

**T.C.**  
**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**BİYOKİMYASAL METAN POTANSİYELİ ESASLI MODELLEME VE**  
**İSTATİSTİKSEL ANALİZ ÇALIŞMALARI**

**Serra ÖZMAN**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Çevre Mühendisliği Programı**

**Danışman**

**Prof. Dr. Kaan YETİLMEZSOY**

**Haziran, 2020**

**T.C.**  
**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**BİYOKİMYASAL METAN POTANSİYELİ ESASLI MODELLEME VE  
İSTATİSTİKSEL ANALİZ ÇALIŞMALARI**

Serra ÖZMAN tarafından hazırlanan tez çalışması 23.06.2020 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, Çevre Mühendisliği Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Kaan YETİLMEZSOY  
Yıldız Teknik Üniversitesi  
Danışman

**Jüri Üyeleri**

Prof. Dr. Kaan YETİLMEZSOY, Danışman  
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Fatma İlter TÜRKDOĞAN, Üye  
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Çiğdem YANGIN-GÖMEÇ, Üye  
İstanbul Teknik Üniversitesi

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Danışmanım Prof. Dr. Kaan YETİLMEZSOY sorumluluğunda tarafımca hazırlanan “Biyokimyasal Metan Potansiyeli Esaslı Modelleme ve İstatistiksel Analiz Çalışmaları” başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Serra ÖZMAN

İmza



Bu alışma, Prof Dr. Kaan YETİLMEZSOY'un 2018 yılı TÜBA-GEBİP Ödülü kapsamındaki projesini destekleyen Türkiye Bilimler Akademisi (TÜBA) tarafından finanse edilmiştir.



*Aileme,*

## TEŞEKKÜR

---

Lisans eğitimden itibaren bana emeği geçen ve bu tez çalışmasının yürütülmesinde konu seçiminden itibaren bana her konuda yol gösteren, değerli bilgilerini ve tecrübelerini benimle paylaşan, bana farklı bakış açıları sunan ve her zaman beni sabırla dinleme zahmetini gösteren tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Kaan YETİLMEZSOY'a sonsuz şükranlarımı arz ederim.

Tez danışmanım Prof. Dr. Kaan YETİLMEZSOY'un 2018 yılı TÜBA-GEBİP Ödülü kapsamındaki projesini destekleyen ve bu çalışmada kullanılan ekipmanları finanse eden Türkiye Bilimler Akademisi (TÜBA)'ne teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmam süresince faydalı katkılarından dolayı Yıldız Teknik Üniversitesi Çevre Mühendisliği Bölümü lisans öğrencisi Türker YALÇINYUVA'ya teşekkür ederim.

Bana her zaman sabır gösteren, maddi ve manevi desteklerini benden hiç eksik etmeyen ve bugünlere gelmemi sağlayan Sevgili Aileme sonsuz şükranlarımı arz ederim.

Serra ÖZMAN

# İÇİNDEKİLER

---

|                                          |                |
|------------------------------------------|----------------|
| <b>SİMGE LİSTESİ</b>                     | <b>x</b>       |
| <b>KISALTMA LİSTESİ</b>                  | <b>xii</b>     |
| <b>ŞEKİL LİSTESİ</b>                     | <b>xiv</b>     |
| <b>TABLO LİSTESİ</b>                     | <b>xxxiii</b>  |
| <b>ÖZET</b>                              | <b>xxxvi</b>   |
| <b>ABSTRACT</b>                          | <b>xxxviii</b> |
| <b>1 GİRİŞ</b>                           | <b>1</b>       |
| 1.1 Literatür Özeti .....                | 1              |
| 1.2 Tezin Amacı .....                    | 5              |
| 1.3 Hipotez .....                        | 6              |
| <b>2 ENDÜSTRİYEL ATIKSU KAYNAKLARI</b>   | <b>7</b>       |
| 2.1 Mezbaha Endüstrisi.....              | 7              |
| 2.2 Peynir Endüstrisi.....               | 9              |
| 2.3 Hayvansal Gıda Endüstrisi.....       | 10             |
| 2.4 Balık Endüstrisi.....                | 11             |
| 2.5 Gübre Endüstrisi.....                | 13             |
| 2.6 Şekerleme-Bisküvi Endüstrisi .....   | 14             |
| 2.7 Meyve ve Sebze Endüstrisi .....      | 16             |
| <b>3 ANAEROBİK ARITMANIN ÖZELLİKLERİ</b> | <b>18</b>      |
| 3.1 Anaerobik Arıtmanın Temelleri .....  | 18             |
| 3.2 Biyogaz .....                        | 18             |
| 3.2.1 Biyogazın Özellikleri .....        | 19             |
| 3.2.2 Biyogazın Kullanım Alanları .....  | 22             |
| 3.2.3 Biyogaz Üretim Sistemleri .....    | 23             |

|        |                                                    |    |
|--------|----------------------------------------------------|----|
| 3.2.4  | Biyogaz Üretiminin Faydaları.....                  | 23 |
| 3.3    | Mikrobiyoloji.....                                 | 24 |
| 3.3.1  | Hidroliz .....                                     | 25 |
| 3.3.2  | Asit Üretimi .....                                 | 25 |
| 3.3.3  | Metan Üretimi.....                                 | 26 |
| 3.4    | Çevre Koşullarının Oksijensiz Arıtmaya Etkisi..... | 29 |
| 3.4.1  | pH ve Alkalinite.....                              | 29 |
| 3.4.2  | Besin İhtiyacı .....                               | 30 |
| 3.4.3  | Sıcaklık .....                                     | 31 |
| 3.4.4  | Bazı Maddelerin Toksisite Etkisi.....              | 32 |
| 3.4.5  | Kükürt.....                                        | 34 |
| 3.4.6  | Oksijen.....                                       | 35 |
| 3.4.7  | Amonyak.....                                       | 35 |
| 3.4.8  | Uçucu Asitler .....                                | 35 |
| 3.4.9  | C/N Oranı .....                                    | 36 |
| 3.4.10 | Bekletme Süresi.....                               | 36 |
| 3.5    | Anaerobik Arıtma Sistemleri .....                  | 37 |
| 3.5.1  | Anaerobik Çamur Çürütücü .....                     | 39 |
| 3.5.2  | Anaerobik Temas Reaktörü .....                     | 39 |
| 3.5.3  | Anaerobik Filtre.....                              | 39 |
| 3.5.4  | Anaerobik Akışkan Yataklı Reaktör .....            | 39 |
| 3.5.5  | Anaerobik Çamur Yataklı Reaktör .....              | 40 |
| 3.5.6  | Anaerobik Çamur Yataklı Filtre .....               | 40 |
| 3.5.7  | Membranlı Anaerobik Reaktör .....                  | 41 |
| 3.5.8  | Anaerobik Ardışık Kesikli Reaktör .....            | 41 |
| 3.5.9  | Anaerobik Kompost Reaktörleri .....                | 41 |

|                                                                               |           |
|-------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 3.5.10 İki Kademeli Anaerobik Arıtma Sistemleri .....                         | 42        |
| <b>4 MATERYAL VE METOT</b>                                                    | <b>45</b> |
| 4.1 BMP Deney Düzeneginin Hazirlanmasi .....                                  | 45        |
| 4.2 Atıksu Temini ve Karakterizasyonu.....                                    | 49        |
| 4.2.1 Atıksuların Temini.....                                                 | 49        |
| 4.2.2 Atıksuların Karakterizasyonu .....                                      | 50        |
| 4.3 Aşı Çamuru Temini ve Karakterizasyonu .....                               | 51        |
| 4.4 Besi Mikro/Makro Nütrient ve İz Element Çözeltilerinin Hazirlanmasi ..... | 52        |
| 4.5 BMP Esaslı Deneysel Çalışmalardan Elde Edilen Sonuçlar .....              | 53        |
| <b>5 MODELLEME ÇALIŞMALARI</b>                                                | <b>54</b> |
| 5.1 MATLAB Nümerik Hesaplama Ortamı .....                                     | 54        |
| 5.2 Kinetik Modelleme.....                                                    | 60        |
| 5.2.1 Modifiye Gompertz Denklemi .....                                        | 61        |
| 5.2.2 Transfer Fonksiyonu (Reaksiyon Eğrisi Tipi Model) .....                 | 61        |
| 5.2.3 Lojistik Fonksiyon.....                                                 | 62        |
| 5.2.4 Monod Tipi Model.....                                                   | 62        |
| 5.2.5 İki Fazlı Üstel İlişki Modeli .....                                     | 63        |
| 5.2.6 Birinci Dereceden Fonksiyon .....                                       | 63        |
| 5.2.7 Chen-Hashimoto Modeli.....                                              | 63        |
| 5.3 MATLAB Esaslı Hesaplama Yöntemi .....                                     | 64        |
| 5.3.1 Deneysel Çalışmada Dikkate Alınan Kabuller ve Sayısal Analiz .....      | 66        |
| 5.3.2 İstatistiksel Analiz.....                                               | 67        |
| 5.4 MATLAB Esaslı Modelleme Sonuçları .....                                   | 68        |
| 5.4.1 Mezbaha Atıksuyu.....                                                   | 70        |
| 5.4.2 Peyniraltı Atıksuyu .....                                               | 84        |
| 5.4.3 Köpek Maması Atıksuyu .....                                             | 98        |

|          |                                               |            |
|----------|-----------------------------------------------|------------|
| 5.4.4    | Balık Atıksuyu .....                          | 112        |
| 5.4.5    | Tavuk Gübresi Atıksuyu .....                  | 126        |
| 5.4.6    | Bisküvi Atıksuyu.....                         | 140        |
| 5.4.7    | Sebze Atıksuyu .....                          | 154        |
| <b>6</b> | <b>SONUÇ VE ÖNERİLER</b>                      | <b>203</b> |
|          | <b>KAYNAKÇA</b>                               | <b>206</b> |
|          | <b>A Kümülatif ve Günlük Metan Üretimleri</b> | <b>214</b> |
|          | <b>B Pseudo Kod</b>                           | <b>222</b> |
|          | <b>Tezden Üretilmiş Yayınlar</b>              | <b>225</b> |



## SİMGE LİSTESİ

---

|             |                                             |
|-------------|---------------------------------------------|
| $R_a^2$     | Ayarlanmış Çoklu Determinasyon Katsayısı    |
| $Y$         | Biyokütle Dönüşüm Oranı                     |
| $Q$         | Çamur Debisi                                |
| $\theta_c$  | Çamur Yaşı                                  |
| $t$         | Çıktı Değişkeni                             |
| $S_i$       | Çıkış substrat konsantrasyonu               |
| $p$         | Çoklu Regresyon Modelindeki Değişken Sayısı |
| $Y_a$       | DeneySEL Veri                               |
| $R^2$       | Determinasyon Katsayısı                     |
| $FV$        | Fraksiyonel Varyans                         |
| $S_0$       | Giriş substrat konsantrasyonu               |
| $n$         | Gözlem Sayısı                               |
| $O$         | Gözlenen (DeneySEL)                         |
| $H$         | Hessian matrisi                             |
| $k_d$       | İçsel Solunum Hız Sabiti                    |
| $FA2$       | İki Faktörü                                 |
| $K$         | Kinetik sabit oranı                         |
| $R$         | Korelasyon Katsayısı                        |
| $B_0$       | Maksimum metan üretimi                      |
| $\mu_{max}$ | Mikroorganizmaların maksimum büyüme oranı   |
| $m$         | Ortalama                                    |
| $MSE$       | Ortalama Karesel Hata                       |
| $RMSE$      | Ortalama Karesel Hata Karekökü              |

|                   |                        |
|-------------------|------------------------|
| MAE               | Ortalama Mutlak Hata   |
| reg               | Regresyon              |
| RMSE <sub>U</sub> | Sistemik Olmayan RMSE  |
| PSE               | Sistemik Hata Oranı    |
| RMSE <sub>s</sub> | Sistemik RMSE          |
| F/I               | Substrat-aşı oranı     |
| Y <sub>p</sub>    | Tahmin Değeri          |
| P                 | Tahmin edilen (Model)  |
| IA                | Uyum İndeksi           |
| mfs               | Üyelik Fonksiyonu      |
| P <sub>x</sub>    | Üretilen Net Biyokütle |
| Q <sub>CH4</sub>  | Üretilen Metan         |

## KISALTMA LİSTESİ

---

|                  |                                                 |
|------------------|-------------------------------------------------|
| AAT              | Atıksu Arıtma Tesisleri                         |
| AAYR             | Anaerobik Akışkan Yataklı Reaktör               |
| AÇYR             | Anaerobik Çamur Yataklı Reaktör                 |
| AF               | Anaerobik Filtre                                |
| AKM              | Askıda Katı Madde                               |
| ATR              | Anaerobik Temas Reaktörü                        |
| BFSG             | Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno                |
| BMP              | Biyokimyasal Metan Potansiyeli                  |
| BOİ <sub>5</sub> | Biyolojik Oksijen İhtiyacı                      |
| CMADs            | Tam Karışimli Anaerobik Çürütücü                |
| CV               | Varyasyon Katsayısı                             |
| ÇRM              | Çoklu Regresyon Modeli                          |
| FBR              | Akışkan Yataklı Reaktör                         |
| HRT              | Hidrolik Bekleme Süresi                         |
| KM               | Katı Madde                                      |
| KOİ              | Kimyasal Oksijen İhtiyacı                       |
| LF               | Lojistik Fonksiyon                              |
| MAR              | Membranlı Anaerobik Reaktör                     |
| MGE              | Modifiye Gompertz Denklemi                      |
| N-M SDSA         | Nelder-Mead Simpleks Doğrudan Arama Algoritması |
| ORP              | Oksidasyon Redüksiyon Potansiyeli               |
| Q-N CLSA         | Kübik Doğrultu Belirleme Algoritması            |
| RCtM             | Reaksiyon Eğrisi Tipi Model                     |

|      |                          |
|------|--------------------------|
| SEE  | Standart Tahmin Hatası   |
| TA   | Toplam Azot              |
| TAA  | Toplam Amonyak Azotu     |
| TAKM | Toplam Askıda Katı Madde |
| TF   | Transfer Fonksiyonu      |
| TF   | Toplam Fosfor            |
| TKA  | Toplam Kjeldahl Azotu    |
| TKM  | Toplam Katı Madde        |
| TOK  | Toplam Organik Karbon    |
| UAKM | Uçucu Askıda Katı Madde  |
| UKM  | Uçucu Katı Madde         |
| UYA  | Uçucu Yağ Asiti          |

## ŞEKİL LİSTESİ

|                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |    |
|-------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Şekil 2.1</b>  | Entegre et tesisi prosesi .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 8  |
| <b>Şekil 2.2</b>  | Entegre et tesisi arıtma prosesi .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 9  |
| <b>Şekil 2.3</b>  | Peynir endüstrisi üretim akış diyagramı .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 10 |
| <b>Şekil 2.4</b>  | Hayvan gıda endüstrisi prosesi (konserve ton balığı).....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 11 |
| <b>Şekil 2.5</b>  | Deniz ürünleri endüstri prosesi .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 13 |
| <b>Şekil 2.6</b>  | Süper fosfat gübre üretim genel prosesi (atık gaz arıtma sistemi dahildir) .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 14 |
| <b>Şekil 2.7</b>  | Ekmek üretim prosesi akış diyagramı .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 15 |
| <b>Şekil 2.8</b>  | Fırın atıksuyu giderim prosesi.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 16 |
| <b>Şekil 2.9</b>  | Turşu endüstri prosesi.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 17 |
| <b>Şekil 2.10</b> | Tarım endüstrisi atıksu arıtma prosesi örneği.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 17 |
| <b>Şekil 3.1</b>  | Evsel çamurların çürütülmesi esnasında organik maddelerin metana dönüşümü .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 27 |
| <b>Şekil 3.2</b>  | Anaerobik reaktör çeşitleri.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 38 |
| <b>Şekil 4.1</b>  | BMP şişelerinin azot gazı yardımıyla yıkanması .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 47 |
| <b>Şekil 4.2</b>  | BMP laboratuvar çalışmasına ait çizim .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 48 |
| <b>Şekil 4.3</b>  | BMP deney düzeneği (TÜBA-GEBİP 2018 laboratuvarı).....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 49 |
| <b>Şekil 5.1</b>  | MATLAB 8.1 (R2013a) versiyonu ekran görüntüsü.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 55 |
| <b>Şekil 5.2</b>  | Komut penceresi ekran görüntüsü .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 56 |
| <b>Şekil 5.3</b>  | Çalışma alanı penceresi ekran görüntüsü .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 56 |
| <b>Şekil 5.4</b>  | MATLAB® esaslı hibrid programlama çalıştırılması neticesinde agro-endüstriyel substratların seçimi için elde edilen ilk menü ekranı .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 68 |
| <b>Şekil 5.5</b>  | MATLAB® esaslı hibrid programlama çalıştırılması neticesinde kinetik modellerin seçimi için elde edilen ilk menü ekranı.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 69 |
| <b>Şekil 5.6</b>  | MATLAB® esaslı hibrid programlama çalıştırılması neticesinde arama algoritmalarının seçimi için elde edilen ilk menü ekranı.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 69 |
| <b>Şekil 5.7</b>  | Mezbaha atıksuyuna ait deneysel verilere göre “Modifiye Gompertz Modeli (MGM)” ve “Nelder-Mead simpleks doğrudan arama algoritması (N-M SDSA)” çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları..... | 70 |
| <b>Şekil 5.8</b>  | Mezbaha atıksuyuna ait deneysel verilere göre “Modifiye Gompertz Modeli (MGM)” ve “BFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno) Quasi-Newton (Q-N) kübik doğrultu belirleme algoritması (BFGS Q-N CLSA)”                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |    |

çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları..... 71

**Şekil 5.9** Mezbaşa atıksuyuna ait deneysel verilere göre “Transfer Fonksiyonu (TF)” ve “Nelder-Mead simpleks doğrudan arama algoritması (N-M SDSA)” çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları..... 72

**Şekil 5.10** Mezbaşa atıksuyuna ait deneysel verilere göre “Transfer Fonksiyonu (TF)” ve “BFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno) Quasi-Newton (Q-N) kübik doğrultu belirleme algoritması (BFGS Q-N CLSA)” çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları..... 73

**Şekil 5.11** Mezbaşa atıksuyuna ait deneysel verilere göre “Lojistik Fonksiyon (LF)” ve “Nelder-Mead simpleks doğrudan arama algoritması (N-M SDSA)” çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları..... 74

**Şekil 5.12** Mezbaşa atıksuyuna ait deneysel verilere göre “Lojistik Fonksiyon (LF)” ve “BFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno) Quasi-Newton (Q-N) kübik doğrultu belirleme algoritması (BFGS Q-N CLSA)” çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları..... 75

**Şekil 5.13** Mezbaşa atıksuyuna ait deneysel verilere göre “Monod Tipi Model (MTM)” ve “Nelder-Mead simpleks doğrudan arama algoritması (N-M SDSA)” çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d)

|                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |    |
|-------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
|                   | biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 76 |
| <b>Şekil 5.14</b> | Mezbaha atıksuyuna ait deneysel verilere göre “Monod Tipi Model (MTM)” ve “BFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno) Quasi-Newton (Q-N) kübik doğrultu belirleme algoritması (BFGS Q-N CLSA)” çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları.....                | 77 |
| <b>Şekil 5.15</b> | Mezbaha atıksuyuna ait deneysel verilere göre “İki Fazlı Üstel İlişki Modeli (İFÜİM)” ve “Nelder-Mead simpleks doğrudan arama algoritması (N-M SDSA)” çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları .....                                                     | 78 |
| <b>Şekil 5.16</b> | Mezbaha atıksuyuna ait deneysel verilere göre “İki Fazlı Üstel İlişki Modeli (İFÜİM)” ve “BFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno) Quasi-Newton (Q-N) kübik doğrultu belirleme algoritması (BFGS Q-N CLSA)” çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları..... | 79 |
| <b>Şekil 5.17</b> | Mezbaha atıksuyuna ait deneysel verilere göre “Birinci Dereceden Fonksiyon (BDF)” ve “Nelder-Mead simpleks doğrudan arama algoritması (N-M SDSA)” çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları .....                                                         | 80 |
| <b>Şekil 5.18</b> | Mezbaha atıksuyuna ait deneysel verilere göre “Birinci Dereceden Fonksiyon (BDF)” ve “BFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno) Quasi-Newton (Q-N) kübik doğrultu belirleme algoritması (BFGS Q-N CLSA)” çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları.....     | 81 |
| <b>Şekil 5.19</b> | Mezbaha atıksuyuna ait deneysel verilere göre “Chen-Hashimoto Modeli (CHM)” ve “Nelder-Mead simpleks doğrudan arama algoritması                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |    |

(N-M SDSA)" çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları..... 82

**Şekil 5.20** Mezbaha atıksuyuna ait deneysel verilere göre "Chen-Hashimoto Modeli (CHM)" ve "BFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno) Quasi-Newton (Q-N) kübik doğrultu belirleme algoritması (BFGS Q-N CLSA)" çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları..... 83

**Şekil 5.21** Peyniraltı atıksuyuna ait deneysel verilere göre "Modifiye Gompertz Modeli (MGM)" ve "Nelder-Mead simpleks doğrudan arama algoritması (N-M SDSA)" çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları..... 84

**Şekil 5.22** Peyniraltı atıksuyuna ait deneysel verilere göre "Modifiye Gompertz Modeli (MGM)" ve "BFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno) Quasi-Newton (Q-N) kübik doğrultu belirleme algoritması (BFGS Q-N CLSA)" çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları..... 85

**Şekil 5.23** Peyniraltı atıksuyuna ait deneysel verilere göre "Transfer Fonksiyonu (TF)" ve "Nelder-Mead simpleks doğrudan arama algoritması (N-M SDSA)" çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları..... 86

**Şekil 5.24** Peyniraltı atıksuyuna ait deneysel verilere göre "Transfer Fonksiyonu (TF)" ve "BFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno) Quasi-Newton (Q-N) kübik doğrultu belirleme algoritması (BFGS Q-N CLSA)" çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d)

|                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |    |
|-------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
|                   | biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 87 |
| <b>Şekil 5.25</b> | Peyniraltı atıksuyuna ait deneysel verilere göre “Lojistik Fonksiyon (LF)” ve “Nelder-Mead simpleks doğrudan arama algoritması (N-M SDSA)” çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları.....                                                      | 88 |
| <b>Şekil 5.26</b> | Peyniraltı atıksuyuna ait deneysel verilere göre “Lojistik Fonksiyon (LF)” ve “BFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno) Quasi-Newton (Q-N) kübik doğrultu belirleme algoritması (BFGS Q-N CLSA)” çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları..... | 89 |
| <b>Şekil 5.27</b> | Peyniraltı atıksuyuna ait deneysel verilere göre “Monod Tipi Model (MTM)” ve “Nelder-Mead simpleks doğrudan arama algoritması (N-M SDSA)” çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları.....                                                       | 90 |
| <b>Şekil 5.28</b> | Peyniraltı atıksuyuna ait deneysel verilere göre “Monod Tipi Model (MTM)” ve “BFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno) Quasi-Newton (Q-N) kübik doğrultu belirleme algoritması (BFGS Q-N CLSA)” çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları.....  | 91 |
| <b>Şekil 5.29</b> | Peyniraltı atıksuyuna ait deneysel verilere göre “İki Fazlı Üstel İlişki Modeli (İFÜİM)” ve “Nelder-Mead simpleks doğrudan arama algoritması (N-M SDSA)” çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları .....                                       | 92 |
| <b>Şekil 5.30</b> | Peyniraltı atıksuyuna ait deneysel verilere göre “İki Fazlı Üstel İlişki Modeli (İFÜİM)” ve “BFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno) Quasi-Newton (Q-N) kübik doğrultu belirleme algoritması (BFGS Q-N CLSA)”                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |    |

çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları..... 93

**Şekil 5.31** Peyniraltı atıksuyuna ait deneysel verilere göre “Birinci Dereceden Fonksiyon (BDF)” ve “Nelder-Mead simpleks doğrudan arama algoritması (N-M SDSA)” çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları ..... 94

**Şekil 5.32** Peyniraltı atıksuyuna ait deneysel verilere göre “Birinci Dereceden Fonksiyon (BDF)” ve “BFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno) Quasi-Newton (Q-N) kübik doğrultu belirleme algoritması (BFGS Q-N CLSA)” çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları..... 95

**Şekil 5.33** Peyniraltı atıksuyuna ait deneysel verilere göre “Chen-Hashimoto Modeli (CHM)” ve “Nelder-Mead simpleks doğrudan arama algoritması (N-M SDSA)” çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları..... 96

**Şekil 5.34** Peyniraltı atıksuyuna ait deneysel verilere göre “Chen-Hashimoto Modeli (CHM)” ve “BFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno) Quasi-Newton (Q-N) kübik doğrultu belirleme algoritması (BFGS Q-N CLSA)” çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları..... 97

**Şekil 5.35** Köpek maması atıksuyuna ait deneysel verilere göre “Modifiye Gompertz Modeli (MGM)” ve “Nelder-Mead simpleks doğrudan arama algoritması (N-M SDSA)” çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları

- arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları ..... 98
- Şekil 5.36** Köpek maması atıksuyuna ait deneysel verilere göre “Modifiye Gompertz Modeli (MGM)” ve “BFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno) Quasi-Newton (Q-N) kübik doğrultu belirleme algoritması (BFGS Q-N CLSA)” çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları ..... 99
- Şekil 5.37** Köpek maması atıksuyuna ait deneysel verilere göre “Transfer Fonksiyonu (TF)” ve “Nelder-Mead simpleks doğrudan arama algoritması (N-M SDSA)” çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları ..... 100
- Şekil 5.38** Köpek maması atıksuyuna ait deneysel verilere göre “Transfer Fonksiyonu (TF)” ve “BFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno) Quasi-Newton (Q-N) kübik doğrultu belirleme algoritması (BFGS Q-N CLSA)” çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları ..... 101
- Şekil 5.39** Köpek maması atıksuyuna ait deneysel verilere göre “Lojistik Fonksiyon (LF)” ve “Nelder-Mead simpleks doğrudan arama algoritması (N-M SDSA)” çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları ..... 102
- Şekil 5.40** Köpek maması atıksuyuna ait deneysel verilere göre “Lojistik Fonksiyon (LF)” ve “BFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno) Quasi-Newton (Q-N) kübik doğrultu belirleme algoritması (BFGS Q-N CLSA)” çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları ..... 103
- Şekil 5.41** Köpek maması atıksuyuna ait deneysel verilere göre “Monod Tipi Model (MTM)” ve “Nelder-Mead simpleks doğrudan arama algoritması

(N-M SDSA)" çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları.....104

**Şekil 5.42** Köpek maması atıksuyuna ait deneysel verilere göre "Monod Tipi Model (MTM)" ve "BFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno) Quasi-Newton (Q-N) kübik doğrultu belirleme algoritması (BFGS Q-N CLSA)" çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları.....105

**Şekil 5.43** Köpek maması atıksuyuna ait deneysel verilere göre "İki Fazlı Üstel İlişki Modeli (İFÜİM)" ve "Nelder-Mead simpleks doğrudan arama algoritması (N-M SDSA)" çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları .....106

**Şekil 5.44** Köpek maması atıksuyuna ait deneysel verilere göre "İki Fazlı Üstel İlişki Modeli (İFÜİM)" ve "BFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno) Quasi-Newton (Q-N) kübik doğrultu belirleme algoritması (BFGS Q-N CLSA)" çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları.....107

**Şekil 5.45** Köpek maması atıksuyuna ait deneysel verilere göre "Birinci Dereceden Fonksiyon (BDF)" ve "Nelder-Mead simpleks doğrudan arama algoritması (N-M SDSA)" çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları .....108

**Şekil 5.46** Köpek maması atıksuyuna ait deneysel verilere göre "Birinci Dereceden Fonksiyon (BDF)" ve "BFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno) Quasi-Newton (Q-N) kübik doğrultu belirleme algoritması (BFGS Q-N CLSA)" çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d)

|                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |     |
|-------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
|                   | biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 109 |
| <b>Şekil 5.47</b> | Köpek maması atıksuyuna ait deneysel verilere göre “Chen-Hashimoto Modeli (CHM)” ve “Nelder-Mead simpleks doğrudan arama algoritması (N-M SDSA)” çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları.....                                                      | 110 |
| <b>Şekil 5.48</b> | Köpek maması atıksuyuna ait deneysel verilere göre “Chen-Hashimoto Modeli (CHM)” ve “BFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno) Quasi-Newton (Q-N) kübik doğrultu belirleme algoritması (BFGS Q-N CLSA)” çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları..... | 111 |
| <b>Şekil 5.49</b> | Balık atıksuyuna ait deneysel verilere göre “Modifiye Gompertz Modeli (MGM)” ve “Nelder-Mead simpleks doğrudan arama algoritması (N-M SDSA)” çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları.....                                                          | 112 |
| <b>Şekil 5.50</b> | Balık atıksuyuna ait deneysel verilere göre “Modifiye Gompertz Modeli (MGM)” ve “BFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno) Quasi-Newton (Q-N) kübik doğrultu belirleme algoritması (BFGS Q-N CLSA)” çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları.....     | 113 |
| <b>Şekil 5.51</b> | Balık atıksuyuna ait deneysel verilere göre “Transfer Fonksiyonu (TF)” ve “Nelder-Mead simpleks doğrudan arama algoritması (N-M SDSA)” çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları.....                                                                | 114 |
| <b>Şekil 5.52</b> | Balık atıksuyuna ait deneysel verilere göre “Transfer Fonksiyonu (TF)” ve “BFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno) Quasi-Newton (Q-N) kübik doğrultu belirleme algoritması (BFGS Q-N CLSA)” çözümlemesi                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |     |

için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları.....115

**Şekil 5.53** Balık atıksuyuna ait deneysel verilere göre “Lojistik Fonksiyon (LF)” ve “Nelder-Mead simpleks doğrudan arama algoritması (N-M SDSA)” çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları.....116

**Şekil 5.54** Balık atıksuyuna ait deneysel verilere göre “Lojistik Fonksiyon (LF)” ve “BFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno) Quasi-Newton (Q-N) kübik doğrultu belirleme algoritması (BFGS Q-N CLSA)” çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları.....117

**Şekil 5.55** Balık atıksuyuna ait deneysel verilere göre “Monod Tipi Model (MTM)” ve “Nelder-Mead simpleks doğrudan arama algoritması (N-M SDSA)” çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları.....118

**Şekil 5.56** Balık atıksuyuna ait deneysel verilere göre “Monod Tipi Model (MTM)” ve “BFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno) Quasi-Newton (Q-N) kübik doğrultu belirleme algoritması (BFGS Q-N CLSA)” çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları.....119

**Şekil 5.57** Balık atıksuyuna ait deneysel verilere göre “İki Fazlı Üstel İlişki Modeli (İFÜİM)” ve “Nelder-Mead simpleks doğrudan arama algoritması (N-M SDSA)” çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları.....120

**Şekil 5.58** Balık atıksuyuna ait deneysel verilere göre “İki Fazlı Üstel İlişki Modeli (İFÜİM)” ve “BFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno) Quasi-Newton

(Q-N) kübik doğrultu belirleme algoritması (BFGS Q-N CLSA)”  
çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile  
amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon  
(deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği  
(kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d)  
biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz  
sonuçları..... 121

**Şekil 5.59** Balık atıksuyuna ait deneysel verilere göre “Birinci Dereceden  
Fonksiyon (BDF)” ve “Nelder-Mead simpleks doğrudan arama  
algoritması (N-M SDSA)” çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon  
(iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci,  
(b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c)  
uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları  
arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik  
esaslı analiz sonuçları ..... 122

**Şekil 5.60** Balık atıksuyuna ait deneysel verilere göre “Birinci Dereceden  
Fonksiyon (BDF)” ve “BFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno)  
Quasi-Newton (Q-N) kübik doğrultu belirleme algoritması (BFGS Q-N  
CLSA)” çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı  
ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon  
(deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği  
(kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d)  
biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz  
sonuçları..... 123

**Şekil 5.61** Balık atıksuyuna ait deneysel verilere göre “Chen-Hashimoto Modeli  
(CHM)” ve “Nelder-Mead simpleks doğrudan arama algoritması (N-M  
SDSA)” çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı  
ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon  
(deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği  
(kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d)  
biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz  
sonuçları..... 124

**Şekil 5.62** Balık atıksuyuna ait deneysel verilere göre “Chen-Hashimoto Modeli  
(CHM)” ve “BFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno) Quasi-Newton  
(Q-N) kübik doğrultu belirleme algoritması (BFGS Q-N CLSA)”  
çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile  
amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon  
(deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği  
(kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d)  
biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz  
sonuçları..... 125

**Şekil 5.63** Tavuk gübresi atıksuyuna ait deneysel verilere göre “Modifiye  
Gompertz Modeli (MGM)” ve “Nelder-Mead simpleks doğrudan arama  
algoritması (N-M SDSA)” çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon  
(iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci,  
(b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c)  
uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları

- arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları ..... 126
- Şekil 5.64** Tavuk gübresi atıksuyuna ait deneysel verilere göre “Modifiye Gompertz Modeli (MGM)” ve “BFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno) Quasi-Newton (Q-N) kübik doğrultu belirleme algoritması (BFGS Q-N CLSA)” çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları ..... 127
- Şekil 5.65** Tavuk gübresi atıksuyuna ait deneysel verilere göre “Transfer Fonksiyonu (TF)” ve “Nelder-Mead simpleks doğrudan arama algoritması (N-M SDSA)” çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları ..... 128
- Şekil 5.66** Tavuk gübresi atıksuyuna ait deneysel verilere göre “Transfer Fonksiyonu (TF)” ve “BFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno) Quasi-Newton (Q-N) kübik doğrultu belirleme algoritması (BFGS Q-N CLSA)” çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları ..... 129
- Şekil 5.67** Tavuk gübresi atıksuyuna ait deneysel verilere göre “Lojistik Fonksiyon (LF)” ve “Nelder-Mead simpleks doğrudan arama algoritması (N-M SDSA)” çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları ..... 130
- Şekil 5.68** Tavuk gübresi atıksuyuna ait deneysel verilere göre “Lojistik Fonksiyon (LF)” ve “BFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno) Quasi-Newton (Q-N) kübik doğrultu belirleme algoritması (BFGS Q-N CLSA)” çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları ..... 131
- Şekil 5.69** Tavuk gübresi atıksuyuna ait deneysel verilere göre “Monod Tipi Model (MTM)” ve “Nelder-Mead simpleks doğrudan arama algoritması (N-M

SDSA)" çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları.....132

**Şekil 5.70** Tavuk gübresi atıksuyuna ait deneysel verilere göre "Monod Tipi Model (MTM)" ve "BFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno) Quasi-Newton (Q-N) kübik doğrultu belirleme algoritması (BFGS Q-N CLSA)" çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları.....133

**Şekil 5.71** Tavuk gübresi atıksuyuna ait deneysel verilere göre "İki Fazlı Üstel İlişki Modeli (İFÜİM)" ve "Nelder-Mead simpleks doğrudan arama algoritması (N-M SDSA)" çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları .....134

**Şekil 5.72** Tavuk gübresi atıksuyuna ait deneysel verilere göre "İki Fazlı Üstel İlişki Modeli (İFÜİM)" ve "BFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno) Quasi-Newton (Q-N) kübik doğrultu belirleme algoritması (BFGS Q-N CLSA)" çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları.....135

**Şekil 5.73** Tavuk gübresi atıksuyuna ait deneysel verilere göre "Birinci Dereceden Fonksiyon (BDF)" ve "Nelder-Mead simpleks doğrudan arama algoritması (N-M SDSA)" çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları .....136

**Şekil 5.74** Tavuk gübresi atıksuyuna ait deneysel verilere göre "Birinci Dereceden Fonksiyon (BDF)" ve "BFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno) Quasi-Newton (Q-N) kübik doğrultu belirleme algoritması (BFGS Q-N CLSA)" çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d)

|                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |     |
|-------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
|                   | biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 137 |
| <b>Şekil 5.75</b> | Tavuk gübresi atıksuyuna ait deneysel verilere göre “Chen-Hashimoto Modeli (CHM)” ve “Nelder-Mead simpleks doğrudan arama algoritması (N-M SDSA)” çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları.....                                                      | 138 |
| <b>Şekil 5.76</b> | Tavuk gübresi atıksuyuna ait deneysel verilere göre “Chen-Hashimoto Modeli (CHM)” ve “BFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno) Quasi-Newton (Q-N) kübik doğrultu belirleme algoritması (BFGS Q-N CLSA)” çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları..... | 139 |
| <b>Şekil 5.77</b> | Bisküvi atıksuyuna ait deneysel verilere göre “Modifiye Gompertz Modeli (MGM)” ve “Nelder-Mead simpleks doğrudan arama algoritması (N-M SDSA)” çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları.....                                                         | 140 |
| <b>Şekil 5.78</b> | Bisküvi atıksuyuna ait deneysel verilere göre “Modifiye Gompertz Modeli (MGM)” ve “BFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno) Quasi-Newton (Q-N) kübik doğrultu belirleme algoritması (BFGS Q-N CLSA)” çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları.....    | 141 |
| <b>Şekil 5.79</b> | Bisküvi atıksuyuna ait deneysel verilere göre “Transfer Fonksiyonu (TF)” ve “Nelder-Mead simpleks doğrudan arama algoritması (N-M SDSA)” çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları.....                                                               | 142 |
| <b>Şekil 5.80</b> | Bisküvi atıksuyuna ait deneysel verilere göre “Transfer Fonksiyonu (TF)” ve “BFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno) Quasi-Newton (Q-N) kübik doğrultu belirleme algoritması (BFGS Q-N CLSA)”                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |     |

- çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları.....143
- Şekil 5.81** Bisküvi atıksuyuna ait deneysel verilere göre “Lojistik Fonksiyon (LF)” ve “Nelder-Mead simpleks doğrudan arama algoritması (N-M SDSA)” çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları.....144
- Şekil 5.82** Bisküvi atıksuyuna ait deneysel verilere göre “Lojistik Fonksiyon (LF)” ve “BFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno) Quasi-Newton (Q-N) kübik doğrultu belirleme algoritması (BFGS Q-N CLSA)” çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları.....145
- Şekil 5.83** Bisküvi atıksuyuna ait deneysel verilere göre “Monod Tipi Model (MTM)” ve “Nelder-Mead simpleks doğrudan arama algoritması (N-M SDSA)” çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları.....146
- Şekil 5.84** Bisküvi atıksuyuna ait deneysel verilere göre “Monod Tipi Model (MTM)” ve “BFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno) Quasi-Newton (Q-N) kübik doğrultu belirleme algoritması (BFGS Q-N CLSA)” çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları.....147
- Şekil 5.85** Bisküvi atıksuyuna ait deneysel verilere göre “İki Fazlı Üstel İlişki Modeli (İFÜİM)” ve “Nelder-Mead simpleks doğrudan arama algoritması (N-M SDSA)” çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları .....148

- Şekil 5.86** Bisküvi atıksuyuna ait deneysel verilere göre “İki Fazlı Üstel İlişki Modeli (İFÜİM)” ve “BFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno) Quasi-Newton (Q-N) kübik doğrultu belirleme algoritması (BFGS Q-N CLSA)” çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları.....149
- Şekil 5.87** Bisküvi atıksuyuna ait deneysel verilere göre “Birinci Dereceden Fonksiyon (BDF)” ve “Nelder-Mead simpleks doğrudan arama algoritması (N-M SDSA)” çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları .....150
- Şekil 5.88** Bisküvi atıksuyuna ait deneysel verilere göre “Birinci Dereceden Fonksiyon (BDF)” ve “BFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno) Quasi-Newton (Q-N) kübik doğrultu belirleme algoritması (BFGS Q-N CLSA)” çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları.....151
- Şekil 5.89** Bisküvi atıksuyuna ait deneysel verilere göre “Chen-Hashimoto Modeli (CHM)” ve “Nelder-Mead simpleks doğrudan arama algoritması (N-M SDSA)” çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları.....152
- Şekil 5.90** Bisküvi atıksuyuna ait deneysel verilere göre “Chen-Hashimoto Modeli (CHM)” ve “BFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno) Quasi-Newton (Q-N) kübik doğrultu belirleme algoritması (BFGS Q-N CLSA)” çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları.....153
- Şekil 5.91** Sebze atıksuyuna ait deneysel verilere göre “Modifiye Gompertz Modeli (MGM)” ve “Nelder-Mead simpleks doğrudan arama algoritması (N-M SDSA)” çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon

- (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları..... 154
- Şekil 5.92** Sebze atıksuyuna ait deneysel verilere göre “Modifiye Gompertz Modeli (MGM)” ve “BFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno) Quasi-Newton (Q-N) kübik doğrultu belirleme algoritması (BFGS Q-N CLSA)” çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları..... 155
- Şekil 5.93** Sebze atıksuyuna ait deneysel verilere göre “Transfer Fonksiyonu (TF)” ve “Nelder-Mead simpleks doğrudan arama algoritması (N-M SDSA)” çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları..... 156
- Şekil 5.94** Sebze atıksuyuna ait deneysel verilere göre “Transfer Fonksiyonu (TF)” ve “BFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno) Quasi-Newton (Q-N) kübik doğrultu belirleme algoritması (BFGS Q-N CLSA)” çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları..... 157
- Şekil 5.95** Sebze atıksuyuna ait deneysel verilere göre “Lojistik Fonksiyon (LF)” ve “Nelder-Mead simpleks doğrudan arama algoritması (N-M SDSA)” çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları..... 158
- Şekil 5.96** Sebze atıksuyuna ait deneysel verilere göre “Lojistik Fonksiyon (LF)” ve “BFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno) Quasi-Newton (Q-N) kübik doğrultu belirleme algoritması (BFGS Q-N CLSA)” çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları..... 159
- Şekil 5.97** Sebze atıksuyuna ait deneysel verilere göre “Monod Tipi Model (MTM)” ve “Nelder-Mead simpleks doğrudan arama algoritması (N-M SDSA)”

çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları.....160

**Şekil 5.98** Sebze atıksuyuna ait deneysel verilere göre “Monod Tipi Model (MTM)” ve “BFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno) Quasi-Newton (Q-N) kübik doğrultu belirleme algoritması (BFGS Q-N CLSA)” çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları.....161

**Şekil 5.99** Sebze atıksuyuna ait deneysel verilere göre “İki Fazlı Üstel İlişki Modeli (İFÜİM)” ve “Nelder-Mead simpleks doğrudan arama algoritması (N-M SDSA)” çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları.....162

**Şekil 5.100** Sebze atıksuyuna ait deneysel verilere göre “İki Fazlı Üstel İlişki Modeli (İFÜİM)” ve “BFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno) Quasi-Newton (Q-N) kübik doğrultu belirleme algoritması (BFGS Q-N CLSA)” çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları.....163

**Şekil 5.101** Sebze atıksuyuna ait deneysel verilere göre “Birinci Dereceden Fonksiyon (BDF)” ve “Nelder-Mead simpleks doğrudan arama algoritması (N-M SDSA)” çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları .....164

**Şekil 5.102** Sebze atıksuyuna ait deneysel verilere göre “Birinci Dereceden Fonksiyon (BDF)” ve “BFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno) Quasi-Newton (Q-N) kübik doğrultu belirleme algoritması (BFGS Q-N CLSA)” çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d)

|                    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |     |
|--------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
|                    | biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 165 |
| <b>Şekil 5.103</b> | Sebze atıksuyuna ait deneysel verilere göre “Chen-Hashimoto Modeli (CHM)” ve “Nelder-Mead simpleks doğrudan arama algoritması (N-M SDSA)” çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları.....                                                      | 166 |
| <b>Şekil 5.104</b> | Sebze atıksuyuna ait deneysel verilere göre “Chen-Hashimoto Modeli (CHM)” ve “BFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno) Quasi-Newton (Q-N) kübik doğrultu belirleme algoritması (BFGS Q-N CLSA)” çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları..... | 167 |
| <b>Şekil A.1</b>   | Farklı substrat kaynakları için elde edilen kümülatif metan üretimleri .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 214 |
| <b>Şekil A.2</b>   | Mezbaha atıksuyu için elde edilen kümülatif (a) ve günlük (b) metan üretimleri .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 215 |
| <b>Şekil A.3</b>   | Peyniraltı atıksuyu için elde edilen kümülatif (a) ve günlük (b) metan üretimleri .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 216 |
| <b>Şekil A.4</b>   | Köpek maması atıksuyu için elde edilen kümülatif (a) ve günlük (b) metan üretimleri .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 217 |
| <b>Şekil A.5</b>   | Balık işleme atıksuyu için elde edilen kümülatif (a) ve günlük (b) metan üretimleri .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 218 |
| <b>Şekil A.6</b>   | Tavuk gübresi atıksuyu için elde edilen kümülatif (a) ve günlük (b) metan üretimleri .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 219 |
| <b>Şekil A.7</b>   | Bisküvi atıksuyu için elde edilen kümülatif (a) ve günlük (b) metan üretimleri .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 220 |
| <b>Şekil A.8</b>   | Sebze atıksuyu için elde edilen kümülatif (a) ve günlük (b) metan üretimleri .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 221 |

## TABLO LİSTESİ

|                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |     |
|-------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Tablo 3.1</b>  | Biyogazın bileşimi .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 19  |
| <b>Tablo 3.2</b>  | Çeşitli Atıkların Biyogaz Üretim Verimi ve Metan Üretim Oranı.....                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 20  |
| <b>Tablo 3.3</b>  | Biyogaz ve çeşitli yakıt türlerinin karşılaştırılması .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 21  |
| <b>Tablo 3.4</b>  | Anaerobik mikroorganizma grupları .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 24  |
| <b>Tablo 3.5</b>  | Anaerobik proses üzerinde toksik etki gerçekleştiren bazı maddelerin derişimleri .....                                                                                                                                                                                                                                                                        | 34  |
| <b>Tablo 3.6</b>  | Anaerobik prosesler için optimal çevre şartları .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 37  |
| <b>Tablo 3.7</b>  | Anaerobik arıtma prosesi, organik yük ve verim açısından değerlendirilmesi.....                                                                                                                                                                                                                                                                               | 38  |
| <b>Tablo 3.8</b>  | Tek ve iki kademeli sistem kıyası .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 42  |
| <b>Tablo 3.9</b>  | Sık Kullanılan Anaerobik Arıtma Sistemlerinin Kıyası.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 43  |
| <b>Tablo 3.10</b> | AÇYR, AF ve AAYR sistemlerdeki başlıca işletme problemleri .....                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 44  |
| <b>Tablo 4.1</b>  | Atıksu türlerine göre kullanılan besi:aşı hacimleri .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 46  |
| <b>Tablo 4.2</b>  | Atıksu türüne göre deneyde ölçülen parametreler .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 51  |
| <b>Tablo 4.3</b>  | Atıksulara mikrobiyal aktiviteyi teşvik amaçlı eklenen iz elementlerinin hacimsel miktarı.....                                                                                                                                                                                                                                                                | 52  |
| <b>Tablo 5.1</b>  | BMP testlerinde kullanılan agro-endüstriyel substratlardan (mezhaba atıksuyu, balık atıksuyu, peyniraltı atıksuyu, bisküvi atıksuyu, tavuk gübresi, hayvan gıdası atıksuyu, sebze atıksuyu) elde edilen deneysel verilere göre Modifiye Gompertz Modeli (MGM), Transfer Fonksiyonu (TF) ve Lojistik Fonksiyon (LF) için belirlenen kinetik parametreler ..... | 168 |
| <b>Tablo 5.2</b>  | BMP testlerinde kullanılan agro-endüstriyel substratlardan (mezhaba atıksuyu, balık atıksuyu, peyniraltı atıksuyu, bisküvi atıksuyu, tavuk gübresi, hayvan gıdası atıksuyu, sebze atıksuyu) elde edilen deneysel verilere göre Monod Tipi Model (MTM) ve Birinci Dereceden Fonksiyon (BDF) için belirlenen kinetik parametreler .....                         | 172 |
| <b>Tablo 5.3</b>  | BMP testlerinde kullanılan agro-endüstriyel substratlardan (mezhaba atıksuyu, balık atıksuyu, peyniraltı atıksuyu, bisküvi atıksuyu, tavuk gübresi, hayvan gıdası atıksuyu, sebze atıksuyu) elde edilen deneysel verilere göre İki Fazlı Üstel İlişki Modeli (İFÜİM) belirlenen kinetik parametreler.....                                                     | 175 |
| <b>Tablo 5.4</b>  | BMP testlerinde kullanılan agro-endüstriyel substratlardan (mezhaba atıksuyu, balık atıksuyu, peyniraltı atıksuyu, bisküvi atıksuyu, tavuk gübresi, hayvan gıdası atıksuyu, sebze atıksuyu) elde edilen deneysel verilere göre Chen-Hashimoto Modeli (CHM) için belirlenen kinetik parametreler.....                                                          | 177 |

|                   |                                                                                                                                                                                                                                                                 |     |
|-------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Tablo 5.5</b>  | Mezbaha atıksuyuna ait verilerin “Nelder-Mead simpleks doğrudan arama algoritması (N-M SDSA)” çözümlemesi için yedi farklı kinetik modelden elde edilen istatistiksel performans indikatörleri .....                                                            | 178 |
| <b>Tablo 5.6</b>  | Mezbaha atıksuyuna ait verilerin “BFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno) Quasi-Newton (Q-N) kübik doğrultu belirleme algoritması (BFGS Q-N CLSA)” çözümlemesi için yedi farklı kinetik modelden elde edilen istatistiksel performans indikatörleri .....       | 180 |
| <b>Tablo 5.7</b>  | Peyniraltı atıksuyuna ait verilerin “Nelder-Mead simpleks doğrudan arama algoritması (N-M SDSA)” çözümlemesi için yedi farklı kinetik modelden elde edilen istatistiksel performans indikatörleri .....                                                         | 182 |
| <b>Tablo 5.8</b>  | Peyniraltı atıksuyuna ait verilerin “BFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno) Quasi-Newton (Q-N) kübik doğrultu belirleme algoritması (BFGS Q-N CLSA)” çözümlemesi için yedi farklı kinetik modelden elde edilen istatistiksel performans indikatörleri .....    | 183 |
| <b>Tablo 5.9</b>  | Köpek maması atıksuyuna ait verilerin “Nelder-Mead simpleks doğrudan arama algoritması (N-M SDSA)” çözümlemesi için yedi farklı kinetik modelden elde edilen istatistiksel performans indikatörleri .....                                                       | 185 |
| <b>Tablo 5.10</b> | Köpek maması atıksuyuna ait verilerin “BFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno) Quasi-Newton (Q-N) kübik doğrultu belirleme algoritması (BFGS Q-N CLSA)” çözümlemesi için yedi farklı kinetik modelden elde edilen istatistiksel performans indikatörleri .....  | 187 |
| <b>Tablo 5.11</b> | Balık atıksuyuna ait verilerin “Nelder-Mead simpleks doğrudan arama algoritması (N-M SDSA)” çözümlemesi için yedi farklı kinetik modelden elde edilen istatistiksel performans indikatörleri .....                                                              | 189 |
| <b>Tablo 5.12</b> | Balık atıksuyuna ait verilerin “BFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno) Quasi-Newton (Q-N) kübik doğrultu belirleme algoritması (BFGS Q-N CLSA)” çözümlemesi için yedi farklı kinetik modelden elde edilen istatistiksel performans indikatörleri .....         | 190 |
| <b>Tablo 5.13</b> | Tavuk gübresi atıksuyuna ait verilerin “Nelder-Mead simpleks doğrudan arama algoritması (N-M SDSA)” çözümlemesi için yedi farklı kinetik modelden elde edilen istatistiksel performans indikatörleri .....                                                      | 192 |
| <b>Tablo 5.14</b> | Tavuk gübresi atıksuyuna ait verilerin “BFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno) Quasi-Newton (Q-N) kübik doğrultu belirleme algoritması (BFGS Q-N CLSA)” çözümlemesi için yedi farklı kinetik modelden elde edilen istatistiksel performans indikatörleri ..... | 194 |
| <b>Tablo 5.15</b> | Bisküvi atıksuyuna ait verilerin “Nelder-Mead simpleks doğrudan arama algoritması (N-M SDSA)” çözümlemesi için yedi farklı kinetik modelden elde edilen istatistiksel performans indikatörleri .....                                                            | 196 |
| <b>Tablo 5.16</b> | Bisküvi atıksuyuna ait verilerin “BFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno) Quasi-Newton (Q-N) kübik doğrultu belirleme algoritması (BFGS Q-N CLSA)” çözümlemesi için yedi farklı kinetik modelden elde edilen istatistiksel performans indikatörleri .....       | 197 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                           |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Tablo 5.17</b> Sebze atıksuyuna ait verilerin “Nelder-Mead simpleks doğrudan arama algoritması (N-M SDSA)” çözümlemesi için yedi farklı kinetik modelden elde edilen istatistiksel performans indikatörleri .....                                                      | 199 |
| <b>Tablo 5.18</b> Sebze atıksuyuna ait verilerin “BFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno) Quasi-Newton (Q-N) kübik doğrultu belirleme algoritması (BFGS Q-N CLSA)” çözümlemesi için yedi farklı kinetik modelden elde edilen istatistiksel performans indikatörleri ..... | 201 |



## **Biyokimyasal Metan Potansiyeli Esaslı Modelleme ve İstatistiksel Analiz Çalışmaları**

Serra ÖZMAN

Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Prof. Dr. Kaan YETİLMEZSOY

Biyokimyasal metan potansiyeli (BMP), spesifik besi maddelerinin biyometanizasyon verimliliğinin ve havasız arıtmaya uygunluğunun tespiti açısından önemli bir deneysel çalışmadır. Biyogaz tesisi projelendirmesi yapılırken fizibilite çalışmalarında bu test kapsamında elde edilen deneysel veriler ve modelleme sonuçları kullanılarak proje detaylandırılması yapılmaktadır. Bu çalışmada, yedi farklı agro-endüstriyel atıksu (peyniraltı, mezbaha, balık işleme, tavuk gübresi, tüketim süresi geçmiş hayvan gıdası (köpek maması), bisküvi ve sebze) kullanılmış ve pH, kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ), çözünmüş kimyasal oksijen ihtiyacı (ÇKOİ), amonyak azotu, alkalinite, orto-fosfat, uçucu askıda katı madde (UAKM) parametreleri açısından karakterize edilmiştir. Deneysel sonuçlar, en yüksek KOİ değerlerinin peyniraltı, sebze ve balık işleme atıksuları için sırasıyla 96145 mg/L, 53165 mg/L ve 51300 mg/L değerlerinde olduğunu göstermiştir. Çalışmada, substrat kaynağı olarak kullanılan yedi farklı agro-endüstriyel atıksu türü için BMP testi kapsamında belirlenen normalize kümülatif metan üretimleri; balık işleme atıksuyu (702.81 mL CH<sub>4</sub>/g UKM, t = 105 gün) > tavuk gübresi atıksuyu (638.52 mL CH<sub>4</sub>/g UKM, t = 80 gün) > peyniraltı atıksuyu (539.69 mL CH<sub>4</sub>/g UKM, t = 112 gün) > köpek maması atıksuyu (424.92 mL CH<sub>4</sub>/g UKM, t = 106 gün) >

mezbaha atıksuyu (397.75 mL CH<sub>4</sub>/g UKM, t = 113 gün) > sebze atıksuyu (381.65 mL CH<sub>4</sub>/g UKM, t = 61 gün) > bisküvi atıksuyu (348.37 mL CH<sub>4</sub>/g UKM, t = 85 gün) sıralamasını vermiş olup, incelenen besi maddelerinin metan üretimi açısından aktif substrat kaynakları olarak kullanılabileceği belirlenmiştir. Mevcut agro-endüstriyel substratların biyobozunurluk sürecini en iyi temsil eden model yapısı ve kinetik parametreler bir “hibrid programlama stratejisi” kapsamında yedi farklı kinetik model (modifiye Gompertz denklemi, transfer fonksiyonu (reaksiyon eğrisi tipi) modeli, lojistik fonksiyon, Monod tipi modeli, iki fazlı üstel ilişki modeli, birinci dereceden model, Chen-Hashimoto modeli) kullanılarak araştırılmıştır. Bu çalışmadan elde edilen bulgular ile ilgili besi maddelerinin biyometanizasyonuna yönelik BMP esaslı literatür boşluğunun doldurulması ve mevcut substrat kaynaklarını kullanacak biyogaz üretim tesislerine katkı sağlanması hedeflenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Biyokimyasal metan potansiyeli, metan üretimi, havasız arıtma, kinetik modelleme, bilgisayar tabanlı modelleme

# **Modeling and Statistical Analysis Studies Based on Biochemical Methane Potential**

Serra ÖZMAN

Department of Environmental Engineering

MSc. Thesis

Advisor: Prof. Dr. Kaan YETİLMEZSOY

Biochemical methane potential (BMP) is an important experimental study for determination of the biomethanization efficiency and suitability of specific substrates for the anaerobic treatment. While projecting the biogas plant, the design is detailed using the experimental data and modeling results obtained within the scope of this test. In this study, seven different agro-industrial wastewater (whey wastewater, slaughterhouse wastewater, fish processing wastewater, poultry manure wastewater, expired animal food (dog food) wastewater, biscuits wastewater, and vegetable wastewater) were used, and pH, chemical oxygen demand (COD), dissolved chemical oxygen demand, ammonia nitrogen, alkalinity, ortho-phosphate, and volatile suspended solid parameters were characterized. In the present study, the order of the normalized cumulative methane productions determined within the scope of BMP test for seven different types of agro-industrial wastewater used as substrate source has been obtained as follows: fish processing wastewater (702.81 mL CH<sub>4</sub>/g VS, t = 105 days) > poultry manure wastewater (638.52 mL CH<sub>4</sub>/g VS, t = 80 days) > whey wastewater (539.69 mL CH<sub>4</sub> / g VSS, t = 112 days) > dog food wastewater (424.92 CH<sub>4</sub>/g VS, t = 106 days) > slaughterhouse wastewater (397.75 mL CH<sub>4</sub>/g VS, t = 113 days) > vegetable wastewater (381.65

CH<sub>4</sub>/g VS, t = 61 days) > biscuit wastewater (348.37 CH<sub>4</sub>/g VS, t = 85 days) and it has been determined that the inspected substances can be used as active substrate sources for the methane production. The model structure and kinetic parameters that best represent the biodegradability process of existing agro-industrial substrates were investigated using seven different kinetic models within the scope of a comprehensive “hybrid programming strategy”. With the findings obtained from this study, it is aimed to fulfill the BMP-based literature gap for the biomethanization of nutrients and contribute to biogas production facilities that will use existing substrate resources.

**Keywords:** Biochemical methane potential, methane production, anaerobic treatment, kinetic modelling, computer-based analysis

### 1.1 Literatür Özeti

Atıksu arıtma prosesleri büyük miktarda enerji tüketir ve çamur gibi istenmeyen yan ürünler üretir ve sonuç olarak her yıl atıksu arıtma tesislerinde (AAT) büyük miktarda çamur üretilir [1]. Türkiye’de atıksu arıtma tesislerinde farklı arıtma seviyeleri uygulanmaktadır. Atıksuyun evsel veya endüstriyel olmasına göre oluşan çamur, kişi başına 40-60 (g katı madde/gün) arasında kabul edilir [2]. 2019 yılında toplam nüfusun yaklaşık %92 ‘si belediye sınırları içinde yaşamaktadır [3]. Nüfusun %78’inin atıksuyunun belirli bir kademedeki arıtıldığına göre atıksu arıtma tesislerinde, yıllık yaklaşık 60 milyon atık çamur açığa çıkmaktadır. Günde yaklaşık 3.000 ton Arıtma Çamuru (yılda 1.095.000 ton) üretildiği hesaplanırsa, bu değer Türkiye’de 2008’de üretildiği belirtilen 1.075.000 ton/yıl (evsel ve kentsel AAT’lerde: 500.000 ton/yıl, Sanayi Tesislerinde: 575.000 ton/yıl) değerine yakındır [4].

Arıtma çamurlarının bertarafı için uygulanan yöntemler arasında stabilizasyon, minimizasyon, geri dönüşüm, yakma, çamurun araziye depolanması, kompostlaştırma ve tarımsal amaçlı kullanım yer almaktadır. Bu yöntemlerin maliyetlerinin artması ve çamurların depolanacağı arazilerin yetersiz olması nedeniyle arıtma çamuru alternatif enerji kaynağı oluşturmak amacıyla biyogaz tesislerinde anaerobik arıtmaya uğratılarak değerlendirilmektedir. Atık çamur, alternatif enerji kaynağı olarak Amerika, Avrupa ve birçok gelişmiş ülkede biyogaz tesislerinde değerlendirilmektedir.

Anaerobik arıtma sonucu atıksu arıtma tesislerindeki biyokütleyle üretilen biyogaz, işletme maliyetlerini büyük ölçüde dengeleyebilen değerli bir son ürünü temsil etmektedir. Buna bağlı olarak biyogazın anaerobik arıtma süreci çok farklı türde mikroorganizmaları içeren karmaşık bir biyolojik süreçtir. Bu biyotransformasyon

süreçleri başlangıç koşulları ve çalışma koşullarından kolayca etkilenir. Bu nedenle tesislerde yaygın olarak mezofilik bakteriler kullanılır [1].

Çeşitli endüstrilerde oluşan atıkların giderim sorunlarını incelenirse, dünyada peynir endüstrisinin üretim kapasitesi 20 milyondan fazladır. Üretilen her 1 kg peynir için 9 kg peynir altı suyu oluşur. Buna göre Dünya’da peynir endüstrisi kaynaklı, yaklaşık 180,000,000 ton peynir altı suyu üretilmektedir. Peyniraltı suyu yüksek miktarda protein, probiyotik ve laktoz içermektedir. Peyniraltı suyu mikro organizmaların büyümesi açısından oldukça uygun bir ortam yaratmaktadır. Dünya’da birçok işletmenin peyniraltı atıksuyunu değerlendirme olasılığı olmasına rağmen bu kirli suyun neredeyse yarısı alıcı ortama boşaltılmakta ve ciddi çevre kirliliğine neden olmaktadır. Peyniraltı sularını arıtan tesisler incelendiğinde de birçoğunun deşarj standartlarını uygulamadığı tespit edilmiştir [5]. Peyniraltı çıkış suyunun kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ), biyolojik oksijen ihtiyacı (BOİ) ve toplam Kjeldahl azotu (TKN) içeriği incelendiğinde biyogaz tesisleri için önemli bir substrat (besi maddesi) kaynağı olduğu görülmektedir.

Küçükbaş endüstrisine bakılırsa; yumurta ile tavuk üretimi sırasında oluşan dışkı dünyada yaklaşık 960 milyon ton/yıl, Türkiye’de 12 milyon ton/yıl’dır. Bu dışkı genellikle bertaraf edilmediği için ciddi çevresel kirliliğe neden olmaktadır. Son yıllarda tavuk endüstrisinde açığa çıkan bu kirlilik özellikle gübre amaçlı kullanılmaya başlanarak ekonomiye kazandırılmaya çalışılmaktadır. Tavuk dışkısının alternatif değerlendirme yöntemi olarak biyogaz üretimi, mantar üretimi ve doğal gübre üretimi amacıyla çalışmalar yapılmaya başlanmıştır [6].

Bisküvi atıkları ıslak anaerobik arıtma kullanılarak kolayca işlenir. Bisküvi atıkları değerli bir biyogaz substratıdır. Atığın neredeyse tüm kuru maddesi biyolojik olarak parçalanabilir [7].

Artan nüfusla birlikte et ve et ürünleri üretimi de artmaktadır. Özellikle gelişmiş ülkelerdeki gıda endüstrisinde et ürünleri tüketimi yüksektir. Bu tesislerden kaynaklanan mezbaha atıksularında KOİ, BOİ, toplam azot, toplam fosfor, toplam askıda katı madde ve yağ oranları çok yüksektir. Organik madde miktarı orta-yüksek düzeyde olan bu atıksularda %45 çözünmüş şekilde ve %55 askıda organik madde bulunur. Mezbaha atıksuları yüksek kirletici sulardır ve çevre – insan sağlığını

olumsuz etkilemektedir. Bu nedenle tesislerin atıksu arıtımının iyi yapılması gerekir [8].

Mezbaha atıksuları ve organik atıkları biyogaz tesisleri için substrat olarak kullanılmaktadır.

Yılda yaklaşık 64 milyon ton balık atığı üretilmektedir. Balık işleme atıkları enerji üretimi için büyük bir potansiyele sahiptir. Balık işlemleri sırasında oluşan atıklarındaki artış ve yenilenebilir enerji pazarının genişlemesi, bu atıklarının biyoyakıtların geleceğinde rol oynayabileceği anlamına gelmektedir. Lipitler ve proteinler açısından zengin olan balık atıkları ve balık çamuru gibi atıklar, yüksek biyokimyasal metan potansiyeline sahiptir. Bu atıklar anaerobik arıtma sürecinde substrat olarak kullanılmaktadır [9].

İklim değişikliğine neden olan sera gazlarının önemli bir kısmı organik atık kaynaklıdır. Gıda atıklarının anaerobik arıtımı; enerji geri kazanımı ve sera gazı emisyonlarının azaltılması için dünya çapında giderek daha fazla dikkat çekmektedir [10].

Biyogaz tesislerinde biyokimyasal metan potansiyelini önceden tahmin edebilmek için çeşitli matematiksel modeller geliştirilmiştir. Yapılan literatür taramasında biyokimyasal metan potansiyelinin modellenmesinde birçok faktör incelenmiştir. Kullanılan organik atığın türü, kompleks organik atıkların kullanımı, atığın uçucu organik madde içeriği, substrat-aşı oranı (F/I), KOİ, arıtma çamuruna ön işlem uygulanıp-uygulanmaması ve kullanılan matematiksel modellere göre çeşitli çalışmalar incelenmiştir. Biyokimyasal metan potansiyeli modellenirken literatürde yaygın olarak kullanılan modeller; birinci mertebeden kinetik denklem, lojistik fonksiyon, reaksiyon eğrisi ve Modifiye Gompertz denklemleridir [11].

Lignoselülozik atıkların biyometan potansiyeli deneysel verilerle analiz edildiğinde, Modifiye Gompertz denklemi kullanılarak yapılan modellemede atıklara ön işlem olarak elektrohidroлиз yapılmasının metan geri kazanım potansiyelini arttırdığı tespit edilmiştir [12].

Kesimhane atıkları ve kompleks yağlardan oluşan substratların biyokimyasal metan potansiyeli; bakteriyel büyüme eğrisi denklemleri, Richards, lojistik ve Gompertz

denklemleri kullanılarak modellendiğinde dört modelin de kullanıma uygun olduğu görülmüştür. Anaerobik arıtmada organik atıklar, bir dizi biyokimyasal işlem yoluyla, başta biyometan olmak üzere biyogaza dönüşür. Bu bertaraf yöntemi, atık geri kazanımını ve enerji üretimini birleştirerek, alternatif enerji kaynağı yaratmakla birlikte bütünsel bir atık arıtma yöntemi geliştirmeyi sağlamaktadır [13].

Birinci dereceden kinetik model parametreleri, maksimum metan üretimi ( $B_0$ ) ve kinetik sabit oranı ( $k$ ) arasında güçlü korelasyon vardır. BMP değeri, testlerle 5 ile 15 gün arasında tespit edilebilmektedir. Fakat geliştirilen güçlü bir kinetik modelle substratın biyokimyasal metan potansiyeli doğru bir şekilde tespit edilebilir [14].

BMP incelendiğinde biyobozunurluk hızı önemlidir. Tek substratın kullanıldığı sistemlerle karışık substratın kullanıldığı sistemler karşılaştırıldığında, karışık sistemlerin biyobozunurluğunun daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Özellikle, farklı substratların her bir fraksiyonu uygun yüzdelere kombine edildiğinde bu görülür. Karbon:Azot (C:N) oranına optimum aralığı 20:1-30:1'dir. Karbon:Fosfor (C:P) oranı da benzer sonuçlar verir. Bu nedenle substratın biyolojik olarak bozunabilirliği C:N:P oranına bağlıdır. Daha yüksek biyogaz ve enerji üretimi açısından bu değerler önemlidir [15].

Karışık substratın kullanıldığı (örneğin, uçucu külün belediye katı atıklarıyla birlikte değerlendirilmesi gibi) çalışmalar yapılırsa da modellenmesi üzerine çok fazla çalışılmamıştır. Geliştirilen Gompertz modeli ile uçucu külün simülasyonu ve inhibisyonu sonucu oluşacak metan potansiyeli modellendiğinde bu durumun biyokimyasal metan birikimini artırdığı gözlemlenmiştir [16].

Yağ tutucu çamuru ve kentsel organik atık çeşitli fraksiyonlarda birlikte kullanıldığında arıtma çamurunun biyokimyasal metan potansiyeli artar [17].

Farklı atıksuların biyokimyasal metan potansiyeli incelenirse; büyük granül boyutu ve dengeli bir besin içeriği, biyokimyasal metan verimliliğini artırır. Başlangıçtaki KOİ ve farklı substratlar, maksimum spesifik metan oranları üzerinde güçlü bir etkiye sahipken; farklı granül boyutları, gecikme fazı süresi üzerinde bir etkiye

sahiptir. Çoğu durumda, deneysel verileri geleneksel Modifiye Gompertz denklemi ve Monod modelleri ile temsil etmek yeterli olmuştur [18].

Modifiye Gompertz modeli balık atıklarının anaerobik arıtma sürecini tanımlamak için en iyi modeldir. Balık atığının sürekli beslemeli anaerobik arıtımı için minimum 13 günlük HRT (hidrolik bekletme süresi) önerilir. Aynı zamanda balık atığının arıtımı ve maksimum biyogaz geri kazanımı için 50-54 günlük toplam HRT önerilmektedir. Kümes ve büyükbaş hayvan gübresi ile çalışan biyogaz tesisinden metan üretimi, yardımcı substrat olarak balık atığı ilave edilerek arttırılabilir [19].

On iki çeşit gıda atığı ve 5 ayrı biyokimyasal metan potansiyel hesaplama modeli (Üstel, Fitzhugh, aktarım fonksiyonu, Koni ve Modifiye Gompertz modelleri) incelendiğinde tüm organik atıklar ve tüm durumlar için üstel modelin uygun olmadığı anlaşılmıştır. Kinetik parametreler tüm durumlar için yaygın olarak kullanılamaz. Biyogaz tesislerinde biyolojik bozunma organik atığın lipid muhtevası, protein ve uçucu organik katı miktarıyla ilişkilidir [20].

## **1.2 Tezin Amacı**

Bu çalışma kapsamında yapılan deneylerde biyokimyasal metan potansiyeli hem deneysel hem de hesaplamalı olarak çalışılmıştır. Besi maddesi olarak peynir, mezbaha, balık, tavuk gübresi, köpek maması, bisküvi ve sebze atıksularıyla çalışılmış; pH çözünmüş kimyasal oksijen ihtiyacı, kimyasal oksijen ihtiyacı, amonyak azotu, alkalinite, orto-fosfat, uçucu organik katı ve besin/aşı oranı parametreleri hesaplanmıştır.

Biyogaz üzerine yapılan çalışmalarda kullanılan substratların biyokimyasal metan potansiyelinin tespiti projelendirme açısından önemlidir. Standart süreçlerde yapılan çalışmalarla biyokimyasal metan hesabının yapılması uzun günler almaktadır. Teknolojik gelişmelerin ilerlemesiyle hesaplamalı bilimlerde çevre teknolojileri alanında yaygın ve etkili bir şekilde kullanılmaya başlanmıştır. Yapılan literatür araştırmasında, özellikle sebze atıksuyu, köpek maması ve bisküvi atıksuyu gibi potansiyel substrat kaynaklarının biyokimyasal metan potansiyellerinin araştırılmasına yönelik önemli bir eksiklik olduğu görülmüştür. Ayrıca, kullanılan

substratlar ile elde edilen çıktılar için deneysel bir veri tabanı oluşturulmuş ve MATLAB® esaslı modelleme yapılarak literatürdeki bu açığın giderilmesi amaçlanmıştır.

### **1.3 Hipotez**

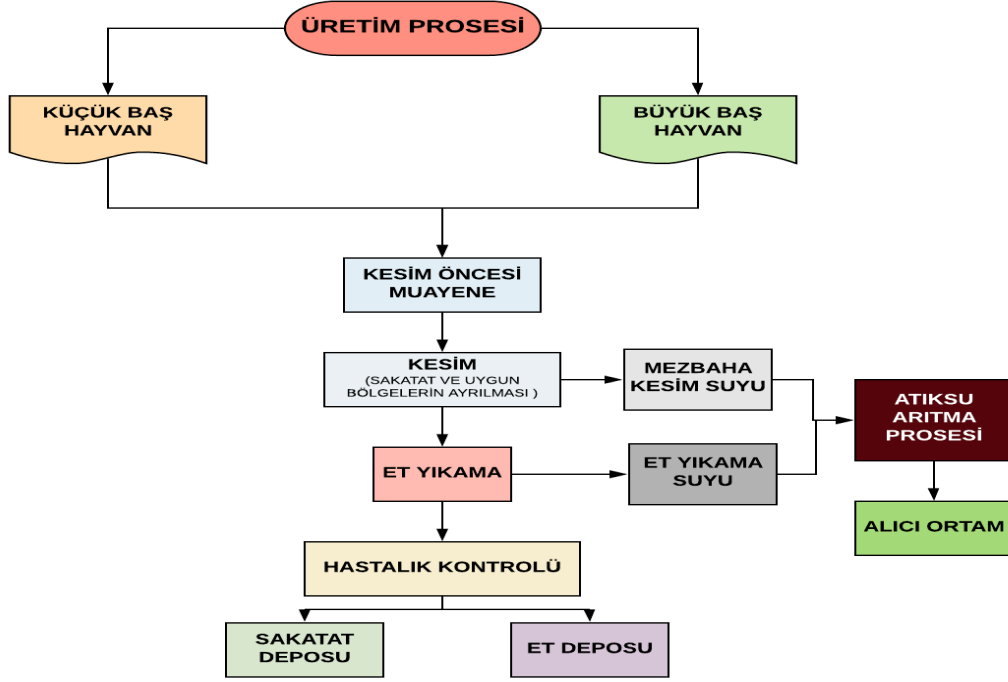
Biyometan potansiyeli biyogaz üretim tesislerinin projelendirilmesi ve işletilmesi açısından önemlidir. Biyogaz üretim prosesinin deneysel veriler ışığında bilgisayar esaslı modellenmesi uzun vadede işletmeler için ekonomik avantaj sağlamaktadır. Projeler için laboratuvarda yapılacak uzun ölçümler yerine tahmin algoritmalarıyla veriler işlenerek malzeme sarfiyatı da minimize edilecektir. Bu çalışmanın hem akademik çalışmalar için hem de işletmeler için kaynak, enerji ve su verimliliği sağlayacak proseslerin kurulmasına katkı sağlaması beklenmektedir.

Biyogaz üretimini etkileyen birçok etken vardır. Kullanılan besi maddesi, uçucu organik katı madde oranı, pH değeri, organik ve hidrolik bekleme süresi, besin/aşı oranı gibi değerler sistemin verimliliğini önemli ölçüde etkiler. Yapılan laboratuvar çalışmalarında gıda endüstrisinde yaygın olarak açığa çıkan atıksular (peynir, mezbaha, sebze, köpek maması, balık ve tavuk gübresi) üzerinde çalışılarak biyometan potansiyel üretimi için kimyasal oksijen ihtiyacı, pH, uçucu organik katı, amonyak azotu, alkalinite, orto-fosfat ve besi/aşı oranı parametreleri deneylerle elde edilmiştir. Elde edilen çalışmalar literatürle karşılaştırılarak verilerin doğruluğu gözlenmiştir. Sisteme girecek besi maddelerinin biyometan üretim potansiyeli kinetik modeller vasıtasıyla MATLAB® programı kullanılarak değerlendirilmiştir.

Endüstriyel atıksu, tipik olarak endüstriyel bir imalat proseste suyun kullanılması veya bu işlemle birlikte gerçekleşen temizlik faaliyetleri sırasında suda çözünmüş veya askıdaki maddelerden kaynaklanan sulu atıktır. Endüstriyel atıksu arıtımının amacı, çözünmüş veya askıda maddeleri uzaklaştırarak [21] atıksuyun deşarj limitlerini sağlamaktır. Endüstriyel atıksu kaynaklı su ve toprak kirliliğini azaltmak hatta ortadan kaldırmak sürdürülebilir bir çevresel yönetim anlayışı benimsenmesi açısından oldukça önemlidir. Bu çalışma kapsamında literatür boşluğunu gidermek amacıyla, deneysel veri tabanı oluşturulan ve MATLAB® esaslı modelleme yapılan endüstriyel atıksu kaynakları; mezbaha, peynir, balık, köpek maması, gübre, bisküvi ve sebze atıksularıdır.

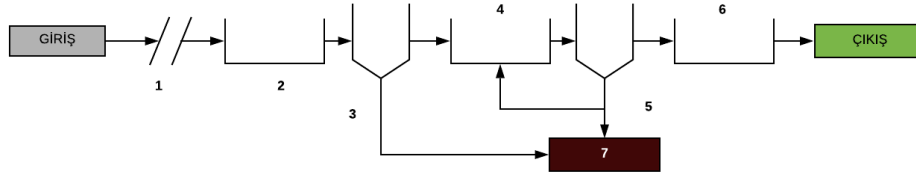
### **2.1 Mezbaha Endüstrisi**

Dünya çapındaki tarım ve hayvancılık sektöründe kullanılan tatlı suyun %29'unu et üretim ve işleme endüstrisi kullanmaktadır. Son on yılda, nüfusun hızla artmasına bağlı olarak küresel çaptaki sığır eti, domuz eti ve kümes hayvanları et üretimi iki katına çıkmıştır. Sektörün 2050 yılına kadar istikrarlı bir şekilde büyümesi beklenmektedir. Bu büyümeyle mezbaha tesislerinin sayısı artmaktadır. Bu artış da daha yüksek miktarda mezbaha atıksuyu üretilmesiyle sonuçlanacaktır. Şekil 2.1'de örnek entegre et tesisi proses akım şeması verilmiştir.



**Şekil 2.1** Entegre et tesisi prosesi

Mezbaha endüstrisi atıksuları global olarak zararlı kabul edilen atıksulardandır. Atıksu; yağ, protein, lif gibi yüksek organik içerikle patojenlerden ve veterinerlik amaçlı kullanılan ilaçların kompleks bileşiminden oluşur. Mezbaha atıksuları büyük miktarda biyokimyasal oksijen ihtiyacı (BOİ), kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ), toplam organik karbon (TOK), toplam azot (TA), toplam fosfor (TF) ve toplam askıda katı madde (TAKM) içerir [21]. Mezbaha atıksuları, yüksek biyokimyasal metan muhtevasına sahiptir ve biyogaz tesisleri için girdi olarak kullanıma uygundur. Şekil 2.2’de bir entegre et tesisinin atıksu arıtma prosesi akım şeması gösterilmiştir.



1. Izgara, 2. Yağ Tutucu, 3. Ön Çökeltme Havuzu, 4. Havalandırma Havuzu, 5. Son Çökeltme Havuzu, 6. Dezenfeksiyon Havuzu, 7. Çamur Kurutma Yatağı

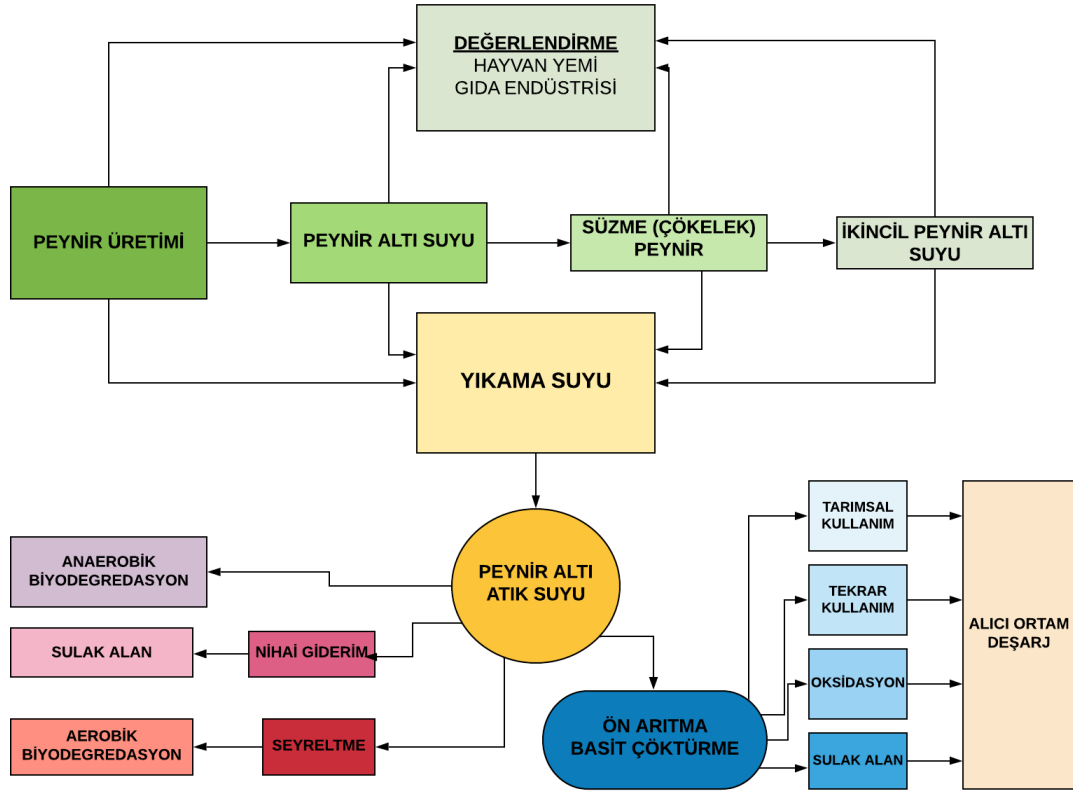
**Şekil 2.2** Entegre et tesisi arıtma prosesi [22]

## 2.2 Peynir Endüstrisi

Süt işlemede su kullanımı anahtar rol oynar. Süt endüstrisinde temizleme-yıkama, dezenfeksiyon, ısıtma-soğutma dahil olmak üzere teknolojik hatların her aşamasında kullanılır su kullanılır. Suyu ihtiyaç çok fazladır.

Bu endüstrideki atıksuyun büyük kısmı üretim proseslerinden gelmektedir. Atıksu, sıhhi faaliyetler dahil olmak üzere süt fabrikasında tüketilen toplam suyun %50-80'iyken, kalan %20-50'si şartlı olarak temizdir. Atıksuyun miktarı ve özellikleri büyük ölçüde fabrika büyüklüğüne, uygulanan teknolojiye, yerinde temizleme, temizleme amaçlı kullanılan yöntemlerinin etkinliği ve karmaşıklığına, iyi üretim uygulamalarına gibi durumlara bağlıdır. Günümüzde hacimsel kirlilik yükü üretilen ton süt başına 1 m<sup>3</sup> atıksudur.

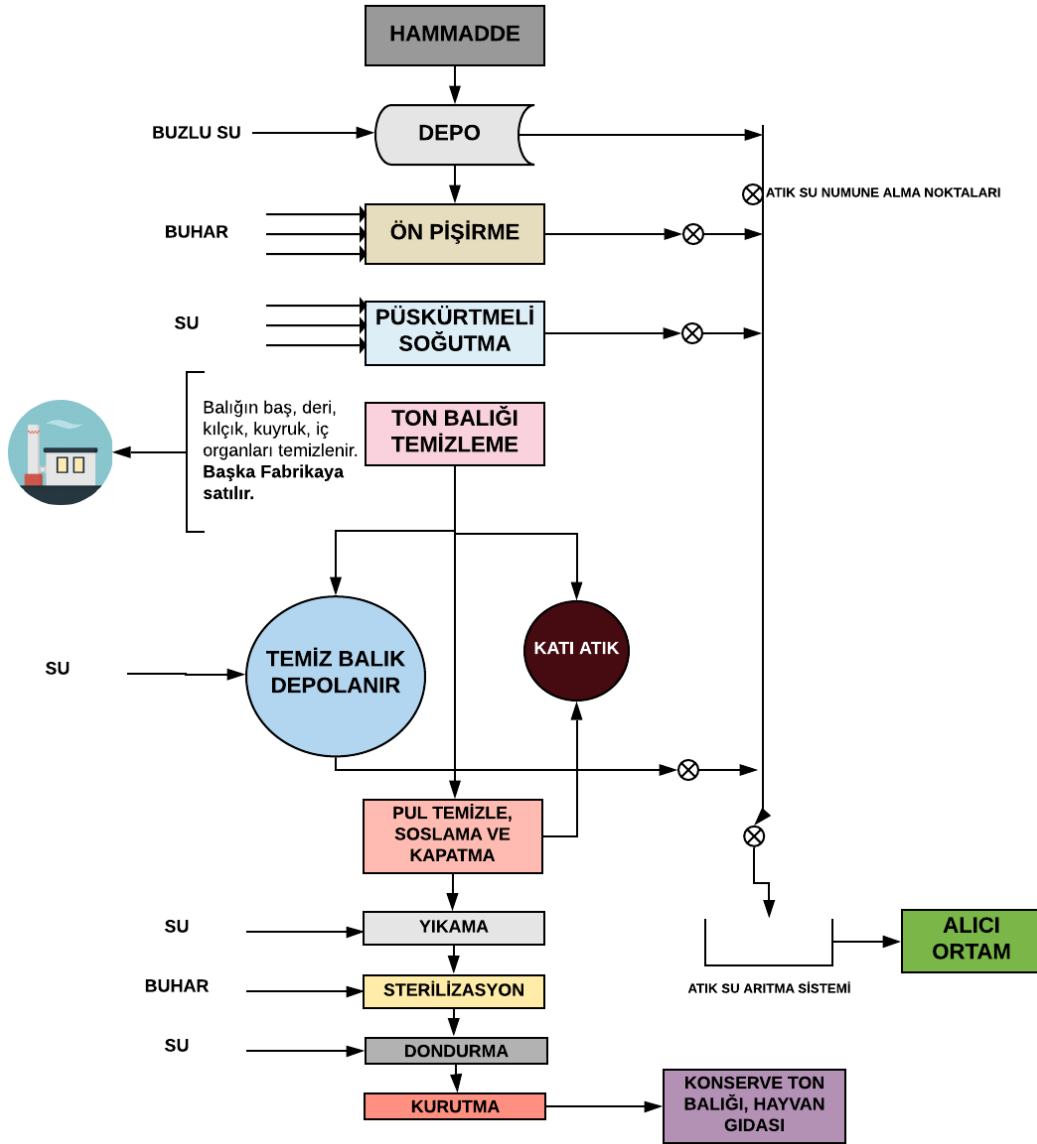
Her süt ürünü ayrı teknolojik üretim hattına ihtiyaç duyduğu için süt fabrikalarında atıksu kalitesi ve miktarı değişkenlik göstermektedir. Üretimden kaynaklı büyük dalgalanmalar atıksu arıtımı için sorunlara yol açmaktadır. Fabrika içi atıksu arıtma tesislerinin çalışmasını engelleyen üretim sürecinde yeni bir döngünün başlamasıyla süt çıkış suyu bileşimi değişkenlik gösterir. Kirletici süt atıklarının gerçek konsantrasyonu, şirketin profiline ve kapasitesine, üretim teknolojisine, kullanılan ekipmanın türüne, atıksuyun yeniden kullanım derecesine, hammadde kaybına, atık yönetimine bağlıdır. Peynir endüstrisi atıksuları yüksek organik atık içerir ve biyolojik atıksu giderimi için uygundur [23]. Şekil 2.3'de bir peynir üretim tesisinin proses akışı diyagramı verilmiştir.



Şekil 2.3 Peynir endüstrisi üretim akış diyagramı [24]

## 2.3 Hayvansal Gıda Endüstrisi

Sera gazlarına neden olan metanın en büyük kaynağı organik atıklardır. Organik atıkların sistemli ve etkin şekilde bertarafı çok önemlidir. Bu sebeple, evcil hayvan gıda endüstrisi temiz üretimde önemli bir noktadadır. Çünkü mezbaha atıkları; kan, tüy, akciğer ve atılan hayvanlar, bertarafı bunların evcil hayvan gıdası üretiminde kullanılmasıyla gerçekleşir. Böylece bu yan ürünler yenilebilir ürünlere dönüştürülürler [25]. Artan sağlıksal ve çevresel endişeler nedeniyle bu yan ürünlerin daha iyi kullanılmasını sağlamak için çalışılmaktadır. Mezbahe artık sularının organik kirlilik yükü yüksektir ve anaerobik olarak bozunabilirler. Arıtma sistemleri kirletici organik yükün giderimi, patojenik mikroorganizmaların uzaklaştırılması, biyogaz ve daha kararlı biyogübre üretimi amacıyla tasarlanırlar [26]. Şekil 2.4'te konserve ton balığı mama üreten bir hayvan gıda üretim tesisinin akış diyagramı verilmiştir.



**Şekil 2.4** Hayvansal gıda endüstrisi prosesi (konserve ton balığı) [27]

## 2.4 Balık Endüstrisi

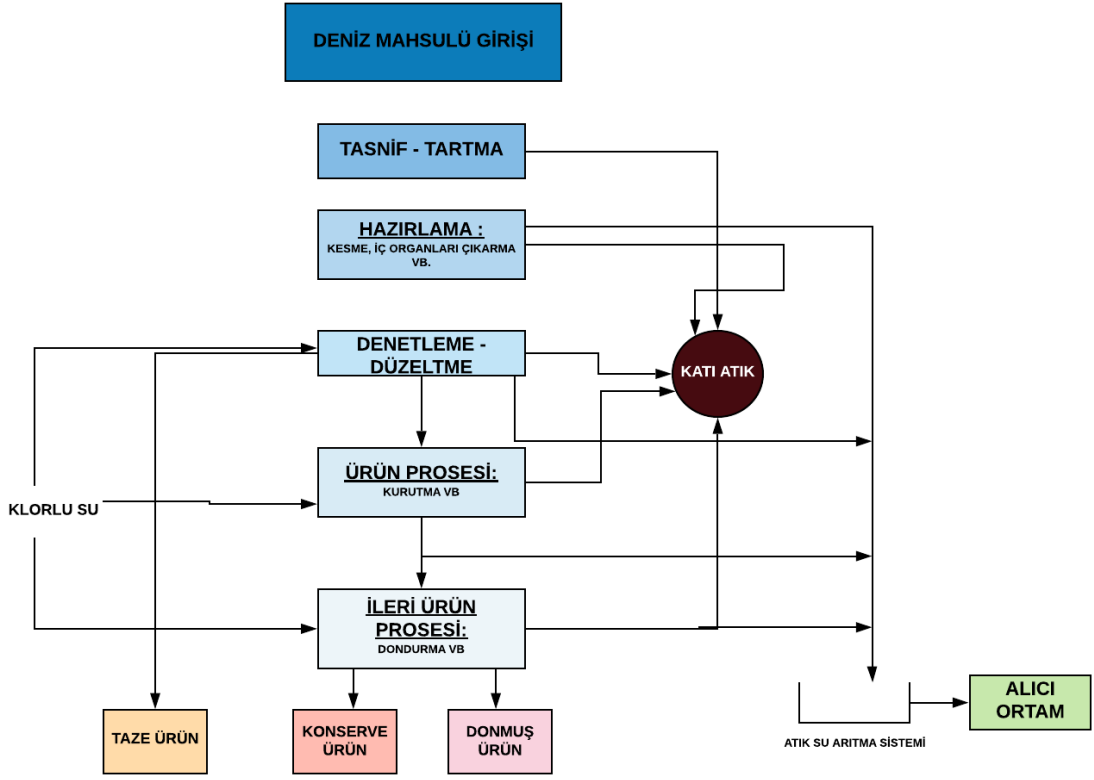
Global gıda endüstrisinde balık ve balıkçılık ürünleri en çok işlem gören segmentlerinden birini temsil etmekte olup, deniz ürünleri üretiminin yaklaşık %78'inin uluslararası ticaret rekabetine maruz kaldığı tahmin edilmektedir. 2012 yılında yaklaşık 200 ülke balık ve balıkçılık ürünleri ihracatı rapor etmiştir. Balıkçılık ticareti, özellikle gelişmekte olan ülkeler için önemlidir. Bu endüstri bazen ticareti yapılan malların toplam değerinin yarısından fazlasını oluşturur. Balık

endüstrisi toplam tarım ihracatının yaklaşık %10'unu ve dünya mal ticaretinin %1'ini değer olarak temsil etmektedir.

Balık endüstrisi hem yüksek arıtma maliyetleri hem de geleneksel atıksu arıtma tesislerinin işletilmesinde sorunlarla karşı karşıyadır. Bu operasyonel problemler yüksek organik yükleme, yüksek tuz içeriği ve kötü koku ile bağlantılıdır. Atıksu, karbonlu bileşiklerden ve azot içeren bileşiklerden (protein, peptit ve uçucu aminler) kaynaklanan yüksek organik besin maddesine sahiptir. Ek olarak, atıksu askıda katı madde, çeşitli mikroplar ve değişken pH içerebilir. Bu endüstriyel atıksuyun bir diğer önemli yönü yüksek tuzluluğudur.

Genel olarak, balık işleme atıksuyu kimyasal ve fiziksel özellikleri ile karakterize edilebilir. Yüksek kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ) ve organik azot konsantrasyonlarının varlığı balık işlemede atıksuyu karakterize eder. Atıksuyun önemli kirletici parametreleri; pH, biyokimyasal oksijen ihtiyacı (BOİ<sub>5</sub>), KOİ, amonyak azotu (NH<sub>3</sub>-N), nitrat azotu (NO<sub>3</sub>-N), fosfor (P), sıcaklık, koku, renk ve katı içerik gibi parametreler. Balıkların işlediği atıksu bakteriyel çürümeye maruz kalır, ağır kirliliğe ve kötü kokuya neden olur. Bunlar ekosistem için oldukça tehlikeli kirlilik yükleridir [28].

Balık işleme atıksuyunun etkilerinin mekansal ve zamansal ölçeği, atık üretiminin miktarına ve niteliğine bağlı olarak değişebilir. Balık işleme endüstrilerinden gelen atıksular genellikle bir yıl boyunca üretilir [29]. Şekil 2.5'de deniz mahsülleri üretimi yapan bir tesisin üretim akış diyagramı bulunmaktadır.



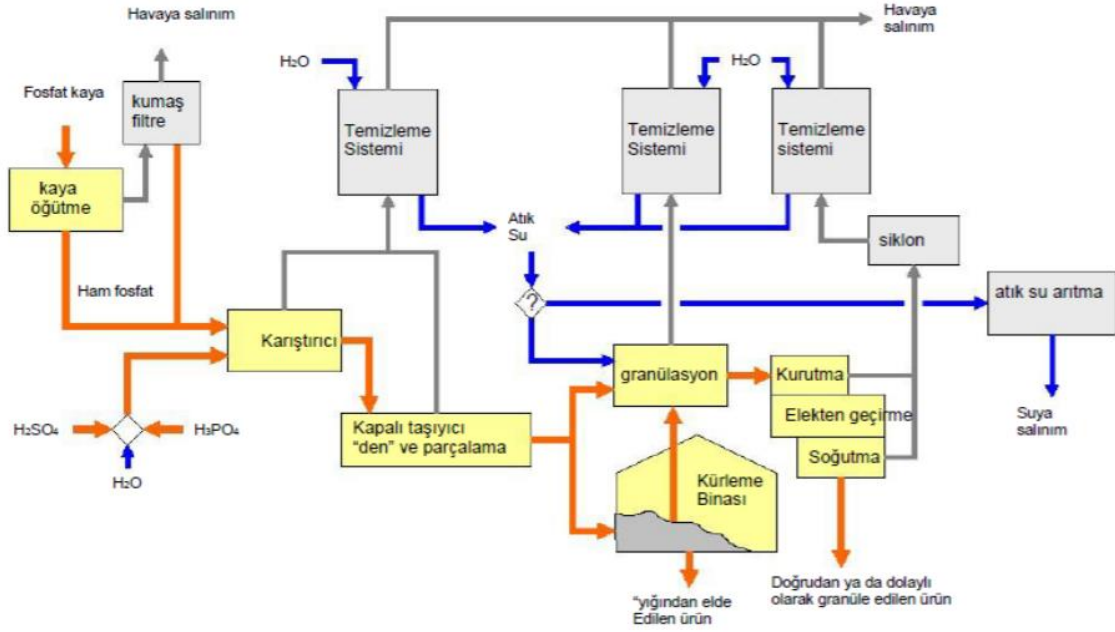
Şekil 2.5 Deniz ürünleri endüstri prosesi [30]

## 2.5 Gübre Endüstrisi

Endüstriyel atıksu arıtımı; gübre, damıtma, boya-pigment, tekstil-özel kimyasal üretim gibi yüksek derecede kirleten kimya endüstrileri için karmaşık bir sorundur. Genel olarak endüstriyel atıksular, kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ), amonyak azotu (AA), toplam askıda katı madde (TKM) ve toplam çözünmüş katı madde (TÇKM) gibi kirletici parametrelerden oluşur.

Gübre endüstrisi, özellikle tarımsal ekonominin önemli olduğu ülkeler için değerli bir imalat sektörüdür. Tarım sektöründe azot, fosfor ve potasyum (N, P, K-azotlu, fosfat ve potasyum gübreleri) gibi besinleri içeren çeşitli gübreler kullanılmaktadır. Tipik bir gübre endüstrisi kompleks, amonyak bileşimlerini (azotlu gübreler için gerekli), fosforik asit / nitrik asit gibi asitleri, alkol gibi çözücüler ve farklı gübre birimlerini içermektedir. Bu nedenle üretilen atıksular kaynağına bağlı olarak önemli kimyasal oksijen ihtiyacı ve amonyak azotu içeriğine sahip olmasına göre

karakterize edilir. Kimyasal gübre üretim tesisleri için atıksu arıtma, çevre kirliliği açısından önemli bir sorundur [31]. Şekil 2.6’da kimyasal gübre üretimi yapan bir tesisin üretim akış diyagramı verilmiştir.

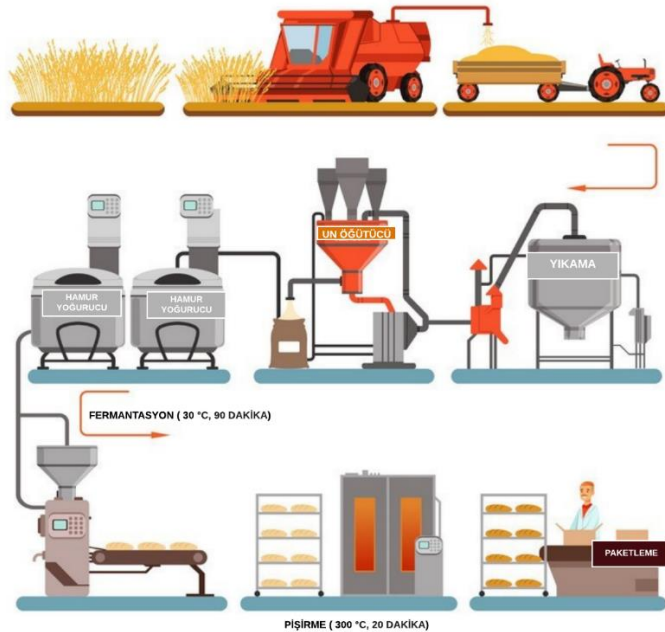


**Şekil 2.6** Süper fosfat gübre üretim genel prosesi (atık gaz arıtma sistemi dahildir) [32]

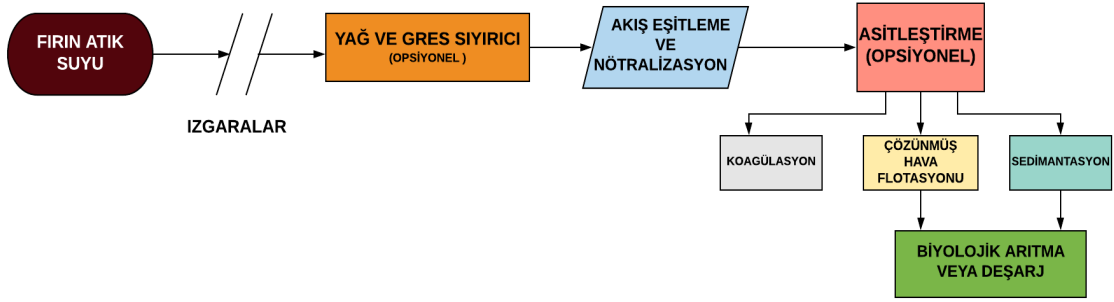
## 2.6 Şekerleme-Bisküvi Endüstrisi

Şekerleme endüstrisi; lokum, yumuşak-dolgulu-dolgunsuz şeker, çikolata, gofret, bisküvi, şekerli-şekersiz sakız, jelibon, draje, ezme gibi şekerleme ürünlerini üreten kuruluşları kapsar. Şekerleme endüstrisinde kullanılan su miktarının yüksektir ancak oluşan atıksu miktarı düşüktür. Bu atıksuların yüksek kirlitici konsantrasyonuna sahip olması nedeniyle bu endüstrinin çevreye verdiği organik ve inorganik kirlilik yüksektir. Bu nedenle atıksuların arıtılması çevre için çok önemlidir. Şekerleme-bisküvi endüstri dalında faaliyet gösteren tesislerden kaynaklanan atıksular genellikle asidik karakterde olup, yüksek organik madde içerikli ve nürient açısından fakir bir yapıya sahiptir. Şekerleme endüstrisinde kullanılan ana hammaddeler; şeker, glikoz, su ve çeşitli türde tat ve koku veren katkı

maddeleridir. Bunun yanında çeşitli yaş ve kuru meyveler, ana hammaddelerden hazırlanmış şurupla kaplanmak üzere kullanılabilir. Bisküvi, dünya genelinde olduğu gibi ülkemizde de yüksek miktarlarda tüketilebilen ve genellikle tüketiciler tarafından çikolata ve diğer benzeri ürünlere göre daha sağlıklı olduğu kabul edilen önemli unlu mamullerden biridir. Besin kalitesi bakımından nispeten iyi, doyurucu ve düşük maliyetli bir ürün olan bisküvinin tüketimi bu özelliklerinden dolayı artmaktadır. En basit ifade ile bisküvi “tahıl ürünlerinin kimyasal yollardan fermente edilip kabartılarak pişirilmesiyle elde edilen hububat ürünü” olarak tanımlanmaktadır. Bisküvi ve kraker ürünleri düşük düzeyde nem oranına (%1-5) sahip olmasından dolayı ısıtma işlemi görmüş tahıl ürünleri arasında önemli bir yere sahiptir. Bu düşük nem içeriği bisküvileri genel olarak mikrobiyolojik bozulmalardan korumakta ve çevreden nem almamak şartıyla uzun raf ömrü sağlamaktadır [33]. Üretimin fazla olmasına rağmen bisküvinin bu özellikleri üretim aşamasında su tüketimini göstermesi açısından önem taşımaktadır. Şekil 2.7’de bir fırın endüstrisine ait üretim akış diyagramı ve Şekil 2.8’de atıksu arıtma proses diyagramı verilmiştir.



**Şekil 2.7** Ekmek üretim prosesi akış diyagramı



**Şekil 2.8** Fırın atıksuyu giderim prosesi [34]

## 2.7 Meyve ve Sebze Endüstrisi

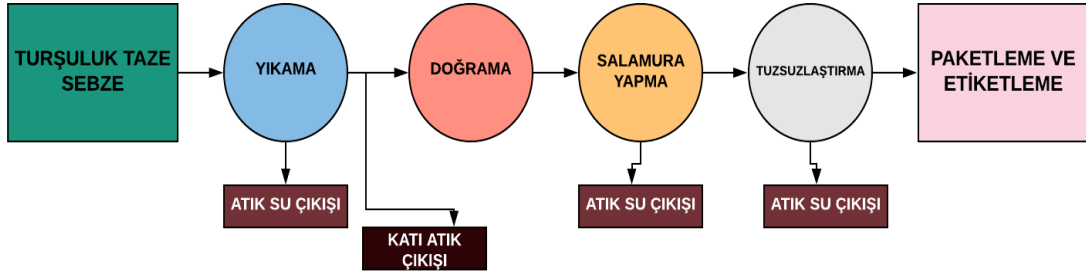
Meyve ve sebze işleme esas olarak Haziran ve Ekim ayları arasında gerçekleşen mevsimsel faaliyetlerle karakterizedir. Endüstrideki faaliyetlerin %88'i meyve ve sebzelerin işlenmesi ve saklanması ile ilgili faaliyetleri, geri kalan %12'si meyve suları ve içecek üretimi ile ilgilidir. İşlenmiş malzemelerin özgüllüğü ve çeşitliliği göz önüne alındığında, meyve ve sebze endüstrisinden gelen atıksuyun karakterize edilmesi zordur. Atıksuyun en yüksek miktarda çıktığı aşama, üretimin ilk aşamasıdır.

Meyve ve sebzelerin yıkanmasından kaynaklanan atıksu genellikle bir kez kullanılır. Daha büyük tesislerde, ilk aşamada kullanılan su eleklerde önceden arıtılır ve tüm meyve-sebze lotlarını yıkadıktan sonra kanalizasyona atılır. Sonraki aşamada bu yeni su partisi ile değiştirilir.

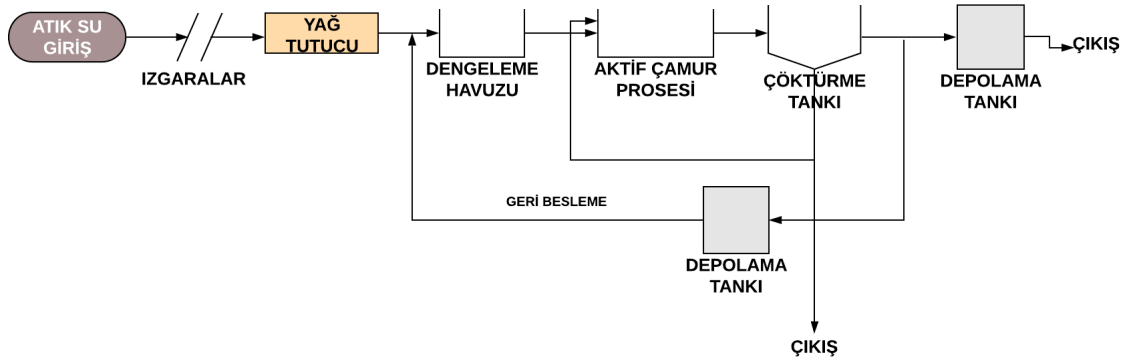
Meyve ve sebze endüstri tesislerinde üretilen atıksu, yüksek miktarda karbonhidrat ve mineralin yanı sıra hammaddeye ve mevsime bağlı olarak değişken bileşim ile karakterizedir. Bu atıksu bileşimi yıkama ve hat dezenfeksiyon işlemlerinden de etkilenir. İşlenen ham maddenin türüne ve uygulanan teknolojiye bağlı olarak atıksuyun katı, kolloidal ve çözünmüş kirletici madde miktarı değişkenlik gösterir. Aynı zamanda, atıksuya nüfuz eden yıkama ve dezenfeksiyon maddelerinin miktarlarını belirlemek zordur.

Atıksuyun açığa çıktığı üretim basamakları; hammadde yıkama, saflaştırma, soyma, ağartma, soğutma (soğutma sonrası ortam) veya doldurmadır. Atıksu bileşimi ve miktarları ayrıca şunlara da bağlıdır: tip, kalite, kurulum ve bir pulun boyutu,

hammadenin tipi ve kökeni. Meyve ve sebze işlenmesinden kaynaklanan atıksu azot bakımından yetersizdir ve ana kirleticisi organik maddedir [35]. Şekil 2.9'da turşu üretim tesis prosesinin akış diyagramı ve Şekil 2.10'da de tarımsal ürünlerin atıksu giderim prosesine örnek diyagram verilmiştir.



Şekil 2.9 Turşu endüstri prosesi [36]



Şekil 2.10 Tarım endüstrisi atıksu arıtma prosesi örneği [37]

### **3.1 Anaerobik Arıtmanın Temelleri**

Anaerobik (oksijensiz) arıtma, mikroorganizmalar yardımıyla biyolojik ve fiziko-kimyasal reaksiyonlardan oluşan askıdaki organiklerin ve kompleks organiklerin oksijensiz ortamda ayrışmasıyla oluşan biyolojik prosestir. Seri ve paralel çok adımdan oluşabilen bu proses temelde iki aşamadan meydana gelmektedir. Birinci aşama hidroliz ve fermentasyonun gerçekleştiği aşamadır. Birinci aşamada polisakkarit, karbonhidrat, protein ve lipid gibi kompleks yapılar enzimler yardımıyla hücre zarından geçebilecek boyutlara parçalanır. Görece küçük ve çözünebilen bu bileşikler oksijensiz oksidasyonla veya fermentasyonla kısa zincirli organik asitlere, alkole ve CO<sub>2</sub>'e dönüşürler. İkinci aşamada ise asit bakterileri önceki aşamada oluşan ürünleri parçalayarak Metan, H<sub>2</sub> ve CO<sub>2</sub>'a dönüştürür. Burada oluşan H<sub>2</sub> ve CO<sub>2</sub>'de sentez yoluyla metana dönüşmektedir. Anaerobik arıtmada oluşan metanın yaklaşık %70'i asetik asit (CH<sub>3</sub>COOH), geri kalan yaklaşık %30'u da karbondioksit ve hidrojenin sentezi (H<sub>2</sub> + CO<sub>2</sub>) yoluyla oluşur [38].

Anaerobik prosesler sonucu oluşan metanın kalorifik değeri yüksektir ve alternatif enerji kaynağı olarak kullanılabilir. Bu proseste kullanılan organik atığın karışık bileşiklerden oluşması, oksijensiz ortamda parçalanma hızı, reaktörde kullanılan bakterilerin türü, sıcaklık, pH ve substratın dönüşüm verimi gibi faktörler oluşan ürünün üretim verimini etkilemektedir.

### **3.2 Biyogaz**

Biyogaz, biyokütleden enerji üretimi için kullanılabilen çok amaçlı ve çevre dostu bir stratejidir. Kompleks organiklerce zengin olan hayvansal atıklar, tarımsal atıklar veya özel yetiştirilen bitkiler olmak üzere her türlü organik atık mikroorganizmalara oksijensiz parçalanarak, yanıcı metan ve karbondioksit gaz karışımı üretilir. Oluşan bu gaz, alternatif temiz yakıt olarak kullanılmak üzere depo edilir [39].

### 3.2.1 Biyogazın Özellikleri

Biyogaz; organik atıkların mikroorganizmalar tarafından oksijensiz ortamda parçalanması sonucu oluşan renksiz, kokusuz ve açık mavi bir alevle yanan, havadan yaklaşık %20 daha hafif olan bir gazdır. Isıl değeri yaklaşık 20 MJ/ m<sup>3</sup>, tutuşma sıcaklığı 650 °C – 750 °C aralığında, yoğunluğu 0,83 g/L, yaklaşık oktani 110 olan bir gazdır. Bu gazın içeriği substratın içeriğine ve fermentasyon yöntemine göre değişiklik gösterir. Genel olarak gaz karışımı %40-70 metan, %30-60 karbondioksit, %0-3 hidrojen sülfür ile çok az miktarda azot ve hidrojenden oluşmaktadır. Yanma verimi %60 oranındadır [40]. Tipik biyogaz bileşimi Tablo 3.1’de verilmiştir.

**Tablo 3.1:** Biyogazın bileşimi [41]

| GAZIN CİNSİ                        | YÜZDE BİLEŞİMİ |
|------------------------------------|----------------|
| Metan (CH <sub>4</sub> )           | 54-80          |
| Karbondioksit (CO <sub>2</sub> )   | 20-45          |
| Azot (N <sub>2</sub> )             | 0-1            |
| Karbondioksit (CO)                 | 0,1            |
| Oksijen (O <sub>2</sub> )          | 0,1            |
| Hidrojen Sülfür (H <sub>2</sub> S) | Az Miktarda    |

Fermentasyon sıcaklığının düşük olması oluşan biyogazdaki metan oranının yüksek olmasını sağlar fakat açığa çıkan gaz miktarı düşük olacağı için verim düşük olur. Bunun yanında biyogaz çıkışı yükseltilmeye çalışılırsa da içeriğindeki metan oranı düşeceği için yanma verimi düşük olur. Biyogaz bileşimine bakıldığında metan gazının ısı değeri yaklaşık 8900 kcal/m<sup>3</sup>tür. Gazın içeriğine göre biyogazın ısı değeriye ortalama 4700-5700 kcal/m<sup>3</sup> arasındadır. Gaz bileşimindeki metanın oranı eğer %50’nin altına düşerse metan verimli şekilde yanmayacaktır. Bazı organik atıkların metan gazı yüzdeleri ve biyogaz verimleri Tablo 3.2’de verilmiştir.

**Tablo 3.2** Çeşitli Atıkların Biyogaz Üretim Verimi ve Metan Üretim Oranı [42]

| <b>Atıklar</b>              | <b>Biyogaz Verimi<br/>(litre/kg)</b> | <b>Metan Gazı Miktarı<br/>(hacim %)</b> |
|-----------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------------|
| Sığır Gübresi               | 90-310                               | 65                                      |
| Kanatlı Gübresi             | 310-620                              | 60                                      |
| Domuz Gübresi               | 340-550                              | 65-70                                   |
| Çimen                       | 280-550                              | 70                                      |
| Buğday Samanı               | 200-300                              | 50-60                                   |
| Çavdar Samanı               | 200-300                              | 59                                      |
| Arpa Samanı                 | 290-310                              | 59                                      |
| Mısır Sapları ve Artıkları  | 380-460                              | 59                                      |
| Keten -Kenevir              | 360                                  | 59                                      |
| Deniz Yosunu                | 420-500                              | 63                                      |
| Sebze Artıkları             | 330-360                              | Değişken                                |
| Ziraat Artıkları            | 310-430                              | 60-70                                   |
| Dökülmüş Ağaç<br>Yaprakları | 210-290                              | 58                                      |
| Atıksu Çamuru               | 310-800                              | 65-80                                   |

Biyogaz üretimi son yıllarda özellikle Avrupa ve Kuzey Amerika’da yaygın olarak kullanılmaktadır. Alternatif yakıt olarak kullanılan biyogaz organik atık ve atık çamur bertarafı amacıyla da birleştirilerek çevreye yaralı bir sistem haline getirilmiştir. Çevre ve insan sağlığına zarar veren fosil yakıtlara seçenek oluşturması açısından biyogaz üretim tesisleri işletilmeye ve yaygınlaşmaya devam edecektir.

Temelde her türlü organik malzemenin mikroorganizmalar tarafından sindirilmesi sonucu oluşan biyogaz, son yıllarda üretim yöntemlerinin gelişmesiyle daha verimli hale gelmiştir. Bu gelişmelere bağlı olarak bilinen organik malzemeler dışında kullanılan bitkisel kökenli malzemeler daha rahat sindirilebilir ve biyogaz üretebilir hale gelmiştir. Biyogaz üretiminde kullanılan organik substratlar; hayvansal atıklar, tarımsal atıklar ve bitkisel yağ kalıntılarıyla konutlardan gelen organik atıklara kadar uzanmaktadır. Üretimden kullanılan substrat ne olursa olsun açığa çıkan gaz aynıdır ve oksijensiz fermentasyon yöntemiyle üretilir [42]. Yakıt türlerinin biyogazla karşılaştırılması Tablo 3.3'te yer almaktadır.

**Tablo 3.3:** Biyogaz ve çeşitli yakıt türlerinin karşılaştırılması [43]

| <b>Yakıt türü</b> | <b>Birimi</b>  | <b>Enerji Değeri (MJ)</b> | <b>Yanma Verimi (%)</b> | <b>Kullanılabilir Enerji (MJ)</b> | <b>Biyogaz Enerji Eşdeğeri</b> |
|-------------------|----------------|---------------------------|-------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|
| Biyogaz           | m <sup>3</sup> | 20                        | 60                      | 11,8                              | 1 m <sup>3</sup>               |
| Elektrik          | kWh            | 3.6                       | 70                      | 2.5                               | 4.7 kWh                        |
| Gazyağı           | L              | 38                        | 50                      | 19                                | 0.62 L                         |
| Bütan             | kg             | 46                        | 60                      | 27.3                              | 0.43 kg                        |
| Kömür             | kg             | 29                        | 28                      | 8.1                               | G                              |

### 3.2.2 Biyogazın Kullanım Alanları

Biyogaz kullanım şekilleri;

- Doğrudan yakma
- Alkole dönüştürme
- Metan gazına dönüştürme [40].

Teknik olarak Likit Petrol Gazı (LPG), doğal gaz ve propanın kullanıldığı tüm alanlarda küçük donanımsa değişikliklerle biyogaz kullanılarak enerji sağlanabilir. Gaz yakıtlarla ısınan fırın ve ocaklarda biyogaz kullanılabileceği gibi şofben ve termosifonlarda da kullanılabilir. Biyogaz kullanılırken içeriğinde bulunan hidrojen sülfür yanarak kükürt dioksit oluşturur. Kükürt dioksit su buharıyla birleşerek sülfürik asit oluşumuna neden olur. Sülfürik asit korozyon olduğu için kullanılan motorları ve kazanları aşındırabilir. Bu nedenle, biyogaz kullanımında kullanılan makine ve ekipmanların korozyona uğramaması için fermetörle farklı yerlerde konumlandırılmalıdır. Biyogaz yakıtıyla çalışan ekipmanların sürekli çalışması suyun yoğunlaşmasının ve sülfürik asit oluşmasının engellenmesini ekipmanda sıcaklığı yüksek tutarak sağlar. Bu durumda korozyon gecikir. Hava ve biyogazın yedi de bir oranında karışması sonucu tam yanma gerçekleşir.

Direkt gaz olarak ya da elektrik enerjisine çevirerek biyogaz kullanılabilir. Doğrudan aydınlatma amacıyla kullanılan biyogaz sıvı petrol gazıyla çalışan lambalarda kullanılır. Benzinli motorlarda doğrudan katkı maddesi almadan ya da metan gaz saflaştırılması sonucu da biyogaz kullanılabilmektedir [42,43].

Biyogaz uzun yıllar köylerde ısınma, yemek pişirme, elektrik eldesi, aydınlatma ve makine çalıştırmak amacıyla ucuz enerji olarak kullanılır. Biyogaz; petrol, kömür ve elektrik kullanımı konusunda ülkenin yüksek miktarda tasarruf etmesi ve endüstriyel gelişmesine katkı sağlaması açısından yüksek katma değeri olan bir gazdır. Ek olarak, biyogaz sayesinde gübrelerin etkinliği artar, kaynağı genişler, tarıma dayalı üretim gelişir ve parazit yumurtaları yok edilerek çevrenin iyileşmesi sağlanır [44].

### **3.2.3 Biyogaz Üretim Sistemleri**

#### **3.2.3.1 Batch Fermentasyon Sistemi**

Batch (Kesikli) Fermentasyon tesisinde yapılan biyogaz üretimi, bitkisel ya da hayvansal organik atıkların mikroorganizmalarla fermentasyonu sonucu yapılır. Organik atıkların alıkonulma süresi kadar atıklar bekletilir. Substratın tipine ve sistem sıcaklığına göre bekleme süresi değişkenlik gösterir. Bekletme süresi sonrası fermentör (reaktör) boşaltılır ve sonraki üretim için yeni substrat ile doldurulur.

#### **3.2.3.2 Beslemeli-Kesikli Fermentasyon Sistemi**

Beslemeli-kesikli (yarı sürekli) fermentasyon sisteminde başlangıç aşamasında belirli oranda organik atıklar konulur. Reaktörde kalan hacme ise fermentasyon süresince günlere bölünerek belirli miktarda organik atık takviye edilmektedir. Fermentasyon süresi sonuna gelindiğinde fermentör boşaltılır ve sonraki üretim için organik atıkla doldurulur.

#### **3.2.3.3 Sürekli Fermentasyon Sistemi**

Reaktör substrat konularak çalıştırılır. Reaktörde gaz çıkışı gözlemlendiğinde sisteme günlük substrat beslemesi yapılır. Sisteme eklenen karışım kadar sistemden dışarıya tortu alınır. Biyogaz üretimi için organik atık madde her gün belirli oranda sisteme verilir, alıkoyma süresince bekletme yapılır ve konulan oran kadar fermente olan ürün günlük olarak reaktörden dışarıya alınır. Bu şekilde sürekli çalışan bir sistem yaratılmış olur [43].

### **3.2.4 Biyogaz Üretiminin Faydaları**

Bitkisel ya da hayvansal organik atıklar genellikle doğrudan yakılır veya doğal gübre olarak tarımsal üretimde kullanılır. Bu organik malzemelerin yakılarak ısı amaçlı kullanımı yaygın olarak gözlemlenmektedir. Böyle üretilen ısının kalitesi düşük ve ısı amaçlı kullanılan organik malzemeden kalan atıklar gübre olarak kullanılamadığı için verimli kullanım yöntemi değildir. Geliştirilen biyogaz üretim sistemiyle ise organik atık materyaller, enerji eldesi için kullanıldıktan sonra geriye kalan tortu gübre amaçlı tarımsal üretimde kullanılabilir.

### 3.3 Mikrobiyoloji

Anaerobik (oksijensiz) arıtma çeşitli mikroorganizmaların görev aldığı kompleks biyokimyasal bir süreçtir. Sistemde çeşitli mikroorganizmalar kullanılsa da başlıca iki grup bakteri asıl işi yapmaktadır. Bunlar; asit ve metan bakterileridir. Bu iki bakteri grubu da ikiye alt gruba ayrılmaktadır. Anaerobik mikroorganizma grupları Tablo 3.4'te verilmektedir [45].

**Tablo 3.4** Anaerobik mikroorganizma grupları [45]

| Başlıca Anaerobik Bakteriler |                                      |
|------------------------------|--------------------------------------|
| Asit Bakterileri             | Bütirik ve propiyonik asit üretenler |
|                              | Asetik asit üretenler                |
| Metan Arkeleri               | Asetik asit kullananlar              |
|                              | Hidrojen kullananlar                 |

Çok kompleks ve heterojen mikroorganizma toplulukları anaerobik reaktörleri çalıştırmaktadır. Bu karışık grupların genetik özelliklerinin tespit edilmesi zordur. Kompleks organik atıkların anaerobik sistemlerde kullanılması genel olarak üç basamaklı proses olarak ele alınır:

- Çözünmüş ve yüksek moleküler ağırlıklı organik materyallerin tespiti,
- Düşük moleküler ağırlığı olan organik materyallerin asit bakterileri tarafından çeşitli yağ asitlerine ve sonrasında asetik asite dönüştürülmesi,
- Asetik asit, H<sub>2</sub> ve CO<sub>2</sub> senteziyle metan üretimi [45].
- Anaerobik proses süresince üretilen enerji mikroorganizmaların hücre yenilemesi ve biyokütle üretimi amacıyla kullanılır.

### **3.3.1 Hidroliz**

Hücre dışı enzimlerinin kompleks organik materyalleri sindirimi sonucu oluşan yavaş prosese hidroliz denir. Sıcaklık, pH ve çamur yaşı reaksiyonun hızını etkileyen önemli parametrelerdir. Anaerobik proseslerde organik atık içeriği hızı sınırlayıcı faktörlerden biridir. Lipidlerin hidrolizi çok yavaş gerçekleştiği için anaerobik proseslerde bu sınırlayıcı olabilmektedir [45]. Çeşitli selülozik yapılar da anaerobik sistemlerde aynı etkiye sahiptir. Lignin özellikle rastgele molekül yapısına sahip olduğu için anaerobik şartlarda ya hidrolize olmaz ya da reaksiyon hızı ciddi oranda düşüktür.

### **3.3.2 Asit Üretimi**

Organik atıklardan asit üretimi gerçekleşirken hidroliz sonucu asetik asit ya da fermentör işletme şartlarının kararlılığı nedeniyle ikiden fazla karbonlu yağ asitleri olan; izo valerik, valerik, butirik, izobutirik ve propiyonik gibi asitler oluşur. Kararlı anaerobik proseslerde yağ asit konsantrasyonları çokça düşüktür (100-300 mg HAc/L). Anaerobik fermentörlerin işletmeye girmesi sırasında uçucu asit konsantrasyonunun 1000-1500 mg HAc/L'yi geçmemesi gerekir [45].

#### **3.3.2.1 Çözünebilir Karbonhidratların Fermentasyonu**

Karbonhidratların fermentasyonu metan bakterilerin bulunmadığı zamanlarda oksijensiz solunum yapan bakteriler sayesinde gerçekleşir. Fermentasyon sonunda açığa çıkan ürünler; etanol, H<sub>2</sub> ve CO<sub>2</sub> olmaktadır. Sistemde H<sub>2</sub> sentezleyen bakteriler varsa eğer etanol indirgenir ve asetat üretiminde artış gerçekleşir [38].

#### **3.3.2.2 Aminoasitlerin Fermentasyonu**

Anaerobik sistemde aminoasit fermentasyonu redoks reaksiyonlarıyla gerçekleşen kompleks bir işlemdir. Anaerobik bakteriler elektron alıcısı olarak aminoasit, ketoasit ve doymamış asitlerle protonları kullanarak indirgenme reaksiyonunu gerçekleştirir. Fermentasyon sonucu açığa çıkan ürünler suksinat asit, hidrojen gazı ve kısa zincirli yağ asitlerdir [38].

### **3.3.2.3 Uzun Zincirli Yağ Asitlerinin Anaerobik Oksidasyonu**

Organik çözücülerle çözünen ve suda çözünemeyen heterojen organik yapılara yağ denir. Yağ asitleri  $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_n\text{COOH}$  genel formuna sahiptir. Bu grup  $\beta$  oksidasyonu ile ayrışır.  $\beta$  oksidasyonu ve asidin  $-\text{COOH}$  kökündeki asetil grupları ardışık koparılacak şekilde asetik asit ile  $\text{H}_2$ 'e dönüştürülür. Oksijensiz  $\beta$  oksidasyonu sayesinde doymuş, 14 ile 18 karbonlu yağ asitleri ilk asetata sonra da  $\text{CO}_2$  ve  $\text{CH}_4$ 'e çevrilirler.

Evsel atıksuyun arıtılması sonucu oluşan arıtma çamurları yüksek oranda lipid ve serbest yağ asiti içermektedir. Uzun zincirli yağ asitleri fermente olarak kısa zincirli yağ asitleri olan asetik asite ya da asetik asitle propiyonik asitte çevrilir [38].

### **3.3.2.4 Kısa Zincirli Yağ Asitlerinin Anaerobik Oksidasyonu**

Kısa zincire sahip yağ asitleri oksijensiz oksidasyona tabii olursa asetat ile hidrojen gazı oluşturur. Asıl karbon ürünleri asetatlar olduğu için reaksiyona asidojenesis denir. Ayrışma işleminin başarılı olabilmesi için sistemde açığa çıkan hidrojen gazlarının etkili giderimi yapılması gerekmektedir.

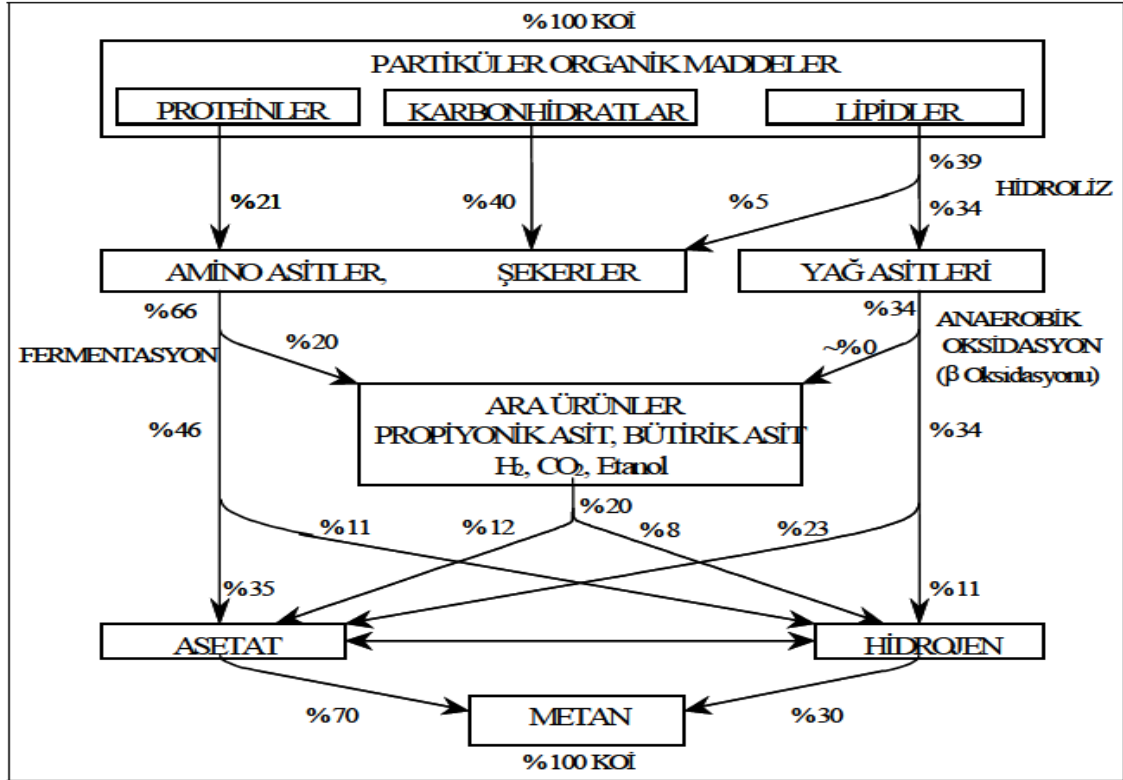
## **3.3.3 Metan Üretimi**

### **3.3.3.1 Asetat, Hidrojen ve Karbondioksit Senteziyle Metan Üretimi**

Metan üreten bakterilerin başlıca kaynağı asetattır. Evsel atıksuların arıtılması sonucu oluşan çamur çürütülürken reaktörlerdeki metan üretiminin %65–70'i asetat metilin indirgenmesiyle oluşur. Şekil 3.1'deki şekilde evsel arıtma çamurlarının çürütülmesiyle organik materyallerin metana dönüşümü gösterilmektedir.

Metan bakterilerinden hidrojen kullananları  $\text{H}_2$  ve  $\text{CO}_2$  sentezleyerek  $\text{CH}_4$  üretir. Bu sentezle metan üreten bakteriler asetik asitle metan üretimi yapan bakterilere oranla daha hızlı sentezleme yapmaktadırlar. Bu nedenle ortamda yeterli miktarda  $\text{H}_2$  ile  $\text{CO}_2$  mevcutsa ve  $\text{H}_2$ 'nin kısmi basıncı uygun seviyedeysse bu şekilde  $\text{CH}_4$  sentezi devam etmektedir.

Anaerobik arıtma sistemlerinde metan üretimi yavaş gerçekleştiği için hız sınırlayıcı faktör olarak kabul edilir. Fakat metan sentezi her zaman hız sınırlayıcı faktör olmak zorunda değildir. Duruma göre hidroliz aşaması da hız için kritik olabilir [45].



**Şekil 3.1** Evsel çamurların çürütülmesi esnasında organik maddelerin metana dönüşümü [45]

### 3.3.3.2 Anaerobik Mikroorganizmaların İlişkileri

Oksijensiz arıtma üzerine yapılan çalışmalar üç grup bakterinin birlikte çalışması gerekliliğini göstermektedir (Şekil 3.1). Şekil incelendiğinde asetate tüketen metan bakterisiyle fermentasyonu sağlayan bakterilerin birlikte çalışarak asetik asit miktarıyla pH'ı kontrol ettiği görülmektedir. Üreme hızı asetate kullanan bakterilerdekine görece yavaştır (minimum ikilenme hızları 2/3 gün, T=35 °C'de). Fermentasyon bakterilerininse üreme hızları oldukça hızlıdır (2-3 saat, T=35 °C'de). Buna göre organik yük arttıkça asit üretimi reaktörde artacaktır. Fakat metan üretimi eşit hızda olmayacağı için reaktörde yüksek miktarda uçucu asit birikimi

gerçekleşecektir. Anaerobik arıtma sistemlerindeki arıtma süreci biyogazın içerdiği H<sub>2</sub> miktarına göre hassas bir şekilde takip edilebilir. Gaz halindeki H<sub>2</sub> miktarının yükselmesiyle hidrojen tüketen bakteriler CO<sub>2</sub> ve H<sub>2</sub> sentezinden CH<sub>4</sub> üretim miktarı düşmektedir. Basitçe açıklamak gerekirse glikoz şok yük olarak reaktöre beslenerek anaerobik reaktörlerde meydana gelenler aşağıdaki reaksiyon (3.1) ile gösterilebilir:



Verilen reaksiyona göre, reaktöre glikoz ani verilirse, asit bakterileri bu şok yükü kısa sürede uyumlanır ve yukarıdaki reaksiyona göre asetik asit meydana getirir. Buna göre pH düşer ve metan üreten bakterilerin sentez reaksiyonlarının hızı yavaşlayarak ortamda H<sub>2</sub> birikimi gerçekleşir.

Fermentörde H<sub>2</sub> miktarı artmasıyla;

- Total asit üretim hızı düşer. Sistem daha uzun sürede kararlı hale döner.
- Bütirik ile propiyonik asit miktarları artar. Böylece asetik asit üretimini ile asetat tüketen metan bakterilerinin CH<sub>4</sub> sentezi engellenir.
- Hidrojen miktarı daha fazla yükselirse propiyonik asit üretimi hızlanır. Fermentördeki pH daha da düşer.

Metan sentezi kompleks organik materyallerin bu üç bakteri grubunun birlikte çalışmasıyla gerçekleşmektedir. Bu sistemlerde hidrojen sentezi yapan ve hidrojen tüketen bakteriler önemlidir. Hidrojen sentezi yapan ve tüketen bakteriler için hidrojenin kısmi basıncıyla serbest enerji seviyesi durumun önemini gözler önüne sermektedir. Ortamdaki hidrojenin kısmi basıncı 10<sup>-4</sup> atmosferi (100 mg/L) seviyelerinde tutulmaya çalışılmalıdır. Aksi takdirde propiyonik asit, asetik asit ile hidrojene parçalanamayabilir. Bu durum hidrojen sentezi için kısmi basıncı 1 atm olan metan bakterilerine göre daha düşük basınç ortamında sentez gerçekleştirilebileceğini ortaya koymaktadır. Sonuç olarak, reaksiyon kolaylaşmaktadır. Yani birim hacim H<sub>2</sub>'e düşen sentez bakteri miktarı düşmektedir. Buna bağlı olarak H<sub>2</sub> tüketen metan bakterilerinin yüksek hızda çalışması için kısmi basınç 10<sup>-4</sup> ~ 10<sup>-6</sup> atm aralığında olmalıdır.

### 3.4 Çevre Koşullarının Oksijensiz Arıtmaya Etkisi

Anaerobik prosesler diğer mikrobiyolojik dönüşümler gibi çevre koşullarıyla bağlantılı olarak meydana gelir. Bilhassa anaerobik proseslerdeki gibi çok çeşitli mikroorganizma gruplarının birlikte olduğu ve birbirleriyle ilişkili çalışmasıyla meydana gelen mikrobiyolojik süreçler için çevresel şartlar daha da önemli bir konumdadır. Optimum mikrobiyolojik etkinlik için optimum çevresel koşulların oluşturulması gerekliliği ele alındığında, önceki bölümlerde bahsedilen üç basamaklı proses işleminin meydana gelmesini etkileyen çevre koşulları şunlardır:

#### 3.4.1 pH ve Alkalinite

Metan sentezini yapan metan bakterileri için optimal pH aralığı 6,5-8,2'dir. Oksijensiz üretim proseslerinde baskın olan asit bakteri grubu pH aralığı ise 5,5-6,5'tir. Bunlara göre oksijensiz üretim proseslerinde bu iki grup bakterinin de yaşayabilmesi için optimal pH aralığı 6,5-7,5'tir. Sistemin çalışması için pH bu aralıkta olmalıdır [46].

Anaerobik üretim proseslerinde mikrobiyal faaliyetlerin gerçekleşebilmesi için pH önemli bir parametredir [47]. Bu parametre substratın suda çözünmesi ve mikroorganizmaların yaşayabilmesi için önemlidir [46]. Basamaklı bir proses olduğu için reaktör sistemi de iki kademeli olarak işletilebilir. Her kademenin kendine ait pH'ı olması sistemi verimli hale getirir. Metan bakterileri düşük pH'tan çok çabuk etkilenir ve üretim hızları azalır. Sisteme çok fazla yükleme gerçekleşirse pH'ın sürekli izlenmesi ve kontrol edilmesi önemlidir. pH'ın 6,2'den düşük olması açığa çıkan metan miktarını ciddi oranda azaltmaktadır [48]. Sistemdeki bikarbonat alkalinitesi 500 mg/L seviyesinden aşağı düşerse ve üretilen biyogazın içeriğinde yaklaşık %38'i CO<sub>2</sub> bulunuyorsa; sistem pH'ı 6 seviyesinden aşağıya düşer ve metanojenik bakterilerin yüzünden sistem toksik etkiye maruz kalır [48].

Çalışan anaerobik proseslerde, sistem başlangıç pH'ı alıkonma zamanının beşinci gününe kadar stabildir. Beşinci günden sonra sistemde artan organik asit miktarı nedeniyle pH hızla düşer. Anaerobik sentezin beşinci ve on yedince günleri aralığında pH az dalgalanmaya sahiptir. Anaerobik sentezin on yedinci gününden sonra organik asitlerin metan gazına dönüşmesi nedeniyle pH önce yükselir

sonrasında da sistemdeki asit miktarının artmasıyla düşmeye başlar. Prosesin devamında metan sentezinin başlamasıyla, meydana gelen organik asitlerin sistemde hızlıca metana dönüşmesi ve pH'ın sonraki basamaklarda ilk pH değerine yaklaşmasıyla küçük dalgalanmalar ile pH sabit bir aralıkta seyreder [49].

Aritma çamurlarının stabil hale gelmesi için uygulanan anaerobik proseslerdeki pH ve nem muhtevasının sistem üzerine etkisi üzerine yapılan çalışmalar metan üretim veriminin (ml/g kuru madde/gün) tüm nem düzeylerinde ve pH = 7 olduğu durumlarda maksimum seviyede olduğunu ortaya koyar [50].

### **3.4.2 Besin İhtiyacı**

Tüm biyolojik proseslerin, mikroorganizmanın üremesi ve yaşaması için zorunlu temel besin elementlerini (C, N, P, K) ve diğer iz elementlerini bulundurması gerekir [51].

Oksijensiz ortam mikroorganizmalarının üremesi ve yaşaması için azotla fosfor gibi makro besinlere ihtiyaç olduğu gibi demir, kobalt ve nikel gibi mikro besinlere de ihtiyacı vardır [47].

Çoğunlukla sistemin nütrient ihtiyacının belirlenmesi için KOİ:N:P veya KOİ:N oranı kullanılır. Sistemin çalışması için gerekli N:P oranı literatürde 7 olarak gösterilmektedir [52]. Yüksek yüklü sistemlerdeki teorik KOİ:N oranı 400:7 ve minimum KOİ:N oranı 350:7'dir. Asetik asit bakterilerinin asetik asitten metan ve karbondioksit sentezi için sistemde demir elementinin olması gereklidir. Sistemde sodyum, kalsiyum, potasyum ve magnezyumun düşük miktarlarda var olmasının sistem verimini olumlu etkilediği de bilinmektedir [52].

Hayvansal organik atıkların nütrient miktarı, yeterli derişim ile uygun nütrient seviyesinde bulunmaktadır. Çeşitli tarımsal organik atıklarda ise (saman, ot, vb.) bu nütrientlerin bazıları yeterli seviyede mevcut değildir. Bu yüzden anaerobik proseslerde besin – element derişim miktarı sistem beslemede kullanılan hammaddeye uygun olarak ayarlanmalıdır [51].

### 3.4.3 Sıcaklık

Anaerobik üretim proseslerinde mikroorganizmaların büyüme hızı ve ürün üretim hızı ile besin tüketim hızı sıcaklıktan ciddi oranda etkilenir. Bu yüzden sıcaklık parametresi anaerobik sistemler için önemlidir [53]. Yapılan çalışmalar ile veriler anaerobik proseslerden maksimum biyogaz verimi ve metan üretim verimi alabilmek için sistemin mikroorganizmaların yaşayabileceği optimum sıcaklığa sahip olması gerektiğini göstermektedir [54]. Bu prosesler mezofilik ve termofilik çalışabilmektedir fakat genellikle mezofilik olarak işletilmektedir [55]. Optimum sistem sıcaklığı mezofilik mikroorganizmalar için 30-40 °C ve termofilik mikroorganizmalar için 55-60 °C'dir [54].

Yüksek sıcaklıkla anaerobik mikroorganizmaların substrat giderim verimi ve içsel solunum hızları artar. Bu nedenle termofilik anaerobik mikroorganizmaların substrat giderim hızı ve hücresel büyüme hızı mezofiliklere göre daha yüksektir. Fakat net mikroorganizma sentezi oranı düşük olduğu için termofilik sistemler işleme yavaş alınabilir. Ek olarak termofilik sistemlerdeki organik yükler ve substratlardaki değişim çevresel etkilere göre çabucak değişebilir. Sıcaklık 20 °C'nin altına düşerse anaerobik mikroorganizmaların aktivitesi önemli miktarda düşer [55]. Sıcaklık parametresi seçimi organik atık yükü ve arıtmada açığa çıkan metan miktarını etkilediği için ekonomik açıdan önemlidir. Yüksek hacimsel yüklemelerin uygulanabilmesi için (20 kg KOİ/m<sup>3</sup>gün kadar) termofilik sıcaklıklarda (50 - 60 °C'de) daha stabil ve hijyenik son ürün üretilir.

Sistemin sıcaklığı metan gazı üretim miktarını ciddi oranda etkiler. 50 - 60 °C'deki metan üretim miktarı 35 °C'dekinden %25 ile %50 oranında daha fazladır [52]. 54 °C'de uygulanan organik yükle 38 °C'de uygulanan yüke göre işletmedeki verim 2 ile 4 katı olarak görülmektedir. Termofilik sistem hızının mezofilik sisteme göre fazla olması her zaman bu sistemleri uygun yapmaz. Yüksek sıcaklık değerlerini sağlayabilmek için de sistemin ek enerji ihtiyaçları vardır ve bu ihtiyaçlar her zaman karşılanamaz. Bu yüzden çoğu zaman kullanılan termofilik sistemler ekonomik değildir. Buna bağlı olarak sisteme giren 55 °C üstü sıcaklığa sahip atıksular substrat olarak kullanılmıyorsa termofilik sistemler kullanıma uygun değildir [56].

Deneylerle elde edilen optimum sıcaklık koşulları göze alınarak anaerobik sistem koşulları oluşturulur, sistem sıcaklığının seviyesini korumak için sisteme ısı yalıtımı ya da ısıtmayla korutma uygulanarak anaerobik sistemler çalıştırılır [46].

Anaerobik üretim proseslerinde 40 ile 60 °C'deki üretim sıcaklığında yapılan, sıcaklık ve alıkoyma süresinin organik atıkların oksijensiz fermentasyonuna etkisinin araştırıldığı çalışmada biyogaz üretim verimi ve KOİ giderim verimi incelendiğinde verimin maksimum olduğu raporlanmıştır. Bu çalışmaların sonucunda 60 °C'de çalıştırılan sistemlerin enerji ihtiyacının yüksek olduğu, 40 °C'nin üstündeki sıcaklıklardaki biyogazın içerdiği metan miktarının azalmaya başladığı gözlemlenmiş olduğu anaerobik işletme şartlarının optimum sıcaklığının 30-40 °C arası olduğu ortaya çıkarılmıştır [57].

Sıcaklıkla asetatin metana dönüşümü arasındaki bağın araştırıldığı bir başka çalışmada 15-45 °C'de değişik sıcaklık değerlerinde deneyler yapılmaktadır. Bununla 35 °C'de gerçekleşen deneyde, log (alışma) fazı sonrası maksimum biyokütle konsantrasyonunun (100 mg/L), maksimum metan üretim hızının (0,08 mol asetate/mg kurukütle/gün) ve tüketilen asetate kütle başına sentezlenen maksimum kuru mikroorganizma kütlesi (1,0-1,1 mg biyokütle/mol.asetate) meydana geldiği rapor edilmiştir [53].

#### **3.4.4 Bazı Maddelerin Toksikite Etkisi**

Genellikle mikroorganizmalar organik veya inorganik toksik maddelerin ortamda bulunmasından olumsuz etkilenir. Atıksularda bu maddeler çeşitli derişimlerde bulunursa mikroorganizmaların etkinlikleri yavaşlar ya da tamamen durur. Oksijensiz solunum yapan bakteriler ise toksik maddelerin bulunduğu ortamlardan genelde etkilenmez hatta bu maddeleri parçalayarak ortamdan uzaklaştırabilir. Bu sayede aerobik işletme süreçlerinde giderimi mümkün olmayan bazı zararlı birleşikler belirli bir alışma evresinden sonra anaerobik proseslerin gerçekleştiği proseslere alınarak giderimi gerçekleşir [48]. Bütün oksijensiz solunum yapan mikroorganizmalar içinde toksik etkiye duyarlılığı yüksek olan metanojen bakterileridir. Yapılan çalışmalar metanojen bakterilerin çeşitli zararlı maddelere belirli düzeye kadar dayandığını ve bakterilerin bu duruma alıştığını göstermektedir. Ek olarak çoğu zararlı maddelerin, belirli düzeydeki derişimin

altında, oksijensiz olarak arıtılabilirliği bu maddelerin toksik etkisini azaltmaktadır. Anaerobik sistemlerde düşük derişim seviyelerinde pozitif etki gösteren çok fazla katyon da (sodyum, potasyum, kalsiyum, magnezyum, amonyum) mevcuttur. Yine bu katyonlar yüksek derişimde toksik etkiye sebep olmaktadır [55].

Gaz halinde fosfin bileşğinin (-88 °C'de kaynama noktasına sahip, renksiz, yanıcı ve zehirli bir gaz) domuz gübresinin anaerobik fermentasyonu sırasında biyogaz oluşumunu engellediğı belirlenmiştir. Yaklaşık 150 ppm'lik bir fosfin konsantrasyonunda, %50 inhibisyon değeri ile logaritmik bir doz-cevap korelasyonu elde edilmiştir. Çalışmada, asetat ve maya ekstraktının anaerobik fermentasyonunun 1000 ppm'lik fosfin konsantrasyonuna kadar etkilenmediğı görülmüştür. Bununla birlikte, anaerobik bakterilerin nispi toleransına rağmen, fosfin bileşğinin gübre bileşenlerinin bozunmasını açıkça engelleyebileceğı rapor edilmiştir [58].

Anaerobik sabit yataklı fermentörde peyniraltı suyu kirlilik gideriminde bakır(II) klorür ( $\text{CuCl}_2$ ), çinko klorür ( $\text{ZnCl}_2$ ) ile nikel klorürün ( $\text{NiCl}_2$ ) zararlı etkilerinin araştırıldığı çalışmaya göre 10 mg  $\text{CuCl}_2/\text{L}$ , 40 mg  $\text{ZnCl}_2/\text{L}$  ve 60 mg  $\text{NiCl}_2/\text{L}$  konsantrasyonlarında bu iyonların var olmasının metan gazı üretim potansiyelini % 50 azalttığı görülmüştür. Yapılan deneyde ek olarak metal tuzlarıyla eş mol sülfür eklenerek metal katyonlarının metal sülfür olarak çökmesi gerçekleştirilerek metal katyonlarının toksik etkiyi engellediğı ortaya konulmuştur. Sülfür iyonları ortamda mevcutsa eğer 60 mg  $\text{NiCl}_2/\text{L}$  derişime kadar  $\text{NiCl}_2$  konsantrasyonunun zararlı etki göstermediğı gösterilmiştir [59].

Yukarı akışlı, anaerobik temas filtre reaktörlerin tabakhane atıksuyu arıtımında (1,5 ile 16,5 g KOİ/L) sülfür, tanin ve krom (III) elementlerinin reaktör performansına göre KOİ giderim verimi ve biyogaz üretim verimi araştırılmıştır. Hidrolik bekletme süreleri 36, 48 ve 60 saattir olarak ayarlanmış ve deney sonu tanin konsantrasyonu 914 mg/L ve üzeri miktarlara ulaştığında reaktörün çalışmasının durduğı gözlemlenmiştir. Tanin derişim miktarının kütlece %70 ve üzerine çıkması durumunda mikrobiyal faaliyetlerin tamamen durduğı belirtilmiştir. Sülfür ile krom (III)'ün konsantrasyonlarınsa 180 mg/L ve 140 mg/L üzerine çıktığında

sistemde toksik etki oluřtuđu tespit edilmiştir [60]. Anaerobik proses üzerinde toksik etki gerçekleştiren bazı maddelerin derişimleri Tablo 3.5’de verilmiştir.

**Tablo 3.5** Anaerobik proses üzerinde toksik etki gerçekleştiren bazı maddelerin derişimleri [61]

| Madde                                                  | Konsantrasyon (mg/L) |
|--------------------------------------------------------|----------------------|
| $\text{NH}_4^+$ , $\text{NH}_3$                        | 1500 – 2000          |
| $\text{H}_2\text{S}$ , $\text{HS}^-$ , $\text{S}^{2-}$ | 100-150              |
| $\text{Na}^+$                                          | 3500 – 6000          |
| $\text{K}^+$                                           | 2500 – 5000          |
| $\text{Ca}^+$                                          | 2500 – 5000          |
| $\text{CN}^-$                                          | 0,5 – 1              |
| Alkil benzen sűlfonat                                  | 500 – 700            |
| $\text{Mg}^{+2}$                                       | 1000 – 1500          |
| $\text{Cr}^{+3}$                                       | 150 – 400            |
| $\text{Cr}^{+6}$                                       | 3                    |
| $\text{Zn}^{+2}$                                       | 1                    |
| $\text{Ni}^{+2}$                                       | 2                    |
| $\text{Cu}^{+2}$                                       | 0,5                  |
| $\text{S}^{2-}$                                        | 200                  |

### 3.4.5 Kűkűrt

Sanayi atıksularının geneli yűksek konsantrasyonda  $\text{SO}_4^{2-}$  ve  $\text{SO}_3^{2-}$ ’u içerir. Sűlfat űreten bakteriler oksijensiz ortamda sűlfatı hidrojen sűlfűre dűnűřtűrűr. Metan

sentezi yapan bakterilerle sülfat sentezi yapan bakteriler aynı asetik asit ve hidrojen kaynağını kullanır. Sülfat bakterileri enerjetik avantaj sahibi olduğu için sistemin elektron akışını sülfat sentezi amacıyla kullanırlar ve metan üretim veriminin düşmesine neden olurlar. Anaerobik arıtmada sülfat, hidrojen sülfüre dönüşerek sistemdeki hidrojen sülfür konsantrasyonunu artırır. Bundan dolayı sistem inhibe olur [48].

#### 3.4.6 Oksijen

Oksijensiz arıtmanın yapıldığı sistemlerde serbest oksijenin bulunması sistemin kararlılığı için önemlidir. Buna bağlı olarak oksijen;  $\text{NO}_3$ ,  $\text{H}_2\text{O}_2$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  gibi bileşiklerde bulunsa da anaerobik arıtım verimini düşürür [48].

#### 3.4.7 Amonyak

Kompleks proteinlerin veya amino asitlerin ayrışmasıyla amonyak meydana gelir. Sanayi atıkları azot bakımından zenginse bu probleme yol açar. Fermentasyon reaksiyonlarında organik maddedeki organik azot, amonyağa dönüşür. Ortamın pH'ına göre de amonyak  $\text{NH}_4^+$  iyonuna dönüşerek iyonlaşmış formda (3.2) sistemde bulunur.



Denge reaksiyonu düşük  $\text{H}^+$  iyonu konsantrasyonunda  $\text{NH}_3$  tarafına kaymaktadır. Anaerobik bakteriler iyonlaşmış  $\text{NH}_3$ 'ün varlığında toksik etkiye sahiptir. Bu sistemlerde kritik konsantrasyon 100-200 mg/L'dir [48].

#### 3.4.8 Uçucu Asitler

Sistemde asit üretimi aşamasında sentezlenen uçucu yağ asitlerinin konsantrasyonu yükselirse toksik etkiye neden olur. Total uçucu asit konsantrasyonu (TUA) miktarı 1000-1500 mg/L'nin üstüne çıkmamalıdır. Sistemin güvenlik oran yüklemesi (TUA/Alkalinite) maksimum 0,1'dir. Doğru işleyen sistemlerde uçucu yağ asitlerinin konsantrasyonu maksimum 500 mg/L'dir. Standart olarak da bu değer minimum 250 mg/L'dir. Eğer sistem içinde propiyonik asit miktarı artmışsa asetik asit sentezleyen bakterilerin toksik etkiye maruz kaldığı anlaşılır [56].

### 3.4.9 C/N Oranı

Biyogaz üretiminin gerçekleşebilmesi için sistemde girdi olan substrat oranı C/N önemlidir. Kullanılan substrattaki karbon kaynağı karbonhidratlar, azot kaynağı ise protein, nitrat ve amonyaktır. Bakteriler karbonu enerji üretimi için kullanırken azotu yeni hücre sentezi amacıyla kullanmaktadır. Sisteme giren substrattaki C/N oranı 30/1 olmalıdır. Karbon tüketimi azota oranla 25-30 kez fazladır. Eğer substrat bu değeri sağlamıyorsa organik madde beslemesi yapılarak C/N oranı sağlanır. Substrat azot açısından zenginse ( $C/N = 10/1$  veya daha düşük) giderim sırasında sistemde  $NH_3$  oluşur. Buna bağlı olarak özellikle sistem pH'ı yükseldiyse sistemde  $NH_3$  toksik etkiye yol açar. Sisteme giren organik maddede azot oranının çok düşük olması durumunda ( $C/N = 50/1$  veya daha fazladır) azot yetersizliği veya yetersiz tampon kapasitesi meydana gelir [62].

### 3.4.10 Bekletme Süresi

Anaerobik sistemlerde substratın bekletme süresi uçucu organik maddelerin reaktördeki bekleme süresine eşittir. Bu bekletme süresi, uçucu organik madde ve hidrolik bekletme süresi olmak üzere kullanılır. Uçucu organik madde çamur yaşı (SRT), bakterilerin sistemdeki uçucu organikleri tüketmek için geçirdikleri süredir. Bu sistemdeki uçucu organik maddelerin kütsel olarak sistemden çıkan uçucu organik maddelere oranıdır. Anaerobik sistemlerde SRT 2 ile 6 gün arasında değişir.

Hidrolik bekletme süresi (HRT) ise sisteme giren substrat miktarının hacimsel hızının reaktörün hacimsel hızına oranıdır. Anaerobik çalışan sistemlerde reaksiyon geri dönüşümü olmaz. Sisteme beslenen organik maddeler sulu çözelti ya da sulu karışım şeklinde olduğundan SRT, HRT'ye eşit olur. SRT ve HRT organik maddelerin parçalanması ve maksimum gaz üretim verimine bağlı sıcaklık parametresiyle orantılıdır. Anaerobik sistemlerdeki sıcaklığa bağlı olarak HRT 10-31 gün aralığında değişir. Anaerobik prosesler için optimal çevre şartları Tablo 3.6'da verilmiştir [51].

**Tablo 3.6** Anaerobik prosesler için optimal çevre şartları [56]

| Parametreler      | Optimal Şartlar                                                                                                                                                                                                              |
|-------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Substrat Bileşimi | Karbon, temel (N, P) ve iz elementler bakımından dengeli olmalıdır. O <sub>2</sub> , NO <sub>3</sub> , H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> , SO <sub>4</sub> gibi oksitleyici maddeler, toksik ve inhibitör elementler içermemeli. |
| KOİ:N:P           | 300:5:1                                                                                                                                                                                                                      |
| pH                | 6,5 ile 8,2                                                                                                                                                                                                                  |
| Sıcaklık          | 25 ile 40 (35 ile 37) °C; 50 ile 60 (55) °C                                                                                                                                                                                  |
| Alkalinite        | 1000 ile 4000 (2000) mg/L CaCO <sub>3</sub>                                                                                                                                                                                  |
| TUA               | < 1000 ile 1500 mg/L Asetik asit                                                                                                                                                                                             |
| TUA/Alkalinite    | < 0,1                                                                                                                                                                                                                        |

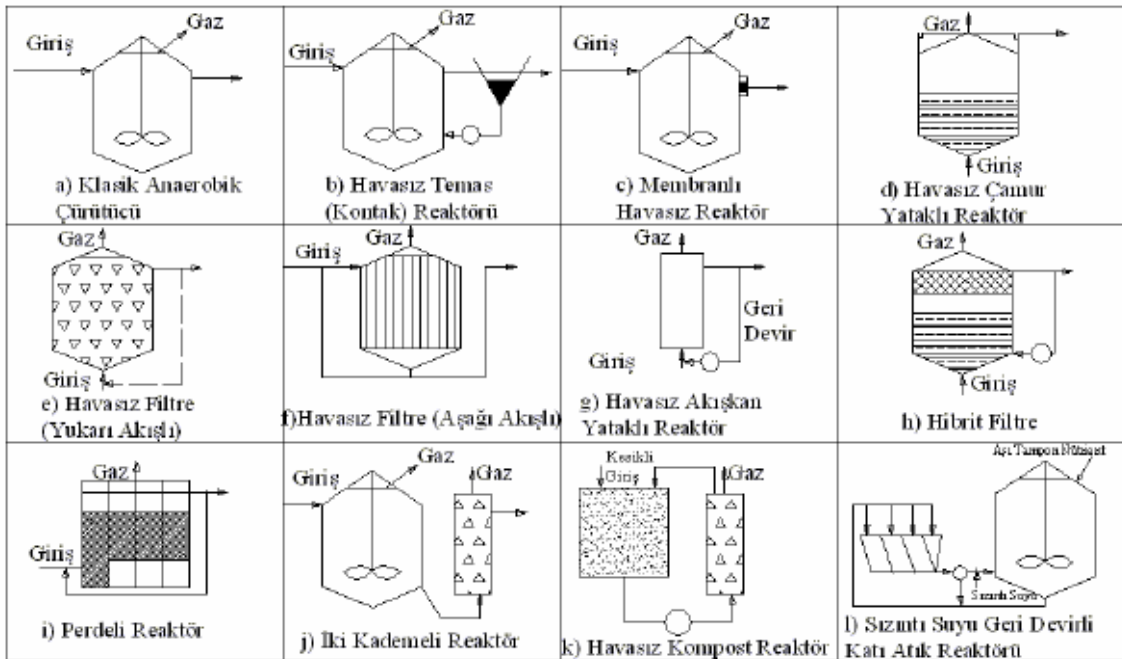
### 3.5 Anaerobik Arıtma Sistemleri

Anaerobik arıtma sistemleri; sisteme giren organik yükü taşıyacak maksimum hacim alanı yaratmak, anaerobik reaktör hacminin ise küçülmesi sağlayarak karşılaşılan problemlere çözüm üretilmek amacıyla geliştirilen çeşitli, verimli sistemlerdir [45]. Başlıca anaerobik fermentasyon reaktör tipleri Şekil 3.2’de verilmiştir. Organik yük ve KOİ giderim verimi açısından genel karşılaştırma Tablo 3.7’de mevcuttur. Sistemlerin genel yapıları detaysız şekilde aşağıda verilmiştir.

**Tablo 3.7** Anaerobik arıtma prosesi, organik yük ve verim açısından değerlendirilmesi [56]

| Reaktör Tipi                             | Organik Yük<br>kg KOİ/m <sup>3</sup> -gün | KOİ Giderim<br>verim % |
|------------------------------------------|-------------------------------------------|------------------------|
| Anaerobik temas reaktörü (ATR)           | 1-6 (3-5)                                 | 80-95                  |
| Anaerobik filtre (AF)                    | 1-18 (7-10)                               | 80-95                  |
| Anaerobik akışkan yataklı reaktör (AAYR) | 1-60 (15-30)                              | 80-90                  |
| Anaerobik çamur yataklı reaktör (AÇYR)   | 5-15 (10-15)                              | 85-95                  |
| Membranlı anaerobik reaktör (MAR)        | 1-30 (15)                                 | 85-95                  |

\*Kurulu tesislerin organik yükleri parantez içindeki değerlerdir.



**Şekil 3.2** Anaerobik reaktör çeşitleri [56]

### **3.5.1 Anaerobik Çamur Çürütücü**

Klasik anaerobik çamur çürütücü reaktörü, geri devirsiz ve tam karışımli reaktör çeşitidir (Şekil 3.2.a). Reaktördeki çamur yaşı HRT'ye eşittir. Düşük hızda üreyen metan bakterilerinin yıkanmasını önlemek için çamur yaşı en az 10 gün olmalıdır. Uygulamada bu süre 15-20 gün arasındadır. Arıtma çamurlarının çürütülmesi haricinde klasik anaerobik çamur çürütücü reaktör endüstriyel kullanım için uygun değildir. Bunun nedeni reaktör hacminin çok büyük olması ve askıda katı madde çıkış konsantrasyonunun yüksek olmasıdır.

### **3.5.2 Anaerobik Temas Reaktörü**

Klasik anaerobik çürütücüye çöktürme tankı ve geri devir düzeneği eklenirse anaerobik temas tankı elde edilir (Şekil 3.2.b). Bu şekilde, çamur yaşı artırılır ve sistemin arıtma verimi yükseltilerek kullanılan reaktörün hacmi azaltılmış olur. Bu reaktörün işletme problemi anaerobik çamurun çöktürülmesinin zor olmasıdır. Sistemde çamur konsantrasyonu askıda organik katı miktarı cinsinden 12.000 mg/L'yi aşarsa çamur çökmesinde ciddi sıkıntılar yaşanır. Buna bağılı olarak maksimum organik yük günlük 5 kg KOİ/m<sup>3</sup>'ü aşmamalıdır.

### **3.5.3 Anaerobik Filtre**

Anaerobik filtre, içinde kırma taş ya da plastik dolgu malzemesi olan ve tabandan beslenen düşey akışlı bir reaktördür (Şekil 3.2.e). Tabandaki dolgu malzemesi bakterilerin tutunabileceğı bir yüzey sağlar. Atıksudaki organik yükün büyük çoğunluğu, filtre yatağındaki boşluklara tutunan mikroorganizmalar tarafından giderilmektedir ve oluşan biyokütlenin %60'ı bu mikroorganizmalar tarafından üretilir. Bu reaktörde değışen çevresel koşullara uyum kolay sağlanır ve çeşitli inhibitörlere karşı biyokütle kaybı düşüktür. Sistemin dezavantajı ise uzun süren biyofilm oluşumu ve yüksek konsantrasyondaki askıda katı madde içeriğı sonucu oluşan hızlı oluşan tıkanıklıklardır. Sistemde kullanılan dolgu malzemesinin sentetik oluşu da bir diğere dezavantajlı durumdur.

### **3.5.4 Anaerobik Akışkan Yataklı Reaktör**

Anaerobik akışkan yataklı reaktörde oluşan biyokütle akışkan halde bulunan 0,1-0,6 mm çapındaki kum, antrasit, aktif karbon gibi ince tanedeki yatak malzemesinin

yüzeyine tutunur (Şekil 3.2.g). Yatak malzemeleri akışkan durumda bulunur. Malzemenin özgül yüzeyi 2000-5000 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup> yüksek konsantrasyon değerlerine, 30.000 mg/L gibi de biyokütle konsantrasyonlarına çıkabilir. Çok yüksek organik konsantrasyonlar (40-60 kg KOİ/m<sup>3</sup>-gün) uygulanabilir ve HRT 1,5-3 saate kadar inebilir. Sistemin en büyük problemi, yatak akışının devamı için sisteme yaptırılan geri devir nedeniyle terfi maliyetinin pahalı olmasıdır.

### **3.5.5 Anaerobik Çamur Yataklı Reaktör**

Anaerobik çamur yataklı reaktörler filtrelerden ayrı olarak, sentetik filtrasyon malzemesinin pahalı olması ve askıda katı madde yüzünden gerçekleşen tıkanıklık, yüksek debideki aşırı yükler ile biyokütle kaybı vs. sorunlarını taşımaz. İçerisinde yatak malzemesi yoktur (Şekil 3.2.d). Sisteme giren atıksuyun kirlilik giderimi reaktörün altındaki çamur yatağıyla üst kısmındaki çamur örtüsüyle gerçekleşmektedir. Sisteme beslenen sudaki organik yükün içeriğine bağlı olarak, aşırı yüklerde çamur yatağı kısmı ve az yüklerde çamur örtüsü kısmı kirlilik gideriminde rol alır. Evsel atıksuların artılmasında uygun olan sistemle 40.000 mg/L'den fazla olan biyokütle konsantrasyonlarına ulaşılabilir.

Sistemin ağır, aktif granüler çamur yatağı vardır. Bu durum bekletme süresinin 3-4 saat gibi kısa değerlerde olmasında bile biyokütleda kaybın olmamasını sağlayarak sistemi işletir. Yüksek verimli işletme ve basit tasarımı nedeniyle globalde yaygın olarak kullanılan artıma sistemidir.

### **3.5.6 Anaerobik Çamur Yataklı Filtre**

Reaktörün alt kısmı anaerobik çamur yataklı üst kısmı ise anaerobik filtre olarak işleyen reaktördür. Filtre kısmı toplam hacmin %50-70'i kadardır. Filtre yatağı dolgu yüksekliği 2 m'den daha az olmalıdır. Bu sistemlerde arıtmanın büyük kısmı alttaki anaerobik çamur yatağında meydana gelir. Üst kısımdaki filtrede genelde lamelli çökelticinin çalışması gibi katı ve sıvı ayrılır bu şekilde reaktördeki biyokütlenin kaçması azaltılır. Bu reaktördeki dolgu malzemesinin içerisinden geçen biyogaz türbülans yaratır ve sistemde beklenen sevide çökeltme oluşmaz. Bu tarz sistemlerde bu nedenle dolgulu kısım reaktörün dışında bulunmalıdır. Anaerobik çamur yataklı reaktörde meydana gelen yukarı akışlı anaerobik filtrede

hidrolik bekletme süresinin 2 saat olması yeterli olur. Anaerobik çamur yataklı filtrede 5-10 kg KOİ/m<sup>3</sup>-gün organik yükte başarıyla çalışan bir reaktördür.

### **3.5.7 Membranlı Anaerobik Reaktör**

Temelde tam karışimli anaerobik bir reaktörden oluşan sistemdir. Sistemde katı maddeler ayrılırken çökeltme yöntemi yerine ultrafiltrasyon birimi kullanılır (Şekil 3.2.c). Sistemde atıksu gözenkli sentetik membran üzerinden akarken ultrafiltrasyon birikimi gerçekleşir. Biyokütle sisteme geri beslenerek çamur yaşı istenildiği kadar yükseltilebilir. Membranlı anaerobik reaktör sistemleri KOİ değeri 10.000 mg/L'nin üstündeki yüksek konsantrasyona sahip, debisi küçük olan endüstriyel atıksular için kullanıma uygundur. Aşı çamurunun bağımlı olmaksızın 1-2 hafta sonrasında 10-15 kg KOİ/m<sup>3</sup>-gün değerinde organik yüklemeye sahiptir.

### **3.5.8 Anaerobik Ardışık Kesikli Reaktör**

Bu reaktörler doldurma, arıtma, çökeltme ve boşaltma aşamalarını içeren kesikli işletilen bir reaktördür. Bu reaktörün hacmi, sürekli beslenen diğer reaktörlerden bir miktar yüksek tutularak yüksek verimli çökeltme gösteren granüller biyokütleyle yüksek verimli arıtma sağlanır. Bu sistemde tipik çökeltme 30 dakikadır. Anaerobik ardışık kesikli reaktörün uçucu asit derişimi genellikle düşüktür. Bunun nedeni, düşük K<sub>s</sub> seviyesine sahip sistemde çoğalan metan bakterilerinin selektif gelişim göstermesidir. Bu sistemler önemli uygulama alanına sahip ve işletmesi kolay olan sistemler olarak görülür.

### **3.5.9 Anaerobik Kompost Reaktörleri**

Arıtma çamuru katı madde oranı %20-35 olan, organik katı atıkların ve/veya arıtma çamurlarının mezofilik-termofilik şartlarda kompostlaştırıldığı reaktör sistemleridir (Şekil 3.2.k). Son 10 yıldır, ayrı toplanan evsel organik atıklarla arıtma çamurları ve zirai atık karışımı şeklinde kullanılan substratlar 3-4 hafta HRT sonunda yüksek gübre değeri olan kompostlara dönüşür. Sistemden elde edilen kompost bakteriyel emniyet amaçlı en az 2 haftalık havalandırmalı komposta tabii bırakılarak olgunlaştırılır ve sonrasında kullanılır.

### 3.5.10 İki Kademeli Anaerobik Arıtma Sistemleri

Arıtma sistemlerinde asit ile metan sentezi tek reaktörde gerçekleşiyorsa buna tek kademeli reaktör denir. Bu safhalar ayrılarak elde edilen arıtma sistemlerine de iki kademeli reaktör denir. Bu sistem asit ve metan reaktörleri oluşturur. Son yıllarda bu tarz iki kademeli arıtma sistemleri yaygın kullanılmaktadır. Faz ayrımı yapılarak anaerobik arıtmada organik yüklerin yaklaşık %50'si arıtılabilir. Sistemde asit ve metan reaktörlerinin aynı tip olması gerekmemektedir. Bu tarz bir uygulamayla kullanılan reaktör hacminde yaklaşık %30-40 oranında küçülme olur. Tam karışımli anaerobik reaktör ya da derin anaerobik lagün kolaylıkla asit reaktörü olarak kullanılabilir (Şekil 3.2.j). Anaerobik reaktörlerin tek ya da iki kademeli olması durumu Tablo 3.8'de karşılaştırılmıştır.

**Tablo 3.8** Tek ve iki kademeli sistem kıyası [56]

|            | <b>Tek Kademeli</b>                                                                                       | <b>İki Kademeli</b>                                                                                           |
|------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Avantaj    | Düşük yatırım maliyeti<br>İşletmenin ve kontrolün kolay olması                                            | Hızlı işletmeye geçirme<br>Kararlı sistem çalışması<br>Daha verimli arıtma<br>Katı organiklerin iyi ayrışması |
| Dezavantaj | Daha süren işletmeye alma durumu<br>Daha kararsız sistem<br>Organik yük konsantrasyonuna karşı hassasiyet | Yüksek yatırım maliyeti<br>Sistemin zor kontrol edilmesi<br>Hassas pH kontrol gerekliliği                     |

Uygulamada sık kullanılan 3 ana arıtma sistemi anaerobik çamur yataklı reaktör (AÇYR), anaerobik filtre (AF) ve anaerobik akışkan yataklı reaktör (AAYR) sistemsel davranışları açısından kıyası Tablo 3.9'de mevcuttur.

**Tablo 3.9** Sık Kullanılan Anaerobik Arıtma Sistemlerinin Kıyası [56]

| <b>Karakteristik Özellikler</b> | <b>AÇYR</b> | <b>AF</b> | <b>AAYR</b> |
|---------------------------------|-------------|-----------|-------------|
| İşletmeye Alınma                | -           | -         | -           |
| Biyokütle (çamur) Üretimi       | ++          | +         | ++          |
| Sıvı Fan Karışımı               | -           | + (+)     | ++          |
| Ani Hidrolik Girişlere Direnme  | -           | ++        | ++          |
| Ani Organik Girişlere Direnme   | +           | +         | +           |
| Askıda Katı Madde Duyarsızlığı  | -           | +         | ++          |
| Tıkanma Uyarsızlığı             | ++          | -         | ++          |
| Biyokütle Yüzme Riski           | -           | +         | +           |
| Reaktör Kontrol İhtiyacı        | +           | +         | -           |

-: zayıf, +: iyi, ++: mükemmel

Arıtma uygulamaları temellerinde buradaki üç sistemdeki en önemli işletme problemleri Tablo 3.10'da yer almaktadır.

**Tablo 3.10** AÇYR, AF ve AAYR sistemlerdeki başlıca işletme problemleri [56]

| <b>AÇYR</b>                                                                                                                                                                                                                                            | <b>AF</b>                                                                                                                                                                                                                                 | <b>AAYR</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>Yatak genişlemesinin kontrolü zordur</p> <p>Giriş suyunun değişkenliğine bağlı olarak proses stabilitesi sorunludur</p> <p>Ani yük değişimlerinde biyokütle kaybı yaşanır</p> <p>İnorganik katı maddeler birikir</p> <p>Biyokütle yüzer (kaçar)</p> | <p>Sisteme giren atıksuyun akımının üniform dağılması zorluğu</p> <p>Yatak tıkanması</p> <p>Tıkanma nedeniyle periyodik olarak filtre geri yıkaması</p> <p>İnorganik katı maddeler birikir</p> <p>Çıkış suyunda AKM ayrılması gerekir</p> | <p>Yatak genişlemesinin kontrolü zordur</p> <p>Atıksu giriş akımının üniform dağıtılması zordur</p> <p>Biyopartikül kaçıışı gerçekleşir</p> <p>Akışkan özellikleri değişkenlik gösterir</p> <p>Biyofilm kopması yaşanır</p> <p>Vana arızaları olur</p> <p>Sürekli geri devir gereklidir</p> |

#### 4.1 BMP Deney Düzenekinin Hazırlanması

Biyokimyasal metan potansiyeli (BMP) spesifik atıkların biyometanizasyon verimliliğinin ve havasız arıtmaya uygunluğunun tespiti açısından önemli bir deneysel çalışmadır. Bir biyogaz tesisinin projelendirilmesi yapılırken fizibilite çalışmalarında bu test kapsamında elde edilen çıktılar ya da kullanılan atığa göre hazır veri havuzundaki BMP potansiyeli esas alınarak proje detaylandırılması yapılmaktadır. Projenin maliyet-verim analizi açısından bu hesaplar önem arz etmektedir [63].

Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen laboratuvar deneylerinde, kurulan BMP deney düzenekinde 7 farklı atıksuyla çalışılmıştır. BMP deney düzenek hazırlanırken 1 L'lik cam şişelerde 700 mL besi+aşı ve 150 mL eser element çözeltisi eklenmiş ve 150 mL gaz boşluğu bırakılmıştır. Burada kullanılan besi:aşı miktarı 1:2 oranında tutulmuştur. BMP şişelerinin toplam hacminin %15'i eser element çözeltisi için ayrılmıştır [64]. Hesaplamalarda kullanılan besi:aşı miktarı uçucu askıda katı madde (UAKM, mg/L) olarak baz alınmıştır.

Her BMP düzenekinin hazırlanmasında kullanılan besi maddesinin ve aşı çamurunun hacmi Denklem (4.1)'den hesaplanmıştır. Mezbaha atıksuyu düzenekinin hesaplamaları 1:2 oranı (besi:aşı) için yapıldığında; kullanılan atıksuyun UKM değeri 11255 mg/L, çamur UKM değeri ise 16750 mg/L olarak bulunmuştur. Bu değerlere göre mezbaha atıksuyu için deneyde 300 ml atıksu ve 400 mL çamur hacmi kullanılmıştır.

Atıksu hacimlerine göre deneylerde kullanılan besi:aşı miktarı Denklem (4.1)'e göre hesaplanmıştır.

$$\frac{F}{I} = \frac{A \times V}{B \times (VR - V)} \quad (4.1)$$

$\frac{F}{I}$  : Deneyde kullanılan besi:aşı oranı, bu deney için 0.5 olarak alınmıştır (2).

$V$ : Deneyde kullanılan her atıksuyun hacmi (L)

$A$ : Deneyde kullanılan besinin UAKM değeri (mg/L)

$B$ : Deneyde kullanılan aşı UAKM değeri (mg/L)

$V_R$ : Deneyde kullanılan besi+aşı reaktör hacmi bu deney için 0.7 L olarak alınmıştır.

Atıksu türlerine göre deneyde kullanılan atıksu ve çamur hacimleri hesaplanarak Tablo 4.1’de verilmiştir.

**Tablo 4.1** Atıksu türlerine göre kullanılan besi:aşı hacimleri

| Besi Maddesi Türü    | Kullanılan besi maddesi hacmi (mL) | Kullanılan aşı çamuru hacmi (mL) |
|----------------------|------------------------------------|----------------------------------|
| Mezbaha atıksuyu     | 300                                | 400                              |
| Köpek maması         | 585                                | 115                              |
| Peynir altı atıksuyu | 150                                | 550                              |
| Balık atıksuyu       | 250                                | 450                              |
| Tavuk gübresi        | 350                                | 350                              |
| Sebze                | 150                                | 550                              |
| Bisküvi              | 200                                | 500                              |

Besi ve aşı çamuru oranı belirlenen atıksular 1 L’lik cam şişelere konulmuşlardır. Yedi deney şişesinin içerisinde oksijen kalmaması için kontrollü bir şekilde, 5 dakika boyunca azot gazı geçirilmiştir. Şekil 4.1’de örnek azotlama gösterilmiştir.

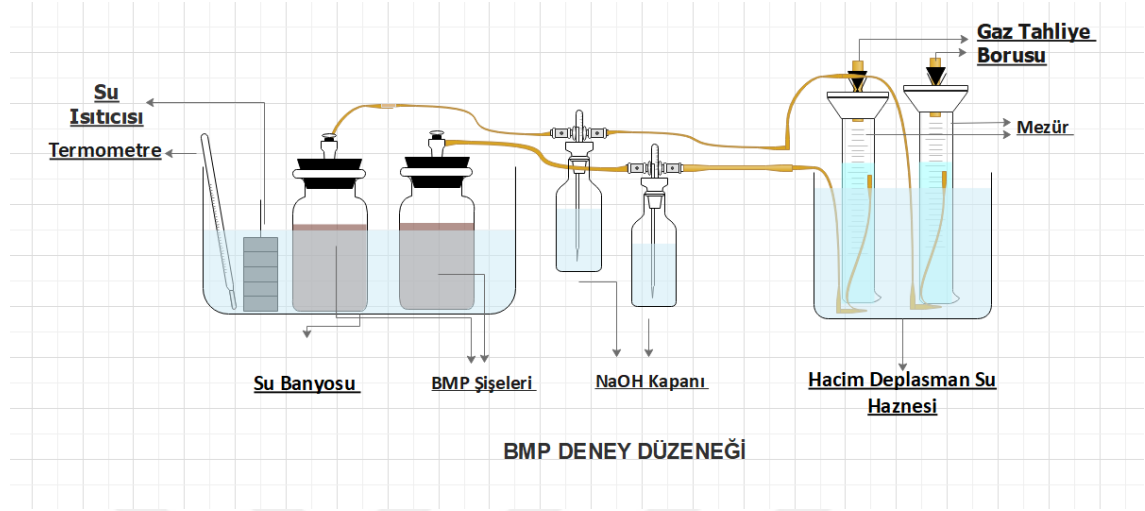


**Şekil 4.1** BMP şişelerinin azot gazı yardımıyla yıkanması

Azotlama işlemi bittikten sonra şişelerin ağzı oksijen geçirmeyecek şekilde hemen kapatılmıştır. Hazırlanan BMP şişeleri, su ısıtıcısıyla 35°C'de muhafaza edilen su havuzlarına konulmuştur. BMP şişeleri, kapaklarından geçirilen plastik borularla NaOH kapanına bağlanarak reaktörlerden açığa çıkan biyogazın içeriğindeki CO<sub>2</sub>'in bu kapanda tutulması sağlanmıştır. Deneyde kullanılan NaOH kapanı (NaOH bariyer çözeltisi), bu deney için %2 oranında hazırlanmıştır [65]. CO<sub>2</sub>'den ayrılan metan gazı hacim deplasman su haznesinde bulunan mezürlere borular vasıtasıyla geçiş yapmıştır. Hacim deplasman su haznesine ters şekilde konumlandırılan mezüre ağız kısmından giriş yapan plastik borular vasıtasıyla metan gazının burada birikmesi sağlanmıştır.

Mezür içerisindeki suyu deplase ederek tepe kısmında biriken metan gazı mL cinsinden ölçülmüştür. Mezürlerin içinde biriken metan gazını toplayabilmek için ek

olarak gaz tahliye boruları eklenmiştir. Deney düzeneğine ait şematik çizim Şekil 4.2’de, deneye ait görseller ise Şekil 4.3’de verilmiştir.



Şekil 4.2 BMP laboratuvar çalışmasına ait çizim



**Şekil 4.3** BMP deney düzeneği (TÜBA-GEBİP 2018 laboratuvarı)

## **4.2 Atıksu Temini ve Karakterizasyonu**

### **4.2.1 Atıksuların Temini**

BMP deneyinde 7 farklı besi maddesi kullanılmıştır. Deneyde kullanılan mezbaha atıksuyu Arnavutköy/İstanbul'da bulunan Çekmece Et ve Et Ürünleri Kesimhanesi'nden alınmıştır. Balık atıksuyu Bakırköy'de bulunan balık halinden

alınmıştır. Tavuk gübresi Silivri’de bulunan bir tavuk çiftliğinden temin edilmiştir. Peyniraltı atıksuyu Bakırköy’de bulunan Gönenli Peynircim A.Ş’den alınmıştır.

Bisküvi atıksuyu; son tarihi geçmiş bir paket bisküvinin 1 L saf suya karıştırılmasıyla elde edilmiştir. Bir gece deiyonize suda (saf suda) bekletilen bisküvi çözeltisi deneyde atıksu olarak kullanılmıştır. Hayvan gıdası atıksuyu da aynı yöntemle hazırlanmıştır. Deneyde 22,5 g kuzu etli köpek maması bir gece önceden 500 mL deiyonize suda bekletilmiştir. Bu sulu çözeltiye 3,3 g sodyum bikarbonat ve 1 mL iz element çözeltisi (eser element çözeltisi) eklenerek karışım 1 L’ye saf suyla tamamlanmıştır. Elde edilen atıksu numunesinin homojenliği sağlanarak buzdolabında +4°C’de muhafaza edilmiştir. Deneyde kullanılan sebze atıksuyu karışık sebze atıksu ortamını temsil etmesi amacıyla; soğan, patates, havuç, mısır, bezelye, domates salçası ve pekmezin rondodan geçirilerek 1 L’ye suyla tamamlanmasıyla elde edilmiştir [66]. Tavuk gübresi atıksuyu ise 220 g ham gübrenin 1 L su ile karıştırılması şeklinde hazırlanmıştır.

#### **4.2.2 Atıksuların Karakterizasyonu**

Deneyde kullanılan atıksuların sisteme eklenmeden önce çeşitli parametreleri karakterize edilmiştir. Atıksular için gerçekleştirilen KOİ ve Çözünmüş KOİ (ÇKOİ) deneyi SM5520 kapalı reflux titrimetrik metoduyla yapılmıştır [67]. Alkalinite deneyi titrimetrik metodla [67], amonyak azotu tayininde APHA 4500 NH<sub>3</sub>-B ön distilasyon adımı [68], daha sonra APHA 4500 NH<sub>3</sub>-C titrimetrik metodu [68], orto-fosfat için APHA 4500-P D kalay klorür metodu [68], UKM için APHA 2540-D metodu [68] ve UAKM için APHA 2540-E metodu [68] kapsamında belirtilen prosedürlere göre yapılmıştır. pH ölçümü için de WTW Multiline P4 Sentix41 cihazı [69] kullanılmıştır. Bu metotlara göre her bir besi atıksuyu için hesaplanan KOİ, ÇKOİ, alkalinite, amonyak azotu, orto-fosfat, UAKM ve pH değerleri Tablo 4.2’de verilmiştir.

**Tablo 4.2** Atıksu türüne göre deneyde ölçülen parametreler

| Besi Maddesi  | KOİ (mg/L) | ÇKOİ (mg/L) | Alkalinite (mg/L) | Amonyak Azotu (mg/L) | Orto-fosfat (mg/L) | UAKM (mg/L) | pH   |
|---------------|------------|-------------|-------------------|----------------------|--------------------|-------------|------|
| Peynir        | 96145      | 30420       | 4068              | 198.6                | 4.01               | 50770       | 5.43 |
| Mezbaha       | 13765      | 8005        | 1350              | 242.9                | 4.75               | 11255       | 6.36 |
| Balık         | 51300      | 20900       | 2006              | 367.5                | 4.31               | 24530       | 6.13 |
| Bisküvi       | 36480      | 22420       | 296               | 45.78                | 2.27               | 33083       | 5.57 |
| Köpek Maması  | 3823       | 1178        | 154               | 33.18                | 3.69               | 2458        | 6.43 |
| Tavuk Gübresi | 22540      | 5525        | 2558              | 83.44                | 3.98               | 13133       | 7.3  |
| Sebze         | 53165      | 33305       | 550               | 73.78                | 2.26               | 48387       | 4.8  |

### 4.3 Aşı Çamuru Temini ve Karakterizasyonu

BMP testlerinde iki ayrı aşı çamuru kullanılmıştır. Deneysel çalışmalar için temin edilen ilk aşı çamuru, mezbaha atıksuyu için kullanılmıştır. Bu aşı çamuru, İstanbul Teknik Üniversitesi (İTÜ) Çevre Mühendisliği Bölümü laboratuvarında işletilmekte olan bir anaerobik reaktörden alınmıştır. İkinci aşı çamuru ise geriye kalan atıksuların tamamında kullanılmıştır. Bu aşı çamuru, Balıkesir Gönen Biyogaz Tesisi'nden temin edilmiştir. Mezbaha atıksuyu için kullanılan aşı çamurunun UAKM değeri 16750 mg/L, diğer atıksular için kullanılan aşı çamurunun UAKM değeri ise 27674 mg/L olarak bulunmuştur.

#### 4.4 Besi Mikro/Makro Nütrient ve İz Element Çözeltilerinin Hazırlanması

Havasız şartlarda faaliyet gösteren mikroorganizmaların hücre sentezi için, organik madde, azot ve fosfor dışında bazı eser elementler de gerekmektedir. Bu nedenle, BMP şişelerindeki atıksu ortamına eklenmek üzere bir stok eser element çözeltisi hazırlanmıştır. Bu mikro/makro nütrient ve iz element çözeltileriyle hazırlanan çözeltiler, mikrobiyal büyümeyi hızlandırdığı için tercih edilmektedir [70]. Deneyde kullanılan iz elementleri ve miktarları Tablo 4.3'te verilmiştir.

**Tablo 4.3** Atıksulara mikrobiyal aktiviteyi teşvik amaçlı eklenen iz elementlerinin hacimsel miktarı

| Kullanılan İz Elementler (mg/L)                  |      |
|--------------------------------------------------|------|
| NH <sub>4</sub> Cl                               | 1200 |
| FeCl <sub>2</sub> .4H <sub>2</sub> O             | 40   |
| H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>                   | 0.5  |
| MgSO <sub>4</sub> .7H <sub>2</sub> O             | 400  |
| MnCl <sub>2</sub> .2H <sub>2</sub> O             | 0.5  |
| KCl                                              | 400  |
| KI                                               | 10   |
| NaHCO <sub>3</sub>                               | 6000 |
| NH <sub>4</sub> Cl                               | 1200 |
| (NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub> | 80   |
| CaCl <sub>2</sub> .2H <sub>2</sub> O             | 50   |
| CuCl <sub>2</sub> .2H <sub>2</sub> O             | 0.5  |
| NaWO <sub>4</sub> . 2H <sub>2</sub> O            | 0.5  |

**Tablo 4.3** Atıksulara mikrobiyal aktiviteyi teşvik amaçlı eklenen iz elementlerinin hacimsel miktarı (devamı)

|                                                       |     |
|-------------------------------------------------------|-----|
| $\text{Na}_2\text{O}_3\text{S}_2.5\text{H}_2\text{O}$ | 0.5 |
| $\text{Na}_2\text{S}.9\text{H}_2\text{O}$             | 0.5 |

#### 4.5 BMP Esaslı Deneysel Çalışmalardan Elde Edilen Sonuçlar

Çalışmada, substrat kaynağı olarak kullanılan yedi farklı agro-endüstriyel atıksu türü için BMP testi kapsamında belirlenen normalize kümülatif metan üretimleri; balık işleme atıksuyu ( $702.81 \text{ mL CH}_4/\text{g UKM}$ ,  $t = 105$  gün) > tavuk gübresi atıksuyu ( $638.52 \text{ mL CH}_4/\text{g UKM}$ ,  $t = 80$  gün) > peyniraltı atıksuyu ( $539.69 \text{ mL CH}_4/\text{g UKM}$ ,  $t = 112$  gün) > köpek maması atıksuyu ( $424.92 \text{ mL CH}_4/\text{g UKM}$ ,  $t = 106$  gün) > mezbaha atıksuyu ( $397.75 \text{ mL CH}_4/\text{g UKM}$ ,  $t = 113$  gün) > sebze atıksuyu ( $381.65 \text{ mL CH}_4/\text{g UKM}$ ,  $t = 61$  gün) > bisküvi atıksuyu ( $348.37 \text{ mL CH}_4/\text{g UKM}$ ,  $t = 85$  gün) sıralamasını vermiş olup, incelenen besi maddelerinin metan üretimi açısından aktif substrat kaynakları olarak kullanılabileceği belirlenmiştir. Her bir substrat kaynağı için elde edilen sonuçlara ait grafikler (kümülatif metan üretimleri:  $\text{mL CH}_4/\text{g UKM}$  ve günlük metan üretimleri:  $\text{mL CH}_4/\text{gün}$ ) Ek-A'da verilmiştir.

### **5.1 MATLAB Nümerik Hesaplama Ortamı**

MATLAB (MATrix LABoratory), mühendislik uygulamalarının, hesaplamalarının ve simülasyonlarının çoğunun gerçekleştirildiği matris ve matematik tabanlı kompleks bir programdır. Sayısal hesaplama, data analizi ve algoritma geliştirmek için kullanılır. Günümüzde makine öğrenmesi, derin öğrenme ve veri bilimi gibi ileri düzey konularda da kullanılmaktadır. En son versiyonu MATLAB 9.8 R2020a'dır (Mart 2020) [71].

MATLAB başlıca kullanım alanları aşağıda verilmiştir:

- Data bilimi
- Algoritma geliştirme
- Veriler için grafik oluşturma
- Simülasyon
- Lineer cebir hesaplamaları
- Görselleştirme ve data analizi
- Uygulama programlama arayüzü oluşturma
- Makine öğrenmesi
- Derin öğrenme

MATLAB kullanılarak;

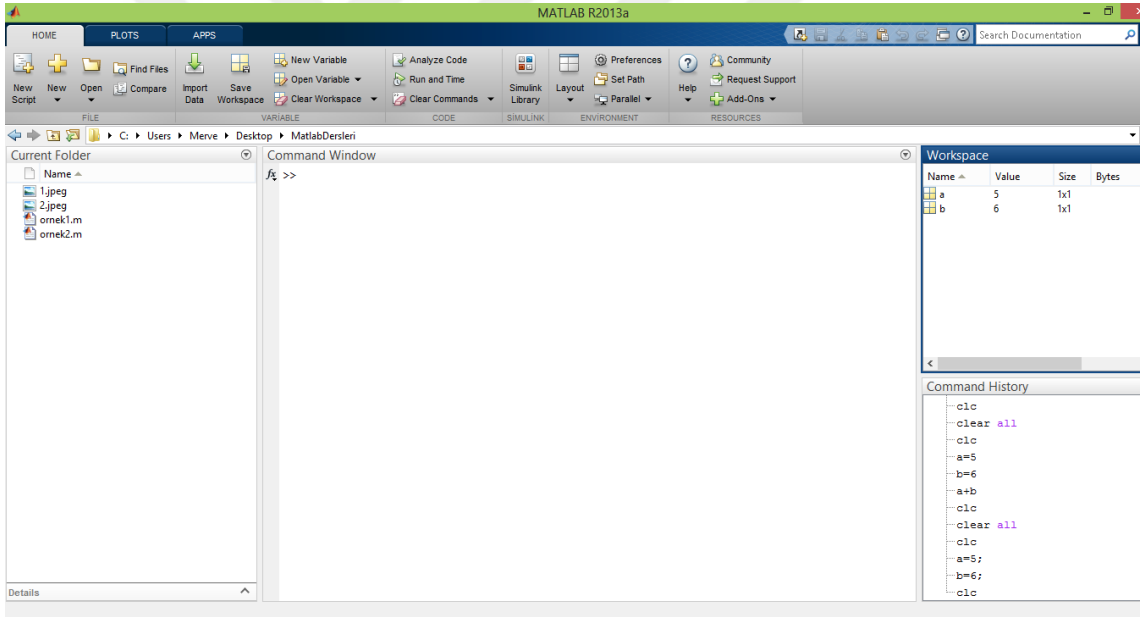
- Farklı algoritmalar dizayn edilebilir ve uygulanabilir.
- Farklı kaynaklardan gelen veriler MATLAB içerisine yüklenerek analizleri yapılabilir.
- Verilerin görselleştirilmesi sağlanabilir.
- Hesaplanan ve tasarlanan ürünlerin simülasyonları yapılabilir.

MATLAB 4 farklı pencereden oluşmaktadır. Bunlar;

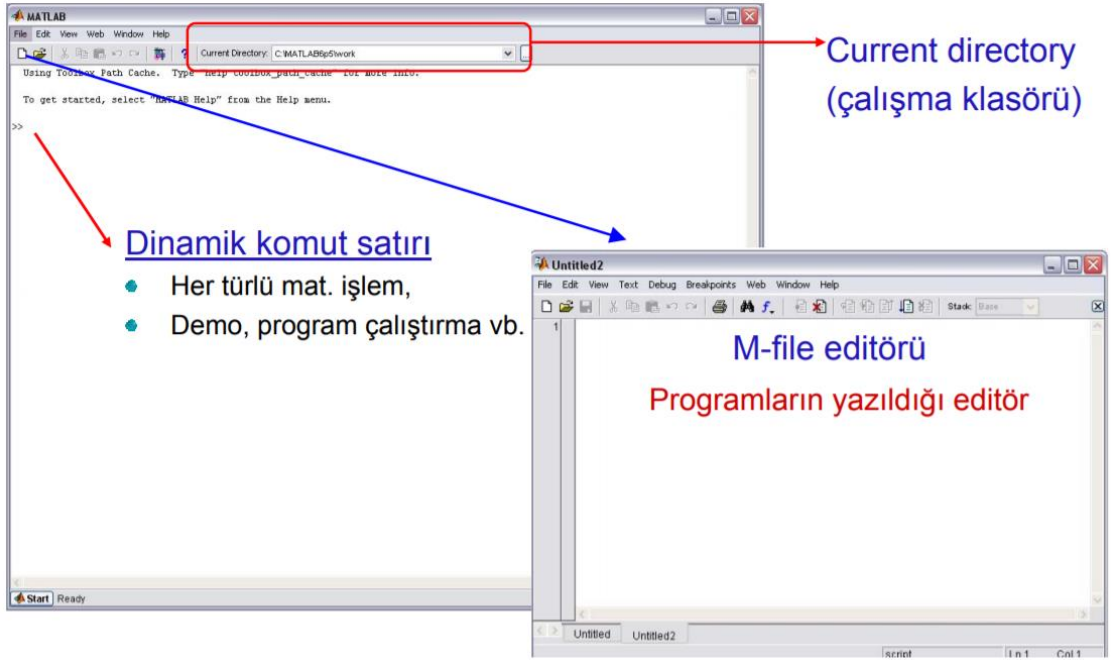
- Çalışma Klasörü Penceresi

- Komut Penceresi
- Çalışma Alanı Penceresi
- Geçmiş Komut Penceresi

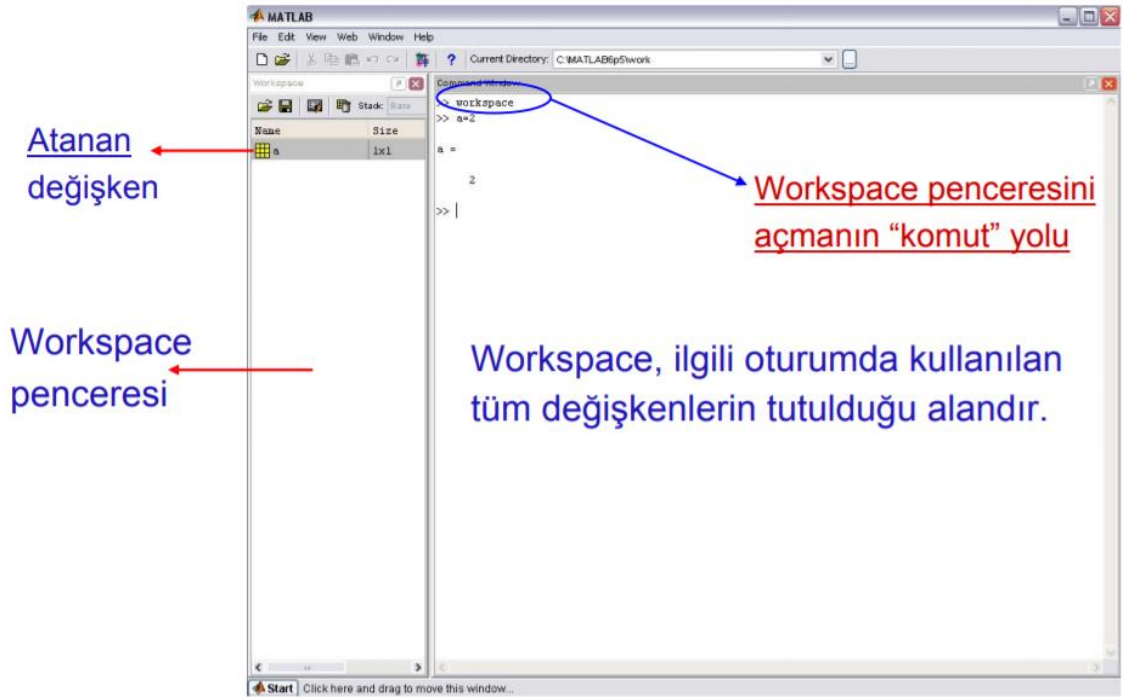
Çalışma klasörü penceresi üzerinde çalışılan program için gerekli olacak dosyaların kayıtlı olduğu klasördür. İstenilen verilere bu pencereden kolayca ulaşılır. Komut penceresi programın, fonksiyonların çalıştırıldığı ve değişkenlerin tanımlandığı alandır. Çalışma alanı penceresinde komut penceresinde tanımlanan değişkenlerin adı, boyutu ve değeri ile ilgili bilgiler bulunmaktadır [72]. Komut geçmişi penceresinde ise daha önce yapılan işlemler görülür. Örnek olarak, MATLAB 8.1 (2013) versiyonu ekran görüntüsü Şekil 5.1’de, komut penceresi ekran görüntüsü Şekil 5.2’de ve çalışma alanı penceresi ekran görüntüsü ise Şekil 5.3’te verilmiştir.



**Şekil 5.1** MATLAB 8.1 (R2013a) versiyonu ekran görüntüsü [72]



Şekil 5.2 Komut penceresi ekran görüntüsü [73]



Şekil 5.3 Çalışma alanı penceresi ekran görüntüsü [73]

MATLAB, kullanıcıların programları kendi özelliklerine göre özelleştirmelerine olanak tanıyan eksiksiz bir programlama araçları seti sunar. MATLAB kullanımı kolay olduğu için, programlama ve problem çözme tekniklerini öğretmek için mükemmel bir hesaplama ortamıdır [74-82].

MATLAB'in bilgi işlem ortamına matrisler, skalalar, sıra dizileri veya yatay vektörler ve sütun dizileri veya dikey vektörler gibi çeşitli matematiksel değişkenler kolayca girilebilir [75]. Bu yaklaşım, M-dosyalarındaki çeşitli yerleşik fonksiyonlar veya kullanıcı tanımlı fonksiyonlar kullanılarak karmaşık hesaplamaların verimli bir şekilde çözülmesini sağlar [75,77]. Bu nedenle, eğer bir problem matris tabanlı bir çözümle formüle edilebilirse, MATLAB, üst düzey bir dilde benzer bir programdan önemli ölçüde daha hızlı çalışır. MATLAB'in C dili programlamalara göre asıl avantajı sayısal hesaplamalar yaparken MATLAB'in yorumlanmasıdır. Ayrıca, C dili ile yazılan programlardan farklı olarak, her değişiklik yapıldığında devam etmeden önceki komutun sonucu görülebilir [82].

MATLAB kullanımı diğer program dillerine göre bize önemli avantajlar sağlar. Bunlar;

- Araç kutusunun kullanımı ile MATLAB'in işlevi büyük oranda genişletilebilir. Örneğin, statik araç çubuğu, verilerin özelleştirilmiş istatistiksel kullanımına olanak sağlar. Excel bağlantısı, verinin Excel tarafından okunabilen bir biçimde yazılmasını sağlar.
- MATLAB her bir veriyi bir matris olarak değerlendirir. Örneğin, bir satır, bir tam sayı ve bir sütundan oluşan bir matris olarak değerlendirilir. Matris çarpma ve toplama gibi matris işlemleri için gömülü hazır fonksiyonlar sağlar.
- Vektörleştirilmiş işlemler kullanılarak kodların boyutunu büyük ölçüde azaltır.
- Simulink, MATLAB'in grafik sistemi etkileşim için optimize edilmiş çıkışlar sağlar. Verinin grafiğe dökülmesini kolaylaştırarak, boyut ve renginin değiştirilmesine izin verir.

MATLAB'te temel dosya türleri aşağıdaki gibidir [73].

\*.m : MATLAB program dosyaları

\*.fig : Grafik dosyaları ve GUI'lerin grafik parçaları

\*.mat : Değişken ve matris dosyaları

\*.p : pre-parsed pseudo-code dosyaları

MATLAB'te genel amaçlı kullanılan kodlar vardır. Bunlar;

Workspace Komutu: Çalışma esnasında çalışma alanında mevcut değişkenler hakkında ayrıntılı bilgi verilir. Pencere içindeki değişkenlerin üzerine çift tıklayarak o değişkenle ilgili bilgilere ulaşıp değişiklikler yapılabilir.

Clear Komutu: Bellekte o anda mevcut bulunan değişkenleri bellekten siler.

Save Komutu: Dosyanın kaydedilmesini sağlar

Load Komutu: Diskte saklı bir dosya içindeki değişkenleri tekrar belleğe yükler.

dir Komutu: Bellekte kayıtlı olan dosyaları listeler.

Type Komutu: Bir .m uzantılı dosyanın içeriğini komut satırında görüntüler.

Edit Komutu: Bir M-dosyasının içeriğinde değişiklik yapma imkânı sağlar.

Open Komutu: Uzantısı ile belirtilen dosyayı açar.

clc Komutu: Komut satırını tamamen siler.

Date Komutu: Gün-Ay-Yıl'ı görüntüler (Örneğin, 17-Oct-2009)

Help Komutu: Yardım menüsünü açar.

Demo Komutu: Matlab demosunu çalıştırır.

Exit Komutu: Matlab oturumundan çıkar.

MATLAB kodlama ile ilgili örnekler aşağıda verilmiştir [83]:

- Verilen bir metin içerisinde kaç tane “a” harfi olduğunu bulan program

```
clear
```

```

clc

metin = 'Final sınavında hangi konular var';

s=0 ;

for i=1 : 1 : length (metin)

if metin (i) == "a"

s= s+1;

end

```

- Satır sütun sayısı bilinen bir matris oluşturma

```

clear

clc

m=input ('A matrisinin satır sayısını giriniz = ');

n= input ('A matrisinin sütun sayısını giriniz = ');

i=1;

while i<=m

j=1;

while j<=n

fprintf (' A matrisinin elemanlarını giriniz : ' , i , j)

A (i , j)= input ( ' ' );

j= j+1 ;

end

i= i+1 ;

end

```

- Girilen iki sayının toplamının karesinin bir fonksiyondan çağırılması

```

x=input ('Birinci sayıyı giriniz : ');

y =input ('İkinci sayıyı giriniz : ');

```

```
z=toplamkare (x, y);  
fprintf (a ve b sayılarının toplamalarının karesi c dir , x, y, z)  
function z=toplamkare (x, y)  
toplam= x+y;  
z=toplam ^2;  
end
```

## 5.2 Kinetik Modelleme

Biyokimyasal reaksiyon kinetiğinin değerlendirilmesi, matematiksel modelleme açısından reaksiyon mekanizmaları hakkında iyi bir fikir verir ve sistem performansının izlenmesi için prosesle ilgili spesifik parametrelerin açıklanmasına yardımcı olur [84]. Bu nedenle, birçok çalışmada farklı özelliklere ve yüksek katı içeriğine sahip çeşitli atık yığınlarının anaerobik fermantasyonunda kinetik modellerin önemi vurgulanmıştır [85,86]. Bunlar arasında, Schnute, Gompertz, Chen ve Hashimoto, Fitzhugh, Koni, Richards, Stannard, Grau n'inci mertebe ve geleneksel Monod modelleri, anaerobik fermantasyon sürecinde kinetik parametreleri belirlemek için en yaygın kullanılan matematiksel modeller olarak bildirilmiştir [87].

Mevcut modelleme çalışmasında, BMP testlerinde kullanılan yedi tarımsal endüstriyel substratlardan (mezhaba atıksuyu, balık atıksuyu, peyniraltı atıksuyu, bisküvi atıksuyu, tavuk gübresi, hayvan gıdası atıksuyu, sebze atıksuyu) elde edilen deneysel verilerin anaerobik biyobozunurluğu değerlendirmek için popüler ve yaygın olarak bilinen yedi farklı kinetik model (modifiye Gompertz denklemi, transfer fonksiyonu (reaksiyon eğrisi tipi) modeli, lojistik fonksiyon, Monod tipi modeli, iki fazlı üstel ilişki modeli, birinci dereceden model, Chen-Hashimoto modeli) kullanılmıştır. Kinetik modellerle ilişkili matematiksel parametreler aşağıdaki alt bölümlerde açıklanmıştır.

### 5.2.1 Modifiye Gompertz Denklemi

Modifiye Gompertz denklemi (MGE) organik kalıntıların kinetik ve gaz üretkenlik potansiyelini araştırmak için genellikle hem metan [88] hem de hidrojen üretimi [89] için kullanılmıştır. Temel olarak, modifiye edilmiş Gompertz modeli, belirli bir substratın [90] gecikme fazının süresini, maksimum metan üretim hızını ve metan üretim potansiyelini (veya nihai metan verimini) belirlemek için uygulanır. Orijinal Gompertz fonksiyonu, balık atığı [91], belediye katı atığı [65], Gelin duvağı (Rodos sarmaşığı) bitkisi atığı [88], atık sorgum yaprakları [90], primer ve sekonder çamur [92] ve hayvan gübreleri [93,94] gibi çeşitli substratların anaerobik çürüme prosesini tanımlamak için araştırmacılar tarafından uygulanmıştır.

Belirli bir zamanda ( $B(t)$ : mL CH<sub>4</sub> / g VS) reaksiyon süresi ( $t$ : gün) ile kümülatif veya birikmiş metan verimi arasındaki ilişkiyi gösteren Modifiye Gompertz Denkleminin genel formu (5.1) aşağıdaki gibidir [70,88,90,95,93,].

$$B(t) = B_0 \cdot \exp \left\{ -\exp \left[ \frac{R_m \cdot e}{B_0} \cdot (\lambda - t) + 1 \right] \right\} \quad (5.1)$$

$B_0$  : Kuluçka döneminin sonunda maksimum metan üretim potansiyeli veya nihai metan verimi (mL CH<sub>4</sub> / g VS);

$R_m$  : Maksimum metan üretim oranı (mL CH<sub>4</sub> / g VS / gün);

$\lambda$  : Gecikme süresi ya da kültürün yeni bir ortama yanıt verme ve metan üretmeye başlaması için gecikmeli bir süre (gün);

$t$  : Sindirim prosesi (gün) içindeki zamanı ifade eder ve  $e$ , doğal logaritmanın tabanını belirtir ( $\exp(1) = 2.718282$ ).

### 5.2.2 Transfer Fonksiyonu (Reaksiyon Eğrisi Tipi Model)

Transfer fonksiyonu (TF) veya reaksiyon eğrisi tipi model (RCtM) esas olarak kontrol amaçlı kullanılır ve herhangi bir işlemin bir girdi / çıktı sistemi olarak değerlendirilebileceğini varsayar [92]. Bu formülasyon (5.2) [70] ham ve aerobik olarak ön işlemde geçirilmiş kanalizasyon çamuru [97], pirinç samanı [98], ikincil kâğıt ve posa çamuru [99] ve simüle edilmiş meşrubat atıksuyu [100] gibi farklı

hammaddelerin anaerobik ayrışması için uygulanmıştır (birimler önceki denklemde tanımlanmıştır):

$$B(t) = B_0 \cdot \left\{ 1 - \exp \left[ - \frac{R_m \cdot (t - \lambda)}{B_0} \right] \right\} \quad (5.2)$$

### 5.2.3 Lojistik Fonksiyon

Lojistik fonksiyon (LF), gaz üretim hızının, halihazırda üretilen gaz miktarı, maksimum üretim oranı ve biyogaz üretiminin maksimum kapasitesi ile orantılı olduğunu değerlendirmektedir [92]. Klasik bir popülasyon büyüme modeli olarak kullanılır ve anaerobik fermantasyon sürecinin davranışını açıklamadaki iyi performansı nedeniyle kinetik analiz için yaygın olarak uygulanmıştır [95]. Bu model (5.3) [70], lignoselüloz atık hamurundan ve kâğıt fabrikası çamurundan [101], atık aktif çamurdan [95], ikincil kâğıt ve kâğıt hamuru çamurundan [99] metan üretiminin tahmin edilmesi için çeşitli çalışmalarda kullanılmıştır (birimler önceki denklemde tanımlanmıştır):

$$B(t) = \frac{B_0}{1 + \exp \left\{ \left[ \frac{4 \cdot R_m \cdot (\lambda - t)}{B_0} \right] + 2 \right\}} \quad (5.3)$$

### 5.2.4 Monod Tipi Model

Monod tipi model (5.4) [102] aşağıda verilmiştir.

$$BMP(t) = BMP_{\infty} \cdot \left( \frac{k_1 \cdot t}{1 + k_1 \cdot t} \right) \quad (5.4)$$

$BMP_{\infty}$ : nihai BMP (NmL / gVS),

BMP (t): t (gün) zamanındaki BMP değeri,

$k_1$ : (1/gün) oran sabitleridir.

### 5.2.5 İki Fazlı Üstel İlişki Modeli

İki fazlı üstel ilişki modeli (5.5) [103] aşağıda verilmiştir.

$$B = B_1 (1 - e^{-k_1 t}) + B_2 (1 - e^{-k_2 t}) \quad (5.5)$$

B : Zamanın bir fonksiyonu olarak metan üretimi,

B<sub>1</sub> : Kolayca bozunabilen organiklerin metana dönüşüm verimi,

B<sub>2</sub> : Daha az kolay bozunabilen materyalin metana dönüşüm verimini temsil eder.

k<sub>1</sub> ve k<sub>2</sub> : İlgili oran sabitleridir.

### 5.2.6 Birinci Dereceden Fonksiyon

Anaerobik sindirim genellikle birinci dereceden reaksiyon kinetiği (5.6) [104] ile tanımlanır. Aşağıda verilmiştir.

$$Y = Y_{\max} (1 - e^{-k_1 t}) \quad (5.6)$$

Burada;

Y = Metan verimi

k<sub>1</sub> = Birinci dereceden reaksiyon oran katsayısı (day<sup>-1</sup>)

Y<sub>max</sub> = Maksimum metan verimi (L CH<sub>4</sub> (gVS-1))

### 5.2.7 Chen-Hashimoto Modeli

Chen-Hashimoto modeli (5.7) [104] aşağıda verilmiştir.

$$\frac{S_i}{S_o} = \frac{k}{HRT \mu_{\max} + k - 1} \quad (5.7)$$

Burada;

S<sub>i</sub> : Çıkış substrat konsantrasyonu (mg L<sup>-1</sup>)

S<sub>0</sub> : Giriş substrat konsantrasyonu (mg L<sup>-1</sup>)

HRT : Hidrolik bekleme süresi (gün)

k: Chen-Hashimoto kinetik sabiti

μ<sub>max</sub>: Mikroorganizmaların maksimum büyüme oranı (gün<sup>-1</sup>)

Substrat konsantrasyonu yaygın olarak KOİ vasıtasıyla ölçülür. KOİ giderimi, anaerobik proseslerde biyogaz üretiminin bir göstergesidir. Bu durum, (5.8) eşitliğinde [104] verilmiştir.

$$\frac{S_i}{S_o} = \frac{Y_{max}-Y}{Y_{max}} \quad (5.8)$$

Bu denklem, aşağıdaki denkleme (5.9) [104] dönüştürülebilir:

$$\frac{Y_{max}}{Y_{max}-Y} = \frac{HRT\mu_{max}}{k} + 1 - \frac{1}{k} \quad (5.9)$$

Burada,  $\frac{Y_{max}}{Y_{max}-Y}$  değerleri hidrolik bekletme süresine karşı çizildiğinde lineer bir grafik elde edilmekte olup, bu doğrunun eğimi  $\frac{\mu_{max}}{k}$  ve y-eksenini kesim noktası da  $1 - \frac{1}{k}$  olmaktadır.

Sistemde, mikroorganizmaların yıkanmasının gerçekleştiği kritik bekletme süresi (5.10) [104] aşağıda verildiği gibi olup, yavaş çoğalan aktif biyokütlenin sistemden yıkanmasını önlemek için çamur yaşı en az bu değerde tutulmalıdır.

$$t_c = \frac{1}{\mu_{max}} \quad (5.10)$$

### 5.3 MATLAB Esaslı Hesaplama Yöntemi

Bu çalışmada, aşağıda belirtilen maddeler için hibrid bilgisayar tabanlı bir programlama stratejisi geliştirilmiştir:

- Biyokinetik parametreleri belirlemek,
- İncelenen organik atıklardan (mezbaa atıksuyu, tavuk gübresi, balık atıksuyu, sebze atıksuyu, hayvan gıdası atıksuyu, peyniraltı atıksuyu) elde edilebilen biyo-metan miktarını hesaplamak,
- Araştırılan substratların biyolojik olarak bozunabilirliğini değerlendirmek; ve

- Enerji/ekonomik temelli bir değerlendirme yapmaktır.

Uygulanan kodlama şeması, farklı hedeflerin tek bir bilgisayar paketinde birleştirilmesiyle geliştirildiğinden “hibrid programlama stratejisi” olarak adlandırılmıştır (kısıtlamasız doğrusal olmayan optimizasyon, birçok farklı istatistiksel tahmin edicinin belirlenmesi ve yukarıda bahsedilen hammaddelerin metan verimliliğinin ekonomik bir değerlendirmesinden oluşur).

Uygulanan modellerle ilişkili kinetik parametrelerin ( $B_0$ ,  $R_m$ ,  $\lambda$ ) belirlenmesi için, Windows 10 platformunda Casper Excalibur’da çalıştırılan (Intel® Core™ i7-7700HQ CPU, 2.81 GHz, 16 GB of RAM, 64-bit) MATLAB® R2018a yazılımında (V9.4.0.813654, 64-bit (win64), Academic License Number: 40578168, MathWorks Inc., Natick, MA) M-dosya düzenleyicisine bir çözüm komut dosyası yazılmıştır. Bu çalışmada, MATLAB® nümerik hesaplama ortamında çok boyutlu kısıtlamasız doğrusal olmayan minimizasyon için iki özel yerleşik kod (fminsearch ve fminunc) uygulanmıştır.

İlk “fminsearch” kodu, Nelder-Mead simpleks doğrudan arama algoritmasını (N-M SDSA) kullanır ve türev içermeyen yöntemi kullanarak minimum sınırsız çok değişkenli fonksiyonu bulur. NM SDSA (John Ashworth Nelder ve Roger Mead tarafından 1965'te önerilmiştir), çok boyutlu kısıtlamasız bir optimizasyonda amaç fonksiyonunun minimum veya maksimum değerlerini (objektif fonksiyonu “f” yerine “-f” olarak kodlayarak) elde etmek için yaygın olarak kullanılan bir sayısal tekniktir. Bu algoritma, n boyutlu x vektörleri için (n + 1) noktadan oluşan bir Simpleks kullanır [105]. Algoritma ilk olarak  $x_0$ 'a her bir  $x_{0(i)}$  elemanının % 5'ini ekleyerek ve bu n vektörlerini  $x_0$  dışında Simpleksin bileşenleri olarak kullanarak ilk yaklaşım  $x_0$  etrafında bir Simpleks yapar (eğer  $x_0(i) = 0$  ise bileşen i olarak 0.00025 kullanılır). Daha sonra, tekrarlanan her adımında Simpleksi, mevcut Simpleks içinde veya yakınında yeni bir nokta ile sürekli olarak değiştirir [106].

İkinci kod “fminunc”, kübik satır arama algoritması (LSA) ile BFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno) Quasi-Newton (Q-N) prosedürünü kullanır. BFGS Q-N LSA (William Cooper Davidon tarafından 1959'da tanıtıldı) sıfır veya objektif fonksiyonların lokal maksima ve minimumlarını elde etmek için uygulanır (f). Bu

kod, Jacobian ( $J_i^j = \partial f_i / \partial x_j$ ) veya Hessian ( $H_{i,j} = \partial^2 f / (\partial x_i \partial x_j)$ ) kullanılamıyorsa veya aramanın her adımında hesaplanması çok zorsa uygulanabilir. Newton tipi yöntemler Hessian matrisi,  $H'$ 'yi doğrudan hesaplar ve bir dizi tekrardan sonra minimumun yerini bulmak için bir iniş yönünde devam eder. Buna rağmen,  $H'$ 'nin sayısal hesaplanması büyük miktarda ölçümleme gerektirir. Bunun tersine, Q-N yöntemleri, uygun bir güncelleme tekniği kullanarak  $H'$ 'ye bir yaklaşım yapmak için eğrilik bilgisi oluşturmak için gözlemlenen  $f(x)$  ve  $\nabla f(x)$  davranışını kullanarak bunu önler.

$H$  tahminini güncellemek için, bu algoritma BFGS formülünü (5.11) kullanır [105]:

$$H_{k+1} = H_k + \frac{q_k q_k^T}{q_k^T s_k} - \frac{H_k^T s_k s_k^T H_k}{s_k^T H_k s_k}; s_k = x_{k+1} - x_k; q_k = \nabla f(x_{k+1}) - \nabla f(x_k) \quad (5.11)$$

Mevcut hesaplama analizinde, her kinetik model yukarıda belirtilen kodlar kullanılarak çözülmüştür. Tahminler bir dizi istatistiksel performans göstergesi tarafından kontrol edilmiştir ve en iyi sonuçlar, iyi uyum kriterlerine göre  $B_0$ ,  $R_m$ , ve  $\lambda$  için seçilmiştir. Önerilen MATLAB® tabanlı hibrid optimizasyon prosedürüne (hata fonksiyonunun en aza indirilmesi) ait pseudo (sözde) kod, Ek-B'de verilmiştir.

### 5.3.1 Deneysel Çalışmada Dikkate Alınan Kabuller ve Sayısal Analiz

Bu çalışmada, substratların biyo-metanizasyon işlemi ve incelenen atıksuların biyo-kinetik katsayılarının tahmini için aşağıdaki kabuller yapılmıştır:

- BMP şişeleri tamamen karıştırılmıştır (hacim sabittir ve hidroliz hız sınırlayıcı adımdır).
- KOİ analizi teorik  $CH_4$  potansiyelinin hesaplanmasını açıklamaktadır. Teorik olarak, STP'de (standart sıcaklık ve basınç) 0.350 L metan veya 35 °C ve 1 atm'de 0.395 L metan 1 g KOİ giderimi ile gözlenebilir.
- Tahmin edilen metan üretim potansiyeli ( $B_0$ ), deneysel  $CH_4$  üretim potansiyelinden ( $B_{0,exp}$ ) %10'dan fazla farklılık gösteriyorsa, kinetik model deneysel olarak elde edilen verileri açıklamak için kullanılamaz ve kinetik parametreler geçerli değildir [107].
- Zamana bağlı olarak ardışık yapılan gözlemler arasındaki farklar %5'ten fazla değilse, sistemin biyogazdaki kümülatif  $CH_4$  üretimi ve  $CH_4$  içeriği

gibi ölçülen parametreler açısından kararlı durumda olduğu varsayılmıştır.

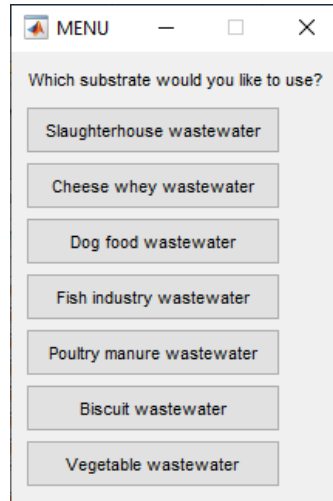
- İzin verilen maksimum tekrarlama veya fonksiyon değerlendirmesi sayısı pozitif bir tamsayıdır ve “200 × değişken sayısı” olarak alınmıştır.
- Fonksiyon değerinde sonlandırma toleransı (TolFun, eğer  $|f(x_i) - f(x_{i+1})| < \text{TolFun}$  ise tekrarlama biter) ve x için sonlandırma toleransı (TolX, eğer  $|x_i - x_{i+1}| < \text{TolX}$  ise, tekrarlama sona erer) "seçenekler" kullanılarak  $1 \times 10^{-4}$  olarak kabul edilmiştir. Diğer problem çözücülerin aksine, “fminsearch” hem TolFun hem de TolX'i tatmin ettiğinde durur.
- Gözlenen değerler ile uygun değerler arasında 0,95 değerinde belirleme katsayısı ( $R^2$ ), uygulanan bir modelin kinetik parametrelerin tahmininde önemli bir performansa sahip olup olmadığını değerlendirmek için bir kriter veya eşik olarak seçilmiştir.

### 5.3.2 İstatistiksel Analiz

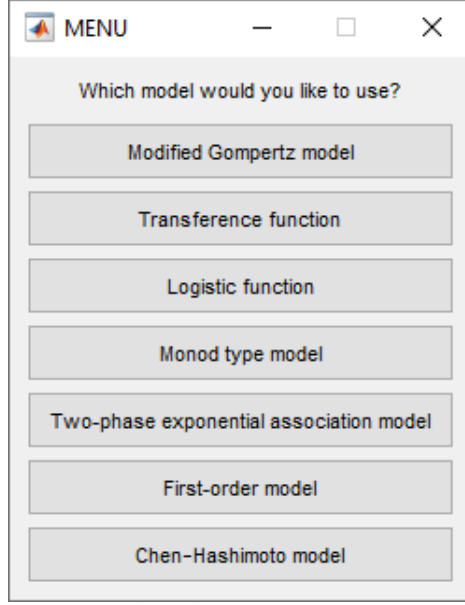
Bu çalışmada, uygulanan kinetik modellerin tahmin performansı üzerinde çapraz karşılaştırmalar yapmak için istatistiksel analizler yapılmıştır. Bu amaçla, determinasyon katsayısı ( $R^2$ ), ortalama mutlak hata (MAE), ortalama kare kök hatası (RMSE), sistematik ve sistematik olmayan RMSE (sırasıyla RMSE<sub>s</sub> ve RMSE<sub>u</sub>), sistematik hatanın oranı (PSE), uyum indeksi (IA), ikinin faktörü (FA2), fraksiyonel varyans (FV), varyasyon katsayısı (CV), standart tahmin hatası (SEE) ve Durbin – Watson (DW) istatistiği gibi performans indikatörleri deneysel veriler ile modellerin çıktıları arasındaki uyumu ölçmek için kullanılmıştır. Bu istatistiksel indikatörlerin ayrıntılı tanımları daha önce yapılmış çalışmalarda bulunabilir [108-110].

## 5.4 MATLAB Esaslı Modelleme Sonuçları

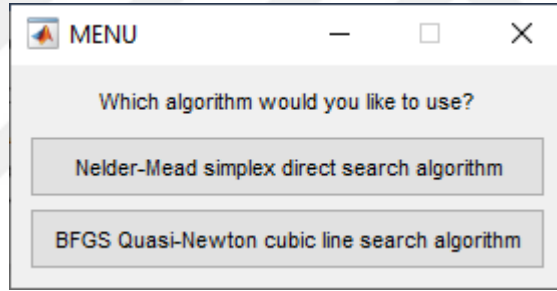
Bu bölümde, Bölüm 5.2’de sunulan yedi farklı kinetik modelin (modifiye Gompertz denklemi, transfer fonksiyonu (reaksiyon eğrisi tipi) modeli, lojistik fonksiyon, Monod tipi modeli, iki fazlı üstel ilişki modeli, birinci dereceden model, Chen-Hashimoto modeli), BMP testlerinde kullanılan yedi agro-endüstriyel substratlardan (mezhaba atıksuyu, peyniraltı atıksuyu, balık atıksuyu, bisküvi atıksuyu, tavuk gübresi atıksuyu, köpek maması atıksuyu, sebze atıksuyu) elde edilen deneysel veriler için Bölüm 5.3’te sunulan “hibrid programlama stratejisi” (kısıtlamasız doğrusal olmayan optimizasyon, birçok farklı istatistiksel performans indikatörünün belirlenmesi ve hammaddelerin metan verimliliğinin ekonomik bir değerlendirmesi) kapsamında çözümlenmesi neticesinde elde edilen modelleme sonuçları ve görsel çıktılar sunulmuştur. MATLAB® esaslı modelleme sonuçlarından elde edilen neticeler matematiksel, istatistiksel ve ekonomik anlamda değerlendirilmiştir. Bu bağlamda, kinetik modellerin kendi içinde mukayesesi yapılmış ve ilgili substrat kaynağına ait anaerobik biyobozunurluk sürecini en iyi temsil eden model yapısı ve kinetik parametreler belirlenmiştir. Aynı zamanda, BMP testlerinde kullanılan agro-endüstriyel besi maddelerinden sağlanabilecek enerji değerlerinin hesaplanması yapılmıştır.



**Şekil 5.4** MATLAB® esaslı hibrid programlama çalıştırılması neticesinde agro-endüstriyel substratların seçimi için elde edilen ilk menü ekranı



**Şekil 5.5** MATLAB® esaslı hibrid programlama çalıştırılması neticesinde kinetik modellerin seçimi için elde edilen ilk menü ekranı

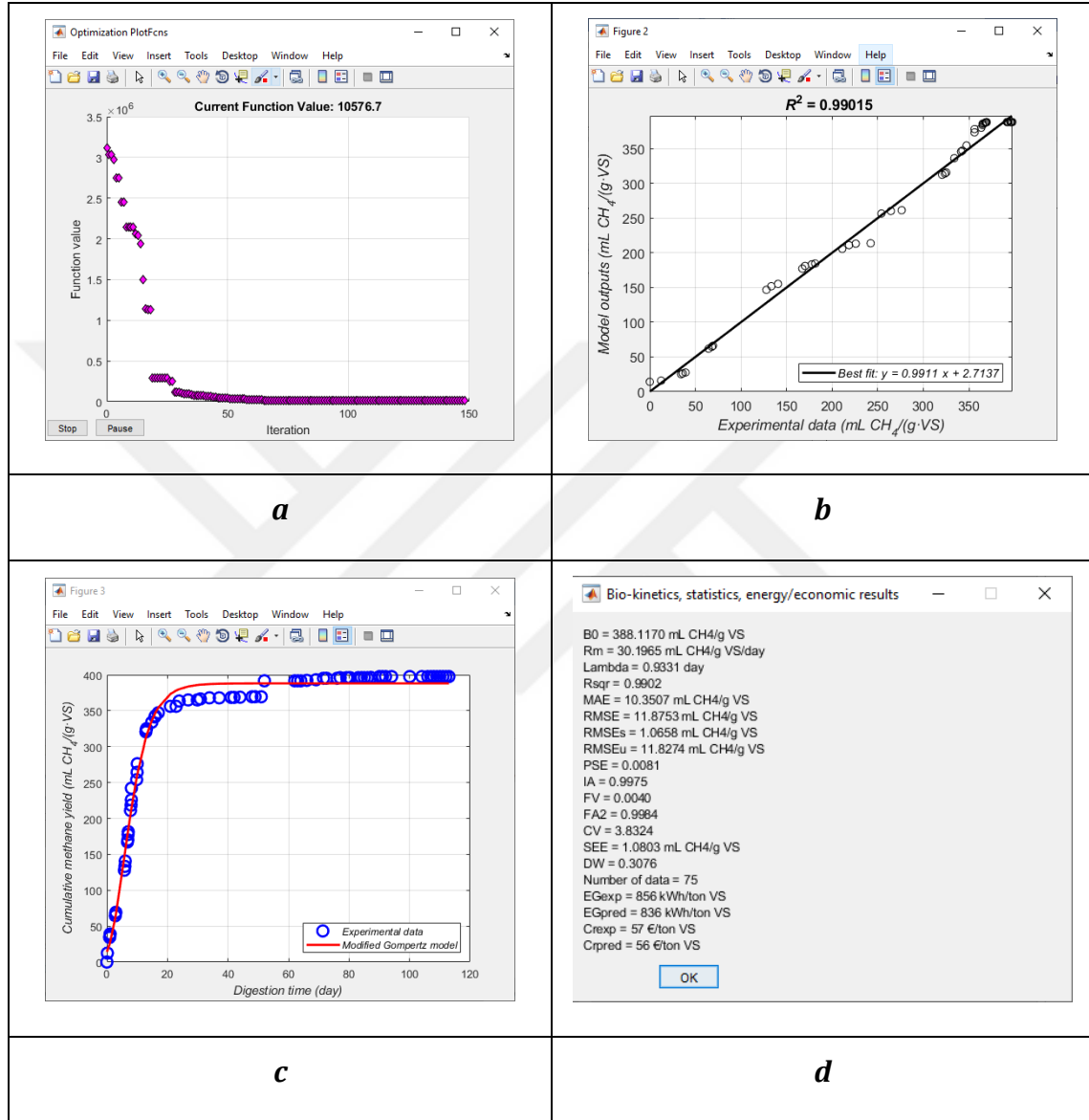


**Şekil 5.6** MATLAB® esaslı hibrid programlama çalıştırılması neticesinde arama algoritmalarının seçimi için elde edilen ilk menü ekranı

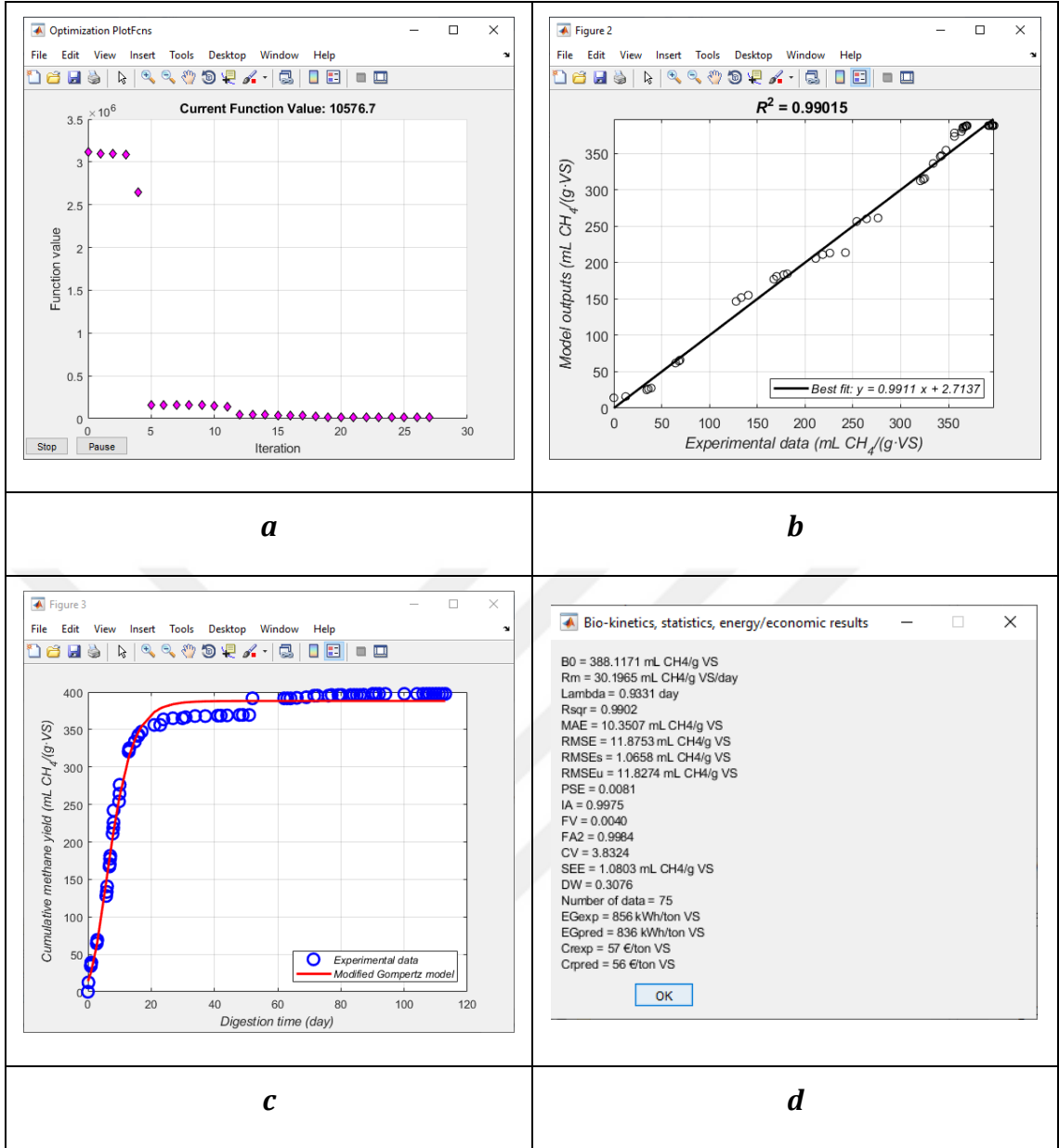
Şekil 5.4–5.6’da gösterilen menü ekranları vasıtasıyla her bir substrat kaynağı için tüm kinetik modeller iki farklı arama algoritmasına (Nelder-Mead simpleks doğrudan arama algoritması: N-M SDSA ve BFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno) Quasi-Newton (Q-N) kübik doğrultu belirleme algoritması: BFGS Q-N CLSA) göre çözümlenmiş ve elde edilen görsel sonuçlar (optimizasyon işlemi, deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasındaki korelasyon, kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasındaki uyum, biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları) Şekil 5.7–5.104’te gösterilmiş ve modellere ait kinetik parametreler ise Tablo 5.1–5.18’de verilmiştir. Tablolarda en iyi performans indikatörleri koyu renk ile gösterilmiş olup, “NaN” ifadeleri ise ilgili

istatistiksel parametrenin mevcut modelin çözümü için değer olarak bir karşılığının bulunmadığını veya beklenen ekstrem bir sonuç hesaplandığını (dolayısıyla anlamlı sonuç olarak kabul edilmediğini) göstermektedir.

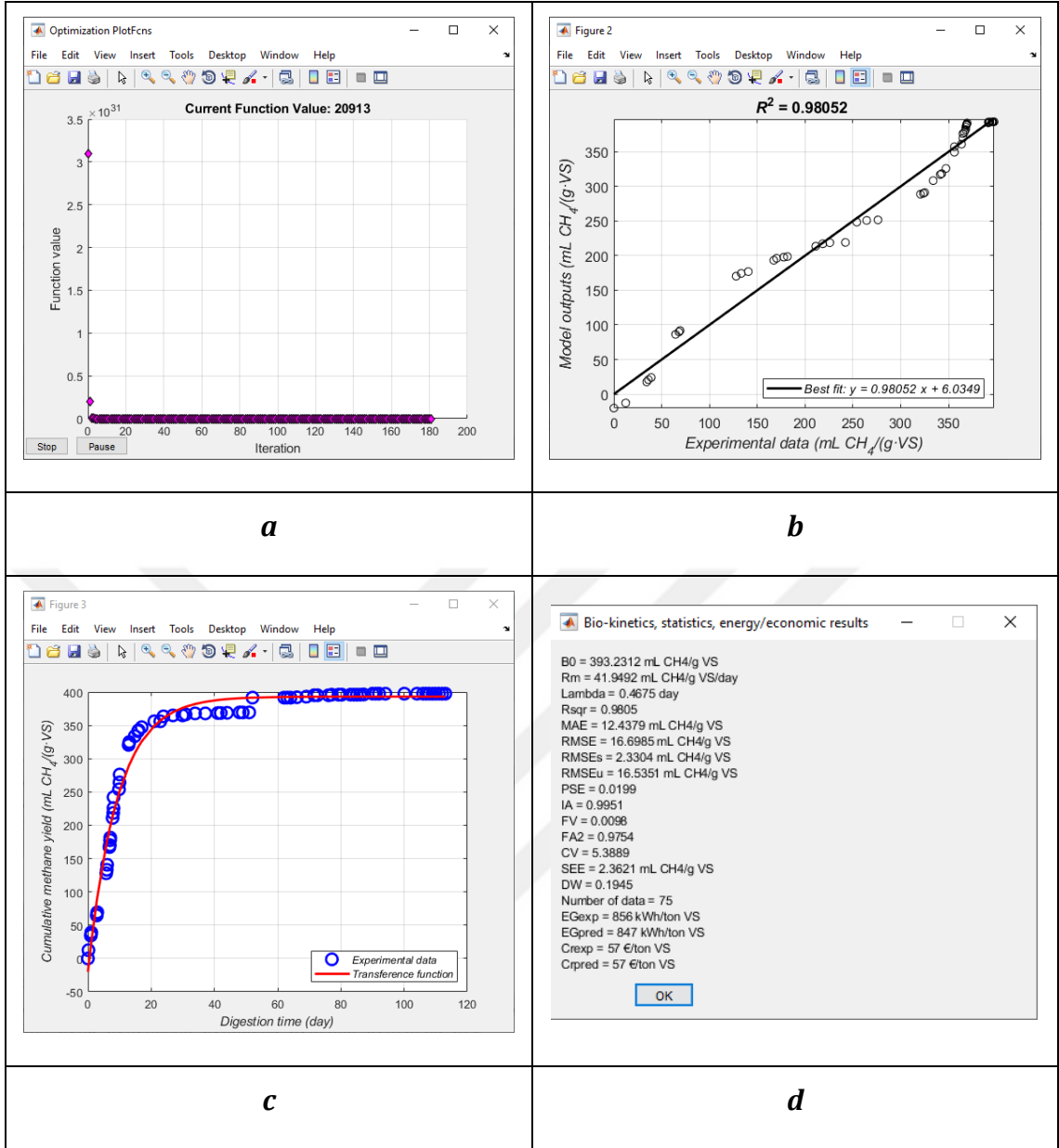
#### 5.4.1 Mezbaa Atıksuyu



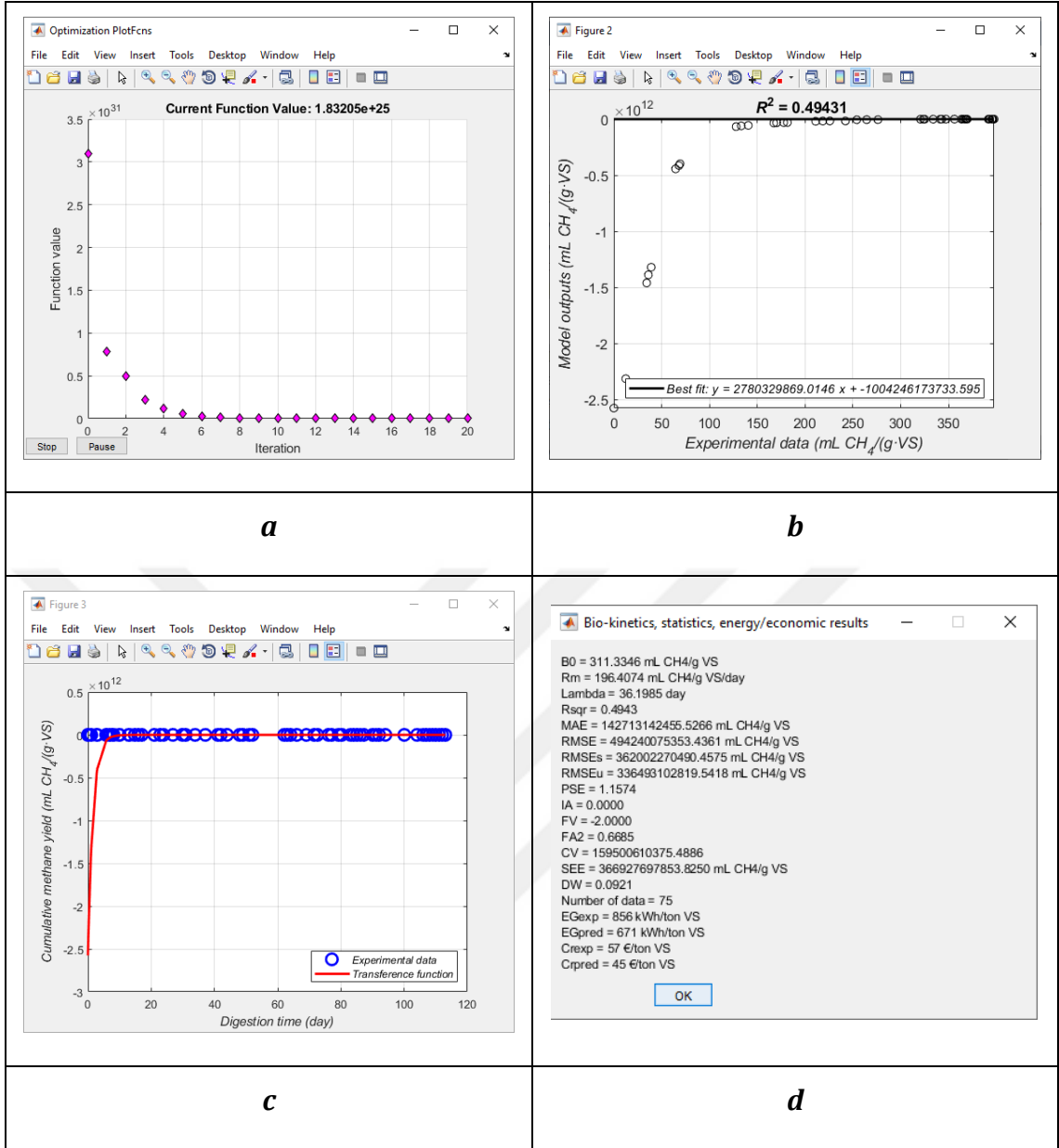
**Şekil 5.7** Mezbaa atıksuyuna ait deneysel verilere göre “Modifiye Gompertz Modeli (MGM)” ve “Nelder-Mead simpleks doğrudan arama algoritması (N-M SDSA)” çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları



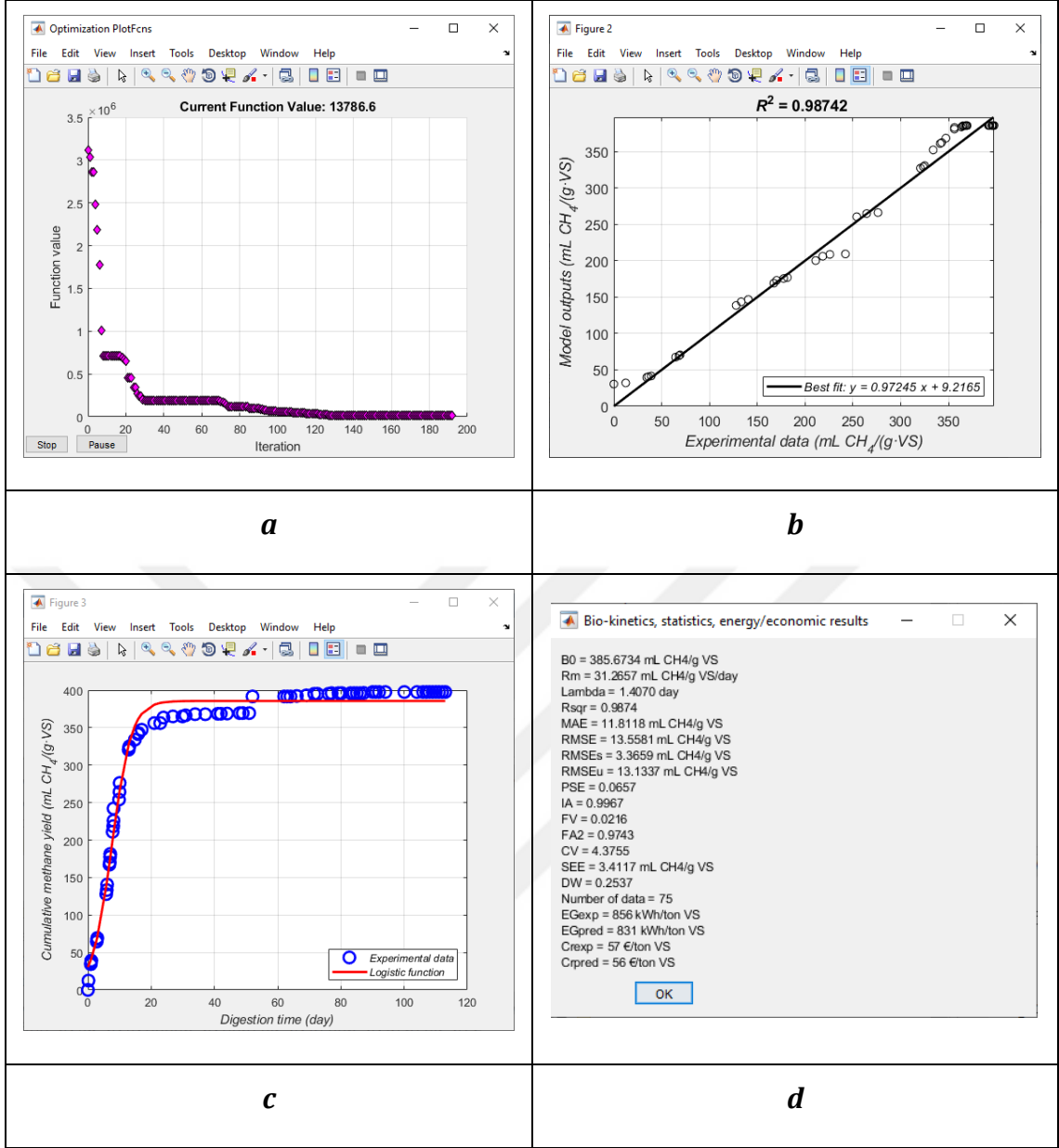
**Şekil 5.8** Mezbaaha atıksuyuna ait deneysel verilere göre “Modifiye Gompertz Modeli (MGM)” ve “BFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno) Quasi-Newton (Q-N) kübik doğrultu belirleme algoritması (BFGS Q-N CLSA)” çözümü için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları



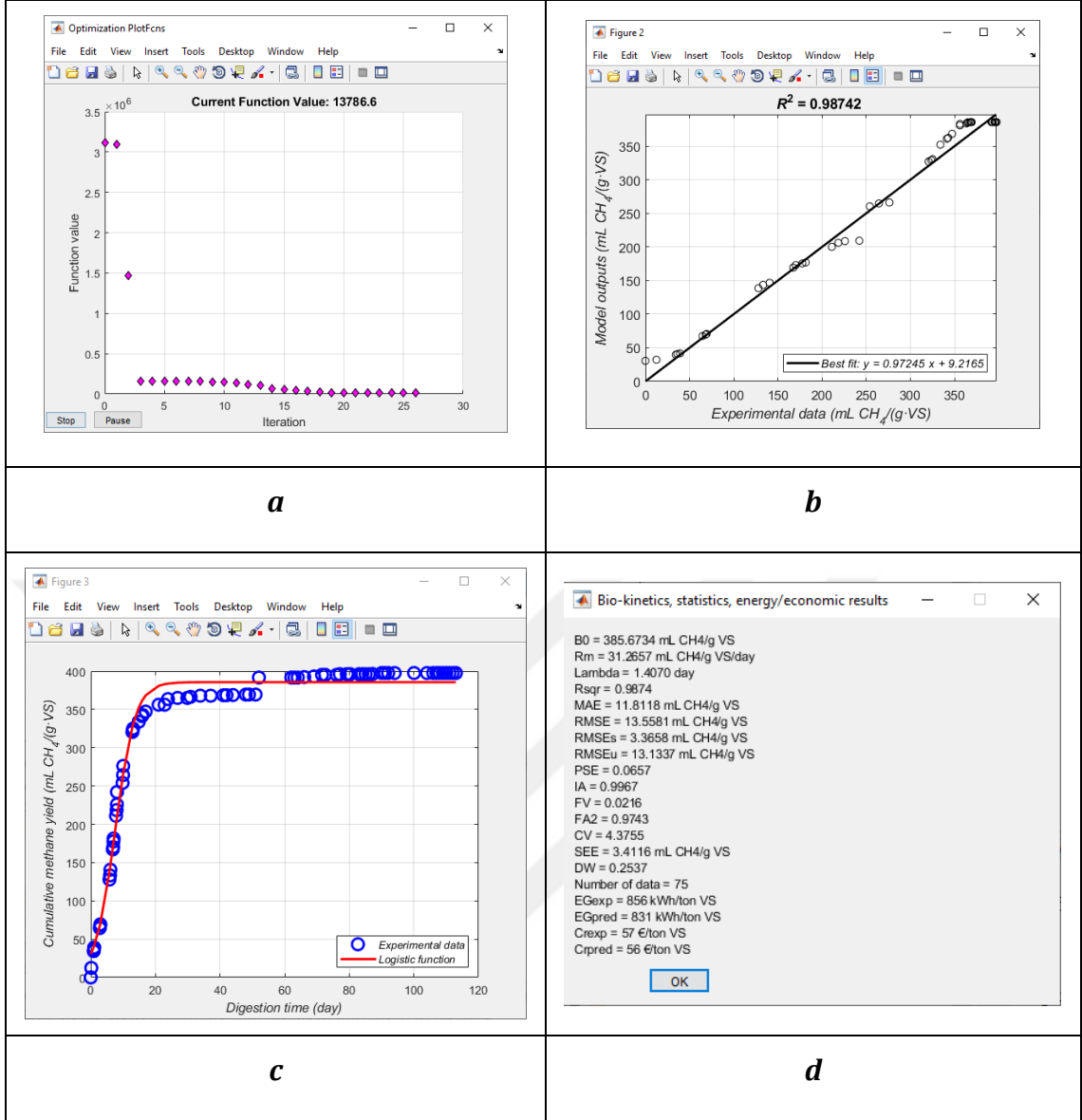
**Şekil 5.9** Mezbaha atıksuyuna ait deneysel verilere göre “Transfer Fonksiyonu (TF)” ve “Nelder-Mead simpleks doğrudan arama algoritması (N-M SDSA)” çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları



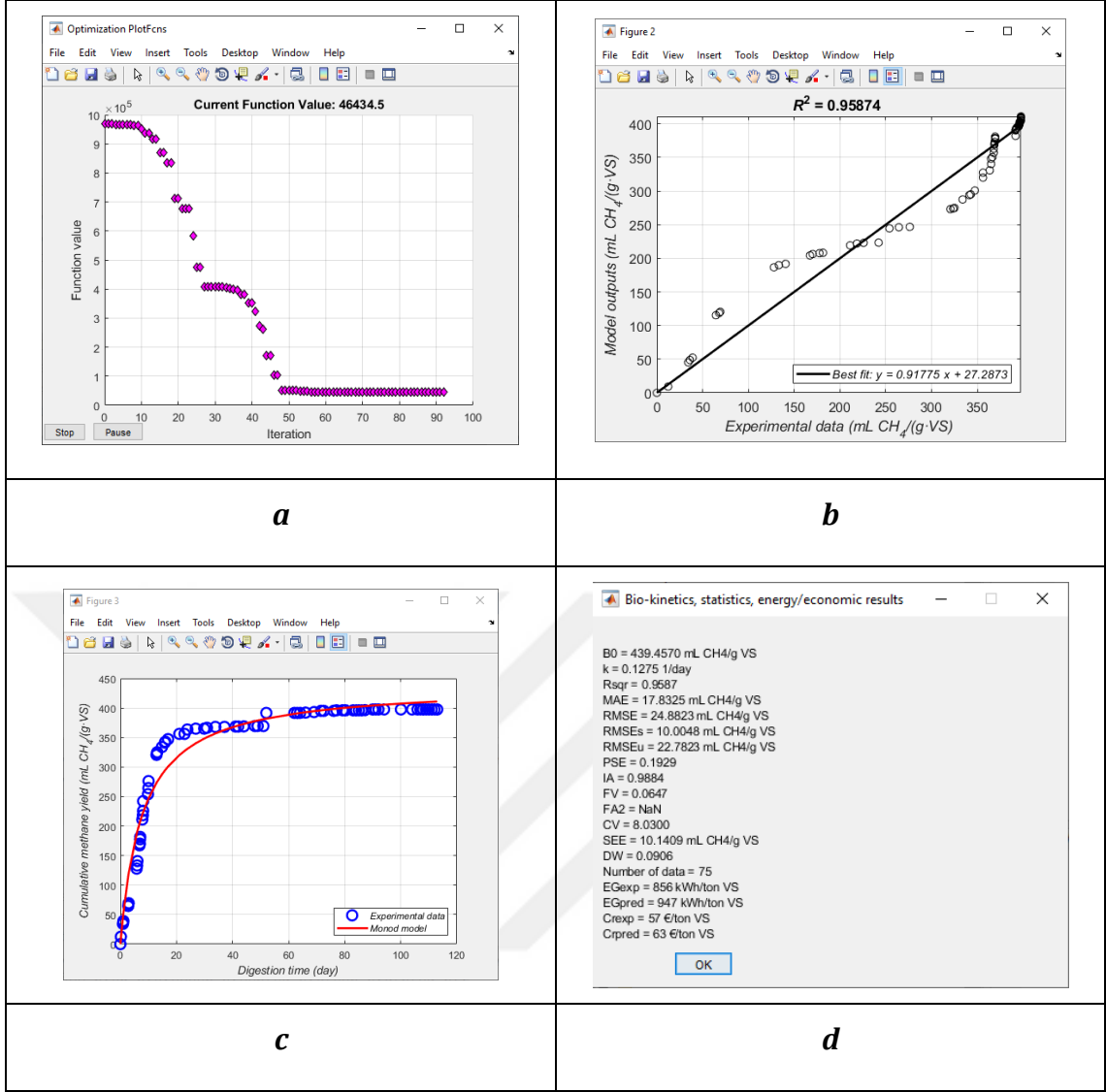
**Şekil 5.10** Mezbaşa atıksuyuna ait deneysel verilere göre “Transfer Fonksiyonu (TF)” ve “BFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno) Quasi-Newton (Q-N) kübik doğrultu belirleme algoritması (BFGS Q-N CLSA)” çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları



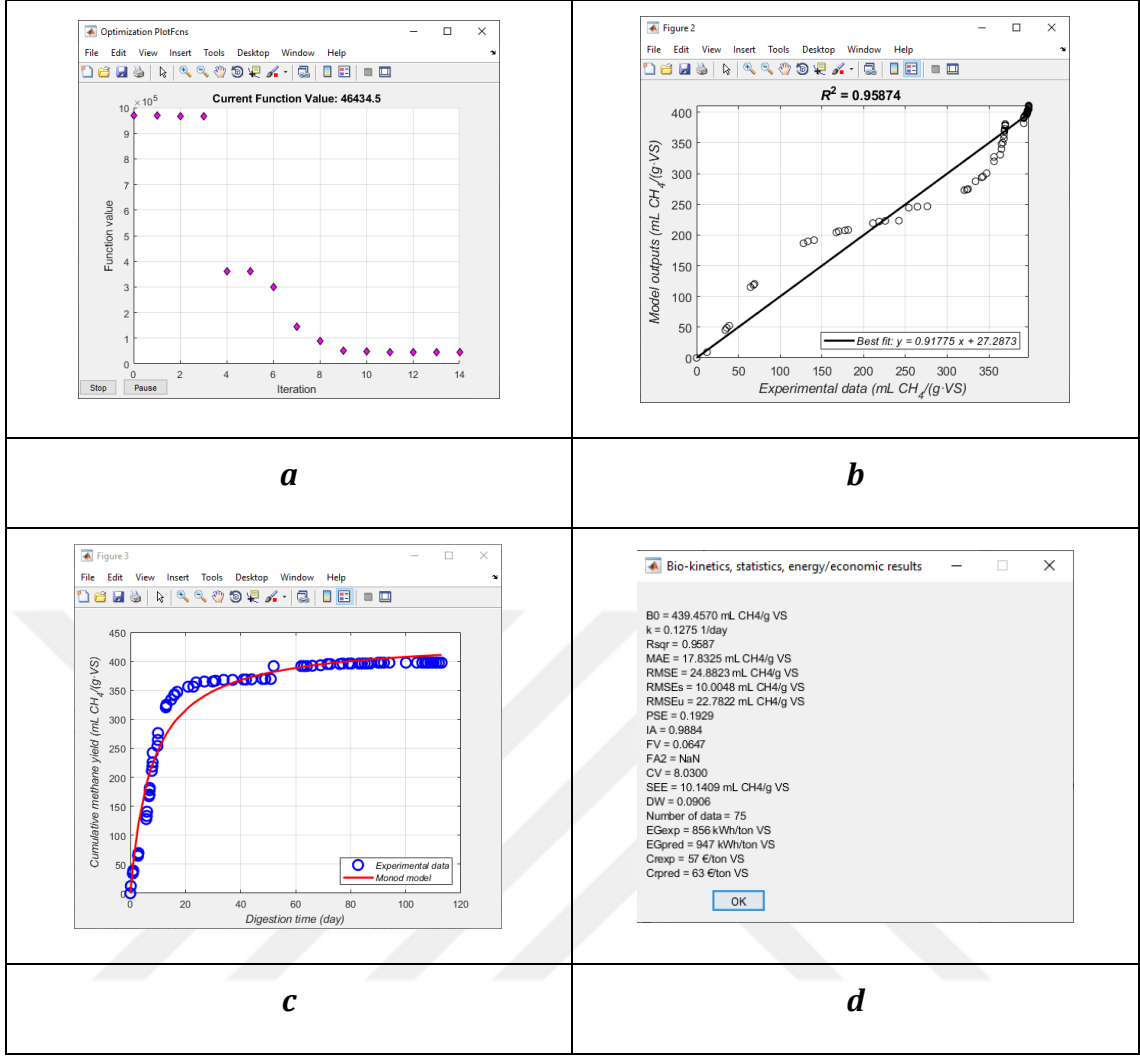
**Şekil 5.11** Mezbahe atıksuyuna ait deneysel verilere göre “Lojistik Fonksiyon (LF)” ve “Nelder-Mead simpleks doğrudan arama algoritması (N-M SDSA)” çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları



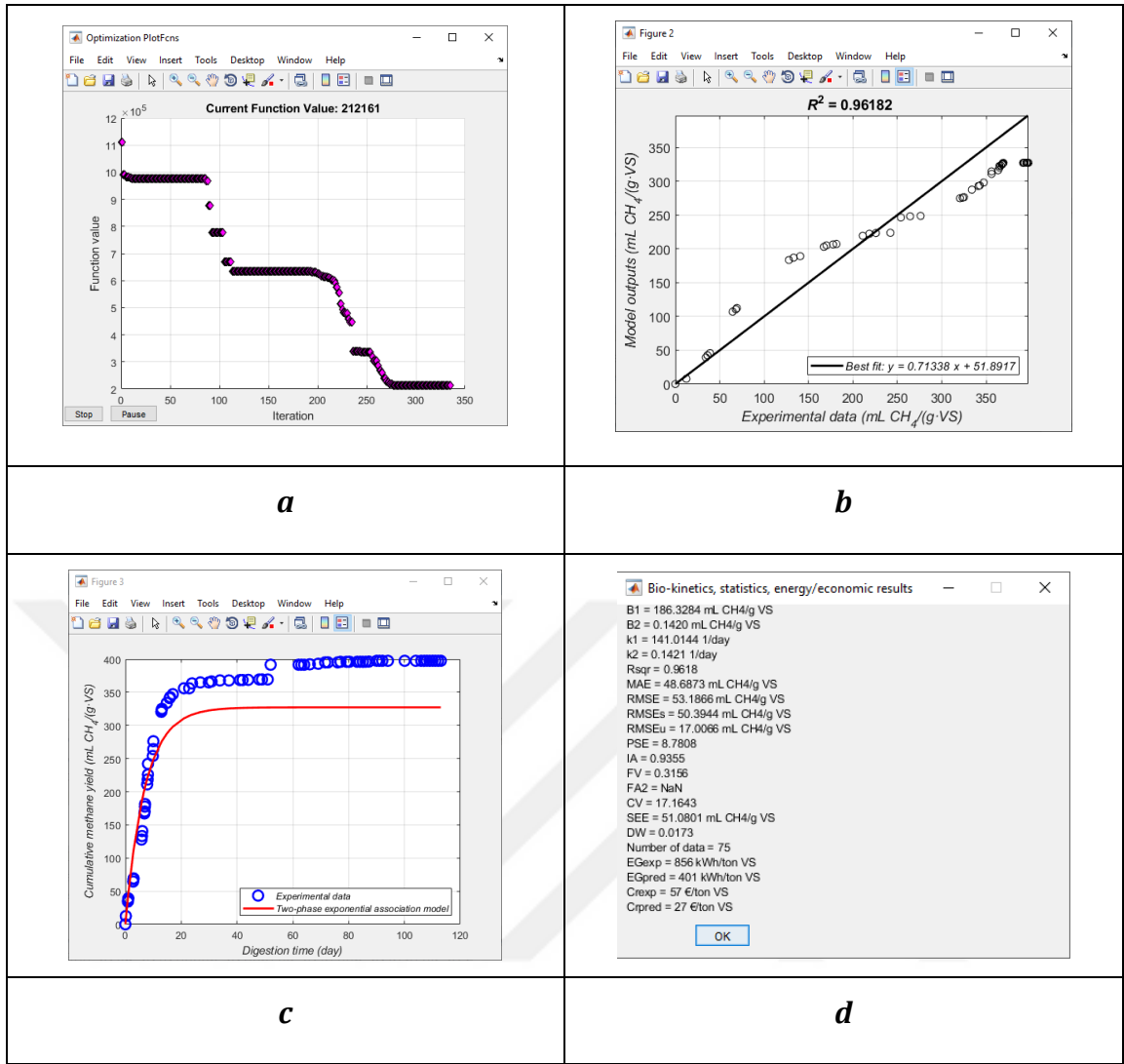
**Şekil 5.12** Mezbaşa atıksuyuna ait deneysel verilere göre “Lojistik Fonksiyon (LF)” ve “BFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno) Quasi-Newton (Q-N) kübik doğrultu belirleme algoritması (BFGS Q-N CLSA)” çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları



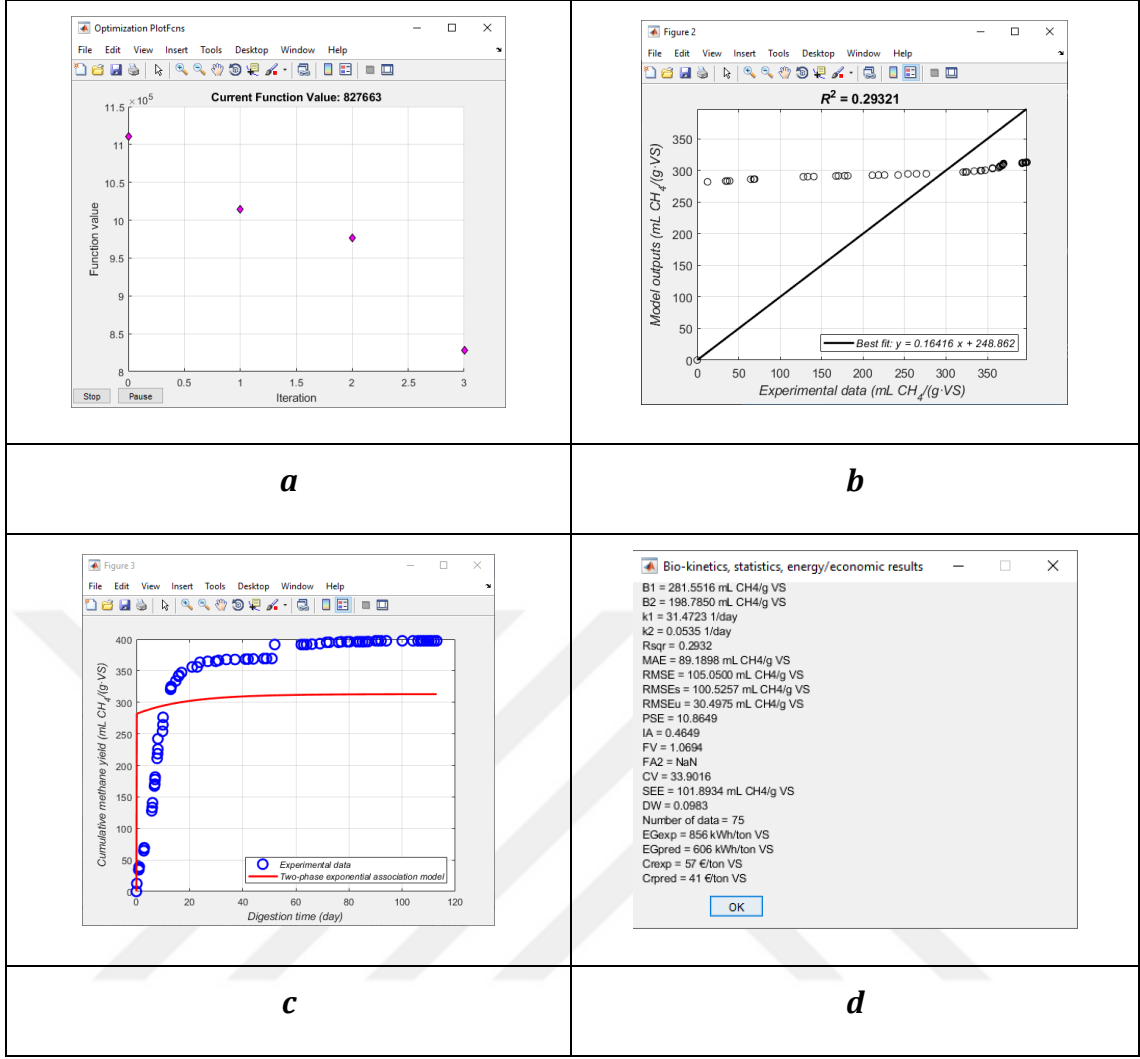
**Şekil 5.13** Mezbaaha atıksuyuna ait deneysel verilere göre “Monod Tipi Model (MTM)” ve “Nelder-Mead simpleks doğrudan arama algoritması (N-M SDSA)” çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları



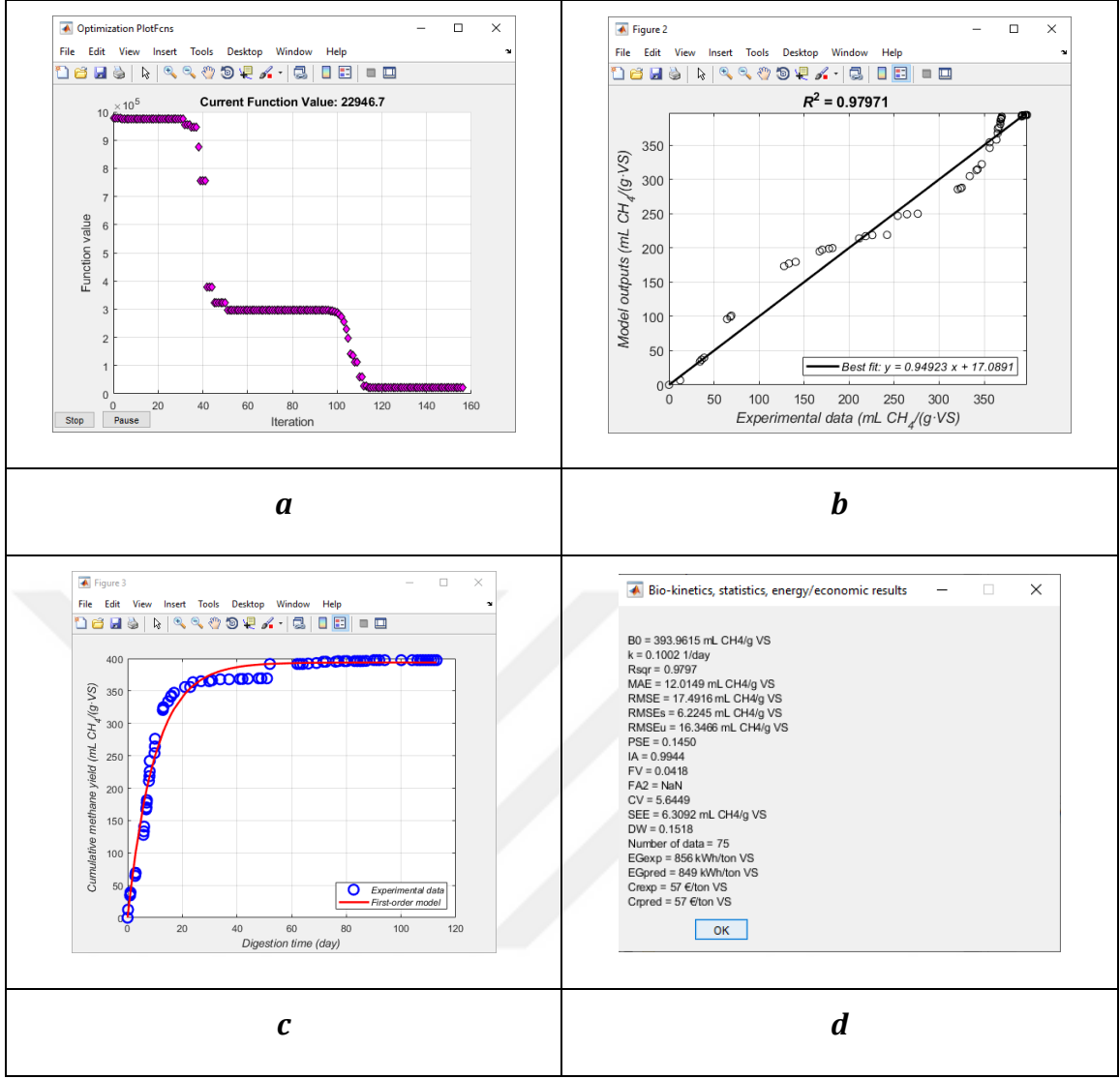
**Şekil 5.14** Mezhiba atıksuyuna ait deneysel verilere göre “Monod Tipi Model (MTM)” ve “BFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno) Quasi-Newton (Q-N) kübik doğrultu belirleme algoritması (BFGS Q-N CLSA)” çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları



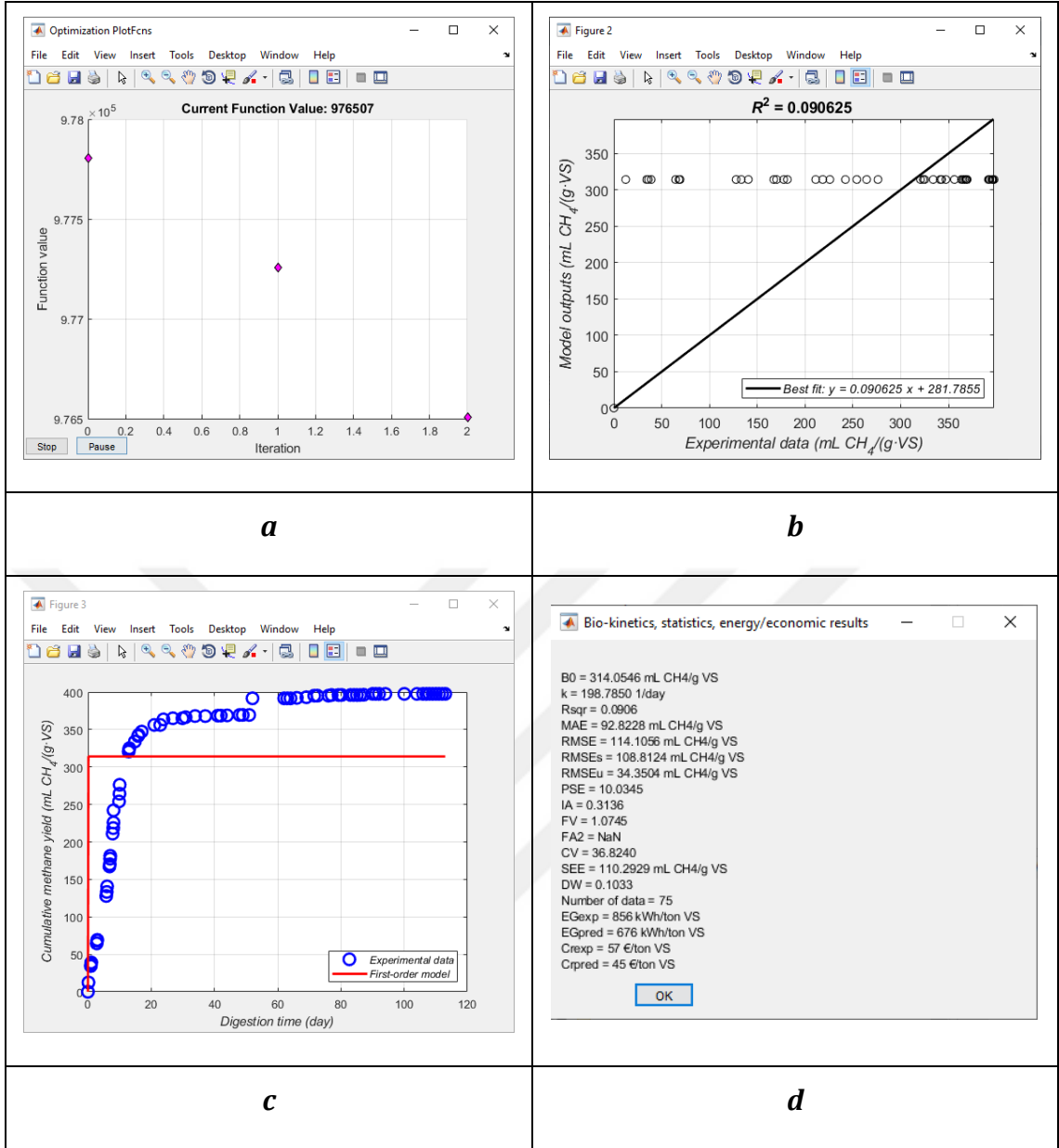
**Şekil 5.15** Mezbaşa atıksuyuna ait deneysel verilere göre “İki Fazlı Üstel İlişki Modeli (İFÜİM)” ve “Nelder-Mead simpleks doğrudan arama algoritması (N-M SDSA)” çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları



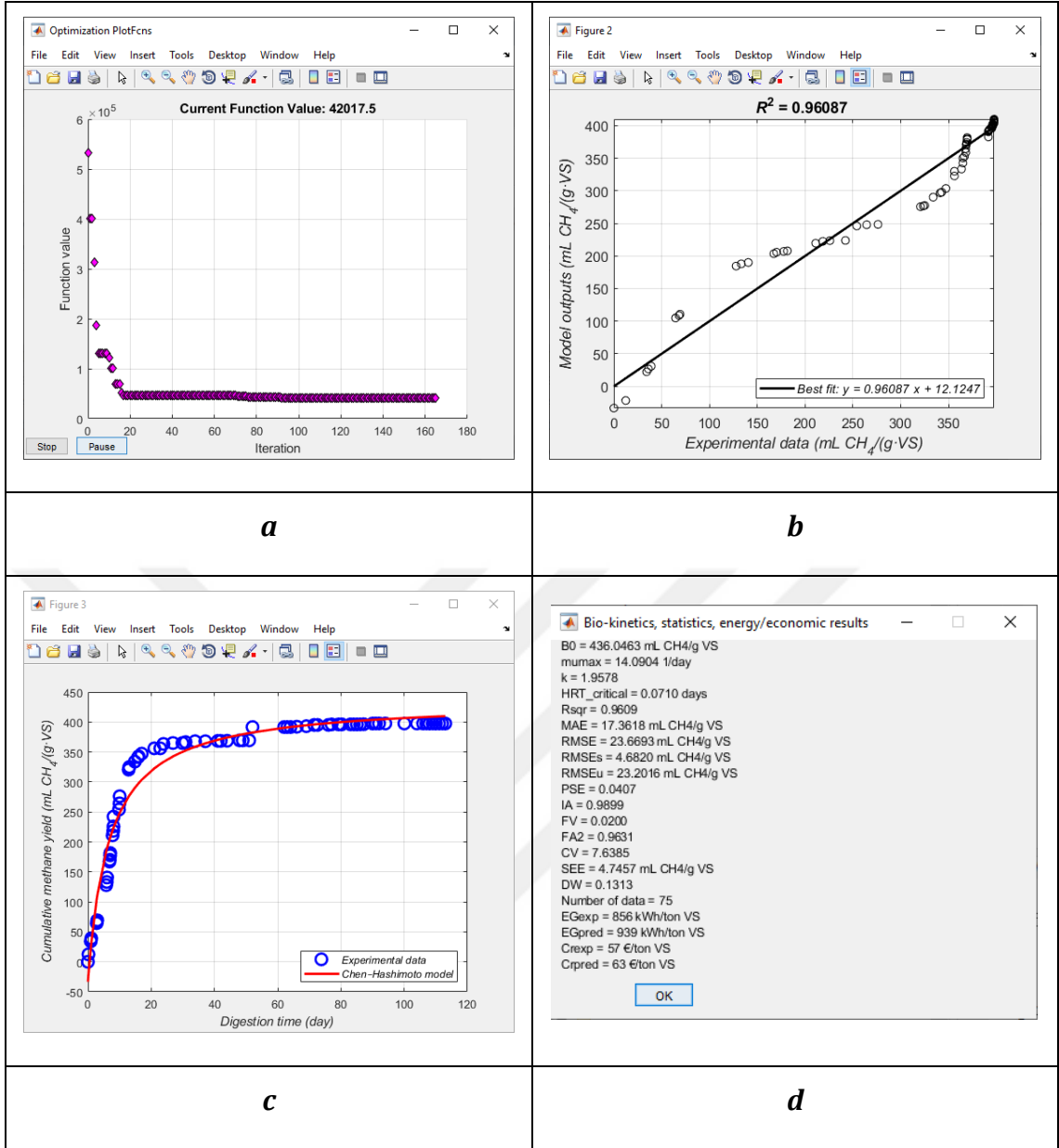
**Şekil 5.16** Mezbaha atıksuyuna ait deneysel verilere göre “İki Fazlı Üstel İlişki Modeli (İFÜİM)” ve “BFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno) Quasi-Newton (Q-N) kübik doğrultu belirleme algoritması (BFGS Q-N CLSA)” çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları



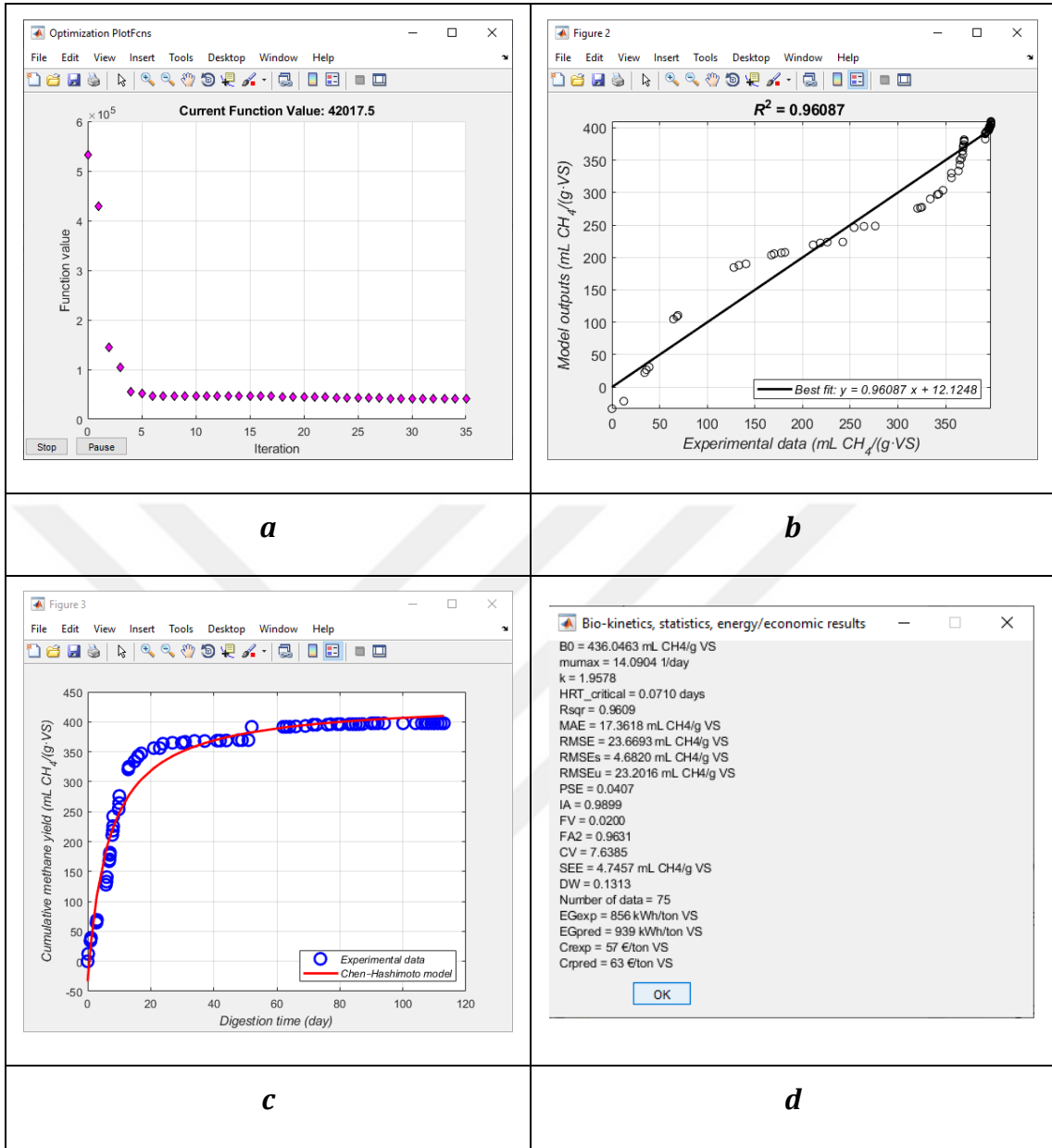
**Şekil 5.17** Mezhiba atıksuyuna ait deneysel verilere göre “Birinci Dereceden Fonksiyon (BDF)” ve “Nelder-Mead simpleks doğrudan arama algoritması (N-M SDSA)” çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları



**Şekil 5.18** Mezbaşa atıksuyuna ait deneysel verilere göre “Birinci Dereceden Fonksiyon (BDF)” ve “BFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno) Quasi-Newton (Q-N) kübik doğrultu belirleme algoritması (BFGS Q-N CLSA)” çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları

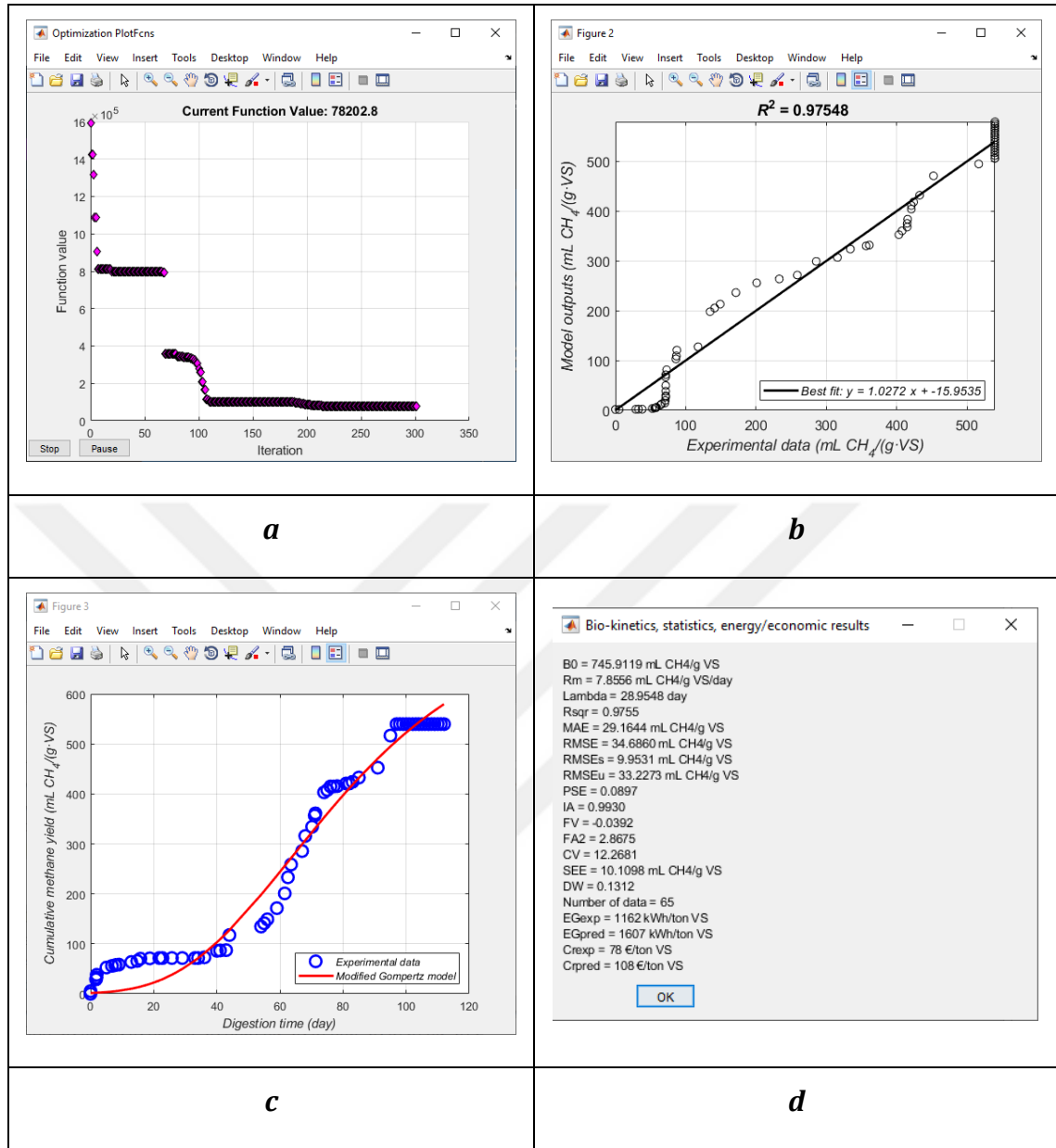


**Şekil 5.19** Mezbaaha atıksuyuna ait deneysel verilere göre “Chen-Hashimoto Modeli (CHM)” ve “Nelder-Mead simpleks doğrudan arama algoritması (N-M SDSA)” çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları

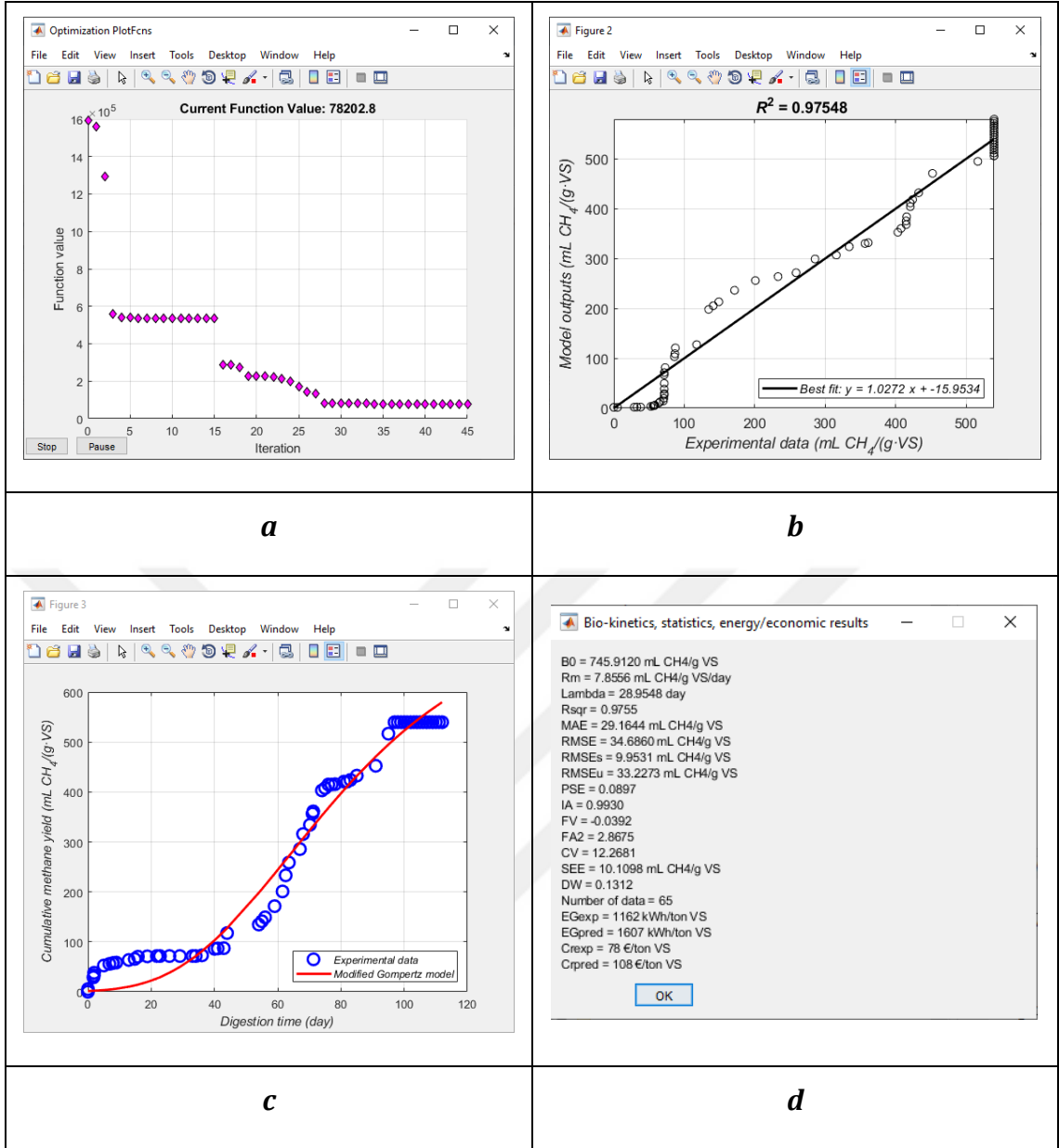


**Şekil 5.20** Mezbaaha atıksuyuna ait deneysel verilere göre “Chen-Hashimoto Modeli (CHM)” ve “BFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno) Quasi-Newton (Q-N) kübik doğrultu belirleme algoritması (BFGS Q-N CLSA)” çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları

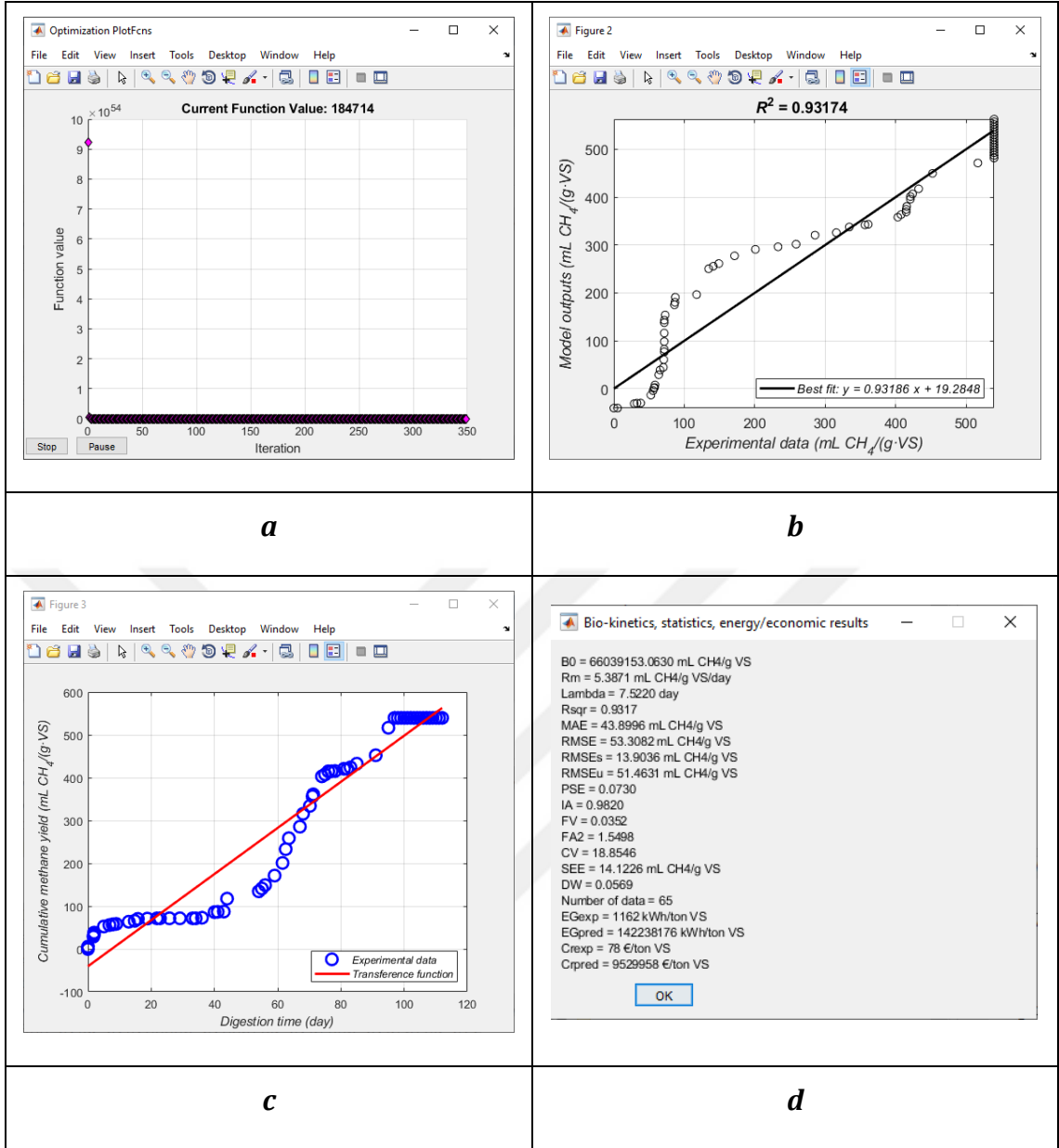
## 5.4.2 Peyniraltı Atıksuyu



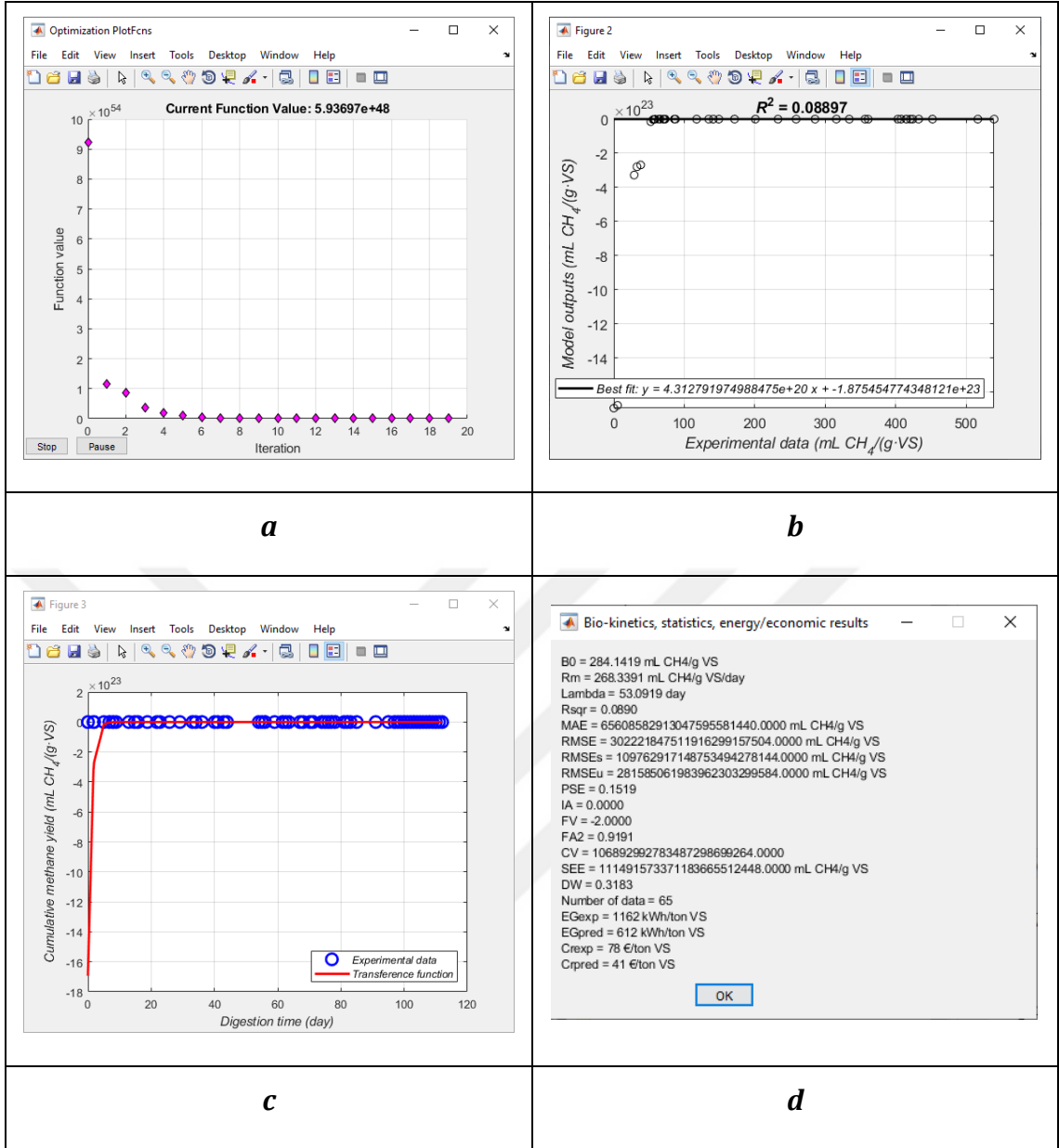
**Şekil 5.21** Peyniraltı atıksuyuna ait deneysel verilere göre “Modifiye Gompertz Modeli (MGM)” ve “Nelder-Mead simpleks doğrudan arama algoritması (N-M SDSA)” çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları



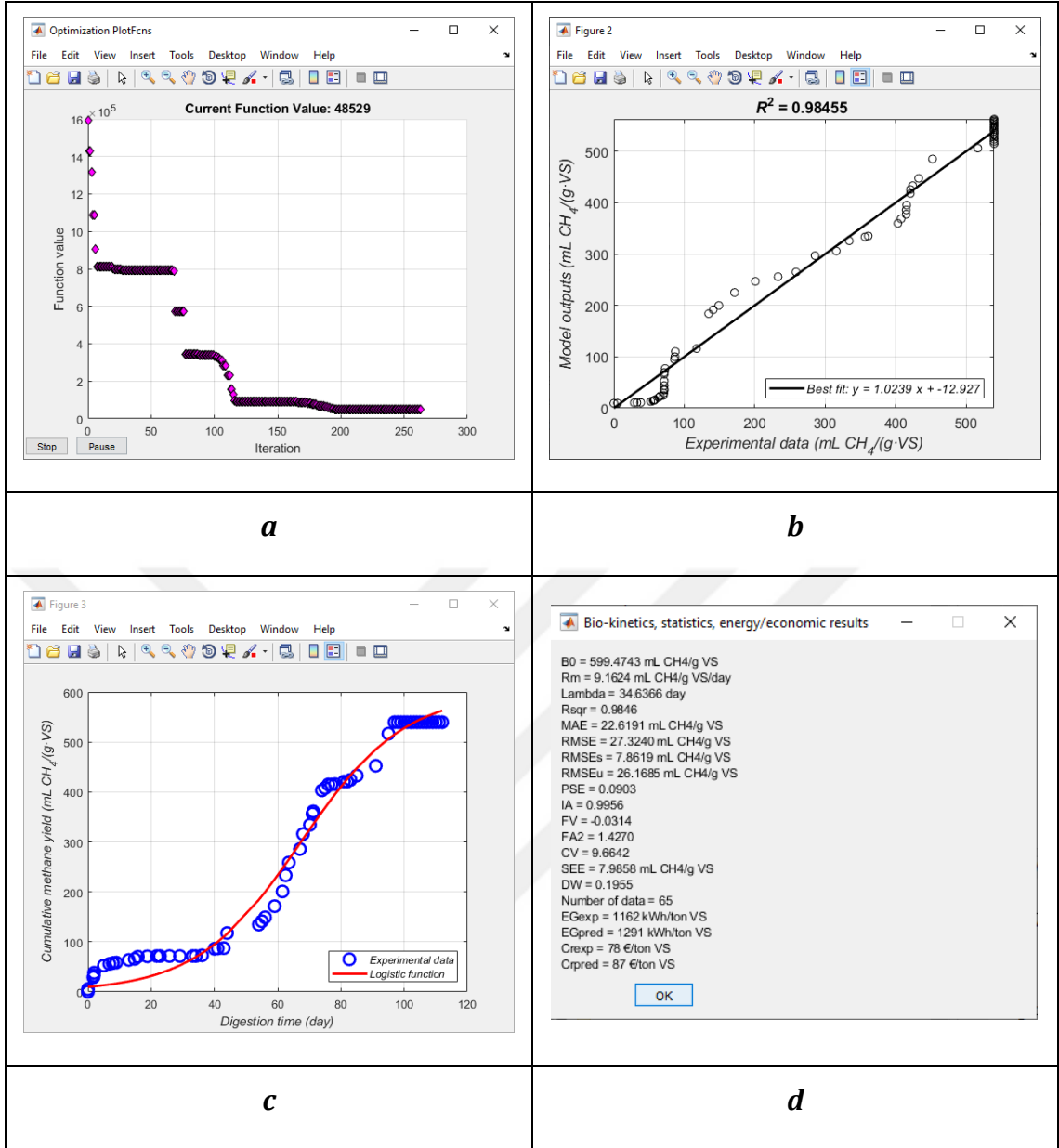
**Şekil 5.22** Peyniraltı atıksuyuna ait deneysel verilere göre “Modifiye Gompertz Modeli (MGM)” ve “BFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno) Quasi-Newton (Q-N) kübik doğrultu belirleme algoritması (BFGS Q-N CLSA)” çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları



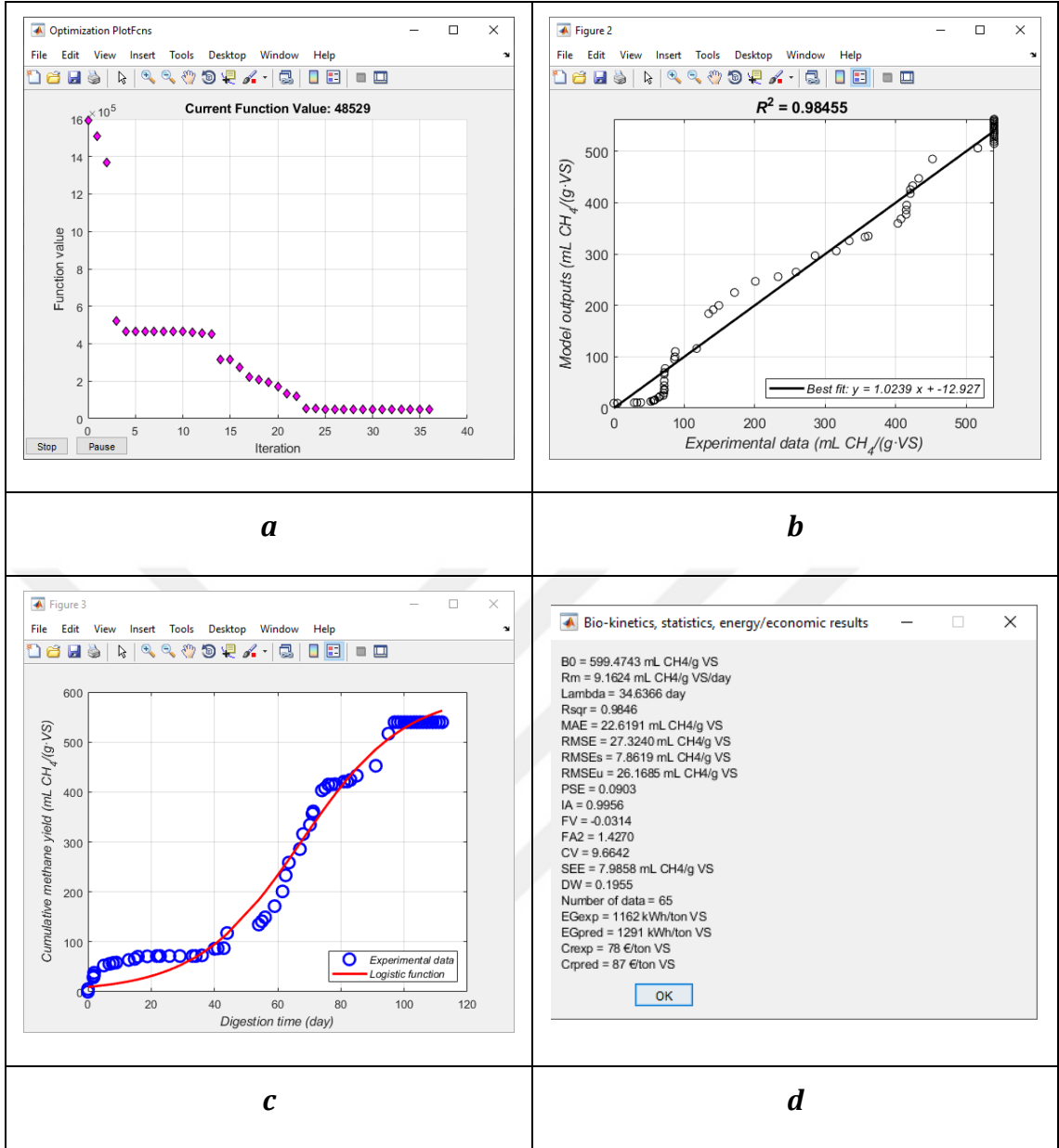
**Şekil 5.23** Peyniraltı atıksuyuna ait deneysel verilere göre “Transfer Fonksiyonu (TF)” ve “Nelder-Mead simpleks doğrudan arama algoritması (N-M SDSA)” çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları



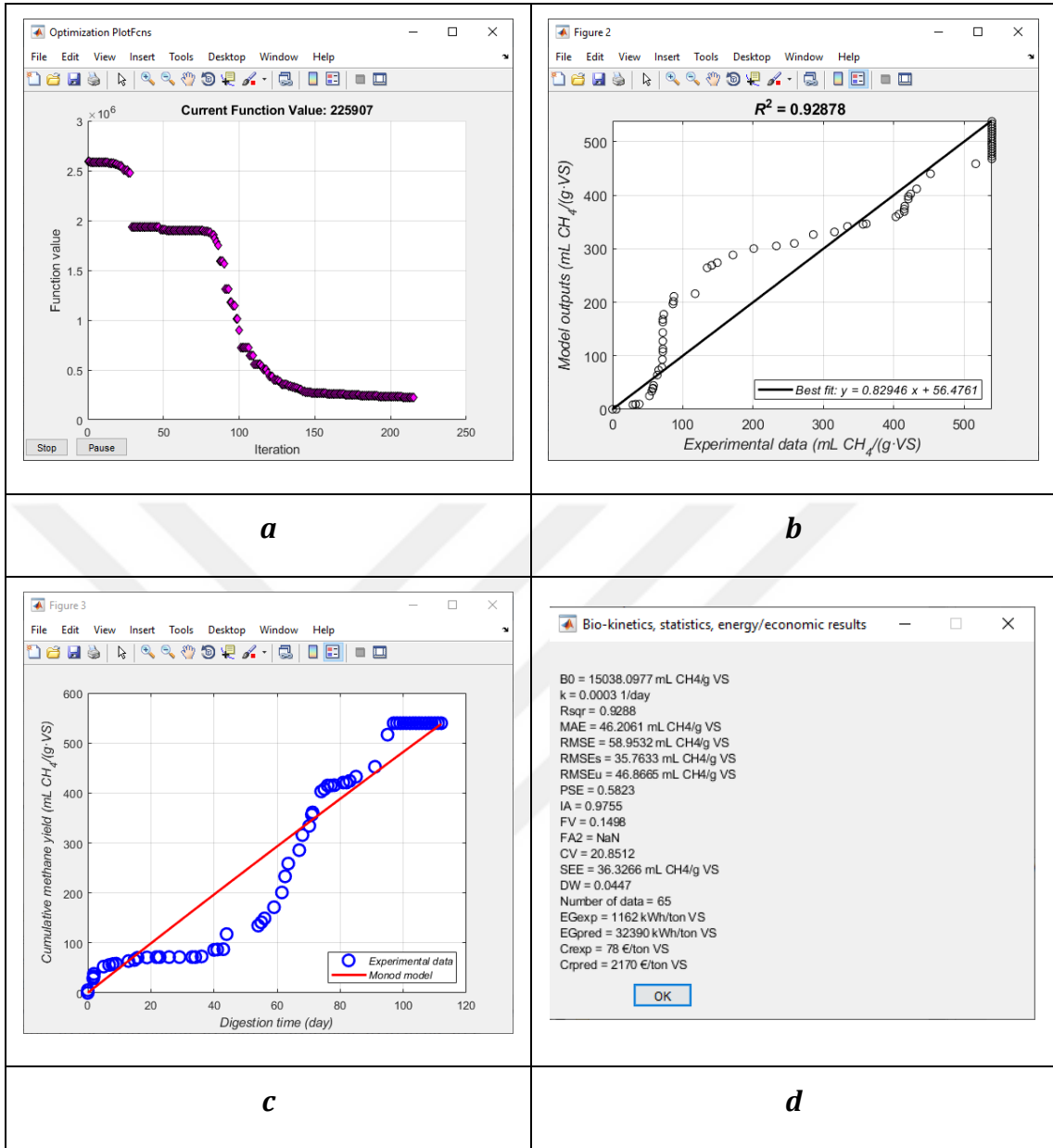
**Şekil 5.24** Peyniraltı atıksuyuna ait deneysel verilere göre “Transfer Fonksiyonu (TF)” ve “BFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno) Quasi-Newton (Q-N) kübik doğrultu belirleme algoritması (BFGS Q-N CLSA)” çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları



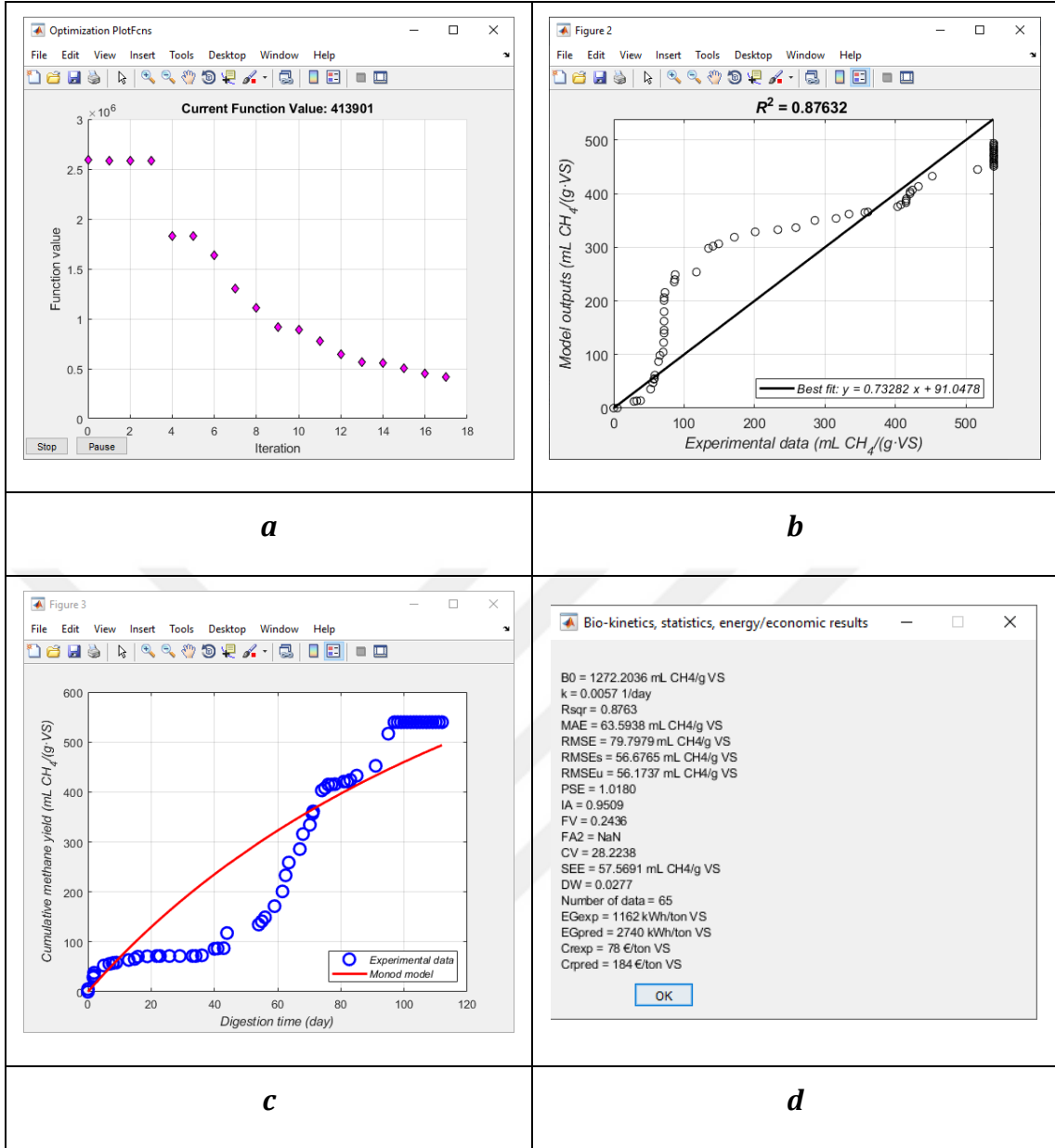
**Şekil 5.25** Peyniraltı atıksuyuna ait deneysel verilere göre “Lojistik Fonksiyon (LF)” ve “Nelder-Mead simpleks doğrudan arama algoritması (N-M SDSA)” çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları



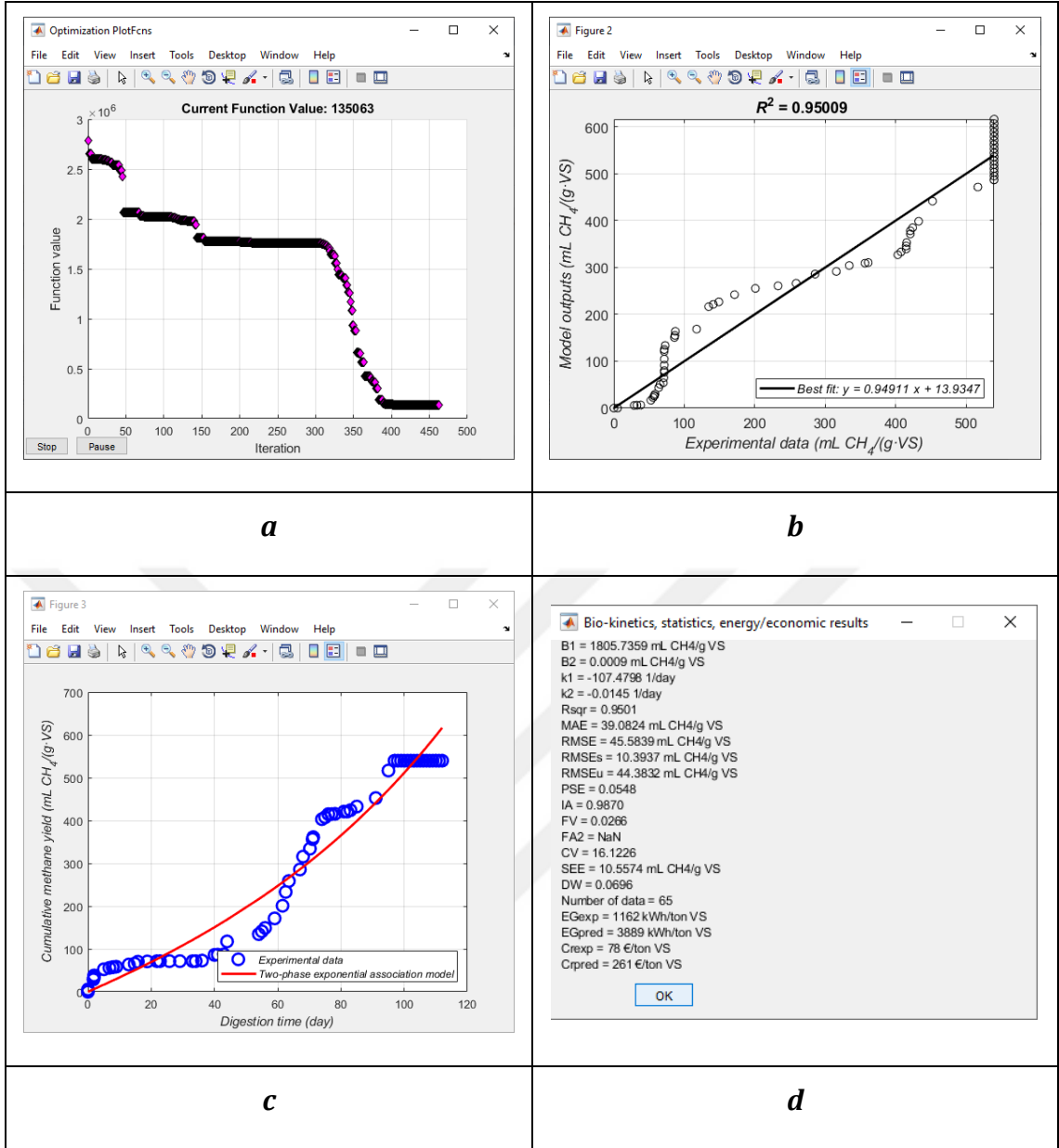
**Şekil 5.26** Peyniraltı atıksuyuna ait deneysel verilere göre “Lojistik Fonksiyon (LF)” ve “BFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno) Quasi-Newton (Q-N) kübik doğruyu belirleme algoritması (BFGS Q-N CLSA)” çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları



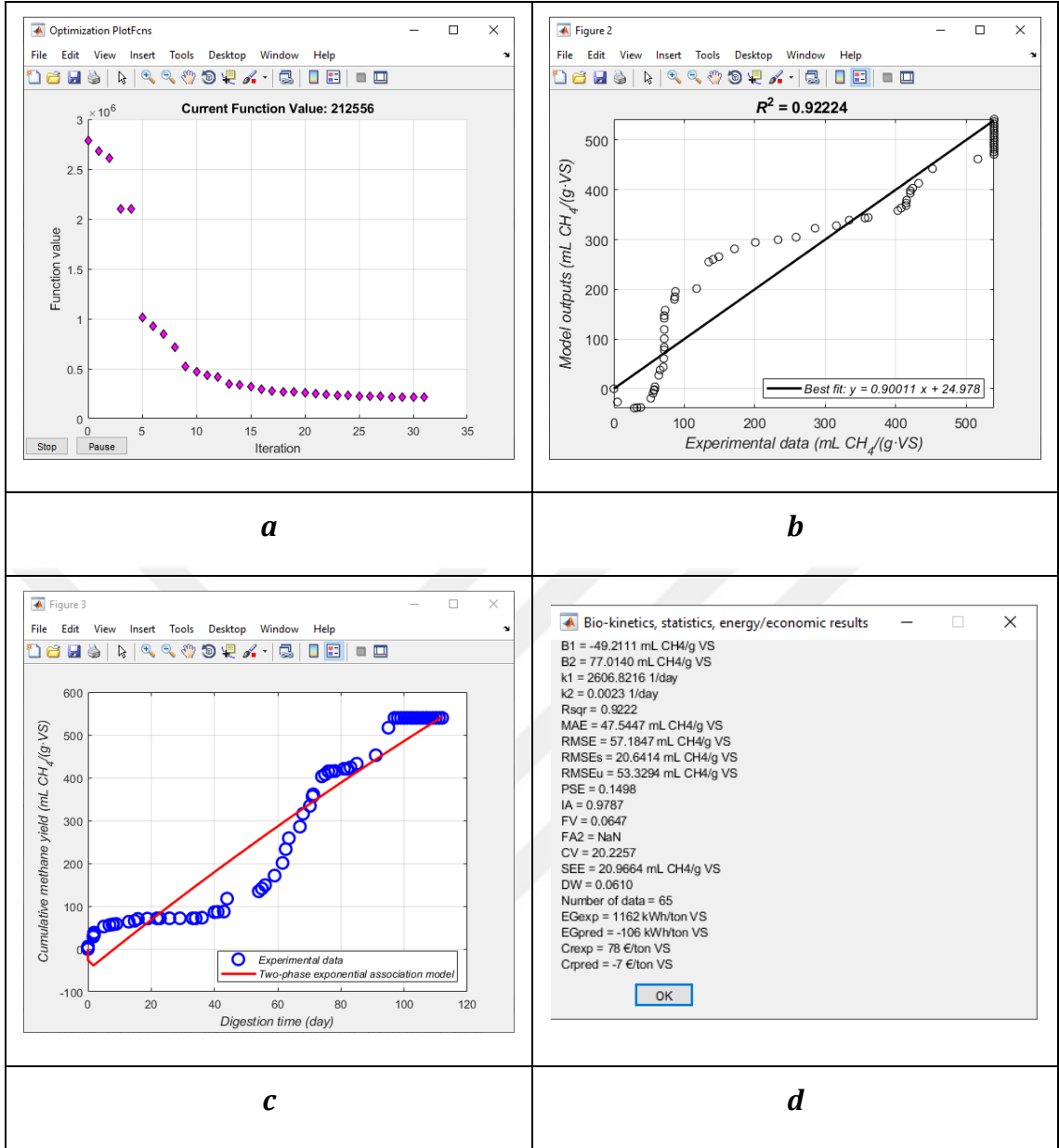
**Şekil 5.27** Peyniraltı atıksuyuna ait deneysel verilere göre “Monod Tipi Model (MTM)” ve “Nelder-Mead simpleks doğrudan arama algoritması (N-M SDSA)” çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları



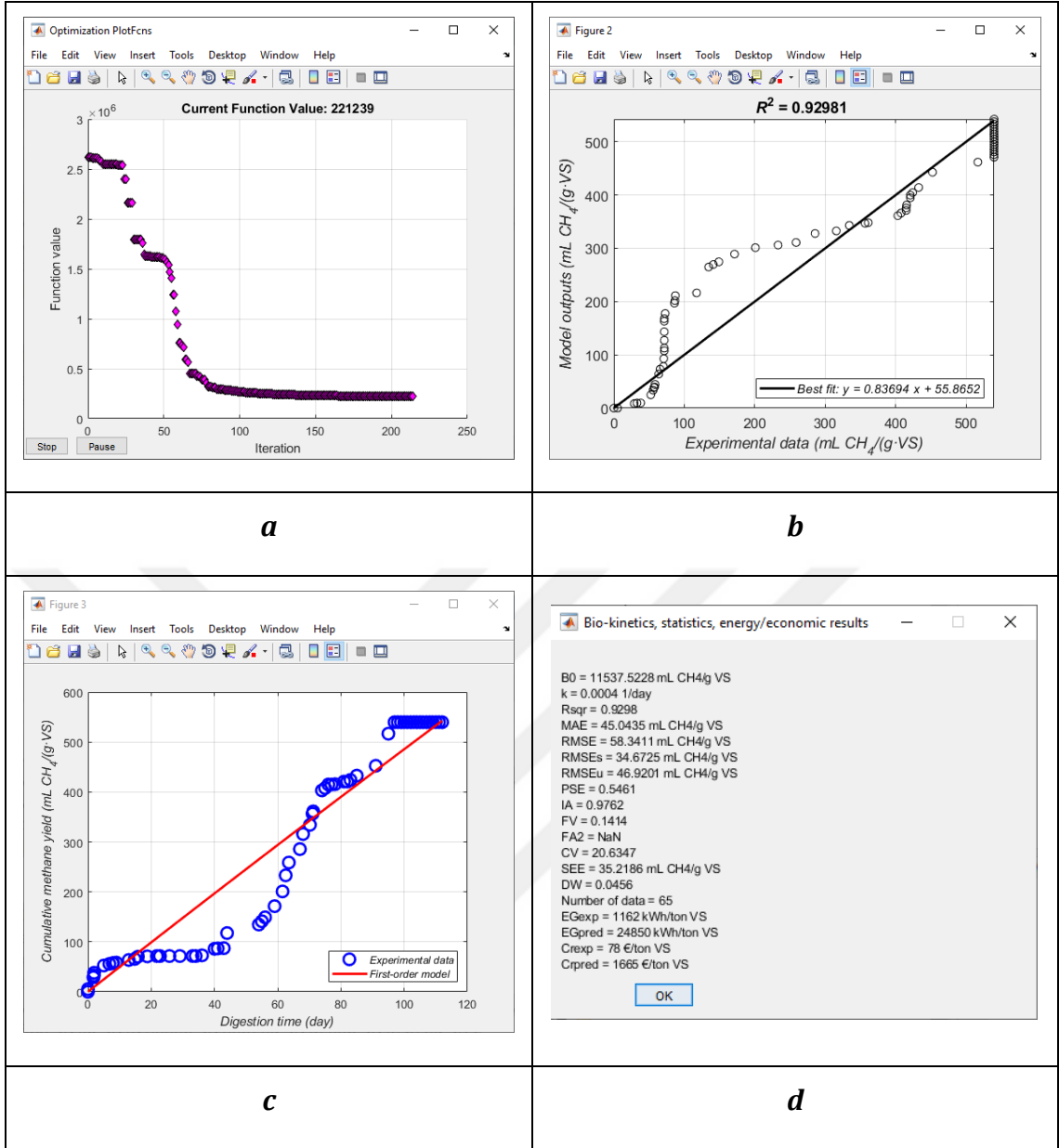
**Şekil 5.28** Peyniraltı atıksuyuna ait deneysel verilere göre “Monod Tipi Model (MTM)” ve “BFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno) Quasi-Newton (Q-N) kübik doğrultu belirleme algoritması (BFGS Q-N CLSA)” çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları



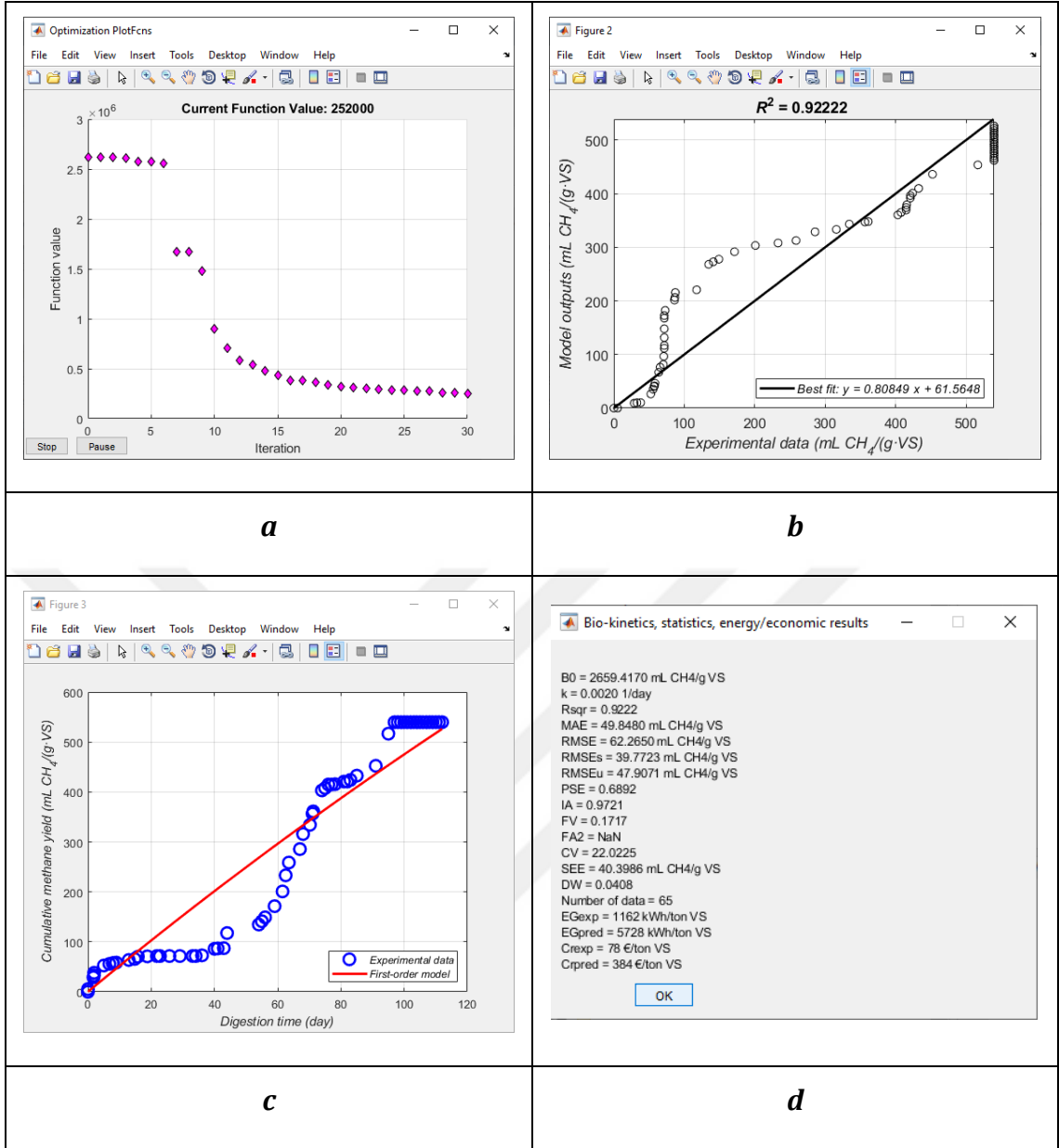
**Şekil 5.29** Peyniraltı atıksuyuna ait deneysel verilere göre “İki Fazlı Üstel İlişki Modeli (İFÜİM)” ve “Nelder-Mead simpleks doğrudan arama algoritması (N-M SDSA)” çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları



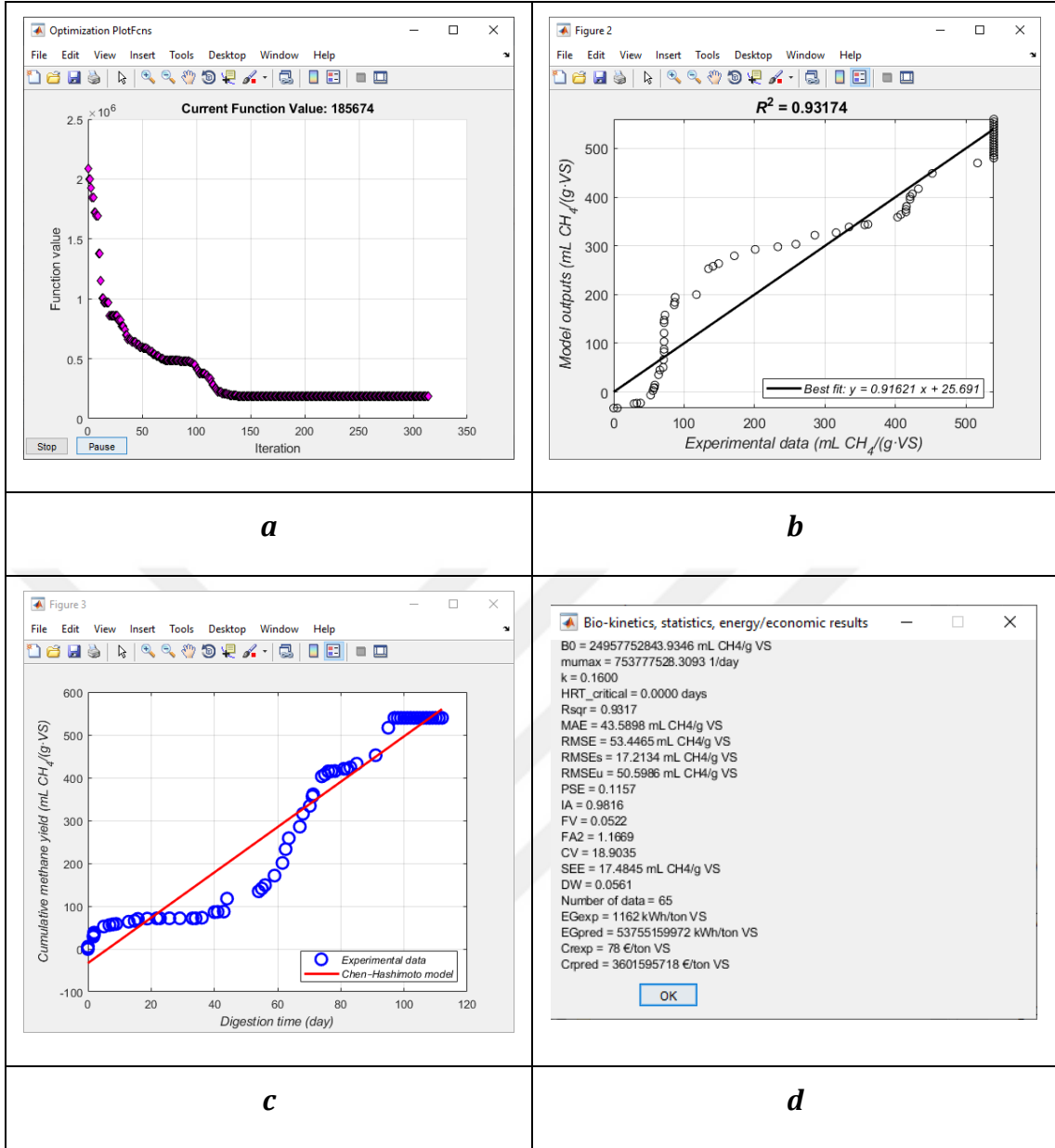
**Şekil 5.30** Peyniraltı atıksuyuna ait deneysel verilere göre “İki Fazlı Üstel İlişki Modeli (İFÜİM)” ve “BFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno) Quasi-Newton (Q-N) kübik doğrultu belirleme algoritması (BFGS Q-N CLSA)” çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları



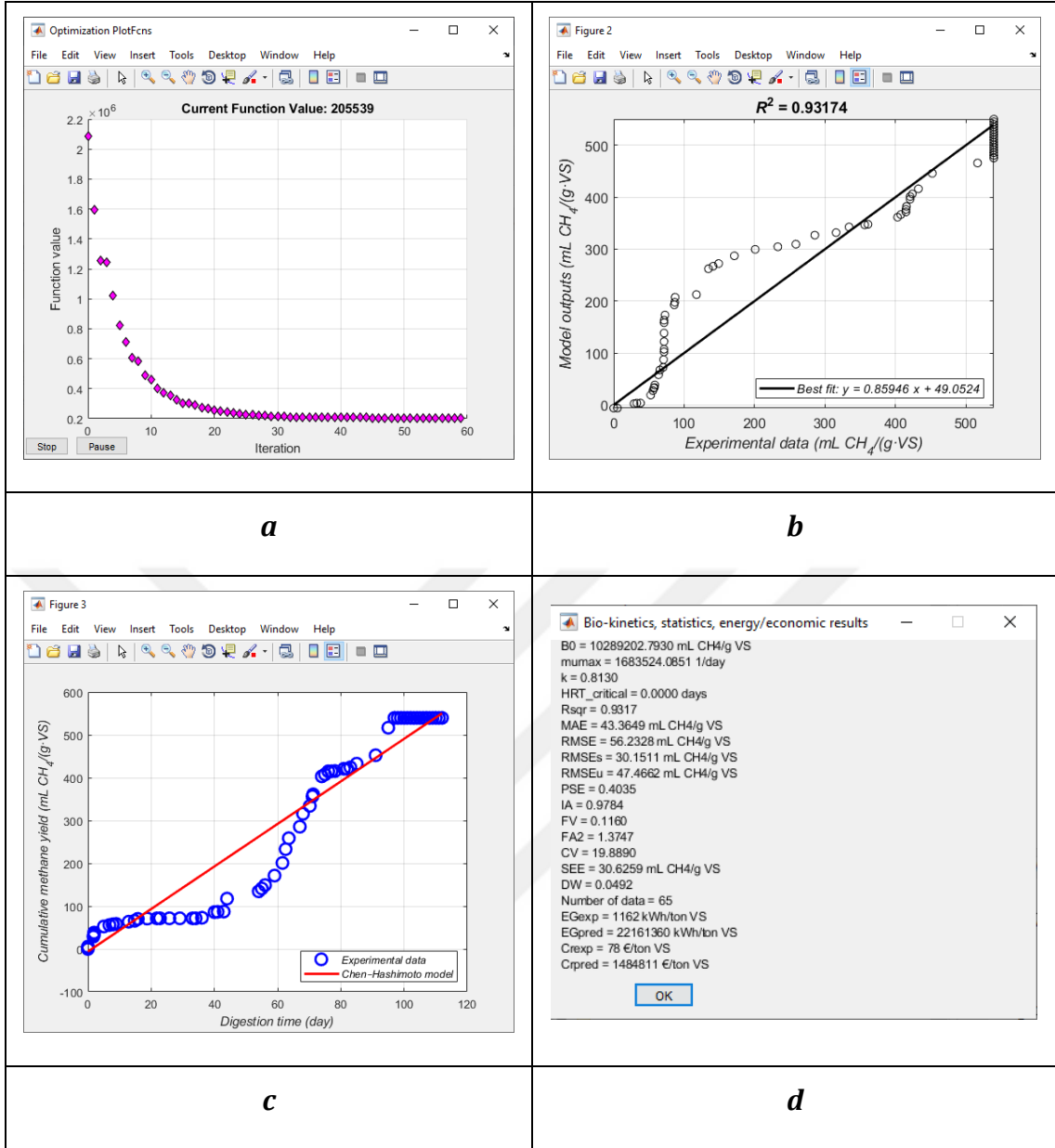
**Şekil 5.31** Peyniraltı atıksuyuna ait deneysel verilere göre “Birinci Dereceden Fonksiyon (BDF)” ve “Nelder-Mead simpleks doğrudan arama algoritması (N-M SDSA)” çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları



**Şekil 5.32** Peyniraltı atıksuyuna ait deneysel verilere göre “Birinci Dereceden Fonksiyon (BDF)” ve “BFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno) Quasi-Newton (Q-N) kübik doğrultu belirleme algoritması (BFGS Q-N CLSA)” çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları

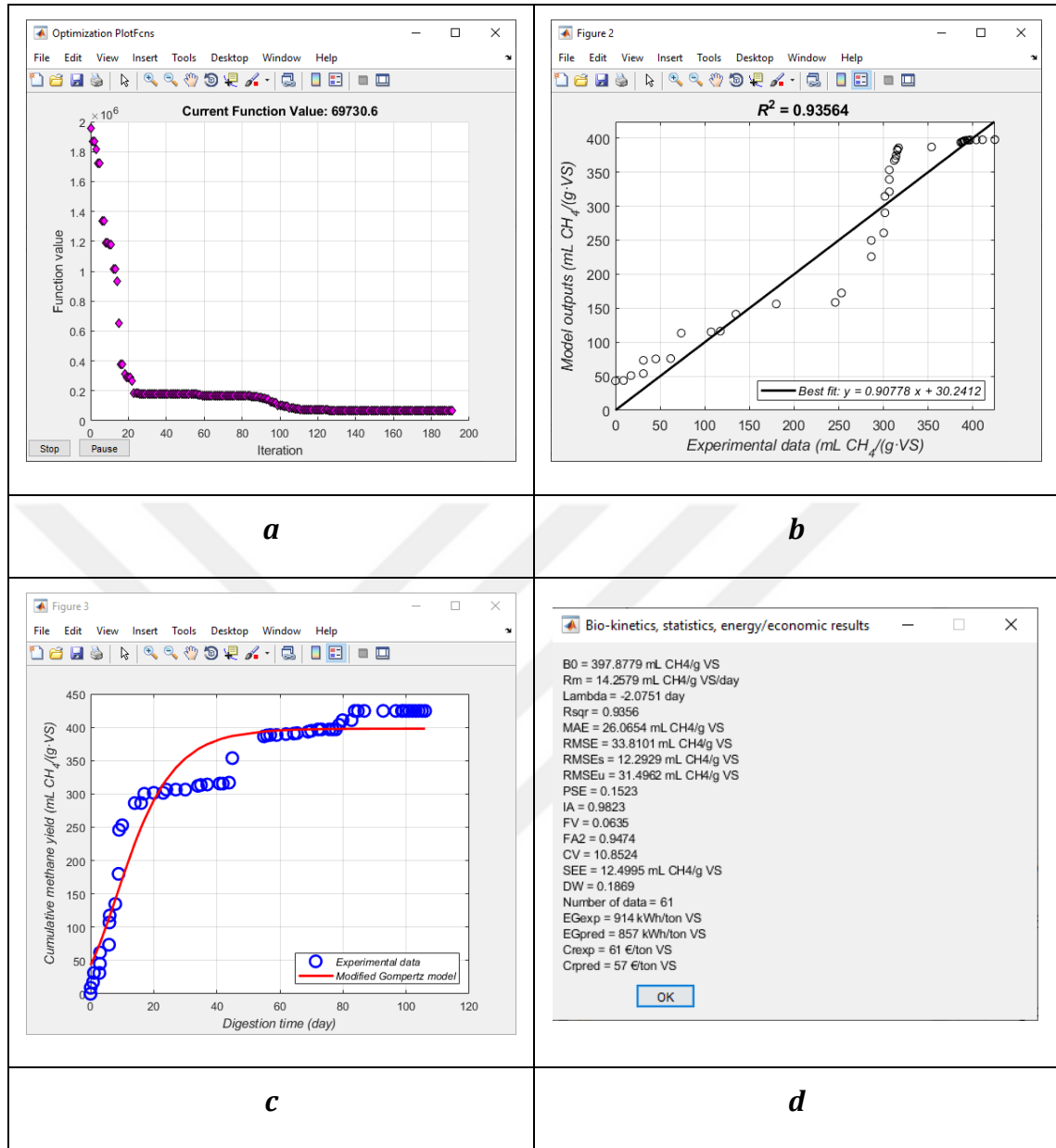


**Şekil 5.33** Peyniraltı atıksuyuna ait deneysel verilere göre “Chen-Hashimoto Modeli (CHM)” ve “Nelder-Mead simpleks doğrudan arama algoritması (N-M SDSA)” çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları

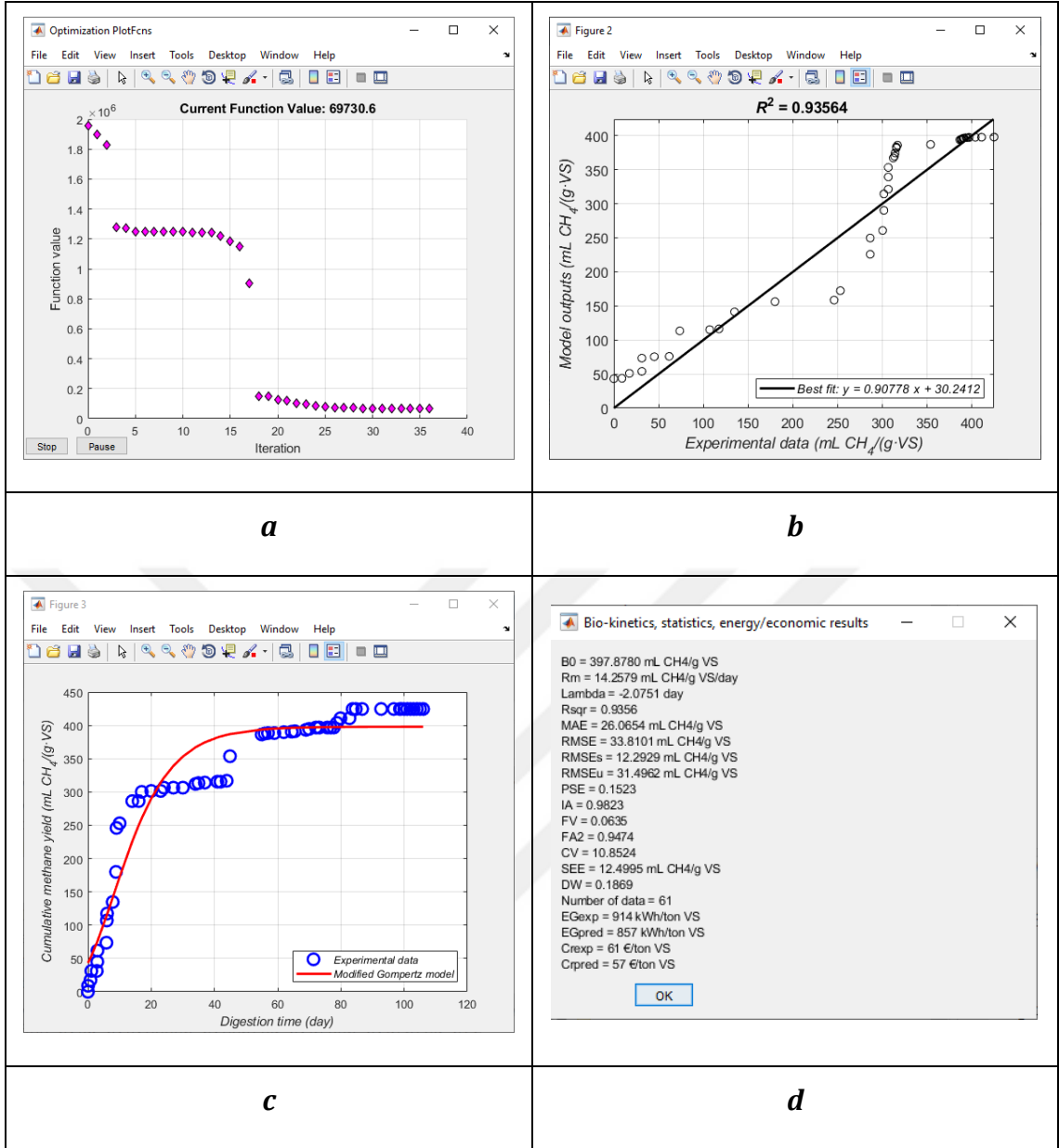


**Şekil 5.34** Peyniraltı atıksuyuna ait deneysel verilere göre “Chen-Hashimoto Modeli (CHM)” ve “BFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno) Quasi-Newton (Q-N) kübik doğrultu belirleme algoritması (BFGS Q-N CLSA)” çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları

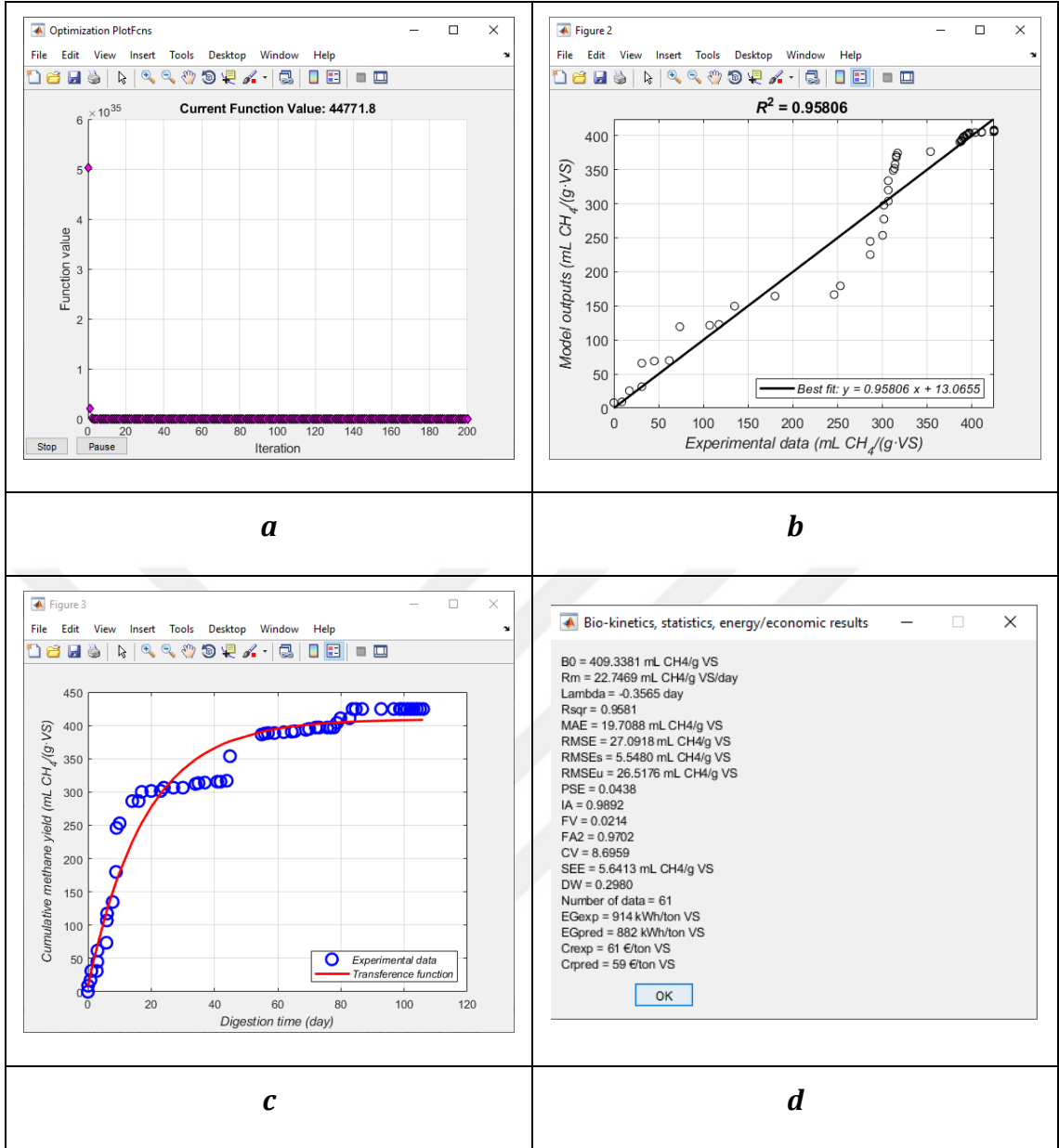
### 5.4.3 Köpek Maması Atıksuyu



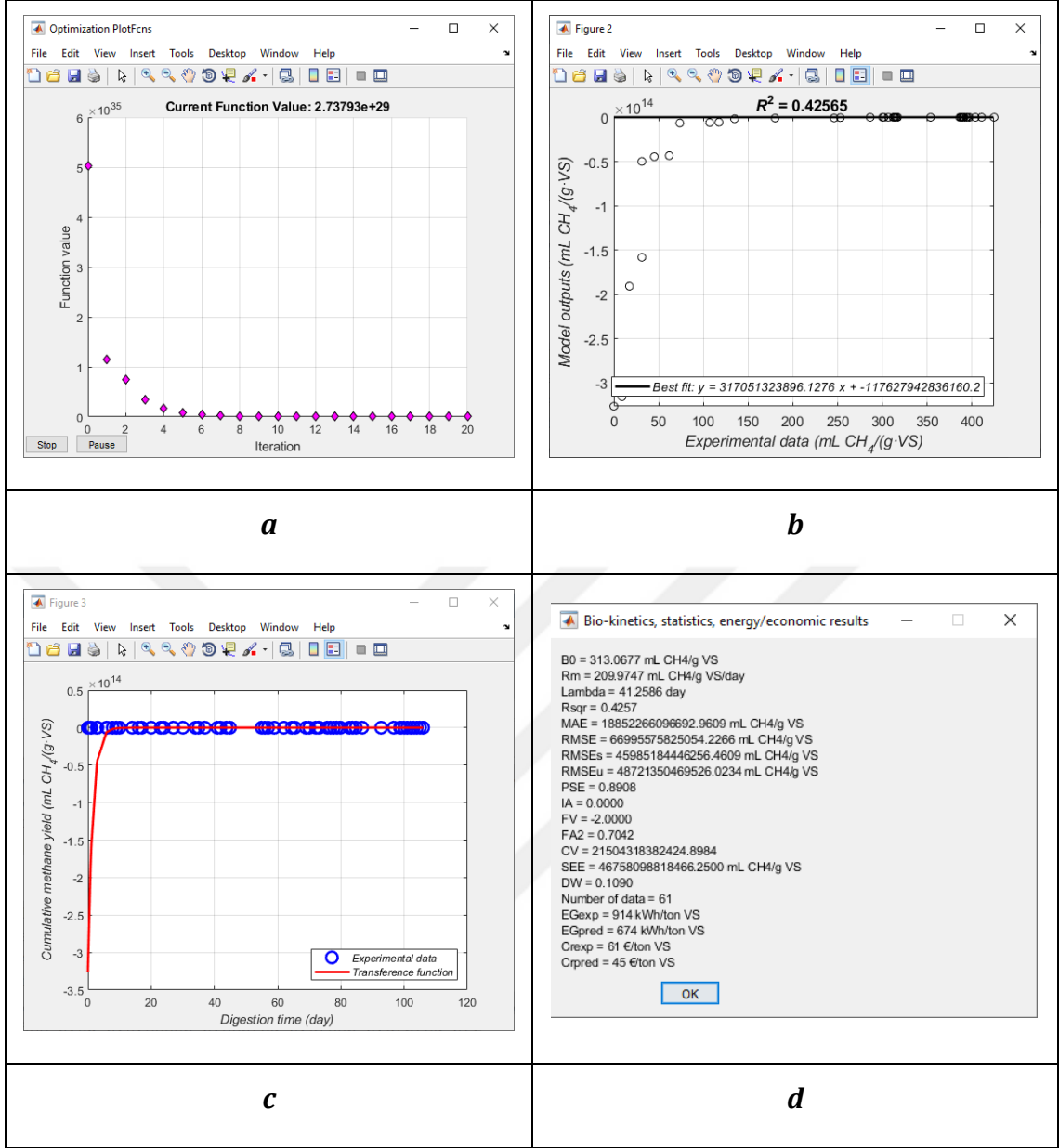
**Şekil 5.35** Köpek maması atıksuyuna ait deneysel verilere göre “Modifiye Gompertz Modeli (MGM)” ve “Nelder-Mead simpleks doğrudan arama algoritması (N-M SDSA)” çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları



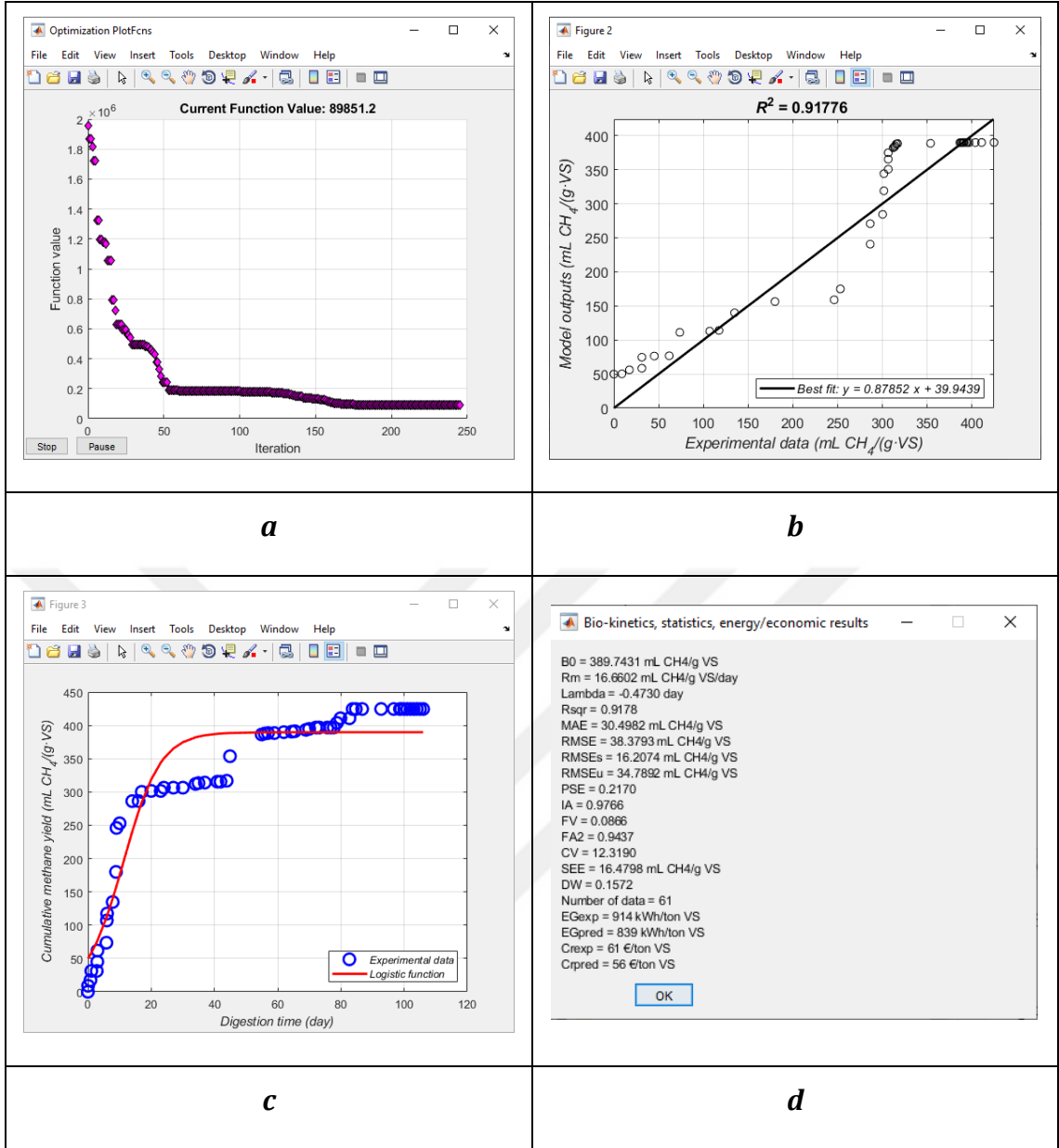
**Şekil 5.36** Köpek maması atıksuyuna ait deneysel verilere göre “Modifiye Gompertz Modeli (MGM)” ve “BFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno) Quasi-Newton (Q-N) kübik doğrultu belirleme algoritması (BFGS Q-N CLSA)” çözümü için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları



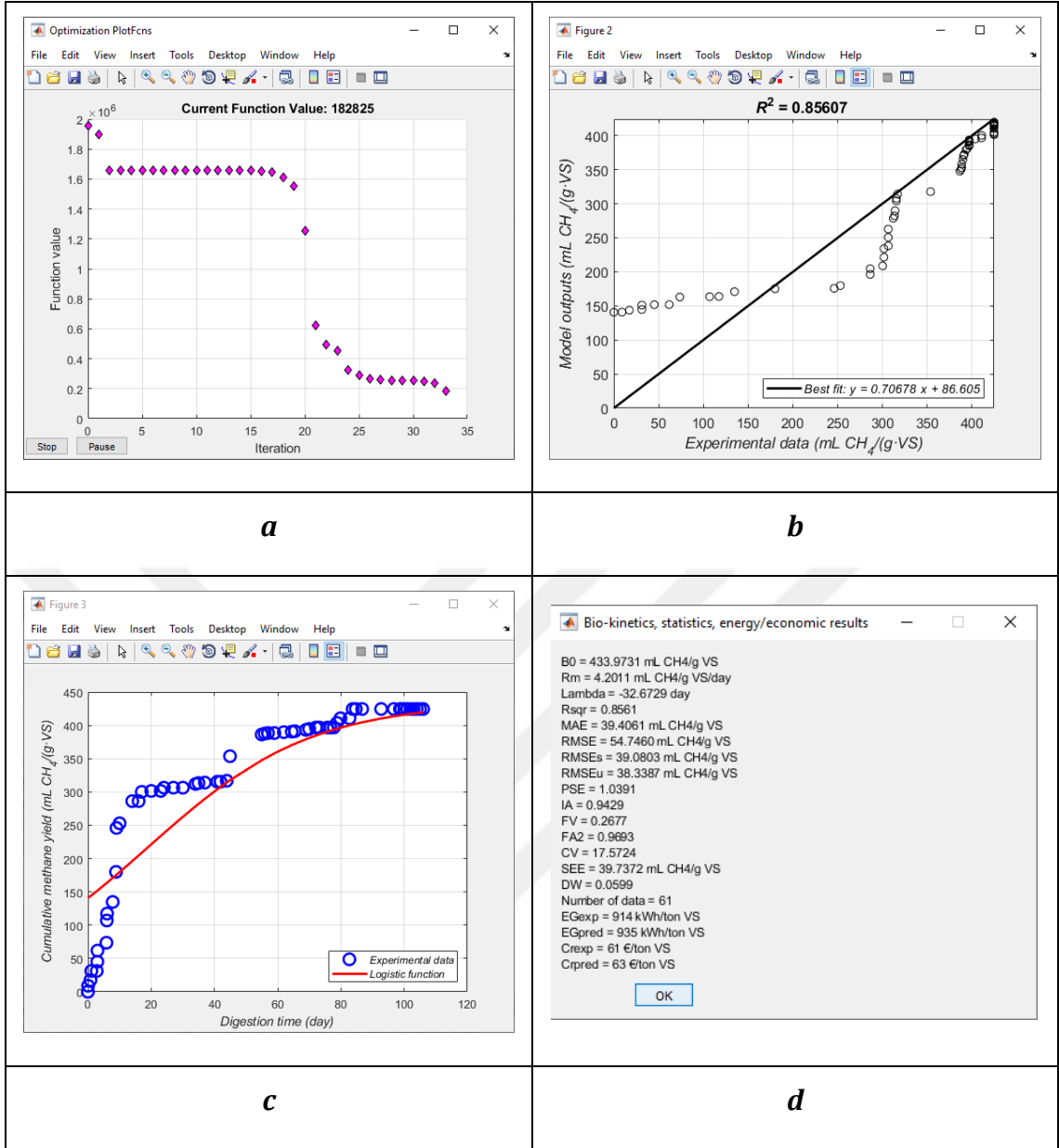
**Şekil 5.37** Köpek maması atıksuyuna ait deneysel verilere göre “Transfer Fonksiyonu (TF)” ve “Nelder-Mead simpleks doğrudan arama algoritması (N-M SDSA)” çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları



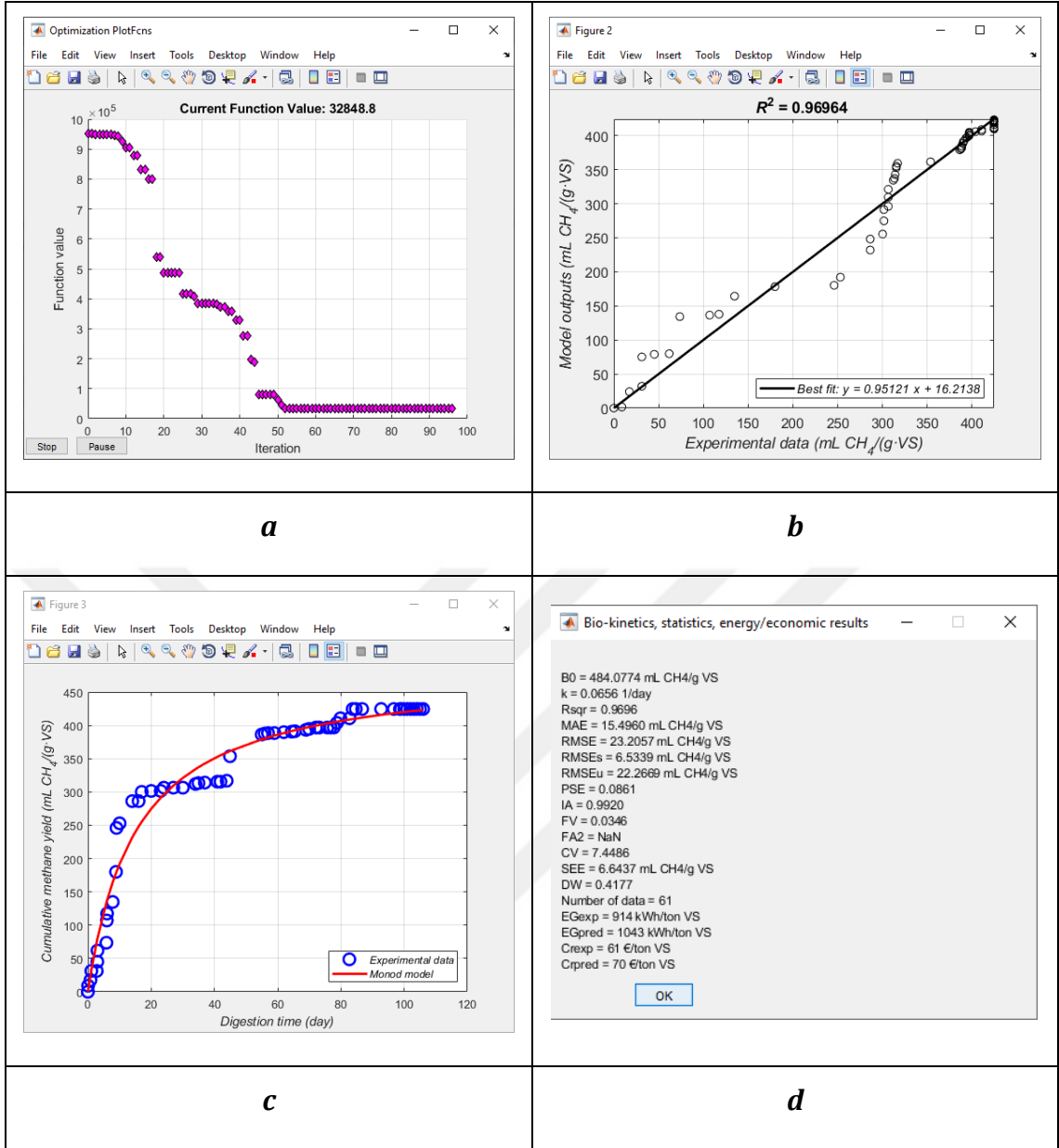
**Şekil 5.38** Köpek maması atıksuyuna ait deneysel verilere göre “Transfer Fonksiyonu (TF)” ve “BFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno) Quasi-Newton (Q-N) kübik doğrultu belirleme algoritması (BFGS Q-N CLSA)” çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları



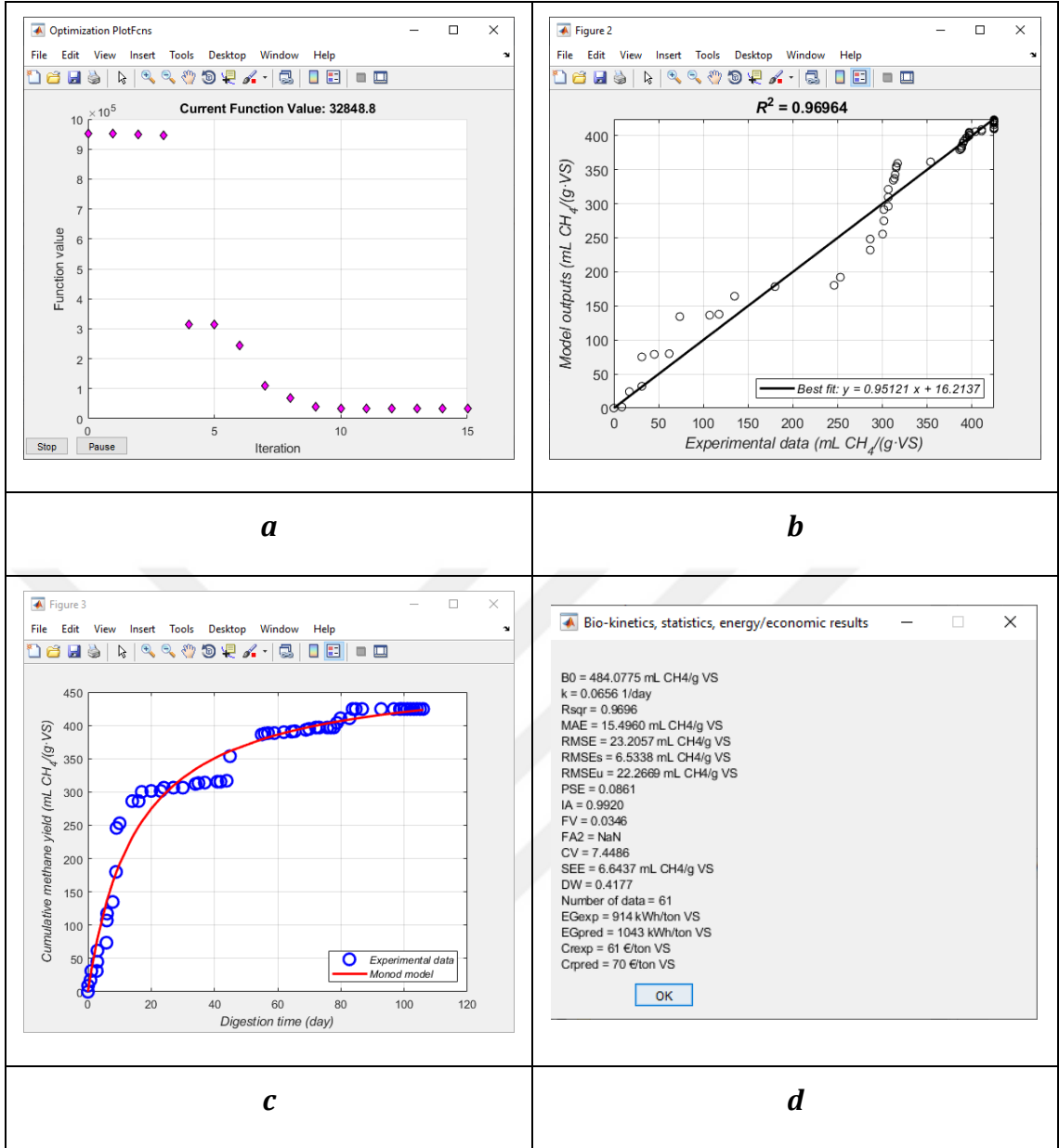
**Şekil 5.39** Köpek maması atıksuyuna ait deneysel verilere göre “Lojistik Fonksiyon (LF)” ve “Nelder-Mead simpleks doğrudan arama algoritması (N-M SDSA)” çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları



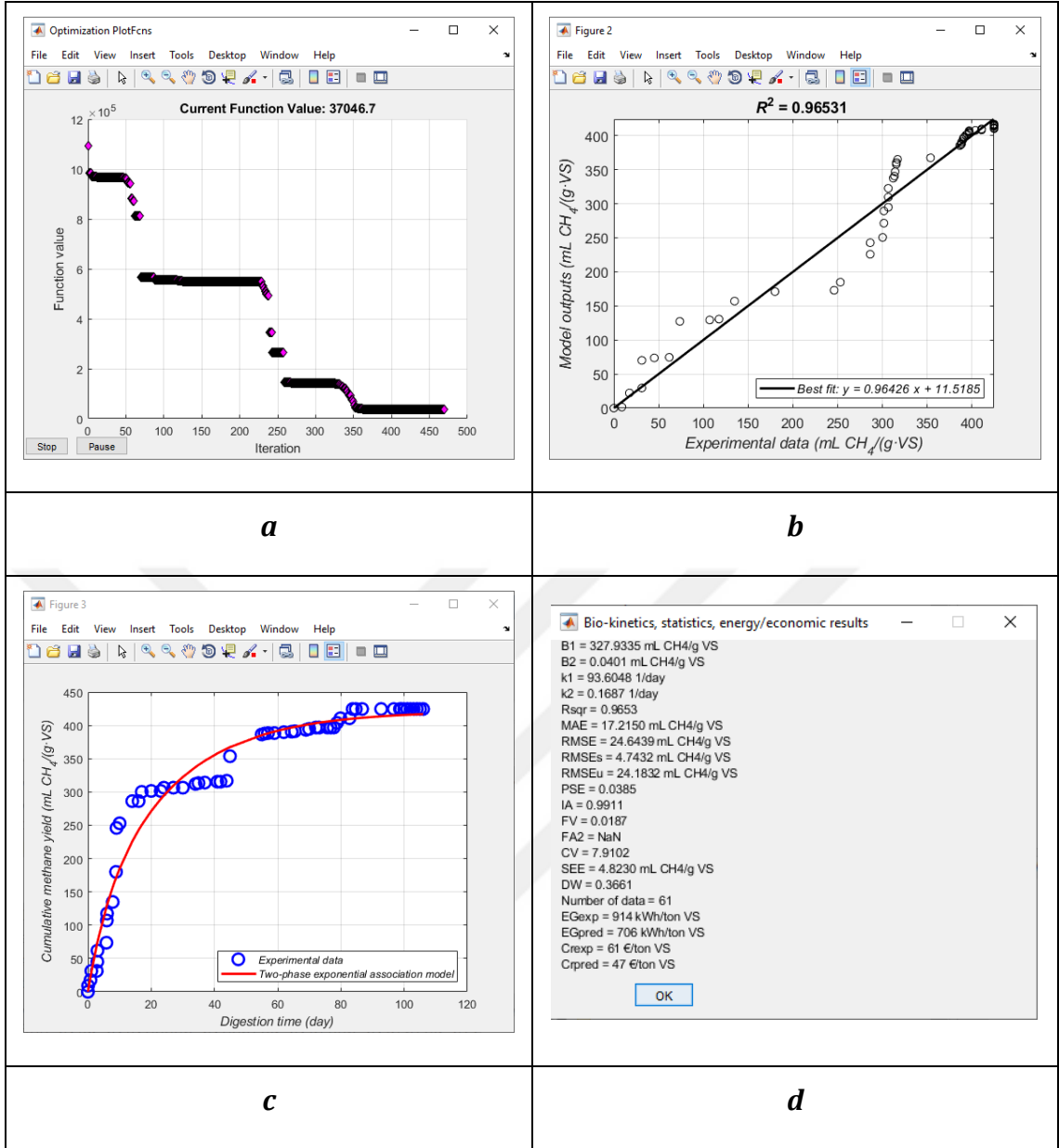
**Şekil 5.40** Köpek maması atıksuyuna ait deneysel verilere göre “Lojistik Fonksiyon (LF)” ve “BFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno) Quasi-Newton (Q-N) kübik doğrultu belirleme algoritması (BFGS Q-N CLSA)” çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları



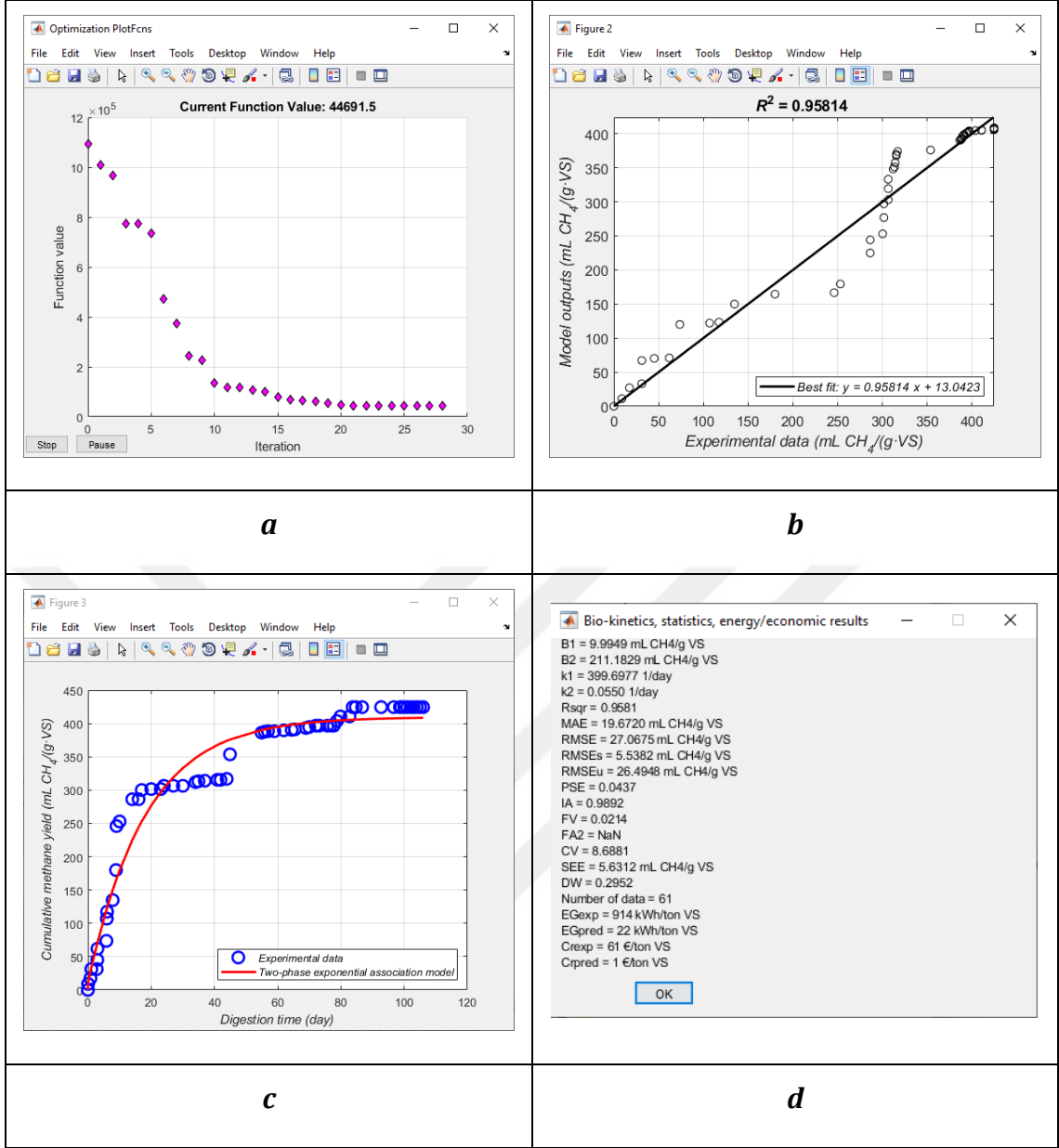
**Şekil 5.41** Köpek maması atıksuyuna ait deneysel verilere göre “Monod Tipi Model (MTM)” ve “Nelder-Mead simpleks doğrudan arama algoritması (N-M SDSA)” çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları



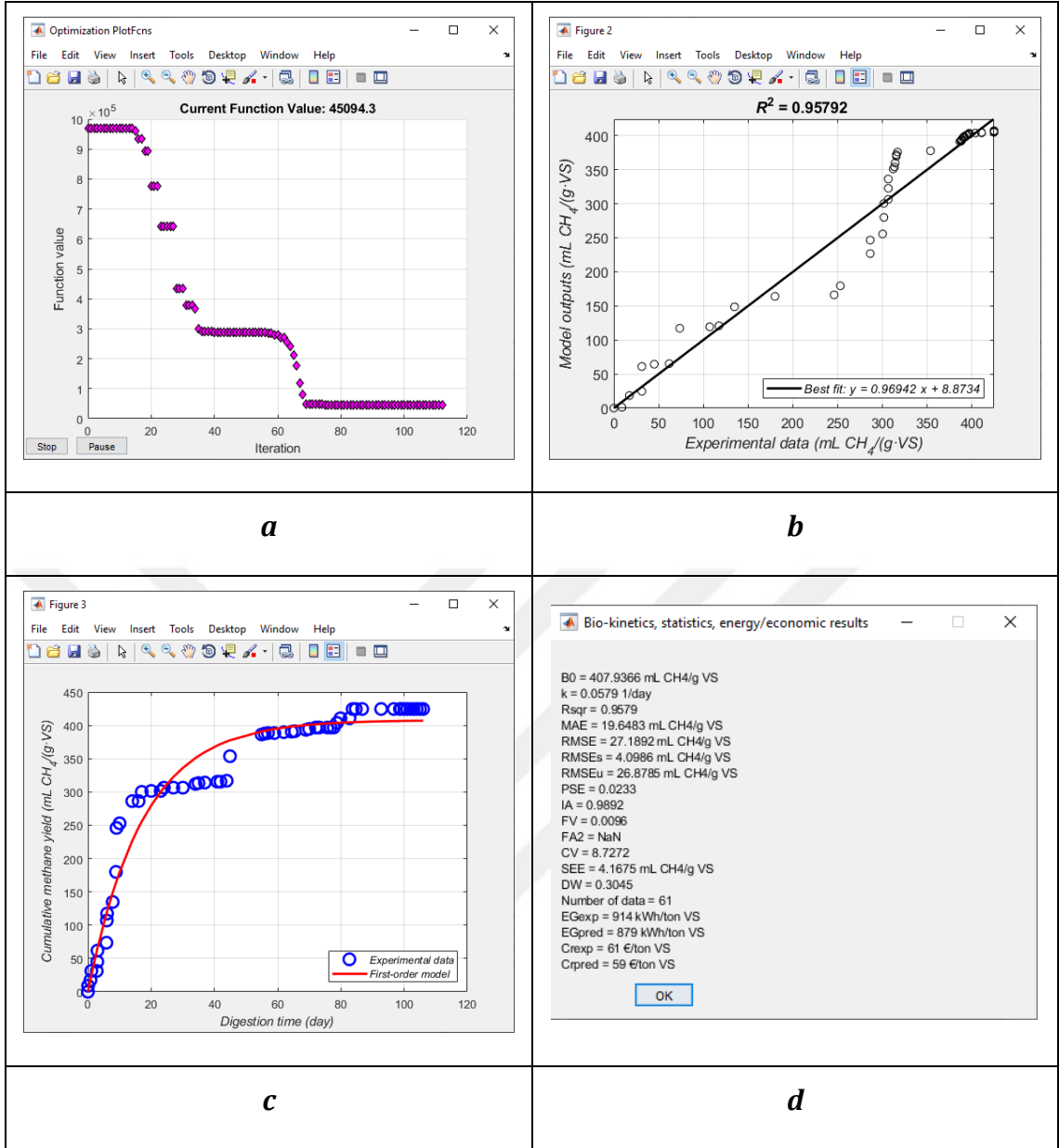
**Şekil 5.42** Köpek maması atıksuyuna ait deneysel verilere göre “Monod Tipi Model (MTM)” ve “BFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno) Quasi-Newton (Q-N) kübik doğrultu belirleme algoritması (BFGS Q-N CLSA)” çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları



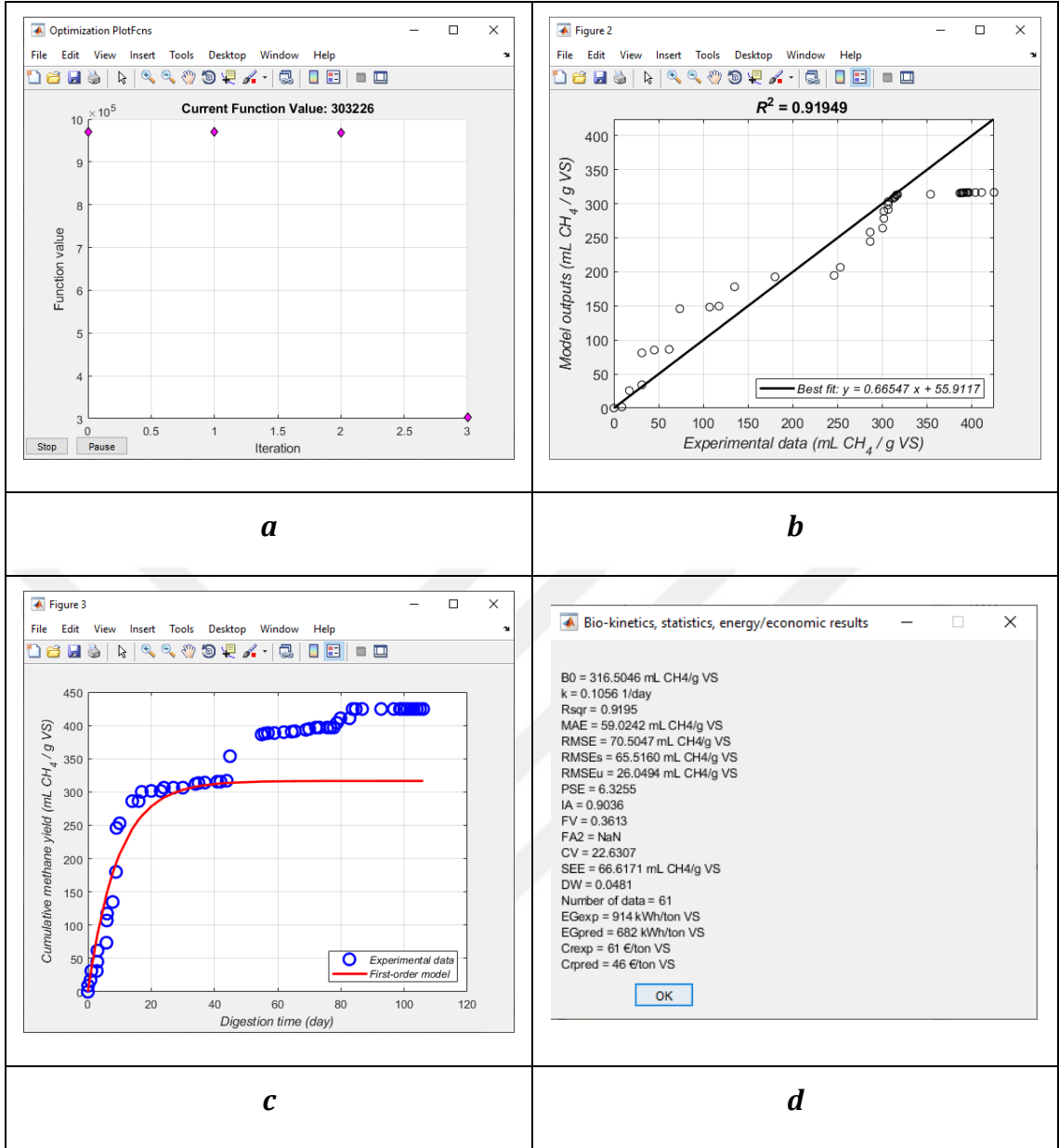
**Şekil 5.43** Köpek maması atıksuyuna ait deneysel verilere göre “İki Fazlı Üstel İlişki Modeli (İFÜİM)” ve “Nelder-Mead simpleks doğrudan arama algoritması (N-M SDSA)” çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları



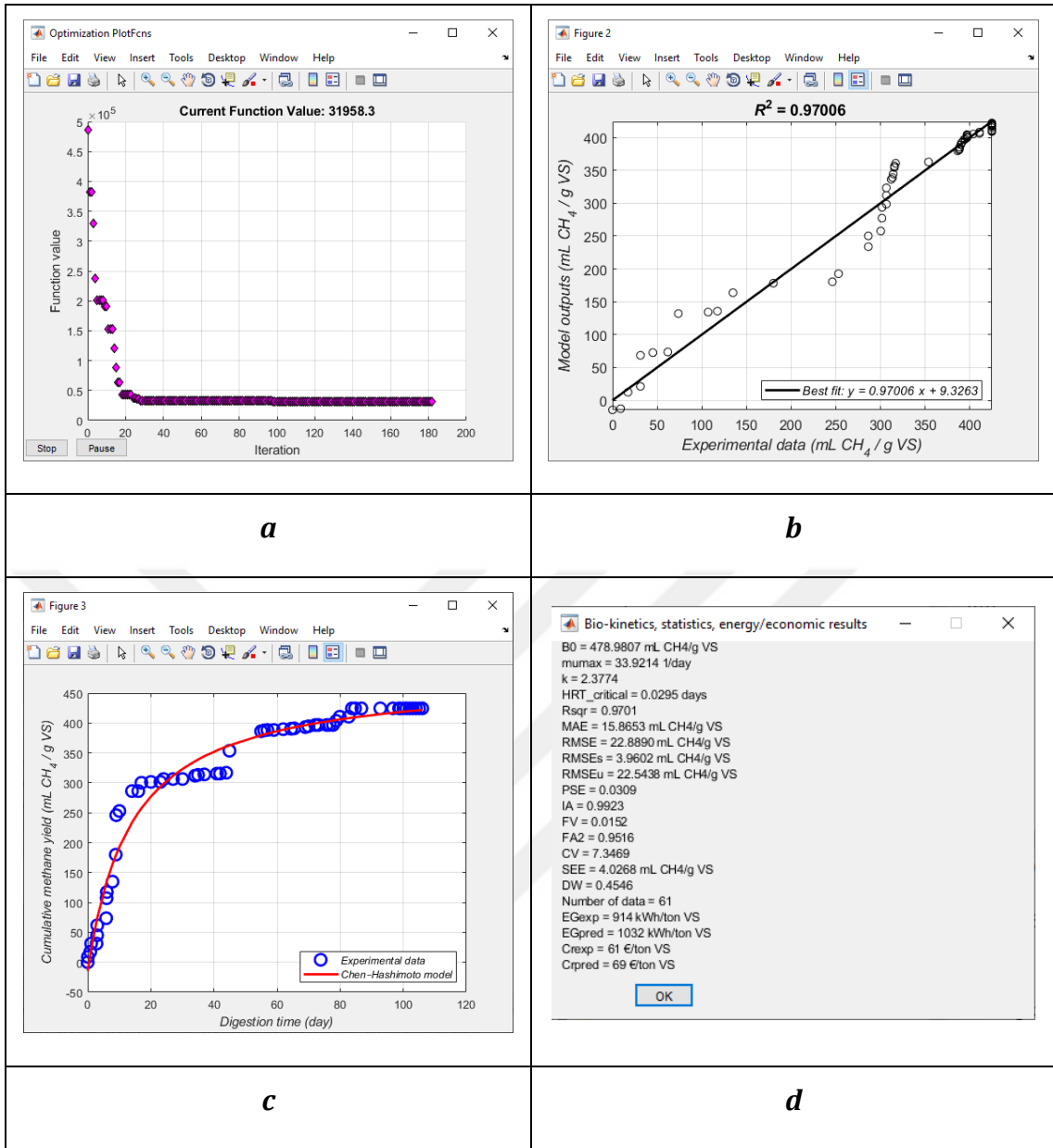
**Şekil 5.44** Köpek maması atıksuyuna ait deneysel verilere göre “İki Fazlı Üstel İlişki Modeli (İFÜİM)” ve “BFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno) Quasi-Newton (Q-N) kübik doğrultu belirleme algoritması (BFGS Q-N CLSA)” çözülmesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları



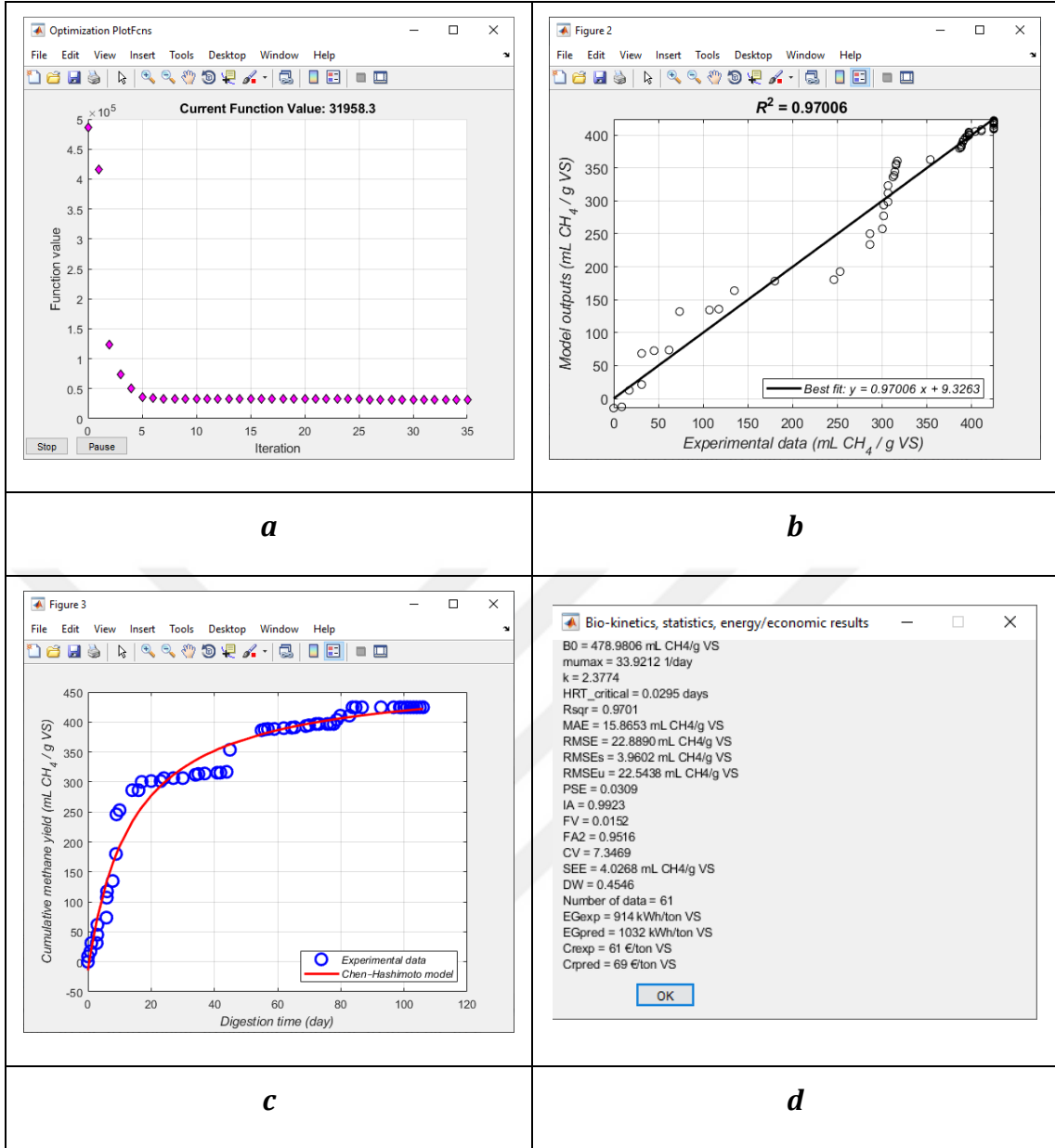
**Şekil 5.45** Köpek maması atıksuyuna ait deneysel verilere göre “Birinci Dereceden Fonksiyon (BDF)” ve “Nelder-Mead simpleks doğrudan arama algoritması (N-M SDSA)” çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları



**Şekil 5.46** Köpek maması atıksuyuna ait deneysel verilere göre “Birinci Dereceden Fonksiyon (BDF)” ve “BFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno) Quasi-Newton (Q-N) kübik doğrultu belirleme algoritması (BFGS Q-N CLSA)” çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları

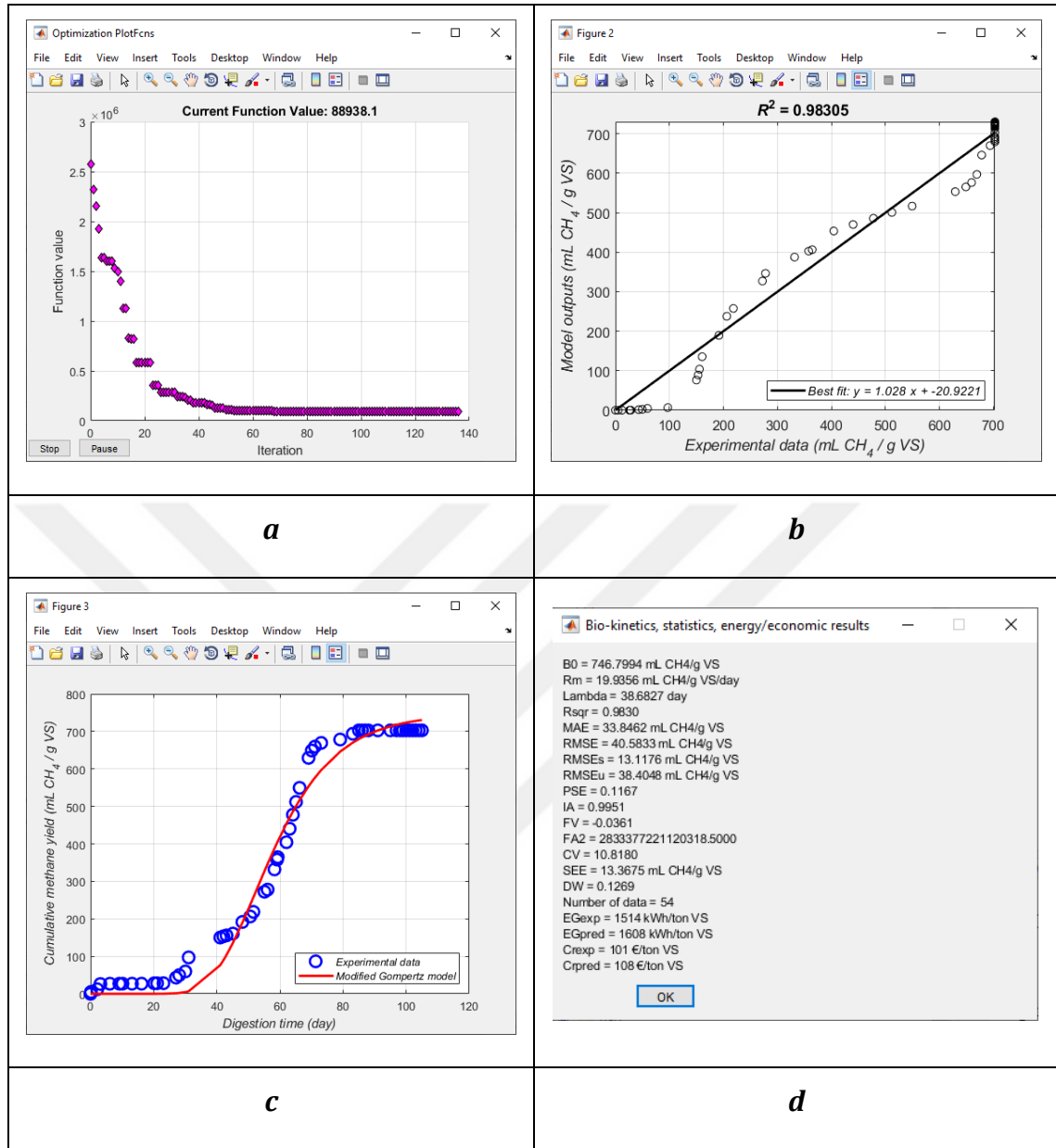


**Şekil 5.47** Köpek maması atıksuyuna ait deneysel verilere göre “Chen-Hashimoto Modeli (CHM)” ve “Nelder-Mead simpleks doğrudan arama algoritması (N-M SDSA)” çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları

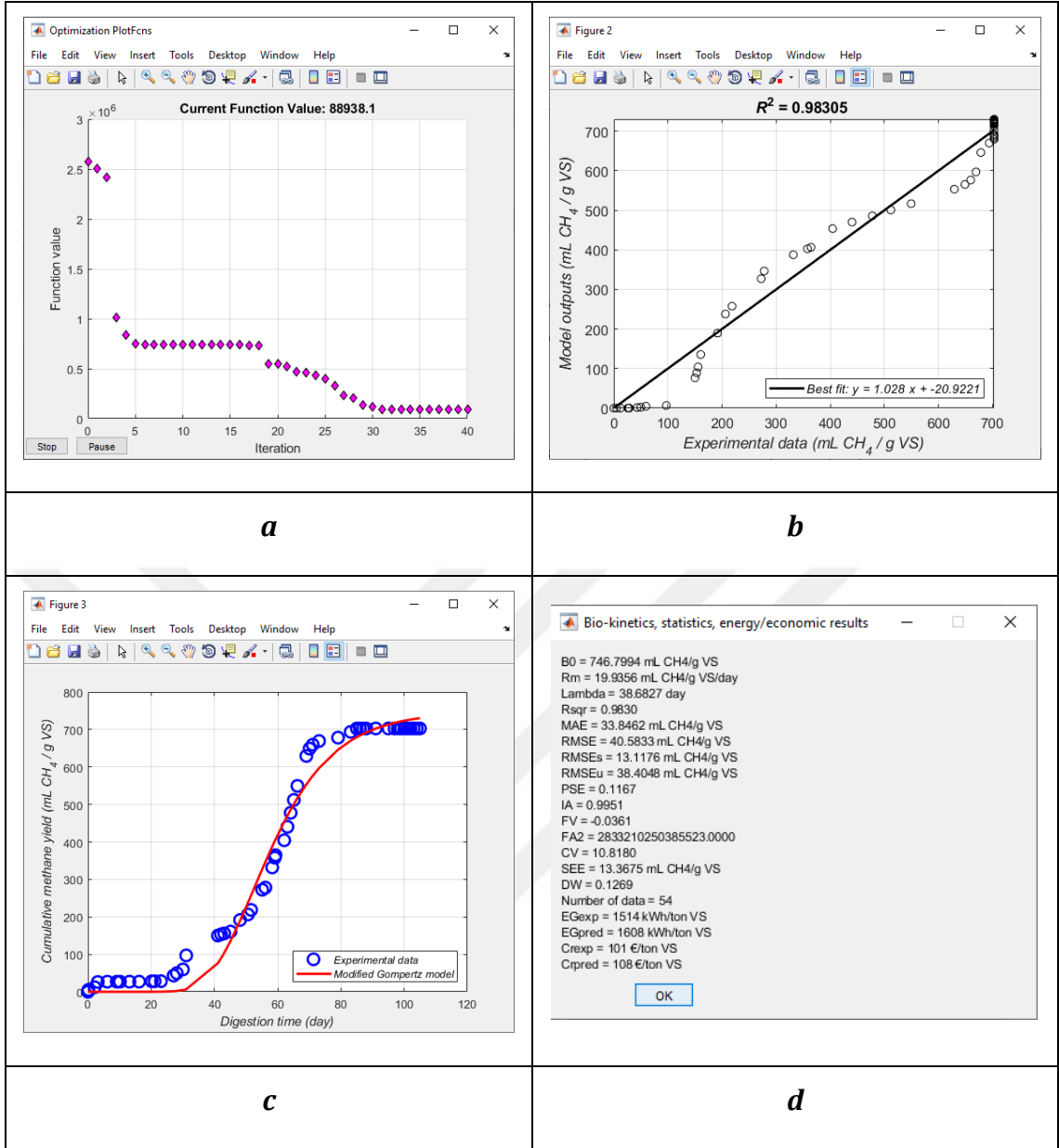


**Şekil 5.48** Köpek maması atıksuyuna ait deneysel verilere göre “Chen-Hashimoto Modeli (CHM)” ve “BFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno) Quasi-Newton (Q-N) kübik doğrultu belirleme algoritması (BFGS Q-N CLSA)” çözümü için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları

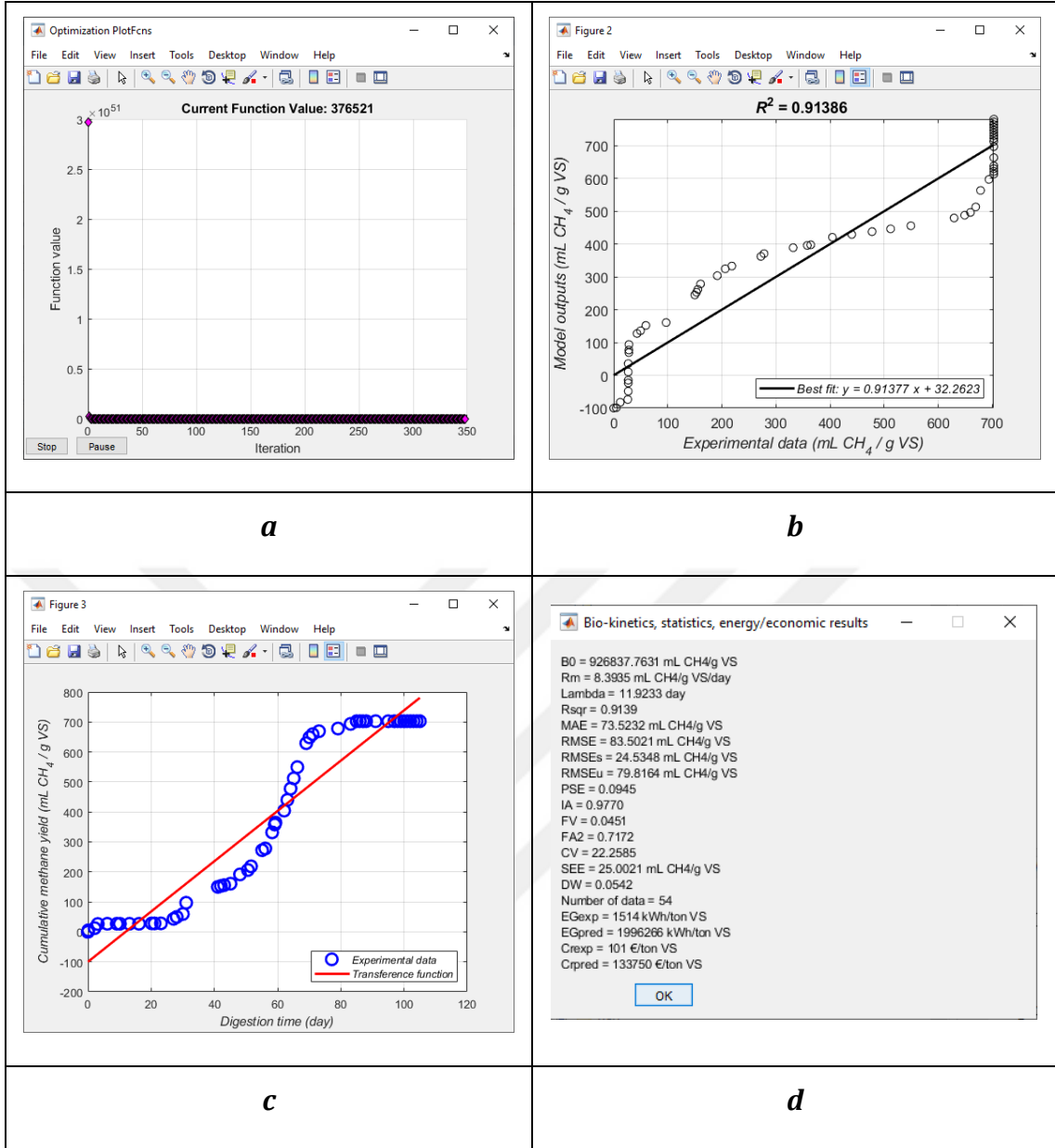
#### 5.4.4 Balık Atıksuyu



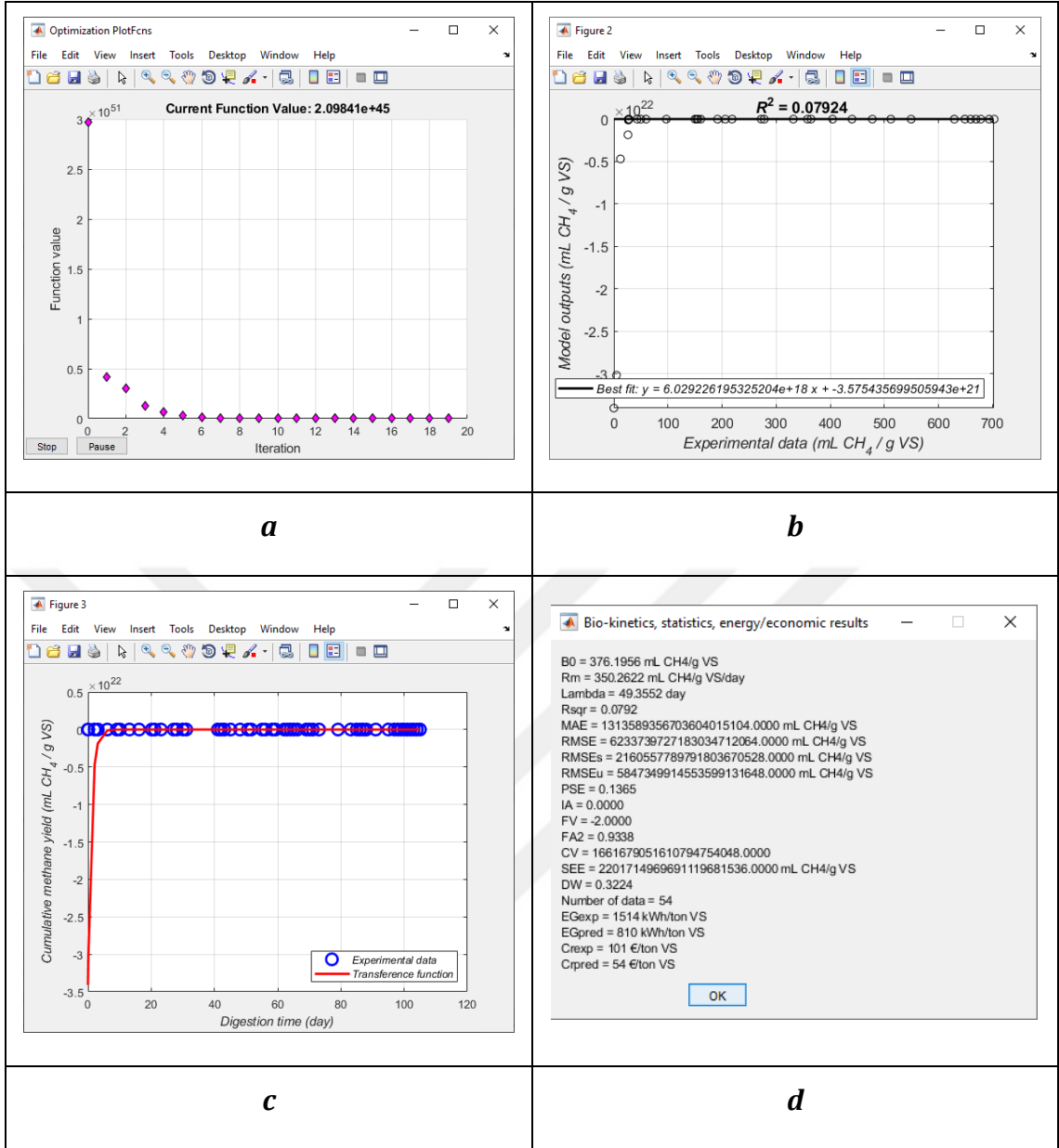
**Şekil 5.49** Balık atıksuyuna ait deneysel verilere göre “Modifiye Gompertz Modeli (MGM)” ve “Nelder-Mead simpleks doğrudan arama algoritması (N-M SDSA)” çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları



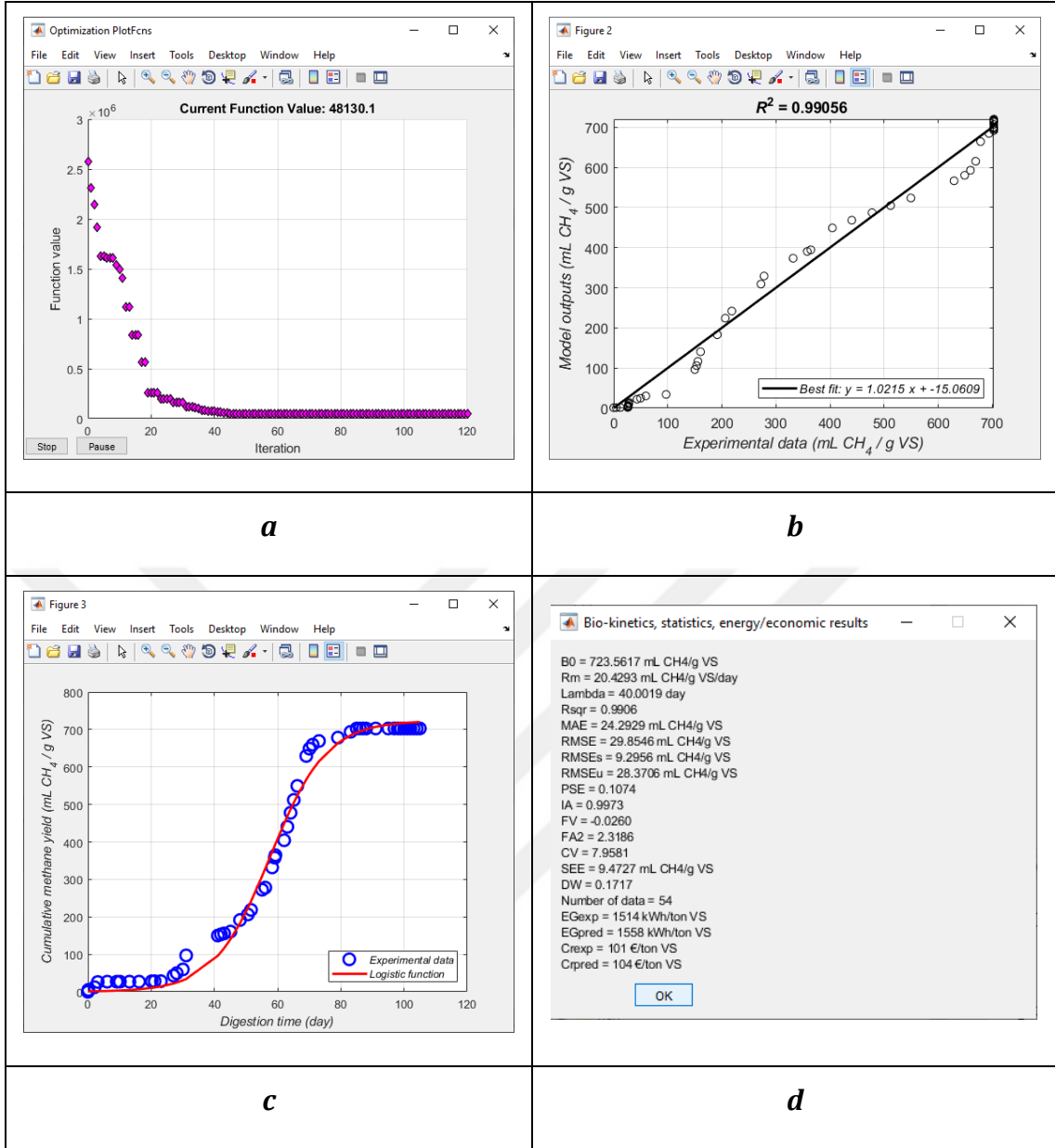
**Şekil 5.50** Balık atıksuyuna ait deneysel verilere göre “Modifiye Gompertz Modeli (MGM)” ve “BFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno) Quasi-Newton (Q-N) kübik doğrultu belirleme algoritması (BFGS Q-N CLSA)” çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları



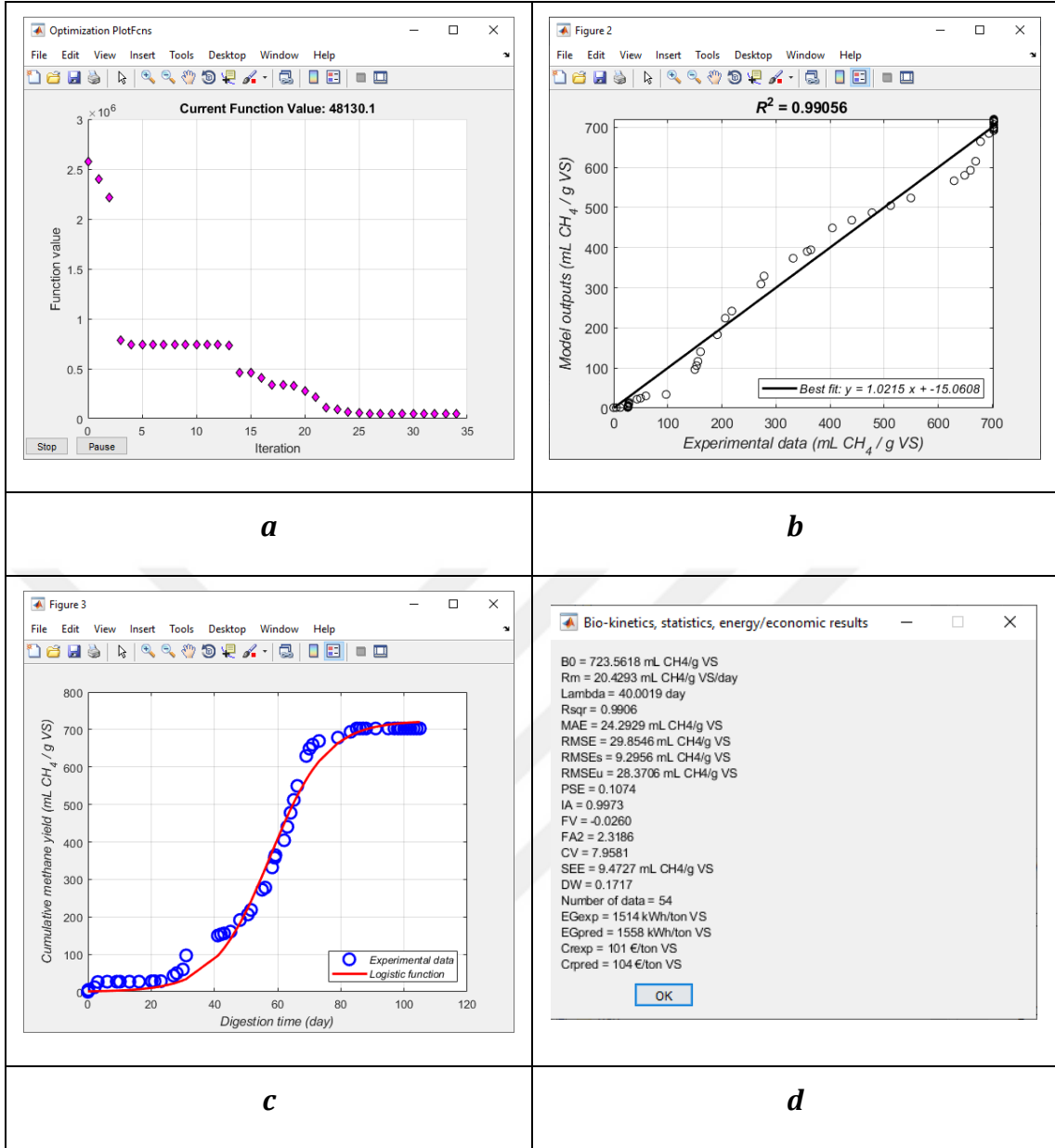
**Şekil 5.51** Balık atıksuyuna ait deneysel verilere göre “Transfer Fonksiyonu (TF)” ve “Nelder-Mead simpleks doğrudan arama algoritması (N-M SDSA)” çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları



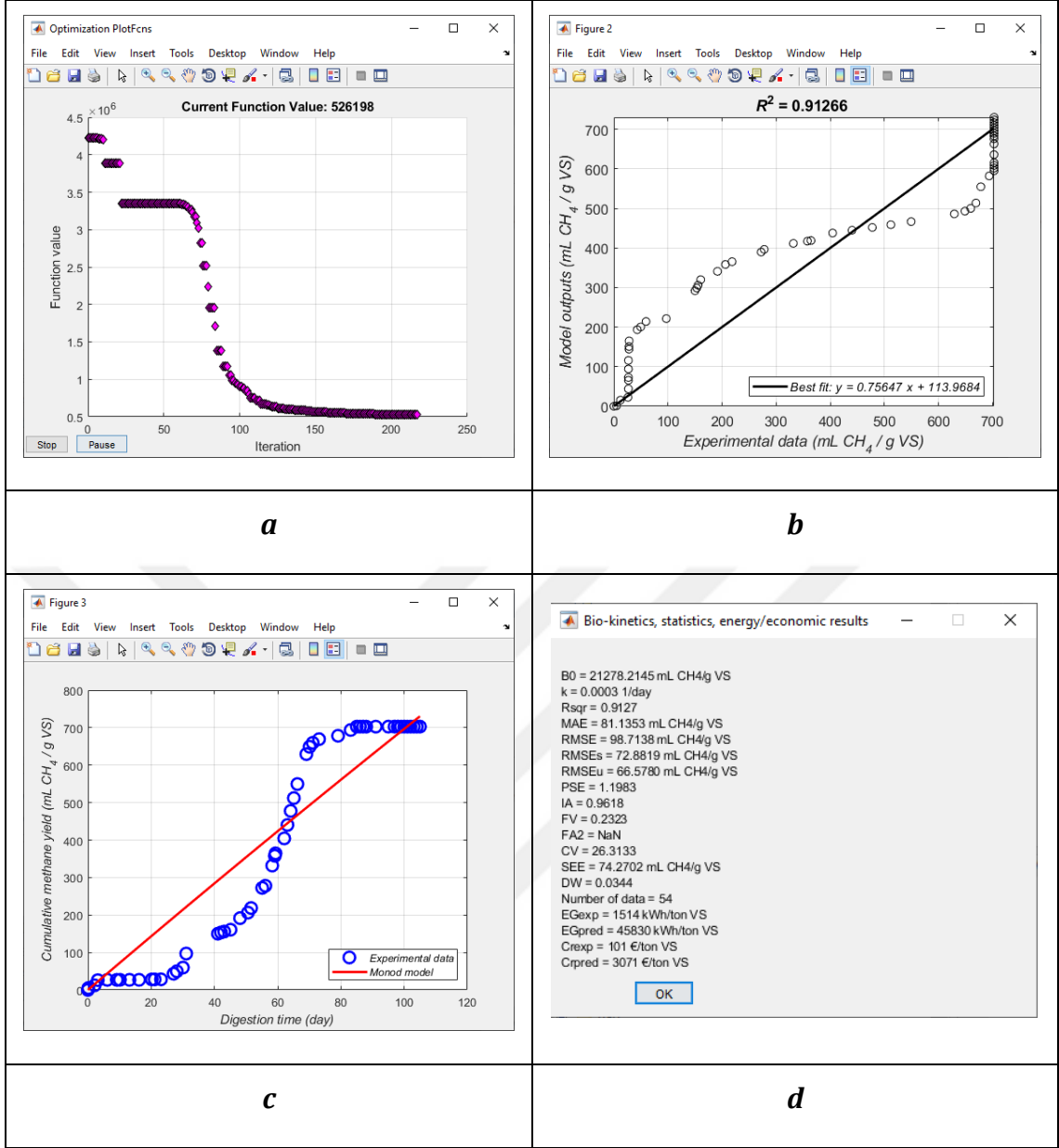
**Şekil 5.52** Balık atıksuyuna ait deneysel verilere göre “Transfer Fonksiyonu (TF)” ve “BFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno) Quasi-Newton (Q-N) kübik doğruyu belirleme algoritması (BFGS Q-N CLSA)” çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları



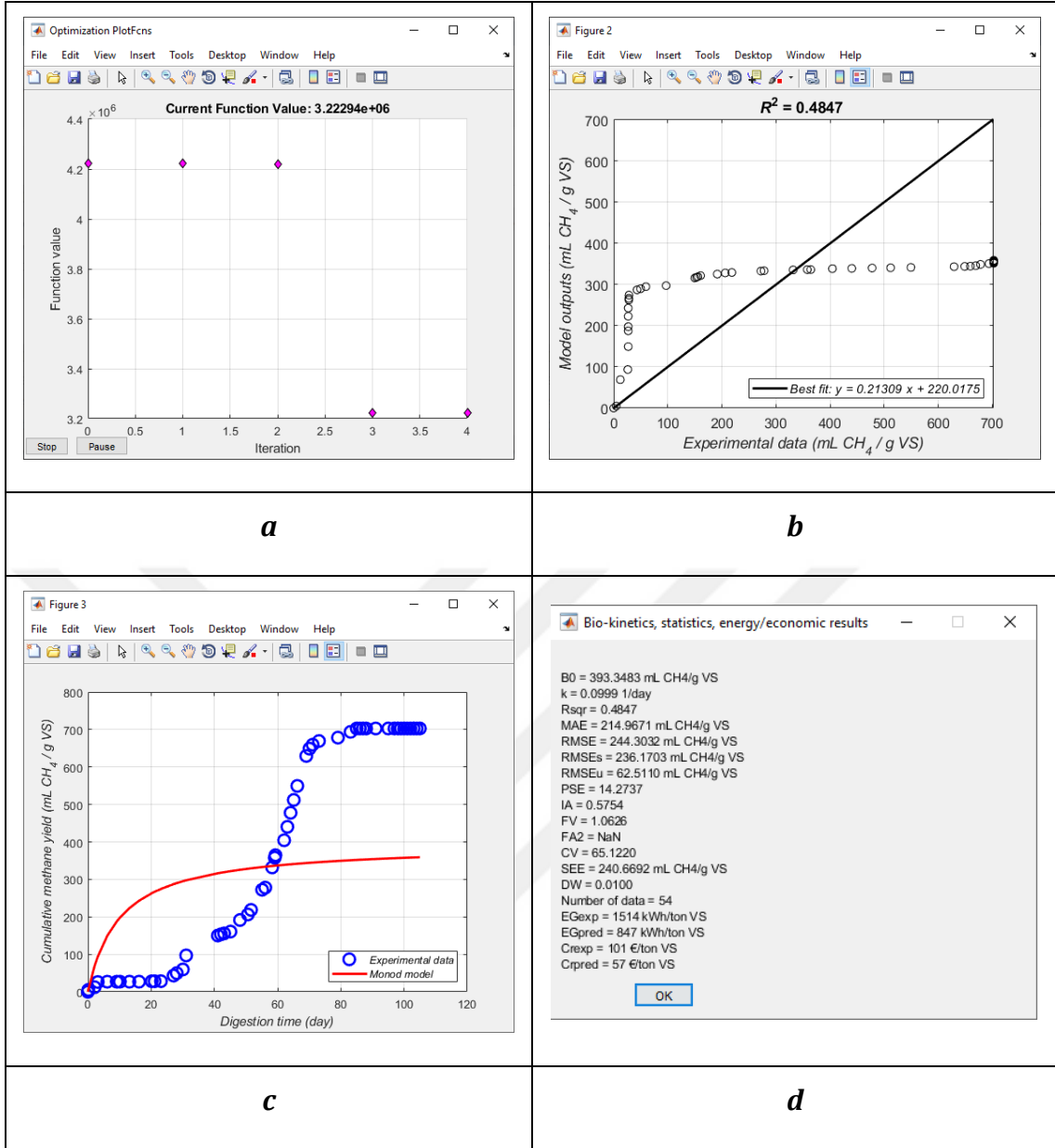
**Şekil 5.53** Balık atıksuyuna ait deneysel verilere göre “Lojistik Fonksiyon (LF)” ve “Nelder-Mead simpleks doğrudan arama algoritması (N-M SDSA)” çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları



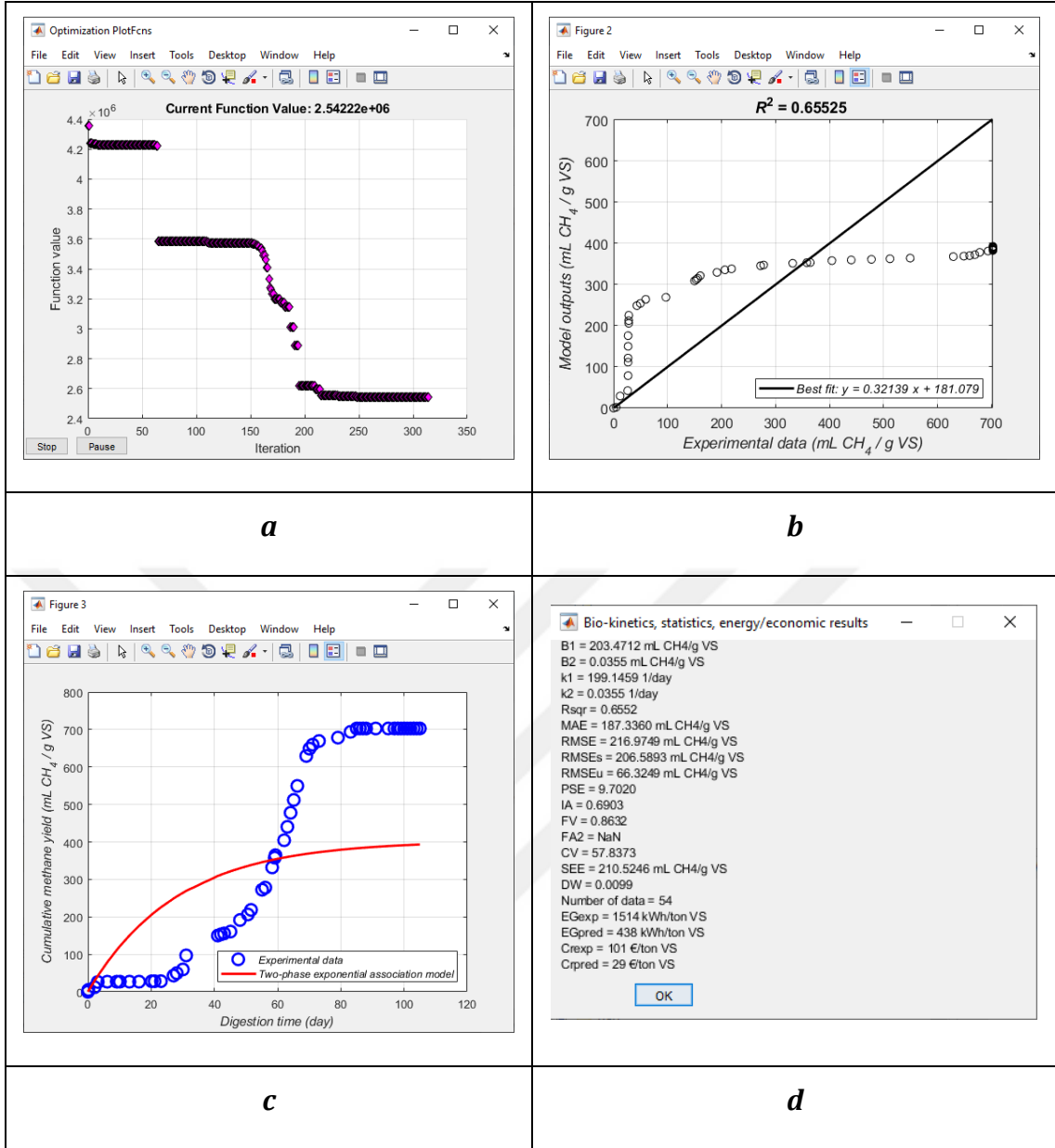
**Şekil 5.54** Balık atıksuyuna ait deneysel verilere göre “Lojistik Fonksiyon (LF)” ve “BFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno) Quasi-Newton (Q-N) kübik doğrultu belirleme algoritması (BFGS Q-N CLSA)” çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları



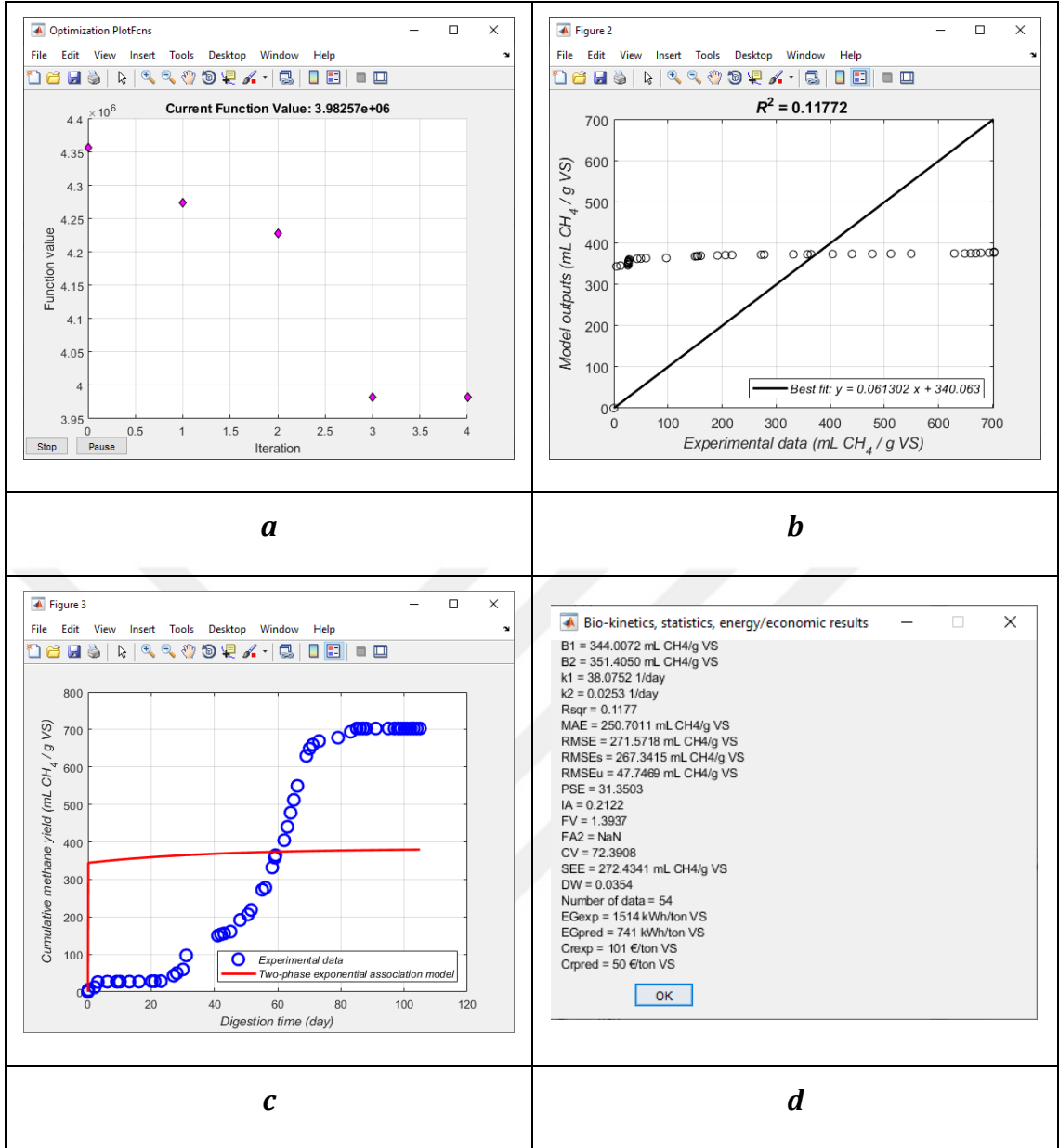
**Şekil 5.55** Balık atıksuyuna ait deneysel verilere göre “Monod Tipi Model (MTM)” ve “Nelder-Mead simpleks doğrudan arama algoritması (N-M SDSA)” çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları



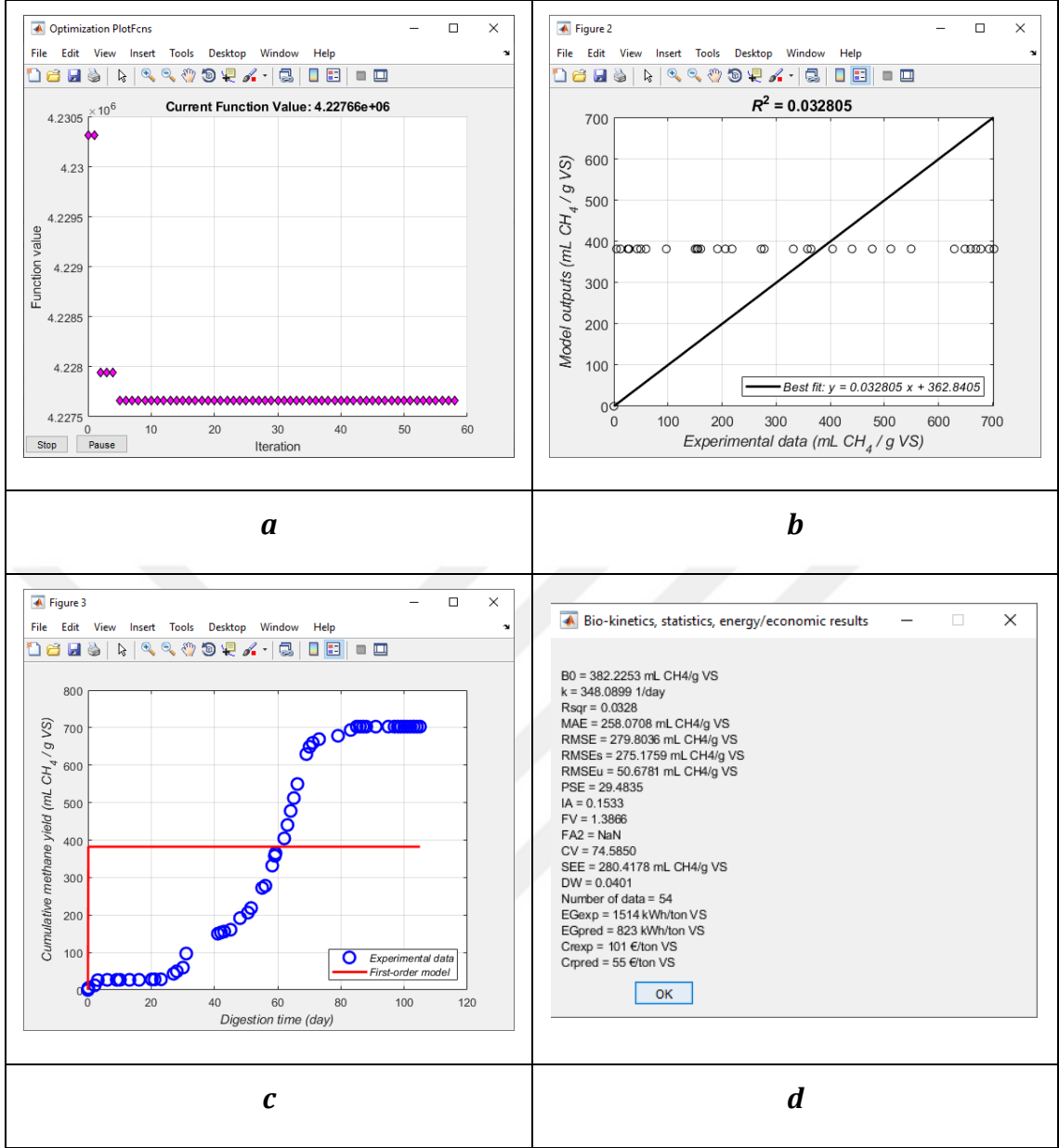
**Şekil 5.56** Balık atıksuyuna ait deneysel verilere göre “Monod Tipi Model (MTM)” ve “BFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno) Quasi-Newton (Q-N) kübik doğruyu belirleme algoritması (BFGS Q-N CLSA)” çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları



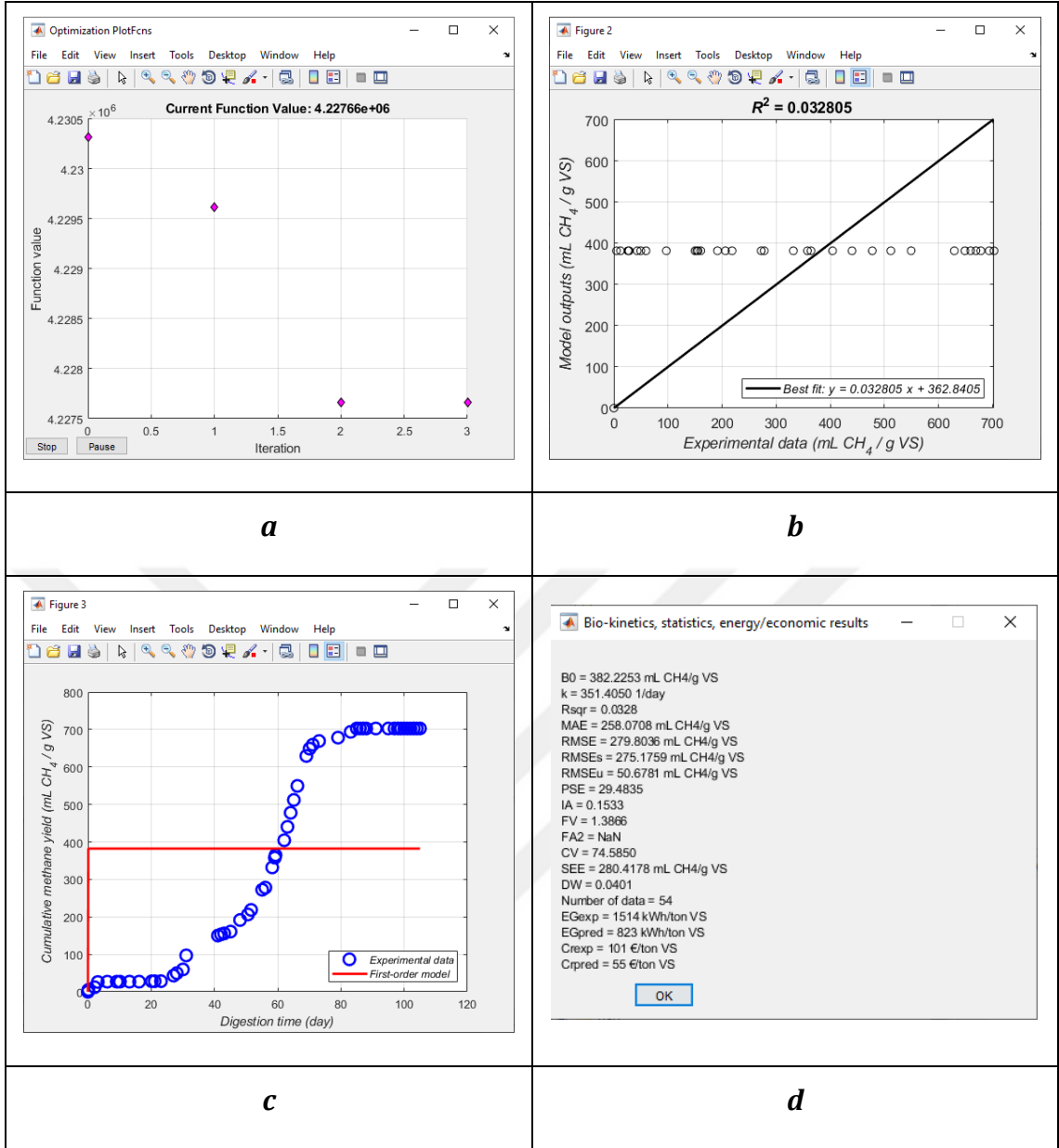
**Şekil 5.57** Balık atıksuyuna ait deneysel verilere göre “İki Fazlı Üstel İlişki Modeli (İFÜİM)” ve “Nelder-Mead simpleks doğrudan arama algoritması (N-M SDSA)” çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları



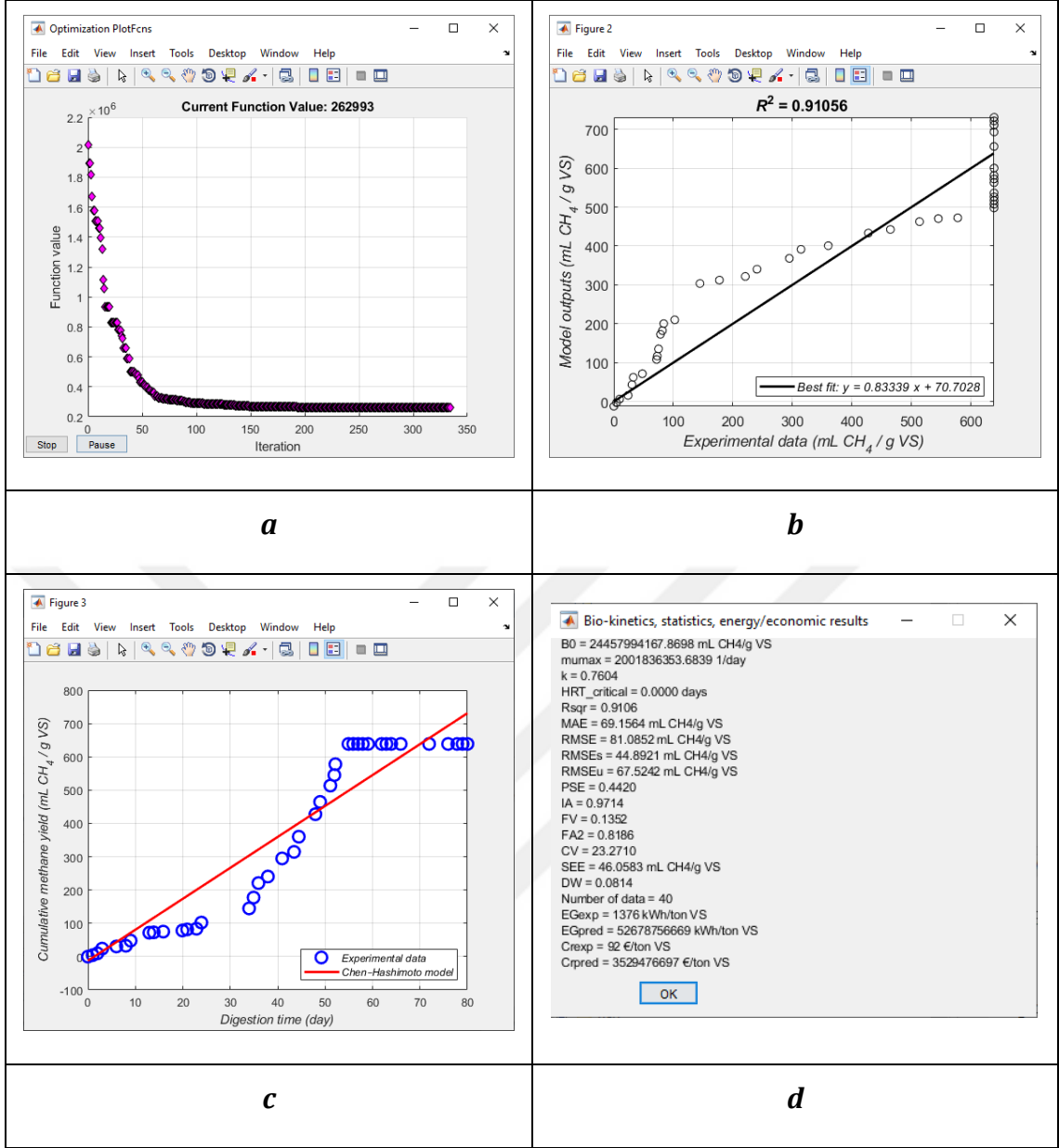
**Şekil 5.58** Balık atıksuyuna ait deneysel verilere göre “İki Fazlı Üstel İlişki Modeli (İFÜİM)” ve “BFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno) Quasi-Newton (Q-N) kübik doğrultu belirleme algoritması (BFGS Q-N CLSA)” çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları



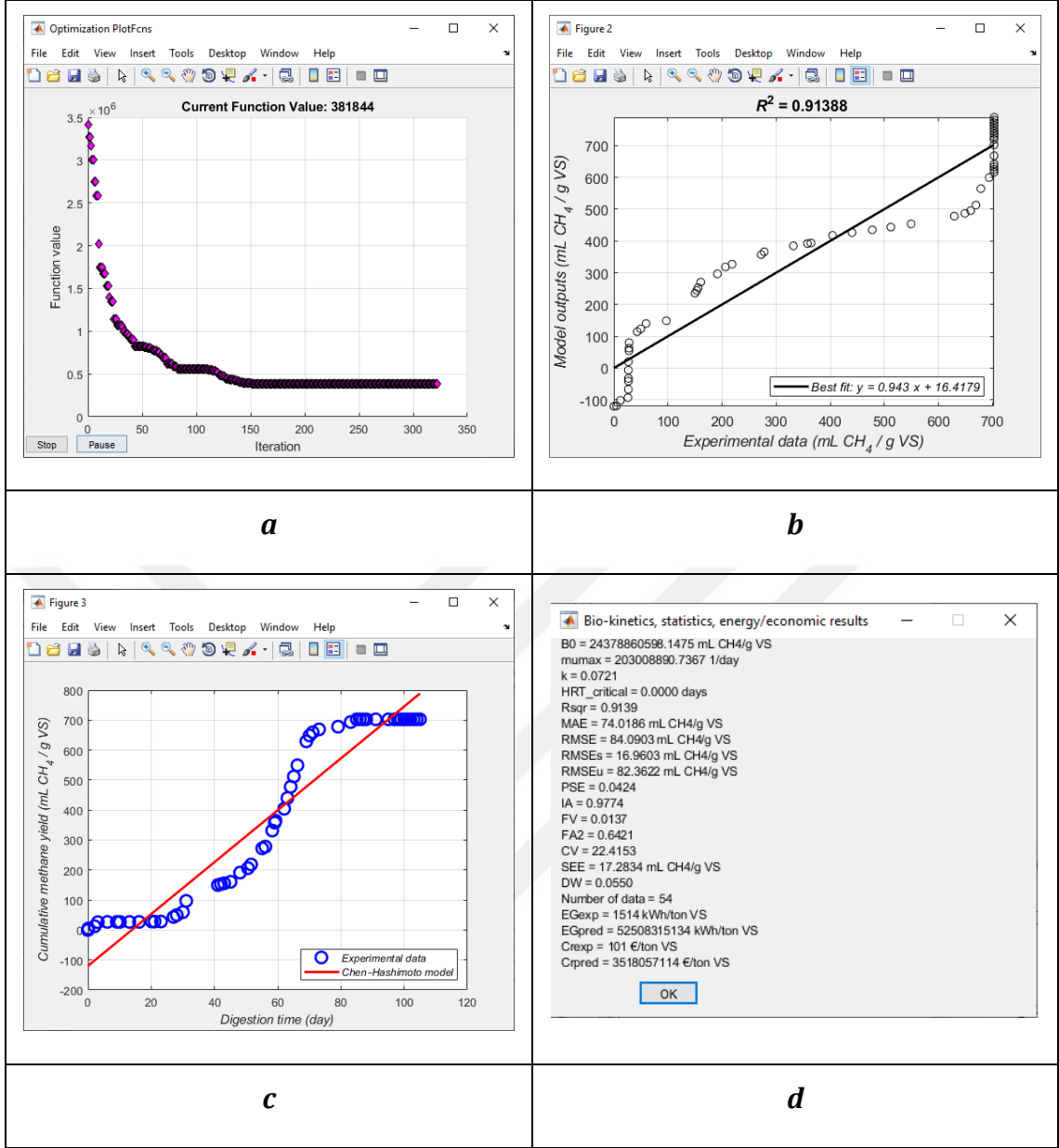
**Şekil 5.59** Balık atıksuyuna ait deneysel verilere göre “Birinci Dereceden Fonksiyon (BDF)” ve “Nelder-Mead simpleks doğrudan arama algoritması (N-M SDSA)” çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları



**Şekil 5.60** Balık atıksuyuna ait deneysel verilere göre “Birinci Dereceden Fonksiyon (BDF)” ve “BFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno) Quasi-Newton (Q-N) kübik doğrultu belirleme algoritması (BFGS Q-N CLSA)” çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları

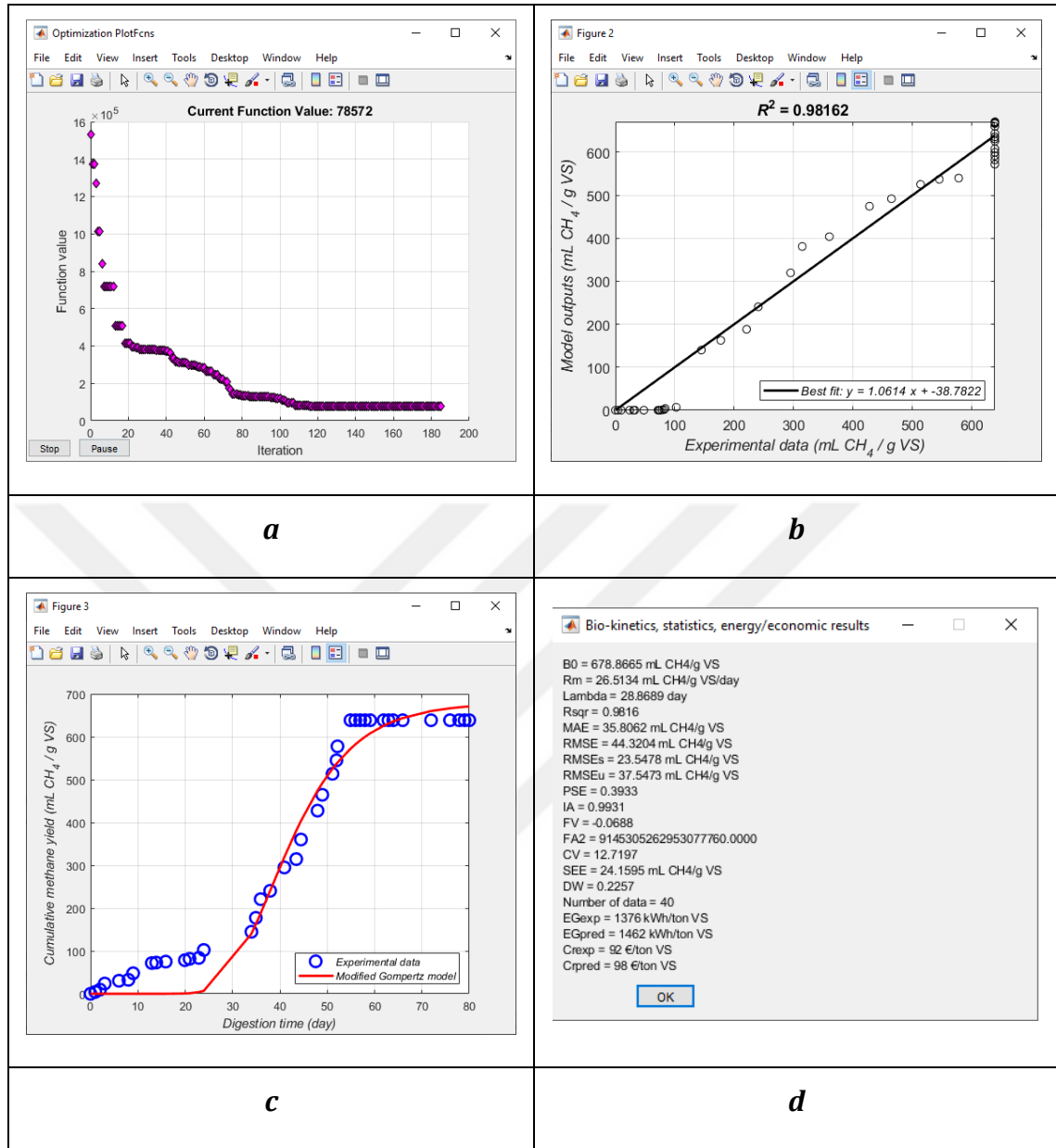


**Şekil 5.61** Balık atıksuyuna ait deneysel verilere göre “Chen-Hashimoto Modeli (CHM)” ve “Nelder-Mead simpleks doğrudan arama algoritması (N-M SDSA)” çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları

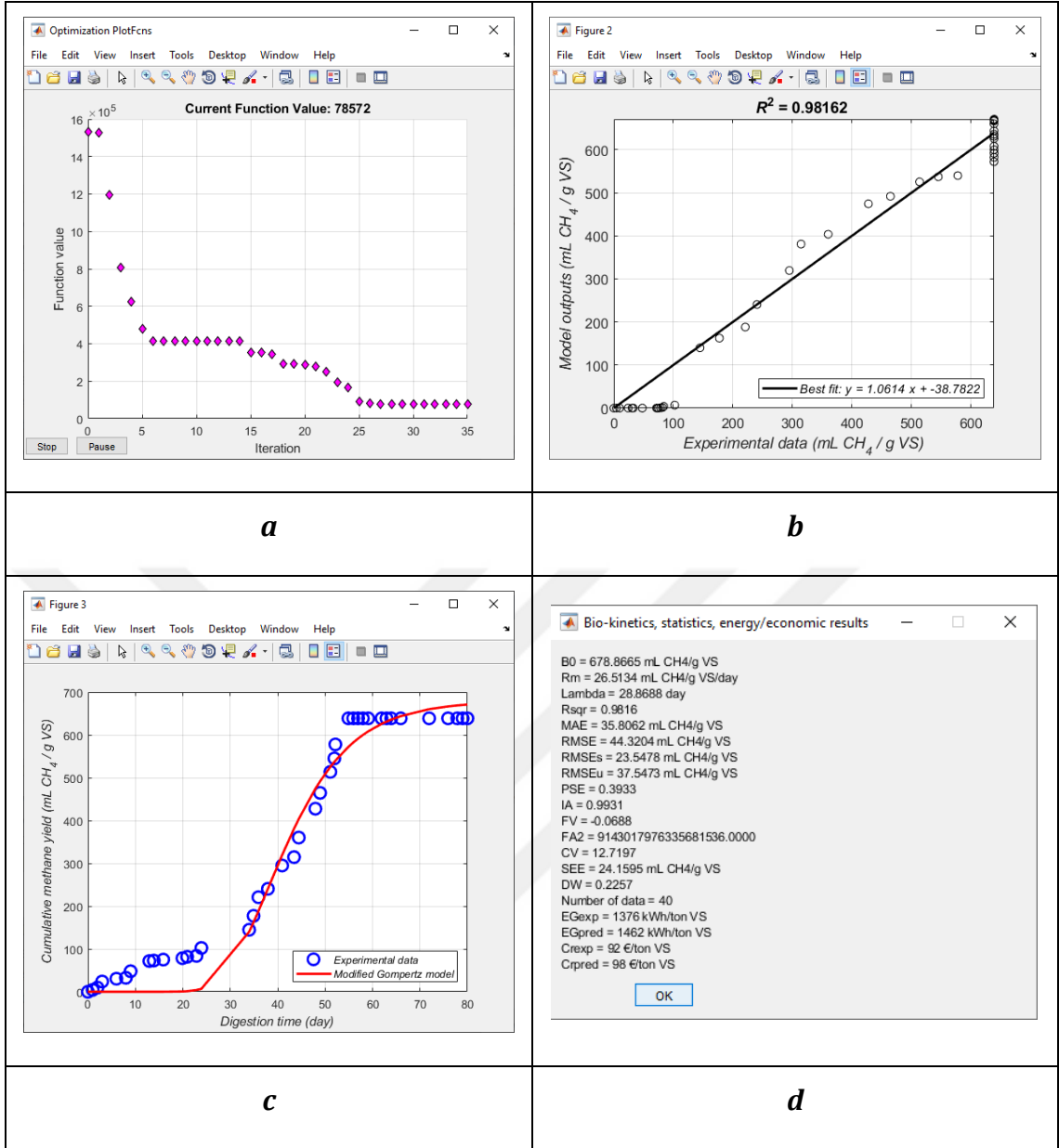


**Şekil 5.62** Balık atıksuyuna ait deneysel verilere göre “Chen-Hashimoto Modeli (CHM)” ve “BFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno) Quasi-Newton (Q-N) kübik doğruyu belirleme algoritması (BFGS Q-N CLSA)” çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları

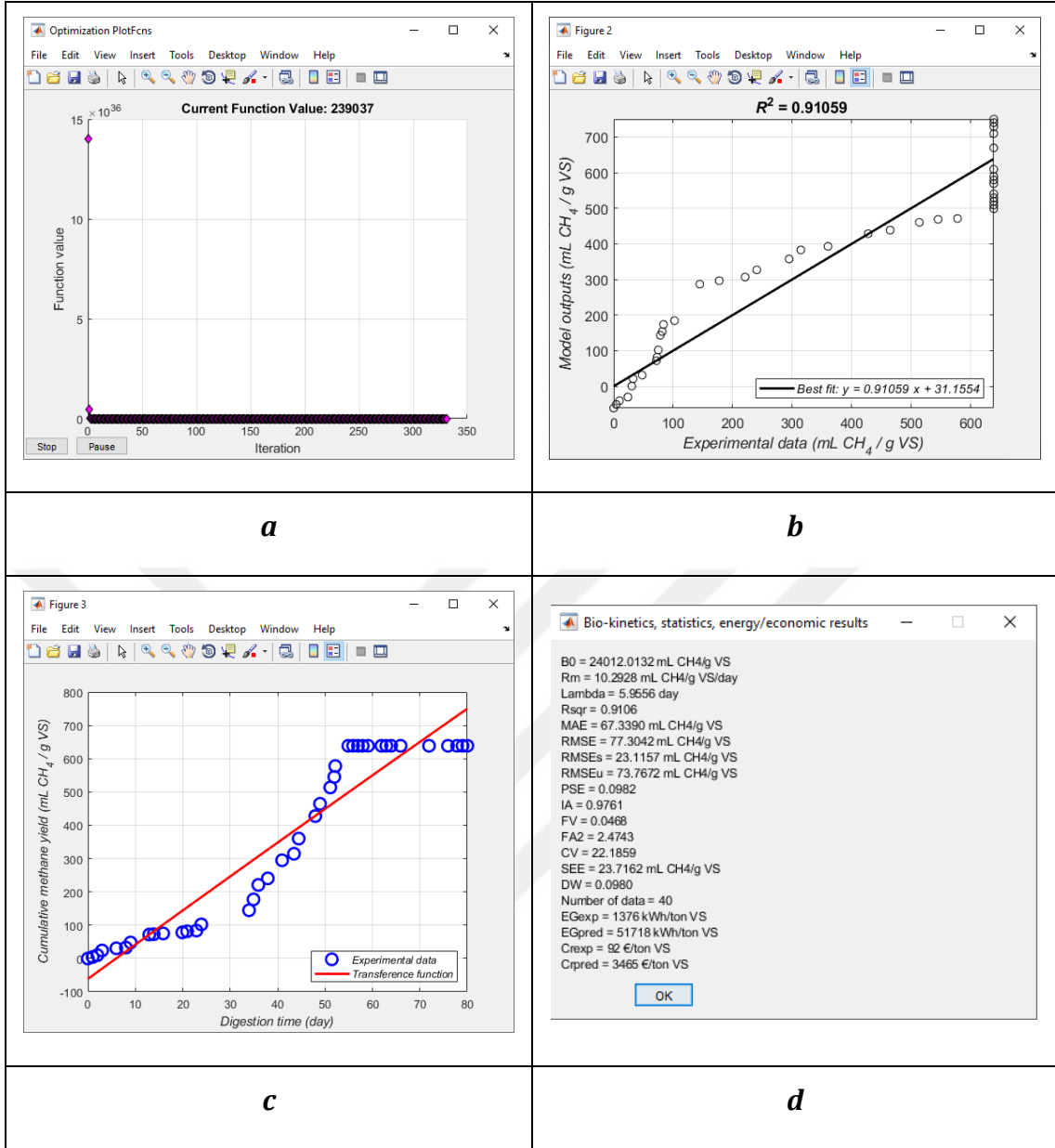
### 5.4.5 Tavuk Gübresi Atıksuyu



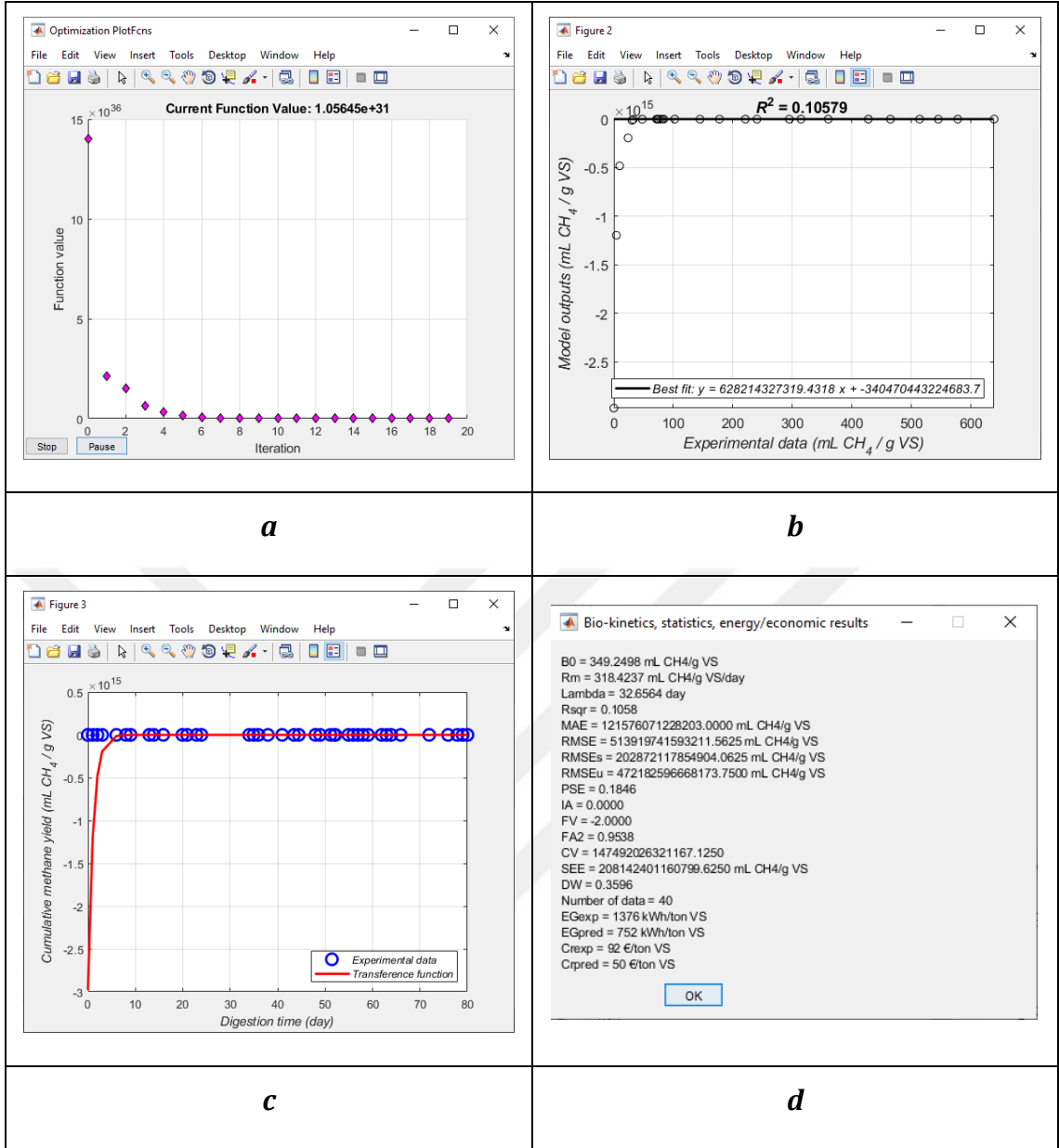
**Şekil 5.63** Tavuk gübresi atıksuyuna ait deneysel verilere göre “Modifiye Gompertz Modeli (MGM)” ve “Nelder-Mead simpleks doğrudan arama algoritması (N-M SDSA)” çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları



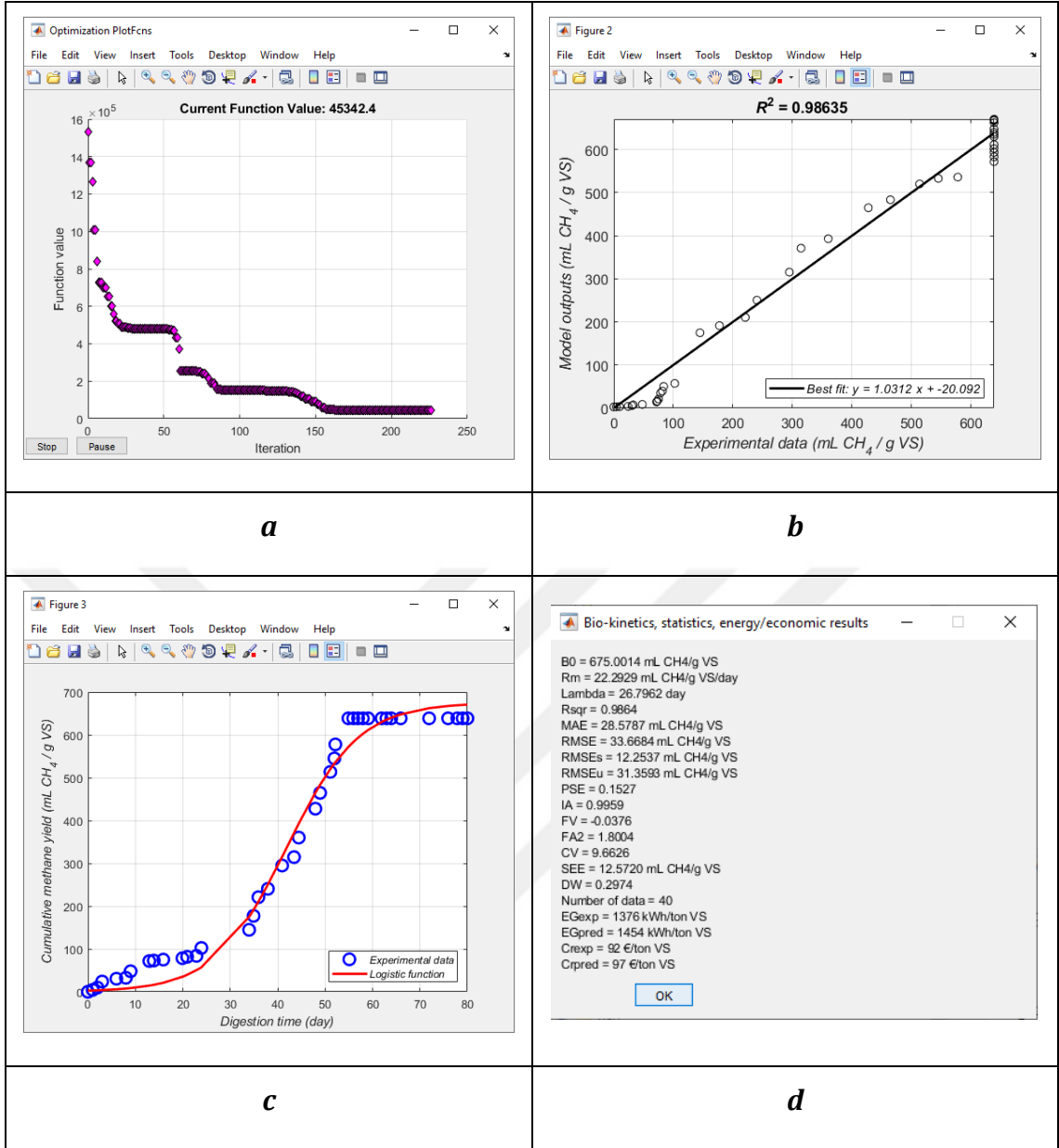
**Şekil 5.64** Tavuk gübresi atıksuyuna ait deneysel verilere göre “Modifiye Gompertz Modeli (MGM)” ve “BFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno) Quasi-Newton (Q-N) kübik doğrultu belirleme algoritması (BFGS Q-N CLSA)” çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları



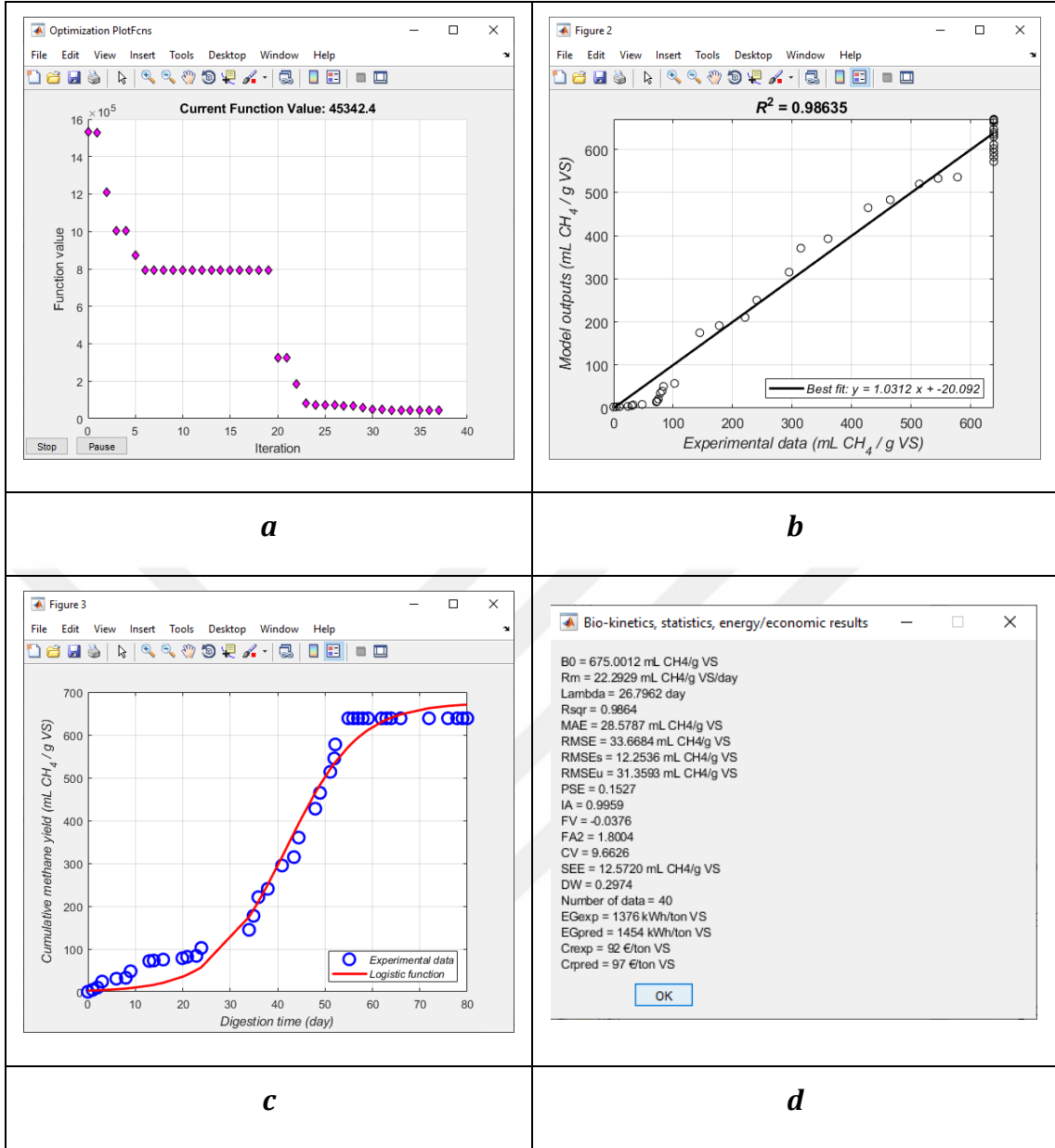
**Şekil 5.65** Tavuk gübresi atıksuyuna ait deneysel verilere göre “Transfer Fonksiyonu (TF)” ve “Nelder-Mead simpleks doğrudan arama algoritması (N-M SDSA)” çözümü için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları



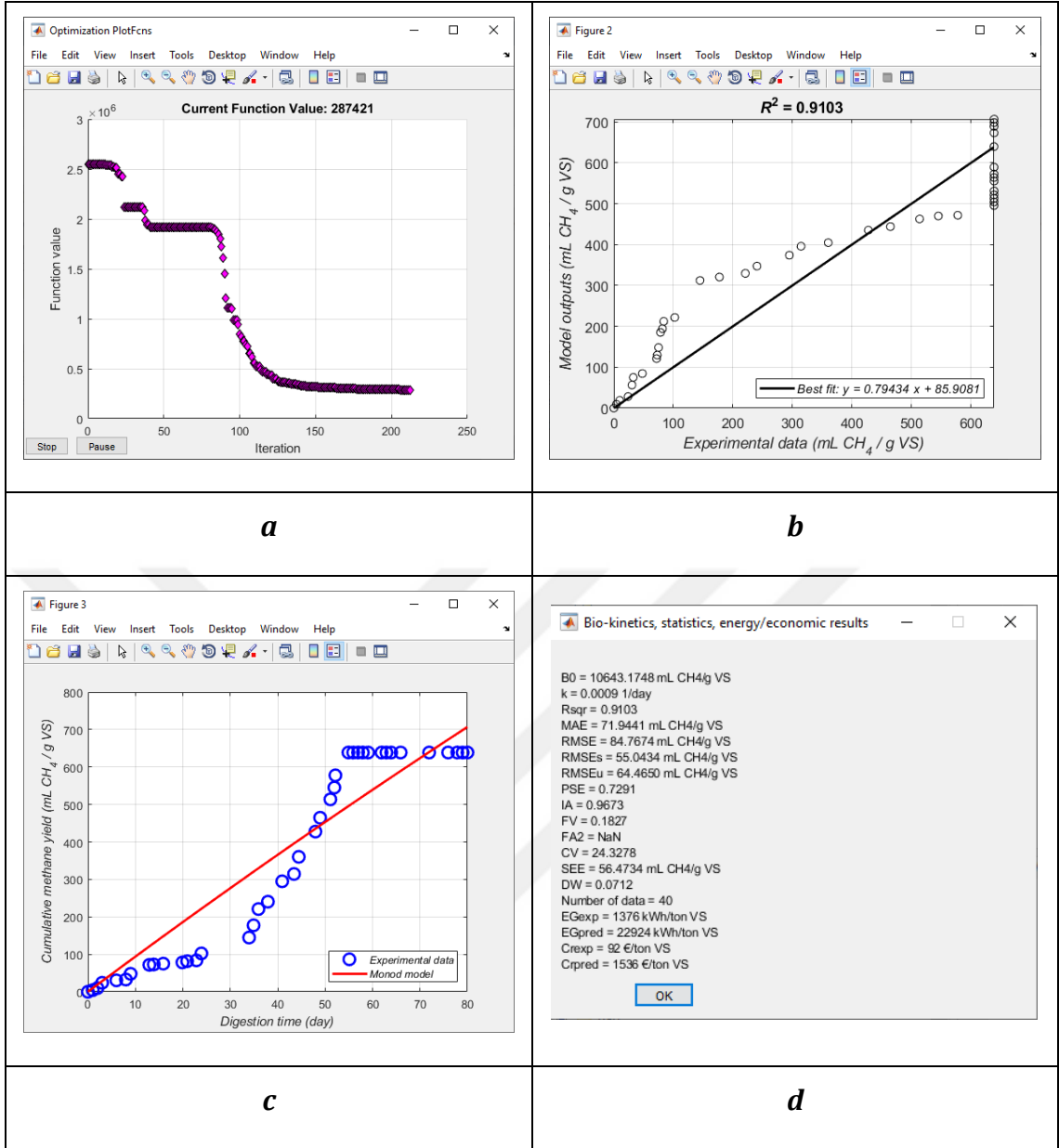
**Şekil 5.66** Tavuk gübresi atıksuyuna ait deneysel verilere göre “Transfer Fonksiyonu (TF)” ve “BFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno) Quasi-Newton (Q-N) kübik doğrultu belirleme algoritması (BFGS Q-N CLSA)” çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları



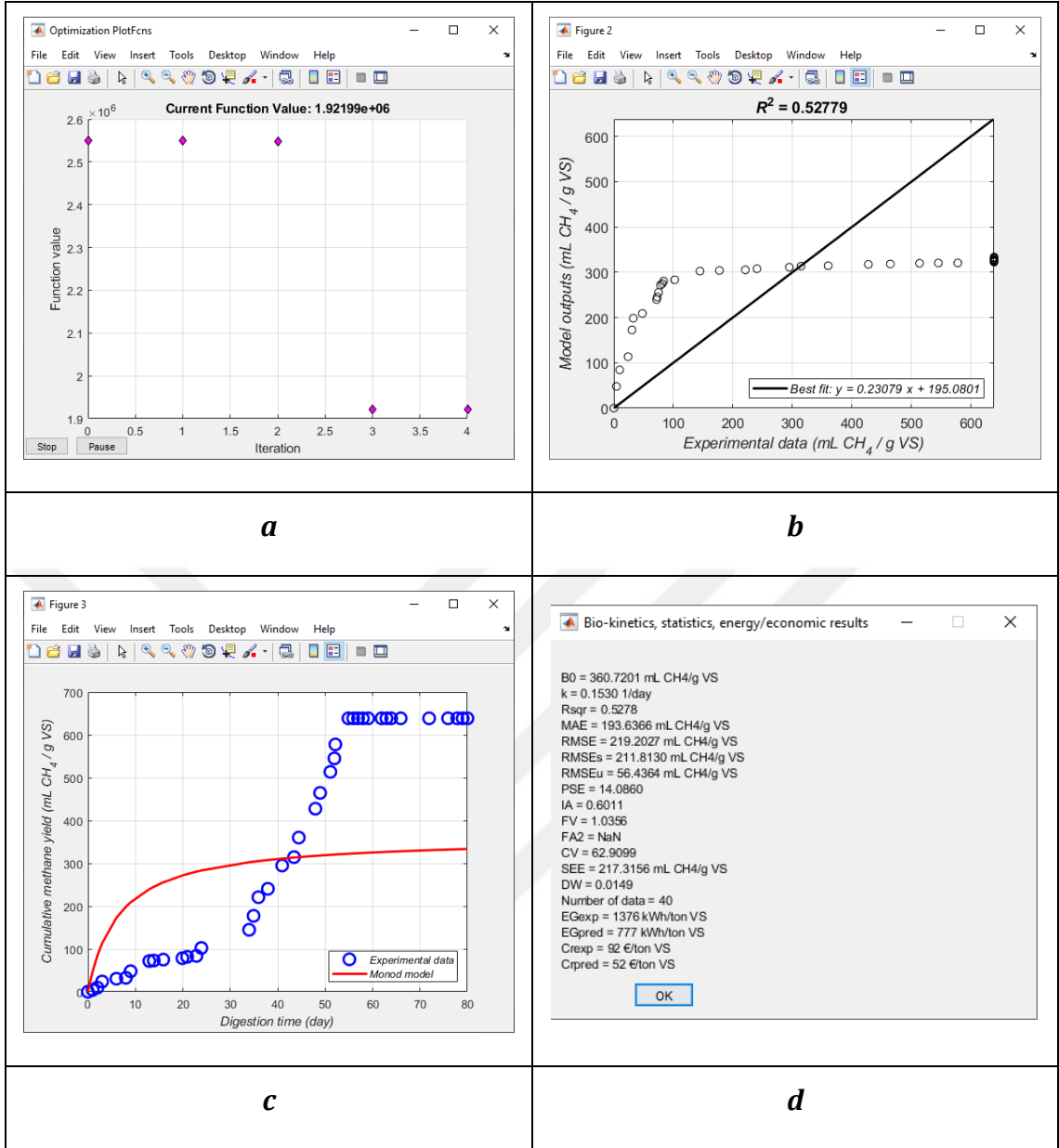
**Şekil 5.67** Tavuk gübresi atıksuyuna ait deneysel verilere göre “Lojistik Fonksiyon (LF)” ve “Nelder-Mead simpleks doğrudan arama algoritması (N-M SDSA)” çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları



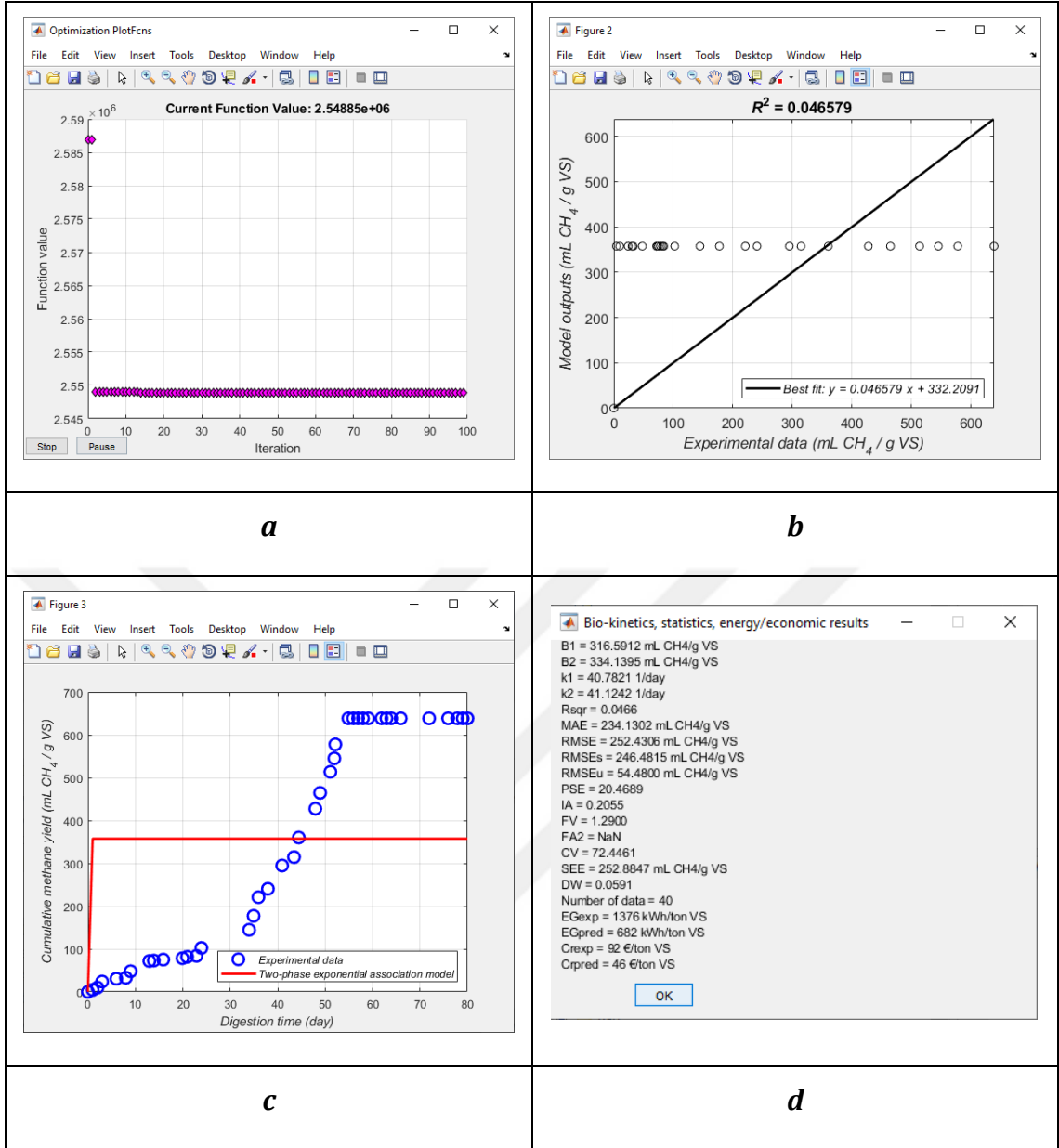
**Şekil 5.68** Tavuk gübresi atıksuyuna ait deneysel verilere göre “Lojistik Fonksiyon (LF)” ve “BFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno) Quasi-Newton (Q-N) kübik doğrultu belirleme algoritması (BFGS Q-N CLSA)” çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları



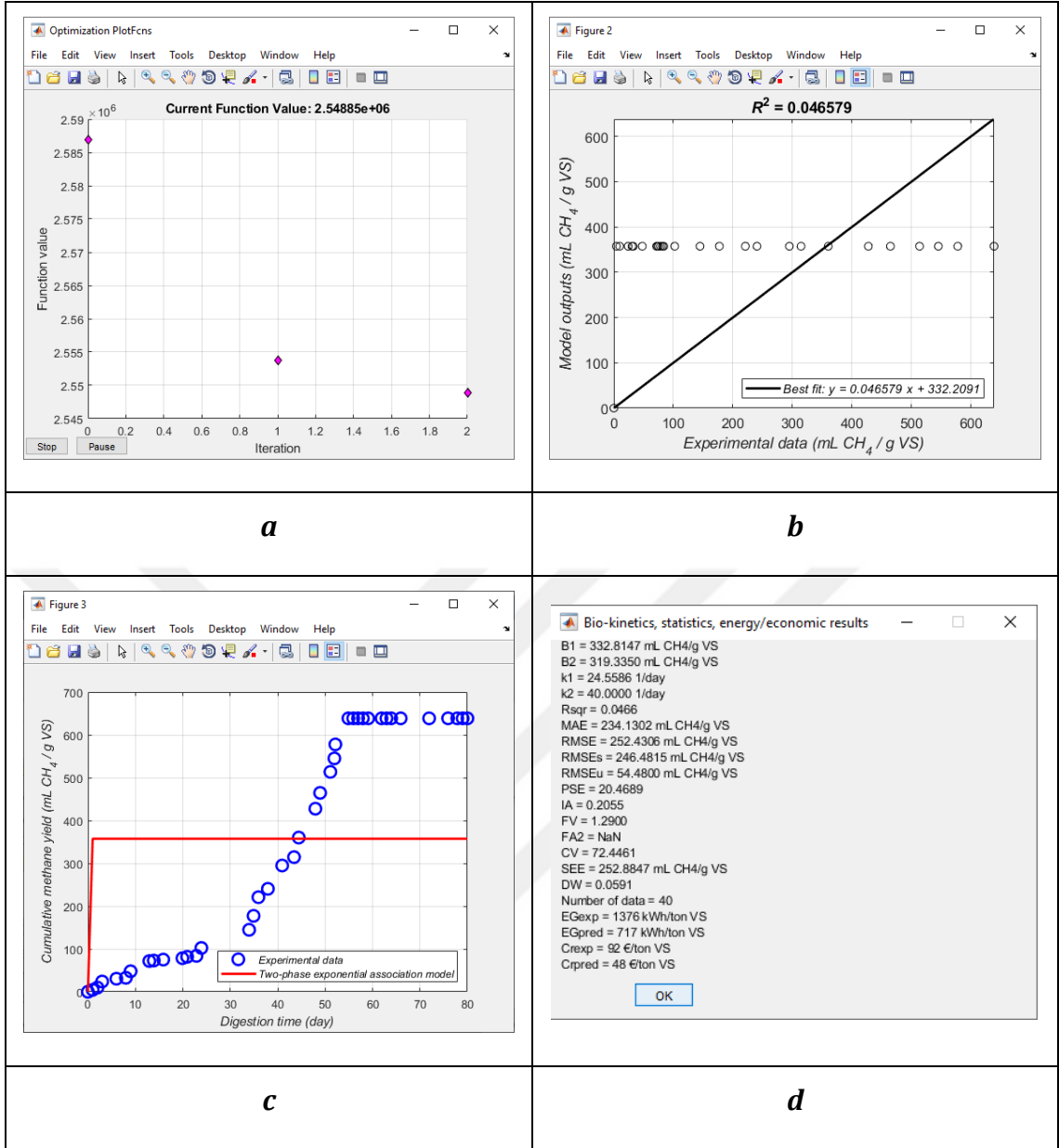
**Şekil 5.69** Tavuk gübresi atıksuyuna ait deneysel verilere göre “Monod Tipi Model (MTM)” ve “Nelder-Mead simpleks doğrudan arama algoritması (N-M SDSA)” çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları



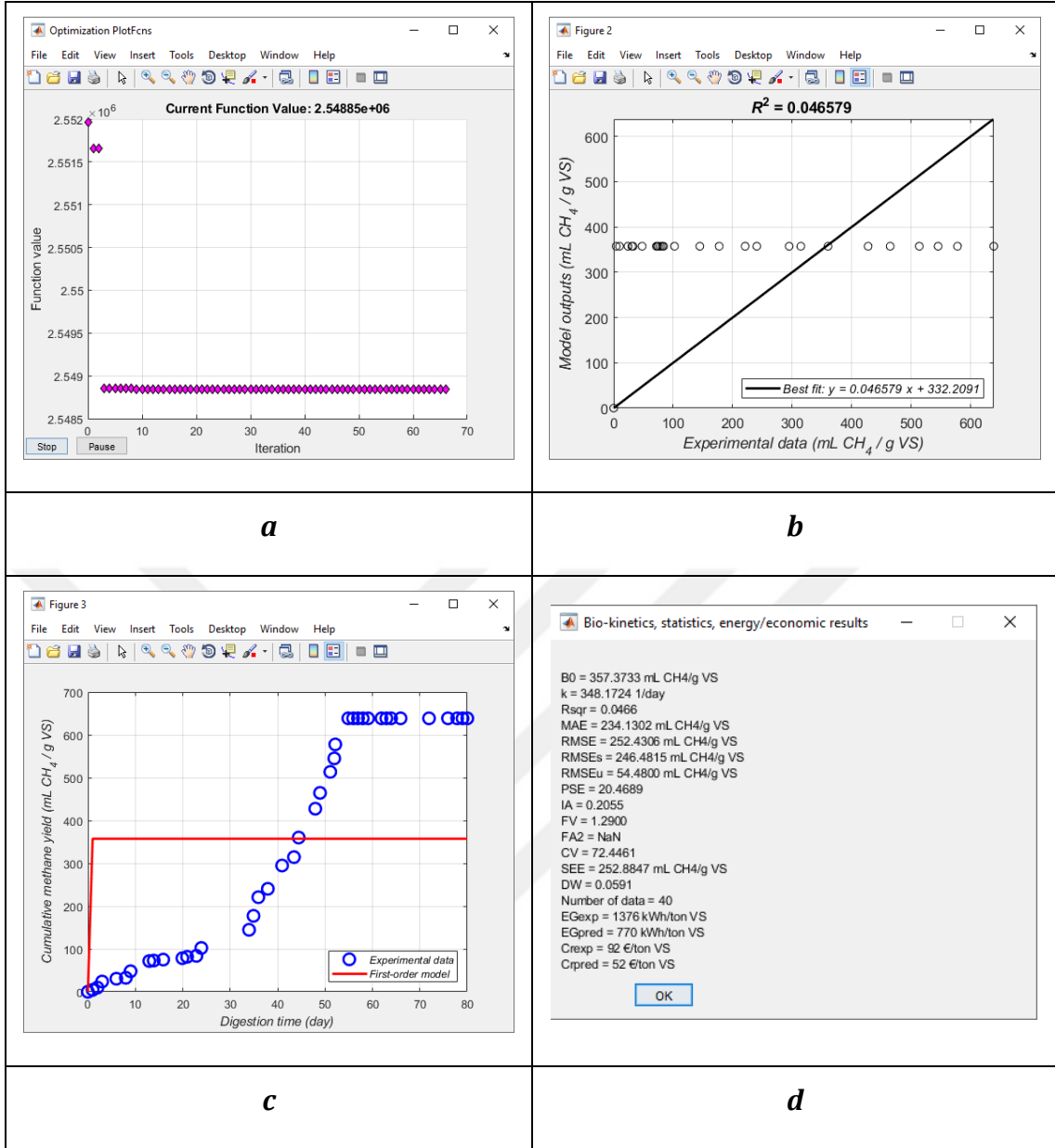
**Şekil 5.70** Tavuk gübresi atıksuyuna ait deneysel verilere göre “Monod Tipi Model (MTM)” ve “BFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno) Quasi-Newton (Q-N) kübik doğrultu belirleme algoritması (BFGS Q-N CLSA)” çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları



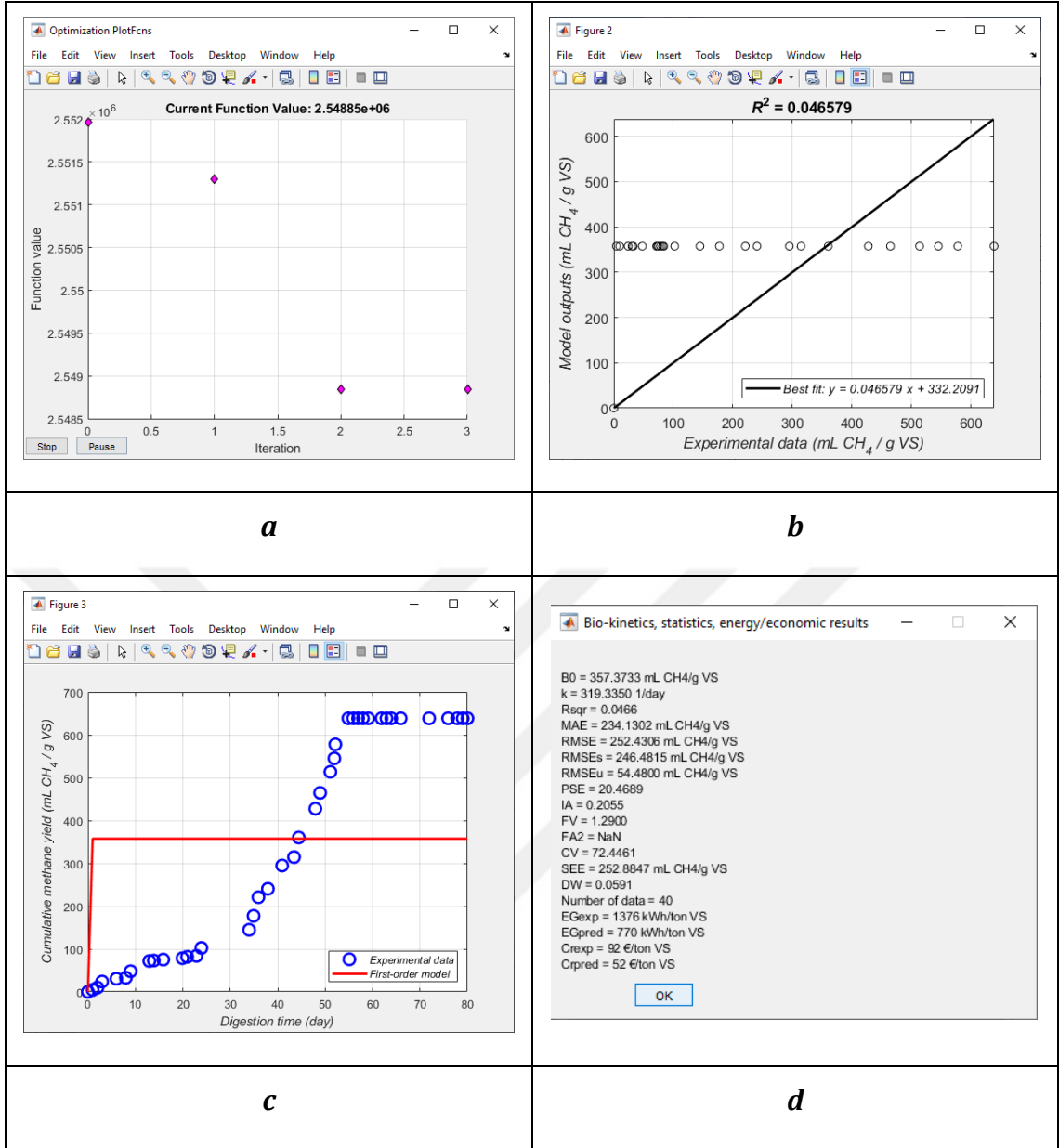
**Şekil 5.71** Tavuk gübresi atıksuyuna ait deneysel verilere göre “İki Fazlı Üstel İlişki Modeli (İFÜİM)” ve “Nelder-Mead simpleks doğrudan arama algoritması (N-M SDSA)” çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları



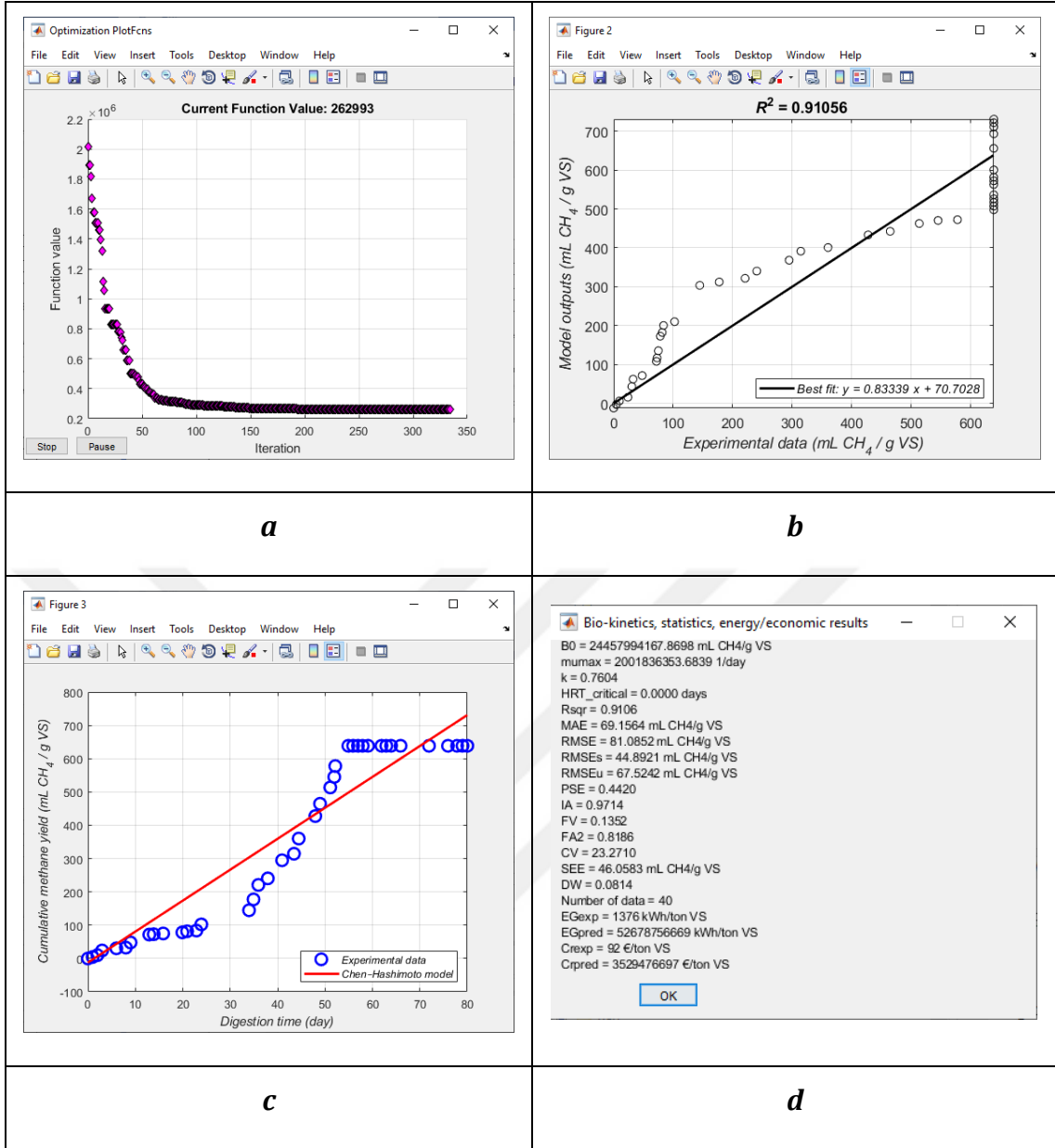
**Şekil 5.72** Tavuk gübresi atıksuyuna ait deneysel verilere göre “İki Fazlı Üstel İlişki Modeli (İFÜİM)” ve “BFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno) Quasi-Newton (Q-N) kübik doğrultu belirleme algoritması (BFGS Q-N CLSA)” çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları



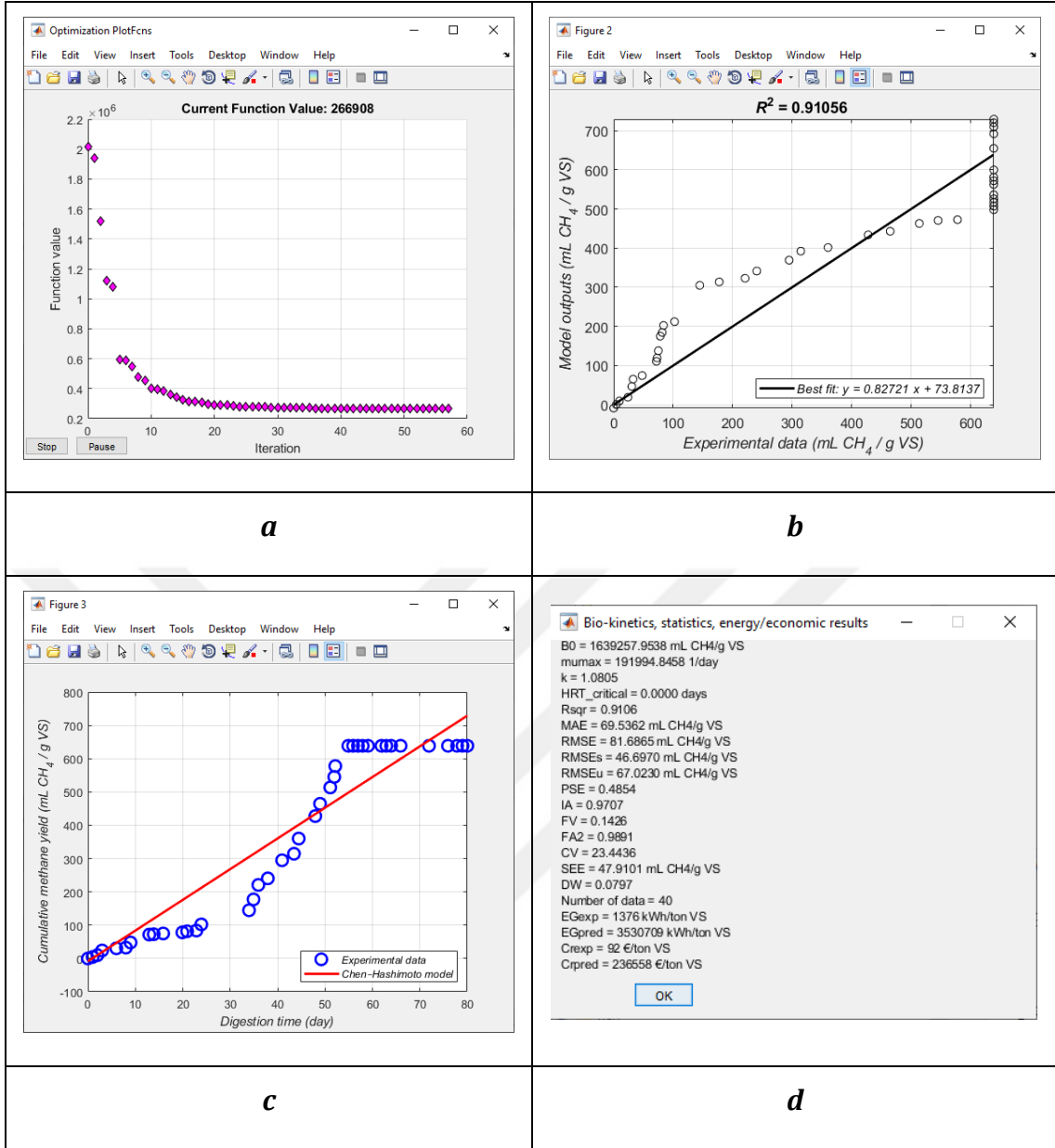
**Şekil 5.73** Tavuk gübresi atıksuyuna ait deneysel verilere göre “Birinci Dereceden Fonksiyon (BDF)” ve “Nelder-Mead simpleks doğrudan arama algoritması (N-M SDSA)” çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları



**Şekil 5.74** Tavuk gübresi atıksuyuna ait deneysel verilere göre “Birinci Dereceden Fonksiyon (BDF)” ve “BFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno) Quasi-Newton (Q-N) kübik doğrultu belirleme algoritması (BFGS Q-N CLSA)” çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları

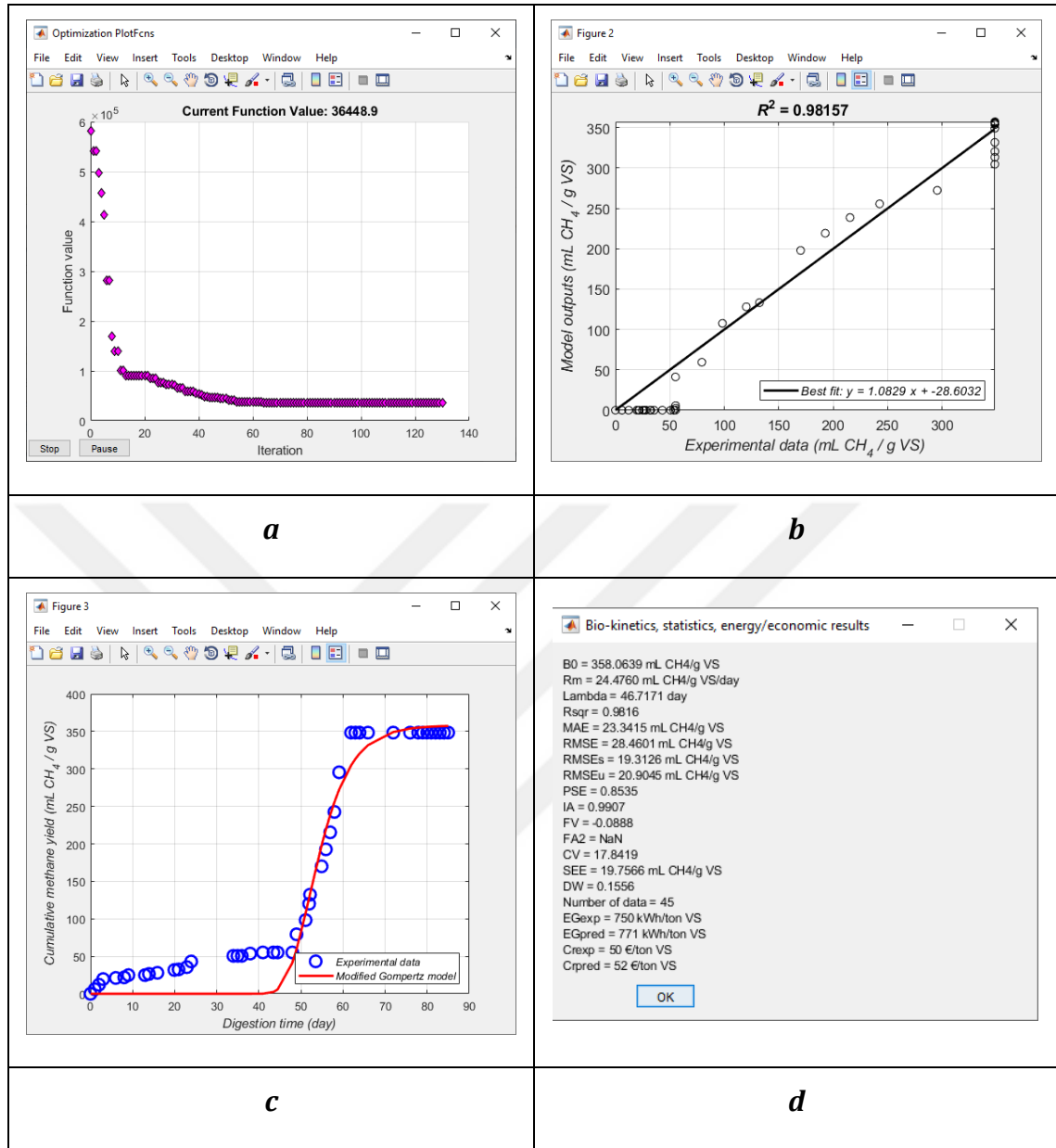


**Şekil 5.75** Tavuk gübresi atıksuyuna ait deneysel verilere göre “Chen-Hashimoto Modeli (CHM)” ve “Nelder-Mead simpleks doğrudan arama algoritması (N-M SDSA)” çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları

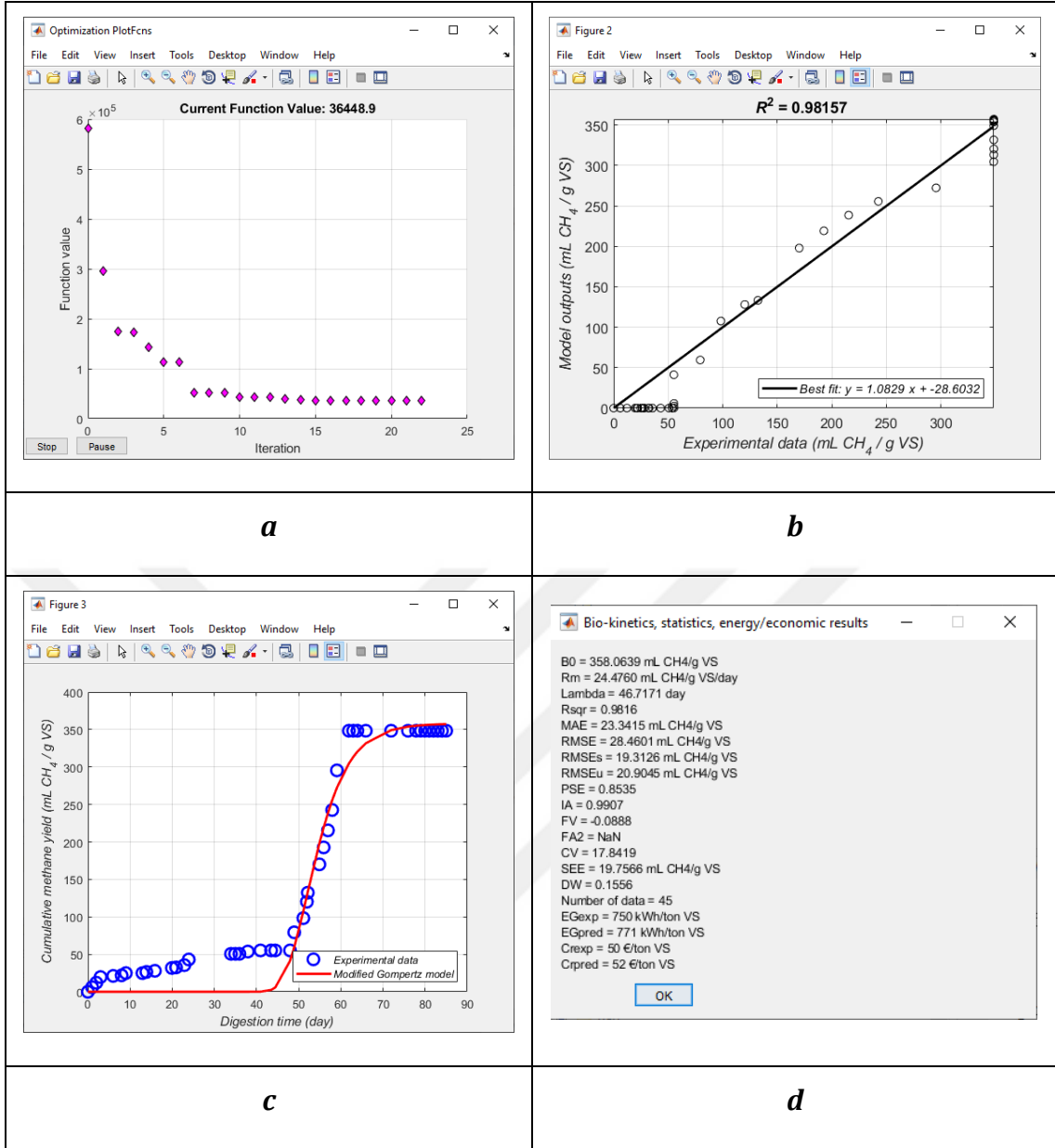


**Şekil 5.76** Tavuk gübresi atıksuyuna ait deneysel verilere göre “Chen-Hashimoto Modeli (CHM)” ve “BFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno) Quasi-Newton (Q-N) kübik doğrultu belirleme algoritması (BFGS Q-N CLSA)” çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları

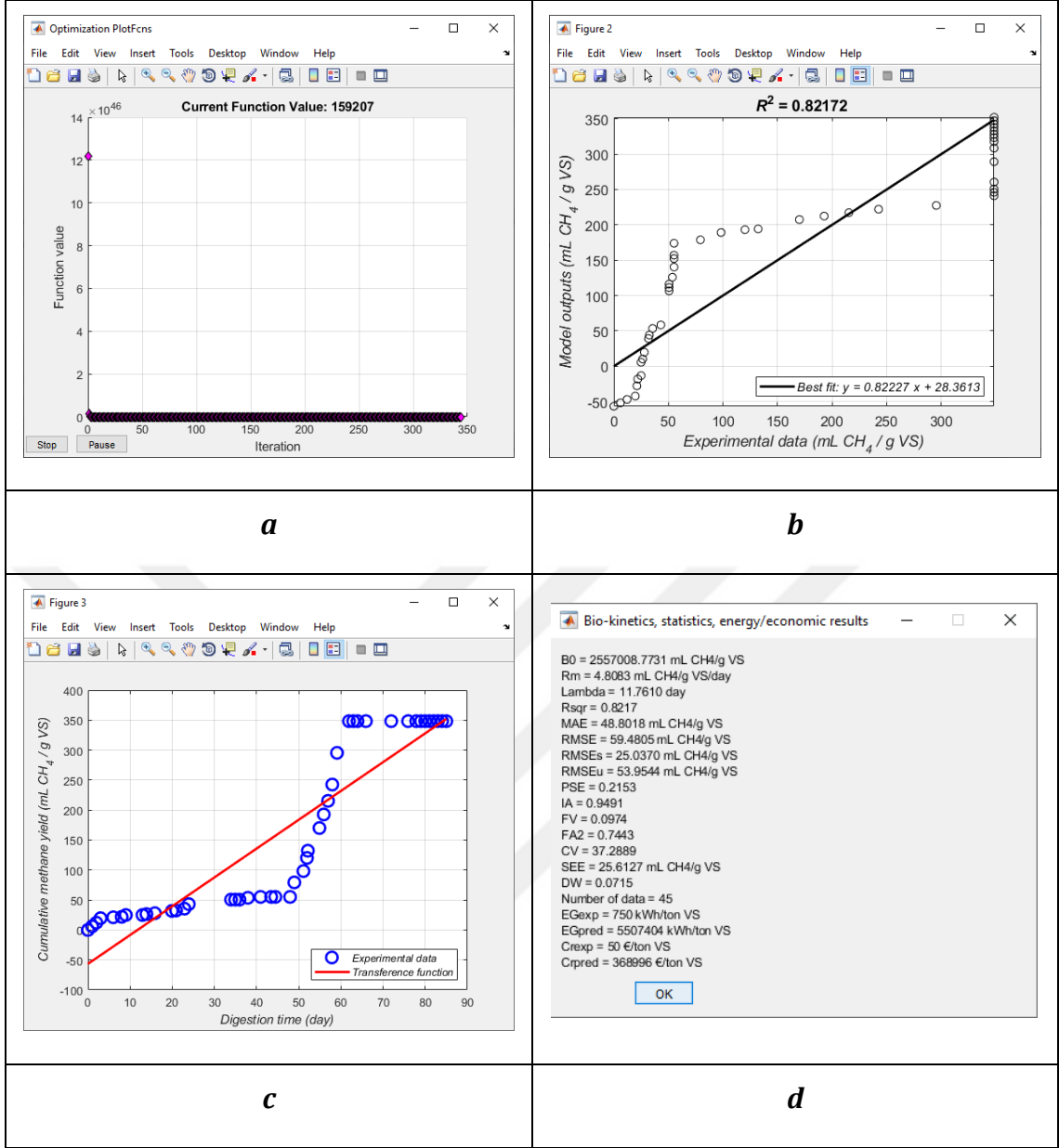
### 5.4.6 Bisküvi Atıksuyu



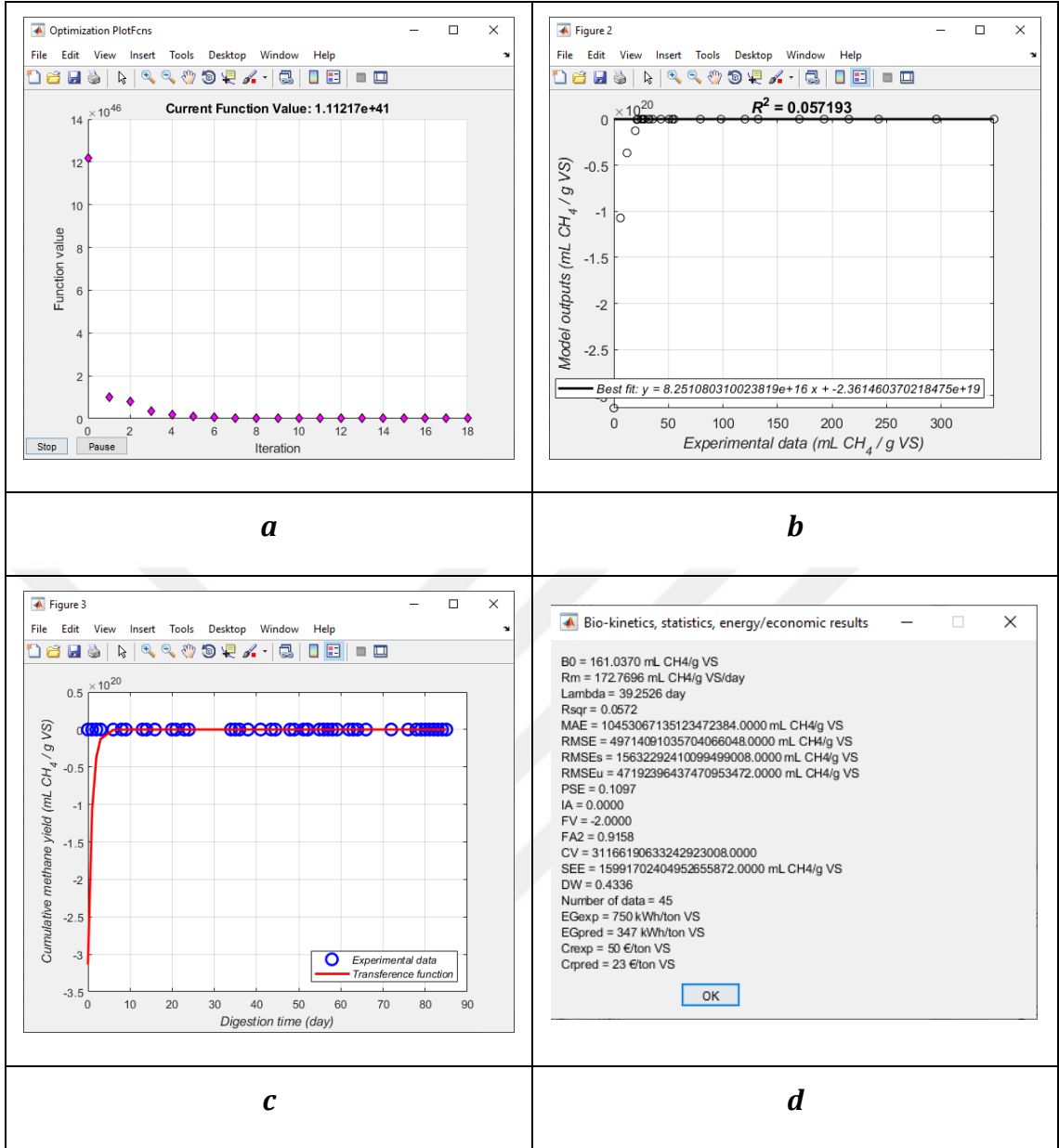
**Şekil 5.77** Bisküvi atıksuyuna ait deneysel verilere göre “Modifiye Gompertz Modeli (MGM)” ve “Nelder-Mead simpleks doğrudan arama algoritması (N-M SDSA)” çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları



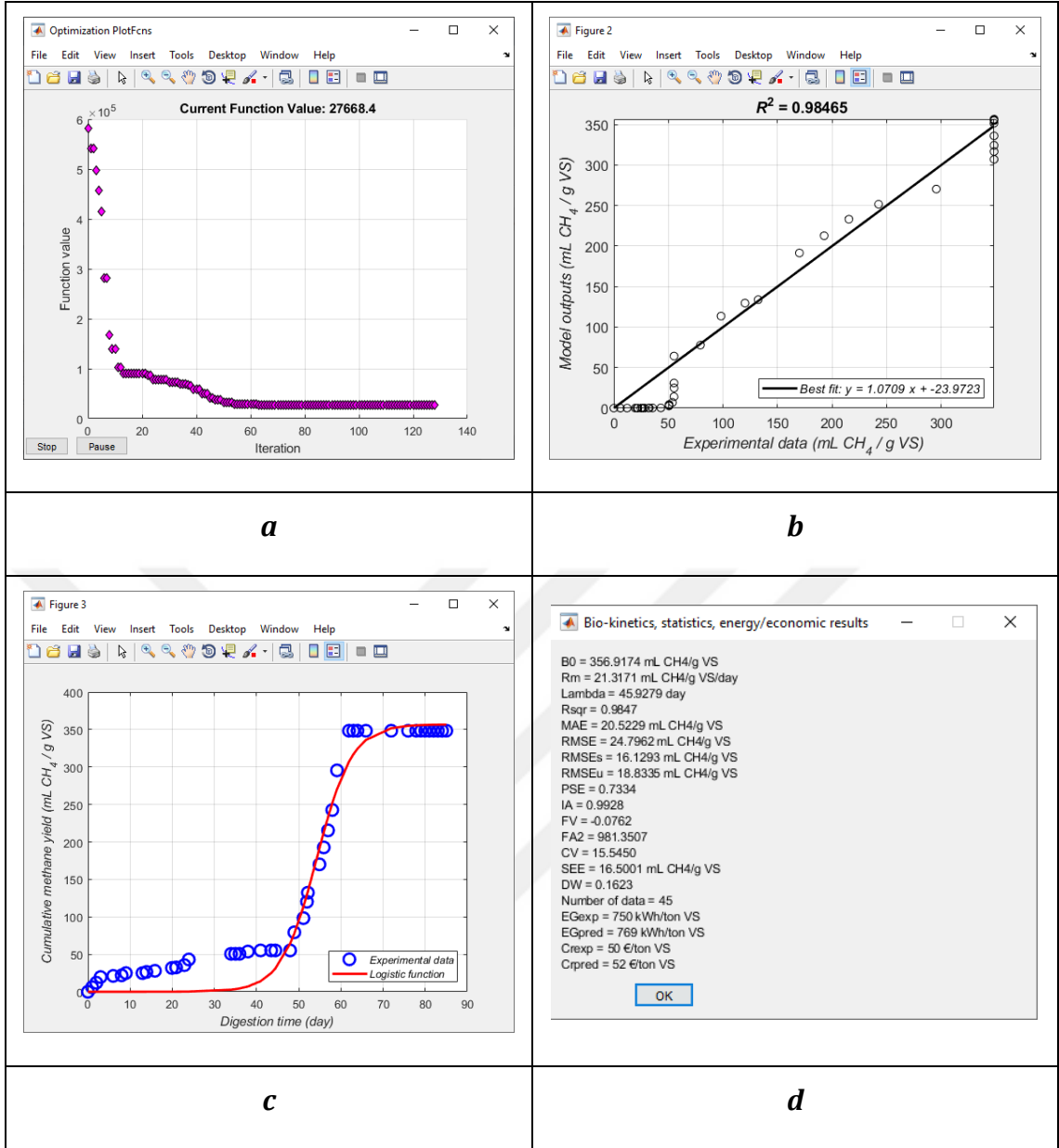
**Şekil 5.78** Bisküvi atıksuyuna ait deneysel verilere göre “Modifiye Gompertz Modeli (MGM)” ve “BFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno) Quasi-Newton (Q-N) kübik doğrultu belirleme algoritması (BFGS Q-N CLSA)” çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları



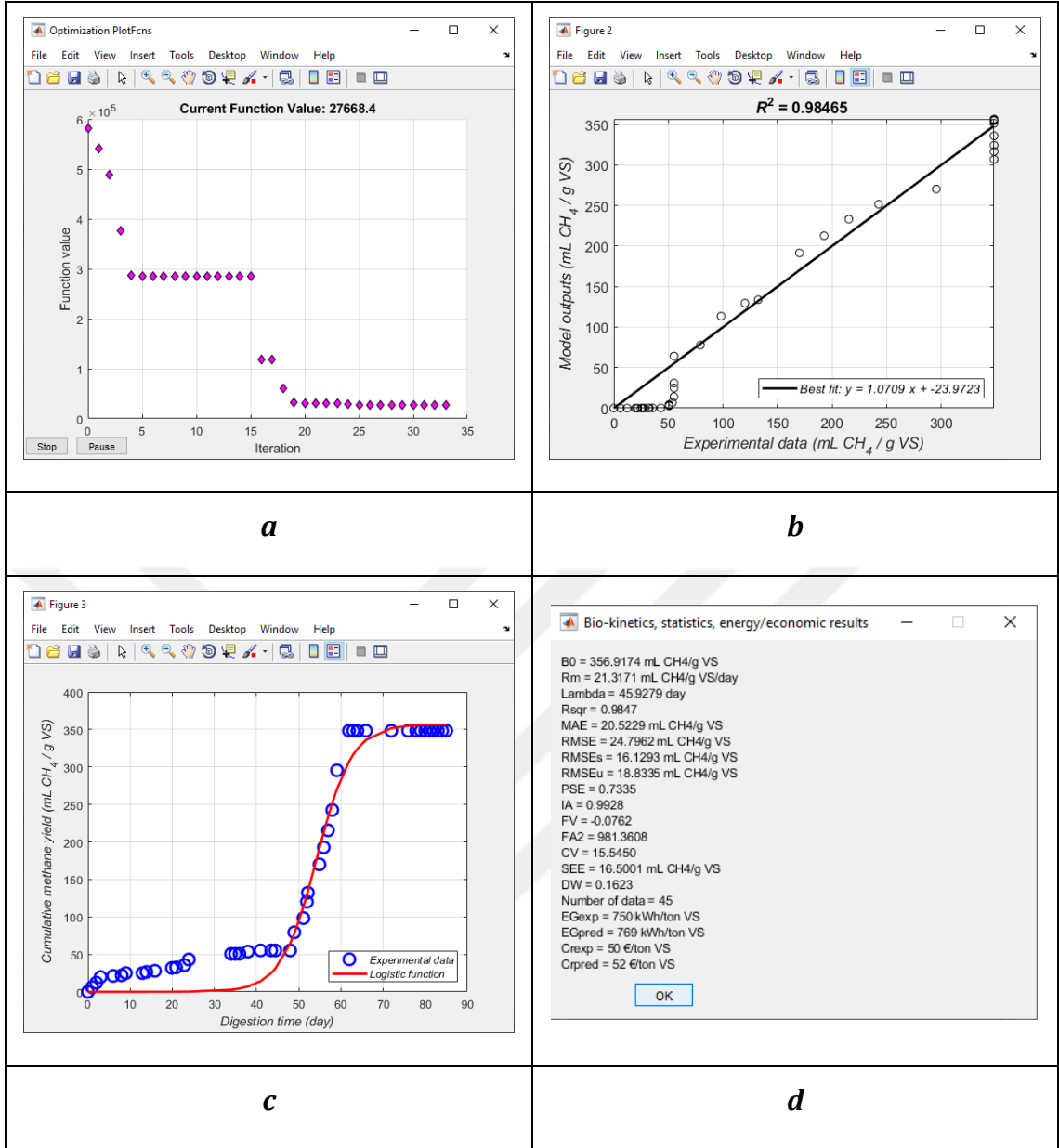
**Şekil 5.79** Bisküvi atıksuyuna ait deneysel verilere göre “Transfer Fonksiyonu (TF)” ve “Nelder-Mead simpleks doğrudan arama algoritması (N-M SDSA)” çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları



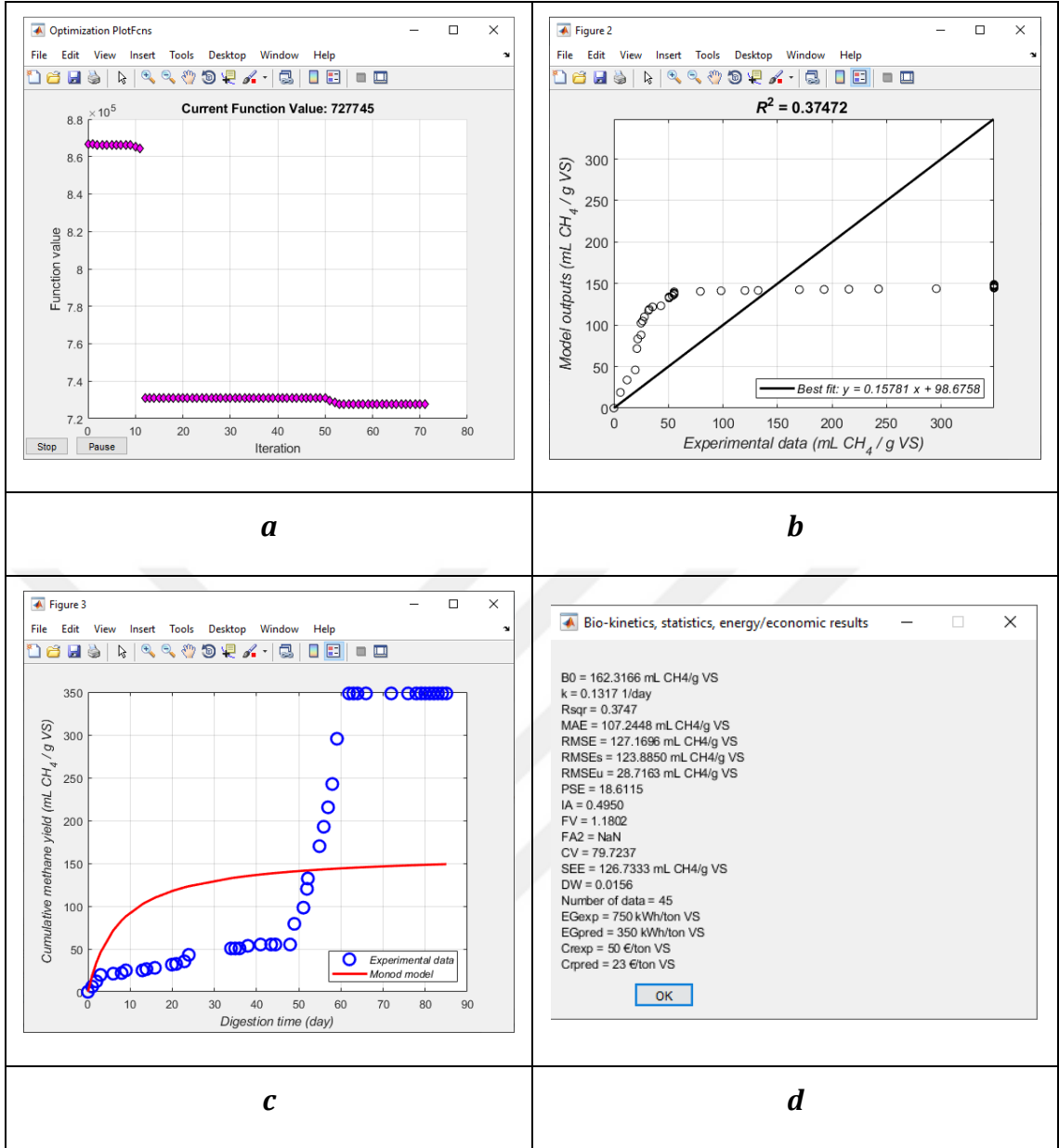
**Şekil 5.80** Bisküvi atıksuyuna ait deneysel verilere göre “Transfer Fonksiyonu (TF)” ve “BFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno) Quasi-Newton (Q-N) kübik doğrultu belirleme algoritması (BFGS Q-N CLSA)” çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları



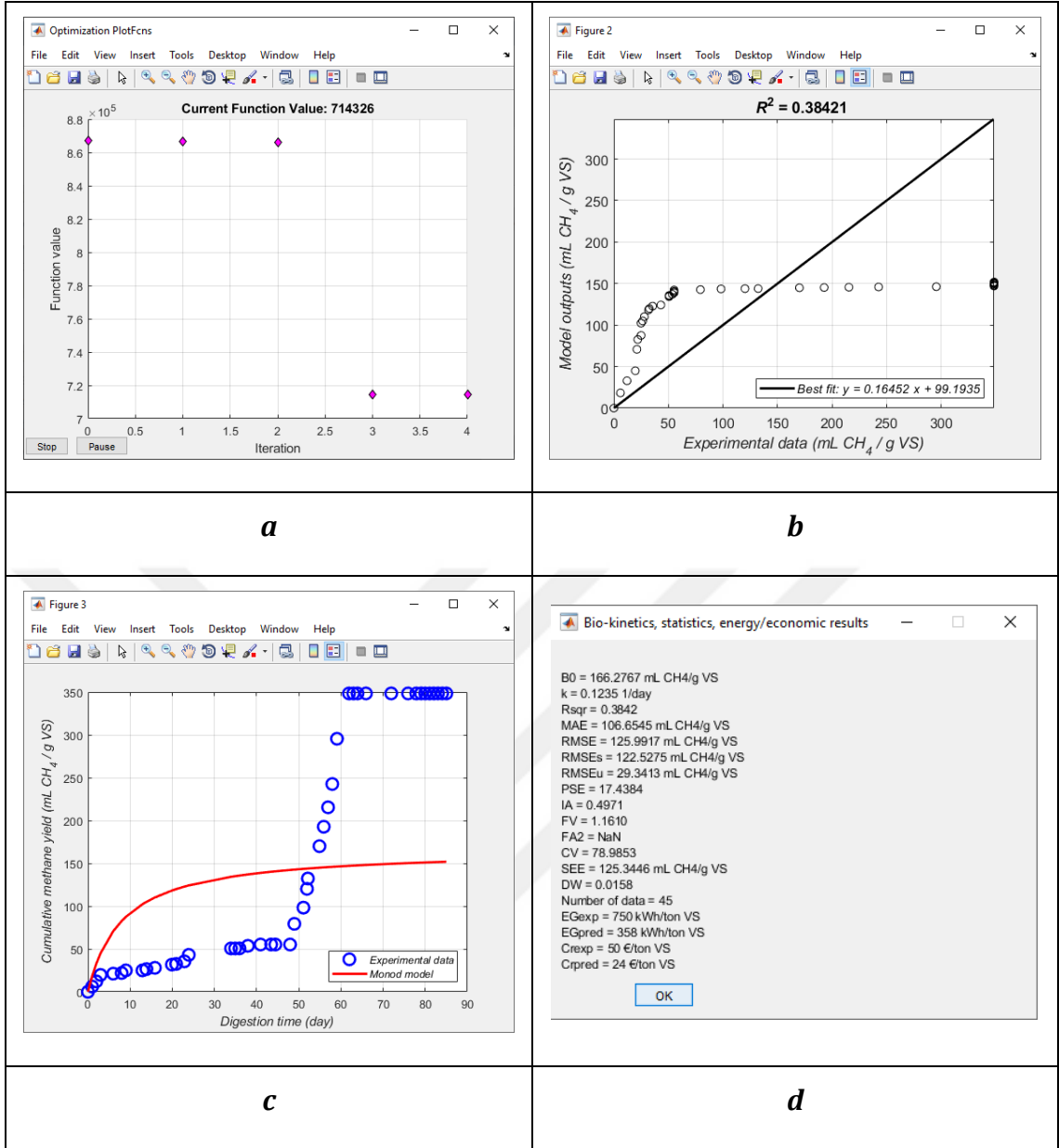
**Şekil 5.81** Bisküvi atıksuyuna ait deneysel verilere göre “Lojistik Fonksiyon (LF)” ve “Nelder-Mead simpleks doğrudan arama algoritması (N-M SDSA)” çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları



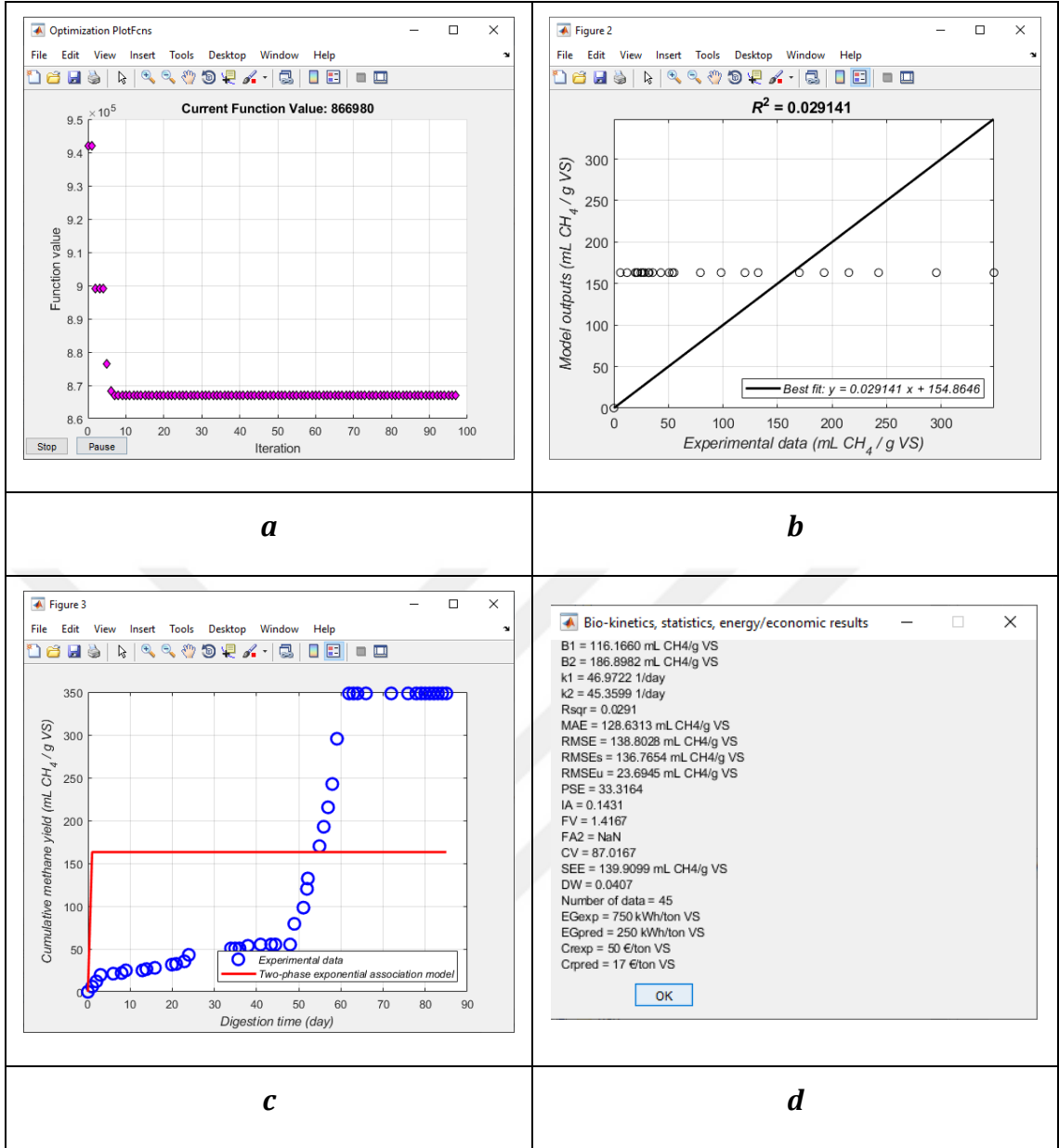
**Şekil 5.82** Bisküvi atıksuyuna ait deneysel verilere göre “Lojistik Fonksiyon (LF)” ve “BFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno) Quasi-Newton (Q-N) kübik doğruyu belirleme algoritması (BFGS Q-N CLSA)” çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları



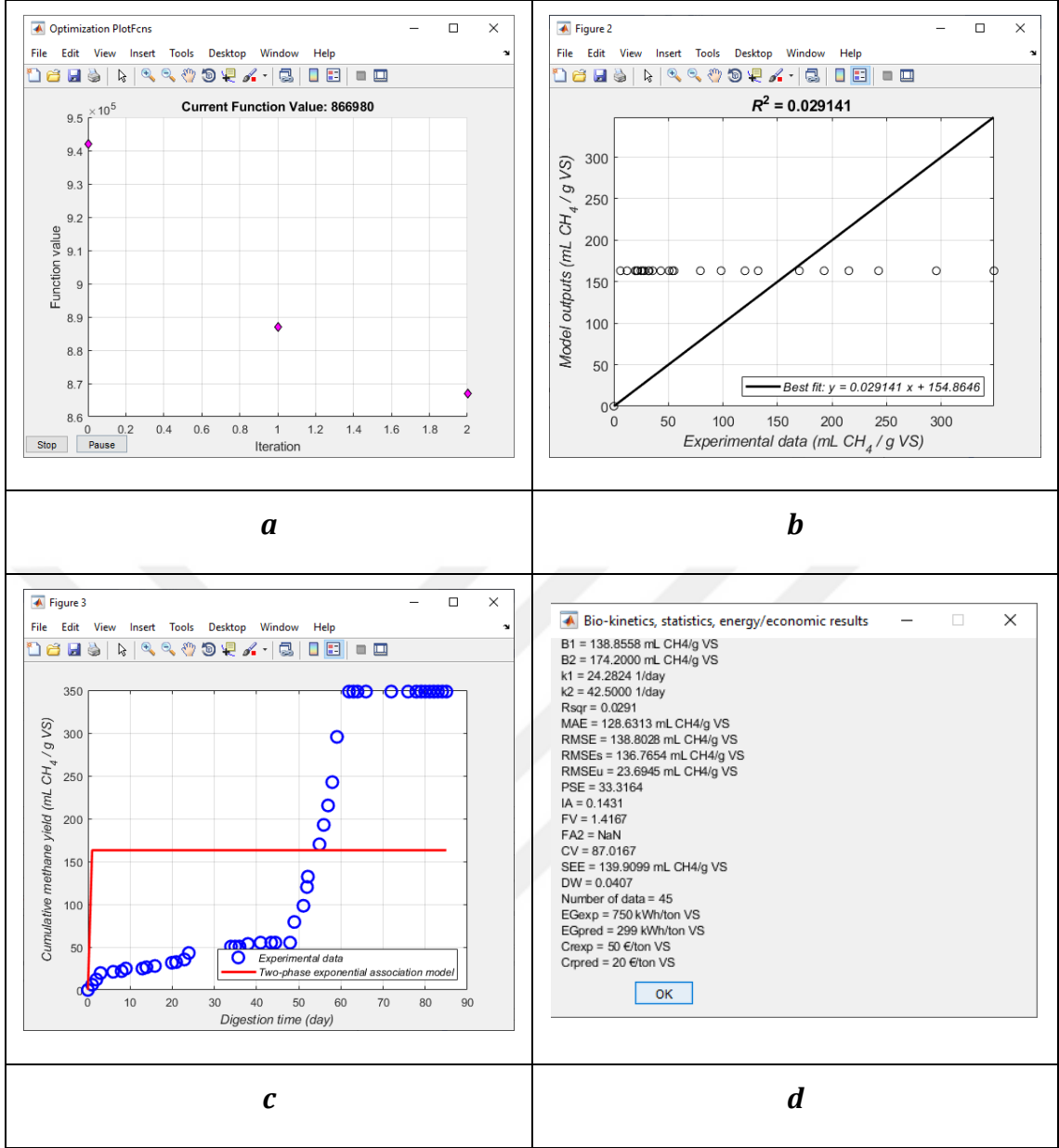
**Şekil 5.83** Bisküvi atıksuyuna ait deneysel verilere göre “Monod Tipi Model (MTM)” ve “Nelder-Mead simpleks doğrudan arama algoritması (N-M SDSA)” çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları



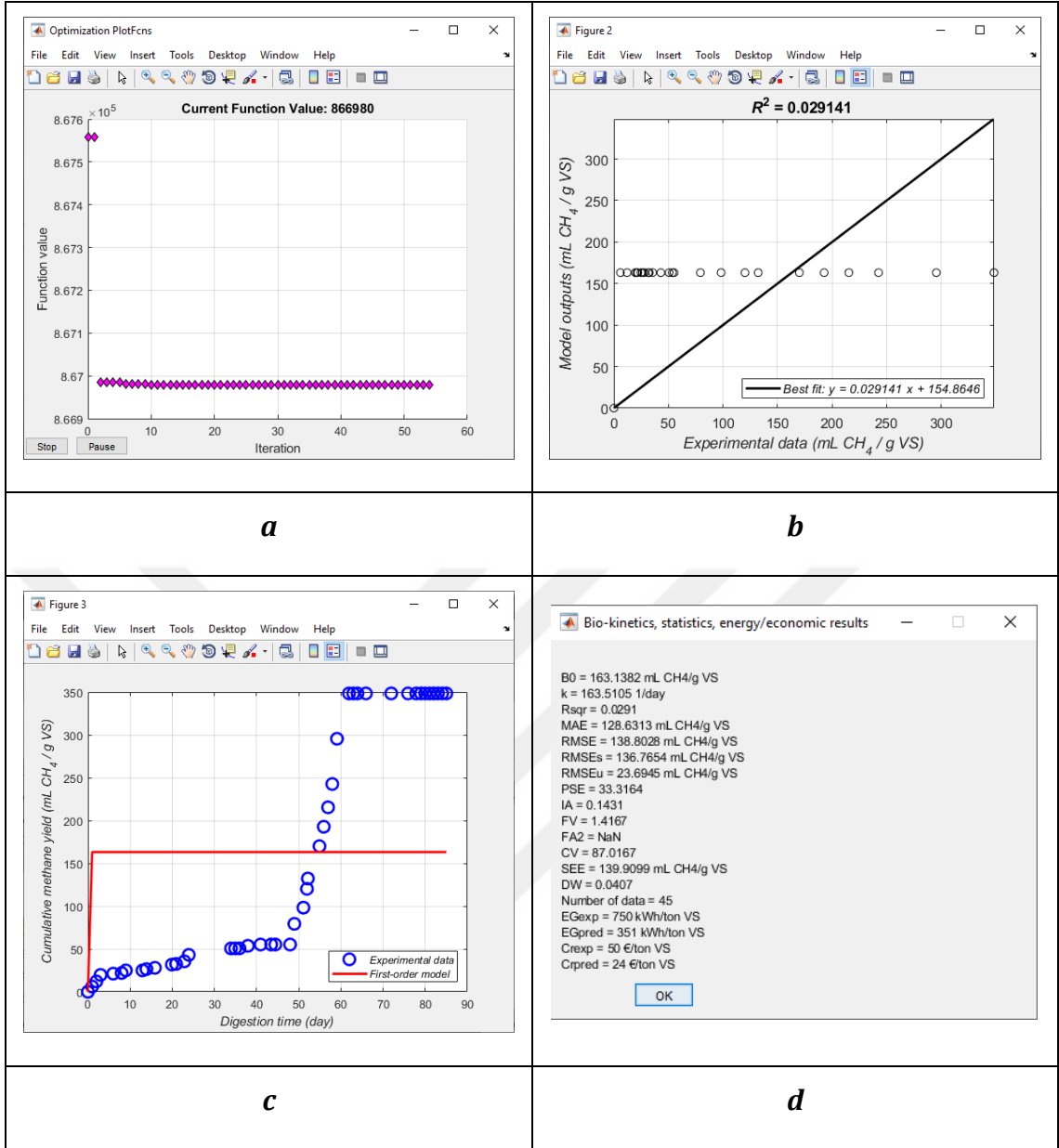
**Şekil 5.84** Bisküvi atıksuyuna ait deneysel verilere göre “Monod Tipi Model (MTM)” ve “BFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno) Quasi-Newton (Q-N) kübik doğrultu belirleme algoritması (BFGS Q-N CLSA)” çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları



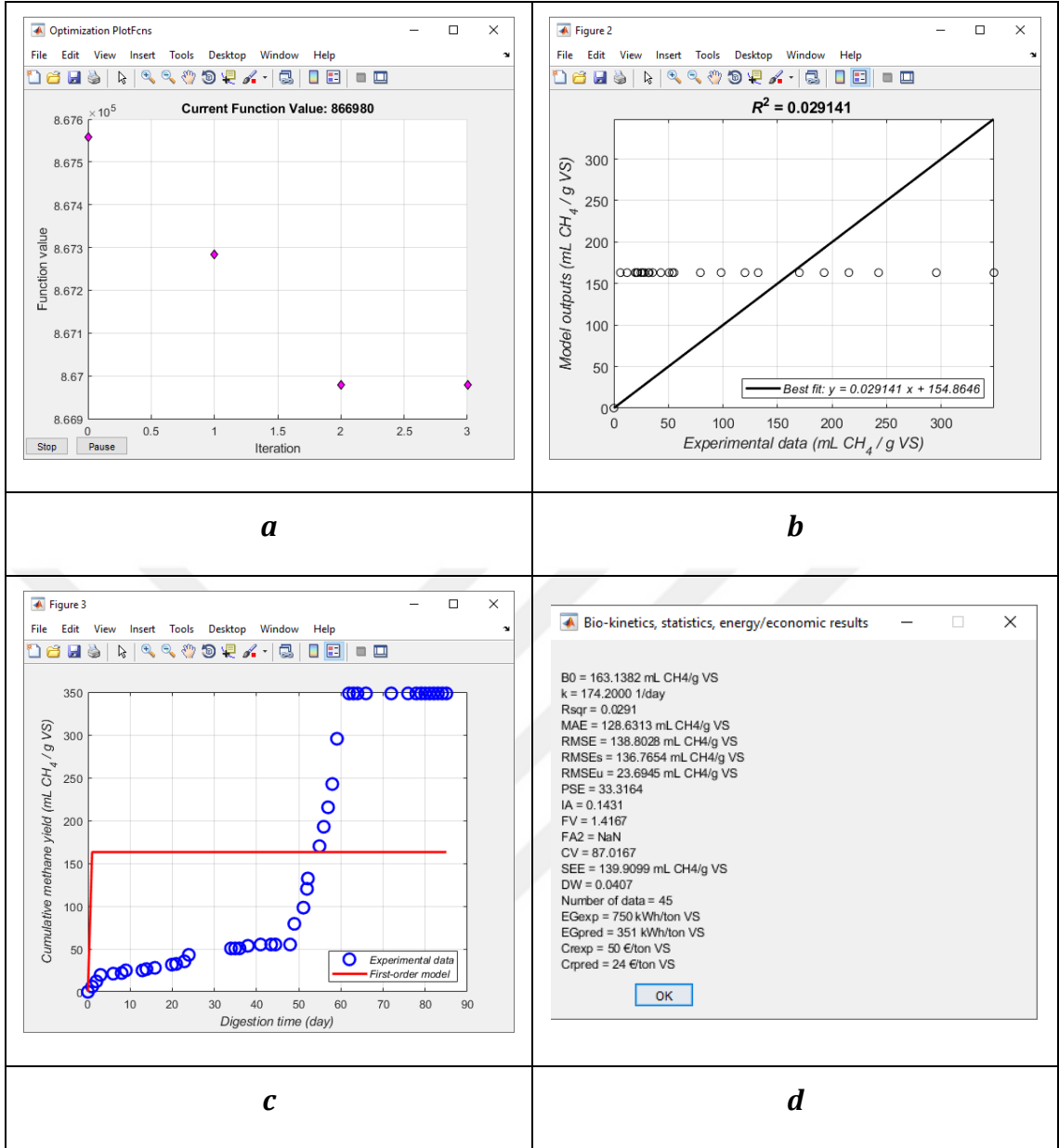
**Şekil 5.85** Bisküvi atıksuyuna ait deneysel verilere göre “İki Fazlı Üstel İlişki Modeli (İFÜİM)” ve “Nelder-Mead simpleks doğrudan arama algoritması (N-M SDSA)” çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları



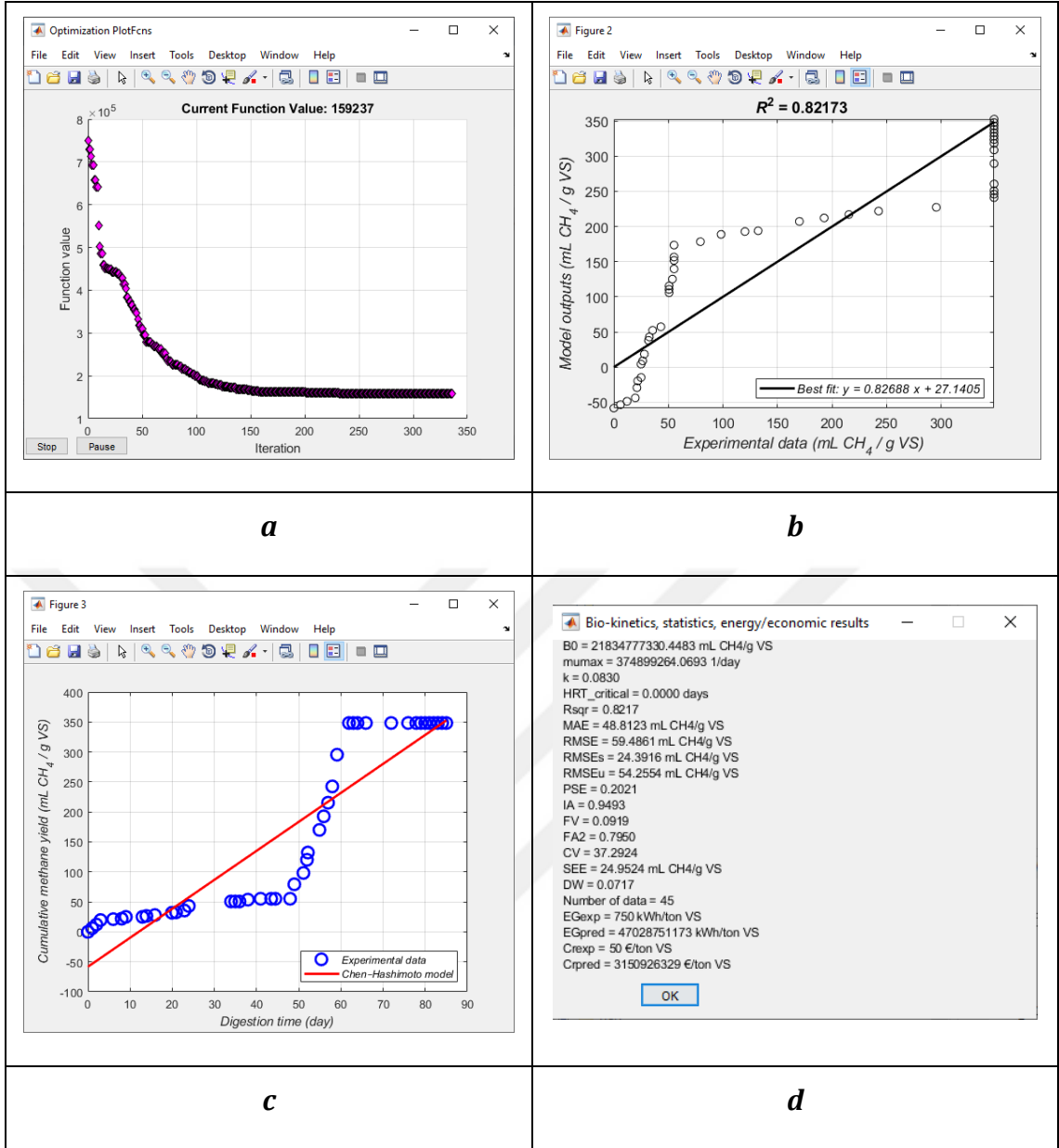
**Şekil 5.86** Bisküvi atıksuyuna ait deneysel verilere göre “İki Fazlı Üstel İlişki Modeli (İFÜİM)” ve “BFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno) Quasi-Newton (Q-N) kübik doğrultu belirleme algoritması (BFGS Q-N CLSA)” çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları



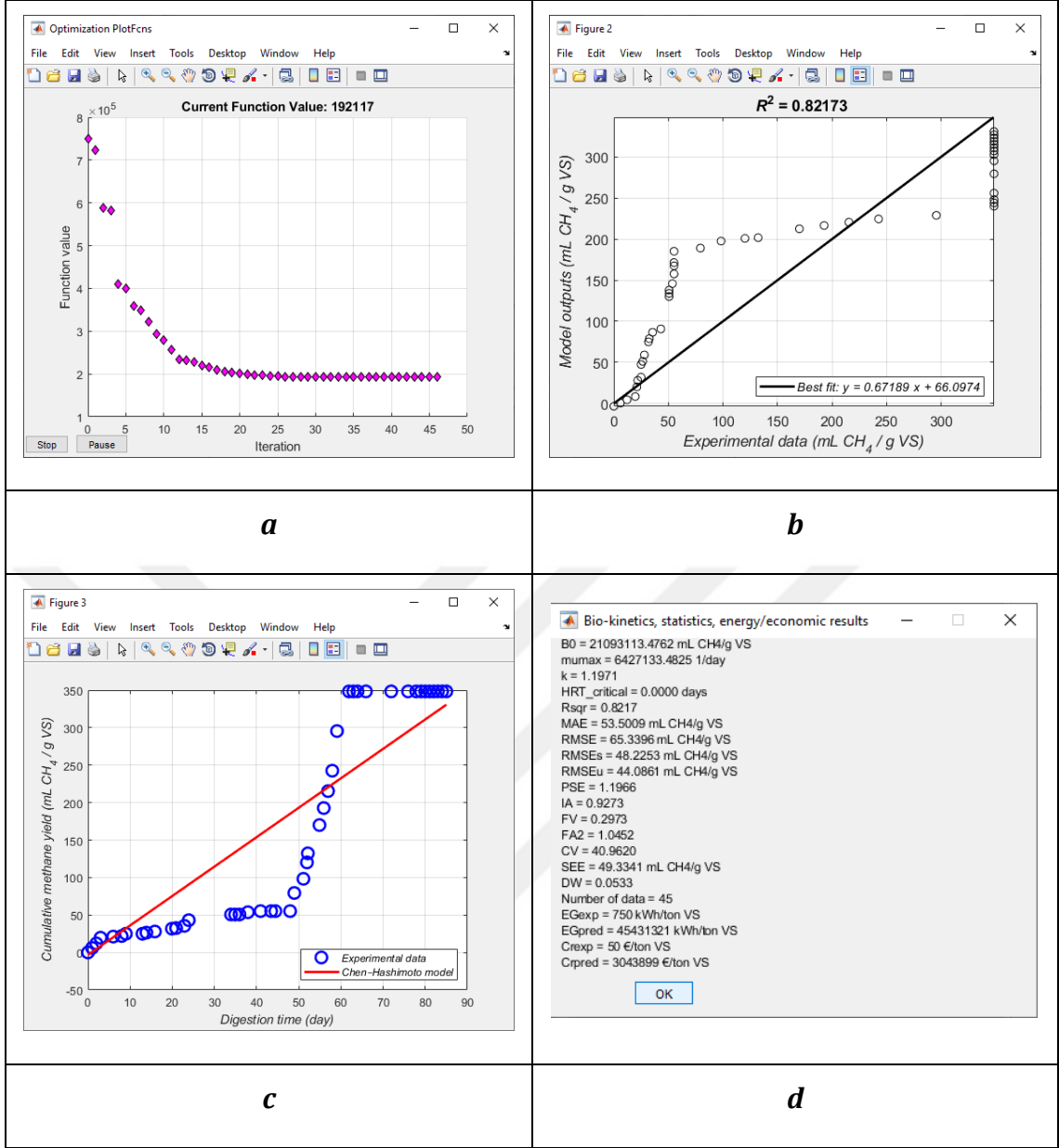
**Şekil 5.87** Bisküvi atıksuyuna ait deneysel verilere göre “Birinci Dereceden Fonksiyon (BDF)” ve “Nelder-Mead simpleks doğrudan arama algoritması (N-M SDSA)” çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları



**Şekil 5.88** Bisküvi atıksuyuna ait deneysel verilere göre “Birinci Dereceden Fonksiyon (BDF)” ve “BFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno) Quasi-Newton (Q-N) kübik doğrultu belirleme algoritması (BFGS Q-N CLSA)” çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları

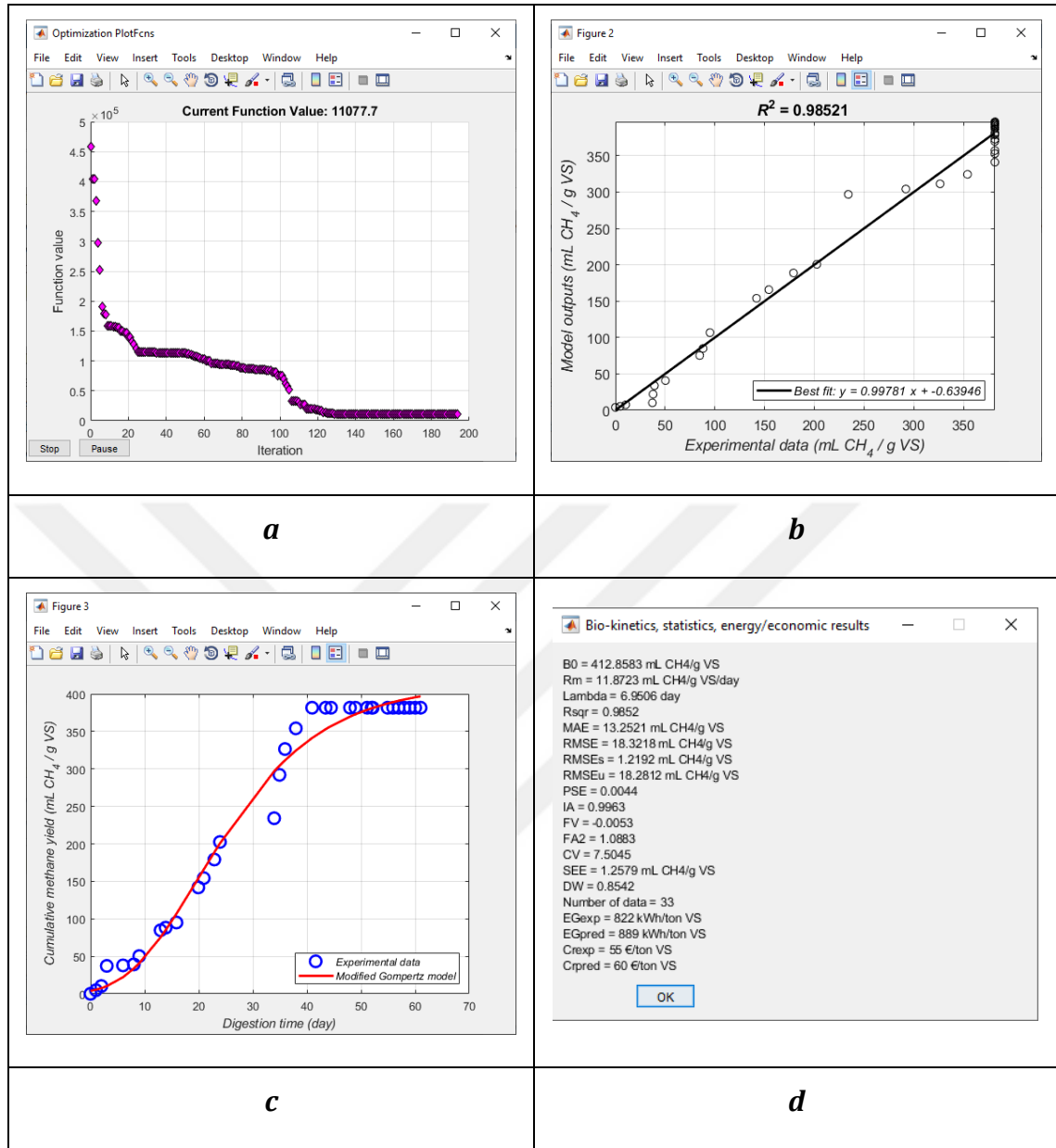


**Şekil 5.89** Bisküvi atıksuyuna ait deneysel verilere göre “Chen-Hashimoto Modeli (CHM)” ve “Nelder-Mead simpleks doğrudan arama algoritması (N-M SDSA)” çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları

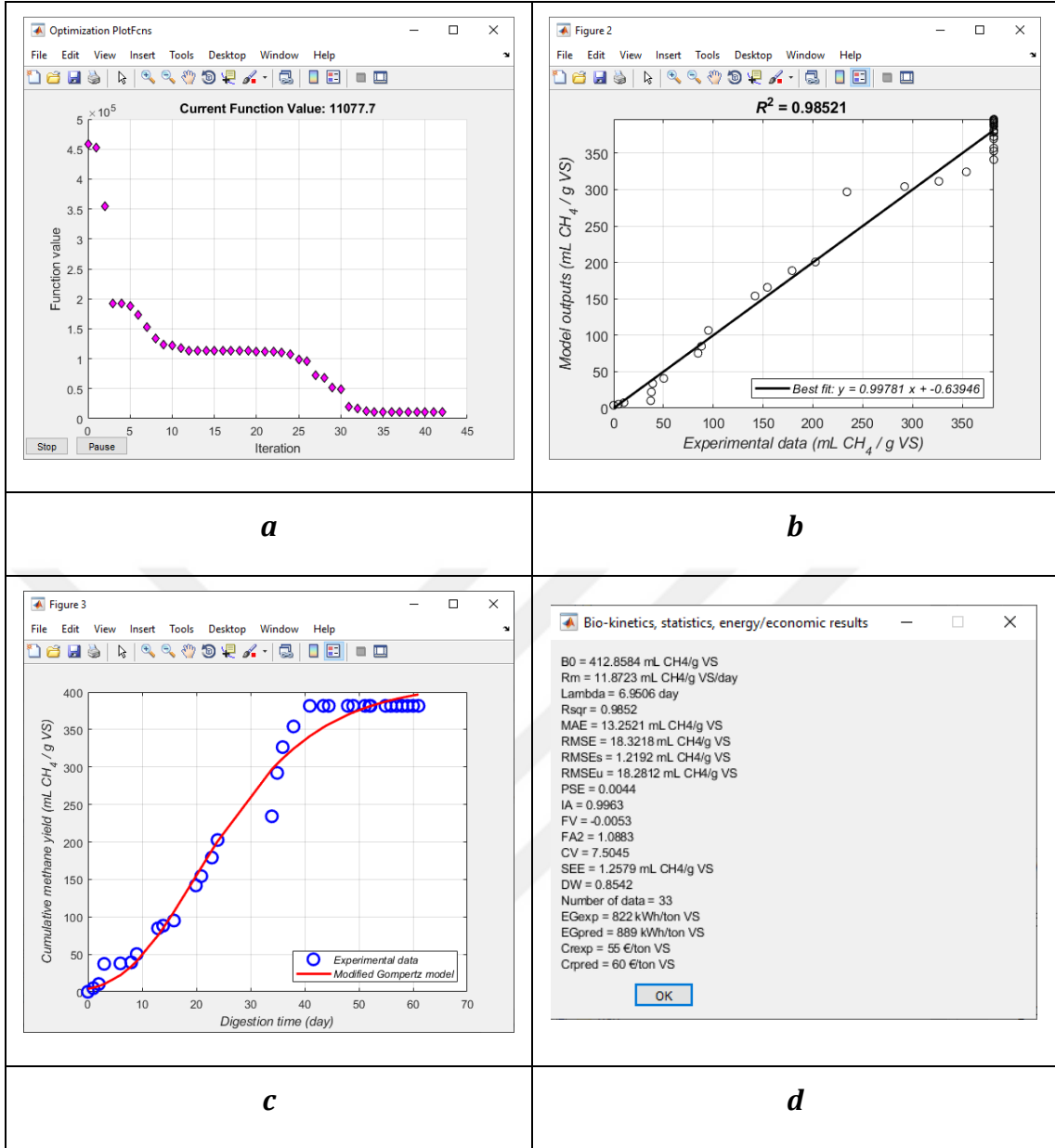


**Şekil 5.90** Bisküvi atıksuyuna ait deneysel verilere göre “Chen-Hashimoto Modeli (CHM)” ve “BFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno) Quasi-Newton (Q-N) kübik doğrultu belirleme algoritması (BFGS Q-N CLSA)” çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları

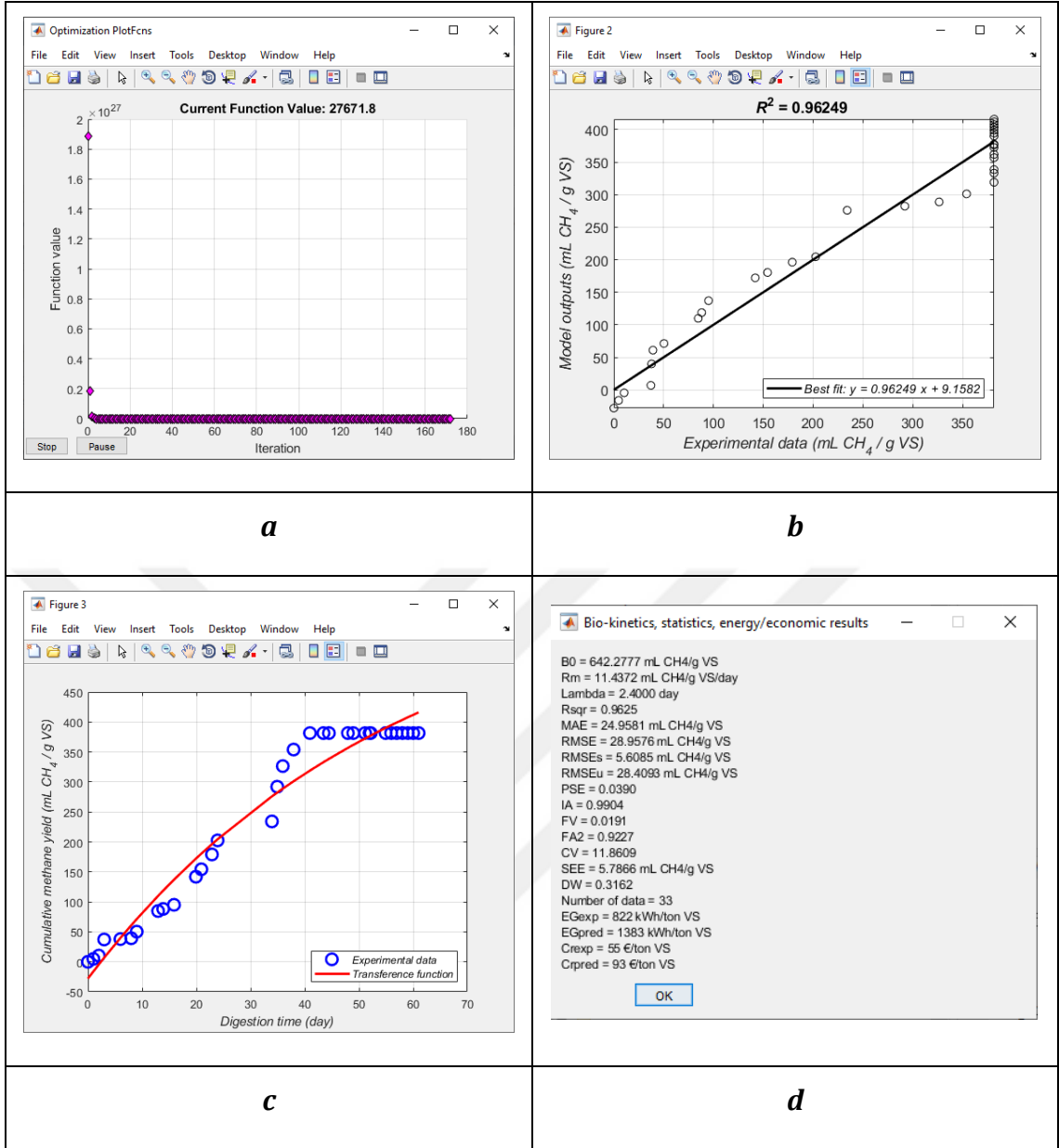
### 5.4.7 Sebze Atıksuyu



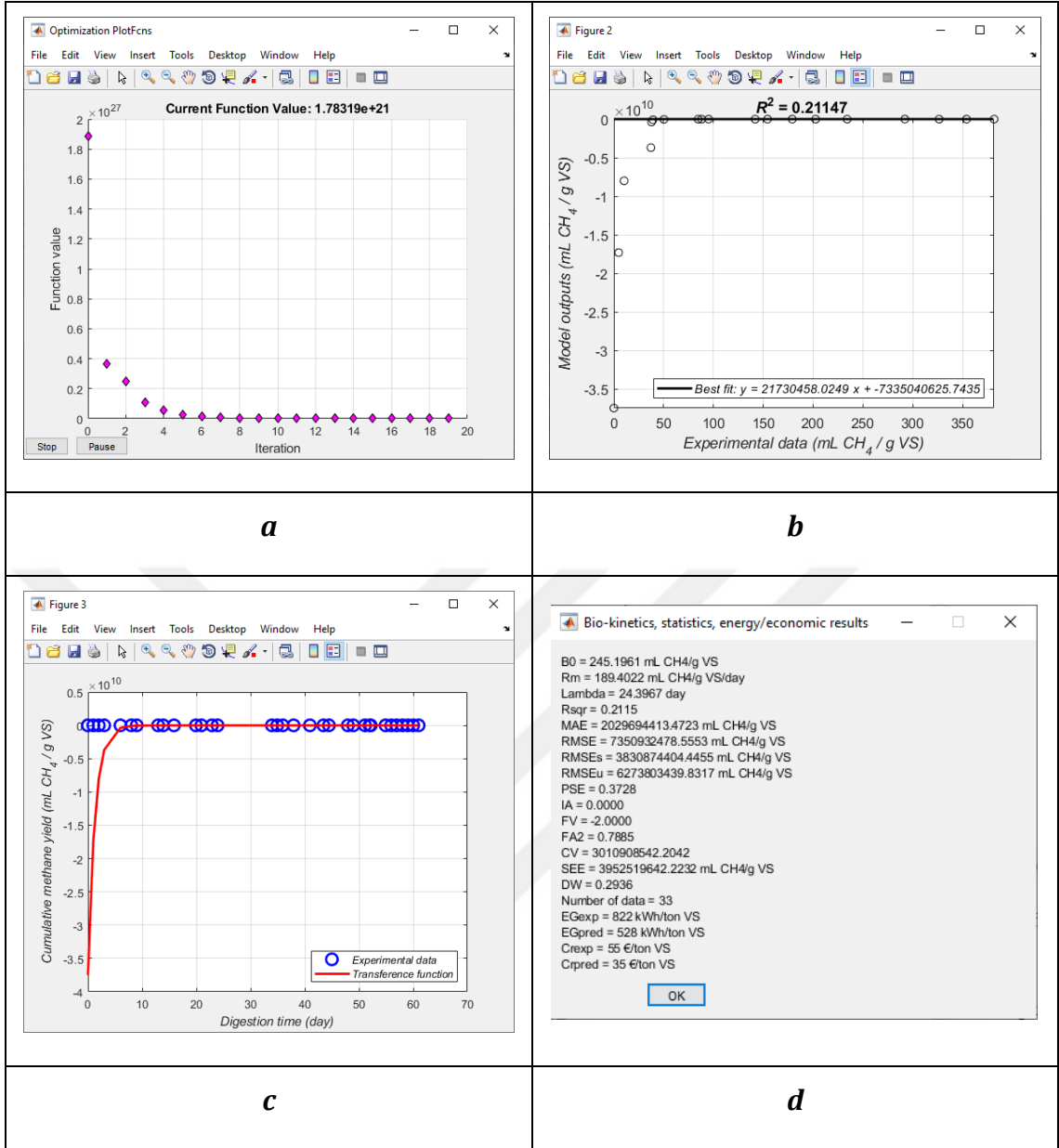
**Şekil 5.91** Sebze atıksuyuna ait deneysel verilere göre “Modifiye Gompertz Modeli (MGM)” ve “Nelder-Mead simpleks doğrudan arama algoritması (N-M SDSA)” çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları



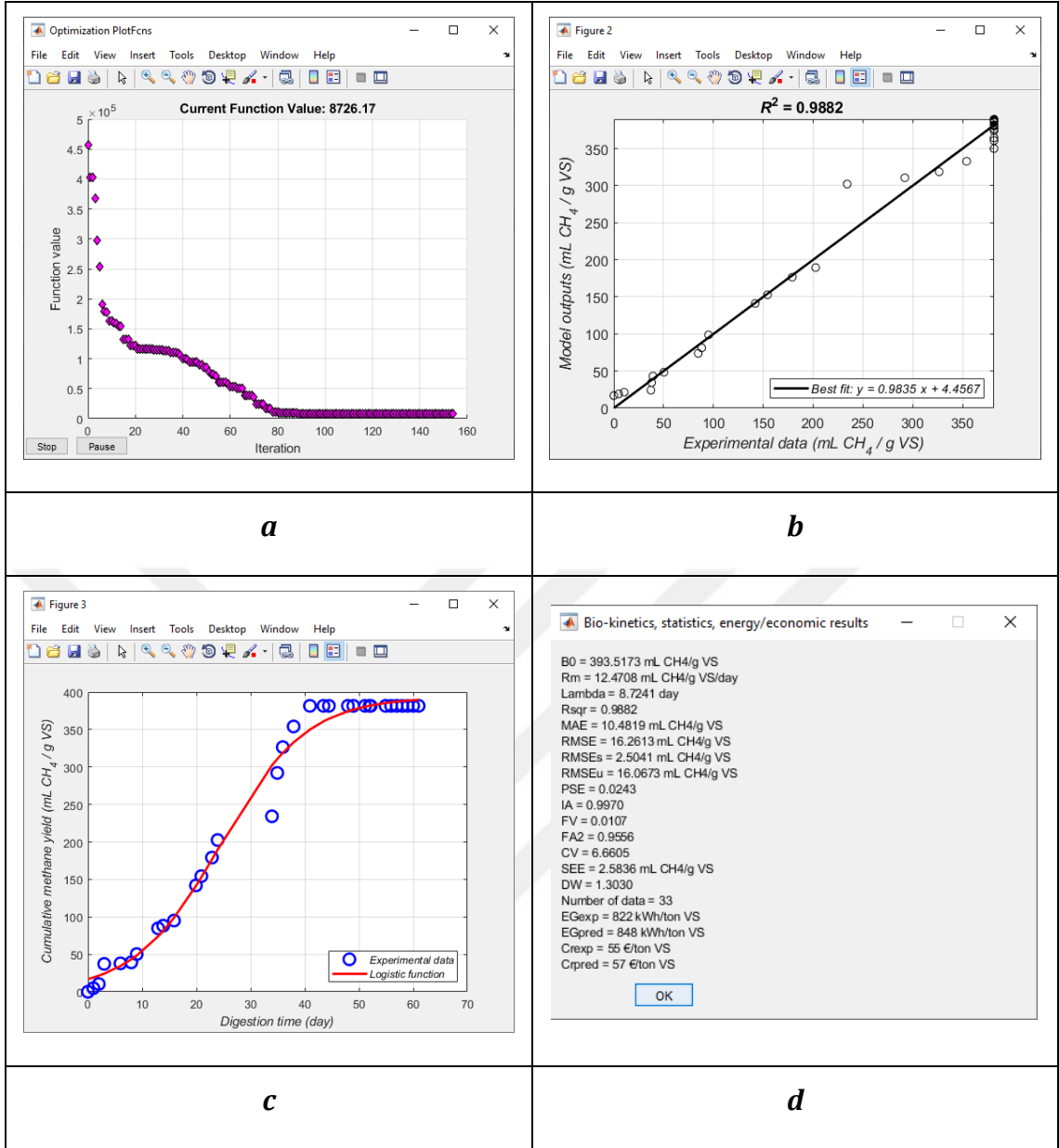
**Şekil 5.92** Sebze atıksuyuna ait deneysel verilere göre “Modifiye Gompertz Modeli (MGM)” ve “BFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno) Quasi-Newton (Q-N) kübik doğrultu belirleme algoritması (BFGS Q-N CLSA)” çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları



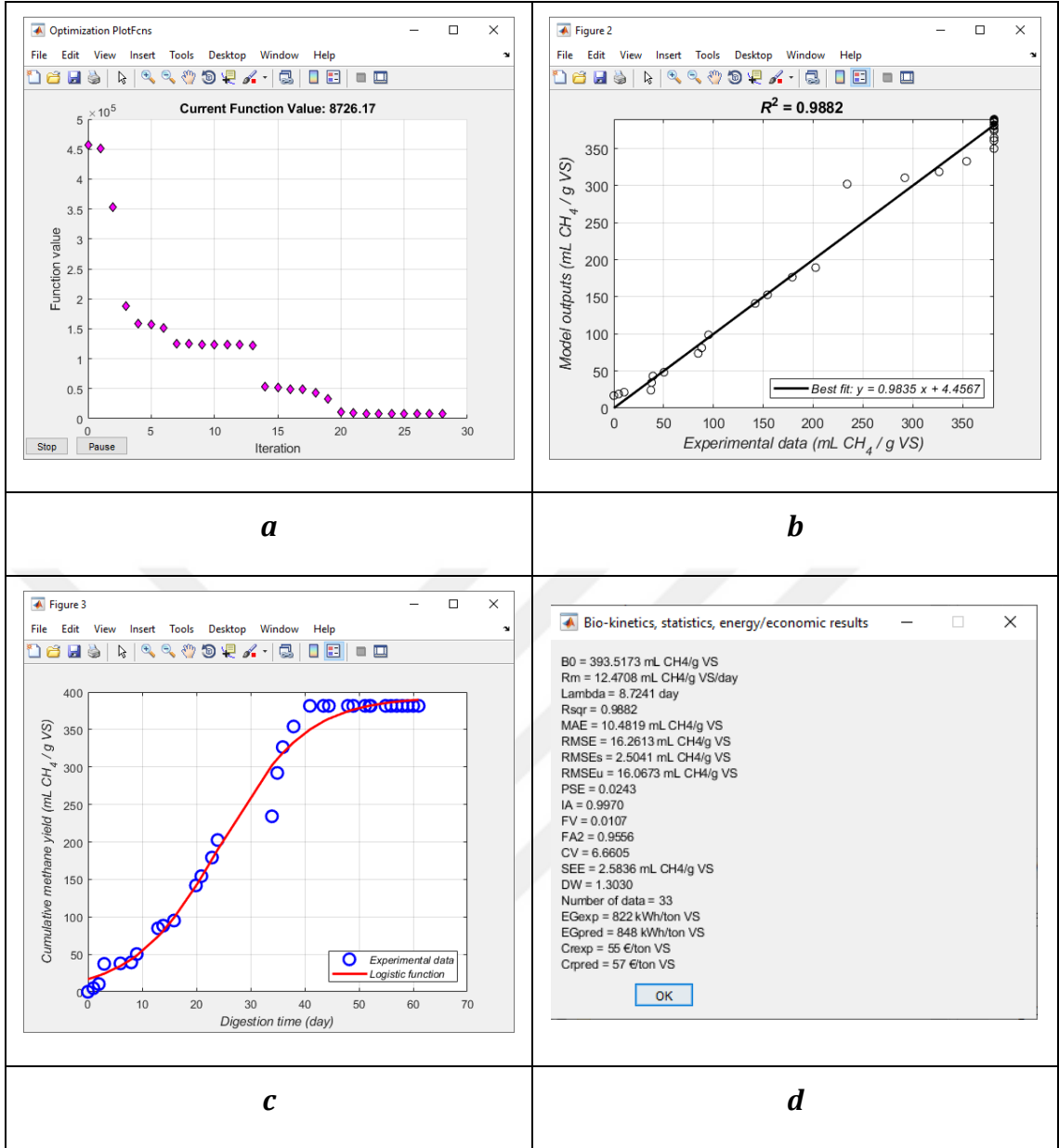
**Şekil 5.93** Sebze atıksuyuna ait deneysel verilere göre “Transfer Fonksiyonu (TF)” ve “Nelder-Mead simpleks doğrudan arama algoritması (N-M SDSA)” çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları



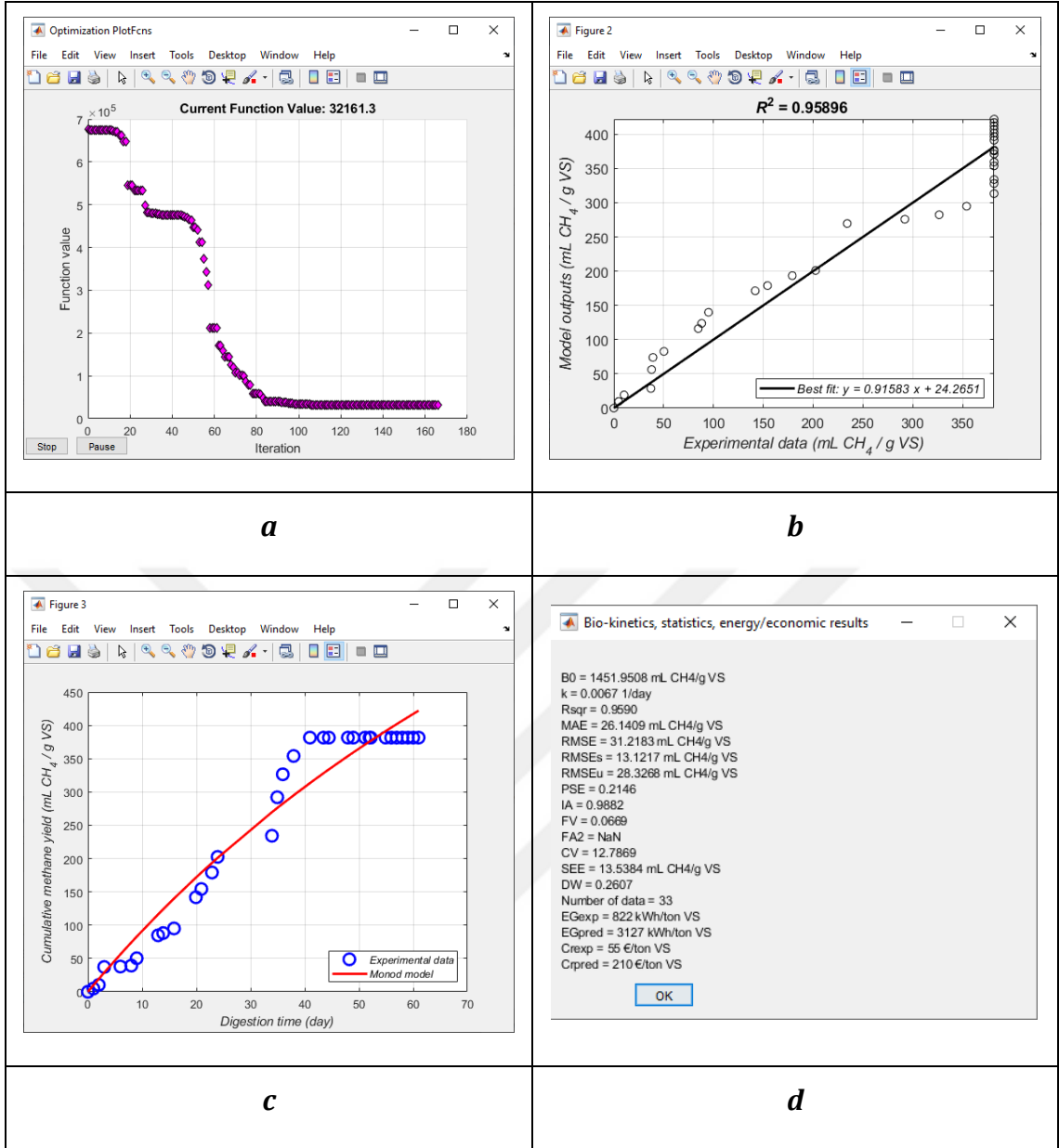
**Şekil 5.94** Sebze atıksuyuna ait deneysel verilere göre “Transfer Fonksiyonu (TF)” ve “BFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno) Quasi-Newton (Q-N) kübik doğruyu belirleme algoritması (BFGS Q-N CLSA)” çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları



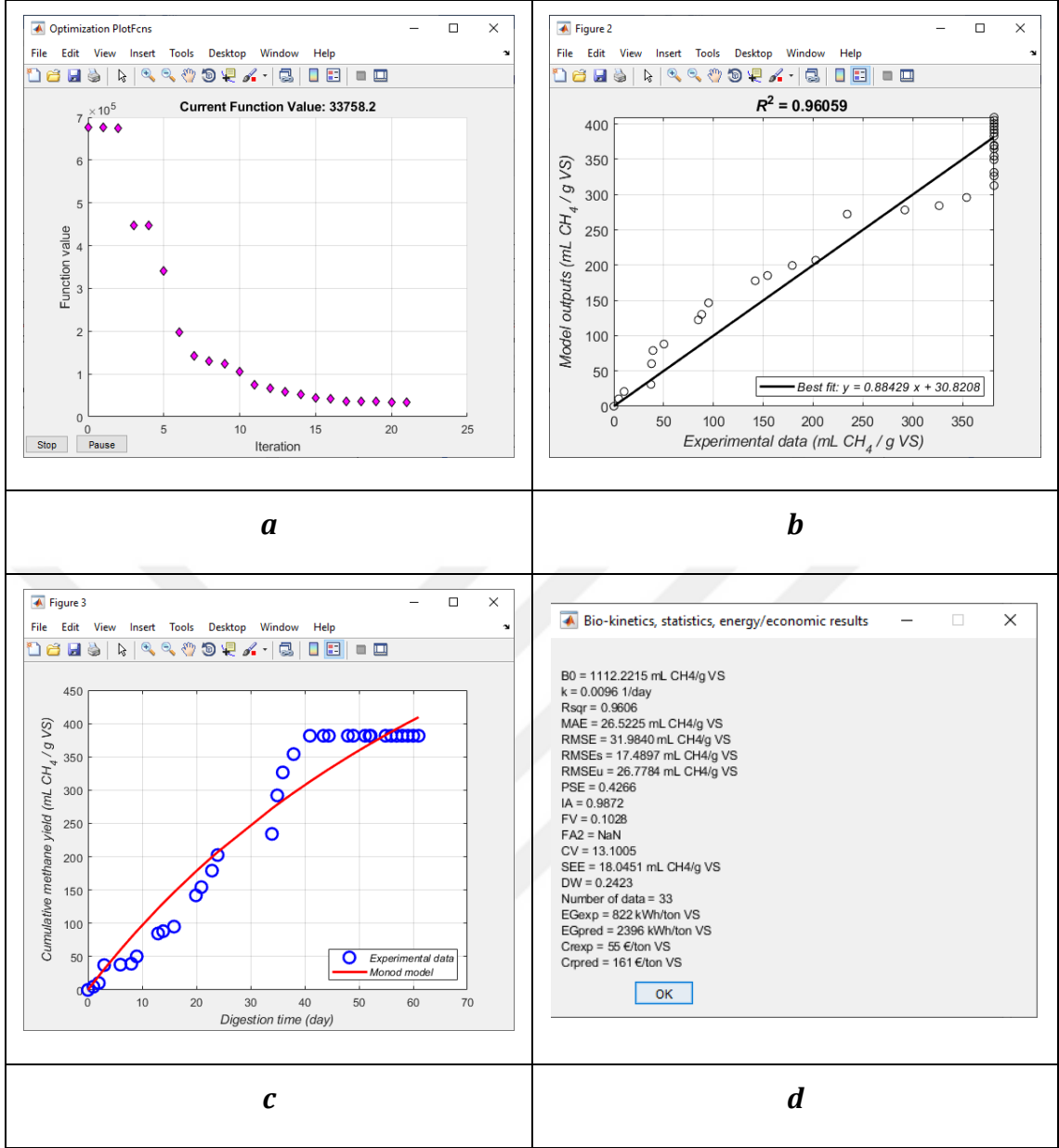
**Şekil 5.95** Sebze atıksuyuna ait deneysel verilere göre “Lojistik Fonksiyon (LF)” ve “Nelder-Mead simpleks doğrudan arama algoritması (N-M SDSA)” çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları



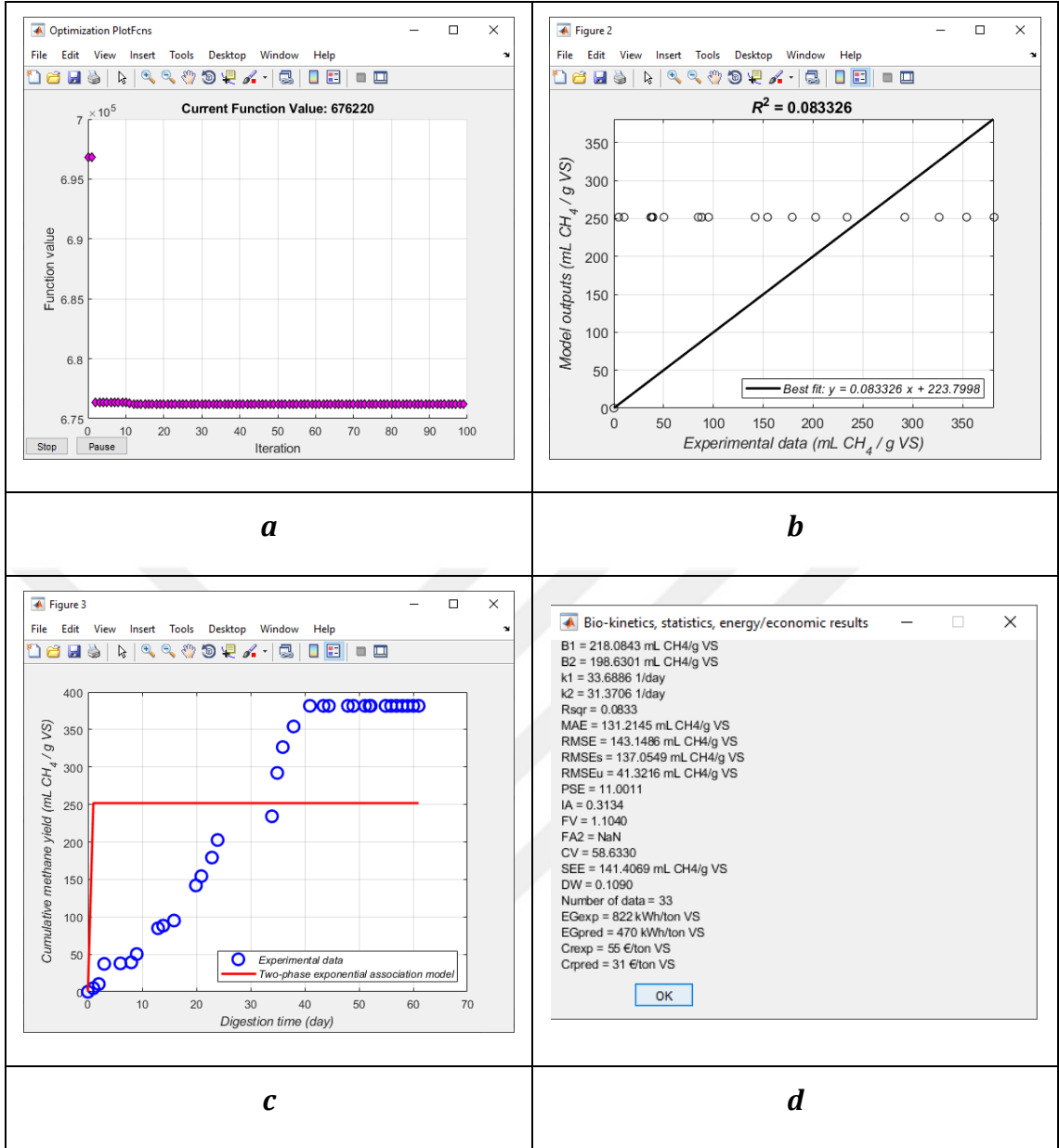
**Şekil 5.96** Sebze atıksuyuna ait deneysel verilere göre “Lojistik Fonksiyon (LF)” ve “BFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno) Quasi-Newton (Q-N) kübik doğrultu belirleme algoritması (BFGS Q-N CLSA)” çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları



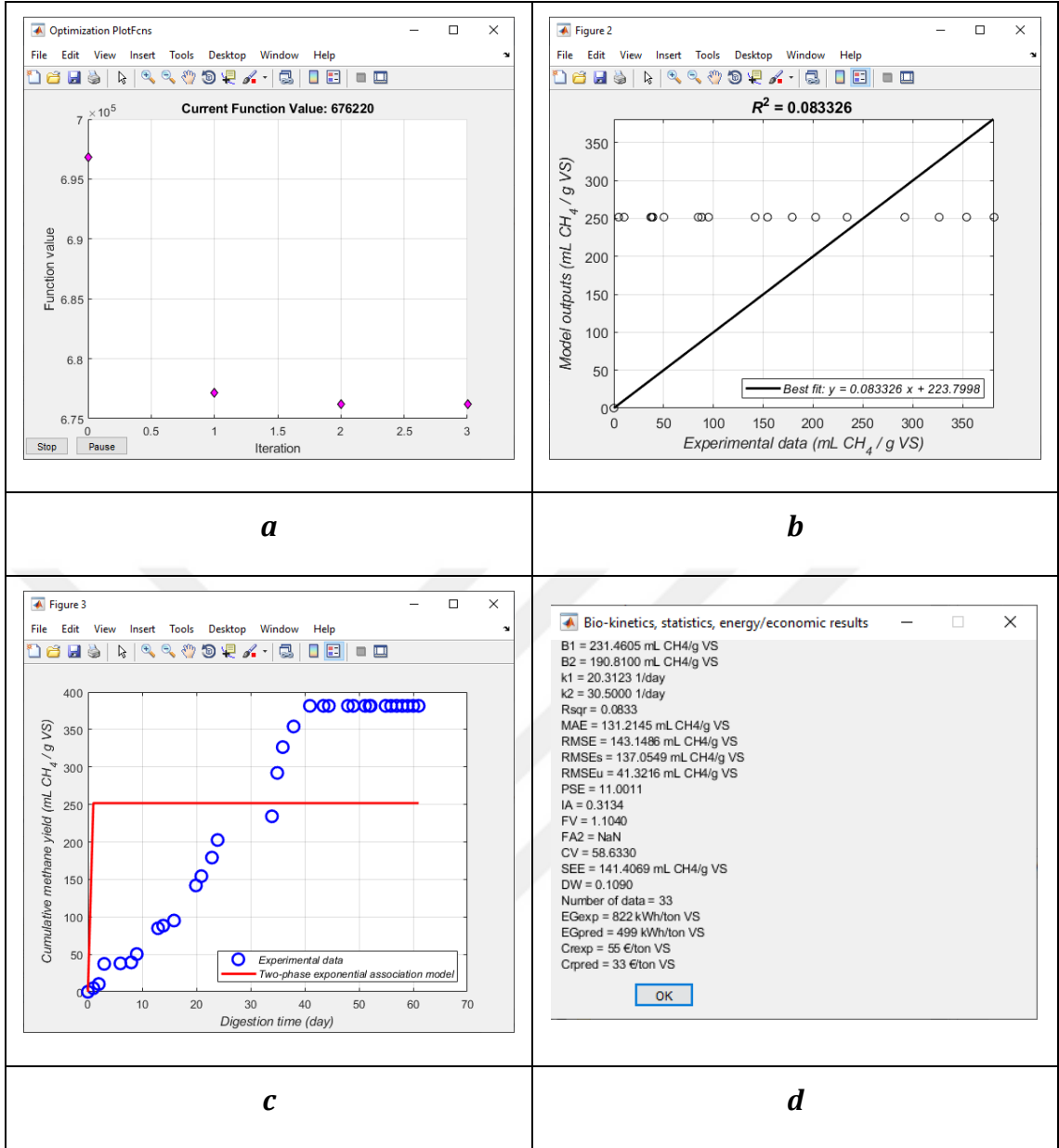
**Şekil 5.97** Sebze atıksuyuna ait deneysel verilere göre “Monod Tipi Model (MTM)” ve “Nelder-Mead simpleks doğrudan arama algoritması (N-M SDSA)” çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları



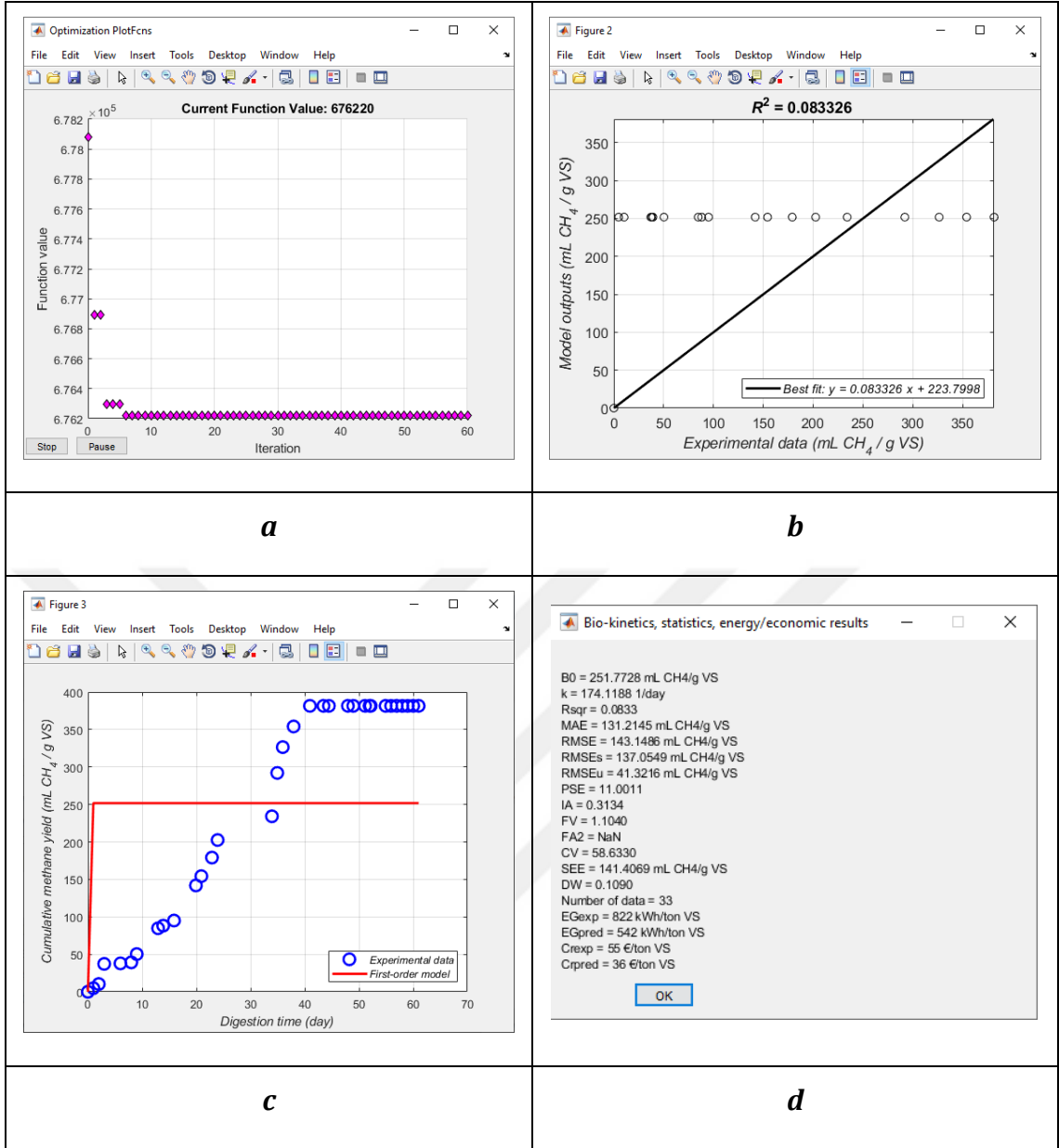
**Şekil 5.98** Sebze atıksuyuna ait deneysel verilere göre “Monod Tipi Model (MTM)” ve “BFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno) Quasi-Newton (Q-N) kübik doğruyu belirleme algoritması (BFGS Q-N CLSA)” çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları



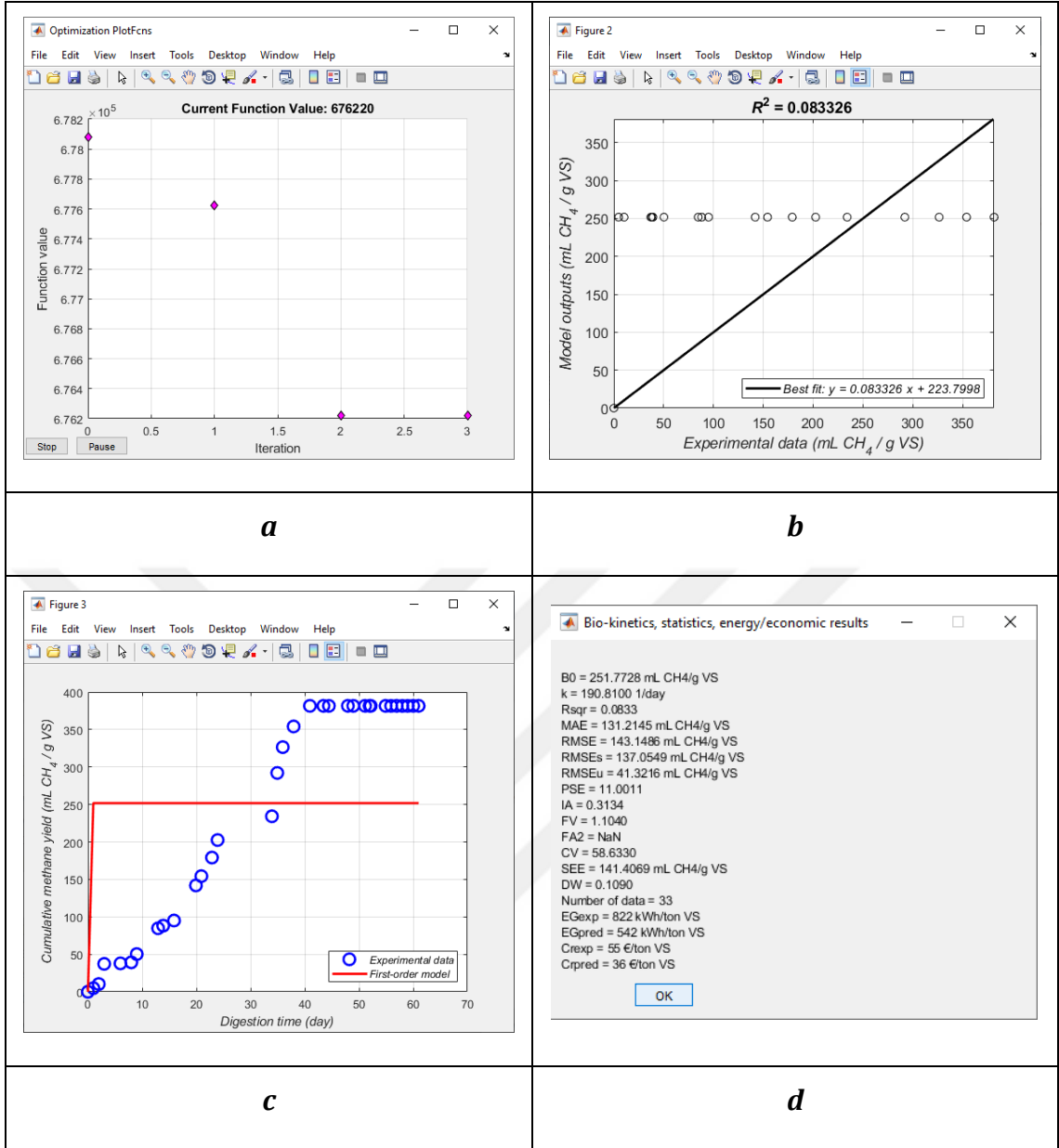
**Şekil 5.99** Sebze atıksuyuna ait deneysel verilere göre “İki Fazlı Üstel İlişki Modeli (İFÜİM)” ve “Nelder-Mead simpleks doğrudan arama algoritması (N-M SDSA)” çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları



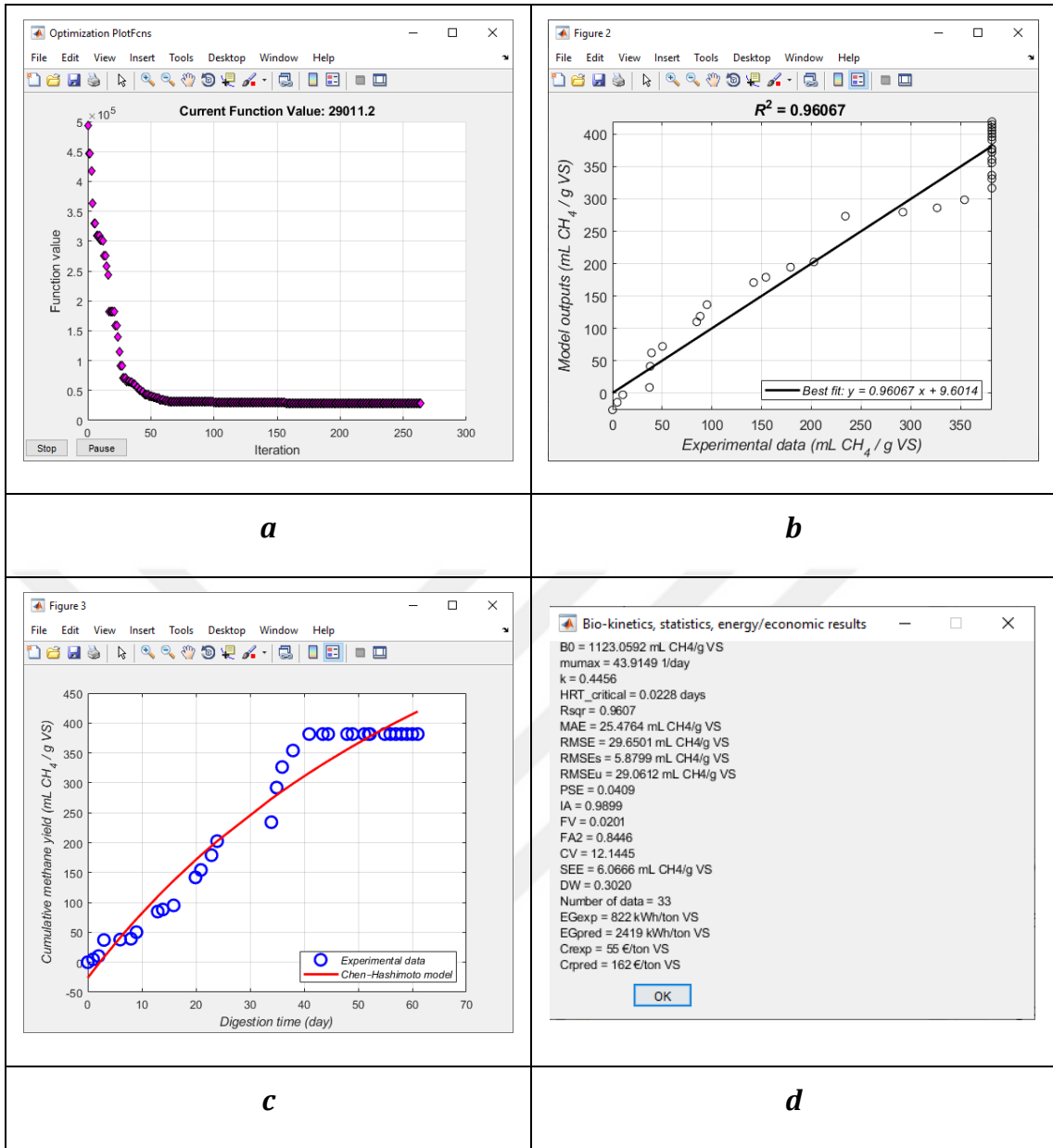
**Şekil 5.100** Sebze atıksuyuna ait deneysel verilere göre “İki Fazlı Üstel İlişki Modeli (İFÜİM)” ve “BFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno) Quasi-Newton (Q-N) kübik doğrultu belirleme algoritması (BFGS Q-N CLSA)” çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları



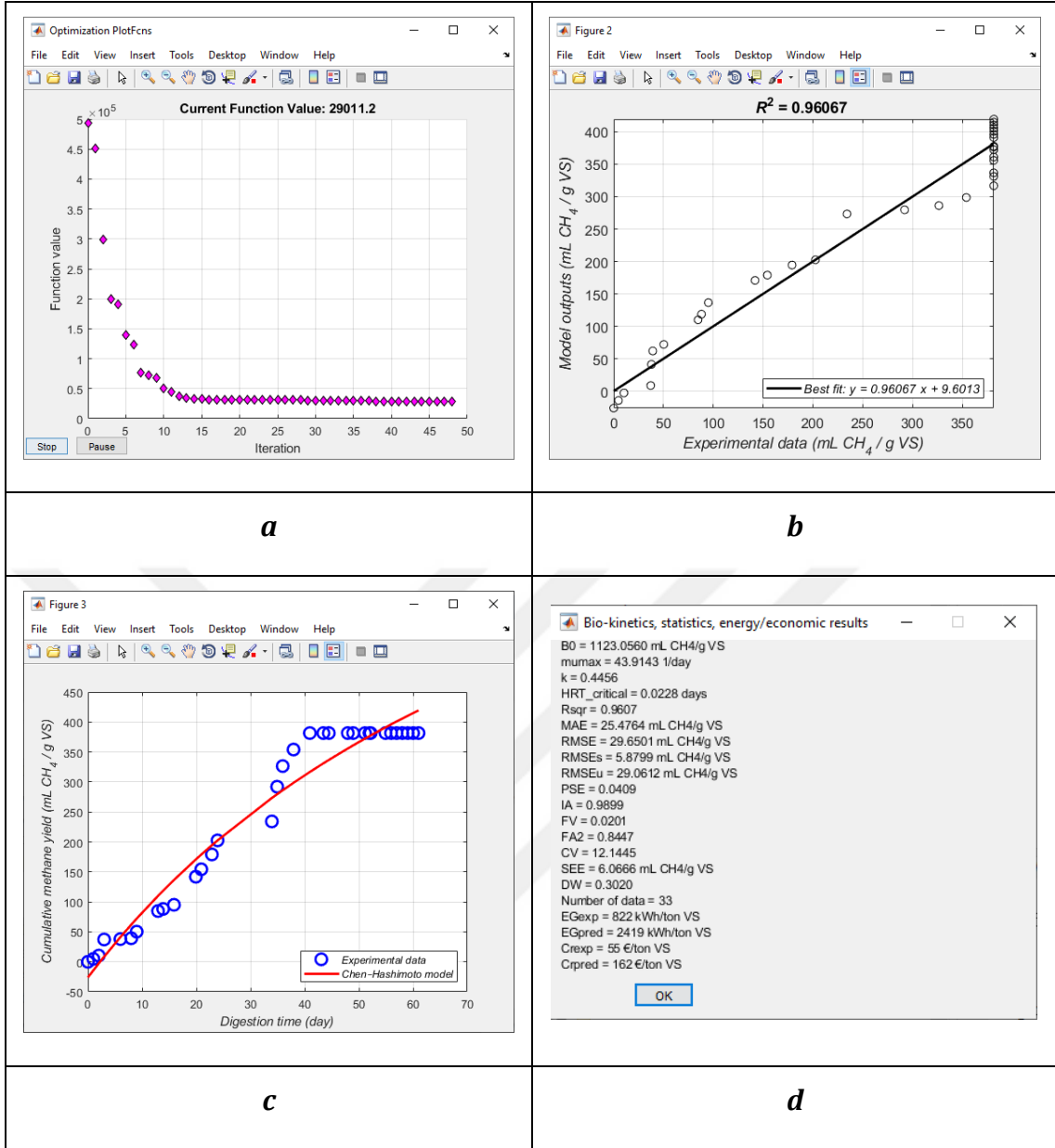
**Şekil 5.101** Sebze atıksuyuna ait deneysel verilere göre “Birinci Dereceden Fonksiyon (BDF)” ve “Nelder-Mead simpleks doğrudan arama algoritması (N-M SDSA)” çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları



**Şekil 5.102** Sebze atıksuyuna ait deneysel verilere göre “Birinci Dereceden Fonksiyon (BDF)” ve “BFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno) Quasi-Newton (Q-N) kübik doğrultu belirleme algoritması (BFGS Q-N CLSA)” çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları



**Şekil 5.103** Sebze atıksuyuna ait deneysel verilere göre “Chen-Hashimoto Modeli (CHM)” ve “Nelder-Mead simpleks doğrudan arama algoritması (N-M SDSA)” çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları



**Şekil 5.104** Sebze atıksuyuna ait deneysel verilere göre “Chen-Hashimoto Modeli (CHM)” ve “BFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno) Quasi-Newton (Q-N) kübik doğruyu belirleme algoritması (BFGS Q-N CLSA)” çözümlemesi için elde edilen (a) optimizasyon (iterasyon sayısı ile amaç fonksiyonu değeri arasındaki ilişki) süreci, (b) korelasyon (deneysel sonuçlar ve model çıktıları arasında), (c) uyum grafiği (kümülatif metan üretimi (deneysel) ve model çıktıları arasında) ve (d) biyokinetikler-istatistiksel değerler-enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları

**Tablo 5.1** BMP testlerinde kullanılan agro-endüstriyel substratlardan (mezhaba atıksuyu, balık atıksuyu, peyniraltı atıksuyu, bisküvi atıksuyu, tavuk gübresi, hayvan gıdası atıksuyu, sebze atıksuyu) elde edilen deneysel verilere göre Modifiye Gompertz Modeli (MGM), Transfer Fonksiyonu (TF) ve Lojistik Fonksiyon (LF) için belirlenen kinetik parametreler (en uygun değer koyu renk ile gösterilmiştir)

| Besin maddesi       | Model ve algoritma | $B_0$    |         | $R_m$    |         | $\lambda$ | $R^2$        | SEE          |
|---------------------|--------------------|----------|---------|----------|---------|-----------|--------------|--------------|
|                     |                    | Deneysel | Tahmin  | Deneysel | Tahmin  | Tahmin    |              |              |
| Mezhaba atıksuyu    | MGM (N-M)          | 397.75   | 388.117 | 27.51    | 30.197  | 0.933     | <b>0.990</b> | <b>1.080</b> |
|                     | MGM (Q-N)          | 397.75   | 388.117 | 27.51    | 30.196  | 0.933     | <b>0.990</b> | <b>1.080</b> |
|                     | TF (N-M)           | 397.75   | 393.231 | 27.51    | 41.949  | 0.468     | 0.981        | 2.362        |
|                     | TF (Q-N)           | 397.75   | 311.335 | 27.51    | 196.407 | 36.198    | 0.494        | NaN          |
|                     | LF (N-M)           | 397.75   | 385.673 | 27.51    | 31.266  | 1.407     | 0.987        | 3.412        |
|                     | LF (Q-N)           | 397.75   | 385.673 | 27.51    | 31.266  | 1.407     | 0.987        | 3.412        |
| Peyniraltı atıksuyu | MGM (N-M)          | 539.69   | 745.912 | 13.80    | 7.856   | 28.955    | 0.975        | 10.110       |
|                     | MGM (Q-N)          | 539.69   | 745.912 | 13.80    | 7.856   | 28.955    | 0.975        | 10.110       |
|                     | TF (N-M)           | 539.69   | NaN     | 13.80    | 5.387   | 7.522     | 0.932        | 14.123       |

**Tablo 5.1** BMP testlerinde kullanılan agro-endüstriyel substratlardan (mezhaba atıksuyu, balık atıksuyu, peyniraltı atıksuyu, bisküvi atıksuyu, tavuk gübresi, hayvan gıdası atıksuyu, sebze atıksuyu) elde edilen deneysel verilere göre Modifiye Gompertz Modeli (MGM), Transfer Fonksiyonu (TF) ve Lojistik Fonksiyon (LF) için belirlenen kinetik parametreler (en uygun değer koyu renk ile gösterilmiştir)  
(devamı)

|                       |              |        |         |       |         |         |              |              |
|-----------------------|--------------|--------|---------|-------|---------|---------|--------------|--------------|
| Perniraltı atıksuyu   | TF<br>(Q-N)  | 539.69 | 284.142 | 13.80 | 268.339 | 53.092  | 0.089        | NaN          |
|                       | LF<br>(N-M)  | 539.69 | 599.474 | 13.80 | 9.162   | 34.637  | <b>0.985</b> | <b>7.986</b> |
|                       | LF<br>(Q-N)  | 539.69 | 599.474 | 13.80 | 9.162   | 34.637  | <b>0.985</b> | <b>7.986</b> |
| Köpek maması atıksuyu | MGM<br>(N-M) | 424.92 | 397.878 | 20.42 | 14.258  | -2.075  | 0.936        | 12.500       |
|                       | MGM<br>(Q-N) | 424.92 | 397.878 | 20.42 | 14.258  | -2.075  | 0.936        | 12.500       |
|                       | TF<br>(N-M)  | 424.92 | 409.338 | 20.42 | 22.747  | -0.356  | <b>0.958</b> | <b>5.641</b> |
|                       | TF<br>(Q-N)  | 424.92 | 313.068 | 20.42 | 209.975 | 41.259  | 0.426        | NaN          |
|                       | LF<br>(N-M)  | 424.92 | 389.743 | 20.42 | 16.660  | -0.473  | 0.918        | 16.480       |
|                       | LF<br>(Q-N)  | 424.92 | 433.973 | 20.42 | 4.201   | -32.673 | 0.856        | 39.737       |

**Tablo 5.1** BMP testlerinde kullanılan agro-endüstriyel substratlardan (mezhaba atıksuyu, balık atıksuyu, peyniraltı atıksuyu, bisküvi atıksuyu, tavuk gübresi, hayvan gıdası atıksuyu, sebze atıksuyu) elde edilen deneysel verilere göre Modifiye Gompertz Modeli (MGM), Transfer Fonksiyonu (TF) ve Lojistik Fonksiyon (LF) için belirlenen kinetik parametreler (en uygun değer koyu renk ile gösterilmiştir) (devamı)

|                        |           |        |         |       |         |        |              |              |
|------------------------|-----------|--------|---------|-------|---------|--------|--------------|--------------|
| Balık atıksuyu         | MGM (N-M) | 702.81 | 746.799 | 22.92 | 19.936  | 38.683 | 0.983        | 13.368       |
|                        | MGM (Q-N) | 702.81 | 746.799 | 22.92 | 19.936  | 38.683 | 0.983        | 13.368       |
|                        | TF (N-M)  | 702.81 | NaN     | 22.92 | 8.394   | 11.923 | 0.914        | 25.002       |
|                        | TF (Q-N)  | 702.81 | 376.196 | 22.92 | 350.262 | 49.355 | 0.079        | NaN          |
|                        | LF (N-M)  | 702.81 | 723.562 | 22.92 | 20.429  | 40.002 | <b>0.991</b> | <b>9.473</b> |
|                        | LF (Q-N)  | 702.81 | 723.562 | 22.92 | 20.429  | 40.002 | <b>0.991</b> | <b>9.473</b> |
| Tavuk gübresi atıksuyu | MGM (N-M) | 638.52 | 678.866 | 23.60 | 26.513  | 28.869 | 0.982        | 24.160       |
|                        | MGM (Q-N) | 638.52 | 678.867 | 23.60 | 26.513  | 28.869 | 0.982        | 24.160       |
|                        | TF (N-M)  | 638.52 | NaN     | 23.60 | 10.293  | 5.956  | 0.911        | 23.716       |
|                        | TF (Q-N)  | 638.52 | 349.250 | 23.60 | 318.424 | 32.656 | 0.106        | NaN          |

**Tablo 5.1** BMP testlerinde kullanılan agro-endüstriyel substratlardan (mezhaba atıksuyu, balık atıksuyu, peyniraltı atıksuyu, bisküvi atıksuyu, tavuk gübresi, hayvan gıdası atıksuyu, sebze atıksuyu) elde edilen deneysel verilere göre Modifiye Gompertz Modeli (MGM), Transfer Fonksiyonu (TF) ve Lojistik Fonksiyon (LF) için belirlenen kinetik parametreler (en uygun değer koyu renk ile gösterilmiştir)  
(devamı)

|                        |              |        |         |       |         |        |              |               |
|------------------------|--------------|--------|---------|-------|---------|--------|--------------|---------------|
| Tavuk gübresi atıksuyu | LF<br>(N-M)  | 638.52 | 675.001 | 23.60 | 22.293  | 26.796 | <b>0.986</b> | <b>12.572</b> |
|                        | LF<br>(Q-N)  | 638.52 | 675.001 | 23.60 | 22.293  | 26.796 | <b>0.986</b> | <b>12.572</b> |
| Bisküvi atıksuyu       | MGM<br>(N-M) | 348.37 | 358.064 | 21.00 | 24.476  | 46.717 | 0.982        | 19.757        |
|                        | MGM<br>(Q-N) | 348.37 | 358.064 | 21.00 | 24.476  | 46.717 | 0.982        | 19.757        |
|                        | TF<br>(N-M)  | 348.37 | NaN     | 21.00 | 4.808   | 11.761 | 0.822        | 25.613        |
|                        | TF<br>(Q-N)  | 348.37 | 161.037 | 21.00 | 172.770 | 39.253 | 0.057        | NaN           |
|                        | LF<br>(N-M)  | 348.37 | 356.917 | 21.00 | 21.317  | 45.928 | <b>0.985</b> | <b>16.500</b> |
|                        | LF<br>(Q-N)  | 348.37 | 356.917 | 21.00 | 21.317  | 45.928 | <b>0.985</b> | <b>16.500</b> |
| Sebze atıksuyu         | MGM<br>(N-M) | 381.65 | 412.858 | 9.40  | 11.872  | 6.951  | 0.985        | 1.258         |
|                        | MGM<br>(Q-N) | 381.65 | 412.858 | 9.40  | 11.872  | 6.951  | 0.985        | 1.258         |

**Tablo 5.1** BMP testlerinde kullanılan agro-endüstriyel substratlardan (mezhaba atıksuyu, balık atıksuyu, peyniraltı atıksuyu, bisküvi atıksuyu, tavuk gübresi, hayvan gıdası atıksuyu, sebze atıksuyu) elde edilen deneysel verilere göre Modifiye Gompertz Modeli (MGM), Transfer Fonksiyonu (TF) ve Lojistik Fonksiyon (LF) için belirlenen kinetik parametreler (en uygun değer koyu renk ile gösterilmiştir)  
(devamı)

|                |             |        |         |      |         |        |              |              |
|----------------|-------------|--------|---------|------|---------|--------|--------------|--------------|
| Sebze atıksuyu | TF<br>(N-M) | 381.65 | 642.278 | 9.40 | 11.437  | 2.400  | 0.962        | 5.787        |
|                | TF<br>(Q-N) | 381.65 | 245.196 | 9.40 | 189.402 | 24.397 | 0.211        | NaN          |
|                | LF<br>(N-M) | 381.65 | 393.517 | 9.40 | 12.471  | 8.724  | <b>0.988</b> | <b>2.584</b> |
|                | LF<br>(Q-N) | 381.65 | 393.517 | 9.40 | 12.471  | 8.724  | <b>0.988</b> | <b>2.584</b> |

**Tablo 5.2** BMP testlerinde kullanılan agro-endüstriyel substratlardan (mezhaba atıksuyu, balık atıksuyu, peyniraltı atıksuyu, bisküvi atıksuyu, tavuk gübresi, hayvan gıdası atıksuyu, sebze atıksuyu) elde edilen deneysel verilere göre Monod Tipi Model (MTM) ve Birinci Dereceden Fonksiyon (BDF) için belirlenen kinetik parametreler (en uygun değer koyu renk ile gösterilmiştir)

| Besi maddesi     | Model ve algoritma | $B_0 = BMP_{\infty} = Y_{max}$ |         | $k_1$   | $R^2$        | SEE           |
|------------------|--------------------|--------------------------------|---------|---------|--------------|---------------|
|                  |                    | Deneysel                       | Tahmin  | Tahmin  |              |               |
| Mezhaba atıksuyu | MTM<br>(N-M)       | 397.75                         | 439.457 | 0.128   | <b>0.959</b> | <b>10.141</b> |
|                  | MTM<br>(Q-N)       | 397.75                         | 439.457 | 0.128   | <b>0.959</b> | <b>10.141</b> |
|                  | BDF<br>(N-M)       | 397.75                         | 393.961 | 0.100   | 0.980        | 6.309         |
|                  | BDF(Q-N)           | 397.75                         | 314.055 | 198.785 | 0.091        | 110.293       |

**Tablo 5.2** BMP testlerinde kullanılan agro-endüstriyel substratlardan (mezhaba atıksuyu, balık atıksuyu, peyniraltı atıksuyu, bisküvi atıksuyu, tavuk gübresi, hayvan gıdası atıksuyu, sebze atıksuyu) elde edilen deneysel verilere göre Monod Tipi Model (MTM) ve Birinci Dereceden Fonksiyon (BDF) için belirlenen kinetik parametreler (en uygun değer koyu renk ile gösterilmiştir) (devamı)

|                       |              |        |          |         |              |               |
|-----------------------|--------------|--------|----------|---------|--------------|---------------|
| Peyniraltı atıksuyu   | MTM<br>(N-M) | 539.69 | NaN      | 0.000   | 0.929        | 36.327        |
|                       | MTM<br>(Q-N) | 539.69 | NaN      | 0.006   | 0.876        | 57.569        |
|                       | BDF<br>(N-M) | 539.69 | NaN      | 0.000   | <b>0.930</b> | <b>35.219</b> |
|                       | BDF<br>(Q-N) | 539.69 | 2659.417 | 0.002   | 0.922        | 40.399        |
| Köpek maması atıksuyu | MTM<br>(N-M) | 424.92 | 484.077  | 0.066   | <b>0.970</b> | 6.644         |
|                       | MTM<br>(Q-N) | 424.92 | 484.078  | 0.066   | <b>0.970</b> | 6.644         |
|                       | BDF<br>(N-M) | 424.92 | 407.937  | 0.058   | 0.958        | <b>4.168</b>  |
|                       | BDF<br>(Q-N) | 424.92 | 316.505  | 0.106   | 0.919        | 66.617        |
| Balık atıksuyu        | MTM<br>(N-M) | 702.81 | NaN      | 0.000   | <b>0.913</b> | <b>74.270</b> |
|                       | MTM<br>(Q-N) | 702.81 | 393.348  | 0.100   | 0.485        | 240.669       |
|                       | BDF<br>(N-M) | 702.81 | 382.225  | 348.090 | 0.033        | 280.418       |

**Tablo 5.2** BMP testlerinde kullanılan agro-endüstriyel substratlardan (mezhaba atıksuyu, balık atıksuyu, peyniraltı atıksuyu, bisküvi atıksuyu, tavuk gübresi, hayvan gıdası atıksuyu, sebze atıksuyu) elde edilen deneysel verilere göre Monod Tipi Model (MTM) ve Birinci Dereceden Fonksiyon (BDF) için belirlenen kinetik parametreler (en uygun değer koyu renk ile gösterilmiştir) (devamı)

|                        |              |        |          |         |              |                |
|------------------------|--------------|--------|----------|---------|--------------|----------------|
| Balık atıksuyu         | BDF<br>(Q-N) | 702.81 | 382.225  | 351.405 | 0.033        | 280.418        |
| Tavuk gübresi atıksuyu | MTM<br>(N-M) | 638.52 | NaN      | 0.001   | <b>0.910</b> | <b>56.473</b>  |
|                        | MTM<br>(Q-N) | 638.52 | 360.720  | 0.153   | 0.528        | 217.316        |
|                        | BDF<br>(N-M) | 638.52 | 357.373  | 348.172 | 0.047        | 252.885        |
|                        | BDF<br>(Q-N) | 638.52 | 357.373  | 319.335 | 0.047        | 252.885        |
| Bisküvi atıksuyu       | MTM<br>(N-M) | 348.37 | 162.317  | 0.132   | 0.375        | 126.733        |
|                        | MTM<br>(Q-N) | 348.37 | 166.277  | 0.123   | <b>0.384</b> | <b>125.345</b> |
|                        | BDF<br>(N-M) | 348.37 | 163.138  | 163.510 | 0.029        | 139.910        |
|                        | BDF<br>(Q-N) | 348.37 | 163.138  | 174.200 | 0.029        | 139.910        |
| Sebze atıksuyu         | MTM<br>(N-M) | 381.65 | 1451.951 | 0.007   | 0.959        | 13.538         |
|                        | MTM<br>(Q-N) | 381.65 | 1112.222 | 0.010   | 0.961        | 18.045         |

**Tablo 5.2** BMP testlerinde kullanılan agro-endüstriyel substratlardan (mezhaba atıksuyu, balık atıksuyu, peyniraltı atıksuyu, bisküvi atıksuyu, tavuk gübresi, hayvan gıdası atıksuyu, sebze atıksuyu) elde edilen deneysel verilere göre Monod Tipi Model (MTM) ve Birinci Dereceden Fonksiyon (BDF) için belirlenen kinetik parametreler (en uygun değer koyu renk ile gösterilmiştir) (devamı)

|                |              |        |         |         |       |         |
|----------------|--------------|--------|---------|---------|-------|---------|
| Sebze atıksuyu | BDF<br>(N-M) | 381.65 | 251.773 | 174.119 | 0.083 | 141.407 |
|                | BDF<br>(Q-N) | 381.65 | 251.773 | 174.119 | 0.083 | 141.407 |

**Tablo 5.3** BMP testlerinde kullanılan agro-endüstriyel substratlardan (mezhaba atıksuyu, balık atıksuyu, peyniraltı atıksuyu, bisküvi atıksuyu, tavuk gübresi, hayvan gıdası atıksuyu, sebze atıksuyu) elde edilen deneysel verilere göre İki Fazlı Üstel İlişki Modeli (İFÜİM) belirlenen kinetik parametreler (en uygun değer koyu renk ile gösterilmiştir)

| Besi maddesi          | Model ve algoritma | $B_1$    | $B_2$   | $k_1$    | $k_2$  | $R^2$        | SEE           |
|-----------------------|--------------------|----------|---------|----------|--------|--------------|---------------|
|                       |                    | Tahmin   |         | Tahmin   | Tahmin |              |               |
| Mezhaba atıksuyu      | İFÜİM<br>(N-M)     | 186.328  | 0.142   | 141.014  | 0.142  | <b>0.962</b> | <b>51.080</b> |
|                       | İFÜİM<br>(Q-M)     | 281.552  | 198.785 | 31.472   | 0.053  | 0.293        | 101.893       |
| Peyniraltı atıksuyu   | İFÜİM<br>(N-M)     | 1805.736 | 0.001   | -107.480 | -0.014 | <b>0.950</b> | <b>10.557</b> |
|                       | İFÜİM<br>(Q-M)     | -49.211  | 77.014  | 2606.822 | 0.002  | 0.922        | 20.966        |
| Köpek maması atıksuyu | İFÜİM<br>(N-M)     | 327.933  | 0.040   | 93.605   | 0.169  | <b>0.965</b> | <b>4.823</b>  |
|                       | İFÜİM (Q-M)        | 9.995    | 211.183 | 399.698  | 0.055  | 0.958        | 5.631         |

**Tablo 5.3** BMP testlerinde kullanılan agro-endüstriyel substratlardan (mezhaba atıksuyu, balık atıksuyu, peyniraltı atıksuyu, bisküvi atıksuyu, tavuk gübresi, hayvan gıdası atıksuyu, sebze atıksuyu) elde edilen deneysel verilere göre İki Fazlı Üstel İlişki Modeli (İFÜİM) belirlenen kinetik parametreler (en uygun değer koyu renk ile gösterilmiştir) (devamı)

|                        |             |         |         |         |        |              |                |
|------------------------|-------------|---------|---------|---------|--------|--------------|----------------|
| Balık atıksuyu         | İFÜİM (N-M) | 203.471 | 0.036   | 199.146 | 0.036  | <b>0.655</b> | <b>210.525</b> |
|                        | İFÜİM (Q-M) | 344.007 | 351.405 | 38.075  | 0.025  | 0.118        | 272.434        |
| Tavuk gübresi atıksuyu | İFÜİM (N-M) | 316.591 | 334.140 | 40.782  | 41.124 | <b>0.047</b> | <b>252.885</b> |
|                        | İFÜİM (Q-M) | 332.815 | 319.335 | 24.559  | 40.000 | <b>0.047</b> | <b>252.885</b> |
| Bisküvi atıksuyu       | İFÜİM (N-M) | 116.166 | 186.898 | 46.972  | 45.360 | <b>0.029</b> | <b>139.910</b> |
|                        | İFÜİM (Q-M) | 138.856 | 174.200 | 24.282  | 42.500 | <b>0.029</b> | <b>139.910</b> |
| Sebze atıksuyu         | İFÜİM (N-M) | 218.084 | 198.630 | 33.689  | 31.371 | <b>0.083</b> | <b>141.407</b> |
|                        | İFÜİM (Q-M) | 231.460 | 190.810 | 20.312  | 30.500 | <b>0.083</b> | <b>141.407</b> |

**Tablo 5.4** BMP testlerinde kullanılan agro-endüstriyel substratlardan (mezhaba atıksuyu, balık atıksuyu, peyniraltı atıksuyu, bisküvi atıksuyu, tavuk gübresi, hayvan gıdası atıksuyu, sebze atıksuyu) elde edilen deneysel verilere göre Chen-Hashimoto Modeli (CHM) için belirlenen kinetik parametreler (en uygun değer koyu renk ile gösterilmiştir)

| Besi maddesi           | Model ve algoritma | $B_0 = Y_{max}$ |          | $k$    | $\mu_{max}$ | $R^2$        | SEE           |
|------------------------|--------------------|-----------------|----------|--------|-------------|--------------|---------------|
|                        |                    | Deneysel        | Tahmin   | Tahmin | Tahmin      |              |               |
| Mezhaba atıksuyu       | CHM (N-M)          | 397.75          | 436.046  | 1.958  | 14.090      | <b>0.961</b> | <b>4.746</b>  |
|                        | CHM (Q-M)          | 397.75          | 1123.056 | 0.446  | 43.914      | <b>0.961</b> | 6.067         |
| Peyniraltı atıksuyu    | CHM (N-M)          | 539.69          | NaN      | 0.160  | NaN         | <b>0.932</b> | <b>17.485</b> |
|                        | CHM (Q-M)          | 539.69          | NaN      | 0.813  | NaN         | <b>0.932</b> | 30.626        |
| Köpek maması atıksuyu  | CHM (N-M)          | 424.92          | 478.981  | 2.377  | 33.921      | <b>0.970</b> | <b>4.027</b>  |
|                        | CHM (Q-M)          | 424.92          | 478.981  | 2.377  | 33.921      | <b>0.970</b> | <b>4.027</b>  |
| Balık atıksuyu         | CHM (N-M)          | 702.81          | NaN      | 0.072  | NaN         | 0.914        | 17.283        |
|                        | CHM (Q-M)          | 702.81          | NaN      | 1.303  | NaN         | 0.914        | 68.906        |
| Tavuk gübresi atıksuyu | CHM (N-M)          | 638.52          | NaN      | 0.760  | NaN         | 0.911        | <b>46.058</b> |
|                        | CHM(Q-M)           | 638.52          | NaN      | 1.080  | NaN         | 0.911        | 47.910        |

**Tablo 5.4** BMP testlerinde kullanılan agro-endüstriyel substratlardan (mezhaba atıksuyu, balık atıksuyu, peyniraltı atıksuyu, bisküvi atıksuyu, tavuk gübresi, hayvan gıdası atıksuyu, sebze atıksuyu) elde edilen deneysel verilere göre Chen-Hashimoto Modeli (CHM) için belirlenen kinetik parametreler (en uygun değer koyu renk ile gösterilmiştir) (devamı)

|                  |           |        |          |       |        |              |                          |
|------------------|-----------|--------|----------|-------|--------|--------------|--------------------------|
| Bisküvi atıksuyu | CHM (N-M) | 348.37 | NaN      | 0.083 | NaN    | <b>0.822</b> | <b>24.95<sub>2</sub></b> |
|                  | CHM (Q-M) | 348.37 | NaN      | 1.197 | NaN    | <b>0.822</b> | 49.334                   |
| Sebze atıksuyu   | CHM (N-M) | 381.65 | 1123.059 | 0.446 | 43.915 | 0.961        | 6.067                    |
|                  | CHM (Q-M) | 381.65 | 1123.056 | 0.446 | 43.914 | 0.961        | 6.067                    |

**Tablo 5.5** Mezhaba atıksuyuna ait verilerin “Nelder-Mead simpleks doğrudan arama algoritması (N-M SDSA)” çözümlemesi için yedi farklı kinetik modelden elde edilen istatistiksel performans indikatörleri (en uygun değer koyu renk ile gösterilmiştir)

| Performans indikatörleri                                                                                                                              | Kinetik modeller |        |        |        |        |        |        |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                                                                                                                                                       | MGM              | TF     | LF     | MTM    | İFÜİM  | BDF    | CHM    |
| Determinasyon katsayısı<br>$R^2 = \frac{\left( \sum_{i=1}^n (O_i - O_m)(P_i - P_m) \right)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - O_m)^2 \sum_{i=1}^n (P_i - P_m)^2}$ | <b>0.990</b>     | 0.981  | 0.987  | 0.959  | 0.962  | 0.980  | 0.961  |
| Ortalama mutlak hata<br>$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n  P_i - O_i $                                                                                  | <b>10.351</b>    | 12.438 | 11.812 | 17.832 | 48.687 | 12.015 | 17.362 |

**Tablo 5.5** Mezbaaha atıksuyuna ait verilerin “Nelder-Mead simpleks doğrudan arama algoritması (N-M SDSA)” çözümlemesi için yedi farklı kinetik modelden elde edilen istatistiksel performans indikatörleri (en uygun değer koyu renk ile gösterilmiştir) (devamı)

|                                                                                                                                          |               |        |        |        |        |        |        |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Ortalama karesel hatanın karekökü<br>$RMSE = \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [P_i - O_i]^2 \right)^{0.5}$                                | <b>11.875</b> | 16.698 | 13.558 | 24.882 | 53.187 | 17.492 | 23.669 |
| Sistemik ortalama RMSE<br>$RMSE_S = \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [(P_i)_{reg} - O_i]^2 \right)^{0.5}$                                 | <b>1.066</b>  | 2.330  | 3.366  | 10.005 | 50.394 | 6.225  | 4.682  |
| Unsistemik ortalama karesel hata<br>$RMSE_U = \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [(P_i)_{reg} - P_i]^2 \right)^{0.5}$                       | <b>11.827</b> | 16.535 | 13.134 | 22.782 | 17.007 | 16.347 | 23.202 |
| Sistemik hata oranı<br>$PSE = \frac{(RMSE_S)^2}{(RMSE_U)^2}$                                                                             | <b>0.008</b>  | 0.020  | 0.066  | 0.193  | 8.781  | 0.145  | 0.041  |
| Uyumluluk indeksi<br>$IA = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n ( P_i - O_m  +  O_i - O_m )^2}$                            | <b>0.998</b>  | 0.995  | 0.997  | 0.988  | 0.936  | 0.994  | 0.990  |
| Fraksiyonel varyans<br>$\sigma_p = \sqrt{\frac{\sum (P_i - P_m)^2}{n-1}}$<br>$FV = \frac{2(\sigma_o - \sigma_p)}{(\sigma_o + \sigma_p)}$ | <b>0.004</b>  | 0.010  | 0.022  | 0.065  | 0.316  | 0.042  | 0.020  |

**Tablo 5.5** Mezbaaha atıksuyuna ait verilerin “Nelder-Mead simpleks doğrudan arama algoritması (N-M SDSA)” çözümlemesi için yedi farklı kinetik modelden elde edilen istatistiksel performans indikatörleri (en uygun değer koyu renk ile gösterilmiştir) (devamı)

| 2'nin faktörü                                                                   |              |       |       |     |     |     |       |
|---------------------------------------------------------------------------------|--------------|-------|-------|-----|-----|-----|-------|
| $0.5 \leq FA2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{O_i}{P_i} \right) \leq 2$ | <b>0.998</b> | 0.975 | 0.974 | NaN | NaN | NaN | 0.963 |

**Tablo 5.6** Mezbaaha atıksuyuna ait verilerin “BFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno) Quasi-Newton (Q-N) kübik doğrultu belirleme algoritması (BFGS Q-N CLSA)” çözümlemesi için yedi farklı kinetik modelden elde edilen istatistiksel performans indikatörleri (en uygun değer koyu renk ile gösterilmiştir)

| Performans indikatörleri                                                                                                                              | Kinetik modeller |       |        |        |         |         |        |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|-------|--------|--------|---------|---------|--------|
|                                                                                                                                                       | MGM              | TF    | LF     | MTM    | İFÜİM   | BDF     | CHM    |
| Determinasyon katsayısı<br>$R^2 = \frac{\left( \sum_{i=1}^n (O_i - O_m)(P_i - P_m) \right)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - O_m)^2 \sum_{i=1}^n (P_i - P_m)^2}$ | <b>0.990</b>     | 0.494 | 0.987  | 0.959  | 0.293   | 0.091   | 0.961  |
| Ortalama mutlak hata<br>$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n  P_i - O_i $                                                                                  | <b>10.351</b>    | NaN   | 11.812 | 17.832 | 89.190  | 92.823  | 17.362 |
| Ortalama karesel hatanın karekökü<br>$RMSE = \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [P_i - O_i]^2 \right)^{0.5}$                                             | <b>11.875</b>    | NaN   | 13.558 | 24.882 | 105.050 | 114.106 | 23.669 |
| Sistemik ortalama RMSE<br>$RMSE_S = \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [(P_i)_{reg} - O_i]^2 \right)^{0.5}$                                              | <b>1.066</b>     | NaN   | 3.366  | 10.005 | 100.526 | 108.812 | 4.682  |

**Tablo 5.6** Mezbaşa atıksuyuna ait verilerin “BFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno) Quasi-Newton (Q-N) kübik doğruyu belirleme algoritması (BFGS Q-N CLSA)” çözümlemesi için yedi farklı kinetik modelden elde edilen istatistiksel performans indikatörleri (en uygun değer koyu renk ile gösterilmiştir) (devamı)

|                                                                                                                                             |               |        |        |        |        |        |        |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| <p>UnsistematiK ortalama karesel hata</p> $RMSE_U = \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [(P_i)_{reg} - P_i]^2 \right)^{0.5}$                    | <b>11.827</b> | NaN    | 13.134 | 22.782 | 30.498 | 34.350 | 23.202 |
| <p>SistematiK hata oranı</p> $PSE = \frac{(RMSE_S)^2}{(RMSE_U)^2}$                                                                          | <b>0.008</b>  | 1.157  | 0.066  | 0.193  | 10.865 | 10.034 | 0.041  |
| <p>Uyumluluk indeksi</p> $IA = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n ( P_i - O_m  +  O_i - O_m )^2}$                           | <b>0.998</b>  | 0.000  | 0.997  | 0.988  | 0.465  | 0.314  | 0.990  |
| <p>Fraksiyonel varyans</p> $\sigma_p = \sqrt{\frac{\sum (P_i - P_m)^2}{n - 1}}$ $FV = \frac{2(\sigma_o - \sigma_p)}{(\sigma_o + \sigma_p)}$ | <b>0.004</b>  | -2.000 | 0.022  | 0.065  | 1.069  | 1.074  | 0.020  |
| <p>2'nin faktörü</p> $0.5 \leq FA2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{O_i}{P_i} \right) \leq 2$                                        | <b>0.998</b>  | 0.668  | 0.974  | NaN    | NaN    | NaN    | 0.963  |

**Tablo 5.7** Peyniraltı atıksuyuna ait verilerin “Nelder-Mead simpleks doğrudan arama algoritması (N-M SDSA)” çözümlemesi için yedi farklı kinetik modelden elde edilen istatistiksel performans indikatörleri (en uygun değer koyu renk ile gösterilmiştir)

| Performans indikatörleri                                                                                                                              | Kinetik modeller |        |               |        |              |        |        |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|--------|---------------|--------|--------------|--------|--------|
|                                                                                                                                                       | MGM              | TF     | LF            | MTM    | İFÜİM        | BDF    | CHM    |
| Determinasyon katsayısı<br>$R^2 = \frac{\left( \sum_{i=1}^n (O_i - O_m)(P_i - P_m) \right)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - O_m)^2 \sum_{i=1}^n (P_i - P_m)^2}$ | 0.975            | 0.932  | <b>0.985</b>  | 0.929  | 0.950        | 0.930  | 0.932  |
| Ortalama mutlak hata<br>$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n  P_i - O_i $                                                                                  | 29.164           | 43.900 | <b>22.619</b> | 46.206 | 39.082       | 45.044 | 43.590 |
| Ortalama karesel hatanın karekökü<br>$RMSE = \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [P_i - O_i]^2 \right)^{0.5}$                                             | 34.686           | 53.308 | <b>27.324</b> | 58.953 | 45.584       | 58.341 | 53.446 |
| Sistematik ortalama RMSE<br>$RMSE_S = \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [(P_i)_{reg} - O_i]^2 \right)^{0.5}$                                            | 9.953            | 13.904 | <b>7.862</b>  | 35.763 | 10.394       | 34.672 | 17.213 |
| Unsistematik ortalama karesel hata<br>$RMSE_U = \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [(P_i)_{reg} - P_i]^2 \right)^{0.5}$                                  | 33.227           | 51.463 | <b>26.168</b> | 46.867 | 44.383       | 46.920 | 50.599 |
| Sistematik hata oranı<br>$PSE = \frac{(RMSE_S)^2}{(RMSE_U)^2}$                                                                                        | 0.090            | 0.073  | 0.090         | 0.582  | <b>0.055</b> | 0.546  | 0.116  |

**Tablo 5.7** Peyniraltı atıksuyuna ait verilerin “Nelder-Mead simpleks doğrudan arama algoritması (N-M SDSA)” çözümlemesi için yedi farklı kinetik modelden elde edilen istatistiksel performans indikatörleri (en uygun değer koyu renk ile gösterilmiştir) (devamı)

|                                                                                                                                           |        |       |              |       |              |       |              |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|-------|--------------|-------|--------------|-------|--------------|
| <p>Uyumluluk indeksi</p> $IA = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n ( P_i - O_m  +  O_i - O_m )^2}$                         | 0.993  | 0.982 | <b>0.996</b> | 0.975 | 0.987        | 0.976 | 0.982        |
| <p>Fraksiyonel varyans</p> $\sigma_p = \sqrt{\frac{\sum (P_i - P_m)^2}{n-1}}$ $FV = \frac{2(\sigma_o - \sigma_p)}{(\sigma_o + \sigma_p)}$ | -0.039 | 0.035 | -0.031       | 0.150 | <b>0.027</b> | 0.141 | 0.052        |
| <p>2'nin faktörü</p> $0.5 \leq FA2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{O_i}{P_i} \right) \leq 2$                                      | 2.868  | 1.550 | 1.427        | NaN   | NaN          | NaN   | <b>1.167</b> |

**Tablo 5.8** Peyniraltı atıksuyuna ait verilerin “BFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno) Quasi-Newton (Q-N) kübik doğrultu belirleme algoritması (BFGS Q-N CLSA)” çözümlemesi için yedi farklı kinetik modelden elde edilen istatistiksel performans indikatörleri (en uygun değer koyu renk ile gösterilmiştir)

| Performans indikatörleri                                                                                                                                  | Kinetik modeller |       |              |       |       |       |       |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|-------|--------------|-------|-------|-------|-------|
|                                                                                                                                                           | MGM              | TF    | LF           | MTM   | İFÜİM | BDF   | CHM   |
| <p>Determinasyon katsayısı</p> $R^2 = \frac{\left( \sum_{i=1}^n (O_i - O_m)(P_i - P_m) \right)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - O_m)^2 \sum_{i=1}^n (P_i - P_m)^2}$ | 0.975            | 0.089 | <b>0.985</b> | 0.876 | 0.922 | 0.922 | 0.932 |

**Tablo 5.8** Peyniraltı atıksuyuna ait verilerin “BFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno) Quasi-Newton (Q-N) kübik doğrultu belirleme algoritması (BFGS Q-N CLSA)” çözümlemesi için yedi farklı kinetik modelden elde edilen istatistiksel performans indikatörleri (en uygun değer koyu renk ile gösterilmiştir) (devamı)

|                                                                                                                    |        |       |               |        |              |        |        |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|-------|---------------|--------|--------------|--------|--------|
| Ortalama mutlak hata<br>$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n  P_i - O_i $                                               | 29.164 | NaN   | <b>22.619</b> | 63.594 | 47.545       | 49.848 | 43.365 |
| Ortalama karesel hatanın karekökü<br>$RMSE = \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [P_i - O_i]^2 \right)^{0.5}$          | 34.686 | NaN   | <b>27.324</b> | 79.798 | 57.185       | 62.265 | 56.233 |
| Sistemik ortalama RMSE<br>$RMSE_S = \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [(P_i)_{reg} - O_i]^2 \right)^{0.5}$           | 9.953  | NaN   | <b>7.862</b>  | 56.677 | 20.641       | 39.772 | 30.151 |
| Unsistemik ortalama karesel hata<br>$RMSE_U = \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [(P_i)_{reg} - P_i]^2 \right)^{0.5}$ | 33.227 | NaN   | <b>26.168</b> | 56.174 | 53.329       | 47.907 | 47.466 |
| Sistemik hata oranı<br>$PSE = \frac{(RMSE_S)^2}{(RMSE_U)^2}$                                                       | 0.090  | 0.152 | 0.090         | 1.018  | <b>0.150</b> | 0.689  | 0.403  |
| Uyumluluk indeksi<br>$IA = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n ( P_i - O_m  +  O_i - O_m )^2}$      | 0.993  | 0.000 | <b>0.996</b>  | 0.951  | 0.979        | 0.972  | 0.978  |

**Tablo 5.8** Peyniraltı atıksuyuna ait verilerin “BFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno) Quasi-Newton (Q-N) kübik doğrultu belirleme algoritması (BFGS Q-N CLSA)” çözümlemesi için yedi farklı kinetik modelden elde edilen istatistiksel performans indikatörleri (en uygun değer koyu renk ile gösterilmiştir) (devamı)

|                                                                                                                                           |        |              |               |       |       |       |       |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|--------------|---------------|-------|-------|-------|-------|
| <p>Fraksiyonel varyans</p> $\sigma_p = \sqrt{\frac{\sum (P_i - P_m)^2}{n-1}}$ $FV = \frac{2(\sigma_o - \sigma_p)}{(\sigma_o + \sigma_p)}$ | -0.039 | -2.000       | <b>-0.031</b> | 0.244 | 0.065 | 0.172 | 0.116 |
| <p>2'nin faktörü</p> $0.5 \leq FA2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{O_i}{P_i} \right) \leq 2$                                      | 2.868  | <b>0.919</b> | 1.427         | NaN   | NaN   | NaN   | 1.375 |

**Tablo 5.9** Köpek maması atıksuyuna ait verilerin “Nelder-Mead simpleks doğrudan arama algoritması (N-M SDSA)” çözümlemesi için yedi farklı kinetik modelden elde edilen istatistiksel performans indikatörleri (en uygun değer koyu renk ile gösterilmiştir)

| Performans indikatörleri                                                                                                                                  | Kinetik modeller |        |        |               |        |        |              |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|--------|--------|---------------|--------|--------|--------------|
|                                                                                                                                                           | MGM              | TF     | LF     | MTM           | İFÜİM  | BDF    | CHM          |
| <p>Determinasyon katsayısı</p> $R^2 = \frac{\left( \sum_{i=1}^n (O_i - O_m)(P_i - P_m) \right)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - O_m)^2 \sum_{i=1}^n (P_i - P_m)^2}$ | 0.936            | 0.958  | 0.918  | <b>0.970</b>  | 0.965  | 0.958  | <b>0.970</b> |
| <p>Ortalama mutlak hata</p> $MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n  P_i - O_i $                                                                                  | 26.065           | 19.709 | 30.498 | <b>15.496</b> | 17.215 | 19.648 | 15.865       |

**Tablo 5.9** Köpek maması atıksuyuna ait verilerin “Nelder-Mead simpleks doğrudan arama algoritması (N-M SDSA)” çözümlemesi için yedi farklı kinetik modelden elde edilen istatistiksel performans indikatörleri (en uygun değer koyu renk ile gösterilmiştir) (devamı)

|                                                                                                                                       |        |        |        |               |        |              |               |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|--------|--------|---------------|--------|--------------|---------------|
| Ortalama karesel hatanın karekökü<br>$RMSE = \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [P_i - O_i]^2 \right)^{0.5}$                             | 33.810 | 27.092 | 38.379 | 23.206        | 24.644 | 27.189       | <b>22.889</b> |
| Sistematik ortalama RMSE<br>$RMSE_S = \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [(P_i)_{reg} - O_i]^2 \right)^{0.5}$                            | 12.293 | 5.548  | 16.207 | 6.534         | 4.743  | 4.099        | <b>3.960</b>  |
| Unsistematik ortalama karesel hata<br>$RMSE_U = \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [(P_i)_{reg} - P_i]^2 \right)^{0.5}$                  | 31.496 | 26.518 | 34.789 | <b>22.267</b> | 24.183 | 26.878       | 22.544        |
| Sistematik hata oranı<br>$PSE = \frac{(RMSE_S)^2}{(RMSE_U)^2}$                                                                        | 0.152  | 0.044  | 0.217  | 0.086         | 0.038  | <b>0.023</b> | 0.031         |
| Uyumluluk indeksi<br>$IA = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n ( P_i - O_m  +  O_i - O_m )^2}$                         | 0.982  | 0.989  | 0.977  | <b>0.992</b>  | 0.991  | 0.989        | <b>0.992</b>  |
| Fraksiyonel varyans<br>$\sigma_p = \sqrt{\frac{\sum (P_i - P_m)^2}{n-1}}$ $FV = \frac{2(\sigma_o - \sigma_p)}{(\sigma_o + \sigma_p)}$ | 0.063  | 0.021  | 0.087  | 0.035         | 0.019  | <b>0.010</b> | 0.015         |

**Tablo 5.9** Köpek maması atıksuyuna ait verilerin “Nelder-Mead simpleks doğrudan arama algoritması (N-M SDSA)” çözümlemesi için yedi farklı kinetik modelden elde edilen istatistiksel performans indikatörleri (en uygun değer koyu renk ile gösterilmiştir) (devamı)

|                                                                                 |       |              |       |     |     |     |       |
|---------------------------------------------------------------------------------|-------|--------------|-------|-----|-----|-----|-------|
| 2'nin faktörü                                                                   |       |              |       |     |     |     |       |
| $0.5 \leq FA2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{O_i}{P_i} \right) \leq 2$ | 0.947 | <b>0.970</b> | 0.944 | NaN | NaN | NaN | 0.952 |

**Tablo 5.10** Köpek maması atıksuyuna ait verilerin “BFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno) Quasi-Newton (Q-N) kübik doğrultu belirleme algoritması (BFGS Q-N CLSA)” çözümlemesi için yedi farklı kinetik modelden elde edilen istatistiksel performans indikatörleri (en uygun değer koyu renk ile gösterilmiştir)

| Performans indikatörleri                                                                                                                              | Kinetik modeller |       |        |               |        |        |               |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|-------|--------|---------------|--------|--------|---------------|
|                                                                                                                                                       | MGM              | TF    | LF     | MTM           | İFÜİM  | BDF    | CHM           |
| Determinasyon katsayısı<br>$R^2 = \frac{\left( \sum_{i=1}^n (O_i - O_m)(P_i - P_m) \right)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - O_m)^2 \sum_{i=1}^n (P_i - P_m)^2}$ | 0.936            | 0.426 | 0.856  | <b>0.970</b>  | 0.958  | 0.919  | <b>0.970</b>  |
| Ortalama mutlak hata<br>$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n  P_i - O_i $                                                                                  | 26.065           | NaN   | 39.406 | <b>15.496</b> | 19.672 | 59.024 | 15.865        |
| Ortalama karesel hatanın karekökü<br>$RMSE = \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [P_i - O_i]^2 \right)^{0.5}$                                             | 33.810           | NaN   | 54.746 | 23.206        | 27.067 | 70.505 | <b>22.889</b> |
| Sistemik ortalama RMSE<br>$RMSE_S = \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [(P_i)_{reg} - O_i]^2 \right)^{0.5}$                                              | 12.293           | NaN   | 39.080 | 6.534         | 5.538  | 65.516 | <b>3.960</b>  |

**Tablo 5.10** Köpek maması atıksuyuna ait verilerin “BFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno) Quasi-Newton (Q-N) kübik doğrultu belirleme algoritması (BFGS Q-N CLSA)” çözümlemesi için yedi farklı kinetik modelden elde edilen istatistiksel performans indikatörleri (en uygun değer koyu renk ile gösterilmiştir) (devamı)

|                                                                                                                                             |        |       |              |               |        |        |              |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|-------|--------------|---------------|--------|--------|--------------|
| <p>Unsistematiik ortalama karesel hata</p> $RMSE_U = \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [(P_i)_{reg} - P_i]^2 \right)^{0.5}$                   | 31.496 | NaN   | 38.339       | <b>22.267</b> | 26.495 | 26.049 | 22.544       |
| <p>Sistematiik hata oranı</p> $PSE = \frac{(RMSE_S)^2}{(RMSE_U)^2}$                                                                         | 0.152  | 0.891 | 1.039        | 0.086         | 0.044  | 6.326  | <b>0.031</b> |
| <p>Uyumluluk indeksi</p> $IA = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n ( P_i - O_m  +  O_i - O_m )^2}$                           | 0.982  | 0.000 | 0.943        | <b>0.992</b>  | 0.989  | 0.904  | <b>0.992</b> |
| <p>Fraksiyonel varyans</p> $\sigma_p = \sqrt{\frac{\sum (P_i - P_m)^2}{n - 1}}$ $FV = \frac{2(\sigma_o - \sigma_p)}{(\sigma_o + \sigma_p)}$ | 0.063  | 2.000 | 0.268        | 0.035         | 0.021  | 0.361  | <b>0.015</b> |
| <p>2'nin faktörü</p> $0.5 \leq FA2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{O_i}{P_i} \right) \leq 2$                                        | 0.947  | 0.704 | <b>0.969</b> | NaN           | NaN    | NaN    | 0.952        |

**Tablo 5.11** Balık atıksuyuna ait verilerin “Nelder-Mead simpleks doğrudan arama algoritması (N-M SDSA)” çözümlemesi için yedi farklı kinetik modelden elde edilen istatistiksel performans indikatörleri (en uygun değer koyu renk ile gösterilmiştir)

| Performans indikatörleri                                                                                                                                  | Kinetik modeller |        |               |        |         |         |        |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|--------|---------------|--------|---------|---------|--------|
|                                                                                                                                                           | MGM              | TF     | LF            | MTM    | İFÜİM   | BDF     | CHM    |
| <p>Determinasyon katsayısı</p> $R^2 = \frac{\left( \sum_{i=1}^n (O_i - O_m)(P_i - P_m) \right)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - O_m)^2 \sum_{i=1}^n (P_i - P_m)^2}$ | 0.983            | 0.914  | <b>0.991</b>  | 0.913  | 0.655   | 0.033   | 0.914  |
| <p>Ortalama mutlak hata</p> $MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n  P_i - O_i $                                                                                  | 33.846           | 73.523 | <b>24.293</b> | 81.135 | 187.336 | 258.071 | 74.019 |
| <p>Ortalama karesel hatanın karekökü</p> $RMSE = \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [P_i - O_i]^2 \right)^{0.5}$                                             | 40.583           | 83.502 | <b>29.855</b> | 98.714 | 216.975 | 279.804 | 84.090 |
| <p>Sistemik ortalama RMSE</p> $RMSE_S = \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [(P_i)_{reg} - O_i]^2 \right)^{0.5}$                                              | 13.118           | 24.535 | <b>9.296</b>  | 72.882 | 206.589 | 275.176 | 16.960 |
| <p>Unsistemik ortalama karesel hata</p> $RMSE_U = \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [(P_i)_{reg} - P_i]^2 \right)^{0.5}$                                    | 38.405           | 79.816 | <b>28.371</b> | 66.578 | 66.325  | 50.678  | 82.362 |
| <p>Sistemik hata oranı</p> $PSE = \frac{(RMSE_S)^2}{(RMSE_U)^2}$                                                                                          | 0.117            | 0.094  | <b>0.107</b>  | 1.198  | 9.702   | 29.484  | 0.042  |

**Tablo 5.11** Balık atıksuyuna ait verilerin “Nelder-Mead simpleks doğrudan arama algoritması (N-M SDSA)” çözümlemesi için yedi farklı kinetik modelden elde edilen istatistiksel performans indikatörleri (en uygun değer koyu renk ile gösterilmiştir) (devamı)

|                                                                                                                                             |        |              |              |       |       |       |              |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|--------------|--------------|-------|-------|-------|--------------|
| <p>Uyumluluk indeksi</p> $IA = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n ( P_i - O_m  +  O_i - O_m )^2}$                           | 0.995  | 0.977        | <b>0.997</b> | 0.962 | 0.690 | 0.153 | 0.977        |
| <p>Fraksiyonel varyans</p> $\sigma_p = \sqrt{\frac{\sum (P_i - P_m)^2}{n - 1}}$ $FV = \frac{2(\sigma_o - \sigma_p)}{(\sigma_o + \sigma_p)}$ | -0.036 | 0.045        | -0.026       | 0.232 | 0.863 | 1.387 | <b>0.014</b> |
| <p>2'nin faktörü</p> $0.5 \leq FA2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{O_i}{P_i} \right) \leq 2$                                        | NaN    | <b>0.717</b> | NaN          | NaN   | NaN   | NaN   | 0.642        |

**Tablo 5.12** Balık atıksuyuna ait verilerin “BFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno) Quasi-Newton (Q-N) kübik doğrultu belirleme algoritması (BFGS Q-N CLSA)” çözümlemesi için yedi farklı kinetik modelden elde edilen istatistiksel performans indikatörleri (en uygun değer koyu renk ile gösterilmiştir)

| Performans indikatörleri                                                                                                                                  | Kinetik modeller |       |              |       |       |       |       |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|-------|--------------|-------|-------|-------|-------|
|                                                                                                                                                           | MGM              | TF    | LF           | MTM   | İFÜİM | BDF   | CHM   |
| <p>Determinasyon katsayısı</p> $R^2 = \frac{\left( \sum_{i=1}^n (O_i - O_m)(P_i - P_m) \right)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - O_m)^2 \sum_{i=1}^n (P_i - P_m)^2}$ | 0.983            | 0.079 | <b>0.991</b> | 0.485 | 0.118 | 0.033 | 0.914 |

**Tablo 5.12** Balık atıksuyuna ait verilerin “BFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno) Quasi-Newton (Q-N) kübik doğrultu belirleme algoritması (BFGS Q-N CLSA)” çözümlemesi için yedi farklı kinetik modelden elde edilen istatistiksel performans indikatörleri (en uygun değer koyu renk ile gösterilmiştir) (devamı)

|                                                                                                                       |        |       |               |         |         |         |        |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|-------|---------------|---------|---------|---------|--------|
| Ortalama mutlak hata<br>$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n  P_i - O_i $                                                  | 33.846 | NaN   | <b>24.293</b> | 214.967 | 250.701 | 258.071 | 79.017 |
| Ortalama karesel hatanın<br>karekökü<br>$RMSE = \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [P_i - O_i]^2 \right)^{0.5}$          | 40.583 | NaN   | <b>29.855</b> | 244.303 | 271.572 | 279.804 | 95.791 |
| Sistemik ortalama RMSE<br>$RMSE_S = \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [(P_i)_{reg} - O_i]^2 \right)^{0.5}$              | 13.118 | NaN   | <b>9.296</b>  | 236.170 | 267.341 | 275.176 | 67.618 |
| Unsistemik ortalama<br>karesel hata<br>$RMSE_U = \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [(P_i)_{reg} - P_i]^2 \right)^{0.5}$ | 38.405 | NaN   | <b>28.371</b> | 62.511  | 47.747  | 50.678  | 67.851 |
| Sistemik hata oranı<br>$PSE = \frac{(RMSE_S)^2}{(RMSE_U)^2}$                                                          | 0.117  | 0.137 | <b>0.107</b>  | 14.274  | 31.350  | 29.484  | 0.993  |
| Uyumluluk indeksi<br>$IA = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n ( P_i - O_m  +  O_i - O_m )^2}$         | 0.995  | 0.000 | <b>0.997</b>  | 0.575   | 0.212   | 0.153   | 0.965  |

**Tablo 5.12** Balık atıksuyuna ait verilerin “BFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno) Quasi-Newton (Q-N) kübik doğrultu belirleme algoritması (BFGS Q-N CLSA)” çözümlemesi için yedi farklı kinetik modelden elde edilen istatistiksel performans indikatörleri (en uygun değer koyu renk ile gösterilmiştir) (devamı)

|                                                                                                                                           |        |              |               |       |       |       |       |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|--------------|---------------|-------|-------|-------|-------|
| <p>Fraksiyonel varyans</p> $\sigma_p = \sqrt{\frac{\sum (P_i - P_m)^2}{n-1}}$ $FV = \frac{2(\sigma_o - \sigma_p)}{(\sigma_o + \sigma_p)}$ | -0.036 | -2.000       | <b>-0.026</b> | 1.063 | 1.394 | 1.387 | 0.207 |
| <p>2'nin faktörü</p> $0.5 \leq FA2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{O_i}{P_i} \right) \leq 2$                                      | NaN    | <b>0.934</b> | NaN           | NaN   | NaN   | NaN   | 0.775 |

**Tablo 5.13** Tavuk gübresi atıksuyuna ait verilerin “Nelder-Mead simpleks doğrudan arama algoritması (N-M SDSA)” çözümlemesi için yedi farklı kinetik modelden elde edilen istatistiksel performans indikatörleri (en uygun değer koyu renk ile gösterilmiştir)

| Performans indikatörleri                                                                                                                                  | Kinetik modeller |        |               |        |         |         |        |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|--------|---------------|--------|---------|---------|--------|
|                                                                                                                                                           | MGM              | TF     | LF            | MTM    | İFÜİM   | BDF     | CHM    |
| <p>Determinasyon katsayısı</p> $R^2 = \frac{\left( \sum_{i=1}^n (O_i - O_m)(P_i - P_m) \right)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - O_m)^2 \sum_{i=1}^n (P_i - P_m)^2}$ | 0.982            | 0.911  | <b>0.986</b>  | 0.910  | 0.047   | 0.047   | 0.911  |
| <p>Ortalama mutlak hata</p> $MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n  P_i - O_i $                                                                                  | 35.806           | 67.339 | <b>28.579</b> | 71.944 | 234.130 | 234.130 | 69.156 |

**Tablo 5.13** Tavuk gübresi atıksuyuna ait verilerin “Nelder-Mead simpleks doğrudan arama algoritması (N-M SDSA)” çözümlemesi için yedi farklı kinetik modelden elde edilen istatistiksel performans indikatörleri (en uygun değer koyu renk ile gösterilmiştir) (devamı)

|                                                                                                                                          |        |        |               |        |         |         |        |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|--------|---------------|--------|---------|---------|--------|
| Ortalama karesel hatanın<br>karekökü<br>$RMSE = \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [P_i - O_i]^2 \right)^{0.5}$                             | 44.320 | 77.304 | <b>33.668</b> | 84.767 | 252.431 | 252.431 | 81.085 |
| Sistemik ortalama RMSE<br>$RMSE_S = \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [(P_i)_{reg} - O_i]^2 \right)^{0.5}$                                 | 23.548 | 23.116 | <b>12.254</b> | 55.043 | 246.481 | 246.481 | 44.892 |
| Unsistemik ortalama<br>karesel hata<br>$RMSE_U = \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [(P_i)_{reg} - P_i]^2 \right)^{0.5}$                    | 37.547 | 73.767 | <b>31.359</b> | 64.465 | 54.480  | 54.480  | 67.524 |
| Sistemik hata oranı<br>$PSE = \frac{(RMSE_S)^2}{(RMSE_U)^2}$                                                                             | 0.393  | 0.098  | <b>0.153</b>  | 0.729  | 20.469  | 20.469  | 0.442  |
| Uyumluluk indeksi<br>$IA = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n ( P_i - O_m  +  O_i - O_m )^2}$                            | 0.993  | 0.976  | <b>0.996</b>  | 0.967  | 0.206   | 0.206   | 0.971  |
| Fraksiyonel varyans<br>$\sigma_p = \sqrt{\frac{\sum (P_i - P_m)^2}{n-1}}$<br>$FV = \frac{2(\sigma_o - \sigma_p)}{(\sigma_o + \sigma_p)}$ | -0.069 | 0.047  | <b>-0.038</b> | 0.183  | 1.290   | 1.290   | 0.135  |

**Tablo 5.13** Tavuk gübresi atıksuyuna ait verilerin “Nelder-Mead simpleks doğrudan arama algoritması (N-M SDSA)” çözümlemesi için yedi farklı kinetik modelden elde edilen istatistiksel performans indikatörleri (en uygun değer koyu renk ile gösterilmiştir) (devamı)

|                                                                                 |     |       |              |     |     |     |       |
|---------------------------------------------------------------------------------|-----|-------|--------------|-----|-----|-----|-------|
| 2'nin faktörü                                                                   |     |       |              |     |     |     |       |
| $0.5 \leq FA2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{O_i}{P_i} \right) \leq 2$ | NaN | 2.474 | <b>1.800</b> | NaN | NaN | NaN | 0.819 |

**Tablo 5.14** Tavuk gübresi atıksuyuna ait verilerin “BFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno) Quasi-Newton (Q-N) kübik doğrultu belirleme algoritması (BFGS Q-N CLSA)” çözümlemesi için yedi farklı kinetik modelden elde edilen istatistiksel performans indikatörleri (en uygun değer koyu renk ile gösterilmiştir)

| Performans indikatörleri                                                                                                                              | Kinetik modeller |       |               |         |         |         |        |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|-------|---------------|---------|---------|---------|--------|
|                                                                                                                                                       | MGM              | TF    | LF            | MTM     | İFÜİM   | BDF     | CHM    |
| Determinasyon katsayısı<br>$R^2 = \frac{\left( \sum_{i=1}^n (O_i - O_m)(P_i - P_m) \right)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - O_m)^2 \sum_{i=1}^n (P_i - P_m)^2}$ | 0.982            | 0.106 | <b>0.986</b>  | 0.528   | 0.047   | 0.047   | 0.911  |
| Ortalama mutlak hata<br>$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n  P_i - O_i $                                                                                  | 35.806           | NaN   | <b>28.579</b> | 193.637 | 234.130 | 234.130 | 69.536 |
| Ortalama karesel hatanın karekökü<br>$RMSE = \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [P_i - O_i]^2 \right)^{0.5}$                                             | 44.320           | NaN   | <b>33.668</b> | 219.203 | 252.431 | 252.431 | 81.687 |
| Sistemik ortalama RMSE<br>$RMSE_S = \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [(P_i)_{reg} - O_i]^2 \right)^{0.5}$                                              | 23.548           | NaN   | <b>12.254</b> | 211.813 | 246.481 | 246.481 | 46.697 |

**Tablo 5.14** Tavuk gübresi atıksuyuna ait verilerin “BFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno) Quasi-Newton (Q-N) kübik doğrultu belirleme algoritması (BFGS Q-N CLSA)” çözümlemesi için yedi farklı kinetik modelden elde edilen istatistiksel performans indikatörleri (en uygun değer koyu renk ile gösterilmiştir) (devamı)

|                                                                                                                                             |        |        |               |        |        |        |              |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|--------|---------------|--------|--------|--------|--------------|
| <p>Unsistematiik ortalama karesel hata</p> $RMSE_U = \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [(P_i)_{reg} - P_i]^2 \right)^{0.5}$                   | 37.547 | NaN    | <b>31.359</b> | 56.436 | 54.480 | 54.480 | 67.023       |
| <p>Sistematiik hata oranı</p> $PSE = \frac{(RMSE_S)^2}{(RMSE_U)^2}$                                                                         | 0.393  | 0.185  | <b>0.153</b>  | 14.086 | 20.469 | 20.469 | 0.485        |
| <p>Uyumluluk indeksi</p> $IA = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n ( P_i - O_m  +  O_i - O_m )^2}$                           | 0.993  | 0.000  | <b>0.996</b>  | 0.601  | 0.206  | 0.206  | 0.971        |
| <p>Fraksiyonel varyans</p> $\sigma_p = \sqrt{\frac{\sum (P_i - P_m)^2}{n - 1}}$ $FV = \frac{2(\sigma_o - \sigma_p)}{(\sigma_o + \sigma_p)}$ | -0.069 | -2.000 | <b>-0.038</b> | 1.036  | 1.290  | 1.290  | 0.143        |
| <p>2'nin faktörü</p> $0.5 \leq FA2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{O_i}{P_i} \right) \leq 2$                                        | NaN    | 0.954  | 1.800         | NaN    | NaN    | NaN    | <b>0.989</b> |

**Tablo 5.15** Bisküvi atıksuyuna ait verilerin “Nelder-Mead simpleks doğrudan arama algoritması (N-M SDSA)” çözümlemesi için yedi farklı kinetik modelden elde edilen istatistiksel performans indikatörleri (en uygun değer koyu renk ile gösterilmiştir)

| Performans indikatörleri                                                                                                                              | Kinetik modeller |            |                   |             |             |             |            |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|------------|-------------------|-------------|-------------|-------------|------------|
|                                                                                                                                                       | MGM              | TF         | LF                | MTM         | İFÜİM       | BDF         | CHM        |
| Determinasyon katsayısı<br>$R^2 = \frac{\left( \sum_{i=1}^n (O_i - O_m)(P_i - P_m) \right)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - O_m)^2 \sum_{i=1}^n (P_i - P_m)^2}$ | 0.982            | 0.822      | <b>0.985</b>      | 0.375       | 0.029       | 0.029       | 0.822      |
| Ortalama mutlak hata<br>$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n  P_i - O_i $                                                                                  | 23.34<br>1       | 48.80<br>2 | <b>20.52</b><br>3 | 107.24<br>5 | 128.63<br>1 | 128.63<br>1 | 48.81<br>2 |
| Ortalama karesel hatanın karekökü<br>$RMSE = \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [P_i - O_i]^2 \right)^{0.5}$                                             | 28.46<br>0       | 59.48<br>1 | <b>24.79</b><br>6 | 127.17<br>0 | 138.80<br>3 | 138.80<br>3 | 59.48<br>6 |
| Sistemik ortalama RMSE<br>$RMSE_S = \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [(P_i)_{reg} - O_i]^2 \right)^{0.5}$                                              | 19.31<br>3       | 25.03<br>7 | <b>16.12</b><br>9 | 123.88<br>5 | 136.76<br>5 | 136.76<br>5 | 24.39<br>2 |
| Unsistemik ortalama karesel hata<br>$RMSE_U = \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [(P_i)_{reg} - P_i]^2 \right)^{0.5}$                                    | 20.90<br>5       | 53.95<br>4 | <b>18.83</b><br>3 | 28.716      | 23.695      | 23.695      | 54.25<br>5 |
| Sistemik hata oranı<br>$PSE = \frac{(RMSE_S)^2}{(RMSE_U)^2}$                                                                                          | 0.853            | 0.215      | <b>0.733</b>      | 18.611      | 33.316      | 33.316      | 0.202      |

**Tablo 5.15** Bisküvi atıksuyuna ait verilerin “Nelder-Mead simpleks doğrudan arama algoritması (N-M SDSA)” çözümlemesi için yedi farklı kinetik modelden elde edilen istatistiksel performans indikatörleri (en uygun değer koyu renk ile gösterilmiştir) (devamı)

|                                                                                                                                             |        |       |              |       |       |       |              |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|-------|--------------|-------|-------|-------|--------------|
| <p>Uyumluluk indeksi</p> $IA = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n ( P_i - O_m  +  O_i - O_m )^2}$                           | 0.991  | 0.949 | <b>0.993</b> | 0.495 | 0.143 | 0.143 | 0.949        |
| <p>Fraksiyonel varyans</p> $\sigma_p = \sqrt{\frac{\sum (P_i - P_m)^2}{n - 1}}$ $FV = \frac{2(\sigma_o - \sigma_p)}{(\sigma_o + \sigma_p)}$ | -0.089 | 0.097 | <b>0.076</b> | 1.180 | 1.417 | 1.417 | 0.092        |
| <p>2'nin faktörü</p> $0.5 \leq FA2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{O_i}{P_i} \right) \leq 2$                                        | NaN    | 0.744 | NaN          | NaN   | NaN   | NaN   | <b>0.795</b> |

**Tablo 5.16** Bisküvi atıksuyuna ait verilerin “BFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno) Quasi-Newton (Q-N) kübik doğrultu belirleme algoritması (BFGS Q-N CLSA)” çözümlemesi için yedi farklı kinetik modelden elde edilen istatistiksel performans indikatörleri (en uygun değer koyu renk ile gösterilmiştir)

| Performans indikatörleri                                                                                                                                  | Kinetik modeller |       |              |       |       |       |       |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|-------|--------------|-------|-------|-------|-------|
|                                                                                                                                                           | MGM              | TF    | LF           | MTM   | İFÜİm | BDF   | CHM   |
| <p>Determinasyon katsayısı</p> $R^2 = \frac{\left( \sum_{i=1}^n (O_i - O_m)(P_i - P_m) \right)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - O_m)^2 \sum_{i=1}^n (P_i - P_m)^2}$ | 0.982            | 0.822 | <b>0.985</b> | 0.375 | 0.029 | 0.029 | 0.822 |

**Tablo 5.16** Bisküvi atıksuyuna ait verilerin “BFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno) Quasi-Newton (Q-N) kübik doğrultu belirleme algoritması (BFGS Q-N CLSA)” çözümlemesi için yedi farklı kinetik modelden elde edilen istatistiksel performans indikatörleri (en uygun değer koyu renk ile gösterilmiştir) (devamı)

|                                                                                                                    |        |        |               |         |         |         |        |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|--------|---------------|---------|---------|---------|--------|
| Ortalama mutlak hata<br>$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n  P_i - O_i $                                               | 23.341 | 48.802 | <b>20.523</b> | 107.245 | 128.631 | 128.631 | 48.812 |
| Ortalama karesel hatanın karekökü<br>$RMSE = \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [P_i - O_i]^2 \right)^{0.5}$          | 28.460 | 59.481 | <b>24.796</b> | 127.170 | 138.803 | 138.803 | 59.486 |
| Sistemik ortalama RMSE<br>$RMSE_S = \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [(P_i)_{reg} - O_i]^2 \right)^{0.5}$           | 19.313 | 25.037 | <b>16.129</b> | 123.885 | 136.765 | 136.765 | 24.392 |
| Unsistemik ortalama karesel hata<br>$RMSE_U = \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [(P_i)_{reg} - P_i]^2 \right)^{0.5}$ | 20.905 | 53.954 | <b>18.833</b> | 28.716  | 23.695  | 23.695  | 54.255 |
| Sistemik hata oranı<br>$PSE = \frac{(RMSE_S)^2}{(RMSE_U)^2}$                                                       | 0.853  | 0.215  | <b>0.733</b>  | 18.611  | 33.316  | 33.316  | 0.202  |
| Uyumluluk indeksi<br>$IA = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n ( P_i - O_m  +  O_i - O_m )^2}$      | 0.991  | 0.949  | <b>0.993</b>  | 0.495   | 0.143   | 0.143   | 0.949  |

**Tablo 5.16** Bisküvi atıksuyuna ait verilerin “BFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno) Quasi-Newton (Q-N) kübik doğrultu belirleme algoritması (BFGS Q-N CLSA)” çözümlemesi için yedi farklı kinetik modelden elde edilen istatistiksel performans indikatörleri (en uygun değer koyu renk ile gösterilmiştir) (devamı)

|                                                                                                                                           |            |       |               |       |       |       |              |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|-------|---------------|-------|-------|-------|--------------|
| <p>Fraksiyonel varyans</p> $\sigma_p = \sqrt{\frac{\sum (P_i - P_m)^2}{n-1}}$ $FV = \frac{2(\sigma_o - \sigma_p)}{(\sigma_o + \sigma_p)}$ | -<br>0.089 | 0.097 | <b>-0.076</b> | 1.180 | 1.417 | 1.417 | 0.092        |
| <p>2'nin faktörü</p> $0.5 \leq FA2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{O_i}{P_i} \right) \leq 2$                                      | NaN        | 0.744 | NaN           | NaN   | NaN   | NaN   | <b>0.795</b> |

**Tablo 5.17** Sebze atıksuyuna ait verilerin “Nelder-Mead simpleks doğrudan arama algoritması (N-M SDSA)” çözümlemesi için yedi farklı kinetik modelden elde edilen istatistiksel performans indikatörleri (en uygun değer koyu renk ile gösterilmiştir)

| Performans indikatörleri                                                                                                                                  | Kinetik modeller |        |               |        |         |         |        |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|--------|---------------|--------|---------|---------|--------|
|                                                                                                                                                           | MGM              | TF     | LF            | MTM    | İFÜİM   | BDF     | CHM    |
| <p>Determinasyon katsayısı</p> $R^2 = \frac{\left( \sum_{i=1}^n (O_i - O_m)(P_i - P_m) \right)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - O_m)^2 \sum_{i=1}^n (P_i - P_m)^2}$ | 0.985            | 0.962  | <b>0.988</b>  | 0.959  | 0.083   | 0.083   | 0.961  |
| <p>Ortalama mutlak hata</p> $MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n  P_i - O_i $                                                                                  | 13.252           | 24.958 | <b>10.482</b> | 26.141 | 131.215 | 131.215 | 25.476 |

**Tablo 5.17** Sebze atıksuyuna ait verilerin “Nelder-Mead simpleks doğrudan arama algoritması (N-M SDSA)” çözümlemesi için yedi farklı kinetik modelden elde edilen istatistiksel performans indikatörleri (en uygun değer koyu renk ile gösterilmiştir) (devamı)

|                                                                                                                                          |        |        |               |        |         |         |        |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|--------|---------------|--------|---------|---------|--------|
| Ortalama karesel hatanın karekökü<br>$RMSE = \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [P_i - O_i]^2 \right)^{0.5}$                                | 18.322 | 28.958 | <b>16.261</b> | 31.218 | 143.149 | 143.149 | 29.650 |
| Sistemik ortalama RMSE<br>$RMSE_S = \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [(P_i)_{reg} - O_i]^2 \right)^{0.5}$                                 | 1.219  | 5.608  | <b>2.504</b>  | 13.122 | 137.055 | 137.055 | 5.880  |
| Unsistemik ortalama karesel hata<br>$RMSE_U = \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [(P_i)_{reg} - P_i]^2 \right)^{0.5}$                       | 18.281 | 28.409 | <b>16.067</b> | 28.327 | 41.322  | 41.322  | 29.061 |
| Sistemik hata oranı<br>$PSE = \frac{(RMSE_S)^2}{(RMSE_U)^2}$                                                                             | 0.004  | 0.039  | <b>0.024</b>  | 0.215  | 11.001  | 11.001  | 0.041  |
| Uyumluluk indeksi<br>$IA = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n ( P_i - O_m  +  O_i - O_m )^2}$                            | 0.996  | 0.990  | <b>0.997</b>  | 0.988  | 0.313   | 0.313   | 0.990  |
| Fraksiyonel varyans<br>$\sigma_p = \sqrt{\frac{\sum (P_i - P_m)^2}{n-1}}$<br>$FV = \frac{2(\sigma_o - \sigma_p)}{(\sigma_o + \sigma_p)}$ | -0.005 | 0.019  | <b>0.011</b>  | 0.067  | 1.104   | 1.104   | 0.020  |

**Tablo 5.17** Sebze atıksuyuna ait verilerin “Nelder-Mead simpleks doğrudan arama algoritması (N-M SDSA)” çözümlemesi için yedi farklı kinetik modelden elde edilen istatistiksel performans indikatörleri (en uygun değer koyu renk ile gösterilmiştir) (devamı)

|                                                                                 |       |       |              |     |     |     |       |
|---------------------------------------------------------------------------------|-------|-------|--------------|-----|-----|-----|-------|
| 2'nin faktörü                                                                   |       |       |              |     |     |     |       |
| $0.5 \leq FA2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{O_i}{P_i} \right) \leq 2$ | 1.088 | 0.923 | <b>0.956</b> | NaN | NaN | NaN | 0.845 |

**Tablo 5.18** Sebze atıksuyuna ait verilerin “BFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno) Quasi-Newton (Q-N) kübik doğrultu belirleme algoritması (BFGS Q-N CLSA)” çözümlemesi için yedi farklı kinetik modelden elde edilen istatistiksel performans indikatörleri (en uygun değer koyu renk ile gösterilmiştir)

| Performans indikatörleri                                                                                                                              | Kinetik modeller |       |               |        |         |         |        |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|-------|---------------|--------|---------|---------|--------|
|                                                                                                                                                       | MGM              | TF    | LF            | MTM    | İFÜİM   | BDF     | CHM    |
| Determinasyon katsayısı<br>$R^2 = \frac{\left( \sum_{i=1}^n (O_i - O_m)(P_i - P_m) \right)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - O_m)^2 \sum_{i=1}^n (P_i - P_m)^2}$ | 0.985            | 0.211 | <b>0.988</b>  | 0.961  | 0.083   | 0.083   | 0.961  |
| Ortalama mutlak hata<br>$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n  P_i - O_i $                                                                                  | 13.252           | NaN   | <b>10.482</b> | 26.523 | 131.215 | 131.215 | 25.476 |
| Ortalama karesel hatanın karekökü<br>$RMSE = \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [P_i - O_i]^2 \right)^{0.5}$                                             | 18.322           | NaN   | <b>16.261</b> | 31.984 | 143.149 | 143.149 | 29.650 |
| Sistematiik ortalama RMSE<br>$RMSE_S = \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [(P_i)_{reg} - O_i]^2 \right)^{0.5}$                                           | 1.219            | NaN   | <b>2.504</b>  | 17.490 | 137.055 | 137.055 | 5.880  |

**Tablo 5.18** Sebze atıksuyuna ait verilerin “BFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno) Quasi-Newton (Q-N) kübik doğrultu belirleme algoritması (BFGS Q-N CLSA)” çözümlemesi için yedi farklı kinetik modelden elde edilen istatistiksel performans indikatörleri (en uygun değer koyu renk ile gösterilmiştir) (devamı)

|                                                                                                                                           |        |        |               |        |        |        |        |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|--------|---------------|--------|--------|--------|--------|
| <p>Unsistemik ortalama karesel hata</p> $RMSE_U = \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [(P_i)_{reg} - P_i]^2 \right)^{0.5}$                    | 18.281 | NaN    | <b>16.067</b> | 26.778 | 41.322 | 41.322 | 29.061 |
| <p>Sistemik hata oranı</p> $PSE = \frac{(RMSE_S)^2}{(RMSE_U)^2}$                                                                          | 0.004  | 0.373  | <b>0.024</b>  | 0.427  | 11.001 | 11.001 | 0.041  |
| <p>Uyumluluk indeksi</p> $IA = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n ( P_i - O_m  +  O_i - O_m )^2}$                         | 0.996  | 0.000  | <b>0.997</b>  | 0.987  | 0.313  | 0.313  | 0.990  |
| <p>Fraksiyonel varyans</p> $\sigma_p = \sqrt{\frac{\sum (P_i - P_m)^2}{n-1}}$ $FV = \frac{2(\sigma_o - \sigma_p)}{(\sigma_o + \sigma_p)}$ | -0.005 | -2.000 | <b>0.011</b>  | 0.103  | 1.104  | 1.104  | 0.020  |
| <p>2'nin faktörü</p> $0.5 \leq FA2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{O_i}{P_i} \right) \leq 2$                                      | 1.088  | 0.788  | <b>0.956</b>  | NaN    | NaN    | NaN    | 0.845  |

## 6 SONUÇ VE ÖNERİLER

---

Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen biyokimyasal metan potansiyeli deneylerinde besi maddesi olarak balık, peynir, mezbaha, köpek maması, tavuk gübresi, bisküvi ve sebze atıksuları kullanılarak hem deneysel hem de hesaplamalı olarak çalışılmıştır. Kullanılan atıksuların pH, çözünmüş kimyasal oksijen ihtiyacı, kimyasal oksijen ihtiyacı, amonyak azotu, alkalinite, orto-fosfat, uçucu organik katı ve besin/aşı oranı parametreleri hesaplanmış ve elde edilen sonuçlar literatür ile karşılaştırılmış ve doğrulanmıştır.

Yapılan çalışmaların sonucunda, balık işleme atıksuyu metan üretim potansiyeli açısından en yüksek substrat olarak bulunmuştur. Ayrıca incelenen besi maddelerinin metan üretimi açısından aktif substrat kaynakları olarak kullanılabileceği belirlenmiştir. Substratların nihai metan üretimleri sonuçlarında çıkan farklılıkların atıksuların karakteristik yapılarından ileri gelmekte olduğunu gösterilmiştir.

Literatür araştırmasına göre, bisküvi, köpek maması ve sebze atıksuyu gibi substrat kaynaklarının biyokimyasal metan potansiyellerinin araştırılmasında büyük bir eksiklik olduğu görülmüştür. Aynı zamanda kullanılan substratlar ile yapılan biyokimyasal metan potansiyeli deney sonuçlarının MATLAB® programında modellenmesine yönelik literatür eksikliği olduğu görülmüş ve bu açığın giderilmesi hedeflenmiştir.

BMP testlerinde kullanılan yedi agro-endüstriyel besi maddesi için elde edilen deneysel verilerin “hibrid programlama stratejisi” (kısıtlamasız doğrusal olmayan optimizasyon, birçok farklı istatistiksel performans indikatörünün belirlenmesi ve hammaddelerin metan verimliliğinin ekonomik bir değerlendirmesi) kapsamındaki kinetik modelleme ve istatistiksel analiz sonuçlarına göre mezbaha atıksuyu biyobozunurluk sürecini en iyi temsil eden kinetik modelin modifiye Gompertz denklemi olduğu belirlenmiştir ( $R^2 = 0.990$ ). Bununla birlikte, köpek maması atıksuyunun havasız şartlardaki parçalanma sürecinin hem Monod tipi model hem

de Chen-Hashimoto modeli ile başarılı bir şekilde modellenebileceği tespit edilmiştir ( $R^2 = 0.970$ ). Çalışma kapsamında kullanılan diğer tüm substrat kaynaklarının (peyniraltı atıksuyu, balık atıksuyu, tavuk gübresi atıksuyu, bisküvi atıksuyu, sebze atıksuyu) biyometanizasyon süreçlerinin modellenmesinde en başarılı kinetik modelin lojistik fonksiyon olduğu görülmüştür ( $R^2 = 0.985-0.991$ ). Bu çalışma kapsamında göz önüne alınan arama algoritmalarının (Nelder-Mead simpleks doğrudan arama algoritması: N-M SDSA ve BFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno) Quasi-Newton (Q-N) kübik doğrultu belirleme algoritması: BFGS Q-N CLSA), ilgili besi maddesine ait deneysel verilerin modellenmesinde birbirine yakın sonuçlar vermesi durumunda, optimizasyon sürecine ait fonksiyon sayıları ve doğrusal olmayan iterasyon sayıları karşılaştırılmış olup, BFGS Q-N CLSA metodunun N-M SDSA yöntemine nazaran kantitatif açıdan daha kısa sürede iterasyon döngüsünü sonuçlandırabildiği görülmüştür.

BMP testlerinde kullanılan yedi farklı agro-endüstriyel substrat kaynağı için “hibrit modelleme stratejisi” kapsamında belirlenen “en uygun kinetik modellerin tahmin değerleri” esas alınarak elde edilen enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçlarına göre (biyogazın enerji değeri = 7.0 kWh/m<sup>3</sup>, yanma prosesinin verimi = %80, ısı-elektrik dönüşüm verimi = %25, biyogazdaki metan muhtevası kabulü = %65 ve kWh başında güncel elektrik maliyeti için); mezbaha atıksuyu için elde edilebilecek enerji değerinin 836 kWh/ton UKM ve biyogaz kaynaklı elektrik enerjisi gelirinin (satış veya tesis içerisinde kullanılması ile) 56€/ton UKM olduğu belirlenmiştir. Benzer şekilde, köpek mamasının substrat kaynağı olarak kabul edilmesi durumunda, bu besi maddesinden sağlanabilecek elde edilebilecek enerji değerinin 1032-1043 kWh/ton UKM (iki farklı modele göre) ve biyogaz kaynaklı elektrik enerjisi gelirinin ise 69-70€/ton UKM olduğu hesaplanmıştır. Diğer besi maddeleri için enerji/ekonomik esaslı analiz sonuçları (tahmini enerji değeri ve biyogaz kaynaklı elektrik enerjisi kazancı) şu şekilde belirlenmiştir: peyniraltı atıksuyu: 1291 kWh/ton UKM ve 87€/ton UKM, balık atıksuyu: 1558 kWh/ton UKM ve 104€/ton UKM, tavuk gübresi atıksuyu: 1454 kWh/ton UKM ve 97€/ton UKM, bisküvi atıksuyu: 769 kWh/ton UKM ve 52€/ton UKM, ve sebze atıksuyu: 848 kWh/ton UKM ve 57€/ton UKM.

Biyokimyasal metan potansiyeli biyogaz üretim tesislerinin işletilmesi ve proje detaylandırılması açısından önemli bir yere sahiptir. Ayrıca, bu bertaraf yöntemi, enerji üretimini ve atık geri kazanımını birleştirerek, bütünsel bir atık arıtma yöntemi geliştirmeyi sağlamaktadır. Bu çalışma kapsamında kullanılan son kullanma tarihi geçmiş gıdaların ve atık sebzelerin ve diğer agro-endüstriyel substrat kaynaklarının biyogaz tesislerinde kullanılmasıyla hem atıkların bertarafı hem de biyogaz üretimi ile enerji kazanımı sağlanabilir. Bu yöntem, biyogaz tesislerine ekonomik olarak önemli bir avantaj sağlayabilir. Aynı zamanda atıkların bertarafı ile çevre kirliliği açısından olumlu bir katkısı olması muhtemeldir.



- [1] Zhang Y., Liu X., Liu X., Zha Y., Xu X., Ren Z., Jiang H., and Wang H., “Research advances in deriving renewable energy from biomass in wastewater treatment plants”, RSC Advances, 6(61), 2016.
- [2] Salan T., “Atıksu Arıtma Çamurlarının Türkiye'deki Durumu ve Enerji Üretiminde Değerlendirilme Olanakları”, ICCI Conference Paper, 2014.
- [3] <http://www.tuik.gov.tr/HbGetirHTML.do?id=33705> 10.01.2020
- [4] Kara E. ve Bay T., “Arıtma Çamuru Sorunu ve Türkiye'nin İlk ve Tek Yakma Tesisi: GASKİ Atıksu Arıtma Çamuru Termal Kurutma ve Yakma Tesisi”, Su ve Çevre Teknolojileri, Teknik Makale, 91. Sayı, Şubat 2016.
- [5] Mahdıyan Nasl B., “Investigation of the effects of the whey addition on the biogas production of a reactor using cattle manure for biogas”, Gazi University, 2015.
- [6] Yenilmez F., Çelik L ve Kutlu H., “The Use of Poultry Manure in Different Areas”, Ulusal Kümes Hayvanları Kongresi 2012, İzmir.
- [7] Chamrádová K., and Rusín J., “Production of Biogas Through Anaerobic Cofermentation of Cattle Slurry with Biscuit Waste”, Institute of Environmental Technology, VSB-Technical University of Ostrava, 2016.
- [8] Molla M. K., “Mezbahalardan Kaynaklanan Atıksuların Arıtılabilirliğinin Araştırılması”, Y.lisans Tezi, Çevre Mühendisliği Anabilimdalı, Bursa Uludağ Üniversitesi, 2019.
- [9] Kafle G. K, and Kim S. H, “Evaluation of the Biogas Productivity Potential of Fish Waste: A Lab Scale Batch Study”, J. of Biosystems Eng. 37(5):302-313, 2012.
- [10] Li Y., Jin Y., Li H., Borrion A., Yu Z., and Li J., “Kinetic studies on organic degradation and its impacts on improving methane production during anaerobic digestion of food waste”, Applied Energy 213, 2018, pp. 136–147.
- [11] Esposito G., Frunzo L., Liotta F., Panico A., and Pirozzi F., “Bio-Methane Potential Tests To Measure The Biogas Production From The Digestion and Co-Digestion of Complex Organic Substrates”, The Open Environmental Engineering Journal, pp. 1-8, 2012.
- [12] Veluchamy C., Raju V. W., and Kalamdhad A.S., “Electrohydrolysis pretreatment for enhanced methane production from lignocellulose waste pulp and paper mill sludge and its kinetics”, Bioresource Technology 252, 2018, pp. 52–58.
- [13] Ware A., and Power N., “Modelling methane production kinetics of complex poultry slaughterhouse wastes using sigmoidal growth functions”,

Department of Civil, Structural and Environmental Engineering, Cork Institute of Technology, Cork, Ireland, Renewable Energy 104, 2017, pp. 50-59.

- [14] Da Silva C., Astals S., Peces M., Campos J. L., and Guerrero L., "Biochemical methane potential (BMP) tests: Reducing test time by early parameter estimation", Waste Management 71, pp. 19-24, 2018.
- [15] Esposito G., Frunzo L., Liotta F., Panico A., and Pirozzi F., "Bio-Methane Potential Tests To Measure The Biogas Production From The Digestion and Co-Digestion of Complex Organic Substrates", The Open Environmental Engineering Journal, pp. 1-8, 2012.
- [16] Gertner P., Huiliñir C., Pinto-Villegas P., Castillo A., Montalvo S., and Guerrero L., "A new model for including the effect of fly ash on biochemical methane potential", Waste Management 68, 2017, pp. 232–239.
- [17] Grosser A., "Determination of methane potential of mixtures composed of sewage sludge, organic fraction of municipal waste and grease trap sludge using biochemical methane potential assays. A comparison of BMP tests and semi-continuous trial results", Energy 143, 2018, pp. 488-499.
- [18] Jijai S., Srisuwan G., O-Thong S., Norli I. and Siripatana C., "Effect of Substrate and Granules/Inocula Sizes on Biochemical Methane Potential and Methane Kinetics", Iranica Journal of Energy and Environment 7(2): 94-101, 2016.
- [19] Kafle G. K, Kim S. H, "Evaluation of the Biogas Productivity Potential of Fish Waste: A Lab Scale Batch Study", J. of Biosystems Eng. 37(5):302-313, 2012.
- [20] Li Y., Jin Y., Li H., Borrion A., Yu Z., and Li J., "Kinetic studies on organic degradation and its impacts on improving methane production during anaerobic digestion of food waste", Applied Energy 213, 2018, pp. 136–147.
- [21] Bustillo-Lecompte, C., and Mehrvar, M., "Slaughterhouse Wastewater: Treatment, Management and Resource Recovery", Physico-Chemical Wastewater Treatment and Resource Recovery, Chp 8, pp. 153-174, 2017.
- [22] Topal M., ve Arslan-Topal E. I., "Bir Entegre Et Tesisine Ait Arıtma Tesisi Çıkış Sularının Yaz Sezonunda Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği'ne (SKKY) Uygunluğunun Araştırılması ", BAÜ Fen Bil. Enst. Dergisi Cilt 13(1), syf. 68-77, 2011.
- [23] Kolev Slavov, A., "Dairy Wastewaters – General Characteristics and Treatment Possibilities – A Review.", Food Technology and Biotechnology, pp. 55(1), 2017.
- [24] Carvalho, F., Prazeres, A. R., and Rivas, J., " Cheese whey wastewater: Characterization and treatment", Science of The Total Environment, pp. 445-446, pp. 385–396, 2013.
- [25] Pukasiewicz S. R. M., Gomes, S. D., Oliveira, J. G. B. de, and Barana, A. C. "Upflow Anaerobic Filter for Pet Food Wastewater Treatment", Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas, 38(1), pp. 55, 2017.

- [26] T.C. Ardahan Belediyesi Biyogaz ve Enerji Potansiyelinin Araştırılmasına Yönelik Fizibilite Çalışması, Boylam Mühendislik ve Çevre Yönetimi LTD. ŞTİ., syf. 30-31, Kasım 2013.
- [27] Uttamangkabovorn, M., Prasertsan, P., and Kittikun, A. H., " Water conservation in canned tuna (pet food) plant in Thailand", Journal of Cleaner Production, 13(6), pp. 547–555, 2005.
- [28] Kafle G. K, Kim S. K, and Sung K., "Ensiling of fish industry waste for biogas production: A lab scale evaluation of biochemical methane potential (BMP) and kinetics", Bioresource Technology 127, pp. 326–336, 2013.
- [29] Ching Y. C. and Redzwan G., "Biological Treatment of Fish Processing Saline Wastewater for Reuse as Liquid Fertilizer ", Sustainability, 9(7), 1062, 2017.
- [30] Tay J. H., Show K. Y., and Hung Y. T., "Seafood Processing Wastewater Treatment", Handbook of Industrial and Hazardous Wastes Treatment, CRC Press, Chp 14, pp. 647, 2004.
- [31] Bhandari, V. M., Sorokhaibam, L. G., and Ranade, V. V., "Industrial wastewater treatment for fertilizer industry—A case study", Desalination and Water Treatment, pp. 1–11, 2016.
- [32] Çevre ve Şehircilik Bakanlığı'nın Çed Alanında Kapasitesinin Güçlendirilmesi İçin Teknik Yardım Projesi, "Entegre Kimya Tesisleri: Gübre Üretim Sektörü", Sözleşme N° 2007tr16ıpo001.3.06/Ser/42, 2017.
- [33] Karagül N., "Şekerleme Endüstrisinde Proses ve Kirlenme Profili ile Arıtılabilirlik Bazlı Deneysel Karakterizasyon", Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, 2012.
- [34] Chen J. P, Yang L., Bai R., and Hung Y. T., "Waste Treatment in the Food Processing Industry", Waste Treatment in the Food Processing Industry Book, Chp 8, CNC Press, 2006.
- [35] Puchlik, M., & Ignatowicz, K., "Seasonal changes in quality of wastewater from fruit and vegetable industry.", E3S Web of Conferences, 22, 00139, 2017.
- [36] Kargi, F., Dinçer, A. R., and Pala, A., "Characterization and biological treatment of pickling industry wastewater", Bioprocess Engineering, 23(4), pp. 371–374, 2000.
- [37] Libutti, A., Gatta, G., Gagliardi, A., Vergine, P., Pollice, A., Beneduce, L., and Tarantino, E., "Agro-industrial wastewater reuse for irrigation of a vegetable crop succession under Mediterranean conditions", Agricultural Water Management, 196, pp. 1–14, 2018.
- [38] Ubay, G., "Evsel Atıksuların Havasız Biyolojik Arıtımı Üzerine Bir Araştırma", Doktora Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 1983.
- [39] Şenol H., Elibol E. A., and Açikel Ü., "Biyogaz Üretimi İçin Ankara'nın Başlıca Organik Atık Kaynakları", BEÜ Fen Bilimleri Dergisi 6(2), pp.15-28, 2017.
- [40] Bayrakçeken, H., "Biyogaz Üretim Sistemi Tasarımı ve Uygulanması", Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon, pp. 20-24, 1997.

- [41] Eryılmaz H., "Biyogaz Üretiminde Türkiye Koşullarına En Uygun Üreteç Tipinin Tespiti", T.C. Köy İşleri ve Kooperatifler Bakanlığı Toprak su Genel Müdürlüğü Merkez Toprak su Araştırma Enstitüsü Müdürlüğü yayınları, Ankara, pp. 21, 1981.
- [42] Akturman, F., "Atıksu Arıtımı ve Arıtma Teknikleri", Bilim ve Teknik, 428: 42-52, 2003.
- [43] Karataş, A., "Tavuk Gübresinin Anaerobik Parçalanması için Uygun Koşulların Belirlenmesi", Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 3-7, pp.21-28, 2006.
- [44] Gökçay, C., Demirer, G.N., Ergüder, T.H. ve Tezel, U., "Anaerobik Arıtımı Teorik Altyapı ve Uygulamaları Eğitim Semineri Notları", TMMOB Çevre Mühendisleri Odası, Ankara Şubesi, pp. 47-55, 2002.
- [45] Öztürk, İ., "Anaerobik Biyoteknoloji ve Atık Arıtımındaki Uygulamaları", Su Vakfı Yayınları, İstanbul, 1999.
- [46] Gökçay, C.F., Duran, M.M. ve Demirer, G.N., "Anaerobik Biyoteknoloji Teorik Altyapı ve Uygulamalar", IV. Ulusal Çevre Müh. Kongresi, İçel, 7-10 Kasım, 2001.
- [47] Ferry, J.G., "Methanogenesis, Ecology, Physiology, Biochemistry and Genetics", Chapman & Hall, New York, pp. 25 -33, 1993.
- [48] Aydemir, D., Peyniraltı Suyunun Anaerobik Arıtımı ve Biyogaz Üretimi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, pp. 12-14, 27-29, 31-43, 2003.
- [49] Speece, R.E., "Anaerobic Biotechnology for Industrial Wastewater", Arche Press, Tennessee, pp. 34-67, 1996.
- [50] Lay, J.J., Li, Y.Y. and Noike, T., "Influences of pH and Moisture Content on the Methane Production in High-Solid Sludge Digestion", Water Research, 31(6):1518-1524, 1997.
- [51] Lapp, H.M., Schulte, D.D., Sparling, A.B. and Buchanan, L.C., "Methane Production from Animal Wastes. 1. Fundamental Considerations", Canadian Agr. Eng., 17(2):97-102, 1975.
- [52] Ayvaz, Z., "Atıksu Arıtma Çamurlarının Değerlendirilmesi", Ege Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Kimya Mühendisliği Bölümü, İzmir, 9 (35): 3-12, 2000.
- [53] Van Den Berg, L., "Effect of Temperature on Growth and Activity of a Methanogenic Culture Utilizing Acetate", Canad. J. of Microb. 23(7):151-158, 1977.
- [54] Lin, C.Y., Noike, T., Sato, K. and Matsumoto, J., "Temperature Characteristics of The Methanogenesis Process in Anaerobic Digestion", Water Science and Technology, 19: 299-310, 1987.
- [55] Duran, M. ve Demirer, G.N., "Atıksu Arıtımı ve Anaerobik Biyoteknoloji", Atıksu Arıtma Sistemleri Semineri Notları, TMMOB Çevre Mühendisleri Odası, Ankara Şubesi, pp. 19-23, 1997.

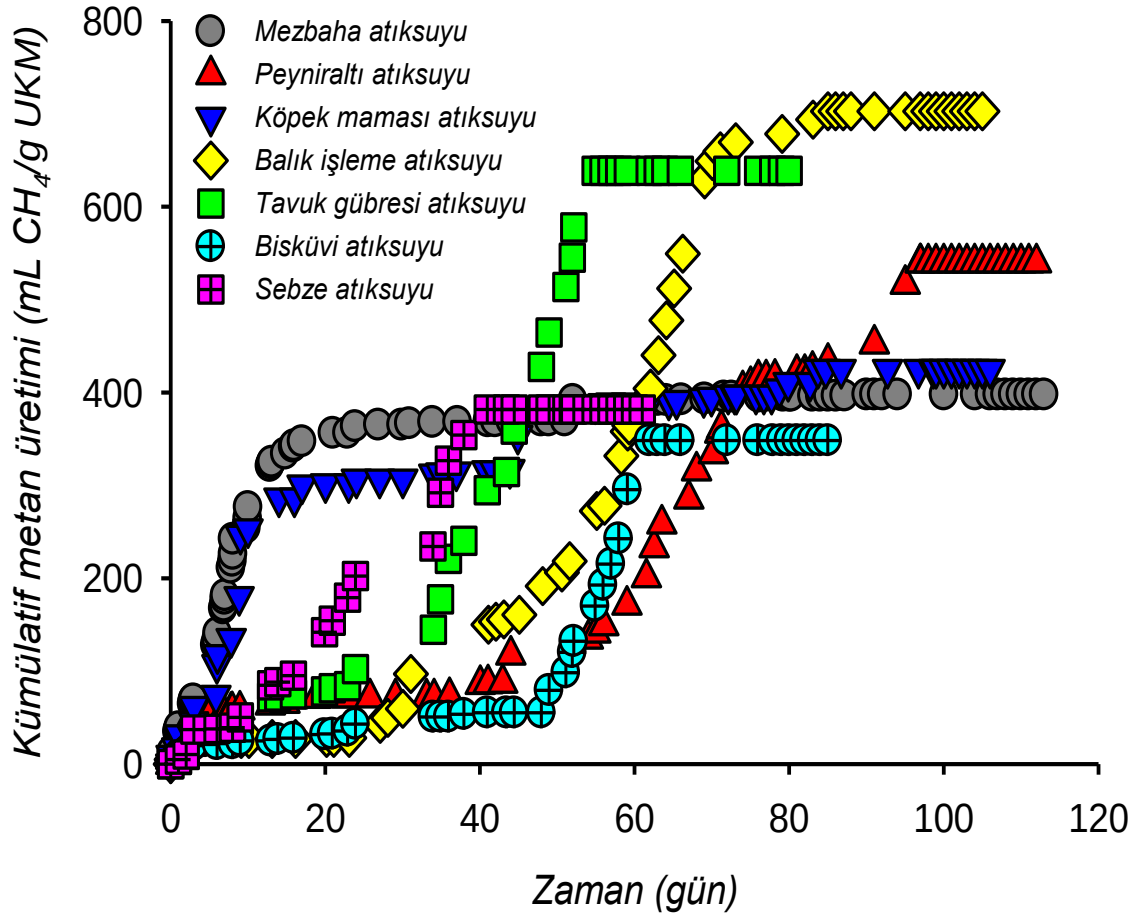
- [56] Uğurlu, A., "Anaerobik Arıtma Sistemleri", Çevre ve Mühendis, Ankara, 3(6): 19-22, 1995.
- [57] Desai, M., Patel, V. and Madamvar, D., "Effect of Temperature and Retention Time on Biomethanation of Cheese Whey-Poultry Waste-Cattle Dung", Environmental Pollution, 83: 311-315, 1994.
- [58] Eismann, F., Glindemann, D., Bergmann, A. and Kusch, P., "Effect of Free Phosphine on Anaerobic Digestion", Water Research, 31(11):2771-2774, 1997.
- [59] Zayed, G. and Winter, J., "Short Contribution: Inhibition Of Methane Production From Whey By Heavy Metals-Protective Effect of Sulfide", Applied Microbiology and Biotechnology Abstract, 53(6):726-731, 2000.
- [60] Vijayaraghavan, K., and Murthy, D.V.S., "Effect of Toxic Substances in Anaerobic Treatment of Tannery Wastewaters", Bioprocess Engineering Abstract, 16(3):151-155, 1997.
- [61] Filibeli, A., Büyükkamacı, N. ve Ayol, A., "Anaerobik Arıtma", DEÜ, Müh. Fak. Yayınları, İzmir, 280:21-46, 2000.
- [62] Tüzüm, A.P., "Yemek Atıklarının Anaerobik Arıtımı ve Biyogaz Üretimi", Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, pp. 14-43, 44-52, 2003.
- [63] Yılmaz F., "Kentsel Atıksuların Öğütülmüş Mutfak Atıkları ile Birlikte Arıtımı ve Yenilenebilir Enerji Kazanımı", İstanbul Teknik Üniversitesi, Y. Lisans Tezi, 2012.
- [64] Çetinkaya A. Y., and Yetilmezsoy K., "Evaluation of anaerobic biodegradability potential and comparative kinetics of different agro-industrial substrates using a new hybrid computational coding scheme", Journal Of Cleaner Production, cilt.238, no.11, 2019.
- [65] Ali, A. H., Abdul Razaq, Z., Tlaiaa, Y., and Khishala, A. D., "Methane biogas production from mixing of algae and municipal solid waste by anaerobic digestion", International Journal of Environmental Research, 10(4), pp. 613-624, 2016.
- [66] Moody L., Burns R., Wu-haan W., and Spajic R., "Use of Biochemical Methane Potential (BMP) Assays for Predicting and Enhancing Anaerobic Digester Performance", Proceedings of the 44th Croatian and the 4th International Symposium on Agriculture, Opatija, Croatia, 16-20 February 2009.
- [67] APHA, "Standart Methods for the Examination of Water and Wastewater", USA: Washington DC, 2005.
- [68] APHA, "Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (21th Edition)", American Public Health Association, American Water Work Association, Water Environment Federation, Washington, D.C., 2005.
- [69] Li, T.G. Bai, R.B., and Liu, J.X., "Distribution and composition of extracellular polymeric substances in membrane-aerated biofilm", Journal of Biotechnology, 135: 52-57, 2008.

- [70] Çetinkaya A., and Yetilmezsoy K., "Evaluation of anaerobic biodegradability potential and comparative kinetics of different agro-industrial substances using a new hybrid computational coding scheme", *J. Cleaner Production*, pp. 238, 2019.
- [71] <https://en.wikipedia.org/wiki/MATLAB> 12.03.2020
- [72] <http://roboturka.com/matlab/matlab-calisma-ortami-tanitimi/> 12.03.2020
- [73] <http://yucelkocyigit.cbu.edu.tr/Matlab1.pdf> 12.03.2020
- [74] Magana A. J., and Silva Coutinho G., "Modeling and simulation practices for a computational thinking-enabled engineering workforce", *Comput. Appl. Eng. Educ.* 25, pp. 62–78, 2017.
- [75] Yetilmezsoy K., "IMECE: implementation of mathematical, experimental, and computerbased education: a special application of fluid mechanics for civil and environmental engineering students", *Comput. Appl. Eng. Educ.* 25, pp. 833–60 [6], 2017.
- [76] Attaway S., "MATLAB: A Practical Introduction to Programming and Problem Solving", London: Butterworth-Heinemann, 2009.
- [77] Nirmalakhandan N., "Modeling Tools for Environmental Engineers and Scientists", Boca Raton, FL: CRC Press, 2001.
- [78] Hahn B., and Valentine D. T., "Essential MATLAB for Engineers and Scientists", 6th edn, Cambridge, MA: Academic, 2016.
- [79] Gustafsson F., and Bergman N., "MATLAB for Engineers Explained", Berlin: Springer Science, 2012.
- [80] Kalechman M., "Practical MATLAB Basics for Engineers", Boca Raton, FL: CRC Press, 2008.
- [81] Moore H., "MATLAB for Engineers: Global Edition", 4th edn, Harlow: Pearson Education, 2014.
- [82] Harder D. W., *Matlab® Tutorial*, 2018.
- [83] [http://nozmen.ktu.edu.tr/files/matlab\\_uygulama\\_or\\_2018.pdf](http://nozmen.ktu.edu.tr/files/matlab_uygulama_or_2018.pdf) 25.03.2020
- [84] Turkdogan-Aydinol, F.I., Yetilmezsoy, K., Comez, S., and Bayhan, H., "Performance evaluation and kinetic modeling of the start-up of a UASB reactor treating municipal wastewater at low temperature." *Bioprocess. Biosyst. Eng.* 34, pp. 153–162, 2011.
- [85] Yetilmezsoy, K., "A benchmarking of competing bio-objective functions for multiresponse optimization of UASB system in pretreatment of poultry manure slurry", *Int. J. Multiscale Comput. Eng.* 15, pp. 477–504, 2017.
- [86] Yetilmezsoy, K., "Integration of kinetic modeling and desirability function approach for multi-objective optimization of UASB reactor treating poultry manure wastewater", *Bioresour. Technol.* 118, pp. 89–101, 2012.

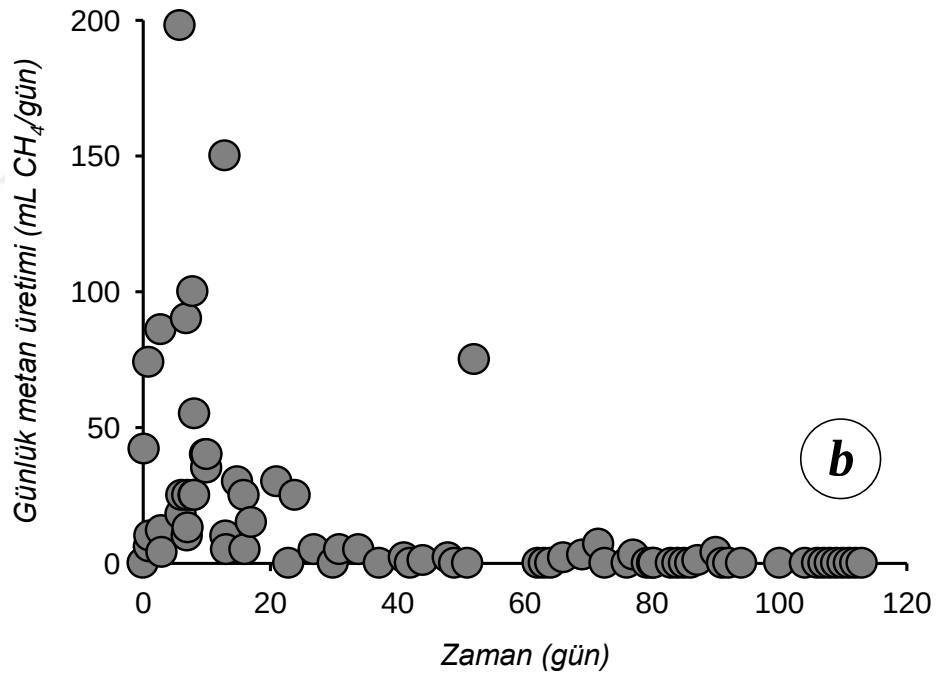
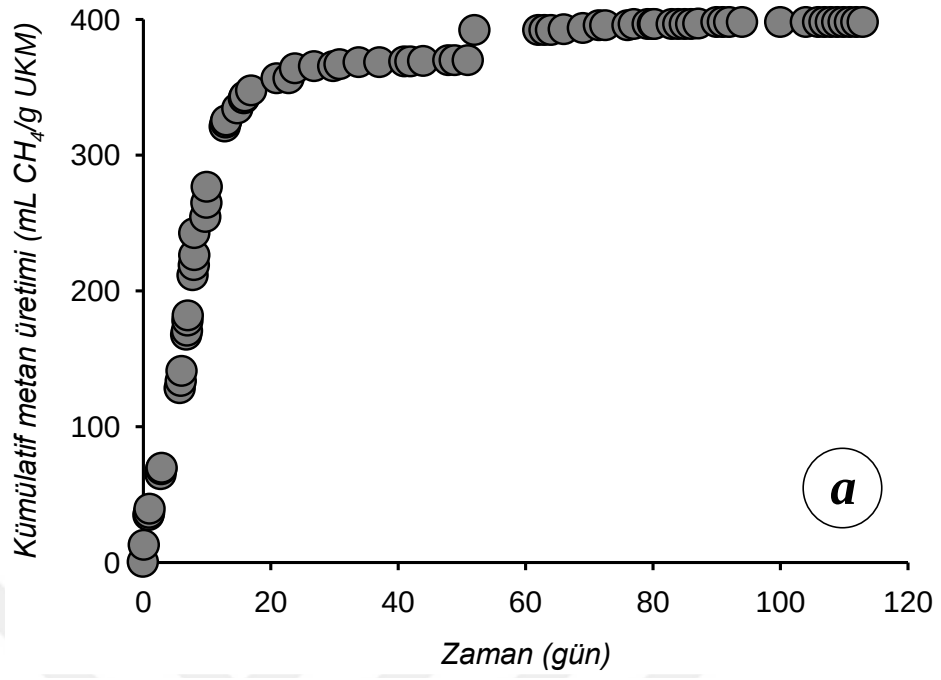
- [87] Jijai, S., Srisuwan, G., O-Thong, S., Norli, I., and Siripatana, C., "Effect of substrate and granules/inocula sizes on biochemical methane potential and methane kinetics" *Iranica J. Energy Environ.* 7, pp. 94–101, 2016.
- [88] Ji, X., Lin, W., Zhang, W., Yin, F., Zhao, X., Wang, C., Liu, J., Yang, H., Chen, Y., and Liu, S., "Evaluation of methane production features and kinetics of *Bougainvillea spectabilis* Willd waste under mesophilic conditions", *African J. Biotechnol.* 14, pp. 1910–1917, 2015.
- [89] Davila-Vazquez, G., Alatraste-Mondragón, F., de León-Rodríguez, A., and Razo-Flores, E., "Fermentative hydrogen production in batch experiments using lactose, cheese whey and glucose: influence of initial substrate concentration and pH", *Int. J. Hydrogen Energy* 33, 4989–4997, 2008.
- [90] Rorke, D., and Gueguim Kana, E., "Kinetics of bioethanol production from waste sorghum leaves using *Saccharomyces cerevisiae* BY4743", *Fermentation* 3 (19), pp. 1–10, 2017.
- [91] Kafle, G.K., and Kim, S.H., "Evaluation of the biogas productivity potential of fish waste: a lab scale batch study", *J. Biosyst. Eng.* 37, pp. 302–313, 2012.
- [92] Donoso-Bravo, A., Pérez-Elvira, S.I., and Fdz-Polanco, F., "Application of simplified models for anaerobic biodegradability tests", *Evaluation of pre-treatment processes. Chem. Eng. J.* 160, pp. 607–614, 2010.
- [93] Yang, Q., Wang, H., Larson, R., and Runge, T.M., "Comparative study of chemical pretreatments of dairy manure for enhanced biomethane production", *BioResources* 12, 7363–7375, 2017.
- [94] Kafle, G.K., and Chen, L., "Comparison on batch anaerobic digestion of five different livestock manures and prediction of biochemical methane potential (BMP) using different statistical models", *Waste Manage.* 48, pp. 492–502, 2016.
- [95] Wang, D., Yang, X., Tian, C., Lei, Z., Kobayashi, N., Kobayashi, M., Adachi, Y., Shimizu, K., and Zhang, Z., "Characteristics of ultra-fine bubble water and its trials on enhanced methane production from waste activated sludge", *Bioresour. Technol.* 273, pp. 63–69, 2019.
- [96] Shen, J., and Zhu, J., "Development of general Gompertz models and their simplified two-parameter forms based on specific microbial growth rate for microbial growth, bio-products and substrate consumption", *Adv. Biotechnol. Microbiol.* 4, pp. 1–11, 2017.
- [97] Gertner, P., Huiliñir, C., Pinto-Villegas, P., Castillo, A., Montalvo, S., and Guerrero, L., "A new model for including the effect of fly ash on biochemical methane potential", *Waste Manage.* 68, pp. 232–239, 2017.
- [98] Kainthola, J., Shariq, M., Kalamdhad, A.S., and Goud, V.V., "Enhanced methane potential of rice straw with microwave assisted pretreatment and its kinetic analysis", *J. Environ. Manage.* 232, pp. 188–196, 2019.

- [99] Huiliñir, C., Quintriqueo, A., Antileo, C., and Montalvo, S., "Methane production from secondary paper and pulp sludge: Effect of natural zeolite and modeling", *Chem. Eng. J.* 257, pp. 131–137, 2014.
- [100] Redzwan, G., and Banks, C., "The use of a specific function to estimate maximum methane production in a batch-fed anaerobic reactor", *J. Chem. Technol. Biotechnol.* 79, 1174–1178, 2004.
- [101] Veluchamy, C., Raju, V.W., and Kalamdhad, A.S., "Electrohydrolysis pretreatment for enhanced methane production from lignocellulose waste pulp and paper mill sludge and its kinetics", *Bioresour. Technol.* 252, pp. 52–58, 2018.
- [102] Strömberg S., Nistor M., and Liu J., "Early prediction of Biochemical Methane Potential through statistical and kinetic modelling of initial gas production" *Bioresour. Technol.* 176, pp. 233–241, 2015.
- [103] Luna-delRisco M., Normak A., and Orupold K., "Biochemical methane potential of different organic wastes and energy crops from Estonia", *Agronomy Research* 9 (1-2), pp. 331–342, 2011.
- [104] Tosun İ., Gönüllü M. T., and Günay A., "Anaerobic Digestion and Methane Generation Potential of Rose Residue in Batch Reactors", *J. Environ. Scien. and Health*, pp.911–921, 2004.
- [105] Arora, S., Singh, S., and Yetilmezsoy, K., "A modified butterfly optimization algorithm for mechanical design optimization problems", *J. Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.* 40, pp. 1–17, 2018.
- [106] Tomassini, M., Antonioni, A., Daolio, F., Buesser, P., and eds., "Adaptive and Natural Computing Algorithms", In: 11th International Conference, ICANNGA, Springer, Berlin, p. 506, 2013.
- [107] Raposo, F., Fernández-Cegri, V., De la Rubia, M.A., Borja, R., Béline, F., Cavinato, C., Demirer, G., Fernández, B., Fernández-Polanco, M., Frigon, J.C., Ganesh, R., Kaparaju, P., Koubova, J., Méndez, R., Menin, G., Peene, A., Scherer, P., Torrijos, M., Uellendahl, H., Wierinck, I., and De Wilde, V., "Biochemical methane potential (BMP) of solid organic substrates: evaluation of anaerobic biodegradability using data from an international interlaboratory study", *J. Chem. Technol. Biotechnol.* 86, 1088–1098, 2011.
- [108] Yetilmezsoy, K., "New explicit formulations for accurate estimation of aeration-related parameters in steady-state completely mixed activated sludge process", *Global Nest J.* 19, pp. 140–159, 2017.
- [109] Yetilmezsoy, K., "A new simple model for the prediction of waste sludge flow rate in the steady-state completely mixed activated sludge process", *Environ. Eng. Manage. J.* 15, 2613–2630, 2016.
- [110] Cakmakci, M., "Adaptive neuro-fuzzy modeling of anaerobic digestion of primary sedimentation sludge, Bioproc", *Biosyst. Eng.* 30, pp. 349–357, 2007.

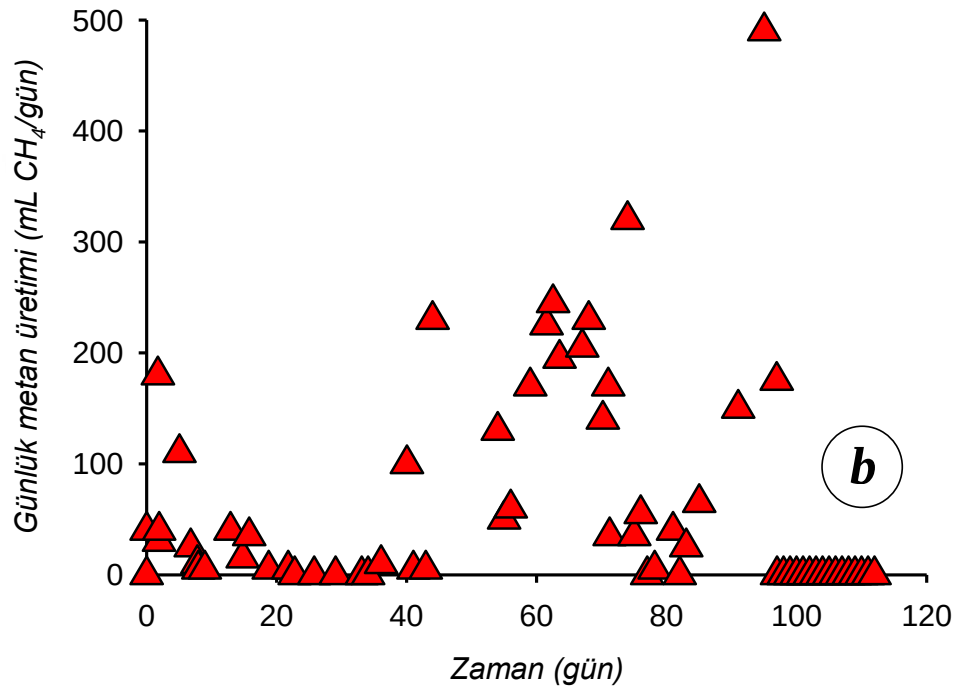
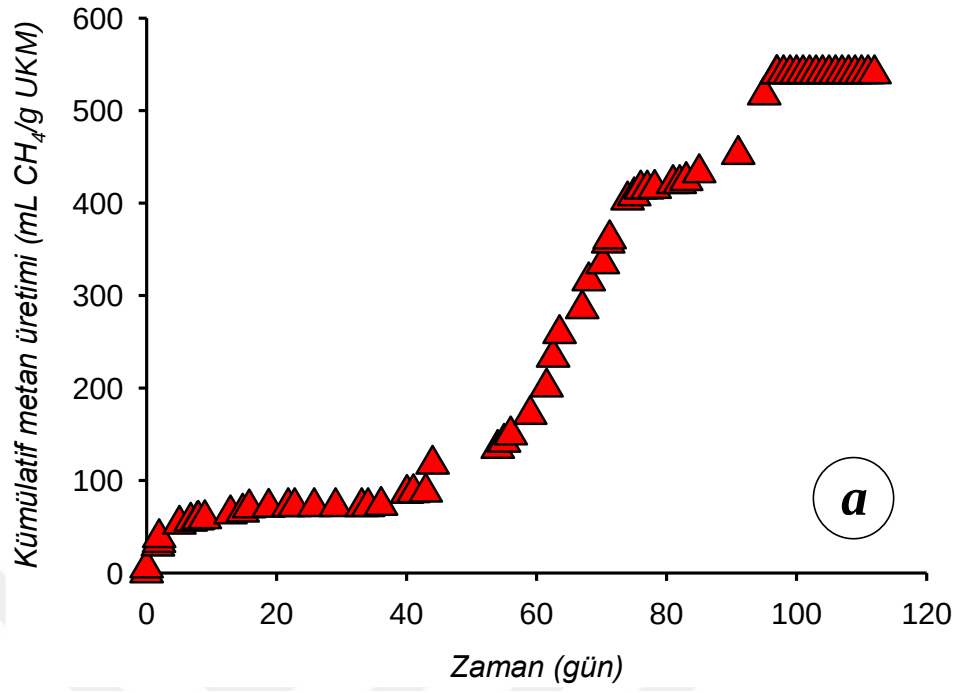
## KÜMÜLATİF VE GÜNLÜK METAN ÜRETİMLERİ



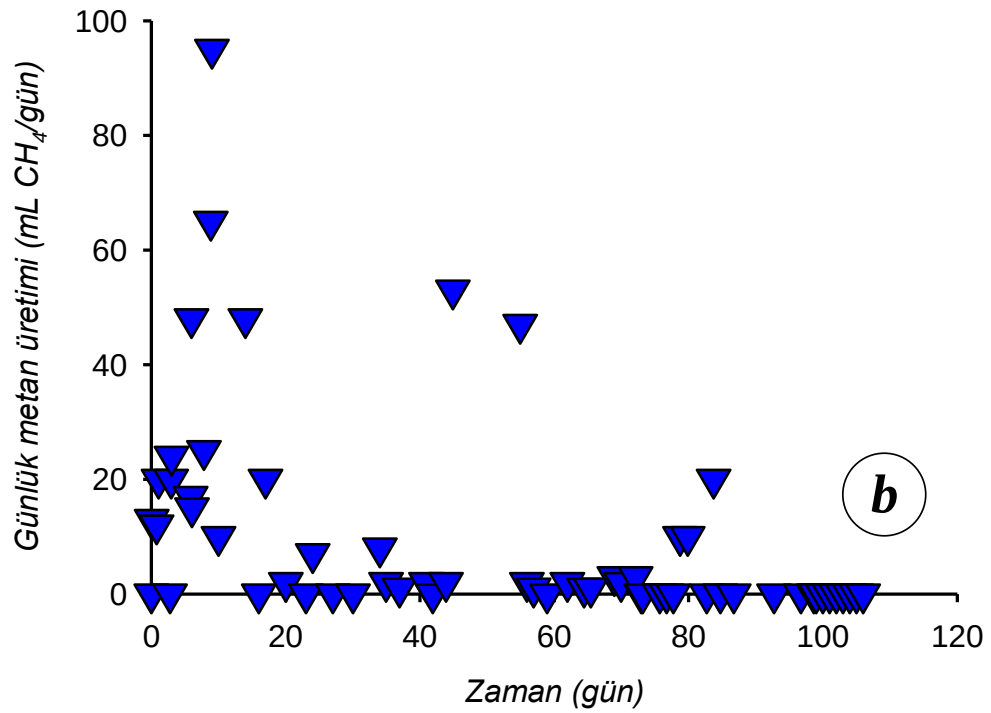
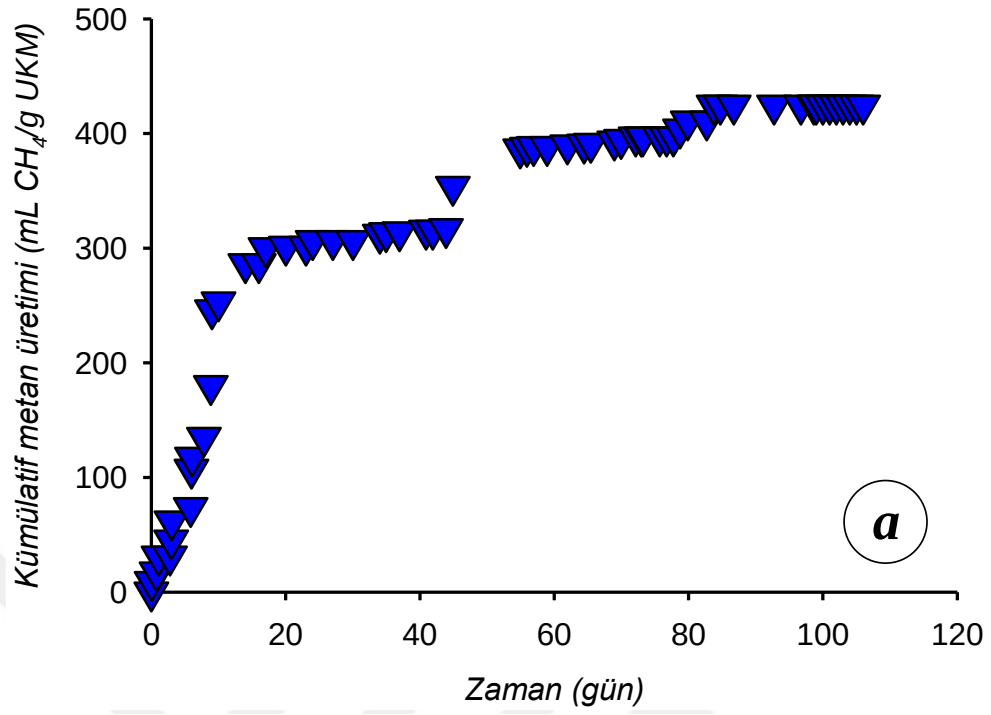
Şekil A.1 Farklı substrat kaynakları için elde edilen kümülatif metan üretimleri



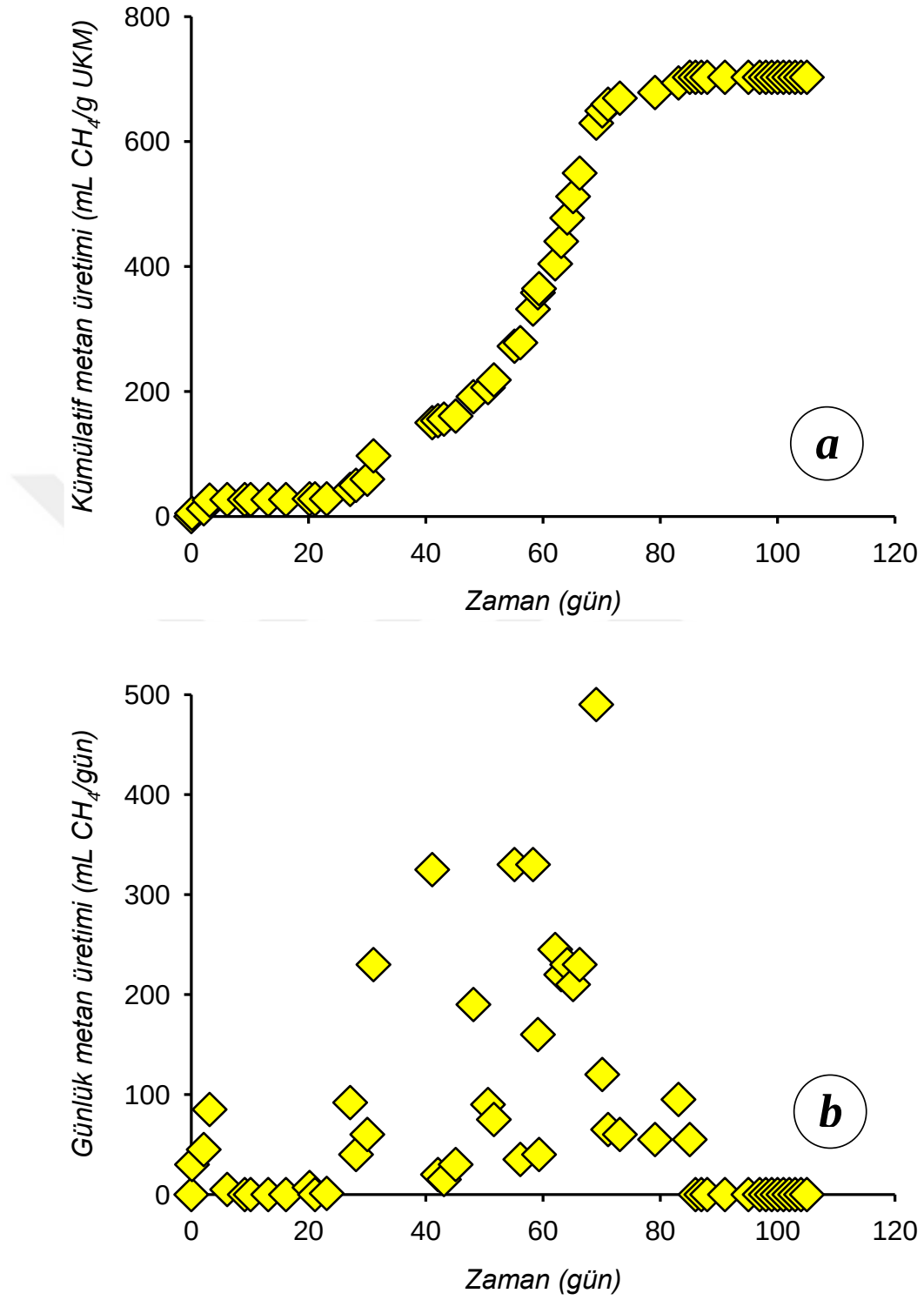
**Şekil A.2** Mezhiba atıksuyu için elde edilen kümülatif (a) ve günlük (b) metan üretimleri



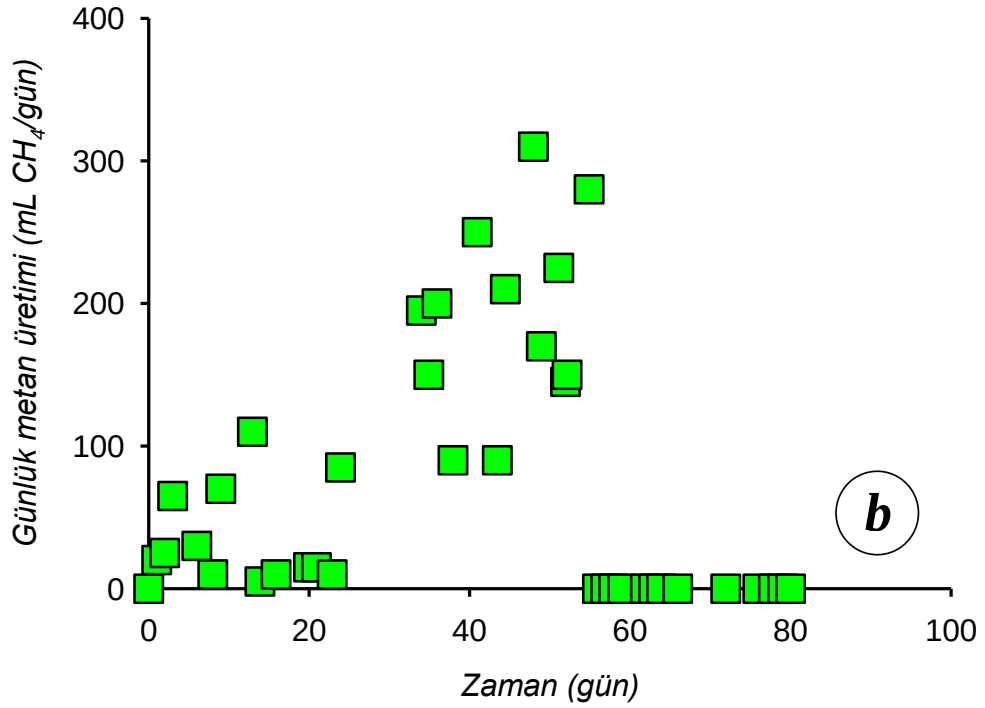
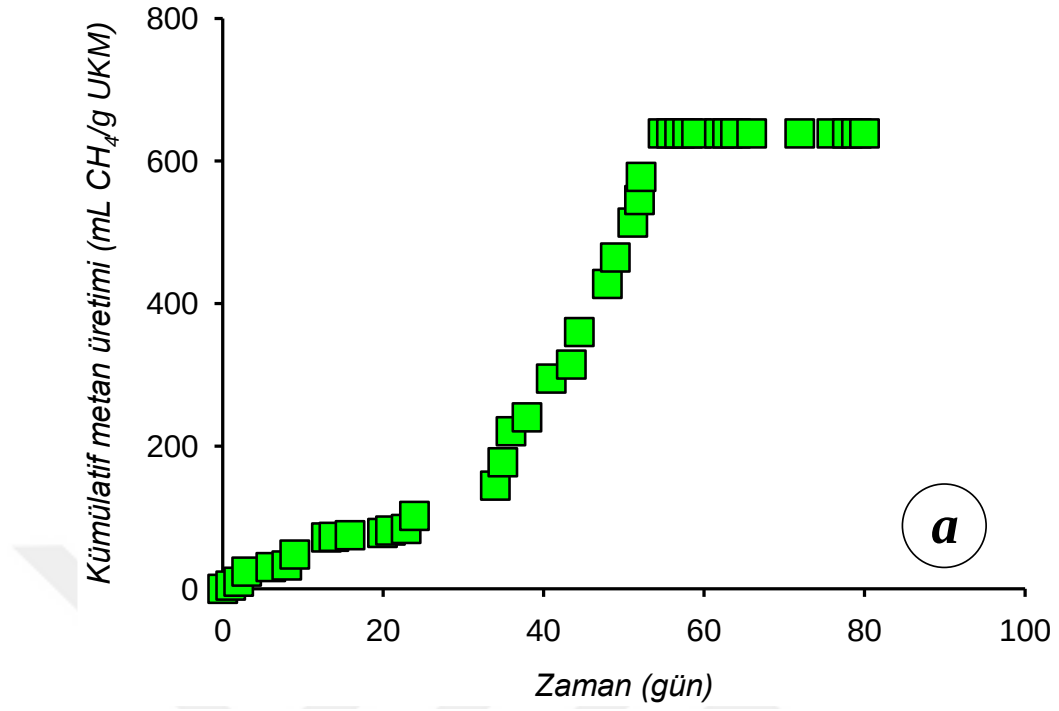
**Şekil A.3** Peyniraltı atıksuyu için elde edilen kümülatif (a) ve günlük (b) metan üretimleri



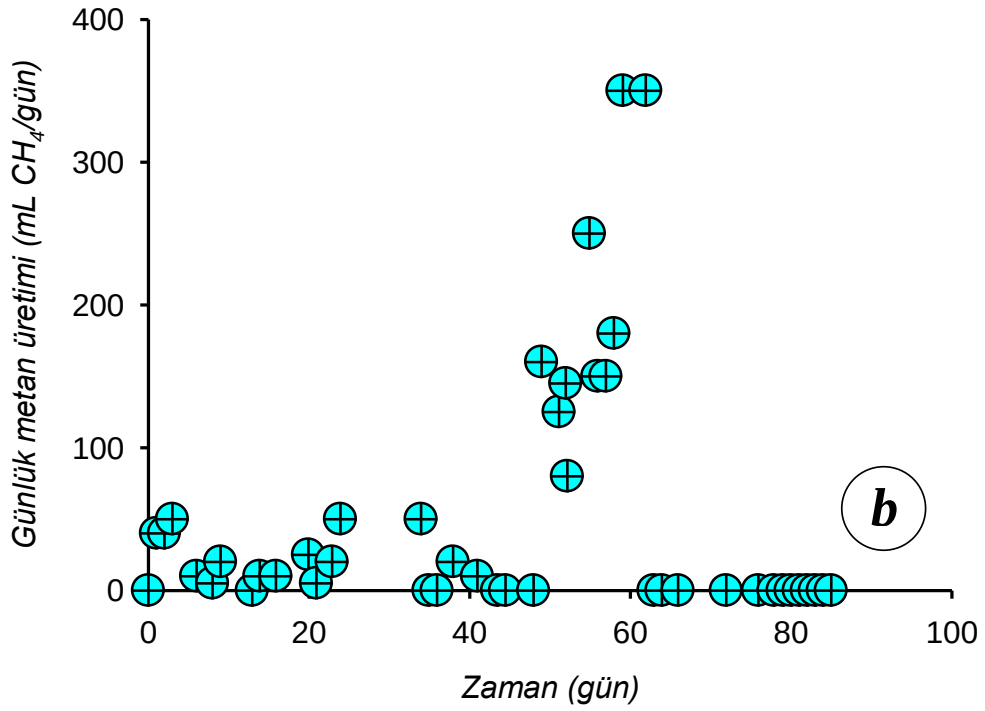
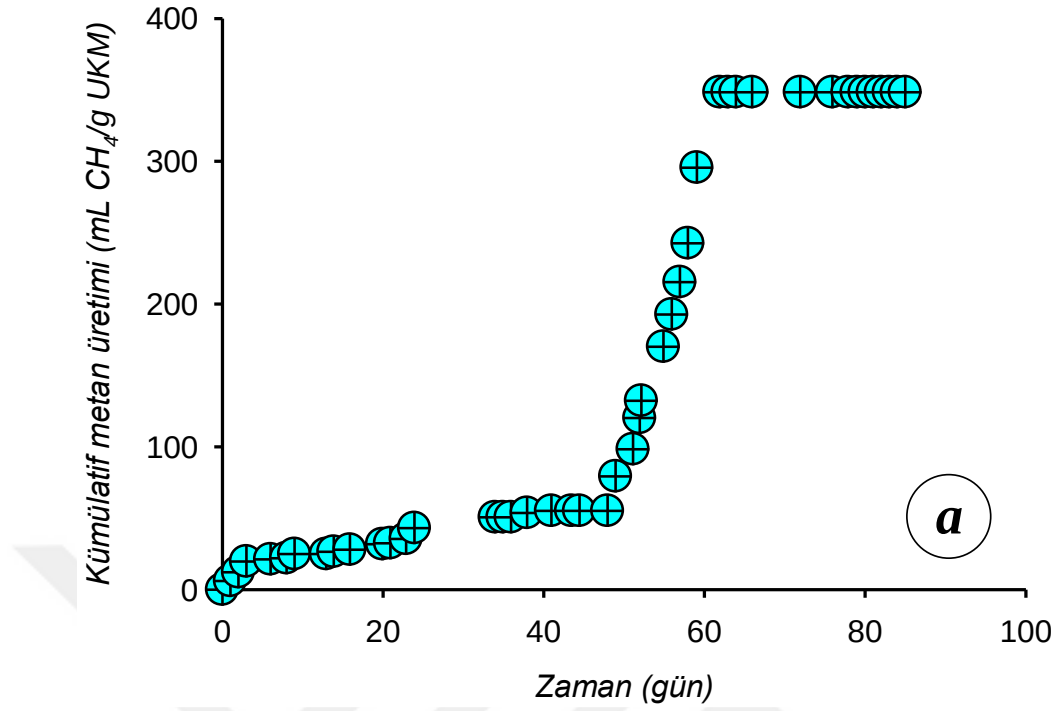
**Şekil A.4** Köpek maması atıksuyu için elde edilen kümülatif (a) ve günlük (b) metan üretimleri



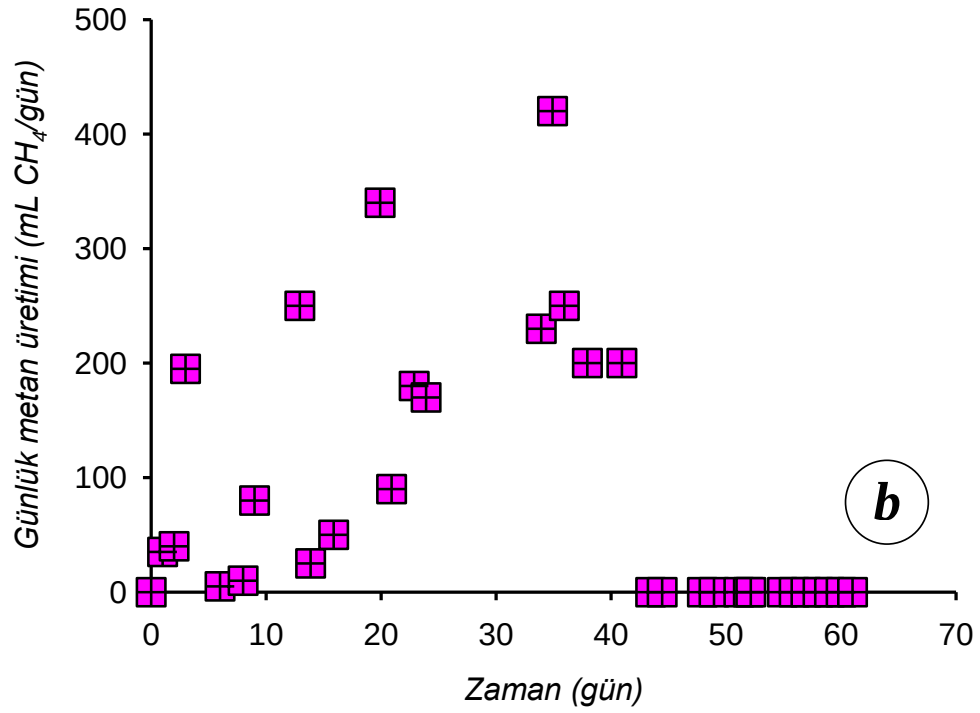
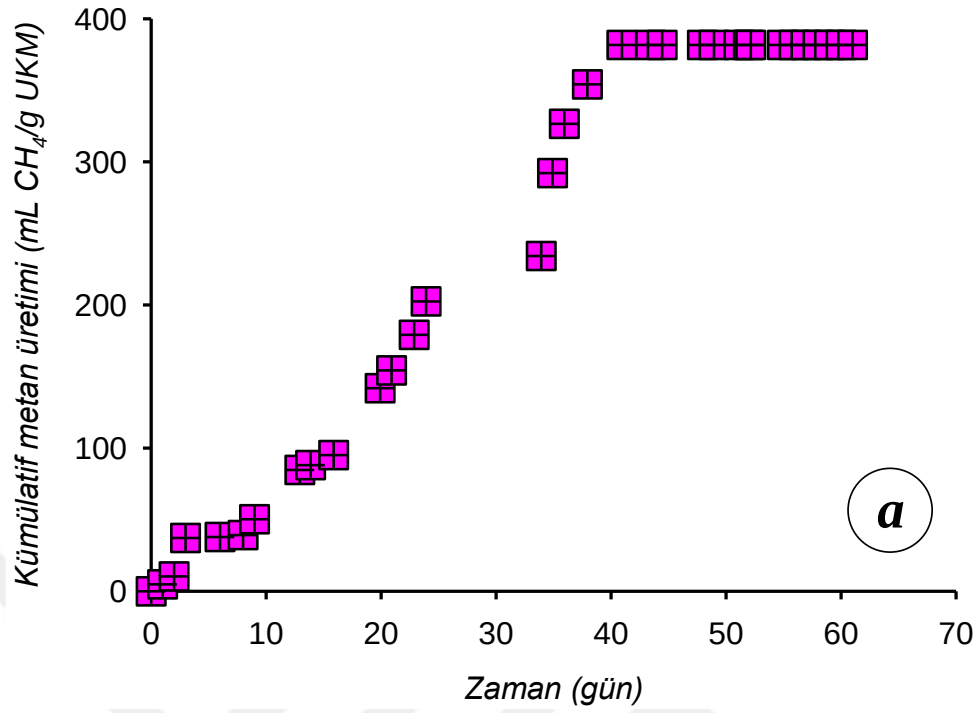
**Şekil A.5** Balık işleme atıksuyu için elde edilen kümülatif (a) ve günlük (b) metan üretimleri



**Şekil A.6** Tavuk gübresi atıksuyu için elde edilen kümülatif (a) ve günlük (b) metan üretimleri



**Şekil A.7** Bisküvi atıksuyu için elde edilen kümülatif (a) ve günlük (b) metan üretimleri



**Şekil A.8** Sebze atıksuyu için elde edilen kümülatif (a) ve günlük (b) metan üretimleri

Substrat kaynağı olarak kullanılan yedi farklı agro-endüstriyel atıksuyun biyometanizasyon prosesinin modellenmesi maksadıyla önerilen MATLAB® tabanlı hibrid optimizasyon prosedürüne ait pseudo (sözde) kodlar aşağıda verilmiştir.

- 1: Değişkenleri ve fonksiyonları bellekten sil, “clear”
- 2: Komut penceresini temizle ve imleci getir, “clc”
- 3: 5 basamaklı ölçeklendirilmiş bir sabit nokta biçimi ayarla, “format short”
- 4: Ans sözdizimi olmadan bir tarih dizesi temsili oluştur, “disp(datestr(now,0))”
- 5: Kronometre zamanlayıcısını başlat, “tic”
- 6: Substrat girişi için seçenekler menüsü oluştur, choice = menu(header, f1, f2, ... )
- 7: Yedi substrat türü için bir “switch” ifadesi geliştir, case 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7
- 8: Her bir substrat için deneysel verileri MAT dosyasından Workspace’e yükle (x = t: gün vs. y = B(t): mL CH<sub>4</sub>/g UKM) (dataslahou.mat, datachewhe.mat, datadogfoo.mat, datafisind.mat, datapouman.mat, databiswas.mat, datavegwas.mat)
- 9: Bağımsız ve bağımlı değişkenleri tanımla, x = data slahou... vegwas(:,1), y = data slahou... vegwas(:,2)
- 10: Fonksiyon girişi için seçenekler menüsü oluştur, choice = menu(header, f1, f2, ... )
- 11: Yedi fonksiyon (kinetic model) için bir “switch” ifadesi geliştir, case 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7
- 12a: Her kinetik modeli için satır içi fonksiyon şeklinde tanımla, fmodel = @(p,x) ...
- 12b: MGE, fmodel = @(p,x) p(1).\*exp(-exp((p(2).\*exp(1)./p(1)).\*(p(3)-x)+1));
- 12c: TF or RCtM, fmodel = @(p,x) p(1).\*(1-(exp(-(p(2).\*(x-p(3))./p(1)))));

12d: LF, fmodel = @(p,x) p(1)./(1+(exp((4.\*p(2).\*(p(3)-x)./p(1))+2)));

12e: MtM, fmodel = @(p,x) p(1).\*((p(2).\*x)./(1+(p(2).\*x)));

12f: TpEAM, fmodel = @(p,x) p(1).\*(1-exp(-p(2).\*x))+p(3).\*(1-exp(-p(4).\*x));

12g: FoM, fmodel = @(p,x) p(1).\*(1-exp(-p(2).\*x));

12h: CHM, fmodel = @(p,x) p(1).\*(1-(p(2)./(x.\*p(3)+p(2)-1)));

13: Minimize edilecek hata fonksiyonunu oluştur, errfn = @(p) sum((fmodel(p,x)-y).^2);

14: Modeller için başlangıç noktalarını ayarla, p0 = [mean(y), (max(y) - min(y))/2, mean(x)];

15: Algoritma girişi için seçenekler menüsü oluştur, choice = menu(header, a1, a2, ...)

16: İki arama algoritması (N-M SDSA ve BFGS Q-N CLSA) için bir “switch” ifadesi geliştir, case 1, 2

17: “optimset” işlevini kullanarak optimizasyon seçenekleri yapısı oluştur veya düzen

18a: “fminsearch” kodu için algoritmayı ayarla, 'Algorithm', 'dual-simplex'

18b: “fminunc” kodu için algoritmayı ayarla, 'Algorithm', 'quasi-newton'

19a: Yinelemeli görüntü elde etme ve çözüm sürecini inceleme seçeneklerini ayarla, 'Display','iter'

19b: Algoritmalar yürütülürken çeşitli ilerleme ölçülerini izdir, 'PlotFcns',@optimplotfval

19c: alıştır optimset('Algorithm','...','Display','iter','PlotFcns',@optimplotfval)

20: Adım # 19c'nin çıkışını “seçenekler” olarak ayarla

21: p0'dan bařla ve “errfn” fonksiyonunun bir minimize “p” bulmaya alıř

22: “errfn” fonksiyonunu minimize et, fminsearch(errfn,p0,options) or fminunc (errfn,p0,options)

- 23a: “fminsearch” kodu için Adım # 20'nin çıkışını [S,fval,exitflag,output] olarak ayarlayın
- 23b: “fminunc” kodu için Adım # 20'nin çıkışını [S,fval,exitflag,output,grad,hessian] olarak ayarlayın
- 24: Modeller için en uygun çözümü bul,  $p1 = S(1)$ ;  $p2 = S(2)$ ;  $p3 = S(3)$ ;  $p4 = S(4)$ ;
- 25: Tahmin değerlerini hesapla,  $yp = fmodel(S,x)$
- 26: Uygun yerleşik fonksiyonları kullanarak istatistiksel performans göstergelerini belirle
- 27: Uygun yerleşik fonksiyonları kullanarak elektrik üretimini ve gelirini belirle
- 28: Adım # 9 ve Adım # 25'in çıktılarını kullanarak sonuçların çizimlerini oluştur
- 29: 26'ıncı adımın çıktısını kullanarak istatistiksel sonuçları karakter temsiline dönüştür
- 30: 27'inci adımın çıktısını kullanarak istatistiksel sonuçları karakter temsiline dönüştür
- 31: Genel sonuçları kullanıcıya iletmek için bir mesaj iletişim kutusu oluştur
- 32: Geçen süreyi saniye cinsinden görüntülemek için kronometre zamanlayıcısını oku

İletişim Bilgisi: serraozman@gmail.com

### Konferans Bildirileri

1. Özman S, Yetilmezsoy, K, Yalçinyuva, T. (2020), “Agro-Endüstriyel Atıksuların Karakterizasyonu ve Biyometanizasyonu”, 4. Geleceğin Mühendisleri Uluslararası Öğrenci Sempozyumu (4th Engineers of Future International Student Symposium), EFIS 2020, II. Oturum, Ref. ID: 19, 07-08 Mayıs 2020, Zonguldak, Türkiye.

