

**ANKARA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**PLASTİK VE BİYOKÜTLE ATIKLARININ PİROLİZ MEKANİZMALARININ  
KESİKLİ ZAMAN MODELLERİYLE BELİRLENMESİ**

**Hilal TANIKER SARI**

**KİMYA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

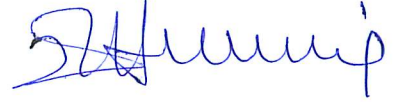
**ANKARA  
2017**

**Her hakkı saklıdır**

## TEZ ONAYI

Hilal TANIKER SARI tarafından hazırlanan “**Plastik ve Biyokütle Atıklarının Piroliz Mekanizmalarının Kesikli Zaman Modelleriyle Belirlenmesi**” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından 16.08.2017 tarihinde oy birliği ile Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı’nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

**Danışman:** Yrd. Doç. Dr. Emir Hüseyin ŞİMŞEK



**Jüri Üyeleri :**

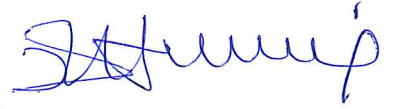
**Başkan :** Prof. Dr. Nurşen ALTUNTAŞ ÖZTAŞ  
Hacettepe Üniversitesi, Fen Fakültesi, Kimya Bölümü



**Üye :** Prof. Dr. Yahya SUYADAL  
Ankara Üniversitesi, Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı



**Üye :** Yrd. Doç. Dr. Emir Hüseyin ŞİMŞEK  
Ankara Üniversitesi, Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı



**Yukarıdaki sonucu onaylarım**

**Prof. Dr. Atila YETİŞEMİYEN**  
Enstitü Müdürü

## ETİK

Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez içindeki bütün bilgilerin doğru ve tam olduğunu, bilgilerin üretilmesi aşamasında bilimsel etiğe uygun davrandığımı, yararlandığım bütün kaynakları atık yaparak belirttiğimi beyan ederim.

16.08.2017



Hilal TANIKER SARI

## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### PLASTİK VE BİYOKÜTLE ATIKLARININ PİROLİZ MEKANİZMALARININ KESİKLİ ZAMAN MODELLERİYLE BELİRLENMESİ

Hilal TANIKER SARI

Ankara Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Emir Hüseyin ŞİMŞEK

Bu tez çalışmasında plastik ve biyokütle atıklarının pirolizi için gaz ve sıvı ürünlerinin oluşum mekanizmaları, reaksiyon hız sabitleri ve reaksiyon mertebeleri belirlenmiştir. Tersinir ve tersinmez tepkime basamakları içeren 5 farklı tepkime mekanizması önerilmiş olup 9 farklı plastik ve 5 farklı biyokütle atığın piroliz ile ısıl bozunması sonucu elde edilen deneysel veriler kullanılarak en iyi mekanizma belirlenmiştir. Çalışmanın birinci bölümünde MATLAB (ver. 7.10, The MathWorks Inc. Natick, MA, USA) bilgisayar programında Kalman filtresi yöntemiyle plastik ve biyokütle atıklar için önerilen mekanizmalar kaydırılmış birinci mertebeden olduğu varsayılarak tepkime hız sabitleri bulunmuş ve en iyi uyumu veren model belirlenmiştir. En iyi uyum sağlayan model için en büyük hız sabitini katı→sıvı tepkime basamağı, en küçük hız sabitini ise sıvı → gaz tepkime basamağı vermektedir. Tepkimelerde genel olarak atıkların büyük bölümü doğrudan sıvıya dönüşmüş olup sıvıdan gaz oluşumu daha yavaş gerçekleşmiştir. Çalışmanın ikinci kısmında ise tepkime mekanizmalarının farklı mertebeden tepkime hızında olduğu varsayımıyla SigmaPlot (ver. 12.0 Notebook, Systat Software, Inc.) programı kullanılarak regresyon analizi yapılmıştır. Regresyon analizi sonucunda plastik ve biyokütle atıklar için tepkime hız sabitleri, tepkime mertebeleri ve en iyi uyum sağlayan mekanizmalar belirlenmiştir. Kalman Filtreleme Yönteminin tersine Regresyon Analizi hemen her atık için farklı tepkime mekanizmalarında deneysel verilerle uyum göstermektedir. Kalman Filtreleme Yöntemi ile elde edilen veriler ise tek bir mekanizmada en iyi uyumu göstermiştir.

**Ağustos 2017, 112 sayfa**

**Anahtar Kelimeler:** Biyokütle, Plastik, Atık, Kinetik, Reaksiyon Mekanizmaları, Kesikli Zaman Modelleri, Kalman Filtresi, Regresyon Analizi

## ABSTRACT

Master Thesis

### DETERMINATION OF PYROLYSIS MECHANISMS OF WASTE PLASTICS AND BIOMASS BY USING DISCRETE TIME MODELS

Hilal TANIKER SARI

Ankara University  
Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Department of Chemical Engineering

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Emir H. ŞİMŞEK

In this thesis, the mechanisms of plastics and biomasses are analysed to determine the basic model of liquid and gas products' formations, reaction rate constants and reaction order. 5 different reaction mechanisms, reversible or irreversible are suggested. Experimental results of nine different plastic waste and five different biomass waste are used. The first section of the thesis, the well-matched model and the reaction rate constants are determined by analysed wastes experimental results by Kalman Filtering method with the computer programme MATLAB (ver. 7.10, The Math Works Inc. Natick, MA, USA). The well-matched mechanism gives the biggest reaction rate constant with solid  $\rightarrow$  liquid reaction step and the smallest reaction rate constant with liquid  $\rightarrow$  gas reaction step. In mechanisms, generally the large amount of wastes directly transform to liquid whether the formation of gas from liquid is too slow. In this section it's assuming that all the reactions mechanisms are the first order. The second section of the thesis, on the assumption that reactions are different order, the experimental results analysed by regression method with SigmaPlot (ver. 12.0 Notebook, Systat Software, Inc.). By regression analyse, the well-matched model, the reaction rate constants and the order of the reactions are determined for all types of wastes. Contrary to Kalman Filtering, regression analyses give different well-matched mechanisms almost all wastes. Kalman Filtering Method gives one well-matched mechanism for all wastes.

**August 2017, 112 pages**

**Key Words:** Biomass, Plastic, Waste, Kinetic, Reaction Mechanisms, Discrete Time Models, Kalman Filter, Regression Analysis

## TEŞEKKÜR

Öğrenimim boyunca destek olan danışman hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Emir H. ŞİMŞEK'e (Ankara Üniversitesi, Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı), bilgi ve deneyimlerini esirgemeyen Prof. Dr. A. KARADUMAN'a (Ankara Üniversitesi, Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı)

Kalman filtresinin tepkime mekanizmalarına uygulanmasında büyük emeği geçen kardeşim Makina Mühendisi Dr. Semih TANIKER'e (Boğaziçi Üniversitesi, Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı);

Hayatımın her aşamasında yanımda olan ve hiçbir zaman desteğini esirgemeyen eşim Salih SARI'ya;

İçtenlikle teşekkür ederim.

Hilal TANIKER SARI

Ankara, Ağustos 2017

## İÇİNDEKİLER

|                                                                             |      |
|-----------------------------------------------------------------------------|------|
| TEZ ONAYI                                                                   |      |
| ETİK.....                                                                   | i    |
| ÖZET.....                                                                   | ii   |
| ABSTRACT .....                                                              | iii  |
| TEŞEKKÜR .....                                                              | iv   |
| SİMGELER DİZİNİ .....                                                       | vii  |
| ŞEKİLLER DİZİNİ .....                                                       | viii |
| ÇİZELGELER DİZİNİ .....                                                     | xii  |
| 1. GİRİŞ.....                                                               | 1    |
| 2. KURAMSAL TEMELLER .....                                                  | 8    |
| 2.1 Plastikler .....                                                        | 8    |
| 2.2 Biyokütle .....                                                         | 11   |
| 2.3 Piroliz .....                                                           | 12   |
| 2.4 Kesikli Reaktörler .....                                                | 15   |
| 2.5 Kaynak Araştırması.....                                                 | 17   |
| 3. MATERYAL VE YÖNTEM .....                                                 | 21   |
| 3.1 Materyal.....                                                           | 21   |
| 3.2 Yöntem .....                                                            | 26   |
| 3.2.1 Kalman filtreleme yöntemi .....                                       | 26   |
| 3.2.2 Regresyon analizi yöntemi .....                                       | 29   |
| 3.2.3 Plastik ve biyokütle atıklarının tepkime mekanizmaları .....          | 30   |
| 4. BULGULAR VE TARTIŞMA .....                                               | 34   |
| 4.1 Kalman Filtreleme Yöntemi ile Tepkime Mekanizması Belirleme .....       | 34   |
| 4.1.1 Tepkime mekanizmalarının plastik atıklara uyumu .....                 | 34   |
| 4.1.2 Tepkime mekanizmalarının biyokütle atıklara uyumu .....               | 61   |
| 4.2 Regresyon Analizi ile Tepkime Mekanizması ve Mertebe Belirleme.....     | 76   |
| 4.2.1 A, B ve C'ye ait $f(t)$ denklemlerini bulma $A=f(t)$ .....            | 77   |
| 4.2.2 A, B ve C'nin t'ye karşı türevini alma .....                          | 79   |
| 4.2.3 Reaksiyonların üstel katsayıları ve hızlarının tespiti .....          | 80   |
| 5. SONUÇ .....                                                              | 91   |
| KAYNAKLAR .....                                                             | 95   |
| EKLER.....                                                                  | 98   |
| EK 1 Kalman Filtresinin MATLAB İle Uygulaması için kullanılan ana kod ..... | 99   |

|                                                                            |            |
|----------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>EK 2 Ana kod içerisinde çağırılan “modeller” fonksiyonu.....</b>        | <b>101</b> |
| <b>EK 3 Ana kod içerisinde çağırılan “plotter” fonksiyonu .....</b>        | <b>104</b> |
| <b>EK 4 Ana kod içerisinde çağırılan “data_plastik” fonksiyonu.....</b>    | <b>105</b> |
| <b>EK 5 Ana kod içerisinde çağırılan “data_biyokutle” fonksiyonu .....</b> | <b>107</b> |
| <b>EK 6 Kalman Filtresi Algoritması.....</b>                               | <b>108</b> |
| <b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>                                                       | <b>112</b> |



## SİMGELER DİZİNİ

|            |                                                          |
|------------|----------------------------------------------------------|
| PP         | Polipropilen                                             |
| PS         | Polistiren                                               |
| AA         | Ağır Aromatik                                            |
| HVGO       | Ağır Vakum Fraksiyonu (Heavy Vacuum Gas Oil)             |
| PE         | Polietilen                                               |
| PET        | Polietilen Teraftalat                                    |
| HDPE       | Yüksek Yoğunluklu Polietilen (High Density Polyethylene) |
| LDPE       | Düşük Yoğunluklu Polietilen (Low Density Polyethylene)   |
| PVC        | Polivinil Klorür                                         |
| BPA        | Bisfenil A                                               |
| T          | Sıcaklık                                                 |
| t          | Zaman                                                    |
| k          | Reaksiyon hız sabiti                                     |
| A          | Katı                                                     |
| B          | Sıvı                                                     |
| C          | Gaz                                                      |
| m, n, p, r | Tepkime mertebeleri                                      |

## ŞEKİLLER DİZİNİ

|                                                                                                               |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 1.1 Atık Yönetimi Hiyerarşisi (Akınç 2015) .....                                                        | 3  |
| Şekil 1.2 Atıkların Piroliz ile Geri Dönüşüm Basamakları (Anonim 2012).....                                   | 5  |
| Şekil 1.3 Düzenli Depolama Alanı Şematik Gösterimi (Anonim 2016 ).....                                        | 6  |
| Şekil 2.1 Etilen Monomerinden Polietilen Oluşumu (Anonim 2015) .....                                          | 8  |
| Şekil 2.2 Plastik Teşhis Kodları .....                                                                        | 10 |
| Şekil 2.3 Klasik ve Modern Biyokütle Ayrımı (Anonim 2016).....                                                | 12 |
| Şekil 2.4 Piroliz Reaktörünün Çalışma Prensibi (Anonim 2015) .....                                            | 13 |
| Şekil 2.5 Piroliz Sonucu Oluşan Ürünler .....                                                                 | 14 |
| Şekil 2.6 Kesikli Karıştırmalı Reaktör .....                                                                  | 16 |
| Şekil 3.1 Kesikli zaman Kalman filtresi akış şeması (Grewal ve Andrews 2001) .....                            | 28 |
| Şekil 3.2 Kalman filtresinin işleyişi (Welch ve Bishop 2006).....                                             | 29 |
| Şekil 4.1 PS'in Model 1'den elde edilen sonuçlarla deneysel sonuçlarının karşılaştırılması .....              | 39 |
| Şekil 4.2 PS'in Model 2'den elde edilen sonuçlarla deneysel sonuçlarının karşılaştırılması .....              | 39 |
| Şekil 4.3 PS'in Model 3'den elde edilen sonuçlarla deneysel sonuçlarının karşılaştırılması .....              | 40 |
| Şekil 4.4 PS'in Model 4'den elde edilen sonuçlarla deneysel sonuçlarının karşılaştırılması .....              | 40 |
| Şekil 4.5 PS'in Model 5'den elde edilen sonuçlarla deneysel sonuçlarının karşılaştırılması .....              | 41 |
| Şekil 4.6 PP'in Model 1'den elde edilen sonuçlarla deneysel sonuçlarının karşılaştırılması .....              | 41 |
| Şekil 4.7 PP'in Model 2'den elde edilen sonuçlarla deneysel sonuçlarının karşılaştırılması .....              | 42 |
| Şekil 4.8 PP'in Model 3'den elde edilen sonuçlarla deneysel sonuçlarının karşılaştırılması .....              | 42 |
| Şekil 4.9 PP'in Model 4'den elde edilen sonuçlarla deneysel sonuçlarının karşılaştırılması .....              | 43 |
| Şekil 4.10 PP'in Model 5'ten elde edilen sonuçlarla deneysel sonuçlarının karşılaştırılması .....             | 43 |
| Şekil 4.11 PP/PS'in Model 1'den elde edilen sonuçlarla deneysel sonuçlarının karşılaştırılması .....          | 44 |
| Şekil 4.12 PP/PS'in Model 2'den elde edilen sonuçlarla deneysel sonuçlarının karşılaştırılması .....          | 44 |
| Şekil 4.13 PP/PS'in Model 3'den elde edilen sonuçlarla deneysel sonuçlarının karşılaştırılması .....          | 45 |
| Şekil 4.14 PP/PS'in Model 4'ten elde edilen sonuçlarla deneysel sonuçlarının karşılaştırılması .....          | 45 |
| Şekil 4.15 PP/PS'in Model 5'ten elde edilen sonuçlarla deneysel sonuçlarının karşılaştırılması .....          | 46 |
| Şekil 4.16 PP/HVGO (1/1)'nın Model 1'den elde edilen sonuçlarla deneysel sonuçlarının karşılaştırılması ..... | 46 |

|                                                                                                                    |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 4.17 PP/HVGO (1/1)'nin Model 2'den elde edilen sonuçlarla deneysel sonuçlarının karşılaştırılması .....      | 47 |
| Şekil 4.18 PP/HVGO (1/1)'nin Model 3'ten elde edilen sonuçlarla deneysel sonuçlarının karşılaştırılması .....      | 47 |
| Şekil 4.19 PP/HVGO (1/1)'nin Model 4'ten elde edilen sonuçlarla deneysel sonuçlarının karşılaştırılması .....      | 48 |
| Şekil 4.20 PP/HVGO (1/1)'nin Model 5'ten elde edilen sonuçlarla deneysel sonuçlarının karşılaştırılması .....      | 48 |
| Şekil 4.21 PP/HVGO (5/1)'in Model 1'den elde edilen sonuçlarla deneysel sonuçlarının karşılaştırılması .....       | 49 |
| Şekil 4.22 PP/HVGO (5/1)'in Model 2'den elde edilen sonuçlarla deneysel sonuçlarının karşılaştırılması .....       | 49 |
| Şekil 4.23 PP/HVGO (5/1)'in Model 3'den elde edilen sonuçlarla deneysel sonuçlarının karşılaştırılması .....       | 50 |
| Şekil 4.24 PP/HVGO (5/1)'in Model 4'den elde edilen sonuçlarla deneysel sonuçlarının karşılaştırılması .....       | 50 |
| Şekil 4.25 PP/HVGO (5/1)'in Model 5'ten elde edilen sonuçlarla deneysel sonuçlarının karşılaştırılması .....       | 51 |
| Şekil 4.26 PP/PS/HVGO (1/1/1)'nin Model 1'den elde edilen sonuçlarla deneysel sonuçlarının karşılaştırılması ..... | 51 |
| Şekil 4.27 PP/PS/HVGO (1/1/1)'nin Model 2'den elde edilen sonuçlarla deneysel sonuçlarının karşılaştırılması ..... | 52 |
| Şekil 4.28 PP/PS/HVGO (1/1/1)'nin Model 3'ten elde edilen sonuçlarla deneysel sonuçlarının karşılaştırılması ..... | 52 |
| Şekil 4.29 PP/PS/HVGO (1/1/1)'nin Model 4'ten elde edilen sonuçlarla deneysel sonuçlarının karşılaştırılması ..... | 53 |
| Şekil 4.30 PP/PS/HVGO (1/1/1)'nin Model 5'ten elde edilen sonuçlarla deneysel sonuçlarının karşılaştırılması ..... | 53 |
| Şekil 4.31 PP/AA (1/1)'nin Model 1'den elde edilen sonuçlarla deneysel sonuçlarının karşılaştırılması .....        | 54 |
| Şekil 4.32 PP/AA (1/1)'nin Model 2'den elde edilen sonuçlarla deneysel sonuçlarının karşılaştırılması .....        | 54 |
| Şekil 4.33 PP/AA (1/1)'nin Model 3'ten elde edilen sonuçlarla deneysel sonuçlarının karşılaştırılması .....        | 55 |
| Şekil 4.34 PP/AA (1/1)'nin Model 4'ten elde edilen sonuçlarla deneysel sonuçlarının karşılaştırılması .....        | 55 |
| Şekil 4.35 PP/AA (1/1)'nin Model 5'ten elde edilen sonuçlarla deneysel sonuçlarının karşılaştırılması .....        | 56 |
| Şekil 4.36 PP/AA (5/1)'nin Model 1'den elde edilen sonuçlarla deneysel sonuçlarının karşılaştırılması .....        | 56 |
| Şekil 4.37 PP/AA (5/1)'nin Model 2'den elde edilen sonuçlarla deneysel sonuçlarının karşılaştırılması .....        | 57 |
| Şekil 4.38 PP/AA (5/1)'nin Model 3'ten elde edilen sonuçlarla deneysel sonuçlarının karşılaştırılması .....        | 57 |
| Şekil 4.39 PP/AA (5/1)'nin Model 4'den elde edilen sonuçlarla deneysel sonuçlarının karşılaştırılması .....        | 58 |
| Şekil 4.40 PP/AA (5/1)'nin Model 5'ten elde edilen sonuçlarla deneysel sonuçlarının karşılaştırılması .....        | 58 |

|                                                                                                                                      |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 4.41 PP/PS/AA(1/1/1)'nin Model 1'den elde edilen sonuçlarla deneysel sonuçlarının karşılaştırılması .....                      | 59 |
| Şekil 4.42 PP/PS/AA(1/1/1)'nin Model 2'den elde edilen sonuçlarla deneysel sonuçlarının karşılaştırılması .....                      | 59 |
| Şekil 4.43 PP/PS/AA(1/1/1)'nin Model 3'ten elde edilen sonuçlarla deneysel sonuçlarının karşılaştırılması .....                      | 60 |
| Şekil 4.44 PP/PS/AA(1/1/1)'nin Model 4'ten elde edilen sonuçlarla deneysel sonuçlarının karşılaştırılması .....                      | 60 |
| Şekil 4.45 PP/PS/AA(1/1/1)'nin Model 5'ten elde edilen sonuçlarla deneysel sonuçlarının karşılaştırılması .....                      | 61 |
| Şekil 4.46 Asbos (Psilocaulon utile) bitkisinin Model 1'den elde edilen sonuçlarla deneysel sonuçlarının karşılaştırılması .....     | 64 |
| Şekil 4.47 Asbos (Psilocaulon utile) bitkisinin Model 2'den elde edilen sonuçlarla deneysel sonuçlarının karşılaştırılması .....     | 65 |
| Şekil 4.48 Asbos (Psilocaulon utile) bitkisinin Model 3'ten elde edilen sonuçlarla deneysel sonuçlarının karşılaştırılması .....     | 65 |
| Şekil 4.49 Asbos (Psilocaulon utile) bitkisinin Model 4'ten elde edilen sonuçlarla deneysel sonuçlarının karşılaştırılması .....     | 66 |
| Şekil 4.50 Asbos (Psilocaulon utile) bitkisinin Model 5'ten elde edilen sonuçlarla deneysel sonuçlarının karşılaştırılması .....     | 66 |
| Şekil 4.51 Scholtzboş (Pteronia pallens) bitkisinin Model 1'den elde edilen sonuçlarla deneysel sonuçlarının karşılaştırılması ..... | 67 |
| Şekil 4.52 Scholtzboş (Pteronia pallens) bitkisinin Model 2'den elde edilen sonuçlarla deneysel sonuçlarının karşılaştırılması ..... | 67 |
| Şekil 4.53 Scholtzboş (Pteronia pallens) bitkisinin Model 3'ten elde edilen sonuçlarla deneysel sonuçlarının karşılaştırılması ..... | 68 |
| Şekil 4.54 Scholtzboş (Pteronia pallens) bitkisinin Model 4'ten elde edilen sonuçlarla deneysel sonuçlarının karşılaştırılması ..... | 68 |
| Şekil 4.55 Scholtzboş (Pteronia pallens) bitkisinin Model 5'ten elde edilen sonuçlarla deneysel sonuçlarının karşılaştırılması ..... | 69 |
| Şekil 4.56 Kraalboş (Galenia africana) bitkisinin Model 1'den elde edilen sonuçlarla deneysel sonuçlarının karşılaştırılması .....   | 69 |
| Şekil 4.57 Kraalboş (Galenia africana) bitkisinin Model 2'den elde edilen sonuçlarla deneysel sonuçlarının karşılaştırılması .....   | 70 |
| Şekil 4.58 Kraalboş (Galenia africana) bitkisinin Model 3'ten elde edilen sonuçlarla deneysel sonuçlarının karşılaştırılması .....   | 70 |
| Şekil 4.59 Kraalboş (Galenia africana) bitkisinin Model 4'ten elde edilen sonuçlarla deneysel sonuçlarının karşılaştırılması .....   | 71 |
| Şekil 4.60 Kraalboş (Galenia africana) bitkisinin Model 5'ten elde edilen sonuçlarla deneysel sonuçlarının karşılaştırılması .....   | 71 |
| Şekil 4.61 Biyokütle-bitki yağı karışımının Model 1'den elde edilen sonuçlarla deneysel sonuçlarının karşılaştırılması .....         | 72 |
| Şekil 4.62 Biyokütle-bitki yağı karışımının Model 2'den elde edilen sonuçlarla deneysel sonuçlarının karşılaştırılması .....         | 72 |
| Şekil 4.63 Biyokütle-bitki yağı karışımının Model 3'ten elde edilen sonuçlarla deneysel sonuçlarının karşılaştırılması .....         | 73 |
| Şekil 4.64 Biyokütle-bitki yağı karışımının Model 4'ten elde edilen sonuçlarla deneysel sonuçlarının karşılaştırılması .....         | 73 |

|                                                                                                                              |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 4.65 Biyokütle-bitki yağı karışımının Model 5'ten elde edilen sonuçlarla deneysel sonuçlarının karşılaştırılması ..... | 74 |
| Şekil 4.66 Palmiye kabuğunun Model 1'den elde edilen sonuçlarla deneysel sonuçlarının karşılaştırılması .....                | 74 |
| Şekil 4.67 Palmiye kabuğunun Model 2'den elde edilen sonuçlarla deneysel sonuçlarının karşılaştırılması .....                | 75 |
| Şekil 4.68 Palmiye kabuğunun Model 3'ten elde edilen sonuçlarla deneysel sonuçlarının karşılaştırılması .....                | 75 |
| Şekil 4.69 Palmiye kabuğunun Model 4'ten elde edilen sonuçlarla deneysel sonuçlarının karşılaştırılması .....                | 76 |
| Şekil 4.70 Palmiye kabuğunun Model 5'ten elde edilen sonuçlarla deneysel sonuçlarının karşılaştırılması .....                | 76 |



## ÇİZELGELER DİZİNİ

|                                                                                                                                                              |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Çizelge 3.1 PS'nin 325°C'de yapılan ısı bozundurulmasına bekleme süresinin etkisi .....                                                                      | 22 |
| Çizelge 3.2 PP'nin 375°C'de yapılan ısı bozundurulmasına bekleme süresinin etkisi .....                                                                      | 22 |
| Çizelge 3.3 PP/HVGO'nun (5/1) 375°C'de yapılan ısı bozundurulmasına bekleme süresinin etkisi.....                                                            | 22 |
| Çizelge 3.4 PP/PS'nin (1/1) 375°C'de yapılan ısı bozundurulmasına bekleme süresinin etkisi.....                                                              | 22 |
| Çizelge 3.5 PP/PS/AA'nın (1/1/1) 375°C'de yapılan ısı bozundurulmasına bekleme süresinin etkisi.....                                                         | 23 |
| Çizelge 3.6 PP/HVGO'nun (1/1) 375°C'de yapılan ısı bozundurulmasına bekleme süresinin etkisi.....                                                            | 23 |
| Çizelge 3.7 PP/PS/HVGO'nun (1/1/1) 375°C'de yapılan ısı bozundurulmasına bekleme süresinin etkisi.....                                                       | 23 |
| Çizelge 3.8 PP/AA'nın (1/1) 400°C'de yapılan ısı bozundurulmasına bekleme süresinin etkisi .....                                                             | 23 |
| Çizelge 3.9 PP/AA'nın (5/1) 400°C'de yapılan ısı bozundurulmasına bekleme süresinin etkisi .....                                                             | 24 |
| Çizelge 3.10 Asbos (Psilocaulon utile) bitkisinin 450°C'de yapılan ısı bozundurulmasına bekleme süresinin etkisi .....                                       | 24 |
| Çizelge 3.11 Kraalbos (Galenia africana) bitkisinin 450°C'de yapılan ısı bozundurulmasına bekleme süresinin etkisi .....                                     | 24 |
| Çizelge 3.12 Scholtzboş (Pteronia pallens) bitkisinin 450 °C'de yapılan ısı bozundurulmasına bekleme süresinin etkisi .....                                  | 25 |
| Çizelge 3.13 Biyokütle ve bitki yağı karışımının 450°C'de yapılan ısı bozundurulmasına bekleme süresinin etkisi .....                                        | 25 |
| Çizelge 3.14 Palmiye kabuğunun 500°C'de yapılan ısı bozundurulmasına bekleme süresinin etkisi.....                                                           | 25 |
| Çizelge 4.1 Plastik atıklar için modellerden elde edilen tepkime hız sabitleri (dk-1) ....                                                                   | 35 |
| Çizelge 4.2 Plastik Atıkların ısı bozundurulmasından elde edilen deneysel veriler ile modellerden hesaplanan değerlerin kareleri farklarının toplamı .....   | 37 |
| Çizelge 4.3 Biyokütle atıklar için modellerden elde edilen tepkime hız sabitleri (dk-1) .....                                                                | 62 |
| Çizelge 4.4 Biyokütle Atıkların ısı bozundurulmasından elde edilen deneysel veriler ile modellerden hesaplanan değerlerin kareleri farklarının toplamı ..... | 63 |
| Çizelge 4.5 Plastik atıkların ısı bozundurulmasından elde edilen deneysel veriler ile f(t) denkleminde katsayılarının tespiti .....                          | 77 |
| Çizelge 4.6 Biyokütle atıkların ısı bozundurulmasından elde edilen deneysel veriler ile f(t) denkleminde katsayılarının tespiti.....                         | 78 |
| Çizelge 4.7 Plastik atıklar için regresyon analizi ile modellerden elde edilen tepkime hız sabitleri (kütle kesri(1-n).dk-1) .....                           | 81 |
| Çizelge 4.8 Plastik atıkların modeller için elde edilen tepkime dereceleri .....                                                                             | 83 |

|                                                                                                                                                                                 |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Çizelge 4.9 Plastik Atıkların ısıl bozundurulmasından elde edilen deneysel veriler ile modellerden regresyon sonucu hesaplanan değerlerin kareleri farklarının toplamı .....    | 86 |
| Çizelge 4.10 Biyokütle atıklar için regresyon analizi ile modellerden elde edilen tepkime hız sabitleri (kütle kesri(1-n).dk-1) .....                                           | 87 |
| Çizelge 4.11 Biyokütle atıkların modeller için elde edilen tepkime dereceleri .....                                                                                             | 88 |
| Çizelge 4.12 Biyokütle Atıkların ısıl bozundurulmasından elde edilen deneysel veriler ile modellerden regresyon sonucu hesaplanan değerlerin kareleri farklarının toplamı ..... | 89 |



## 1. GİRİŞ

Yaşamın doğal ve kaçınılmaz sonucu olan atık, insanlığın varoluşuyla birlikte oluşmaya başlamış olup tarih boyunca endüstriyel gelişmeler ve tüketim malzemelerinde meydana gelen değişmelere bağlı olarak değişkenlik göstermiştir. Kullanım alanları tükenmiş ve bertaraf edilmesi gereken katı, sıvı, gaz bütün maddeler atık sınıfındadır.

Ambalaj, gıda, tekstil vb. içeren atıklar evsel atıklar, sanayi atıkları endüstriyel atıklar, çevre ve insan sağlığına zarar verebilecek atıklar (piller, floresanlar) tehlikeli atıklar ve hastane, muayenehane gibi sağlık merkezlerinden kaynaklanan atıklar ise tıbbi katı atıklar olarak tanımlanmaktadır.

Tüketim alışkanlıklarının değişmesi, teknolojik gelişmeler sonucu hızla yükselen sanayileşme, artan nüfus ile büyüyen kentleşme sonucu ortaya çıkan atıklar insan sağlığını, hayvan ve bitki türlerini tehdit ederek ciddi boyutlarda çevre sorunlarına neden olmaktadır (Palabıyık 2004).

Dünya Sağlık Örgütü (WHO, 1946) sağlıklı olarak nitelendirilmek için herhangi bir hastalığa sahip olmamanın yetersiz olduğunu, insanın ancak hem fiziksel hem de zihinsel ve sosyal açılardan iyi olduğunda sağlıklı olarak tanımlanabileceğini belirtmektedir. Bu durumda temiz ve sağlıklı çevre, sağlıklı olabilmek için en temel ihtiyaçtır (Güler vd. 1996, Tokgöz vd. 1982).

Temiz ve sağlıklı bir çevre için çeşitli faaliyetlerimiz sonucu ürettiğimiz atıkların bertarafı üzerinde titizlikle durmak gerekmektedir. Eskiden biriktirme ve depolama ile uzaklaştırılan atıkların günümüz modern ve çağdaş toplumlarında da aynı şekilde bertarafı mümkün değildir. Atıkların sistemli ve kontrollü bir şekilde yaşam alanlarımızdan uzaklaştırılabilmesi için atık yönetimi zorunlu hale gelmiştir (Palabıyık 2001).

Atık yönetimi; atığın oluşumu, toplanması, işlenmesi ve uzaklaştırılması basamaklarının yanı sıra enerji, çevre ve kaynakların korunması ile verimlilik ve istihdam konuları da

ele almaktadır. Tüm bu başlıkların bir bütün olarak ele alınması ile sağlanabilecek olan sistematik atık yönetimi sonucu yalnızca atıkların uzaklaştırılması değil aynı zamanda çevre ve insan sağlığı korunması ve ekonomik kalkınmaya destek sağlanmış olacaktır, (Agrawal 1990).

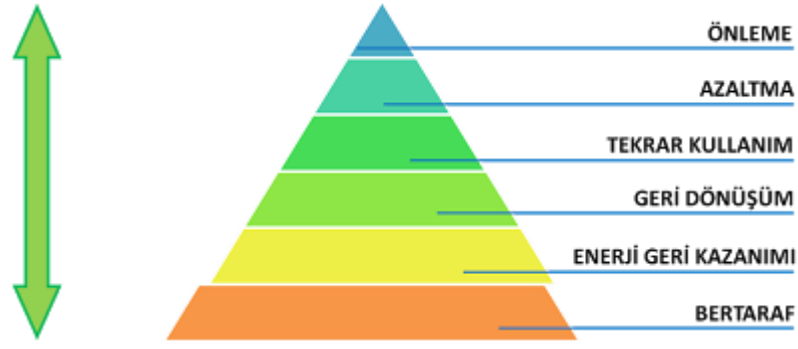
Atık yönetiminin ilk adımı, endüstriyel, evsel, tıbbi vb. tüm atıkların kaynağında azaltılmasını içerir. Atıkların mümkün olduğunca kontrollü ve az üretimi ile sağlık, çevre ve ekonomi açısından büyük faydalar sağlanabilecektir. Kontrollü olarak üretilen atıklar daha sonra sınıflarına göre ayrı ayrı toplanarak ara depolama alanlarında uygun koşullarda depolanır. Sınıflandırılmış olan atıklar, uygulanacak prosese göre geri kazanım veya bertaraf tesislerine taşınır.

Atık yönetimi, kaynağında azaltma, ara depolama, taşıma, geri kazanım ve bertaraf başlıklarının yanı sıra tüm bu işlemler esnasında kullanılan araç, gereç ekipmanların temini ve tesislerin kurulumu, işletilmesi, bakımı, revizyonu, izleme-kontrol ve devreden çıkarılması süreçlerini ve tüm prosesler için gerekli personel istihdamını da içermektedir.

Katı atık yönetiminin temel prensipleri aşağıdaki gibi sıralanabilir;

- Atıkların kaynağında azaltılması (kontrollü atık üretimi)
- Atıkların sınıflarına göre toplanması ve taşınması
- Geri kazanım ve bertaraf

Atık Yönetim Hiyerarşini gösteren piramit en üst basamaktan başlayarak alt basamaklara doğru ele alınır (Şekil 1.1). İlk basamak atığın oluşumunu engellemek olup bu önlenemiyorsa atık oluşumunun azaltılması planlanmalıdır. Oluşan atıkların sınıflandırılarak toplanması sonucu tekrar kullanımı mümkünse tekrar kullanımı sağlanmalıdır. Atığın tekrar kullanımı sağlanamadığında ise geri dönüşüm ve enerji geri kazanım basamakları değerlendirilmelidir. Tüm bu basamaklar sonucunda elde kalan atıklar ise ancak bertaraf edilebilecektir.



Şekil 1.1 Atık Yönetimi Hiyerarşisi (Akınç 2015)

Atığın kullanımının mümkün olmayacağı zamana kadar yalnızca toplama ve temizleme prosesleri ile yeniden ve yeniden kullanılması tekrar kullanım olarak tanımlanmaktadır. Bu şekilde tüm maddelerden atık olarak nitelendirilmeden önce mümkün olan en fazla faydayı sağlamak amaçlanmaktadır.

Genellikle gıda ve bitkisel atıkların uygun ortamlarda dönüşümünün sağlanması kompostlaştırma olarak tanımlanmaktadır. Kompostlaştırma bir çeşit geri dönüşümdür. Geri dönüşüm sonucu elde edilen gübre tarımda oldukça verimli kullanılabilmektedir.

Değerlendirilebilecek olan plastik, kâğıt, karton, metal, cam vb. maddelerin çeşitli prosesler sonucu yeni bir ürüne dönüştürülmesi de bir çeşit geri dönüşümdür. Bu maddelerin geri dönüşümünün sağlanabilmesi için öncelikle doğru şekilde sınıflandırılması ve temizlenmeleri gerekmektedir.

Geri dönüşümü sağlanan her atık ile

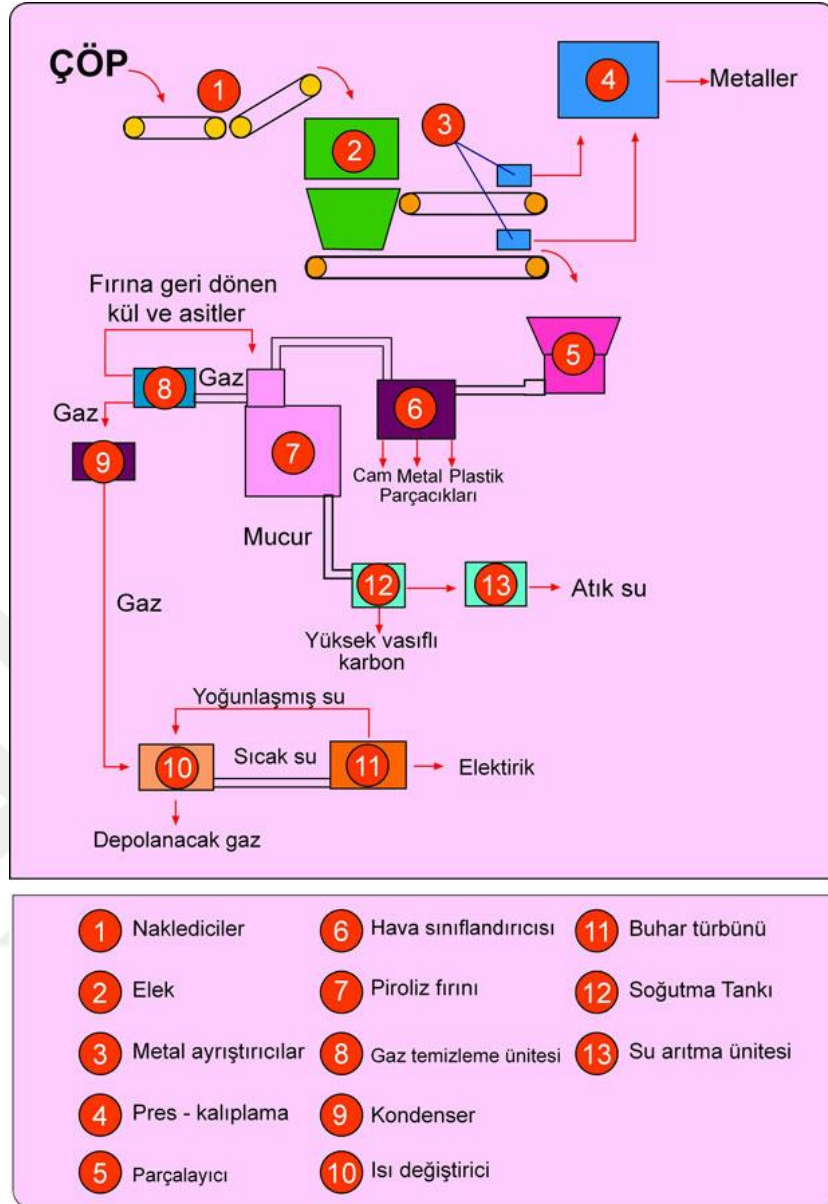
- Atık üretimi azaltılmış olur.
- Doğal kaynaklar korunur.
- Enerji tüketimi azalır. Tasarruf edilmiş olur.
- Ekonomik fayda ve tasarruf sağlanmış olur.

Geri dönüşümün en temel basamağı yakma işlemidir. Yakma işlemi ile ısı değeri yüksek olan atıklardan enerji kazanımı sağlanmış olur. Enerji kazanımının yanı sıra atığın hacim olarak da azaltılması sağlanmış olur. Bu sebeple enerji kazanımı

sağlanamayacak olan ısı değeri düşük atıklara da yakma işlemi uygulanır. Depolama yöntemi ile bertarafı sağlanacak atıklar yakma işlemi sonucunda % 80-90 hacimce, % 75-80 ağırlıkça azaltılmış olur.

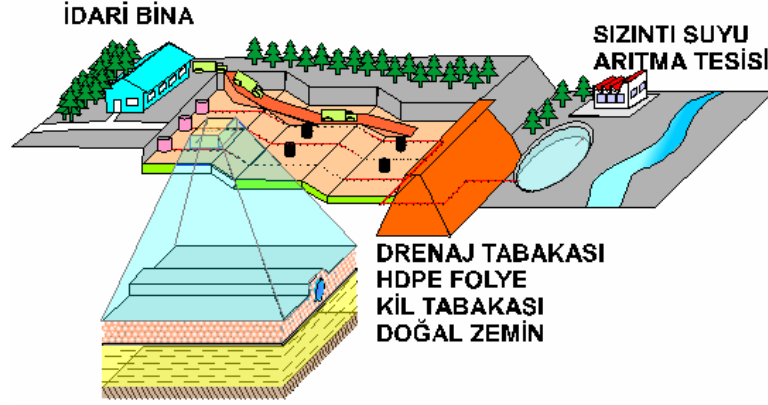
Isıl değeri yüksek olan atıklar geri dönüşüm tesisine getirilerek enerji kazanımı sürecine alınırlar. Geri dönüştürme tesisinde temel süreç piroliz fırınında gerçekleşir. Geri dönüşüm tesisine gelen atıklar, piroliz fırınına alınmadan önce birtakım işlemlerden geçer.

- Tesise gelen atıklara uygulanan ilk işlem ayıklamadır. Atığın içinde bulunan büyük boyutlardaki maddeler (beyaz eşya, mobilya vs.) elle ayrılır.
- Ayırma işleminden sonra atıklar kamyonlarla taşıma bantlarına aktarılırlar.
- Taşıma bantlarına alınan atıklar eleğe taşınırlar. Atıklar elekte boyutlarına göre ayrılırlar. Büyük boyutlardaki atıklar kalıplanma bölmesinde preslenirler. Diğer atıklar ise parçalayıcı yardımı ile boyutlarına göre ayrıştırılırlar.
- Parçalayıcıdan sonra atıkların bünyesindeki plastik, cam, metal parçacıklar kompresör yardımı ile uzaklaştırılırlar.
- İçindeki cürufları temizlenen atıklar, piroliz fırınına gönderilirler.
- Piroliz fırınından çıkan gaz temizleme ünitesine iletilir. Gazın içeriğinde bulunan kül, yağ gibi istenmeyen maddeler birtakım kimyasal işlemler sonucu uzaklaştırılır.
- Gazın içeriğindeki nem oranı kondansetör yardımıyla azaltılır.
- Kondensatörden çıkan yüksek ısıdaki gaz ısı değiştiricilerden geçirilerek kızgın buhar elde edilir.
- Geri dönüşüm tesisinin yanında bulunan buhar türbini ile buhardan elektrik enerjisi elde edilir.
- Türbinden çıkan buhar yoğunlaşarak ısı değiştiricilerde tekrar su olarak kullanılır. Bu sistem kapalı devre bir sistemdir.
- Piroliz fırınından çıkan mucur ayrıştırma tanklarına alınır. Ayrıştırma tanklarından alınan mucur kok kömürü (yüksek vasıflı karbon) olarak nitelendirilir. Bu kömür birçok sanayi dalında kullanılır.



Şekil 1.2 Atıkların Piroliz ile Geri Dönüşüm Basamakları (Anonim 2012)

Isıl değeri düşük atıklar ise yakma işlemi sonucunda düzenli depolama alanlarında depolanırlar. Düzenli depolama atıkların çevre ve insan sağlığına tehdit olmaması için yaşadığımız ortamdan uzaklaştırılarak, özel alanlarda depolanmasıdır. Bu atıklar sıkıştırılarak veya yakılarak büyük alanlara dökülür ve üstleri örtülür. Düzenli depolama alanları doğal bir biyolojik reaktör olarak da nitelendirilebilir.



Şekil 1.3 Düzenli Depolama Alanı Şematik Gösterimi (Anonim 2016 )

Türkiye’de düzensiz depolama alanları yaygındır. Atıklar kontrolsüz olarak buralarda birikmekte ve çevre ve insan sağlığı açısından ciddi tehdit unsuru teşkil etmektedirler. Ancak AB uyum yasaları çerçevesinde atık yönetimi zorunlu hale gelmiş ve belediyeler bu alandaki çalışmalarına devam etmektedirler.

Günümüzde enerji kaynakları, teknolojik gereksinimler, artan nüfus ve değişen yaşam tarzıyla hızla tüketilmekte olup enerji tüketimi her gün artmaktadır. Artan enerji tüketimi de enerji kaynaklarına olan talebi arttırmaktadır. Artan talebi karşılayabilmek için alternatif enerji kaynaklarının önemi gün geçtikçe hızla artmaktadır.

Alternatif enerji kaynakları değerlendirilirken özellikle çevre dostu, yenilenebilir kaynaklar yoğun ilgi görmektedir. Bu kapsamda biyokütle alternatif enerji kaynakları arasında uygulama alanı en geniş olandır. Tarım, orman ve endüstri faaliyetleri neticesinde ortaya çıkan atıkların biyokütle olarak kullanılabilmesinin yanı sıra enerji üretimine özel olarak da biyokütle (şeker kamışı vs.) yetiştirilebilmektedir. Biyokütle hemen her yerde yetiştirilebilir, çevre dostudur ve sosyoekonomik gelişme sağlamaktadır. Bu başlıklar göz önüne alındığında biyokütle enerji kaynakları arasında stratejik bir konuma sahiptir ve sürdürülebilir olarak sağlanabilecek en önemli kaynaktır (Varol 2012).

Biyokütle haricinde plastikler de alternatif enerji kaynağı olarak rağbet görmektedir. Plastikler, gıdadan tekstile sayılamayacak kadar geniş kullanım alanına sahiptir. Plastikler, seri üretilebilir, ucuz, uzun ömürlü, dayanıklı, hafif, katı, esnektir, kolay şekillendirilebilir ve düşük ısı ve elektrik iletkenidir. Plastiklerin üretim ve kullanım kolaylığını sağlayan bu geniş özellikleri plastıklere olan talebi de arttırmaktadır. Ancak plastiklerin de bir kullanım ömrü bulunmaktadır ve bu süre sonunda atık olarak nitelendirilmektedirler. Plastiklerin kullanım avantajı sağlayan dayanıklılık özelliği atık haline geldiklerinde talep edilmeyen bir özellik haline gelmekte ve çevre sorunlarına neden olmaktadır. Bazı ülkelerde plastiklerin atık yönetimi dâhilinde ve alternatif enerji kaynağı olarak değerlendirilmesi sorunluluk haline getirilmektedir (Al-Hurmizy 2012).

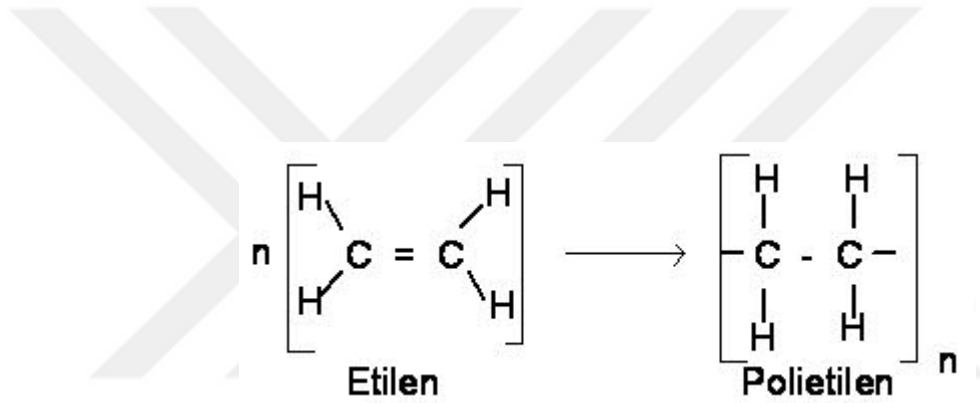
Plastik atıkların, bertaraf etme probleminin olması sebebiyle geri kazanım yöntemleri ile değerlendirilmesi, hem çevre açısından hem de plastikler petrolden elde edildikleri için ekonomik açıdan da önem arz etmektedir.

Gerek biyokütle ve gerekse plastik atıkların ekonomiye kazandırılması gittikçe artan enerji kaynağı ihtiyacına önemli katkı yapacak niteliktedir. Üstelik bu geri kazanım çevrenin korunmasına da yardımcı olacaktır.

## 2. KURAMSAL TEMELLER

### 2.1 Plastikler

Eski Yunancada bir kalıp vasıtasıyla şekil verilmiş anlamına gelen “plastikos” kelimesinden gelen plastikler karbon (C), hidrojen (H), oksijen (O), azot (N) ve diğer organik veya inorganik elementlerden oluşmaktadır. Bu elementlerin birleşimi ile polimer yapının en küçük bileşeni olan monomerler oluşur. Monomerler çoklu bağlar içeren, yüksek molekül kütlesine sahip polimerleri oluşturmak için diğer monomerlerle kimyasal olarak bağlanırlar (Şekil 2.1).



Şekil 2.1 Etilen Monomerinden Polietilen Oluşumu (Anonim 2015)

Doğal olarak bulunmayan plastikler, uygun reaksiyon koşulları altında ( sıcaklık, basınç vs.) katalizör yardımı ile monomerlerin yapısındaki çift bağın koparak birbirine bağlanması sonucu uzun ve zincirli bir yapıya dönüşmesi ile oluşurlar. Reaksiyon sonucu toz, granül veya reçine halinde oluşan plastikler genellikle ham petrolün işlenmesi sırasında oluşan artık maddelerden üretilirler. Toz, reçine veya granül haldeki polimerler ısıtılarak yumuşatılır, daha sonra ürüne göre kalıplara dökülerek soğutulur. Soğutma sonucu şekillendirilmiş plastik ürün elde edilmiş olur.

1860 yılında Aleksander Parkes tarafından bulunan plastikler, bugün oldukça yaygın kullanım alanlarına sahiptir. Özellikle düşük maliyetli, kolay şekillendirilebilir ve düşük yoğunluklu malzemeler olması birçok alanda üretim ve kullanım kolaylığı sağlamaktadır. Her geçen gün plastiklere olan talep artmakta olup plastik ürünleri

dünyada yılda 150 milyon ton'dan fazla kullanılmaktadır. Plastikler, doğal ve yapay olarak iki başlıkta değerlendirilirler.

Doğal Plastikler, ilk üretilen plastikler olup selüloz içerikli doğal organik malzemelerden oluşmaktadırlar. Kafur veya kunduz yağı gibi maddelerle birleştğinde plastik madde elde edilen selüloz nitrattan 1860 yıllarından ilk olarak selüloid adı verilen plastik elde edildi. İlk plastik selüloid sinema ve fotoğrafçılıkta kullanılan filmlerin üretiminde kullanıldı ancak kolay tutuşabilir olduğundan daha sonraları farklı plastikler tercih edildi.

Yapay plastikler, 19. yy başlarından kimyasal malzemelerle laboratuvarlarda üretilmeye başlandı.

Yapay plastikler;

19. yüzyılın başlarında yapay plastikler yapıldı. Bu plastikler laboratuvarlarda kimyasal maddelerden elde edildi. Günümüzde plastikler çok çeşitli alanlarda kullanılmaktadır. Tekstilden kozmetiğe kadar kullanılan birçok plastik madde bulunmaktadır.

Geniş kullanım alanına sahip plastikler;

- ⇒ Akrlonitrilbütadienstiren (Acrylonitrilebutadienestyrene)(ABS): Elektronik cihazların plastik aksamalarında
- ⇒ Bakalit (Bakelite)
- ⇒ Polietilen (Polyethylene)(PE): Çok ucuzdur, oldukça geniş bir kullanım alanına sahiptir.
- ⇒ Polietilen tereftalat (Polyethyleneterephthalate)(PETE): Pet şişeler
- ⇒ Polikarbonat (Polycarbonate)(PC): Gözlük, CD vb.
- ⇒ Polilaktik Asit (Polylacticacid)
- ⇒ Polipropilen (Polypropylene)(PP): Otomotiv yan sanayi, plastik mobilyalar vb.
- ⇒ Polistiren (Polystyrene)(PS): Ambalaj, beyaz eşya, elektronik vb.
- ⇒ Politetrafloroetilen (Polytetrafluoroethylene)(PTFE)(Teflon): Tava, rezistans vb.

- ⇒ Poliüretan (Polyurethane): Yalıtım maddesi, köpük, ayakkabı vb.
- ⇒ Polivinilidenklorit (Polyvinylidenechloride)(Saran)(PVDC): Paketleme.
- ⇒ Polivinilklorit (Polyvinylchloride)(PVC): Boru vb.
- ⇒ Poliamit (Polyamide)(PA)(Nylon): Misina, fiber, diş fırçası kılları vb.
- ⇒ Poliester (Polyester): Tekstil

Plastikleri teşhis etmek için 7 farklı kod kullanılır. (Şekil 2.2) Bunlar;

- ✓ Düşük yoğunluklu polietilen (LDPE)
- ✓ Polietilen tereftalat (PET veya PETE veya PE)
- ✓ Polipropilen (PP)
- ✓ Polistiren (PS)
- ✓ Polivinil klorür (PVC)
- ✓ Yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) ve
- ✓ Diğer



Şekil 2.2 Plastik Teşhis Kodları

**1. PET:** Polietilen teraftalat'ın kısaltmasıdır. Çok yumuşak, şeffaf ve gıdalarda tek kullanım için güvenli olduğu kabul edilir. Çoğu su, meşrubat ve diğer içecek şişeleri bu malzemeden imal edilir. Dondurulmamalı, bulaşık makinesinde yıkanmamalı ve mikrodalga fırında kullanılmamalıdır. İçinde bulunan gıda maddesine herhangi bir zararlı madde sızdırmaz. Ancak tekrar kullanım için yeterince temizlenemez ve tekrar kullanıldığında zararlı bakteriler ürer. Bu yüzden PET şişeler tekrar tekrar kullanılmamalıdır.

**2. HDPE:** Yüksek Yoğunluklu Polietilen (High-Density Polyethylene)'in kısaltmasıdır. Gıdalarla kullanımının güvenli olduğu kabul edilir. Bulaşık makinesinde yıkanabilir, mikrodalga fırında kullanılabilir. Bisfenol A (BPA) içermez. Bisphenol A, bir endokrin engelleyicidir ki bu doğal hormonların fonksiyonuna, hareketine, transferine, salgısına

ve üretimine müdahale eden bir maddedir. BPA, insan vücudundaki hormonların sahtesi olup insan sağlığı için son derece tehlikelidir. Bebekler ve küçük çocuklar, BPA'nın etkilerine karşı oldukça hassastırlar.

**3. V veya PVC:** Polivinil klorürün kısaltmasıdır. Gıdalarla kullanılmamalıdır. İçindeki zararlı maddeleri gıdalara sızdırır.

**4. LDPE:** Düşük Yoğunluklu Polietilen (Low-Density Polyethylene)'in kısaltmasıdır. Bu malzeme de HDPE gibi gıdalarla birlikte kullanılabilir. Bulaşık makinesinde yıkanabilir, mikrodalga fırında kullanılabilir.

**5. PP veya PE:** Polietilen'in kısaltmasıdır. En güvenli plastik türü olarak kabul edilir. 2 ve 4 numara bu maddenin düşük ve yüksek yoğunluklu halidir. İçinde barındırdığı gıdalara sızdırdığı bilinen herhangi bir zararlı madde yoktur. Bulaşık makinesinde yıkanabilir, mikrodalga fırında kullanılabilir.

**6. PS:** Polistiren'in kısaltmasıdır. Çay ve kahve gibi sıcak içecekler için kullanılan köpük bardaklar bu plastik türüne örnektir. Benzen'den imal edilir. Benzen, insan için kanserojen bir madde olarak bilinir. Gıdalarla teması sakıncalıdır.

**7. PC-Diğer:** Belirli bir plastik türüne ait değildir. İlk 6 tür haricindeki tüm plastiklere 7 numara verilir. Genellikle BPA denen zararlı maddeyi içerirler. Güvenli değildirler.

## 2.2 Biyokütle

Temelde bitki ve canlı organizmaları kapsayan biyokütle, fotosentez yardımıyla güneş enerjisini depolayan organizmalar olarak nitelendirilir. Biyokütle, yalnızca bir türün ya da birçok türden meydana gelen bir toplumdaki organizmaların toplam kütlesi olarak da tanımlanmaktadır. Geniş tanımı yaşayan organizmalar olan biyokütle orman, tarım, kanalizasyon ve organik endüstriyel atıkları içermektedir.

Enerji hammaddesi organik maddeler fotosentez yardımıyla sentezlenerek atmosfere oksijen verirler. Fotosentez sırasında açığa çıkan karbondioksit bu organiklerin

oluşumunda atmosferden alındığından ekstra karbondioksit üretimi gerçekleşmemiş olur ve çevre kendi kendini korur.

Biyokütle, geleneksel anlamda ısınma ve yemek pişirmek için odun olarak binyıllardır kullanılmaktadır. Modern anlamda ise odunun enerji yoğunluğunun artırılarak yakıtı dönüştürülmesi ile 21. yüzyılda kullanılmaya başlanmıştır. Günümüzde halen atık olarak değerlendirilen biyokütle alternatif ve yenilenebilir bir enerji kaynağı olup ekonomiye kazandırılması gerekmektedir.

Biyokütleden elde edilebilecek olan enerji katı, sıvı, gaz olarak sınıflandırılabilir. Odun, pelet vs. katı enerji formunu, biyodizel, etanol vs. sıvı enerji formunu, hidrojen, biyogaz vs. ise gaz enerji formunu oluşturmaktadır. Gazlaştırma ve piroliz işlemleri ile biyokütleden sıvı ve gaz enerji formları üretilebilir.



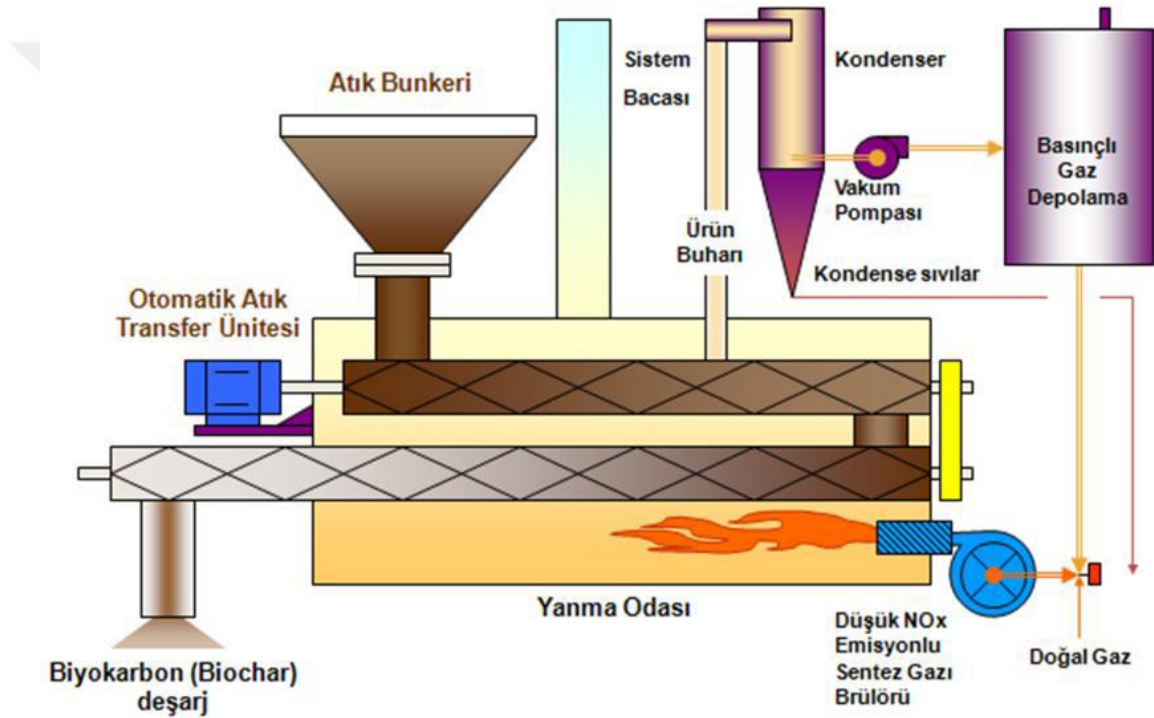
Şekil 2.3 Klasik ve Modern Biyokütle Ayrımı (Anonim 2016)

### 2.3 Piroliz

Piroliz; atığın havasız ortamda, azot ve hidrojen atmosferinde sıcaklık etkisiyle parçalanarak gaz, sıvı yakıt ve kömüre dönüştürülmesi işlemidir.

Piroliz işleminde atığın molekülündeki kimyasal bağları oksijensiz ortamda termal olarak bozunurlar. Piroliz sürecinin en önemli parametresi sıcaklıktır. Piroliz sıcaklığının artması ile gaz ürün verimi artarken, sıvı ve katı ürün verimi düşer. Gelişmiş ülkelerde, atıkları uzaklaştırmak için yakma ve depolama işlemleri yerine atığın geri kazanma ile değerlendirildiği piroliz işlemi uygulanmaktadır.

Piroliz süreci; yüksek sıcaklığa ve aşındırıcı gazlara dayanıklı yapıda fırınlarda gerçekleştirilmektedir.

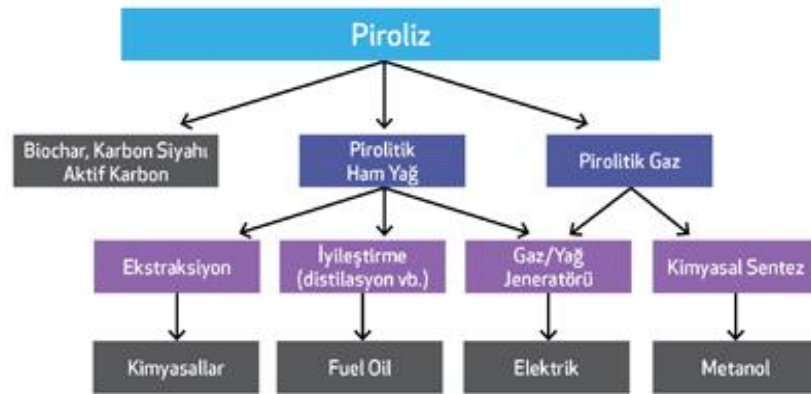


Şekil 2.4 Piroliz Reaktörünün Çalışma Prensibi (Anonim 2015)

Yatay U-tipi şeklindeki piroliz reaktörünün dış kısmında reaktörün tamamını içine alan bir yanma kamarası ve kamarayı ısıtmak için bir gaz brülörü bulunmaktadır. Piroliz ünitesine kurutulmuş katı beslemeden önce piroliz reaktörü dıştan doğal gaz ile çalıştırılan brülör ile ön ısıtmaya tabi tutulur, yanma kamarasında sıcaklık 900 °C'lere ulaştıktan sonra piroliz işlemi için atıklar fırının üst kısmından beslenir. Besleme bunkerinin altındaki valf, atığın reaktör içerisine hava (oksijen) sızmasını önleyecek şekilde devamlı olarak beslenmesini sağlar. Reaktör içerisindeki hız kontrollü helezon reaktörün içine beslenen atık biriketlerini yatayda sağa, sola hareket ettirir. Bu sayede

atığın iyi bir karışma ile tamamının termal parçalanması sağlanmış olur ve reaktörün alt bölümündeki çıkışa doğru yönlendirilir. Termal bozunma sonucunda katı atıktan oluşan sentez gazı bir vakum pompası ile emilerek gaz soğutma ve temizleme ünitesine aktarılırken gazı alınmış atıktan geriye kalan katı alttan çekilir.

Piroliz reaktöründe termal bozunma ile üretilen sıcak sentez gazı önce siklon seperatörden geçirilir ve katı karbon partiküllerinden arındırılır. Siklondan alınan gaz önce soğutulur ve bünyesinde taşımış olduğu su buharı ve katran yoğunlaştırılır. Soğutulan gaz daha sonra bünyesindeki HCl, H<sub>2</sub>S kirleticilerinden temizlenir. Yıkama kolonundan çekilen soğutulmuş (30-40 °C) ve temizlenmiş sentez gazı gaz depolama tankında sıkıştırılmış olarak depolanır. Sıkıştırılan gazın yaklaşık % 15'i piroliz ünitesinin enerji ihtiyacı için piroliz reaktörünün brülörüne gönderilir ve doğal gaz kullanımı kesilir. Üretilen sıkıştırılmış gazın % 85'i ise gaz motorlarında yakılarak elektrik enerjisine dönüştürülür.



Şekil 2.5 Piroliz Sonucu Oluşan Ürünler

Biyokütle ve plastik atıkların ısıl bozundurulması ve pirolizine yönelik olarak literatürde birçok çalışma vardır.

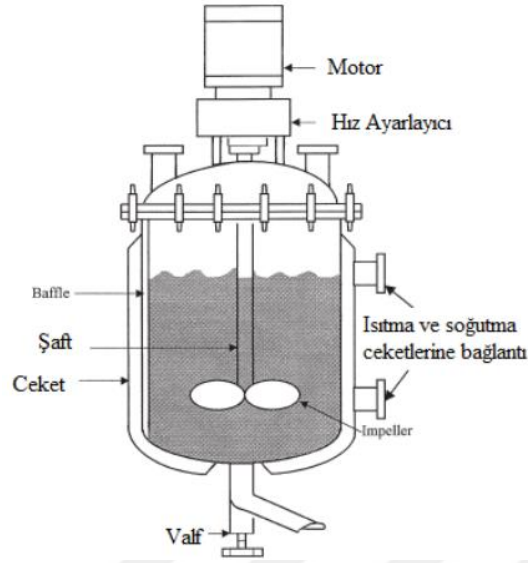
## 2.4 Kesikli Reaktörler

Kesikli reaktörler endüstriyel proseslerde geniş kullanım alanı olan, ürün karıştırması, kimyasal reaksiyonlar, kesikli distilasyon, kristalizasyon, sıvı-sıvı ekstraksiyon, polimerizasyon gibi çok çeşitli proseslerin gerçekleşmesine yardımcı olan birimlerdir.

Tipik bir kesikli reaktör bir tank, karıştırıcı ve iç ısıtma-soğutma sistemi bulundurur. Bu kaplar 1 litreden az hacimde oldukları gibi 15000 litre hacimlerine kadar yüksek hacimlerde de olabilir. Çelik, paslanmaz çelik, cam ya da çeşitli kompozit malzemelerden üretilir. Sıvı ve katılar genel olarak reaktörün en üst noktalarında işlem görürken buhar ve gaz değişimleri de yine aynı şekilde üst kısımlarda gerçekleşir. Sıvılar genellikle en alt kısımda değişime uğrar.

Kesikli reaktörlerde reaksiyon mükemmel bir homojenlikte gerçekleşir. Proses istenilen dönüşüm oranına erişildiğinde durur. Reaktör boyutları küçük ölçekte çalışan pilot tesisler için 5 galon, daha geniş ölçekte çalışan işletmelerde bu değer 10.000 ila 20.000 galon arasında değişmektedir. Geniş hacimler gerekli olduğunda tasarım bu duruma paralel olarak çok çeşitli operasyon üniteleri kullanımını da beraberinde getirir.

Küçük ölçekteki pilot tesislerde kesikli reaktörler ön bilgi elde etmek amacıyla kullanılabilir. Kesikli reaktörler ayrıca daha yüksek saflıkta verimde gelişmiş küçük miktarlarda yeni ürün üretiminde tercih sebebidir. Endüstride kesikli reaktörler ilaç biyokimyasal ya da boya endüstrisinde yaygın olarak kullanılır. Bu reaktörler mükemmel karıştırıcı sistemlerini ve bazı dâhili temizleme ünitelerini de içerir (Şekil 2.6).



Şekil 2.6 Kesikli Karıştırmalı Reaktör

Kesikli reaktörlerin avantajları;

- Kolay kurulum
- Küçük maliyetler
- Rahat operasyon şartları

Kesikli reaktörlerin en önemli dezavantajları işletim maliyetidir. Reaktörün doldurulması boşaltılması sırasında ve yeni bir besleme yapılmadan önce temizleme işlemlerinde geçen zaman kaybı büyük bir işletim maliyeti sorunudur. Ayrıca bir reaksiyon oluşurken belirli bir sıcaklığa ısıtılması gerekebilir. Reaksiyon tamamlandığında ise ürünün soğutulması istenebilir. Bunları sağlamak için de ciddi bir enerji ve zamana ihtiyaç duyulur. Diğer bir dezavantaj da ısı transferinin kontrolünün zorluğu ve ürün kalitesinin devamlılığını sağlayabilmenin güçlüğüdür. Kimyasal reaksiyon hızı genellikle sıcaklık artışı ile artar. Reaktanlar arasındaki baskın temaslar da hızı artırır.

Mekanik karıştırıcılar kütle iletimini ısı akışı itici gücü ile sağlayarak kap çeperlerinde film direncinin oluşmasını azaltmaya çalışır. Buna ek olarak karıştırıcılar küçük katı parçacıkların da topaklanmasını önler.

## 2.5 Kaynak Araştırması

Çağlar (2004), bu çalışmada Trabzon'dan elde ettiği fabrikasyon çay atığını kullanarak piroliz yapmıştır. Çay atıkları öğütülüp kurutularak 1,5 gr atık kütle için 0,1. 0,3. 0,5 ve 0,7 gr miktarlarda  $K_2CO_3$ ,  $ZnCl_2$  ve  $Na_2CO_3$  katalizörleri ile karıştırılmış ve 700 °C sıcaklıkta piroliz işlemi gerçekleştirilmiştir. Sıcaklık 350°C iken % 32,3 olan piroliz verimi, sıcaklık 750 °C'ye çıkarıldığında % 26,3'e düşmüştür.  $Na_2CO_3$  katalizörü ile piroliz reaksiyonunun sıvı verimi % 26,1'den % 30,2'ye yükselmiştir. Katalizör miktarı ( $Na_2CO_3$ ) % 10'dan % 70'e arttırıldığında sıvı ürünlerin verimi % 30,2'den % 27,3'e düşmüştür. 0,5 g  $K_2CO_3$  katalizörü kullanıldığında piroliz reaksiyonunun sıvı verimi % 26,1'den % 26,2'ye çıkmıştır. Katalizör miktarı ( $K_2CO_3$ ) % 10'dan % 70'e çıkartıldığında sıvı ürünler % 25,9'den % 25,1'e düşmüştür. 0,1 gr  $ZnCl_2$  katalizörü ile sıvı verimi % 26,1'den % 26,4'e yükselmiştir. En yüksek sıvı ürün verimini % 26,4 ve % 26,0 olarak  $ZnCl_2$  katalizörü (0,1 ve 0,3 g) ile 700 °C sıcaklıktaki piroliz reaksiyonu vermiştir.

Olgun (2005), yenilenebilir enerji kaynaklarından olan odunun pirolizi yöntemiyle gaz ve sıvı ürünlerin verimi üzerine sıcaklık, süre gibi işletme parametrelerinin etkisini incelemiştir. Gürgen, meşe ve kavak türlerindeki odun talaşları (300 µm altı) mikro reaktörde değişik sıcaklık ve sürelerde ısıl bozunmaya tabi tutulmuştur. Oluşan gaz, sıvı ve çar ürün miktarları belirlenmiştir. 300-450 °C sıcaklık aralığında 1 saatlik piroliz ile gürgen için 450°C, meşe için 350°C ve kavak için 450 °C'de elde edilen en yüksek gaz ürün verimleri sırasıyla % 65,05, % 47,60, % 35,59'dur. Gürgen için en yüksek gaz ürün verimi 450 °C piroliz sıcaklığında 1 saatlik işletme süresinde % 65,05 olarak elde edilmiştir. 450 °C piroliz sıcaklığında meşe için en yüksek gaz ürün verimi 1,5 saatlik işletme süresinde % 45,84 ve kavak için en yüksek gaz ürün verimi yarım saatlik işletme süresinde % 54,29'dur. 300-450 °C sıcaklık aralığında 1 saatlik piroliz ile gürgen için 350 °C, meşe için 450 °C ve kavak için 400 °C'de elde edilen en yüksek sıvı ürün verimleri sırasıyla % 43,77, % 66,98, % 69,18'dir. 450 °C piroliz sıcaklığında elde edilen en yüksek sıvı ürün verimleri, gürgen için 2 saatte % 53,45, meşe için 1 saatte % 66,98 ve kavak için 1,5 saatte % 63,55'dir. Gürgen, meşe ve kavak türlerindeki biyokütlelerin pirolizi sonucu oluşan sıvı ürünlerin GC/MS analizleri yapılmış olup benzen, toluen, etil benzen, furfural, 2-hidroksi-3-metil-2-siklopenten-1-one, ksilenler

ve çeşitli fenol bileşikleri içerdiği, benzen ve fenol bileşiklerinin miktarlarının fazla olduğu gözlenmiştir.

Dominguez vd. (2006) bu çalışmada, kahve kabuklarını 500, 800 ve 1000 °C sıcaklıklarda konvensiyonel ve mikrodalga pirolize tabi tutmuştur. Piroliz metodunun ve sıcaklığın ürün verimine ve piroliz ürününün karakteristiğine etkileri incelenmiştir. Piroliz sonuçları, düşük sıcaklıklarda bile yüksek gaz fraksiyonları oluştuğunu göstermiştir. Mikrodalga ve konvensiyonel piroliz karşılaştırıldığında mikrodalga uygulamasının konvensiyonele göre daha fazla gaz daha az sıvı ürettiği görülmüştür. Ayrıca aynı sıcaklıklarda, mikrodalga ile oluşan H<sub>2</sub> ve sentez gazı (H<sub>2</sub> + CO) (hacimce % 40 ve % 72) konvensiyonel ile oluşana göre (hacimce % 30 ve % 53) daha fazladır. Piroliz fraksiyon verimleri ve en yüksek ısı değerlerinden piroliz ürünlerinin enerji dağılımının gaz>katı>sıvı şeklinde olduğu görülmüştür. Piroliz sıcaklığındaki artışla gazın enerji birikimi artarken katının birikimi azalmaktadır. Bu etki mikrodalga piroliz kullanımıyla artmıştır.

Yılgin vd. (2006) çalışmada, odun türlerinin (meşe, çam ve kavak vb.) farklı sıcaklıklardaki hızlı pirolizini araştırdı. Yenilenebilir enerji ve hammadde kaynağı olan odunun hızlı pirolizi sonucu oluşan ürünlerin verimi üzerine odun türünün, sıcaklığın (400, 500 ve 600 °C) ve tane boyutunun (8, 10 ve 12 mm) etkisi incelemiştir. Piroliz sıcaklığının artması ile sıvı ürün veriminin arttığı tane boyutunun artması ile ise azaldığı görülmüştür. Piroliz ürün verimleri üzerinde odun türünün etkili olduğu görülmüştür. Meşe odununda (yüksek lignin içeriği) katı ürün veriminin, kavak odununda (yüksek selüloz içeriği) ise sıvı ve gaz ürün verimlerinin yüksek olduğu görülmüştür.

Paradela (2009) bu çalışmada, plastik ve biyokütle atıklarının farklı karışımlarının pirolizi ile oluşan sıvı verimini arttırmayı amaçlamıştır. Polietilen (PE), polipropilen (PP) ve polistren (PS) plastik atık orman atıkları ise biyokütle olarak kullanılmıştır. Karışımlardaki biyokütle bulunması sıvı verimini düşürmüştür ancak içeriğindeki yüksek oranda uçuculardan dolayı ürünlerin gaz fraksiyonlarını arttırmıştır.

Ertay vd. (2008) bu çalışmada, Hatay (Dörtöl) uçucu yağ fabrikasından temin edilen defne artıklarını biyokütle kaynağı olarak seçmiştir. Defne artıkları, inert atmosferde 350-600 °C arasındaki farklı sıcaklıklar altında sabit yatak reaktörde pirolize tabi tutulmuştur. Piroliz ürünleri verimi üzerinde parçacık boyutu, piroliz sıcaklığı ve inört gaz (N<sub>2</sub>) akış hızının etkileri incelenmiştir. Deney sonuçları inört gaz akış hızının ve piroliz sıcaklığının piroliz ürünlerinin verimi üzerinde etkili olduğunu göstermiştir. Elde edilen sıvı piroliz ürünlerinin GC-MS ile analizleri yapılmıştır.

Önal (2009) alışmasında, tütünün tarla atığını hammadde olarak kullanmış ve yapay yakıt üretimi için hızlı pirolizini gerçekleştirmiştir. 0,425-0,85 mm parçacık boyutlarındaki tütün 500°C/dk ısıtma hızında, 400, 500, 550, 700 °C sıcaklıklarda; 50, 100, 200, 400 cm<sup>3</sup>/dk inört gaz (N<sub>2</sub>) akış hızları uygulanarak pirolize tabi tutulmuştur. Hızlı piroliz çalışmalarında piroliz sıcaklığı ve azot akış hızının piroliz ürünlerinin verimleri üzerine etkisi incelenmiştir. Sıvı ürün verimi en yüksek % 32,63 olarak, 500 °C/dk ısıtma hızı ile 550 °C sıcaklıkta, 200 cm<sup>3</sup>/dk azot akış hızında elde edilmiştir. Hızlı piroliz sonucu elde edilen sıvı ürünler kromatografik ve spektroskopik yöntemlerle incelenmiş olup kimyasal hammadde kaynağı ve yakıt olarak kullanılabilirliği değerlendirilmiştir.

Taşar vd. (2011) bu çalışmasında, kayın, am, meşe, odunlarının endüstriyel kullanımı sonucunda açığa çıkan farklı parçacık boyutlarındaki toz atıklarını piroliz hammaddesi olarak kullandı. Üç tür odun talaşının pirolizi 10 ml/dk akış hızında nitrojen beslenerek 25-900 °C aralığında sıcaklıklarda 10 °C/dk ısıtma hızı ile gerçekleştirilmiş. Piroliz sonucunda termograf ile üç bölge belirlenmiştir. Farklı teorik model eşitlikleri için bozunmayı gösteren regresyon sabitleri Coast-Redfern metodu ile hesaplanmış. Hesaplanan regresyon katsayılarına göre bozunmayı en iyi tanımlayan kinetik model belirlenmiştir.

Varol ve Mutlu (2012) bu çalışmalarında, piroliz yöntemiyle üç farklı biyokütleden sıvı ve katı ürünlerin oluşumu ve oluşan ürünlerin karakterizasyonunu incelemişler. Sabit yataklı reaktörde inört gaz ortamında üç farklı biyokütlenin pirolizi gerçekleştirilmiştir. Pirininin 10°C/dk ısıtma hızında, 550 °C sıcaklıktaki pirolizinde en yüksek sıvı ürün

verimine ulaşılmıştır. Elde edilen sıvı piroliz ürünlerinin GC-MS, FT-IR, <sup>1</sup>H-NMR analizleri yapılmıştır.

Rangarajan (2014) bu çalışmasında, parçacık model geliştirerek ticari reaktörlerde çıkan kentsel katı atıklar ile olan biyokütlenin pirolizini tanımlamak istemiştir. Saf biyokütleyle katı atıklar karıştırılmıştır. Katı atıkların içindeki plastikler için polietilen ve polistren kullanılmıştır. Parçacıkların piroliz altında fiziksel ve kimyasal dönüşümü dönüşüm ve kimyasal reaksiyon denklikleri kullanılarak modellenmiştir. Bu formülasyonlar MATLAB'ta uygulanmıştır. Çeşitli biyokütle ve atık numuneleriyle ilişkili simülasyonlar pirolizin kimyasal kompozisyondan fazlasıyla etkilendiğini göstermiştir. Saf biyokütleyle karşılaştırıldığında plastik içeren katı atıkların daha yüksek sıcaklıklarda bozunduğu görülmüştür. Yanı sıra polietilen içeren karışımların daha fazla kütle kaybı yaşadığı gözlemlenmiştir.

Weerdhof (2015) bu çalışmasında, biyokütlenin dönüşüm prosesine sıcaklık, partikül büyüklüğü ve yakıt özelliklerinin etkilerini incelemek için biomass partiküllerinin dönüşümünü kullanarak piroliz prosesini modellemiştir. Bu çalışmayı iki basamakta gerçekleştirmiştir. İlk olarak, odunsu biyokütlelerin kimyasal kompozisyonlarını ve yapılarına dair literatür taraması ile elde ettiği bilgileri incelemiş ve önerilen reaksiyonların biyokütle pirolizi için açıklanan reaksiyon basamaklarına ve kinetiklerine bakılmıştır. İkinci basamakta ise homojen model dönüşüm etkilerini içerecek şekilde partikül modele genişletilmiştir. Bu model ile sıcaklığın ortama ve parçacık boyutuna etkisi araştırılmıştır. Kimyasal piroliz, lignin, selüloz ve yarı selüloz kullanılarak oluşan yakıt modeli içermektedir. Tüm yakıtlar iki reaktörde katı ve gaza dönüştürülmüştür. İki reaktörden de katı veriminin artan sıcaklıkla azaldığı görülmüştür. Modelden elde edilen sonuçlar literatür verileriyle karşılaştırılmıştır. Bu durumun literatürde de aynı olduğu görülmüştür.

### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

#### 3.1 Materyal

Bu tez çalışmasında; Gökkaya (2012)'nın polipropilen, polistiren, ağır aromatikler ve HVGO petrokimyasalları ile yaptığı piroliz deneylerinin sonuçları kullanılmıştır. Deneyler basınç altında ısı ve katalitik olarak yapılmıştır. PP ve PS plastik atıklarının ayrı ayrı ve belli oranlarda karışımları, rafinerilerin ağır vakum fraksiyonu (HVGO) ve Ağır Aromatik atıklar ile belli oranlarda karışımları ısı ve katalitik olarak eş-pirolize tabi tutulmuştur. Yapılan deneylerde elde edilen ürünlere bekleme süresinin etkisinin görülmesi için reaktör içi sıcaklık istenilen seviye ulaştığında 30, 60 ve 90 dakika aynı sıcaklıkta bekletilmiştir.

Sıvı ürün ve katı kalıntının miktarları tartım ile bulunmuş ve toplam reaktöre konan maddeden reaktörden alınan katı ve sıvı miktarları toplamı çıkartılarak gaz+kayıp ürün miktarı tespit edilmiştir. Sıvı, katı ve gaz+kayıp ürün miktarları belirlendikten sonra oluşum yüzdeleri aşağıdaki gibi hesaplanmıştır. Yapılan deneylere ilişkin veriler aşağıdadır.

Dönüşmeden kalan katı ( $\frac{C_A}{C_{A_0}} = 1 - X_A$ );

$$\% \text{ Katı (A)} = \frac{\text{Reaktörden alınan katı (gr)}}{\text{Reaktöre konulan madde (gr)}} \times 100 \quad (3.1)$$

Sıvı ürün verimi ( $Y_B = \frac{C_B}{C_{A_0}}$ );

$$\% \text{ Sıvı (B)} = \frac{\text{Reaktörden alınan sıvı (gr)}}{\text{Reaktöre konulan madde (gr)}} \times 100 \quad (3.2)$$

Gaz ürün verimi ( $Y_C = \frac{C_C}{C_{A_0}}$ );

$$\% \text{ Gaz} = \frac{\text{Reaktöre konulan madde (gr)} - \text{Reaktörden alınan katı+sıvı (gr)}}{\text{Reaktöre konulan madde (gr)}} \times 100 \quad (3.3)$$

Çizelge 3.1 PS'nin 325 °C'de yapılan ısı bozundurulmasına bekleme süresinin etkisi

| Süre (dk) | Katı | Sıvı | Gaz  |
|-----------|------|------|------|
| 30,0      | 9,3  | 80,5 | 10,2 |
| 60,0      | 10,2 | 79,4 | 10,4 |
| 90,0      | 10,2 | 77,9 | 11,9 |

Çizelge 3.2 PP'nin 375 °C'de yapılan ısı bozundurulmasına bekleme süresinin etkisi

| Süre (dk) | Katı | Sıvı | Gaz  |
|-----------|------|------|------|
| 30,0      | 8,1  | 76,8 | 15,1 |
| 60,0      | 7,6  | 82,9 | 9,5  |
| 90,0      | 7,8  | 78,2 | 14,0 |

Çizelge 3.3 PP/HVGO'nun (5/1) 375 °C'de yapılan ısı bozundurulmasına bekleme süresinin etkisi

| Süre (dk) | Katı | Sıvı | Gaz  |
|-----------|------|------|------|
| 30,0      | 23,4 | 68,6 | 8,0  |
| 60,0      | 6,7  | 81,6 | 11,7 |
| 90,0      | 9,4  | 81,3 | 9,4  |

Çizelge 3.4 PP/PS'nin (1/1) 375 °C'de yapılan ısı bozundurulmasına bekleme süresinin etkisi

| Süre (dk) | Katı | Sıvı | Gaz  |
|-----------|------|------|------|
| 30,0      | 14,7 | 77,9 | 7,5  |
| 60,0      | 11,5 | 74,7 | 13,8 |
| 90,0      | 15,2 | 68,7 | 16,1 |

Çizelge 3.5 PP/PS/AA'nın (1/1/1) 375 °C'de yapılan ısıl bozundurulmasına bekleme süresinin etkisi

| Süre (dk) | Katı | Sıvı | Gaz  |
|-----------|------|------|------|
| 30,0      | 34,4 | 56,7 | 8,9  |
| 60,0      | 34,9 | 54,7 | 10,4 |
| 90,0      | 33,9 | 54,2 | 11,9 |

Çizelge 3.6 PP/HVGO'nun (1/1) 375 °C'de yapılan ısıl bozundurulmasına bekleme süresinin etkisi

| Süre (dk) | Katı | Sıvı | Gaz  |
|-----------|------|------|------|
| 30,0      | 9,2  | 83,5 | 7,3  |
| 60,0      | 13,2 | 73,7 | 13,2 |
| 90,0      | 10,1 | 77,6 | 12,3 |

Çizelge 3.7 PP/PS/HVGO'nun (1/1/1) 375 °C'de yapılan ısıl bozundurulmasına bekleme süresinin etkisi

| Süre (dk) | Katı | Sıvı | Gaz  |
|-----------|------|------|------|
| 30,0      | 10,2 | 79,7 | 10,2 |
| 60,0      | 16,9 | 74,9 | 8,1  |
| 90,0      | 19,7 | 69,2 | 11,2 |

Çizelge 3.8 PP/AA'nın (1/1) 400 °C'de yapılan ısıl bozundurulmasına bekleme süresinin etkisi

| Süre (dk) | Katı | Sıvı | Gaz  |
|-----------|------|------|------|
| 30,0      | 30,7 | 59,6 | 9,7  |
| 60,0      | 29,3 | 57,8 | 12,9 |
| 90,0      | 27,1 | 59,0 | 13,9 |

Çizelge 3.9 PP/AA'nın (5/1) 400 °C'de yapılan ısı bozundurulmasına bekleme süresinin etkisi

| Süre (dk) | Katı | Sıvı | Gaz  |
|-----------|------|------|------|
| 30,0      | 14,8 | 69,1 | 16,1 |
| 60,0      | 12,8 | 68,5 | 18,8 |
| 90,0      | 15,1 | 67,8 | 17,1 |

Bu tez çalışmasında; Jongh vd. (2011) Asbos (Psilocaulon utile), Kraalbos (Galenia africana) ve Scholtzboş (Pteronia pallens) biyokütleleri, Chen vd. (2011) biyokütle ve bitki yağı karışımı ve Abnisa vd. (2011) palmye kabukları ile yaptıkları piroliz sonuçları biyokütle atıklar için kullanılmıştır.

Asbos (Psilocaulon utile), Kraalbos (Galenia africana) ve Scholtzboş (Pteronia pallens) biyokütleleri, 450°C sabit sıcaklık altında vakum pirolizi sonucu elde edilen ürünlere bekleme süresinin etkisinin görülmesi için reaktör içi sıcaklık istenilen seviye ulaştığında 30, 60 ve 90 dakika aynı sıcaklıkta bekletilmiştir. Yapılan deneylere ilişkin veriler aşağıdadır.

Çizelge 3.10 Asbos (Psilocaulon utile) bitkisinin 450 °C'de yapılan ısı bozundurulmasına bekleme süresinin etkisi

| Süre (dk) | Katı | Sıvı | Gaz |
|-----------|------|------|-----|
| 30        | 59   | 25   | 16  |
| 60        | 56   | 35   | 9   |
| 120       | 60   | 21   | 19  |

Çizelge 3.11 Kraalbos (Galenia africana) bitkisinin 450 °C'de yapılan ısı bozundurulmasına bekleme süresinin etkisi

| Süre (dk) | Katı | Sıvı | Gaz |
|-----------|------|------|-----|
| 30        | 43   | 26   | 31  |
| 60        | 41   | 37   | 22  |
| 120       | 37   | 28   | 35  |

Çizelge 3.12 Scholtzbos (*Pteronia pallens*) bitkisinin 450 °C’de yapılan ısıtıl bozundurulmasına bekleme süresinin etkisi

| Süre (dk) | Katı | Sıvı | Gaz |
|-----------|------|------|-----|
| 30        | 45   | 22   | 33  |
| 60        | 47   | 20   | 33  |
| 120       | 46   | 25   | 29  |

Biyokütle ve bitki yağı karışımının, 450 °C sabit sıcaklık altında pirolizi sonucu elde edilen ürünlere bekleme süresinin etkisinin görülmesi için reaktör içi sıcaklık istenilen seviye ulaştığında 5, 10, 15 ve 20 dakika aynı sıcaklıkta bekletilmiştir. Yapılan deneylere ilişkin veriler aşağıdadır.

Çizelge 3.13 Biyokütle ve bitki yağı karışımının 450 °C’de yapılan ısıtıl bozundurulmasına bekleme süresinin etkisi

| Süre (dk) | Katı | Sıvı | Gaz  |
|-----------|------|------|------|
| 5         | 37   | 47   | 16   |
| 10        | 31   | 44,5 | 24,5 |
| 15        | 29   | 46   | 25   |
| 20        | 29   | 45   | 26   |

Palmye kabuklarının, 500 °C sabit sıcaklık altında pirolizi sonucu elde edilen ürünlere bekleme süresinin etkisinin görülmesi için reaktör içi sıcaklık istenilen seviye ulaştığında 30, 60, 90, 120 ve 150 dakika aynı sıcaklıkta bekletilmiştir. Yapılan deneylere ilişkin veriler aşağıdadır.

Çizelge 3.14 Palmye kabuğunun 500 °C’de yapılan ısıtıl bozundurulmasına bekleme süresinin etkisi

| Süre (dk) | Katı | Sıvı | Gaz  |
|-----------|------|------|------|
| 30        | 32,5 | 29   | 38,5 |
| 60        | 32   | 46   | 22   |
| 90        | 31   | 45,4 | 23,6 |
| 120       | 30,5 | 45,5 | 24   |
| 150       | 29   | 45,5 | 25,5 |

## 3.2 Yöntem

### 3.2.1 Kalman filtreleme yöntemi

Matematikçi Rudolf Kalman tarafından bulunan Kalman Filtresi, tahmini parametreler için en düşük hata kare ortalaması veren en uygun tahmincidir. 1960’larda navigasyon sistemlerinde kullanılmaya başlayan Kalman Filtresi havacılık alanında yaygın olarak kullanılmaktadır.

Kalman Filtresi, dinamik bir sistemde modelin giriş çıkış bilgileri ile önceki bilgileri kullanarak sistemin durumunu tahmin etmeyi sağlayan bir algoritmadır. Sistemdeki ölçülemeyen durumların tahmininde oldukça güçlü olan Kalman diğer tahminciler gibi filtreleme de yapmaktadır. Kalman Filtesi, sistemdeki girdi, ölçüm ve gürültüleri eşzamanlı olarak işleyerek en düşük hata kareleri yöntemine göre filtreleme yapar ve sistemin özelliklerini bir model olarak belirler. Belirlenen bu model sonraki durumların matematiksel tahminini mümkün kılar.

Teorik olarak Kalman filtresi, son olarak beyaz gürültü tarafından bozulan durumla lineer ilişkisi olan ölçümleri kullanarak beyaz gürültü tarafından bozulan lineer dinamik sistemin anlık durumunu tahmin etme problemi olan lineer-kuadratik tahminleyicisidir. Beyaz gürültü, frekans spektrumu içerisinde sabit güç seviyesine sahip gürültüdür.

Pratik olarak istatistiksel tahmin teori tarihindeki en büyük buluşlardan biridir. İnsanoğlunun çok sayıda uygulamayı bu buluş sayesinde gerçekleştirmiş ve elektronik sistemlerin oluşturulmasında silikon kadar kaçınılmaz hale gelmiştir. Sürekli üretim prosesleri, uçaklar, gemiler ve uzaya araçları gibi kompleks dinamik sistemlerin kontrolü için en çok tercih edilen birincil uygulamadır. Dinamik bir sistemi kontrol etmek için öncelikle neler olduğu bilinmelidir. Bu tür uygulamalarda kontrol edilmesi istenilen her değişkenin ölçülmesi mümkün değildir. Kalman filtresi dolaylı ölçümlerden kaynaklanan eksik verilerden sonuç çıkarma imkânı sağlar. Kalman filtresi insanların sel esnasında nehirlerin akışı ve gök cisimlerinin yörüngeleri gibi insanların

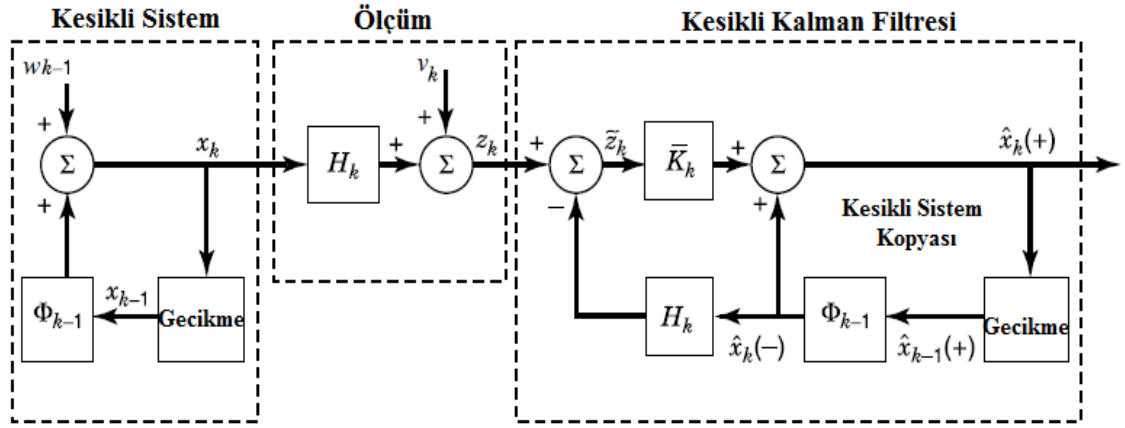
kontrol edemediği dinamik sistemlerin gelecekteki gidişatını tahmin etmede de kullanılır (Kavuştu 2012).

Kalman filtreleme yönteminin yaygın olarak kullanıldığı alanlar;

- Kimyasal tesislerde proses kontrolünde basınç, sıcaklık, akış hızı, gaz analiz tahmininde
- Nehir sistemlerinde sel tahminlerinde su seviyesinin, yağmur ölçęinin tahmininde
- Uzak araçlarında rota uygulamalarında radar ve görüntüleme sistemlerinde
- Navigasyon ölçmelerinde, GPS sistemlerinde, otomatik pilotlarda,
- 3 boyutlu modellemelerde
- Belirli makroekonomi, zaman serileri
- Sismik verilerin analizinde, deprem tahminlerinde
- Hava raporlarının tahminleri vb. birçok alanda kullanılmaktadır.

Kalman filtresi üç ana aşamadan oluşmaktadır. Bunlar filtreleme (Filtering), düzgünleştirme (Smoothing) ve öngörme (Forecasting)'dir. Somut bir tanım veya incelenecek problem tipleri için, aşağıdaki durumu göz önünde bulundurun. Elimizde sinyal  $x_1(t)$  ve gürültü  $x_2(t)$  var. Sadece  $y(t)=x_1(t)+x_2(t)$  toplamı gözlenebilmektedir.  $y(t_0), \dots, y(t)$ 'yi gözlemlediğimizi ve değerlerini tam olarak bildiğimizi varsayalım.  $t_1 < t$  ise düzgünleştirme problemi,  $t_1 = t$  ise filtreleme problemi,  $t_1 > t$  ise öngörme problemi denir.

Kalman filtresi bilinen periyod parametrelerinden bilinmeyen periyod parametrelerini az sayıda ölçme periyodu ile durum değişkenlerini minimum varyansla tahmin edebilir. Bu ilk tahminleri geliştirerek yeniden tahmin edebilir. Kesikli zaman kalman tahminleyicisi şekilde gösterilmiştir.



Şekil 3.1 Kesikli zaman Kalman filtresi akış şeması (Grewal ve Andrews 2001)

Burada;

$$X_k = \varphi_{k-1} X_{k-1} + W_{k-1} \quad \text{Sistem Dinamik Modeli} \quad (3.4)$$

$$Z_k = H_k X_k + V_k \quad \text{Ölçüm modeli} \quad (3.5)$$

$$\hat{X}_k(+) = [I - \bar{K}_k H_k] P_k(-) \quad \text{Sistem durum vektörü kestirimi} \quad (3.6)$$

$$\hat{X}_k(-) = \varphi_{k-1} \hat{X}_{k-1}(+) \quad \text{Sistem durum vektörü kestirim güncellemesi} \quad (3.7)$$

$$\bar{K}_k = [P_k(-) H_k^T [H_k P_k(-) H_k^T + R_k]^{-1}] \quad \text{Kalman kazanç matrisi} \quad (3.8)$$

$$P_k(-) = \varphi_{k-1} P_{k-1}(+) \varphi_{k-1}^T + Q_{k-1} \quad \text{Kestirim hata kovaryans} \quad (3.9)$$

$$P_k(+) = [I - \bar{K}_k H_k] P_k(-) \quad \text{Kestirim hata kovaryansı güncellemesi} \quad (3.10)$$

Kalman fitresi, işlemi bir çeşit geri-besleme kontrol ile tahmin eder. Bazı zamanlarda işlem durumu tahmin eder ve ölçü biçiminde geri-besleme edinir. Kalman filtre denklemleri zaman güncelleme ve ölçüm güncelleme olarak 2 grupta toplanabilir. Zaman güncelleme denklemlerinde sistem ve hata kovaryans kestiriminin bir sonraki durumu hesaplanır. Ölçüm güncelleme denklemlerinde ise hesaplanan değerler geri-besleme ile düzeltilir ve bir sonraki adım için sistem durum kestirimi yapar. Kalman filtresi denklemler Eşitlik (3.8-3.12)'de verilmiştir.

Zaman güncelleme denklemleri;

$$\hat{x}_k^- = A\hat{x}_{k-1} + Bu_{k-1} \quad (3.11)$$

$$P_k^- = AP_{k-1}A^T + Q \quad (3.12)$$

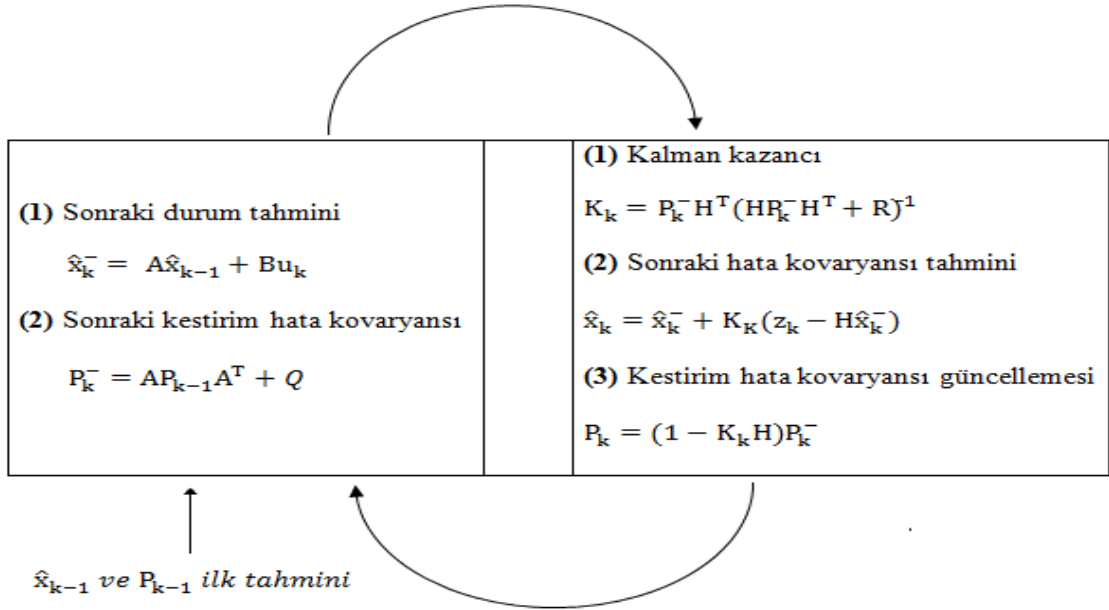
Ölçüm güncelleme denklemleri;

$$K_k = P_k^- H^T (HP_k^- H^T + R)^{-1} \quad (3.13)$$

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + K_k(z_k - H\hat{x}_k^-) \quad (3.14)$$

$$P_k = (1 - K_k H)P_k^- \quad (3.15)$$

Her zaman ve ölçüm güncellemesinden sonra işlem yeni  $P_k^-$  kestirimi tahmini veya tasarlanması için kullanılan önceki  $P_k$  kestirimi ile işlem tekrarlanır (Şekil 3.2).



Şekil 3.2 Kalman filtresinin işleyişi (Welch ve Bishop 2006)

### 3.2.2 Regresyon analizi yöntemi

Regresyon Analizi en az iki değişkenin aralarındaki ilişkiyi belirlemek için kullanılan bir yöntemdir. Bu değişkenler arasında neden sonuç ilişkisi bulunmalı ve değişkenlerin biri bağımlı değişken olmalıdır. Regresyonda değişkenlerin nicel olması zorunluluktur.

Değişkenlerin aralarındaki ilişkinin belirlenerek tahmin ve kestirimler yapabilmek için regresyon analizi yapılır. Örneğin; yaş-boy, gelir-gider, çalışma süresi- başarı derecesi, yem miktarı-süt verimi, gübre miktarı-ürün verimini gibi aralarında sebep sonuç ilişkisi olan birçok değişkenin aralarındaki ilişkiyi belirlemek için kullanılan matematiksel model regresyon analizi ile belirlenebilir. Regresyon yalnızca değişkenler arası ilişkinin modelini belirlemez, ayrıca değişkenlerden birinin bilinmesi halinde diğer değişken için kestirimlerde bulunur ve değişkenler arasında ilişkinin gücü ile ilgili de bilgilendirir. (www.wikipedia.com.tr 2016)

Değişkenler arasındaki ilişkinin matematiksel tanımına regresyon denklemi denir. Genel regresyon denklemi;

$$y = a + bx \quad (3.16)$$

Burada;

y: bağımlı değişken

x: bağımsız değişken

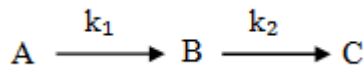
a, b: regresyon katsayılarıdır.

### 3.2.3 Plastik ve biyokütle atıklarının tepkime mekanizmaları

Bu tez çalışmasında plastik ve biyokütle atıklarının piroliz mekanizmalarının belirlenmesi için 5 farklı tepkime modeli denenmiş olup bu modeller aşağıda verilmiştir.

#### Model 1:

Bu model, katı atığın (A) seri tepkimelerle sıvılara (B), ve gazlara (C) dönüştüğünü öngörmektedir.



Burada bütün ardışık tepkimelerin birinci mertebe ve tersinmez olduğu kabul edilmiştir.

Bu modele göre tepkime hız ifadeleri;

$$\frac{dA}{dt} = -k_1 A \quad (3.17)$$

$$\frac{dB}{dt} = k_1 A - k_2 B \quad (3.18)$$

$$\frac{dC}{dt} = k_2 B \quad (3.19)$$

Hız ifadelerinin türevleri;

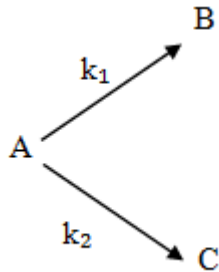
$$C_{A(i+1)} = C_{Ai}(1 - k_1 \Delta t) \quad (3.20)$$

$$C_{B(i+1)} = C_{Bi} + (k_1 C_{Ai} - k_2 C_{Bi}) \Delta t \quad (3.21)$$

$$C_{C(i+1)} = C_{Ci} + k_2 C_{Bi} \Delta t \quad (3.22)$$

### Model 2:

Bu model, katı atıktan (A), sıvı (B) ve gazların (C) oluşumunu içermektedir.



Bu modele göre tepkime hız ifadeleri;

$$\frac{dA}{dt} = -(k_1 + k_2) A \quad (3.23)$$

$$\frac{dB}{dt} = k_1 A \quad (3.24)$$

$$\frac{dC}{dt} = k_2 A \quad (3.25)$$

Hız ifadelerinin türevleri;

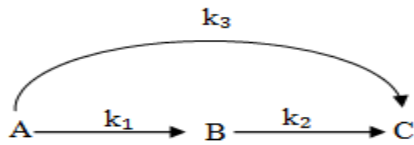
$$C_{A(i+1)} = C_{Ai}(1 - (k_1 + k_2) \Delta t) \quad (3.26)$$

$$C_{B(i+1)} = C_{Bi} + k_1 C_{Ai} \Delta t \quad (3.27)$$

$$C_{C(i+1)} = C_{Ci} + k_2 C_{Ai} \Delta t \quad (3.28)$$

### Model 3:

Bu model, katı atığın (A) seri tepkimelerle sıvılara (B), ve gazlara (C) ve direk gazlara (C) dönüşümünü içermektedir.



Bu modele göre tepkime hız ifadeleri;

$$\frac{dA}{dt} = -(k_1 + k_3)A \quad (3.29)$$

$$\frac{dB}{dt} = k_1A - k_2B \quad (3.30)$$

$$\frac{dC}{dt} = k_2B + k_3A \quad (3.31)$$

Hız ifadelerinin türevleri;

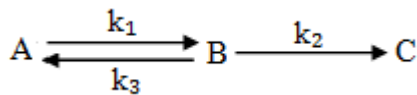
$$C_{A(i+1)} = C_{Ai}(1 - (k_1 + k_3)\Delta t) \quad (3.32)$$

$$C_{B(i+1)} = C_{Bi} + (k_1 C_{Ai} - k_2 C_{Bi})\Delta t \quad (3.33)$$

$$C_{C(i+1)} = C_{Ci} + (k_3 C_{Ai} + k_2 C_{Bi})\Delta t \quad (3.34)$$

### Model 4:

Bu model, katı atığın (A) seri tepkimelerle sıvılara (B), ve gazlara (C) ve sıvıların (B) tersinir tepkime ile katılara dönüşümünü içermektedir.



Bu modele göre tepkime hız ifadeleri;

$$\frac{dA}{dt} = -k_1A + k_3B \quad (3.35)$$

$$\frac{dB}{dt} = k_1A - (k_2 + k_3)B \quad (3.36)$$

$$\frac{dC}{dt} = k_2 B \quad (3.37)$$

Hız ifadelerinin türevleri;

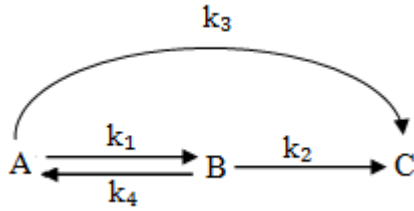
$$C_{A(i+1)} = C_{Ai} - (k_1 C_{Ai} - k_3 C_{Bi})\Delta t \quad (3.38)$$

$$C_{B(i+1)} = C_{Bi} + (k_1 C_{Ai} - (k_2 + k_3)C_{Ci})\Delta t \quad (3.39)$$

$$C_{C(i+1)} = C_{Ci} + k_2 C_{Bi}\Delta t \quad (3.40)$$

### Model 5:

Bu model, katı atığın (A) seri tepkimelerle sıvılara (B), ve gazlara (C) ve direk gazlara (C), sıvıların (B) ise tersinir tepkime ile katılara dönüşümünü içermektedir.



Bu modele göre tepkime hız ifadeleri;

$$\frac{dA}{dt} = -(k_1 + k_3)A + k_4 B \quad (3.41)$$

$$\frac{dB}{dt} = k_1 A - (k_2 + k_4)B \quad (3.42)$$

$$\frac{dC}{dt} = k_2 B + k_3 A \quad (3.43)$$

Hız ifadelerinin türevleri;

$$C_{A(i+1)} = C_{Ai}(1 - (k_1 + k_3)\Delta t) + k_4 C_{Bi}\Delta t \quad (3.44)$$

$$C_{B(i+1)} = C_{Bi} + (k_1 C_{Ai} - (k_2 + k_4)C_{Bi})\Delta t \quad (3.45)$$

$$C_{C(i+1)} = C_{Ci} + (k_3 C_{Ai} + k_2 C_{Bi})\Delta t \quad (3.46)$$

## 4. BULGULAR VE TARTIŞMA

### 4.1 Kalman Filtreleme Yöntemi ile Tepkime Mekanizması Belirleme

#### 4.1.1 Tepkime mekanizmalarının plastik atıklara uyumu

Polipropilen, polistiren, ağır aromatikler ve HVGO petrokimyasallarının ayrı ayrı ve belli oranlarda karışımlarının ısı ve katalitik olarak eş-pirolizleri sonucu elde edilen deneysel verilere (Çizelge 3.1-3.9) her bir model için elde edilen analitik çözümler ayrı ayrı uydurularak MATLAB (ver 7.10, The MathWorks Inc. Natick, MA,USA) bilgisayar programında Kalman filtresi yöntemiyle tüm plastikler için tepkime hız sabitleri belirlenmiştir (Çizelge 4.1). Plastik atıkların ısı bozunmasından elde edilen deneysel verilerle modellerden hesaplanan değerlerin kareler farklarının toplamı eşitlik 4.1’de gösterildiği şekilde hesaplanmış olup çizelge 4.2’de verilmiştir. Plastik atıkların deneysel sonuçları ile modellerden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır (Şekil 4.1-4.45).

$$\sum_i (y_{m_i} - y_{d_i})^2 = (s_m - s_d)^2 + (g_m - g_d)^2 \quad (4.1)$$

Burada;

$y_{m_i} - y_{d_i}$  = Model ve deneysel verilerden hesaplanan değerleri

$s_m - s_d$  = Model ve deneysel verilerden hesaplanan sıvı verimlerini

$g_m - g_d$  = Model ve deneysel verilerden hesaplanan sıvı verimlerini ifade etmektedir.

Çizelge 4.1 Plastik atıklar için modellerden elde edilen tepkime hız sabitleri ( $dk^{-1}$ )

|                          | $k_1$    | $k_2$     | $k_3$     | $k_4$    |
|--------------------------|----------|-----------|-----------|----------|
| <b>Polistiren (PS)</b>   |          |           |           |          |
| Model 1                  | 0,03986  | 0,00236   |           |          |
| Model 2                  | 0,03545  | 0,00445   |           |          |
| Model 3                  | 0,02982  | 0,00149   | 0,01008   |          |
| Model 4                  | 0,02818  | 0,00054   | 0,00366   |          |
| Model 5                  | 0,02427  | 0,00003   | 0,01032   | 0,00429  |
| <b>Polipropilen (PP)</b> |          |           |           |          |
| Model 1                  | 0,04245  | 0,003012  |           |          |
| Model 2                  | 0,03827  | 0,007166  |           |          |
| Model 3                  | 0,03027  | 0,002051  | 0,01517   |          |
| Model 4                  | 0,02704  | 0,001500  | 0,00281   |          |
| Model 5                  | 0,02273  | 0,000451  | 0,01311   | 0,003423 |
| <b>PP/PS</b>             |          |           |           |          |
| Model 1                  | 0,033595 | 0,004051  |           |          |
| Model 2                  | 0,026748 | 0,003646  |           |          |
| Model 3                  | 0,026373 | 0,003333  | 0,0040198 |          |
| Model 4                  | 0,028203 | 0,001635  | 0,0059728 |          |
| Model 5                  | 0,024905 | 0,0003799 | 0,0077991 | 0,006768 |
| <b>PP/HVGO (1/1)</b>     |          |           |           |          |
| Model 1                  | 0,038474 | 0,001332  |           |          |
| Model 2                  | 0,033182 | 0,003601  |           |          |
| Model 3                  | 0,029977 | 0,000503  | 0,006806  |          |
| Model 4                  | 0,029385 | 0,000136  | 0,003262  |          |
| Model 5                  | 0,025741 | 0,000279  | 0,008562  | 0,003951 |

Çizelge 4.1 Plastik atıklar için modellerden elde edilen tepkime hız sabitleri (dk-1)  
(devam)

|                             | <b>k<sub>1</sub></b> | <b>k<sub>2</sub></b> | <b>k<sub>3</sub></b> | <b>k<sub>4</sub></b> |
|-----------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| <b>PP/HVGO (5/1)</b>        |                      |                      |                      |                      |
| Model 1                     | 0,03573              | 0,0007958            |                      |                      |
| Model 2                     | 0,03229              | 0,0041237            |                      |                      |
| Model 3                     | 0,02796              | 0,0002166            | 0,008459             |                      |
| Model 4                     | 0,02601              | 0,0001069            | 0,002686             |                      |
| Model 5                     | 0,02352              | 0,0001834            | 0,007736             | 0,0031028            |
| <b>PP/PS/HVGO ( 1/1/1 )</b> |                      |                      |                      |                      |
| Model 1                     | 0,028295             | 0,0043061            |                      |                      |
| Model 2                     | 0,022587             | 0,0004170            |                      |                      |
| Model 3                     | 0,020945             | 0,0035691            | 0,001225             |                      |
| Model 4                     | 0,028255             | 0,0011979            | 0,008464             |                      |
| Model 5                     | 0,024217             | 0,0000202            | 0,009493             | 0,009341             |
| <b>PP/AA (1/1)</b>          |                      |                      |                      |                      |
| Model 1                     | 0,01148              | 0,0026998            |                      |                      |
| Model 2                     | 0,006491             | 0,0000481            |                      |                      |
| Model 3                     | 0,012266             | 0,0036115            | 0,000713             |                      |
| Model 4                     | 0,026762             | 0,0007648            | 0,011377             |                      |
| Model 5                     | 0,023990             | 0,0001855            | 0,004670             | 0,012438             |
| <b>PP/AA (5/1)</b>          |                      |                      |                      |                      |
| Model 1                     | 0,031814             | 0,0019319            |                      |                      |
| Model 2                     | 0,024829             | 0,0042169            |                      |                      |
| Model 3                     | 0,023728             | 0,0011422            | 0,0053183            |                      |
| Model 4                     | 0,028084             | 0,0001288            | 0,0058854            |                      |
| Model 5                     | 0,024571             | 0,0002778            | 0,0104662            | 0,007059             |

Çizelge 4.1 Plastik atıklar için modellerden elde edilen tepkime hız sabitleri (dk-1)  
(devam)

|                         | <b>k<sub>1</sub></b> | <b>k<sub>2</sub></b> | <b>k<sub>3</sub></b> | <b>k<sub>4</sub></b> |
|-------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| <b>PP/PS/AA (1/1/1)</b> |                      |                      |                      |                      |
| Model 1                 | 0,0060132            | 0,002714             |                      |                      |
| Model 2                 | 0,0024194            | 0,000026             |                      |                      |
| Model 3                 | 0,0083837            | 0,004321             | 0,000771             |                      |
| Model 4                 | 0,0247902            | 0,001005             | 0,014685             |                      |
| Model 5                 | 0,0222603            | 0,000116             | 0,002894             | 0,015196             |

Çizelge 4.2 Plastik Atıkların ısııl bozundurulmasından elde edilen deneysel veriler ile modellerden hesaplanan değerlerin kareleri farklarının toplamı

|                       | <b>Model 1</b> | <b>Model 2</b> | <b>Model 3</b> | <b>Model 4</b> | <b>Model 5</b> |
|-----------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| <b>PS</b>             | 6,2558         | 6,1464         | 5,8912         | 5,3225         | 4,8349         |
| <b>PP</b>             | 6,3455         | 5,9133         | 5,6721         | 5,8966         | 4,9462         |
| <b>PP/PS</b>          | 6,0542         | 6,5239         | 5,7816         | 4,7199         | 4,4733         |
| <b>PP/HVGO/11</b>     | 6,5447         | 6,7797         | 6,2749         | 5,2787         | 5,0392         |
| <b>PP/HVGO/51</b>     | 4,3428         | 4,0275         | 4,0397         | 4,1458         | 3,7320         |
| <b>PP/PS/HVGO/111</b> | 7,4659         | 7,6346         | 7,1220         | 5,3072         | 4,9209         |
| <b>PP/PA/11</b>       | 5,4817         | 5,4370         | 5,1498         | 3,6536         | 3,4136         |
| <b>PP/AA/51</b>       | 6,1503         | 5,6754         | 5,5342         | 5,1664         | 4,2126         |
| <b>PP/PS/AA/111</b>   | 5,5868         | 5,4683         | 5,3037         | 3,6089         | 3,3528         |

Plastik atıkların piroliz ile ısııl bozundurulmasından elde edilen deneysel sonuçlar ile modellerden hesaplanan sonuçların hata kareleri farklarının toplamına bakıldığında genel olarak en iyi uyumu Model 5 göstermektedir. Bu model katı→sıvı, sıvı→gaz, katı→gaz tepkime basamaklarına ve sıvı→katı tersinir tepkime basamağına sahiptir. Model 5 ile en iyi uyumu gösteren plastik atık ise PP/PS/AA(1/1/1) olmuştur.

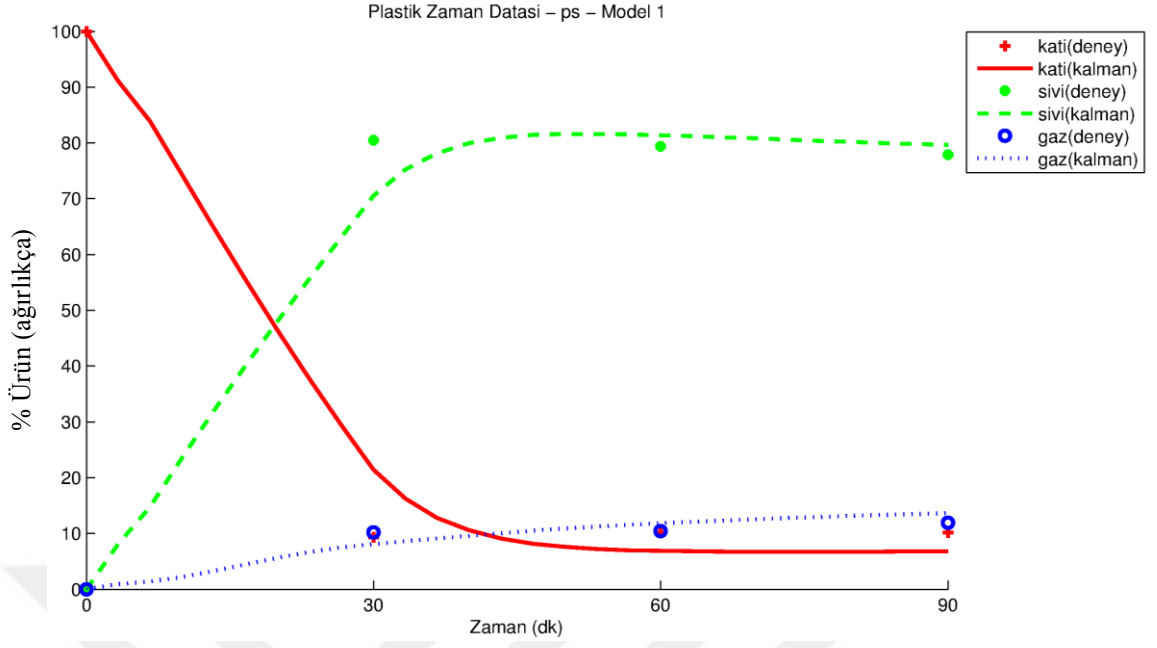
En iyi uyum sağlayan Model 5 için tepkime hız sabitlerinin büyüklüğüne bakıldığında en büyük hız sabitine katı→sıvı tepkime basamağı sahiptir. Bu plastik atıkların büyük bölümünün doğrudan sıvıya dönüştüğünü göstermektedir. Model 5 için en küçük hız

sabitine ise sıvı → gaz tepkime basamağı sahiptir. Tepkimelerde genel olarak sıvıdan gaz oluşumu daha yavaş gerçekleşmiştir.

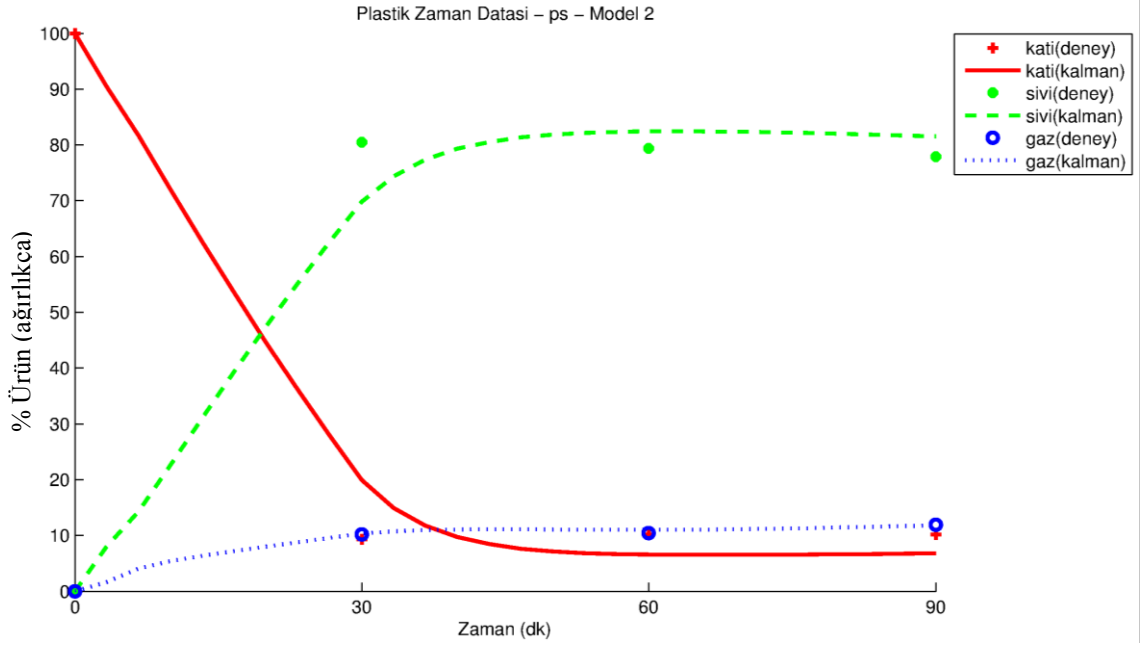
En büyük hız sabitini katı→sıvı tepkime basamağı ile PS, PP, PP/PS, PP/HVGO (1/1), PP/HVGO (5/1), PP/PS/HVGO (1/1/1), PP/AA (5/1) plastikleri için Model 1 verirken, PP/AA (1/1) ve PP/PS/AA (1/1/1) için Model 4 vermektedir.

En küçük hız sabitini sıvı→gaz tepkime basamağı ile PS, PP, PP/PS, PP/PS/HVGO (1/1/1), PP/AA (1/1), plastikleri için Model 5 verirken PP/HVGO (1/1), PP/HVGO (5/1) ve PP/AA (5/1) için Model 4 vermektedir. PP/PS/AA (1/1/1) için en küçük hız sabitini Model 2 ile katı→gaz tepkime basamağı vermektedir. Bu modelde sıvı→gaz tepkime basamağı bulunmamaktadır.

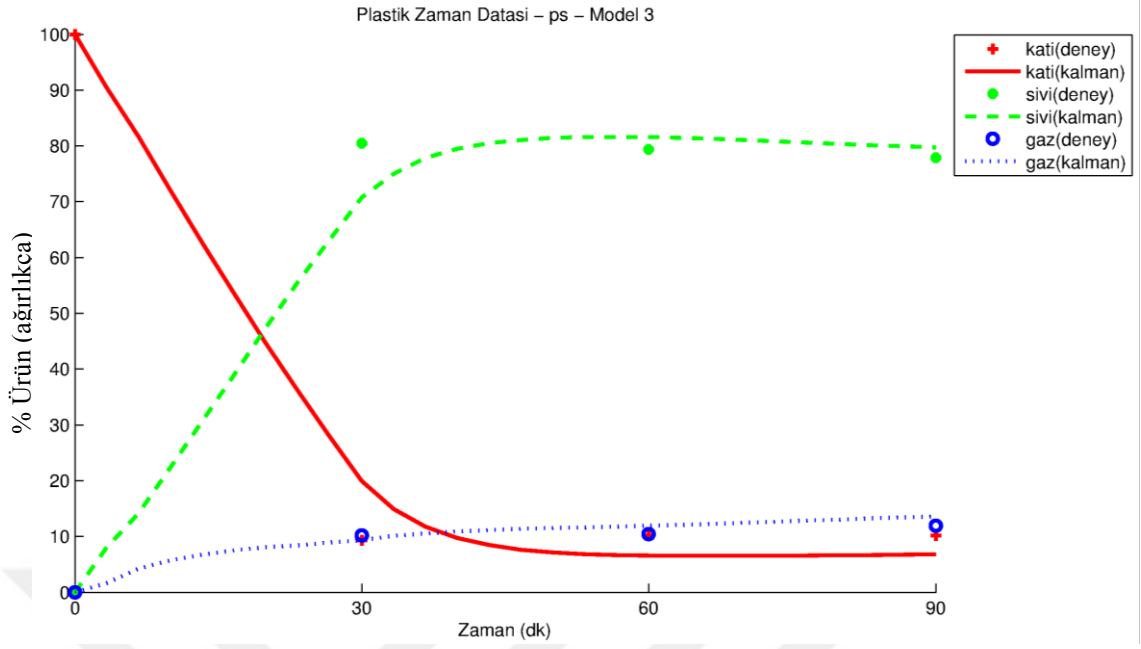
PS, PP, PP/PS, PP/HVGO (1/1), PP/HVGO (5/1), PP/PS/HVGO (1/1/1), PP/AA (1/1), PP/AA (5/1) PP/PS/AA (1/1/1) plastiklerinin deneysel sonuçlarının her bir model ile uyumunu şekil 4.1-4.45 göstermektedir. Tüm plastikler için görülmektedir ki Model 5 ile sağlanan uyumu diğer modeller göstermemektedir. Tüm modeller gaz oluşumu için teorik gidişata hemen hemen yakın sonuçlar verirken katı ve sıvı oluşumları için teorik gidişat ile uyumsuz sonuçlar vermektedir. Model 5 katı oluşumların yanı sıra sıvı ve gaz oluşumları için de teorik gidişatı sağlamaktadır.



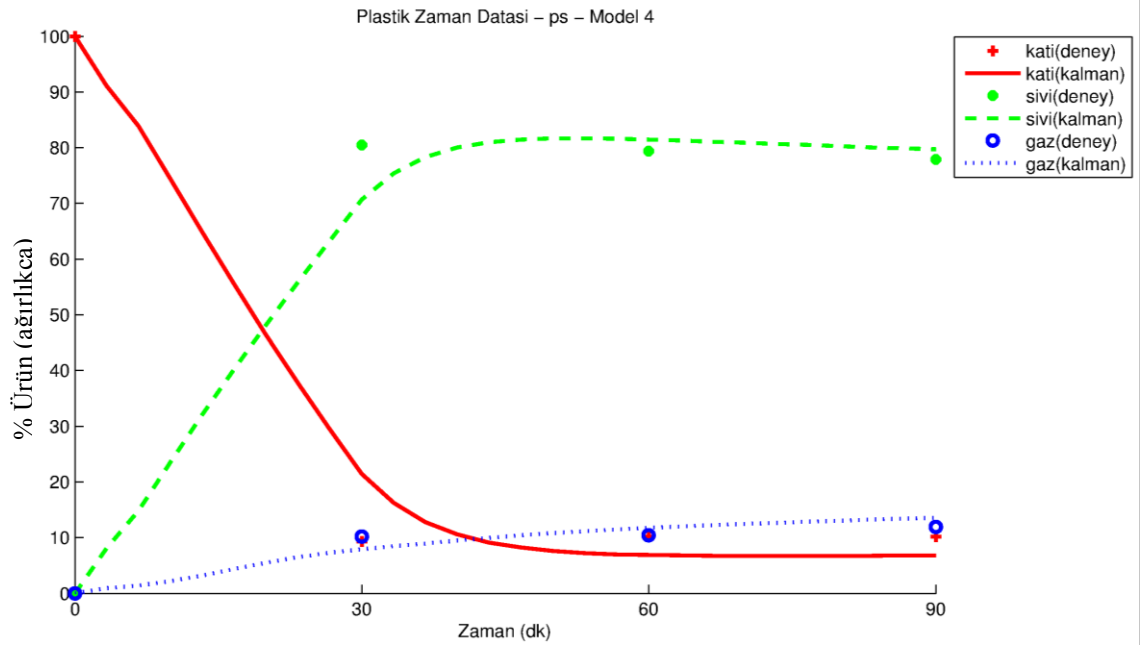
Şekil 4.1 PS'in Model 1'den elde edilen sonuçlarla deneysel sonuçlarının karşılaştırılması



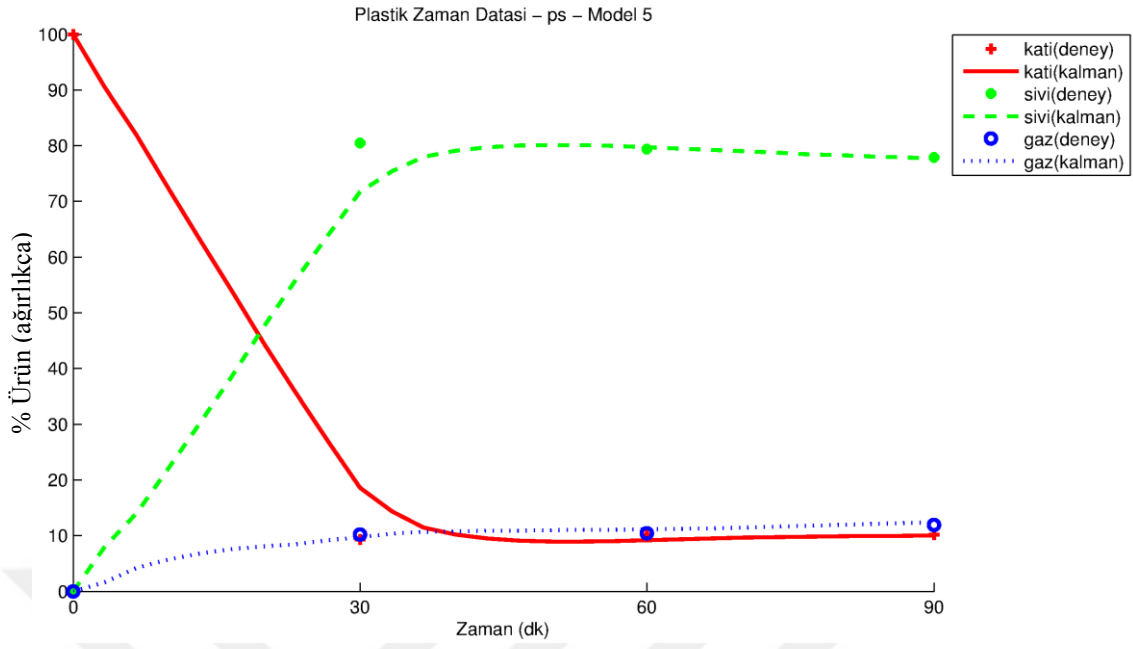
Şekil 4.2 PS'in Model 2'den elde edilen sonuçlarla deneysel sonuçlarının karşılaştırılması



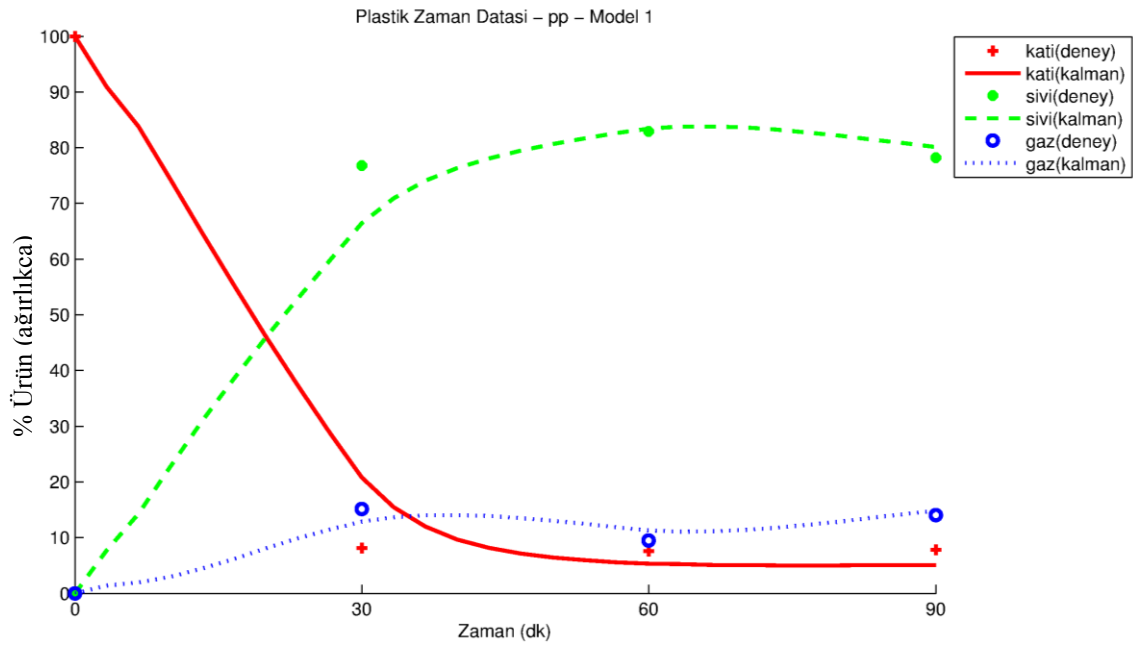
Şekil 4.3 PS'in Model 3'den elde edilen sonuçlarla deneysel sonuçlarının karşılaştırılması



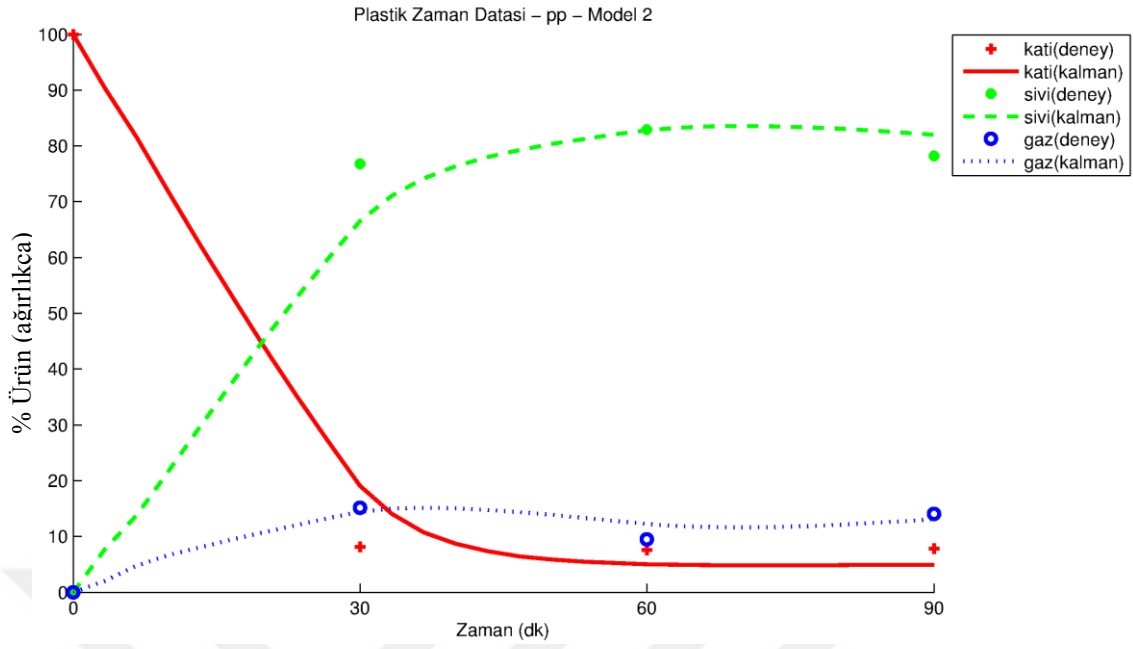
Şekil 4.4 PS'in Model 4'den elde edilen sonuçlarla deneysel sonuçlarının karşılaştırılması



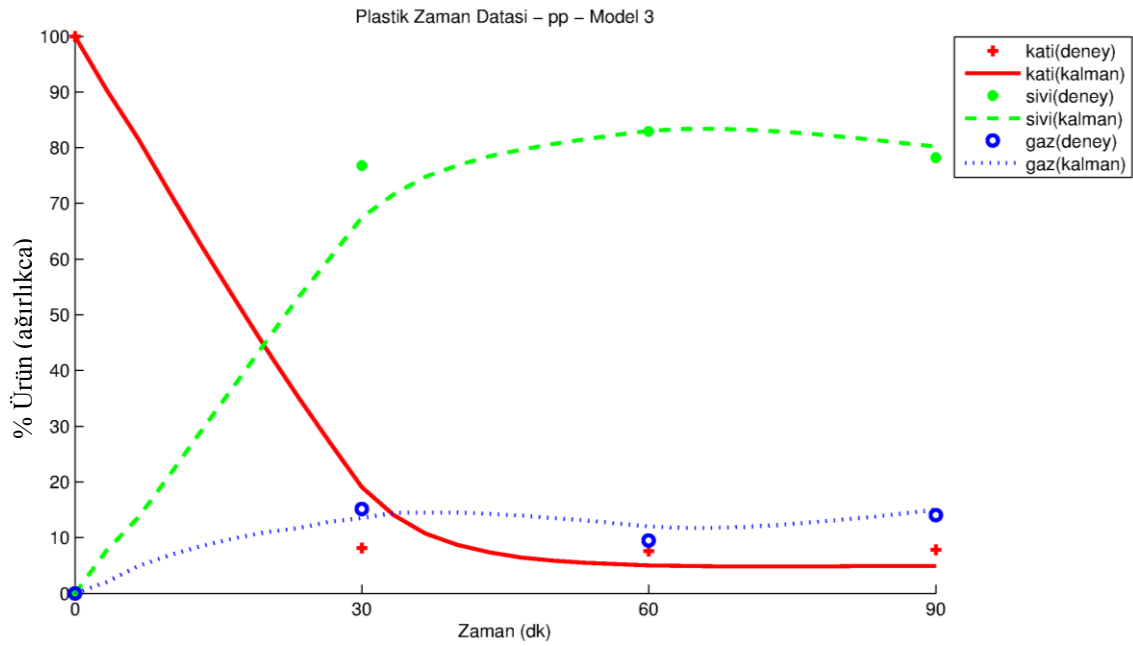
Şekil 4.5 PS'in Model 5'den elde edilen sonuçlarla deneysel sonuçlarının karşılaştırılması



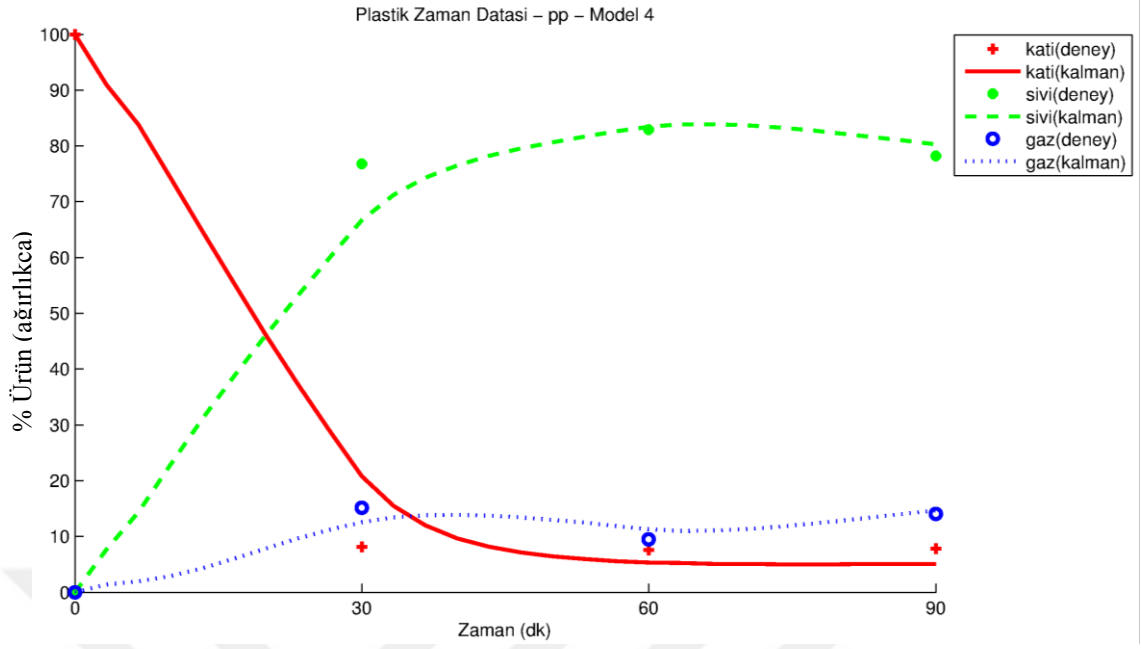
Şekil 4.6 PP'in Model 1'den elde edilen sonuçlarla deneysel sonuçlarının karşılaştırılması



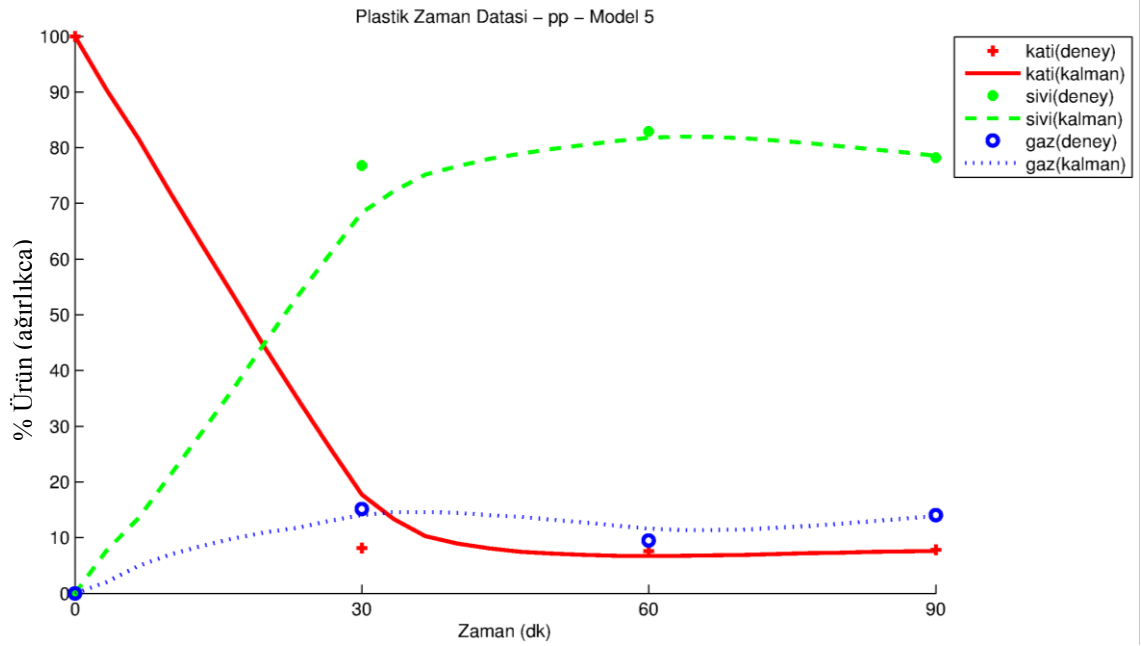
Şekil 4.7 PP'in Model 2'den elde edilen sonuçlarla deneysel sonuçlarının karşılaştırılması



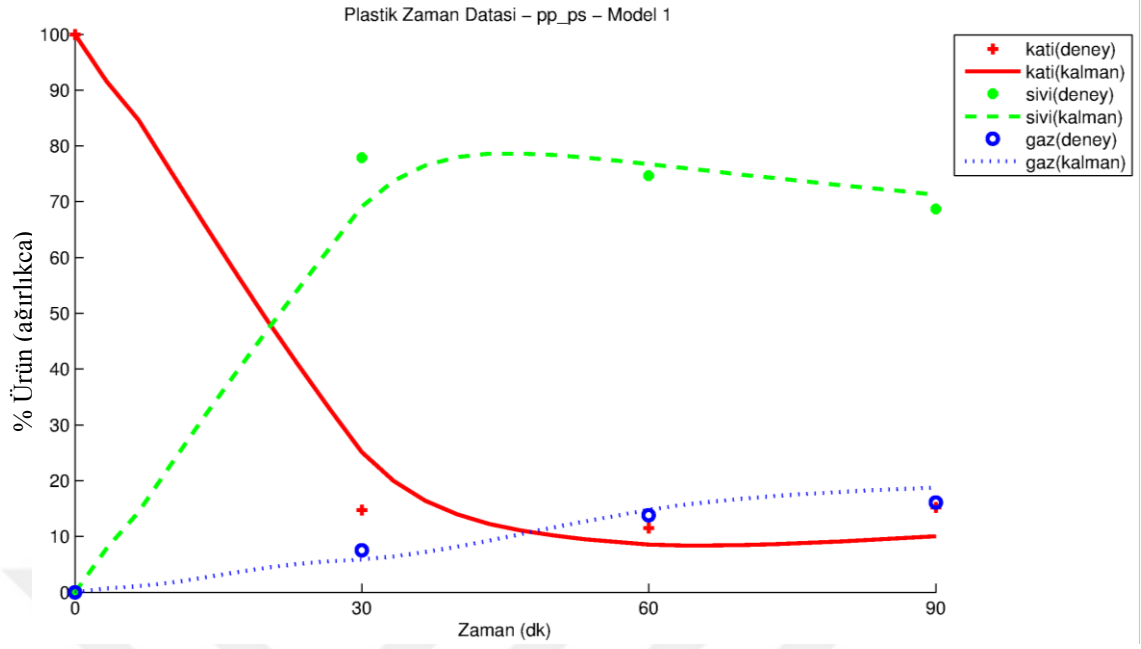
Şekil 4.8 PP'in Model 3'den elde edilen sonuçlarla deneysel sonuçlarının karşılaştırılması



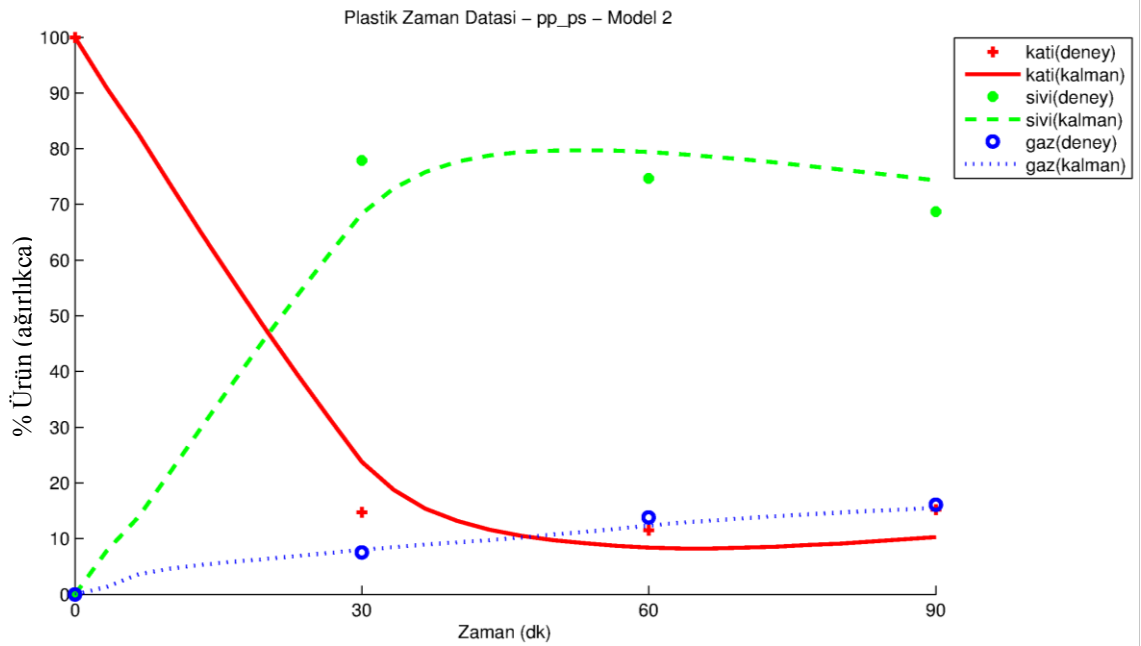
Şekil 4.9 PP'in Model 4'den elde edilen sonuçlarla deneysel sonuçlarının karşılaştırılması



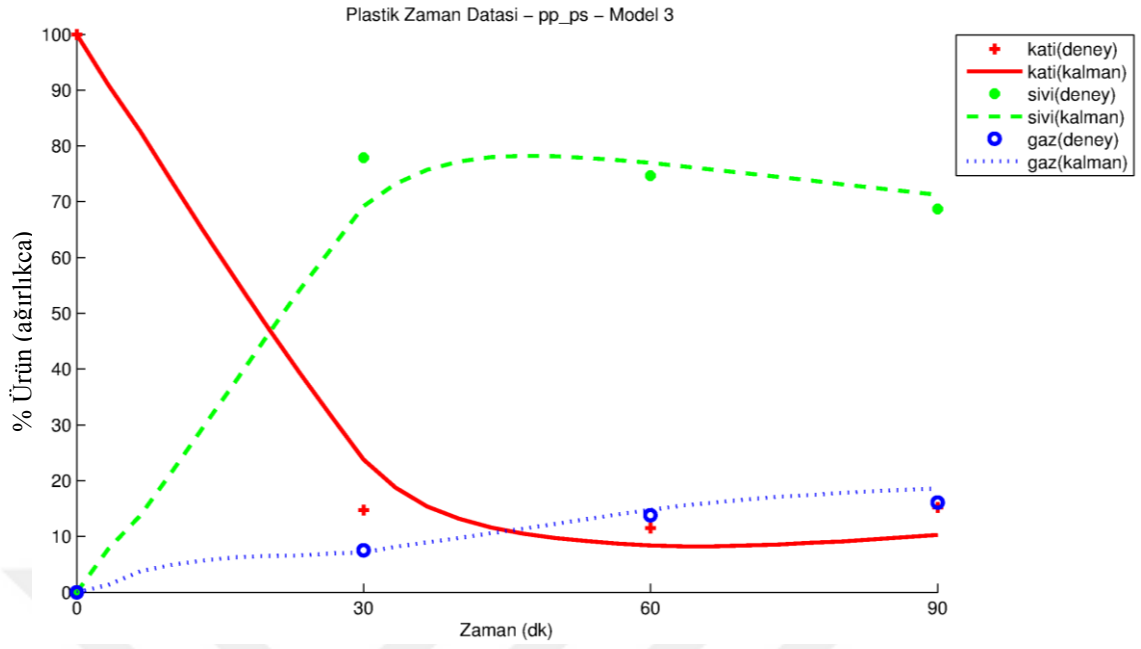
Şekil 4.10 PP'in Model 5'ten elde edilen sonuçlarla deneysel sonuçlarının karşılaştırılması



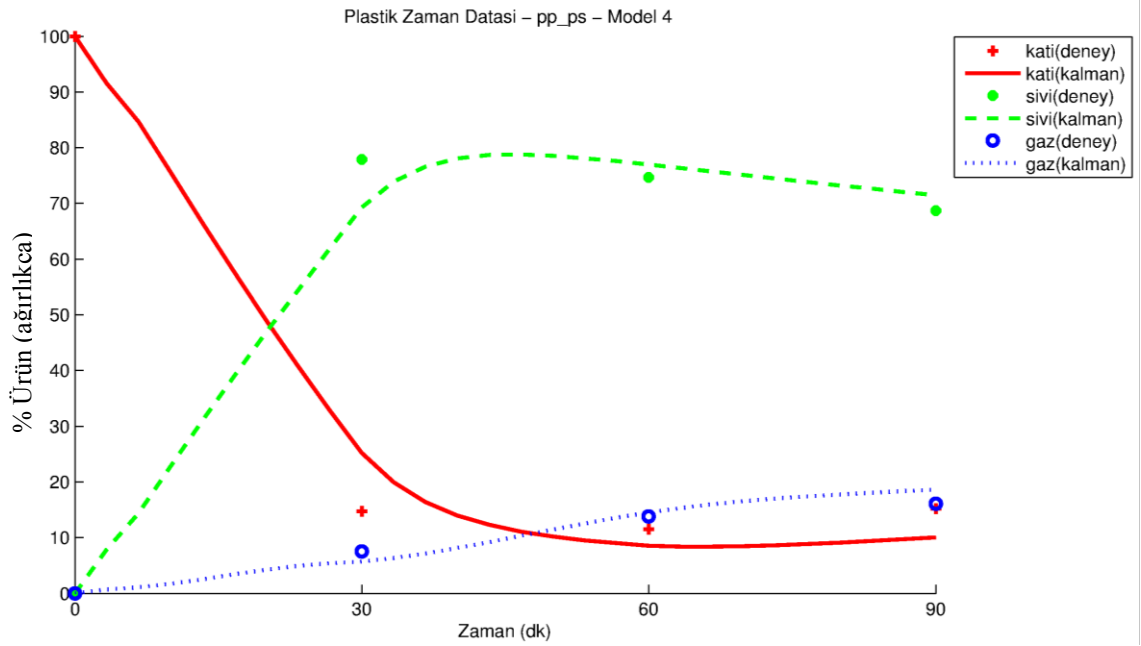
Şekil 4.11 PP/PS'in Model 1'den elde edilen sonuçlarla deneysel sonuçlarının karşılaştırılması



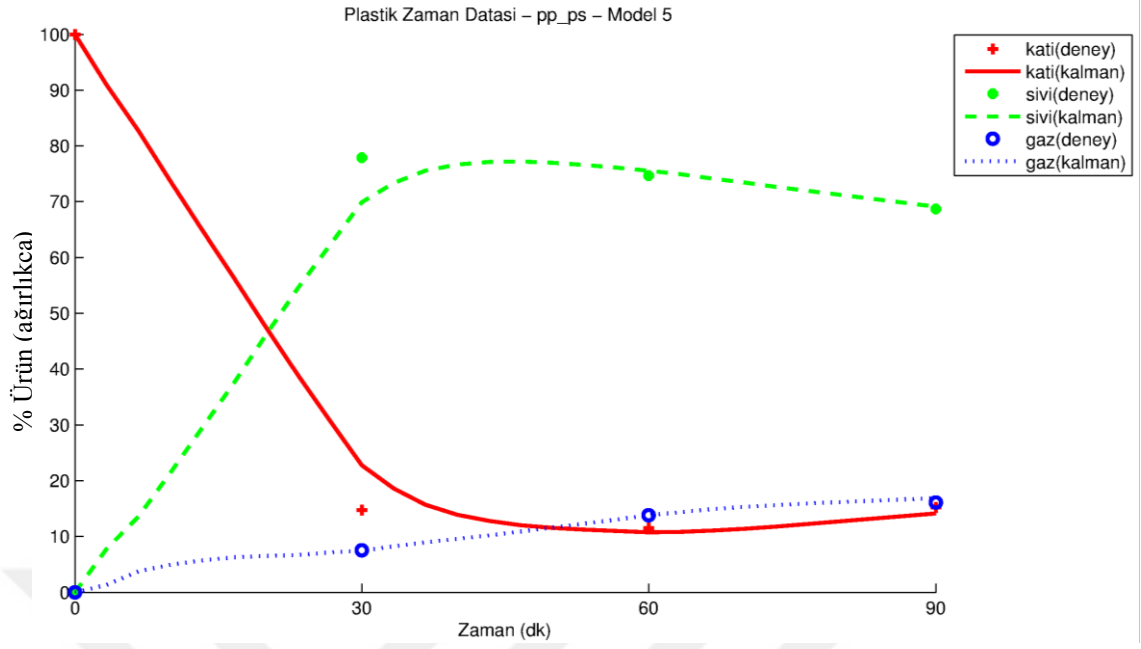
Şekil 4.12 PP/PS'in Model 2'den elde edilen sonuçlarla deneysel sonuçlarının karşılaştırılması



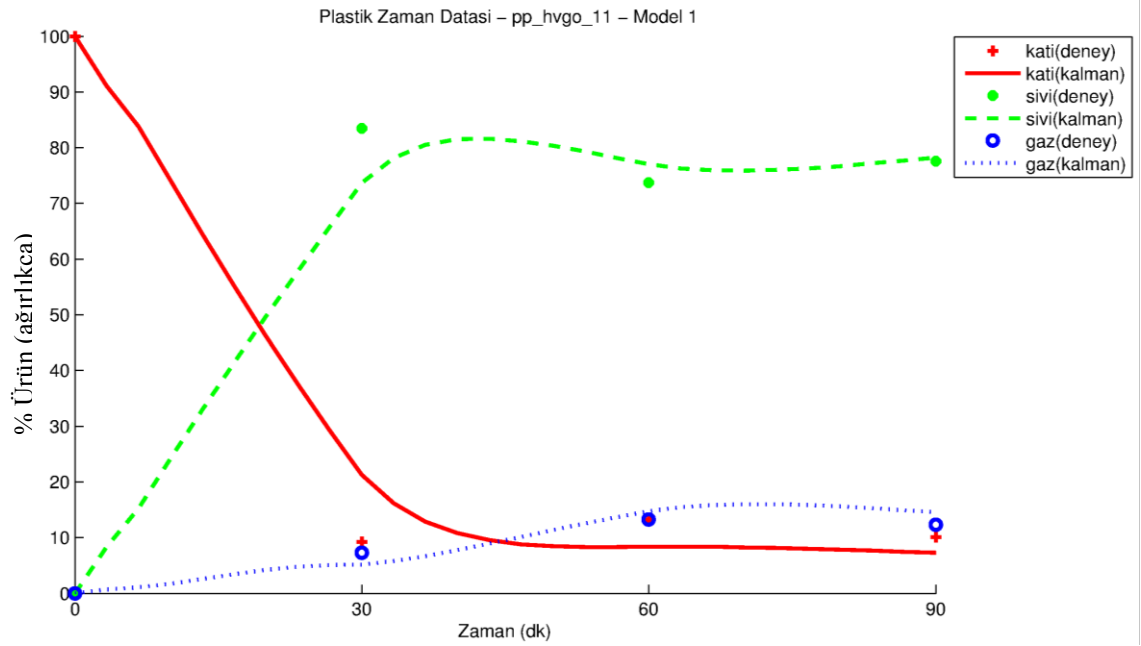
Şekil 4.13 PP/PS'in Model 3'den elde edilen sonuçlarla deneysel sonuçlarının karşılaştırılması



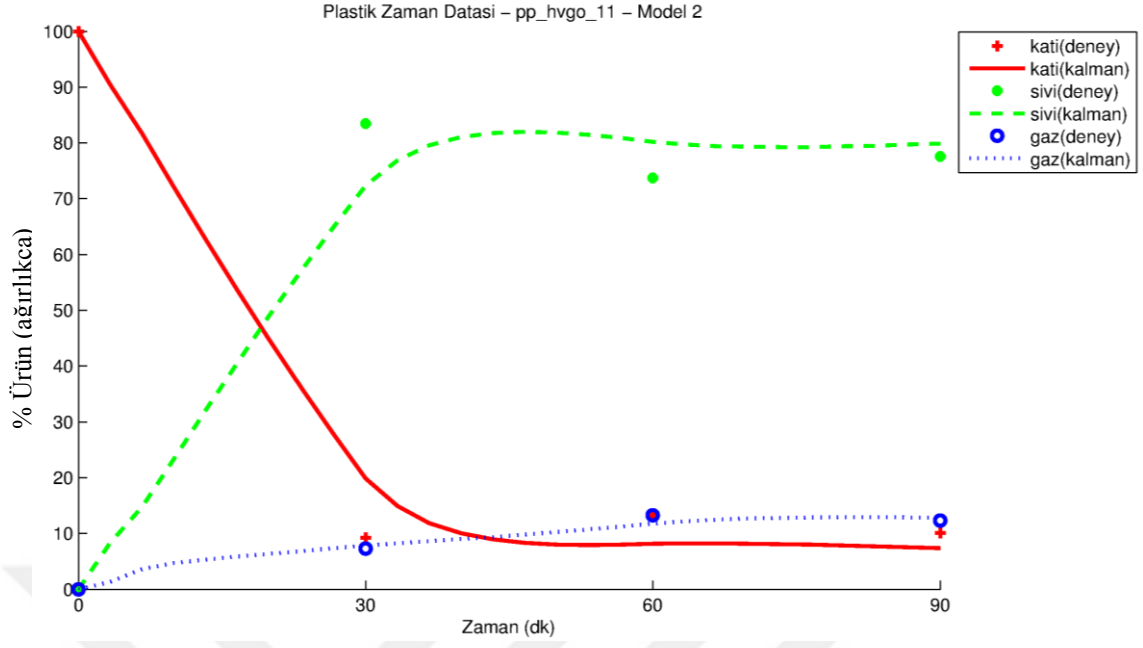
Şekil 4.14 PP/PS'in Model 4'ten elde edilen sonuçlarla deneysel sonuçlarının karşılaştırılması



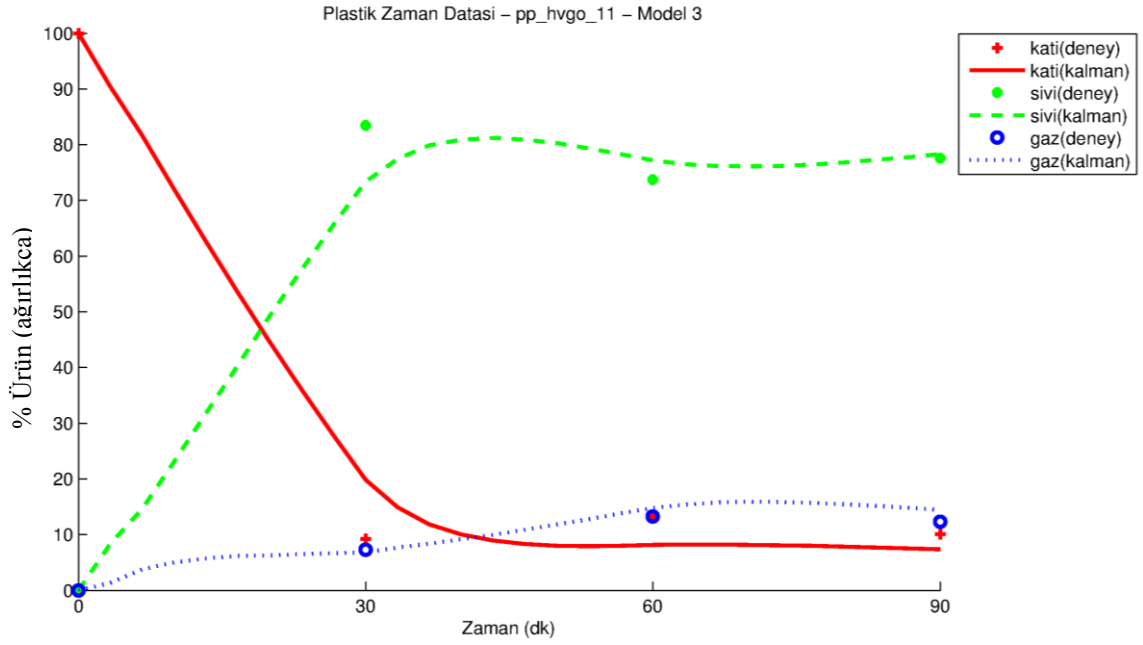
Şekil 4.15 PP/PS'in Model 5'ten elde edilen sonuçlarla deneysel sonuçlarının karşılaştırılması



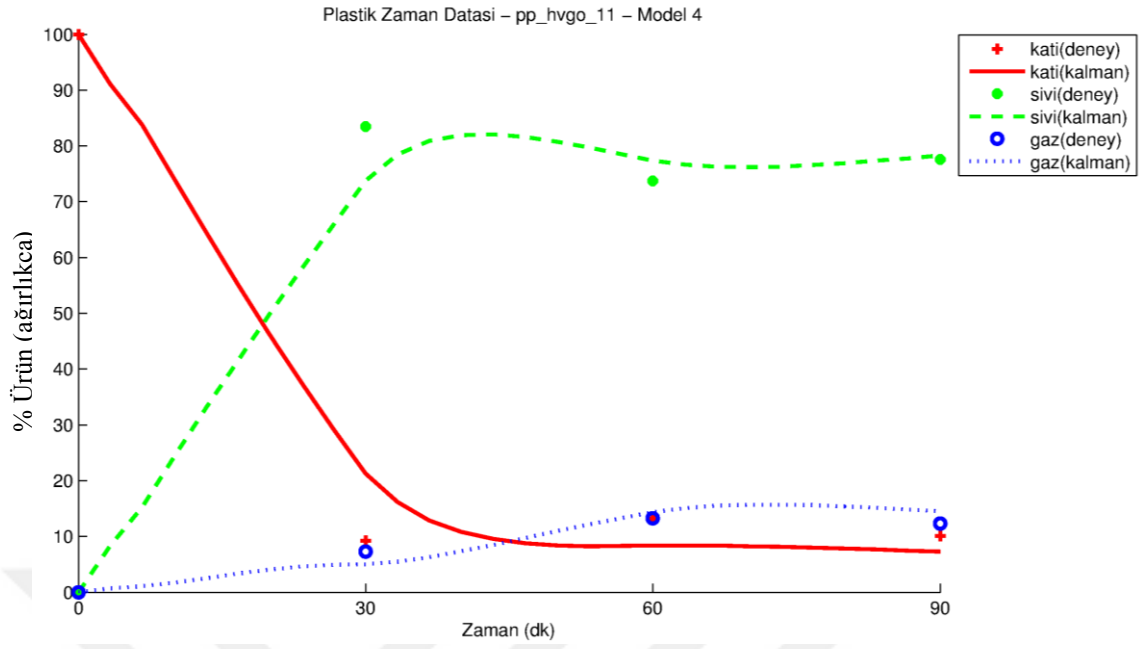
Şekil 4.16 PP/HVGO (1/1)'nin Model 1'den elde edilen sonuçlarla deneysel sonuçlarının karşılaştırılması



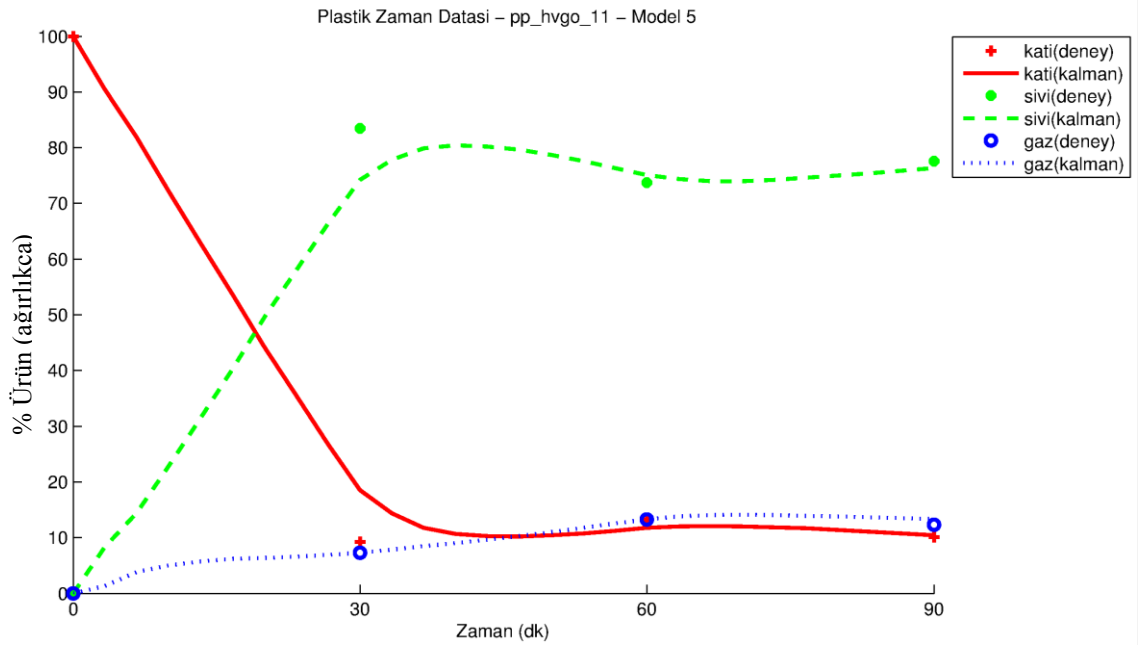
Şekil 4.17 PP/HVGO (1/1)'nin Model 2'den elde edilen sonuçlarla deneysel sonuçlarının karşılaştırılması



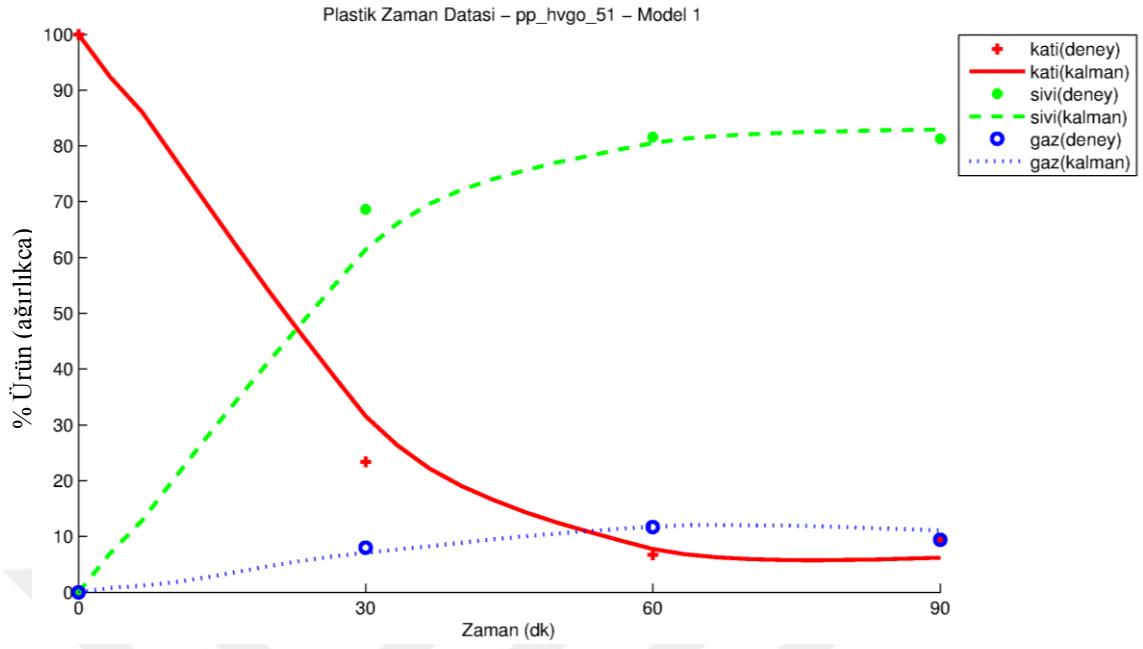
Şekil 4.18 PP/HVGO (1/1)'nin Model 3'ten elde edilen sonuçlarla deneysel sonuçlarının karşılaştırılması



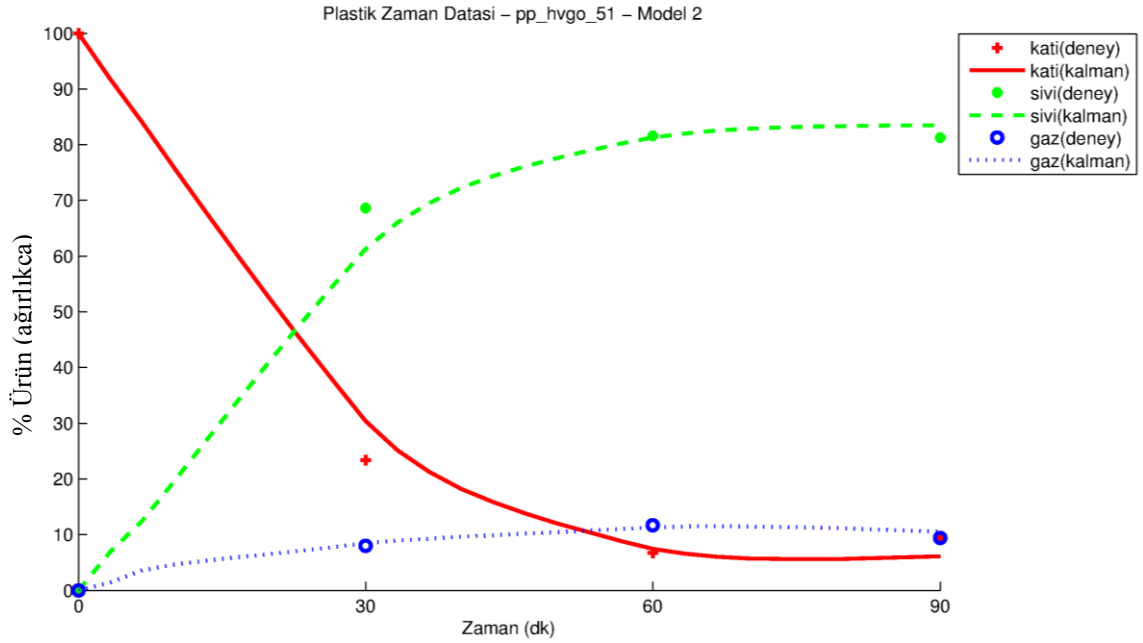
Şekil 4.19 PP/HVGO (1/1)'nin Model 4'ten elde edilen sonuçlarla deneysel sonuçlarının karşılaştırılması



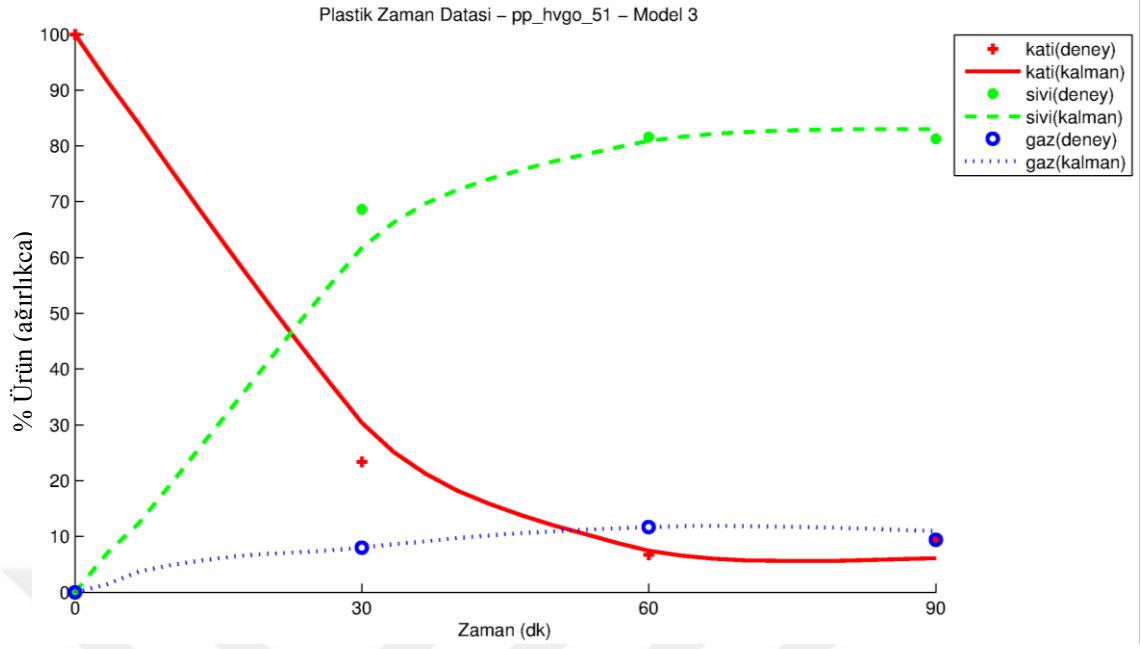
Şekil 4.20 PP/HVGO (1/1)'nin Model 5'ten elde edilen sonuçlarla deneysel sonuçlarının karşılaştırılması



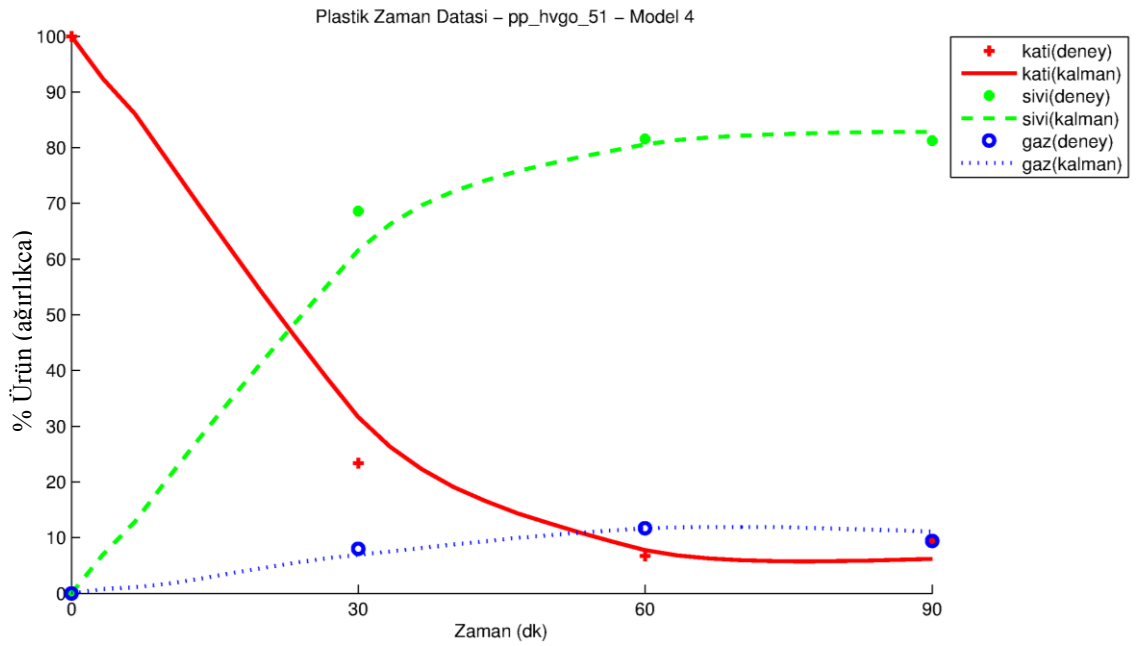
Şekil 4.21 PP/HVGO (5/1) 'in Model 1'den elde edilen sonuçlarla deneysel sonuçlarının karşılaştırılması



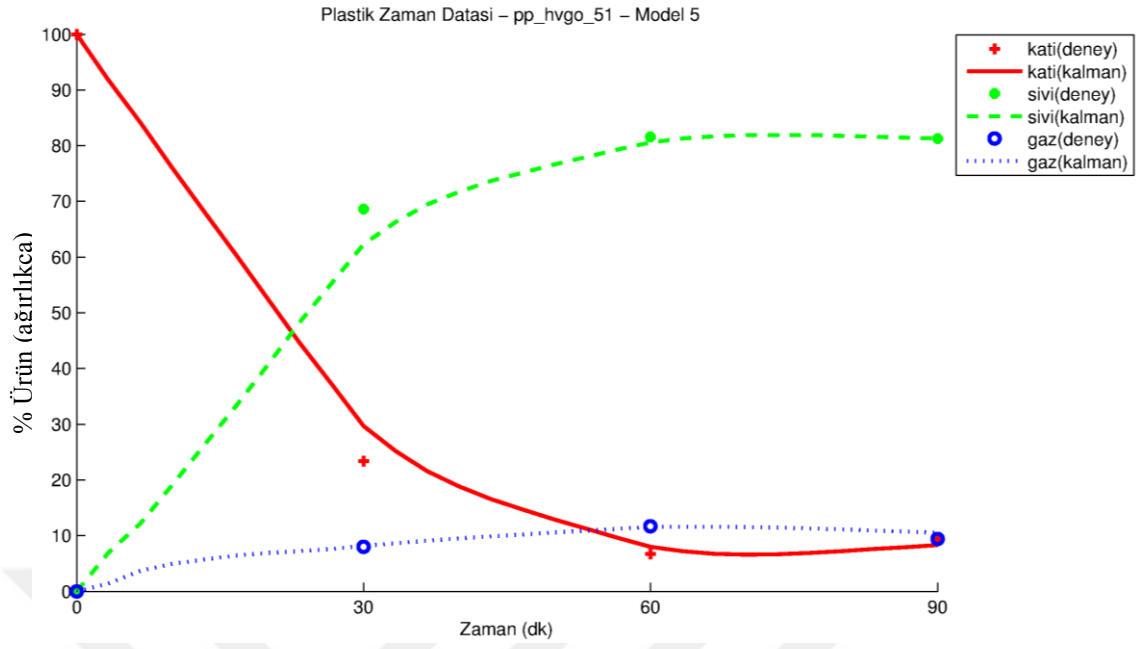
Şekil 4.22 PP/HVGO (5/1)'in Model 2'den elde edilen sonuçlarla deneysel sonuçlarının karşılaştırılması



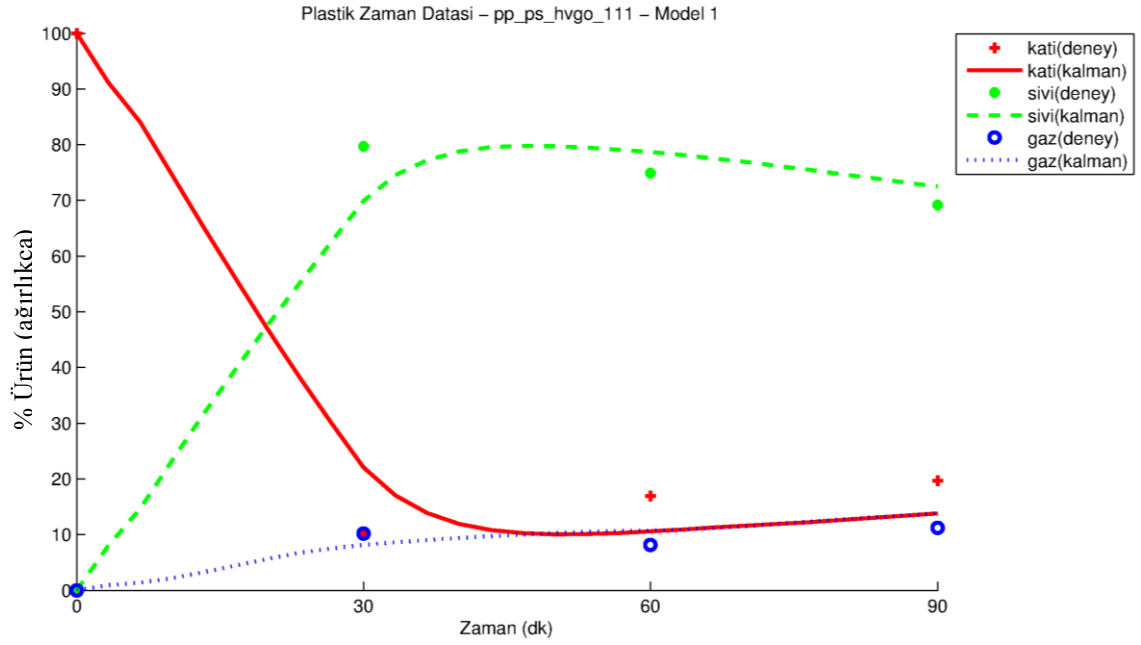
Şekil 4.23 PP/HVGO (5/1)'in Model 3'den elde edilen sonuçlarla deneysel sonuçlarının karşılaştırılması



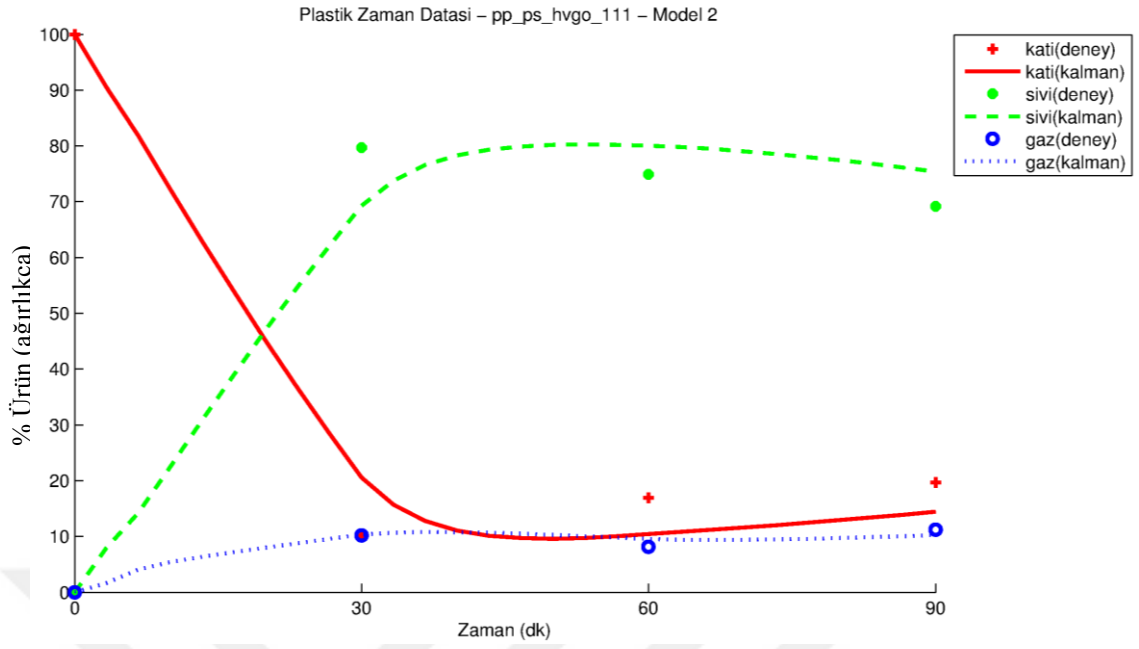
Şekil 4.24 PP/HVGO (5/1)'in Model 4'den elde edilen sonuçlarla deneysel sonuçlarının karşılaştırılması



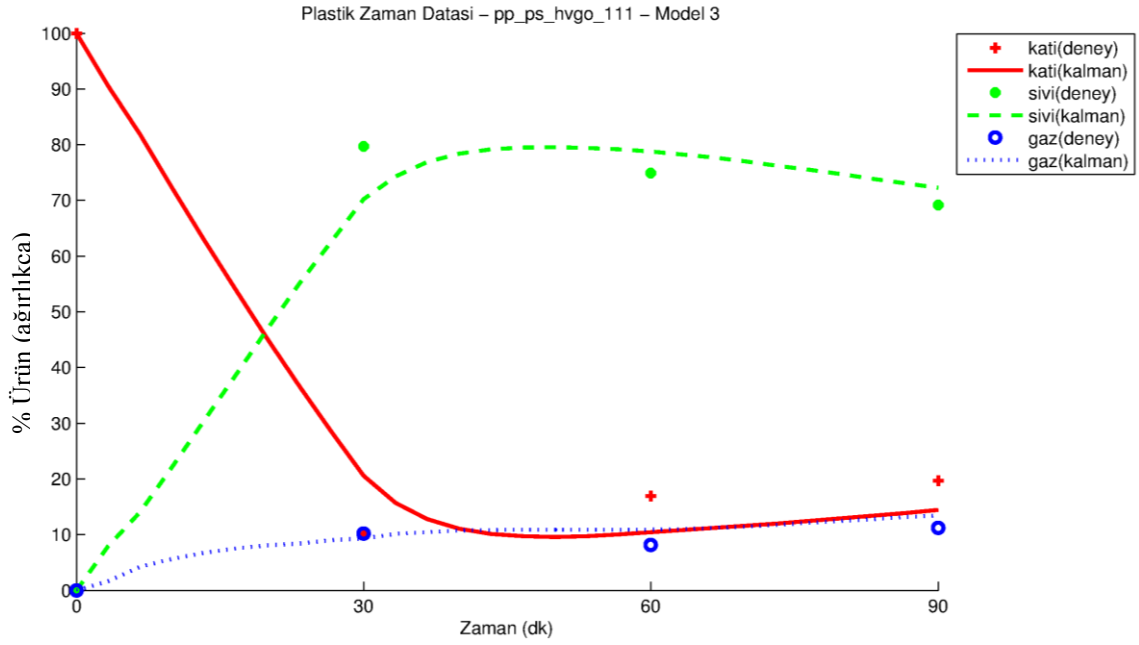
Şekil 4.25 PP/HVGO (5/1)'in Model 5'ten elde edilen sonuçlarla deneysel sonuçlarının karşılaştırılması



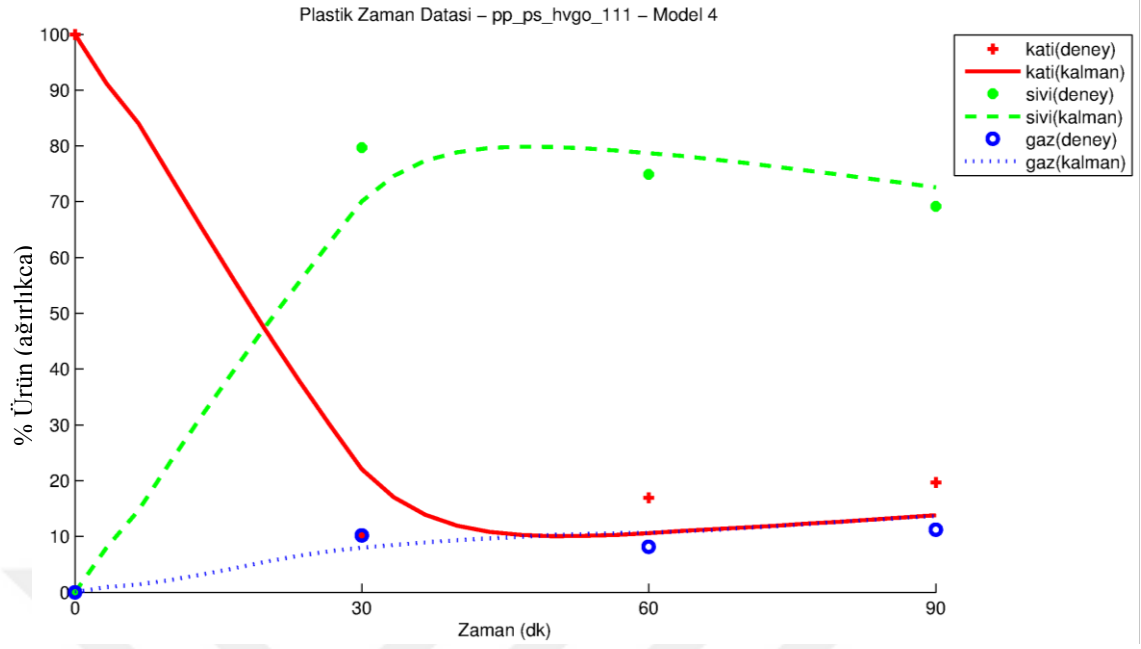
Şekil 4.26 PP/PS/HVGO (1/1/1)'nin Model 1'den elde edilen sonuçlarla deneysel sonuçlarının karşılaştırılması



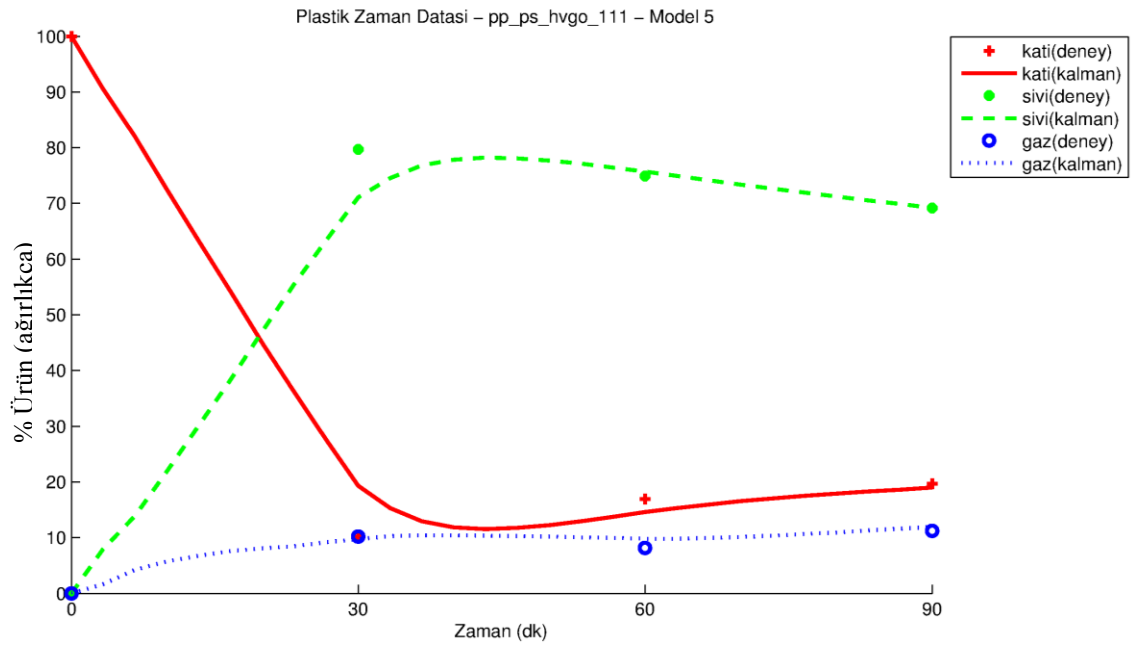
Şekil 4.27 PP/PS/HVGO (1/1/1)'nın Model 2'den elde edilen sonuçlarla deneysel sonuçlarının karşılaştırılması



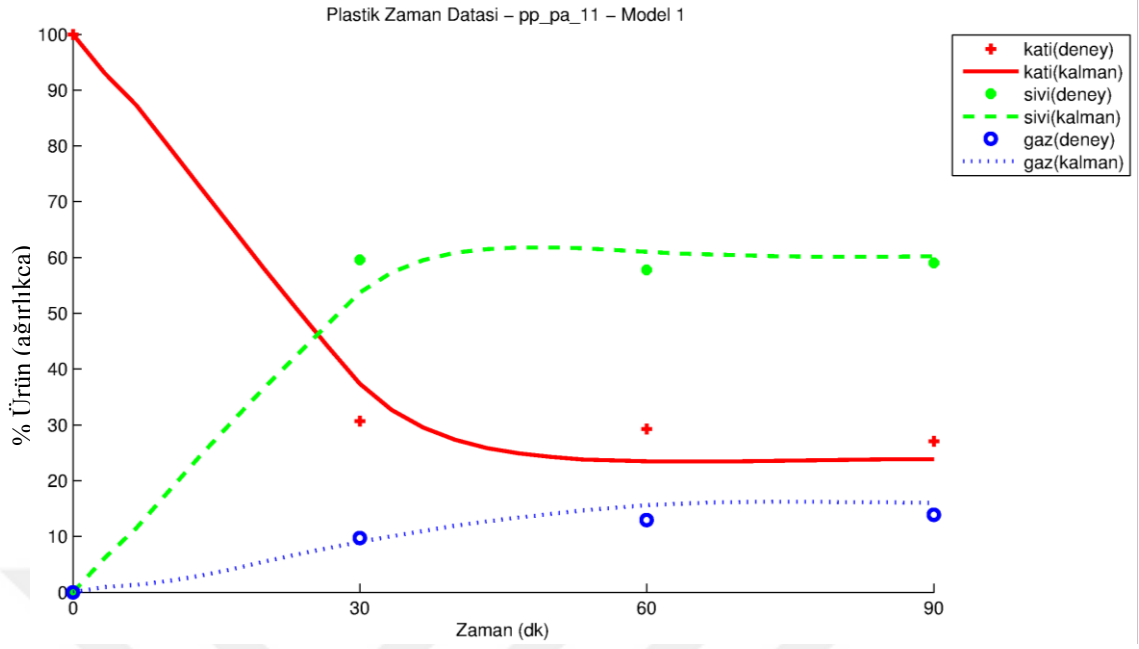
Şekil 4.28 PP/PS/HVGO (1/1/1)'nın Model 3'ten elde edilen sonuçlarla deneysel sonuçlarının karşılaştırılması



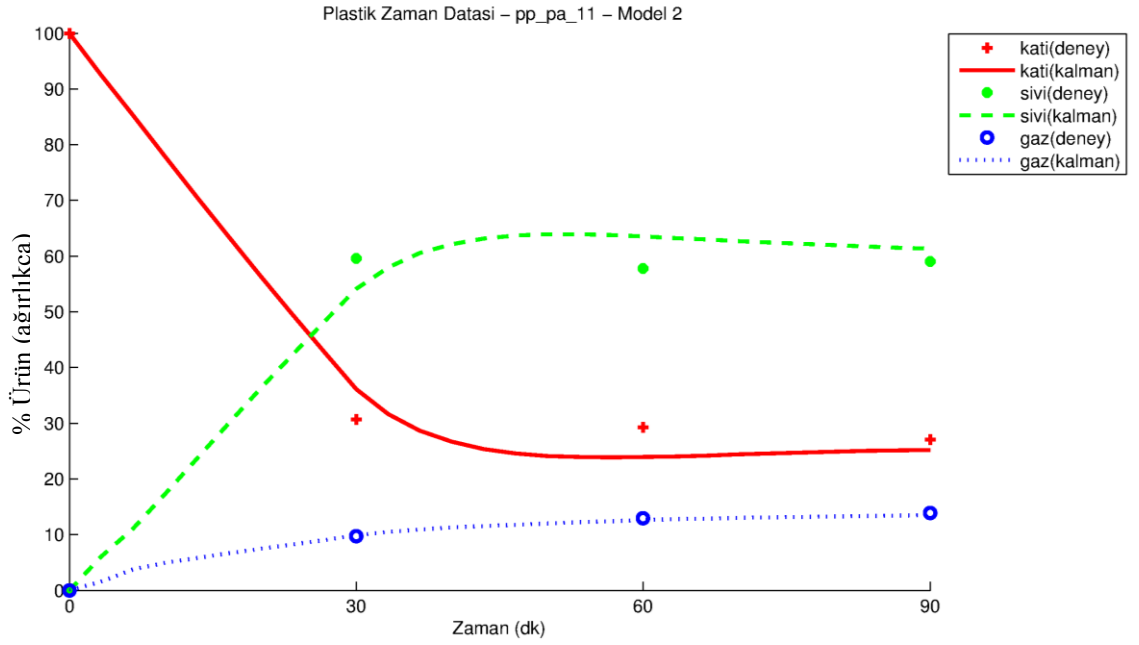
Şekil 4.29 PP/PS/HVGO (1/1/1)'nin Model 4'ten elde edilen sonuçlarla deneysel sonuçlarının karşılaştırılması



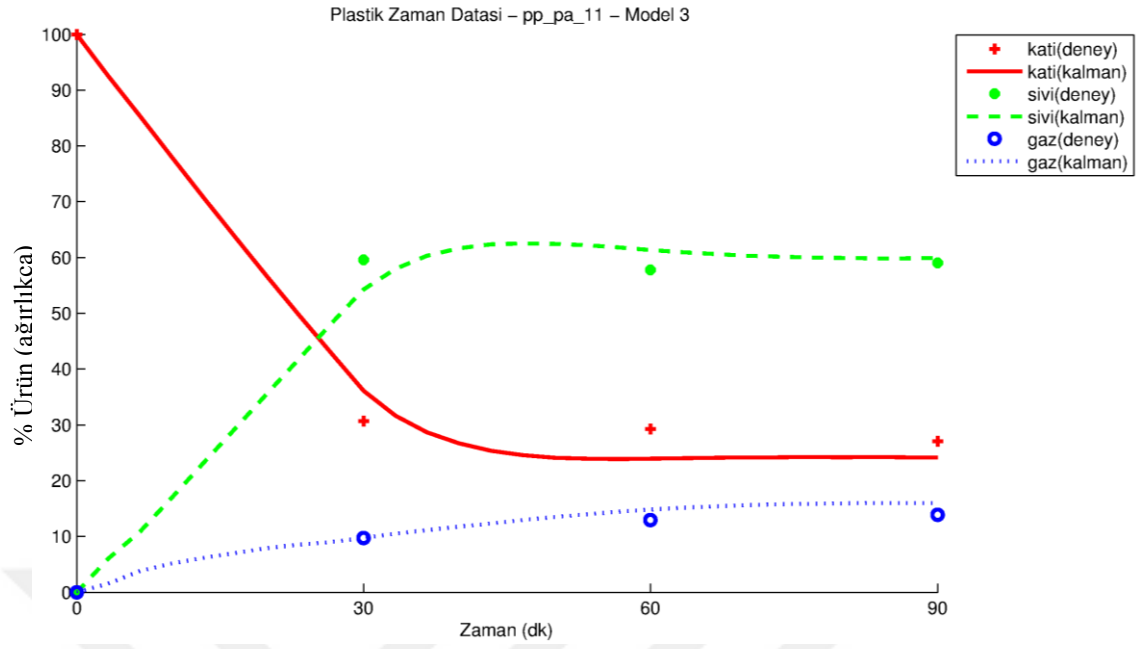
Şekil 4.30 PP/PS/HVGO (1/1/1)'nin Model 5'ten elde edilen sonuçlarla deneysel sonuçlarının karşılaştırılması



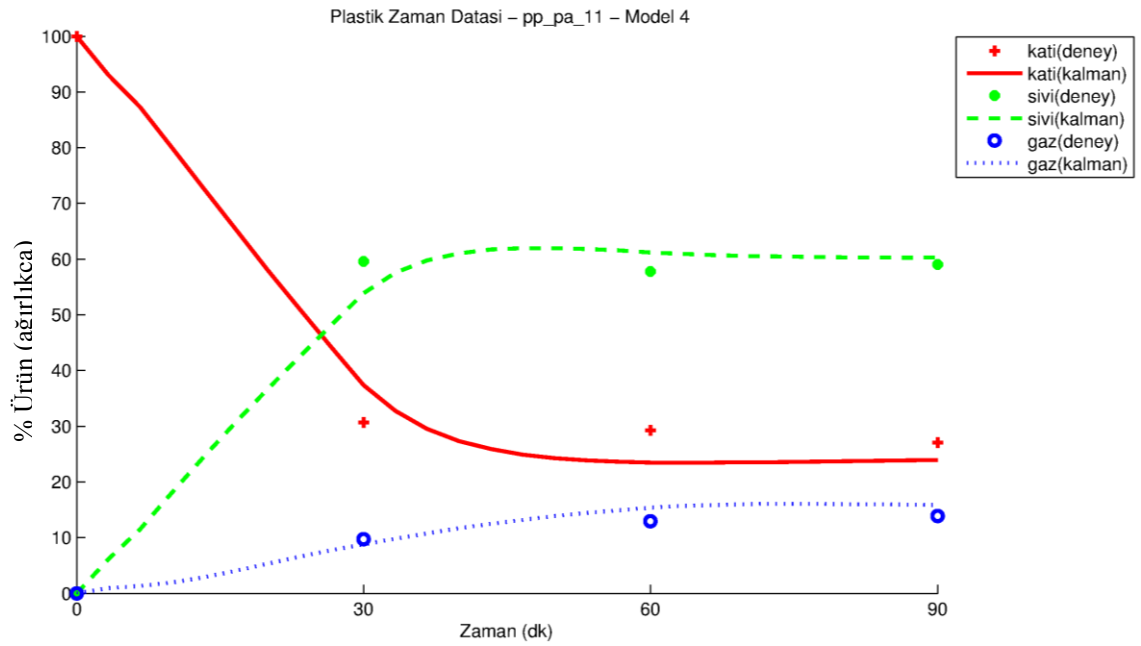
Şekil 4.31 PP/AA (1/1)'nin Model 1'den elde edilen sonuçlarla deneysel sonuçlarının karşılaştırılması



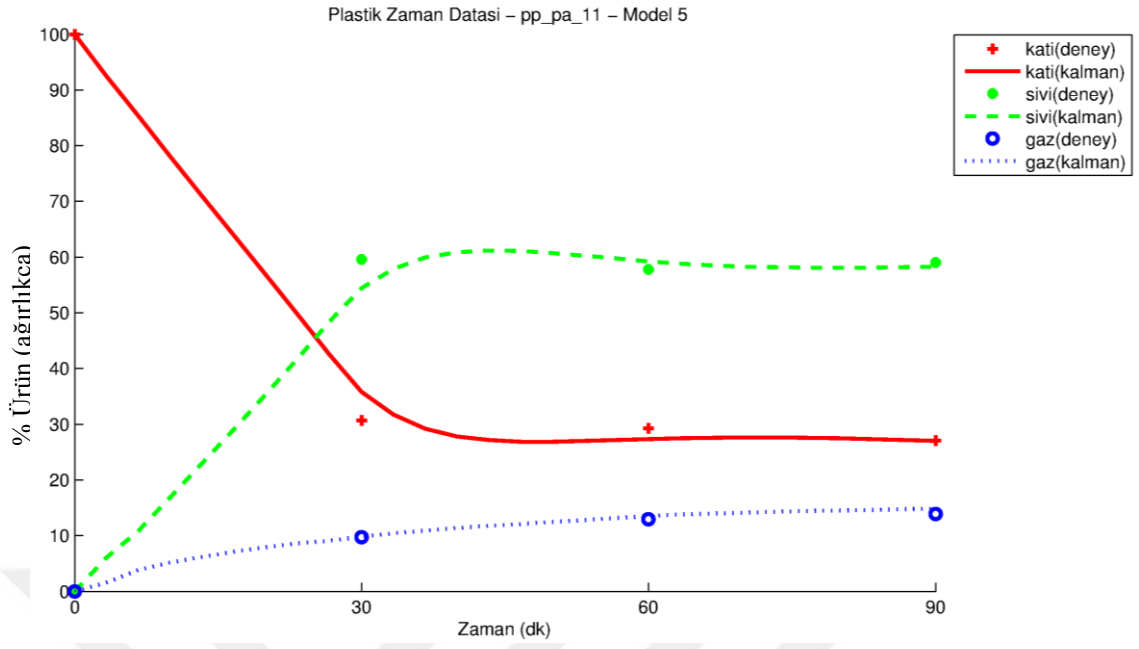
Şekil 4.32 PP/AA (1/1)'nin Model 2'den elde edilen sonuçlarla deneysel sonuçlarının karşılaştırılması



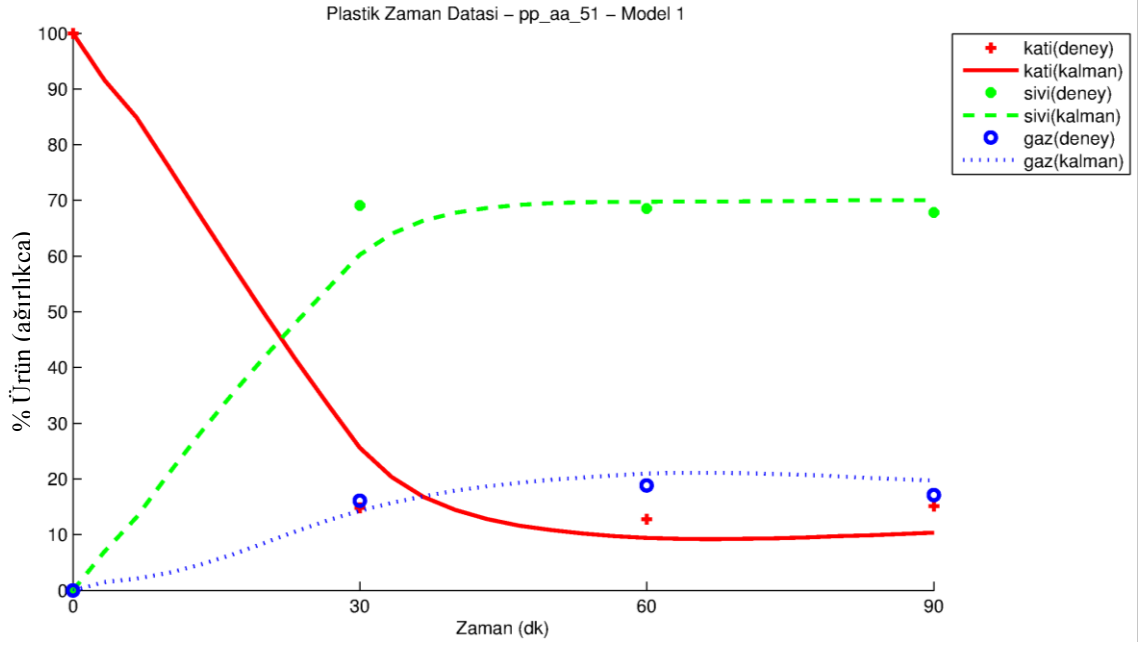
Şekil 4.33 PP/AA (1/1)'nin Model 3'ten elde edilen sonuçlarla deneysel sonuçlarının karşılaştırılması



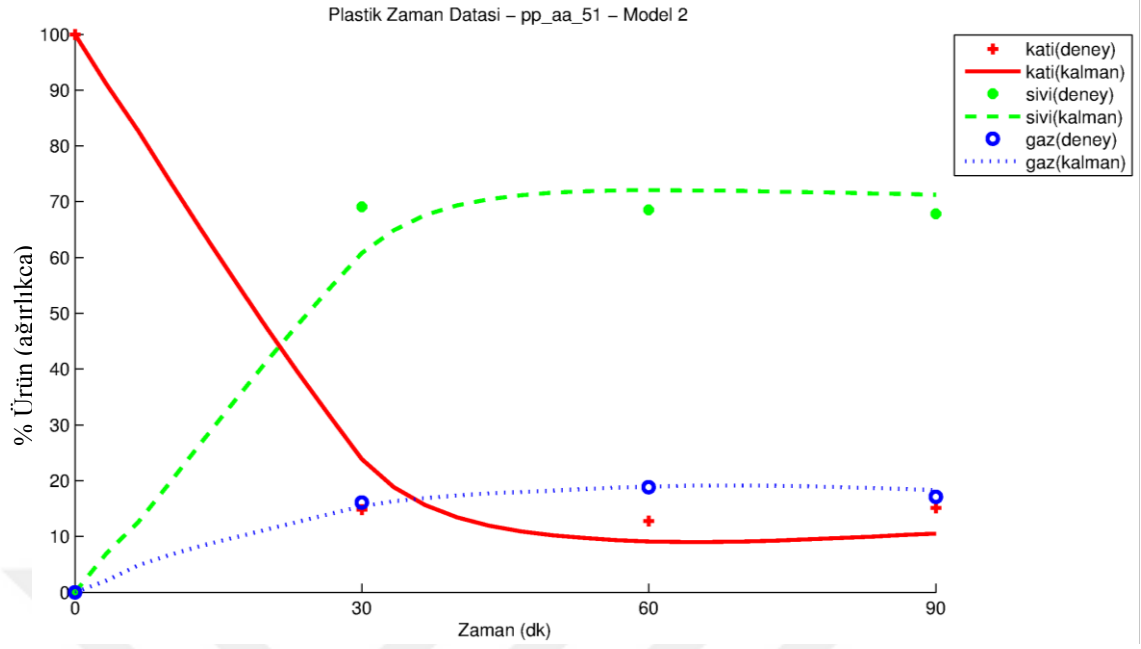
Şekil 4.34 PP/AA (1/1)'nin Model 4'ten elde edilen sonuçlarla deneysel sonuçlarının karşılaştırılması



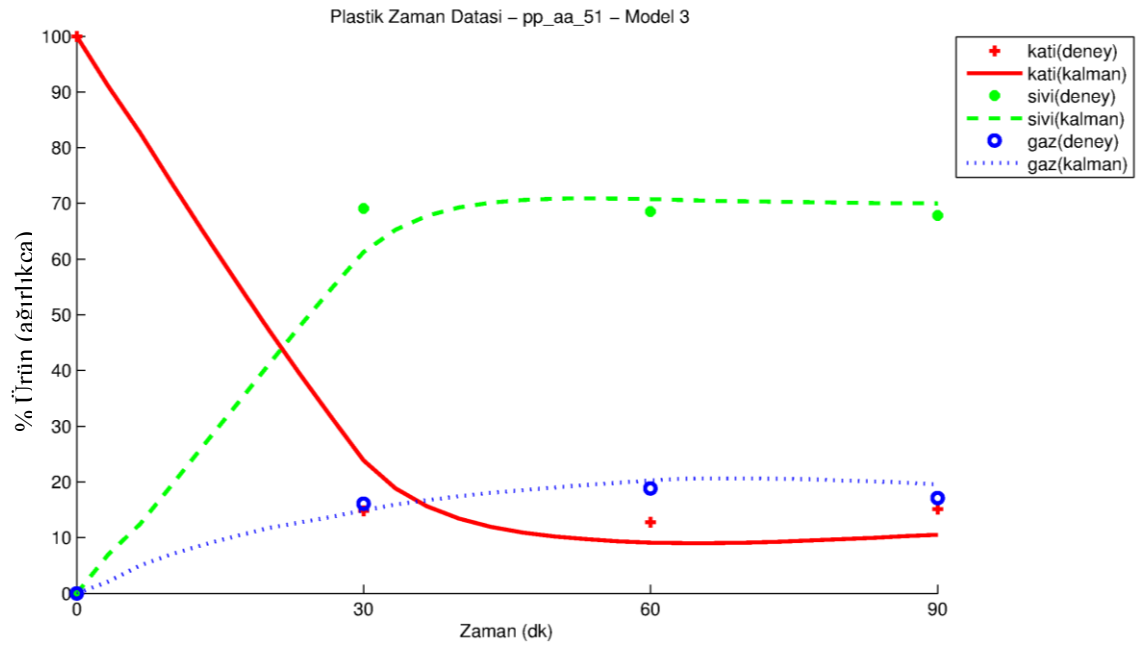
Şekil 4.35 PP/AA (1/1)'nin Model 5'ten elde edilen sonuçlarla deneysel sonuçlarının karşılaştırılması



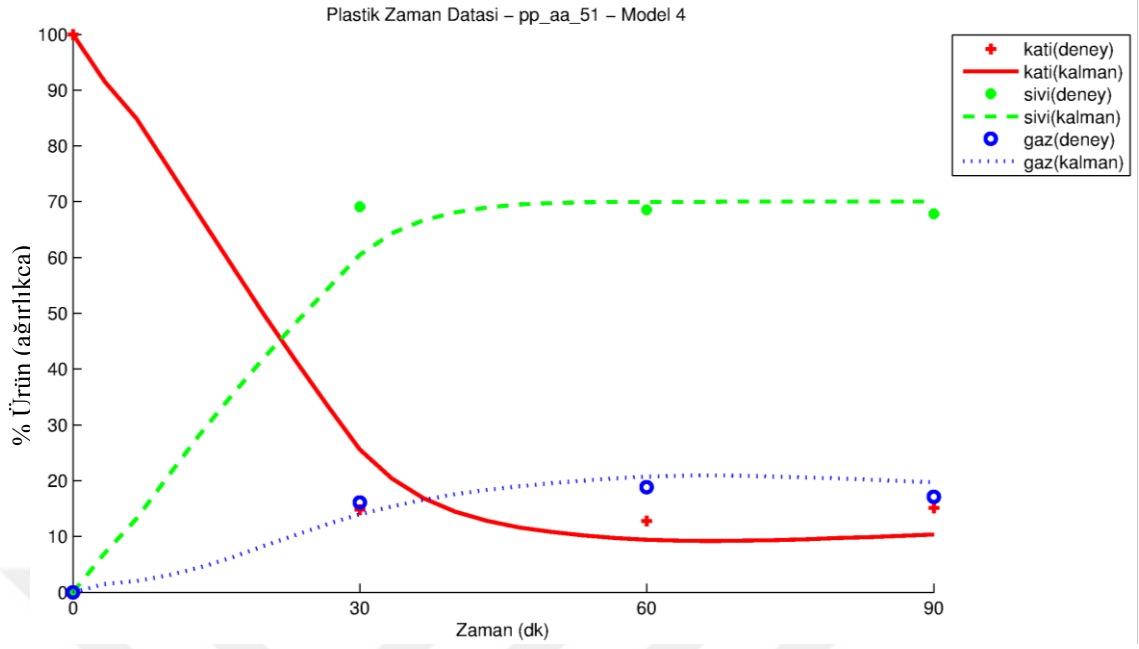
Şekil 4.36 PP/AA (5/1)'nin Model 1'den elde edilen sonuçlarla deneysel sonuçlarının karşılaştırılması



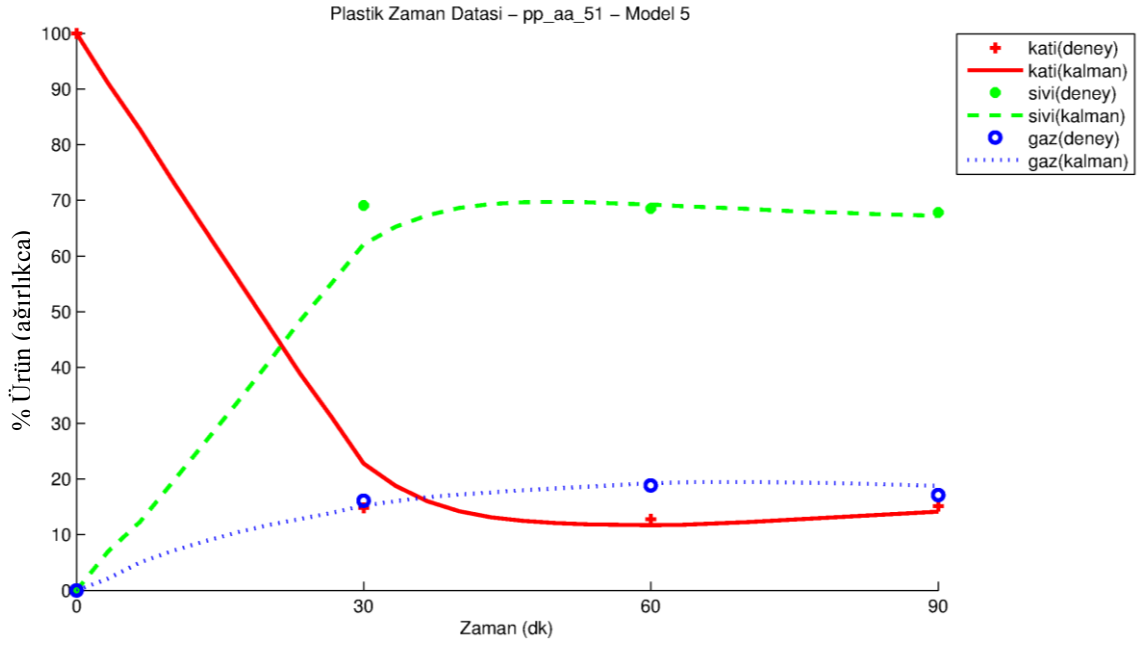
Şekil 4.37 PP/AA (5/1)'nin Model 2'den elde edilen sonuçlarla deneysel sonuçlarının karşılaştırılması



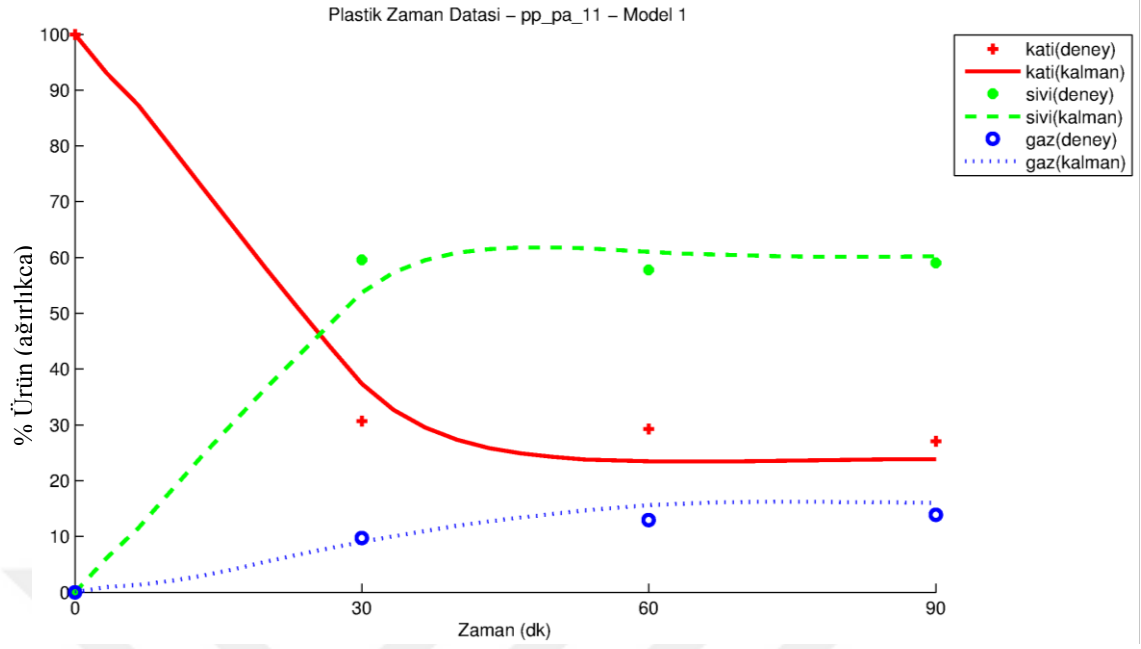
Şekil 4.38 PP/AA (5/1)'nin Model 3'ten elde edilen sonuçlarla deneysel sonuçlarının karşılaştırılması



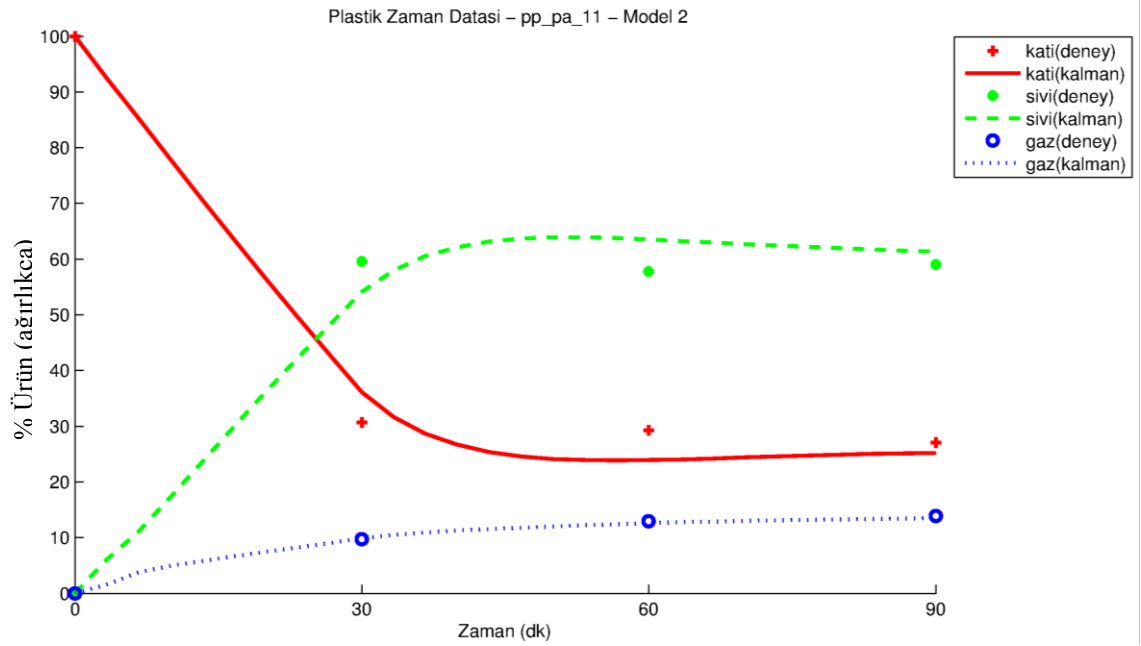
Şekil 4.39 PP/AA (5/1)'nin Model 4'den elde edilen sonuçlarla deneysel sonuçlarının karşılaştırılması



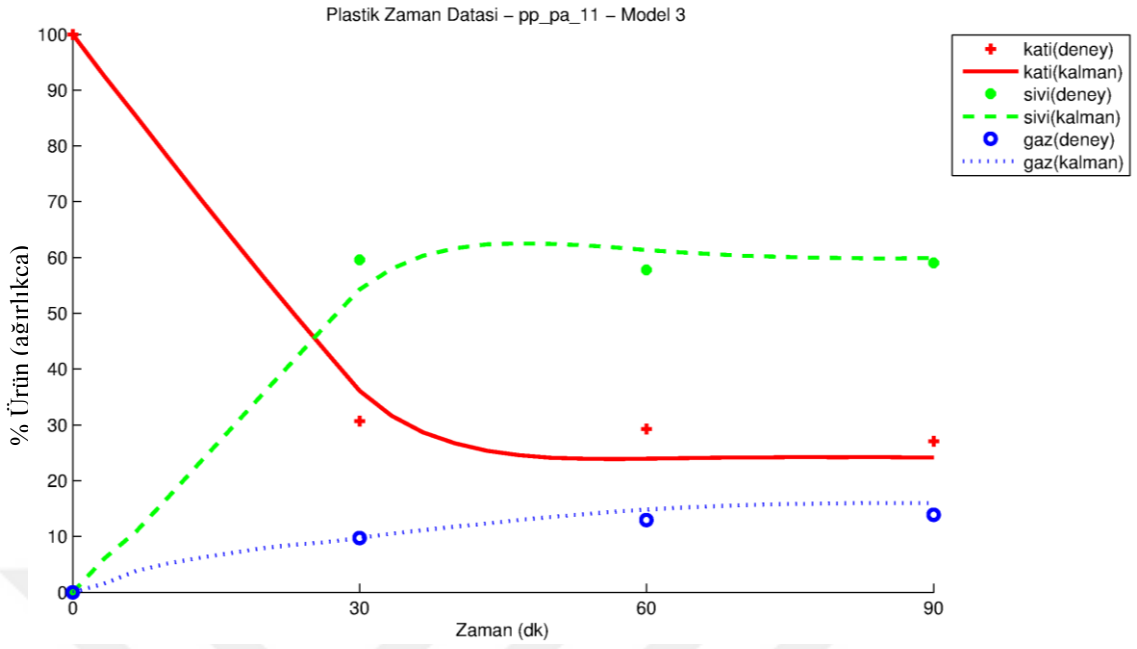
Şekil 4.40 PP/AA (5/1)'nin Model 5'ten elde edilen sonuçlarla deneysel sonuçlarının karşılaştırılması



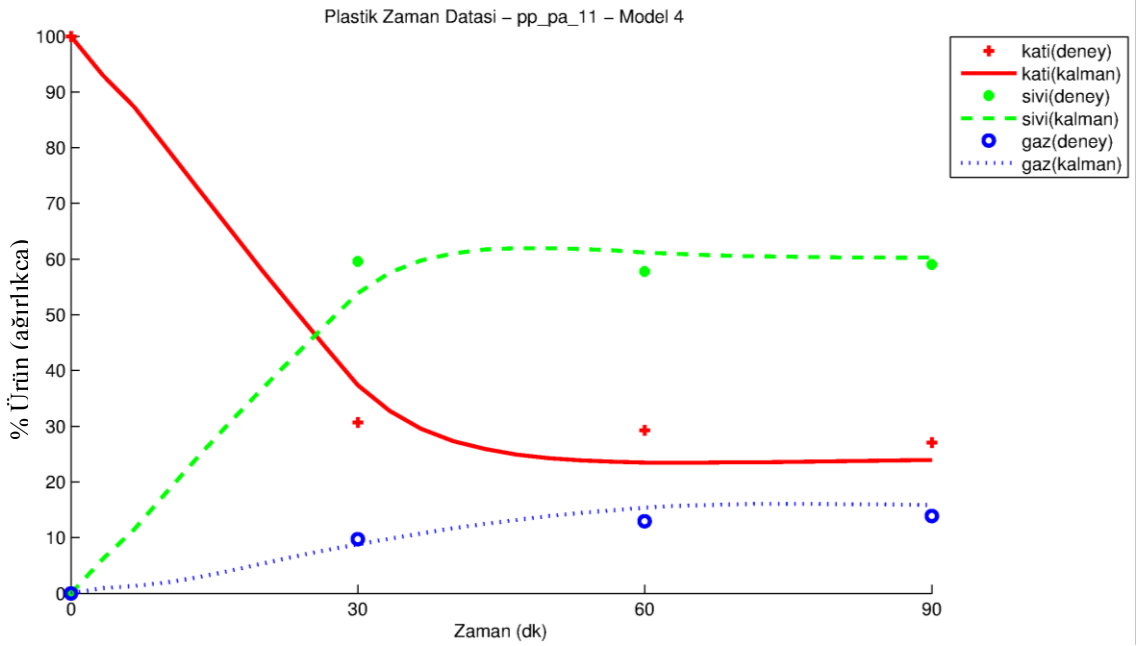
Şekil 4.41 PP/PS/AA(1/1/1)'nin Model 1'den elde edilen sonuçlarla deneysel sonuçlarının karşılaştırılması



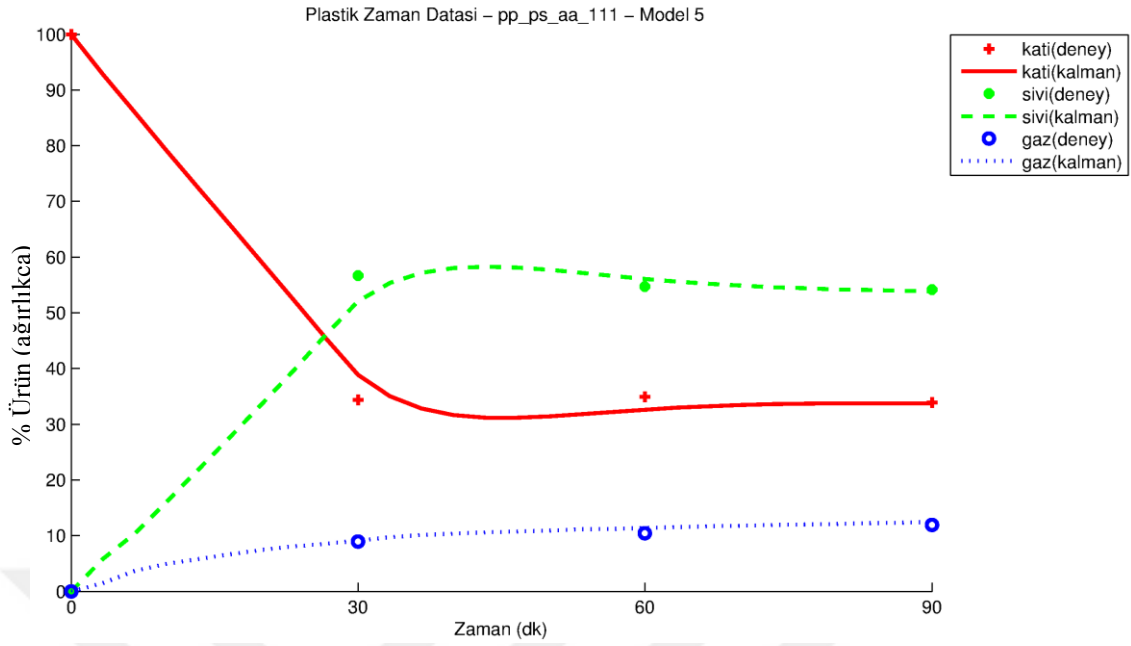
Şekil 4.42 PP/PS/AA(1/1/1)'nin Model 2'den elde edilen sonuçlarla deneysel sonuçlarının karşılaştırılması



Şekil 4.43 PP/PS/AA(1/1/1)'nin Model 3'ten elde edilen sonuçlarla deneysel sonuçlarının karşılaştırılması



Şekil 4.44 PP/PS/AA(1/1/1)'nin Model 4'ten elde edilen sonuçlarla deneysel sonuçlarının karşılaştırılması



Şekil 4.45 PP/PS/AA(1/1/1)'nin Model 5'ten elde edilen sonuçlarla deneysel sonuçlarının karşılaştırılması

#### 4.1.2 Tepkime mekanizmalarının biyokütle atıklara uyumu

Asbos (*Psilocaulon utile*), Kraalbos (*Galenia africana*) ve Scholtzboş (*Pteronia pallens*) bitkilerinin, biyokütle-bitki yağı karışımının ve palmye kabuğunun pirolizleri sonucu elde edilen deneysel verilere (Çizelge 3.10-3.14) her bir model için elde edilen analitik çözümler ayrı ayrı uydurularak MATLAB (ver 7.10, The MathWorks Inc. Natick, MA, USA) bilgisayar programında Kalman filtresi yöntemiyle tüm biyokütle atıkları için tepkime hız sabitleri belirlenmiştir (Çizelge 4.3). Biyokütle atıkların ısıl bozunmasından elde edilen deneysel verilerle modellerden hesaplanan değerlerin kareleri farklarının toplamı Eşitlik 4.1'de gösterildiği şekilde hesaplanmış olup çizelge 4.4'de verilmiştir. Biyokütle atıkların deneysel sonuçları ile modellerden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır (Şekil 4.46-4.70).

Çizelge 4.3 Biyokütle atıklar için modellerden elde edilen tepkime hız sabitleri ( $\text{dk}^{-1}$ )

|                                             | $k_1$     | $k_2$     | $k_3$     | $k_4$     |
|---------------------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| <b>Asbos (<i>Psilocaulon utile</i>)</b>     |           |           |           |           |
| Model 1                                     | 0,000646  | 0,0060826 |           |           |
| Model 2                                     | 0,0005454 | 0,0023183 |           |           |
| Model 3                                     | 0,0008852 | 0,0053286 | 0,000915  |           |
| Model 4                                     | 0,0059725 | 0,0055433 | 0,016755  |           |
| Model 5                                     | 0,0039835 | 0,0037428 | 0,001570  | 0,015307  |
| <b>Scholtzboş (<i>Pteronia pallens</i>)</b> |           |           |           |           |
| Model 1                                     | 0,0039497 | 0,0080684 |           |           |
| Model 2                                     | 0,0012814 | 0,0001432 |           |           |
| Model 3                                     | 0,001675  | 0,0000940 | 0,000014  |           |
| Model 4                                     | 0,0112551 | 0,007599  | 0,0160986 |           |
| Model 5                                     | 0,0082085 | 0,0003788 | 0,0003204 | 0,0161508 |
| <b>Kraalbos (<i>Galenia africana</i>)</b>   |           |           |           |           |
| Model 1                                     | 0,004985  | 0,0086748 |           |           |
| Model 2                                     | 0,000952  | 0,0036161 |           |           |
| Model 3                                     | 0,000503  | 0,0052901 | 0,002014  |           |
| Model 4                                     | 0,015835  | 0,0075968 | 0,014862  |           |
| Model 5                                     | 0,009342  | 0,0017278 | 0,006044  | 0,015379  |
| <b>Biyokütle-bitki yağı karışımı</b>        |           |           |           |           |
| Model 1                                     | 0,044179  | 0,024336  |           |           |
| Model 2                                     | 0,029469  | 0,034646  |           |           |
| Model 3                                     | 0,031355  | 0,011373  | 0,032759  |           |
| Model 4                                     | 0,046760  | 0,023873  | 0,012572  |           |
| Model 5                                     | 0,034329  | 0,009909  | 0,033735  | 0,016398  |

Çizelge 4.3 Biyokütle atıklar için modellerden elde edilen tepkime hız sabitleri ( $\text{dk}^{-1}$ )  
(devam)

|                       | $k_1$    | $k_2$     | $k_3$    | $k_4$    |
|-----------------------|----------|-----------|----------|----------|
| <b>Palmiye kabuğu</b> |          |           |          |          |
| Model 1               | 0,001217 | 0,0009607 |          |          |
| Model 2               | 0,000259 | 0,0008359 |          |          |
| Model 3               | 0,000121 | 0,0001131 | 0,001107 |          |
| Model 4               | 0,021911 | 0,0007517 | 0,001372 |          |
| Model 5               | 0,013489 | 0,0003475 | 0,004753 | 0,010962 |

Çizelge 4.4 Biyokütle Atıkların ısı bozundurulmasından elde edilen deneysel veriler ile modellerden hesaplanan değerlerin kareleri farklarının toplamı

|                                      | <b>Model 1</b> | <b>Model 2</b> | <b>Model 3</b> | <b>Model 4</b> | <b>Model 5</b> |
|--------------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| <b>Asbos (Psilocaulon utile)</b>     | 4,5051         | 3,7474         | 3,6297         | 4,0787         | 3,0822         |
| <b>Kraalbos (Galenia africana)</b>   | 6,6526         | 4,5668         | 4,3744         | 6,3656         | 3,9881         |
| <b>Scholtzboş (Pteronia pallens)</b> | 7,0754         | 4,0667         | 4,1713         | 6,8809         | 3,8544         |
| <b>biomass/veg/oil</b>               | 8,0322         | 6,5329         | 6,5044         | 8,0120         | 6,4285         |
| <b>palm/shell</b>                    | 6,8354         | 4,6681         | 4,5651         | 6,4146         | 4,8734         |

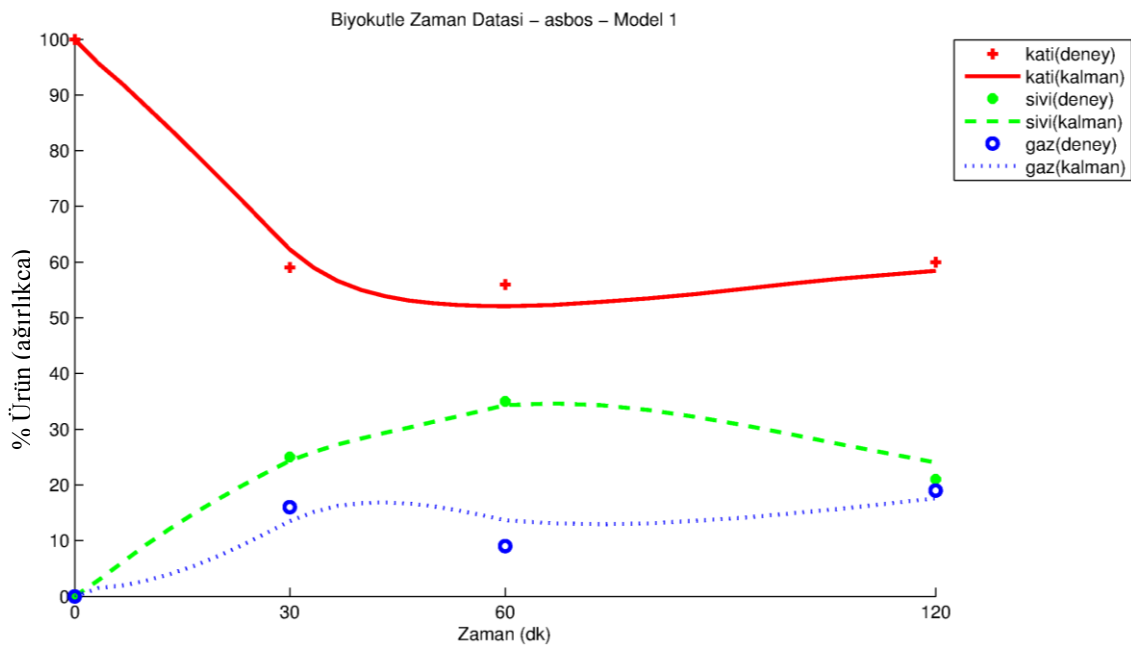
Biyokütle atıkların piroliz ile ısı bozundurulmasından elde edilen deneysel sonuçlar ile modellerden hesaplanan sonuçların hata kareleri farklarının toplamına bakıldığında genel olarak en iyi uyumu Model 5 göstermektedir. Bu model katı→sıvı, sıvı→gaz, katı→gaz tepkime basamaklarına ve sıvı→katı tersinir tepkime basamağına sahiptir. Model 5 ile en iyi uyumu gösteren biyokütle atık ise tüm biyokütle atıkları arasında en küçük hata kareler toplamını veren Asbos (Psilocaulon utile) bitkisi olmuştur.

En iyi uyum sağlayan Model 5 için tepkime hız sabitlerinin büyüklüğüne bakıldığında en büyük hız sabitine katı→sıvı tepkime basamağı ile biyokütle-yağ karışımı ve palmiye kabuğu, sıvı→katı tepkime basamağı ile Asbos (Psilocaulon utile), Scholtzboş (Pteronia pallens) ve Kraalbos (Galenia africana) bitkileri sahiptir. Model 5 için en küçük hız sabitine ise katı → gaz tepkime basamağı ile Asbos (Psilocaulon utile), Scholtzboş (Pteronia pallens) ve Kraalbos (Galenia africana), sıvı→gaz tepkime basamağı ile biyokütle-yağ karışımı ve palmiye kabuğu sahiptir.

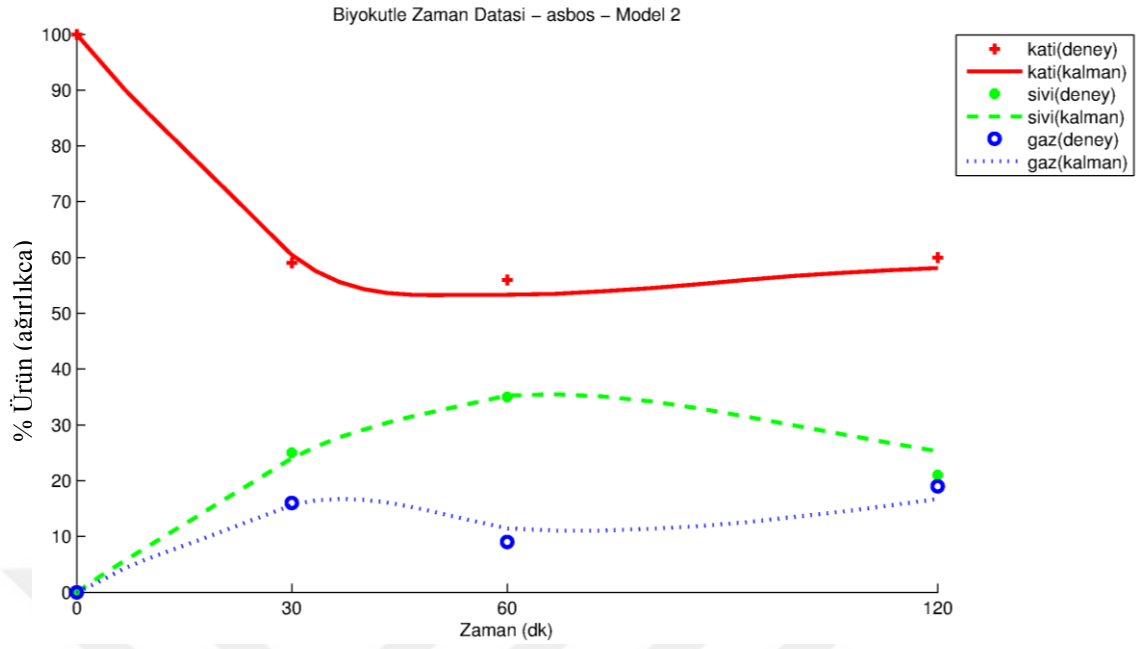
En büyük hız sabitini Model 4 ile Kraalbos (*Galenia africana*), biyokütle-yağ karışımı ve palmye kabuğu için katı→sıvı tepkime basamağı verirken, Asbos (*Psilocaulon utile*) ve Scholtzbos (*Pteronia pallens*) bitkileri için sıvı→gaz tersinir tepkime basamağı vermektedir.

En küçük hız sabitini katı→sıvı tepkime basamağı ile Asbos (*Psilocaulon utile*) ve Kraalbos (*Galenia africana*) bitkileri için Model 2, sıvı→gaz tepkime basamağı ile biyokütle-yağ karışımı için Model 5 ve palmye kabuğu için Model 3, katı→gaz tepkime basamağı ile Scholtzbos bitkisi için Model 3 vermektedir.

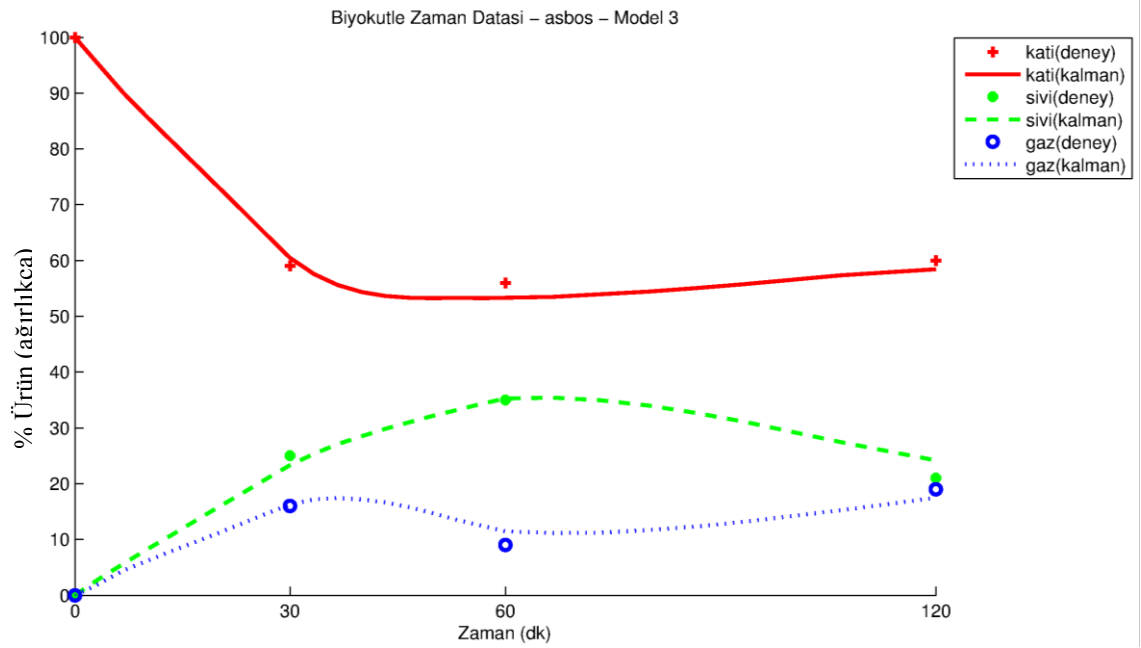
Asbos (*Psilocaulon utile*), Scholtzbos (*Pteronia pallens*), Kraalbos (*Galenia africana*), biyokütle-yağ karışımı ve palmye kabuğu biyokütle atıkları için deneysel sonuçların her bir model ile uyumunu şekil 4.46-4.70 göstermektedir. Tüm biyokütle atıkları için görülmektedir ki Model 5 ile sağlanan uyumu diğer modeller göstermemektedir. Tüm modeller gaz oluşumu için teorik gidişata hemen hemen yakın sonuçlar verirken katı ve sıvı oluşumları için teorik gidişat ile uyumsuz sonuçlar vermektedir. Model 5 katı oluşumların yanı sıra sıvı ve gaz oluşumları için de teorik gidişatı sağlamaktadır.



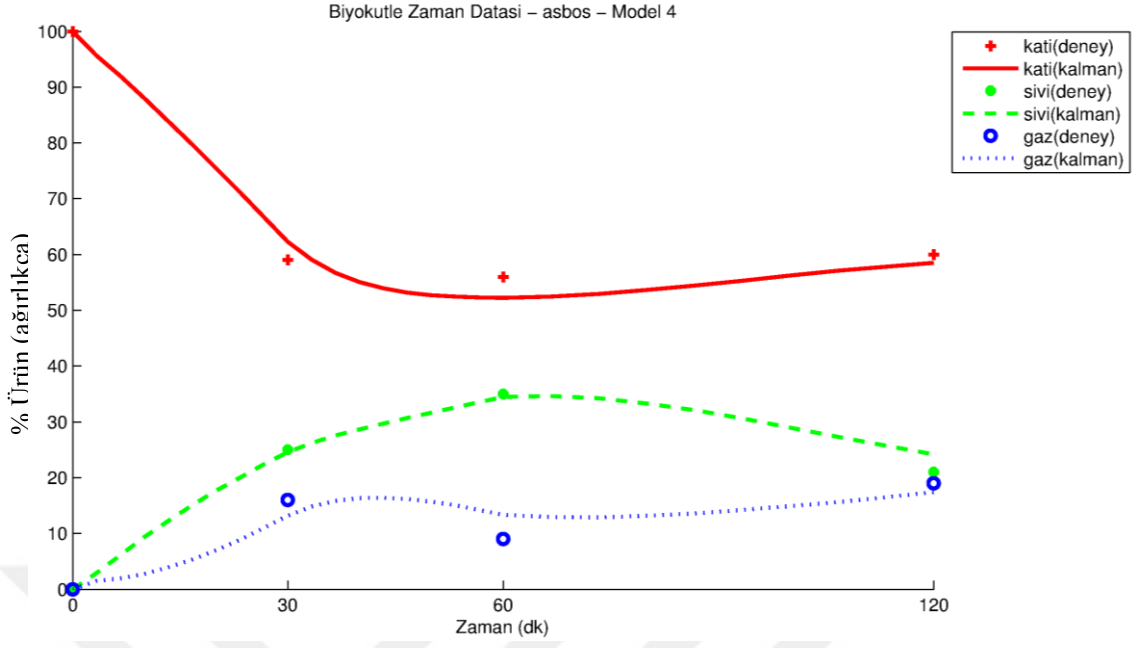
Şekil 4.46 Asbos (*Psilocaulon utile*) bitkisinin Model 1'den elde edilen sonuçlarla deneysel sonuçlarının karşılaştırılması



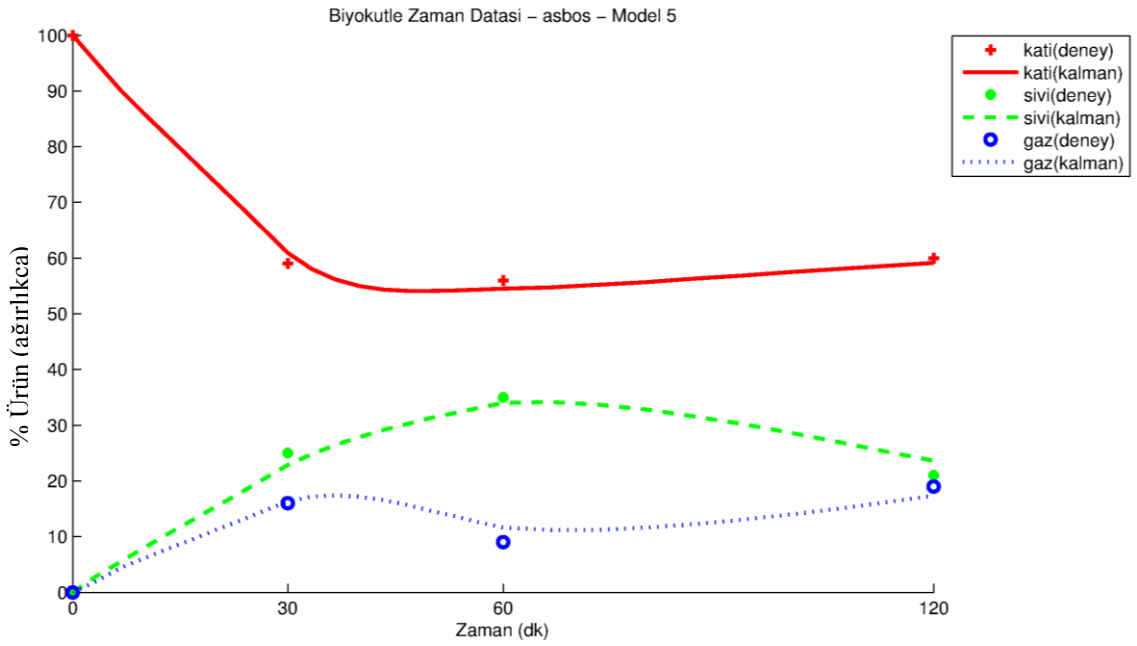
Şekil 4.47 Asbos (Psilocaulon utile) bitkisinin Model 2’den elde edilen sonuçlarla deneysel sonuçlarının karşılaştırılması



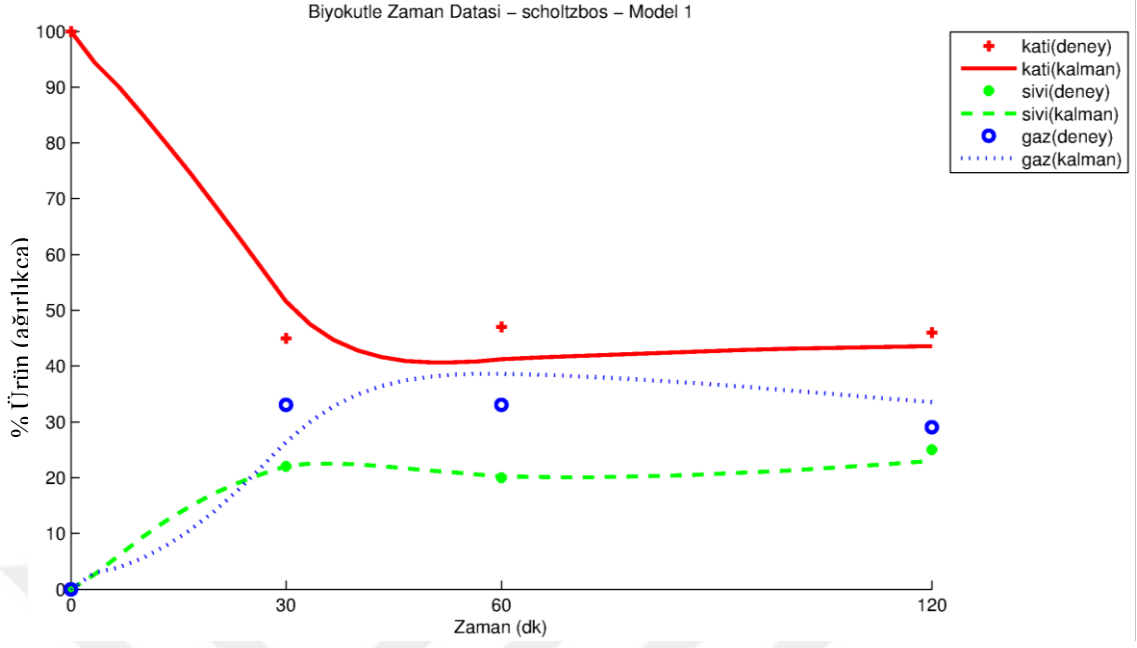
Şekil 4.48 Asbos (Psilocaulon utile) bitkisinin Model 3’ten elde edilen sonuçlarla deneysel sonuçlarının karşılaştırılması



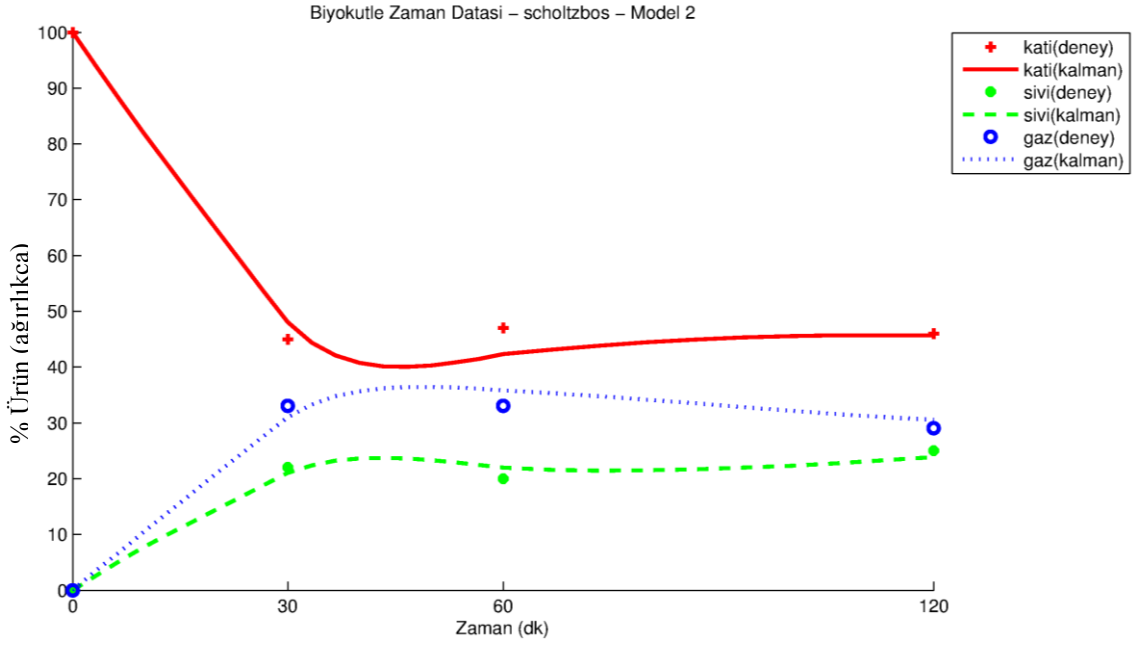
Şekil 4.49 Asbos (Psilocaulon utile) bitkisinin Model 4'ten elde edilen sonuçlarla deneysel sonuçlarının karşılaştırılması



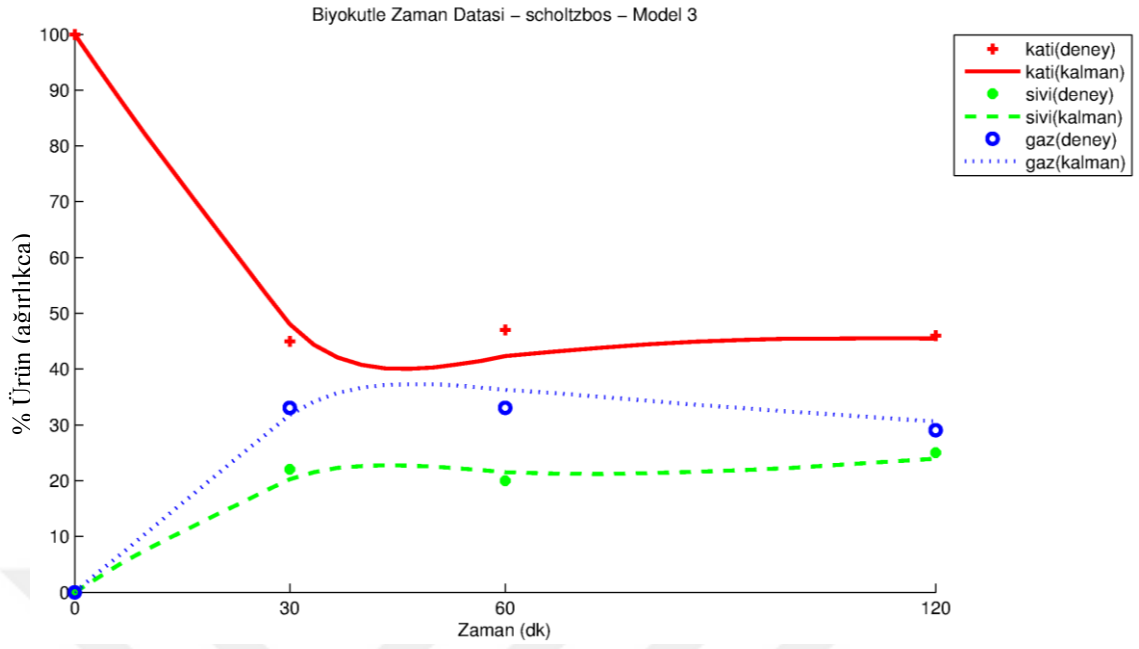
Şekil 4.50 Asbos (Psilocaulon utile) bitkisinin Model 5'ten elde edilen sonuçlarla deneysel sonuçlarının karşılaştırılması



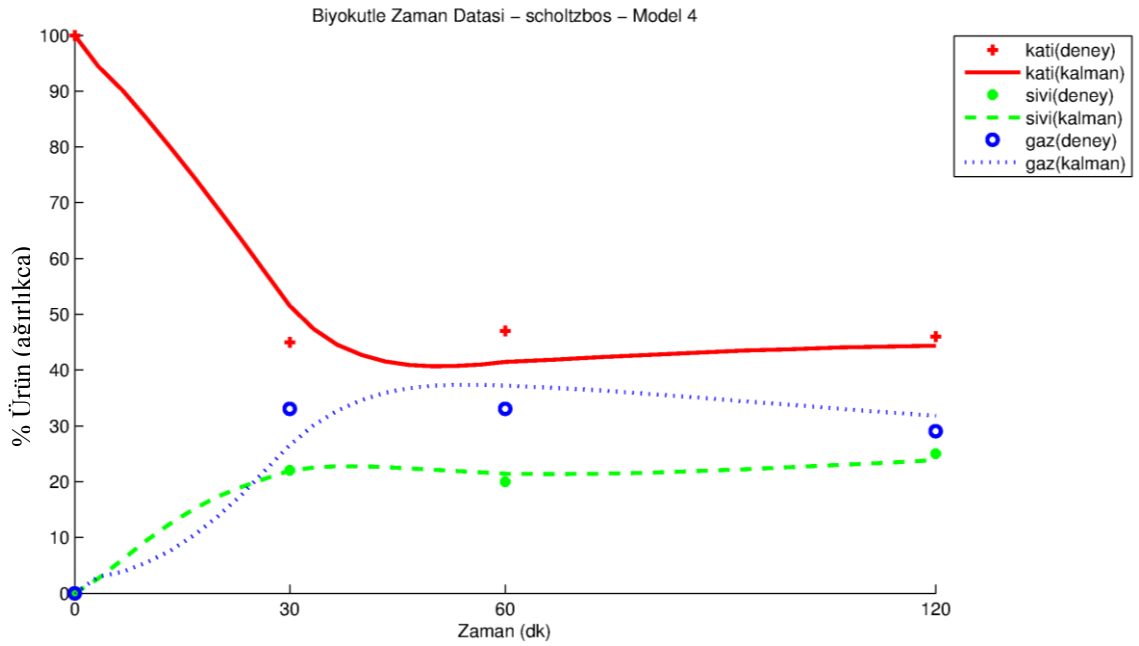
Şekil 4.51 Scholtzbos (*Pteronia pallens*) bitkisinin Model 1’den elde edilen sonuçlarla deneysel sonuçlarının karşılaştırılması



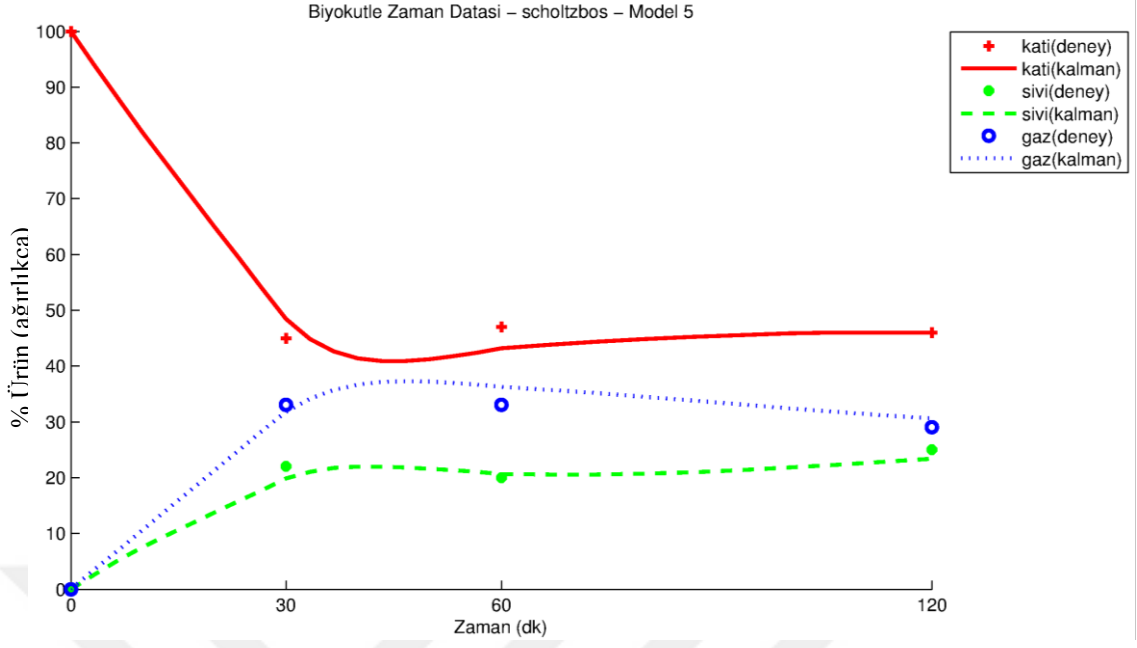
Şekil 4.52 Scholtzbos (*Pteronia pallens*) bitkisinin Model 2’den elde edilen sonuçlarla deneysel sonuçlarının karşılaştırılması



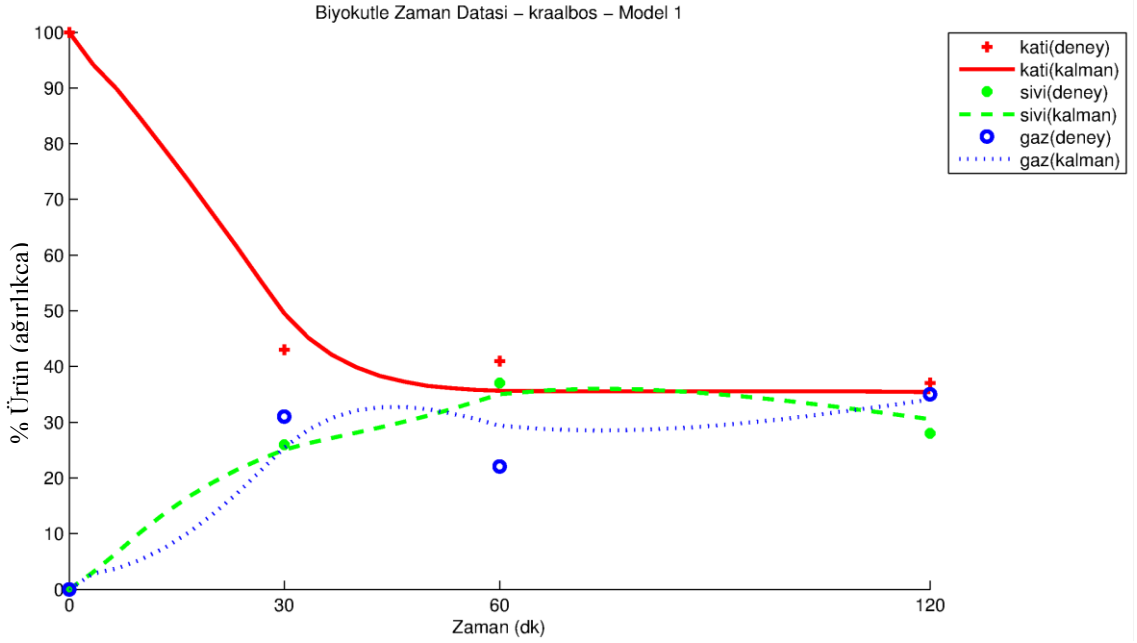
Şekil 4.53 Scholtzbos (*Pteronia pallens*) bitkisinin Model 3'ten elde edilen sonuçlarla deneysel sonuçlarının karşılaştırılması



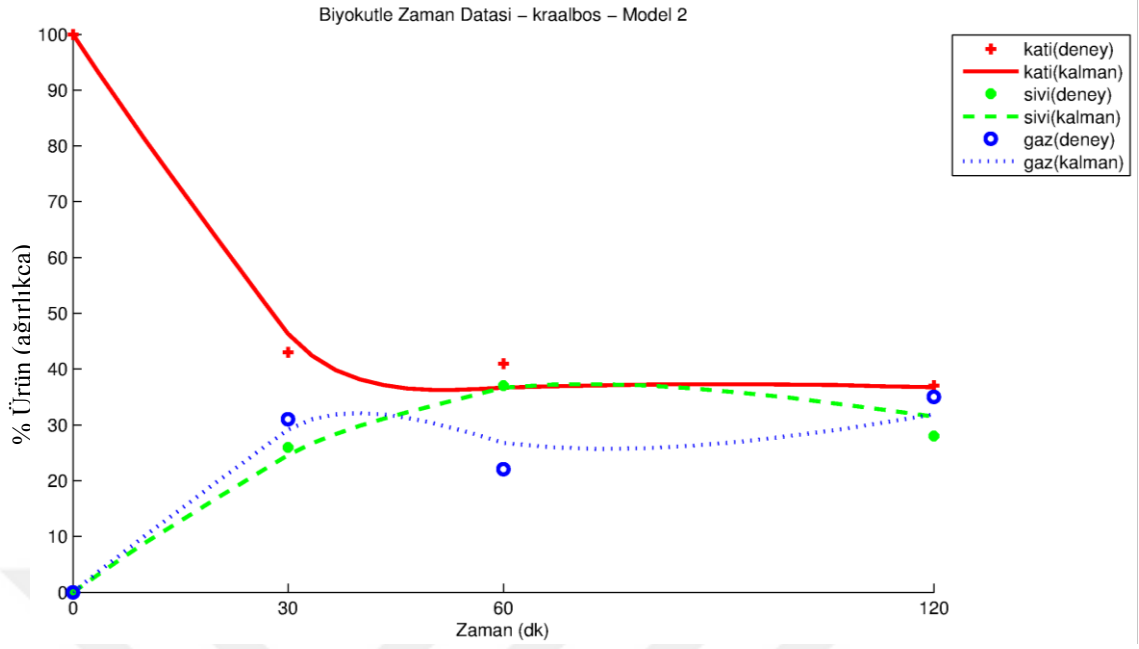
Şekil 4.54 Scholtzbos (*Pteronia pallens*) bitkisinin Model 4'ten elde edilen sonuçlarla deneysel sonuçlarının karşılaştırılması



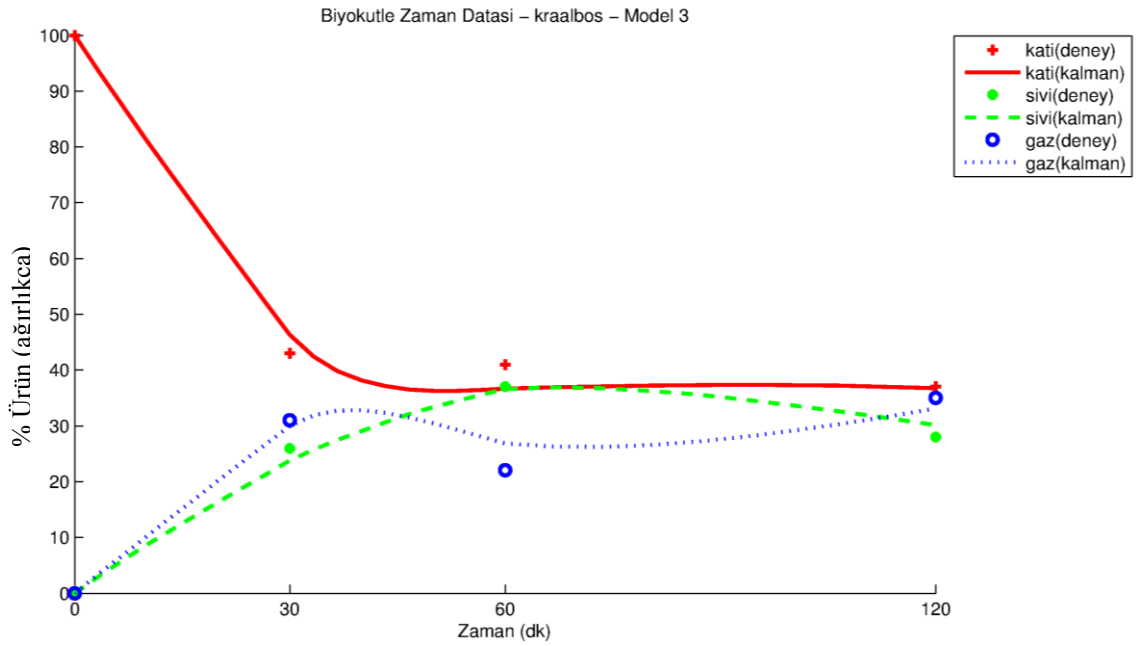
Şekil 4.55 Scholtzbos (*Pteronia pallens*) bitkisinin Model 5'ten elde edilen sonuçlarla deneysel sonuçlarının karşılaştırılması



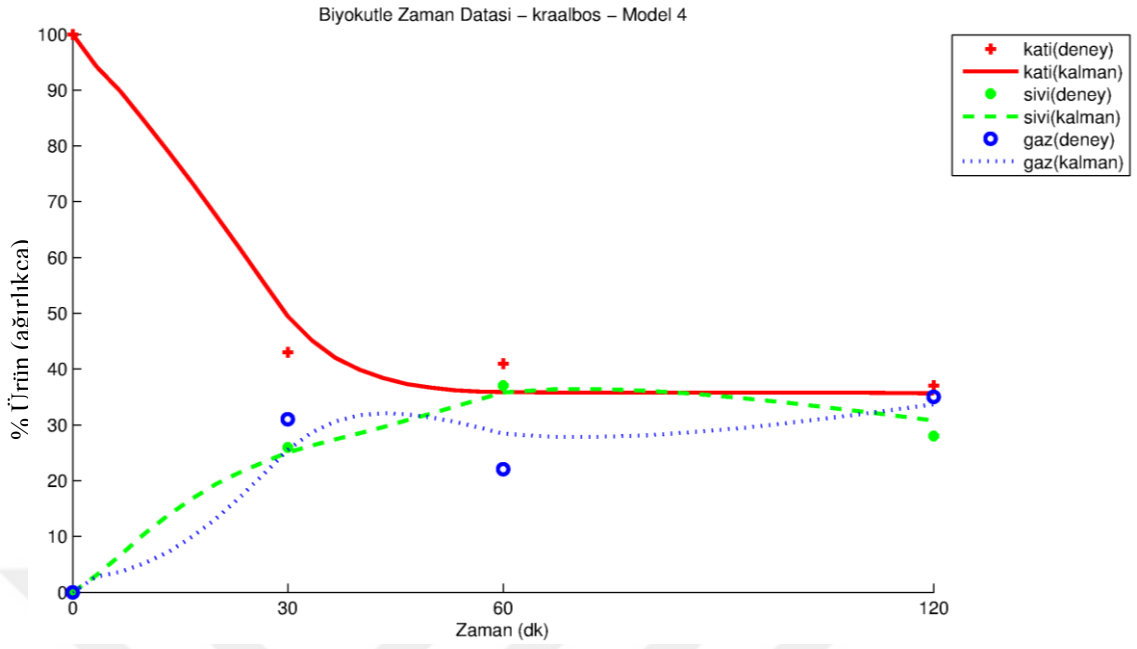
Şekil 4.56 Kraalbos (*Galenia africana*) bitkisinin Model 1'den elde edilen sonuçlarla deneysel sonuçlarının karşılaştırılması



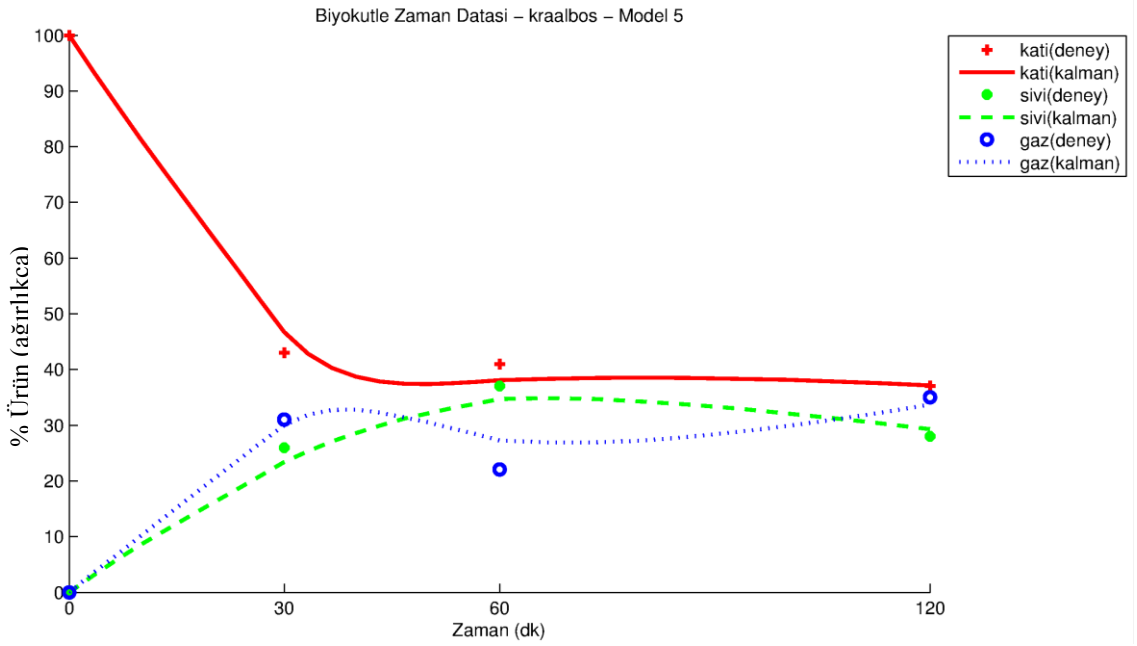
Şekil 4.57 Kraalbos (*Galenia africana*) bitkisinin Model 2’den elde edilen sonuçlarla deneysel sonuçlarının karşılaştırılması



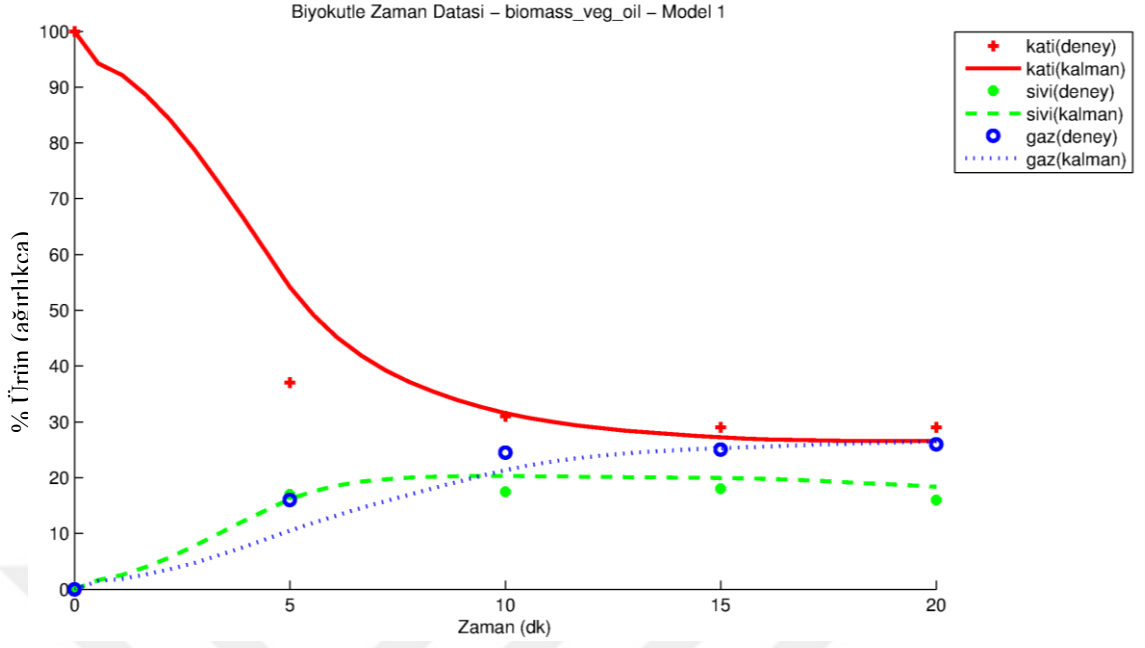
Şekil 4.58 Kraalbos (*Galenia africana*) bitkisinin Model 3’ten elde edilen sonuçlarla deneysel sonuçlarının karşılaştırılması



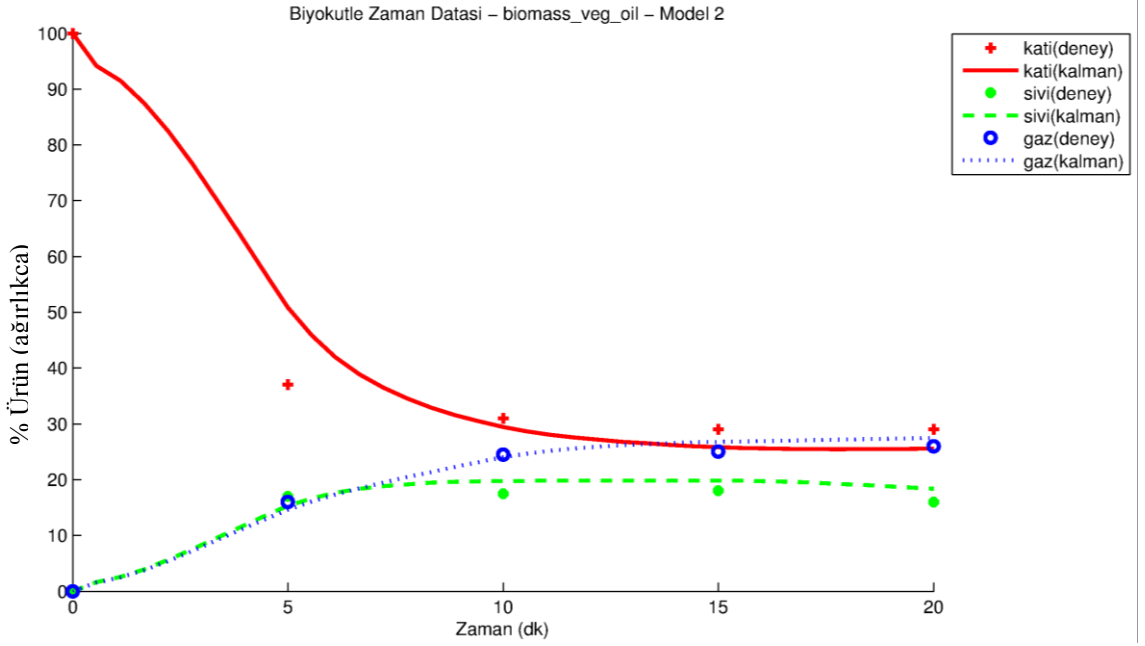
Şekil 4.59 Kraalbos (*Galenia africana*) bitkisinin Model 4'ten elde edilen sonuçlarla deneysel sonuçlarının karşılaştırılması



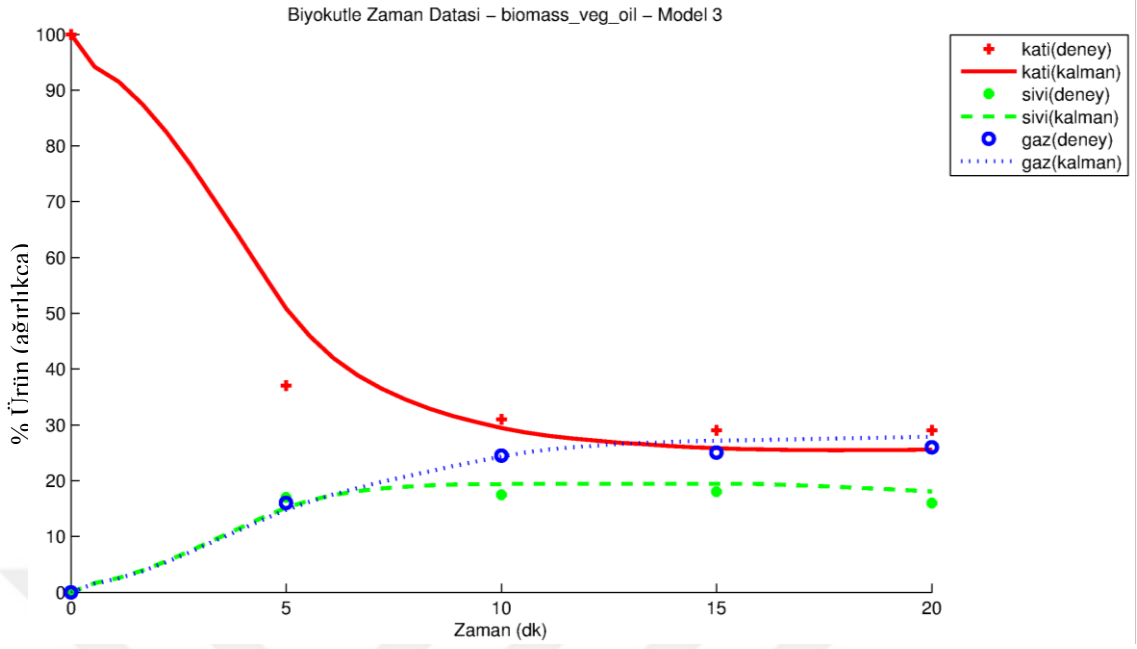
Şekil 4.60 Kraalbos (*Galenia africana*) bitkisinin Model 5'ten elde edilen sonuçlarla deneysel sonuçlarının karşılaştırılması



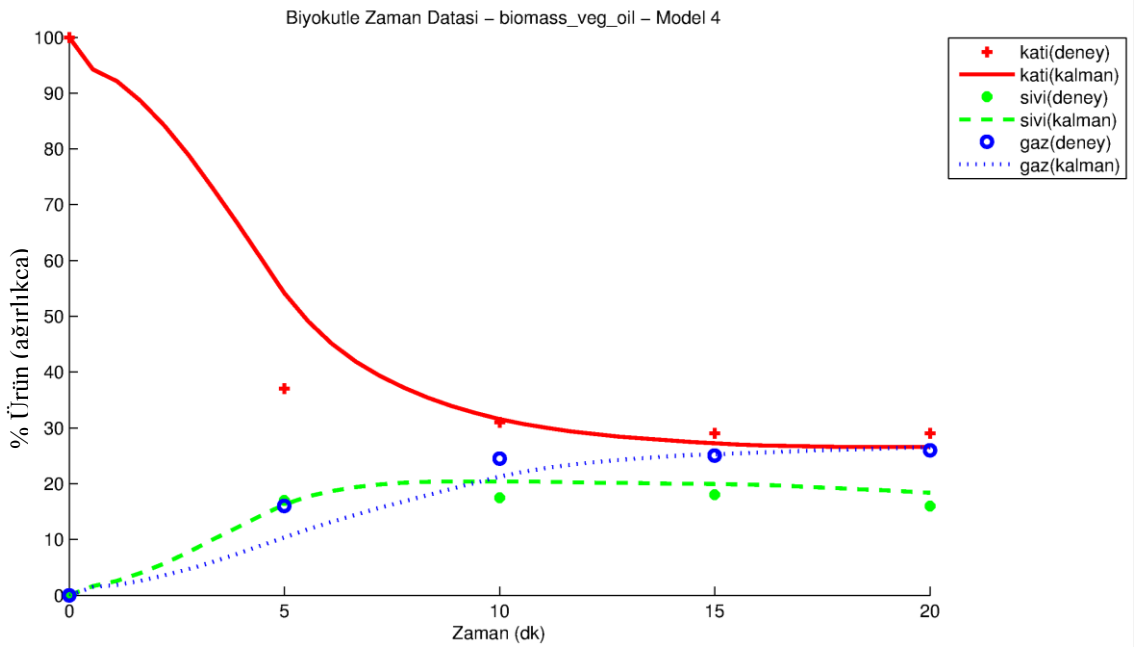
Şekil 4.61 Biyokütle-bitki yağı karışımının Model 1’den elde edilen sonuçlarla deneysel sonuçlarının karşılaştırılması



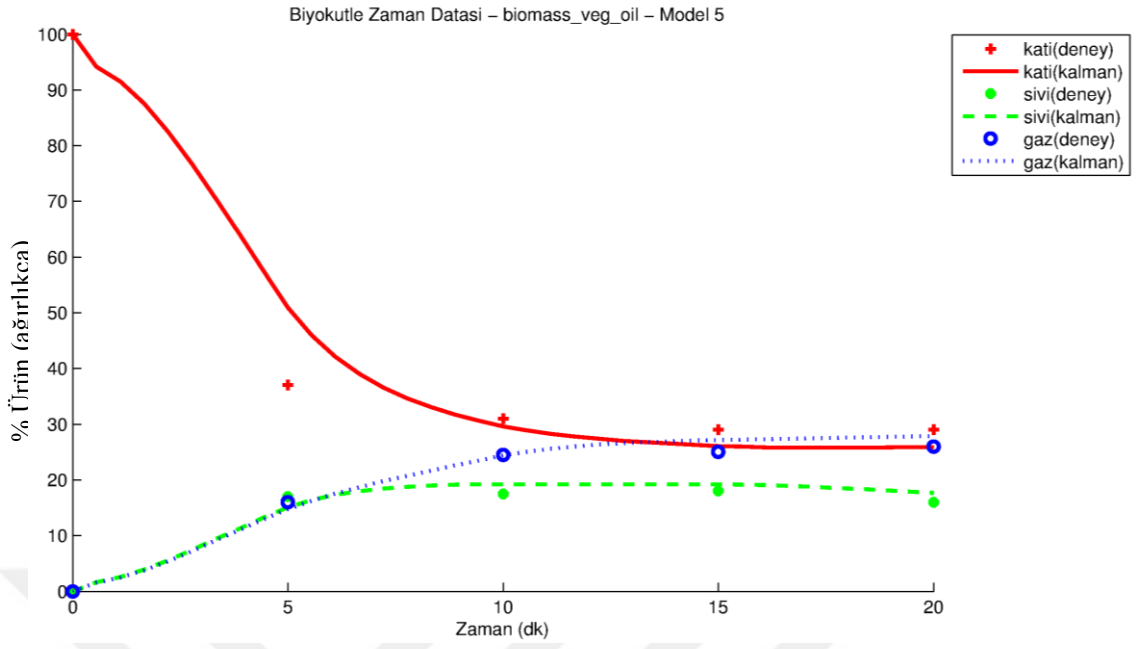
Şekil 4.62 Biyokütle-bitki yağı karışımının Model 2’den elde edilen sonuçlarla deneysel sonuçlarının karşılaştırılması



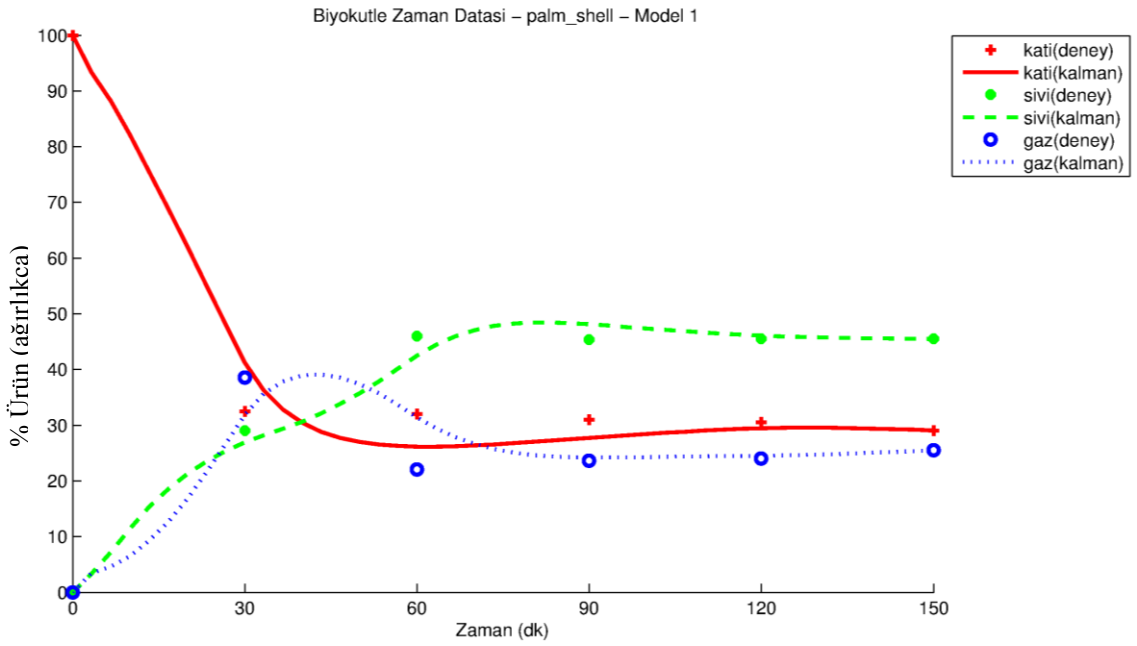
Şekil 4.63 Biyokütle-bitki yağı karışımının Model 3'ten elde edilen sonuçlarla deneysel sonuçlarının karşılaştırılması



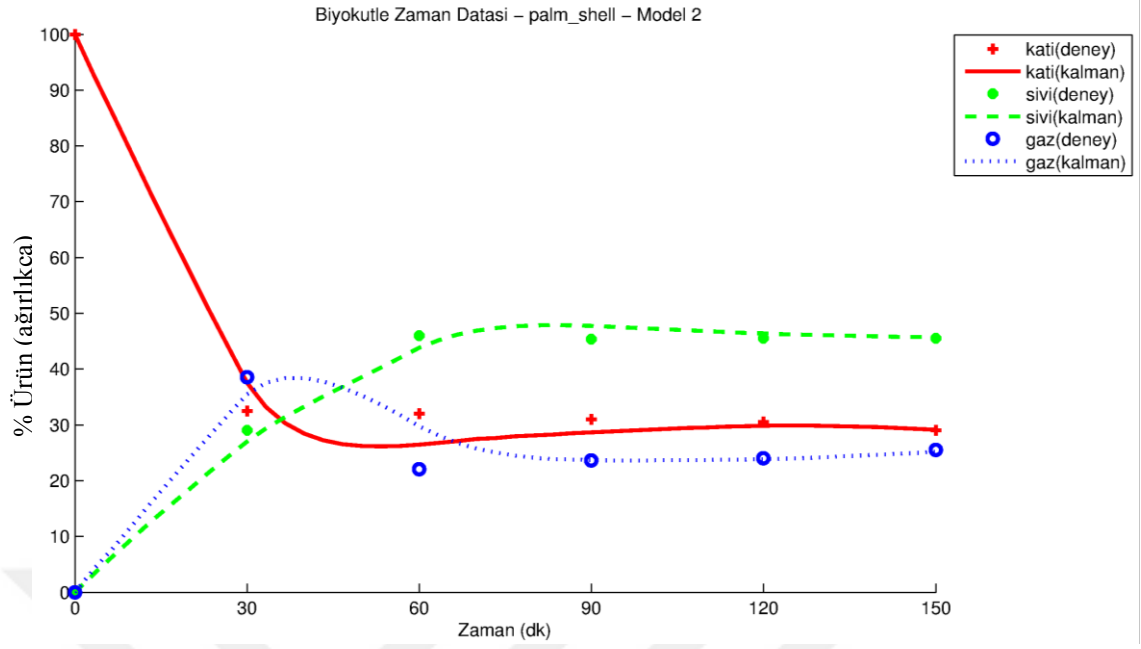
Şekil 4.64 Biyokütle-bitki yağı karışımının Model 4'ten elde edilen sonuçlarla deneysel sonuçlarının karşılaştırılması



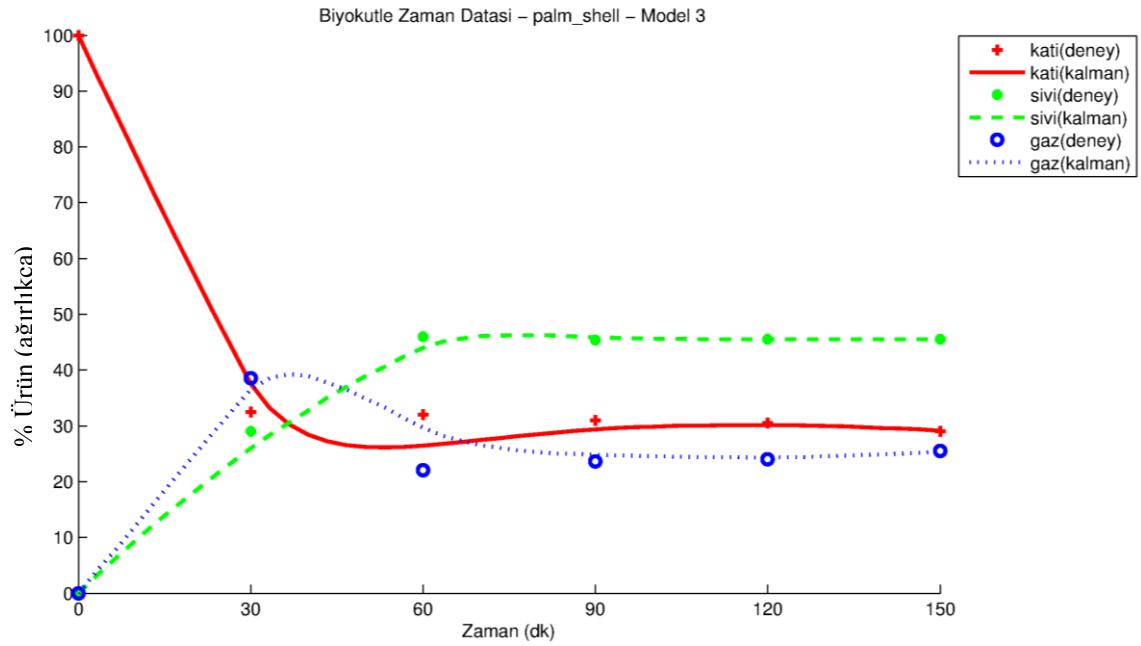
Şekil 4.65 Biyokütle-bitki yağı karışımının Model 5'ten elde edilen sonuçlarla deneysel sonuçlarının karşılaştırılması



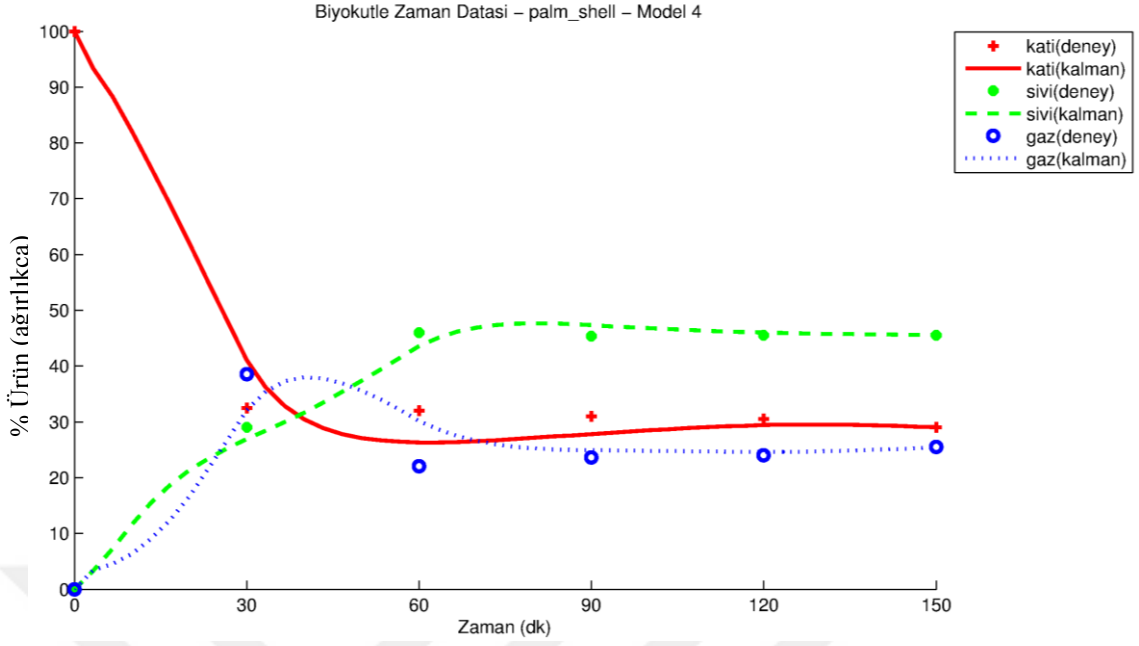
Şekil 4.66 Palmiye kabuğunun Model 1'den elde edilen sonuçlarla deneysel sonuçlarının karşılaştırılması



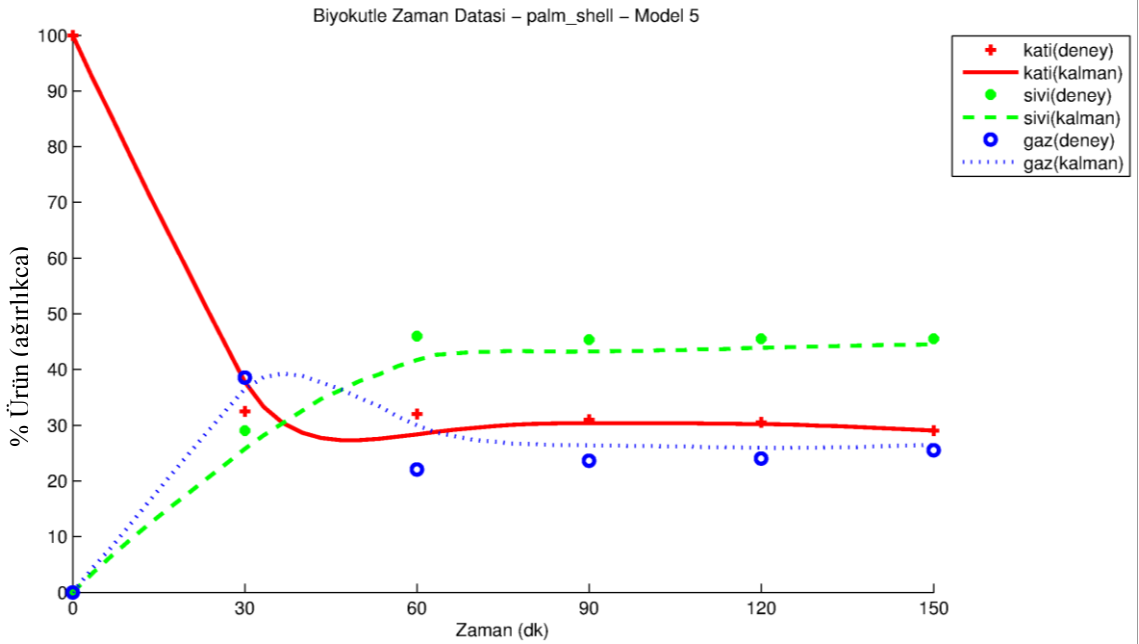
Şekil 4.67 Palmiye kabuğunun Model 2'den elde edilen sonuçlarla deneysel sonuçlarının karşılaştırılması



Şekil 4.68 Palmiye kabuğunun Model 3'ten elde edilen sonuçlarla deneysel sonuçlarının karşılaştırılması



Şekil 4.69 Palmiye kabuğunun Model 4'ten elde edilen sonuçlarla deneysel sonuçlarının karşılaştırılması



Şekil 4.70 Palmiye kabuğunun Model 5'ten elde edilen sonuçlarla deneysel sonuçlarının karşılaştırılması

#### 4.2 Regresyon Analizi ile Tepkime Mekanizması ve Mertebe Belirleme

Bu tez çalışmasında Kalman Filtreleme Yöntemi ile yapılan çalışmalar tüm tepkimelerin birinci mertebe olduğu varsayımı ile yapılmıştır. Çalışmanın bu

bölümünde tepkimelerin farklı mertebelerde olduğu durumların da değerlendirilebilmesi için regresyon analizi yapılmıştır. SigmaPlot (ver. 12.0 Notebook, Systat Software, Inc.) programı kullanılarak yapılan regresyon analizinde ilk basamak olarak plastik ve biyokütle atıkları için deneysel sonuçlarla en düşük hata oranı veren denklem ve bu denklemin katsayıları tespit edilmiştir. (Çizelge 4.5-4.6)

#### 4.2.1 A, B ve C'ye ait f(t) denklemlerini bulma A=f(t)

Analiz sonuçlarına göre deneysel sonuçlarla en düşük hata oranı veren denklem 4.2 olmuştur.

$$Y = y_0 + at + bt^2 + ct^3 \quad (4.2)$$

Çizelge 4.5 Plastik atıkların ısıl bozundurulmasından elde edilen deneysel veriler ile f(t) denkleminde katsayılarının tespiti

| Y                    | y <sub>0</sub> | a       | b       | c            | R <sup>2</sup> |
|----------------------|----------------|---------|---------|--------------|----------------|
| <b>PS</b>            |                |         |         |              |                |
| <b>A</b>             | 106,6495       | -4,9343 | 0,0793  | -0,0004      | 0,9842         |
| <b>B</b>             | -5,9075        | 4,3790  | -0,0703 | 0,0004       | 0,9839         |
| <b>C</b>             | -0,7420        | 0,5553  | -0,0090 | 0,000049601  | 0,9860         |
| <b>PP</b>            |                |         |         |              |                |
| <b>A</b>             | 106,6136       | -4,9613 | 0,0786  | -0,0004      | 0,9858         |
| <b>B</b>             | -4,9789        | 3,9712  | -0,0575 | 0,0003       | 0,9898         |
| <b>C</b>             | -1,6348        | 0,9900  | -0,0211 | 0,0001       | 0,9294         |
| <b>PP/PS</b>         |                |         |         |              |                |
| <b>A</b>             | 105,8570       | -4,5134 | 0,0686  | -0,0003      | 0,9874         |
| <b>B</b>             | -5,8393        | 4,2686  | -0,0691 | 0,0003       | 0,9820         |
| <b>C</b>             | -0,0336        | 0,2528  | 0,0003  | -0,000012291 | 0,9993         |
| <b>PP/HVGO (1/1)</b> |                |         |         |              |                |
| <b>A</b>             | 106,9641       | -5,0386 | 0,0841  | -0,0004      | 0,9813         |
| <b>B</b>             | -6,9435        | 4,8006  | -0,0849 | 0,0005       | 0,9739         |
| <b>C</b>             | -0,0107        | 0,2348  | 0,0010  | -0,000023703 | 0,9969         |

Çizelge 4.6 Plastik atıkların ısııl bozundurulmasından elde edilen deneysel veriler ile f(t) denkleminde katsayılarının tespiti (devam)

| <b>PP/HVGO (5/1)</b>      |                      |          |          |                          |                      |
|---------------------------|----------------------|----------|----------|--------------------------|----------------------|
| <b>A</b>                  | 104,0815             | -3,6922  | 0,0454   | -0,0002                  | 0,9948               |
| <b>B</b>                  | -3,8513              | 3,3698   | -0,0437  | 0,0002                   | 0,9912               |
| <b>C</b>                  | -0,2315              | 0,3229   | -0,0018  | -0,0000074621            | 0,9987               |
| <b>PP/PS/HVGO (1/1/1)</b> |                      |          |          |                          |                      |
| <b>A</b>                  | 107,0446             | -5,0229  | 0,0845   | -0,0004                  | 0,9788               |
| <b>B</b>                  | -6,1110              | 4,4099   | -0,0726  | 0,0004                   | 0,9804               |
| <b>C</b>                  | -0,9607              | 0,6248   | -0,0123  | 0,000076816              | 0,9615               |
| <b>PP/AA (1/1)</b>        |                      |          |          |                          |                      |
| <b>A</b>                  | 104,9308             | -3,7273  | 0,0588   | -0,0003                  | 0,9862               |
| <b>B</b>                  | -4,4892              | 3,2809   | -0,0539  | 0,0003                   | 0,9825               |
| <b>C</b>                  | -0,4416              | 0,4464   | -0,0049  | 0,000018875              | 0,9972               |
|                           | <b>y<sub>0</sub></b> | <b>a</b> | <b>b</b> | <b>c</b>                 | <b>R<sup>2</sup></b> |
| <b>PP/AA (5/1)</b>        |                      |          |          |                          |                      |
| <b>A</b>                  | 105,9714             | -4,5474  | 0,0704   | -0,0003                  | 0,9933               |
| <b>B</b>                  | -5,0492              | 3,7531   | -0,0601  | 0,0003                   | 0,9843               |
| <b>C</b>                  | -0,9123              | 0,7911   | -0,0101  | 3,9505x10 <sup>-56</sup> | 0,9932               |
| <b>PP/PS/AA (1/1/1)</b>   |                      |          |          |                          |                      |
| <b>A</b>                  | 104,8097             | -3,5704  | 0,0575   | -0,0003                  | 0,9843               |
| <b>B</b>                  | -4,2735              | 3,1197   | -0,0511  | 0,0003                   | 0,9822               |
| <b>C</b>                  | -0,5362              | 0,4506   | -0,0064  | 0,000032482              | 0,9934               |

Çizelge 4.7 Biyokütle atıkların ısıtılma bozundurulmasından elde edilen deneysel veriler ile f(t) denkleminde katsayılarının tespiti

| Y                                    | y <sub>0</sub> | a        | b       | c           | R <sup>2</sup> |
|--------------------------------------|----------------|----------|---------|-------------|----------------|
| <b>Asbos (Psilocaulon utile)</b>     |                |          |         |             |                |
| A                                    | 101,6602       | -1,9612  | 0,0261  | -0,0001     | 0,9859         |
| B                                    | -1,9454        | 1,2365   | -0,0133 | 0,000037261 | 0,9903         |
| C                                    | 0,2851         | 0,7248   | -0,0128 | 0,000069182 | 0,8432         |
| <b>Kraalbos (Galenia africana)</b>   |                |          |         |             |                |
| A                                    | 101,7817       | -2,6794  | 0,0364  | -0,0002     | 0,9808         |
| B                                    | -1,8166        | 1,2530   | -0,0130 | 0,000037735 | 0,9934         |
| C                                    | 0,0349         | 1,4264   | -0,0234 | 0,0001      | 0,8994         |
| <b>Scholtzbos (Pteronia pallens)</b> |                |          |         |             |                |
| A                                    | 101,6319       | -2,6131  | 0,0372  | -0,0002     | 0,9710         |
| B                                    | -0,3911        | 1,0230   | -0,0150 | 0,000069651 | 0,9592         |
| C                                    | -1,2407        | 1,5901   | -0,0222 | 0,000093178 | 0,9781         |
| <b>Biyokütle-bitki yağı karışımı</b> |                |          |         |             |                |
| A                                    | 101,6704       | -17,3036 | 1,3258  | -0,0325     | 0,9863         |
| B                                    | -0,2368        | 4,5387   | -0,3494 | 0,0083      | 0,9747         |
| C                                    | -1,0614        | 4,4886   | -0,2523 | 0,0047      | 0,9967         |
| Y                                    | y <sub>0</sub> | a        | b       | c           | R <sup>2</sup> |
| <b>Palm shell</b>                    |                |          |         |             |                |
| A                                    | 96,8334        | -2,5478  | 0,0295  | -0,0001     | 0,9509         |
| B                                    | -2,3948        | 1,4028   | -0,0131 | 0,000039339 | 0,9947         |
| C                                    | 5,5614         | 1,1450   | -0,0164 | 0,000066294 | 0,6080         |

#### 4.2.2 A, B ve C'nin t'ye karşı türevini alma

Regresyon analizinin ikinci basamağında en iyi uyumu sağlayan denklemin türevi alınmıştır (4.3). Türevi alınan denklem reaksiyon hızını vermektedir.

$$\frac{dY}{dt} = a + 2bt + 3ct^2 \quad (4.3)$$

#### 4.2.3 Reaksiyonların üstel katsayıları ve hızlarının tespiti

Çalışmanın bu bölümünde plastik ve biyokütle atıkların piroliz mekanizmalarının belirlenmesi için denenen farklı mertebelerde 5 tepkime modeli aşağıda verilmiştir.

##### Model 1:

$$\frac{dA}{dt} = -k_1 A^m \quad (4.4)$$

$$\frac{dB}{dt} = k_1 A^m - k_2 B^p \quad (4.5)$$

$$\frac{dC}{dt} = k_2 B^p \quad (4.6)$$

##### Model 2:

$$\frac{dA}{dt} = -k_1 A^m - k_2 A^n \quad (4.7)$$

$$\frac{dB}{dt} = k_1 A^m \quad (4.8)$$

$$\frac{dC}{dt} = k_2 A^n \quad (4.9)$$

##### Model 3:

$$\frac{dA}{dt} = -k_1 A^m - k_3 A^n \quad (4.10)$$

$$\frac{dB}{dt} = k_1 A^m - k_2 B^p \quad (4.11)$$

$$\frac{dC}{dt} = k_2 B^p + k_3 A^n \quad (4.12)$$

##### Model 4:

$$\frac{dA}{dt} = -k_1 A^m + k_3 B^p \quad (4.13)$$

$$\frac{dB}{dt} = k_1 A^m - k_2 B^r - k_3 B^p \quad (4.14)$$

$$\frac{dC}{dt} = k_2 B^r \quad (4.15)$$

##### Model 5:

$$\frac{dA}{dt} = -k_1 A^m - k_3 A^n + k_4 B^p \quad (4.16)$$

$$\frac{dB}{dt} = k_1 A^m - k_2 B^r - k_4 B^p \quad (4.17)$$

$$\frac{dc}{dt} = k_3 A^n + k_2 B^r \quad (4.18)$$

Regresyon analizinin sonraki adımında yukarıda verilen modellerin katsayıları ve tepkimelerin hız sabitleri tespit edilmiştir. (Çizelge 4.7-4.10)

Çizelge 4.8 Plastik atıklar için regresyon analizi ile modellerden elde edilen tepkime hız sabitleri (kütle kesri<sup>(1-n)</sup>.dk<sup>-1</sup>)

|              | <b>k<sub>1</sub></b> | <b>k<sub>2</sub></b>     | <b>k<sub>3</sub></b>     | <b>k<sub>4</sub></b>    |
|--------------|----------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------|
| <b>PS</b>    |                      |                          |                          |                         |
| Model 1      | 0,0246               | 3,2345x10 <sup>-19</sup> |                          |                         |
| Model 2      | 0,1090               | 0,0082                   |                          |                         |
| Model 3      | 0,0189               | 5,0018x10 <sup>-17</sup> | 0,0082                   |                         |
| Model 4      | 0,6404               | 0,1396                   | 0,0439                   |                         |
| Model 5      | 0,5838               | 1,3113x10 <sup>-19</sup> | 0,0082                   | 0,0301                  |
| <b>PP</b>    |                      |                          |                          |                         |
| Model 1      | 0,0519               | 2,3315x10 <sup>-18</sup> |                          |                         |
| Model 2      | 0,1500               | 7,1918x10 <sup>-5</sup>  |                          |                         |
| Model 3      | 0,0635               | 7,4100x10 <sup>-18</sup> | 7,1919x10 <sup>-5</sup>  |                         |
| Model 4      | 0,2028               | 1,0495x10 <sup>-18</sup> | 2,7807x10 <sup>-47</sup> |                         |
| Model 5      | 0,33455              | 1,8056x10 <sup>-17</sup> | 7,1917x10 <sup>-5</sup>  | 1,7816x10 <sup>-5</sup> |
| <b>PP/PS</b> |                      |                          |                          |                         |
| Model 1      | 0,0050               | 5,3576x10 <sup>-5</sup>  |                          |                         |
| Model 2      | 0,0014               | 0,0672                   |                          |                         |
| Model 3      | 0,0031               | 5,46725x10 <sup>-5</sup> | 0,0220                   |                         |
| Model 4      | 0,2451               | 0,1756                   | 0,1738                   |                         |
| Model 5      | 0,2300               | 5,4706x10 <sup>-5</sup>  | 0,0220                   | 0,1741                  |

Çizelge 4.9 Plastik atıklar için regresyon analizi ile modellerden elde edilen tepkime hız sabitleri (kütle kesri<sup>(1-n)</sup>.dk<sup>-1</sup>) (devam)

|                      | <b>k1</b> | <b>k2</b> | <b>k3</b> | <b>k4</b> |
|----------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| <b>PP/HVGO (1/1)</b> |           |           |           |           |
| Model 1              | 0,0044    | 0,1253    |           |           |
| Model 2              | 0,0482    | 0,0250    |           |           |
| Model 3              | 0,0031    | 0,0016    | 0,0173    |           |
| Model 4              | 0,1823    | 0,1253    | 0,1246    |           |
| Model 5              | 0,1716    | 0,0016    | 0,0173    | 0,1260    |

|                      |        |                          |        |        |
|----------------------|--------|--------------------------|--------|--------|
| <b>PP/HVGO (5/1)</b> |        |                          |        |        |
| Model 1              | 0,0869 | 0,0911                   |        |        |
| Model 2              | 0,0619 | 0,0046                   |        |        |
| Model 3              | 0,0829 | 3,220510 <sup>-18</sup>  | 0,0046 |        |
| Model 4              | 0,7896 | 0,0911                   | 0,0290 |        |
| Model 5              | 0,7194 | 6,9647x10 <sup>-20</sup> | 0,0046 | 0,0146 |

|                           |        |                          |        |        |
|---------------------------|--------|--------------------------|--------|--------|
| <b>PP/PS/HVGO (1/1/1)</b> |        |                          |        |        |
| Model 1                   | 0,0012 | 0,1340                   |        |        |
| Model 2                   | 0,0213 | 0,0022                   |        |        |
| Model 3                   | 0,0213 | 6,7470x10 <sup>-19</sup> | 0,0022 |        |
| Model 4                   | 0,0242 | 0,1340                   | 0,0004 |        |
| Model 5                   | 0,0217 | 1,3733x10 <sup>-18</sup> | 0,0022 | 0,0004 |

|                    |        |                          |                         |                         |
|--------------------|--------|--------------------------|-------------------------|-------------------------|
| <b>PP/AA (1/1)</b> |        |                          |                         |                         |
| Model 1            | 0,0007 | 0,1506                   |                         |                         |
| Model 2            | 0,0015 | 0,0012                   |                         |                         |
| Model 3            | 0,0004 | 5,3070x10 <sup>-18</sup> | 0,0012                  |                         |
| Model 4            | 0,0242 | 0,1506                   | 7,5170x10 <sup>-7</sup> |                         |
| Model 5            | 0,0231 | 4,4001x10 <sup>-18</sup> | 0,0012                  | 5,6182x10 <sup>-7</sup> |

Çizelge 4.12 Plastik atıklar için regresyon analizi ile modellerden elde edilen tepkime hız sabitleri (kütle kesri<sup>(1-n)</sup>.dk<sup>-1</sup>) (devam)

|                    | <b>k1</b> | <b>k2</b> | <b>k3</b>               | <b>k4</b>                |
|--------------------|-----------|-----------|-------------------------|--------------------------|
| <b>PP/AA (5/1)</b> |           |           |                         |                          |
| Model 1            | 0,0024    | 0,4902    |                         |                          |
| Model 2            | 0,0080    | 0,7071    |                         |                          |
| Model 3            | 0,0029    | 0,0203    | 3,5990x10 <sup>-7</sup> |                          |
| Model 4            | 0,1255    | 0,4901    | 2,3335x10 <sup>-8</sup> |                          |
| Model 5            | 0,2547    | 0,0203    | 3,5988x10 <sup>-7</sup> | 2,12548x10 <sup>-8</sup> |

**PP/PS/AA (1/1/1)**

|         |        |                          |                          |                         |
|---------|--------|--------------------------|--------------------------|-------------------------|
| Model 1 | 0,0002 | 1,6350x10 <sup>-18</sup> |                          |                         |
| Model 2 | 0,0019 | 4,5610x10 <sup>-10</sup> |                          |                         |
| Model 3 | 0,0003 | 5,9773x10 <sup>-17</sup> | 4,5755x10 <sup>-10</sup> |                         |
| Model 4 | 0,0154 | 1,2141x10 <sup>-17</sup> | 7,2036x10 <sup>-6</sup>  |                         |
| Model 5 | 0,0128 | 1,2141x10 <sup>-17</sup> | 0,0025                   | 7,2159x10 <sup>-6</sup> |

Çizelge 4.13 Plastik atıkların modeller için elde edilen tepkime dereceleri

| <b>Derece</b> | <b>m</b> | <b>n</b> | <b>p</b> | <b>r</b> |
|---------------|----------|----------|----------|----------|
| <b>Model</b>  |          |          |          |          |

|           |        |        |                        |                        |
|-----------|--------|--------|------------------------|------------------------|
| <b>PS</b> |        |        |                        |                        |
| Model 1   | 1,1619 |        | 0,27                   |                        |
| Model 2   | 0,7956 | 0,9121 |                        |                        |
| Model 3   | 1,1933 | 0,9121 | 1,94x10 <sup>-15</sup> |                        |
| Model 4   | 0,4435 |        | 0,8207                 | 1,34x10 <sup>-16</sup> |
| Model 5   | 0,4369 | 0,9121 | 0,8895                 | 2,08x10 <sup>-14</sup> |

|           |                        |        |         |        |
|-----------|------------------------|--------|---------|--------|
| <b>PP</b> |                        |        |         |        |
| Model 1   | 0,9952                 |        | 0,3089  |        |
| Model 2   | 0,7068                 | 2,0915 |         |        |
| Model 3   | 0,9061                 | 2,0915 | 0,5669  |        |
| Model 4   | 0,6818                 |        | 24,3135 | 0,754  |
| Model 5   | 2,10x10 <sup>-24</sup> | 2,0915 | 2,7542  | 0,5816 |

Çizelge 4.8 Plastik atıkların modeller için elde edilen tepkime dereceleri (devam)

| <b>Derece</b><br><b>Model</b> | <b>m</b> | <b>n</b> | <b>p</b> | <b>r</b> |
|-------------------------------|----------|----------|----------|----------|
|-------------------------------|----------|----------|----------|----------|

|              |        |        |        |                        |
|--------------|--------|--------|--------|------------------------|
| <b>PP/PS</b> |        |        |        |                        |
| Model 1      | 1,4991 |        | 2,1538 |                        |
| Model 2      | 1,7568 | 0,3109 |        |                        |
| Model 3      | 1,5877 | 0,5681 | 2,6684 |                        |
| Model 4      | 0,6551 |        | 0,4843 | $1,89 \times 10^{-16}$ |
| Model 5      | 0,6554 | 0,5681 | 0,4864 | 2,6684                 |

|                   |        |        |                        |                        |
|-------------------|--------|--------|------------------------|------------------------|
| <b>PP/HVGO/11</b> |        |        |                        |                        |
| Model 1           | 1,5487 |        | $2,46 \times 10^{-16}$ |                        |
| Model 2           | 0,9964 | 0,5331 |                        |                        |
| Model 3           | 1,6169 | 0,6095 | 0,5272                 |                        |
| Model 4           | 0,7368 |        | 0,5362                 | $3,34 \times 10^{-18}$ |
| Model 5           | 0,7381 | 0,6095 | 0,5364                 | 0,5272                 |

|                   |        |        |                        |                        |
|-------------------|--------|--------|------------------------|------------------------|
| <b>PP/HVGO/51</b> |        |        |                        |                        |
| Model 1           | 0,815  |        | $5,53 \times 10^{-17}$ |                        |
| Model 2           | 0,8686 | 0,9573 |                        |                        |
| Model 3           | 0,8023 | 0,9573 | 0,5312                 |                        |
| Model 4           | 0,3338 |        | 0,8477                 | $1,18 \times 10^{-16}$ |
| Model 5           | 0,3282 | 0,9573 | 0,9786                 | 0,5272                 |

|                       |        |        |                        |                        |
|-----------------------|--------|--------|------------------------|------------------------|
| <b>PP/PS/HVGO/111</b> |        |        |                        |                        |
| Model 1               | 1,846  |        | $1,27 \times 10^{-16}$ |                        |
| Model 2               | 1,1661 | 1,2318 |                        |                        |
| Model 3               | 1,1661 | 1,2318 | $1,11 \times 10^{-16}$ |                        |
| Model 4               | 1,1695 |        | 1,7501                 | $4,58 \times 10^{-16}$ |
| Model 5               | 1,0902 | 1,2318 | 1,7576                 | 0,5245                 |

Çizelge 4.8 Plastik atıkların modeller için elde edilen tepkime dereceleri (devam)

| <b>Derece</b><br><b>Model</b> | <b>m</b> | <b>n</b> | <b>p</b> | <b>r</b> |
|-------------------------------|----------|----------|----------|----------|
|-------------------------------|----------|----------|----------|----------|

|                 |        |       |                        |                        |
|-----------------|--------|-------|------------------------|------------------------|
| <b>PP/AA/11</b> |        |       |                        |                        |
| Model 1         | 1,8769 |       | $3,67 \times 10^{-17}$ |                        |
| Model 2         | 1,6667 | 1,297 |                        |                        |
| Model 3         | 1,9674 | 1,297 | $1,54 \times 10^{-16}$ |                        |
| Model 4         | 1,0902 |       | 3,3804                 | $1,30 \times 10^{-17}$ |
| Model 5         | 1,0902 | 1,297 | 3,4497                 | 0,3153                 |

|                 |        |                        |        |        |
|-----------------|--------|------------------------|--------|--------|
| <b>PP/AA/51</b> |        |                        |        |        |
| Model 1         | 1,6595 |                        | 0,0909 |        |
| Model 2         | 1,3471 | $4,31 \times 10^{-19}$ |        |        |
| Model 3         | 1,5887 | 3,1801                 | 0,85   |        |
| Model 4         | 0,7725 |                        | 4,2153 | 0,0909 |
| Model 5         | 0,5813 | 3,1801                 | 4,275  | 0,85   |

|                     |        |        |                        |                        |
|---------------------|--------|--------|------------------------|------------------------|
| <b>PP/PS/AA/111</b> |        |        |                        |                        |
| Model 1             | 2,145  |        | $1,11 \times 10^{-16}$ |                        |
| Model 2             | 1,6135 | 4,5475 |                        |                        |
| Model 3             | 2,0226 | 4,5468 | $5,44 \times 10^{-14}$ |                        |
| Model 4             | 1,1798 |        | 2,8831                 | 0,185                  |
| Model 5             | 1,1797 | 1,1797 | 2,8827                 | $6,66 \times 10^{-16}$ |

Çizelge 4.14 Plastik Atıkların ısıl bozundurulmasından elde edilen deneysel veriler ile modellerden regresyon sonucu hesaplanan değerlerin kareleri farklarının toplamı

|                       | <b>Model 1</b> | <b>Model 2</b> | <b>Model 3</b> | <b>Model 4</b> | <b>Model 5</b> |
|-----------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| <b>PP</b>             | 16,9475        | 11,4670        | 11,2797        | 13,8656        | 556,1488       |
| <b>PS</b>             | 14,3230        | 14,0016        | 13,2205        | 16,8570        | 13,7684        |
| <b>PP/PS</b>          | 28,6598        | 31,8918        | 106,9342       | 19,1016        | 1126,516       |
| <b>PP/HVGO/11</b>     | 28,6305        | 30,9342        | 27,6358        | 32,8020        | 31,3332        |
| <b>PP/HVGO/51</b>     | 2,1510         | 1,4970         | 1,4960         | 1,5600         | 0,8230         |
| <b>PP/PS/HVGO/111</b> | 34,0641        | 33,5558        | 33,5558        | 21,8934        | 47,3552        |
| <b>PP/AA/11</b>       | 7,3822         | 6,3050         | 6,2275         | 8,8444         | 5,3949         |
| <b>PP/AA/51</b>       | 69,3829        | 48,6585        | 36,0665        | 40,6329        | 40,1342        |
| <b>PP/PS/AA/111</b>   | 10,8525        | 9,8831         | 9,9099         | 10,2597        | 13,8511        |

Plastik atıkların piroliz ile ısıl bozundurulmasından elde edilen deneysel sonuçlar ile modellerden regresyon analizi metodu hesaplanan sonuçların hata kareleri farklarının toplamına bakıldığında en iyi uyumu PP/PS/AA/111 için Model 2, PP, PS, PP/HVGO/11 ve PP/AA/51 için Model 3, PP/PS, PP/PS/HVGO/111 için Model 4 ve PP/HVGO/51, PP/AA/11 için Model 5 göstermektedir. Genel olarak en iyi uyumu sağlayan Model 3 olmuştur. Bu model katı→sıvı, sıvı→gaz ve katı→gaz tepkime basamaklarına sahiptir. Tüm sonuçlar arasında en düşük hata oranı Model 5 ile PP/HVGO/51 göstermiştir. Bu model katı→sıvı, sıvı→gaz, katı→gaz tepkime basamaklarına ve sıvı→katı tersinir tepkime basamağına sahiptir.

Genel olarak en iyi uyum sağlayan Model 3 için tepkime hız sabitlerinin büyüklüğüne bakıldığında en büyük hız sabitine katı→sıvı tepkime basamağı sahiptir. Bu plastik atıkların büyük bölümünün doğrudan sıvıya dönüştüğünü göstermektedir. Model 4 için en küçük hız sabitine ise sıvı → gaz tepkime basamağı sahiptir. Tepkimelerde genel olarak sıvıdan gaz oluşumu daha yavaş gerçekleşmiştir.

En büyük hız sabitini katı→sıvı tepkime basamağı ile PS, PP/PS, PP/HVGO (1/1), PP/HVGO (5/1), PP/PS/HVGO (1/1/1), PP/AA (1/1) ve PP/PS/AA (1/1/1) plastikleri için Model 4 verirken PP ve PP/AA (5/1) için Model 5 vermektedir.

En küçük hız sabitini sıvı→gaz tepkime basamağı ile PP/PS, PP/PS/AA (1/1/1) için Model 1, PP/PS/HVGO (1/1/1) için Model 3, PP için Model 4 ve PS, PP/HVGO (1/1), PP/HVGO (5/1), PP/AA (1/1) için Model 5 vermektedir. PP/AA (5/1) için en küçük hız sabitini Model 5 ile sıvı→katı tepkime basamağı vermektedir.

Çizelge 4.15 Biyokütle atıklar için regresyon analizi ile modellerden elde edilen tepkime hız sabitleri (kütle kesri<sup>(1-n)</sup>.dk<sup>-1</sup>)

|                                      | k1                      | k2                      | k3                      | k4                      |
|--------------------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| <b>Asbos (Psilocaulon utile)</b>     |                         |                         |                         |                         |
| Model 1                              | 6,37x10 <sup>-9</sup>   | 0,1617                  |                         |                         |
| Model 2                              | 1,22x 10 <sup>-8</sup>  | 1,21 x10 <sup>-7</sup>  |                         |                         |
| Model 3                              | 6,93 x10 <sup>-10</sup> | 7,65 x10 <sup>-17</sup> | 1,21 x10 <sup>-7</sup>  |                         |
| Model 4                              | 0,0005                  | 0,1912                  | 0,0060                  |                         |
| Model 5                              | 2,36 x10 <sup>-26</sup> | 0,0203                  |                         | 0,0086                  |
| <b>Scholtzbos (Pteronia pallens)</b> |                         |                         |                         |                         |
| Model 1                              | 0,0022                  | 0,3533                  |                         |                         |
| Model 2                              | 9,78 x10 <sup>-6</sup>  | 3,42 x10 <sup>-6</sup>  |                         |                         |
| Model 3                              | 0,0718                  | 5,18 x10 <sup>-17</sup> | 3,42 x10 <sup>-6</sup>  |                         |
| Model 4                              | 0,0813                  | 0,0353                  | 4,01 x10 <sup>-20</sup> |                         |
| Model 5                              | 0,0717                  | 3,56 x10 <sup>-18</sup> | 3,42 x10 <sup>-6</sup>  | 9,58 x10 <sup>-16</sup> |
| <b>Kraalbos (Galenia africana)</b>   |                         |                         |                         |                         |
| Model 1                              | 0,0178                  | 0,8651                  |                         |                         |
| Model 2                              | 5,77 x10 <sup>-5</sup>  | 1,60 x10 <sup>-7</sup>  |                         |                         |
| Model 3                              | 0,3690                  | 6,68 x10 <sup>-24</sup> | 7,58 x10 <sup>-7</sup>  |                         |
| Model 4                              | 0,1428                  | 0,1435                  | 8,68 x10 <sup>-14</sup> |                         |
| Model 5                              | 0,3224                  | 1,05 x10 <sup>-17</sup> | 1,60 x10 <sup>-7</sup>  | 4,55 x10 <sup>-6</sup>  |

Çizelge 4.16 Biyokütle atıklar için regresyon analizi ile modellerden elde edilen tepkime hız sabitleri (kütle kesri<sup>(1-n)</sup>.dk<sup>-1</sup>) (devam)

|                             | <b>k1</b> | <b>k2</b>               | <b>k3</b>               | <b>k4</b>              |
|-----------------------------|-----------|-------------------------|-------------------------|------------------------|
| <b>Biyokütle/Bitki yağı</b> |           |                         |                         |                        |
| Model 1                     | 0,0031    | 0,0372                  |                         |                        |
| Model 2                     | 0,0003    | 0,0043                  |                         |                        |
| Model 3                     | 0,0012    | 1,30 x10 <sup>-19</sup> | 0,0043                  |                        |
| Model 4                     | 0,1169    | 0,2614                  | 5,96 x10 <sup>-20</sup> |                        |
| Model 5                     | 0,3595    | 3,71 x10 <sup>-16</sup> | 0,0043                  | 8,06 x10 <sup>-9</sup> |

**Palmiye Kabuğu**

|         |                        |                         |                        |        |
|---------|------------------------|-------------------------|------------------------|--------|
| Model 1 | 9,79 x10 <sup>-5</sup> | 1,79 x10 <sup>-35</sup> |                        |        |
| Model 2 | 0,0005                 | 5,47 x10 <sup>-5</sup>  |                        |        |
| Model 3 | 4,89 x10 <sup>-5</sup> | 4,48 x10 <sup>-20</sup> | 5,50 x10 <sup>-5</sup> |        |
| Model 4 | 0,0813                 | 0,1435                  | 1,24 x10 <sup>-7</sup> |        |
| Model 5 | 0,3577                 | 2,73 x10 <sup>-16</sup> | 5,47 x10 <sup>-5</sup> | 0,0003 |

Çizelge 4.17 Biyokütle atıkların modeller için elde edilen tepkime dereceleri

| <b>Derece</b>                        | <b>m</b> | <b>n</b> | <b>p</b>                | <b>r</b>                |
|--------------------------------------|----------|----------|-------------------------|-------------------------|
| <b>Model</b>                         |          |          |                         |                         |
| <b>Asbos (Psilocaulon Utile)</b>     |          |          |                         |                         |
| Model 1                              | 4,2785   |          | 6,04 x10 <sup>-18</sup> |                         |
| Model 2                              | 4,0417   | 3,4024   |                         |                         |
| Model 3                              | 4,6681   | 3,4024   | 0,6407                  |                         |
| Model 4                              | 1,7904   |          | 1,4125                  | 4,21 x10 <sup>-17</sup> |
| Model 5                              | 1,5859   | 1,6773   | 1,324                   | 7,09 x10 <sup>-15</sup> |
| <b>Scholtzbos (Pteronia Pallens)</b> |          |          |                         |                         |
| Model 1                              | 1,5314   |          | 3,45 x10 <sup>-16</sup> |                         |
| Model 2                              | 2,5309   | 2,8622   |                         |                         |
| Model 3                              | 0,5615   | 2,8622   | 3,82 x10 <sup>-14</sup> |                         |
| Model 4                              | 1,5312   |          | 1,35 x10 <sup>-13</sup> | 9,74 x10 <sup>-16</sup> |
| Model 5                              | 0,5618   | 2,8622   | 5,44 x10 <sup>-15</sup> | 8,88 x10 <sup>-16</sup> |

Çizelge 4.18 Biyokütle atıkların modeller için elde edilen tepkime dereceleri (devam)

| <b>Kraalbos (Galenia Africane)</b> |        |                        |                        |                        |
|------------------------------------|--------|------------------------|------------------------|------------------------|
| Model 1                            | 1,0764 |                        | $8,96 \times 10^{-16}$ |                        |
| Model 2                            | 2,2009 | 3,5086                 |                        |                        |
| Model 3                            | 0,2431 | 3,1619                 | 0,4415                 |                        |
| Model 4                            | 1,0851 |                        | 1,5935                 | $2,54 \times 10^{-16}$ |
| Model 5                            | 1,5859 | 3,5086                 | 1,324                  | 0,6154                 |
| <b>Biyokütle/Bitki yağı</b>        |        |                        |                        |                        |
| Model 1                            | 1,8944 |                        | $1,29 \times 10^{-16}$ |                        |
| Model 2                            | 2,068  | 1,536                  |                        |                        |
| Model 3                            | 2,0236 | 1,5358                 | $3,33 \times 10^{-15}$ |                        |
| Model 4                            | 1,0851 |                        | 15,935                 | $2,18 \times 10^{-18}$ |
| Model 5                            | 1,5859 | 1,536                  | 1,324                  | 0,2121                 |
| <b>Palmiye Kabuğu</b>              |        |                        |                        |                        |
| Model 1                            | 2,2445 |                        | 20,4749                |                        |
| Model 2                            | 1,7388 | 2,187                  |                        |                        |
| Model 3                            | 2,2727 | 2,1857                 | $6,66 \times 10^{-15}$ |                        |
| Model 4                            | 0,7394 |                        | 4,1984                 | $2,54 \times 10^{-16}$ |
| Model 5                            | 2,187  | $1,29 \times 10^{-24}$ | 2,2364                 | $8,88 \times 10^{-6}$  |

Çizelge 4.19 Biyokütle Atıkların ısııl bozundurulmasından elde edilen deneysel veriler ile modellerden regresyon sonucu hesaplanan değerlerin kareleri farklarının toplamı

|                                      | <b>Model 1</b> | <b>Model 2</b> | <b>Model 3</b> | <b>Model 4</b> | <b>Model 5</b> |
|--------------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| <b>Asbos (Psilocaulon utile)</b>     | 8,96           | 6,74           | 6,71           | 8,26           | 49,53          |
| <b>Scholtzbos (Pteronia Pallens)</b> | 23,84          | 13,03          | 13,17          | 1040,02        | 13,17          |
| <b>Kraalbos (Galenia africane)</b>   | 32,90          | 22,30          | 23,12          | 578,87         | 2387,65        |
| <b>Biyokütle/bitki yağı</b>          | 737,22         | 464,47         | 588,06         | 952,14         | 2524,91        |
| <b>Palmiye Kabuğu</b>                | 24,06          | 14,80          | 14,68          | 15,60          | 4610,81        |

Biyokütle atıkların piroliz ile ısı bozundurulmasından elde edilen deneysel sonuçlar ile modellerden hesaplanan sonuçların hata kareleri farklarının toplamına bakıldığında en iyi uyumu Asbos (*Psilocaulon utile*) ve Palmiye kabuğu Model 3 ile Scholtzboş (*Pteronia pallens*), Kraalboş (*Galenia africana*) ve Biyokütle/bitki yağı Model 2 ile göstermektedir. Asbos (*Psilocaulon utile*) bitkisi tüm biyokütle atıkları arasında Model 3 ile en küçük hata kareler toplamını veren bitkisel atık olmuştur.

En iyi uyum sağlayan modellerde en büyük tepkime hız sabitini Asbos (*Psilocaulon utile*), Biyokütle-bitki atığı karışımı ve Palmiye kabuğu için katı→gaz, Scholtzboş (*Pteronia pallens*) ve Kraalboş (*Galenia africana*) için katı→sıvı, tepkime basamakları vermektedir.

En iyi uyum sağlayan modellerde en küçük tepkime hız sabitine Asbos (*Psilocaulon utile*) ve Palmiye kabuğu için sıvı→gaz, Scholtzboş (*Pteronia pallens*), Kraalboş (*Galenia africana*) ve için katı→gaz, Biyokütle-bitki atığı karışımı için katı→sıvı tepkime basamakları vermektedir.

Tüm bitkisel atıklar için en büyük tepkime hız sabitini sıvı→gaz tepkime basamağı ile Kraalboş (*Galenia africana*) için Model 1, Asbos (*Psilocaulon utile*) için Model 4, katı→sıvı tepkime basamağı ile Scholtzboş (*Pteronia pallens*) için Model 4, Biyokütle-bitki atığı karışımı ve Palmiye kabuğu için Model 5 vermektedir.

En küçük tepkime hız sabitini sıvı→gaz tepkime basamağı ile Kraalboş (*Galenia africana*) ve Palmiye kabuğu için Model 3, katı→sıvı tepkime basamağı ile Asbos (*Psilocaulon utile*) için Model 5; gaz→sıvı tersinir tepkime basamağı ile Scholtzboş (*Pteronia pallens*) ve Biyokütle-bitki atığı karışımı için Model 4 vermektedir.

## 5. SONUÇ

- 1) Kalman filtresi yöntemi ile yapılan çalışmalar sonuçlarına göre;
  - a) Plastik atıkların piroliz ile ısıl bozundurulmasından elde edilen deneysel sonuçlar ile modellerden hesaplanan sonuçların hata kareleri farklarının toplamına bakıldığında genel olarak en iyi uyumu Model 5 göstermektedir.
  - b) Model 5 ile en iyi uyumu gösteren plastik atık ise PP/PS/AA(1/1/1) olmuştur.
  - c) En iyi uyum sağlayan Model 5 için tepkime hız sabitlerinin büyüklüğüne bakıldığında en büyük hız sabitine katı→sıvı tepkime basamağı sahiptir.
  - d) Model 5 için en küçük hız sabitine ise sıvı → gaz tepkime basamağı sahiptir.
  - e) En büyük hız sabitini katı→sıvı tepkime basamağı ile PS, PP, PP/PS, PP/HVGO (1/1), PP/HVGO (5/1), PP/PS/HVGO (1/1/1), PP/AA (5/1) plastikleri için Model 1 verirken, PP/AA (1/1) ve PP/PS/AA (1/1/1) için Model 4 vermektedir.
  - f) En küçük hız sabitini sıvı→gaz tepkime basamağı ile PS, PP, PP/PS, PP/PS/HVGO (1/1/1), PP/AA (1/1), plastikleri için Model 5 verirken PP/HVGO (1/1), PP/HVGO (5/1) ve PP/AA (5/1) için Model 4 vermektedir. PP/PS/AA (1/1/1) için en küçük hız sabitini Model 2 ile katı→gaz tepkime basamağı vermektedir.
  - g) Biyokütle atıkların piroliz ile ısıl bozundurulmasından elde edilen deneysel sonuçlar ile modellerden hesaplanan sonuçların hata kareleri farklarının toplamına bakıldığında genel olarak en iyi uyumu Model 5 göstermektedir.
  - h) Model 5 ile en iyi uyumu gösteren biyokütle atık ise tüm biyokütle atıkları arasında en küçük hata kareler toplamını veren Asbos (Psilocaulon utile) bitkisi olmuştur.
  - i) En iyi uyum sağlayan Model 5 için tepkime hız sabitlerinin büyüklüğüne bakıldığında en büyük hız sabitine katı→sıvı tepkime basamağı ile biyokütle-yağ

karışımı ve palmiye kabuğu, sıvı→katı tepkime basamağı ile Asbos (*Psilocaulon utile*), Scholtzbos (*Pteronia pallens*) ve Kraalbos (*Galenia africana*) bitkileri sahiptir.

j) Model 5 için en küçük hız sabitine ise katı → gaz tepkime basamağı ile Asbos (*Psilocaulon utile*), Scholtzbos (*Pteronia pallens*) ve Kraalbos (*Galenia africana*), sıvı→gaz tepkime basamağı ile biyokütle-yağ karışımı ve palmiye kabuğu sahiptir.

k) En büyük hız sabitini Model 4 ile Kraalbos (*Galenia africana*), biyokütle-yağ karışımı ve palmiye kabuğu için katı→sıvı tepkime basamağı verirken, Asbos (*Psilocaulon utile*) ve Scholtzbos (*Pteronia pallens*) bitkileri için sıvı→gaz tersinir tepkime basamağı vermektedir.

l) En küçük hız sabitini katı→sıvı tepkime basamağı ile Asbos (*Psilocaulon utile*) ve Kraalbos (*Galenia africana*) bitkileri için Model 2, sıvı→gaz tepkime basamağı ile biyokütle-yağ karışımı için Model 5 ve palmiye kabuğu için Model 3, katı→gaz tepkime basamağı ile Scholtzbos bitkisi için Model 3 vermektedir.

m) Model 5 katı, sıvı ve gaz oluşumları için teorik gidişatı sağlamaktadır.

2) Regresyon analizi sonucu yapılan çalışmalar sonuçlarına göre;

a) Plastik atıkların piroliz ile ısı bozundurulmasından elde edilen deneysel sonuçlar ile modellerden regresyon analizi metodu hesaplanan sonuçların hata kareleri farklarının toplamına bakıldığında en iyi uyumu PP/PS/AA/111 için Model 2, PP, PS, PP/HVGO/11 ve PP/AA/51 için Model 3, PP/PS, PP/PS/HVGO/111 için Model 4 ve PP/HVGO/51, PP/AA/11 için Model 5 göstermektedir.

b) Genel olarak en iyi uyumu sağlayan Model 3 olmuştur. Bu model katı→sıvı, sıvı→gaz ve katı→gaz tepkime basamaklarına sahiptir.

c) Tüm sonuçlar arasında en düşük hata oranı Model 5 ile PP/HVGO/51 göstermiştir.

d) Model 3 için tepkime hız sabitlerinin büyüklüğüne bakıldığında en büyük hız sabitine katı→sıvı tepkime basamağı sahiptir. Bu plastik atıkların büyük bölümünün doğrudan sıvıya dönüştüğünü göstermektedir.

e) Model 3 için en küçük hız sabitine sıvı → gaz tepkime basamağı sahiptir. Tepkimelerde genel olarak sıvıdan gaz oluşumu daha yavaş gerçekleşmiştir.

f) En büyük hız sabitini katı→sıvı tepkime basamağı ile PS, PP/PS, PP/HVGO (1/1), PP/HVGO (5/1), PP/PS/HVGO (1/1/1), PP/AA (1/1) ve PP/PS/AA (1/1/1) plastikleri için Model 4 verirken PP ve PP/AA (5/1) için Model 5 vermektedir.

g) En küçük hız sabitini sıvı→gaz tepkime basamağı ile PP/PS, PP/PS/AA (1/1/1) için Model 1, PP/PS/HVGO (1/1/1) için Model 3, PP için Model 4 ve PS, PP/HVGO (1/1), PP/HVGO (5/1), PP/AA (1/1) için Model 5 vermektedir. PP/AA (5/1) için en küçük hız sabitini Model 5 ile sıvı→katı tepkime basamağı vermektedir.

h) Biyokütle atıkların piroliz ile ısıl bozundurulmasından elde edilen deneysel sonuçlar ile modellerden hesaplanan sonuçların hata kareleri farklarının toplamına bakıldığında en iyi uyumu Asbos (Psilocaulon utile) ve Palmiye kabuğu Model 3 ile Scholtzbos (Pteronia pallens), Kraalbos (Galenia africana) ve Biyokütle/bitki yağı Model 2 ile göstermektedir.

i) Asbos (Psilocaulon utile) bitkisi tüm biyokütle atıkları arasında Model 3 ile en küçük hata kareler toplamını veren bitkisel atık olmuştur.

j) En iyi uyum sağlayan modellerde en büyük tepkime hız sabitini Asbos (Psilocaulon utile), Biyokütle-bitki atığı karışımı ve Palmiye kabuğu için katı→gaz, Scholtzbos (Pteronia pallens) ve Kraalbos (Galenia africana) için katı→sıvı, tepkime basamakları vermektedir.

k) En iyi uyum sağlayan modellerde en küçük tepkime hız sabitine Asbos (Psilocaulon utile) ve Palmiye kabuğu için sıvı→gaz, Scholtzbos (Pteronia pallens), Kraalbos (Galenia africana) ve için katı→gaz, Biyokütle-bitki atığı karışımı için katı→sıvı tepkime basamakları vermektedir.

l) Tüm bitkisel atıklar için en büyük tepkime hız sabitini sıvı→gaz tepkime basamağı ile Kraalbos (*Galenia africana*) için Model 1, Asbos (*Psilocaulon utile*) için Model 4, katı→sıvı tepkime basamağı ile Scholtzbos (*Pteronia pallens*) için Model 4, Biyokütle-bitki atığı karışımı ve Palmiye kabuğu için Model 5 vermektedir.

m) En küçük tepkime hız sabitini sıvı→gaz tepkime basamağı ile Kraalbos (*Galenia africana*) ve Palmiye kabuğu için Model 3, katı→sıvı tepkime basamağı ile Asbos (*Psilocaulon utile*) için Model 5; gaz→sıvı tersinir tepkime basamağı ile Scholtzbos (*Pteronia pallens*) ve Biyokütle-bitki atığı karışımı için Model 4 vermektedir.

3) Kalman Filtresi ve Regresyon Yöntemi sonuçları karşılaştırıldığında;

a) En kararlı sonuçlar Kalman Filtreleme Metodu ile elde edilmiştir.

b) Plastik atıklar için en küçük hata oranını PP/HVGO (5/1) Regresyon Yöntemi sonucu Model 4 vermektedir.

c) Biyokütle atıklar için en küçük hata oranını Asbos (*Psilocaulon utile*) bitkisi Kalman Filtreleme Yöntemi sonucu Model 5 vermektedir.

## KAYNAKLAR

- Anonim. 2012. <https://ekogiller.wordpress.com/>, Erişim Tarihi: 01/05/2016
- Anonim. 2015. <http://www.alternatifpower.com.tr/tr/gazlar/syngas-17/>, Erişim Tarihi: 01/05/2016
- Anonim. 2016. <https://www2.deloitte.com/tr/tr/pages/energy-and-resources/articles/golden-age-of-biomass-article.html>, Erişim Tarihi: 01/03/2016
- Anonim. 2017. <http://www.sinanilyas.com/makale/45/hangi-plastik-turleri-sagliga-zararli.php>, Erişim Tarihi: 01/03/2016
- Anonim.2017.<http://hbogm.meb.gov.tr/modulerprogramlar/kursprogramlari/kimya/moduller/ReaktorKullanma.pdf>, Erişim Tarihi: 13/07/2017
- Abnisa, F., Daud, W., Husin, W. and Sahu, J. 2011. Utilization possibilities of palm shell as a source of biomass energy in Malaysia by producing bio-oil in pyrolysis process. *Biomass and Bioenergy*, 35, 1863-1872.
- Agrawal, S. 1990. Waste Management: A Systems Perspective. *Industrial Management & Data Systems*, 90(5).
- Akınç, O. 2015. Atık Yönetimi Yönetmeliği ve Atık Sınıflandırma. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı Sunumu. 35s.
- Al-Hurmizy, M. 2012. Aype Atıklarının Rafineri Artıkları İle Isıl Ve Katalitik Bozundurulması, Yüksek Lisans Tezi, 93s, Ankara.
- Chen, Y., Yang, F., Wua, L., Wang, C. and Yang, Z. 2011. Co-deoxy-liquefaction of biomass and vegetable oil to hydrocarbon oil: Influence of temperature, residence time, and catalyst. *Bioresource Technology*, 102, 1933-1941.
- Çağlar, A. 2004. Çay Atığının Katalitik Pirolizi: Sıvı Ürün Verimi Üzerine Katalizörlerin Etkisi. *Kastamonu Eğitim Dergisi*, 12(2). 385-392.
- Dominguez, A., Fernandez, Y., Fidalgo, B., Pis J. and Menendez, J. 2007. Biogas to Syngas by Microwave-Assisted Dry Reforming in the Presence of Char. *Energy & Fuels*, 21. 2066-2071.
- Dominguez, A., Menendez, J., Fernandez, Y., Pisa J., Nabais, J., Carrott, P. and Carrott, M. 2007. Conventional and microwave induced pyrolysis of coffee hulls for the production of a hydrogen rich fuel gas. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 79. 128-135.
- Ertaş M., Alma, M. ve Fidan, M. Defne. 2008. Artıklarından Piroliz Metodu ile Sentetik Sıvı Yakıt Üretimi. VII. Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu, UTES'2008. İstanbul
- Gökkaya, M. 2012. Plastik Atıkların Petrokimyasal Atıklarla Katalitik Eş-Pirolizi. Yüksek Lisans Tezi. Ankara üniversitesi. 110s. Ankara

- Güler, Ç. ve Çobanoğlu, Z. 1996, Sağlık Açısından Çöp, Tıbbi Dökümantasyon Merkezi Toplum Sağlığı Dizisi No: 14, Ankara.
- Grewal, M. and Andrews, A. 2001. Kalman Filtering: Theory and Practice Using Matlab, John Wiley & Sons Inc., 401p.
- Jongh, W., Carrier, M. and Knoetze, J. 2011. Vacuum pyrolysis of intruder plant biomasses. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 92, 184–193.
- Kavuştu, H. 2012. Kömürlerin Tetralinde Mikrodalga Enerji İle Sıvılaşma Mekanizmalarının Kesikli Zaman Modelleriyle Belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi. Ankara Üniversitesi. Ankara
- Olgun, A. 2005. Bazı Biyokütlelerin Pirolizi ve Piroliz Ürünlerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi. Ankara Üniversitesi. 129s. Ankara
- Önal, E. 2009. Tütün Tarla Atıklarının Hızlı Pirolizi. Anadolu Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi. 10(2). 557-564.
- Palabıyık, H. (2001). Belediyelerde Kentsel Katı Atık Yönetimi: İzmir Büyükşehir Belediyesi Örneği. Doktora Tezi. Dokuz Eylül Üniversitesi. İzmir.
- Palabıyık, H. ve Altunbaş, D. (2004). "Kentsel Katı Atıklar ve Yönetimi", Çevre Sorunlarına Çağdaş Yaklaşımlar: Ekolojik, Ekonomik, Politik ve Yönetimsel Perspektifler, 103-124. Beta, İstanbul.
- Paradela, F., Pinto, F., Gulyurtlu, I., Cabrita, I., Lapa, N. and Oliveira J. 2009. Effect Of Experimental Conditions On Pyrolysis Of Plastics Mixed With Forestry Biomass. 7(1). 12-20.
- Rangarajan, B. 2014. Modeling of Waste To Energy Processes In an Engineering Environment. Master of Thesis. Delf University of Technology. 51p. Holand
- Taşar, Ş., Erşen, T., Duranay, N. Ve Yılgin M. 2011. Farklı Odun Türlerinin İzotermal Olmayan Şartlarda Piroliz Kinetiğinin İncelenmesi. 6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11). Elazığ
- Tokgöz, M. ve Sarmaşık, N., 1982, "Çöp Sorunu ve Sağlık", Çevre '82 Sempozyumu, İzmir.
- Üçgül, İ. ve Akgül, D. 2010. Biyokütle Teknolojisi. Yekarum Dergi, 1(1), 3-11.
- Varol E. ve Mutlu Ü. 2012. Biyokütle Piroliz Sıvı Ürününün Karakterizasyonu. Onuncu Ulusal Kimya Mühendisliği Kongresi. İstanbul
- Weerdhof, M. 2015. Modeling the pyrolysis process of biomass particles. Master of Thesis. Eindhoven University of Technology. 65p. Holand
- Welch, G. and Bishop G. 2006. An Introduction to the Kalman Filter, University of North Carolina, 16p, Chapel Hill.

Wikipedia. 2016. [www.wikipedia.com](http://www.wikipedia.com), Erişim Tarihi: 01/03/2016

Yılğın, M., Duranay, N.D. and Pehlivan, P. 2005. Odunun Flash Pirolizi. III. Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu ve Sergisi, 19-21 Ekim 2005, Mersin.



## **EKLER**

**EK 1** Kalman Filtresinin MATLAB İle Uygulaması için kullanılan ana kod

**EK 2** Ana kod içerisinde çağırılan “modeller” fonksiyonu

**EK 3** Ana kod içerisinde çağırılan “plotter” fonksiyonu

**EK 4** Ana kod içerisinde çağırılan “data\_plastik” fonksiyonu

**EK 5** Ana kod içerisinde çağırılan “data\_biyokutle” fonksiyonu

**EK 6** Kalman Filtresi Algoritması

## EK 1 Kalman Filtresinin MATLAB İle Uygulaması için kullanılan ana kod

```
clc;clear all;close all;
format compact;
format short g;

% data_plastik;
data_biyokutle;

fields = fieldnames(mydata);

karsilastirma=[];

for i=1:numel(fields)
disp(fields{i});

z=mydata.(fields{i});
Gm=z(:,1:5);
G=Gm;

x_axis=G(:,1)';
z=G(:,2:5)';
N=size(z,2);

dlt=x_axis(2)-x_axis(1);

save durum.mat;
dummy=[];
klar=[];

model_name = 'Model 1';
disp(model_name);
modeller;
plotter;
dummy=[dummy;C];
klar=[klar;xhat(5:7,N)' 0];
save('durum.mat','dummy','-append')
save('durum.mat','klar','-append')
clear all;
load durum.mat;

model_name = 'Model 2';
disp(model_name);
modeller;
plotter;
dummy=[dummy;C];
klar=[klar;xhat(5:7,N)' 0];
save('durum.mat','dummy','-append')
```

```

save('durum.mat','klar','-append')
clear all;
load durum.mat;

model_name = 'Model 3';
disp(model_name);
modeller;
plotter;
dummy=[dummy;C];
klar=[klar;xhat(5:7,N)' 0];
save('durum.mat','dummy','-append')
save('durum.mat','klar','-append')
clear all;
load durum.mat;

model_name = 'Model 4';
disp(model_name);
modeller;
plotter;
dummy=[dummy;C];
klar=[klar;xhat(5:7,N)' 0];
save('durum.mat','dummy','-append')
save('durum.mat','klar','-append')
clear all;
load durum.mat;

model_name = 'Model 5';
disp(model_name);
model5;
plotter;
dummy=[dummy;C];
klar=[klar;xhat(5:8,N)'];
save('durum.mat','dummy','-append')
save('durum.mat','klar','-append')
clear all;
load durum.mat;

karsilastirma=[karsilastirma dummy];
% xlswrite([data_name, '_', fields{i}, '.xls'],G)
xlswrite([fields{i}, '.xls'],klar)

end
% xlswrite('karsilastirma_time.xls',karsilastirma)
% karsilastirma

delete durum.mat

```

## EK 2 Ana kod içerisinde çağırılan “modeller” fonksiyonu

```
xhat=zeros (7, N);
xhat(:,1)=[100 0 0 0 .01 .01 .01]';
```

```
H= [1 0 0 0 0 0 0
     0 1 0 0 0 0 0
     0 0 1 0 0 0 0
     0 0 0 1 0 0 0];
```

```
P= [1 0 0 0 0 0 0
     0 1 0 0 0 0 0
     0 0 1 0 0 0 0
     0 0 0 1 0 0 0
     0 0 0 0 1e-6 0 0
     0 0 0 0 0 1e-6 0
     0 0 0 0 0 0 1e-6]*4;
```

```
Q= [1 0 0 0 0 0 0
     0 1 0 0 0 0 0
     0 0 1 0 0 0 0
     0 0 0 1 0 0 0
     0 0 0 0 1e-6 0 0
     0 0 0 0 0 1e-6 0
     0 0 0 0 0 0 1e-6]*.1;
```

```
% P=eye(7)*4;
%
% Q=eye(7)*.1;
R=eye(4);
```

```
for k=2:N
    x1=xhat(1, k-1);
    x2=xhat(2, k-1);
    x3=xhat(3, k-1);
    k1=xhat(5,k-1);
    k2=xhat(6,k-1);
    k3=xhat(7,k-1);
```

```
if strcmp(model_name,'Model 1')
```

```
Ahat = [1-k1*dlt 0 0 0 0 0 0
         k1*dlt 1-k2*dlt 0 0 0 0 0
         0 k2*dlt 1 0 0 0 0
         0 0 0 0 1 0 0
         0 0 0 0 0 1 0
         0 0 0 0 0 0 1];
```



```

Ahat = [1-k1*dlt    k3*dlt    0 0 0 0 0
        k1*dlt    1-(k2+k3)*dlt    0 0 0 0 0
        0        k2*dlt    1 0 0 0 0
        0        0    0 1 0 0 0
        0        0    0 0 1 0 0
        0        0    0 0 0 1 0
        0        0    0 0 0 0 1];

```

```

A= [ 1    0    0    0    -x1*dlt    0    x2*dlt
    0    1    0    0    x1*dlt    -x2*dlt    -x2*dlt
    0    0    1    0    0    x2*dlt    0
    0    0    0    1    0    0    0
    0    0    0    0    1    0    0
    0    0    0    0    0    1    0
    0    0    0    0    0    0    1];

```

end

```

xhat(:,k) = Ahat * xhat(:,k-1);
P=A* P * A' + Q;

```

```

K = P * H' / (H * P * H' + R);
P = (eye(7) - K * H) * P;
P = (eye(7) - K * H) * P;
xhat(:,k) = abs(xhat(:,k) + K * (z(:,k) - H * xhat(:,k)));
%xhat(:,k) = xhat(:,k -1) + K * (z(:,k) - H * xhat(:,k -1));

```

end

```

CA=sum((z(1,:)-xhat(1,:)).^2);
CB=sum((z(2,:)-xhat(2,:)).^2);
CC=sum((z(3,:)-xhat(3,:)).^2);
%CD=sum((z(4,:)-xhat(4,:)).^2);
C= (CA+CB+CC);

```

```

% disp('    --k"lar--');
% disp(xhat(5:7,:));

```

### EK 3 Ana kod içerisinde çağırılan “plotter” fonksiyonu

```
figure('Position', [60, 60, 1000, 500]);
hold on

plot(Gm(:,1),Gm(:,2),'r+', 'LineWidth',2)
plot(x_axis,xhat(1,:), 'r-', 'LineWidth',2)
plot(Gm(:,1),Gm(:,3),'g*', 'LineWidth',2)
plot(x_axis,xhat(2,:), 'g--', 'LineWidth',2)
plot(Gm(:,1),Gm(:,4),'bo', 'LineWidth',2)
plot(x_axis,xhat(3,:), 'b:', 'LineWidth',2)
% plot(x_axis,z(4,:), 'cx')
% plot(x_axis,xhat(4,:), 'c-')

title([data_name, ' - ', strrep(fields{i}, '_', '\_'), ' - ', model_name]);

%
legend('kati(deney)', 'kati(kalman)', 'sivi(deney)', 'sivi(kalman)', 'gaz(deney)', 'gaz(kalman)',
'toplam donusum(deney)', 'toplam donusum(kalman)', 'location', 'northeastoutside')
legend('kati(deney)', 'kati(kalman)', 'sivi(deney)', 'sivi(kalman)', 'gaz(deney)', 'gaz(kalman)',
'location', 'northeastoutside')

set(gca, 'XTick', Gm(:,1))
xlabel(myxlabel)
ylabel('% Dönüşüm')

cd('D:\Dropbox\tez\yeni_kodlar\png');

savefig([data_name, ' - ', fields{i}, ' - ', model_name], 'png');

cd('D:\Dropbox\tez\yeni_kodlar');
```

#### EK 4 Ana kod içerisinde çağırılan “data\_plastik” fonksiyonu

```
data_name = 'Plastik Zaman Datası';  
myxlabel='Zaman (dk)';
```

```
% Herbiri 4x6
```

```
% sütunlar -> | Zaman | katı | sıvı | gaz | toplam dönüşüm | toplam |
```

```
mydata = struct;
```

```
mydata.ps=      [0      100      0      0      0      100  
                 30      9.3      80.5      10.2      90.7      100  
                 60      10.2      79.4      10.4      89.8      100  
                 90      10.2      77.9      11.9      89.8      100];
```

```
mydata.pp =      [0      100      0      0      0      100  
                 30.0      8.1      76.8      15.1      91.8      100  
                 60.0      7.6      82.9      9.5      92.4      100  
                 90.0      7.8      78.2      14.0      92.2      100];
```

```
mydata.pp_hvgo_11= [0      100      0      0      0      100  
                   30.0      9.2      83.5      7.3      90.8      100.0  
                   60.0      13.2      73.7      13.2      86.9      100.0  
                   90.0      10.1      77.6      12.3      89.9      100.0];
```

```
mydata.pp_hvgo_51 =      [0      100      0      0      0      100  
                         30.0      23.4      68.6      8.0      76.6      100.0  
                         60.0      6.7      81.6      11.7      93.3      100.0  
                         90.0      9.4      81.3      9.4      90.6      100.0];
```

```
mydata.pp_ps=      [0      100      0      0      0      100  
                   30.0      14.7      77.9      7.5      85.4      100.0  
                   60.0      11.5      74.7      13.8      88.5      100.0  
                   90.0      15.2      68.7      16.1      84.8      100.0];
```

```
mydata.pp_ps_aa_111=      [0      100      0      0      0      100  
                          30.0      34.4      56.7      8.9      65.6      100.0  
                          60.0      34.9      54.7      10.4      65.1      100.0  
                          90.0      33.9      54.2      11.9      66.1      100.0];
```

```
mydata.pp_ps_hvgo_111= [0      100    0      0      0      100
30.0   10.2   79.7   10.2   89.9   100.0
60.0   16.9   74.9    8.1   83.0   100.0
90.0   19.7   69.2   11.2   80.4   100.0];
```

```
mydata.pp_pa_11= [0      100    0      0      0      100
30.0   30.7   59.6    9.7   69.3   100.0
60.0   29.3   57.8   12.9   70.7   100.0
90.0   27.1   59.0   13.9   72.9   100.0];
```

```
mydata.pp_aa_51= [0      100    0      0      0      100
30.0   14.8   69.1   16.1   85.2   100.0
60.0   12.8   68.5   18.8   87.3   100.0
90.0   15.1   67.8   17.1
```

## EK 5 Ana kod içerisinde çağırılan “data\_biyokutle” fonksiyonu

```
data_name = 'Biyokutle Zaman Datasi';  
myxlabel='Zaman (dk)';
```

```
% Herbiri 4x6
```

```
% sütunlar -> | Zaman | katı | sıvı | gaz | su | toplam |
```

```
mydata = struct;
```

```
mydata.Asbos (Psilocaulon utile) = [0 100 0 0 0 100  
30 59 25 16 39.5 100  
60 56 35 9 53.25 100  
120 60 21 19 42.25 100];
```

```
mydata.Kraalbos (Galenia africana) = [0 100 0 0 0 100  
30 43 26 31 32.5 100  
60 41 22 30.25 100  
120 37 28 35 43 100];
```

```
mydata.Scholtzbo (Pteronia pallens) = [0 100 0 0 0  
100  
30 45 22 33 28.75 100  
60 47 20 33 29 100  
120 46 25 29 32.25 100];
```

```
mydata.biomass_veg_oil = [0 100 0 0 0 100  
5 37 17 16 30 100  
10 31 17.5 24.5 27 100  
15 29 18 25 28 100  
20 29 16 26 29 100];
```

```
% Herbiri 4x6
```

```
% sütunlar -> | Zaman | katı | sıvı | gaz | toplam dönüşüm | toplam |
```

```
%mydata.palm_shell= [0 100 0 0 0 100  
% 30 32.5 29 38.5 67.5 100  
% 60 32 46 22 68 100  
% 90 31 45.4 23.6 69 100  
% 120 30.5 45.5 24 69.5 100  
% 150 29 45.5 25.5 71 100];
```

## EK 6 Kalman Filtresi Algoritması

Kalman Filtresinin uygulanması aşamasında deneylerden alınan değerler aşağıdaki şekilde matrisler halinde düzenlenir.

$$\hat{x}_1 = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ k_1 \\ k_2 \\ k_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 100 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0.01 \\ 0.01 \\ 0.01 \end{bmatrix}$$

Burada;

$x_1, x_2$  ve  $x_3$ : Durumlar, yani ölçülebilir değerler.

$x_1 = 100, x_2 = 0, x_3 = 0$

$k_1, k_2, k_3$ : Ölçülemeyen değerler.

$k_1 = 0.01, k_2 = 0.01, k_3 = 0.01$  (ölçülemeyen değerler için verilen başlangıç değerleri)

H matrisi ile ölçülebilen durumlar seçilir.  $H=1$  olarak alınır.

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

P = başlangıç hata kovaryansı  $P_0 \neq 0$

$$P = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.000001 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.000001 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.000001 \end{bmatrix}$$

Q = kovaryans matrisi

$$Q = \begin{bmatrix} 0.1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.0000001 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.0000001 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.0000001 \end{bmatrix}$$

R = birim matris

$$R = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Modellerden elde edilen kesikli zaman denklemleri matrisler halinde düzenlenir.  
(Aşağıda verilen matrisler Model 1'e göre düzenlenmiştir.)

$$\hat{A} = \begin{bmatrix} 1 - k_1 \Delta t & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ k_1 \Delta t & 1 - k_2 \Delta t & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_2 \Delta t & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\hat{A} = \begin{bmatrix} 0.96667 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.033333 & 0.96667 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.033333 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & -x_1 \Delta t & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & x_1 \Delta t & -x_2 \Delta t & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & x_2 \Delta t & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & -333.33 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 333.33 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Kesikli zaman denklemlerinden elde edilen veriler ile hata kovaryansı aşağıda verilen formüle göre hesaplanır.

$$P = A * P * A' + Q$$

$$P = \begin{bmatrix} 4.5444 & -0.44444 & 0 & 0 & -0.0013333 & 0 & 0 \\ -0.44444 & 4.5444 & 0 & 0 & 0.0013333 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 4.1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 4.1 & 0 & 0 & 0 \\ -0.0013333 & 0.0013333 & 0 & 0 & 4.1e-006 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 4.1e-006 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 4.1e-006 \end{bmatrix}$$

Hesaplanan hata kovaryansı ile aşağıda verilen denklem kullanılarak Kalman Kazancı hesaplanır.

$$K = \frac{P * H'}{(H * P * H' + R)}$$

$$K = \begin{bmatrix} 0.81847 & -0.014551 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -0.014551 & 0.81847 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.80392 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.80392 & 0 & 0 & 0 \\ -0.00022263 & 0.00022263 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Hesaplanan Kalman Kazancı ile hata kovaryansı güncellenir.

$$P = (I - K * H) * P$$

$$P = \begin{bmatrix} 0.81847 & -0.014551 & 0 & 0 & -0.00022263 & 0 & 0 \\ -0.014551 & 0.81847 & 0 & 0 & 0.00022263 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.80392 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.80392 & 0 & 0 & 0 \\ -0.00022263 & 0.00022263 & 0 & 0 & 3.5063e-006 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 4.1e-006 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 4.1e-006 \end{bmatrix}$$

Güncellenen hata kovaryansı ile kalman kazancı güncellenir.

Güncellenen kalman kazancı yardımıyla sonraki durum değerleri aşağıdaki formül ile hesaplanır.

$$\hat{x}_2 = |\hat{A} * \hat{x}_1 + K * (z_k - H * \hat{x}_2)|$$

$$\hat{x}_2 = \begin{bmatrix} 93.258 \\ 3.303 \\ 3.439 \\ 6.0294 \\ 0.010903 \\ 0.01 \\ 0.01 \end{bmatrix}$$

Bu işlem basamakları hata kovaryansı minumum seviyeye ulaşıncaya kadar tekrar eder.

## ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Hilal TANIKER SARI  
Doğum Yeri : Ordu  
Doğum Tarihi : 27.02.1984  
Medeni Hali : Evli  
Yabancı Dili : İngilizce

### Eğitim Durumu

Lise : Orhangazi Anadolu Lisesi, 1995-2002.  
Lisans : Hacettepe Üniversitesi Mühendislik Fakültesi  
Kimya Mühendisliği Bölümü, 2002-2007.  
Yüksek Lisans : Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü  
Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı,

### Çalıştığı Kurum ve Yıl:

Makine ve Kimya Endüstrisi Kurumu: Ocak 2012-Halen