



## Examining the impact of product variety on design, supply, and production processes using system dynamics approach

Zafer Doğruyol<sup>1</sup> , Samet Güner<sup>2\*</sup> 

<sup>1</sup>Sakarya University, Graduate School of Business, Production Management and Marketing Department, 54187, Serdivan, Sakarya, Turkey

<sup>2</sup>Sakarya University, School of Business, Esentepe Campus, 54187, Serdivan, Sakarya, Turkey

### Highlights:

- Product variety causes complexity and problems
- The impacts of product variety on design, supply, and production processes were examined using system dynamics approach
- A practical tool was proposed to decide on the product variety in a bus production system

### Keywords:

- Product variety
- System dynamics
- Simulation
- Complexity

### Article Info:

Research Article  
Received: 04.05.2020  
Accepted: 01.01.2021

### DOI:

10.17341/gazimmfd.731788

### Correspondence:

Author: Samet Güner  
e-mail:  
sguner@sakarya.edu.tr  
phone: +90 264 295 6326

### Graphical/Tabular Abstract

A system dynamics model was proposed to analyze the impacts of product variety on design, supply, and production processes in a bus production company. Figure A shows the model map for the case company.

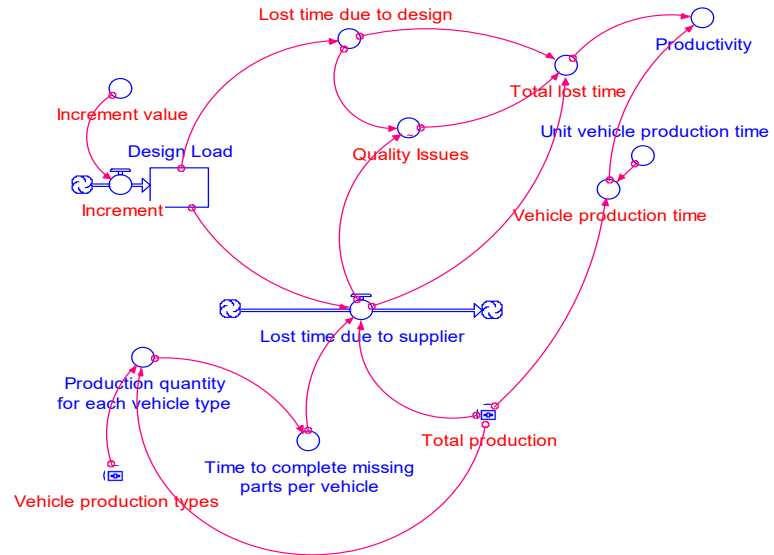


Figure A. Model Map for the Case Company

**Purpose:** Automotive manufacturers are trying to respond to their customers' increasing demands for product customization to stay competitive in the market. The increase in product diversity due to product customization causes some problems in business processes. This study was conducted to assist managers in examining and monitoring the possible impacts of increasing product variety on the other processes and deciding on the appropriate product variety level.

### Theory and Methods:

This study was carried out on a bus production facility, and a system dynamics model was developed that can analyze the impact of increasing product variety on design, supply, and production processes. Expert opinions were received through interviews, and historical data of the business were analyzed during the development process of the system dynamics model.

### Results:

Research results revealed that increasing product variety increases the design load, and has a positive impact on productivity and quality up to a certain level. However, managing diversity becomes difficult, and processes are negatively affected due to the increasing complexity after a certain stage. Using the proposed model, an optimal design load that maximizes the productivity was tried to be determined.

### Conclusion:

Besides the positive impacts of the increasing product variety on the market share, its' impacts on the production process should also be taken into consideration in the decision-making process. This study provided a model for decision makers to determine an appropriate design load level.



## Ürün çeşitliliğinin tasarım, tedarik ve üretim süreçlerine etkisinin sistem dinamiği yaklaşımı ile incelenmesi

Zafer Doğruyol<sup>1</sup>, Samet Güner<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Sakarya Üniversitesi, İşletme Enstitüsü, Üretim Yönetimi ve Pazarlama Anabilim Dalı, 54187, Serdivan / SAKARYA, Türkiye

<sup>2</sup>Sakarya Üniversitesi, İşletme Fakültesi, İşletme Bölümü, Esentepe Kampüsü, 54187, Serdivan / SAKARYA, Türkiye

### ÖNEÇIKANLAR

- Otobüs üretim sistemlerinde ürün çeşitliliği
- Ürün çeşitliliğinin verimliliğe etkisi
- Karmaşık sistemlerin sistem dinamiği yaklaşımı ile analizi

### Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi  
Geliş: 04.05.2020  
Kabul: 01.01.2021

### DOI:

10.17341/gazimmfd.731788

### Anahtar Kelimeler:

Ürün çeşitliliği,  
sistem dinamiği,  
simülasyon, verimlilik

### ÖZ

Otomotiv üreticileri pazarda rekabetçi kalabilmek için müşterilerinin giderek artan ürün kişiselleştirme taleplerine yanıt vermeye çalışmaktadır. Ürün kişiselleştirmeye bağlı olarak artan ürün çeşitliliği, işletme süreçlerinde bazı problemlerin ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Bir otobüs üretim tesisi üzerinde yapılan bu çalışmada ürün çeşitliliğindeki artışın tasarım, tedarik ve üretim süreçlerine etkisini analiz edebilen bir sistem dinamiği modeli geliştirilmiştir. Sistem dinamiği modelinin geliştirilmesi sürecinde uzman görüşleri alınmış ve işletmenin geçmiş verileri analiz edilmiştir. Araştırma sonuçları, ürün çeşitliliğindeki artışın tasarım yükünü artırarak belirli bir seviyeye kadar verimlilik ve kalite üzerinde olumlu bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymuştur. Ancak belirli bir aşamadan sonra artan karmaşıklığa bağlı olarak çeşitliliği yönetmek zorlaşmakta ve süreçler olumsuz yönde etkilenmektedir. Geliştirilen model kullanılarak verimliliği maksimize edecek uygun bir tasarım yükü belirlenmeye çalışılmıştır. Böylece bu çalışmanın ürün çeşitliliğindeki artışın diğer süreçlere olan muhtemel etkilerini izleme ve uygun ürün çeşitliliği seviyesine karar verme noktasında yöneticilere yardımcı olması beklenmektedir.

## Examining the impact of product variety on design, supply, and production processes using system dynamics approach

### HIGHLIGHTS

- Product variety in bus production systems
- The impact of product variety on productivity
- Analysis of complex systems with system dynamics approach

### Article Info

Research Article  
Received: 04.05.2020  
Accepted: 01.01.2021

### DOI:

10.17341/gazimmfd.731788

### Keywords:

Product variety,  
system dynamics,  
simulation,  
productivity

### ABSTRACT

Automotive manufacturers are trying to respond to their customers' increasing demands for product customization to stay competitive in the market. The increase in product diversity due to product customization causes some problems in business processes. This study was carried out on a bus production facility, and a system dynamics model was developed that can analyze the impact of increasing product variety on design, supply, and production processes. Expert opinions were received and historical data of the business were analyzed during the development process of the system dynamics model. Research results revealed that increasing product variety increases the design load, and has a positive impact on productivity and quality up to a certain level. However, managing diversity becomes difficult, and processes are negatively affected due to the increasing complexity after a certain stage. Using the proposed model, an optimal design load that maximizes productivity was tried to be determined. Thus, this study is expected to aid managers in monitoring the possible impacts of increasing product variety on the other processes and deciding on the appropriate product variety level.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Otomotiv sektöründe müşterilerin kişiselleştirme talepleri artmakta ve teslim süresi talepleri kısalmaktadır. Otomotiv üreticileri rekabetçi kalabilmek için müşterilerin bu taleplerine yanıt vermeye çalışmaktadır. Ancak yüksek çeşitlilik ve kısa teslim süreleri üretim sistemlerinde karmaşıklığa neden olmaktadır. Karmaşıklık, temel olarak birbiri ile yakından ilişkili birden fazla parçadan oluşmuş ve çıktılarının kolayca öngörülemediği bir yapı olarak tanımlanabilir. Bir sistem içerisinde yer alan bileşen adedi, bu bileşenlerin miktarı, bileşenler arasındaki bağlantı sayısı ve bu bağlantıların niteliği sistemin karmaşıklığının göstergesidir [1, 2].

Artan ürün çeşitliliğinin üretim sistemleri üzerindeki etkilerini inceleyen çalışmalara bakıldığında, literatürdeki çalışmaların genellikle binek otomobil üretim süreçlerine odaklandığı görülmektedir [3, 4]. Bu çalışmalarda bir veya birkaç operasyon ele alınarak artan ürün çeşitliliğinin karmaşıklık, verimlilik ve maliyet üzerindeki etkileri incelenmiştir [5-8]. Yapılan araştırmalar, parça ve seçenek çeşitliliğinin artmasının tutarlı çevrim süreleri yerine daha az tahmin edilebilir parça bileşenleri kullanılmasına neden olduğunu, bunun da nihayetinde karmaşıklığı artırarak doğrudan işgücü ve ürün kalitesini etkilediğini ortaya koymaktadır [6]. Nitekim Aggeri ve Segrestin [9], ürün tasarımı sürecinde yapılan değişikliklerin ürün veya işlem çeşitliliğindeki artışın en büyük sorumlusu olduğunu ve bu sürecin ek maliyetler oluşturmasının yanında tüm süreçler üzerinde öngörülemeyen etkileri olabileceğini belirtmiştir. Özellikle de otomotiv üretiminde yapılan çalışmalarda çeşitlilik artışının montaj ve parça temin süreçlerinde kalite, verimlilik ve karmaşıklık üzerinde önemli bir etkisinin olduğu deneysel veriler ve simülasyon uygulamaları ile kanıtlanmıştır [10-12].

Bu çalışmanın literatüre iki önemli katkısı olması beklenmektedir. Literatürde ürün çeşitliliğinin işletme süreçlerine etkisinin incelendiği çalışmalarda çeşitli doğrusal ve statik modelleme teknikleri kullanılmıştır. Ancak işletmelerdeki süreçlerin karmaşık yapısı nedeniyle doğrusal ve statik modelleme teknikleri süreçlerin dinamik ve karmaşık yapısını modellemekte yetersiz kalmaktadır [13, 14]. Bu nedenle, bu çalışmada, sistemin dinamik yapısını bir bütün olarak ele alarak problemlere hızlı bir deneysel çözüm getirebilen ve 1950'lerin sonunda Forrester tarafından geliştirilen "Sistem Dinamiği" yaklaşımı kullanılmıştır. Önerilen yaklaşım ile ürün çeşitliliğindeki artışın hem üretim sisteminin verimliliğine hem de diğer işletme süreçlerine etkisi sistem dinamiği ile modellenmiş ve simüle edilmiştir. Böylece probleme ilişkin daha bütüncül bir bakış açısı kazandırılmıştır.

Araştırmanın bir diğer önemli katkısı uygulamanın kısa serili üretim yapan bir otobüs üretim sistemi üzerinde yapılmış olmasıdır. Literatürdeki çalışmaların daha çok binek otomobil üretim sistemleri üzerinde yoğunlaştığı

görülmektedir [6, 9, 10]. Ancak binek otomobil ile kıyaslandığında otobüs üretiminde kişiselleştirilmiş tasarım gereksinimi ve bunun neden olduğu çeşitlilik daha fazladır. Buna rağmen literatürde artan çeşitliliğin otobüs üretim sistemleri üzerindeki etkisini inceleyen çalışma bulunmamaktadır. Bu çalışmada otobüs üretim sistemlerinde veya kısa serili üretim yapan benzer üretim sistemlerinde artan kişiselleştirilmiş ürün talebinin karşılanması için girilen tasarım ve üretim faaliyetlerinin neden olduğu zaman baskının tasarım, tedarik ve üretim süreçleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Yapılan analizler çeşitlilik artışının tasarım yükünü artırdığını, belirli bir seviyeden sonra tedarik ve kalite süreçlerinde çeşitli problemlere neden olduğunu ve üretim verimliliğini düşürdüğünü ortaya koymuştur.

Çalışma şu şekilde tasarlanmıştır. İkinci bölümde kapsamlı bir literatür incelemesi yapılarak ürün çeşitliliğinin ve çalışanlar üzerindeki zaman baskısının üretim süreçlerine etkisi incelenmiştir. Yine bu bölümde otobüs üretim sistemlerinde ürün çeşitliliği ele alınmış ve otobüs üretiminin ayırt edici özellikleri vurgulanmıştır. Üçüncü bölümde bu araştırmaya konu olan ve çalışmanın uygulamasının yapıldığı vaka şirketi tanıtılmış ve problem tanımlanmıştır. Dördüncü bölümde araştırmanın yöntemi açıklanmış ve veri seti hakkında bilgi verilmiştir. Beşinci bölümde çalışmanın uygulaması yapılmış ve bulguları paylaşılmıştır. Altıncı ve son bölümde ise çalışmanın sonuçları vurgulanmıştır.

## 2. LİTERATÜR İNCELEMESİ (LITERATURE REVIEW)

### 2.1. Ürün Çeşitliliğinin Süreçlere Etkisi (Impact of Product Variety on Processes)

İşletmeler pazardaki heterojen müşteri gereksinimlerine cevap verebilmek amacıyla müşterilere sunulan ürün sayısını arttırmaya çalışmaktadır [15, 16]. Ürün çeşitliliği, pazar payını artırmak ve yeni müşteri çekmek için etkili bir yöntemdir [17]. Müşterilerine daha çeşitli ve kişiselleştirilmiş ürünler sunabilen şirketler rakipleri karşısında rekabet avantajı kazanmaktadır [18]. Nitekim yeni ürünlerini pazara rekabetçi bir fiyatla sunabilmek, üretim işletmelerinin kritik bir başarı faktörü olarak görülmektedir [19, 20]. Bu nedenle işletmeler ürün çeşitliliğini artırma eğiliminde olup, yeni ürün arayışı ile gelirlerini artırmak ve sürekliliklerini sağlamak amacıyla bu döngünün içinde yer almaktadır [15, 17, 21]. Ancak rekabetçi olmak adına artırılan ürün çeşitliliği belirli bir seviyeden sonra işletmedeki diğer süreçleri olumsuz yönde etkileyerek zamanla bozulmalara neden olmakta [22] ve işletmeye ek maliyetler getirmektedir [23]. Artan çeşitlilik işletme süreçlerindeki karmaşıklığı artırmaktadır [24]. Bu karmaşıklık işletmedeki ürün geliştirme, lojistik, üretim, pazarlama ve satış gibi tüm işlevsel alanlarda ve operasyonel süreçlerde etkisini gösterir [25]. Nitekim otomotiv endüstrisindeki ürün çeşitliliği ve bu çeşitliliğin neden olduğu karmaşıklık birçok literatürdeki çalışmaya konu olmuştur. MacDuffie vd. [6] ve Fisher ve Ittner [26],

yaptıkları çalışmada ürün çeşitlilik seviyesindeki artışın ürün karmaşıklığını artırarak imalat ve montaj sistemlerinin işletiminde ve yönetiminde neden olduğu problemleri ve bu sistemlerin kalite ve verimliliğine olan olumsuz etkilerini ampirik verilerle ve simülasyonla göstermiştir. MacDuffie vd. [6] üretim sistemlerinde ürün çeşitliliğine bağlı olan üç farklı karmaşıklık olabileceğini ortaya koymuştur: ürün çeşitliliğinden kaynaklanan model karmaşıklığı, parça karmaşıklığı ve ana tasarımdan bağımsız varyasyonların neden olduğu karmaşıklık. Cooper vd. [27], ürün ve süreç çeşitliliğinin neden olduğu karmaşıklığı ölçmek için üç endeks geliştirmiştir: ürün çeşitliliğini ifade eden ürün endeksi, süreçlerin kendi karmaşıklığından kaynaklanan süreç endeksi ve ürün tasarımındaki farklılıklar nedeniyle süreçlerde yapılmasına gerek duyulan değişiklikleri gösteren ve ürün-süreç etkileşimini ifade eden ürün-süreç endeksi. Özellikle de otomotiv gibi ürün karmaşıklığının yüksek olduğu sektörlerde ürün çeşitliliğinden kaynaklanan karmaşıklığın yönetimi daha fazla önem taşımaktadır [28].

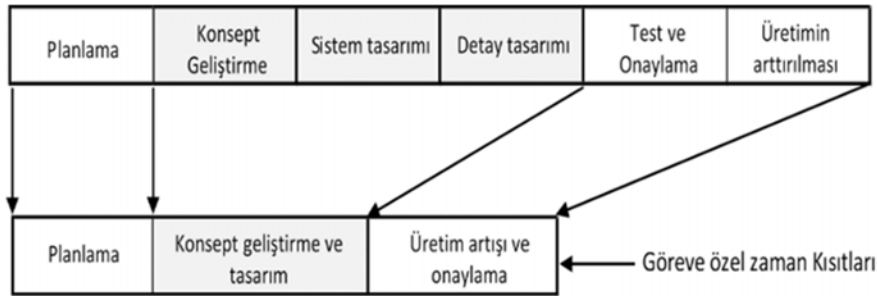
Schleich vd. [22], ürün çeşitliliğindeki artışın şirketlerin üretim maliyetleri, teslimat süreleri, stok seviyeleri ve bileşen fiyatlarında artışa neden olacağını ve artan karmaşıklığın maliyetleri genellikle kolayca belirlenemez şekilde arttıracağını ifade etmiştir. Nitekim Ramdas [16] ve Weisera vd. [29], ürün çeşitliliğindeki artıştan dolayı ürün maliyetinin direkt olarak arttığını göstermiştir. Yazarlar ayrıca ürün karmaşıklığının malzeme ve işçilik gibi doğrudan maliyetlerinin yanı sıra genel giderler ve süreç yatırımları gibi endirekt maliyetler üretebileceğini belirtmiştir.

Literatürde yapılan pek çok çalışmada ürün çeşitliliğindeki artışın neden olduğu karmaşıklıktan ötürü kalite kusurlarında artış yaşandığı ve bu durumun onarım ve yeniden işleme neden olarak işletmenin verimliliğini düşürdüğü gözlenmiştir [26]. Ayrıca ürün çeşitliliğinin daha uzun iş akış süreleri, kurulum süreleri ve teslimat zamanlarına neden olacağı vurgulanmıştır [22, 26]. Çeşitlilik nedeni ile artan parça sayısı güvenlik stoku miktarını arttıracığından ve daha fazla depolama alanına ihtiyaç duyulacağından ötürü işletmenin stok politikalarında da değişiklik gerektirecektir [26, 30]. Diğer yandan ürün çeşitliliğindeki artış süreçler arasında daha fazla işlem, koordinasyon çabası ve denetim gerektirdiği için planlama faaliyetlerine de ilave yükler getirmektedir [15, 16]. Bozarth vd. [31] çeşitliliğin tedarikçi

etkileşimlerinde de karmaşıklığa neden olduğunu belirtmiştir. Artan ürün çeşitliliği ve bunun neden olduğu karmaşıklık işletmelerin ölçek ekonomisinden uzaklaşmasına neden olmaktadır. Çeşitlilik nedeni ile düşük miktarda üretilen ürünler ölçek ekonomisinden uzaklaşmaya neden olmakta ve daha yüksek hacimlerle üretilen standart ürünlere kıyasla üretim maliyetlerini arttırmaktadır.

Ürün çeşitliliğinin bir diğer olumsuz etkisi ise tasarım departmanı ve süreci üzerinde görülmektedir. Günümüzde yeni ürün tasarımı kısaltılmış geliştirme aşamaları ile nitelendirilmekte ve ürün çeşitliliğinin artması ile ürün yaşam döngüsü kısalmaktadır [8, 26]. Bu durum hem tasarım sürecini hem de tasarım departmanı çalışanlarını olumsuz yönde etkilemektedir. Süreç açısından bakıldığında ortaya çıkan değişiklikler birbiriyle ilişkili birkaç bileşen üzerinde beklenmeyen bir etki oluşturabilir ve bu yineleme döngüsünden dolayı gecikmeler ve komplikasyonlar ortaya çıkabilir [32]. Çalışanlar açısından bakıldığında ise ürün yaşam döngüsünün kısaltılması tasarım sürelerinin de kısaltılmasını gerektirmektedir. Artan çeşitlilik karşısında işletmeler aynı tasarım mühendislerinden aynı süre içerisinde daha fazla çıktı beklemekte ve süreçler için gerekli olan süreleri kısaltarak tasarım grubuna uygulama zamanı için kısıt oluşturmaktadır. Otobüs üretim sürecinde ürün çeşitliliği nedeniyle kısalan tasarım, test ve üretim süreçleri Şekil 1’de gösterilmiştir.

Yeni tasarımlar için tanımlanan zaman aralığı gerekli zaman aralığından daha kısa olduğunda, tasarım mühendisleri üzerindeki zaman baskısı artmaktadır. Bu durum tasarım sürecinde mühendislik hatalarına neden olmaktadır. Nitekim Amabile [33], zaman baskısının algılanan iş yükü üzerinde olumsuz bir etkisi olduğunu belirterek, insanların baskı altında daha fazla çalıştıklarını ancak daha akıllıca çalışmadıklarını ifade etmiştir. Tasarım sürecinde mühendislik hataları gibi öngörülemeyen ve beklenmeyen olaylar, sınırlı çalışma sürelerinde sorunsuz ve kusursuz çalışması gereken süreçlerde değişikliklere neden olur. Bu değişimler, çok aşamalı üretim süreçlerinde karmaşıklığı arttıran en önemli nedenlerden biridir. Sonuçta, düzeltilmesi gereken mühendislik hataları ile süreçler daha da karmaşık hale gelir. Çeşitliliğin ürün ağacı üzerinde de önemli etkileri olmaktadır. Ürün ağacı (BOM: Bill of Materials; APL: Araç Parça Listesi), ürünü oluşturan tüm bileşenleri, bu bileşenler arasındaki ilişkiyi, bu bileşenlerin özelliklerini içeren ürünün



Şekil 1. Zaman baskının tasarım ve üretim süreçlerine etkisi (Impact of time pressure on design and production processes)

tanımlanmasını sağlayan, ERP sistemi ile diğer departmanların modülleri ile etkileşim içerisinde olan temel yapıdır. Çeşitlilik artışına bağlı olarak ürünler arası oluşan bileşen farklılığı her ürün için ayrı ürün ağacı oluşturma zorunluluğu getirmektedir. Bu durum MRP süreçlerinde tedarik, planlama ve nihayetinde üretim süreçlerinde karmaşıklığa neden olmaktadır [34].

Özellikle de kişiselleştirilmiş ürünler için yapılan tasarım değişiklikleri üretim süreçlerini çok boyutlu olarak etkilemekte ve üretim sürecindeki karmaşıklık artırılmaktadır. Müşteriye özel ürünlerin üretiminde siparişler, müşteri tarafından verilen tanım ve değerlere göre üretilir veya mevcut ürün bu talebe göre değiştirilir. Bu nedenle, müşteriye özgü tasarım yapmak çok karmaşık bir ürün ağacı yapısını, dokümantasyon sürecini ve tasarım sürecini beraberinde getirir. Değişiklik gerektiren her ürün için ayrı bir ürün ağacı oluşturulması nedeniyle meydana gelen karmaşıklık, yeni bileşen seçiminde veya bunların ilişkilendirilmesinde ürün ağacı oluşturulması sürecinde hata yapılmasına neden olmakta ve ürün ağacında yanlış kodlanmış veya tekrarlayan bileşen tanımlanmasına yol açmaktadır. Bu durum yanlış parça siparişlerinin oluşmasına, gereksiz parça siparişi nedeniyle atıl stoklara, eksik parça nedeniyle aracın eksik parça ile hattan çıkmasına, hattın durmasına veya tedarikçilerde neden olduğu karmaşıklık nedeni ile gecikmenin yanında kalitesizliğe de neden olmaktadır [34].

Ürün çeşitliliğinin işletme süreçlerinde neden olduğu tüm bu olumsuzluklar dikkate alındığında, yöneticilerin ürün çeşitliliğinin muhtemel etkileri üzerinde daha fazla düşünceleri gerektiği ortaya çıkmaktadır. Ancak ürün çeşitliliğinin pazar payı ve gelir üzerindeki olumlu etkileri de dikkate alınmalıdır. Bu noktada amaç ürün çeşitliliğini ve karmaşıklığı en düşük seviyeye indirmekten ziyade çeşitliliğin yarattığı faydalar ve neden olduğu maliyetler arasında optimum kombinasyonu bulmak olmalıdır [35]. Nitekim Stäblein vd. [36], otomotiv sektöründe maliyet tasarrufu ve yüksek performans hedeflerine ulaşmak için optimal ürün çeşidi sayısını belirlemenin gerekliliğine vurgu yapmıştır.

## 2.2. Otobüs Üretim Sistemlerinde Ürün Çeşitliliği (Product Variety in Bus Production Systems)

Otomobil ve otobüs üretim sistemleri pek çok benzer özelliğe sahip olsa da, aralarında önemli yapısal ve operasyonel farklılıklar vardır. Bu farklılıklar üretim yöntemlerinden, verimlilik beklentilerinden, üretim hacminden, müşteri beklentilerinden, pazardaki rekabet ortamından ve pazarlama yöntemlerinden kaynaklanmaktadır. Yapısal olarak bakıldığında, otobüs üretimi hem üretim yöntemleri hem de ürün oluşturma süreçleri açısından binek araç üretiminden oldukça farklıdır. Örneğin, binek araç gövdesi metal sacların preslenerek şekillendirilmesi ile üretilir ve üzerinde yapılabilecek değişiklik sayısı oldukça sınırlıdır. Çünkü yüksek hacimde üretilen binek araçlarda herhangi bir değişiklik yapmak,

üretim teknolojileri nedeni ile yüksek maliyet gerektirir ve bu seçenekleri üretim hattında takip etmek zor ve zaman alıcıdır. Dolayısıyla gövde üretimi ve montajı, binek araç üretim sistemlerindeki esnekliği en düşük olan süreç olarak kabul edilmektedir.

Otobüslerin karoseri veya iç mekân tasarım kısıtlamaları ise, benzersiz karoseri veya özel iç tasarıma sahip olan binek araç tasarım kısıtlamaları kadar sıkı, maliyetli ve zaman alıcı değildir. Otobüs üreticileri için iskelet olarak yapılan gövdede, binek araç üreticilerinin aksine gövde değişikliğine gitmek daha olasıdır ve müşteri istek ve çözümlerine kısmi tasarım değişikliğine gidilerek düşük miktarda, kısa serili üretim ile cevap verilebilir [37]. Mevcut tasarımdaki gövde parçaları veya iç sistemler önemli ölçüde yeni ürün tasarımında kullanılarak bir tasarım değişikliğinde kaynak kullanımı, maliyet ve performans anlamında önemli bir avantaj elde edilir. Ayrıca otobüsler binek araç gibi özgün bir şasiye sahip olmayıp, imalat ve montaj sistemleri daha geleneksel ve ürün kısıtlamaları daha düşüktür. Dolayısıyla binek araçlarda müşteri talebi doğrultusunda kısa sürede tasarım değişikliğine gidilmesi hem ürün mimarisini hem de tedarik zinciri yapılanması açısından çok mümkün değil iken, ticari araç sektöründe bu tür taleplerin karşılanması daha olasıdır.

Diğer yandan otobüs üretim sistemlerinde ürün/süreç tasarım aşaması binek otomobil tasarımından farklı olarak daha uzun bir pazar ömrüne sahiptir. Binek araçların tasarımı kendine özgün gövde mimarisinde yaklaşık 4-7 yıllık bir pazar ömrüne sahipken, aynı süre otobüs sektöründe yaklaşık 7-14 yıldır [38].

İster binek ister ticari araç olsun, otomotiv endüstrisinde sıkça karşılaşılan karmaşıklık sorunu, seçeneklerin çoğalmasından ve ürün çeşitliliği nedeni ile montaj hattı düzenindeki değişiklikten kaynaklanmaktadır [39, 40]. Bu çalışma kapsamında ürün çeşitliliğinin otomotiv üretim sistemi üzerindeki etkilerini planlama, üretim/montaj, kaynaklar, tedarik zinciri yapısı ve kalite olmak üzere beş başlık altında inceleyebiliriz.

**Planlama:** Üretim planlama fonksiyonunun tipik işlevi, malzeme ihtiyaç planlaması, talep yönetimi, kapasite planlama ve üretim sahasındaki işlerin planlanmasını ve önceliklendirme aşamalarını içerir. Ayrıca detay ürün setinin sıralaması, monte edilen üründen beklenen kalite seviyesi ve fikstür, alet, özel alan, personel veya ekipman ihtiyacı gibi montaj süreci tasarım sorunları gibi tüm olası gereksinimlerin planlama sürecini kapsamaktadır [41-43]. Üretim öncesi planlanan bu süreçler ürün çeşitliliği nedeni ile yapılan değişiklikten olumsuz etkilenir.

**Üretim/montaj:** Yüksek ürün çeşitliliği ürün ve parçalar için daha fazla işlem gerektirir. Farklı rotalara sahip yüksek çeşitlilikteki ürün ve iş merkezi sayısının artması karmaşıklığı artırır [44]. Bu durum işçilerin bir üründen diğerine daha sık geçmesine neden olarak montaj sürelerini artırır ve verimliliği azaltır. Artan karmaşıklıkta sorunları izlemek ve çözmek için daha fazla denetim gerekir. Bunların

sonucu olarak, ürünler için daha uzun teslim süresi ve daha düşük kalite seviyesi ortaya çıkabilir [45].

**Kaynaklar:** Çeşitliliğin artmasıyla değişkenliğin yaratacağı sorunların çözümü için ilave kaynaklar gerekecektir: daha fazla enerji tüketimi, daha fazla parça çeşidi, daha fazla işçi vb. Ayrıca artan ürün çeşitliliğini karşılamak ve değişik işlemleri gerçekleştirmek için kullanılacak yüksek parça miktarı nedeniyle daha fazla tesis ve depo alanına ihtiyaç duyulacaktır [46].

**Tedarik zinciri yapısı:** Ürün çeşitliliğinin artması tedarik edilecek yarı mamul ve parça sayısını artıracaktır. Bu durum, tedarik zinciri verimliliğini artırmak için tedarikçi sayısını azaltmayı amaçlayan yalın tedarik zinciri kavramına ters düşen daha fazla tedarikçi ile çalışma gerekliliği doğurur. Çeşitlilik parça ve ürün stok miktarını, tedarikçiye verilen sipariş sayısını ve temin süresini artırırken üretim parti büyüklüğünde azalmaya neden olur. Siparişlerin çeşitlilik nedeniyle daha küçük partilere bölünmesi nakliye maliyetini ve hazırlık (setup) süresini artırarak parça fiyatlarının yükselmesine neden olur. Ayrıca farklı ürün grupları için dâhili lojistik sayısında artış yaşanacağı gibi çeşitliliğe bağlı olarak artan stok kodu nedeniyle stok alanı bulma zorunluluğu ortaya çıkar.

**Kalite:** Yarı mamul/parça üretiminde ve montaj hattındaki çeşitlilik nedeni ile daha fazla kalite kontrol noktasına gerek duyulacak, kalite süreçlerinin izlenmesi takibi, çözümlenmesi ve raporlanması ilave yönetsel takip ve kaynak gerektirecektir.

### 3. PROBLEM TANIMI (PROBLEM DESCRIPTION)

Bu çalışma, ülkemizde faaliyet gösteren ve 2000'den fazla çalışanı olan bir otobüs üreticisinin üretim sistemi üzerinde yapılmıştır. Bu üretim sisteminde tipik bir otobüs üretim süreci sekiz ana sistemden ve bileşenlerden oluşmaktadır: aktarma sistemi (motor, soğutma sistemi, şanzıman), akslar (direksiyon sistemleri, tekerlekler, frenler, süspansiyon, şaft), havalandırma (klima, ısıtma fanları, klima kontrol sistemleri), elektrik (enstelasyon ağı, ışıklar, röleler, teşhis, bilgi sistemleri, güvenlik sistemleri, gösterge panelleri), kapılar (kumandalar, kilitler, bagaj kapıları), şase sistemi (hava kompresörü, borular, frenler, süspansiyon), iç mekân (koltuklar, konsollar, kaplamalar, ayna) ve son olarak dış trim (camlar ve aynalar).

Türkiye'de yerleşik olan bu şirket, 1960'lı yıllardan bu yana müşterilerine hem ticari hem de askeri alanda araç tasarımı, üretimi ve pazarlaması hizmeti sunan bir otomotiv sanayi tesisidir. Vaka şirketi rekabet gücünü kendi teknolojisinden, tasarım kabiliyetinden ve esnek üretim sistemi sayesinde müşterilerinin özel ihtiyaçlarını karşılayabilme becerisinden almaktadır. Şirket iç ve dış pazarda iyi bir üne sahip olup, kendi tesisinde faaliyet göstermektedir. Bu şirketin üretimi bir tesisten oluşmaktadır. Şirket, bugüne kadar dünya çapında binlerce araç satışı yapmıştır. Ayrıca 2011-2019 yılları arasında sadece otobüs gamında 178'den fazla yeni araç modeli (yeni ürün, türev araç ve yüz değişimi) piyasaya sürmüştür. Vaka şirketinde hibrit ve elektrikli araç

çalışmaları günümüzde devam etmektedir. İşletmede kuruluşundan itibaren Ar-Ge faaliyetlerine büyük önem verilmiş ve üretilen tüm ürünlerde kullanıma uygunluk ve kullanıcı ihtiyaçları ön planda tutulmuştur. Şirket, ortaya çıkan veya zaman içinde ortaya çıkması beklenen ihtiyaçları dikkate alarak üretilecek ürünlerin geliştirilmesi ve test edilmesi politikasını kalıcı olarak uygulamakta ve tasarım departmanı uygun gördüğü takdirde üretime başlamaktadır. Ar-Ge süreci, mevcut ürün yelpazesini genişletmenin yanı sıra, iç ve dış pazarların değişen taleplerine paralel olarak orijinal ürünler tasarlamada daimi olarak uygulanmaktadır.

Vaka şirketi, faaliyet gösterdiği gelişmekte olan pazardaki değişken ortam, artan rekabet baskısı, sınırlı talep ve rakipler nedeni ile oluşan aşırı kapasite nedeni ile bu pazarda sıkışmak yerine niş pazarlar için yenilikçi çözümler veya değişik talepler için ürün modifikasyonları tasarlayarak farklılaşma stratejisini tercih etmiştir. Şirketin bu stratejisi, mühendislik tasarım kapasitesi için zorlayıcı bir güç olmakta ve kaynakların sınırlı olduğu bir durumda tasarım ekibinin üzerinde gerilim oluşturmaktadır. Mevcut tasarım kapasitesi ile müşterilerin artan çeşitlilik taleplerine cevap vermek ve yenilikçi uygulamalar geliştirmek, özellikle de zaman kısıtı nedeniyle, ürün geliştirme sürecinde sık sık gecikmelere neden olmaktadır [47, 48]. Vaka Şirketinde ürün çeşitliliği, karar verme aşamasında önemli bir unsur olarak görülmemektedir. Bu nedenle geleneksel üretim alışkanlığı ile ürün çeşitliliğine karar verme süreci bağımsız bölümlerin farklı perspektiflerine göre şekillenmektedir. Dolayısıyla ürün çeşitliliğine karar verme süreci bütüncül bir bakış açısından ziyade farklı departmanların bireysel hedefleri doğrultusunda gerçekleştirilmektedir. Örneğin pazarlama departmanı, pazarı genişletme umudu ile işletmenin mevcut tasarım yükü ve kaynak kısıtlarını görmezden gelerek düşük hacimli ve yüksek çeşitlilikte üretim talep edebilir. Ancak artan çeşitlilik nedeniyle tasarım departmanı üzerinde oluşan zaman baskısı şirket için önemli sorunlar yaratabilmektedir. Şirket içi problemlere bakıldığında onarım, yeniden işleme, ek çalışma saatleri, eksik parça temini, geciken teslimatlar, ilave tasarım süreleri ve satış sonrası sorunlar dikkat çekmektedir. Şirket içi problemlerin yanı sıra garanti maliyeti, geri çağırma ve müşteri memnuniyetsizliği gibi dış başarısızlık faktörleri de ortaya çıkmaktadır. Dolayısıyla, ürün çeşitliliği kararına daha bütüncül bir bakış açısı kazandıracak bir yönteme ihtiyaç duyulmaktadır.

### 4. ARAŞTIRMANIN YÖNTEMİ (RESEARCH METHOD)

Geleneksel problem çözme yöntemleri karmaşık sistemlerde yer alan stratejik ve dinamik süreçlerin anlaşılmasında yetersiz kalabilmektedir. 1950'li yıllarda Forrester tarafından geliştirilen Sistem Dinamiği (SD) yaklaşımı, birçok alt sistemi bütünleştirerek tüm üretim sistemini bir bütün halinde değerlendirme imkânı sunar. SD, bir sistemi akışlar, seviyeler ve yardımcı diyagramlar vasıtasıyla görselleştirerek karmaşık süreçlerinin davranışını anlamaya yardımcı olur. Ayrıca SD, sistem üzerinde istenilen değişiklikleri belirlemeye ve test etmeye olanak sağlayan "sanal bir laboratuvar" oluşturmaya imkân sağlar [49]. Bu

sayede model üzerinde çok sayıda farklı senaryoları modellemek, analiz etmek ve denemek mümkün olmaktadır. Ürün çeşitliliğinin üretim sistemi üzerindeki etkilerinin inceleneceği bu çalışmada SD yaklaşımı kullanılacaktır.

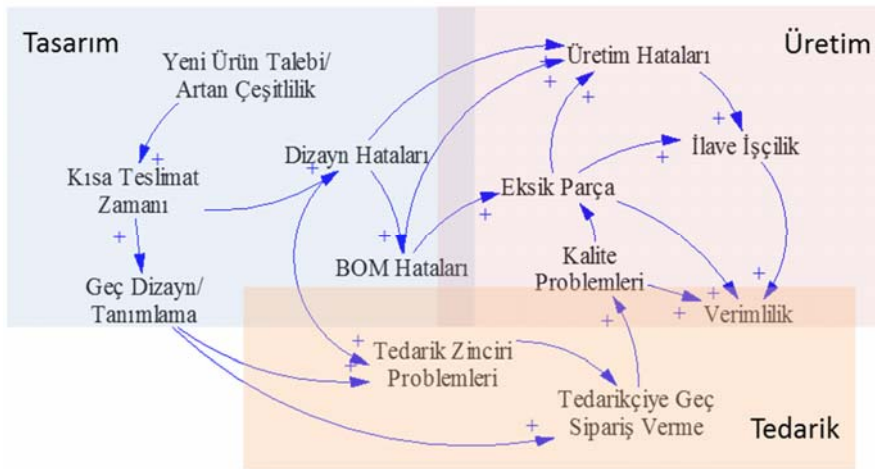
Simülasyon, üretim sistemlerinde yaşanabilecek değişikliklerin muhtemel etkilerinin sanal bir ortamda analiz edilmesini sağlayan önemli bir araçtır [50]. Şehir içi hibrit otobüslerin yakıt ekonomisinin iyileştirilmesinden [51] motor parçalarının performans analizine kadar [52] pek çok alanda simülasyon uygulamaları ile başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Bu çalışmada simülasyon modelini oluşturmadan önce karmaşık bir sistemdeki değişkenler arasındaki neden-sonuç ilişkilerini anlamak ve görselleştirmek amacıyla Nedensel Döngü Diyagramı (NDD) oluşturulmalıdır. NDD, dinamik bir sistemin elemanlarının karşılıklı etkileşimlerini ve ilişkilerini anlamayı kolaylaştıran ve sistemin yapısal davranışının döngü boyunca nasıl üretildiğini ve süreçteki neden-sonuç ilişkilerini inceleyen bir araçtır [53]. NDD, karmaşık bir sistemdeki değişkenler arasındaki neden-sonuç ilişkilerini anlamak ve görselleştirmek amacıyla kullanılacak en uygun araçlardan biridir [54]. Bu çalışmada da artan ürün çeşitliliğinin tasarım, tedarik ve üretim süreçlerine olan etkilerini analiz etmek amacıyla ilk olarak probleme özgü NDD oluşturulmuştur. Vaka şirketine özgü NDD oluşturma sürecinde üretim, satın alma, planlama, kalite, stok, mühendislik, metod departmanlarında görev yapan 29 uzman ile bir dizi görüşme yapılmış ve ortaya çıkan NDD üzerinde görüş birliği sağlanmıştır. NDD oluşturulduktan sonra, yine aynı uzman grubu ile yapılan görüşmeler doğrultusunda model haritası oluşturulmuştur. Model haritası NDD'nin daha detaylı bir şekli olup, sistemde yer alan tüm değişkenleri ve bu değişkenler arasındaki matematiksel ilişkileri içermektedir. Model haritası oluşturulurken verilerin elde edilebilirliği de dikkate alınmış ve uzman grubunun görüş birliği sağlanmıştır. Model haritasındaki değişkenler arasındaki matematiksel ilişkilerin kurulmasında işletmenin on yıllık verileri kullanılmıştır. Modelin oluşturulma ve analiz sürecinde STELLA programı kullanılmıştır.

## 5. Analiz ve Bulgular (Analysis and Findings)

### 5.1. Nedensel Döngü Diyagramı (Causal Loop Diagram)

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 yaklaştıkları görülmüştür. Örneğin stok ve planlama departmanları artan çeşitliliğin stokta tutulan malzemenin çeşitliliğini artırarak elde tutulan stok miktarında artışa neden olduğunu, bunun da 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 temel olarak parçaların zamanında temin edilememesi veya üretilmemesi nedeniyle eksik parça problemine neden olduğu, buna bağlı olarak da tasarım, tedarik, planlama, kalite ve üretim süreçlerini etkilediği konusunda fikir birliğine varılmıştır.

Uzmanlarla yapılan görüşmeler neticesinde vaka şirketine ilişkin nedensel döngü diyagramı Şekil 2'deki gibi oluşturulmuştur. Oluşturulan nedensel döngü diyagramı sistemdeki etkileşim halindeki değişkenleri, oklar vasıtasıyla değişkenler arasındaki ilişkinin yönünü (yani hangi değişkenin diğerini etkilediğini) ve +/- işareti ile değişkenler arasındaki ilişkinin pekiştirici mi yoksa dengeleyici mi olduğunu göstermektedir. NDD, çalışmanın kapsamı dikkate alınarak tasarım, tedarik ve üretim olmak üzere üç ana süreci kapsayacak şekilde oluşturulmuş olup, bu üç süreç arasındaki karşılıklı ilişkileri göstermektedir. Diyagram tasarım süreci ile başlamaktadır. Artan çeşitliliğin tasarım sürecine getirdiği iş yüküne bağlı olarak teslim süreleri kısalmaktadır. Kısalan teslim süreleri iş yoğunluğunu artırarak tasarımların geç tamamlanmasına, dizayn hatalarına ve buna bağlı olarak BOM hatalarına sebebiyet vermektedir. Tasarım sürecinde ortaya çıkan bu problemler tedarik zinciri problemlerine, tedarikçiye geç sipariş verme ve üretim hatalarına neden olurken, üretim hataları ise ek işçilik ve kalite problemlerine sebep olurken, ek işçilik ve kalite problemleri de üretim verimliliğini düşürmektedir. Üretim verimliliğinin düşmesi ise tedarikçiye geç sipariş verme ve üretim hatalarına neden olurken, üretim hataları ise ek işçilik ve kalite problemlerine sebep olurken, ek işçilik ve kalite problemleri de üretim verimliliğini düşürmektedir. Üretim verimliliğinin düşmesi ise tedarikçiye geç sipariş verme ve üretim hatalarına neden olurken, üretim hataları ise ek işçilik ve kalite problemlerine sebep olurken, ek işçilik ve kalite problemleri de üretim verimliliğini düşürmektedir.



Şekil 2. Vaka Şirketi için Nedensel Döngü Diyagramı (Causal Loop Diagram for the Case Company)

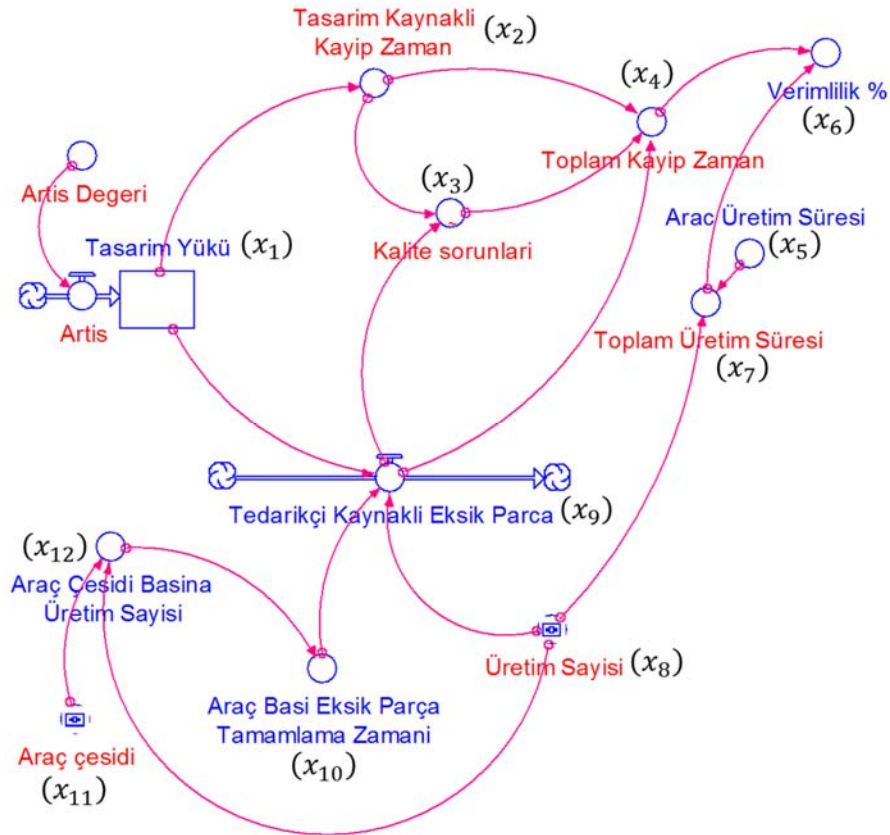
Diyagramın ikinci parçasında tasarım sürecinde yaşanan gecikmelerin, BOM ve dizayn hatalarının tedarik sürecine etkileri gösterilmektedir. Görüleceği gibi bu problemler, tedarik sürecinde tedarikçilere geç sipariş verme, hatalı sipariş veya hiç sipariş çıkmaması, dizayn hataları nedeniyle tedarik edilen parçanın kullanılmaması ve tekrar sipariş açılması neticesinde malzeme temininde gecikmeler ve kalite sorunları baş göstermektedir. Bahsedilen bu problemlerin tedarikçi ilişkileri ve artan malzeme temin maliyetleri üzerindeki etkileri çalışmanın kapsamına alınmamıştır. Üretim süreci hem tasarım hem de tedarik kaynaklı sorunlardan etkilenmektedir. Tasarım ve tedarik kaynaklı sorunların üretim sürecindeki en büyük etkisi hatalı ve eksik parçalı üretim olarak gerçekleşmektedir. Hatalı ve eksik parçalı olarak üretilen araçlarla ilgili sorunların çözülebilmesi için tekrar işçiliğe gerek duyulmakta, bu da verimlilik kaybına neden olmaktadır.

### 5.2. Model Haritası (Model Map)

Nedensel döngü diyagramı göz önüne alınarak uzman görüşleri doğrultusunda vaka şirketine ait model haritası Şekil 3'teki gibi oluşturulmuştur. Model haritası, tasarım yükündeki artışı ifade eden "artış değeri" değişkeni ile başlamaktadır. Model haritası üzerindeki ilişkiler numaralandırılmış olup her biri aşağıda ayrı ayrı açıklanmıştır.

**Tasarım yükü endeksi ( $x_1$ ):** Vaka şirketinde tasarımlar kapsamlarına göre yeni araç, kapsamlı değişiklik, orta seviyeli değişiklik ve minör değişiklik projeleri olmak üzere dört seviyede değerlendirilmektedir. *Yeni araç projeleri* tamamen yeni bir aracı devreye almak veya 8 aydan fazla süren ve tasarım grubunun iş kapasitesinin yaklaşık %10-20'sini alan projelerdir. *Kapsamlı değişiklik projeleri*, motor, güç aktarma organları veya gövdede kapsamlı değişiklikleri kapsayan, 4-8 aylık planlama süresi olan ve tasarım grubu kapasitesinin %8-15'ini alan projelerdir. *Orta seviyeli değişiklik projeleri*, araç içi veya güç paketinde çok kapsamlı olmayan değişiklikler gerektirmeyen, 2-4 ay arası planlama süresinde olan ve tasarım grubu kapasitesinin %5-8'ini alan projelerdir. Son olarak *minör değişiklikler* ise 0-2 ay arasında tamamlanabilen projeler olup tasarım grubu kapasitesinin %3-5'ini gerektirir. Tasarım yükü, tasarım projesi sayısına göre birer birer yükselmekte olup, maksimum tasarım yükü 8 olarak belirlenmiştir. Modelin çalıştığı her döngüde endeks 1 birim artmakta ve 8'e ulaştığında döngü sonlanmaktadır.

**Tasarım kaynaklı kayıp zaman ( $x_2$ ):** Tasarım yükünün tasarım sürecinde neden olduğu zaman kaybını göstermektedir. Hatalı tasarım, tasarımın geç ulaştırılması, BOM hataları kaynaklı sorun nedeni ile kaybedilen hatalar bu kapsamda değerlendirilmiştir. Model haritasından görüleceği gibi, tasarım kaynaklı kayıp zaman değişkeninin tek girdisi tasarım yükü endeksidir ( $x_1$ ). Vaka şirketinin



Şekil 3. Vaka şirketi için model haritası (Model map for the case company)



geçmiş yıllara ilişkin verilerine göre modelde tasarım yükü ve tasarım kaynaklı kayıp zaman üzerinde regresyon analizi yapılmış ve Eş. 1 elde edilmiştir.

$$x_2 = 468.39x_1^2 - 3034.2x_1 + 10151 \quad (1)$$

Regresyon analizi sonuçları R değerinin 0,962 olduğunu, R<sup>2</sup> değerinin ise 0,927 olup bağımsız değişkenin bağımlı değişken tarafından iyi açıklandığını göstermektedir. F = 88,9 ve gözlenen anlamlılık düzeyi 3,15 olup kurulan regresyon modelinin anlamlı olduğu görülmektedir.

*Kalite sorunları (x<sub>3</sub>):* Tasarım hataları nedeniyle parça montaj ve tedarikçi kaynaklı parça hatalarından gelen uygunsuzlukları kapsar. Bu çalışmada tedarikçi kaynaklı uygunsuzlukların tasarım nedeni olanları dikkate alınmıştır. Kalite sorunlarının iki temel girdisi tasarım kaynaklı kayıp zaman (x<sub>2</sub>) ve tedarikçi kaynaklı eksik parçadır (x<sub>9</sub>). Bu ilişki, işletmenin 10 yıllık verilerine çoklu regresyon analizi yapılarak Eş. 2 elde edilmiştir:

$$x_3 = 0.2443x_2 + 0.03x_9 - 220 \quad (2)$$

*Toplam kayıp zaman (x<sub>4</sub>):* Toplam kayıp zamanın üç temel bileşeni bulunmaktadır: tasarım kaynaklı kayıp zaman (x<sub>2</sub>), kalite sorunları (x<sub>3</sub>) ve tedarikçi kaynaklı kayıp zaman (x<sub>9</sub>). Yapılan çoklu regresyon analizi ile bu ilişki aşağıdaki şekilde formüle edilmiştir:

$$x_4 = x_2 + x_3 + (x_9 \times 0,07) \quad (3)$$

*Araç üretim süresi (x<sub>5</sub>):* Bir birim aracın üretilmesi için planlanmış ve verimlilik hesaplarında baz alınan süredir. Bu modelde vaka şirketinin üretimdeki araç çeşidinin ağırlığı esas alınarak geçmiş yılların ortalaması alınmıştır. Modelin pratik uygulamasında kullanıcıların araç üretim süresi değerini o yıl planlanan araç çeşidinin ortalama süresine göre alması gerekmektedir.

*Verimlilik (x<sub>6</sub>):* Verimlilik değişkeni, kurulan sistem dinamiği modelinin çıktısıdır. İki temel girdisi toplam kayıp zaman (x<sub>4</sub>) ve toplam üretim süresidir (x<sub>7</sub>). Verimlilik değişkeni, tasarım hatalarından kaynaklanan toplam mesai veya harcanan ilave işgücü/saat nedeni ile oluşan verim kaybını, yani verimsizliği içermektedir. Çalışma kapsamında verimsizlik, bir araç için gerekli standart üretim süresine ek olarak kullanılan ilave işçiliktir. Modelde, toplam kayıp zamanın üretim zamanına oranı verim kaybını göstermektedir. Bu oranının 1'den çıkartılması ile verimli kullanılan süre oranı hesaplanmış olur. Verimlilik Eş. 4 ile hesaplanmıştır:

$$x_6 = \left[ 1 - \left( \frac{x_4}{x_7} \right) \right] \times 100 \quad (4)$$

*Toplam üretim süresi (x<sub>7</sub>):* Yıllık araç üretim sayısı (x<sub>8</sub>) ile araç başı ortalama üretim süresinin (x<sub>5</sub>) çarpılması ile elde edilir (Eş. 5). Toplam kayıp zamanın toplam üretim süresine oranı verim kaybı olarak nitelendiğinden, toplam üretim süresi verimlilik hesabının önemli bir bileşenidir.

$$x_7 = x_5 \times x_8 \quad (5)$$

*Üretim sayısı (x<sub>8</sub>):* Yıl içerisinde üretilen veya üretilmesi planlanan araç sayısıdır. Araç üretim sayısının toplam işgücü kapasitesinin altında olması, kaynakların kullanılmamasından ötürü verimsizlik yaratır. Araç üretim sayısının işgücü kapasitesinin çok üzerinde olması ise, ilave iş yükünün getirdiği gerekli insan kaynağı ihtiyacı nedeniyle sürekli mesai yapılması, tanımlı stok alanlarının yetersiz kalması ve malzeme hareketlerinin planlanan seviyenin üstüne çıkmasının getirdiği kayıplar nedeniyle verimsizliğe neden olur. Kurulan modelde üretim sayısı, işletmenin geçmiş yıllardaki ortalama değerleri göz önüne alınarak sabit bir değer alınmıştır.

*Tedarikçi kaynaklı eksik parça (x<sub>9</sub>):* Tedarikçilerden kaynaklanan, zamanında teslim edilemeyen veya kalite sorunu sebebiyle kullanılmayan parçalar nedeniyle oluşan zaman kayıplarıdır. Tedarikçilerin parça ve hizmet sunumunda yaşanan gecikme ve kalite hatalarının bir kısmı tasarım kaynaklıdır. Mevcut tasarımın müşteri talebi veya araç testinde görülen sorunlar nedeniyle değişmesi, tasarım sürecinin gecikmesine veya hatalı tasarıma neden olmaktadır. Her iki durum da nihayetinde tedarikçi üzerinde bir zaman baskısı oluşturmakta ve tedarikçi için gerekli üretim zamanının (tedarik, imalat, kontrol) daralarak hatalı parça üretimine veya geç teslimatlara neden olmaktadır. Tasarım kaynaklı hataların tedarik kaynaklı hatalara oranını bulmak amacıyla vaka şirketinin geçmiş kayıtları incelenmiş ve tedarik sürecinde yaşanan zaman kayıplarının ne kadarının tasarım kaynaklı olduğu belirlenmiştir. Tedarikçi kaynaklı eksik parçanın (x<sub>9</sub>) bileşenleri tasarım yükü endeksi (x<sub>1</sub>), üretim sayısı (x<sub>8</sub>) ve araç başı eksik parça tamamlama zamanıdır (x<sub>10</sub>). Tedarikçi kaynaklı eksik parça miktarı ile bir eksik parçayı tamamlamak için ihtiyaç duyulan sürenin çarpımı tedarik kaynaklı kayıp zamanı vermektedir. Buna göre, vaka şirketinin geçmiş verileri regresyon analizine tabi tutularak Eş. 6 elde edilmiştir:

$$x_9 = 7383.5x_1 + x_8 \times x_{10} + 33837 \quad (6)$$

*Araç başı eksik parça tamamlama zamanı (x<sub>10</sub>):* Üretim sürecindeki parça eksikliği nedeniyle bir araç için ortalama kayıp zaman değeridir. Vaka şirketinin geçmiş 10 yıllık araç çeşidi başına üretim sayısı (x<sub>12</sub>) verilerine ilişkin regresyon analizi yapılarak Eş. 7 elde edilmiştir:

$$x_{10} = 0.0397x_{12}^2 - 3.2309x_{12} + 119.04 \quad (7)$$

*Araç çeşidi (x<sub>11</sub>):* Bir yıl içerisinde yapılan toplam üretimdeki araç çeşidi sayısıdır. Yıl içerisindeki araç çeşidinin fazla olması ürün portföyünün genişliğini ifade eder. Ancak beraberinde kurulum/hazırlık zamanında artış, hat dengeleme sorunları ve verimlilik seviyesinde düşüş getirir. Araç çeşidi, sadece üretim sürecindeki çeşitliliği ifade ettiğinden tasarım projesindeki çeşitlilik ile karıştırılmamalıdır. Üretimdeki araç çeşitliliğinin tasarım yüküne etkisi yoktur. Vaka şirketinin geçmiş yıllara ilişkin verilerine göre sabit ortalama bir değer alınmıştır. Modelin

pratik uygulamasında kullanıcı o yıl planlanan araç çeşidine göre ortalama almalıdır.

*Araç çeşidi başına üretim sayısı* ( $x_{12}$ ): Yıl içerisinde üretilen toplam araç sayısının ( $x_8$ ) araç çeşidine ( $x_{11}$ ) bölünmesi ile hesaplanmıştır (Eş. 8).

$$x_{12} = \frac{x_8}{x_{11}} \quad (8)$$

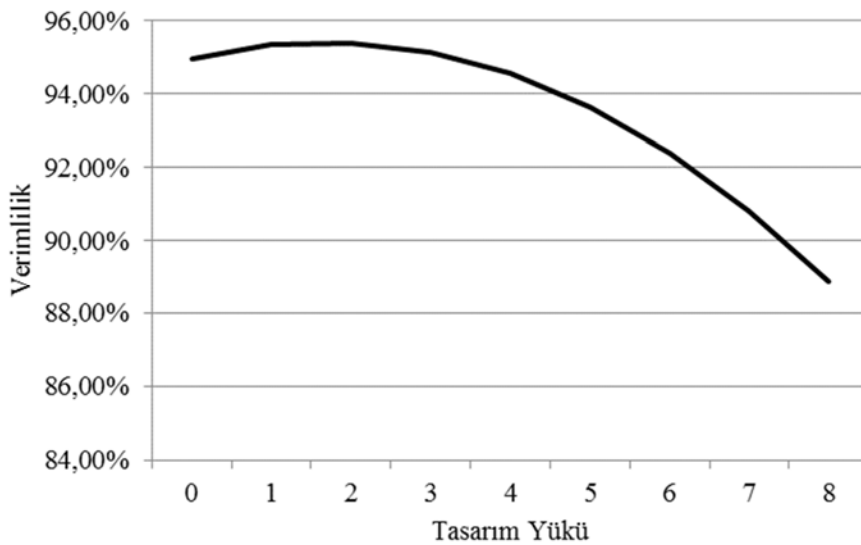
### 5.3. Bulgular (Findings)

Model haritasındaki değişkenleri ve bu değişkenler arasındaki ilişkileri belirleyen değerlerin ve formüllerin yerlerine yerleştirilmesinden sonra model çalıştırılmıştır. Modelde yıllık otobüs üretim miktarı ve araç çeşidi sabit olarak alınmıştır. Buna göre, işletmenin yıllık ortalama değerleri dikkate alınarak yıllık otobüs üretim miktarının 800, yıllık araç çeşidinin ise 30 olduğu varsayılmıştır. Bu varsayım altında tasarım yükü endeksinin verimliliğe oranı Şekil 4'te verilmiştir. Grafiğin dikey eksenini şirketin verimliliğini, yatay eksenini ise tasarım yükünü göstermektedir. Tasarım yükünün 0 olması, işletmede hiçbir yeni araç tasarımı projesi olmadığını göstermektedir. Böylece tasarım yükündeki artışın, verimlilik üzerindeki etkileri takip edilebilmektedir.

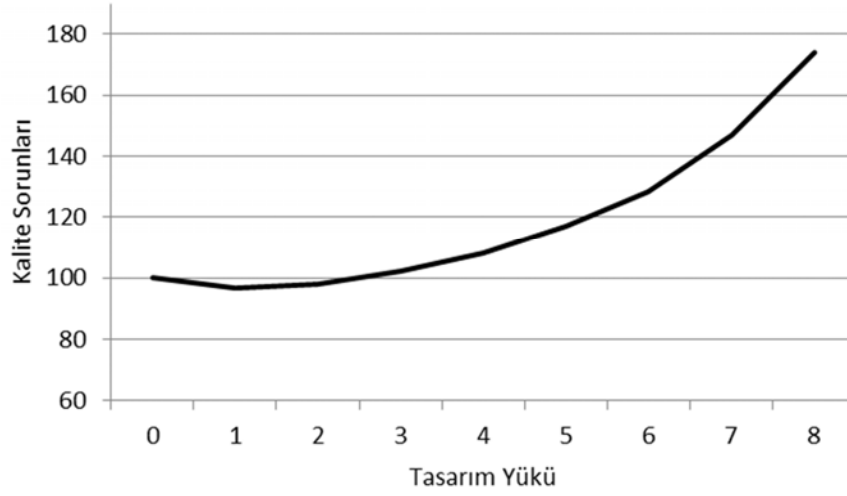
Grafikten görüleceği gibi tasarım yükü 0 iken verimlilik %94,97 olarak hesaplanmıştır. Tasarım yükü arttığında verimliliğin de belirli bir noktaya kadar arttığı gözlemlenmiştir. Buna göre tasarım yükü 1 olduğunda verimlilik %95,35'e, 2 olduğunda ise en yüksek seviyesine ulaşarak %95,4'e yükselmektedir. Ancak bu noktadan sonra tasarım yükündeki her artışın üretim verimliliğini düşürmeye başladığı gözlemlenmiştir. Nitekim tasarım yükü maksimum seviyeye ulaştığında üretim verimliliği en düşük seviyesine, yani %88,89'a gerilemiştir.

Tasarım yükünün artması sadece üretim verimliliğini değil, ilişkili birçok süreçte de etkisini göstermektedir. Şekil 5, tasarım yükü endeksi ile kalite sorunlarının ilişkisini göstermektedir. Grafiğin yatay eksenini tasarım yükü endeksinin, dikey eksenini ise kalite hata miktarını göstermektedir. Tasarım yükü endeksinin 0 olduğu durumdaki kalite sorunları adedi 100'e eşitlenmiş, diğer endeks değerleri de buna göre belirlenmiştir. Şekil 5'ten görüleceği gibi, tasarım yükü 0 iken 100 olan kalite sorunu miktarı, tasarım yükünün 1'e çıkmasıyla birlikte %3,16 oranında azalarak 96,84'e düşmektedir. Tasarım yükü 2'ye yükseldiğinde kalite sorunları 97,85'e yükselmişse de, başlangıç değerinin altında kalmıştır. Ancak bu noktadan sonra tasarım yükündeki artışın kalite üzerindeki olumsuz etkilerinin daha yüksek bir oranda gerçekleştiği görülmektedir. Nitekim tasarım yükü 3 olduğunda kalite hataları 102,01'e yükselirken, tasarım yükü maksimum seviyeye yükseldiğinde kalite hataları 174,03'e çıkmaktadır.

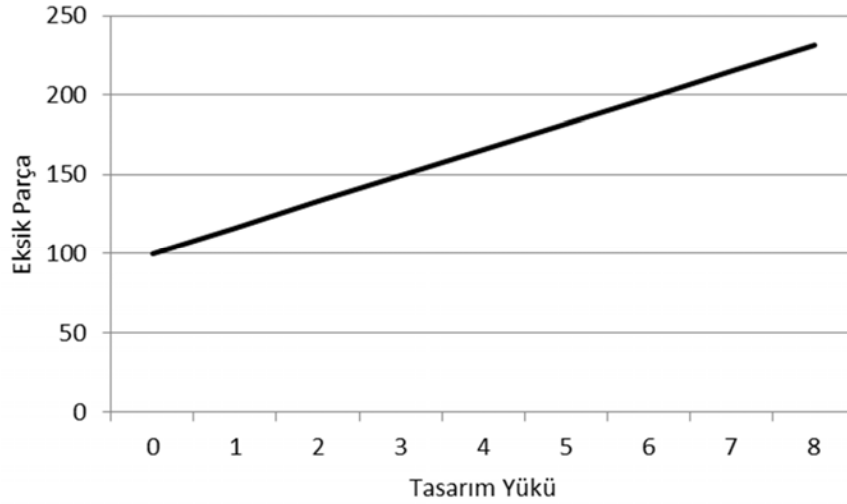
Tasarım yükündeki artış, tedarik sürecinden kaynaklı eksik parça sayısında da ciddi bir artışa neden olmaktadır. Tasarımda yapılan değişiklikler tedarikçi üzerinde bir zaman baskısı oluşturarak teslimatların geç veya hatalı yapılmasına neden olmaktadır. Şekil 6, tasarım yükü endeksi ile tedarikçi kaynaklı eksik parça ilişkisini göstermektedir. Grafiğin yatay eksenini tasarım yükü endeksinin, dikey eksenini ise eksik parça miktarını göstermektedir. Tasarım yükü endeksinin 0 olduğu durumdaki eksik parça miktarı 100'e eşitlenmiş, diğer endeks değerleri de buna göre belirlenmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, eksik parça miktarının tasarım yükündeki artışa paralel olarak arttığı görülmektedir. Tasarım yükü 0'dan 1'e yükseldiğinde eksik parça miktarı 100'den 116'ya, 2'ye yükseldiğinde 133'e ve en nihayetinde 8'e yükseldiğinde 231'e çıkmaktadır. Bununla beraber, eksik parça miktarındaki artış oranlarının, bir önceki aşama ile kıyaslandığında giderek azaldığı görülmüştür. Örneğin



Şekil 4. Tasarım yükünün verimliliğe etkisi (Impact of design load on productivity)



Şekil 5. Tasarım yükünün kalite sorunlarına etkisi (Impact of design load on quality problems)



Şekil 6. Tasarım yükünün eksik parça miktarına etkisi (Impact of design load on missing piece quantity)

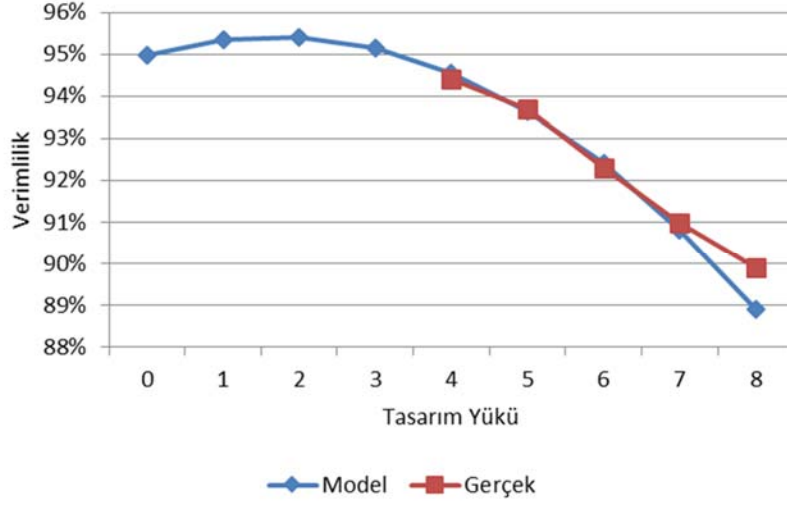
tasarım yükü endeksi 1'e yükseldiğinde, eksik parça miktarı %16,35 oranında artmaktadır. Tasarım yükü 2 olduğunda, eksik parça miktarı bir önceki aşamaya göre %14,11 oranında artmaktadır. Tasarım yükü en nihayetinde 8 olduğunda, süreçteki eksik parça oranı tasarım yükünün 7 olduğu duruma kıyasla sadece %7,64 artış göstermiştir.

#### 5.4. Model Geçerliliği (Model Validation)

Model geçerliliği, bir modelin modellenen sistemi yeterince yansıtmaya özelliğini ifade etmekte olup, model kalitesinin en önemli göstergesidir [55, 56]. Analizlerde kullanılan dinamik modelde yer alan yapılar ve değişkenler arasındaki ilişkilerin geçerliliğini doğrulamak amacıyla, nedensel döngü diyagramı (NDD) vaka şirketinde çalışan uzmanların görüşleri doğrultusunda oluşturulmuştur. Çalışmada kullanılan dinamik model haritası, uzman görüşleri neticesinde doğrulanan NDD'ye dayalı olarak

oluşturulduğundan, bu çalışmada önerilen dinamik model içerisinde yer alan yapılar ve değişkenler arasındaki ilişkiler doğrulanmış olmaktadır.

Çalışma kapsamında oluşturulan sistem dinamiği modeli ile elde edilen sonuçların gerçek verilerle tutarlılığını test etmek amacıyla, elde edilen simülasyon değerleri vaka şirketinin geçmiş on yıldaki tecrübelerinden elde edilen gerçek verilerle kıyaslanmıştır. Kıyaslama sonucu Şekil 7'de gösterilmiştir. Simülasyon modeli tasarım yükünün 0 ile 8 arasındaki değişimine göre işletmenin verimliliğini hesaplanmıştır. Uygulamada ise vaka şirketinin tasarım yükünün geçtiğimiz on yılda 4 ile 8 arasında değiştiği görülmektedir. Şekil 7'den görüleceği üzere, simülasyon modelinin tasarım yüküne bağlı olarak ürettiği verimlilik değerleri ile gerçek veriler büyük oranda örtüşmektedir. Böylece önerilen sistem dinamiği modelinin modellenen sistemi başarılı bir şekilde yansıttığı söylenebilir.



Şekil 7. Sonuçların gerçek verilerle kıyaslanması (Comparing the results with real data)

## 6. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada artan ürün çeşitliliğinin bir otobüs üretim sistemi üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla bir sistem dinamiği modeli önerilmiştir. Literatürde ürün çeşitliliğinin işletme süreçleri üzerindeki etkilerini analiz etmek amacıyla sıkça kullanılan doğrusal ve statik modelleme tekniklerinden farklı olarak sürecin bir bütün olarak ele alınmasını sağlayan sistem dinamiği yaklaşımının kullanılması, bu çalışmanın literatüre bir katkısıdır. Bununla birlikte, bilindiği kadarıyla, bu çalışma ürün çeşitliliğinin otobüs üretim sistemlerindeki etkilerini inceleyen literatürdeki ilk çalışmadır. Binek otomobil üretim sisteminden önemli farklılıklar gösteren otobüs üretim sisteminin ele alınmış olması da bu çalışmanın literatüre bir katkısı olarak değerlendirilebilir.

Sistem dinamiği modelinin geliştirme ve uygulama sürecinde vaka şirketinin geçmiş on yıllık verileri analiz edilmiş ve şirkette çalışan uzmanlarla kapsamlı ve uzun süreli görüşmeler yapılmıştır. Ürün çeşitliliğindeki bir artışın diğer süreçlere etkisini analiz edebilen bu modelin, uygun tasarım yükünü belirleyerek ürün çeşitliliği seviyesine karar verme noktasında yöneticilere yardımcı olması beklenmektedir. Böylece ürün çeşitliliği kararlarının departmanların bireysel öngörülerini ve perspektifleri ile değil, işletmenin genel faydasını artıracak şekilde verilmesi mümkün olabilecektir.

Araştırmanın temel bulguları şu şekilde sıralanabilir. Ürün çeşitliliğindeki artışa bağlı olarak artan tasarım yükü, belirli bir noktaya kadar üretim verimliliğini artırarak işletmeye olumlu bir katkı sunmaktadır. Ancak bu noktadan sonra tasarım yükünde yaşanan her artışın verimliliği ciddi şekilde düşürdüğü ortaya koyulmuştur. Benzer bir durum kalite sorunlarında da görülmektedir. Tasarım yükündeki artışın başlangıçta kalite problemlerini azalttığı görülmüşse de, ilerleyen aşamalarda tasarım yükündeki artışa bağlı olarak kalite problemlerinin ciddi şekilde arttığı tespit edilmiştir.

Tasarım yükündeki artış tedarik sürecinde de aksamalara ve hatalara sebebiyet vererek tedarikçi kaynaklı eksik parça sayısında ciddi bir artışa sebep olmaktadır. Tüm bu bulgular doğrultusunda, karar verme sürecinde tasarım yükündeki artışın pazar payı üzerindeki olumlu etkilerinin yanı sıra, üretim sürecindeki etkilerinin de dikkate alınması gerektiği ve işletmelerin kendileri için uygun bir tasarım yükü seviyesi belirlemesinin gerekliliği ortaya konmuş ve bunun için karar vericilere bir model sunulmuştur. Bu model vaka şirketi ile benzer özellikler sergileyen diğer firmalar tarafından da aynı şekilde veya bazı küçük değişikliklerle kullanılabilir. Önerilen model ileriki çalışmalarda ürün çeşitliliğinin stok politikaları ve satış sonrası hizmetleri üzerindeki etkilerini de kapsayacak şekilde genişletilebilir. Ayrıca çeşitlilik artışına bağlı olarak artan süreç karmaşıklığını modele dâhil edebilmek için de ileri çalışmalara ihtiyaç vardır.

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Magee, C.L., de Weck, O.L., An Attempt at Complex System Classification, Massachusetts Institute of Technology, 2002.
2. Kersten, W., Grussenmeyer R., Lammers T., Complexity management in distribution networks- reviewing current approaches, Research in Logistics & Production, 2 (1), 55-68, 2012.
3. Efthymiou, K., Mourtzis, D., Pagoropoulos, A., Papakostas, N., Chryssolouris, G., Manufacturing systems complexity analysis methods review, International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 29 (9), 1025-1044, 2016.
4. Kohr, D., Budde, L., Friedli, T., Identifying Complexity Drivers in Discrete Manufacturing and Process Industry, The 50th CIRP Conference on Manufacturing Systems, 2017.
5. Lyons, A.C., Um, J., Sharifi, H. Product variety, customisation and business process performance: A mixed-methods approach to understanding their

- relationships, *International Journal of Production Economics*, 221, 1-13, 2020.
6. MacDuffie, J.P., Sethuraman, K., Fisher, M.L., *Product Variety and Manufacturing Performance: Evidence from the International Automotive Assembly Plant Study*, *Management Science*, 42 (3), 307-474, 1996.
  7. Delic, M., Eyers, D.R. The effect of additive manufacturing adoption on supply chain flexibility and performance: An empirical analysis from the automotive industry, *International Journal of Production Economics*, 228, 1-15, 2020.
  8. Randall, T.R., Terwiesch, C., Ulrich, K. *User Design of Customized Products*, *Marketing Science*, 26 (2), 268-280, 2007.
  9. Aggeri, F., Segrestin, B., *Innovation and project development: an impossible equation? Lessons from an innovative automobile project development*, *R&D Management*, 37 (1), 37-47, 2007.
  10. Webbink, R.F., Hu, S.J., *Automated generation of assembly system-design solutions*, *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2 (1), 32-39, 2005.
  11. Marcora, S.M., Staiano, W., Manning, V., *Mental fatigue impairs physical performance in humans*, *Journal of Applied Physiology*, 106, 857-864, 2009.
  12. Trattner, A.L., Hvam, L., Herbert-Hansen, Z.N.L., Raben, C., *Product variety, product complexity and manufacturing operational performance: A systematic literature review*, 24th International Annual EurOMA Conference, Edinburgh, United Kingdom, 2017.
  13. Forrester, J.W., *System dynamics—the next fifty years*, *System Dynamics Review*, 23 (2-3), 359-370, 2007.
  14. Lane, D.C., *The power of the bond between cause and effect: Jay Wright Forrester and the field of system dynamics*, *System Dynamics Review*, 23 (2-3), 95-118, 2007.
  15. Fisher, M., Jain, A., MacDuffie, J.P., *Strategies for Product Variety: Lessons from the Auto Industry, içinde Redesigning the Firm*, (ed) Bowman, E.H., Kogut, B.M., Oxford University Press, 1995.
  16. Ramdas, K., *Managing Product Variety: An Integrative Review and Research Directions*, *Production and Operations Management*, 12 (1), 79-101, 2003.
  17. Scavarda, L.P., Schaffer, J., Scavarda, A.J., Reis, A.C., Schleich, H., *Product variety: an auto industry analysis and a benchmarking study*, *Benchmarking An International Journal* 16 (3), 387-400, 2009.
  18. Sanderson, S., Uzumeri, M., *The innovation imperative: strategies for manufacturing product models and families*. Irwin Professional Publisher, Illinois, 1997.
  19. Cooper, R.G., *The drivers of success in new-product development*, *Industrial Marketing Management*, 76, 36-47, 2019.
  20. Mason, R.B., Dobbstein, T., *The Influence of the Level of Environmental Complexity and Turbulence on the Choice of Marketing Tactics*, *Journal of Economics and Behavioral Studies*, 8 (2), 40-55, 2016.
  21. Ramdas, K., Sawhney, M., *A Cross-Functional Approach to Evaluating Multiple Line Extensions for Assembled Products*, *Management Science*, 47 (1), 22-36, 2000.
  22. Schleich, H., Schaffer, J., Scavarda, L.F., *Managing Complexity in Automotive Production*, 19th International Conference on Production Research, 2005
  23. Jacobs, M.A., Swink, M., *Product portfolio architectural complexity and operational performance: Incorporating the roles of learning and fixed assets*, *Journal of Operations Management*, 29 (7-8), 677-691, 2011.
  24. Baldwin, C.Y., Clark, K., *Design rules: The power of modularity*, The MIT Press, 2000.
  25. Vogel, W., Lasch, R. *Complexity drivers in manufacturing companies: a literature review*, *Logistics Research*, 9, 1-66, 2016.
  26. Fisher, M.L., Ittner, C.D., *The Impact of Product Variety on Automobile Assembly Operations: Empirical Evidence and Simulation Analysis*, *Management Science*, 45 (6), 1999.
  27. Cooper, W.W., Sinha, K.K., Sullivan, R.S., *Measuring Complexity in High-Technology Manufacturing: Indexes for Evaluation*, *Interfaces*, 22 (4), 38-48, 1992.
  28. Nafisia, R.M., Wiktorsson, M., Rösiöb, C., *Manufacturing Involvement in New Product Development: An Explorative Case Study in Heavy Automotive Component Assembly*, ru26th CIRP Design Conference, *Procedia CIRP*, 50, 65-69, 2016.
  29. Weisera, A.K., Baasnerb, B., Hoschb, M., Schlueterb, M., Ovtcharovaave, J., *Complexity Assessment of Modular Product Families*, ru26th CIRP Design Conference, *Procedia CIRP*, 50, 595-600, 2016.
  30. Fujimoto, H., Ahmed, A., Iida, Y., Hanai, M., *Assembly Process Design for Managing Manufacturing Complexities Because of Product Varieties*, *International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, 15, 283-307, 2003.
  31. Bozarth, C.C., Warsinga, D.P., Flynn, B.B., Flynn, E.J., *The impact of supply chain complexity on manufacturing plant performance*, *Journal of Operations Management*, 27, 78-93, 2009.
  32. ElMaraghy, H., Schuh, G., ElMaraghy, W., Piller, F., Schönsleben, P., Tseng, M., Bernard, A., *Product variety management*, *CIRP Annals*, 62 (2), 629-652, 2013.
  33. Amabile, T.M., Mueller, J.S., Simpson, W.B., Hadley, C.N., Kramer, S.J., Fleming, L., Patterson, C., *Time Pressure and Creativity in Organizations: A Longitudinal Field Study*, Harvard Business School Working Paper, No. 02-073, 2002.
  34. Karayazı, F., Cedimoğlu, İ.H., *Ürün varyant konfigürasyon yönetiminin ürün ağacı ve hataları üzerindeki etkilerinin incelenmesi*, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 19 (2), 187-196, 2015.
  35. Koren, Y., Shpitalni, M., Gu, P., Hu, S.J., *Product Design for Mass-Individualization*, CIRP 25th Design Conference Innovative Product Creation, *Procedia CIRP*, 36, 64-71, 2015.
  36. Stäblein, T., Holweg, M., Miemczyk, J., *Theoretical versus actual product variety: how much customisation do customers really demand?*, *International Journal of*

- Operations & Production Management, 31 (3), 350-370, 2011.
37. Cupek, R., Ziebinski, A., Huczala, L., Erdogan, H., Agent-Based Manufacturing Execution Systems for Short-Series Production Scheduling, *Computers in Industry*, 82, 245-258, 2016.
  38. Federal Transit Administration, Asset Inventory Module Report, 2017.
  39. Zeltzer, L.L.D.L.G., Analysing and Levelling Manufacturing Complexity in Mixed-Model Assembly Lines, Basılmamış Doktora Tezi, Universiteit Gent, 2016.
  40. Kılınççı, Ö., Petri net-based algorithm for maximizing production rate in assembly lines, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 35 (2), 753-763, 2020.
  41. Wochner, S., Grunow, M., Stäblein, T., Stolletz, R., 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, 2016.
  42. Buergin, J., Blaettchen, P., Qu, C., Lanza, G., Assignment of Customer Specific Orders to Plants with Mixed-Model Assembly Lines in Global Production Networks, *Procedia CIRP*, 50, 330-335, 2016.
  43. Chatras, C., Giard, V., Sali, M., High variety impacts on Master Production Schedule: a case study from the automotive industry, *IFAC-PapersOnLine*, 48 (3), 1073-1078, 2015.
  44. Türker, A.K., Göleç, A., Aktepe, A., Ersöz, S., İpek, M., Çağıl, G., A real-time system design using data mining for estimation of delayed orders and application, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 35 (2), 709-724, 2020.
  45. Bednar, S., Salanci, V., Product Variety Induced Complexity and its Measurement, *Acta Technologia - International Scientific Journal about Technologies*, 2 (2), 5-9, 2016.
  46. Seha, S., Zamberi J., Fairul, A.J., design and simulation of integration system between automated material handling system and manufacturing layout in the automotive assembly line, 4th International Conference on Mechanical Engineering Research (ICMER2017), 1-10, 2017.
  47. Martin, M.V., Ishi, K., Design for variety: Development of complexity indices and design charts, *Proceedings of ASME Design Engineering Technical Conferences, (DETC'97)*, 1997.
  48. Schuh, G., Rebentisch, E., Riesener, M., Mattern, C., Fey, P. Method for the evaluation and adaptation of new product development project complexity, *Procedia CIRP*, 60, 338-343, 2017.
  49. Coyle, G., System Dynamics Review: Qualitative and quantitative modelling in system dynamics: some research questions, *System Dynamics Review*, 16 (3), 225-244, 2000.
  50. Belgin, Ö., Hybrid approach in a production line for multi-objective simulation optimization, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 34 (4), 1847-1859, 2019.
  51. İnce, B. ve Başlamışlı, S.Ç., Design of energy management system algorithms for the improvement of fuel economy of intracity hybrid buses and development of an adaptive hybrid algorithm, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 36 (1), 559-575, 2021.
  52. Arabacı E., Simulation and performance analysis of a spark ignition engine using gasoline and LPG as fuel, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 36 (1), 447-457, 2021.
  53. Duggan, J., *System Dynamics Modeling with R*, Springer International Publishing, 2016.
  54. Çil, İ., Karaduman, E., Özçetin, K.N., İpek, M., Bir tekstil firmasında satış tahminleri üzerinden emniyet stoğu gün sayısının system dinamiği yaklaşımıyla belirlenmesi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 22 (2), 826-837, 2018.
  55. Schwanning, M. ve Groesser, S., System Dynamics Modeling: Validation for Quality Assurance. In: Dangerfield B. (eds) *System Dynamics. Encyclopedia of Complexity and Systems Science Series*. Springer, New York, 2020.
  56. Barlas, Y. Formal aspects of model validity and validation in system dynamics, *System Dynamics Review*, 12 (3), 183-210, 1996.