

**T.C.**  
**GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ**  
**MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ÇARPIŞMA TESTİ VE BENZER PROBLEMLERİN SİSTEM**  
**DİNAMİĞİ KAPSAMINDA VENSİM YAZILIMI İLE**  
**MODELLENMESİ**

**YASİN ZÜLFİKAROĞLU**  
**YÜKSEK LİSANS TEZİ**  
**TASARIM VE İMALAT MÜHENDİSLİĞİ**

**GEBZE**  
**2008**

**T.C.**  
**GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ**  
**MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ÇARPIŞMA TESTİ VE BENZER PROBLEMLERİN SİSTEM**  
**DİNAMİĞİ KAPSAMINDA VENSİM YAZILIMI İLE**  
**MODELLENMESİ**

**YASİN ZÜLFİKAROĞLU**  
**YÜKSEK LİSANS TEZİ**  
**TASARIM VE İMALAT MÜHENDİSLİĞİ**

**TEZ DANIŞMANI**  
**Yrd. Doç. Dr. MEHMET ALİ ARSLAN**

**GEBZE**  
**2008**

|                                                                                                                                          |                                                                              |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|
|  <p><b>GEBZE YÜKSEK<br/>TEKNOLOJİ<br/>ENSTİTÜSÜ</b></p> | <p><b>MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ<br/>ENSTİTÜSÜ<br/>JÜRİ ONAY FORMU</b></p> |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|

**JÜRİ**

ÜYE ( BAŞKAN) : Doç. Dr. Fehmi ERZİNCANLI

ÜYE : Yrd. Doç. Dr. Mehmet Ali ARSLAN

ÜYE : Yrd. Doç. Dr. Hacı Ali Mantar

Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 28 /07/2008 tarih ve 2008/25 sayılı kararı ile yukarıdaki öğretim elemanlarından oluşmuş jüri tarafından düzenlenen ...../...../..... tarihli Tez Savunma Tutanağı neticesinde Yüksek Lisans öğrencisi Yasin ZÜLFİKAROĞLU' nun çalışması GYTE Mühendislik ve Fen Bilimleri Yönetim Kurulu ...../...../..... tarih ve ....../..... sayılı kararıyla .....Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak onaylanmıştır.

**İMZA/MÜHÜR**

## ÖZET

**TEZİN BAŞLIĞI:** ÇARPIŞMA TESTİ VE BENZER PROBLEMLERİN SİSTEM DİNAMİĞİ KAPSAMINDA VENSİM YAZILIMI İLE MODELLENMESİ

**YAZAR ADI:** Yasin ZÜLFİKAROĞLU

Birbirine sebep – sonuç ilişkileri bağlı dinamik değişkenlerden oluşan karmaşık sistemlerin davranışlarını, temel olarak matematiksel modellerin geri besleme döngüleri ve birikim – akış diyagramları ile ifade edilmesi suretiyle, Sistem Dinamiği problemleri kapsamında incelenirler. Sistem dinamiği problemleri uygulamalarından, özellikle son zamanlarda bilgisayar yazılımlarında görülen ilerlemeler sayesinde, çokça faydalanılır hale gelinmiştir. Sistem Dinamiği prensipleri üzerine kurulu birçok yazılımdan biri olan VENSİM yazılımı, dinamik sistemlerin modellenmesi ve davranışlarının analizi için birçok alanda uygulanan çok fonksiyonlu bir araçtır.

Bu çalışmada Sistem Dinamiği yaklaşımının ve VENSİM yazılımının işleyişi araştırılmış, kullanım sahaları ve yapısal özellikleri incelenmiştir. Bu amaçla farklı alanlardaki, dinamik sistem problemleri, yukarıda bahsedilen kapsamda, VENSİM yazılımı ile istenilen amaçlara yönelik olarak modellenmiştir. İlk olarak, çarpışma emniyetini belirlemek için gerçekleştirilen çarpışma testlerine dayalı bir problem incelenmiştir. Bu problemde, sabit bir hızla rijit bir bariyere çarpan bir aracın söz konusu parçasında, çarpma esnasında oluşan yavaşlama ivmesi VENSİM yazılımında elde edilerek Sistem Dinamiğinin, fiziksel bir sistemin modellenmesindeki performansı incelenmiştir. İkinci problem olarak Dinamik değişkenlerden oluşan ve yapı itibarı ile daha karışık bir sistem olan, Malzeme Tedarik Zinciri Modeli, VENSİM yazılımında simüle edilerek Sistem Dinamiğinin yapısı ve davranışları incelenmiş, böylece uzun vadede girdi – çıktı etkileşimleri büyük resme bakılarak detaylı olarak gözlemlenmiştir.

## ABSTRACT

**THESIS TITLE:** Modeling of Crash Test and Similar Problems by Vensim Software Using System Dynamics

**AUTHOR:** Yasin ZÜLFİKAROĞLU

The behavior of the complex systems that are composed of interconnected dynamic variables are studied in the category of System Dynamics Problems, representing mathematical models with feedback loops and stock – flow diagrams. Recently, System Dynamics applications are widely used. Thanks to the rapidly developing software technology. VENSIM, as being one of the most used commercial software, VENSIM is a multipurpose software tool for modeling and analyzing the different characteristics of dynamic systems.

In this study, the use of System Dynamics approach and VENSIM software are both explored. Its application area and structural characteristics are studied. Aiming at the objectives mentioned above, different types of system problems are modeled by software. Firstly, a crash test problem is studied to verify crashworthiness and modeled with VENSIM by calculating the deceleration seen on a specific part of a car that crashes into a rigid barrier at a constant speed. In this way the performance of System Dynamics are applied on a physical system model of interest. Secondly, VENSIM is used to simulate materials supply chain model that is composed of dynamic variables and structurally more complex. System Dynamics structure and behavior of this system are both studied and the system's input – output relations are observed the details of the whole picture of the system characteristics.

## TEŞEKKÜR

Tez çalışmam süresince değerli görüş ve önerileriyle bana destek olan danışman hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Mehmet Ali ARSLAN' a, ve yüksek lisans öğrenimim boyunca sürekli yardımlarını gördüğüm Bölüm Başkanımız Sayın Doç. Dr. Fehmi ERZİNCANLI' ya ve değerli bölüm hocalarıma teşekkür ederim.

Ayrıca bu süre zarfında benden manevi desteklerini esirgemeyen aileme ve sevdiklerime teşekkürü bir borç bilirim.

# İÇİNDEKİLER DİZİNİ

|                                                         |      |
|---------------------------------------------------------|------|
| ÖZET                                                    | iv   |
| ABSTRACT                                                | v    |
| TEŞEKKÜR                                                | vi   |
| İÇİNDEKİLER DİZİNİ                                      | vii  |
| SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ                          | ix   |
| TABLolar DİZİNİ                                         | xiii |
| 1. GİRİŞ                                                | 1    |
| 2. SİSTEM DİNAMİĞİ                                      | 3    |
| 2.1. Giriş                                              | 3    |
| 2.2. Sistem Davranışı ve Nedensellik Döngü Diyagramları | 4    |
| 2.2.1. Davranış Örnekleri                               | 5    |
| 2.2.2. Nedensellik Döngü Diyagramları                   | 6    |
| 2.2.3. Sistem Yapısı ve Davranış Örnekleri              | 8    |
| 2.2.4. Nedensellik Döngü Diyagramlarının Oluşturulması  | 11   |
| 2.3. Birikim–Akış Diyagramları ve Modelleme Yaklaşımı   | 12   |
| 3. VENSİM YAZILIMI ve MODEL OLUŞTURMA                   | 15   |
| 3.1. Giriş                                              | 15   |
| 3.2. Vensim Yazılımı Genel Yapısı                       | 16   |
| 3.3. Tavşan Nüfus Modeli                                | 17   |
| 3.4. Geliştirilmiş Tavşan Nüfus Modeli                  | 25   |
| 3.5. Tavşan ve Tilki Ekolojisi Modeli                   | 31   |
| 4. ÇARPIŞMA TESTİ ÖRNEĞİ                                | 38   |
| 4.1. Giriş                                              | 38   |
| 4.2. Araç Güvenliği Kavramı                             | 38   |

|                                                 |     |
|-------------------------------------------------|-----|
| 4.2.1 Motorlu Araç Güvenliği                    | 40  |
| 4.2.2. Otomobil Yapısı                          | 41  |
| 4.2.3. Malzemeler                               | 43  |
| 4.2.4 Çarpışma Emniyeti                         | 43  |
| 4.2.5 Çarpışma Emniyeti Testleri                | 46  |
| 4.3. Çarpışma Simülasyonu Modelleri             | 51  |
| 4.3.1. Yay – Kütle Modeli                       | 52  |
| 4.4. Vensim Yazılımı ve Yay-Kütle Modeli        | 56  |
| 4.4.1. Maxwell Yay Kütle Modeli                 | 57  |
| 4.4.2 Vensim Yazılımında Maxwell Modeli Örneği  | 59  |
| 5. TEDARİK ZİNCİRİNİN VENSİM MODELİ             | 65  |
| 5.1. Giriş                                      | 65  |
| 5.2. Tedarik Zinciri                            | 65  |
| 5.2.1. Tedarik Zincirinin Fonksiyonları         | 66  |
| 5.2.2. Tedarik Zincirinin Yapısı                | 68  |
| 5.2.3. Tedarik Zinciri Çeşitleri                | 68  |
| 5.3. Tedarik Zinciri Yönetimi                   | 70  |
| 5.3.1. Tedarik Zinciri Yönetimi Bileşenleri     | 72  |
| 5.4. Tedarik Zinciri Problemleri                | 73  |
| 5.4.1 Tedarik Zincirinde Kırbaç Etkisi Problemi | 78  |
| 5.5. Tedarik Zinciri Modelleme                  | 80  |
| 5.5.1. Simülasyon Modelleri                     | 81  |
| 5.6. Vensim Yazılımı ve Tedarik Zinciri Modeli  | 81  |
| 5.6.1. Sistem Dinamiği Üretim Sistemi Modeli    | 83  |
| 5.6.2. Sistem Dinamiği Üretim Sonrası Modeli    | 88  |
| 5.6.3. Tedarik Zinciri Modeli Sonuçları         | 94  |
| 6. SONUÇLAR ve ÖNERİLER                         | 99  |
| KAYNAKLAR DİZİNİ                                | 101 |
| ÖZGEÇMİŞ                                        | 108 |

## SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

### Simgeler

$k$

$c$

$f$

$f_{yay}$

$f_{sönüm}$

$d$

$d_{yay}$

$d_{sönüm}$

$\dot{d}_{sönüm}$

$\dot{d}_{yay}$

$\dot{d}$

$\ddot{d}$

$V_0$

$m$

$g$

A, B

D

P

T

### Açıklamalar

Yay Sabiti

Sönüm Sabiti

Kuvvet

Yay Kuvveti

Sönüm Kuvveti

Yer Değiştirme

Yay Yer Değiştirmesi

Sönüm Elemanı Yer Değiştirmesi

Sönüm Elemanı Hızı

Yay Hızı

Hız

İvme

Başlangıç Hızı

Kütle

Yer Çekimi İvmesi

Tahmin Parametreleri

Distribütör

Perakendeci

Toptancı

## ŞEKİLLER DİZİNİ

| <u>Şekil</u>                                              | <u>Sayfa</u> |
|-----------------------------------------------------------|--------------|
| 2.1. Davranış Örnekleri                                   | 6            |
| 2.2. Nedensellik Döngü Diyagramı                          | 7            |
| 2.3. Pozitif Geri besleme Döngüsü                         | 8            |
| 2.4. Negatif ( Dengeleyici ) Geri besleme Döngüsü         | 9            |
| 2.5. Gecikmeli Negatif geri besleme Döngüsü               | 10           |
| 2.6. Pozitif ve Negatif Döngülerin Birleşimi              | 10           |
| 2.7. Nedensellik Döngü Ve Birikim-Akış Diyagramları       | 13           |
| 3.1. Vensim Kullanıcı Arayüzü                             | 16           |
| 3.2. Temel Skeç Araçları                                  | 19           |
| 3.3. Simülasyon Ayar Penceresi                            | 19           |
| 3.4. Tavşan Nüfusu Modeli                                 | 20           |
| 3.5. Denklem Editörü                                      | 21           |
| 3.6. “Tavşan Nüfusu” Denklem Editörü Penceresi            | 22           |
| 3.7. Tavşan Nüfusu Grafiği                                | 23           |
| 3.8. Artan Tavşan Nüfusu Simülasyon Sonucu                | 23           |
| 3.9. Tavşan Nüfus Değişim Tablosu                         | 24           |
| 3.10. Azalan Tavşan Nüfusu Simülasyon Sonucu              | 25           |
| 3.11. Nüfus ve Ölüm Arasındaki Lineer Bağ                 | 26           |
| 3.12. Nüfus ve Ölüm Arasındaki Üssel Bağ                  | 26           |
| 3.13. Normalleştirme                                      | 27           |
| 3.14. Tavşan Nüfus Modeli                                 | 28           |
| 3.15. Lookup Fonksiyonu                                   | 29           |
| 3.16. Tavşan Nüfus Modeli Denklemleri ve Parametreleri    | 29           |
| 3.17. Tavşan Nüfus Değişimi                               | 30           |
| 3.18. Tavşan ve Tilki Ekolojisi Modeli                    | 31           |
| 3.19. Kalabalıklaşmanın Ölümlere Etkisi Lookup Fonksiyonu | 33           |
| 3.20. Tilki Tavşan Tüketimi Lookup Fonsiyonu              | 33           |
| 3.21. Tilki Ölüm Oranı Lookup Fonksiyonu                  | 34           |
| 3.22. Tavşan Nüfusunun Farklı Senaryolara Göre Değişimi   | 35           |
| 3.23. Tilki Nüfusunun Farklı Senaryolara Göre Değişimi    | 35           |

|                                                              |    |
|--------------------------------------------------------------|----|
| 3.24. Tavşan ve Tilki Nüfusunun Birbirine Göre Değişimi      | 36 |
| 3.25. Vaşak ve Tavşan Nüfusu İstatistiği                     | 37 |
| 4.1. Şasi Üstü Gövde Araç Yapısı                             | 42 |
| 4.2. Unit -Body Araç Yapısı                                  | 43 |
| 4.3. Kızak Testi                                             | 47 |
| 4.4. Bariyer Testi                                           | 48 |
| 4.5. Önden Offset Çarpışma Testi                             | 49 |
| 4.6. Yandan Çarpışma Testi                                   | 49 |
| 4.7. Direk Testi                                             | 50 |
| 4.8. Direk Testi Çarpışma Anı                                | 50 |
| 4.9. İlk Oluşturulan Önden Çarpışma Simülasyon Modeli        | 53 |
| 4.10. Önden Çarpışma Simülasyon Modeli                       | 54 |
| 4.11. Test ve Simülasyon Sonuçları Karşılaştırması           | 55 |
| 4.12. a) Yay, b) Sönümleyici, c) Kelvin, d ) Maxwell Elemanı | 56 |
| 4.13. a) Yay, b) Sönümleyici, c) Kelvin, d) Maxwell Elemanı  | 57 |
| 4.14. Maxwell Modeli                                         | 58 |
| 4.15. Maxwell Modeli İvmeleri                                | 59 |
| 4.16. Vensim Maxwell Modeli                                  | 60 |
| 4.17. Sert Yay Özelliğinde Yavaşlama İvmesi                  | 63 |
| 4.18 Normal Yay Özelliğinde Yavaşlama İvmesi                 | 63 |
| 4.19. Yumuşak Yay Özelliğinde Yavaşlama İvmesi               | 64 |
| 5.1. Tedarik Zinciri                                         | 68 |
| 5.2. Tedarik Zinciri Çeşitleri                               | 69 |
| 5.3. Tek aşamalı Tedarik Zinciri                             | 70 |
| 5.4. Çok Aşamalı Tedarik Zinciri                             | 70 |
| 5.5. Klasik Tedarik Zinciri Yönetimi Yapısı                  | 72 |
| 5.6. Tedarik Zinciri Yönetimi Seviyeleri                     | 73 |
| 5.7. Perakendeci Tedarik Sisteminde Kırbaç Etkisi            | 79 |
| 5.8. Forrester Modeli                                        | 82 |
| 5.9. Üretim Sistemi Modeli                                   | 84 |
| 5.10. Distribütör Modeli                                     | 89 |
| 5.11. Perakendeci Modeli                                     | 92 |
| 5.12. Tedarik Zinciri Sistem Dinamiği Modeli                 | 93 |
| 5.13. Perakendeci Sipariş Politikası                         | 94 |

|                                                               |    |
|---------------------------------------------------------------|----|
| 5.14. Toptancı Sipariş Politikası                             | 94 |
| 5.15. Distribütör Sipariş Politikası                          | 95 |
| 5.16. Üretim                                                  | 95 |
| 5.17. Tamamlanmış Ürün Stoku                                  | 96 |
| 5.18. Satışlar ve Üretim Teslimatı Arasındaki Gecikme         | 97 |
| 5.19. Sipariş Politikası ve Sipariş Teslimatı Karşılaştırması | 97 |

## TABLÖLAR DİZİNİ

### Tablo

### Sayfa

4. 1. Farklı Yay sabitleri İçin Maxwell Modelleri

59

# 1. GİRİŞ

Sistem Dinamiği iş dünyası, ekonomi, üretim, sosyal bilimler, sağlık, biyoloji gibi çok çeşitli alanlarda görülebilen zamana bağlı değişen karmaşık sistemleri düzenleyebilmek, davranışlarını anlayabilmek ve yorumlayabilmek için oluşturulmuş güçlü bir metodoloji ve bilgisayar simülasyonu modelleme tekniğidir. Oluşturulan sistem modelinin bütünüdür davranışını etkileyen geri besleme döngüleri, zaman gecikmeleri, birikimler ve akışlar Sistem Dinamiğini diğer yaklaşımlardan ayıran başlıca özellikleridir [1].

Sistem Düşünüşü, günlük hayatta görülen birçok karmaşık sistemi anlamak için geliştirilen kavramsal bir çatı, bir bilgi kümesi ve araçlardan oluşan bir disiplindir. Sistemi oluşturan parçaların arasındaki ilişkilerin sistemin bütünüdür davranışına etkisini anlama yoludur. Temelini Sistem Dinamiği oluşturur. Sistem Düşünüşü büyük resme bakarak, anlık çözümler yerine uzun vadeli çözümler sağlar [2].

Sistem Dinamiğinin gelişimiyle beraber sistem modelleme ve simülasyon yazılımları bilişim teknolojilerinin gelişimlerine paralel olarak gelişmiştir. Sistem Dinamiği modellerinin oluşturulmasına yönelik birçok yazılım piyasaya çıkmıştır. VENSİM yazılımı da bunlardan biridir. VENSİM, dinamik sistemlerin modellenmesi, kağıda dökülmesi, analiz edilmesi ve modellerin optimize edilmesi için kullanılan bir görsel modelleme aracıdır. VENSİM PLE ve VENSİM PLE Plus Sistem Dinamiğinin öğrenilmesini kolaylaştırmak için tasarlanmış VENSİM konfigürasyonlarıdır. VENSİM PLE nedensel döngü, birikim ve akış diyagramlarından oluşan simülasyon modellerini tasarlamada basit ve esnek bir yol sağlar.

Sistem Düşünüşü, Sistem Dinamiği ve VENSİM yazılımının zamana bağlı değişen dinamik sistemlerin modellenmesinde nasıl kullanıldıkları verilen çeşitli örneklerle bu çalışmada açıklanmıştır.

VENSIM'in kullanışını açıklamak ve Sistem Dinamiğinin işleyişini daha iyi anlamak amacıyla ilk olarak Av- Avcı nüfus ilişkisini inceleyen bir örnek VENSIM'de basit bir model seviyesinden daha karmaşık seviyeye doğru modellenmiştir.

İkinci örnek olarak çarpışma testleri ve çarpışma emniyeti kavramı açıklanmıştır. Çarpışma simülasyonu ile ilgili bir problem ele alınarak VENSIM yazılımında modellenmiş ve Sistem Dinamiği yaklaşımının fiziksel bir sistemin modellenmesindeki performansı incelenmiştir.

En son örnek olarak ise tedarik zinciri problemlerinin VENSIM yazılımında incelenmesi ele alınmıştır. Bu amaçla örnek bir tedarik zinciri, yazılımda sistem dinamiği yaklaşımı ile oluşturulmuş ve sonuçları incelenmiştir.

## 2. SİSTEM DİNAMİĞİ

### 2.1. Giriş

Sistem Dinamiği, karmaşık sistemleri ve problemleri modellemek, sistem elemanları arasındaki ilişkileri belirleyerek sistemin tümünün uzun vadede göstereceği davranışın anlaşılmasını sağlamak için oluşturulmuş güçlü bir simülasyon modelleme tekniğidir [3]. 1950'li yıllarda Massachusetts Teknoloji Enstitüsünde görevli Profesör Jay W. Forrester tarafından geliştirilmiştir. Kendi tanımlaması ile sistem Dinamiği sistemlerin zamanla nasıl değiştiğiyle ilgilenir. Sosyal ve fiziksel sistemlerin davranışlarını göstermek için, çevrede var olan dünyadaki detaylar hakkındaki zaten bilinen bilgiyi elde etmek için bilgisayar simülasyonunu kullanır. Genellikle başkalarının suçlandığı problemlerin kaynağının insanın kendi karar verme politikası olduğunu ve problemi düzeltebilecek politikaların nasıl geliştirilebileceğini gösterir. Sistem dinamiği analizi için aşamalar ilk olarak Jay W. Forrester tarafından "Endüstriyel Dinamikler" kitabında açıklanmıştır. Buna göre sistem dinamiği yaklaşımında aşağıdaki adımlar izlenebilir[4]:

1. Problemin tanımlanması.
2. Birbirleriyle etkileşimde bulunmaları sonucu gözlenen semptomları yaratan faktörlerin izole edilmesi.
3. Yeni kararlara ve mevcut bilgide değişimlere neden olan kararları oluşturan bilgiye dayalı geri besleme döngülerinin neden-sonuç ilişkisinin izlenmesi.
4. Mevcut bilgi akışları ile kararlara nasıl ulaşıldığını açıklayan geçerli resmi karar politikalarının formüle edilmesi.
5. Karar politikalarının, bilgi kaynaklarının ve sistem bileşenleri arasındaki etkileşimlerin matematik modelinin kurulması.

6. Zaman boyunca model tarafından açıklanan sistem davranışının ortaya çıkarılması (uzun zaman alan hesaplamaları bilgisayarda yaparak).
7. Sonuçların, gerçek sisteme ait olan ilgili tüm mevcut bilgi ile karşılaştırılması.
8. Modelin, kabul edilir ölçüde gerçeği temsil edene kadar revize edilmesi.
9. Sistem davranışını geliştirmek üzere model üzerinde değişiklikler yaparak gerçek sistemde ne şekilde değiştiği görülebilecek organizasyonel ilişkilerin ve politikaların tekrar tasarlanması.
10. Gerçek sistemin, model ile yapılan deneylerin performansının gelişeceğini gösterdiği yönde değiştirilmesi.

## 2.2. Sistem Davranışı ve Nedensellik Döngü Diyagramları

İnsanoğlu hızlı problem çözücüsüdür. Olayları sebeplere bağlar. Örneğin bir ürünün satışları düşükse buna sebep olarak satış elemanlarının yetersiz olduğunu, problemin bundan kaynaklandığını düşünebilir. Satış elemanlarının eğitilmesi veya satış noktalarının artırılması bu probleme ilk başta bir çözüm getirebilir. Basit problemlerde bu metot işe yarayabilir. Fakat problemler karmaşıktıkça işe yaramaz hale gelir. Verilen anlık çözümler uzun vadede başka problemlere sebep olur. Bu yüzden problemin içinde bulunduğu sistemi tanımak ve problemi, sistemin yapısını düzelterek çözmek daha yararlıdır [5].

Sistem, beraber tek bir davranış ortaya koyan birbirine bağlı parçalar grubu olarak tanımlanır [3]. Sistem yapısı sistem davranışını, bu da ortaya çıkan sonuçları etkiler. Örnek olarak bir satış problemi ele alınsın. Piyasaya yeni sürülen bir ürünün satılmadığı görülüyor. Bunun ilk sebebi olarak satış departmanı iyi çalışmıyor denebilir. Satış departmanının iyi çalışmaması da aşırı çalışmalarına bağlanabilir. Her duruma bir sebep bularak bu işlem sonsuza kadar gidebilir. Her probleme bir sebep

bulaktansa sistemin içyapısına odaklanmak, buradaki sorunları bulmak problemi çözebilir [5].

### 2.2.1. Davranış Örnekleri

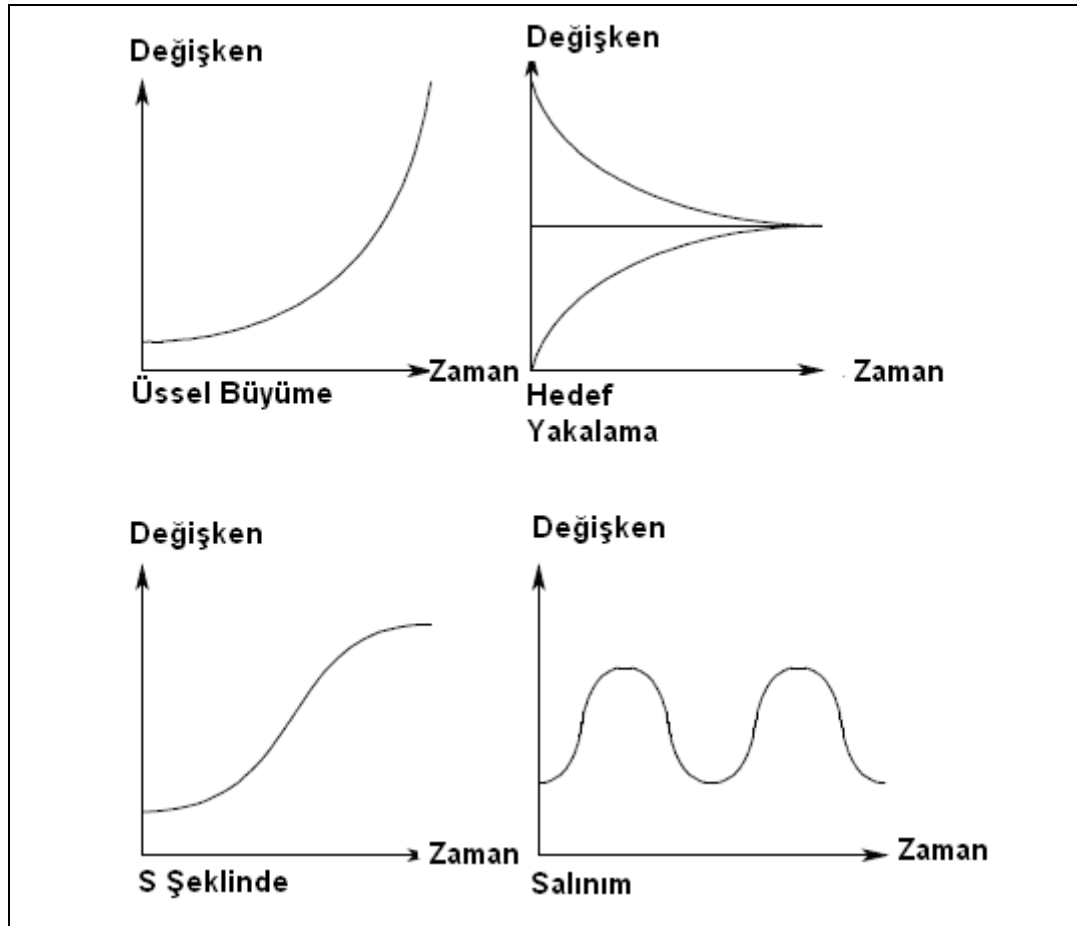
Sistem yapısını göz önüne almaya başlamak için ilk olarak problemle ilgili sistem parçalarından problemi oluşturan davranış örnekleri aranır. İlgili değişkenlerin zamana karşı değişimi irdelenir. Bu değişkenler iş dünyasından örnek verilecek olursa maliyet, satış, kar, pazar payı olabilir. Sistem yaklaşımı problem çözüm metodu olarak gücünün çoğunu buradan alır. Benzer davranış örnekleri çeşitli değişik durumlarda ortaya çıkar ve bu karakteristik örneklere sebep olan sistem yapıları bilinir. Problem olan bir davranış örneği bulunursa buna sebep olan sistem yapısı bulunur. Bu sistem yapısı bulup düzeltilirse problem çözülebilir.

Dört çeşit davranış örneği vardır. Bunlar;

- Üssel Büyüme: Değişken zamana karşı artan bir hızla artar.
- Hedef Yakalama: Değişken hedef değere ulaşır.
- S şeklinde Büyüme: Üssel Büyümeyi Hedef yakalama takip eder.
- Salınım: Değişken belli bir değer seviyesinde salınım yapar.

Bunların dışında ana dört davranış örneğinin kombinasyonları görülebilir. Şekil 2.1.'de davranış örnekleri görülmektedir [5].

Davranış örneği grafikleri bir çeşit sistem düşüncü araçlarıdır. Ele alınan değişkenin nasıl değişebileceği hakkında öngörüler verirler. Örneğin bir ürünün satış bilgisinin geçmiş ve güncel değerleri grafik olarak incelendiğinde mevcut davranış örnekleri göz önüne alınarak nasıl bir değişim göstereceği hakkında öngörüye sahip olunabilir [6].



Şekil 2.1. Davranış Örnekleri

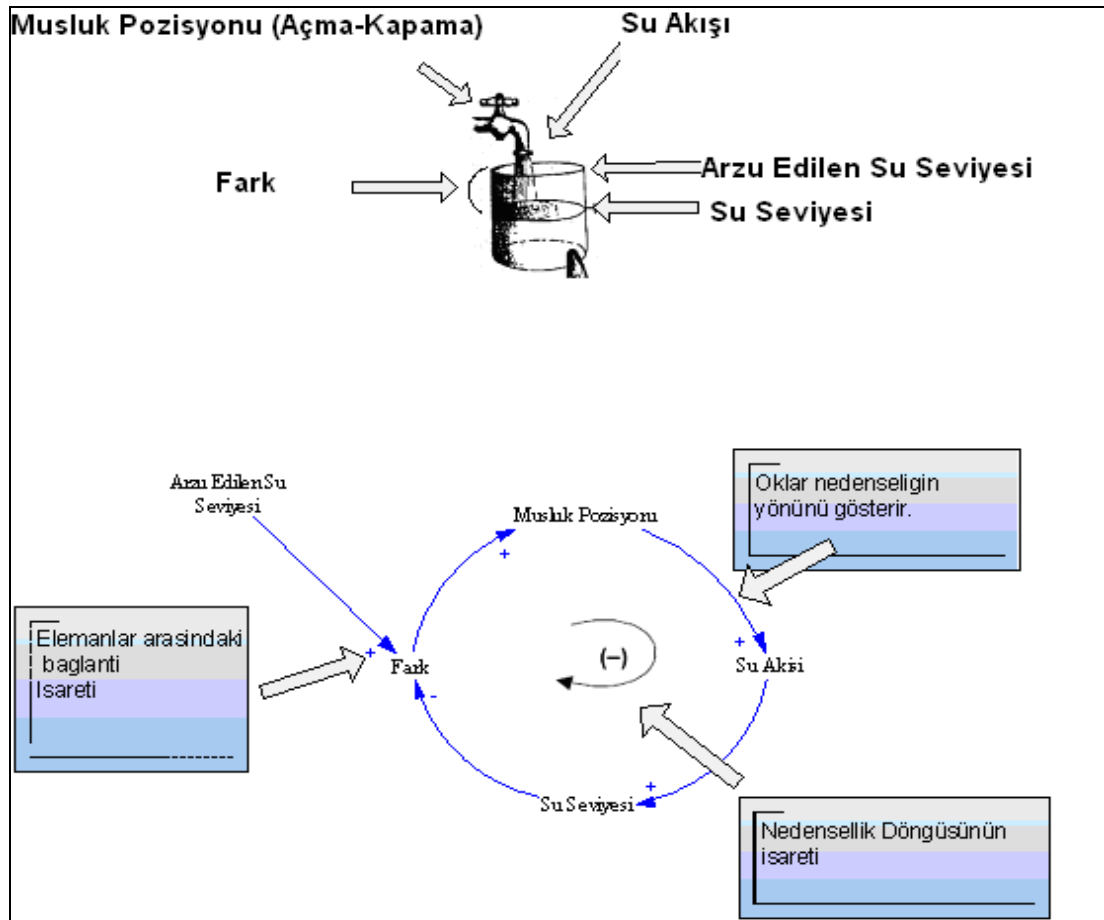
### 2.2.2. Nedensellik Döngü Diyagramları

İlk Sistem Dinamiği çalışmaları nedensellik döngü diyagramlarını kullanmamıştır. Döngüler birikim-akış diyagramları ve denklemlerle ifade edilmiştir. Bu tür bir ifade tarzı mühendisler için yeterli olmuştur. Sistem Dinamiği yaklaşımını daha geniş bir kitlenin ulaşımına açmak için nedensellik döngü diyagramları oluşturulmuştur [7].

Nedensellik Döngü Diyagramları sistemi oluşturan ve sistemin davranışını etkileyen elemanlar arası ilişkiyi görmek için kullanılan görsel bir ifade şeklidir. Diyagram sistem elemanlarından ve bunları birbirine bağlayan nedensel bağlardan (oklar) oluşur. Okların ucunda görülen artı ve eksi işaretleri elemanlar arasındaki nedensellik ilişkisini gösterir. Birbirine bağlanan elemanlar aynı yönde değişiyorsa pozitif, farklı yönde değişiyorsa negatif işaret alırlar. Örnek olarak A ve B birbirine

bağlı iki eleman kabul edilsin. A' nın değeri artarken B' nin de değeri artıyorsa veya A' nın değeri azalırken B' nin de değeri azalıyorsa işaret pozitif olur. Buna karşın A' nın değeri azalıyorken B' nin değeri artıyorsa veya A' nın değeri artıyorken B' nin değeri azalıyorsa işaret negatif olur.

Şekil 2.2.de bir bardağa istenilen seviyede su doldurulması sistemi nedensellik döngü diyagramı ile ifade edilmiştir. Buna göre; musluk pozisyonunun artması su akışını artırır. Bunu ifade etmek için diyagramda *Musluk Pozisyonu* ve *Su Akışı* elemanları kullanılmış ve birbirlerine bağlanmıştır. İkisinin arasındaki nedensel ilişkiye göre işaret pozitifdir. Diğer bir eleman ise *Fark* elemanıdır. *Fark* arzu edilen su seviyesi ile mevcut su seviyesi arasındaki farktır. Dolayısıyla burada işaret negatiftir. Son olarak nedensel döngüyü oluşturmak için *Fark* elemanı *Musluk Pozisyonu* elemanına bağlanmıştır. Su istenilen seviyeye gelirse yani *Fark* azalırsa musluk kapatılır. *Arzu Edilen Su Seviyesi* elemanını *Fark* elemanına bağlayan işaret pozitif olur. Değişimleri aynı yöndedir.



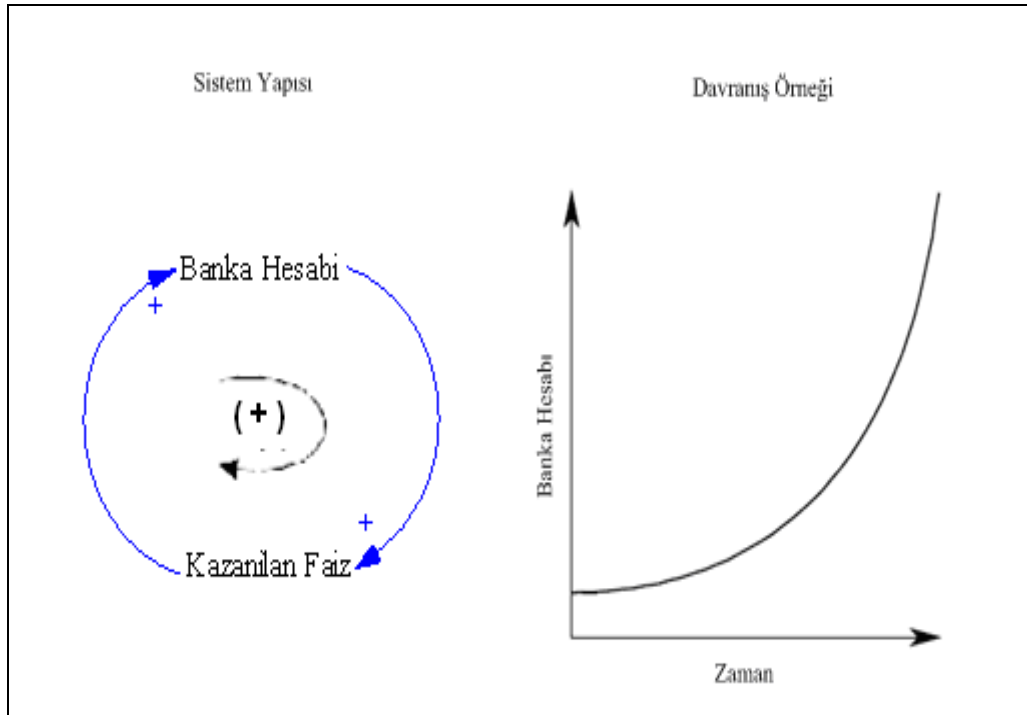
Şekil 2.2. Nedensellik Döngü Diyagramı

Her bağlantıda elemanlar arası ilişkiyi gösteren işaretlerin yanı sıra nedensel döngünün de işareti vardır. Döngünün içindeki negatif işaret sayısına göre belirlenir. Çift sayıda negatif işaret varsa döngü işareti pozitifdir. Sayı tek ise döngü negatiftir.

### 2.2.3. Sistem Yapısı ve Davranış Örnekleri

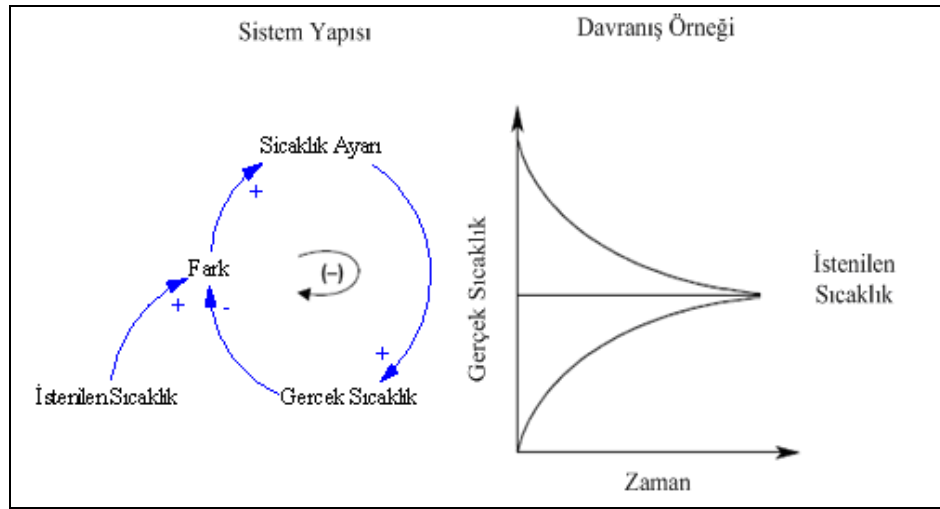
Gerçekte davranış örnekleri gösteren sistemler çok daha karmaşıktır. Aşağıda verilen örnekler bu sistemlerin yapı taşlarıdır.

- *Pozitif (Pekiştirici) geri besleme Döngüsü:* Sistem yapısındaki sistem elemanı zamana karşı katlanarak büyür. Artış hızı artarak hızlı bir büyüme görülür. Yokuş aşağı yuvarlanan bir kartopu gibi gittikçe büyür büyüdükçe büyüme hızı da artar. Sistemdeki bir elemanın başlangıçtaki değişimin zamanla ilerdeki değişimleri tetiklediği döngüdür [8]. Faize yatırılmış para buna örnek olarak verilebilir. Şekil 2.3.'de buna ait sistem yapısı ve davranış örneği görülmektedir. Bu davranışın başlarında büyüme anlaşılamayabilir. İleride büyük bir probleme dönüşebilecek bir yapı gözden kaçabilir. Sonraki dönemlerde de önlenmesi zor hale gelebilir.



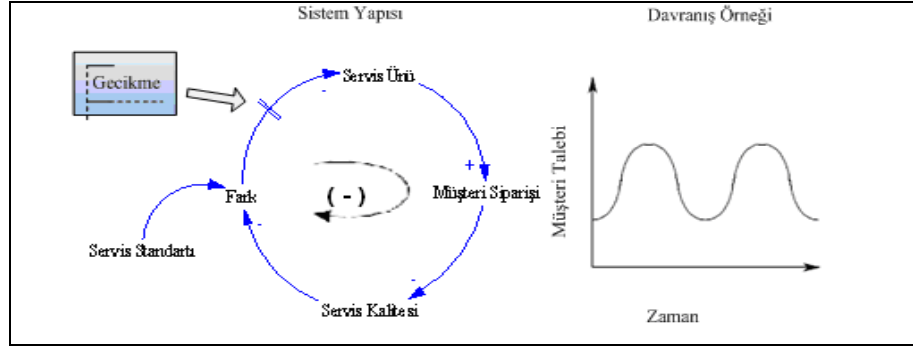
Şekil 2.3. Pozitif Geri besleme Döngüsü

- *Negatif (Dengeleyici) Geri besleme Döngüsü:* Bir elemandaki değişimin çevrim üzerinde taşınıp tekrar aynı elemana döndüğünde başlangıç değişimin tersi yönünde elemanı etkilediği döngülerdir [9]. Negatif veya dengeleyici geri besleme döngüsü hedef arar. İlgili değişkenin değeri istenilen değerin üstünde ise döngü yapısı bu değeri aşağı düşürür. İstenilen değerin altında ise döngü yapısı bu değeri yükseltir. Şekil 2.4. 'de elektrikli battaniyenin sıcaklık ayarının negatif geri besleme diyagramı görülür [5].



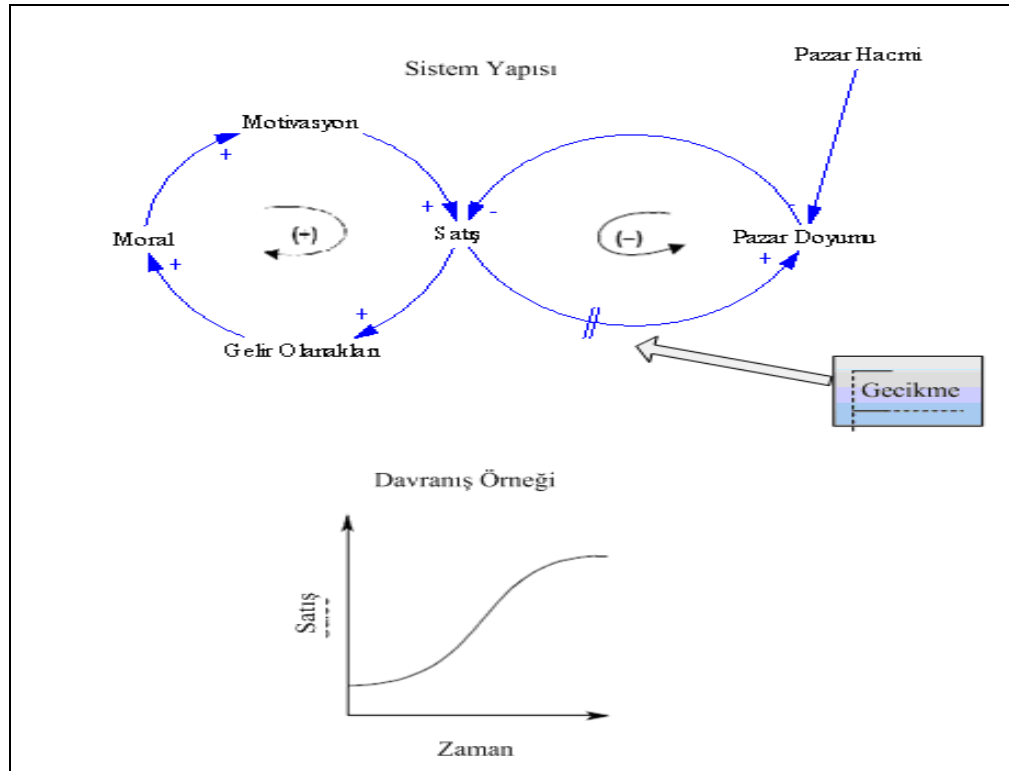
Şekil 2.4. Negatif ( Dengeleyici ) Geri besleme Döngüsü

- *Gecikmeli Negatif geri besleme Döngüsü:* Gecikmeler sosyal ve ekonomik sistemlerde çokça görülürler ve malzeme ve bilgi gecikmeleri olarak iki tipte olabilirler [10]. Gecikmeli bir negatif geri besleme döngüsü salınım sebeptir. Bu davranış döngünün yapısına bağlıdır. Bazı durumlarda serbestçe salınım, bazen de bir hedef değere doğru zamanla sönümlenen bir salınım görülür. Çoklu seviyeli üretim ve dağıtım sistemleri, bir ürün için olan müşteri talep bilgisinin üretim bölümüne taşınması sırasında yaşanan gecikmelerden dolayı bu davranışı sergileyebilir. Bu gecikmelerden dolayı talebi karşılamak için üretim çok uzun sürer. Daha sonra ise üretim aşırı depolamayı eritebilmek için yavaşlatılır. Şekil 2.5.' de servis kalitesi ile ilgili bir sistem ve davranışı görülmektedir[5].



Şekil 2.5. Gecikmeli Negatif geri besleme Döngüsü

- *Pozitif ve Negatif Döngülerin Birleşimi:* S Şeklinde büyüme Sigmodial büyüme olarak da adlandırılır. Bu tip davranış örnekleri yeni bir ürünün piyasaya çıkması, söylentilerin yayılması, sınırlı kaynağa sahip popülasyon gibi sistemlerde görülebilir [11]. Pozitif ve negatif döngülerin birleşmesinden çok çeşitli davranışların ortaya çıkması mümkündür. Şekil 2.6. 'da verilen örnekte ilk evredeki üssel büyümeyi oluşturan pozitif geri besleme döngüsünü negatif geri besleme döngüsü takip etmiştir. Bunun sonucunda S Şeklinde bir davranış ortaya çıkmıştır. S şeklindeki davranış örneği üssel büyüme ve hedef yakalama davranış örneklerinin birleşimidir [5].



Şekil 2.6. Pozitif ve Negatif Döngülerin Birleşimi

## 2.2.4. Nedensellik Döngü Diyagramlarının Oluşturulması

Nedensellik döngü diyagramlarının oluşturulmasından önce hangi olayların sistem yapısını daha anlaşılır kılacaklarına karar verilmelidir. Piyasada satılan bir ürün örneği göz önüne alınsın. Satışlar önceki aya göre beklenenden daha aşağıda gerçekleştiği farzedilirse, ilk olarak ürünün satışının zamanla nasıl değiştiğine bakılır. Yani ortaya çıkardığı davranış örneğinin tipi belirlenir. S Şeklinde mi? Salınım mı yapıyor? Üssel büyüme mi gösteriyor? Davranış örneği belirlendiği zaman bu davranışı oluşturabilecek genel nedensellik döngü diyagramları göz önüne alınır. Bu genel döngüler kullanılarak asıl durumun nedensellik döngü diyagramları oluşturulur. Aşağıda nedensellik döngü diyagramlarının oluşturulmasında izlenecek temel noktalar verilmiştir.

1. Nedensellik döngü diyagramı elemanları, artan veya azalan değişkenler olarak kabul edilirler.
  - Elemanları bu şekilde ifade edebilmek için fiil yerine isim kullanılmalıdır. Örneğin “artan maliyet” yerine “maliyet” kullanılmalıdır. Diyagramlarda aksiyonlar bağlantılarla (oklarla) ifade edilir.
  - Elemanlara verilen isimlerin, değişimin hangi yönünün yukarı olduğunu belirtmeleri gerekir. Örneğin “suça karşı tutum” veya “suça karşı tolerans” gibi olabilir.
  - Nedensel bağlar bağladıkları elemanların arasındaki sebep ilişkisini gösterir. A’dan B’ye pozitif bir bağlantı olsun. Bu bağ B’ nin A’nın gerçekleşmesinden hemen sonra gerçekleştiği anlamına gelmez. A artarsa B’de artar, A azalırsa B de azalır anlamına gelir.
2. Negatif geri besleme döngüsünde bir hedef vardır. Bu hedefin *Fark* elemanı kullanılarak diyagramda ifade edilmesi daha anlaşılır bir anlatımdır.

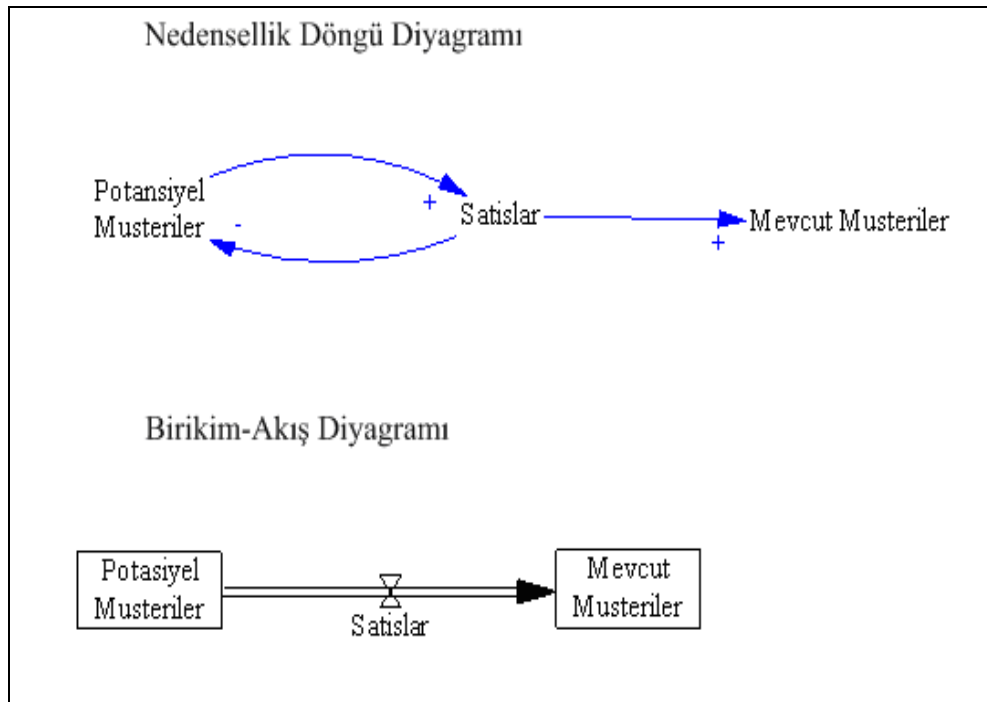
3. Bir işlemin algılanan değeri ile gerçek değerinin arasındaki fark davranış örneğinin açıklanmasında önemlidir. Bu sebeple bir değişkenin gerçek değeri ile algılanan değeri döngü diyagramında yer almalıdır. Çoğu durumda gerçek durum algılanırken bir gecikme görülür. Örneğin belli bir ürünün kalitenin değişmesi müşteriler tarafından algılanması zaman alır.
4. Aksiyonların sonuçlarının kısa vadede ve uzun vadede sonuçları farklı olabilir ve ayrı döngülerle ayrılmalıdır. Ağrın kesici kullanımının kısa vadede sonucu ağrının kesilmesi, ama uzun vadede bunun sonucu ilacın alışkanlık yapması örnek olarak verilebilir .
5. İki eleman arasındaki bağlantı çok fazla açıklama gerekiyorsa araya daha fazla elemanın konması gerekir. Böylelikle olay daha açık hale gelir.
6. Diyagramlar mümkün olan en basit halde olmalıdır. Diyagramın amacı her detayı açıkça göstermek değil, davranış örneğini gösteren geri besleme yapısını her yönüyle sunmasıdır.

### 2.3. Birikim–Akış Diyagramları ve Modelleme Yaklaşımı

Sistem dinamiği metodu dört temel fikir üzerinde kurulmuştur. Bu fikirlerden ilki, dünyadaki bütün dinamik davranışların, AKIŞ'lar ile bunların toplandığı BİRİKİM lerden oluştuğu fikridir. BİRİKİM bir havuz ve AKIŞ da havuzu dolduran veya boşaltan boru ve musluk sistemidir. İkinci temel fikir, sistemdeki birikim ile akışların geri besleme döngüleri içinde olduğu fikridir. Geri besleme, bilginin aktarılması ve geriye dönmesidir. Sistem dinamiğinde modellemede, sistem birikimleri ile ilgili bir bilgi kendi akışına ulaşana kadar tüm yapı içinde dolaşır. Bilgiye karşılık olarak, akışlar birikimleri değiştirir ve böylece geri besleme döngülerini kapatır. Üçüncü temel fikir de herhangi bir sistemdeki geri besleme döngülerinin genelde doğrusal olmayan bağlamalar ile birleştiği fikridir. Aslında bunun anlamı, sistemin birikimleri hakkındaki geri besleme bilgisinin birikimleri orantılı olmayan (ve genelde karışık ve tahmin edilemez) yollarla etkileyecek şekilde geri beslediğidir. Son temel fikir ise sistemin doğasında olan ve birbiriyle etkileşim içindeki akışların, geri besleme döngülerinin ve doğrusal

olmayan bağlamaların oluşturduğu ağı dinamik davranışının tek başına insan aklıyla izlenemeyeceği ya da, matematiksel olarak basitçe modellenemeyeceği fikridir. Bu nedenle karmaşık sistemlerin dinamik davranışını ortaya çıkarmak için bilgisayar simülasyonu gereklidir [4].

Birikim-Akış Diyagramları Nedensellik Döngü Diyagramları ile oluşturulmuş sistemi daha anlaşılır hale getirmek için kullanılır. Şekil 2.7. 'de görülen örnek, bir ürünün satışına bağlı potansiyel müşteriler ve mevcut müşteriler arasındaki ilişkiyi ifade eder. Potansiyel müşteriler yapılan satışlarla mevcut müşterilere dönüşürler.



Şekil 2.7. Nedensellik Döngü Ve Birikim-Akış Diyagramları

Potansiyel müşteri havuzundan mevcut müşteri havuzuna satışlar vasıtasıyla bir akış vardır. Potansiyel müşteriler ve satışlar potansiyel müşteri sayısını sıfıra indirme hedefi olan negatif bir geri besleme döngüsü ile bağlanmıştır. Nedensellik Döngü diyagramına bakarak bir yorum yapılırsa potansiyel müşteri sayısı ne kadar artarsa satışlarında artması iki eleman arasındaki pozitif işaretli bağ ile anlaşılabilir. Benzer şekilde daha çok satış potansiyel müşterilerin azalması anlamına gelir ki bu aralarındaki bağın negatif olması ile anlaşılır. Potansiyel müşterilerin sayısının sıfır olması ile satışlarında sıfır olacağı nedensellik döngü diyagramından anlaşılır. Yalnız potansiyel müşterilerin sayılarının hangi hızla azaldığını anlamak bu diyagramla

mümkün değildir. Bu yüzden birikim-akış diyagramlarından faydalanılır. Modelin karmaşıklığı arttıkça birikim-akış diyagramları önem kazanır [5].

Şekilde 2.7.'de görülen birikim-akış diyagramı potansiyel müşterilerin sayısının sıfıra gitme hızı hakkında düşünmeye yarayacak bir yapı sağlar. Bu ifadede üç tip eleman vardır. Bunlar Birikim, Akış ve Bilgidir. Bu diyagramda kullanılan elemanlar her çeşit işlemin modelini oluşturabilme imkanı verir. Bu grafiksel ifade şekli bir işlemin karakteristiklerini araştırmada kullanılabilecek nicel bir modelin geliştirilmesinde temel oluşturabilir. Nedensellik döngü diyagramlarından farklı olarak değişik tipte değişkenlerle ifade edilir. Potansiyel ve mevcut müşteriler bir dikdörtgenin içinde ifade edilmiştir. Bu tip değişkenlere Birikim, Seviye veya Yığılma denir. Birikim, biriken veya azalan herhangi bir şey için generik bir semboldür. Akışlar ise birikimlerin değişim hızı olarak tanımlanır [12]. Şekilde görülen *Satış* değişkeni bir vana sembolü ifade edilmiştir. Birikim-akış diyagramlarını anlamak için bu değişkenler arasındaki fark iyi anlaşılmalıdır.

### 3. VENSİM YAZILIMI ve MODEL OLUŞTURMA

#### 3.1. Giriş

Modelleme süreci, modelin eskizinin oluşturulması, denklemlerin yazılması ve nümerik büyüklüklerin belirlenmesinden oluşur. Sonraki işlemler modelin simüle edilmesi ve elde edilen bilgilerin kayıt edilmesidir. En son işlem ise simülasyon bilgileri analiz aracı kullanılarak model içindeki değişkenlerin dinamik davranışlarını keşfetmektir.

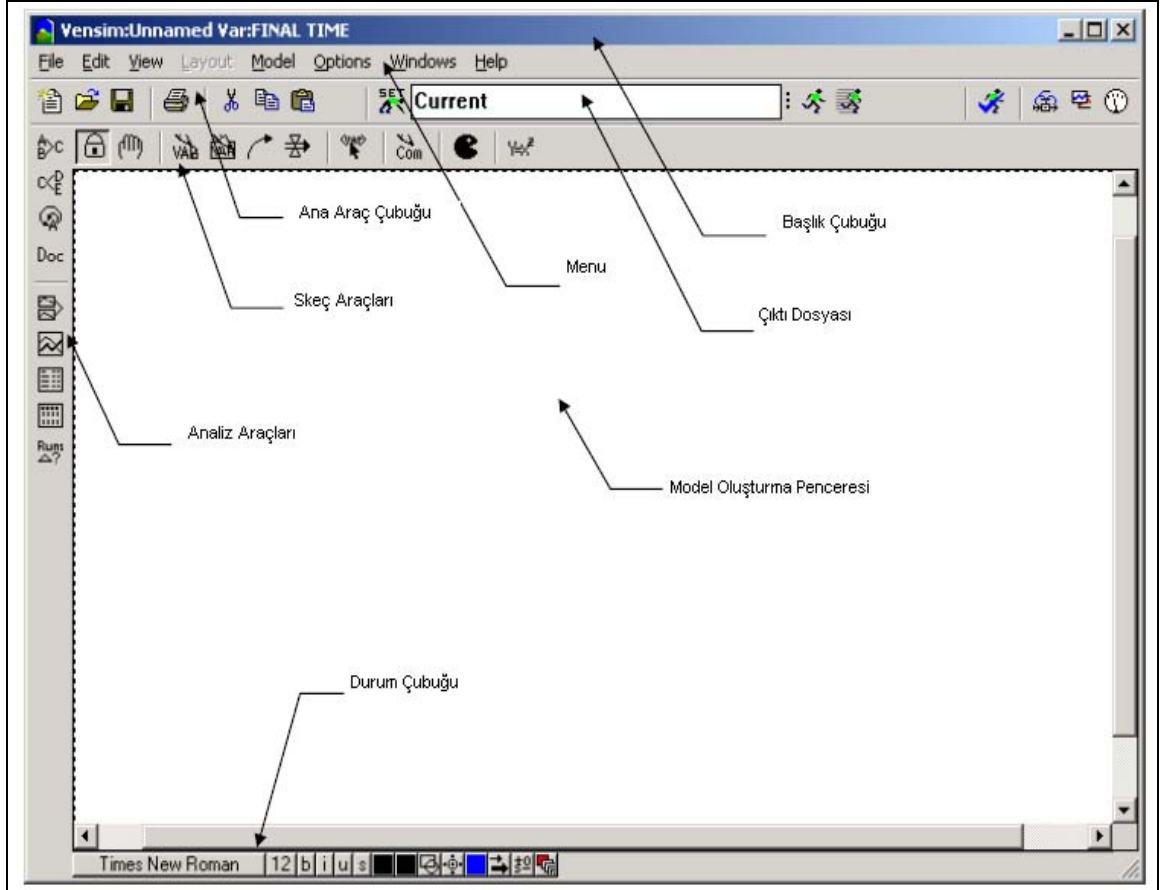
VENSİM Yazılımı, Sistem Dinamiği modellerinin canlandırıldığı, belgelendirildiği, analiz ve optimize edildiği bir görsel modelleme aracıdır. VENSİM PLE ise kişisel öğrenimi daha kolaylaştıracak şekilde tasarlanmış sürümüdür [13].

Bu yazılım kullanılarak nedensel döngü diyagramlarından ve birikim-akış diyagramlarından oluşturulabilen kolay ve esnek bir simülasyon modeli oluşturma yolu sağlanır. Kelimeleri oklarla birbirine bağlayarak sistem değişkenleri arasındaki ilişkiler nedensel bağlantılar olarak girilir ve kayıt edilir. Tam bir simülasyon modeli oluşturmaya yardım eden Denklem Editörü tarafından bu bilgiler kullanılır. Model, oluşturulma aşamasında analiz edilebilir, bir değişkenin ve değişkeni içeren geri besleme döngüsünün nedenlerine ve kullanımına bakılabilir. Simüle edilebilir bir model oluşturulduğu zaman VENSİM Yazılımı modelin davranışları hakkında bilgi verir.

Simülasyon modelinin yapısal diyagramı değişkenler arasındaki bazı ilişkileri ifade eden bir resimdir. Ve her zaman tüm değişkenleri ve tüm ilişkileri göstermeyebilir. VENSİM yazılımındaki sistem dinamiği simülasyon modeli sadece değişkenler arası ilişkileri belirleyen denklemler kullanılarak ifade edilir. Tüm denklem listesi VENSİM modelini tamamen açıklar.

### 3.2. Vensim Yazılımı Genel Yapısı

VENSIM yazılımı çalışma tezgâhına benzeyen bir kullanıcı arayüzü kullanır. VENSIM ana penceresinde başlık çubuğu, ana araç çubuğu, menü ve analiz çubuğu bulunur. Bir model açıkken durum çubuğu ve skeç araçları da belirir. Şekil 3.1’de VENSIM penceresi görülmektedir.



Şekil 3.1. Vensim Kullanıcı Arayüzü

- Başlık Çubuğu açılmış olan modeli ve workbench değişkenini gösterir. Workbench değişkeni modelde seçilen herhangi bir değişkendir.
- Skeç ve analiz araçları hariç VENSIM’de kullanılan tüm işlemler Menüden gerçekleştirilir.
- Araç çubuğu çok sık kullanılan simülasyon özelliklerine ve menü araçlarına ulaşım sağlar.

- İnşa Penceresi skeç araçlarının kullanılarak modellerin yapılarının oluşturulmasında ve denklem yazımında kullanılır.
- Skeç Araçları Model yapısını oluşturmada gerekli elemanları içerir. Bunlar; Birikim, Akış, Denklem Editörü, Bağlantı Okları olarak sıralanır.
- Durum Çubuğu skecin ve skeçteki objelerin durumunu gösterir. Objelerin şekillerini değiştirmek veya yazı tipini belirlemek durum Çubuğu ile mümkündür.
- Analiz Araçları modelleri incelemek için gerekli araçları içerir. Aktif olan Workbench değişkeninin hakkında bilgi verir. Simülasyon sonunda elde edilen dataların tablo olarak veya grafik olarak görülebilmesiyle değişkenin davranış özellikleri belirlenebilir.

Maksimum verimle VENSIM'in kullanılması için bu araçların kullanılması iyi bilinmelidir. Skeç araçları model oluşturur. Analiz araçları kullanılarak yapı gözden geçirilir ve model simüle edilir. Dataset analiz araçları (grafikler ve tablolar) kullanılarak model test edilir. Simülasyon denemeleri tekrarlanarak model iyice anlaşılır. İstenilen değişkenlerin davranışları grafik ve tablo çıktıları ile belirlenir. VENSIM yazılımının belirtilen bu sıranın takibi ile kullanılması maksimum verimi sağlar.

Modellerin oluşturulması, değerlendirilmesi ve modifiye edilmesi iteratif bir yaklaşımla yapılmalı, küçük detaylardan ve birkaç döngüden başlayarak işleyen bir model oluşturulmalıdır. Bu aşamadan sonra ortaya çıkan işleyen model, istenilen detay ve karmaşıklığı gösterinceye kadar modifiye edilebilir ve geliştirilebilir.

### 3.3. Tavşan Nüfus Modeli

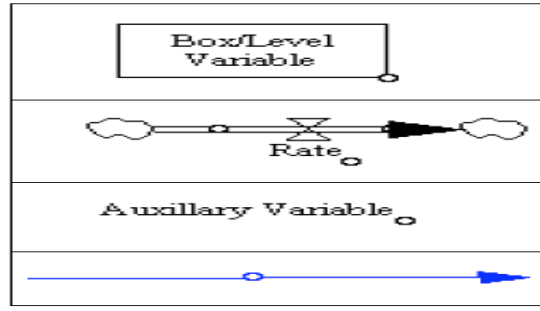
VENSIM yazılımının kullanımı, sınırlı bir alanda yaşayan tavşanların nüfusunun modellenmesi örneği ile açıklanabilir. Tavşan nüfusunun doğum ve ortalama ömürleri göz önüne alınarak Sistem Dinamiği modeli oluşturulabilir.

Modelleme süreci modelin taslağının oluşturulması süreci ile başlar, denklemlerin yazılması ve sayısal büyüklüklerin belirlenmesi ile devam eder. Sonraki adımda model simüle edilir ve simülasyon çıktıları kaydedilir. En son olarak modeldeki değişkenlerin dinamik davranışları analiz araçları kullanılarak değerlendirilir. Model inşa etme süreci istenilen şartlar sağlanana kadar modeli oluşturma, test etme ve tekrar oluşturma işlemlerinden oluşan iteratif bir süreçtir. Modeli simüle edilebilir yapmak ve model analizi, modeli en iyi hale getirmede önemli rol oynar [13].

VENSIM yazılımında oluşturulan bir simülasyon modelinin davranışı, değişik değişkenler arasındaki denklemlerle ifade edilerek belirlenir. Bir modelin yapısal diyagramı ise değişkenler arasındaki ilişkinin bir resmi olarak düşünülebilir. VENSIM, model denklemlerinin ve model yapısal diyagramlarının tutarlılığını ve bağdaşmasını sağlar.

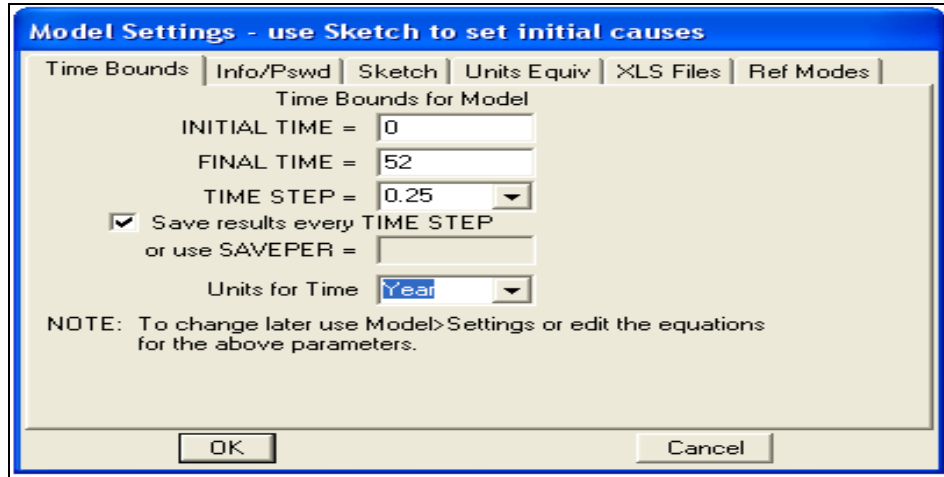
Model oluşturulurken Şekil 3.2. de görülen skeç araçları kullanılır. Bunlar sistem dinamiği VENSIM modellerinin temel elemanlardır [14]. Kısaca özetlenirse:

- *Box Variable*, birikimleri ifade eden skeç aracıdır. Büyük harfle başlayan isimlerle ifade edilir. “Nüfus” gibi.
- *Rate*, akışları ifade eden skeç aracıdır. Küçük harflerle ifade edilir. “ortalama ömür” gibi.
- *Auxillary Variable*, modelde kullanılan sabitler veya parametrelerdir.
- *Connector*, diyagram oluşturmada kullanılan değişkenler arası bağlantıyı ifade etmek için kullanılır.



Şekil 3.2. Temel Skeç Araçları [14]

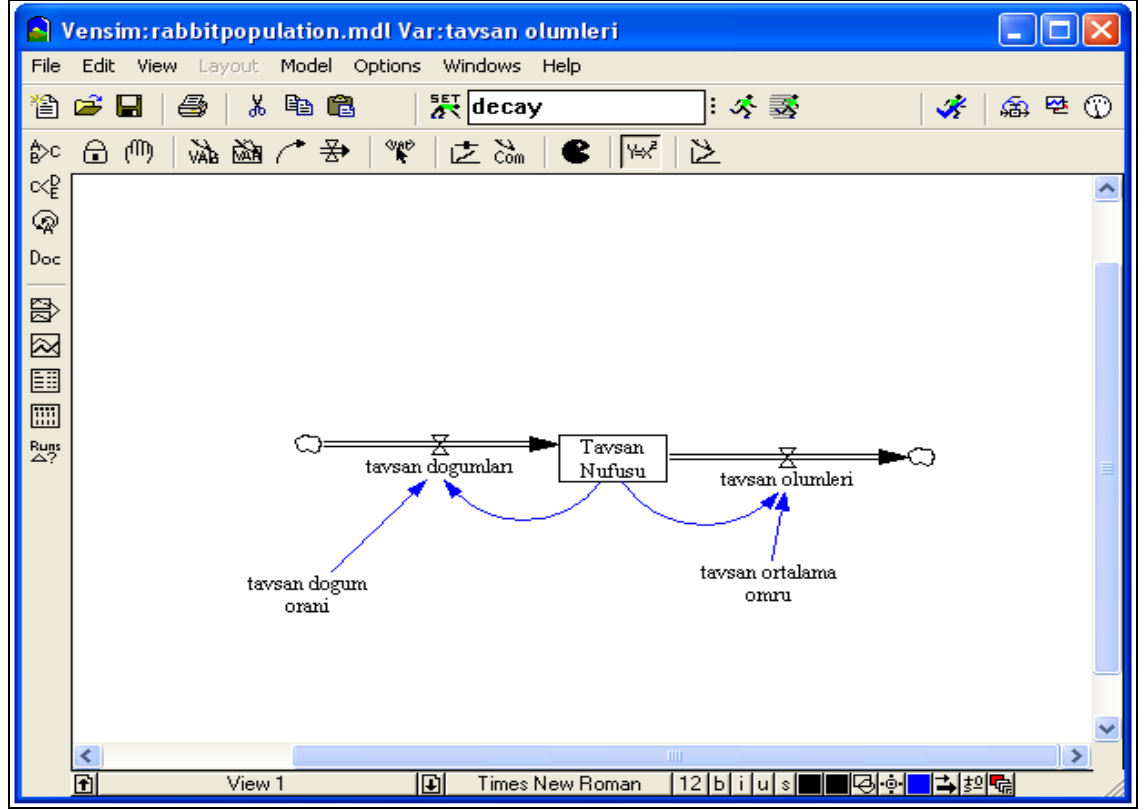
Tavşan nüfusu modelini oluşturmada önce simülasyon ayarları yapılmalıdır. Bu bölümde zaman birimi ve zaman adımı seçilir. Model için zaman birimi yıl, adım ise 0.25 birim olarak alınmıştır. Zaman adımı birikime akan akışın hesaplandığı zaman aralığıdır. Başka bir deyişle her 0.25 birim zaman aralığında akan miktarın birikimlerde toplanmasıdır. Zaman adımı ne kadar küçük olursa integrasyon hatası o kadar az olur. Şekil 3.3. 'de simülasyon ayar penceresi görülmektedir.



Şekil 3.3. Simülasyon Ayar Penceresi

Simülasyon ayarları yapıldıktan sonra skeç araçları kullanılarak modelin yapısal taslağı oluşturulur. Modelde kullanılan birikim “Tavşan Nüfusu”dur. *Box Variable* seçilerek birikim elemanı oluşturulur. Modelde mevcut akışlar ise *Rate* aracı seçilerek oluşturulur. Modelde iki akış vardır. Bunlar “doğum” ve ölüm” akışlarıdır. *Variable* aracı kullanılarak *doğum oranı* ve *ortalama tavşan ömrü* değişkenleri oluşturulur. Tüm bu elemanlar oluşturulduktan sonra bunların aralarındaki ilişkileri göstermek için *Arrow* aracı kullanılarak gerekli bağlantılar yapılır.

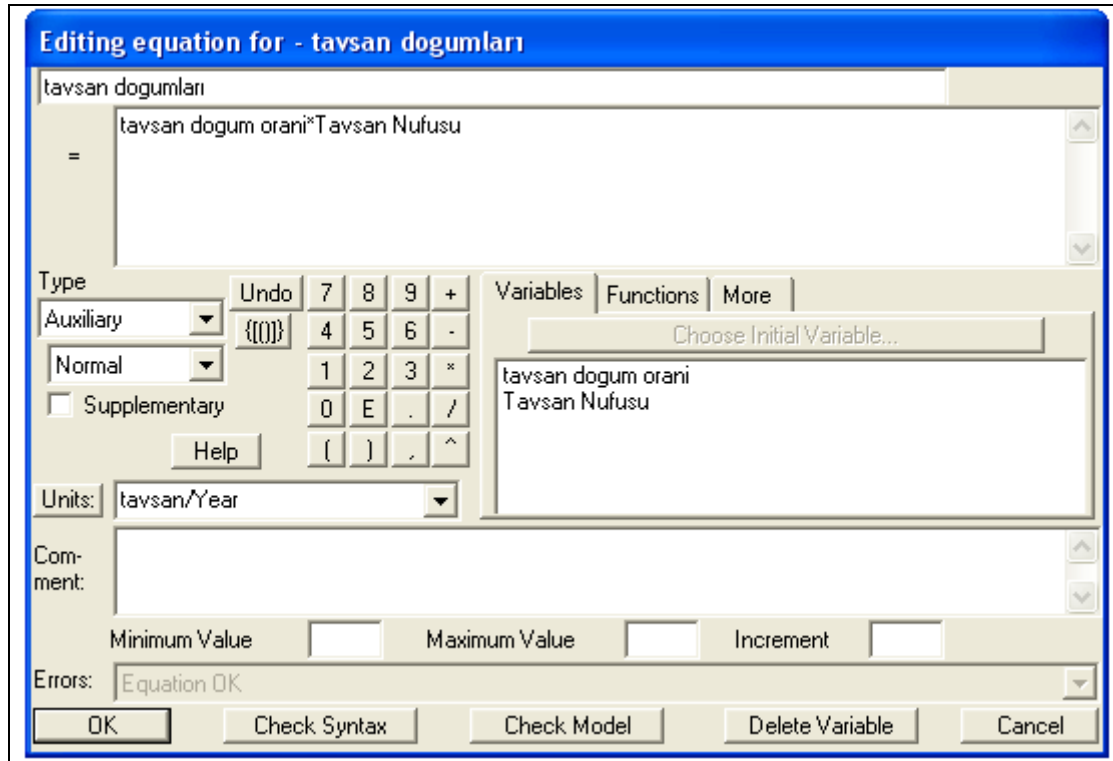
Tavşan Nüfusu Modelinin yapısı böylelikle oluşturulur. Tavşan nüfusundan doğumlara doğru olan pozitif bir geri besleme döngüsü nüfusu artırıcı etki yapar. Ölümünden nüfusa negatif bir geri besleme döngüsü ise nüfusu azaltıcı etki gösterir. Şekil 3.4. de modelin yapısı görülmektedir.



Şekil 3.4. Tavşan Nüfusu Modeli

Model bu haliyle yapısal olarak hazırdır. Simüle edilebilmesi için elemanlar arasındaki bağlantıları oluşturan denklemlerin oluşturulması gereklidir. Bunun için denklem aracı kullanılır.

Modelde nüfusun doğum ve ölümlerden etkilendiği görülmektedir. Doğumlar ise nüfus ve doğum oranının etkisi altındadır. Doğum oranı hiç bir etki altında değildir. Sabit bir orandır. Doğumu tanımlayan denklem “*tavşan doğumları=tavşan doğum oranı\*Tavşan Nüfusu*” olarak belirlenmiştir. Tavşan doğum oranı 0.04 olarak alınmıştır. Denklemin *Equation Editor* seçilerek istenilen değişkenlerin denklemleri tanımlanır. Şekil 3.5. de denklem editörü görülmektedir.



Şekil 3.5. Denklem Editörü

Modellerde birimler de önemlidir. Sonuçları iyi analiz edebilmek için birimlerin doğru olması gerekir. Tavşan doğumları için birim “tavşan/Year” olarak girilmiştir. Birimler denklem editörü ile girilir. Daha sonra simülasyon çıktısı olarak elde edilen grafiklerde bu birimler görülür. Denklemlerde bir hata varsa denklem editörü kullanıcıyı uyarır. Denklemlerde hata olduğu sürece simülasyon gerçekleşmez. Denklem editörü yardımı ile tüm model kontrol edilebilir.

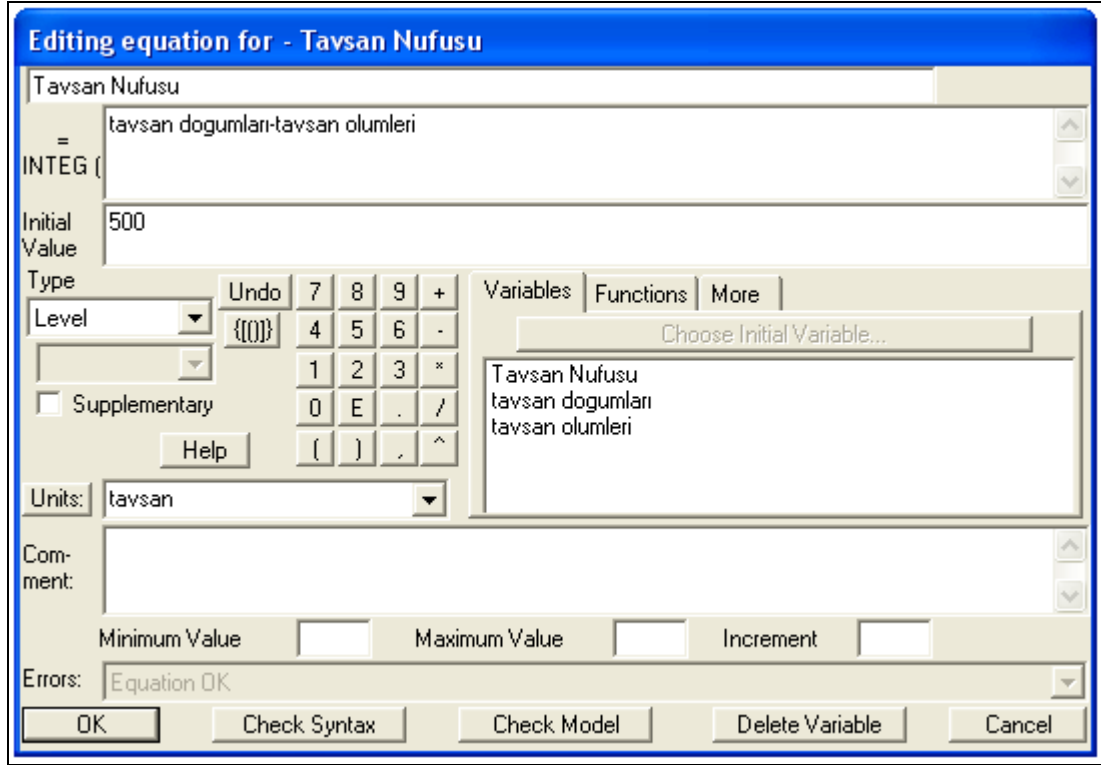
Benzer şekilde tavşan ölümleri akışı için gerekli denklemler denklem editörü aracılığıyla girilir. Ölümleri tanımlayan denklem aşağıdaki gibidir.

$$\text{tavşan ölümleri} = \text{tavşan nüfusu} / \text{tavşan ortalama ömrü}$$

Tavşan ortalama ömrü 25 hafta olarak alınmıştır. Birimi “tavşan/Year” olarak kabul edilmiştir.

Birikim elemanı olan *Tavşan Nüfusu* da denklemlerle tanımlanmıştır. *doğumlar* akışı modelin taslağında *Nüfus* birikimine girdi olarak görülmektedir. *ölümler* akışı ise *Nüfus* birikiminden çıkan bir çıktı olarak görülmektedir. Görsel

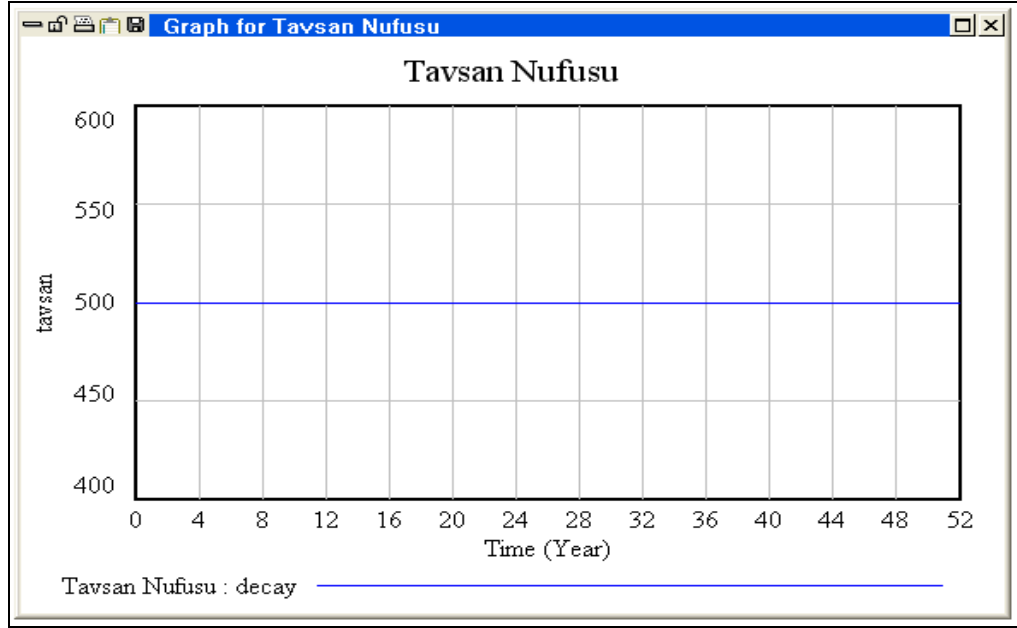
olarak oluşturulan taslaktaki bu bağlantılar denklem editöründe görülür. Başka bir deyişle *Nüfus* birikimi denklem editörü açıldığı zaman “ tavsan nüfusu=tavsan dogumları-tavsan ölümleri” olarak gözükecektir. Bu model için tavşanların başlangıç nüfusu 500 olarak alınmıştır. Nüfusun birimi “tavşan” dır.



Şekil 3.6. “Tavsan Nüfusu” Denklem Editörü Penceresi

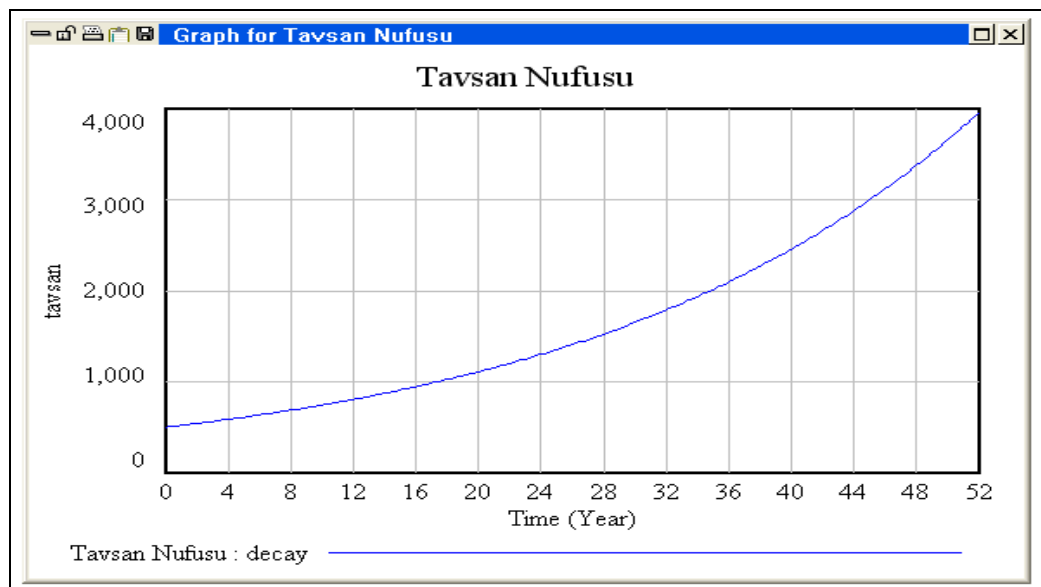
Şekil 3.6. da birikimin denklemi, birimi, başlangıç değeri görülür. Değişkenin tipi **level** yani birikim olarak alınmıştır. VENSIM belirtilen simülasyon süresi için bu birikimdeki değerleri integre ederek toplar ve data olarak kaydeder. Analiz araçları yardımıyla bu dataalar grafik veya tablo olarak görülür.

Model yapısal taslağı ve denklemleri tanımlandıktan sonra simüle edilebilir. Fakat simülasyondan önce birim ve model kontrolü VENSIM yazılımınca yaptırılır. Herhangi bir hata yoksa simülasyon işlemine geçilir. Menüden simülasyon işlemi **Simulate** tuşu ile gerçekleştirilir. Bu işlemden sonra grafik ve tablo araçları kullanılarak istenilen değişkenlerin zamana karşı değişimi görülebilir.



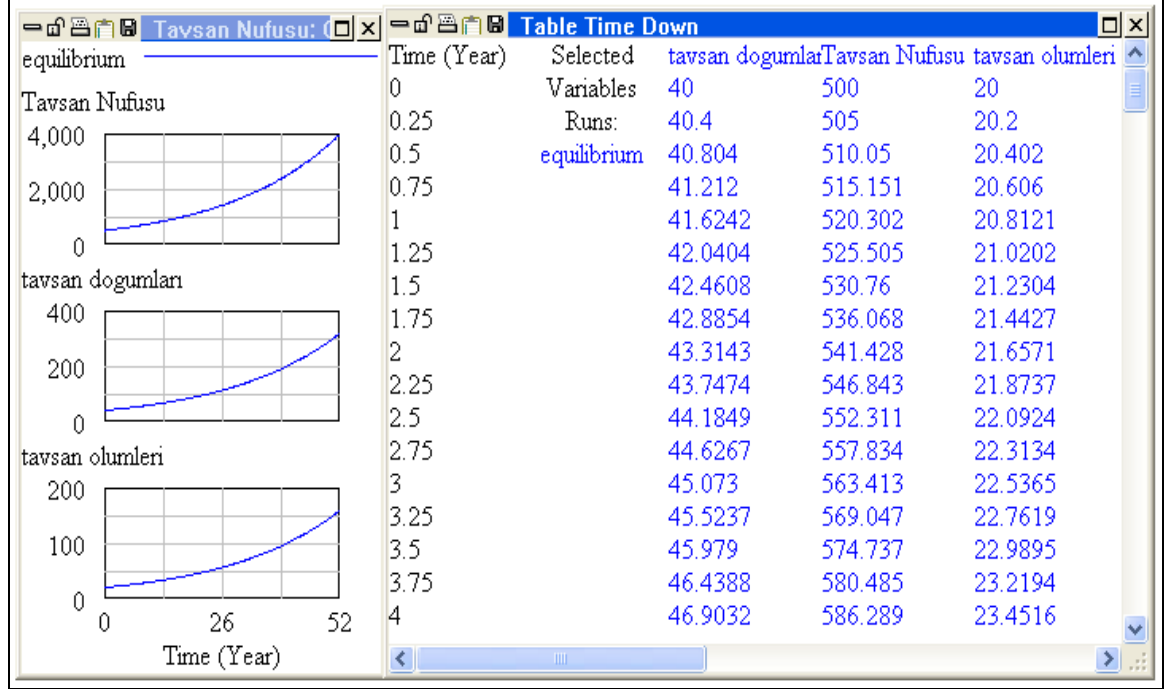
Şekil 3.7. Tavsan Nüfusu Grafiği

Şekil 3.7. de tavşan nüfusunun zamana karşı değişmediği sabit kaldığı görülür. Doğum ve ölümler eşit olduğu için bu sonuç çıkmıştır. Aynı model üstünden farklı şartlar için simülasyon yapılabilir. Modelin yapısını değiştirmeden sadece kullanılan sabitleri değiştirerek farklı simülasyonlar yapılarak birbirleriyle karşılaştırılabilir. Bu model için, doğum oranının daha yüksek olması sonucunda nüfus değişiminin ne olacağı sorgulanmıştır. “tavşan doğum oranı” sabiti 0.04 yerine 0.08 alınırsa Şekil 3.8. deki grafik elde edilir.



Şekil 3.8. Artan Tavşan Nüfusu Simülasyon Sonucu

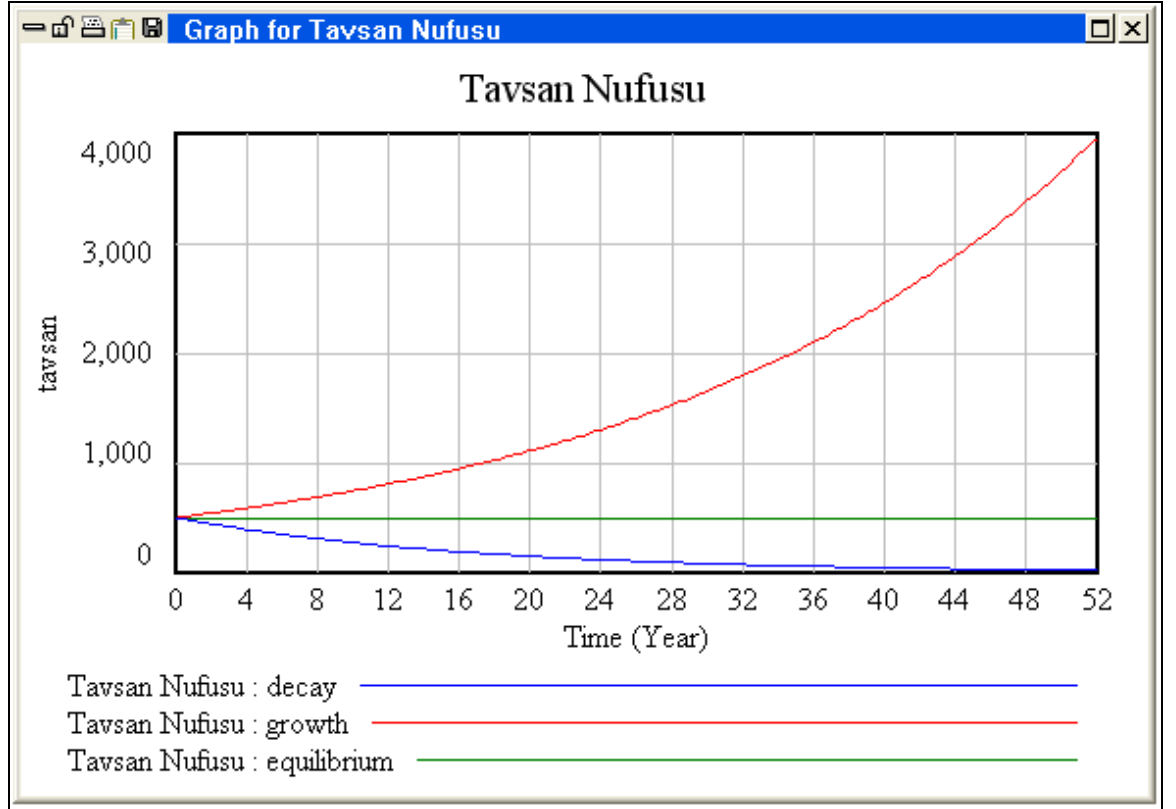
Tavşan nüfusu üssel olarak artmıştır. Sonuçlar grafik dışında tablo olarak da görülebilir. Şekil 3.9. da hem tablo hem de akışların da dâhil olduğu grafikler görülür.



Şekil 3.9. Tavşan Nüfus Değişim Tablosu

Tabloda görüldüğü üzere doğumlarla beraber ölümlerde artmıştır. Doğumların artışı daha hızlı olduğu için nüfus artmıştır. Modelin zaman adımı 0.25 seçildiği için tabloda zaman birimi 0.25 lik adımlarla artmıştır ve sonuçlar her bir adım için tabloda gösterilmiştir.

Model yapısında değişiklik yapmadan farklı simülasyonlar yapılabilir. Nüfusun değişmediği, arttığı ve azaldığı senaryolar tek bir grafikte analiz edilebilir. Ölümlerin doğumlardan daha çok gerçekleştiği durumda nüfus azalacaktır. Bunun için modelde kullanılan “tavşan ortalama ömrü” 10 yıl olarak değiştirilmiştir. Şekil 3.10. da aynı model üstünden farklı senaryolar için elde edilmiş simülasyon sonuçları bir grafik üstünde gösterilmiştir.



Şekil 3.10. Azalan Tavşan Nüfusu Simülasyon Sonucu

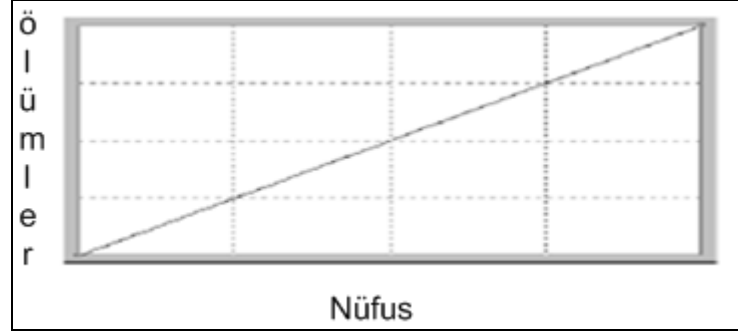
### 3.4. Geliştirilmiş Tavşan Nüfus Modeli

Sistem Dinamiği modelleri basit modellerden daha karışık modellere doğru geliştirilerek oluşturulur. Daha önce oluşturulan Tavşan Nüfusu Modeli de geliştirilebilir. Modeli geliştirmek için şartlar tekrar gözden geçirilebilir.

Nüfusun artması nüfus yoğunluğunu artırır. Tavşanların yaşam alanı sınırlıdır. Nüfus arttıkça sınırlı alandan dolayı nüfusu etkileyen problemler ortaya çıkar. Yaşam alanının sınırlı olmasından dolayı mevcut çevrenin ideal bir nüfusu olduğu kabul edilmiştir. Bu çevrenin taşıma kapasitesidir. Taşıma kapasitesi içinde bulunduğu çevre için ideal nüfustur. Dolayısıyla taşıma kapasitesi aşılabılır. Kapasite aşımı yaşam kalitesini düşürecek ve ortalama ömür düşecektir [13].

Önceki nüfus modeli, denklemlerinde sadece çarpma ve bölmelerin kullanıldığı basit bir modeldir. Dört işlem, denklemlerin önemli yapıtaşları olmasına rağmen bazen değişik bağlantıların kullanılması gerekir. VENSIM üssel (

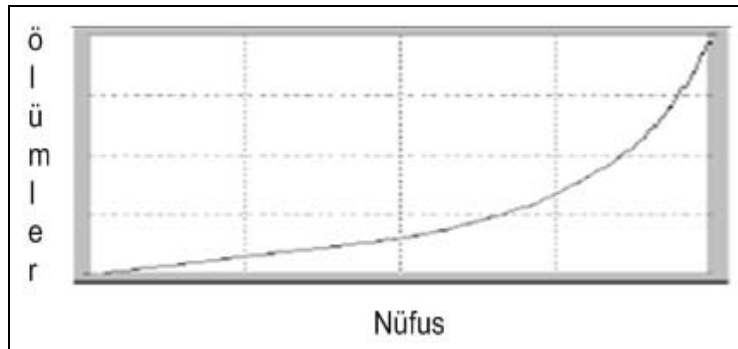
exponential ) ve doğal logaritma gibi farklı fonksiyonların kullanılabildiği bir yazılımdır. Çoğu kez istenilen özellikte veya şekilde fonksiyonların oluşturulması daha uygundur. VENSIM’de oluşturulan Lookup fonksiyonları ve tabloları dinamik modelin elemanları arasındaki daha karışık ilişkileri ortaya koyar. Tavşan Nüfusu Modelinde ölümler ile nüfus arasında lineer bir bağ olduğu için belli bir katsayı kullanılarak bu bağ denklemlerde kullanılmıştır [13].



Şekil 3.11. Nüfus ve Ölüm Arasındaki Lineer Bağ

Şekil 3.11. de görüldüğü gibi nüfus ve ölümler arasında lineer bir bağ vardır. Ölümler ve nüfus aynı hızla artar (zamana karşı lineer anlamında değil). Lineer bir bağlantının olduğu bu gibi durumlarda bir grafik kullanmak yerine lineer grafiğin eğimiyle aynı değerde olan bir katsayı kullanmak daha kolaydır [13].

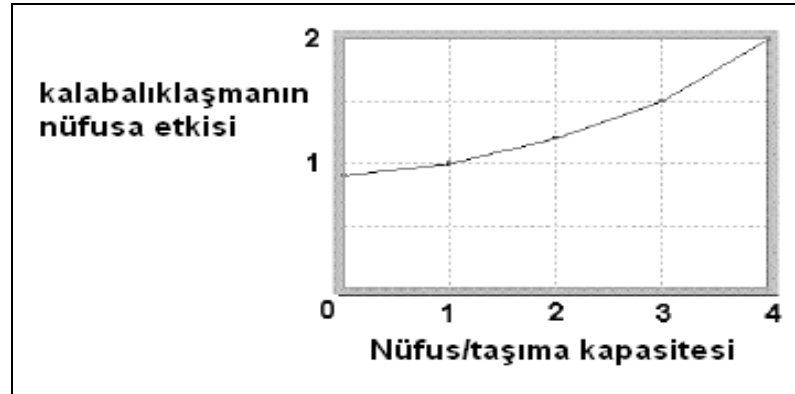
Ölümle nüfus arasındaki ilişki lineer değilse sabit katsayı yerine grafik kullanılmalıdır. Ölümlerin nüfustan daha hızlı arttığı bir model için Şekil 3.12. deki gibi bir ilişki düşünülebilir. Bu tür bir sonuç sınırlı kaynakların olduğu bir toplulukta ortaya çıkabilir.



Şekil 3.12. Nüfus ve Ölüm Arasındaki Üssel Bağ

Şekil 3.12. de görülen fonksiyon girdi olarak tavşan miktarını kullanarak yıllık tavşan ölüm miktarını çıktı olarak verir. Bu oluşturulması ve değiştirilmesi zor bir fonksiyondur. Örneğin model için yaşam süresi daha uzun bir cins tavşan kullanıldığı düşünülürse mevcut fonksiyonun yeniden düzenlenmesi gerekir. Bu problemlerle karşılaşmamak için normalleştirilmiş lookup fonksiyonları kullanılır. Normalleştirilmiş girdi (0,0) veya (1,1) gibi bir referans noktası etrafında oluşturulur. Girdi birimsizdir ve modeldeki diğer değişkenlerin ölçü birimlerinden bağımsızdır. Fonksiyonun çıktısı için de aynı özellikler geçerlidir. Örneğin nüfus binlerle ölçülen tavşan sayısı iken ölümler binlerle ölçülen aylık ölen tavşan sayısıdır. Nüfus ‘u girdi olarak , Ölümler’i çıktı olarak kabul eden bir Lookup fonksiyonu geçerli değildir.

Öte yandan taşıma kapasitesi ile bağlantılı nüfus ‘u girdi olarak kullanarak normalleştirilmiş ve çıktı olarak *kalabalıklaşmanın ölümlere etkisini* veren bir Lookup fonksiyonu şartlar değiştiği zaman değiştirilmek zorunda değildir. Lookup fonksiyonunu değiştirmeden istenilen senaryolar simüle edilebilir. Nüfusun miktarı veya özellikleri değiştiği zaman lookup fonksiyonunu değiştirmeden sadece *taşıma kapasitesini* veya *ortalama ömürü* değiştirerek istenilen değişiklikler yapılabilir. Şekil 3.13. de normalleştirilmiş bir lookup fonksiyonu görülmektedir [13].



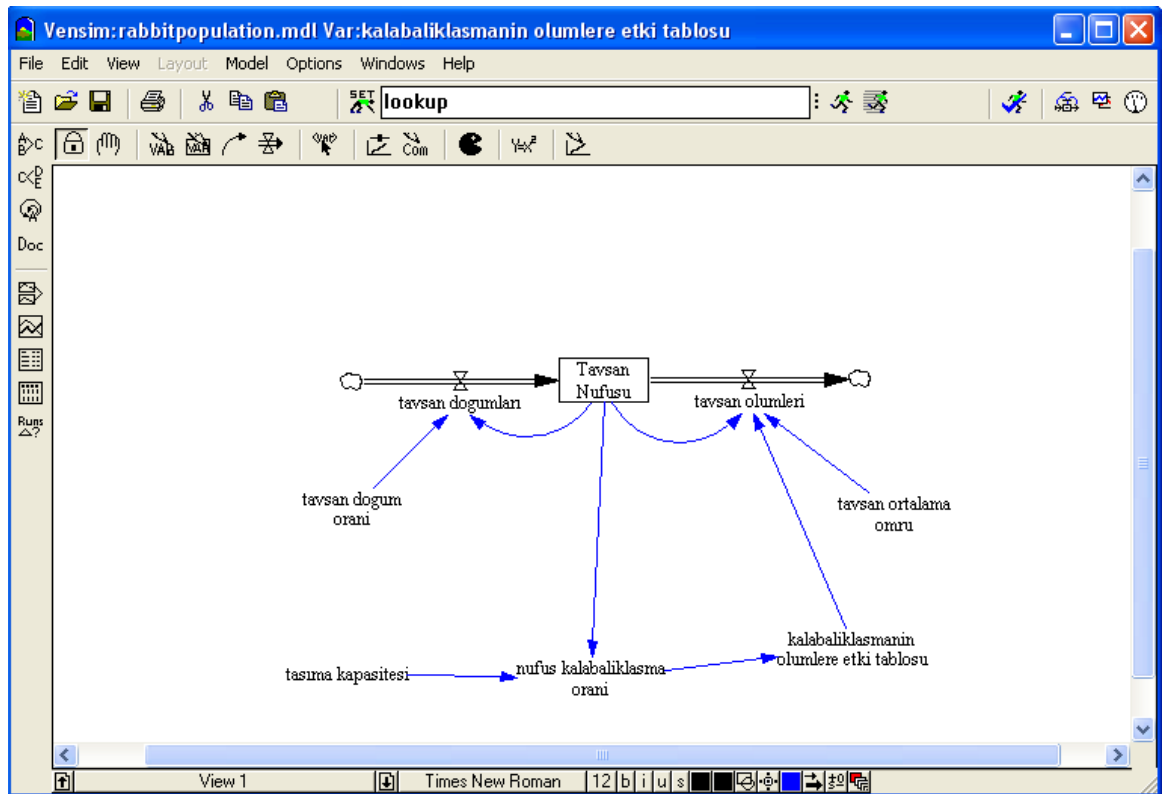
Şekil 3.13. Normalleştirme

Normalleştirme için giriş değişkeni normal veya ortalama bir değere bölünür (  $Nüfus / taşıma\ kapasitesi$  ). Nüfus bu değere eşitken fonksiyonun girdisi 1 değerini alır. *Nüfusun* diğer değerleri girdiyi 1 etrafında değiştirirler. Böylelikle Lookup fonksiyonu modelin başka bir değişkenin değerini normal değerine artıracak veya azaltacak çıktı değerini verir. Başka bir deyişle eğer giriş değeri normal veya

ortalama değere eşitse çıktı değeri de 1 olur ve etkilediği model değişkeninin değerinde hiçbir etkisi olmaz [13].

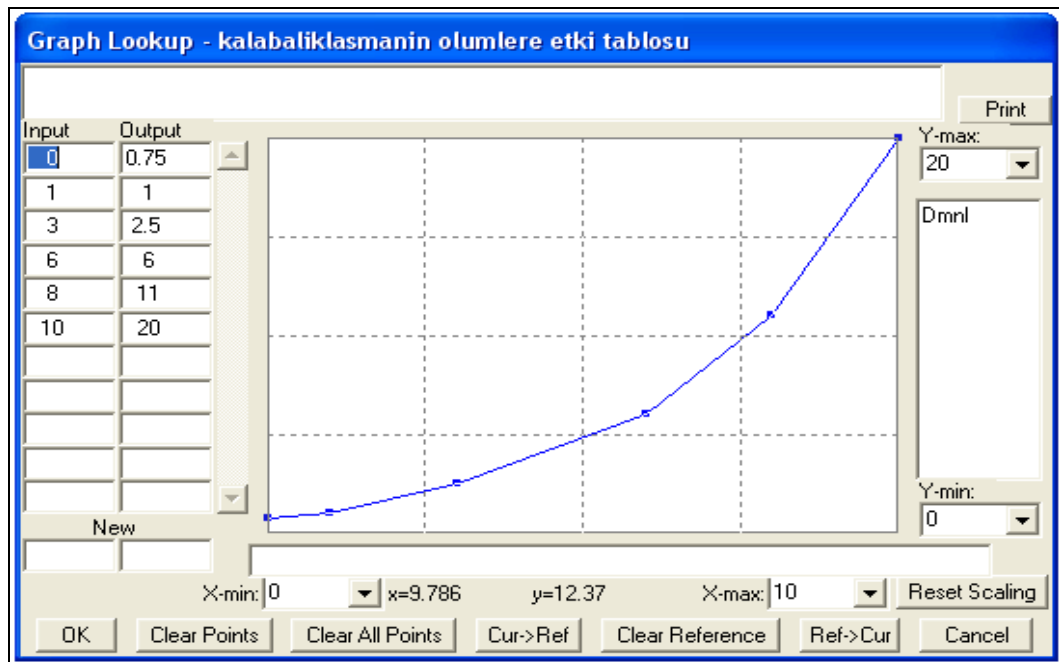
Geliştirilmiş Tavşan Nüfus modelinde bahsedilen Lookup fonksiyonları kullanılmıştır. Normalleştirme, *kalabalıklaşmanın nüfusa etki tablosu* adı ile yer alan model elemanında uygulanmıştır. Girdi olarak *nüfus kalabalıklaşma oranı* kullanılmıştır. Bu eleman *nüfusun taşıma kapasitesine oranıdır* ( $nüfus / taşıma\ kapasitesi$ ). Lookup fonksiyonundan çıkan çıktı ölümleri etkiler ve *Tavşan ölümleri* ile çarpım halinde olan bir katsayıdır. Nüfus artarsa kalabalıklaşma oranı artar. Bu oranın artması lookup fonksiyonunun girdi değerinin artması anlamına gelir. Çıktı değeri fonksiyona bağlı olarak artar ve *ölümleri* artırır. *Nüfus* azalır ve dengeleyici döngü böyle devam eder.

Lookup fonksiyonun girdisi olan *kalabalıklaşma oranı* birimsizdir. *Nüfus* ve *taşıma kapasitesi* değişkenlerinin birimleri Tavşan'dır. Kalabalıklaşma oranı bu iki değer in oranı olduğu için sonuçta birimsiz bir katsayı elde edilir. Aynı şekilde çıktı değeri de birimsizdir. Şekil 3.14. de oluşturulan yeni model görülmektedir.



Şekil 3.14. Tavşan Nüfus Modeli

Lookup fonksiyonları denklem editörü aracıyla fonksiyon üzerindeki noktalar girilerek oluşturulur. Diğer bir deyişle fonksiyonun girdi ve çıktı değerleri yazılarak istenilen fonksiyon elde edilir. İhtiyaca göre nokta sayısı artırılarak daha hassas bir fonksiyon elde edilir. Model için önemli olan (1,1) noktasının belirtilmesidir. Taşıma kapasitesi ve nüfus eşit olduğu zaman çıktı 1 değerini alır ki bu da ölümlerde hiçbir etki yapmaz. Şekil 3.15. de lookup fonksiyonunun oluşturulması görülmektedir. İstenilen noktalar fonksiyonun grafiği üstünde belirtilmiştir.



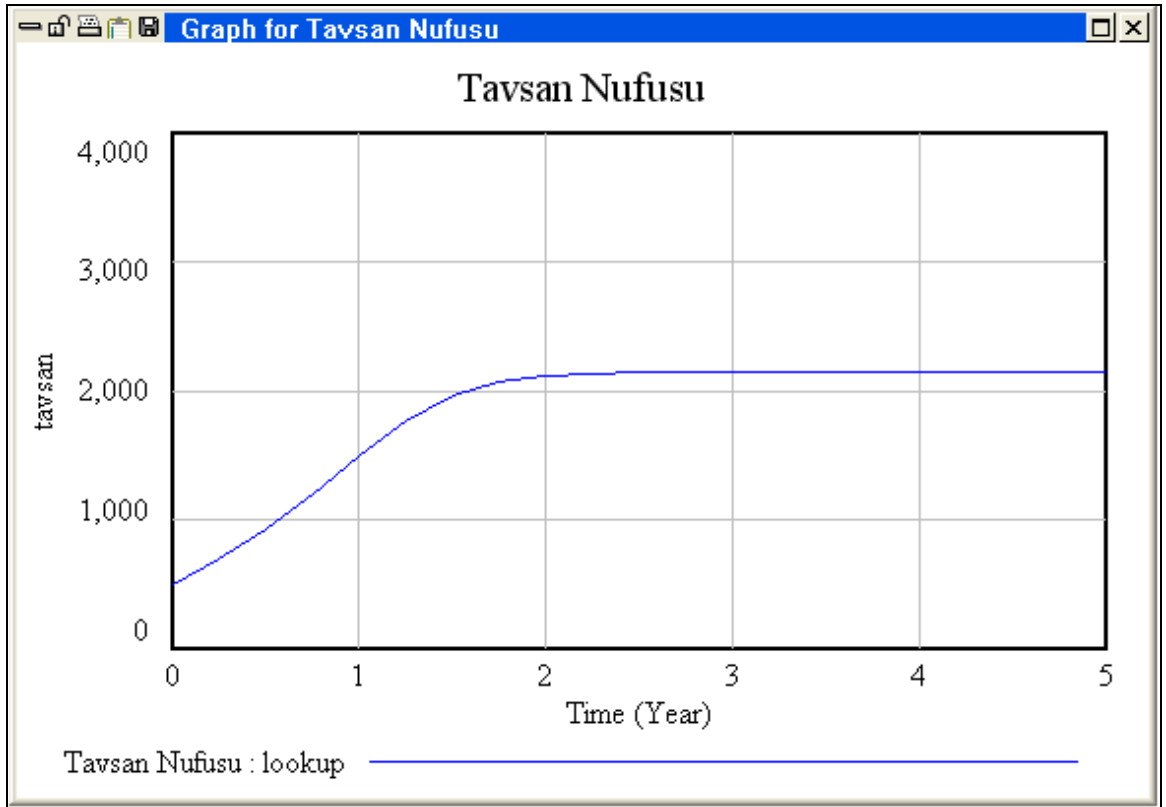
Şekil 3.15. Lookup Fonksiyonu

|                                                                                                                             |                                                                                                                                                               |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| (01) FINAL TIME = 5<br>Units: Year<br>The final time for the simulation.                                                    | (07) tavşan dogum oranı=<br>2<br>Units: fraction/Year                                                                                                         |
| (02) INITIAL TIME = 0<br>Units: Year<br>The initial time for the simulation.                                                | (08) tavşan dogumları=<br>tavşan dogum oranı*Tavşan Nufusu<br>Units: tavşan/Year                                                                              |
| (03) kalabalıklasmanın olumlere etki tablosu(<br>[(0,0)-<br>(10,20)],(0,0.75),(3,2.5),(6,6),(8,11),(10,20))<br>Units: Dnmrl | (09) Tavşan Nufusu= INTEG (<br>tavşan dogumları-tavşan olumlari,<br>500)<br>Units: tavşan                                                                     |
| (04) nüfus kalabalıklasma oranı=<br>Tavşan Nufusu/tasıma kapasitesi<br>Units: Dnmrl                                         | (10) tavşan olumlari=<br>(Tavşan Nufusu/tavşan ortalama<br>onu)*kalabalıklasmanın olumlere etki tablosu<br>(nüfus kalabalıklasma oranı)<br>Units: tavşan/Year |
| (05) SAVEPER =<br>TIME STEP<br>Units: Year [0,?]<br>The frequency with which output is stored.                              | (11) tavşan ortalama onu=<br>2<br>Units: Year                                                                                                                 |
| (06) tasıma kapasitesi=<br>500<br>Units: tavşan                                                                             | (12) TIME STEP = 0.25<br>Units: Year [0,?]<br>The time step for the simulation.                                                                               |

Şekil 3.16. Tavşan Nüfus Modeli Denklemleri ve Parametreleri

Şekil 3.16. da tavşan nüfus modelinin parametreleri ve modelde kullanılan denklemler gösterilmiştir. VENSIM yazılımının bir özelliği olarak kullanılan tüm denklem ve parametreler liste olarak görülebilir. Buna göre *tavşan başlangıç nüfusu* 500 tavşan olarak alınmıştır. 5 yıllık bir süre için simülasyon yapılmıştır. Ortalama ömür 2 yıl, doğum oranı 2 fraction/yıl olarak alınmıştır. “(*doğan tavşan / tavşan nüfusu*) / yıl” ifadesi tavşan doğum oranıdır. Dolayısıyla bu ifadenin birimi “(tavşan / tavşan) / yıl” olur ki bu da “1 / yıl” olarak yazılır. VENSIM yazılımında bu ifade “fraction / year” olarak görülür.

Birim ve model kontrolü yapıldıktan sonra model simüle edilir. Önceki modelde kalabalıklaşma göz önüne alınmadığı için nüfus sürekli artmıştır. Bu modelde nüfusun belirli bir doyma noktasına ulaştığı elde edilen simülasyon sonuçlarında görülür. Şekil 3.17. de simülasyon sonucu görülmektedir.



Şekil 3.17. Tavsan Nüfus Değişimi



normal süreçte ölen tavşan sayısı olarak alınır. Eğer normal süreçte ölen tavşan sayısı tilki tavşan tüketiminden az ise tavşan ölümleri tilki tavşan tüketimi olarak alınır. Tavşan ölümleri aşağıda görüldüğü gibi denklem editöründe oluşturulmuştur. Bu ifadeye göre normal süreçte ölen tavşan sayısı ve tilki tavşan tüketim sayısından büyük olanı tavşan ölümlerine eşit olur. Bir başka deyişle tavşan ölümleri tilki tavşan tüketimini karşılar.

$$tavsan\ olumleri = MAX(Tavsan\ Nufusu / ortalama\ tavsan\ omru \times kalabaliklasmanin\ olumlere\ etkisi\ lookup(tavsan\ kalabaliklasmasi),\ tilki\ tavsan\ tuketimi)$$

Modelde 3 tane lookup fonksiyonu yer alır. Bunlardan biri önceki modelde de olan *kalabalıklaşmanın ölümlere etkisi*, diğer ikisi ise *tilki tavsan tuketimi lookup* ve *tilki ölüm oranı lookup* olarak modelde yer almıştır. *Tilki tavşan tüketimi lookup* girdi olarak *tavsan kalabalıklaşmasını* kullanır ve çıktı olarak *tilki tavşan tüketimini* etkileyen bir katsayı verir. *Tilki ölüm oranı lookup* fonksiyonu *tilki yiyecek bulma imkânı* değişkenini girdi olarak kullanır ve *tilki ölümlerini* etkileyen bir katsayı elde edilir.

*Tavşan başlangıç nüfusu* 500 tavşan olarak alınmıştır. *Tilki başlangıç nüfusu* ise 30 tilkidir. Tilki ve tavşan doğum oranları sırasıyla 0.25 ve 2 fraction / year, ortalama ömürler ise sırasıyla 4 ve 2 yıl olarak belirlenmiştir. *Taşıma kapasitesi* ise 500 tavşan olarak kabul edilmiştir. Modelde kullanılan denklemler aşağıda gösterilmiştir.

$$tavsan\ dogumlari = tavsan\ dogum\ orani \times Tavsan\ Nufusu$$

$$tavsan\ kalabaliklasmasi = Tavsan\ Nufusu / tasima\ kapasitesi$$

$$tavsan\ olumleri = MAX(Tavsan\ Nufusu/ortalama\ tavsan\ omru \times kalabaliklasmanin\ olumlere\ etkisi\ lookup(tavsan\ kalabaliklasmasi),\ tilki\ tavsan\ tuketimi)$$

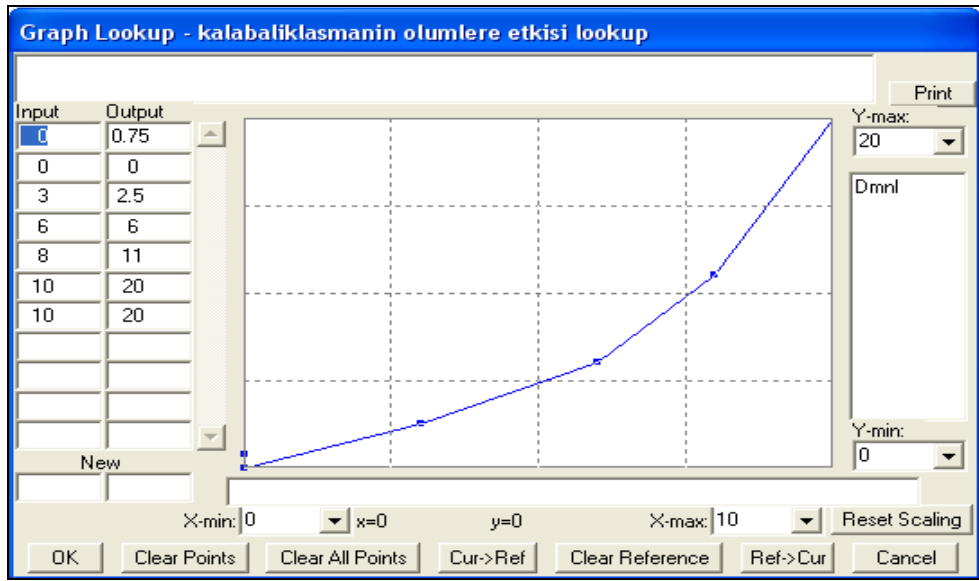
$$tilki\ dogumlari = Tilki\ Nufusu \times tilki\ dogum\ orani$$

$$tilki\ olumleri = Tilki\ Nufusu/ortalama\ tilki\ omru \times tilki\ olum\ orani\ lookup(tilki\ yiyecek\ bulma\ imkani)$$

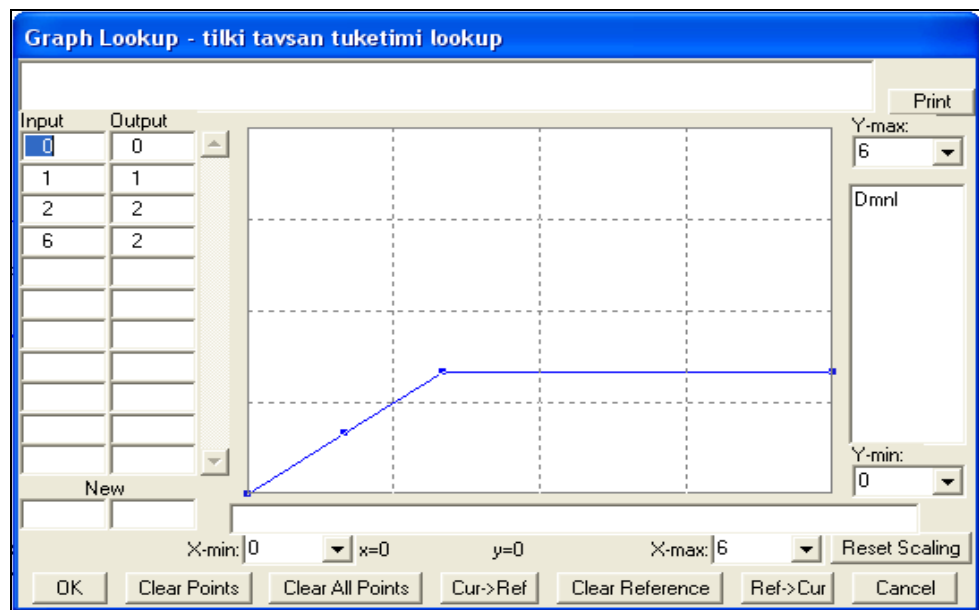
$tilki\ tavsan\ tuketimi = Tilki\ Nufusu \times tilki\ yiyecek\ ihtiyaci \times tilki\ tavsan\ tuketimi$   
 $lookup(tavsan\ kalabaliklasmasi)$

$tilki\ yiyecek\ bulma\ imkani = tilki\ tavsan\ tuketimi / (Tilki\ Nufusu \times tilki\ yiyecek\ ihtiyaci)$

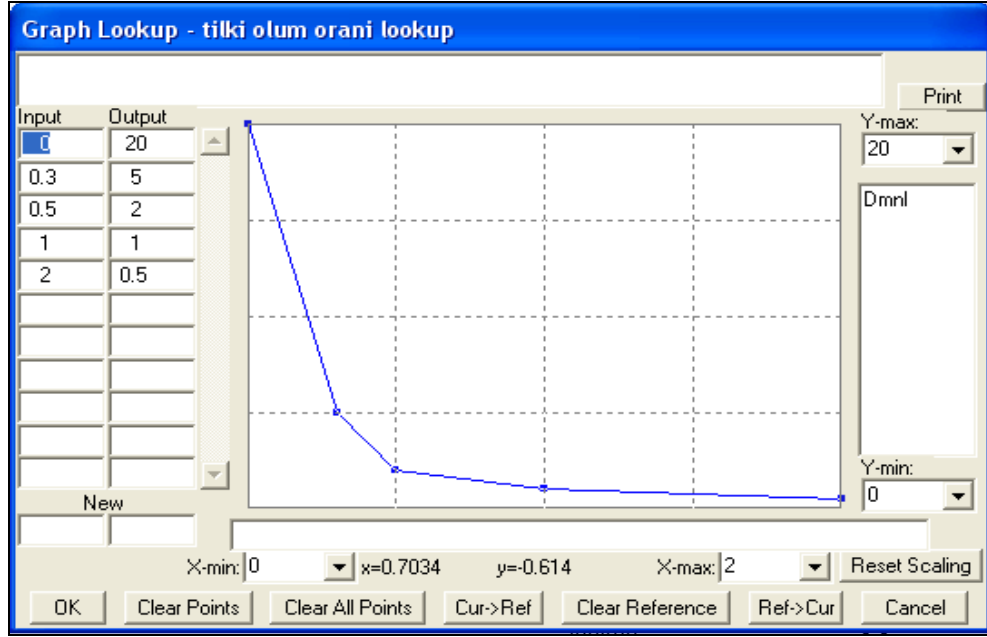
Şekil 3.19. , Şekil 3.20. ve Şekil 3.21. de modelde kullanılan lookup fonksiyonları gösterilmiştir.



Şekil 3.19. Kalabalıklaşmanın Ölümlere Etkisi Lookup Fonksiyonu



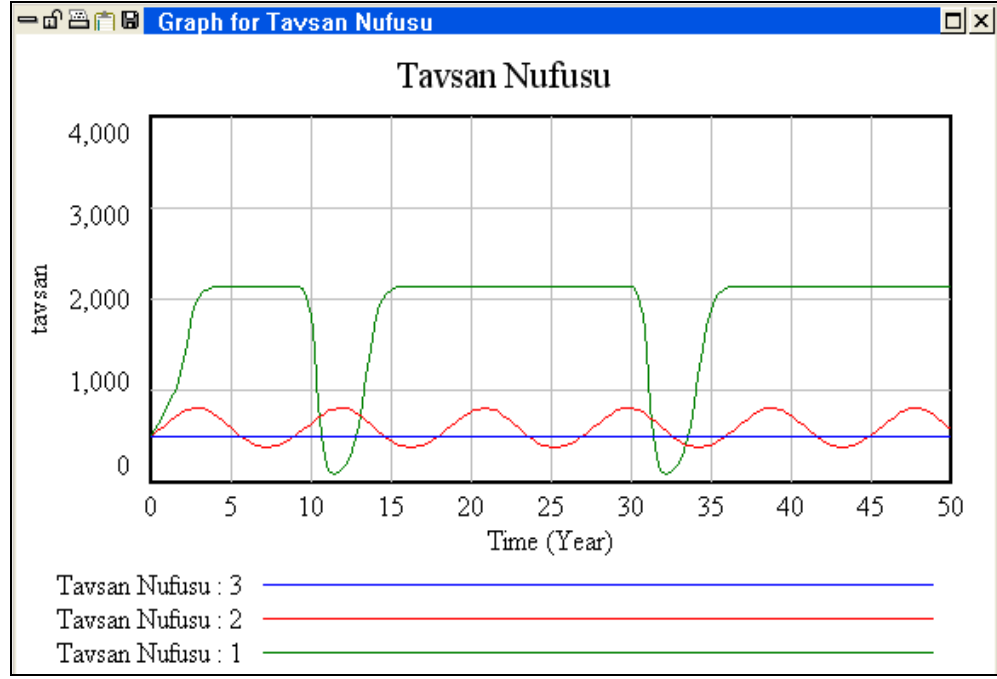
Şekil 3.20. Tilki Tavşan Tüketimi Lookup Fonsiyonu



Şekil 3.21. Tilki Ölüm Oranı Lookup Fonksiyonu

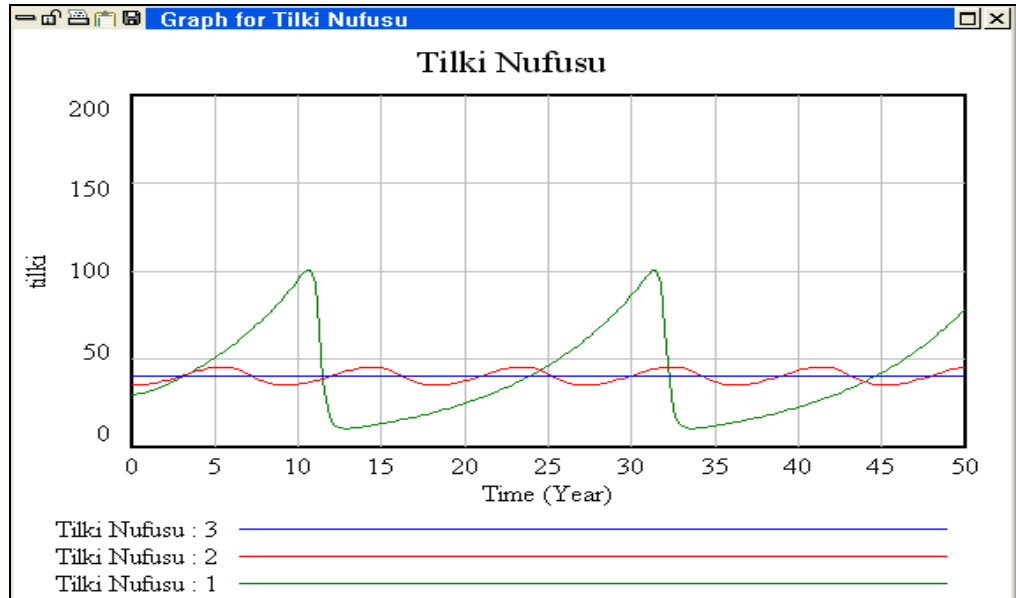
Şekil 3.21. de diğerler lookup fonksiyonlarından farklı olarak girdi değeri ile çıktı değeri ters orantılıdır. Yiyecek bulma imkanı arttıkça ölüm oranı düşer.

Oluşturulan modelin denklemleri ve birimleri hatasız olduğu kontrol edildikten sonra model simüle edilmiştir. Tavşan ve tilki nüfusu arasındaki denge simülasyon sonuçlarında görülür. Şekil 3.22. de 3 farklı senaryo için tavşan nüfustaki değişim görülmektedir. İlk durumda *tilki başlangıç nüfusu* 30 olarak alınmıştır. Bu durumda tavşan nüfusu belli bir denge seviyesine ulaşır belli bir süre sabit kaldıktan sonra hızla azalmıştır. İkinci durumda *tavşan başlangıç nüfusu* ise 35 alınmıştır. Bu durumda nüfus belli bir değerde salınım göstermiştir. En son durum ise tilki başlangıç nüfusunun 40 olarak alındığı senaryodur. Bu durumda ise nüfus dengededir. Çok küçük sayılabilecek değişiklikler uzun vadede değişkenin dinamik davranışını tamamen değiştirmiştir.

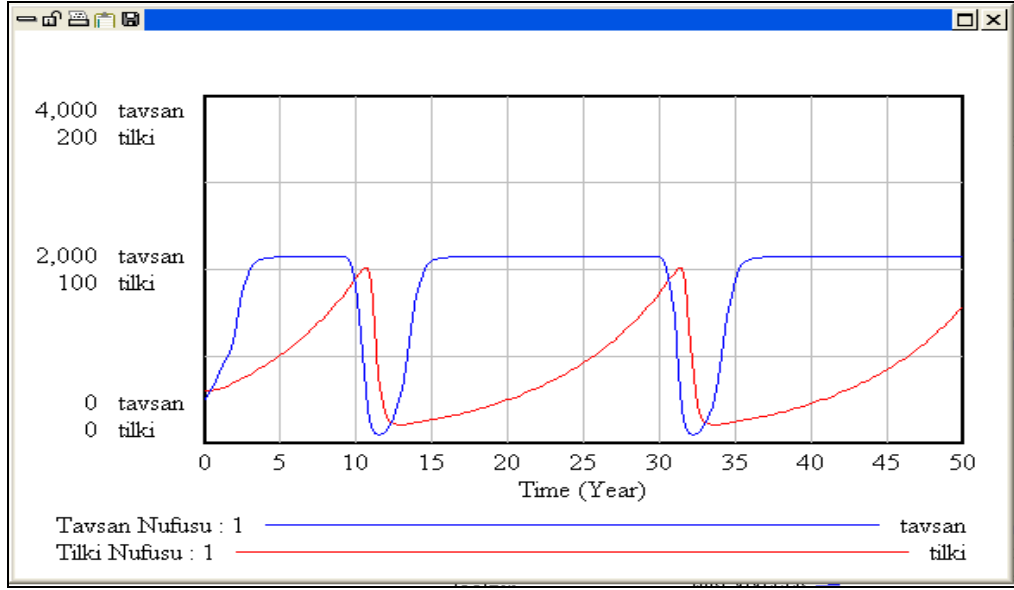


Şekil 3.22. Tavşan Nüfusunun Farklı Senaryolara Göre Değişimi

Aynı şekilde tilki nüfusundaki değişim bahsedilen üç farklı senaryo için incelenmiştir. Bir numaralı senaryo için tilki nüfusu belli bir değere kadar üssel olarak artmış ve çok kısa bir süre sonra hızla azalmıştır. İkinci senaryoda tilki nüfusu belli bir değerde salınım yapmıştır. Üçüncü senaryoda ise tilki nüfusu denge halindedir ve değişmemiştir. Şekil 3.24. de tilki nüfusunun değişimi görülmektedir.



Şekil 3.23 Tilki Nüfusunun Farklı Senaryolara Göre Değişimi

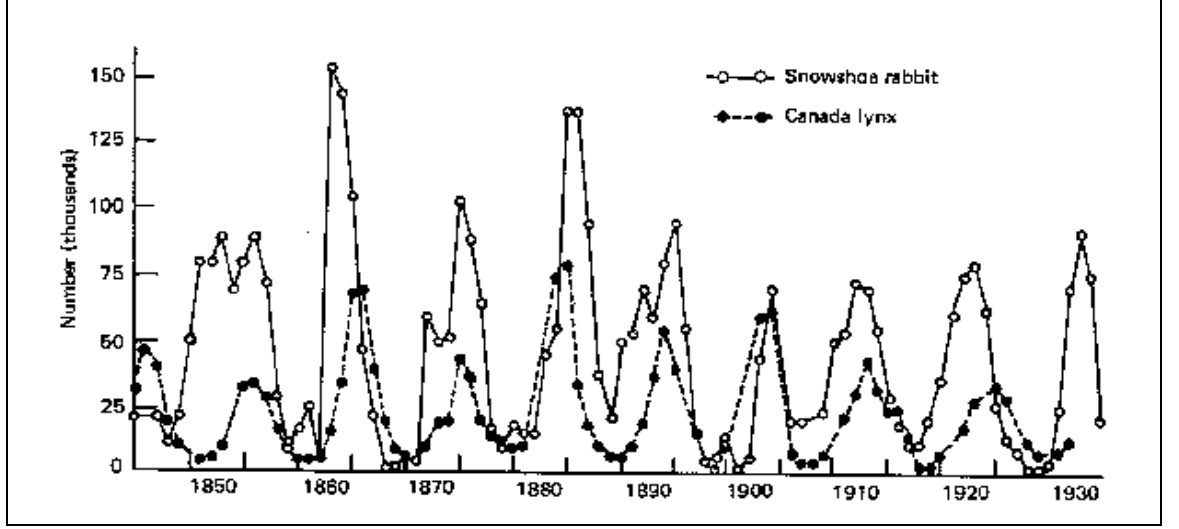


Şekil 3.24. Tavşan ve Tilki Nüfusunun Birbirine Göre Değişimi

Tilki ve tavşan nüfusunun tilki başlangıç nüfusunun 30 olarak kabul edildiği durum için birbirlerine göre değişimi Şekil 3.24. de gösterilmiştir. Mantıksal ve matematiksel Av ve avcı teorisine uygun bir değişim gözlemlenmiştir. Av sayısının artmasıyla avcı sayısı da artmıştır. Tavşan nüfusu taşıma kapasitesine ve doğum oranına bağlı olarak bir müddet sabit kalmıştır. Bir süre sonra av tüketiminin artmasıyla av sayısı ( tavşan ) azalmıştır. Tavşan sayısının artması tilki sayısını da azaltmıştır. Bu döngü av ve avcının birbirleriyle olan ilişkilerine bağlı olarak devam etmiştir.

Tavşan ve tilki ekolojisi sistem Dinamiğini anlamak için verilen iyi bir örnektir. Av ve avcı ilişkisi uzun yıllardır araştırılan bir konudur. Mantık ve matematiksel teoriye göre av sayısının çok olduğu zamanlarda avcı sayısı artar ve av nüfusunu azaltır. Av nüfusunun azalmasıyla avcılar azalır ve av nüfusu artmaya başlar. Döngü bu şekilde devam eder. Bir kürk firmasının kayıtlarından elde edilen istatistiğe göre o bölgede yaşayan kar tavşanı ve vaşak nüfusu teoriye uygun bir değişim göstermiştir. Şekil 3.25. de tavşan ve vaşak nüfusunun gözlemlenen değişimi gösterilmiştir. Görüldüğü üzere döngü 8-10 yılda bir tekrarlamıştır. Tavşan ve tilki ekolojisi modelinde elde edilen sonuca benzer bir sonuç görülür. Simülasyon sonuçları sadece gerçek sonuçlara uyumlu sonuçlar verir. Gerçek dünyadaki sonuçlar daha değişkendir. Modelde öngörülmeleyen birçok etken sonuçların farklı çıkmasına sebep olabilir. İyi oluşturulmuş bir modelden elde edilen simülasyon

sonuçları gerçek veri ile karşılaştırılır. Sonuçlar uyumlu ise farklı senaryolar ( varsayımlar) için “eğer” tipi sorulara cevap aranabilir [15].



Şekil 3.25. Vaşak ve Tavşan Nüfusu İstatistiği [15]

## 4. ÇARPIŞMA TESTİ ÖRNEĞİ

### 4.1. Giriş

Sistem Dinamiği metodu ile zamana bağlı değişen elemanların bulunduğu karmaşık sistemler modellenir. Bu sistemler dünya üzerinde bulunan çok farklı konularda olabilir. Bir tedarik zincirinin modeli, bir sağlık kuruluşunda hastaları daha az süre bekletecek bir sistemin modeli, bir su havzasının uzun vadede göstereceği değişimin modeli gibi birçok değişkene bağlı karmaşık sistemlerin Sistem Dinamiği yaklaşımı ile modellendiği görülmüştür. Çarpışma testi örneğinde ise VENSIM yazılımı ile Sistem Dinamiği kapsamında fiziksel bir sistemin modellenmesi yapılmıştır. Daha önce yapılmış olan bir çalışmanın sonuçları VENSIM Yazılımı ile elde edilmiştir.

### 4.2. Araç Güvenliği Kavramı

1990'lı yılların başlarında otomobillerde güvenlik kavramı ön plana çıkmaya başlamıştır. Yolcu emniyeti, motorlu taşıtların pazarlanmasında önemli bir özellik olmuştur. Standartlaştırılmış çarpışma testleri ile ölçülen araç kaza emniyeti kalite, stil, kullanım, yol tutuş ve yakıt ekonomisi gibi özelliklerle aynı öneme sahip olmuştur.

Enerji absorbe eden ön ve yan otomobil gövde yapıları, hava yastıkları, emniyet kemerleri ve çeşitli kaza önleyici sistemler birçok araçta standart olarak sunulan özelliklerdir. Gelecekte, güvenlik araçları yolcuları yaşına, cinsiyetine, araçtaki konumuna ve kaza şiddetine göre koruyacak “akıllı” araçlardan oluşabilir. Kazaya karşı yapısal direnç sağlayan araç emniyetine verilen önem gelecek yıllarda da müşteri istekleri, geliştirilen yasalar ve endüstrinin globalleşmesi doğrultusunda şekillenip gelişecektir [16].

Trafik kazası sırasında araç durduğu halde, aracın içindeki kişiler aracın çarpma öncesi seyrettiği hızda harekete devam ederler. Aracın tamamen

durmasından sonra, aracın içindeki kişiler kaza noktasına doğru sürüklenir; ön panele, cama ve birbirlerine çarparlar. Trafik kazalarındaki yaralanmaların bir kısmı insana çarpma etkisi ile oluşur. Diğer yandan, araçtaki kişilerin vücudu tamamen durmuş olsa bile, iç organları aynı hızda harekete devam eder ve iç organlar birbirine çarparlar, bu da yaralanmaların oluş mekanizmaları içindedir [17].

Araç güvenliğini sağlamak, dizayn kavramının tanımlanması ile başlayan, aracın geri dönüşümü ile sona eren iteratif bir süreçtir. Yolcu korunumunda sürekli gelişimi amaçlayarak tasarımcılar tarafından işletilir. İnsan faktörünün, yaralanma biyomekaniğinin ve yapısal mekaniğin çok disiplinli bilgisine dayanır. Geçmişte, güvenlik kavramı, araç çarpışma alanını ve bunun sonucu aracın ağırlığını da artırarak elde edilen nispeten düşük araç yavaşlama ivmesi sinyalleri ile ifade edilirdi. Bugünün kısa burunlu (ön uçlu) araçlarının yapılarıysa yakıt ekonomisini ve geri dönüşüm gereksinimlerini sağlamak için optimize edilmiş yapılarla dizayn ve inşa edilirler. Araçların hafif ve aynı zamanda ön, yan, arka, takla çarpışmalarına karşı yeterli kaza emniyetini sağlayacak kadar sağlam olmaları gerekir. Ayrıca tasarımcılar ikinci bir darbe sonucu oluşabilecek potansiyel yaralanmaları azaltacak yolcu kısıtlamalarını ( emniyet kemerleri, hava yastıkları vs.) sağlamalıdır [16]. Emniyet kemeri, aracın çarpması sırasında oluşan ivme azalması durumunda, vücudu sabitleştirerek ön panelden ve camdan uzak tutar. İvmenin vücudun tüm alanına yayılmasını sağlar ve kişilerin bir fırlatma nesnesi haline dönüşmesini engeller [18].

Bahsedilen tüm bu kısıtlamalar ve kısıtlanan tasarım süreçleri güvenlik mühendislerini geleneksel düşünce tarzlarını değiştirmeye zorlamıştır. Bunun sonucu olarak araç emniyetini ölçmeye yarayan, prototip testine bağlı olan, mevcut test metodları artık ihtiyacı karşılamaz hale gelmiştir. Bunun için günümüzde, yüzlerce dizayn seçeneğini değerlendirebilmek için güvenlik mühendisleri en az sayıda prototip testi ile birleştirilmiş alternatif analitik araçları geliştirirler ve kullanırlar. Bir kaza anında yolcu güvenliğini garanti etmek için hemen hemen tüm araç üreticileri farklı seviyelerde analitik araçlar kullanırlar. Bu amaca hizmet eden simülasyon araçları ile oluşturulan modeller mühendislere prototip testinden önce kazanın sonuçları hakkında öngörü sağlarlar.

### 4.2.1 Motorlu Araç Güvenliği

Geçen yüzyıl boyunca yolcu güvenliği tüm kara araçları için önemli bir tasarım hedefi haline gelmiştir. Otomotiv güvenliğinin gelişimi üç ayrı döneme ayrılabilir.

1900–1935 yılları karmaşık araç çarpışma sürecinin anlaşılmasının doğumu, büyümesi ve gelişimi dönemidir. Araç çarpışması, araç için normal olmayan çalışma şartları oluşturan koşulların sonucudur. Başka bir araçla veya sabit bir cisimle meydana gelen çarpışma aracı kuvvetlere ve deformasyonlara maruz bırakır. Eğer yer alan kuvvetler araç yapısının enerji absorbe etme kapasitesini aşarsa yolcular yaralanabilirler veya ölebilirler. Bu ilk dönemde; lastik patlamalarının azaltılması, motorların motor krankı yerine kendiliğinden çalışabilir hale getirilmesi, farların geliştirilmesi, katmanlı cam kullanılması ve yolcuların daha iyi korunması için tamamı çelik gövde yapısı kullanılması gibi gelişmeler görülmüştür. 1930’da ilk tam ölçülü bariyer çarpışma ve devrilme testleri yapılmıştır [16].

1936–1965 arası ikinci dönem orta seviye güvenlik dönemidir. Bu dönemin başlarında birçok otomobil üreticisi; firma dönüş sinyalleri, gelişmiş önfarlar, çift öncam sileceği, gösterge panosuna başın çarpmasını simüle eden bir test, içeri göçmeye dirençli öncam gibi kaza önleyici araçlar sunmuştur. İlk araç-bariyer ön çarpışma testi, aracın bir duvara fırlatılması yolu ile bu dönemde yapılmıştır. Bu dönemde ne mankenler ne de elektronik aletler kullanılmıştır. Araçların yapısal kaza performansı çarpmış aracın gözlemlenmesine göre belirlenmiştir. Bu dönemin en önemli güvenlik aleti emniyet kemerlerinin bir seçenek olarak sunulması olmuştur [16].

Üçüncü dönem ise araçların belli standartlarda üretilmesinin resmiyet kazanması ile başlamıştır. Bu standartlar kaza emniyeti ve çarpışma önleyici önlemlerin performansı düzenlenmiş ve otoyolların gelişmesi ve araç sürücülerinin eğitiminin artması ile beraber kazaların azalmasında önemli bir rol oynamışlardır. Türkiye’de otomobillerde emniyet kemeri ve çocuklar için sabitleyici sistemlerin kullanılmasını teşvik etmek ve denetlemek, güvenlik donanımı kullanımına ilişkin

mevzuatı güçlendirmek ve otomobillerde zorunlu sabitleyici sistemlerin kullanılmasını öngören kuralları sıkı bir şekilde uygulamak belirlenen stratejilerdir [19].

Trafik kazalarına yönelik birincil korumada riskli olan çevre etmenlerinin elimine edilmesi ve kişilerin güvenli davranmaları amaçlanmaktadır. Trafik kazası yaralanmalarının ikincil korumasında emniyet kemeri gibi kişisel koruyucuların kullanılması amaçlanmaktadır. Üçüncül koruma ise tedavi ve rehabilitasyon hizmetlerini kapsamaktadır [20].

Günümüzde, taşıtlarda güvenliği artırma çabaları kaza emniyeti, kaza önleme, sürücü performansı ve otoyol inşaatı üzerine odaklanmıştır. Geçen zaman içinde otomobil üreticileri sürücünün kazadan kaçınması için ABS, çekiş kontrol sistemi gibi birçok özelliği araçlara eklemişlerdir. Ayrıca araçlar stratejik noktalara yerleştirilmiş enerji absorbe edici parçalarla çevrilmiş rijit çelikten yolcu hücreleri, yolcuları kaza anında kontrolsüz hareketlerini engelleyen hava yastıkları, üç noktalı emniyet kemerleri gibi kaza emniyeti unsurlarını içeren hale gelmişlerdir [16].

#### **4.2.2. Otomobil Yapısı**

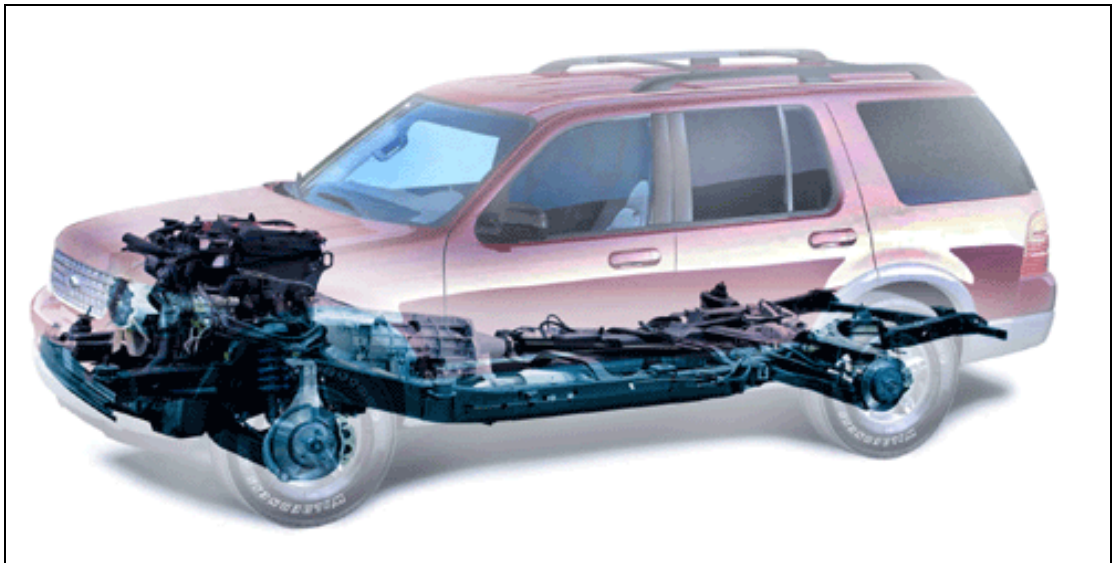
Güvenlik mühendisleri, otomobili ömür döngüsü boyunca karşılaşılabileceği statik ve dinamik yüklere dayanabilecek şekilde tasarlarlar ve üretirler. Dış şekiller düşük aerodinamik sürtünme sağlar. İç ortam yolcuların konforlu bir şekilde yerleşebilmesine olanak sağlar. Süspansiyonla beraber araç gövdesi yol titreşimlerini ve aerodinamik gürültüyü minimum seviyeye tutacak şekilde tasarlanırlar. Bunlarla beraber araç yapısı ölümcül olmayan kazalarda rijit yapısını devam ettirebilecek ve yeterli korumayı sağlayacak özellikleri taşıyan bir tasarım olmalıdır [16].

Modern otomobillerin çoğunda, eskinin sert ve kalın şasi çerçevelerinin yerini, tek kabuk ya da blok halindeki kafes biçimli hafif yapılar almıştır. Katı şasilere sahip taşıtlarla karşılaşılan bir çarpmada, açığa çıkan enerji (darbenin şoku) yutulmuyor, neredeyse olduğu gibi yolculara aktarılıyordu. Bu işe, aracın fazla hasar görmesini önüyor ancak, sürücü ve yolcuların savrulmalarına, aracın çeşitli

kısımlarına çarparak ezilmelerine sebep oluyordu. Modern otomobillerde gövdenin bir bölümü yolcu koruyucu kafes biçiminde, geri kalan bölümleri İse, kaza anında ezilebilecek yapıdadır. Bu bölümler, kaza anında ortaya çıkabilecek enerjinin büyük bir bölümünü yutar ve kalan enerjiyi de yolculara zarar vermeyecek doğrultulara yönlendirir. Mevcut binek araç ve kamyonet gövdeleri Şasi Üstü Gövde yapısı ve Unit-Body yapısı olmak üzere iki tipten oluşur [21].

Binek veya spor bir aracın şasi üstü gövde yapısı; araç gövdesi, şasi ve ön kaputtan oluşur. Araç gövdesi burulmaya ve eğilmeye karşı aracın rijtliğinin çoğunu sağlar. Aynı zamanda kaza anında yolcuların yaralanmasını engelleyen özel tasarlanmış bir hücre oluşturur. Şasi çerçevesi; motoru, transmisyonu, güç üretim ve aktarım elemanlarını, süspansiyon ve aksesuarlarını taşır. Önden çarpmalarda ön sac parçalar ve şasi, çarpışma enerjisinin çoğunu plastik şekil değiştirerek absobe ederler. Araç gövdesi şasiye yüksek frekanslı titreşimleri izole eden şok emici gövde bağlantı noktalarından bağlıdır. Şekil 4.1. de bu şekilde şasi üstü gövde yapısına sahip bir araç görölmektedir.

Unit-body yapılar binek araçların çoğunda kullanılır. Bu araçlar gövde, şasi ve ön sac metalin tek bir birim halinde spot kaynakla veya başka bağlama usulleri ile bir araya getirilmesi ile oluşturulur. Unit-body araç yapısı,aracın rijitliğini artırırken araç ağırlığını düşürür [22].



Şekil 4.1. Şasi Üstü Gövde Araç Yapısı



Şekil 4.2. Unit -Body Araç Yapısı

#### 4.2.3. Malzemeler

Otomotiv sanayinde inovatif malzeme gelişmeleri polimelerde, alüminyum alaşımlarında ve yüksek dayançlı asilçeliklerde gerçekleşmiştir [23]. Çelik, araç kullanımında en çok kullanılan malzemedir. İyi işlenebilirlik, korozyon direnci ve geri dönüşülebilirlik, gövde yapısı malzemelerinden beklenen temel özelliklerdir. Gövde malzemeleri yeterli dayanıma ve yük altında çarpışma enerjisini emmek için kontrollü bir şekil değiştirmeye sahip olmalıdırlar. Böylelikle bir kaza anında yeterli bir yaşam alanı sağlanarak yolcuların korunumu sağlanır. Ayrıca yakıt tüketimini azaltmak için yapı hafif olmalıdır. Bu yüzden seri üretim araçların çoğu yüksek dayanımlı çelik sacdan üretilirler. Kompozit malzemeler ve alüminyum bazı özel üretimlerde kullanılırlar[16].

#### 4.2.4. Çarpışma Emniyeti

Araç yapılarının oluşturulmasında göz önüne alınan ilk şart yaralanmalara sebep olan çarpışma enerjisini minimum düzeyde yolculara aktarmaktır. Yolcu kompartmanının dışında enerjiyi absorbe eden ezilme alanları oluşturularak yolcu kompartmanına uygun bir yavaşlama ivmesi sağlanır [24].

Çarpışma emniyeti, bir otomobil yapısının ve tüm elemanlarının, meydana gelmesi durumunda yaşama ihtimali olan bir çarpışmaya karşı yolcuları koruma performansının ölçөгüdür. Otomotiv endüstrisinde bu kavram biraz daha farklıdır. Kaza emniyeti, makul yavaşlama ivmeleri içeren çarpışmalarda aracın yapısının plastik deformasyona uğradığı halde yolculara yaşam boşluğu sağlama kapasitesi olarak ifade edilir. Yolcuların çarpışma esnasında hareketlerini sınırlayan sistemler, yaralanmaların ve ölümlerin azalmasında ek koruma sağlarlar. Günümüzde çarpışma emniyeti ölçümü bazı testlerin ve analitik metotların birleşimi ile belirlenir [16].

Çarpışma emniyeti ve yolcu güvenliği tasarım şartlarından en önemlileri olarak otomotiv endüstrisinde yer alırlar. İlk zamanlarda minimum plastik deformasyon için araçlar ahşaptan üretilmişlerdir. Zaman ilerledikçe gövde yapısı gelişmiş ve bünyesinde çarpışmanın kinetik enerjisini plastik deformasyonla emecek kademeli çarpışma bölgeleri içermiştir. Günümüzde ise, araç gövdeleri çeşitli birleştirme metotlarıyla bir araya getirilmiş yüksek dayanımlı çelik saçlardan imal edilirler. Tasarımcılar, yolcu kompartımanın çarpışmada bütünlüğünü koruyarak ve aynı zamanda çarpışma yavaşlama ivmesinin değerini insanlar için zararlı sınır değerinin üst tolerans limitinin altında tutarak yolcuların korunmasını sağlayan araçlar tasarlarlar. Kısa sürede en yüksek değerine ulaşan ve zamanla kademeli olarak azalan yavaşlama ivmesi hareketi sınırlandırılmış yolcu ( emniyet kemeri, hava yastığı vs...) korunumu için daha faydalıdır. Bu yüzden çarpışma emniyetinin hedefi; kontrollü araç deformasyonu ile çarpışma enerjisini absorbe eden, aynı zamanda çarpışma yüklerin yolculara iletimini minimuma indirmek için deformasyondan arta kalan enerjinin yolcu koruma sistemleri tarafından kontrol edilebilmesine izin veren yeterli boşluğu sağlayan araç yapılarıdır.

Gerçek çarpışmalar özgündür. Araç bir ağaca, duvara veya kendisiyle benzer veya farklı ağırlığa, sağlamlığa sahip bir nesneye çarpabilir. Çarpışmalar güvenlik uzmanları tarafından genellikle önden, yandan, arkadan çarpışma ve devrilme olarak sınıflandırılırlar. Bunun ötesinde araç tek veya birden çok darbeye maruz kalabilir. Çarpışmalar değişik hızlarda, bir aracın ağaca çarpmasındaki gibi saniyeden az sürelerde veya devrilme ve taklalarda olduğu gibi bir veya iki saniyede meydana gelebilirler. Tüm bu faktörler çarpışma emniyetini tüm çarpışma senaryolarına göre sağlayan araç yapılarının tasarımlarındaki zorluğu ortaya koyar. Kazaların tekrar

oluşturulması ve motorlu araçların çarpışmalarının analiz edilmesi, trafikte yer alan aracın güvenlik performansı hakkında önemli bilgiler sağlarlar. Bu metotlar yavaşlama ivmesi, yolcu kinematiği ve yolcu yükleri gibi gerekli sayısal bilgileri sağlamazlar. Bu yüzden tasarım mühendisleri standart laboratuvar testlerinin, saha deneylerinin ve analizlerin birleşimine dayanarak hareket ederler [16].

Araç yapısı normal bir sürüş ve yol tutuş için eğilmeye ve burulmaya karşı yeterince dayanıklı olmalıdır. Rahatsızlığa sebep olan yüksek frekanslı titreşimleri en aza indirmelidir. Değişik cinsiyetteki, yaştaki, boyuttaki yolcular ve çarpma hızı için aşağıda verilen gereklilikleri sağlayacak yavaşlama ivmesini üretebilen bir araç yapısı sağlanmalıdır.

- Özellikle ağaçlar gibi dar nesnelere çarpmada ortaya çıkan çarpışma kinetik enerjisini plastik deformasyona uğrayarak absorbe edebilen, şekil değiştirebilen ve sağlam olan buruşma bölgesi ön yapı. Estetik kaygılarla zorlanan kısa burunlu araç tasarımı çarpışma emniyeti mühendislerine zorluk çıkarır.
- Arka yolcu kompartımanının bütünlüğünü sağlayan yakıt tankını koruyan şekil değiştirebilen arka yapı.
- Yandan çarpmalarda çarpma yüklerine karşı kapıları açılmaktan korumak ve yan göçmeleri en aza indirmek için iyi tasarlanmış yan yapılar.
- Devrilmelere karşı güçlü tavan yapısı
- Yolcuları farklı iç mekânlarda ve dekorda koruyacak araç yapısı ile uyum içinde çalışan yolcu koruma sistemleri.
- Güç nakil organları pozisyonları ve sürüş konfirügasyonları (  $4 \times 4$  veya  $4 \times 2$  ) için çeşitli şasi dizaynlarını barındırmalıdır.

Çarpışma emniyeti mühendislerinin işleri tipik yapısal analizcilerinkilerle karşılaştırılırsa kendine özgüdür denebilir. Normal tasarımcılar yapıları elastik analiz kullanarak işletme yükleri karşısında akma veya kopma olmayacak şekilde tasarlarlar. Otomobil yapıları ise bahsedilen işletme yüklerini karşılamalıdır ve buna ek olarak milisaniyelerle ifade edilen bir sürede çarpışma enerjisini absorbe edebilmek için plastik şekil değiştirmelidirler. Hafif ve ekonomik olarak seri üretime uygun olmalıdırlar. Sürüş ve yol tutuş için yapısal rijitlikleri ayarlanmalıdır. Gürültü ve titreşim yoldaki diğer araçlarla uyumlu olmalıdır.

Otomotiv güvenlik mühendislerinin birincil hedefi yolcu güvenliğini sağlamaktır. Mühendisler yolcuları korumaktan sorumludurlar. Böylece yolculara iletilen herhangi bir yavaşlama ivmesi değeri, yolcu koruma sistemleri tarafından insan için kritik değerin tolerans aralığında tutulabilir. Tasarımcılar bu hedefi kaza önleyici ve çarpışma emniyeti ölçülerinin birleşimi ile sağlarlar [16].

Otomotiv endüstrisinin gelişimi ile beraber araç tasarım kriterleri güvenlik düzenlemeleri, yakıt ekonomisi, üretim maliyeti ve tasarım süresi gibi isteklerin karşılanabilmesi için çok hızlı bir şekilde artmıştır. Tüm bu gereksinimler, çarpışma emniyeti değerlendirmesi için, gerekli malzemelerin basit mukavemet hesaplarının çok ötesinde matematiksel araçların gelişimini sağlamışlardır. Bu günlerde güçlü bir yöntemler kombinasyonu çarpışma emniyetinin değerlendirilmesinde kullanılır. Bu araçlar basit birkaç serbestlik dereceli toplu-parametre modellerinden ayrıntılı milyonlarca serbestlik dereceli sonlu elemanlar modellerine kadar çeşitlendirilebilirler.

#### **4.2.5 Çarpışma Emniyeti Testleri**

Araçlara çarpışma testleri uygulanması, yeni bir araç için yolcu koruması seviyesinin belirlenmesinde kullanılan bir metottur [25]. Araç parçalarından ve aracın tümüne kadar araç yapılarının çarpma emniyeti simülasyonlarından elde edilen tüm ilerlemelere, sayısal mekanikte en son teknikleri ve süper bilgisayarları kullanmaya rağmen çarpma emniyetinin en son değerlendirilmesi hala laboratuvar testlerine dayanır. Özellikle araç sertifikalandırılmasında bu geçerlidir.

Üç test kategorisi vardır: Komponent Testi, Kızak Testi ve Tam Ölçekli Bariyer Çarpışması. Testlerin karmaşıklığı ve değişkenler komponent testinden tam ölçek testlere geçildikçe artar. Komponent testleri, izole edilmiş komponentin yüklenmesi karşısında dinamik ve/veya quasi-statik cevabını belirlerler. Komponent testleri çarpışma modunu ve enerji absorbe etme kapasitesinin belirlenmesinde çok önemlidir. Performanslarının anlaşılması prototip taban ve matematik model oluşturmada gereklidir [16].

Kızak testinde mühendisler yolcu kompartımanı iç aksesuarlarının tamamıyla veya yolcu koltukları, ön panel, direksiyon simidi, emniyet kemerleri, hava yastıkları gibi iç aksesuarların birkaçıyla temsil eden bir araç yapay ortamı kullanırlar. İnsan yerine geçen mankenler (dummy) veya kadavralar yolcuları veya şoförü canlandırmak için koltuklara yerleştirilirler ve yolcuların yandan veya önden çarpışmaya karşı gösterdikleri tepkiyi değerlendirebilmek için aracın çarpışma esnasındaki yavaşlama ivmesine benzer ivmede dinamik yüklere maruz bırakılırlar [26]. Kızak testinin birincil amacı yolcu koruma sistemlerinin değerlendirilmesidir. Mankenin kinematiğinin yüksek hızlı fotoğraflanması ile değerlendirme yapılır. Ayrıca yolcu koruma aksesuarlarına ve mankenlere yerleştirilen çeşitli sensörlerle belirlenen kuvvet ve momentler, çarpışma şiddetinin ve yolcu koruma sistemlerinin yolculara iletilen yükleri azaltmasındaki verimliliğinin belirlenmesinde yardımcı olurlar [16]. Şekil 4.3. de kızak testi ortamı görülmektedir.



Şekil 4.3. Kızak Testi

Bariyer çarpışma testi, önceden belirlenmiş bir başlangıç hızına ve açısına sahip yönlendirilmiş bir aracın bariyere çarptırılmasıdır. Genellikle bariyer testlerinde aracın tamamı kullanılır. Aracın yapısal sağlamlığından emin olmak ve yasal standartları sağlamak için bariyer testleri yapılırlar. Çok sayıda yük hücreleri, ivmeölçerlerle tamamen donatılmış araç ve aynı şekilde donatılmış sürücü ve yolcu koltuklarına yerleştirilmiş mankenler ( dummies ) 0 derece, 30 derece ve eksi 30 derece açılarla 13.4 m/s ilk hızla rijit bariyere çarptırılırlar. Mnakenler emniyet kemeri bağlı veya açık halde olabilirler. Bariyer de aynı şekilde darbe kuvvetinin zamana bağlı değişimini kaydetmek için yük hücreleri ile donatılmıştır. Verilen bu şartlar A.B.D.' de geçerli olan bir motorlu araç güvenlik standardıdır. Bu standardın sağlanması için herhangi bir şekilde bağlanmamış, serbest halde koltuklara oturtulmuş bulunan sürücü ve ön yolcu mankenlerinden elde edilen yaralanma değerleri insanların baş, göğüs ve bacaklarından yaralanma eşik değerlerinden az olmalıdırlar [27].

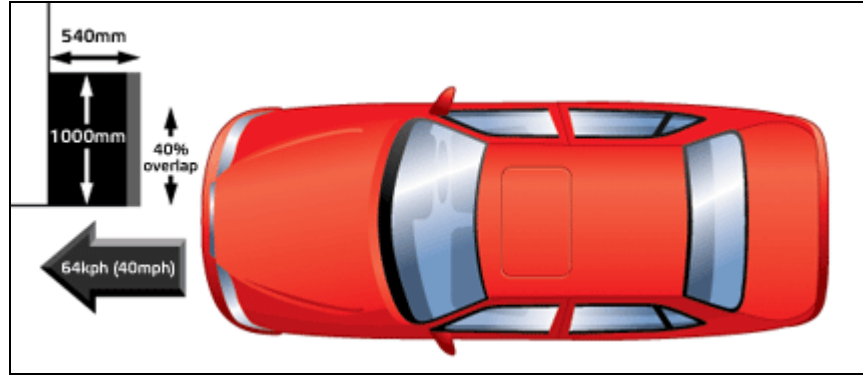
Bunlara ek olarak manken performansı saatte 35 mil çarpışma hızına göre de değerlendirilir. Bu test NCAP (New Car Assessment Program) testi olarak da bilinir. NCAP testinde manken üç noktalı kemer sistemi ve ek olarak hava yastığı ile tutulur. Aracın rijit bir bariyere çarpması, yapıyı yüksek yavaşlama ivmelerine maruz bırakarak koruma sistemlerinin verimliliğinin değerlendirilmesinde bir metot sağlar. Şekil 4.4. de bariyer testi görülmektedir [16].



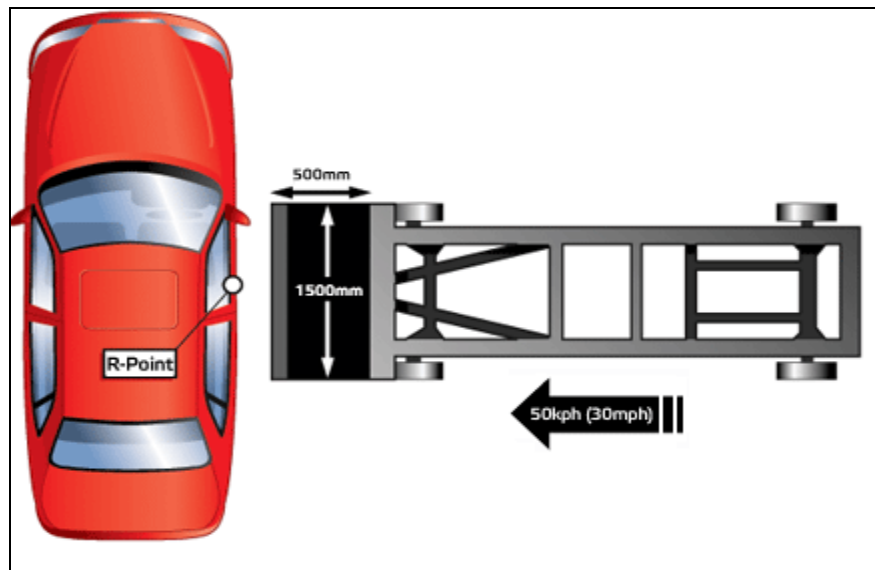
Şekil 4.4. Bariyer Testi

Son yıllarda kullanılmaya başlayan bir test de aracın ön cephesinin, deforme olabilir veya rijit bir bariyere % 40 veya %50 oranında örtüşecek şekilde bir çarpışma sağlanarak yapılan testtir. Bu tip teste aracın ön yapısı daha çok deformasyona maruz kalır ve nispeten daha az yavaşlama ivmesi görülür. Şekil 4.5. de önden offset darbe testi görülmektedir [27].

Güvenlik uzmanları benzer tam ölçekli testleri yan darbeler için de kullanırlar. Deforme olabilen, belli bir ağırlığı ve rijitliği olan bir bariyer sağ veya sol yandan saatte 50 km hızla dik açıyla çarpıtılır. Bu testte şoför ve arka bebek koltuğunda yer alan bebek mankenleri kullanılır. Şekil 4.6. da yandan çarpışma testi görülmektedir [28].

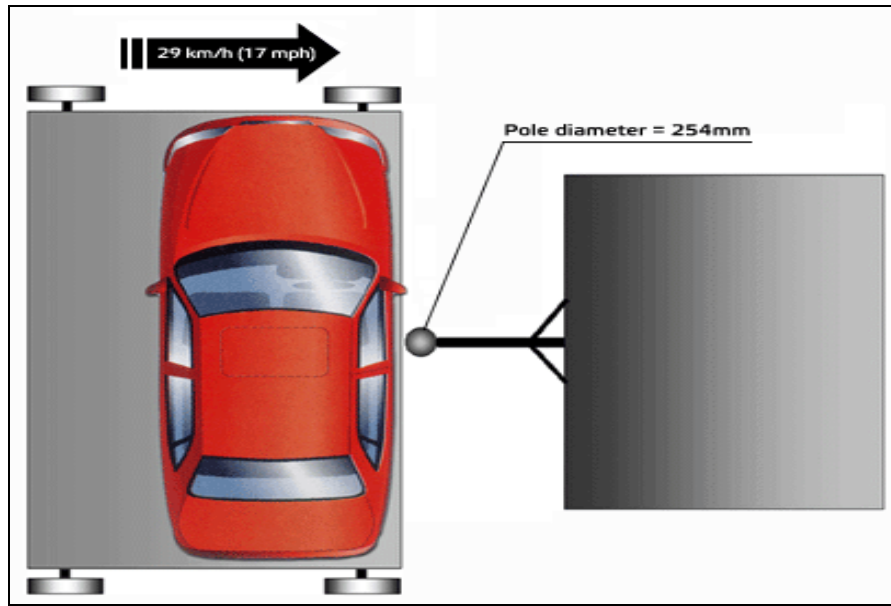


Şekil 4.5. Önden Offset Çarpışma Testi



Şekil 4.6. Yandan Çarpışma Testi

Direk testi, aracın savrularak yandan dar yapıda rijit bir cisme çarptırılarak yapıldığı testtir. Saatte 29 km hızla araç cisme çarptırılır. Bu testin amacı bu tür çarpmalarda çarpmanın olduğu noktadaki yolcunun kafasının ne kadar korunduğunun değerlendirilmesidir. Bu testlerin uygulandığı araçlarda kafa koruma yan hava yastıkları vardır. Hava yastıksız bir bu şekilde bir çarpışmada başa alınacak darbe ölümcül olabilir. Kullanılan hava yastıkları yolcunun başını darbeden korur ve başın açılan boşluktan çıkmasını engeller. Şekil 4.6. da direk yan çarpışma testinin meydana gelişi gösterilmiştir. Şekil 4.7. de ise direk testi çarpışma anı görülmektedir.



Şekil 4.7. Direk Testi



Şekil 4.8. Direk Testi Çarpışma Anı

Bunlara ek olarak arkadan çarpışma testleri deforme olabilen bir bariyerle yakıt tankının sağlamlığını değerlendirmek için uygulanır. Ayrıca aracın tavanının mukavemetini değerlendirmek için hemen hemen statik bir yük araç tavanına uygulanarak yüklenen yük için deformasyonun belli bir değeri aşmamasından emin olunur [16].

Uygulanan tüm bu testler hem zaman alır hem de yüksek maliyetlidir. Özellikle otomotiv endüstrisinin ilk zamanları göz önüne alınırsa yalnızca prototiplerle yapılan testler çok yüksek maliyet getirmiştir. Üreticiler resmi standartları sağlamak için, bir model için 100 den fazla prototipi harcayabilirler. Onlarca yıldır mühendisler çarpışma olayını matematik modelleriyle simüle edilmesinin altını çizmişlerdir. Tutarlı ve sağlam, modern sayısal mekanik ve bilgisayar donanımlarını kullanan analitik araçlar, çarpışma simülasyonları için bir gereklilik olmuşlardır [16]. Kaza analizi hakkında yeni yöntemlerin kullanılması kazalarla ilgili daha çok bilgi edinilmesine yardım etmiştir [29].

Gün geçtikçe artan güvenlik taleplerini, özellikle hava yastıkları ile ilgili olanları karşılamak için araç tasarımları testlerin ve matematik modellemenin birbirini karşılayıcı karışımına doğru gelişmiştir. Beklenen performans ve dizayn aşaması yapılacak olan testin tipini ve karmaşıklığını belirlerler. Çarpışma emniyeti, bir testten ve bir bilgisayar simülasyonundan hangisi ile belirlenirse belirlensin, esas olan gerçek kaza şartlarında insan yaralanmasının potansiyelini belirlemektir. Ne yazık ki gerçek kazaların her biri kendine özgüdür. Gerçek kaza koşullarını bire bir üretmeye çalışmak, son derece zaman alan ve pahalı bir iştir. Bu yüzden mühendisler insan hayatı korumada ve yaralanmaları azaltma amacına uygun kaza biçimlerini seçerek kullanırlar.

### **4.3. Çarpışma Simülasyonu Modelleri**

Araç tasarımını etkileyen, stil ve güvenlik şartları olmuştur. Son tasarım, yapılan testlerle yönlendirilmiş, malzemelerin basit lineer dayanımını ölçen metotlarla desteklenmiş uzun bir sürecin ürünü olmuştur. Bilgisayar donanımında ve yazılımında görülen gelişmelerle birçok analitik dizayn yolları gelişmiştir. Bu

gelişmeler mühendislere, çarpışma emniyeti, sessiz sürüş ve güvenilirlik alanlarında ki müşteri taleplerini karşılayabilecek modern araç tasarımlarını oluşturmak için gerekli çeşitli araçlar sunmuşlardır. Bu araçlar basit yay – kütle modellerini, kiriş elemanı modelini, hibrid modellerini ve sonlu elemanlar modellerini içerirler.

Karmaşıklık açısından bu araçlar çeşitlilik gösterse de her biri kütle, momentum ve enerji dönüşümlerini gerektiren yapısal mekanik prensiplerine dayanırlar. Kullanılacak olan analiz aracı mevcut dizayn aşamasına ve mevcut olan işe bağlıdır. Örneğin, basit kiriş modeli konseptin başlangıcında bölümün geometrisini, ebadını ve kalınlığını belirlemede uygun olabilirken prototip tamamlanmışken aracın tam ölçek sonlu elemanlar analizi daha uygun olabilir. Araç gövdesinin deformasyonunun modellenmesi, çarpışma analizlerinde absorbe edilen enerjinin belirlenmesinde önemli rol oynar [29].

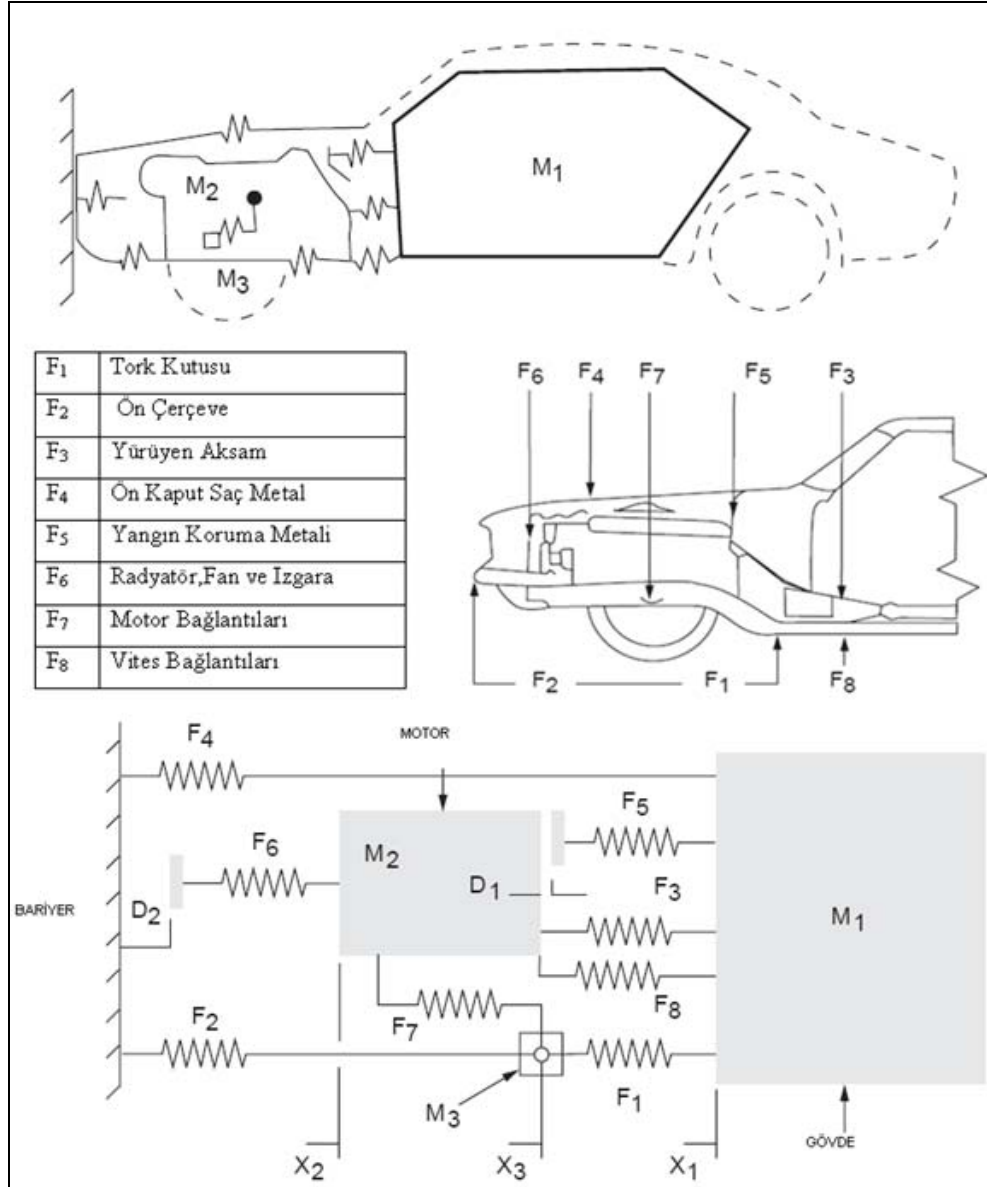
#### **4.3.1. Yay – Kütle Modeli**

Çarpışma emniyeti dizayn işleminin birincil hedefi testte kullanılan mankenlerin çarpışma tepkilerinin kabul edilen yaralanma risk değerlerinden düşük olmasını sağlamaktır. Aracın rijit bir bariyere önden çarpması ile elde edilen çarpışma sinyali tasarım aşaması için başlıca gerekli unsurdur. Yolcu modellerine girdi olarak kullanılır. Tasarım işlemi, kütle – yay modelleri veya sonlu elemanlar modellerinden hesaplanan çarpışma sinyaline bağlıdır[16].

Hem kütle-yay modelinde hem de sonlu elemanlar metodu modelinde, çarpışma performansı için aracın uç ön yapılarını tasarlamak iki ana işlem gerektirir. Birincisi araç gövde yapısı, ön yolcuların önünde bulunan güç aktarım araçları gibi önemli bileşenleri tasarlamaktır. İkincisi işlem ise yolcu mankeni, yolcu koruma sistemleri ve aracın iç yüzeyleri gibi yolcuların ortamının tasarımı ile ilgilidir. Araç ön yapısının, önemli bileşenlerin ve kütlelerin modellenmesi, bu parçaların bir bariyer ile çarpışma sırasında ezilmesini ve hareketini simüle eder. Aracın çarpışma simülasyonunun çıktısı aracın B sütunu yanı marşpiyeldeki ivmenin zamana karşı değişimi göstergesidir. Bu ivme –zaman kaydı aynı zamanda çarpışma sinyali olarak da adlandırılır. Yolcu ortamı ve yolcu mankeninin modellenmesi ise öngörülen,

ölçülen veya kabul edilen çarpışma sinyalini girdi olarak kullanır. Simülasyon çıktısı ise, yaralanma kriterleri ile karşılaştırılan yolcu mankeninin cevabıdır. Bu iki modelin aşamalarını birleştiren arayüz ortak çarpışma sinyalidir.

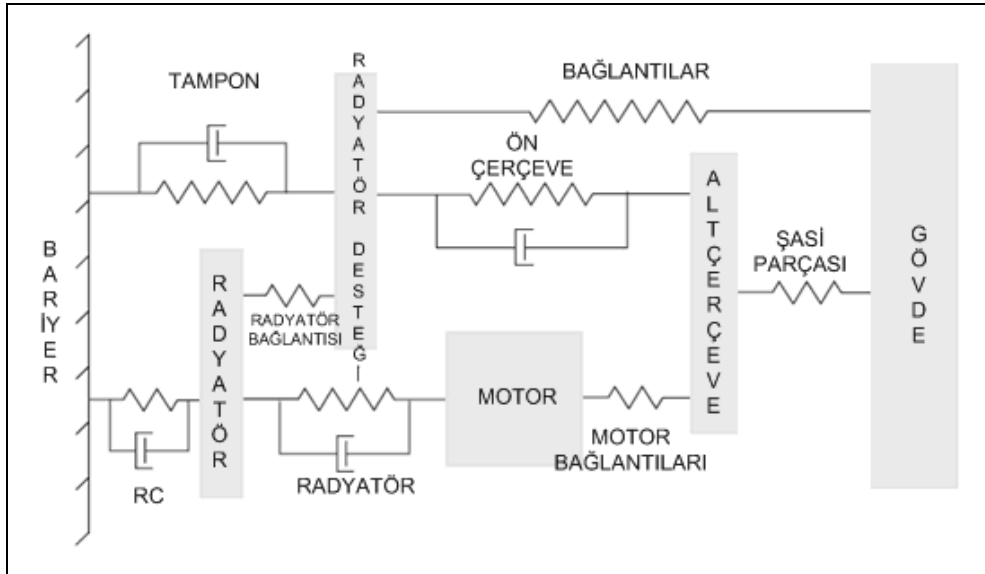
Şekil 4.9. da 1970lerde ilk geliştirilen önden rijit bariyere çarpan bir aracın ön yapısının simülasyon modeli görülmektedir.



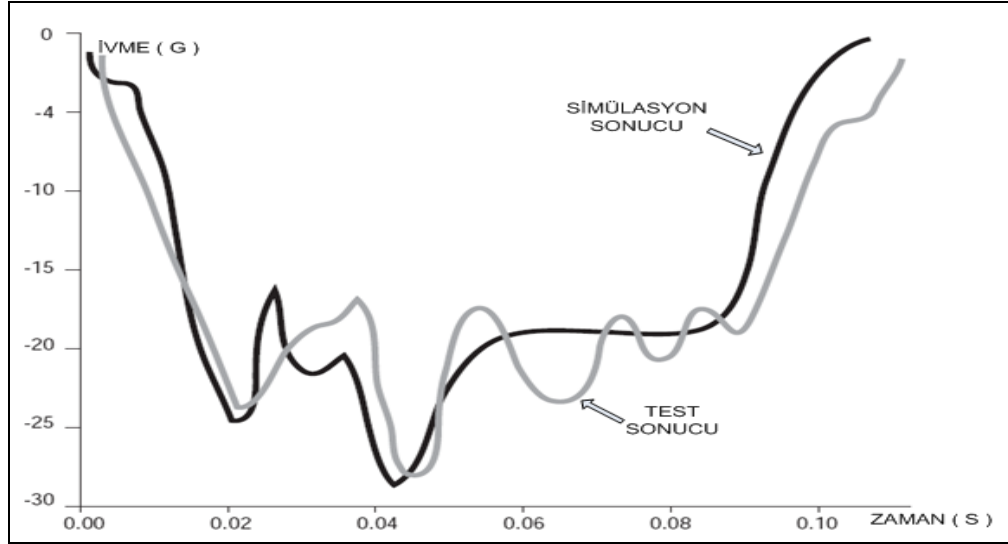
Aracın önden çarpmalardaki çarpışma emniyetinin simüle edilmesinde kullanılan Yay-Kütle Modellemesi nispeten basit ve güçlü bir metottur. Bu model çarpışma mühendisleri tarafından kolaylığı ve tutarlılığı yüzünden çokça kullanılır.

Bu modellemede, ön darbenin çarpışma karakteristikleri modellemesinde kabul edilebilen bir sadeleştirme ile araç tek boyutlu yay-kütle sistemine benzetilir. Çarpışma olayının basitçe ifade edilmesi yüzünden yay-kütle modeli, yapısal çarpışma emniyetini iyi bilen ve anlayan, model parametrelerini üretmede ve çıktıları tasarım bilgilerine dönüştürmede önemli ölçüde deneyime sahip kullanıcılar gerektirir. Modelde görülen yay parametreleri deneysel olarak elde edilmişlerdir.

Yay-kütle modellerinin çeşitli tipleri ön, yan ve arka çarpışmaların simülasyonunda başarılı bir şekilde kullanılmışlardır. Şekil 4.9. da saatte 35 mil hızla rijit bariyere çarpan aracın Yay-Kütle modeli gösterilmiştir. Modelin yapılandırılması, uygun kütle ve yayları ve bunların çökme modlarını belirleyen gerçek bir bariyer testi çalışmasından elde edilir. Çarpışma olaylarının zamanlamasında test sonuçları ile en iyi uyumu sağlamak için “yayların” yük-sehim karakteristikleri belirlenerek model ayarlanır.



Şekil 4.10. Önden Çarpışma Simülasyon Modeli [16]



Şekil 4.11. Test ve Simülasyon Sonuçları Karşılaştırması [16]

Şekil 4.11. de test sonuçları ve simülasyon sonuçlarının karşılaştırılması görülmektedir. Görüldüğü üzere birbirine çok yakın sonuç elde edilmiştir.

Yay-Kütle modellerinin çarpışmaya karşı dayanımlı araç yapılarının geliştirilmesinde kullanışlı oldukları kanıtlanmıştır. Modeller, çarpışma için yapısal geliştirme veya araç türevlerinin geliştirilmesi gibi yapısal olarak benzer çarpışma enerjisi yönetim sistemleri geliştirmede tasarımcıya olanak sağlarlar. Ayrıca modeller, araç ve güç aktarım sistemlerinin kinematiğinin incelenmesinde olanak sağlarlar. Bunun dışında, yapısal bileşenlerin görevlerinin belirlenmesinde rehberlik yaparlar.

Modelin basit oluşu, çabuk hazırlanabilirliği, parametrik çalışmalar gibi özelliklerinden ötürü araç tasarımının ön evrelerinde Yay-Kütle modelleri kullanılabilirler. Ancak yeni yapısal konseptlerde, tasarıma yardımcı olan modellere bir kısıtlama vardır. Yay karakteristiği bilgisine ihtiyaç duyarlar. Bu bilgi deneysel olarak belirlenir, var olan datadan veya sonlu elemanlar veya benzeri modellerden elde edilir.

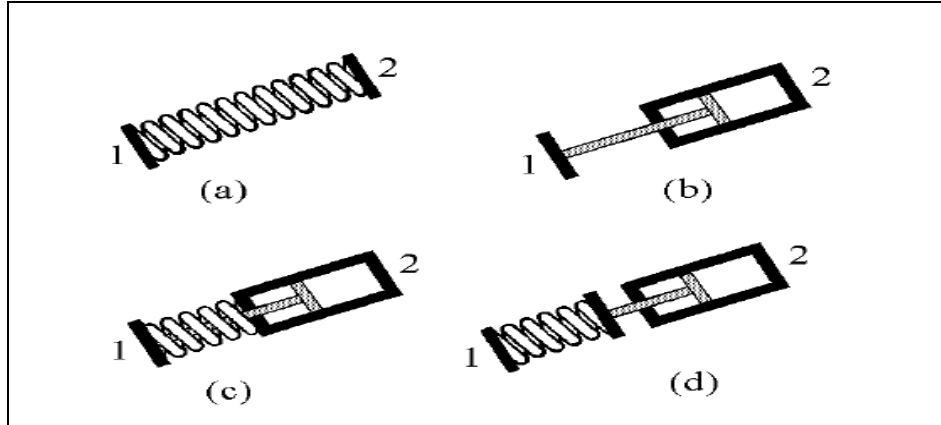
Bunlara ek olarak Yay-Kütle modelleri tek boyutludur. Artan tasarım gereksinimlerini ile tek boyutlu modeller tam olarak karşılayamazlar. İki veya üç

boyutlu modeller araç çarpışma performansı hedefini karşılamak için gerekli yapısal tasarımları yönlendirmede gereklidirler [16].

#### 4.4. Vensim Yazılımı ve Yay-Kütle Modeli

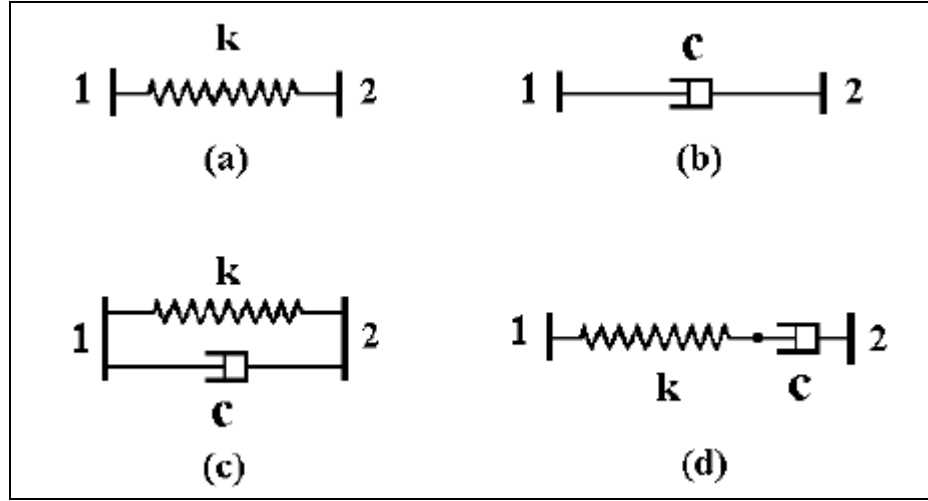
Çarpışma sinyali analizinde çok çeşitli modeller kullanılır. Bu modeller her iki tarafı kütlelere bağlanan enerji absorbe edici elemanlardan meydana gelirler. Mühendislik malzemelerinin birçoğu viskoz ve elastik karakteristikler gösterdikleri için, enerji absorbe etme Kelvin tipi, Maxwell tipi veya her ikisinin birleşimi olan elemanlarla ifade edilebilir. Şematik olarak, modellerdeki kütleler yay ve/veya sönüm elemanları ile çeşitli dizilişlerde birleştirilirler. Modellerin hareket denklemleri kapalı-form çözümlerle açıkça çözülürler. Bu kapalı-form formüller çarpışma analizinde kullanılırlar.

Yay ve sönüm elemanları mekanik sistemlerde görülen temel enerji absorbe edici bileşenlerdir. Şekil 4.12. de kullanılan elemanlar görülmektedir [30].



Şekil 4.12. a) Yay, b) Sönümleyici, c) Kelvin, d) Maxwell Elemanı[30]

Kelvin elemanında yay ve sönümleyici paralel bağlıdır. Maxwell elemanında ise birbirine seri bağlanmışlardır. Şekil 4.13. de bu elemanların şematik gösterimi görülmektedir.



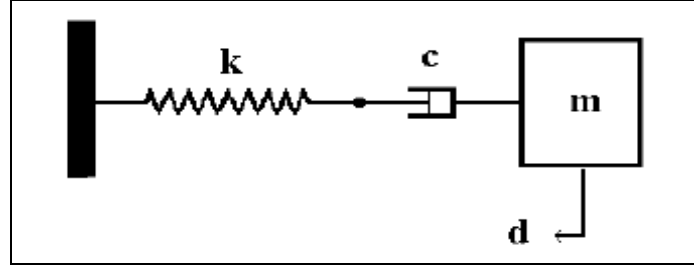
Şekil 4.13. a) Yay, b) Sönümleyici, c) Kelvin, d) Maxwell Elemanı [30]

Bir kamyonetin gövde ve şasi arasında yer alan gövde bağlantıları gibi parçaların çarpışma performansları 2 parametrelili Kelvin modeli ve standart 3 parametrelili katı modeli ile incelenebilir. Parametre sayısı kullanılan yay ve sönüm elemanı sayısına göre adlandırılır [30].

#### 4.4.1. Maxwell Yay Kütle Modeli

Viskoelastik malzemeler hem viskos hem de elastik malzemelerin özelliklerini taşırlar. Bu tür malzemeleri ifade edebilmek ve analizlerini kolaylaştırmak için Maxwell modeli geliştirilmiştir. Maxwell sistem modeli birbirine seri bağlı yay ve sönümleyiciden oluşur. Modelin darbeye karşı cevap karakteristikleri analiz edilir. İki parametrelili Maxwell modeli özel bir cevap karakteristiği sağlar ve parçaların gerilme relaksasyonu, sürünme ve yerel araç darbelerinin modellenmesine uygundur [31].

Kullanılan Maxwell model elemanı kütsüz ve tek eksenlidir. Bu yüzden eğilme veya burulma rijitliği önemsenmez. Elemanın bitiş noktaları herhangi bir gövdeye bağlanabilirler. Maxwell modeli relaksasyon ve sürünme gibi zamana bağlı olguları gösteren malzemeleri modellemek için uygulanır. Araç darbe modellemesinde, aracın etkin rijitliğinin düşük olduğu yerel darbeler için bu model uygundur. Şekil 4.14. de Maxwell modeli görülmektedir.



Şekil 4.14. Maxwell Modeli [30]

Yay ve sönüm elemanı arasındaki dinamik etkileşimleri incelemek için,  $m$  değerinde bir kütle elemana bağlanmıştır. Rijit bariyer-araç darbesini simüle etmek için elemanın bu şekilde rijit bir duvara çarptığı düşünülmüştür. Çarpan ağırlığa oranla komponent ( parça ) ağırlığının önemsiz olduğu kabul edilen komponent testini modellemek için yay ve sönüm elemanı, bir kamyonetin motor-gövde bağlantıları gibi komponentleri temsil ederler. Modelin hareket denklemleri sönüm elemanının ve sistemin yer değiştirmesinden türetilerek bulunur.

$$f(kuvvet) = f_{yay} = f_{sönüm} = k \times d_{yay} = c \times \dot{d}_{sönüm}$$

$$d(deplasman) = d_{yay} + d_{sönüm}$$

$$\dot{d}_{sönüm} = \frac{k}{c} \times d_{yay} = \frac{k}{c} \times (d - d_{sönüm}) \quad (1)$$

$$\ddot{d} = -\frac{f}{m} = -\frac{c \times \dot{d}_{sönüm}}{m} \quad (2)$$

( 1 ) ve ( 2 ) ifadeleri birinci ve ikinci dereceden diferansiyel denklemlerdir.  $d_{sönüm}$  ve  $d$  nümerik integrasyon ile bulunabilir. Yay ve sönüm elemanının yer değiştirmeleri ve yer değiştirme hızları Maxwell modelinde aşağıdaki gibi ifade edilir. Toplam yer değiştirme yay ve sönüm elemanının yer değişimlerinin toplamıdır. Bu özellik elemanların hızları için de geçerlidir [30].

$$d = d_{yay} + d_{sönüm} \quad \dot{d} = \dot{d}_{yay} + \dot{d}_{sönüm}$$

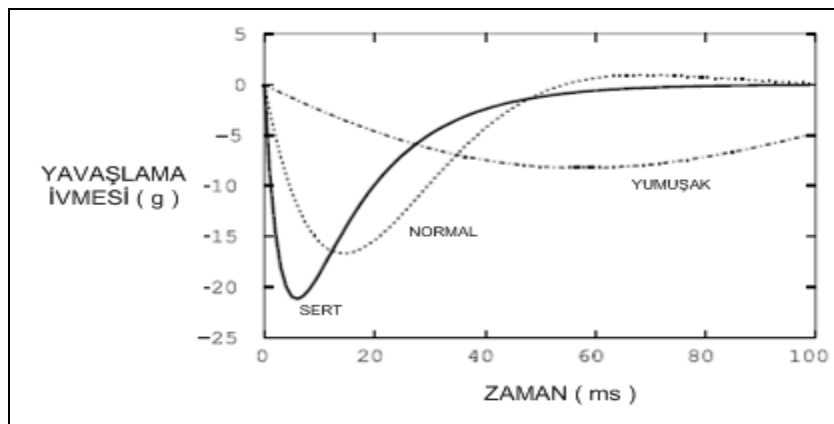
#### 4.4.2 Vensim Yazılımında Maxwell Modeli Örneği

Maxwell Yay – Kütle modeli çarpışma testlerinde araç komponentlerinin analizinde kullanılan bir modeldir. Bu bölümde bu konuda daha önce yapılan bir çalışma VENSIM yazılımı ile yapılmıştır. Verilen örneğin sonuçları ile VENSIMden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Araç – Rijit Bariyer Darbesi için bilgiler Tablo 4.1. de verilmiştir.

Darbe başlangıç hızı  $V_0 = 4.47m/s$  olarak alınmıştır. Üç farklı yay sabiti için kütlenin cevabı ( ivmesi ) bulunmalıdır. ( 1 ) ve ( 2 ) nolu ifadeler kullanılarak kütlenin ivmesi bulunur. Şekil 4.15. de her üç yay sabitine göre ortaya çıkan ivmeler gösterilmiştir [30].

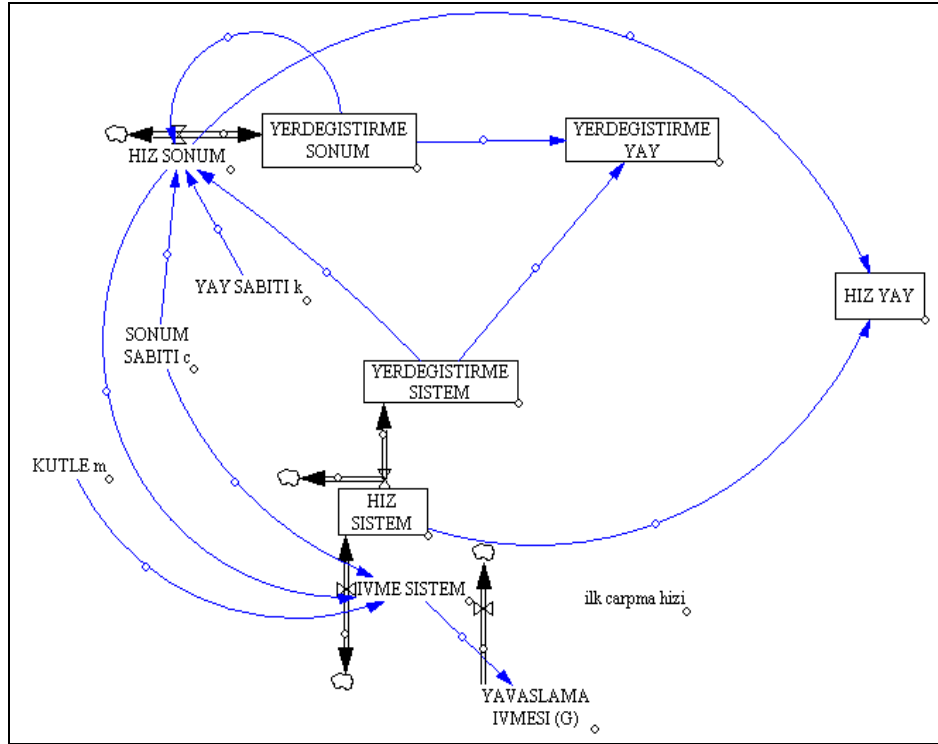
Tablo 4. 1. Farklı Yay sabitleri İçin Maxwell Modelleri

| Yay Sertliği | Yay Sabiti k                  | Sönüm Sabiti c                | Kütle W         | Başlangıç Hızı  |
|--------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------|-----------------|
| 1 ( Sert )   | $k = 35561641.81 \frac{N}{m}$ | $c = 53342.576 \frac{N-s}{m}$ | $W = 907.185kg$ | $V_0 = 4.47m/s$ |
| 2 ( Normal ) | $k = 5339040 \frac{N}{m}$     |                               |                 |                 |
| 3 (Yumuşak ) | $k = 533904 \frac{N}{m}$      |                               |                 |                 |



Şekil 4.15. Maxwell Modeli İvmeleri [30]

Maxwell modelinde ortaya çıkan ivmelerin VENSIM Yazılımı ile hesaplanabilmesi için gerekli bağıntıların modellenmesi gerekir. Bu ifadeler 1. ve 2. dereceden diferansiyel denklemlerdir. İvme, hız ve yerdeğiştirme zamana bağlı olarak değişirler. Şekil 4.16. da bu ifadelerden yararlanılarak VENSIM’de oluşturulan Maxwell modeli görülmektedir.



Şekil 4.16. Vensim Maxwell Modeli

Oluşturulan VENSIM modelinde ortaya çıkan çarpışma sinyali “Yavaşlama İvmesi”dir. Modelde görülen *YAVAŞLAMA İVMESİ* sistemde ortaya çıkan ivmenin g yerçekimi ivmesi biriminde ifade edilmiş halidir. İvme sönüm elemanının hızına, yay, sönüm sabitine ve kütleye bağlıdır. İvme sistem hızını etkileyen bir akış olarak kabul edilmiştir. İvme bir akış olarak hız birikimini etkiler. Hız hem akış hem de birikim olarak ifade edilmiştir. Sistem hızı birikiminin başlangıç değeri darbe başlangıç hızıdır. Sistem hızı, bir birikim olarak ivme akışından etkilenirken, bir akış olarak da yer değiştirme birikimini etkiler. Birikimler akışların belli bir zaman aralığı için akan miktarın toplamıdır. Bu model için hız birikimi ivme akışının belli bir zaman aralığında toplamıdır. Başka bir deyişle ivmenin integre edilmesidir. Aynı şekilde ivmenin integrasyonundan elde edilen hız akışı, yer değiştirme birikiminde toplanır.

Modelde görülen diğer bir akış elemanı ise sönüm elemanının hızıdır. Sönüm elemanın hızı bir akış olarak sönüm elemanının yer değiştirmesini etkiler. Maxwell modelinde kullanılan ifadelerin VENSIM yazılımındaki formülasyonu aşağıdaki gibidir.

*DARBE BASLANGIC HIZI=4.47*

*Units: m/s*

*FINAL TIME = 0.1*

*Units: Second*

*The final time for the simulation.*

*HIZSONUM = (YAY SABİTİ k/SÖNÜM SABİTİc)\*(YERDEGISTIRME SİSTEM-YERDEGISTIRME SONUM)*

*Units: m/s*

*HIZ YAY = SİSTEM HIZI-HIZ SONUM*

*Units: m*

*INITIAL TIME = 0*

*Units: Second*

*The initial time for the simulation.*

*KÜTLE m = 907.185*

*Units: kg*

*SAVEPER = TIME STEP*

*Units: Second [0,?]*

*The frequency with which output is stored.*

*SİSTEM HIZI= INTEG (YAVASLAMA İVMESİ, DARBE BASLANGIC HIZI)*

*Units: m/s*

*SÖNÜM SABİTİ c=53342.6 Units: Ns/m*

*TIME STEP = 0.00078125*

*Units: Second [0,?]*

*The time step for the simulation.*

*"Yavaslama ivmesi (g)" = YAVASLAMA İVMESİ / 9.80665*

*Units: g*

*YAVASLAMAİVMESİ = (-SÖNÜM SABİTİ c x HIZ SONUM) / KÜTLEM*

*Units: m/s<sup>2</sup>*

*YAY SABİTİ k = 5.33904e+006*

*Units: N/m*

*YERDEGISTIRME SISTEM = INTEG ( SİSTEM HIZI, 0)*

*Units: m*

*YERDEGISTIRME SONUM= INTEG ( HIZ SONUM, 0)*

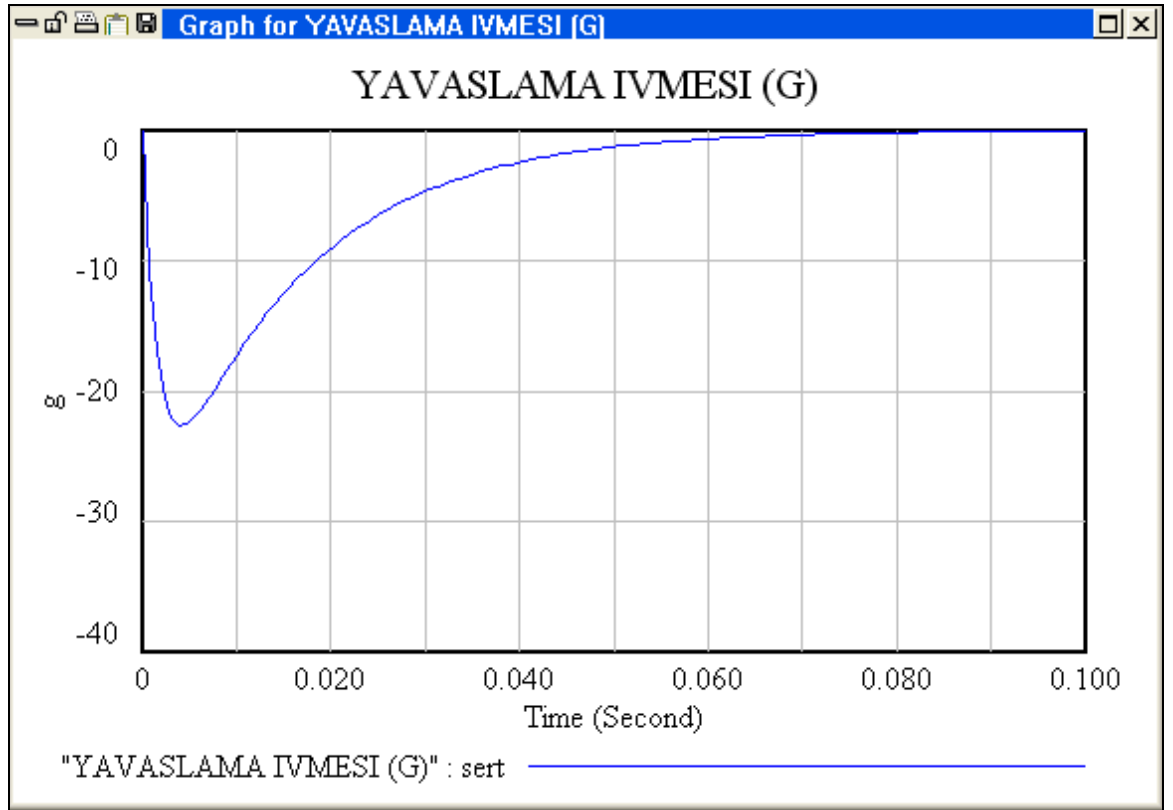
*Units: m*

*YERDEGISTIRME YAY = INTEG ( YERDEGISTIRME SISTEM-YERDEGISTIRME SONUM, 0)*

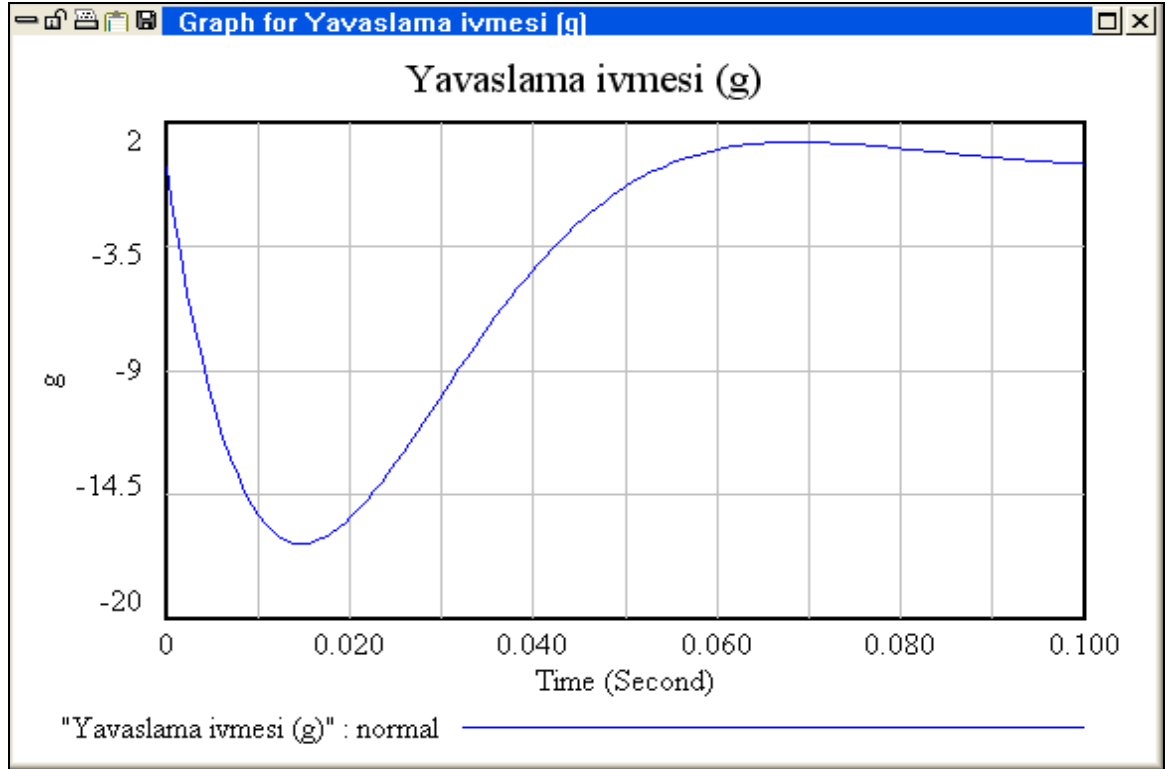
*Units: m*

Şekil 4.17. da sert yay sertliği özelliği için VENSIM yazılımında elde edilen çarpışma sinyalinin ( yavaşlama ivmesinin ) zamana karşı değişimi görülmektedir. Çarpma anında ivme sıfırdır. Yavaşlama ivmesinin zirve noktası çarpışmanın ilk safhasında oluşmuş daha sonra yavaşlayarak azalmıştır. VENSIM ile elde edilen sonuç Şekil 4.15. de görülen çalışmanın sonucu ile aynıdır.

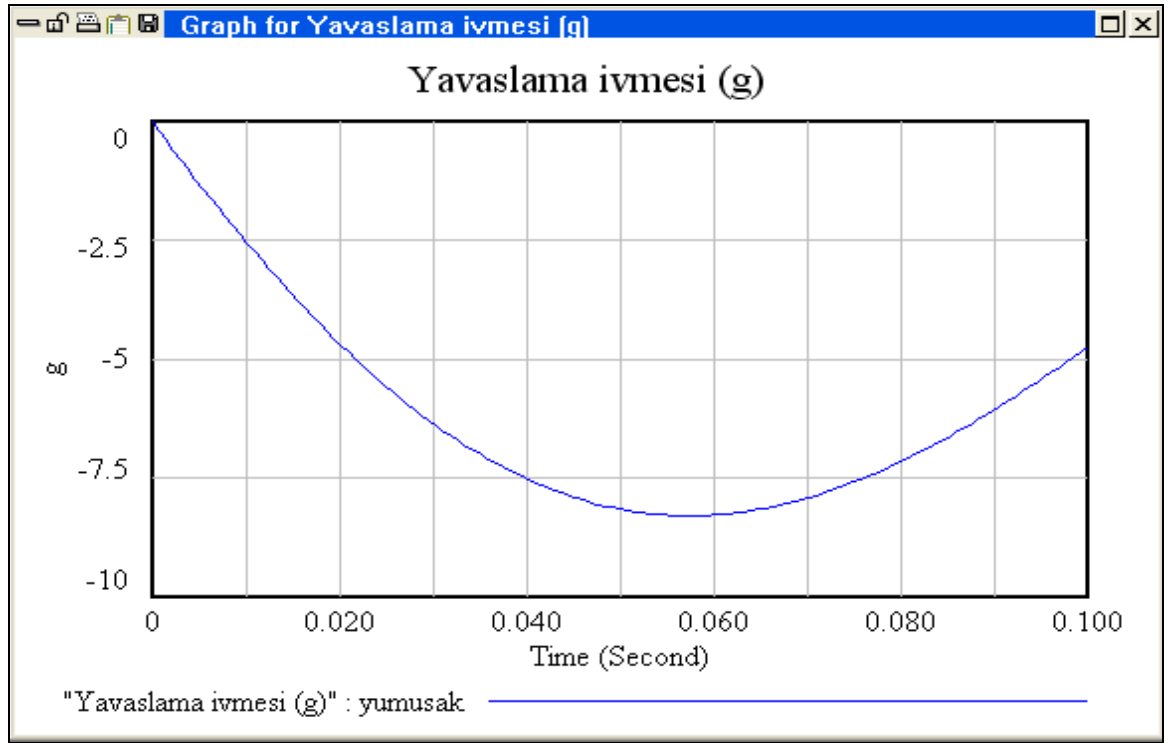
Şekil 4.18. ve Şekil 4.19. da sırasıyla normal ve yumuşak yay özelliği için ortaya çıkan yavaşlama ivmeleri görülmektedir. Modelin yay sertliği artıkça oluşan ivmelerin ve maksimum değerlerinin azaldığı görülmüştür. Şekil 4.14. de görülen sonuçlar VENSIM yazılımı ile elde edilmiştir.



Şekil 4.17. Sert Yay Özelliğinde Yavaşlama İvmesi



Şekil 4.18 Normal Yay Özelliğinde Yavaşlama İvmesi



Şekil 4.19. Yumuşak Yay Özelliğinde Yavaşlama İvmesi

Çalışmada görüldüğü gibi VENSIM yazılımı ile dinamik fiziksel sistemlerin modellenmesi yapılmıştır. Zamana göre değişen dinamik değişkenlerin olduğu fiziksel sistemler Sistem Dinamiği kapsamında modellenebilir. Kullanılan yazılımın özellikleri modelleme kapasitesini sınırlar. Sistem Dinamiği Yapısı itibarı ile bir sistemin tümünün davranışını ele alır. Dolayısıyla oluşturulan modellerin ayrıntı seviyesi fiziksel sistemlerin modellenmesine göre daha düşüktür. Sistem Dinamiği metodu ile genellemelerin daha çok yapıldığı makro modeller oluşturulması daha uygundur.

## 5. TEDARİK ZİNCİRİNİN VENSİM MODELİ

### 5.1. Giriş

Sistem Dinamiği Yaklaşımının kullanım alanını gösteren en iyi uygulamalardan biri tedarik zinciri yönetiminin modellenmesidir. Bir ürünün tedarik zinciri, ürünün üretimden en son müşteriye ulaşana kadar geçirdiği aşamalardan oluşur. Tedarikçiler, üretim, distribütör, toptancı, perakendeci ve en son müşteri birimleri gibi bilgi, para ve malzemenin el değiştirdiği birimler, tedarik zincirini oluşturur.

Yapılan çalışmalarda tedarik zincirinde ortaya çıkan problemlere getirilen kısa çözümlerin uzun vadede daha önemli problemlere sebep olduğu görülmüştür. Bu sebepten dolayı problemlerin çözümü için sistemin tümünü ele almak, büyük resme bakmak gerekir. Birbirine bağlı dinamik değişkenlerin bulunduğu tedarik zinciri Sistem Dinamiği yaklaşımı için uygun bir çalışma sahasıdır.

Bu bölümde tedarik zinciri yönetimi hakkında bilgi verilmiştir. VENSİM yazılımı kullanılarak sistem Dinamiği kapsamında bir tedarik zinciri modeli oluşturulmuştur. Oluşturulan modelden elde edilen bilgiler ışığında tedarik zincirinde ortaya çıkabilecek problemler gözlenmiştir.

### 5.2. Tedarik Zinciri

Tedarik zincirini tüketicilerin elinde ürün ya da hizmet formunda değer üreten farklı süreç ve aktiviteleri kapsayan organizasyonlar ağıdır [32]. APICS sözlüğünde tedarik zinciri şöyle tanımlanmaktadır: “1. Tedarikçi ile firma arasındaki, ilk hammaddeleri ile tamamlanmış ürünlerin son tüketimi arasında yer alan süreçler; 2. Ürün ve hizmetlerin müşterilere sunulması için değer zincirini harekete geçiren firma içi ve dışı fonksiyonlar”.

Tedarik zinciri, bir veya daha fazla ürün grubuyla ilgili elde etme, üretim ve dağıtım faaliyetlerinden kolektif bir biçimde sorumlu olan otonom veya yarı otonom iş faaliyetlerinden oluşan bir şebekedir [33].

Lee ve Billington'a göre ise tedarik zinciri, hammaddeleri elde eden, bunları yarı ve tamamlanmış ürünlere dönüştüren ve ardından bir dağıtım sistemi vasıtasıyla bu ürünleri müşterilere teslim eden yapılar şebekesidir [34].

Nihaî müşterilere dağıtılmak üzere hammaddeleri tamamlanmış ürünlere dönüştüren tedarik zinciri, çok safhalı, kapsamında birden fazla görevi olan ve birçok işletmeyi içeren bir süreçtir.

Genel bir tanım olarak tedarik zinciri, hammaddelerin siparişi ve elde edilmesinden, mamullerin üretilmesine ve müşteriye dağıtım ve ulaştırılmasına kadar olan kurumsal fonksiyonlarına uzanan bir faaliyetler dizisidir.

Bu noktada, tek bir ürün için basit bir tedarik zinciri örneği verilebilir: Bu zincirde satıcılardan hammadde sağlanır, tek bir adımda tamamlanmış ürüne dönüştürülür, ardından dağıtım merkezlerine ve son olarak da müşterilere taşınır. Gerçek tedarik zincirleri ortak bileşenlere, üretim araçlarına ve kapasitelere sahip tamamlanmış birçok ürünü bulundurur [35] .

### **5.2.1. Tedarik Zincirinin Fonksiyonları**

Bir iş ortamında üç çeşit akış mevcuttur. Bunlar:

- Mamulün elde edilmesinden tüketimine kadar olan akışı
- Satıcılardan iş ortamına ve buradan da müşterilere olan bilgi akışı
- Satın alma vs. için gerekli fonları sağlayan müşterilerden iş ortamına olan finansal akış.

Tedarik zinciri fonksiyonları ise iş ortamındaki mamul akışını temsil etmektedir. Tedarik zinciri bir işletmede doğru malzemelerin, hizmetlerin ve teknolojinin doğru kaynaktan, doğru zaman ve uygun kalitede satın alındığının garanti edilmesinden sorumludur [36].

İşletmenin tedarik fonksiyonu, üretim süreci için gerekli üretim faktörlerinin gerekli nitelik ve nicelikte, gerekli zamanda ve uygun fiyatla işletmede hazır bulundurulması ve bunların üretim/montaj hattına, depolara ve tüketiciye taşınmasına ilişkin tüm faaliyetleri içeren bir işletme fonksiyonudur [37].

İşletmenin tedarik fonksiyonuna konu olan malzeme çeşitlerinin nitel ve nicel özellikleri üretilecek ürün tarafından belirlenir. Tedarik edilecek malzemelerin ve miktarının belirlenmesinde, üretilcek olan ürünün hangi zamanda ve ne kadar üretileceği ve ürünün kalite özellikleri belirleyici unsurlardır [38].

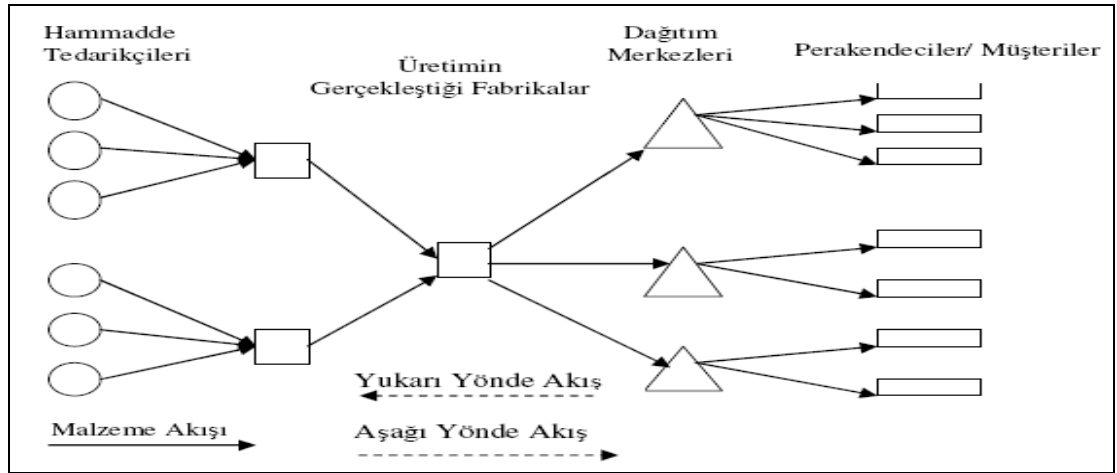
Pazarlamanın yüksek seviyeli müşteri hizmeti maksimum satış amaçları, üretim ve dağıtım hedefleriyle de çakışmaktadır. Birçok üretim işlemi, envanter seviyeleri ve dağıtım imkânları üzerindeki etkisi göz önüne alınmadan, çıktıyı maksimize etmek ve maliyetleri düşürmek üzere tasarlanmıştır. Satın alma kontratları, eski satın alma örneklerinin ötesinde çok az bir bilgiyle müzakere edilmektedir. Bu etmenlerin sonucunda, işletme için tek, bütünsel bir plan bulunmamaktadır, planların sayısı iş çeşitlerinin sayısı kadardır. Bu farklı fonksiyonların bütünlleştirilmesi için bir mekanizmaya ihtiyaç vardır. Tedarik zinciri yönetimi, bu tür bir bütünlşmeye ulaşılabilir bir stratejidir. Tedarik zinciri yönetiminin tipik olarak, malzeme akışının bütün olarak tek bir firma tarafından sahip olduğu ve her bir kanal üyesinin bağımsız olarak çalıştığı tam olarak bütünlşmiş firmalar arasında bulunduğu gözlenmektedir. Bu yüzden zincirdeki çeşitli bileşenlerin koordinasyonu, onların etkili bir şekilde yönetilmesiyle sağlanır [35].

Kurumsal fonksiyonların verimli olabilmeleri için bütünsel bir biçimde çalışmaları gerekir. Tedarik zinciri ile ilgili olaylara hızlı ve kaliteli bir şekilde karşılıklar verilmesini sağlamak için kuruluş çerçevesindeki birçok fonksiyonun koordinasyonu gereklidir [36].

### 5.2.2. Tedarik Zincirinin Yapısı

TZY, hammaddelerin elde edilmesinden son ürünlerin teslimine kadar ürün, hizmet, fon ve bilgi akışını sağlayarak verimliliği, kaliteyi ve yeterliliği arttırmaya yönelik bir sistemdir [39].

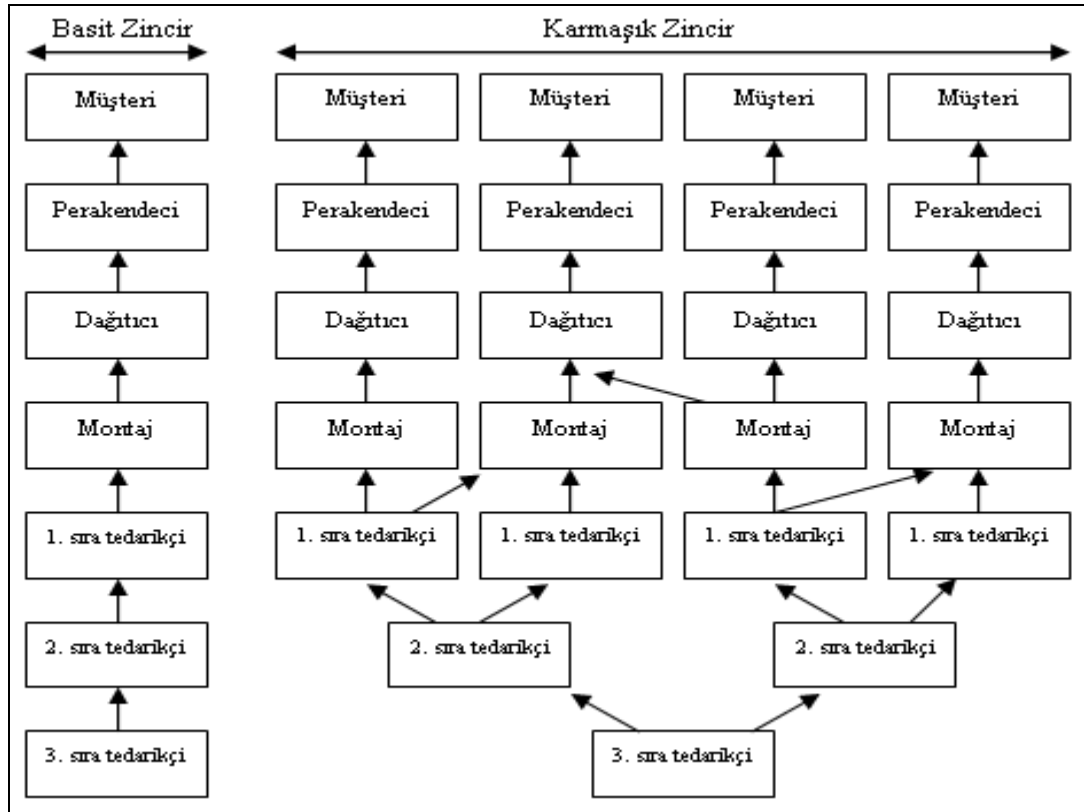
Tedarik zincirinde malzemeler hammadde kaynaklarından, bu hammaddeleri yarı mamullere dönüştüren bir üretim seviyesine geçer. Bu yarı mamuller daha sonra tamamlanmış ürünleri meydana getirmek üzere bir sonraki seviyede birleştirilecektir. Elde edilen ürünler dağıtım merkezlerine ve buralardan da satıcılar ve müşterilere aktarılır. Şekil 5.1. de bu işlemler görülmektedir.



Şekil 5.1. Tedarik Zinciri [40]

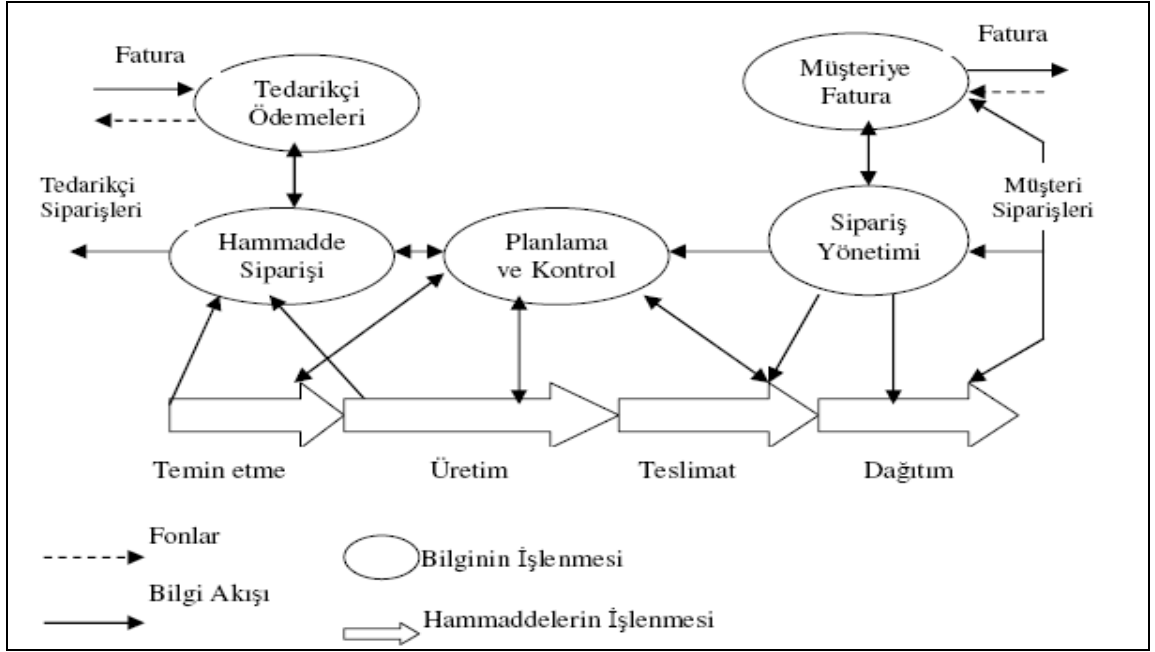
### 5.2.3. Tedarik Zinciri Çeşitleri

Bir tedarik zinciri Şekil 5.2. 'de görüldüğü gibi tedarikçiler (bir veya daha fazla sıra), montajcılar/imalatçılar, dağıtım merkezleri, perakendeciler ve müşterileri içerir. Bu şekil, iki tür tedarik zinciri biçimini göstermektedir. Basit bir tedarik zincirinde her bir tedarikçi bağımlıdır ve bir veya daha fazla bileşeni sadece bir üst sıra tedarikçi veya montaj tesisine sağlamaktadır. Karmaşık bir tedarik zincirinde ise en azından bir tedarikçi, bir veya daha fazla bileşeni iki veya daha fazla üst sıradaki tedarikçilere veya montaj tesislerine sağlamaktadır [41].

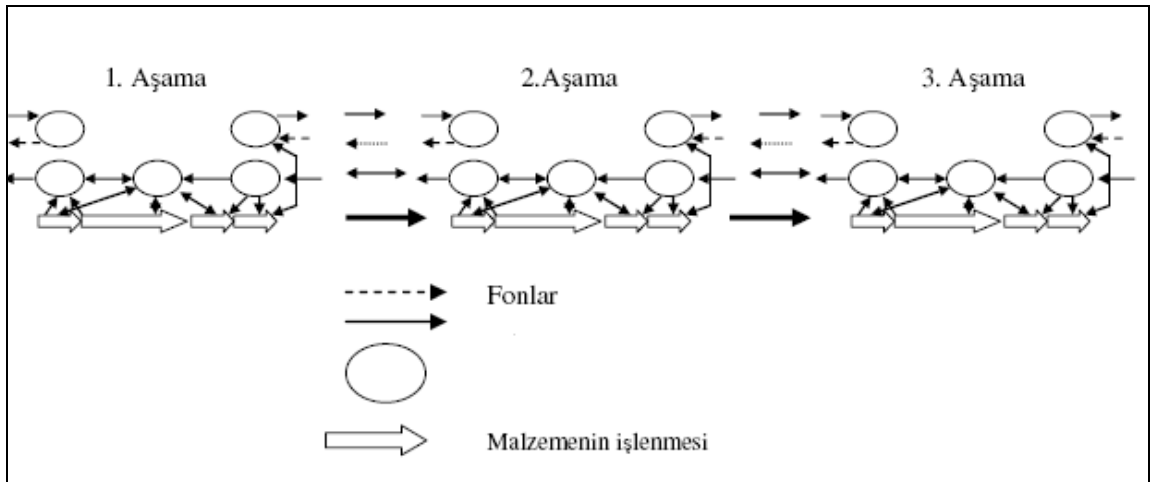


Şekil 5.2. Tedarik Zinciri Çeşitleri [41]

Tedarik zincirleri artan karmaşıklığa göre tek aşamalı ve çok aşamalı tedarik zincirleri olarak ikiye ayrılabilir. Tek aşamalı tedarik zinciri, hammaddelerin elde edilmesi, üretim ve dağıtım süreçlerindeki malzeme akış fonksiyonlarını birleştirir. Bu çeşit tedarik zinciri birçok bilgi işleme ve karar verme fonksiyonlarını da içerir. Tek aşamalı tedarik zincirleri fonların yönetimini de kapsamaktadır, çünkü borçlar ve alacakların kontrolü de önemlidir. Tek aşamalı tedarik zincirin temel yapısı Şekil 5.3. de gösterilmiştir. Çok safhalı tedarik zinciri yönetimi, tipik olarak çok şirketli tedarik zincirleridir, ancak özellikle de tek safhalı tedarik zincirlerinin çoklu kopyalarıdır. Volkswagen çok safhalı tedarik zincirine bir örnek sunmaktadır. Üretici, ilerideki sipariş bilgilerini ve gerçek siparişleri elektronik olarak almak üzere satıcılarıyla birlikte çalışmakta ve günlük otomobil üretim planlaması için verileri girmektedir[42].



Şekil 5.3. Tek aşamalı Tedarik Zinciri [42]



Şekil 5.4. Çok Aşamalı Tedarik Zinciri [42]

### 5.3. Tedarik Zinciri Yönetimi

Tedarik zinciri yönetimi ürün, bilgi ve hizmet akışının, başlangıç noktasından son noktaya ulaşmaya değin tedarik zinciri içerisindeki hareketliliğinin etkin ve verimli bir şekilde planlanması, depolanması ve taşınması hizmetidir.

Tedarik zinciri yönetimi tüketiciye ürünleri doğru miktarda, doğru yerde ve doğru zamanda temin edebilmeyi sağlayan, ürün ya da hizmetin üretilmesi için

gerekli olan birimlerin etkin olarak entegre edilmesi ile tüm sistem boyunca verimlilik ve etkinlik sağlayarak müşteri hizmet gereklerini yerine getirebilmektir. Tedarik zinciri yönetimi tanımında bu temel yaklaşım herkesçe kabul görürken farklı kaynaklarda aşağıda verilmiş tanımlar da mevcuttur.

Tedarik zinciri yönetimi, işletme içinde ve tedarik zincirinde yer alan ticari ortakların işletme fonksiyonlarında, üretken yeteneklerini ve kaynaklarını birleştirmeye çalışan, üstün müşteri değer yaratmak için yaratıcı çözümler geliştirmeye odaklanmış ve ürünler, hizmetler ve bilginin eş zamanlı akışını başarmış rekabetçi tedarik zincirine dönüşmelerini sağlamak amacıyla sürekli gelişen bir yönetim felsefesidir [43].

Tedarik zinciri yönetimi, malzemelerin ve tamamlanmış malların, satıcıdan müşteriye kadar olan akışının potansiyel ara duraklar olarak üretim vasıtaları ve depolar kullanılarak etkili yönetimidir. Buna karşın bu faaliyet, yeni bir kavram değildir. İşletmeler son yıllarda tedarik zincirine uygun yapının verilmesi sonucunda müşteri hizmet seviyelerini iyileştirebileceği, sistemdeki fazla envanterin azaltılabileceğini ve işletme ağındaki gereksiz maliyetlerin kısılabileceğine dikkat etmiştir [44].

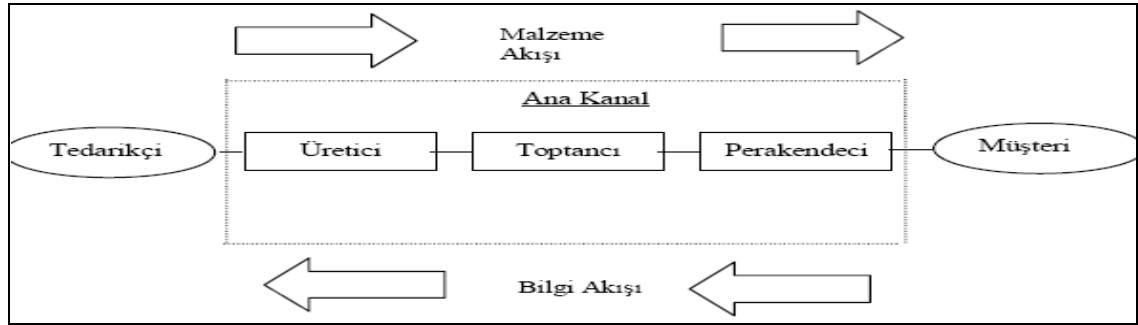
Tedarik zinciri yönetimi müşteriye memnun edecek bir şekilde daha iyi bir şekilde ürün ve hizmet üretilip sunmak için genişleyen bir faktörler bileşenini planlama ve kontrol etme amacıyla ileri teknoloji, bilişim yönetimi ve yöneylem araştırmaları matematiği kullanır. İleri seviyede programlar, ilişkisel veritabanları ve buna benzer teknik araçları kullanır. Teknolojisi karmaşık olsa bile, tedarik zinciri yönetiminin en önemli kavramları ve çalışma teknikleri oldukça anlaşılırdır [42].

Kısaca Tedarik Zinciri Yönetimi, hammadde temininden üretime ve dağıtımla son müşteriye kadar bir malın ulaşabilmesi için bir değer zincirinde yer alan tedarikçi, üretici, dağıtıcı, perakendeci ve müşteriler arasında malzeme/ürün, para ve bilginin yönetimidir. Tedarik Zinciri Yönetimi'nin temel amaçları şu şekilde ifade edilebilir:

- Müşteri tatminini artırmak,

- Çevrim zamanını azaltmak,
- Stok ve stokla ilgili maliyetlerin azaltılmasını sağlamak,
- Ürün hatalarını azaltmak,
- Faaliyet maliyetini azaltmak

Bu amaçları gerçekleştirebilmek için firmaların, tedarikçileri ve onların tedarikçileri ile müşterileri ve onların müşterileri arasında tedarik zincirinin bütününde haberleşme ve bilgi paylaşımını artırması gerekmektedir. Bilgi ve planların tedarikçiler ve müşterilerle paylaşılması zincir etkinliğini ve rekabetçiliğini artırabilir [45]. Şekil 5.5. de klasik bir tedarik zinciri yönetimi yapısı görülmektedir.



Şekil 5.5. Klasik Tedarik Zinciri Yönetimi Yapısı

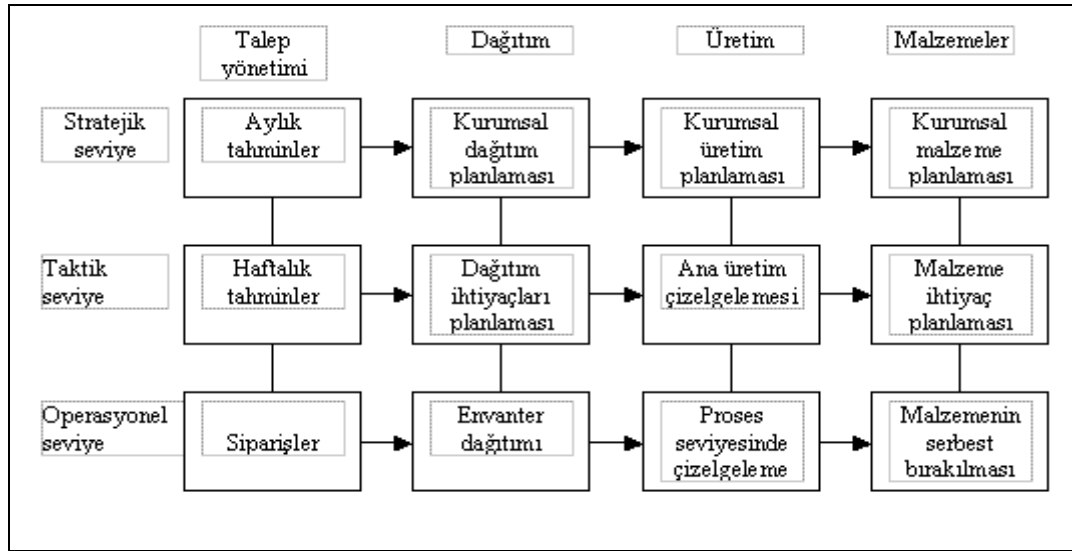
Şekil 5.5. de tek bir ürün için basit bir tedarik zinciri yönetimidir. Bu zincirde tedarikçilerden hammaddeler elde edilir, tamamlanmış ürüne dönüştürülür, ardından dağıtım merkezlerine ve son olarak da müşterilere taşınır.

### 5.3.1. Tedarik Zinciri Yönetimi Bileşenleri

Tedarik zinciri yönetimi; firmanın faaliyetlerinin stratejik seviyeden başlayıp, taktiksel seviyeye ve operasyonel seviyeye kadar geniş bir kısmını kapsar. Stratejik düzeyde uzun süreli etkileri olan kararlar verilir. Bu, fabrika ve depoların sayısı, yeri ve kapasiteleri ve materyallerin lojistik ağı boyunca akışının tasarımını kapsar.

Taktiksel düzey her sene bir veya birkaç sene güncellenen kararları kapsar. Bunlar taşıma stratejileri, satın alma ve üretim kararları, stok politikaları ve müşterilerin hangi sıklıkla ziyaret edileceği kararlarını da içerir. Operasyonel düzey, kamyon yükleme, rota tayini, çizelgeleme gibi günlük kararları kapsar [46].

Bu kararların gelirler, maliyet ve hizmet düzeyi üzerinde çok önemli etkileri vardır. Bu karar bileşenlerinin birbirleriyle etkileşimde olması sebebiyle karar sürecinde koordinasyon etkisinin değerlendirilmesi gereklidir. Aktiviteler arasında önemli maliyet çatışmaları olan durumlarda da bu aktiviteler koordine biçimde yürütülmelidir.



Şekil 5.6. Tedarik Zinciri Yönetimi Seviyeleri

## 5.4. Tedarik Zinciri Problemleri

Tedarik zinciri yönetimi problemi üç ana uygulama alanında ele alınabilir. Müşteri yönetimi, üretim yönetimi ve ürün geliştirme. Müşteri yönetimi hedef pazarın tanımlanması ve hedef müşteri kitlesine yönelik programların uygulanması ile ilgili aktiviteleri ele alır. Üretim yönetimi satın alma, talep tahmin, siparişlerin karşılanması ve lojistik gibi farklı süreçleri içerir. Ürün geliştirme, tedarik zinciri yönetimi bağlamında, tedarik zinciri için tasarım ve yerleştirme için tasarım gibi stratejileri kapsar [47].

Başka bir sınıflandırma olarak tedarik zinciri yönetimi problemleri, stratejik seviyeden operasyonel seviyeye görülen problemler olarak sınıflandırılabilirler. Bunlar kısaca aşağıdaki gibi sıralanabilir [48].

- Dağıtım Ağı Konfigürasyonu:** Coğrafi olarak farklı bölgelere yayılmış perakendecilere hizmet veren birkaç fabrika göz önüne alınsın. Mevcut kullanılmakta olan depolar uygun bulunmamakta ve yönetimin dağıtım ağını yeniden tasarlamak ve organize etmek istediği farz edilsin. Böyle bir isteğin nedeni, örneğin, değişen talep yapısı yada kullanılmakta olan bazı depolarla yapılan kontratların bitmiş olması olabilir. Eğer talep yapısı değişmiş ise fabrika kapasitelerinde değişiklik yapmak, yeni tedarikçiler seçmek, dağıtım ağındaki ürün akışını değiştirmek gerekebilir. Toplam üretim miktarları, stok ve ulaşım maliyetlerini en aza indirip, hizmet düzeyi ihtiyaçlarını karşılayacak şekilde depo yerleri, bu depoların kapasiteleri nasıl seçilmeli, her bir fabrikada ne kadar üretmeli, tesisler arasındaki mal akışı nasıl olmalıdır? Görüldüğü gibi yönetimin karşılaştığı problem karmaşık bir optimizasyon problemidir ve bu problemin çözümünde ileri teknolojiler ve yaklaşımlar kullanmak gerekir.
- Stok Kontrolü:** Bir perakendecinin belirli bir ürünü stoklamakta ve talep geldikçe satmakta olduğu varsayılın. Müşteri talebi zamana bağlı olarak değiştiği için, perakendeci gelecek talebi tahmin etmek için sadece geçmiş verilerden yararlanabilir. Perakendecinin amacı, stok elde bulundurma ve sipariş maliyetlerini en aza indirecek şekilde stok düzeyi hangi noktaya indiğinde sipariş vereceğini belirlemektir. Ayrıca, perakendeci neden stok bulundurmak zorundadır? Talepteki belirsizliklerden dolayı mı, tedarikteki belirsizliklerden dolayı mı, yoksa başka bir nedenle mi? Eğer stok bulundurmanın nedeni talepteki belirsizlik ise bu belirsizliği azaltmanın yolları var mıdır? Stok dönüşüm oranı ne olmalıdır? Bu oran endüstriden endüstriye farklılık gösterir mi? Görüldüğü üzere iyi bir stok kontrolü için bu sorunlar çözülmelidir.
- Tedarik Kontratları:** Geleneksel tedarik zincirlerinde, zinciri oluşturan her birim kendi karını maksimize etmeye çalışır ve dolayısı ile aldıkları kararların

tedarik zincirini oluşturan diğer ortaklar üzerindeki etkilerini göz önüne almaz. Tedarikçilerle satın alanlar arasındaki ilişkilerin nasıl olacağı; fiyatlandırma, miktar iskontoları, teslimat süreleri, kalite, geri alma ve benzeri şeylerin belirtildiği tedarik kontratları aracılığı ile belirlenir. Tedarik kontratları tüm tedarik zinciri performansını arttırmak amacı ile kullanılabilir mi? Özellikle miktar iskontoları ve gelir paylaşımı kontratlarının tedarik zinciri performansı üzerindeki etkisi nedir? Satın alanları daha büyük miktarlarda almaya teşvik edecek ve aynı zamanda tedarikçi karlarını arttıracak tedarikçi fiyatlandırma stratejileri var mıdır? Tedarikçi zincirinde birimler arasındaki ilişkide bu sorulara yanıt aranmalıdır.

- **Dağıtım Stratejileri** Çapraz Yükleme olarak bilinen dağıtım stratejisinde merkezi depolar kullanmakta ve bu depolar tedarik sürecinin koordinasyonunun ve tedarikçilerden gelen malların ara sevkiyatlarının yapıldığı, ancak kendileri stok bulundurmeyen yerlerdir. Bu tür depolara *çapraz yükleme noktaları* denir. Kaç tane çapraz yükleme noktasına ihtiyaç vardır? Çapraz yükleme stratejisi kullanarak gerçekleştirilebilecek tasarruflar ne kadardır? Çapraz yükleme stratejisi nasıl uygulanmalıdır? Çapraz yükleme stratejisi, depoların stok bulundurduğu klasik stratejiden daha iyi midir? Bir şirket hangi stratejiyi kullanmalıdır? Dağıtım stratejisini belirlerken bu problemler çözülmelidir.
- **Tedarik Zinciri Bütünleştirme ve Stratejik İşbirliği** Global olarak optimal olan bir tedarik zinciri tasarlamak ve bu tasarımı uygulamaya geçirmek, tedarik zincirini oluşturan bileşenlerin dinamikleri ve amaçları farklı olduğundan çok zordur. Tedarik zinciri bileşenlerini aynı amaca yöneltecek biçimde tedarik zinciri nasıl bütünleştirilebilir? Başarılı bir tedarik zinciri bütünleştirilmesi için bilgi paylaşımının ve planlamanın önemi nedir? Hangi bilgiler paylaşılmalıdır? Bu bilgiler nasıl kullanılmalıdır? Bu bilgiler tedarik zincirinin tasarımı ve yönetimini nasıl etkiler? Verili bir durumda kullanılabilecek ortaklık biçimleri nelerdir ve nasıl uygulanabilir? Bu sorular cevaplanarak bütünleşik bir tedarik zinciri oluşturulabilir.

- **Dışarıya Yaptırma ve Satınalma Stratejileri** Tedarik zinciri stratejinizi gözden geçirmek yalnızca farklı faaliyetlerin koordine edilmesinden oluşmaz. Aynı zamanda neyin üretilip neyi dışarıya yaptırılacağına da karar verilmesi gerekir. Dışarı yaptırmaya karar verildiğinde karşılaşılabilecek riskler nelerdir? Bu riskler nasıl azaltılabilir? Satın almada internet nasıl kullanılabilir? Tüm bu sorular göz önüne alınmalıdır.
- **Bilgi Teknolojisi ve Karar Destek Sistemleri** Bilgi teknolojisi etkin tedarik zinciri yönetimini kolaylaştıran kritik bir faktördür. Tedarik zinciri yönetiminin başlıca sorunlarından biri de verilerin transfer edilip edilmeyeceğinden çok hangi verilerin transfer edileceğidir. Transfer edilen veriler nasıl analiz edilmelidir? İnternetin etkisi nedir, nasıl kullanılmalıdır? Elektronik ticaretin tedarik zinciri yönetimindeki rolü nedir? Bu problemler bilgi teknolojilerinin etkin kullanımı için çözülmelidir.
- **Müşteri Değeri** Müşteri değeri, bir şirketin ürünlerine ve sağladığı hizmetlere bağlı olarak müşteriye yaptığı katkının ölçüsüdür. Müşteri değerini neler oluşturur? Müşteri değeri nasıl ölçülür? Tedarik zinciri yönetiminin müşteri değerine katkısı nedir?

Bu geniş tedarik zinciri yönetimi problemleri tedarik zincirinin yapısı (biçimi) ve tedarik zincirinin koordinasyonu başlıklarıyla da ayrıştırılıp incelenebilir. Bu sınıflandırma aşağıda görülmektedir [46].

- **Yapısal problemler;** Tedarik zinciri ağının tasarımı bağlamında stratejik düzeydeki problemleri kapsar. Tedarik zinciri ağı, kendi içinde tedarik, üretim ve dağıtım ağlarından oluşur. Bu tür problemlerle ilgili kararlar al ya da üret problemi, satın alma stratejisi, tedarik sözleşmeleri ve tedarikçi seçimi süreci olarak tanımlanabilir. Tedarik zinciri yönetimi perspektifi doğrultusunda firmalar yalnızca kendi tedarikçilerini değil onların tedarikçilerini de ele almalıdırlar. Bunun yanı sıra firmalar, altyapı tedarikçilerinin de önemini farkına varmalıdırlar. Altyapı tedarik zinciri de dikkatlice tasarlanmalı ve yönetilmelidir. Üretim-Dağıtım ağının tasarımı ise

genel olarak yerleştirme ve paylaşırma problemlerinden oluşur. Bunlar, çeşitli tesislerin (fabrika ya da depo gibi) yeri kararlaştırılırken, aynı zamanda tesisler arasındaki akışların da talep odaklarına hizmet edecek şekilde paylaşırılması anlamında problemlerdir. Ele alınması gereken diğer konular dışarıdan edinim kararları, dağıtım kanalının tipi ve örneğin geri dönüşüm ağı ihtiyacı gibi çevresel faktörlerdir. Sonuç olarak, bir tedarik zincirinin yapısı probleminin çözümü tedarik zinciri üzerindeki tesisleri ve bunlarla ilişkili bağlantıları belirlemektir.

- **Koordinasyon problemi** ise taktik ve operasyonel temelde tedarik zinciri ağının yönetimini ele alır. Tedarik zinciri koordinasyon problemi, birkaç farklı karar verici tarafından verilen operasyonel kararların entegrasyonunu içerdiğinden oldukça karmaşık bir olgudur. Bu kararlar tek bir fonksiyon dâhilinde olabileceği gibi farklı fonksiyonları ya da birden fazla organizasyonu içerebilir. Bunun da ötesinde, mevcut bir probleme uygun tedarik zinciri modelinin seçiminde, koordinasyonun fonksiyonlar arası, organizasyonlar arası ya da fonksiyon içi olup olmayacağı kararından kaynaklanan belirgin önemin dışında, karar verme sürecinin merkezi ya da yerel olması da anahtar bir konudur. Merkezi karar verme süreci, tedarik zincirinde tüm tedarik zincirinden karar vermeye yetecek bilgileri alıp, işleyebilen ve bu kararları uygulatma gücüne sahip tek bir karar vericinin bulunduğu bir yapıdır. Karar verme süreci merkezi olmaz ise tedarik zinciri üzerinde genellikle zincirin bir kısmındaki bilgi doğrultusunda karar veren çeşitli sayıda karar verici yer alır. Bu karar vericilerin birbirleriyle çakışma ihtimali olan farklı hedefleri (yerel hedefler) olması doğal olacaktır. Ardından yerel karar vericilerin kanal boyunca koordinasyonu için koordinasyon mekanizmaları gerekecektir. Aslında bu tip mekanizmalar riskin ve kazancın tüm tedarik zinciri birimleri arasında paylaşımını sağlayarak, tedarik zinciri birimlerinin kararlarının birbirleriyle uyumu yönünde olumlu etki yaratırlar.

### 5.4.1 Tedarik Zincirinde Kırbaç Etkisi Problemi

Tedarik zinciri üyeleri birbiriyle sürekli etkileşim halindedir. Tedarik zincirinde bilginin paylaşımında ortaya çıkan aksaklıklar zincirde aksamalara ve verimsizliklere neden olur; aşırı stok yatırımları ortaya çıkar, abartılı sipariş seviyeleri ve maliyetlerin yükselmesine neden olan talep dalgalanmaları oluşur [49] .

Tedarik zincirlerinde bilginin aktarımı esnasında ortaya çıkacak aksaklıklar ya da çarpıtmalar tedarik zinciri boyunca ilerlerken varyansı artmakta ve her bir üye için olumsuz sonuçların ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Bu durum kulaktan kulağa oyununda ilk oyuncudan son oyuncuya doğru gidildiğinde bilginin bozulmasına benzetilebilir. Eğer her oyuncuya yanlış söylediği kelime kadar ceza verilecek olursa en çok cezayı son oyuncu alacaktır. Ancak tüm oyuncular bozulmuş cümlelerin oluşumunda eşit miktarda etkili ve sorumludur [49] .

Bir işletme için tedarik, kuruluş aşamasında gerekli makine ve teçhizatın tedarik edilmesi ile başlar. İşletmenin faaliyetlerine başlaması ve çalışabilmesi için hammadde ve malzeme tedarik etmesi gerekir [50].

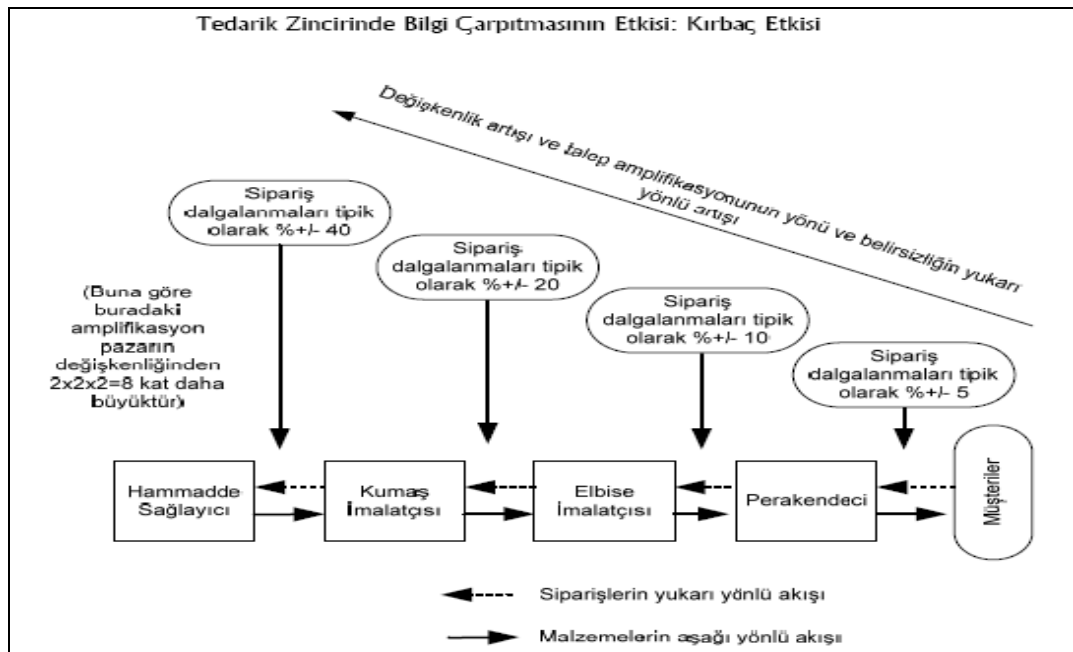
Tedarik zinciri yönetimi, tedarikçilerden son tüketiciye kadar olan tüm değer yaratma sürecinin eniyilemesi ile ilgilenir. Temel fikir, zincirin bir bütün olarak düşünülmesidir. Zincirdeki tüm üyeler, dolaylı ya da dolaysız olarak diğer zincir üyelerini ve zincirin performansını etkiler. Tedarik zinciri yönetimi, hammaddelerin edinilmesinden imalat ürünlerine ve buradan da tüketiciye işlenmiş ürünlerin dağıtımına kadar tüm tedarik zinciri boyunca bilgiye dayalı karar alınmasına olanak vermektedir. Tedarik zincirinde ürün akışı, hammadde kaynakları, imalatçı, dağıtıcılar, tüketiciler vs. arasında, her iki yönde de akan arz-talep işlem bilgisi tarafından denetlenmektedir. İşletmeler rekabet şartlarında değişen müşteri taleplerine uygun, esnek bir üretimi gerçekleştirebilmek ve tedarikçilerden nihai müşteriye kadar uzanan zincirdeki aksaklıkları gidermek zorundadır [41].

Tedarik zinciri üyelerinden birinden diğerine bilgi akışı esnasında oluşacak bilgi çarpıtması, zaman ve enerjinin etkili bir şekilde kullanılmaması nedeniyle aşırı

stok yatırımları, verimsiz müşteri servisi, gelir ve kar kayıpları, kapasite planı sapmaları, verimsiz taşıma ve uyulamayan üretim çizelgeler gibi çok büyük verimsizlikler ortaya çıkarır [51]. Kırbaç etkisi (Bullwhip Effect) olarak bilinen bu durum pek çok araştırmacı tarafından incelenmiştir. Bazı endüstrilerde “whipsaw” ya da “whiplash” etkisi olarak da adlandırılan bu durum ilk olarak Sistem Dinamiği Metodunun kurucusu Jay Forrester (1961) tarafından ele alındığı için “Forrester Etkisi” olarak tanınmıştır [52].

Bilgi çarpıtması; fabrika deposu, ürün taşıma servislerinin depoları, üreticinin pazarlama deposu, dağıtıcının merkez deposu, dağıtımının bölgesel deposu ve perakende satıcının depolama alanı gibi tedarik zincirinin her aşamasında mal alıp stok etmeyi teşvik eder. Çünkü bu etki talep tahminlerinde önemli sapmalara ve sonucunda taleplerin karşılanamamasına sebep olmaktadır [51].

Towill ve Mc Cullen (1999) tarafından yapılan çalışmada kırbaç etkisi Şekil 5.7.’ de görüldüğü gibi özetlenmiştir. Tedarik zincirinin her seviyesinde talep varyasyonu bir önceki seviyeden gelen siparişe bağlı olarak katlanarak artmaktadır.



Şekil 5.7. Perakendeci Tedarik Sisteminde Kırbaç Etkisi [53]

## 5.5. Tedarik Zinciri Modelleme

Her tedarik zinciri modelinin kendine özgü özellikleri olmasına rağmen, birçoğu aşağıda tanımlanan adımların yerine getirilmesini gerektirir [54]:

*a- Problemin Tanımlanması:* Bir çalışma hâlihazırda bir ihtiyacı giderecek şekilde hazırlanmamışsa, detaylı ve eksiksiz olması bir anlam ifade etmez. Etkili bir çalışma yapabilmek için, potansiyel problemleri olan sistem parçalarının incelenmesi ve çalışmanın buna göre hazırlanması gerekir. İyi bir model kurucusu tarafından, sistemin diğer parçalarını da kolayca içine alabilecek şekilde tasarlanmış olmalıdır. Fakat içinde gereksiz ve fazlalık bilgilerin bulunduğu bir model bilgisayar üzerinde diğer modellere göre daha yavaş çalışabilir ve maliyeti daha yüksek olabilir.

*b- Hedeflerin Belirlenmesi:* Tedarik zinciri modelinin amaçları, üzerinde çalışılacak problemin durumuna göre saptanır. Geliştirmede kullanılan belirli metotların, çalışmanın hedefinin belirlenmesindeki rolü büyüktür. Fakat bu hedefler, daha önce yapılan modelin sonuçlarının yeni verilere uyarlanmasını engelleyecek şekilde dar planlanmamalıdır.

*c- Model Formülasyonu:* Hedeflerin ve problemin belirlenmesinden sonra, modeli kuracak olan kişi modelin temel çatısını geliştirebilir. Bu çatı genellikle olayların prensiplerini ve kullanılan elemanları içerir. Toplanan verilerin doğruluğunun, elde edilen sonuç üzerindeki etkisi büyüktür. Yapılan ilk plan içerisinde; gerekli olan verilerin, bilgi kaynaklarının ve bu bilgilerin nasıl elde edilebileceği belirtilmektedir. İlk olarak, çalışmanın hedefleri ile ilgili olan bu bilgilerin çıkartılması gerekir. Tecrübeli bir model kurucu, çalışmada yer alan diğer kişilere hangi verilerin gerekli hangilerinin gereksiz olduğu konusunda yardım etmelidir. Sistemin taklidini yapmak veya sistemin bir kopyasını çıkarmak için harcanan çaba genellikle gereksizdir. Detayların gerekli olduğu zaman eklenmesi, çalışmanın hedefine ulaşması açısından takip edilmesi gereken en iyi yoldur. Teknik karışıklıklar modelle, modelin kurulma amacı arasındaki ilişkiden daha az öneme sahiptir.

### 5.5.1. Simülasyon Modelleri

Diğer uygulamalarında da olduğu gibi simülasyon tedarik zinciri yönetimi problemlerinin daha detaylı ve daha gerçekçi bir şekilde ele alınması avantajına sahiptir. Bu sebeple tedarik zinciri yönetiminde simülasyon modelleri belli başlı problem çözümlerini test etmek amacıyla kullanılmaktadır. Alternatif olarak, basitleştirilmiş genel bir sistemin davranışının simülasyonu yolu ile meselenin ana noktalarının anlaşılması sağlanabilir. Bu ikinci durumda, sonuçların hem yapı hem de koordinasyon parametreleri üzerinde etkileri gözlemlenebilir [46].

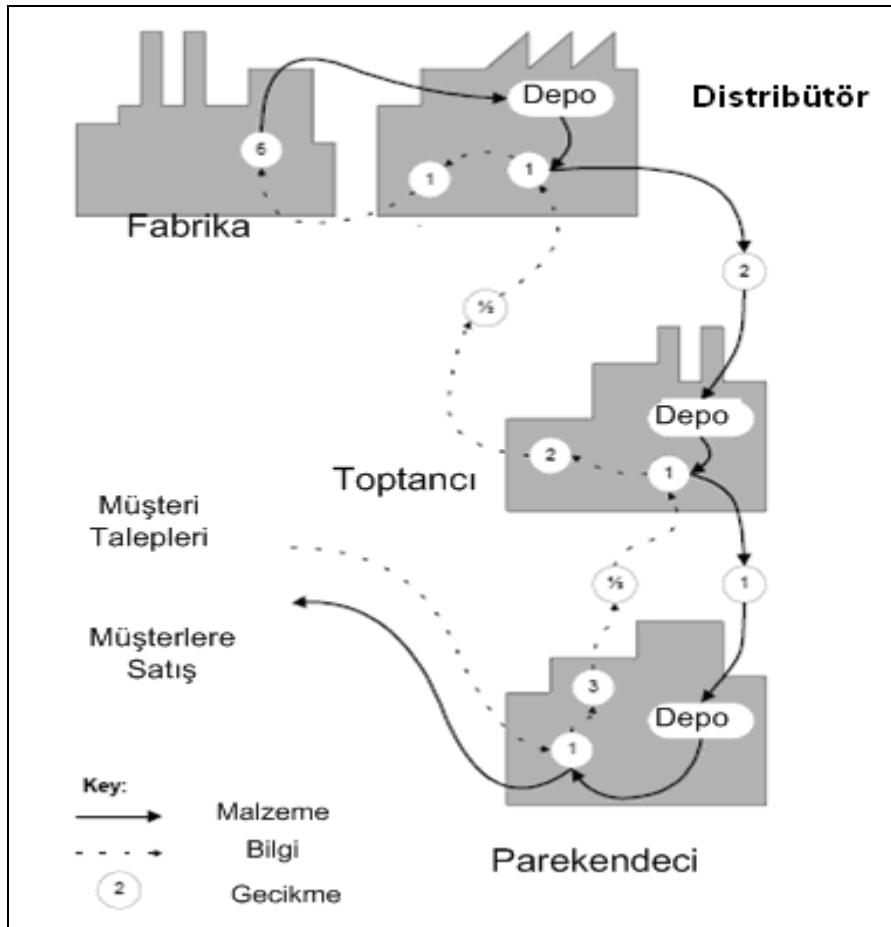
## 5.6. Vensim Yazılımı ve Tedarik Zinciri Modeli

Tedarik zinciri yönetimi sistem Dinamiği modellemesi çalışmaları, stok karar ve politika geliştirilmesi, zaman sıkışması, talep yükselmesi, tedarik zinciri tasarımı ve uluslararası tedarik zinciri yönetimi konuları üzerine odaklanır.

Sistem Dinamiği yaklaşımının Tedarik Zinciri Yönetiminde uygulanması ilk olarak J.W.Forrester'in Endüstriyel Dinamikler kitabında görülmüştür. Birbirleriyle etkileşen bilgi, malzeme, sipariş, para, insan gücü ve başlıca araç akışları ile açıklanan bir üretim-dağıtım sistemi bu kitapta ortaya konmuştur. Sistem Dinamiği Modelinin oluşturulması ve kullanılmasına dayanarak Tedarik Zinciri Yönetiminde vuku bulan olaylar Forrester tarafından kitapta açıklanmıştır [55].

Tedarik zinciri, bilgi akışının geri beslemesi ve malzeme akışının ileri beslemesi ile birbirine bağlı olan, malzeme sağlayıcılar, üretim tesisleri, dağıtım servisleri ve müşteriler alt parçalarından oluşan bir sistem olarak tanımlanır [56]. Forrester'ın modelinde fabrikadan distribütöre, buradan toptancıya, toptancıdan perakendeciye ve en son müşteriye doğru yönelen bir malzeme akışı vardır. Buna karşılık ters yönde akan siparişler ( bilgi akışı ) vardır. Ayrıca zincirde her adımda bir gecikme süresi görülür. Bu gecikme süreleri modelde üretim işlem sürecini, sipariş değerlendirme gibi yönetimsel işlerden kaynaklanan gecikmeleri temsil ederler [55].

“Forrester Tedarik Zinciri” veya Forrester Modeli Fabrika, Distribütör, Toptancı ve Perakendeci olmak üzere dört ana birimden oluşan bir modeldir. Forrester’a göre endüstriyel bir şirketin başarısı bilgi, malzeme, sipariş, işgücü, para ve ana donanım akışlarının birbirleri arasındaki etkileşimine bağlıdır. Bu akışların kontrolünün anlaşılması yönetimin asıl işidir [55]. Şekil 5.8. de Forrester Modeli görülmektedir.



Şekil 5.8. Forrester Modeli

Tedarik Zinciri Yönetimi Modeli, VENSIM yazılımında Sistem Dinamiği kapsamında oluşturulabilir. Hem yazılımın kullanımı hem de Sistem Dinamiği Metodunun kullanılmasına olanak sağlayan dinamik değişkenlerin modelde bulunması dolayısıyla Tedarik Zinciri Yönetimi modeli, konunun anlaşılması için iyi bir örnektir. VENSIM Yazılımında oluşturulan modelde, fabrika, distribütör, toptancı ve perakendeci arasında ürün akışı, birimler arası bilgi akışı, birimler arası

geçişlerde ortaya çıkan gecikmeler, stoklar ve sipariş emirlerinde meydana gelen kamçı etkisi (bullwhip effect) gözlemlenebilir.

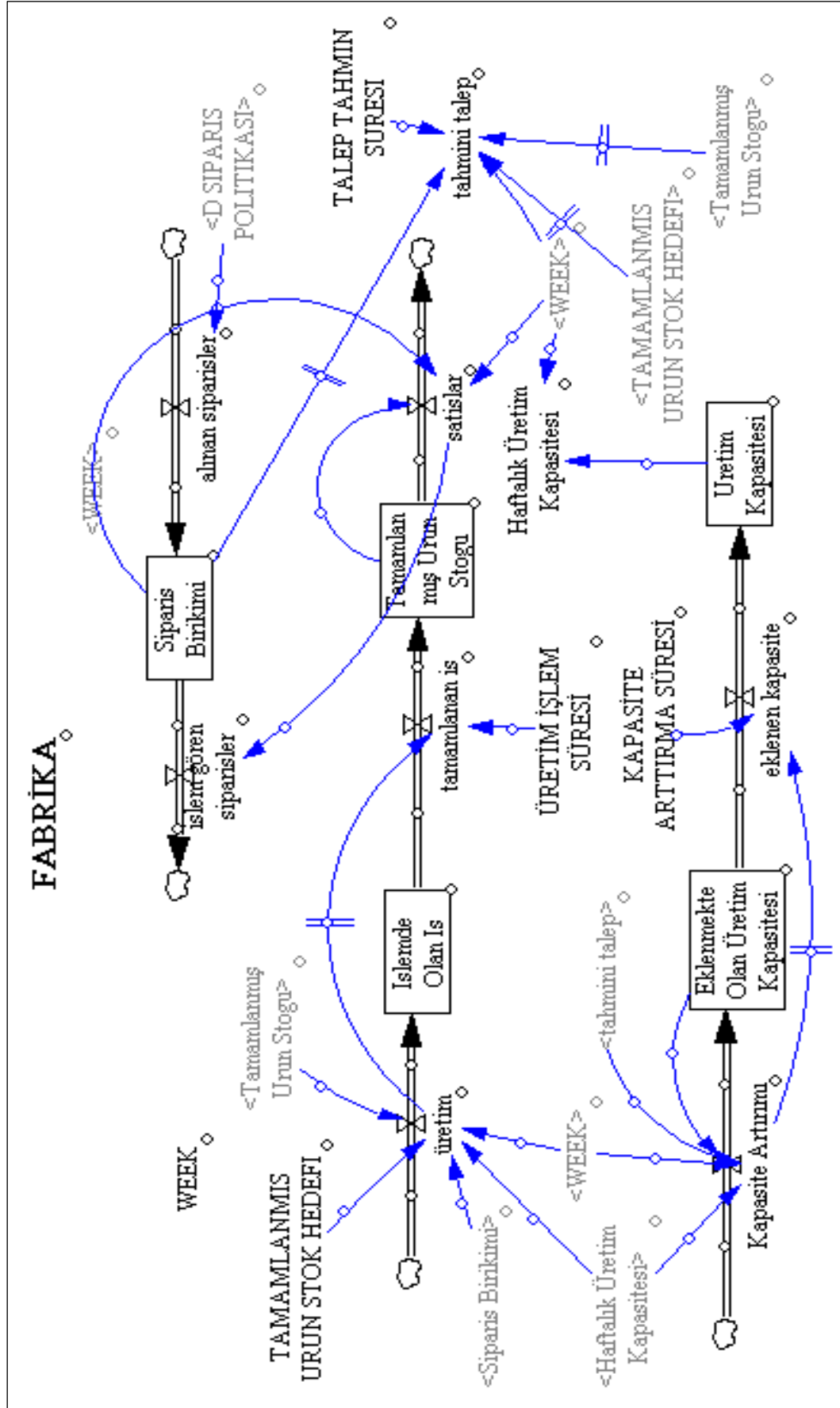
Oluşturulan tedarik zinciri yönetimi modeli fabrika içindeki üretim ve üretim sonrası olmak üzere iki bölüm olarak incelenebilir. Ürünün üretim aşaması kaynak malzemenin ürüne dönüşmesi olarak düşünülür. Üretilen ürünler depolanırlar ve daha sonra distribütörlere gelen talebe göre yollanırlar. Üretim sonrası aşama ise ürünün distribütör, toptancı, perakendeci ve müşteri birimleri arasında el değiştirmesidir.

### **5.6.1. Sistem Dinamiği Üretim Sistemi Modeli**

Üretim tedarikçilerden gelen kaynak maddenin donanım ve iş gücü aracılığıyla ürün haline dönüşmesidir. Sistem Dinamiği yaklaşımı ile bakıldığında üretim sistemi işgücü, hammadde ve donanım dinamik değişkenlerinin olduğu bir sistem olarak görülebilir.

Tedarik Zinciri Modelinde üretim tüm sistemin bir alt sistemi veya bir değişkeni olabilir. Kullanıldığı yere göre üretim sisteminin detay seviyesi değişebilir. Sistemin içinde giriş değerini işleyip bir çıkış değeri veren sistem elemanı veya işgücü, hammadde ve işlem süresine bağlı olarak ürün çıktısı veren bir alt sistem olabilir [57] .

VENSIM yazılımı ile hazırlanan Üretim Sistemi modeli Tedarik Zinciri Modelinin bir alt sistemidir. Oluşturulan modelde hammadde ve işgücü değişkenleri kullanılmamıştır. Üretim kapasitesi değişkeni kullanılarak hammadde ve işgücünün etkisi modele yansıtılmıştır. Şekil 5.9. de Üretim Sistemi Modeli görülmektedir.



Şekil 5.9. Üretim Sistemi Modeli

Çalışmada oluşturulan üretim modeli genel bir modeldir. Chomiakow'un 2007 yılındaki çalışmasından faydalanılmıştır. Çalışmada görülen üretim modeli Tedarik Zinciri Modeline entegre edilmiş ve üzerinde değişiklikler yapılmıştır [58].

Üretim Sistemi distribütörden gelen talebi karşılamak için üretim yapar. Bir taraftansa bitmiş ürün stok değeri emniyet stok değerinin altına düşmemeli veya emniyet stok değerini aşarak aşırı stok yapmamalıdır. Aşırı ürün stoklanması firmalar için ek maliyet anlamına gelir.

Sistemde görülen, talepler değerlendirilirken, malzemeler taşınırken ve üretim yapılırken görülen gecikmeler modelde göz önüne alınmalıdır. Simülasyonun gerçeğe en yakın halde olması için bu gereklidir.

Talebin karşılanması için gerekli üretim miktarı, talep ne kadar çok olursa olsun üretim kapasitesi ile sınırlıdır. Modelde üretim kapasitesi sınırlıdır. Üretim Kapasitesi işgücü, tedarikçilerden elde edilen hammaddeler, iş ortamı gibi üretimi etkileyen faktörlerin bir sonucu olarak sabit bir değer alınmıştır. Fakat gelen siparişler mevcut üretim kapasitesi ile karşılanamıyorsa üretim kapasitesi artırılabilir. Kapasite artırımı talep kestirimi ile yapılır. Talepte her hafta dalgalanmalar gözükabilir. Bu dalgalanmalara göre her seferinde kapasite artırımı yapılmaz. Bunun yerine uzun bir zaman aralığında talebin değişimi gözlenir ve buna göre oluşan tahmini talebe göre kapasite artırımı yapılır.

Üretim Sistemi Modelinde üretim bir akış olarak ifade edilmiştir. Üretim miktarı; *sipariş birikimi*, *üretim kapasitesi*, *tamamlanmış ürün stoku* ve *tamamlanmış ürün stok hedefine* ( emniyet stok seviyesine ) bağlıdır. Fakat ne kadar sipariş birikirse biriksin üretimi belirleyen *üretim kapasitesidir*. Üretim akışını ifade eden VENSIM denklemi aşağıdaki gibidir.

$$\text{üretim} = \text{MAX} ( \text{MIN} ( (\text{Siparis Birikimi} + \text{TAMAMLANMIS URUN STOK HEDEFI} - \text{Tamamlanmış Urun Stoku}) / \text{WEEK , Haftalık Üretim Kapasitesi} ) , 0 )$$

*Units: Units/Week*

Üretim, “*Siparis Birikimi + TAMAMLANMIS URUN STOK HEDEFI-Tamamlanmış Urun Stoku*” ile ifade edilen üretim talebi kadar veya bu talebin üretim kapasitesinden fazla olması halinde üretim kapasitesi kadar olur. Denklemde Kullanılan Minimum fonksiyonu bu işlemi gerçekleştirir. Maksimum fonksiyonu ise üretim değerinin negatif değer almasını engeller. Modelde kullanılan Tamamlanmış Ürün Stok Hedefi değeri 100 ünite olarak alınmıştır. Haftalık Üretim Kapasitesi normal değeri ise 100 Units/week olarak belirlenmiştir.

Üretimde tamamlanmış ürünler depolanır. Fakat her ürünün bir üretim süresi vardır. Dolayısıyla oluşan bu üretim süresi modelde ifade edilmelidir. Bunu ifade edebilmek için *İşlemde Olan İş* birikimi kullanılmıştır. *Üretim* akışı bu birikime akar ve buradan *Tamamlanan İş* akışı olarak çıkar. *Tamamlanmış İş* akışı *Tamamlanmış Ürün Stoku* birikimine akar. Aslında *Tamamlanan İş* akışı *Üretim* akışının *üretim işlem süresi* kadar geciktirilmiş değeridir. DELAY1I fonksiyonu *Üretim* akışını *üretim işlem süresi* kadar geciktirir. *Üretim işlem süresi* 2 hafta olarak alınmıştır.

*tamamlanan is=DELAY1I( üretim, ÜRETİM İŞLEM SÜRESİ, üretim )*

*Units: Units/Week*

*Tamamlanmış Ürün Stoku* Birikimi fabrikada depolanan ürünleri temsil eder. *Tamamlanmış Ürün Akışı* bu birikimi arttırıcı yönde hareket eder. *Satışlar* akışı ise tam tersine bu birikimi azaltır. *Satışlar* akışı *Sipariş* ve *Bitmiş Ürün Stoku* birikimlerine bağlıdır. Bu iki birikimden küçük değerde olanına eşittir. *Siparişler* stok değerinden fazla ise satış değeri ancak stok değeri ile sınırlıdır. Aynı şekilde stok değeri biriken siparişlerden fazla ise satışlar siparişler kadar gerçekleşir. *Satışlar* akışı Minimum fonksiyonu kullanılarak ifade edilmiştir.

*Satışlar = MIN( Siparis Birikimi/WEEK , Tamamlanmış Urun Stoku/WEEK )*

*Units: Units/Week*

*Sipariş Birikimi* distribütörden gelen *Alınan Siparişler* akışı ile artar. *İşlem Gören Siparişler* akışı ile ise azalır. *İşlem Gören Siparişler* akışı *Satışlar* akışıdır. Sistemde bulunan gecikmelerden dolayı sipariş birikmesi yaşanır. Gelen siparişlere anında yanıt verilemez ve siparişler birikir.

Üretim kapasitesi talebin artmasıyla artırılabilir. Bunun için uzun vadede talebin hareketi belirlenerek kapasite artırımına gidilir. Modelde talep tahmini, *Tahmini Talep* değişkeni ile yapılmıştır. Talep tahmin süresi 20 hafta olarak alınmıştır. Bu Smooth fonksiyonunu kullanarak VENSIM yazılımında ifade edilmiştir. Kullanılan Smooth fonksiyonu üretim talebindeki dalgalanmaları gidererek talepteki değişimin yönelimini belirlemiştir.

$$\text{tahmini talep} = \text{SMOOTH}( (\text{Siparis Birikimi} + \text{TAMAMLANMIS URUN STOK HEDEFI} - \text{Tamamlanmış Urun Stoku}) / \text{WEEK}, \text{TALEP TAHMIN SURESI} )$$

*Units: Units/Week*

*Tahmini talep* kullanılarak kapasite artırımı belirlenir. Üretim kapasitesi, tahmini talepten az ise üretim kapasitesi artırılır. Modelde kapasite artırımı bir akıştır ve *Eklenmekte Olan Üretim Kapasitesi* birikimini etkiler. Üretim kapasitesi ile tahmini talebi karşılaştırırken eklenmekte olan fakat henüz aktif olmayan kapasite artırımında göz önünde bulundurmak gerekir. Fabrikada kapasite artırımına gidildiğinde yeni ekipmanların hazır hale gelmesi belli bir süre gerektirir. Dolayısıyla tahmini talebin ilerleyen zamanlarda karşılanması olasıdır.

$$\text{Kapasite Artırımı} = \text{MAX}( \text{tahmini talep} - (\text{Haftalık Üretim Kapasitesi} + \text{Eklenmekte Olan Üretim Kapasitesi} / \text{WEEK}), 0 )$$

*Units: Units/Week*

$$\text{Eklenmekte Olan Üretim Kapasitesi} = \text{INTEG} ( \text{Kapasite Artırımı} - \text{eklenen kapasite}, 0 )$$

*Units: Units*

$$\text{eklenen kapasite} = \text{DELAYII}( \text{Kapasite Artırımı}, \text{KAPASİTE ARTTIRMA SÜRESİ} / \text{Kapasite Artırımı} )$$

*Units: Units/Week*

$$\text{Uretim Kapasitesi} = \text{INTEG} ( \text{eklenen kapasite}, 100 )$$

*Units: Units*

“*Tahmini talep - Haftalık Üretim Kapasitesi + Eklenmekte Olan Üretim Kapasitesi/WEEK*” ifadesi negatif değer alırsa kullanılan Maksimum fonksiyonundan dolayı kapasite artırımı sıfır olur. Bu mevcut olan üretim kapasitesinin talebi karşılayacak durumda olduğunu gösterir.

*Eklenen Kapasite* akışı *Üretim Kapasitesi* birikimine akar. *Eklenen kapasite, Kapasite Artırımı* akışının kapasite artırma süresiyle geciktirilmesine eşittir. Bu şekilde kapasite artırımında geçen zaman modele dâhil edilir. Kapasite artırma süresi 10 hafta olarak alınmıştır. Modelde görülen WEEK sabiti yazılımda birim tutarlılığını sağlamak için kullanılmıştır. Değeri 1, birimi week olarak belirlenmiştir.

### 5.6.2. Sistem Dinamiği Üretim Sonrası Modeli

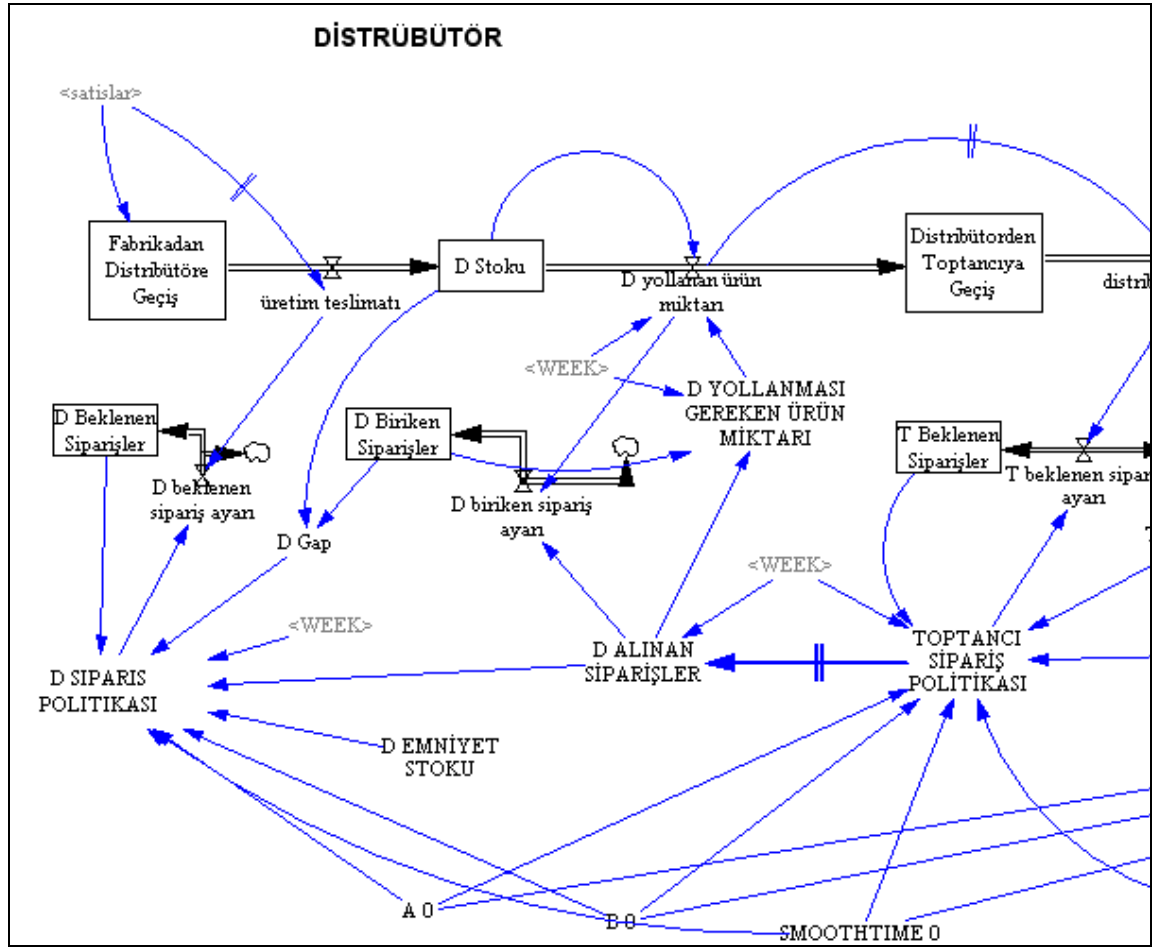
Distribütörden gelen siparişlere karşılık olarak üretim sistemi emniyet stoku değerini belli bir seviyenin altına düşürmeden biriken siparişleri karşılamaya çalışır. Satışlarla distribütöre taşınan malzeme burada depolanır. Aynı şekilde distribütörde emniyet stok seviyesini sabit tutarak toptancıdan gelen siparişleri karşılamaya çalışır. Aynı işlem perakendeci için de geçerlidir. Siparişler ve malzeme akışı esnasında ortaya çıkan gecikmeler talebi karşılamada ve stok seviyesini sabit tutmada problemlere sebep olurlar. Siparişlerde ve stoklarda dalgalanmalar görülür. Bunlarda aşırı stok veya bilinen tabirle yok satma durumlarını ortaya çıkarırlar. Modelin oluşturulmasında belirtilen bu unsurlar etkili olmuştur. Ayrıca Özbayrak ve diğerlerinin 2007 yılında yaptığı çalışmadan faydalanılmıştır [59].

Distribütör, toptancı ve perakendeci için oluşturulan model ortaktır. Her bir alt model birbirine sipariş emirleri ve yollanan malzemeler ile bağlanarak Tedarik Zinciri Modeli oluşturulmuştur.

Distribütöre gelen ürünler Üretim Teslimatı Akışı ile ifade edilmiştir. Üretim Teslimatı Akışı Satışlar Akışını geciktirilmiş şeklidir. Bu geciktirme teslimatı sırasında geçen süreyi ifade etmek için kullanılmıştır. Gecikmesi süresi 1 hafta olarak belirlenmiştir. Satışların başlangıç değeri ise 20 unite olarak alınmıştır.

$\text{üretim teslimatı} = \text{DELAY FIXED}(\text{satislar}, 1, 20)$

Units: Units/Week



Şekil 5.10. Distribütör Modeli

Üretim Teslimatı akışı D (Distribütör) Stoku birikimini artırır. D Yollanan Ürün akışı ise D Stoku birikimini azaltıcı yönde hareket eder. Siparişler ne kadar olursa olsun yollanan ürün miktarı stokta bulunan ürün sayısı ile sınırlıdır. Modelde Minimum fonksiyonu kullanılarak bu kavram ifade edilmiştir.

$D \text{ yollanan ürün miktarı} = \text{MIN}(D \text{ Stoku} / \text{WEEK}, D \text{ YOLLANMASI GEREKEN ÜRÜN MİKTARI})$

Units: Units/Week

Yollanması gereken ürün miktarı biriken siparişler ve alınan siparişlerin toplamıdır. Fakat stok seviyesindeki dalgalanmalar ve sistemde görülen gecikmelerden dolayı toptancıya yollanan ürün miktarı bu değerde olmaz.

Toptancıdan gelen talep *D Alınan Siparişler* değişkeni ile ifade edilmiştir. Bu *Toptancı Sipariş Politikasının* geciktirilmiş şeklidir. Geciktirme süresi 0.5 hafta olarak alınmıştır. Sipariş emirlerinde görülen gecikmeler bilgi gecikmesidir ve malzemelerin taşınmasında ortaya çıkan gecikmelerden daha kısadrlar. *D Alınan Siparişler* VENSIM yazılımında aşağıdaki gibi ifade edilmiştir.

$$D \text{ ALINAN SİPARİŞLER} = \text{DELAY FIXED}(\text{TOPTANCI SİPARİŞ POLİTİKASI}, 0.5 * \text{WEEK}, 20))$$

*Units: Units/Week*

*D Biriken Siparişler* birikimi, karşılanamayan talepleri ifade eder. Talebin karşılanamamasının sebebi stok seviyesinin yeterli olamamasıdır. Biriken siparişler *D Biriken Siparişler Ayarı* akışı ile değişmektedir. *Sipariş birikimi* yollanan ürün miktarı ile toptancıdan alınan siparişin ( talebin ) farkıdır.

*D gap* değişkeni *distribütör stok seviyesi* ile *biriken siparişlerin* farkıdır. Stok seviyesi belli bir değerde tutulmalıdır ve bu değer emniyet stoku seviyesidir. *D gap* ifadesi emniyet stok seviyesini sağlamak için kullanılır. Örnek verilirse; *D gap* değeri 10 birim farz edilsin. Emniyet stoku değeri ise 100 birim kabul edilsin. Bu durumda sipariş edilmesi gereken miktar 90 birim olur. Stok seviyesi sipariş birikiminden 10 birim fazladır ve biriken siparişler karşılandığı zaman stokta 10 birim kalır. Emniyet stoku seviyesini sağlamak için 90 birime ihtiyaç vardır. Bu durumun terside olabilir. *D gap* değeri negatif ise hem emniyet stoku seviyesini karşılamak hem de biriken siparişleri karşılamak için sipariş emri verilir.

*D Sipariş Politikası* ifadesi distribütör için fabrikadan sipariş edilecek ürünleri ifade eder. *Biriken siparişler*, *emniyet stoku seviyesi* ve mevcut stok seviyesine göre bir sipariş politikası oluşturulur. Burada önemli olan nokta, beklenen siparişlerin de göz önüne alınması gerektiğidir. Beklenen siparişler daha önceden sipariş edilmiş fakat henüz teslim alınmamış siparişlerdir. Bu yüzden beklenen

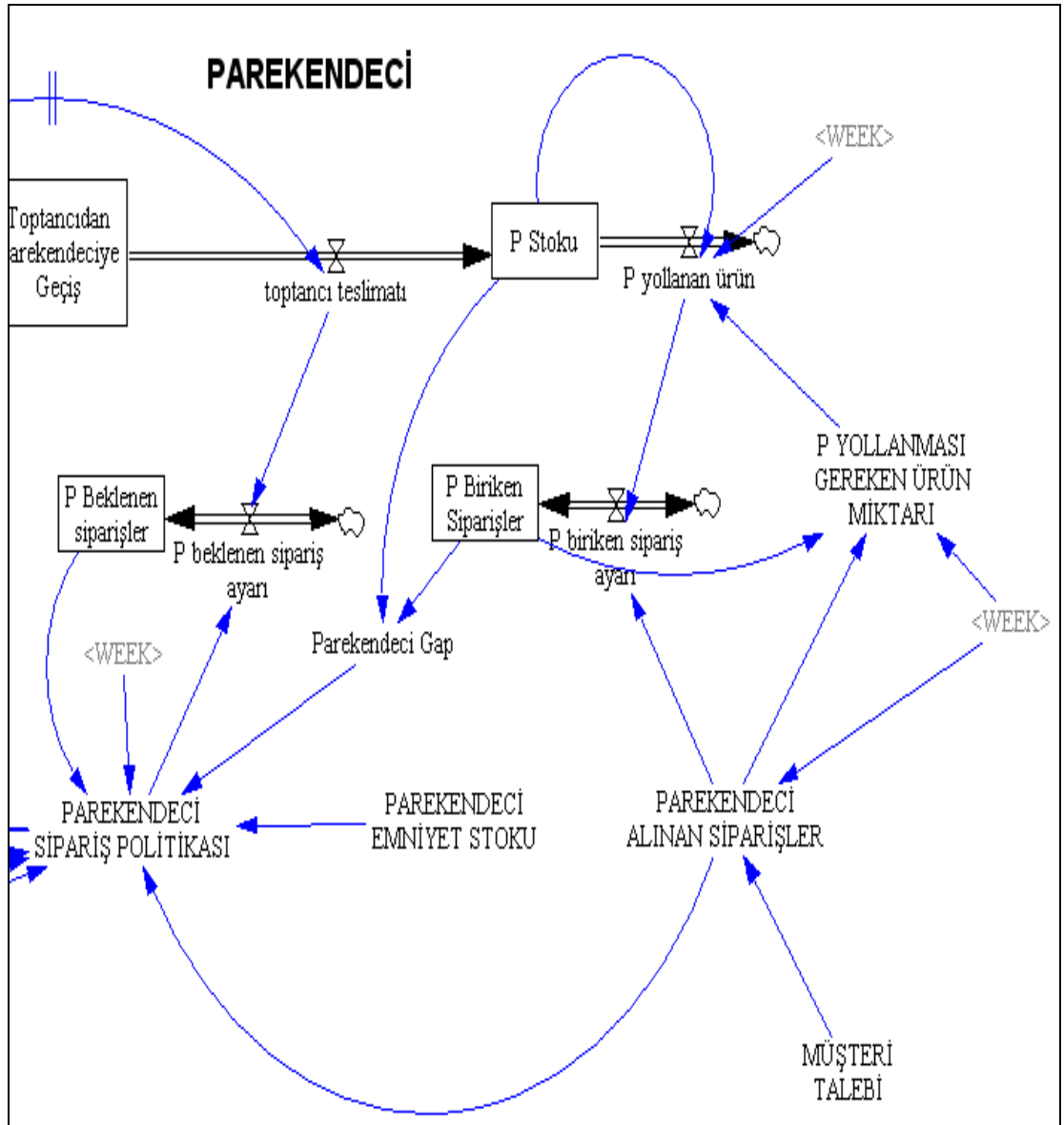
siparişler yeni verilecek siparişlerden çıkarılmalıdırlar. *D Sipariş Politikası* oluşturulurken Stermann'ın 1989 tarihli kaynağından faydalanılmıştır [60].

$$D \text{ SIPARIS POLITIKASI} = \text{MAX}(0, \text{SMOOTH}(D \text{ ALINAN SİPARİŞLER}, \text{SMOOTH TIME}) + A * (D \text{ EMNİYET STOKU/WEEK} - (D \text{ Gap /WEEK}) - B * D \text{ Beklenen Siparişler/WEEK}))$$

*Units: Units/Week*

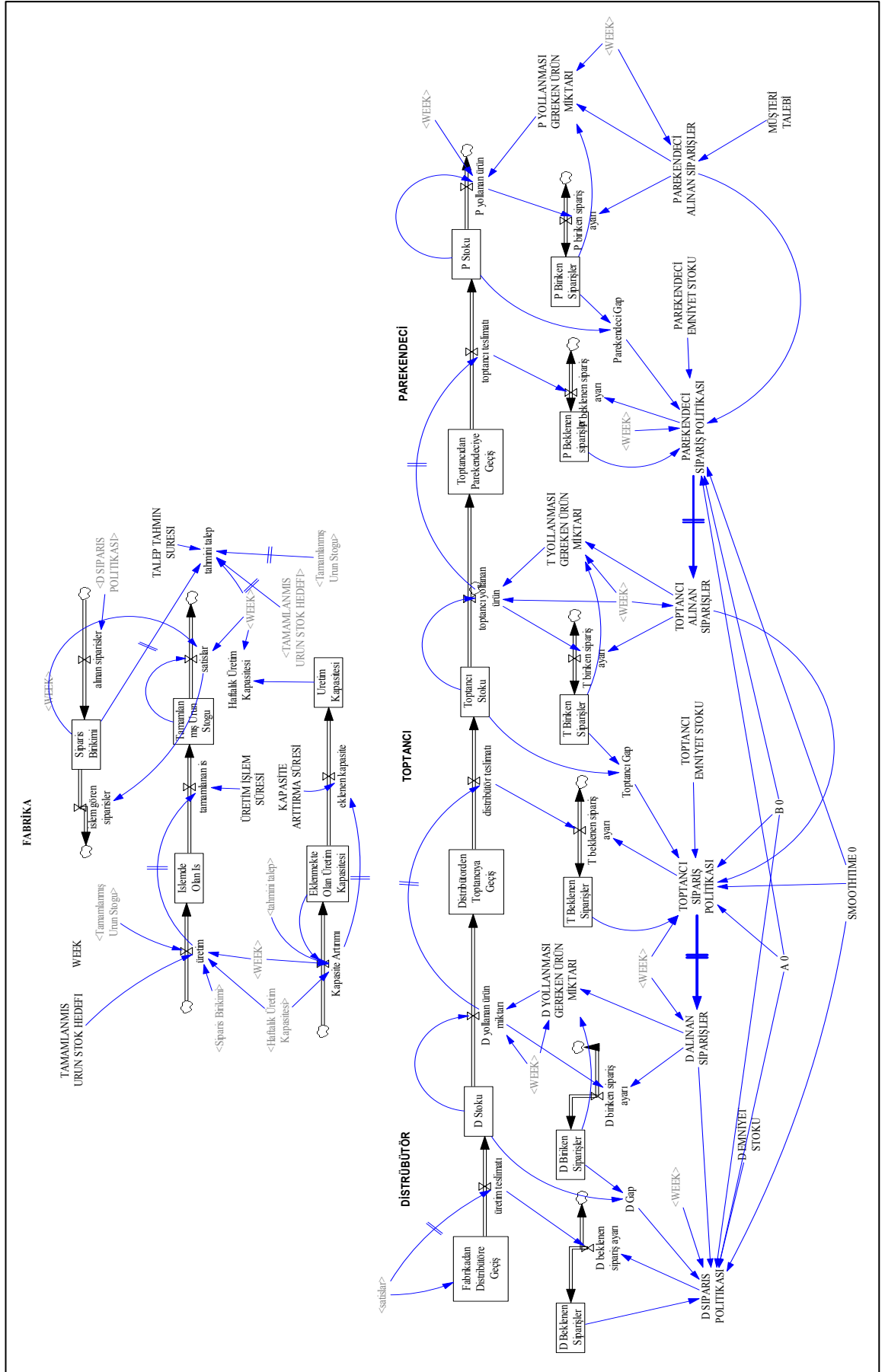
Maksimum fonksiyonu oluşabilecek negatif değerleri engellemek için kullanılmıştır. Sipariş verme politikası oluşturulurken *emniyet stoku* ve *alınan siparişler* göz önüne alınmıştır. *Emniyet stoku* değerinden *D gap* değeri çıkarılarak emniyet stok seviyesi korunmak istenmiştir. Smooth fonksiyonu belli bir zaman aralığı için kullanılarak gerekli sipariş miktarı belirlenmiştir. Ayrıca beklenen siparişler, verilecek siparişlerden çıkarılarak daha önceden sipariş verilen ve teslimatı gerçekleşmeyen siparişler göz önüne alınmıştır. İfadeye görülen A ve B değerleri tahmin parametreleridir. Modelde bulunan gecikmelerin etkilerden dolayı bu sabitler ifadeye kullanılmıştır. A ve B sabitleri sırasıyla 0.26 ve 0.088 olarak, Smoothtime değeri ise 1 hafta olarak alınmıştır [61]. Emniyet stoku değeri 100 ünite olarak belirlenmiştir.

Distribütör için oluşturulan bu model toptancı ve perakendeci için de aynıdır. Yollanan ürün miktarı ve alınan siparişlerle birbirlerine bağlanmışlardır. Perakendeci modelinde müşteri talebi sipariş emridir. Haftalık 20 ünite olarak belirlenmiştir. Başlangıçta sistem dengededir. 40. haftada müşteri talebinde % 50 lik bir artışla haftalık 30 birime yükseldiği öngörülmüştür. Şekil 5.11. Perakendeci Modeli görülmektedir.



Şekil 5.11. Perakendeci Modeli

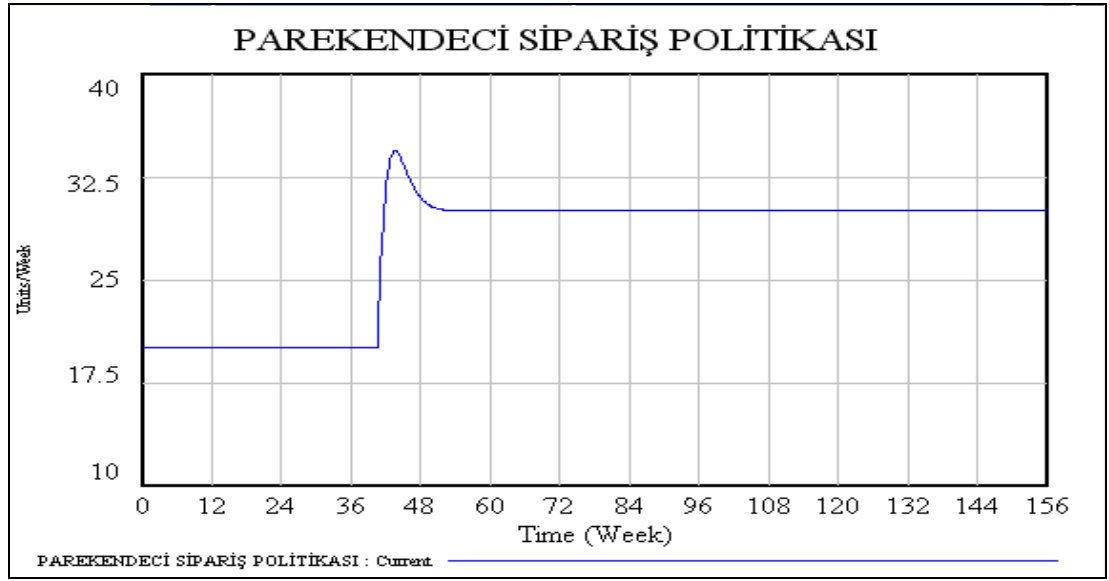
Hazırlanan Tedarik Zinciri Modelindeki stok seviyelerindeki değişimler, sipariş birikimleri, sipariş politikaları VENSIM yazılımında görülebilir. Sistem mevcut bulunan bilgi ve malzeme aktarımlarında ortaya çıkan gecikmelerin neden olduğu sorunlar incelenebilir. Sistem Dinamiği yaklaşımı ile sorunlara sebep olan nedenlere yerel çözümler bulmak yerine sistemin tümünün hareketi incelenerek problemleri ortadan kaldıracak çözümler üretilebilir. Şekil 5.12. de Tedarik Zinciri Modelinin tamamı görülmektedir.



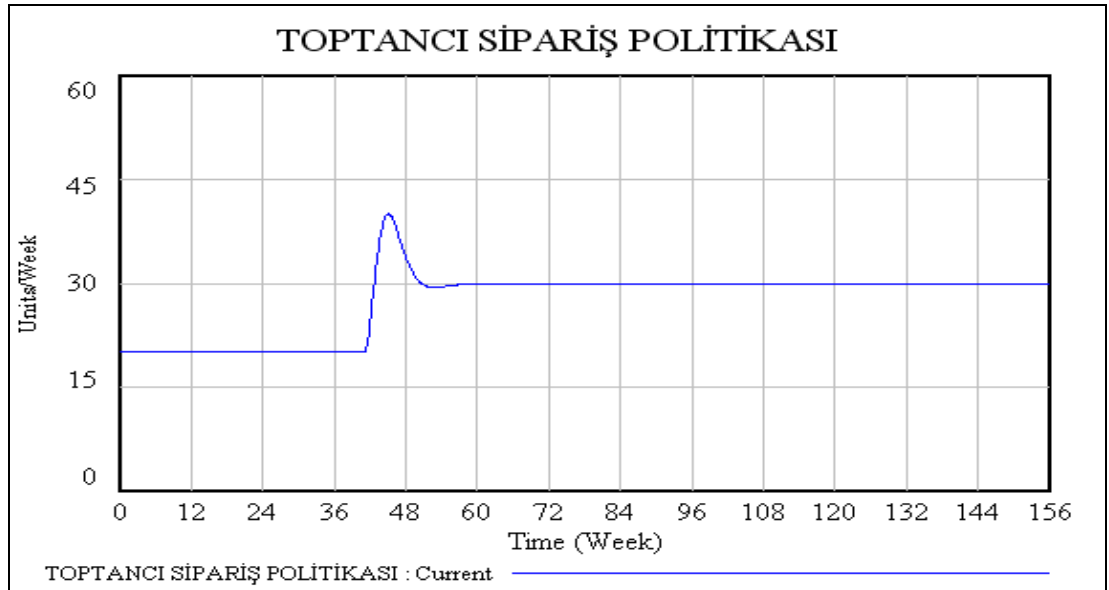
Şekil 5.12. Tedarik Zinciri Sistem Dinamiği Modeli

### 5.6.3. Tedarik Zinciri Modeli Sonuçları

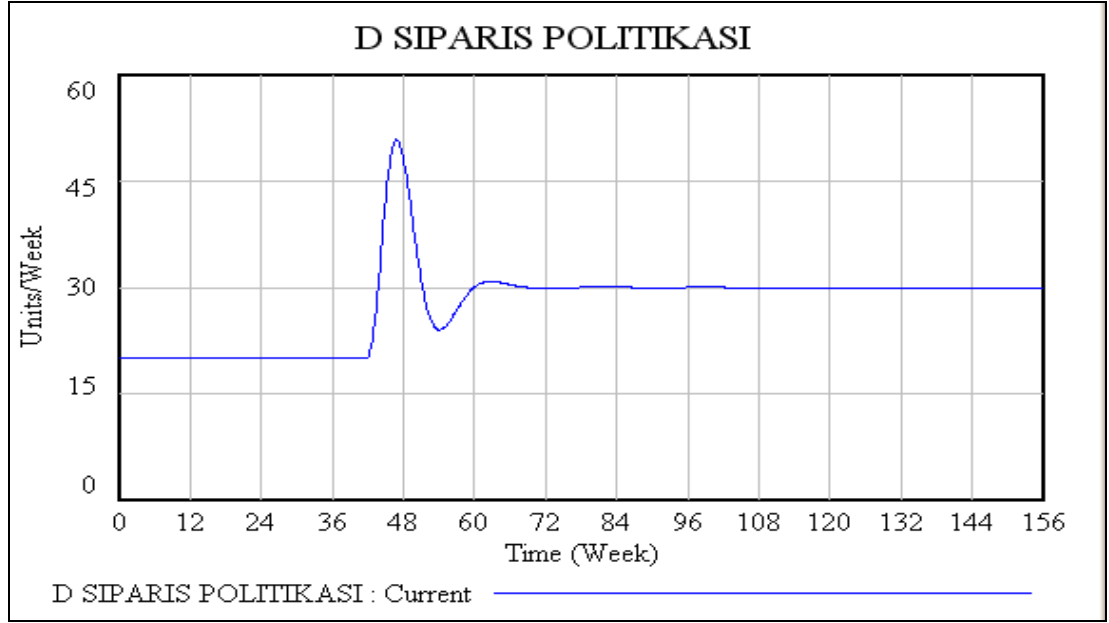
Hazırlanan modelde VENSIM Yazılımının sunduğu olanaklardan faydalanarak tedarik zinciri problemleri incelenebilir. Sipariş politikalarında görülen kamçı etkisi oluşturulan modelde ortaya çıkmıştır. Malzeme ve bilgi akışında var olan gecikmeler kamçı etkisinin ortaya çıkmasına sebep olur. Ortaya çıkan kamçı etkileri VENSIM Yazılımında aşağıda görülen grafiklerdeki gibi olmuştur.



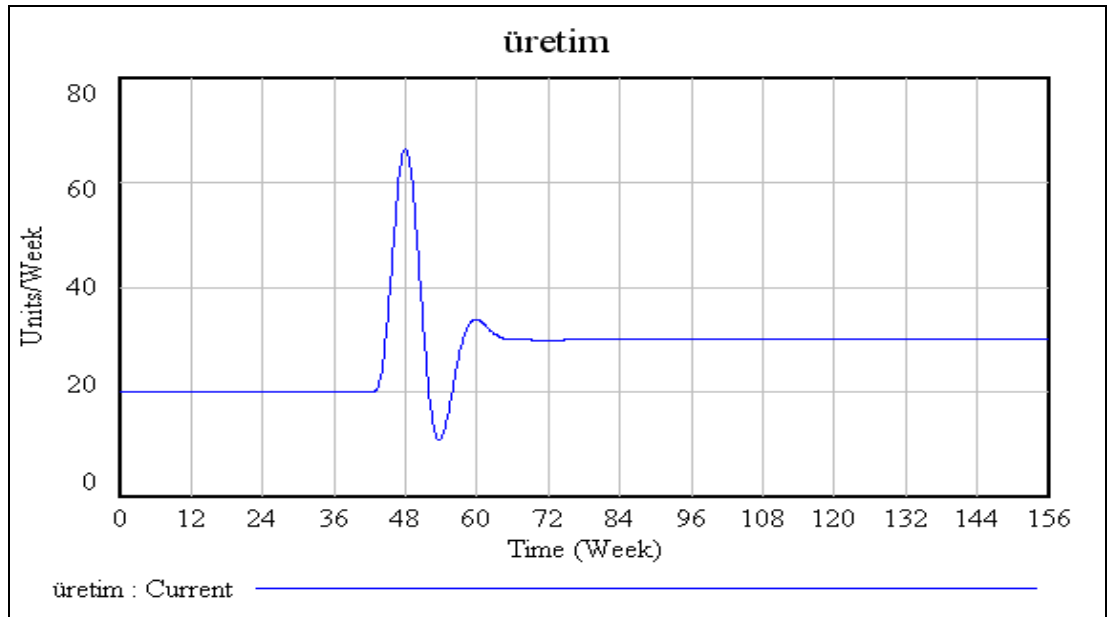
Şekil 5.13. Perakendeci Sipariş Politikası



Şekil 5.14. Toptancı Sipariş Politikası



Şekil 5.15. Distribütör Sipariş Politikası

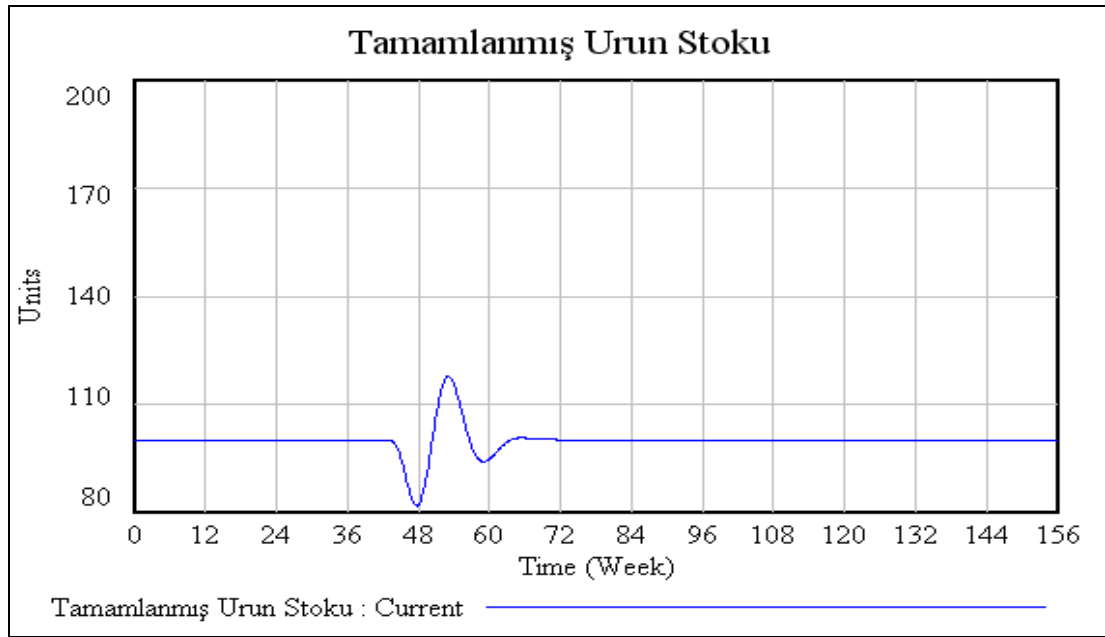


Şekil 5.16. Üretim

Müşteri talebinde görülen dalgalanma sipariş politikasını etkilemiştir. Sipariş politikaları grafiklerinde görüldüğü üzere perakendeciden üretime gelinceye kadar oluşan dalgalanma artmıştır. Bu kamçı etkisi probleminin özelliğidir. Bu davranışın esas kaynağı bilgi çarpıtılmasıdır. Metters' a göre ise, kırbaç etkisinin sebeplerinin başında bilginin tedarik zinciri üyeleri arasında ilerlerken çarpıtılması gelmektedir. Metters yaptığı çalışmada işletme içi iletişimde oluşacak problemlerin, bilginin

transferi esnasında oluşan zaman kayıpları ile birleştğinde etkinin temelini oluşturduğu üzerinde durmaktadır [62].

Kamçı etkisi sipariş politikalarından başka stok seviyelerinde de görülebilir. İşletmelerde bilgi çarpıtmasından kaynaklanan aşırı stoklar ek maliyet demektir. Veya tam tersi yok satma denilen ve müşteri memnuniyetini etkileyen talebi karşılayamama durumu da ortaya çıkabilir. Şekil 5.17. da Üretim safhasında bulunan tamamlanmış ürün stoku görülmektedir.

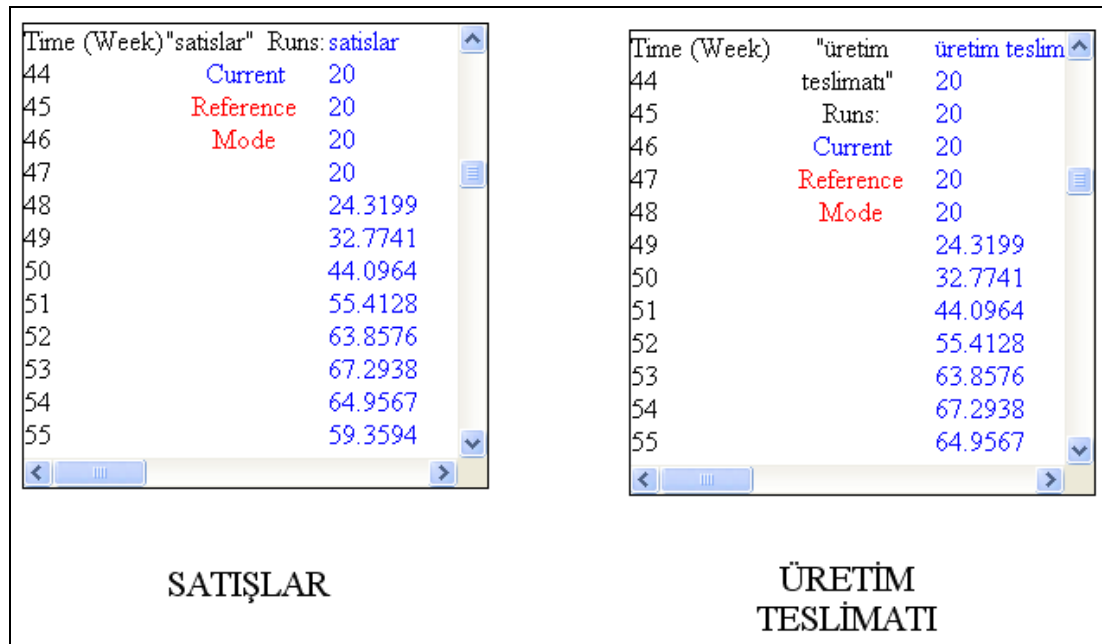


Şekil 5.17. Tamamlanmış Ürün Stoku

Şekil 5.17 da görüldüğü gibi Stok seviyesinde talebi karşılayabilmek için azalma olmuş. Artan talebi karşılamak için verilen siparişlerle stok aşırı yükselmiş ve emniyet stoku seviyesini aşmıştır. İlerleyen haftalarda sistem dengeye oturmuş ve stok seviyesi emniyet stoku seviyesine gelmiştir.

VENSIM Yazılımı kullanılarak malzeme akışında yaşanan gecikmelerde gözlemlenebilir. VENSIM Yazılımının Input -Output Object özelliği kullanılarak bir kullanıcı arayüzü oluşturulabilir. Üretimde tamamlanmış ürün stokundan gelen satışlar ile distribütörün satın alınan malzemeyi teslim alması örnek verilebilir. Malzemelerin taşınma süresi 1 hafta olarak belirlenmiştir. Buna göre 48. haftada satılan mallar 49. haftada distribütöre ulaşmalıdır. Şekil 5.18. de satışlar ile üretim

teslimi arasındaki gecikme görülmektedir. 48. haftadaki 24.3199 units/week satışlar değeri üretim teslimatında 49. haftada görülmektedir.



Şekil 5.18. Satışlar ve Üretim Teslimatı Arasındaki Gecikme

| Time (Week) | "distribütör teslimatı" | distribütör teslimatı | -- | "TOPTANCI SİPARİŞ POLİTİKASI" | TOPTANCI SİPARİŞ POLİTİKASI |
|-------------|-------------------------|-----------------------|----|-------------------------------|-----------------------------|
| 45          | Runs:                   | 20                    |    | Runs:                         | 35.9784                     |
| 46          | Current                 | 27.7585               |    | Current                       | 43.634                      |
| 47          | Reference               | 35.9784               |    | Reference                     | 47.3129                     |
| 48          | Mode                    | 43.634                |    | Mode                          | 47.1781                     |
| 49          |                         | 47.3129               |    |                               | 43.7598                     |
| 50          |                         | 32.2067               |    |                               | 38.6589                     |
| 51          |                         | 27.2213               |    |                               | 36.8072                     |
| 52          |                         | 30.7313               |    |                               | 36.1374                     |
| 53          |                         | 39.1797               |    |                               | 34.8507                     |
| 54          |                         | 49.441                |    |                               | 31.8988                     |
| 55          |                         | 51.0056               |    |                               | 26.8964                     |
| 56          |                         | 37.8419               |    |                               | 21.8777                     |
| 57          |                         | 29.0827               |    |                               | 20.2239                     |
| 58          |                         | 22.6821               |    |                               | 20.7555                     |
| 59          |                         | 20.5198               |    |                               | 22.8116                     |
| 60          |                         | 20.8643               |    |                               | 25.3247                     |
| 61          |                         | 22.8516               |    |                               | 27.6749                     |
| 62          |                         | 25.3395               |    |                               | 29.473                      |

Şekil 5.19. Sipariş Politikası ve Sipariş Teslimatı Karşılaştırması

Başka bir sonuç ise sipariş politikası ile teslim alınan siparişlerin arasındaki ilişkinin gözlemlenmesidir. Sistem dengeye kavuştuğunda bu iki değer birbirine yaklaşır. Şekil 5.19 de iki değer toptancı için karşılaştırılması görülmektedir. Müşteri talebinin değiştiği 40. haftadan sonra 44.haftadan itibaren denge bozulmaya başlamış, 65. haftada tekrar dengeye gelmiştir.

Birbirine bağılı dinamik değişkenlerden oluşan tedarik zinciri sistem Dinamiğı simülasyon modellemesi için ideal bir örnektir. Sistem Dinamiğı yaklaşımı ile VENSIM’de oluşturulan Tedarik Zinciri Modeli bir tedarik zincirinin yapısını ve tedarik zincirinde karşılaşılabilecek bazı problemleri göstermiştir. Problemlerin azaltılması yolunda bir öngörü sağlamıştır.

## 6. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Yapılan bu çalışmada örnek Sistem Dinamiği problemleri VENSIM yazılımı ile modellenmiş, her bir sistemin işleyişi ve yapısı elde edilmiştir. Bunun için Av-Avcı Nüfus etkileşimi modeli VENSIM yazılımında modellenerek yazılımın kullanımı anlatılmıştır. İkinci örnek olarak çarpışma emniyetini belirleyen çarpışma testlerinden bir çalışma yapılmıştır. Üçüncü örnek olarak ise bir malzeme tedarik zinciri Sistem Dinamiği kapsamında modellenmiştir.

Av-Avcı Nüfus Etkileşimi modelinde VENSIM yazılımının genel yapı itibarı ile kullanımı açıklanmıştır. Böylece bir ekosistemde bulunan, doğum, ölüm, nüfus taşıma kapasitesi ve avlanma gibi etmenlerden etkilenen av ve avcı nüfusu sisteminin, birikim ve akış diyagramları kullanılarak nasıl oluşturulduğu, dinamik değişkenler arasındaki matematiksel bağlantılar grafiksel ve sayısal olarak elde edilmiştir.

Çarpışma testi probleminde ise Sistem Dinamiği ile fiziksel bir sistemin modellenmesi irdelenmiştir. Sabit bir hızla rijit bir bariyere çarpan aracın incelenen parçasında ortaya çıkan yavaşlama ivmesi, çarpışma testinden önce yaklaşık olarak hesaplanmıştır. VENSIM yazılımında ortaya çıkan sonuç ile daha önceden yapılan bu çalışmada elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmış ve aynı yavaşlama ivmesi sonuçları elde edilmiştir.

Son uygulama olarak malzeme tedarik zinciri yine VENSIM yazılımı ile modellenerek, tedarik zincirinde ortaya çıkan problemler gözlemlenmiştir. Modelde, malzeme ve bilgi akışı modellenmiştir. Bir işletmede, belirli bir üretim kapasitesinde üretilen ürünün sırasıyla üretim, distribütör, toptancı, perakendeci ve son müşteri arasındaki ilerleyişi ve bu ilerleyiş sırasında ortaya çıkan gecikmeler, talebi karşılamak ve stok seviyesini belli bir değerin altına düşürmemek için verilen siparişlerin iletilmesinde yaşanan bilgi gecikmeleri hazırlanan modelde gözönüne alınmıştır. Her bir birimin kendi durumunu kurtarmak için hareket ettiği ve oluşan iletişim bozukluğu ile ortaya çıkan aşırı stok, yok satma ve kamçı etkisi problemleri simülasyon sonucu görülmüştür. Tedarik zincirlerinde çokca görülen bu problemler

ve çıkan bu sonuçlarla, Sistem Dinamiği yaklaşımının, sistemin karakteristiklerinin resminin tümünü gösterdiği görülmüştür.

Sistem Dinamiği yaklaşımı ile hazırlanan modeller karmaşık sistemlerin dinamik yapısının incelenmesine ve davranışlarının analiz edilmesine olanak sağladığı verilen örneklerde görülmüştür. Tedarik zinciri örneğinde basit bir tedarik zincirinin işleyişi incelenmiş ve bu zincirin işleyişinde ortaya çıkan problemler gözlenmiştir. Bu model aşağıda verilen önerilerle daha iyi sonuç verebilir.

1- Üretim ve dağıtım sistemlerinin daha ayrıntılı olarak modellenmesi ile daha iyi sonuç elde edilebilir.

2- Üretim kapasitesini etkileyen iş gücü, motivasyon, ekipman kapasitesi gibi değişkenler modele eklenebilir.

3- Tedarik zincirinin davranışı hakkında daha iyi bilgi sahibi olmak için gerçekte mevcut bir tedarik zinciri ele alınarak çıkan sonuçlar gerçek bilgilerle karşılaştırılabilir. Modelin tutarlılığı da bu karşılaştırma ile daha iyi anlaşılabilir.

Sonuç olarak, matematiksel olarak çok sayıda diferansiyel denklemlerle ifade edilebilen fiziksel, biyolojik, sosyo-ekonomik karmaşık sistemlerin, iç dinamiklerine bağlı olarak uzun vadede davranışlarını tesbit etmek çok zordur. Buna karşılık Sistem Dinamiği yaklaşımı bu konuda kullanıcıya kolaylıklar sağlamaktadır. Sistem dinamiğiyle bu sistemlerin simüle edilmesi durumunda, diferansiyel denklemlerin sonucunda ortaya çıkan dinamiklerin, tespit edilmesi mümkün ve görece çok daha kolay olduğu görülmüştür.

## KAYNAKLAR DİZİNİ

- [ 1 ]. [www.systemdynamics.org](http://www.systemdynamics.org) , 2008.
- [ 2 ]. Wikipedia. <http://en.wikipedia.org/wiki/systemthinking>, 2008.
- [ 3 ]. J.W. Forrester. “*Industrial Dynamics*”, 1961.
- [ 4 ]. Atçı ve Didari. “*Öğrenen Organizasyonun Oluşturulmasında Bir Araç Olarak Uzel Strateji Dinamikleri Laboratuvarı*”  
<http://www.kalder.org/genel/14kongresunumlar/2D%20%20SUAT%20DI>  
DARI.doc, 2008
- [ 5 ]. Kirkwood, C. “*System Dynamics Methods: A Quick Introduction*” . College of Business Arizona State University. 1998.
- [ 6 ]. [www.pegasus.com/botgraphs.html](http://www.pegasus.com/botgraphs.html), 2008.
- [ 7 ]. Richardson, P. “*Problems with causal-loop diagrams*” System Dynamics Review 2 (no. 2, Summer 1986):158-170 ISSN 0883-7066. 1986.
- [ 8 ]. Levin, Roberts ve Hirsch, The Persistent Poppv “*A Computer-aided Search for Heroin Police*”, Cambridge, MA Ballinger Publishing Co. 1974.
- [ 9 ]. Meadows ve Donella H. “*The Limits to Growth*”, 205 sayfa. Universe Books, 381 Park Avenue South, New York, NY 10016. 1972.
- [ 10 ]. Roberts, N. Mit roadmaps “*Introduction to delays*” . 2001
- [ 11 ]. Glick ve Duhon. “*Generic Structures: S-shaped Growth*”.1994

- [ 12 ]. Martin, L. “*Mistakes and Misunderstandings: Table Functions*” theMIT System Dynamics in Education Project . 1997.
- [ 13 ]. VENSİM PLE. Vensim Personal Learning Edition. 1999.
- [ 14 ]. Hilman. National Computational Science Institute. VENSİM PLE. 2008.
- [ 15 ]. Globalchange.<http://www.globalchange.umich.edu/globalchange1/current/lectures/predation/predation.html> 2008.
- [ 16 ]. Crashworthiness. “*Vehicle Crashworthiness And Occupant Protection*”. American Iron and Steel Institute Town Center Southfield, Michigan 48075.2000.2006.
- [ 17 ]. “*Ülkemizde Emniyet Kemeri Kullanımı*”. T.C. Emniyet Genel Müdürlüğü Trafik Hizmetleri Başkanlığı Trafik Araştırma Merkezi Müdürlüğü Yayınları, Ankara,1999.
- [ 18 ]. Hancı, H. “*Emniyet Kemeri Kullanımı*”.  
<http://trafiklive.azbuz.com/readArticle.jsp?objectID=000000002814968>.  
2008
- [ 19 ]. T.C. Karayolu İyileştirmesi ve Trafik Güvenliği (KİTĞİ) Trafik Güvenliği Projesi, Türkiye İçin Ulusal Trafik Güvenliği Programı Ana Raporu. 2001.
- [ 20 ]. Boztaş ve Özcebe. “*Trafik Kazası Yaralanmalarında İkincil Korunma: Emniyet Kemeri*” <http://www.ttb.org.tr/STED/sted0505/trafik.pdf>, 2008.
- [ 21 ]. F.ÇAKIR. “*Şasi*”  
[http://www.obitet.gazi.edu.tr/obitet/sasi\\_ve\\_guc\\_aktarma\\_organlari/sasi\\_ve\\_karoser\\_.htm](http://www.obitet.gazi.edu.tr/obitet/sasi_ve_guc_aktarma_organlari/sasi_ve_karoser_.htm), 2008.

- [ 22 ]. “Auto Body” <http://everything2.com/index.pl?node=auto%20body>, 2008
  
- [ 23 ]. Ş.Karagöz, Y.Keskin, C. Oral “*Malzeme Bilimlerinde Gelişmeler Ve Modern Malzemelerin Ekonom Dekiroölü* ”  
<http://arsiv.mmo.org.tr/pdf/10665.pdf> , 2008.
  
- [ 24 ]. Technical Whitepaper: Crashworthiness and Crash Avoidance  
<http://www.autoaluminum.org/documents/whitepapers/crashworthiness.pdf>, 2008.
  
- [ 25 ]. Anders, L. “*How does Euro NCAP results correlate to real life injury risks - a paired comparison study of CAR-TO-CAR CRASHES*” Swedish National Road Administration and Karolinska Institutet, Sweden 2008.
  
- [ 26 ]. “Safe ride news”  
[http://www.saferidenews.com/html/Side\\_Impact\\_NCAPH\\_testing.html](http://www.saferidenews.com/html/Side_Impact_NCAPH_testing.html), 2008.
  
- [ 27 ]. Stucki, Fessahaie, Hollowell. “*Determination Of Frontal Offset Test Conditions Based On Crash Data*” NHTSA R&DISSI, Inc.United States Paper Number 98-S1-O-02. 1999.
  
- [ 28 ]. Side Impact Crashworthiness Evaluation Crash Test Protocol (VersionV). Insurance Institute for Highway Safety. 2008
  
- [ 29 ]. Rovid and Melegh .“*Modelling of road vehicle body deformation using EES vatues detection*” Department of Automobiles, Budapest University of Technology and Economics, Budapest, Hungary. 2003
  
- [ 30 ]. Huang, M. “*Vehicle Crush Mechanics*”, 2002.
  
- [ 31 ]. Wikipedia. “*Viskoelastiklik*”. <http://en.wikipedia.org/wiki/Viscoelasticity> 2008.

- [ 32 ]. Christopher, M. “*Logistics and supply chain management*”. Prentice Hall, İngiltere, 0273630490, 1998
- [ 33 ]. Swaminathan, Jayashankar M. “*Quantitative analysis of emerging practices in supply chains*”, 1996.
- [ 34 ]. Lee, and Billington. “*The Evolution of Supply-Chain-Management Models and Practice at Hewlett-Packard*”. Interfaces 25 (pp.42-63): 5 September-October, 1995.
- [ 35 ]. Ganeshan ve Harrison. “*An Introduction to Supply Chain Management*”. Penn State University. URL: [http:// silmaril.smeal.psu.edu/ misc/ supply\\_chain\\_intro.html](http://silmaril.smeal.psu.edu/misc/supply_chain_intro.html). 1995.
- [ 36 ]. “*Tedarik Zinciri Yönetimi Nedir?*” [http://enm.blogcu.com/tedarik-zinciri-yonetimi-nedir\\_1021039.html](http://enm.blogcu.com/tedarik-zinciri-yonetimi-nedir_1021039.html) , 2008.
- [ 37 ]. Müftüoğlu, T. “*İşletme İktisadi*”, Turhan Kitapevi , s 384-385. 1994.
- [ 38 ]. Bayhan, M. “*Tedarik zinciri yönetimi ve bir uygulama*” .Pamukkale Üniversitesi Yüksek Lisans Tezi. 2004
- [ 39 ]. Akmut, Aktas ve Aykaç. “*Girisimciler için işletme Yönetimi*” Ankara, Gazi Kitapevi, s.158. 2003
- [ 40 ]. Ataman, G. “*Tedarik Zinciri ve Yönetimi: Degisim Mühendisligi ve Dış Kaynaklardan Yararlanma İlişkisi Üzerine Bir irdeleme*”, Marmara Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi, Cilt 5, Sayı 17, 2002

- [ 41 ]. Paksoy, T., Altiparmak, F. “*Dağıtım Ağlarının Tasarımı Ve Eniyilemesi Kapsamında Tedarik Zinciri Ve Lojistik Yönetimine Bir Bakış: Son Gelişmeler Ve Genel Durum*”, Yıldız Teknik Üniversitesi Dergisi 2003/4, 149-167. 2003
- [ 42 ]. Metz, J. .”*Demystifying Supply Chain Management.. Supply Chain Management Review*”. Winter 1998
- [ 43 ]. ROSS, D.F. “Competing Through Supply Chain Management: Creating Market-Winning Strategies Through Supply Chain Partnerships” Kluwer Academic Publishers, Boston. 1998.
- [ 44 ]. Sengupta ve Turnbull. “*Seamless Opmization of the Entire Supply Chain.*” IIE Solutions. Volume 28(10). pp.28-33. 1996
- [ 45 ]. Özdemir. Erciyes Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi, Sayı: 23, ss. 87-96. “*Tedarik Zinciri Yönetiminin Gelişimi, Süreçleri ve Yararları*”. Temmuz-Aralık 2004.
- [ 46 ]. Küçükdeniz. “*Tedarik Zinciri Yönetiminde Bulanık Modelleme*”. Danışman: Doç.Dr. Şakir Esnaf . Yök Tez Merkezi Tez No: 184454. 2004
- [ 47 ]. Giannoccaro, I., Pontrandolfo, P. “*Models For Supply Chain Management: A Taxonomy*”. Twelfth annual conference of the production and operations management society, Mart 30-Nisan 2 2001, Orlando FL.
- [ 48 ]. “Tedarik Zinciri Yönetimine Giriş”.  
[http://web.sakarya.edu.tr/~ukula/ders1\\_tzy.pdf](http://web.sakarya.edu.tr/~ukula/ders1_tzy.pdf) 2008.
- [ 49 ]. Paksoy, T., Keskin, E.“*Tedarikçi Zincirinde Bilgi Çarpıtmasının Etkisi: Kırbaç Etkisi*”, Selçuk Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi, Sayı: 15, pp 483-496. 2006

- [ 50 ]. Karayalçın, İ. Endüstri Mühendisliği Ve Üretim Yönetimi El Kitabı, 1. Baskı, Çağlayan Basımevi, İstanbul. 1987.
- [ 51 ]. Lee, H. L., Padmanabhan, P., Whang, S. “*The Bullwhip Effect In Supply Chains*”, Sloan Management Review 38 (3),93-102. 1997.
- [ 52 ]. Dejonckheere, J., Disney, S. M., Lambrecht, M. R., Towill, D. R. “*Measuring The Bullwhip Effect: A Control Theoretic Approach To Analyse Forecasting Induced Bullwhip In Order-Up-To Policies*”, European Journal of Operational Research 147, 567-590. 2003.
- [ 53 ]. Towill D.R., Mc Cullen, P. “The impact of an agile manufacturing programme on supply chain dynamics”, International Journal Logistic Management 10 (1), 83-96. 1999.
- [ 54 ]. Lee, Y. H., Kim, S. H. “*Production-Distribution Planning In Supply Chain Considering Capacity Constraints*”, Computers and Industrial Engineering, Vol. 43, Issue 1-2, pp 169-190. 2002.
- [ 55 ]. J. A. Joines, R. R. Barton, K. Kang, and P. A. Proceedings of the 2000 Winter Simulation Conference Fishwick, eds. “*System Dynamics Modelling In Supply Chain Management: Research Review*” Bernhard J. Angerhofer. Marios C. Angelides Department of Information Systems and Computing Brunel University Uxbridge, Middlesex UB8 3PH, UK. 2000.
- [ 56 ]. Stevens, G. C. “*Integrating the Supply Chain*”. International Journal of Physical Distribution & Logistics Management 19 (8):3-8. 1989.
- [ 57 ]. Wild R. “*Production and operations management*”, 4th ed. Cassell 1991.

- [ 58 ]. Chomiakow. “*A Generic Pattern for Modeling Manufacturing Companies*” Daniel Chomiakow Industrie seminar der Universität MannheimSchloss 68131 Mannheim,Germany.The 2007 International Conference of the System Dynamics Society and 50th Anniversay Celebration July 29 – August 2, 2007, Boston, Massachusetts, USA. 2007.
  
- [ 59 ]. Ozbayrak,. Papadopoulo, Akgun. “*Systems Dynamics Modelling Of A Manufacturing Supply Chain System*” Simulation Modelling Practice and Theory 15 1338–1355 Science Direct. 2007.
  
- [ 60 ]. Sterman J. D. “*Modeling Managerial Behavior: Misperceptions of Feedback in aDynamic Decision Making Experiment*”. Management Science, 35(3), pp 321-339, 1989
  
- [ 61 ]. Yogesh. “*Information Visibility And Its Effect On Supply Chain Dynamics, Information Visibility And Its Effect On Supply Chain Dynamics.*”Submitted to the Department of Mechanical Engineering on May 8, 2000 in partial fulfillment of the requirements for the Degree of Master of Science. 2000.
  
- [ 62 ]. Metters, R. “*Quantifying The Bullwhip Effect In Supply Chains*”,Journal Of Operations Management 15 (2), 89-100. 2002

## ÖZGEÇMİŞ

10.06.1981 yılında Bursa’da doğdu. İlköğrenimine Bursa Hürriyet İlkokulunda 1988-1990 yılları arasında Bursa’da devam etti. 1991-1992 yıllarında Çankırı Güneş İlkokulunda ilköğrenimini tamamladı. Orta öğrenimine 1993 yılında Çankırı Anadolu Lisesinde başladıktan sonra 1994 - 1999 yıllarında ortaöğrenim ve liseyi Beşiktaş Atatürk Anadolu Lisesinde tamamladı. 2000 yılında Sakarya Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünde lisans eğitime başladı. 2004 yılında mezun oldu. Ağustos 2005’de Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Tasarım ve İmalat Mühendisliği Ana Bilim Dalında yüksek lisan eğitime başladı ve halen burda eğitime devam etmektedir.