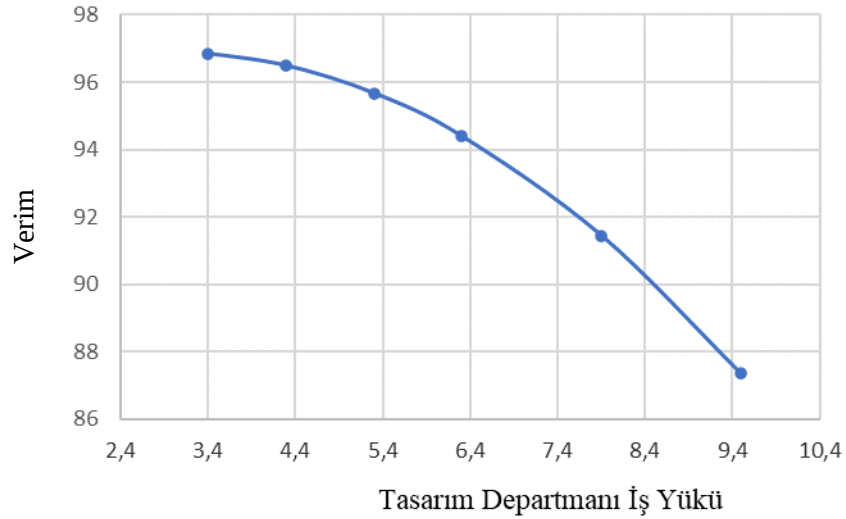
Vaka şirketin tasarım seviyelerine ve ağırlık katsayısına göre ve tasarım kapasitesinin %15 mesai ilavesi ile yapabileceği iş yükü endeksi 4,1 olarak bulunmuş, bunun

üzerindeki endeksler tasarım grubunda daha fazla iş yükü olduğunu göstergesi olarak kabul edilmiştir. Örneğin, tasarım seviyesine göre 1'den 4 proje, 2'den 5 proje, 3'den 9 proje ve 4'den 18 proje olmak üzere Toplam ağırlık/ Proje Sayısı hesabına göre (optimum) tasarım yükü endeksi 3,6 olarak bulunmuştur. Bu sayede tasarım yükündeki artışın, verimlilik üzerinde yarattığı etkiler takip edilebilmiştir. Tasarım departman yükünde alt sınır ise 2,6 olarak alınmıştır. 4,1 değeri, vaka şirketinde kaydedilmiş en düşük değerdir.

5.4. Bulgular

Sistem dinamiği modeli çalıştırılarak tasarım yükündeki artışın diğer süreçleri nasıl etkilediği incelenmiştir.

Tasarım yükünün üretim verimliliğine etkisi: Şekil 26'da gösterilmiştir. Görüleceği gibi tasarım departman yükündeki her artış üretim verimliliğini düşürmektedir. Tasarım yükünün en düşük olduğu durumda 96,7 olan verimlilik tasarım yükünün maksimum seviyeye ulaşması ile üretim verimliliği en düşük seviyeye, %87,07'ye gerilemiştir.

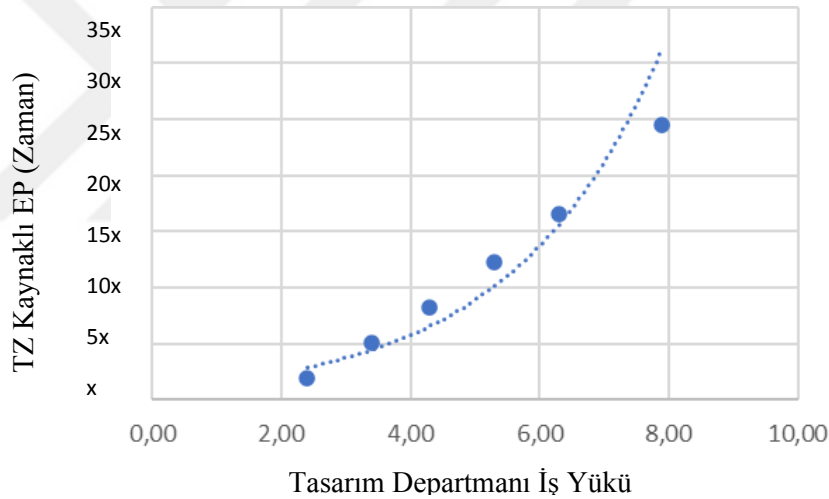


Şekil 26 Tasarım Yükünün Üretim Verimliliğine Etkisi

Modelin çalıştırılması ile görülen tasarım yükündeki artış ile verimlilik üzerindeki olumsuz etkisine ilişkin bulgu önceki literatürü destekler niteliktedir. Nitekim Guimaraes vd. (1999), üretim hattında bir üründen diğerine geçişin verimliliği düşürdüğünü ifade etmiştir. Ayrıca Marcora vd. (2009); Webbink ve Hu (2005), çalışmalarında bahsedilen

simülasyon uygulamaları da ürün çeşitliliğindeki artışın üretim sisteminin verimliliğini düşürdüğünü ve karmaşıklığını artırdığını ortaya koymaktadır. Diğer pek çok araştırmacı da çeşitliliğin neden olduğu karmaşıklıktan ötürü kalite hatalarının artacağını, bunun da üretim verimliliğini düşüreceğini ortaya koymuştur (Ekinci ve Baykasoğlu, 2016; Fisher ve Ittner, 1999; Ittner ve MacDuffie, 1995; Ramdas, 2003; Zhu vd., 2008).

Tasarım yükünün tedarik süreçlerine etkisi: ürün tasarımında yapılan değişikliklerin hem vaka şirket tecrübelerinden hem de literatür çalışmalarında belirtildiği gibi tedarikçi üzerinde bir zaman baskısı oluşturup kalite ve eksik parça sorunlarına neden olacağı bilgisine benzer şekilde modelinde çıktı vermesi beklenmekte idi. Şekil 27’de, tasarım yükü endeksi ile tedarikçi kaynaklı eksik parça arasındaki ilişki görülmektedir. Grafikte dikey eksenle tedarikçi kaynaklı eksik parça için kayıp zaman (saat olarak), yatay eksenle ise tasarım yükü endeksi görülmektedir.



Şekil 27: Tedarik Zinciri Kaynaklı Eksik Parça (Ünite Başına Kayıp Zaman)

Sonuçlar incelendiğinde, eksik parça miktarının (EP, eksik parçanın Vaka Şirket üzerindeki etkisi ve oluşumu bölüm 4.2.4 de anlatılmıştır) tasarım yükündeki artışa bağlı olarak yükseldiği görülmektedir.

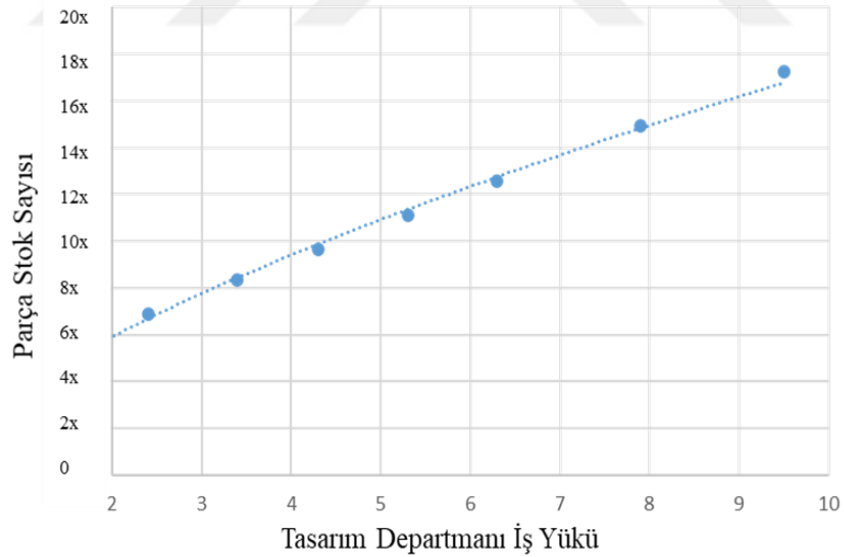
Tasarım yükü 2,4’de iken üretimdeki kayıp zaman 11X adam/saate ve en nihayetinde Tasarım yükü endeksi 9’a yükseldiğinde üretimdeki kayıp zaman 27X adam/saate çıkmaktadır. Elde edilen bu bulgu, (Crippa vd., 2010) çalışmasındaki yeni ürün serisinin devreye alınması durumunda malzeme ihtiyaç planlama sisteminin doğruluğunun

düşeceği ve buna bağlı olarak eksik parça miktarının ciddi oranda artacağına ilişkin bulgusunu desteklemektedir.

Sonuçlar incelendiğinde, eksik parça miktarının (EP, eksik parçanın Vaka Şirket üzerindeki etkisi ve oluşumu bölüm 4.2.4 de anlatılmıştır) tasarım yükündeki artışa bağlı olarak yükseldiği görülmektedir.

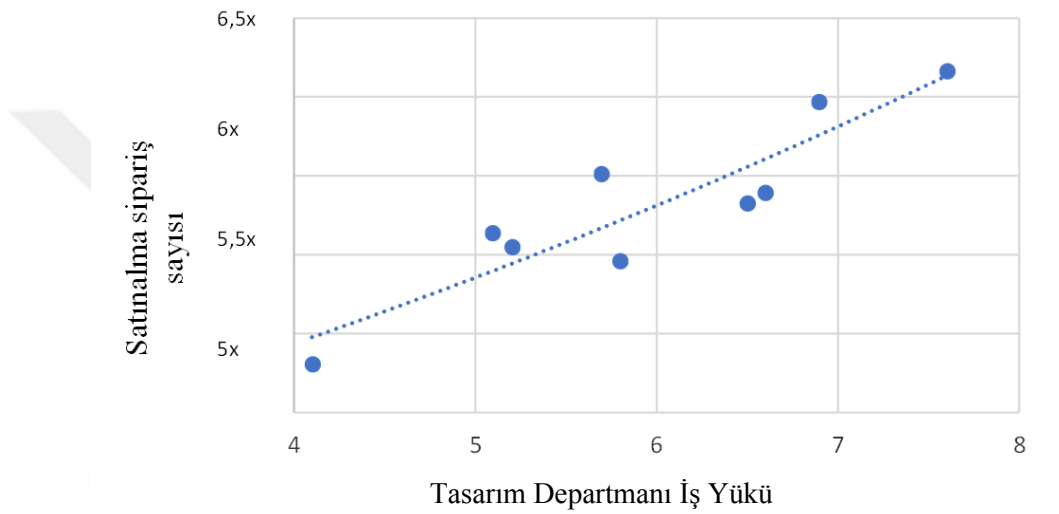
Tasarım yükü 2,4'de iken üretimdeki kayıp zaman 11X adam/saate ve en nihayetinde Tasarım yükü endeksi 9'a yükseldiğinde üretimdeki kayıp zaman 27X adam/saate çıkmaktadır. Elde edilen bu bulgu, (Crippa vd., 2010) çalışmasındaki yeni ürün serisinin devreye alınması durumunda malzeme ihtiyaç planlama sisteminin doğruluğunun düşeceği ve buna bağlı olarak eksik parça miktarının ciddi oranda artacağına ilişkin bulgusunu desteklemektedir.

Ürün çeşitliliğindeki artışın stoklara etkisi: Şekil 28'de ürün çeşitliliğinin stoklar üzerindeki etkisi görülmektedir. Buna göre, ürün çeşitliliğine bağlı olarak tasarım departmanının iş yükünün artması hem stoktaki ürün miktarını hem de toplam stok maliyetini ciddi şekilde artırmaktadır.



Şekil 28: Stoktaki Kalem Sayısı

Ürün çeşitliliğindeki artışın Tedarik zinciri üzerindeki etkisi: Siparişlerin çeşitlilik nedeniyle daha küçük partilere bölünmesi, çeşitliliğin tedarikçi etkileşimlerinde de karmaşıklık yaratacağını belirtmiştir (Bozarth vd., 2009; Karayazı ve Cedimoğlu, 2015). Şekil 29, ürün çeşitliliğindeki artışın tedarikçiye açılan sipariş sayısına etkisini göstermektedir. Model çıktısından görüldüğü gibi, tasarım yükünün 4 olduğu durumda sipariş sayısı yaklaşık 4,5X iken, tasarım yükü 8'e yaklaştığında sipariş sayısı 6X'ten fazla olmaktadır.



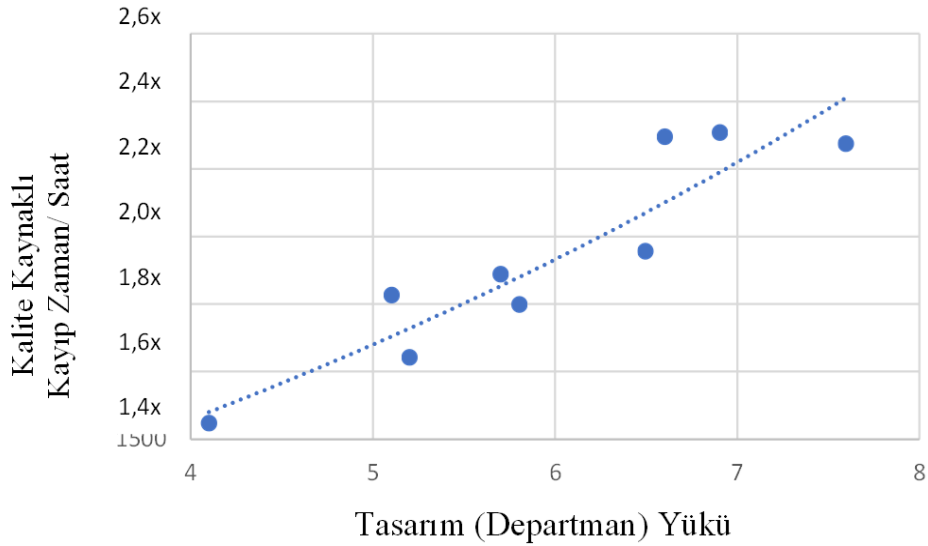
Şekil 29: Tedarikçiye Açılan Sipariş Sayısının Ürün çeşitliliği ile Değişimi

Tasarım departman yükü artışının kalite sorunlarına etkisi: Şekil 29'da görüleceği gibi ürün tasarımında yapılan değişiklikler, önceki bölümlerde açıklandığı gibi geç sipariş, sipariş değişiklikleri, fazla miktarda yeni parça talebi nedeniyle tedarikçiler üzerinde baskı oluşturmaktadır.

Bu baskı sipariş gecikmesine, tedarik edilen parçalardaki kalite sorunlarına ve üretim hattında kalite sorunları oluşmasına etki etmektedir. Şekil 30'da grafikte dikey eksen kalite kaynaklı kayıp zamanı yatay eksen ise tasarım yükü endeksini, gösterilmektedir.

Grafikten görüleceği gibi tasarım yükünün artışı üretim hattındaki kalite sorunlarını tetiklemesi üretim hattındaki kayıp zamanda süreside artma yaratmakta ve neticesinde üretim verimliliğinde düşüşüne sebep olmaktadır. Bu bulgu, literatürdeki kalite seviyesinin üretim sistemindeki çeşitlilikle ters orantılı olduğu, artan karmaşıklığın daha düşük kalite seviyesine neden olacağı ve parça ve seçenek çeşitliliğindeki artışın çevrim

sürelerini etkileyerek verimlilik ve ürün kalitesini etkileyeceğine yönelik önceki bulguları desteklemektedir (Bednar ve Salanci, 2016; ElMaraghy W.; Meselhy, 2009; Marcora vd., 2009; Webbink ve Hu, 2005).



Şekil 30: Kalite Kaynaklı Kayıp Zaman- Araç Bazlı

Çalışmanın bulguları genel olarak değerlendirildiğinde: modelden elde edilen sonuçların literatür ile uyumlu olduğu görülmektedir. Amabile vd., (2002), tasarımda artan iş yükünün hem algılanan zaman hem de iş yükü üzerinde olumsuz bir etkisi olacağı, benzer şekilde (Vogel ve Lasch, 2015; Ramdas, 2003) çalışmalarında bahsedilen çeşitliliğin sistemin genel karmaşıklığı üzerinde yüksek etkiye sahip olduğunu şeklindeki ifadeleri ile uyumludur. Ayrıca, (Schuh ve Schwenk, 2001) çalışmasında da belirttiği gibi, değer zincirinin belirli bölümlerindeki çeşitliliğe dayalı karmaşıklığın üretim, kalite ve lojistik süreçlerine süreçlerini olumsuz etkileyeceğini varsayımı modelin çıktıları ile uyumaktadır. Son olarak, (Bonev vd., 2015; Vogel ve Lasch, 2015) çalışmalarında belirtilen otomotiv gibi teknik endüstrilerde yüksek zaman baskısı ve kısıtlı kaynaklar nedeniyle ürün çeşitliliğinin tasarım üzerindeki olumsuz etkisinin fazla olması beklenmesi gerektiği ifadesi ile de uyumludur.

5.5. Modelin Geçerliliğinin Test Edilmesi

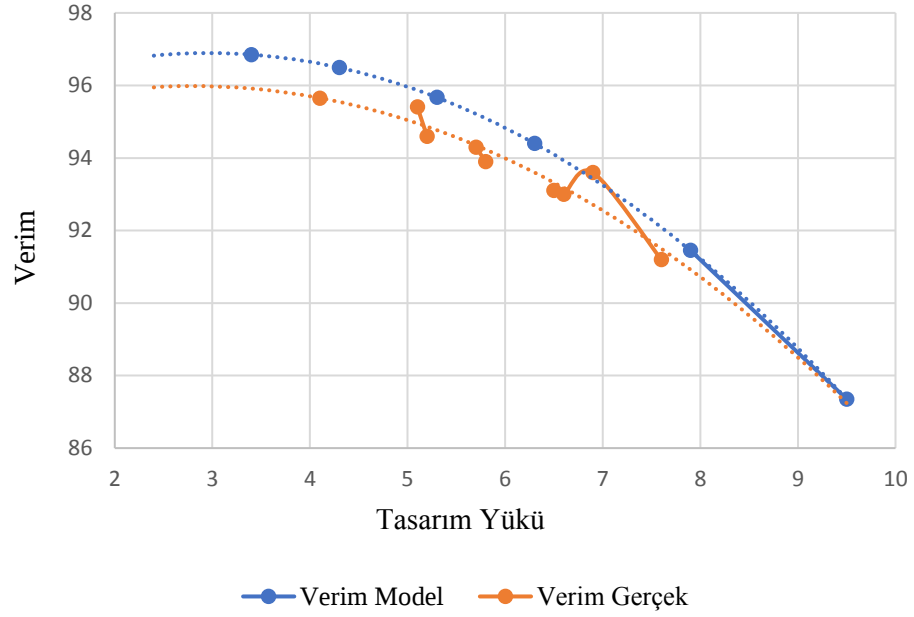
Önerilen sistem dinamiği modelinin geçerlilik testi, (Barlas, 1996) tarafından önerilen yöntemde belirtilen üç ana başlık altında test edilmiştir.

5.5.1 Doğrudan Yapı Testleri

Yapı onay testi: Nitel verilerle, gerçek sistemin nasıl işlediğinin yorumlanmasıdır. Bu araştırmada, derinlemesine niteliksel bir araştırmanın temelini oluşturmak ve araştırmayı genişletme ve sorulara daha detaylı bir anlayış getirmek amacı ile literatür taramasının yanında uzman görüşleri ve aynı endüstriyel üretim gamı bulunan diğer firmalara ait bulgular da kıyaslanmıştır. Literatür çalışmasında da görüleceği gibi, karmaşıklıkta görüngü (fenomen) ile ilişkiler örgüsü (context) arasındaki sınırların çok net olmaması kanıt kaynağının arttırılması gerektirmiştir. Grup çalışmalarında mevcut durum analiz edilerek nitel değerlendirmelerle ortaya konan Nedensel Döngü Diyagramı Şekil 20 ile nicel gereklilikler ve sonrasında model oluşturulmuştur. Bununla birlikte, grup toplantılarında şirketin geçmiş verilerinden elde edilen bilgiler (şirket datasından elde edilen ampirik veriler; çeşitliliğin artması ile artan kalite, verimlilik kayıpları ve tedarik zinciri sorunları) ve hat yanı görüşmeleri aracılığıyla gerçekleştirilen nitel incelemeler, model unsurlarının birbiri ile olan ilişkilerinin geçerliliğini sağlamaya yardımcı olmuştur. Oluşturulan modeldeki çıktılar, endüstrideki diğer firmaların uygulamaları (kıyaslama, bölüm 4.2.4) ve literatürdeki benzer uygulamalar ile kıyaslanmıştır. Böylece, önerilen modelin yapısal olarak geçerli olduğu söylenebilir.

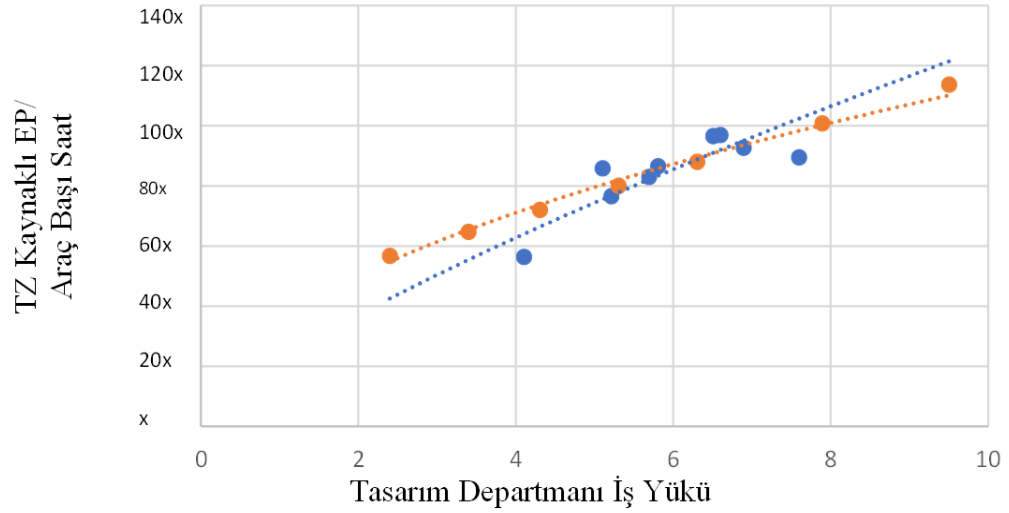
Aşırı koşul testi: her parametre için uç değerlerde, model ile gerçek sistemin beklenen davranışı göstermesi istenir. Şekil 31’de görüleceği gibi Vaka Şirketin maksimum ve minimum tasarım yükü değerlerine karşılık gelen model değerleri (modelin bu tasarım yüküne göre verdiği verimlilik değerleri) paralellik göstermektedir.

Modelin ekstrem durum testini yapmak amacıyla, vaka şirketin 10 yıllık tasarım yükü datasından elde edilen asgari değer altında ve azami değer üzerinde değerler kullanılmıştır. Model grafiğinden Şekil 31’den da görüleceği gibi model gerçek sisteme



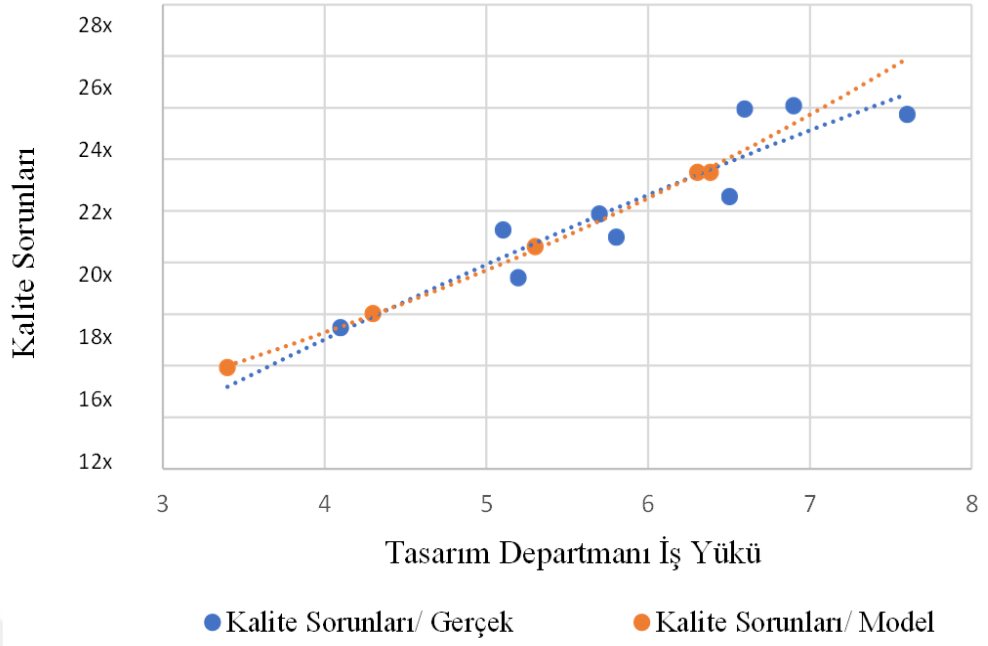
Şekil 31: Tasarım Yükü Verim Eğrisi ile Gerçek- Model Kıyaslama

,
benzer davranış sergilemektedir. Model, Şekil 31, Şekil 32, Şekil 33 ve Şekil 34’de
görüldüğü gibi ekstrem (aşırı durum) testinde uygun sonuç vermektedir.

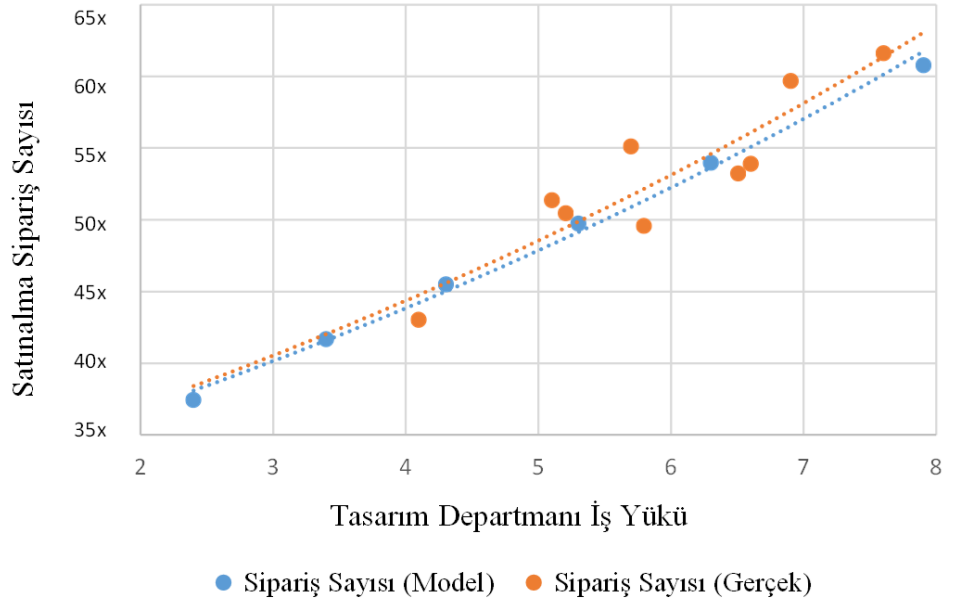


● Ünite başına TZ Kaynaklı EP SAAT/ Gerçek ● Araç Başı TZ kaynaklı Kayıp zaman/ Model

Şekil 32: Tedarik Zinciri Kaynaklı EP Nedenli Kayıp Zaman



Şekil 34: Vaka Şirketi Kalite Kayıpları Model/ Gerçek Kıyaslama



Şekil 33: Tedarikçiye verilen sipariş sayısının Model/ Gerçek mukayesesi

Parametre onay testi: Modeldeki parametrelerin (sabitlerin) gerçek sistemle ne kadar uyum sağladığının değerlendirilmesi işlemidir. Modeldeki sabit parametreler araç üretim sayısı, araç başına eksik parça tamamlama süresi ve araç üretim süresidir ve bu süreler vaka şirketin 10 yıllık verileri esas alınarak oluşturulmuştur (endeks hesabı bölüm 4.5'te açıklanmıştır). Araç üretim süresi vaka şirketin 10 yıllık verisinden araç tiplerine göre alınan ortalama değerdir. Aynı şekilde üretim miktarı da vaka şirketin 10 yıllık üretim sayısının ortalaması olarak alınmıştır. Parametre değerlerinin gerçek sistemden alınmış olması modelle gerçek sistem arasında parametre onay testi için uyumlu olduğunu söyleyebiliriz.

Boyutsal tutarlılık testi: Modelde tasarım yükü endeksi (boyutsuz) girdisi ile oluşan karmaşıklık çıktıları her aşamada adam/saat olarak tanımlanmıştır (adetsel girdilerde de üretim adedi, tasarım adedi gibi adam/saate dönüştürülmektedir). Sonuç göstergesi olan verimlilik gereken adam saat ile gerçekleşen adam saatin oranlamasıdır. Böylece önerilen model boyutsal olarak tutarlıdır.

5.5.2 Yapıya Yönelik Davranış Testleri Yapısal davranış testleri, model tarafından oluşturulan modelin davranış kalıpları üzerinde belirli davranış testleri uygulayarak yapının geçerliliğini dolaylı değerlendirir (Barlas 1989b; Forrester ve Senge). Bu testler simülasyonu içerir, amaç olası yapısal kusurları ortaya çıkartmaktır.

Ekstrem durum testi: Vaka Şirketin maksimum ve minimum tasarım yükü değerlerine karşılık gelen model değerleri ile paralellik göstermektedir. (Aşırı koşul durumuna örnek olarak: tasarım yükü endeksinin tanım aralığındaki hiçbir değer için verimlilik %100'ün üzerinde çıkmamıştır veya makul sayılamayacak düşük değerlere düşmemiştir. Örneğin, Vaka Şirketin tarihinde hiçbir durumda verimlilik %80 nin altına düşmemiştir, modelde en düşük Tasarım Yükü değerinde bile bu seviyelerin altı görülmemiştir).

Boyutsal duyarlılık testi: modelin duyarlı olduğu parametreleri belirlemek ve gerçek bu parametrelerde duyarlılık gösterip göstermediğidir. Model yapı itibarı ile Tasarım yükü parametrelerine hassastır. Gerçek tasarım yükü değerlerinin değişim eğrisi ile paralel hareket etmekte ve benzer davranışı sergilemektedir. Model duyarlıdır.

Modifiye davranış tahmini: (geçmiş verileri mevcutsa uygulanabilir). Model, gerçek sistemde olan verilerle test edilmesidir. Model, vaka şirketin gerçek verileri uygulanarak test edilmiş ve benzer sonuçlar bulunmuştur.

Sınır yeterlilik testi: Gerçek sistemin sınırları değiştirildiğinde davranışı da önemli ölçüde değişiyorsa modelin de bu değişiklikleri içermesi gerekir. Modelde yer alan önemli problemler; eksik parça, kalite sorunları, dizayn kaynaklı sorunlar ve tedarik zinciri sorunları modelin sınır değerleri değiştirildiğinde önemli ölçüde değişmemektedir. Örneğin tasarım yükü üst sınırı gerçek sistemde 7,5 iken modelde sınır 7,5 olarak alındığında sistemin davranışında belirgin bir bozulma görülmemektedir Şekil 33. Bu nedenle maksimum tasarım yükü değeri için 9,4 alınmıştır. Minimum tasarım yükü değeri için gerçek değerlerde minimum tasarım yükü olan 4,1'in altında bir değer yoktur bu nedenle modelin bu değerden düşük değerler için sınanması çok mümkün olmamıştır ancak model 3,6 değerine kadar verilerde bozulma görülmemiştir bu nedenle 3,6 değerleri model sınır yeterlilik değeri olarak kabul edilmiştir (bölüm 5.3 de açıklanmıştır). Vaka şirket mevcut olanaklarla ve kapasite ile bu seviyenin üstüne çıkamaz. Daha üst seviyedeki sınır değerleri için diğer değerlerin sonuçlarının değişiminin test edilebileceği veri yetersizliği nedeni ile sınır bu seviyede bırakılmıştır.

Faz ilişkisi testi: modelin çalıştırılması sonucu elde edilen değişkenler arasındaki faz ilişkileri gerçek değerlerle çelişmemeli. Model çalışması ile elde her tasarım yükü aralığı için (faz) edilen faktörlere ait sayısal değerler (tablo değerleri) gerçek modelde gözlemlenen faz ilişkileriyle çelişmemektedir. Şekil 32, 33 34'de model ve gerçek değerlerin benzer faz ilişkileri gösterdiği görülmektedir. Model bu açıdan geçerlidir.

Davranış paterni testi: Sistem dinamiğinde modeller olay tahmininden ziyade, şablon tahmini (frekanslar, dönemler, trendler vb.) üzerinedir (Barlas, 1996). Davranış paterni testinde, model parametreleri değiştirilerek ve hangi parametrelerin oldukça hassas olduğunu gözlemlenir ve daha sonra bu davranışın gerçek sistemle eşleşip eşleşmediğini karşılaştırır. Bu nedenle, model davranışının gerçek sistemle eşleştirilmesinde gerçek geçmiş performans verileri gereklidir.

5.5.3 Davranış Örüntü Testleri

Davranış örüntü testi tahminlerinin doğruluğuna kontrol için uygulanan model yapısı hakkında fazla bilgi vermeyen “zayıf” bir testtir. minimum veya maksimum değer trend vb. gibi davranış özelliklerinin model ve gerçek değerlere ait grafiksel, görsel olarak kıyaslamaktır. Kavramsal model (NDD) örüntüsünden görüleceği gibi model davranışında, hipotezde de belirtildiği gibi tasarım yükünün artması ile tasarım, tedarik ve kalite sorunlarında ve bu sorunlara bağlı olarak eksik parça tamamlama süresinde

gerçek değerlerde benzer artış terendi görülmektedir Şekil 31, 32, 33 Model Davranış Örüntü testi açısından geçerlidir. Bahsi geçen tüm bu sorunların etkisi ile ilave işçilik (kayıp zaman) nedeni ile verimlilikte düşme eğilimi oluşmakta ve bu durum tasarım yükünün belirlenmiş aralıklardaki tüm değerleri için sağlanmaktadır.

5.6. Sistem Karmaşıklığının Ölçümü

Karmaşıklık ölçümü ile, literatürde yapılan çalışmalarda değerlendirilmeler ve modelden elde edilen bulguların ilişkisel ve birleştirici boyutlarını ölçen başka bir yöntemle daha desteklenmesi amaçlanmıştır. Bu nedenle çalışmada, uygulanan Sistem Dinamiği yöntemi ile elde edilen değerlerin çok kriterli karar verme yöntemlerinden TOPSIS yöntemi kullanılarak kriterle arasındaki ilişkiler farklı bir yöntemle doğrulanmıştır.

5.6.1. TOPSIS için Karmaşıklık Faktörlerinin Belirlenmesi

TOPSIS hesaplanmasında önemli girdilerden biride de karmaşıklık faktörlerinin belirlenmesi ve seçimidir. Sistem karmaşıklığının ölçülmesindeki ilk aşamada çalışma modelindeki faktörler esas alınarak karmaşıklık faktörlerinin belirlenmesi şeklinde gerçekleştirilmiştir.

Vogel ve Lash (2018), bir otomotiv şirketinin de konu edildiği ampirik çalışmada, karmaşıklık seviyesinin, teknik endüstrilerde (örneğin otomotiv veya mühendislik), diğerlerine göre daha yüksek bir etkiye sahip olduğunu ve bunlardan en önemlilerinin ürün geliştirme süresi, ürün teslim tarihine uyum, ürün kalitesi, ürün geliştirme maliyetleri olarak ifade etmiştir. Götzfield (2013), bir otomotiv şirketini de incelediği çalışmada karmaşıklık faktörlerini, “dış ve iç karmaşıklık arasındaki ilişkiyi kapsayan ve sistemin karmaşıklığını artırmaya yönlendiren bir görüngü” olarak tanımlamaktadır. Götzfield (2013), bu çalışmada ayrıca karmaşıklık faktörlerinin çoğunun portföy ve ürün karmaşıklığı ile ilgili olduğunu, bunun yanında literatürde müşteri ihtiyaçlarının ayrışıklığı, talep değişkenliği, tedarik tabanının küreselleşmesi ve tedarikçilerin güvenilirmezliği gibi nedenlerin üretim programı istikrarsızlığına neden olduğunu ifade etmiştir. Kohr (2021), bir otomotiv şirketini incelediği ampirik çalışmada, ürünün farklı seviyelerindeki gereksinimlerin müşteri gereksinimleri ile bağlantısını sağlamanın süreçteki en büyük zorluklardan biri olduğundan bahsetmektedir. Pazarın ve müşteri talebinin belirsizliği, teslimat belirsizliğinin (kalite ve zaman) yanında üretim ve montaj süreçlerinde büyük bir çeşitlilik ve buna bağlı belirsizliği ortaya çıkartmaktadır (Kohr,

2021). Otomotiv endüstrinin de içinde olduğu çalışmalarda (Götzfield, 2013; Kohr, 2021; Vogel ve Lash, 2018) bahsedilen karmaşıklık faktörleri Tablo 9’da özetlenmiştir.

Tablo 9: Karmaşıklık Faktörleri ile İlgili Literatür

	(Vogel and Lash, 2018)	(Götzfield, 2013)	(Kohr, 2021)
Genel Pazarla İlgili Karmaşıklık	Pazarın ekonomik faktörleri Çeşitli gereksinimler Pazarın değişimi Rakiplerin sayısı ve gücü Teknolojik ilerleme Eşzamanlı proje miktarı	Müşteri sayısı Küresel müşteri tabanı Müşteri tipi Müşteri siparişleri Teslimat sıklığı Ürün lansmanları	Müşteri sayısı gereksinimlerinin çeşitliliği Müşteri talebinin oynaklığı Siyasi faktörler Yasal faktörler Rekabet dinamikleri
Ürün ve Ürün Portföyü Karmaşıklığı	Ürün yelpazesi / portföy Ürünün yenilik derecesi Ürün yaşam döngüsü uzunluğu	Tedarikçi sayısı Tedarikçi güvenilirliği Ürün tipi Ürün çeşitliliği SKU sayısı	Ürün çeşitliliği Üretim teknolojisinin dinamikleri Ürün yapısı Ürün sayısı Ürün teknolojisinin dinamikleri
Değer Zinciri Süreçleri Karmaşıklığı	Müşteri taleplerinin bireyselliği Rekabet karmaşıklığı Müşteri katılımı	Üretim planlama istikrarsızlığı İnsanlar Özel olmayan ekipman Süreçler Süreç sayısı	Teslimat belirsizliği (zaman/kalite) Organizasyon yapısı Şirket kültürü Çeşitli üretim ve SC süreçleri Tedarikçi sayısı

Sonuç olarak ve yukarıda otomotivle ilgili üç literatür çalışmasından çıkartabilecek ortak bir ifade ile; özellikle tasarım ve üretim yapan şirketlerde karmaşıklık faktörlerini üç ana başlık altında pazar, ürün ve ürün portföyü ve değer zinciri karmaşıklığı altında değerlendirilebileceği görülmektedir. Buradan elde edilecek bulguların ışığında özellikle tasarım ve üretim yapan şirketlerde karmaşıklık faktörlerini üç ana başlık altında “Pazar, ürün ve ürün portföyü, değer zinciri karmaşıklığı altında değerlendirilebileceği görülmektedir Şekil 35.

Yukarıdaki çalışmalara örnek olan otomotiv şirketlerine benzer şekilde üretim ve tasarım faaliyetleri bulunan Vaka Şirketin bu üç ana başlık altında karmaşıklık kriterlerinin değerlendirilmesi ve buradan çıkartımla bu çalışmada ele alınan Pazar ve pazar şatlarına bağlı olarak ürün çeşitliliğinin artması ile yeni ürün yaratma (tasarımı) ürün yelpazesinin

genişlemesi ile değer zincirinde yer alan tedarik zinciri, üretim, kalite süreçlerini etkileyen faktörlerin ele alınmasını destekler niteliktedir.



Şekil 35: Karmaşıklık Faktörleri Özet Çıkartım

Buradan yapılan bir çıkartımla, tasarım, üretim, tedarik zinciri olmak üzere 3 ana başlık altında toplam Sistem Dinamiği modelinde bulunan 8 Faktör belirlenmiştir Tablo 10.

Tablo 10: Çalışmada Kullanılan Karmaşıklık Faktörleri

	Boyutlar	Faktörler	Faktörlerin Üretim karmaşıklığıyla ilişkisi
Ürün Çeşitliliği Daha fazla ürün çeşitliliği, daha fazla tedarikçi oluşturmalarının yanı sıra daha fazla ürün için envanter ve diğer lojistik gereksinimi yaratır	Tasarım Herhangi bir teknolojik yenilik veya değişiklik isteği, Sık değişen müşteri talepleri için geliştirilen yeni üretim hatları, malzemeler, Rakiplerin herhangi bir eylemi, ürün tasarımı, süreçlerde değişiklik yapmayı gerektirir.	Proje Süresi PS Tasarım Yüğü TY Tasarım Kaynaklı Kayıp zaman TZ	Teknolojik yenilik veya değişiklik isteği nedeni ile cari yıl içinde yapılması gereken proje sayısıdır. Teknolojik yenilik, müşteri talepleri; yeni ürün tasarımı, üretim hatları Çeşitlilik nedeni ile ürün tasarımındaki aksaklıklar, karmaşıklığa, yol açar.
	Üretim Çeşitlilik nedeni ile ürün tasarımındaki aksaklıklar, gecikmeler operasyonel karmaşıklığa, teslimat gecikmelerine ve artan üretim maliyetlerine yol açar.	Kalite Kaynaklı Kayıp zaman KS Verimlilik ÜV Tasarım ve Kalite Kaynaklı Kayıp zaman TKK Toplam Kayıp Zaman (Üretim) TKZ	Çeşitlilik, üretilebilirliği ve montaj kabiliyetini büyük ölçüde etkiler. Üreti süreçlerinde değişiklik karmaşıklık seviyesini ve verimliliği etkiler. Üretim süreçlerinde değişiklik kalite seviyesinde düşmeye neden olur. Üretim süreçlerinde değişiklik ürünlerin devreye alınması karmaşıklık seviyesini artırır.
	Tedarik Zinciri Çeşitlenen parça tedariki, lojistik ve ulaşım sistemi karmaşıklık yaratır ve tüm TZ'nin Verimliliğini etkiler.	TZ kaynaklı Ünite Başına Kayıp zaman TZK	Pazarın ve ürünün çeşitlenmesi TZ verimliliğini ve kurumsal karlılığı olumsuz etkiler.

TOPSIS uygulamasında, seçilen bu 8 kriter ile ilgili bilgiler şirket datasından çıkartılarak değişen tasarım yükü değerlerine göre başarı sıralaması yapılmıştır. TOPSIS uygulamasında kullanılacak olan ağırlıklar entropi yöntemi ile hesaplanmıştır.

5.6.2 Entropi ile Kriter Ağırlıklarının Belirlenmesi

Aşama 1: Karar matrisinin oluşturulması: İlk aşamada karar alternatiflerinin belirlenmesi amacı ile formül (1)'e göre (9 alternatif ve 9 parametre sayısı dikkate alınarak) 9x9 boyutunda karar matrisi oluşturulmuştur Tablo 11.

Tablo 11: Karar Matrisi

Sıra	TY	KS	PK	PM	TK	TKZ	TKK	PS	TZK
1	1,00	737,50	4866,60	2259555,00	7585,19	8322,69	8322,69	30979,00	45,60
2	1,70	921,53	5886,50	2689860,40	6346,51	7268,04	7268,04	46074,00	51,21
3	2,40	1105,56	6906,40	3120165,80	5566,85	6672,41	6672,41	61169,00	56,82
4	3,40	1368,46	8363,40	3734887,80	5249,31	6617,77	6617,77	76264,00	64,83
5	4,30	1605,07	9674,70	4288137,60	5764,47	7369,54	7369,54	91359,00	75,04
6	5,30	1867,97	11131,70	4902859,60	7226,82	9094,79	9094,79	106454,00	80,05
7	6,30	2130,87	12588,70	5517581,60	9625,94	11756,81	11756,81	121549,00	88,07
8	7,90	2551,51	14919,90	6501136,80	15413,04	17964,55	17964,55	136644,00	100,89
9	9,50	2972,15	17251,10	7484692,00	23598,30	26570,45	26570,45	151739,00	113,71

TY: Tasarım Yüğü, **KS:** Kalite sorunları, **PK:** Parça Stok Kalem sayısı, **PM:** Parça Stok Tutarı, **TK:** Tasarım Kaynaklı Kayıp Zaman, **TKZ:** Toplam Kayıp Zaman (Üretim), **TKK:** Tasarım ve Kalite, **PS:** Proje Süresi, **TZK:** TZ kaynaklı Ünite Başına Kayıp zaman

Aşama 2: Normalize edilmiş karar matrisi: Karar matrisindeki değişkenlerin karşılaştırılabilir olması için bir normalizasyon süreci gerekmektedir. Bu amaçla (2) formülü kullanılarak parametrelerin normalize değerleri belirlenir ($\tilde{d}_{ij}$), Tablo 12.

Tablo 12: Normalize Karar Matrisi

Sıra	TY	KS	PK	PM	TK	TKZ	TKK	PS	TZK
1	0,02392	0,04833	0,05314	0,05579	0,0878	0,0819	0,0819	0,0377	0,0674
2	0,04067	0,06039	0,06427	0,06642	0,0735	0,0715	0,0715	0,0560	0,0757
3	0,05742	0,07245	0,07541	0,07704	0,0644	0,0656	0,0656	0,0744	0,0840
4	0,08134	0,08967	0,09131	0,09222	0,0608	0,0651	0,0651	0,0928	0,0959
5	0,10287	0,10518	0,10563	0,10588	0,0667	0,0725	0,0725	0,1111	0,1110
6	0,12679	0,12240	0,12154	0,12106	0,0837	0,0895	0,0895	0,1295	0,1184
7	0,15072	0,13963	0,13745	0,13624	0,1114	0,1157	0,1157	0,1478	0,1302
8	0,18900	0,16720	0,16290	0,16053	0,1784	0,1768	0,1768	0,1662	0,1492
9	0,22727	0,19476	0,18835	0,18481	0,2732	0,2614	0,2614	0,1845	0,1682

Aşama 3: Bilgi entropisi: Normalize karar matrisi oluşturulduktan sonra bilgi entropisi (e_j), formül (3) ile elde edilir Tablo 13.

Tablo 13: Entropi Değerleri

Sıra	TY	KS	PK	PM	TK	TKZ	TKK	PS	TZK
1	-0,08930	-0,14642	-0,15595	-0,16102	-0,2136	-0,2049	-0,2049	-0,1235	-0,1818
2	-0,13024	-0,16950	-0,17640	-0,18011	-0,1918	-0,1886	-0,1886	-0,1615	-0,1954
3	-0,16406	-0,19016	-0,19492	-0,19749	-0,1767	-0,1788	-0,1788	-0,1933	-0,2081
4	-0,20409	-0,21625	-0,21856	-0,21982	-0,1702	-0,1779	-0,1779	-0,2205	-0,2248
5	-0,23396	-0,23687	-0,23744	-0,23775	-0,1807	-0,1903	-0,1903	-0,2441	-0,2440
6	-0,26185	-0,25710	-0,25615	-0,25562	-0,2076	-0,2160	-0,2160	-0,2647	-0,2526
7	-0,28521	-0,27490	-0,27277	-0,27157	-0,2445	-0,2495	-0,2495	-0,2826	-0,2655
8	-0,31487	-0,29904	-0,29560	-0,29365	-0,3075	-0,3063	-0,3063	-0,2982	-0,2838
9	-0,33673	-0,31862	-0,31444	-0,31204	-0,3545	-0,3507	-0,3507	-0,3119	-0,2998

$$K=1/\ln(m) \quad 0,45512$$

TY: Tasarım Yüğü, **KS:** Kalite sorunları, **PK:** Parça Stok Kalem sayısı, **PM:** Parça Stok Tutarı, **TK:** Tasarım Kaynaklı Kayıp Zaman, **TKZ:** Toplam Kayıp Zaman (Üretim), **TKK:** Tasarım ve Kalite, **PS:** Proje Süresi, **TZK:** TZ kaynaklı Ünite Başına Kayıp zaman

Aşama 4: Entropi ve sapmanın bulunması: Her bir parametrenin entropi ve sapması formül (3 ve 4 ile) ile hesaplanır Tablo 14.

Tablo 14: Entropi ve Sapmanın Değerleri

	TY	KS	PK	PM	TK	TKZ	TKK	PS	TZK
e_j (kriterlerin Entropi değeri)	0,91949	0,95979	0,96586	0,96898	0,9317	0,9389	0,9389	0,9559	0,9812
d_j (Farklılaşma derecesi)	0,08051	0,04021	0,03414	0,03102	0,0683	0,0611	0,0611	0,0441	0,0188

Aşama 5: Ağırlığın bulunması: Son aşamada, her bir kriterin göreceli entropisini formül (5) yardımı ile bulunur Tablo 15.

Tablo 15: Kriterlerin Ağırlık Değerleri

	TY	KS	PK	PM	TK	TKZ	TKK	PS	TZK
w_j (Kriter Önem Ağırlığı)	0,18330	0,09153	0,07772	0,07061	0,1555	0,1391	0,1391	0,1003	0,0429

Olması gerektiği gibi tüm kriterlerin ağırlık değerlerinin toplamı 1'e eşittir.

5.6.3. TOPSIS ile Sistem Karmaşıklığının Sıralanması

TOPSIS altı aşamada hesaplanmıştır.

Aşama 1: Karar matrisinin oluşturulması: Entropi yönteminde olduğu gibi TOPSIS'te de öncelikle karar matrisi oluşturulur, Tablo 11'de görülen 9x9 boyutunda karar matrisi oluşturulmuştur.

Aşama 2: Normalize edilmiş karar matrisi: Karar matrisindeki değişkenlerin karşılaştırılabilir olması için formül (7)'ye göre bir normalizasyon süreci gerçekleştirmiştir Tablo 16.

Tablo 16: Normalize Edilmiş Karar Matrisi

Sıra	TY	KS	PK	PM	TK	TKZ	TKK	PS	TZK
1	0,06200	0,13368	0,14863	0,15698	0,2258	0,2139	0,2139	0,1040	0,1944
2	0,10540	0,16703	0,17977	0,18688	0,1889	0,1868	0,1868	0,1546	0,2183
3	0,14880	0,20039	0,21092	0,21677	0,1657	0,1715	0,1715	0,2053	0,2422
4	0,21080	0,24804	0,25542	0,25948	0,1562	0,1701	0,1701	0,2559	0,2763
5	0,26660	0,29093	0,29546	0,29792	0,1716	0,1894	0,1894	0,3066	0,3199
6	0,32860	0,33858	0,33996	0,34062	0,2151	0,2337	0,2337	0,3573	0,3412
7	0,39060	0,38623	0,38446	0,38333	0,2865	0,3021	0,3021	0,4079	0,3754
8	0,48981	0,46248	0,45565	0,45166	0,4587	0,4616	0,4616	0,4586	0,4301
9	0,58901	0,53872	0,52685	0,51999	0,7023	0,6828	0,6828	0,5092	0,4847

Aşama 3: Ağırlıklı normalize matris: Normalize matristeki değerler, entropi yönteminde hesaplanmış olan Tablo 15'deki ağırlık değerleri normalize karar matrisindeki değerlerle formül (8)'e göre işlem görerek Tablo 17'da görülen ağırlıklı normalize matris elde edilir.

Tablo 17: Ağırlıklı Normalize Matris

Sıra	TY	KS	PK	PM	TK	TKZ	TKK	PS	TZK
1	0,01136	0,01224	0,01155	0,01108	0,0351	0,0297	0,0297	0,0104	0,0083
2	0,01932	0,01529	0,01397	0,01320	0,0294	0,0260	0,0260	0,0155	0,0094
3	0,02728	0,01834	0,01639	0,01531	0,0258	0,0238	0,0238	0,0206	0,0104
4	0,03864	0,02270	0,01985	0,01832	0,0243	0,0236	0,0236	0,0257	0,0118
5	0,04887	0,02663	0,02296	0,02104	0,0267	0,0263	0,0263	0,0308	0,0137
6	0,06023	0,03099	0,02642	0,02405	0,0334	0,0325	0,0325	0,0358	0,0146
7	0,07160	0,03535	0,02988	0,02707	0,0445	0,0420	0,0420	0,0409	0,0161
8	0,08978	0,04233	0,03541	0,03189	0,0713	0,0642	0,0642	0,0460	0,0184
9	0,10796	0,04931	0,04094	0,03672	0,1092	0,0950	0,0950	0,0511	0,0208

Aşama 4: İdeal ve negatif-ideal değerler: İdeal (fayda kriterleri ile ilişkili) ve negatif-ideal (maliyet kriterleri ile ilişkili) çözümler, ağırlıklı normalleştirilmiş karar matrisindeki her sütun için bulunan en iyi ve en kötü değerler Tablo 18'de gösterilmiştir.

Tablo 18: İdeal ve Negatif-İdeal Değerler

En İyi ve En kötü	TY	KS	PK	PM	TK	TKZ	TKK	PS	TZK
V+	0,0646	0,06029	0,05914	0,05847	0,07666	0,07496	0,07496	0,05696	0,054843
V-	0,01156	0,01869	0,02018	0,02101	0,01705	0,01867	0,01867	0,01729	0,024699

Aşama 5: İdeal ve negatif-ideal değerlere uzaklık: En çok tercih edilen alternatif, ideal çözüme en yakın olan ve negatif-ideal çözümden en uzak seçenek olmalıdır (Hwang ve Yoon, 1981). Her seçeneğin ideal ve negatif ideal çözümlere olan uzaklığını ölçmek için n-boyutlu Öklid uzaklığı kullanılır (Hwang ve Yoon, 1981), bunun için her bir alternatifin ideal değere uzaklığı formül (9 ve 10)’e göre bulunur.

Uygulanan analiz Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) yöntemlerinden TOPSIS yöntemine göre yapıldığından bütün kriter değerleri ağırlıklarına göre dikkate alındığında genel performans sıralaması Tablo 18’de verilmiştir

Aşama 6: İdeal çözüme göreli yakınlık ve tercih sıralaması: Son olarak, göreli yakınlık indeksi C_i^* , (Performans Skoru) Formül (11)’e göre hesaplandığında Tablo 18’deki değerler elde edilmiştir. Tabloda ayrıca C_i^* değeri (performans değeri) en yüksek den düşüğe göre sıralanmıştır.

Yapılan TOPSIS analizi sonucunda Tablo 19’da görüldüğü gibi tasarım yükünün en küçük değeri ideal çözümü temsil etmektedir. Farklı bir şekilde ifade edersek bu performans skorunun en yüksek değeri TY’de en küçük değere karşılık gelirken verimlilikte de en yüksek sonucu vermektedir.

Tablo 19: İdeal ve Negatif-İdeal Değerlere Uzaklık

En İyi olandan uzaklık	Si+	Si-	TY	Performans skor C_i^*
1	0,172	0,167	1,0	0,4934
2	0,171	0,166	1,7	0,4933
3	0,168	0,163	2,4	0,4931
4	0,161	0,156	3,4	0,4924
5	0,151	0,146	4,3	0,4914
6	0,136	0,130	5,3	0,4892
7	0,115	0,109	6,3	0,4848
8	0,074	0,063	7,9	0,4592
9	0,041	0,012	9,5	0,2329

Tablo 19'dan görüleceği gibi üretim sistemindeki karmaşıklığın tasarım yükü ile doğru orantılı olduğu görölmektedir. Başka bir ifadeyle, tasarım yükü arttıkça sistemin karmaşıklığı da artış göstermektedir.

Bu çalışmada çok kriterli karar verme yöntemlerinden TOPSIS yöntemi ile 8 adet vaka şirket performans göstergeleri kullanılarak tasarım yükünün etkileri değerlendirilmiş ve bu performans skorlarına göre kriterler sıralanmıştır. Yapılmış olan analiz sonucunda tasarım yükünün minimum olması durumunda ideal durum olduğu belirlenirken şirketin stratejik hedeflerine uygun olarak karar vericilerin hedefler ve ideal durum arasında bir optimum durumuna karar vermeleri gerekmektedir. TOPSIS yöntemi ile bulunan sıralama tasarım yükü ile istenmeyen kriterler arasında ilişki olduğunu göstermektedir. Başka bir ifadeyle, tasarım yükü arttıkça sistemin karmaşıklığı da artış göstermektedir bu durum model çıktılarını desteklemektedir.

SONUÇ VE ÖNERİLER

Otomotiv sektöründeki rekabet ürün çeşitliliğinin artmasını tetiklerken bunun bir sonucu olarak ürün yaşam döngüsünün kısalması firmaları ürün çeşitlendirme sarmalına itmektedir. Bu durum, işletmeleri pazar gereksinimini karşılamak için ürün çeşitliliğini arttırmaya zorlarken, diğer yandan çeşitliliğin yarattığı problemleri kontrol altında tutma gerekliliği doğurmaktadır. Pazarda büyüme ve kârlılık amaçlayan şirketlerin çeşitlilik kaynaklı karmaşıklıkların üstesinden gelerek, kazançları ve maliyetleri dengelemesi gerekmektedir.

Çeşitliliğin yarattığı sorunlardan en fazla etkilenen süreçlerden biri olan tasarım süreci şeffaf değildir ve bu süreçte ortaya çıkan sorunlar diğer süreçleri dengesizliğe itmektedir. Bu durum sistemi büyük ölçüde karmaşık yapmakta ve diğer süreçlerde öngörülemeyen sorunlara neden olmaktadır. Değişen pazar ve rekabet şartları çeşitliliği teşvik etse de kazanç ve kayıplar arasındaki gerekli kombinasyonu oluşturacak stratejik kararların alınması gerekmektedir. Bu noktada her şirket kendine uygun bir yöntem geliştirmelidir.

Şirketler, ürün çeşitliliği ile yaratılan pazar payı artışı ve gelir üzerindeki olumlu etkilerinden faydalanırken ürün çeşitliliğinin oluşturduğu karmaşıklığı en düşük seviyeye indirmekten ziyade çeşitliliğin yarattığı faydalar ve neden olduğu yükler arasında optimum kombinasyonu yaratmak zorundadır. Literatürde ürün çeşitliliği ve karmaşıklığın optimizasyonu, yalın yönetim, ürün platformu, modüler üretim, kitlesel kişiselleştirme, endüstri 4.0 gibi konular kapsamlı bir şekilde tartışılrsa da bir şirketin erken karar verme aşamasında ürün çeşitliliğini ve karmaşıklığı yönetmeye ilişkin kapsamlı bir teori henüz sunulmamıştır. Bu çalışma, ürün çeşitliliği ve karmaşıklık yönetiminde erken karar verme ve değerlendirme yaklaşımı ile önceki araştırmaları genişletmeyi amaçlamaktadır.

Çalışmanın literatüre katkıları şu şekilde özetlenebilir. Öncelikle literatürdeki çalışmalardan farklı olarak bu çalışmada binek otomobil üretim sistemleri değil, kısa serili üretim yapan ve binek otomobil üretim yöntemi yapısı olarak farklılıklar gösteren otobüs üretim sistemleri incelenmiş ve bir vaka şirketi üzerinden ürün çeşitliliği ve karmaşıklığın süreçlere etkisi analiz edilmiştir. Çalışmanın bir diğer önemli katkısı benimsenen bütüncül bakış açısından kaynaklanmaktadır. Sistem dinamiği yaklaşımı ile hem ürün çeşitliliğinin tasarım, üretim ve tedarik süreçlerine etkileri incelenebilmiş hem

de oluşturulan simülasyon modeli ile ürün çeşitliliğindeki bir değişimin diğer süreçler üzerindeki etkileri simüle edilebilmiştir. Oluşturulan sistem dinamiği model ile ürün çeşitliliğindeki artışın tasarım departmanı üzerinde oluşturduğu zaman baskısı ve bu baskının diğer süreçlere etkisi analiz edilmiştir. Çalışmanın bir başka potansiyel katkısı ise üretim sisteminin karmaşıklığını ölçmek amacıyla önerilen ve çok kriterli karar verme tekniklerine dayalı iki aşamalı yöntemdir. İlk aşamada karmaşıklığa etki eden ve sistem dinamiği modelinde yer alan kriterlerin ağırlıklarını belirlemek amacıyla Entropi yöntemi kullanılmıştır. İkinci aşamada ise belirli tasarım yükleri altındaki karmaşıklık seviyelerini ölçmek ve sıralamak amacıyla TOPSIS kullanılmıştır. Önerilen bu yöntem ile bir üretim sistemin karmaşıklığının pratik bir şekilde ölçülebilmesi amaçlanmıştır. Son olarak bu çalışma, karmaşıklık yönetimi teorisine ve literatürüne üretim yönetimi, tedarik zinciri yönetimi ve ürün portföyü optimizasyonu, tasarım yönetimi gibi çeşitli disiplinlerle ilgili katkıda bulunmaktadır. Böylece araştırma, çeşitliliğin neden olduğu karmaşıklığın yönetimi için çözümler sağlamak için disiplinler arası çalışan araştırmacılara katkı sağlayabilir.

Çalışmanın uygulamaya katkısı ise, önerilen sistem dinamiği modeli ile işletmelerin ürün çeşitliliğindeki artışın diğer süreçlere olası etkilerini görebilmeleri ve simüle edebilmelerine yardımcı olmaktır. Nitekim optimal ürün çeşitliliğine karar verme aşamasında işletmeler pazar payındaki olası artışın yanı sıra bu kararın tasarım, üretim ve tedarik süreçlerine olumsuz etkilerini analiz edebilmelidir. Çalışma kapsamında önerilen modelin, karar vericilere uygun ürün çeşitliliği ve tasarım yükü belirleme noktasında yardımcı olması beklenmektedir. Model her ne kadar bir otobüs üretim sistemi için geliştirilmiş olsa da benzer özellikler taşıyan farklı kısa serili üretim yapan işletmeler tarafından da bazı küçük değişikliklerle kullanılabilir. Geliştirilen model işletmelerin değer zincirine bir bütün olarak bakmasını da sağlamaktadır. Her ne kadar bir firma bir ürün çeşitliliği ve karmaşıklık yönetimine ilişkin bireysel bir çaba gösterse ve uygulamanın başarısı büyük ölçüde yönetim önceliğine, örgütsel birlikteliğe ve fonksiyonların katılımına bağlı olsa da bu ön koşulların gerçekleştirilmesinden sonra ürün çeşitliliğini ve karmaşıklığı optimize etmek için ürün yapısı ve değer- zinciri süreçleri konusunda gerçekleştirilecek faaliyetler büyük bir önem arz eder. Modelde ürün çeşitliliğine ilişkin bir kararın sadece işletme içini değil, değer zincirinde yer alan

tedarikçileri ve satış sonrası faaliyetlerini de kapsayabiliyor olması, işletmelere bu bütüncül bakış açısını sağlayabilir.

Çalışmanın potansiyel katkılarının yanı sıra bazı kısıtlarının olduğuna da değinmek gerekmektedir. Vaka şirketine özgü model oluşturma sürecinde hem işletmenin bilgilerinin gizliliği hem de bazı bilgilere net olarak ulaşamaması nedeni model haritasına bazı süreçler dâhil edilmemiştir. Bu çalışmada sadece operasyonel verilere odaklanılarak ürün çeşitliliğinin verimliliğe etkisi dikkate alınmış ancak maliyetlerdeki ve gelirdeki etkisi göz ardı edilmiştir. Ayrıca, geliştirilen sistem dinamiği modelinde, vaka şirketinde karmaşıklık ölçütleri olarak görülen etkilenen parça sayısı, tedarik süreleri veya tedarik edilen parçalardaki fiyat artışı, minimum sipariş adet zorunluluğundan elde kalacak parça sayısı ve maliyeti ve yatırım gereksinimi (stok veya üretim hattında yapılacak kapsamlı yatırım), her ne kadar bu süreçleri etkilese de kapsam dışında bırakılmıştır.

Çalışmada geliştirilen model orta ve büyük ölçekli üretim sistemleri için tasarlanmıştır. Bu şirketler tekrar eden yapısal problemlerle karakterize edilen üretim yapmaktadır. Bu şirketlerde değişim daha yavaştır ve sorunları gidermek için yatırım yapacak finansal güce sahiptir. Farklı bir sektördeki veya büyüklükteki bir işletme için modelin revize edilmesi gerekebilir. Son olarak, bu çalışmada bahsi geçen üretim sistemi incelemesi ekipman kullanımı düzeyinde değil, bir sistemde süreçlerin dinamik olarak birbirini nasıl etkilediğini gösteren bir yapıda tanımlanmaktadır.

Mevcut çalışmadan yola çıkarak gelecek çalışmalar için bazı öneriler sunulabilir. Önerilen modelin ileriki çalışmalarda satış sonrası, müşteri memnuniyeti ve envanter sistemlerini de dahil edecek şekilde geliştirilmesi modelin kapsamını genişletilebilir. Ürün çeşitliliğinin stok politikalarına (tedarik edilen parçalardaki fiyat artışı, minimum sipariş adet zorunluluğundan elde kalacak parça maliyeti vs.) ve satış sonrası hizmet maliyetlerine etkisinin incelenmesi modelin kapsamını artıracaktır. Ayrıca, çalışmanın kısıtlarında da belirtildiği gibi, bu çalışmada ürün çeşitliliğinin sağladığı gelir artışı ile neden olduğu maliyetler araştırma modeline dâhil edilmemiştir. Eğer ürün çeşitliliğinin parasal boyutları da dikkate alınabilseydi oluşturulan model şirketin kârını maksimum yapabilecek en uygun tasarım yükünü önerebilirdi. Bu konu da ileriki çalışmalar için yol gösterici olabilir.

Çalışmadan uygulamacılar için bazı pratik öneriler çıkartılabilir. Her firma, sistem veya problem benzersizdir. Bu çalışmada sunulan model her ne kadar var olan bir sistemin doğrulanmış kopyası ise de bu modelin farklı bir problem veya firma üzerinde uygulanması durumunda modelin uygulanacağı firmanın stratejik öncelikleri, problemin yapısı, yaratılmak istenen sistemdeki unsurların ilişkileri oldukça önem arz etmektedir.

Model, problemin ve kapsamının yapısına, kısıtlarına ve belirsizlik seviyesine, ihtiyaç duyulan bilgi seviyesine ve sonuçları kullanacak karar alıcılara göre farklılık arz eder. Karmaşıklık modellemede tüm firmalar için geçerli olacak kesin bir çözüm yoktur ve her firma kendi benzersiz modelini oluşturmalıdır. Bu nedenle sunulan model esnek olarak hazırlanmış, modeldeki unsurların azaltılması, çoğaltılması, kapsamının genişletilmesi ile farklı problemlerde kullanılması mümkündür. Aynı şekilde, unsurlar arasındaki matematiksel ilişkiler her firmaya özgüdür ve bu ilişkilerin tespit edilip modele yerleştirilmesi gerekir.

Modeldeki geliştirme süreci sürekli dir. Her uygulama aşamasından sonra geliştirmeler ve düzenlemeler ile modelin kapsam ve içerik olarak mükemmelliğe doğru yol alması amaçtır. Bu nedenle hedeflenen doğruluğa ulaşmayı garanti edebilmek için geri besleme eylemleri önemli kazanmaktadır.

Model tanımlanan kriterler ve ilişkilerine göre bir çıktı seti oluştursa da değerlendirme ile seçim birbirinden farklıdır. Model, farklı firmalara aynı sonuçları sunsa bile firmaların stratejik öncelikleri veya yöneticilerin risk alma isteklerine göre değerlendirme ve kararları farklı olacaktır. Neticede seçim bir yargının sonucudur ve sonuçlara objektif değer yargıları ile yaklaşmak gereklidir.

Özetle, bu araştırma, çeşitliliğin neden olduğu karmaşıklığı tasarım departmanı yükü üzerinden değerlendirme konusunda bir bakış açısı sağlar. Bu bakış açısı ile literatürde karmaşıklık konusunda bolca sunulan optimizasyon paradigmaları ile bütünsel bir karmaşıklık yönetimi önerilebilir. Sonuç olarak, yönetimin pazar avantajı sağlamak amacı ile ürün çeşitliliğini ne ölçüde arttıracaklarını anlamak için performans iyileştirme ölçütleri derinlemesine araştırılmalıdır.

KAYNAKÇA

- Abdelkafi, N. (2008). *Variety induced complexity in mass customization: Concepts and management* (Vol. 7). Erich Schmidt Verlag GmbH & Co KG.
- Adami, C., & Cerf, N. J. (2000). Physical complexity of symbolic sequences. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 137(1-2), 62-69.
- Adane, T. F., & Nicolescu, M. (2014). *System dynamics analysis of energy usage: case studies in automotive manufacturing*. *International Journal of Manufacturing Research* 5, 9(2), 131-156.
- Adler, P. S. (1995). Interdepartmental interdependence and coordination: The case of the design/manufacturing interface. *Organization science*, 6(2), 147-167.
- Aggeri, F., & Segrestin, B. (2007). Innovation and project development: an impossible equation? Lessons from an innovative automobile project development. *R&D Management*, 37(1), 37-47.
- Ahsan, K., & Gunawan, I. (2014). Analysis of product recalls: Identification of recall initiators and causes of recall. *Operations and Supply Chain Management: An International Journal*, 7(3), 97-106.
- De Toni, A. F., Nardini, A., Nonino, F., & Zanutto, G. (2001). Complexity measures in manufacturing systems. In *Proc. of the European Conf. on Complex Systems, Paris, France* (pp. 14-18).
- Amabile, T. M., Mueller, J. S., Simpson, W. B., Hadley, C. N., Kramer, S. J., & Fleming, L. (2002). Time pressure and creativity in organizations: A longitudinal field study.
- Ameri, F., Summers, J. D., Mocko, G. M., & Porter, M. (2008). Engineering design complexity: An experimental study of methods and measures. *Res. Eng. Des.*, 19(2-3), 161-179.
- Andrews, J., & Smith, D. C. (1996). In search of the marketing imagination: Factors affecting the creativity of marketing programs for mature products. *Journal of marketing research*, 33(2), 174-187.
- Antani, K. R. (2014). *A study of the effects of manufacturing complexity on product quality in mixed-model automotive assembly*. (Doctoral dissertation, Clemson University).
- Baer, M., & Oldham, G. R. (2006). The curvilinear relation between experienced creative time pressure and creativity: moderating effects of openness to experience and support for creativity. *Journal of Applied Psychology*, 91(4), 963.
- Baldwin, C. Y., Clark, K. B., & Clark, K. B. (2000). *Design rules: The power of modularity* (Vol. 1). MIT press.

- Barclay, I., & Dann, Z. (2000). New-product-development performance evaluation: a product-complexity-based methodology. *IEE Proceedings-Science, Measurement and Technology*, 147(2), 41-55.
- Barlas, Y. (1996). Formal aspects of model validity and validation in system dynamics. *System Dynamics Review: The Journal of the System Dynamics Society*, 12(3), 183-210.
- Barlas, Y., & Carpenter, S. (1990). Philosophical roots of model validation: two paradigms. *System Dynamics Review*, 6(2), 148-166.
- Bar-Yam, Y. (2002). *General features of complex systems*. Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS), UNESCO, EOLSS Publishers, Oxford, UK, 1.
- Beamish, P. W., & Bapuji, H. (2008). Toy recalls and China: Emotion vs. evidence. *Management and Organization Review*, 4(2), 197-209.
- Bednar, S., & Salanci, V. (2016). Product variety induced complexity and its measurement. *Acta Technologia*, 2(2), 5-9.
- Bednar, S., & Modrak, J. (2015). Product variety management as a tool for successful mass customized product structure. *Polish Journal of Management Studies*, 12(1), 16-25.
- Bednar, S., & Modrak, V. (2014). Mass customization and its impact on assembly process' complexity. *International Journal for Quality Research*, 8(3).
- Bednar, S., Modrak, J., & Soltysova, Z. (2017). Assessment of assembly process complexity and modularity in mass customized manufacturing. In *International Conference on Advanced Manufacturing Engineering and Technologies* (pp. 245-256). Springer, Cham.
- Beitz, W., Pahl, G., & Grote, K. (1996). Engineering design: a systematic approach. *Mrs Bulletin*, 71.
- Bekmezci, M. (2018). Kitlesel kişiye özel üretim ve uygulama yöntemleri.
- Bliss, C. (2000). *Management of complexity. (Management von Komplexität)*. University Wiesbaden, Muenster.
- Bonev, M., Hvam, L., Clarkson, J., & Maier, A. (2015). Formal computer-aided product family architecture design for mass customization. *Computers in industry*, 74, 58-70.
- Boulding, K. E. (1956). *The image: Knowledge in life and society* (Vol. 47). University of Michigan press.
- Bozarth, C. C., Warsing, D. P., Flynn, B. B., & Flynn, E. J. (2009). The impact of supply chain complexity on manufacturing plant performance. *Journal of Operations Management*, 27(1), 78-93.

- Brabazon, P. G., & MacCarthy, B. L. (2017). The automotive Order-to-Delivery process: How should it be configured for different markets? *European Journal of Operational Research*, 263(1), 142-157.
- Buergin, J., Blaettchen, P., Qu, C., & Lanza, G. (2016). Assignment of customer-specific orders to plants with mixed-model assembly lines in global production networks. *Procedia CIRP*, 50, 330-335.
- Caridi, M., Pero, M., & Sianesi, A. (2009). The impact of NPD projects on supply chain complexity: an empirical research. *International Journal of Design Engineering*, 2(4), 380-397.
- Ceglarek, D., & Shi, J. (1995). Dimensional variation reduction for automotive body assembly. *Manufacturing Review*, 8(2).
- Ceglarek, D., Huang, W., Zhou, S., Ding, Y., Kumar, R., & Zhou, Y. (2004). Time-based competition in multistage manufacturing: Stream-of-variation analysis (SOVA) methodology. *International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, 16(1), 11-44.
- Chaitin, G. J. (1966). On the length of programs for computing finite binary sequences. *Journal of the ACM (JACM)*, 13(4), 547-569.
- Chapman, R., & Hyland, P. (2004). Complexity and learning behaviors in product innovation. *Technovation*, 24(7), 553-561.
- Chatras, C., Giard, V., & Sali, M. (2015). High variety impacts on Master Production Schedule: a case study from the automotive industry. *IFAC-PapersOnLine*, 48(3), 1073-1078.
- Chrysosolouris, G., Mavrikios, D., & Mourtzis, D. (2013). Manufacturing systems: skills & competencies for the future. *Procedia CIRP*, 7(2013), 17-24.
- Cilliers, P., & Spurrett, D. (1999). Complexity and post-modernism: Understanding complex systems. *South African Journal of Philosophy*, 18(2), 258-274.
- Cleveland, J. (1994). Complexity theory: Basic concepts and application to systems thinking. *Innovation network for communities*, 27.
- Coccia, M. (2020). Comparative critical decisions in management. Global Encyclopedia of Public Administration, Public Policy, and Governance. Springer Nature Switzerland AG.
- Closs, D. J., Nyaga, G. N., & Voss, M. D. (2010). The differential impact of product complexity, inventory level, and configuration capacity on unit and order fill rate performance. *Journal of Operations Management*, 28(1), 47-57.
- Cohen, Y., Naseraldin, H., Chaudhuri, A., & Pilati, F. (2019). Assembly systems in Industry 4.0 era: a road map to understand assembly 4.0. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 105(9), 4037-4054.

- Coombs, C. H. A, *Theory of Data*, UK: John Wiley and Sons, 1964. Daft, R.L., *Management*. 2nd Edition, USA: The Dryden Press, 1991, s.179.
- Cooper, R. G. (2019). The drivers of success in new-product development. *Industrial Marketing Management*, 76, 36-47.
- Corbett, L. M., Brockelsby, J., & Campbell-Hunt, C. (2002). Tackling industrial complexity. Tackling Industrial Complexity. *Institute for Manufacturing, Cambridge*, 83-96.
- Crespo-Varela, J. R., Okudan Kremer, G. E., Tucker, C. S., & Medina, L. A. (2012). *An analysis of complexity measures for product design and development*. In International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference (Vol. 45028, pp. 523-532). American Society of Mechanical Engineers.
- Crippa, R., Larghi, L., Pero, M., & Sianesi, A. (2010). The impact of new product introduction on supply chain ability to match supply and demand. *International Journal of Engineering, Science and Technology*, 2(9).
- Crutchfield, J. P. (1990). Complexity: order contra chaos. In *Proceedings of the International Conference on Fuzzy Logic and Neural Networks, Iizuka, Japan* (S. Yasui, T. Yamakawa, eds.). World Scientific, Singapore.
- Çil, İ., Karaduman, E., Özçetin, K. N., & İpek, M. (2018). Bir tekstil firmasında satış tahminleri üzerinden emniyet stoğu gün sayısının sistem dinamiği yaklaşımıyla belirlenmesi. *Sakarya University Journal of Science*, 22(2), 826-837.
- Danne, C. (2009). Assessing the cost of assortment complexity in consumer goods supply chains by reconfiguration of inventory and production planning parameters in response to assortment changes. *Tagungsband zum Doctoral Consortium der WI* 2009, 24.
- Deng, H., Yeh, C. H., & Willis, R. J. (2000). Inter-company comparison using modified TOPSIS with objective weights. *Computers & Operations Research*, 27(10), 963-973.
- Deshmukh, A. V., Talavage, J. J., & Barash, M. M. (1998). Complexity in manufacturing systems. Part 1: Analysis of static complexity. *IIE transactions*, 30(7), 645-655.
- DGarvin, D. A., & Roberto, M. A. (2001). What you don't know about making decisions. *Harvard business review*, 79(8), 108-119.
- Doukas, M. (2016). *Development of methods and tools for the design and operation of manufacturing networks for mass customisation*. (Doctoral dissertation)
- Duggan, J. (2016). *System dynamics modeling with R*. Springer International Publishing.

- Efthymiou, K., Pagoropoulos, A., Papakostas, N., Mourtzis, D., & Chryssolouris, G. (2012). Manufacturing systems complexity review: challenges and outlook. *Procedia CIRP*, 3, 644-649.
- Efthymiou, K., Sipsas, K., Mourtzis, D., & Chryssolouris, G. (2015). On knowledge reuse for manufacturing systems design and planning: A semantic technology approach. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 8, 1-11.
- Ekinci E. (2016). Modelling and analysis of complexity in service Systems. *Graduate School of Natural and Applied Sciences of Dokuz Eylül University In Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Doctor of Philosophy in Industrial Engineering, Industrial Engineering Program*
- Ekinci, E., & Baykasoglu, A. (2016). Modelling complexity in retail supply chains. *Kybernetes*.
- Eleren, A., & Karagül, M. (2008). 1986-2006 Türkiye Ekonomisinin Performans Değerlendirmesi. *Yönetim ve Ekonomi: Celal Bayar Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 15(1), 1-14.
- ElMaraghy, H., AlGeddawy, T., Samy, S. N., & Espinoza, V. (2014). A model for assessing the layout structural complexity of manufacturing systems. *Journal of Manufacturing Systems*, 33(1), 51-64.
- ElMaraghy, W. H., & Meselhy, K. T. (2009). Quality and maintainability frameworks for changeable and reconfigurable manufacturing. In *Changeable and Reconfigurable Manufacturing Systems* (pp. 321-336). *Springer, London*.
- ElMaraghy, W., ElMaraghy, H., Tomiyama, T., & Monostori, L. (2012). Complexity in engineering design and manufacturing. *CIRP annals*, 61(2), 793-814.
- Feldman D. P., Crutchfield J. P., (1998) Measures of Statistical Complexity: Why? *Phys. Lett. A*, Vol 238, pp 244-252, 1998.].
- Fisher, M. L., & Ittner, C. D. (1999). The impact of product variety on automobile assembly operations: Empirical evidence and simulation analysis. *Management science*, 45(6), 771-786.
- Fisher, M. L., Jain, A., & MacDuffie, J. P. (1995). Strategies for product variety: lessons from the auto industry. *Redesigning the firm*, 116-154.
- Flood, R. L., & Carson, E. R. (2013). *Dealing with complexity: an introduction to the theory and application of systems science*. Springer Science & Business Media.
- Forrester, J. W. (1968). Industrial dynamics—after the first decade. *Management Science*, 14(7), 398-415.
- Forrester, J. W. (2007). System dynamics—the next fifty years. *System Dynamics Review: The Journal of the System Dynamics Society*, 23(2-3), 359-370.

- Frizelle, G., & Woodcock, E. (1995). Measuring complexity as an aid to developing operational strategy. *International Journal of Operations & Production Management*.
- Fujimoto, H., Ahmed, A., Iida, Y., & Hanai, M. (2003). Assembly process design for managing manufacturing complexities because of product varieties. *International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, 15(4), 283-307.
- Garbie, I. (2016). Competitive manufacturing strategies. In sustainability in manufacturing enterprises. (pp. 51-72). *Springer, Cham*.
- Garbie, I. H. (2013). DFSME: Design for sustainable manufacturing enterprises (an economic viewpoint). *International Journal of Production Research*, 51(2), 479-503.
- Gell-Mann M., Crutchfield J. P., (2004). *Computation in Physical and Biological Systems Measures of Complexity*. Available on <http://www.santafe.edu/research/measuringComplexity.php>
- Gembarski, P. C., & Lachmayer, R. (2017). How rule-based systems impact product complexity. *Annals of the Faculty of Engineering Hunedoara-International Journal of Engineering*, 15(1).
- Gießmann, M. (2010). Complexity management in logistics. causal analytical study on the influence of procurment complexity on the logistics success.
- Götzfried, M. (2013). Managing complexity induced by product variety in manufacturing companies. (*Doctoral dissertation, PhD thesis, University of St. Gallen*).
- Grassberger, P. (1991). Information and complexity measures in dynamical systems. In Information dynamics. (pp. 15-33). *Springer, Boston, MA*.
- Greitemeyer, J., & Ulrich, T. (2006). Komplexitätsmanagement im Mittelstand. *Scope*. April, 8-9.
- Gonçalves, J. N., Cortez, P., Carvalho, M. S., & Frazão, N. M. (2021). A multivariate approach for multi-step demand forecasting in assembly industries: Empirical evidence from an automotive supply chain. *Decision Support Systems*, 142, 113452.
- Guimaraes, T., Martensson, N., Stahre, J., Igbaria, M. (1999). *Empirically testing the impact of manufacturing system complexity on performance*. *International Journal of Operations & Production Management*, 19(12), 1254-1269, 1999.
- Güneş, V. (2016) Postmodern pazarlama unsurlarının sanal oyunlar üzerinden tüketicide bıraktığı etki: pokemon go örneği.
- Haarhaus, T., & Liening, A. (2020). Building dynamic capabilities to cope with environmental uncertainty: The role of strategic foresight. *Technological Forecasting and Social Change*, 155, 120033.

- H. Schleich, J. Schaffer, L. F. Scavarda. (2007). Managing complexity in automotive Production. *Proceedings of the 19th International Conference on Production Research*.
- Harker, P. T., & Vargas, L. G. (1987). The theory of ratio scale estimation: Saaty's analytic hierarchy process. *Management science*, 33(11), 1383-1403.
- Hsiao, S. W., Wang, M. F., & Chen, C. W. (2017). Time pressure and creativity in industrial design. *International Journal of Technology and Design Education*, 27(2), 271-289.
- Hu, S. J. (2013). Evolving paradigms of manufacturing: From mass production to mass customization and personalization. *Procedia Cirp*, 7, 3-8.
- Hwang, C. L., & Yoon, K. (1981). Methods for multiple attribute decision making. In Multiple attribute decision making. (pp. 58-191). *Springer, Berlin, Heidelberg*.
- Ittner, C. D., & Macduffie, J. P. (1995). Explaining plant-level differences in manufacturing overhead: Structural and executional cost drivers in the world auto industry. *Production and Operations Management*, 4(4), 312-334.
- Jacob Ziv, (1997). "A conversation with Jacob Ziv"
- Jacobs, M. A., & Swink, M. (2011). Product portfolio architectural complexity and operational performance: Incorporating the roles of learning and fixed assets. *Journal of Operations Management*, 29(7-8), 677-691.
- Janse van Rensburg, A. C. (2012). Can complexity analysis support business performance insight?
- J.D. Power 19 June 2013. Eriřim adresi: <https://www.jdpower.com/business/press-releases/2013-jd-power-initial-quality-study-iqs> (Eriřim tarihi: 01/03/2019).
- Jetin, B. (2018). The historical evolution of product variety in the auto industry: An international comparative study. In *Coping with variety* (pp. 111-146). *Routledge*.
- Johansson, B. (2002). Discrete Event Simulation–present situation and future potential. Department of Product and Production Development. *Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden*.
- Kabasakal, I., Keskin, F. D., Ventura, K., & Soyuer, H. (2017). From mass customization to product personalization in automotive industry: potentials of industry 4.0. *J. Manage. Market. Logistics*, 4(3), 244-250.
- Kaluza, B., Bliem, H., & Winkler, H. (2006). Strategies and metrics for complexity management in supply chains. Complexity Management in Supply Chains. *Erich Schmidt Verlag, Göttingen*, 3-19.
- Kang, T., Lim, C., Delaurentis, D., & Mavris, D. (2003, July). A system dynamics model of the development cycle for future mobility vehicles. In *Proceedings of the 21st*

- Karau, S. J., & Kelly, J. R. (2004). Time pressure and team performance: An attentional focus integration. *Research on managing groups and teams*, 6, 185-212.
- Karayazi, F., & Cedimoğlu, İ. (2015). Ürün varyant konfigürasyon yönetiminin ürün ağacı ve hataları üzerindeki etkilerinin incelenmesi. *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 19(2), 187-196.
- Karci, A., & Bilgiç, F. (2019). Karıcı ve Shannon Entropilerin Karşılaştırılması. *Bilgisayar Bilimleri*, 4(2), 68-73.
- Keckl, S., Kern, W., Abou-Haydar, A., & Westkämper, E. (2016). An analytical framework for handling production time variety at workstations of mixed-model assembly lines. *Procedia CIRP*, 41, 201-206.
- Kelly, J. R., & Karau, S. J. (1999). Group decision making: The effects of initial preferences and time pressure. *Personality and Social Psychology Bulletin*, 25(11), 1342-1354.
- Keuper, F. (2003). Kybernetische Simultaneitätsstrategie: Systemtheoretisch-kybernetische Navigation im Effektivitäts-Effizienz-Dilemma. *Logos-Verlag*.
- Kieser, A., Budde, A., Fleischer, M., Hadaschik, M., Kubicek, H., Kundenreich, M., ... & Schmidt, J. (1977). Auf Dem Weg Zu Einer Empirisch Fundierten Theorie Des Unternehmungswachstums: Die Konzeption Eines Forschungsprojektes. *Management International Review*, 47-69.
- Kinsner, W. (2010). System complexity and its measures: How complex is complex. In *Advances in cognitive informatics and cognitive computing*. (pp. 265-295). *Springer, Berlin, Heidelberg*.
- Kirca, A. H., Randhawa, P., Talay, M. B., & Akdeniz, M. B. (2020). The interactive effects of product and brand portfolio strategies on brand performance: Longitudinal evidence from the US automotive industry. *International Journal of Research in Marketing*, 37(2), 421-439.
- Kohr, D. (2021). Identifying and Conceptualizing Methods for Mastering Complexity—A Complexity Drivers-Based Approach. (*Doctoral dissertation, Universität St. Gallen*).
- Kohr, D., Budde, L., Friedli, T. (2017). Identifying complexity drivers in discrete manufacturing and process industry. *The 50th CIRP Conference on Manufacturing Systems, 2017*.
- Kolmogorov, A. N. (1965). Three approaches to the quantitative definition of information. *Problems of information transmission*. 1(1), 1-7.

- Ladyman, J., Lambert, J., & Wiesner, K. (2013). What is a complex system?. *European Journal for Philosophy of Science*, 3(1), 33-67.
- Lalas, C., Mourtzis, D., Papakostas, N., & Chrysosolouris, G. (2006). A simulation-based hybrid backwards scheduling framework for manufacturing systems. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 19(8), 762-774.
- Lampel, J., & Mintzberg, H. (1996). Customizing customization. *Sloan management review*, 38(1), 21-30.
- Lampón, J. F., & Rivo-López, E. (2021). Modular product architecture implementation and decisions on production network structure and strategic plant roles. *Production Planning & Control*, 1-16.
- Lancaster, K. (1990). The economics of product variety: A survey. *Marketing science*, 9(3), 189-206.
- Lane, D. C. (2007). The power of the bond between cause and effect: Jay Wright Forrester and the field of system dynamics. *System Dynamics Review: The Journal of the System Dynamics Society*, 23(2-3), 95-118.
- Langton, C., Minar, N., & Burkhart, R. (1995, April). The swarm simulation system: a tool for studying complex systems. *In Santa Fe Institute* (pp. 1-9).
- Lechner, A., & Wagenitz, A. (2011). Capturing Variety Driven Structural Complexity in the Automotive Inbound Logistics with a Zero-Base Approach. *International Supply Chain Management and Collaboration Practices*, 4, 377.
- Light, R. L., & Clarke, J. (2021). Understanding the complexity of learning through movement. *Physical Education and Sport Pedagogy*, 26(3), 268-278.
- Linnéusson, G., Ng, A. H., & Aslam, T. (2018). Quantitative analysis of a conceptual system dynamics maintenance performance model using multi-objective optimisation. *Journal of Simulation*, 12(2), 171-189.
- López-Ruiz, R., Sañudo, J., Romera, E., & Calbet, X. (2011). Statistical complexity and fisher-shannon information: Applications in statistical complexity. (pp. 65-127). *Springer, Dordrecht*.
- Lui, L. T., Terrazas, G., Zenil, H., Alexander, C., & Krasnogor, N. (2015). Complexity measurement based on information theory and Kolmogorov complexity. *Artificial life*, 21(2), 205-224.
- Lyons, A. C., Um, J., & Sharifi, H. (2020). Product variety, customisation and business process performance: A mixed-methods approach to understanding their relationships. *International Journal of Production Economics*, 221, 107469.
- M. Alders, (2007). Komplexitäts und Variant Management der Audi AG, (in:)Individualisierte Produkte, *Heidelberg/Lindermann/ Reicwald/Zah, Berlin*.

- MacDuffie, J.P., Sethuraman, K., Fisher, M.L. (1996). Product variety and manufacturing performance: Evidence from the international automotive assembly plant study, *Management Science*, 42(3), 307-474, 1996.
- Magee, C.L., de Weck, O.L., (2002). An attempt at complex system classification. *Massachusetts Institute of Technology*.
- Makumbe, P., Seering, W., and Rebentisch, E. (2009). Beyond Cost: Product Complexity and the Global Product Development Location Advantage. *International Conference On Engineering Design, Stanford University*.
- Marcora, S. M., Staiano, W., & Manning, V. (2009). Mental fatigue impairs physical performance in humans. *Journal of applied physiology*, 106(3), 857-864.
- Marti, M. (2007). Complexity management: optimizing product architecture of industrial products. *Springer Science & Business Media*.
- Martin, M. V., & Ishii, K. (1997, September). Design for variety: development of complexity indices and design charts. In *International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference* (Vol. 80463, p. V004T31A029). American Society of Mechanical Engineers.
- Maruchek, A., Greis, N., Mena, C., & Cai, L. (2011). Product safety and security in the global supply chain: Issues, challenges and research opportunities. *Journal of Operations Management*, 29(7-8), 707-720.
- Mehr, R., & Lüder, A. (2019). Managing Complexity Within the Engineering of Product and Production Systems. In *Security and Quality in Cyber-Physical Systems Engineering* (pp. 57-79). Springer, Cham.
- Meybodi, M. (2020). Integrated Product Design and Development: Lessons Learned from Lean Manufacturing Practices. *International Journal of Business and Economics*, 5(1), 60-75.
- Meyer, M. H., & Lehnerd, A. P. (1997). The power of product platforms. Simon and Schuster.
- Miguel, P. A. C., & Hsuan, J. (2010). An exploratory investigation on modularity adoption in design and production through a case-based research in a Brazilian automaker. *Product: Management and Development*, 8(2), 173-181.
- Miles, M. B., & Huberman, A. M. (1994). Qualitative data analysis: *An expanded sourcebook*. sage.
- Miller, D. (1986). Configurations of strategy and structure: Towards a synthesis. *Strategic management journal*, 7(3), 233-249.
- Mintzberg, H. (2009). *Managing*. Berrett-Koehler Publishers.

- Modrak, V., Bednar, S., & Soltysova, Z. (2016). Application of axiomatic design-based complexity measure in mass customization. *Procedia CIRP*, 50, 607-612.
- Modrak, V., Soltysova, Z., Modrak, J., & Behunova, A. (2017). Reducing impact of negative complexity on sustainability of mass customization. *Sustainability*, 9(11), 2014.
- Morzy, M., Kajdanowicz, T., & Kazienko, P. (2017). On measuring the complexity of networks: Kolmogorov complexity versus entropy. *Complexity*, 2017.
- Muniz Jr, J., Nascimento, L. O., Martins, H. R., & Rangel, L. A. D. (2017). Flexibility assessment to mitigate complexity: trucks production analysis. *International Journal of the Analytic Hierarchy Process*, 9(1).
- Muralidharan, E., Bapuji, H., & Hora, M. (2019). The more I err, the less I pay: Effect of firm recall experience, firm type and recall severity on remedy to consumers. *European Journal of Marketing*.
- Nazir, N. M., & Shavarebi, K. (2019). A review of global automotive industry's competitive strategies. *World Journal of Science, Technology and Sustainable Development*.
- Novak, S., & Eppinger, S. D. (2001). Sourcing by design: Product complexity and the supply chain. *Management science*, 47(1), 189-204.
- Opricovic, S., & Tzeng, G. H. (2003). Defuzzification within a multicriteria decision model. *International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems*, 11(05), 635-652.
- Osgood, I. (2017). Industrial fragmentation over trade: the role of variation in global engagement. *International studies quarterly*, 61(3), 642-659.
- Özden Ünal H. (2011) Topsis yöntemi ile avrupa birliğine üye ve aday ülkelerin ekonomik göstergelere göre sıralanması.
- Park, K., & Kremer, G. (2013). The impact of complexity on manufacturing performance: a case study of the screwdriver product family. In *DS 75-3: Proceedings of the 19th International Conference on Engineering Design (ICED13) Design For Harmonies, Vol. 3: Design Organisation and Management, Seoul, Korea 19-22.08. 2013* (pp. 141-150).
- Perona, M., & Miragliotta, G. (2004). Complexity management and supply chain performance assessment. A field study and a conceptual framework. *International journal of production economics*, 90(1), 103-115.
- Piller, F. (2018). *Creating a Sustainable Mass Customization Business Model*. In *Mass Customization and Design Democratization* (pp. 29-40). Routledge.

- Piller, F. T., & Waringer, D. (1999). *Modularisierung in der Automobilindustrie: neue Formen und Prinzipien; modular sourcing, Plattformkonzept und Fertigungssegmentierung als Mittel des Komplexitätsmanagements*. Shaker.
- Pine II, B. J., & Hull, R. (1995). Mass customization: the new frontier in business competition. *R and D Management*, 25(2), 254.
- Pine, B. J. (1993). *Mass customization* (Vol. 17). Boston: Harvard business school press.
- Porter, M. E. (1980). Industry structure and competitive strategy: Keys to profitability. *Financial analysts journal*, 36(4), 30-41.
- Quelch, J. A., & Kenny, D. (1995). Extend profits, not product lines. *The Journal of Product Innovation Management*, 3(12), 249-250.
- Ramdas, K. (2003). Managing product variety: An integrative review and research directions. *Production and operations management*, 12(1), 79-101.
- Randall, T., & Ulrich, K. (2001). Product variety, supply chain structure, and firm performance: Analysis of the US bicycle industry. *Management Science*, 47(12), 1588-1604.
- Richardson, G. P. (1996). Problems for the future of system dynamics. *System Dynamics Review: The Journal of the System Dynamics Society*, 12(2), 141-157.
- Richardson, G. P. (2020). Core of System Dynamics. *System Dynamics: Theory and Applications*, 11-20.
- Robertson, D., & Ulrich, K. (1998). Platform product development. *Sloan management review*.
- Roy, R., Evans, R., Low, M. J., & Williams, D. K. (2011). Addressing the impact of high levels of product variety on complexity in design and manufacture. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 225(10), 1939-1950.
- Saaty, T. L. (2000). *Fundamentals of decision making and priority theory with the analytic hierarchy process* (Vol. 6). RWS publications.
- Sagot, B. (2013, February). Comparing complexity measures. In *Computational approaches to morphological complexity*.
- Sanderson, S. W., & Uzumeri, M. (1997). The Innovation Imperative—Strategies for Managing Product Models and Families. *Irwin, ISBN: 078631009X*.
- Scavarda, L. F., Schaffer, J., Scavarda, A. J., Reis, A. D. C., & Schleich, H. (2009). Product variety: an auto industry analysis and a benchmarking study. *Benchmarking: An International Journal*, 16(3), 387-400.

- Schuh, C., Raudabaugh, J. L., Kromoser, R., Strohmer, M. F., Triplat, A., & Pearce, J. (2017). The Purchasing Chessboard®. In *The Purchasing Chessboard* (pp. 49-206). Springer, New York, NY.
- Schuh, G., Rudolf, S., Riesener, M., Dölle, C., & Schloesser, S. (2017). Product production complexity research: developments and opportunities. *Procedia CIRP*, 60, 344-349.
- Schulze, A., Paul MacDuffie, J., & Täube, F. A. (2015). Introduction: knowledge generation and innovation diffusion in the global automotive industry—change and stability during turbulent times. *Industrial and corporate change*, 24(3), 603-611.
- Seha, S., Zamberi, J., & Fairu, A. J. (2017, October). Design and simulation of integration system between automated material handling system and manufacturing layout in the automotive assembly line. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 257, No. 1, p. 012017). IOP Publishing.
- Senge, P. M., & Forrester, J. W. (1980). Tests for building confidence in system dynamics models. *System dynamics, TIMS studies in management sciences*, 14, 209-228.
- Shah, R., Ball, G. P., & Netessine, S. (2017). Plant operations and product recalls in the automotive industry: An empirical investigation. *Management Science*, 63(8), 2439-2459.
- Shalon, D., Gossard, D., Ulrich, K., & Fitzpatrick, D. (1992, September). Representing Geometric Variations in Complex Structural Assemblies on CAD Systems. In *International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference* (Vol. 97720, pp. 121-132). American Society of Mechanical Engineers.
- Shannon, C. E. (1948). A mathematical theory of communication. *The Bell system technical journal*, 27(3), 379-423.
- Shannon, C. E., & Weaver, W. (1964). *The mathematical Theory of Communication*. Tenth Printing.
- Siegenfeld, A. F., & Bar-Yam, Y. (2020). An introduction to complex systems science and its applications. *Complexity*, 2020.
- Simpson, J., & Simpson, M. (2011). Complexity reduction: a pragmatic approach. *Systems Engineering*, 14(2), 180-192.
- Sivadasan, S., Smart, J., Huatuco, L. H., & Calinescu, A. (2013). Reducing schedule instability by identifying and omitting complexity-adding information flows at the supplier–customer interface. *International Journal of Production Economics*, 145(1), 253-262.

- Soba, M., & Eren, K. (2011). Considering the financial and non-financial ratios using TOPSIS on the performance evaluation, an application in intercity highway bus sector. *The Journal of Social Economic Research*, 21, 23-40.
- Stalk, G. (1988). Time--the next source of competitive advantage.
- Sterman, J. (2002). System Dynamics: systems thinking and modeling for a complex world.
- Suh, N. P. (2007). Ergonomics, axiomatic design and complexity theory. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 8(2), 101-121.
- Sunderraman, G. (1998). Complexity in Manufacturing: Some Lessons to Learn in Planning and Implementation. *Vikalpa*.
- Suthikarnnarunai, N. (2008). Automotive supply chain and logistics management. In *Proceedings of the international multiconference of engineers and computer scientists* (Vol. 2, pp. 1-7).
- Szmelter, A., & Woźniak, H. (2015). Complexity of logistics systems and its impact on automotive industry. *Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Gdańskiego. Ekonomika Transportu i Logistyka*, (56), 159-174..
- Thonemann, U. W., & Bradley, J. R. (2002). The effect of product variety on supply-chain performance. *European Journal of Operational Research*, 143(3), 548-569.
- Tiryaki, F., Ahlatcıoğlu, M. (2005). Fuzzy Stock Selection Using a New Fuzzy Ranking and Weighting Algorithm. *Applied Mathematics and Computation*, 170 (1), 145-156.
- Tseng, M. M., & Jiao, J. (2001). Mass customization. *Handbook of industrial engineering*, 3, 684-709.
- Ulrich, D., & Barney, J. B. (1984). Perspectives in organizations: resource dependence, efficiency, and population. *Academy of Management Review*.
- Um, J., Lyons, A., Lam, H. K., Cheng, T. C. E., & Dominguez-Pery, C. (2017). Product variety management and supply chain performance: A capability perspective on their relationships and competitiveness implications. *International Journal of Production Economics*, 187, 15-26.
- Vakharia, A. J., Parmenter, D. A., & Sanchez, S. M. (1996). The operating impact of parts commonality. *Journal of Operations Management*, 14(1), 3-18.
- Vega E. V. B. (2012). Structural complexity of manufacturing systems layout.
- Verna, E., Genta, G., Galetto, M., & Franceschini, F. (2021). Defect prediction for assembled products: a novel model based on the structural complexity paradigm.
- Vogel, W. (2019). Complexity management in variant-rich product development.

- Vogel, W., & Lasch, R. (2015). Approach for complexity management in variant-rich product development. In *Operational Excellence in Logistics and Supply Chains: Optimization Methods, Data-driven Approaches and Security Insights. Proceedings of the Hamburg International Conference of Logistics (HICL)*, Vol. 22 (pp. 97-140). Berlin: epubli GmbH.
- Vogel, W., & Lasch, R. (2018). Complexity drivers in product development: A comparison between literature and empirical research. *Logistics Research*, 11(7), 1-42.
- Bertalanffy, L. V. (1968). General system theory: Foundations, development, applications. George Braziller. *Braziller, New York*.
- Webbink, R. F., & Hu, S. J. (2005). Automated generation of assembly system-design solutions. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2(1), 32-39.
- Wildemann, H. (1998). Komplexitätsmanagement durch Prozeß-und Produktgestaltung. Komplexitätsmanagement, Wiesbaden, 47-68.
- Wind, Y., & Saaty, T. L. (1980). Marketing applications of the analytic hierarchy process. *Management science*, 26(7), 641-658.
- Wochner, S., Grunow, M., Staebelin, T., & Stolletz, R. (2016). Planning for ramp-ups and new product introductions in the automotive industry: Extending sales and operations planning. *International Journal of Production Economics*, 182, 372-383.
- Wolak, P., & Johansson, M. (2019). Buffer optimisation of a packaging line using Volvo GTO's flow simulation methodology.
- Vogel, W., & Lasch, R. (2018). Complexity drivers in product development: A comparison between literature and empirical research. *Logistics Research*, 11(7), 1-42.
- Womack, J. P., & Jones, D. T. (2003). Banish waste and create wealth in your corporation. *Recuperado de* http://www.kvimis.co.in/sites/kvimis.co.in/files/ebook_attachments/James.
- Yurdakul, M., & İç, Y. T. (2004). AHP approach in the credit evaluation of the manufacturing firms in Turkey. *International journal of production economics*, 88(3), 269-289.
- Yüksel, B. İşletme-müşteri ilişkilerinin kişisel boyuta indirgemedeki kitlesel kişiselleştirme (mass customization) statejisinin rolü. *Dumlupınar Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, (3).
- Zeltzer, L. (2016). Analysing and levelling manufacturing complexity in mixed-model assembly lines. (*Doctoral dissertation, Ghent University*).

- Zenil, H., Marshall, J. A., & Tegnér, J. (2015). Approximations of algorithmic and structural complexity validate cognitive-behavioural experimental results. *arXiv preprint arXiv:1509.06338*.
- Zhang, Z., & Luo, Q. (2007, October). A grey measurement of product complexity. In *2007 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics* (pp. 2176-2180). IEEE.
- Zhu, X., Hu, S. J., Koren, Y., & Marin, S. P. (2008). Modeling of manufacturing complexity in mixed-model assembly lines. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 130(5).



ÖZGEÇMİŞ

İlk orta ve lise öğrenimini İstanbul’da tamamladı 1982 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi Makine Fakültesinden mezun oldu. 2001 yılında Yeditepe Üniversitesinde yüksek lisans eğitimini tamamladı. 1985 yılından 2018 yılına kadar bir otomotiv şirketinde Kalite, Satınalma ve Üretim departmalarını yönetti. 2018 yılından itibaren bir otomotiv yan sanayi şirketinde AR-GE yöneticiliği yapmaktadır.

