

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**HİDROLİK YAPILAR ÜZERİNDE GERÇEKLEŞEN HAVALANMANIN  
NEHİRLERDEKİ ÇÖZÜNMÜŞ OKSİJEN DENGESİ VE ATIKSU ARITMA  
SİSTEMLERİNİN OPTİMİZASYONU ÜZERİNE ETKİLERİ**

**DOKTORA TEZİ**

**İnş. Müh. Egemen ARAS**

**MART 2009  
TRABZON**

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

HİDROLİK YAPILAR ÜZERİNDE GERÇEKLEŞEN HAVALANMANIN  
NEHİRLERDEKİ ÇÖZÜNMÜŞ OKSİJEN DENGESİ VE ATIKSU ARITMA  
SİSTEMLERİNİN OPTİMİZASYONU ÜZERİNE ETKİLERİ

İnş. Müh. Egemen ARAS

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde  
“Doktor (İnşaat Mühendisliği)”  
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 09.02.2009  
Tezin Savunma Tarihi : 10.03.2009

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Mehmet BERKÜN  
Jüri Üyesi : Prof. Dr. Hızır ÖNSOY  
Jüri Üyesi : Doç. Dr. Ercan KÖSE  
Jüri Üyesi : Prof. Dr. Basri ERTAŞ  
Jüri Üyesi : Prof. Dr. Dursun Zafer ŞEKER

Enstitü Müdürü : Prof. Dr. Salih TERZİOĞLU

Trabzon 2009

## ÖNSÖZ

Hidrolik yapılar üzerinde gerçekleşen havalanmanın akarsulardaki çözünmüş oksijen dengesi ve atıksu arıtma sistemlerinin optimizasyonu üzerine etkilerini inceleyen bu çalışma, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında Doktora Tezi olarak gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışmayı bana önererek tezimin her aşamasında ilgisini esirgemeyen, bana her konuda yardımcı olan, bilgi ve deneyimlerinden her zaman yararlandığım ve yararlanmaya devam edeceğim, değerli büyüğüm Sayın Prof. Dr. Mehmet BERKÜN'e teşekkür eder, saygılar sunarım.

Deneysel çalışmalarım sırasında, hidrolik laboratuvarında bana yardımcı olan laboratuvar personeline, matematik denklem ve modellemelerin çıkarılmasında yardım eden Gümüşhane Üniversitesi Öğretim Elemanı Öğr. Gör. Mehmet MERDAN'a, ve bilgisayar programlama ve algoritmayı hazırlamamda yardımcı olan Karadeniz Teknik Üniversitesi Öğretim Elemanı Arş.Gör. Vedat TOĞAN'a teşekkürlerimi sunuyorum.

Lisans ve Lisansüstü öğrenimim boyunca üzerimde emeği olan Hidrolik Anabilim Dalındaki hocalarım başta olmak üzere tüm hocalarıma teşekkür ederim.

Hayatım boyunca bana her türlü konuda destek sağlayan bütün aile fertlerime ve hem tezimin yazılmasında bana yardım eden hem de her zaman manevi desteğini arkamda hissettiğim sevgili eşim Arş. Gör. Aylin ARAS'a içten teşekkürlerimi sunuyorum.

Egemen ARAS  
Trabzon 2009

## İÇİNDEKİLER

|  | <u>Sayfa No</u> |
|--|-----------------|
| ÖNSÖZ.....   | II              |
| İÇİNDEKİLER.....   | III             |
| ÖZET.....  | V               |
| SUMMARY.....   | VI              |
| ŞEKİLLER DİZİNİ.....   | VII             |
| TABLolar DİZİNİ.....   | XIII            |
| SEMBOLLER DİZİNİ.....  | XV              |
| 1. GENEL BİLGİLER.....   | 1               |
| 1.1. Giriş.....  | 1               |
| 1.2. Gaz Transferi.....  | 2               |
| 1.2.1. Serbest Düşme ve Dalan Jet Olayındaki Gaz Transferi.....              | 9               |
| 1.2.2. Hidrolik Sıçramadaki Gaz Transferi.....                               | 11              |
| 1.2.3. Serbest Yüzey Havalanmasındaki Gaz Transferi.....                     | 14              |
| 1.3. Çözünmüş Oksijen (ÇO).....  | 16              |
| 1.3.1. Çözünmüş Oksijen Transferi.....                                       | 16              |
| 1.3.2. Oksijen Eksiklik Oranı.....   | 28              |
| 1.3.3. Çözünmüş Oksijen Transfer Verimi.....                                 | 31              |
| 1.3.4. Oksijen Transferini Etkileyen Faktörler.....                          | 31              |
| 1.3.5. Oksijen Transfer Verimine Su Sıcaklığının Etkisi.....                 | 34              |
| 1.3.6. Çözünmüş Oksijen Doygunluk Konsantrasyonu.....                        | 35              |
| 1.3.7. Doygunluk Konsantrasyonu Değişimi.....                                | 39              |
| 1.4. Hidrolik Yapılarda Gerçekleşen Oksijen Transferi.....                   | 42              |
| 1.4.1. Savakların Yapısal Etkileri.....                                      | 44              |
| 1.4.2. Dolusavak Tipinin Oksijen Transferine Etkisi.....                     | 44              |
| 1.4.3. Memba ve Mansap Arasındaki Çözünmüş Oksijen Değeri Farklılıkları..... | 47              |
| 1.5. Akarsu Havalanması.....   | 52              |
| 1.5.1. Akarsuların Kirlenmesi.....   | 52              |
| 1.5.2. Akarsularda Kendi Kendine Temizlenme Olayı.....                       | 54              |
| 1.5.3. Oksijen Eğrisi.....   | 56              |
| 1.5.3.1. Oksijen Eğrisini Etkileyen Faktörler.....                           | 58              |
| 1.5.3.2. Oksijen Eğrisinin Zamana Göre Değişimi.....                         | 58              |

|          |  |     |
|----------|--|-----|
| 1.5.4.   | Havalandırma Katsayısı $K_2$ 'nin Tayini.....                    | 59  |
| 1.5.4.1. | Havalandırma Katsayısı $K_2$ 'yi Etkileyen Faktörler.....        | 61  |
| 1.5.4.2. | Havalandırma Katsayısı $K_2$ 'nin Oksijen Eğrisine Etkileri..... | 63  |
| 2.       | YAPILAN ÇALIŞMALAR.....  | 65  |
| 2.1.     | Hidrolik Yapılarla Birlikte Oluşan Akarsu Havalanması.....       | 65  |
| 2.2.     | Materyal ve Metot.....   | 68  |
| 2.3.     | Deney Düzenegi.....  | 71  |
| 2.4.     | Deneilerin Uygulanışı ve Sonuçlar.....                           | 74  |
| 2.4.1.   | Kanal Boyunca Akış.....  | 103 |
| 2.4.2.   | Mansap Çözünmüş Oksijen Konsantrasyonu.....                      | 118 |
| 2.5.     | Hidrolik Yapıdan Sonra Çözünmüş Oksijen Değişiminin Analizi..... | 119 |
| 2.6.     | Çözünmüş Oksijen Değişiminin Matematiksel Modellenmesi.....      | 121 |
| 2.6.1.   | Regresyon Analizi.....   | 121 |
| 2.6.2.   | Düz Tabanlı Savak İçin Debi-ÇO Değişiminin Modellenmesi.....     | 122 |
| 2.6.3.   | Basamaklı Savak İçin Debi-ÇO Değişiminin Modellenmesi.....       | 133 |
| 2.6.4.   | Debi-ÇO Değişimi İçin Değerlendirme.....                         | 144 |
| 2.6.5.   | Düz Tabanlı Savak İçin ÇO-Mesafe Değişiminin Modellenmesi.....   | 146 |
| 2.6.6.   | Basamaklı Savak İçin ÇO-Mesafe Değişiminin Modellenmesi.....     | 159 |
| 2.6.7.   | ÇO-Mesafe Değişimi İçin Değerlendirme.....                       | 172 |
| 2.6.8.   | Regresyon Analizi İçin Değerlendirme.....                        | 175 |
| 2.7.     | Arıtma Tesislerinin Genetik Algoritma ile Optimizasyonu.....     | 176 |
| 2.7.1.   | Yöntem ve Çalışmanın Amacı.....                                  | 176 |
| 2.7.2.   | Optimizasyonda Kullanılan Bağlantılar.....                       | 178 |
| 2.7.3.   | Sınır Şartları.....  | 181 |
| 2.7.4.   | Yapılan Kabuller .....   | 184 |
| 2.7.5.   | Program Çıktıları.....   | 185 |
| 2.7.6.   | Sonuçlar ve Programın Analizi.....                               | 185 |
| 3.       | BULGULAR VE İRDELEME.....  | 189 |
| 4.       | SONUÇLAR.....  | 192 |
| 5.       | ÖNERİLER.....  | 195 |
| 6.       | KAYNAKLAR.....   | 196 |
| ÖZGEÇMİŞ |  |     |

## ÖZET

Akarsularda su kalitesinin en önemli parametrelerinden biri su içerisindeki çözünmüş oksijen miktarıdır. Çözünmüş oksijen miktarı suyun kalitesini önemli ölçüde etkiler. Akarsular üzerine yapılan hidrolik yapılar, su-hava dengesinin belirlenmesinde sadece yapısal olarak değil, akarsu üzerindeki ekolojik etkisi açısından da değerlendirilir. Hidrolik yapıların tipi, yeri gibi özellikleri akarsu havalanmasının boyutları açısından çok önemlidir. En uygun havalandırma, çevre şartları ve akımın durumuna uygun olarak seçilen hidrolik yapılar ile sağlanabilir. Kirliliği yüksek olan akarsularda, hidrolik yapıların mansabında artan çözünmüş oksijen miktarı ile birlikte bir temizlenme olurken, aşırı oksijen konsantrasyonu oluşması durumunda canlı yaşamı olumsuz etkilenebilir.

Bu çalışmanın amacı, akarsu üzerinde oluşturulan bir hidrolik yapıda meydana gelen havalanmanın, akarsu üzerindeki çözünmüş oksijen dengesi üzerindeki etkilerini araştırmaktır. Öncelikle akarsu üzerine kurulan bir barajın memba ve mansabı arasındaki havalanma verimliliği konusunda çalışılmış ve daha sonra akarsu boyunca çözünmüş oksijen konsantrasyonunun nasıl bir salınım yapacağı incelenmiştir.

Bu amaçla çalışmanın ilk bölümünde, çözünmüş oksijen transferi ve akarsu kirlenmesi ile ilgili genel bilgiler verilerek bunların arasındaki bağ incelenmiştir. Literatürdeki araştırmacıların akarsulardaki oksijen transferi ile ilgili yaptığı çalışmalar verilmiş, laboratuvar ve saha çalışmaları irdelenerek çıkardıkları denklemler verilmiştir. Daha sonra oksijen eğrisi hakkında bilgi verilerek oksijen transferini etkileyen faktörler açıklanmıştır.

İkinci bölümde, laboratuvarında kanal üzerinde yapılan model çalışmada, düz ve basamaklı savaklara sahip bir barajın akarsu üzerindeki çözünmüş oksijen dengesi üzerindeki etkileri incelenmiş ve elde edilen verilerle bir akarsu üzerindeki çözünmüş oksijen miktarını çıkartabileceğimiz matematik denklemler ve eğriler geliştirilmiştir. Son bölümde, çözünmüş oksijen konsantrasyonunun, akarsu üzerinde kurulacak atıksu arıtma tesislerinin üzerine oluşturacağı etkileri inceleyen bir bilgisayar programı geliştirilerek maliyet optimizasyonu yapılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Çözünmüş Oksijen Konsantrasyonu, Akarsu Kirliliği, Havalanma, Hidrolik Yapılar, Arıtma Tesisleri Optimizasyonu

## SUMMARY

### **Effects of Aeration through the Hydraulics Structures on Dissolved Oxygen Balance in Rivers and on the Optimization of Wastewater Treatment System**

One of the most important parameters of water quality in rivers is dissolved oxygen content in the water. In order to determine water-air balance, hydraulic structures constructed on rivers are evaluated not just as structural but also in regards to ecologic effect on the river. Types and place of hydraulic structures have major importance in regards to scope of river reaeration. In highly polluted rivers, while being cleaned by increasing dissolved oxygen in the downstream of hydraulic structures, excessive oxygen concentration may affect life negatively.

The purpose of this study is to research and analyze the effect of aeration occurred through the hydraulic structure on dissolved oxygen balance on the river. Primarily, subject of aeration efficiency between upstream and downstream of a dam constructed on a river has been studied and then, it is researched that how dissolved oxygen concentration makes swing along the river.

In the first section, general information about dissolved oxygen transfer and river pollution has been given for this purpose and relation between them has been researched. The studies of researchers in literature about oxygen transfer in rivers have been given, laboratory and field studies have been examined and equations that they have obtained have been given. Then, information about oxygen sag curve has been given and factors affecting oxygen transfer have been explained.

In the second section, the effect of a dam that has smooth and stepped spillway on dissolved oxygen balance on the river has been researched in a model study carried out on a canal in laboratory and mathematical equations and graphs have been developed for obtaining dissolved oxygen amount by using data obtained. In the last section, cost optimization has been done by developing computer software that researches possible effects of dissolved oxygen concentration on waste water treatment facilities that would be constructed on the river.

**Key Words:** Dissolved Oxygen Content, River Pollution, Reaeration, Hydraulics Structures, Optimization of Wastewater Treatment

## ŞEKİLLER DİZİNİ

|  | <u>Sayfa No</u> |
|--|-----------------|
| Şekil 1. Çift film teorisinin mekanizması.....   | 3               |
| Şekil 2. Dalan jet akış bölgesinin bir taslağı.....  | 10              |
| Şekil 3. Hidrolik sıçramada hava-su akış bölgesi.....  | 14              |
| Şekil 4. Holler (1970)'in oluşturduğu deney düzeneği.....  | 18              |
| Şekil 5. Nakasone (1987)'nin kullandığı model.....   | 22              |
| Şekil 6. Gulliver ve Rindels(1992)'e göre savaklardaki hava giriş biçimleri.....                             | 24              |
| Şekil 7. Wormleaton ve Soufiani (1998)'nin kullandıkları model.....  | 25              |
| Şekil 8. Watson vd (1998)'in oluşturduğu laboratuar modeli.....  | 26              |
| Şekil 9. Kim ve Walter (2001)'in çalıştıkları deney düzeneği.....  | 27              |
| Şekil 10. Su yüzeyi profili (a) hidrolik yapıdan önce, (b) hidrolik yapıdan sonra.....                       | 29              |
| Şekil 11. Oksijen doygunluk konsantrasyonunun sıcaklıkla değişimi.....                                       | 29              |
| Şekil 12. Tebbutt vd. (1977)'in kullandığı laboratuar modeli.....  | 36              |
| Şekil 13. Akarsularda çözünmüş oksijen konsantrasyonunun zamana göre değişimi ...                            | 59              |
| Şekil 14. Çözünmüş oksijen eğrisinin farklı havalandırma katsayısı ( $K_2$ ) değerleri altında değişimi..... | 64              |
| Şekil 15. Kret şekline ve genişliğine göre savaklar .....  | 66              |
| Şekil 16. Kretin plandaki yerine göre olan savaklar .....  | 66              |
| Şekil 17. Boşaltım kanalının yönü ve yerine göre savaklar .....  | 67              |
| Şekil 18. Savak üzerinden geçen akışın şekline göre savaklar .....   | 67              |
| Şekil 19. Basamaklı dolusavaklarda havalanma durumu.....   | 69              |
| Şekil 20. Deney düzeneği.....  | 72              |
| Şekil 21. Kanal plan ve boykesiti.....   | 73              |
| Şekil 22. Düz tabanlı savakta debi-havalanma verimliliği ilişkisi.....                                       | 80              |
| Şekil 23. Düz tabanlı savakta debi- $E_{20}$ ilişkisi.....   | 80              |
| Şekil 24. Basamaklı savakta debi-havalanma verimliliği ilişkisi.....   | 81              |
| Şekil 25. Basamaklı savakta debi- $E_{20}$ ilişkisi.....   | 81              |
| Şekil 26. Savaklarda havalanma verimliliklerinin karşılaştırılması ( $Q_1 = 0.10$ l/sn)....                  | 82              |
| Şekil 27. Savaklarda havalanma verimliliklerinin karşılaştırılması ( $Q_2 = 0.15$ l/sn)....                  | 82              |
| Şekil 28. Savaklarda havalanma verimliliklerinin karşılaştırılması ( $Q_3 = 0.20$ l/sn)....                  | 83              |



|  |     |
|--|-----|
| Şekil 29. Savaklarda havalanma verimliliklerinin karşılaştırılması ( $Q_4 = 0.32$ l/sn)....  | 83  |
| Şekil 30. Savaklarda havalanma verimliliklerinin karşılaştırılması ( $Q_5 = 0.40$ l/sn)....  | 84  |
| Şekil 31. Savaklarda $E_{20}$ verimliliklerinin karşılaştırılması ( $Q_1 = 0.10$ l/sn).....  | 84  |
| Şekil 32. Savaklarda $E_{20}$ verimliliklerinin karşılaştırılması ( $Q_2 = 0.15$ l/sn).....  | 85  |
| Şekil 33. Savaklarda $E_{20}$ verimliliklerinin karşılaştırılması ( $Q_3 = 0.20$ l/sn).....  | 85  |
| Şekil 34. Savaklarda $E_{20}$ verimliliklerinin karşılaştırılması ( $Q_4 = 0.32$ l/sn).....  | 86  |
| Şekil 35. Savaklarda $E_{20}$ verimliliklerinin karşılaştırılması ( $Q_5 = 0.40$ l/sn).....  | 86  |
| Şekil 36. Savaklarda ortalama havalanma verimliliklerinin debi ile ilişkisi.....             | 87  |
| Şekil 37. Savaklarda ortalama $E_{20}$ verimliliklerinin debi ile ilişkisi.....              | 87  |
| Şekil 38. Düz tabanlı savakta topukta oluşan çözülmüş oksijen yüzdeleri.....                 | 90  |
| Şekil 39. Basamaklı savakta topukta oluşan çözülmüş oksijen yüzdeleri.....                   | 90  |
| Şekil 40. Düz tabanlı savakta çıkış suyu derinliğinin havalanmaya etkisi ( $Q_1 = 0.10$ )... | 95  |
| Şekil 41. Düz tabanlı savakta çıkış suyu derinliğinin havalanmaya etkisi ( $Q_2 = 0.15$ )... | 95  |
| Şekil 42. Düz tabanlı savakta çıkış suyu derinliğinin havalanmaya etkisi ( $Q_3 = 0.20$ )... | 96  |
| Şekil 43. Düz tabanlı savakta çıkış suyu derinliğinin havalanmaya etkisi ( $Q_4 = 0.32$ )... | 96  |
| Şekil 44. Düz tabanlı savakta çıkış suyu derinliğinin havalanmaya etkisi ( $Q_5 = 0.40$ )... | 97  |
| Şekil 45. Basamaklı savakta çıkış suyu derinliğinin havalanmaya etkisi ( $Q_1 = 0.10$ )...   | 97  |
| Şekil 46. Basamaklı savakta çıkış suyu derinliğinin havalanmaya etkisi ( $Q_2 = 0.15$ )...   | 98  |
| Şekil 47. Basamaklı savakta çıkış suyu derinliğinin havalanmaya etkisi ( $Q_3 = 0.20$ )...   | 98  |
| Şekil 48. Basamaklı savakta çıkış suyu derinliğinin havalanmaya etkisi ( $Q_4 = 0.32$ )...   | 99  |
| Şekil 49. Basamaklı savakta çıkış suyu derinliğinin havalanmaya etkisi ( $Q_5 = 0.40$ )...   | 99  |
| Şekil 50. Düz tabanlı savakta debi-çıkış suyu derinliği ilişkisi.....                        | 100 |
| Şekil 51. Basamaklı savakta debi-çıkış suyu derinliği ilişkisi.....                          | 100 |
| Şekil 52. Savaklarda çıkış suyu derinliklerinin karşılaştırılması ( $Q_1 = 0.10$ ).....      | 101 |
| Şekil 53. Savaklarda çıkış suyu derinliklerinin karşılaştırılması ( $Q_2 = 0.15$ ).....      | 101 |
| Şekil 54. Savaklarda çıkış suyu derinliklerinin karşılaştırılması ( $Q_3 = 0.20$ ).....      | 102 |
| Şekil 55. Savaklarda çıkış suyu derinliklerinin karşılaştırılması ( $Q_4 = 0.32$ ).....      | 102 |
| Şekil 56. Savaklarda çıkış suyu derinliklerinin karşılaştırılması ( $Q_5 = 0.40$ ).....      | 103 |
| Şekil 57. Düz tabanlı savakta kanal boyunca ÇO konsantrasyonu değişimi( $Q_1 = 0.10$ ).      | 109 |

|  |     |
|--|-----|
| Şekil 58. Basamaklı savakta kanal boyunca ÇO konsantrasyonu değişimi ( $Q_1 = 0.10$ )...   | 109 |
| Şekil 59. Düz tabanlı savakta kanal boyunca ÇO konsantrasyonu değişimi ( $Q_2 = 0.15$ )... | 110 |
| Şekil 60. Basamaklı savakta kanal boyunca ÇO konsantrasyonu değişimi ( $Q_2 = 0.15$ )...   | 110 |
| Şekil 61. Düz tabanlı savakta kanal boyunca ÇO konsantrasyonu değişimi ( $Q_3 = 0.20$ )... | 111 |
| Şekil 62. Basamaklı savakta kanal boyunca ÇO konsantrasyonu değişimi ( $Q_3 = 0.20$ )...   | 111 |
| Şekil 63. Düz tabanlı savakta kanal boyunca ÇO konsantrasyonu değişimi ( $Q_4 = 0.32$ )... | 112 |
| Şekil 64. Basamaklı savakta kanal boyunca ÇO konsantrasyonu değişimi ( $Q_4 = 0.32$ )...   | 112 |
| Şekil 65. Düz tabanlı savakta kanal boyunca ÇO konsantrasyonu değişimi ( $Q_5 = 0.40$ )... | 113 |
| Şekil 66. Basamaklı savakta kanal boyunca ÇO konsantrasyonu değişimi ( $Q_5 = 0.40$ )...   | 113 |
| Şekil 67. Savaklardaki ortalama ÇO yüzdeliklerinin karşılaştırılması ( $Q_1 = 0.10$ )..... | 116 |
| Şekil 68. Savaklardaki ortalama ÇO yüzdeliklerinin karşılaştırılması ( $Q_2 = 0.15$ )..... | 116 |
| Şekil 69. Savaklardaki ortalama ÇO yüzdeliklerinin karşılaştırılması ( $Q_3 = 0.20$ )..... | 117 |
| Şekil 70. Savaklardaki ortalama ÇO yüzdeliklerinin karşılaştırılması ( $Q_4 = 0.32$ )..... | 117 |
| Şekil 71. Savaklardaki ortalama ÇO yüzdeliklerinin karşılaştırılması ( $Q_5 = 0.40$ )..... | 118 |
| Şekil 72. Düz tabanlı savakta B noktası için lineer form.....                              | 122 |
| Şekil 73. Düz tabanlı savakta B noktası için quadratik form.....                           | 123 |
| Şekil 74. Düz tabanlı savakta B noktası için kübik form.....                               | 123 |
| Şekil 75. Düz tabanlı savakta B noktası için 4.derece form.....                            | 124 |
| Şekil 76. Düz tabanlı savakta B noktası için exponansiyel form.....                        | 124 |
| Şekil 77. Düz tabanlı savakta C noktası için lineer form.....                              | 125 |
| Şekil 78. Düz tabanlı savakta C noktası için quadratik form .....                          | 125 |
| Şekil 79. Düz tabanlı savakta C noktası için kübik form.....                               | 126 |
| Şekil 80. Düz tabanlı savakta C noktası için 4.derece form .....                           | 126 |
| Şekil 81. Düz tabanlı savakta C noktası için exponansiyel form.....                        | 127 |
| Şekil 82. Düz tabanlı savakta D noktası için lineer form.....                              | 128 |
| Şekil 83. Düz tabanlı savakta D noktası için quadratik form.....                           | 128 |
| Şekil 84. Düz tabanlı savakta D noktası için kübik form.....                               | 129 |
| Şekil 85. Düz tabanlı savakta D noktası için 4. derece form.....                           | 129 |
| Şekil 86. Düz tabanlı savakta D noktası için exponansiyel form.....                        | 130 |
| Şekil 87. Düz tabanlı savakta E noktası için lineer form.....                              | 130 |

|   |     |
|---|-----|
| Şekil 88. Düz tabanlı savakta E noktası için quadratik form.....                  | 131 |
| Şekil 89. Düz tabanlı savakta E noktası için kübik form.....                      | 131 |
| Şekil 90. Düz tabanlı savakta E noktası için 4.derece form.....                   | 132 |
| Şekil 91. Düz tabanlı savakta E noktası için exponansiyel form.....               | 132 |
| Şekil 92. Basamaklı savakta B noktası için lineer form.....                       | 133 |
| Şekil 93. Basamaklı savakta B noktası için quadratik form.....                    | 134 |
| Şekil 94. Basamaklı savakta B noktası için kübik form.....                        | 134 |
| Şekil 95. Basamaklı savakta B noktası için 4. derece form.....                    | 135 |
| Şekil 96. Basamaklı savakta B noktası için exponansiyel form.....                 | 135 |
| Şekil 97. Basamaklı savakta C noktası için lineer form.....                       | 136 |
| Şekil 98. Basamaklı savakta C noktası için quadratik form.....                    | 137 |
| Şekil 99. Basamaklı savakta C noktası için kübik form.....                        | 137 |
| Şekil 100. Basamaklı savakta C noktası için 4.Derece form.....                    | 138 |
| Şekil 101. Basamaklı savakta C noktası için exponansiyel form.....                | 138 |
| Şekil 102. Basamaklı savakta D noktası için lineer form.....                      | 139 |
| Şekil 103. Basamaklı savakta D noktası için quadratik form.....                   | 139 |
| Şekil 104. Basamaklı savakta D noktası için kübik form.....                       | 140 |
| Şekil 105. Basamaklı savakta D noktası için 4. derece form.....                   | 140 |
| Şekil 106. Basamaklı savakta D noktası için exponansiyel form.....                | 141 |
| Şekil 107. Basamaklı savakta E noktası için lineer form.....                      | 141 |
| Şekil 108. Basamaklı savakta E noktası için quadratik form.....                   | 142 |
| Şekil 109. Basamaklı savakta E noktası için kübik form.....                       | 142 |
| Şekil 110. Basamaklı savakta E noktası için 4. derece form.....                   | 143 |
| Şekil 111. Basamaklı savakta E noktası için exponansiyel form.....                | 143 |
| Şekil 112. Düz tabanlı savakta için $Q_1 = 0.10$ l/sn için lineer form.....       | 147 |
| Şekil 113. Düz tabanlı savakta için $Q_1 = 0.10$ l/sn için quadratik form.....    | 147 |
| Şekil 114. Düz tabanlı savakta için $Q_1 = 0.10$ l/sn için kübik form.....        | 148 |
| Şekil 115. Düz tabanlı savakta için $Q_1 = 0.10$ l/sn için 4.derece form.....     | 148 |
| Şekil 116. Düz tabanlı savakta için $Q_1 = 0.10$ l/sn için exponansiyel form..... | 149 |
| Şekil 117. Düz tabanlı savakta için $Q_2 = 0.15$ l/sn için lineer form.....       | 149 |
| Şekil 118. Düz tabanlı savakta için $Q_2 = 0.15$ l/sn için quadratik form.....    | 150 |

|   |     |
|---|-----|
| Şekil 119. Düz tabanlı savakta için $Q_2 = 0.15$ l/sn için kübik form.....        | 150 |
| Şekil 120. Düz tabanlı savakta için $Q_2 = 0.15$ l/sn için 4.derece form.....     | 151 |
| Şekil 121. Düz tabanlı savakta için $Q_2 = 0.15$ l/sn için exponansiyel form..... | 151 |
| Şekil 122. Düz tabanlı savakta için $Q_3 = 0.20$ l/sn için lineer form.....       | 152 |
| Şekil 123. Düz tabanlı savakta için $Q_3 = 0.20$ l/sn için quadratik form.....    | 152 |
| Şekil 124. Düz tabanlı savakta için $Q_3 = 0.20$ l/sn için kübik form.....        | 153 |
| Şekil 125. Düz tabanlı savakta için $Q_3 = 0.20$ l/sn için 4.derece form.....     | 153 |
| Şekil 126. Düz tabanlı savakta için $Q_3 = 0.20$ l/sn için exponansiyel form..... | 154 |
| Şekil 127. Düz tabanlı savakta için $Q_4 = 0.32$ l/sn için lineer form.....       | 154 |
| Şekil 128. Düz tabanlı savakta için $Q_4 = 0.32$ l/sn için quadratik form.....    | 155 |
| Şekil 129. Düz tabanlı savakta için $Q_4 = 0.32$ l/sn için kübik form.....        | 155 |
| Şekil 130. Düz tabanlı savakta için $Q_4 = 0.32$ l/sn için 4. derece form.....    | 156 |
| Şekil 131. Düz tabanlı savakta için $Q_4 = 0.32$ l/sn için exponansiyel form..... | 156 |
| Şekil 132. Düz tabanlı savakta için $Q_5 = 0.40$ l/sn için lineer form.....       | 157 |
| Şekil 133. Düz tabanlı savakta için $Q_5 = 0.40$ l/sn için quadratik form.....    | 157 |
| Şekil 134. Düz tabanlı savakta için $Q_5 = 0.40$ l/sn için kübik form.....        | 158 |
| Şekil 135. Düz tabanlı savakta için $Q_5 = 0.40$ l/sn için 4. derece form.....    | 158 |
| Şekil 136. Düz tabanlı savakta için $Q_5 = 0.40$ l/sn için exponansiyel form..... | 159 |
| Şekil 137. Basamaklı savakta için $Q_1 = 0.10$ l/sn için lineer form.....         | 160 |
| Şekil 138. Basamaklı savakta için $Q_1 = 0.10$ l/sn için quadratik form.....      | 160 |
| Şekil 139. Basamaklı savakta için $Q_1 = 0.10$ l/sn için kübik form.....          | 161 |
| Şekil 140. Basamaklı savakta için $Q_1 = 0.10$ l/sn için 4. derece form.....      | 161 |
| Şekil 141. Basamaklı savakta için $Q_1 = 0.10$ l/sn için exponansiyel form.....   | 162 |
| Şekil 142. Basamaklı savakta için $Q_2 = 0.15$ l/sn için lineer form.....         | 162 |
| Şekil 143. Basamaklı savakta için $Q_2 = 0.15$ l/sn için quadratik form.....      | 163 |

|   |     |
|---|-----|
| Şekil 144. Basamaklı savakta için $Q_2 = 0.15$ l/sn için kübik form.....                | 163 |
| Şekil 145. Basamaklı savakta için $Q_2 = 0.15$ l/sn için 4. derece form.....            | 164 |
| Şekil 146. Basamaklı savakta için $Q_2 = 0.15$ l/sn için exponansiyel form.....         | 164 |
| Şekil 147. Basamaklı savakta için $Q_3 = 0.20$ l/sn için lineer form.....               | 165 |
| Şekil 148. Basamaklı savakta için $Q_3 = 0.20$ l/sn için quadratik form.....            | 165 |
| Şekil 149. Basamaklı savakta için $Q_3 = 0.20$ l/sn için kübik form.....                | 166 |
| Şekil 150. Basamaklı savakta için $Q_3 = 0.20$ l/sn için 4.derece form.....             | 166 |
| Şekil 151. Basamaklı savakta için $Q_3 = 0.20$ l/sn için exponansiyel form.....         | 167 |
| Şekil 152. Basamaklı savakta için $Q_4 = 0.32$ l/sn için lineer form.....               | 167 |
| Şekil 153. Basamaklı savakta için $Q_4 = 0.32$ l/sn için quadratik form.....            | 168 |
| Şekil 154. Basamaklı savakta için $Q_4 = 0.32$ l/sn için kübik form.....                | 168 |
| Şekil 155. Basamaklı savakta için $Q_4 = 0.32$ l/sn için 4. derece form.....            | 169 |
| Şekil 156. Basamaklı savakta için $Q_4 = 0.32$ l/sn için exponansiyel form.....         | 169 |
| Şekil 157. Basamaklı savakta için $Q_5 = 0.40$ l/sn için lineer form.....               | 170 |
| Şekil 158. Basamaklı savakta için $Q_5 = 0.40$ l/sn için quadratik form.....            | 170 |
| Şekil 159. Basamaklı savakta için $Q_5 = 0.40$ l/sn için kübik form.....                | 171 |
| Şekil 160. Basamaklı savakta için $Q_5 = 0.40$ l/sn için 4. derece form.....            | 171 |
| Şekil 161. Basamaklı savakta için $Q_5 = 0.40$ l/sn için exponansiyel form.....         | 172 |
| Şekil 162. Akarsu havzasının şematik olarak gösterimi.....                              | 177 |
| Şekil 163. Müsaade edilir çözülmüş oksijen eksikliği oranının şematik gösterilmesi..... | 180 |
| Şekil 164. Tipik fiyat eğrisi.....  | 181 |
| Şekil 165. Sınır şartlarının grafiksel gösterimi.....                                   | 183 |
| Şekil 166. Hedef maliyet fonksiyonu uygun bölgesinin grafiksel gösterimi .....          | 183 |
| Şekil 167. Mümkün olan optimum çözümler.....  | 186 |
| Şekil 168. Akarsu havzasındaki çözülmüş oksijen profili.....                            | 188 |

## TABLolar DİZİNİ

|   | <u>Sayfa No</u> |
|---|-----------------|
| Tablo 1. Çeşitli gazlara ait Henry sabitleri.....   | 5               |
| Tablo 2. $A_G$ değerleri.....   | 8               |
| Tablo 3. a ve b katsayılarının değerleri.....   | 21              |
| Tablo 4. Çözünmüş oksijen doygunluk değerinin sıcaklıkla değişimi.....  | 38              |
| Tablo 5. Hava İçindeki Su Buharının Değişik Sıcaklıklardaki Kısmi Basıncı.....  | 41              |
| Tablo 6. ÇO doygunluk konsantrasyonunun tuzluluk ile değişimini.....  | 42              |
| Tablo 7. ÇO doygunluk konsantrasyonunun deniz seviyesinden mesafesi ile değişimi.....                                   | 43              |
| Tablo 8. Hasting Barajı memba ve mansabında ölçülen ÇO değerleri.....   | 48              |
| Tablo 9. Nakasone (1987) tarafından çeşitli savakların memba ve mansabında ölçülen ÇO. değerleri.....                   | 49              |
| Tablo 10. Basamaklı savaklarda havalanma verimliliği.....   | 50              |
| Tablo 11. Gulliver ve Rindels (1993)'in ölçtükleri havalanma verimlilikleri.....  | 51              |
| Tablo 12. $K_L a_t$ için tipik değerler.....  | 55              |
| Tablo 13. Çeşitli durumlar için verilen tahmini $k_2$ değerleri.....  | 60              |
| Tablo 14. Havalanma katsayısı $K_2$ tahmini için geliştirilmiş formüller.....   | 60              |
| Tablo 15. Saha çalışmaları ile bulunmuş $K_2$ değerleri.....  | 62              |
| Tablo 16. Reid vd. (2007) tarafından Lagan Nehrinden bulunan $K_2$ değerleri.....                                       | 62              |
| Tablo 17. Düz tabanlı savakta memba ve mansap çözünmüş oksijen konsantrasyon değerleri ve havalanma verimlilikleri..... | 76              |
| Tablo 18. Basamaklı savakta memba ve mansap çözünmüş oksijen konsantrasyonu değerleri ve havalanma verimlilikleri.....  | 78              |
| Tablo 19. Düz tabanlı savakta topukta oluşan havalanma yüzdeleri.....   | 88              |
| Tablo 20. Basamaklı savakta topukta oluşan havalanma yüzdeleri.....   | 89              |
| Tablo 21. Düz tabanlı savakta oluşan çıkış suyu derinlikleri.....   | 91              |
| Tablo 22. Basamaklı savakta oluşan çıkış suyu derinlikleri.....   | 93              |
| Tablo 23. Düz tabanlı savakta kanal boyunca oluşan çözünmüş oksijen konsantrasyonu değerleri.....                       | 105             |
| Tablo 24. Basamaklı savakta kanal boyunca oluşan çözünmüş oksijen konsantrasyon değerleri.....                          | 107             |
| Tablo 25. Düz tabanlı savakta kanal boyunca oluşan ÇO konsantrasyon yüzdeleri.....                                      | 114             |

|   |     |
|---|-----|
| Tablo 26. Basamaklı savakta kanal boyunca oluşan $\text{ÇO}$ konsantrasyon yüzdeleri..... | 115 |
| Tablo 27. Massachusetts çözülmüş oksijen standartları.....                                | 121 |
| Tablo 28. B noktası için ortalama konsantrasyonlar.....                                   | 122 |
| Tablo 29. C noktası için ortalama konsantrasyonlar.....                                   | 122 |
| Tablo 30. D noktası için ortalama konsantrasyonlar.....                                   | 127 |
| Tablo 31. E noktası için ortalama konsantrasyonlar.....                                   | 127 |
| Tablo 32. B noktası için ortalama konsantrasyonlar (Basamaklı savak).....                 | 133 |
| Tablo 33. C noktası için ortalama konsantrasyonlar (Basamaklı savak).....                 | 136 |
| Tablo 34. D noktası için ortalama konsantrasyonlar (Basamaklı savak).....                 | 136 |
| Tablo 35. E noktası için ortalama konsantrasyonlar (Basamaklı savak).....                 | 136 |
| Tablo 36. Düz tabanlı savakta kanal boyunca oluşan ortalama konsantrasyonlar.....         | 146 |
| Tablo 37. Basamaklı savakta kanal boyunca oluşan ortalama konsantrasyonlar.....           | 159 |
| Tablo 38. Optimizasyon problemi için kullanılacak olan temel veriler.....                 | 184 |
| Tablo 39. Optimizasyon problemi için kullanılacak olan ara veriler.....                   | 184 |
| Tablo 40. Optimizasyon probleminin sonuçları ve lineer programlama ile karşılaş....       | 187 |
| Tablo 41. B noktası için lineer regresyon hatalar toplamları.....                         | 189 |
| Tablo 42. Düz tabanlı savak için Debi- $\text{ÇO}$ değişimi için hata analizi.....        | 190 |
| Tablo 43. Basamaklı savak için Debi- $\text{ÇO}$ değişimi için hata analizi.....          | 191 |
| Tablo 44. Çözülmüş Oksijen-Mesafe değişimi için hata analizi.....                         | 191 |

## SEMBOLLER DİZİNİ

|                |  |
|----------------|--|
| A              | : Gaz-sıvı arayüz alanı (m <sup>2</sup> )                                      |
| C              | : Sudaki çözünmüş oksijen konsantrasyonu (mg/l)                                |
| ÇO             | : Çözünmüş oksijen   |
| D              | : t zamanında ÇO açığı   |
| DO             | : Çözünmüş oksijen miktarı (mg/l)  |
| E              | : Havalanma verimliliği  |
| EL             | : Ölçüm yapılan bölgenin deniz seviyesinden yüksekliği                         |
| F              | : Froude sayısı  |
| H              | : Mansap su derinliği  |
| L              | : Nihai biyokimyasal oksijen ihtiyacı  |
| P              | : Atmosferik basınç (mmHg)   |
| R              | : Reynolds sayısı  |
| RF             | : 28 günlük yağış miktarı (inç)  |
| Q              | : Akış debisi  |
| S              | : Eğim   |
| T              | : Su sıcaklığı (°C)  |
| Y              | : Fiyat fonksiyonu   |
| a              | : Birim hava ve su başına düşen spesifik yüzey alanı                           |
| a <sub>s</sub> | : Akarsularda BOİ giderimi için fiyat eğrisinin lineer kısmının eğimi          |
| a <sub>w</sub> | : Su kalitesi faktörü  |
| a <sub>1</sub> | : Hidrolik yapıdan önce oluşan hava-su özgül ara kesit yüzeyi                  |
| a <sub>2</sub> | : Hidrolik yapıdan sonra oluşan hava-su özgül ara kesit yüzeyi                 |
| a*             | : Su kalitesine bağlı katsayı  |
| A <sub>G</sub> | : Suyun özelliklerine bağlı bir katsayı  |
| b <sub>w</sub> | : Havalandırma katsayısı   |
| b*             | : Savak tipine bağlı bir katsayı   |
| B'             | : Hava konsantrasyonuna bağlı değişken   |
| c              | : BOİ giderimi için fiyat eğrisinin lineer kısmının düşey ekseni kestiği değer |



- $C_b$  : Sınır tabakasının dış tarafındaki hava konsantrasyonu
- $C_{ds}$  : Klorür konsantrasyonu (g/l)
- $C_{DS}$  : Mansap çözünmüş gaz konsantrasyonu (mg/l)
- $C_{DS1}$  : Ortam şartlarına ayarlanmış mansap çözünmüş oksijen konsantrasyonu
- $C_{Gaz}$  : Su içerisindeki çözünmüş kimyasal madde konsantrasyonu ( $kg/m^3$ )
- $C_{cl}$  : Klor oranı (%)
- $C_{max}$  : Maksimum hava hacmi
- $C_S$  : Sudaki çözünmüş oksijenin doyum konsantrasyonu (mg/l)
- $C_{SS}$  : 1 atm basınçta tuzlu sudaki oksijen doyum konsantrasyonu
- $C_{S1}$  : Ortam şartlarına ayarlanmış çözünmüş oksijen doyum konsantrasyonu
- $C_{US}$  : Mamba çözünmüş gaz konsantrasyonu (mg/l)
- $C_{US1}$  : Ortam şartlarına ayarlanmış mamba çözünmüş oksijen konsantrasyonu
- $C_0$  :  $t = 0$  anındaki oksijen konsantrasyonu
- $C_t$  :  $t = t$  anındaki oksijen konsantrasyonu
- $d$  : napın kalınlığı (m)
- $d_{ab}$  : Hava kabarcıkları yarıçapı
- $d_t$  : Çıkış suyu derinliği (m)
- $D_A$  : Müsaade edilebilen oksijen eksikliği (mg/l)
- $D_{Gaz}$  : Su içerisindeki gazın moleküler difüzyon katsayısı ( $m^2/s$ )
- $D_p$  : Penetrasyon derinliği
- $D_S$  : s. varış noktasının başlangıcındaki oksijen eksikliği (mg/l)
- $e_k$  : Hata terimi
- $E_S$  : s. varış noktasının sonundaki oksijen eksikliği (mg/l)
- $E_T$  :  $T^\circ C$ 'deki oksijen transfer verimi
- $E_1(f)$  : Ortalama hata
- $E_2(f)$  : Ortalama kare hatanın karekökü
- $E_\infty(f)$  : Maksimum hata
- $E_{15}$  :  $15^\circ C$ 'deki oksijen transfer verimi

- $E_{20}$  : 20 °C'deki oksijen transfer verimi
- $f(X_k)$ : Gerçek değer
- $F_S$  : s. varış noktasının sonundaki BOİ konsantrasyonu (mg/lt)
- $g$  : Yerçekimi ivmesi
- $G'$  : Hava konsantrasyonuna bağlı değişken
- $h$  : Suyun düşme yüksekliği
- $h_m$  : Çıkış suyu derinliği
- $H_C$  : Savak üzerindeki kritik su derinliği
- $H_d$  : Savak üzerinden düşen jetin düşü yüksekliği
- $H_{Gaz}$  : Henry yasası sabiti
- $H_S$  : Su derinliği (feet)
- $k_{AN}$  : Suyun tuzluluğuna bağlı bir katsayı
- $k_{N1}$  : Debi ve düşü yüksekliğinin bir fonksiyonu olan katsayı
- $k_{N2}$  : Debi ve düşü yüksekliğinin bir fonksiyonu olan katsayı
- $k_{N3}$  : Debi ve düşü yüksekliğinin bir fonksiyonu olan katsayı
- $k_S$  : Biyooksidasyon sabiti ( $gün^{-1}$ )
- $k_1$  : BOİ reaksiyon hızı katsayısı (e tabanına göre)
- $k_2$  : Havalanma katsayısı (e tabanına göre)
- $K_M$  : Gaz transferi katsayısı (m/s)
- $K_L$  : Likit katsayısı
- $K_L.a$  : Kütle transfer katsayısı
- $K_1$  : BOİ reaksiyon hızı katsayısı (10 tabanına göre)
- $K_2$  : Havalanma katsayısı (10 tabanına göre)
- $(K_2)_{(20)}$ : 20°C deki havalanma katsayısı
- $L_a$  : Havalanma uzunluğu (m)
- $L_h$  : Havalanma mesafesi (m)
- $L_R$  : Hidrolik yapıdan uzaklık (km)
- $L_S$  : Atıksu ile karıştıktan sonra s. varış noktasının başlangıcındaki BOİ konsantrasyonu
- $M_{Gaz}$  : Çözünmüş gaz toplam kütlesi (kg)
- $M_S$  : Tesisin çıkış BOİ Konsantrasyonu (mg/lt)

- $P_{Gaz}$  : Havadaki kimyasalların kısmi basıncı
- $P_S$  : Tesisin giriş BOİ Konsantrasyonu (mg/l)
- $P_w$  : Su buharı kısmi basıncı
- $r$  : Oksijen eksiklik oranı
- $r_S$  : Havalanma hız sabiti ( $gün^{-1}$ )
- $r_{15}$  :  $15^{\circ}C$  deki oksijen eksiklik oranı
- $r_{20}$  :  $20^{\circ}C$  deki oksijen eksiklik oranı
- $r_T$  :  $T^{\circ}C$  deki oksijen eksiklik oranı
- $q_w$  : Birim genişlikten geçen debi
- $(q_w)_c$  : Sınır tabakasının yüzeye ulaştığı ve serbest havalanmanın olmadığı debi
- $Q_S$  : Atık suyun deşarj debisi ( $m^3/gün$ )
- $s$  : Kapağın batma yüksekliği
- $s_0$  : II noktasındaki çözülmüş oksijen konsantrasyonu (mg/l)
- $s_1$  : II noktasındaki çözülmüş oksijen konsantrasyonu değişimi (Yerleşim 1'den gelen) (mg/l)
- $s_2$  : II noktasındaki çözülmüş oksijen konsantrasyonu değişimi (mg/l) (Yerleşim 2'den gelen) dir.
- $t$  : Havalanma zamanı (s)
- $T_{kr}$  : Kritik zaman
- $T_S$  : Atık suyun oksijen eksikliği (mg/l)
- $u_0$  : I noktasındaki çözülmüş oksijen konsantrasyonu (mg/l)
- $u_1$  : I noktasındaki çözülmüş oksijen konsantrasyonu değişimi(mg/l)
- $U_r$  : Kabarcıkların yükselme hızı
- $V_0$  : Havanın suya aktarılması için ihtiyaç duyulan minimum hız
- $V^*$  : Sürtünme hızı
- $x_t$  : s varış noktasına olan uzaklığın yarısı için geçen süre (gün)
- $y_k$  : Tahmini değer
- $\alpha$  : s varış noktasına olan uzaklığı için geçen süre (gün)
- $\beta_1$  : Sabit
- $\beta_2$  : Sabit

$\beta_3$  : Sabit

$\frac{dC}{dt}$  : Konsantrasyon değişim hızı (mg/L.s)

$\varepsilon_s$  : Arıtma verimi

$\delta_{ab}$  : Sınır tabakası kalınlığı

$\eta$  : Çözülmüş gaz hacmi, sıcaklık ve savak eğimine bağlı bir değişken.

$\theta$  : Üçgen labirent savak tepe açısı

$\theta_3$  : Tam gelişmiş akım bölgesinde dış yayılma açısı

$\nu_w$  : Kinematik viskozite (m<sup>2</sup>/s)

## 1.GENEL BİLGİLER

### 1.1. Giriş

Akarsular dünyanın hemen her yerinde insanların dolaylı ya da dolaysız olarak yaptıkları etkinlikler neticesinde kirlenmektedirler. Çok az sayıda akarsu kirlenmeye maruz bırakılmamaktadır. Kirletici öğelerle doldurulan akarsular yıl içerisinde ve uzunluğu boyunca oksijen kazanarak kendi kendini temizlemeye çalışmaktadır.

Kirlenmeye maruz bırakılan akarsuların bir kısmı kendi kendine temizlenmeyi tam olarak oluşturamaz. Akarsu boyunca su içerisine girmesi beklenen çözülmüş oksijen (ÇO) miktarı yetersiz kalabilir. Bu durumda akarsularda, kirlenme ve koku problemleri olabileceği gibi insan ve çevre sağlığını kötü yönde etkileyebilecek durumlar söz konusu olabilir.

Bu tip durumları önlemenin en önemli yolu tabii ki kirleticiyi ana kaynağında bulmak ve yeterli bir arıtmadan geçirerek akarsuya vermektir. Bunun yapılamaması durumunda ise, akarsu üzerinde çeşitli müdahalelerle daha temiz bir ortam sağlamak gerekir.

Hidrolik yapılar akarsu ile kısa bir süre temasta olmalarına rağmen, sistem içerisindeki çözülmüş oksijen miktarı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Akarsu yatağı boyunca çok uzun mesafelerde meydana gelebilecek oksijen transferi, bir hidrolik yapı ile kısa bir mesafede ve sürede meydana gelebilir. Bu hızlı bir şekilde gerçekleşen oksijen transferinin asıl sebebi, su içerisinde meydana gelen hava kabarcıklarıdır. Oksijen, oluşan hava kabarcıklarıyla beraber su içerisine geçer. Bu olay hava-gaz transferi olarak da bilinir. Hava kabarcıklarının oluşması, hava ile su arasındaki temas yüzeyini çok büyük oranında artırır ve transfer çok daha hızlı gerçekleşir (Uslu ve Türkman, 1987).

Oksijen transferi, hidrolik yapı üzerinde serbest düşen jetle, nap akışı ile, suya çarpan jette, hidrolik sıçrama esnasında veya savak üzerinde serbest yüzey havalanması şeklinde çeşitli durumlarda oluşabilir. Her olayda oksijen transferinin mekanizması farklı şekilde oluşur. Bu mekanizmalar literatürde birçok bilim adamı tarafından incelenmiş ve deneysel veriler yardımıyla formülize edilmiştir. Konu ile ilgili çalışmalar günümüzde halen devam etmektedir (Lung, 1996; İnkayalı ve Budak, 2003; Neto vd., 2007; Urban vd., 2008).

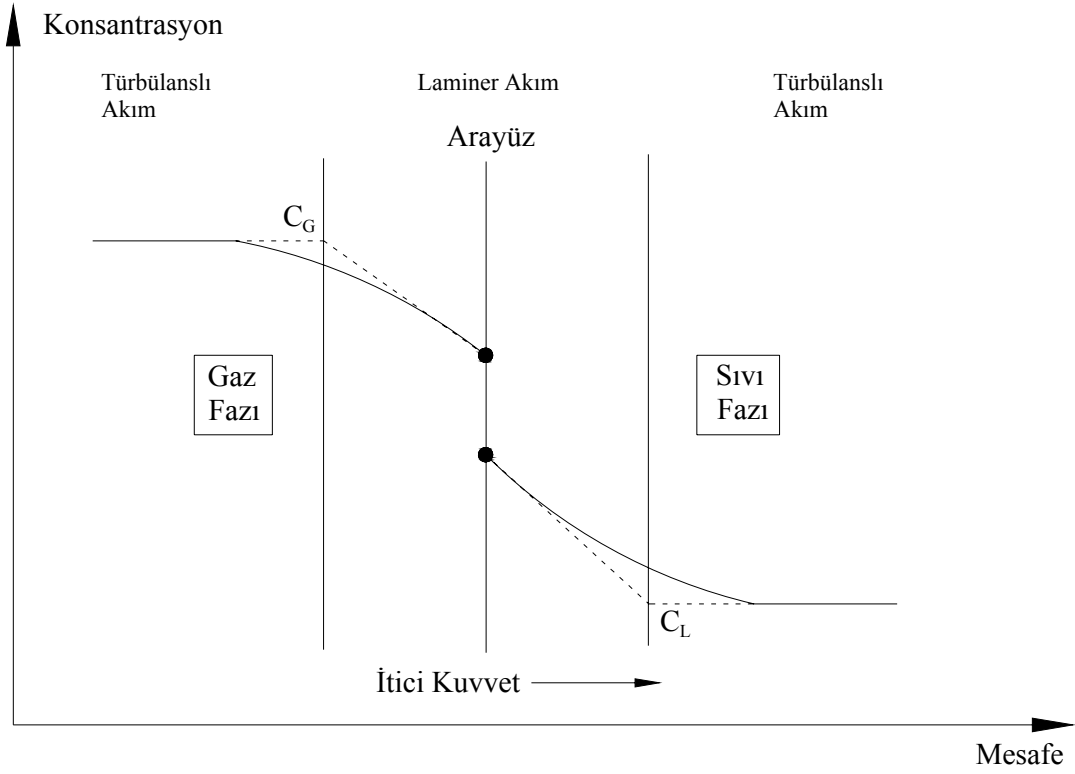
Herhangi bir sebeple, sudaki çözünmüş oksijen doyma sınırının altına düştüğünde, su tekrar atmosferle temas geçirilirse çözünmüş oksijen tekrar doyma sınırına yaklaşılır. Bir sıvı içerisinde bir gazın eriyebilirliği Henry Kanunu'na tabiidir. Sabit bir ısıda bir sıvı içerisinde bir gazın çözünebilirliği gazın kısmi basıncı ile orantılıdır. Akarsularda çözünme sadece su-hava temas yüzeyinde olur. İnce bir su filmi kısa sürede doymuş hale geçer. Daha sonraki havalandırma su kütlesine oksijenin difüzyonu suretiyle olur. Bu yavaş bir işlemdir. Türbülanslı bir akarsuda, bu doymuş tabaka kırılır ve havalandırma daha çabuk olur (Tebbutt, 1984; Aras, 2003).

## 1.2. Gaz Transferi

Gaz ile sıvı arasındaki bir kütle transferi işlemi sonucu sıvılarda havalanma gerçekleşir. Burada itici kuvvet, gaz fazda genellikle kısmi basınç farkı, sıvı fazda ise konsantrasyon farkı ile ifade edilir. Kütle transfer işlemi gaz ile sıvının temas ettiği ara yüzeyin her iki tarafından film içerisinde gerçekleşir (Theriault, 1927; Popel, 1974).

Sıvılarda gaz transferinin nasıl oluştuğunu anlamak için çift film teorisi adı verilen teori kullanılır. Çift film teorisi ilk olarak 1925 yılında Lewis ve Whitman (1925) tarafından tartışılmıştır. Bu teoriye göre, ara yüzeyde iki tabaka mevcuttur. Bu iki tabakanın dışında sıvı ve gaz fazları yer alır. Bu tabakalar, gaz moleküllerinin gaz ve sıvı fazları arasındaki hareketlerine karşı direnç gösterirler. Sıvı içerisinde çözünebilirliği az olan gazlar, gaz fazdan sıvı faza geçerken esas direnci sıvı tabakasından görürken, çözünebilirliği çok olan gazlar ise direnci gaz filminden görürler. Çözünebilirliği orta düzeyde olan gazlar ise her iki tabakadan da geçiş direnci ile karşılaşırlar (Şekil 1).

Suların havalandırılmasında karşılaşılan sistemlerde genel olarak suda az çözünen gazlar söz konusu olup gaz transfer hızı, gazın denge halindeki konsantrasyonu ve mevcut konsantrasyonu arasındaki farkla orantılıdır (Baylar, 2002; Duan, 2007).



Şekil 1. Çift film teorisinin mekanizması

Fick yasalarına göre sakin bir su içerisinde bir ara yüzden diğerine toplam gaz transferinin, moleküler difüzyon katsayısı ve negatif eğim gaz konsantrasyonu ile bağıntısı şu şekildedir :

$$\frac{d}{dt} M_{Gaz} - D_{Gaz} \left( \frac{d}{dx} C_{Gaz} \right) \quad (1)$$

Burada;

$M_{Gaz}$  : Çözülmüş gaz toplam kütlesi (kg)

$D_{Gaz}$  : Su içerisindeki gazın moleküler difusivitesi ( $m^2/s$ )

$C_{Gaz}$  : Su içerisindeki çözülmüş kimyasal madde konsantrasyonu ( $kg/m^3$ )

Çözülmüş gaz konsantrasyonu eğimi, bir gaz kabarcığı ile çevrili su tabakası içerisindeki bir sınır tabakası formundadır. Bir kabarcık için bu tabakanın analizi ;

1. Kabarcıkların şekli,

2. Laminer ve türbülans akımın varlığı,

3. Bitişik kabarcıkların birbirlerine karışarak büyümesi ve mobil bir arayüzün oluşması durumlarından ötürü bir hayli komplekstir. Genel olarak bir hava-su ara yüzünde çözünmüş kimyasallar (oksijen, nitrojen) gaz transferi şöyle yazılabilir :

$$\frac{d}{dt} M_{Gaz} = K_M \cdot A \left( \frac{P_{Gaz}}{H_{Gaz}} - C_{Gaz} \right) \quad (2)$$

Burada ;

$K_M$  : Gaz transferi katsayısı (m/s)

$A$  : Gaz-sıvı arayüz alanı (m<sup>2</sup>)

$P_{Gaz}$  : Havadaki kimyasalların kısmi basıncı

$H_{Gaz}$  : Henry yasası sabiti

Eğer kimyasallar, oksijen veya klor gibi kolay uçabilen gazlardan ise bu transfer likit gaz tarafından kontrol edilir ve transfer katsayısı, likit katsayısına ( $K_L$ ) denktir ( $K_M \sim K_L$ ).

Ayrıca Henry yasasına göre; sabit sıcaklıktaki belirli bir hacimdeki sıvıda çözünmüş herhangi bir gazın ağırlığı, sıvı üzerindeki gaz basıncı ile direkt orantılıdır. Buna göre dengedeki bir sıvıda çözünmüş gaz konsantrasyonu ( $C_S$ ) şu şekilde yazılabilir ;

$$C_S = \frac{P_{Gaz}}{H_{Gaz}} \quad (3)$$

Henry sabiti ( $H_{Gaz}$ ); tuzluluk oranı, sıcaklık ve yüzeye bağlı olarak değişir. Bu değer in tam bir sabit olmadığı ve basınç değişiklikleri gibi değiştiği bilinmelidir. Çeşitli gazlara ait Henry sabitleri tablo 1’de verilmiştir.



Tablo 1. Çeşitli gazlara ait Henry sabitleri (Muslu, 1985)

| T (°C)                          | Hava | CO <sub>2</sub> | CO   | H <sub>2</sub> | H <sub>2</sub> S | CH <sub>4</sub> | N <sub>2</sub> | O <sub>2</sub> |
|---------------------------------|------|-----------------|------|----------------|------------------|-----------------|----------------|----------------|
| 0                               | 4.32 | 0.0728          | 3.52 | 5.79           | 0.0268           | 2.24            | 5.29           | 2.55           |
| 10                              | 5.49 | 0.104           | 4.42 | 6.36           | 0.0367           | 2.97            | 6.68           | 3.27           |
| 20                              | 6.64 | 0.142           | 5.36 | 6.83           | 0.0483           | 3.76            | 8.04           | 4.01           |
| 30                              | 7.71 | 0.186           | 6.20 | 7.29           | 0.0609           | 4.49            | 9.24           | 4.75           |
| 40                              | 8.70 | 0.233           | 6.96 | 7.51           | 0.0745           | 5.20            | 10.4           | 5.35           |
| 50                              | 9.46 | 0.283           | 7.61 | 7.65           | 0.0884           | 5.77            | 11.3           | 5.88           |
| 60                              | 10.1 | 0.341           | 8.21 | 7.65           | 0.103            | 6.26            | 12.0           | 6.29           |
| 10 <sup>-4</sup> atom/mol oranı |      |                 |      |                |                  |                 |                |                |

Toplam hava-su karışımı bölünerek, birim hava ve su başına düşen spesifik yüzey alanı (a) bulunabilir :

$$\frac{d}{dt}C_{Gaz} = K_L \cdot a(C_S - C_{Gaz}) \quad (4)$$

Burada;

$\frac{dC}{dt}$  : Konsantrasyon değişim hızı (mg/L.s)

$K_L \cdot a$  : Kütle transfer katsayısı

olarak adlandırılırlar.

Gaz transferinde  $C_S$  ile  $C_{Gaz}$  arasında şu bağıntı vardır :

1.  $C_S > C_{Gaz}$  durumunda gaz erimiş hale gelir,
2.  $C_S < C_{Gaz}$  durumunda gaz desorbe olur ve uçar.

Savaklar üzerinde akışın havalanması ve güçlü türbülans ile hava-gaz kimyasal transferi gelişir. Kimyasallar oksijen-nitrojen gibi atmosferik gazlar ya da uçucu organik maddeler gibi kirletilmiş öğeler olabilir. Güçlü türbülans etkisi transfer katsayısını yükseltir ve büyük miktarda hava kabarcığı, kümülatif bir halde yüzey bölgesini oluşturarak hava-su arayüz alanını genişletir (Rahmé vd., 1997; Berkün, 2005).

Denklem (4) bir kanal ya da hidrolik yapı boyunca integre edilirse, basamaklar ya da üstten aşmalı savaklar boyunca toplam gaz transferi, oksijen eksiklik oranı ( $r$ ) ile gösterilebilir:

$$r = \exp \left[ \int_u^d K_L \cdot a \cdot dt \right] \quad (5)$$

$$r = \frac{C_S - C_{US}}{C_S - C_{DS}} \quad (6)$$

Burada;

$C_{US}$  : Memba çözünmüş oksijen konsantrasyonu

$C_{DS}$  : Mansap çözünmüş oksijen konsantrasyonu

Bir çok durumda arayüz alanı ( $a$ ), transfer katsayısı ( $K_L$ ) ve bunların çarpımı bir hidrolik yapı boyunca farklılık gösterir ve bir sabit olarak düşünülemez. Bundan dolayı denklem (5) oksijen transferi hakkında tam bir bilgi veremez. Eğer transfer katsayısı ve arayüz alanının üç boyutlu düzlemde pozisyonu biliniyorsa denklem (4) yerel olarak integre edilerek sonuca ulaşılabilir.

Türbülans sırasında, oluşan gaz-sıvı akışı için hesaplanan transfer katsayısı  $K_L$ 'nin kabarcıkların toplam hacmine, boyutuna ve akış durumuna bakılmaksızın bağımsız bir sabit olduğu ortaya çıkarılmıştır. Penetrasyon teorisi kullanılarak, yüzey kirliliğinden de etkilenen  $K_L$  şu şekilde ifade edilebilir :

$$d_{ab} < 0.25 \text{ mm. için ; } K_L = 0.28 D_{Gaz}^{2/3} \left( \frac{\mu_W}{\rho_W} \right)^{-1/3} \sqrt[3]{g} \quad (7)$$

$$d_{ab} > 0.25 \text{ mm. için ; } K_L = 0.47 \sqrt{D_{Gaz}} \left( \frac{\mu_W}{\rho_W} \right)^{-1/6} \sqrt[3]{g} \quad (8)$$

Hava kabarcıkları yarıçapı  $d_{ab}$  ile gösterilir ise arayüz alanı da basitçe şu bağıntıyla sunulabilir :

$$a = 6 \frac{C}{d_{ab}} \quad (9)$$

Bir başka havalanma ölçüsü, havalanma verimliliği (E) ise şöyle tanımlanabilir :

$$E = \frac{C_{DS} - C_{US}}{C_S - C_{US}} \quad (10)$$

Basamaklı yapılarda çözünmüş oksijen hacmi için eksilme oranının ilk ölçümleri Gameson (1957) tarafından rapor edilmiş ve şöyle bir bağıntı geliştirmiştir :

$$r = 1 + 0.469 A_G (1 + 0.046 T) \Delta H \quad (11)$$

$A_G$  değerleri tablo 2 de verilmiştir.

Tablo 2.  $A_G$  değerleri

| Su zellikleri           | $A_G$ Değerleri |
|--------------------------|-----------------|
| Temiz su                 | 1.8             |
| Az kirli su              | 1.6             |
| Tamamen kirli su         | 1.0             |
| Kanalizasyona karışan su | 0.65            |

Denklem (11), kısa basamaklı savaklar içinde doğrulanmış ve sonraları şu şekle sokulmuştur :

$$r = 1 + (0.38B)A_G(1 + 0.046T) \Delta H(1 - 0.11\Delta H) \quad (12)$$

B katsayısı Gameson (1957) verilerine göre 1.30'a denktir fakat Tebbutt (1972)'un gözlemlerine göre 0.7-1.3 arasında değişmektedir. Butts ve Evans (1983), prototip üzerinde yaptıkları çalışmalarda ise bu katsayıyı 0.65-1.14 arasında bulmuşlardır.

Essery (1978) ise ampirik bir bağıntı sunmuştur :

$$r_{20} = \exp \left[ \frac{H_{baraj}}{\sqrt{gh}} \left( 0.427 + 0.31 \ln \left( \frac{d_{kr}}{h} \right) \right) \right] \quad (13)$$

Burada ;

$r_{20}$  : 20°C deki oksijen eksiklik oranıdır.

15°C' deki oksijen eksiklik oranını kullanarak 20°C deki oksijen transfer verimini ifade edebilmek için de şu denklem kullanılmaktadır:

$$E_{20} = 1 - \frac{1}{r_{15}^{1.115}} \quad (14)$$

### 1.2.1. Serbest Düşme ve Dalan Jet Olayındaki Gaz Transferi

Chanson (1994)'a göre jetin iç kesme tabakasında yüzebilirlik, kabarcık yollarını oluşturur ve bunlar dış kesme tabakasından daha büyük kesme gerilmesine bağlıdır. Buna göre daha ufak kabarcık hacimlerinin, jetin iç tabakasında gözlenebilmesi muhtemeldir. Maksimum kabarcık penetrasyon derinliğinin teorik değeri süreklilik denklemlerinden, difüzyon jeti ile çıkarılabilir (Bağatur, 2000). Kabarcıkların havalandırıldıkları bir noktada ortalama jet hızının dikey bileşeni, kabarcık yükselme hızına denk olduğu farz edilir. Buna göre, düzlem jetler için penetrasyon derinliği ( $D_p$ ) şöyle ifade edilebilir :

$$\frac{D_p}{d_i} = 0.0240 \left( \frac{V_i}{U_r} \right)^2 \frac{(\sin \theta)^3}{(\tan \theta_3)^2} \left[ 1 + \sqrt{1 - 20.81 \left( \frac{U_r}{V_i} \right)^2 \frac{\tan \theta_3}{(\sin \theta)^2}} \right] \quad (15)$$

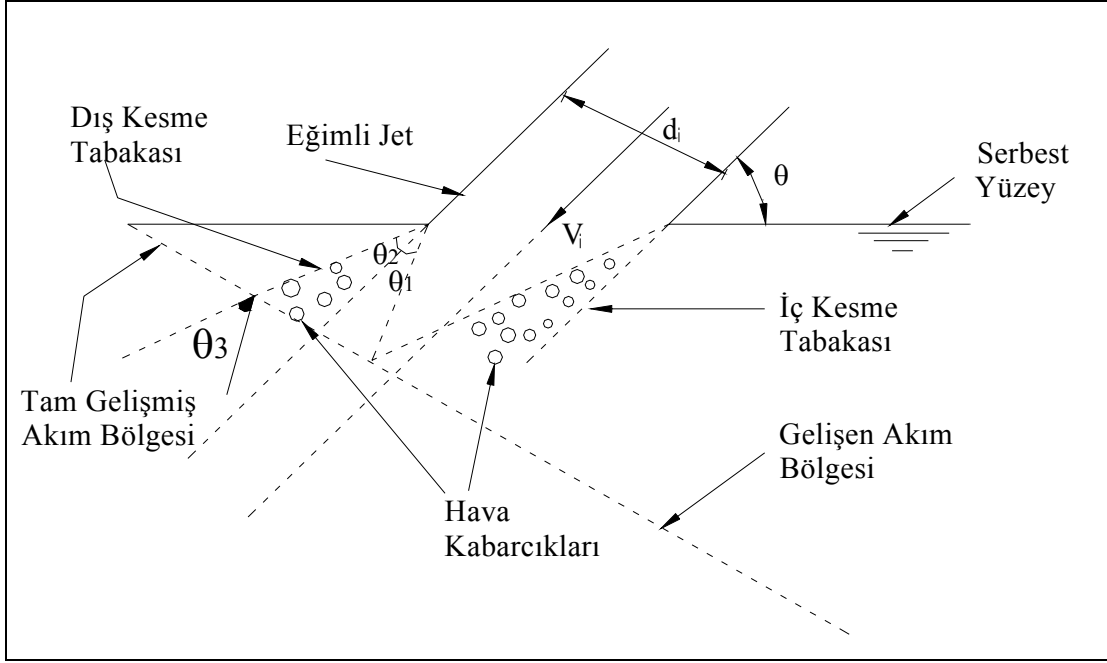
Burada;

$U_r$  : Kabarcıkların yükselme hızı

$\theta_3$  : Tam gelişmiş akım bölgesinde dış yayılma açısı (Şekil 2)

Oluşan hava kabarcıklarının dağılımı iki farklı bölgede oluşur :

1. Dalan jetin neden olduğu aşağıya doğru akış hareketi ile birlikte olan kabarcıklı bir hava-su bölgesi,
2. Bir önceki kabarcık tarafından kuşatılmış kabarcıkların yükseldiği bölge (Sene, 1988).



Şekil 2. Dalan jet akış bölgesinin bir taslağı

Son araştırmalar, iki boyutlu dalan jetler için hız profilleri ve difüzyonu hakkındaki bilgilerin yetersiz olduğunu belirtmiştir. Bu tip bilgi eksikleri denklemlerin integrasyonunu ve yorumları engeller. Yükselen kabarcıkların toplandığı bölgede kabarcık hareketi, yüzebilirlik tarafından kontrol edilir. İlk yaklaşım için hava kabarcığı hareketinin dikey olduğu ve durgun suda kabarcık hızının, kabarcık yükselme hızına eşit olduğu kabul edilir (Hager, 1983; Jun ve Jain, 1993; Rajaratnam ve Albers, 1998; Chamani ve Beirami, 2002; Sousa vd., 2003).

Avery-Novak (1978) oksijen transferi üzerine yaptıkları sistematik bir çalışma sonucu, geniş derinlikte ve üstten aşmalı modellerde şöyle bir bağıntı çıkardılar :

$$r = 1 + k_{AN} \left[ \frac{q_w}{\mu_w} D_H \sqrt{\frac{g \cdot \Delta H}{8}} \right]^{0.53} \left[ \frac{2 \Delta H}{D_H} \right]^{0.89} \quad (16)$$

Burada;

$k_{AN}$  : Suyun tuzluluğuna bağlı bir katsayı ( $0.627 \times 10^{-4}$  -  $1.243 \times 10^{-4}$ )

Nakasone'nin geliştirdiği bağıntı ise çıkış suyu derinliğini de dikkate alıyordu :

$$\ln r = k_{N1} \Delta H^{kN2} q_w^{kN3} d_t^{0.310} \quad (17)$$

Burada ;

$d_t$  : ıkış suyu derinliği (m)

$k_{N1}, k_{N2}, k_{N3}$  : Debi ve dūřu yūksekliliđinin bir fonksiyonu olan katsayılar

Bu denklem būyūk hacimli durumlar ( $\Delta H > 12$  m. ve  $q_w > 0.065$  m<sup>2</sup>/s) için řu řekle dūnūřtūrūlebilir :

$$\ln r = 5.92 \frac{\Delta H^{0.816}}{q_w^{0.363}} d_t^{0.310} \quad (18)$$

Çıkarılan bu denklem bazı model ve prototip çalıřmalarında, 0.011-7.8 m<sup>2</sup>/s'lik debi, 0.24-5.8 m.'lik dūřu yūksekliliđi ve 0.25-7.5 m.'lik çıkıř suyu derinlikleri için dođrulandı.

Nakasone'nin bu sonuçları, çıkıř suyu derinliđinin artması ile havalanmadaki verimliliđin de arttıđını gūstermektedir. Fakat ıkıř suyu derinliđinin, hava kabarcıklarının maksimum penetre derinliđinden daha būyūk olduđu durumlar için havalanma verimliliđinin su toplama havuzu derinliđinden bađımsız olduđunu da belirtmek gerekir (Brattberg ve Chanson, 1998; Rein, 1998).

### 1.2.2. Hidrolik Sıçramadaki Gaz Transferi

Bir hidrolik sıçrama; būyūk ölçekli tūrbūlans geliřimi, enerji kırılması ve havalanma olarak karakterize edilebilir. Hidrolik sıçramadaki gaz transferi, būyūk miktardaki hava kabarcıkları ve sıçramadaki tūrbūlans karıřımı ile meydana gelir (Tang vd., 1995).

Hidrolik sıçramada topukta suya būyūk miktarda hava giriři olur ve hava kabarcıkları mansap tarafına yayılır. Hidrolik sıçramada su-hava akıřı ū būlgede (řekil 3) oluřur :

1. Ufak hacimli hava kabarcıkları ile oluşan bir türbülans kesme tabakası,
2. Kabarcıkların birleşmesi ve büyük ölçekli girdapların gelişmesiyle meydana gelen bir kaynama akış bölgesi,
3. Serbest yüzey üzerinde çok yüklü hava tabakasından oluşan köpüklü tabaka

Havalanma olayı, hava kabarcıkları formunda ve membadan gelen çarpma ile tuzaklanan hava cebi formunda meydana gelir. Hava cebi çok küçük hava kabarcıklarına parçalanır. Kabarcıklar düşük kesme gerilmeli bölgeye difüze oldukları zaman kabarcıklar daha büyük hale gelmek için birleşirler ve yüzebilirliğin etkisiyle kaynama bölgesine taşınırlar. Serbest yüzeyin yakınındaki sıvı ince film kabarcıklara ayrılır. Bunların şekilleri beşgen ile ongen arasında değişmektedir (Townson, 1991; Cummings ve Chanson, 1999).

Bir hidrolik sıçramada ufak hava kabarcıklarından meydana gelen hava-su gaz transferinin önemli bölümü türbülans kesme bölgesinin içinde olur. Bu türbülans kesme bölgesi; büyük hava hacimleri, küçük hava kabarcıkları ve bunlardan dolayı oluşan ara birim tarafından belirlenir. Bu arayüz alanı şu şekilde belirtilebilir :

$$a \sim 6 \frac{C_{\max}}{(d_{ab})_{\max}} \quad (19)$$

Chanson (1995) kısmi oluşmuş hidrolik sıçrama için, sıçramanın topuğunda meydana gelen türbülans kesme bölgesindeki maksimum hava hacmini ( $C_{\max}$ ) belirleyen bir denklem sunmuştur :

$$C_{\max} = 0.1467(V_1 - 0.414) \quad (20)$$

Sabit bir sıcaklık ve hemen hemen sabit bir arayüz alanı için hava-su gaz transferi denklemi, sıçramanın üzerinden integre edilebilir:

$$r \sim \exp(K_L . a . t) \quad (21)$$



İlk yaklaşım için havalanma zamanı (t) ise şöyle yazılabilir :

$$t \sim 2 \frac{L_a}{V_1} \quad (22)$$

Burada;

$L_a$  : Havalanma uzunluğu (m)

Bu denklem, hava kabarcıklarının havalanmasının ortalama bir hızla, havalanma bölgesinin üzerindeki  $V_1/2$ 'ye denk olan bir hızla havalanmakta olduğunu gösterir. Bu tahmin ile hidrolik sıçramadaki toplam transfer şöyle ifade edilebilir:

$$r \sim \exp \left[ 12 \cdot K_L \cdot \frac{C_{\max}}{(d_{ab})_{\max}} \frac{L_a}{V_1} \right] \quad (23)$$

Denklem (21) ve (23) kısmi gelişmiş hidrolik sıçramadaki gaz transferinin tahmini için kullanılabilir. Bu denklemler fiziksel nedenlere ve sıçramanın akışkanlar mekaniği özelliklerine bağlıdır.

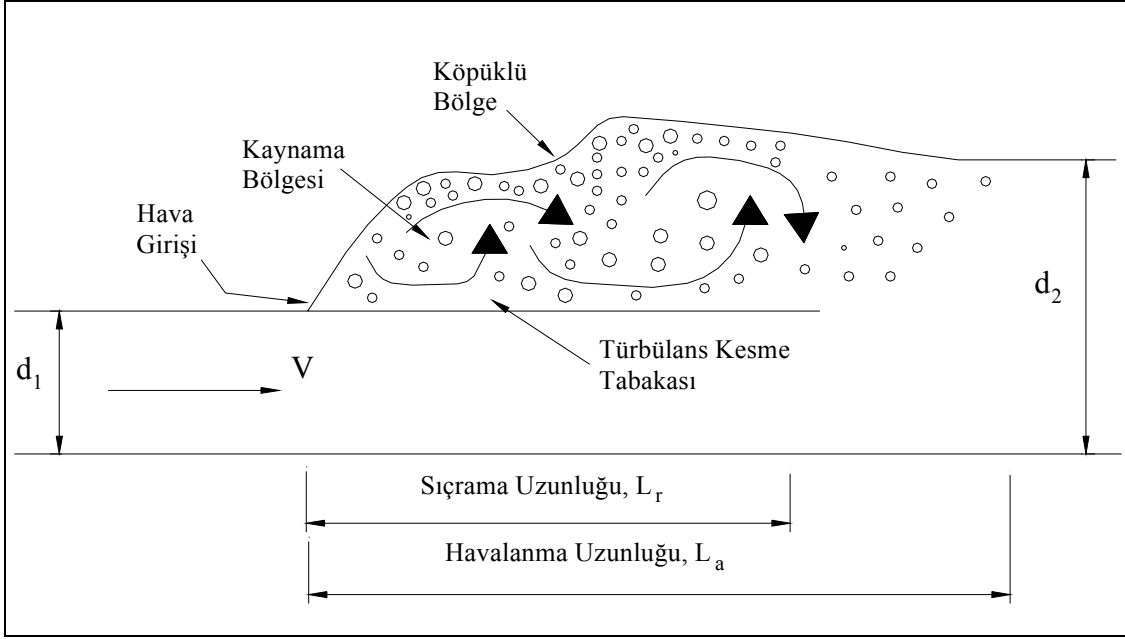
Avery-Novak (1978) modeller üzerinde yaptıkları çalışmalarda, hidrolik sıçramadaki gaz transferi için şu bağıntıyı geliştirmişlerdir :

$$r = 1 + \beta_1 \left( \frac{q_w}{\sqrt{gd_1^3}} \right)^{\beta_2} \left( \frac{q_w}{v_w} \right)^{\beta_3} \quad (24)$$

Burada;

$v_w$  : Kinematik viskozite ( $m^2/s$ )

$\beta_1, \beta_2, \beta_3$  : Sabit



Şekil 3. Hidrolik sıçramada hava-su akış bölgesi

### 1.2.3. Serbest Yüzey Havalanmasındaki Gaz Transferi

Düz tabanlı savaklarda, serbest havalanan akımlarda hava konsantrasyonu dağılımı, hava-su karışımı içindeki bütün ortalama hava dağılımı için hesaplanabilir:

$$C = \frac{B'}{B' + \exp\left[-G' \cos \alpha \left(\frac{y}{Y_{90}}\right)^2\right]} \quad (25)$$

$$\frac{C}{C_b} = \left(\frac{y}{\delta_{ab}}\right)^{0.270} \quad (26)$$

Burada;

$C$  : Yerel hava konsantrasyonu

$B'$  ve  $G'$  : Hava konsantrasyonuna bağlı değişkenler

$C_b$  : Sınır tabakasının dış tarafındaki hava konsantrasyonu

$\delta_{ab}$  : Sınır tabakası kalınlığı

Bu denklemler her ne kadar düz savak akımlar için kullanılabilir olsa da, basamaklı savaklar üzerinde serbest havalanma-hava kabarcığı difüzyonu hakkında uygun bir tahmin yapmakta kullanılabilir. Hava-su sınır tabakası hesapları için bir ideal hava-su tabakası tanımlanabilir. Bunun için yararlı bir seçenek hava konsantrasyonunun %50 olduğu durum olabilir (Kökpınar 1996).

Çözülmüş oksijen ve nitrojen hacmi için havalanma verimliliği çeşitli debi ve eğimlerle, kretten olan uzaklıklara göre değerlendirilirse; suyun debisi yükseldiğinde havalanmanın başlangıç noktasının mansaba doğru kaydığı ve serbest yüzey havalanmasının verimliliğinin düştüğü görülür. Oksijen transferi hesapları analiz edildiğinde serbest yüzey havalanması verimliliği başlangıçtaki gaz hacmine bağlı olduğu görüldü. Buna göre havalanma verimliliği şu şekilde tahmin edilebilir:

$$E = \left[ 1 - \frac{q_w}{(q_w)_c} \right]^n \quad (27)$$

$$(q_w)_c = 0.129(L_{savak})^{1.403} (\sin \alpha)^{0.388} (h \cos \alpha)^{0.0975} \quad (28)$$

Burada;

$(q_w)_c$  : Sınır tabakasının yüzeye ulaştığı ve serbest havalanmanın olmadığı debi

$\eta$  : Çözülmüş gaz hacmi, sıcaklık ve savak eğimine bağlı bir değişken. Hesaplardan  $\eta$ 'nın 3-9 arasında değiştiğini gözlenmiştir.

Verilen bir debi için kanal eğimindeki bir artış, yükselen bir havalanma meydana getirir ve bundan dolayı yükselen bir sınır tabakasını da beraberinde meydana getirir. Artan eğimle birlikte ortalama hızda artar ve bununla birlikte bulunma süresi azalır. Düşük eğimler için havalanmanın miktarı, optimum havalanmayı bulmak için yeterli büyüklükte değildir. Basamaklı kanallar için ortalama akış hızı çok büyük, bulunma süresi de çok kısa hale gelir (Orlins ve Gulliver, 1997; Eiger, 1995).

### **1.3. Çözünmüş Oksijen (ÇO)**

Akarsulardaki çözünmüş oksijen seviyesi, su kalitesi ve sudaki canlı yaşamı açısından en önemli belirleyicilerden birisidir. Sudaki çözünmüş oksijen miktarını değiştiren çeşitli parametreler vardır. Bunlardan en önemlisi atmosferdeki oksijendir. Atmosferdeki oksijenin fiziksel olarak suyun yapısına girmesi işlemine havalanma (aeration) denir. Su bünyesinde, canlı yaşamı ve biyolojik parçalanma gibi diğer işlemler için oksijen miktarı çok önemli bir parametredir.

Çeşitli yöntemlerle su bünyesine giren oksijen bir süre sonra doygunluk konsantrasyonuna ulaşır ve durur. Fakat akarsuya yapılan bir takım fiziksel eklentiler (baraj, savak, kaskatlar) ve akarsu içinde oluşan fotosentetik aktivite ile birlikte sudaki çözünmüş oksijen konsantrasyonu doygunluk konsantrasyonunun üzerine çıkabilir (Bowie vd., 1985). Bu duruma doygunluk üstü durum yada süpersaturasyon denir. Süpersaturasyon durumunda akarsu tabanında bitkilerin çoğalması ve alglerin hızlı artması durumu gözükabilir (Hibbs ve Gulliver, 1997).

#### **1.3.1. Çözünmüş Oksijen Transferi**

Birçok araştırmacı zaman içerisinde, hidrolik yapılarda gerçekleşen oksijen transfer verimi için denklemler geliştirmiştir.

İlk olarak Gameson (1957) ve Gameson vd (1958), akarsular üzerine inşa edilen savaklar için çalışmalar yapmışlardır. Çalışmalarda, oksijen transferinin 3 farklı şekilde gerçekleştiğini bulmuşlardır. Bunlar; serbest düşen jet ile oksijen transferi, serbest yüzey havalanması ile

gerçekleşen oksijen transferi ve iki fazlı akışlarda suya dalış ile gerçekleşen oksijen transferi. Gameson, en fazla oksijen transferinin suya dalış ile olduğunu çalışmaları neticesinde bulmuş ve oksijen transfer verimi için şu denklemi sunmuştur:

$$E_{20} = 1 - (1 + 0.693a_w b_w h)^{-1} \quad (29)$$

Burada;

$E_{20}$ : 20 °C'deki oksijen transfer verimi,

$a_w$ : su kalitesi faktörü

$b_w$ : havalandırma katsayısı

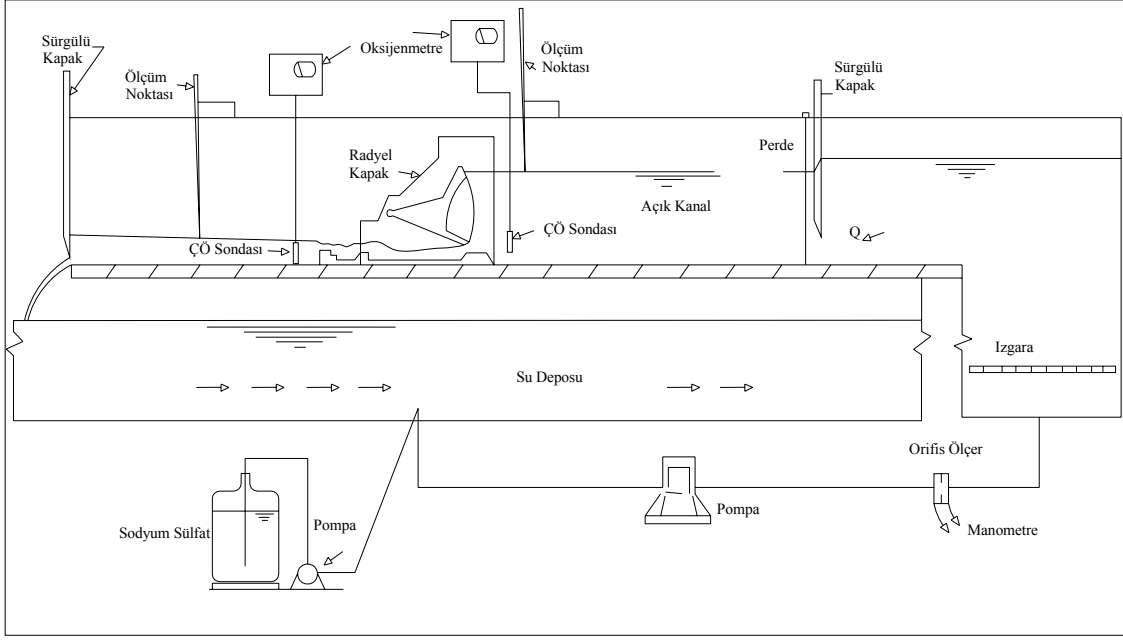
$h$ : suyun düşme yüksekliğidir.

Preul ve Holler (1969), Ohio nehri üzerinde çalışmalarda bulunmuşlardır. Ufak düşüleri olan barajlarda yaptıkları çalışmalar neticesinde üzerinde kapak bulunan eşikler için havalanma verimliliği için şu denklemi sunmuşlardır:

$$E_{20} = 1 - \left( \frac{1}{1 + 666F^{-3.33}} \right) \quad (30)$$

Holler (1970), öncelikle hidrolik yapıların dizaynının oksijen transferindeki önemine değinmiştir. Oluşturdukları model çalışma ile (Şekil 4), oksijen eksiklik oranının; suyun sıcaklığı, yüzeyde oluşan türbülans ve debinin bir fonksiyonu olduğunu belirtmiştir. Suyu dalan jetle beraber oksijen eksiklik oranının azaldığını, hidrolik sıçramada ise eksiklik oranını sıçramanın hızının tayin ettiği savunmuştur. Radyal kapaklı savaklar için 20°C de şu denklemi sunmuşlardır:

$$E_{20} = 1 - \left( \frac{1}{1 + 0.213h} \right) \quad (31)$$



Şekil 4. Holler (1970)'in oluşturduğu deney düzeneği

Tsivoglou ve Wallace (1972), akarsuların havalanma kapasiteleri üzerine çalışmışlar ve hidrolik yapılar için şu havalanma denklemini önermişlerdir.

$$E_{20} = 1 - \exp(-0.18h) \quad (32)$$

Department of the Environmental Water Research Laboratory (1973), Gameson'un (1957) denklemini düzenleyerek aşağıdaki denklemi önermiştir.

$$E_{20} = 1 - [1 + 0.073a_w b_w h(1 - 0.011h)]^{-1} \quad (33)$$

Foree (1976), küçük akarsular üzerinde çalışmalarda bulunmuştur. Çalışmalarında suyun hızını da dikkate alarak düşük debili akarsulardaki yeniden havalanma olayını incelemiştir. 3 yıllık bir saha çalışması neticesinde su yapılarında hava girişinin dikkate alınması için şu denklemi sunmuştur:

$$E_{20} = 1 - \exp(-0.48h) \quad (34)$$

Avery ve Novak (1978), savak ve kaskatlar için yaptıkları çalışmalarda hidrolik sıçrama modeli oluşturmuşlardır. Oksijen eksiklik oranının Reynolds sayısının bir fonksiyonu olduğunu savunmuşlardır. En uygun havalanma verimliliği için çıkış suyu derinliğinin önemli bir parametre olduğunu ve kanal genişliğinin önemli olmadığını belirtmişlerdir. Froude yasalarına göre oluşturdukları modelde en uygun çıkış suyu derinliğini saptamaya çalışmışlar ve havalanma verimliliği için şu denklemi sunmuşlardır.

$$E_{20} = 1 - \left( \frac{1}{1 + 0.24x10^{-4} F^{1.78} R^{0.53}} \right)^{1.115} \quad (35)$$

Burada;

F : Froude sayısı

R: Reynolds sayısıdır.

Markofsky ve Kobus (1978), savaklarda Reynold sayısı  $5.10^5$  den büyük akımlar için;

$$E_{20} = 1 - \left( \frac{1}{1 + 0.1F^{1.2}} \right)^{1.115} \quad (36)$$

denkleminin kullanılmasının uygun olduğunu belirtmişlerdir.

Wilhems ve Smith (1981), kapaklı dip savaklar üzerine çalışmışlar ve havalanma için şu denklemi önermişlerdir:

$$E_{20} = 1 - \exp(-0.14h) \quad (37)$$

Butts ve Evans (1983), küçük barajlar için havalanma verimliliğini ölçmüşlerdir. Kuzey Illinois'teki akarsularda 54 farklı savak üzerinden bilgiler toplamışlardır. Bu küçük barajları öncelikle fiziksel özelliklerine göre sınıflandırmışlar ve havalanmaya etkisini incelemişlerdir.

Birbirine fiziksel olarak çok benzeyen barajlarda dahi farklı havalanma katsayıları elde etmişlerdir. Daha sonra bu farklılığın savak topundaki düşü yüksekliğinden kaynaklandığını bulmuşlardır. Yapılan çalışmalar neticesinde oksijen transferini etkileyen en önemli parametrelerin, gelen suyun çözünmüş oksijen hacmi, sıcaklık ve düşü yüksekliği olarak belirlemişlerdir. Saha çalışmasının neticesinde şu denklemi sunmuşlardır:

$$E_{20} = 1 - \left(1 + 0.73a^* \cdot b^* \cdot h(1 - 0.11h)\right)^{-1} \quad (38)$$

Burada  $a^*$  su kalitesine bağlı bir katsayı ve  $b^*$ , savak tipine bağlı bir katsayı olup tablo 3 de değerleri verilmiştir.

Nakasone (1987), savaklarda farklı akım rejimlerinde havalanma verimliliğini tarif etmek için 3 farklı sistemle çalışmıştır. Bunlar laboratuvar çalışmasında kullandığı model (Şekil 5), Hollanda Meuse nehrindeki çalışmalar ve Hague şehrindeki içme suyu tesislerindeki basamaklı sistemlerdir. Bu üç sistemi karşılaştırması sonrasında; çıkış suyu derinliğinin de debi ve düşü yüksekliği gibi formüllerde yer alması gerektiğine, havalanma verimliliğinin debiyle beraber arttığına fakat belli bir noktadan sonra debiyle beraber azaldığına ve en uygun debinin  $235 \text{ m}^3/\text{saat}$  olduğuna, azalan çıkış suyu derinliği ile havalanma verimliliğinin düştüğüne ve en uygun derinliğin nap yüksekliğinin %30'u kadar olduğuna karar vermiş ve farklı durumlar için havalanma verimliliğini formülize etmiştir:

$$1.5H_C \leq 1.2m \text{ ve } q \leq 0.65 \text{ m}^3 / \text{s} / \text{m} \text{ için; } E_{20} = 1 - \exp\left[-2.61(D + H_C)^{1.31} q^{0.428} H^{0.310}\right] \quad (39)$$

$$1.5H_C > 1.2m \text{ ve } q \leq 0.65 \text{ m}^3 / \text{s} / \text{m} \text{ için; } E_{20} = 1 - \exp\left[-2.86(D + H_C)^{0.816} q^{0.428} H^{0.310}\right] \quad (40)$$

$$1.5H_C < 1.2m \text{ ve } q > 0.65 \text{ m}^3 / \text{s} / \text{m} \text{ için; } E_{20} = 1 - \exp\left[-0.28(D + H_C)^{0.31} q^{-0.363} H^{0.310}\right] \quad (41)$$

$$1.5H_C > 1.2m \text{ ve } q > 0.65 \text{ m}^3 / \text{s} / \text{m} \text{ için; } E_{20} = 1 - \exp\left[-0.30(D + H_C)^{0.816} q^{-0.363} H^{0.310}\right] \quad (42)$$



Tablo 3. a ve b katsayılarının değerleri (Pelletier vd., 2006)

| <b>Su Kalite Katsayılar (a*)</b>    |           |
|-------------------------------------|-----------|
| <i>Kirlilik Durumu</i>              | <b>a*</b> |
| Aşırı                               | 0.65      |
| Orta                                | 1.0       |
| Az                                  | 1.6       |
| Temiz                               | 1.8       |
| <b>Baraj Çeşidi Katsayısı (b*)</b>  |           |
| <i>Baraj Çeşidi</i>                 | <b>b*</b> |
| Düz geniş tepeli düzenli basamaklı  | 0.70      |
| Düz geniş tepeli düzensiz basamaklı | 0.80      |
| Düz geniş tepeli dik yüzeyli        | 0.60      |
| Düz geniş tepeli düz eğimli yüzeyli | 0.75      |
| Düz geniş tepeli eğik yüzeyli       | 0.45      |
| Yuvarlak geniş tepeli eğik yüzeyli  | 0.75      |
| Keskin tepeli düz eğimli yüzeyli    | 1.00      |
| Keskin tepeli dik yüzeyli           | 0.80      |
| Açılır kapaklı                      | 0.05      |

Burada;

D: savağın kretinden suyun düşme yüksekliği (m)

H<sub>c</sub>: savak üzerindeki kritik su derinliği (m)

Q : birim genişlikten geçen debi (m<sup>3</sup>/s.m)

Thene (1988), savaklarda hava girişi ile incelemelerde bulunmuştur. Su içerisine hidrokarbon eklemek ve bu gazı takip etmek metodu ile gerekli analizleri yapmıştır. Literatürdeki Ervine ve Elsayy (1975) ile Elsayy ve McKeogh (1977)'un hava girişi ile ilgili buldukları denklemlerden yararlanarak şu denklemi önermişlerdir:

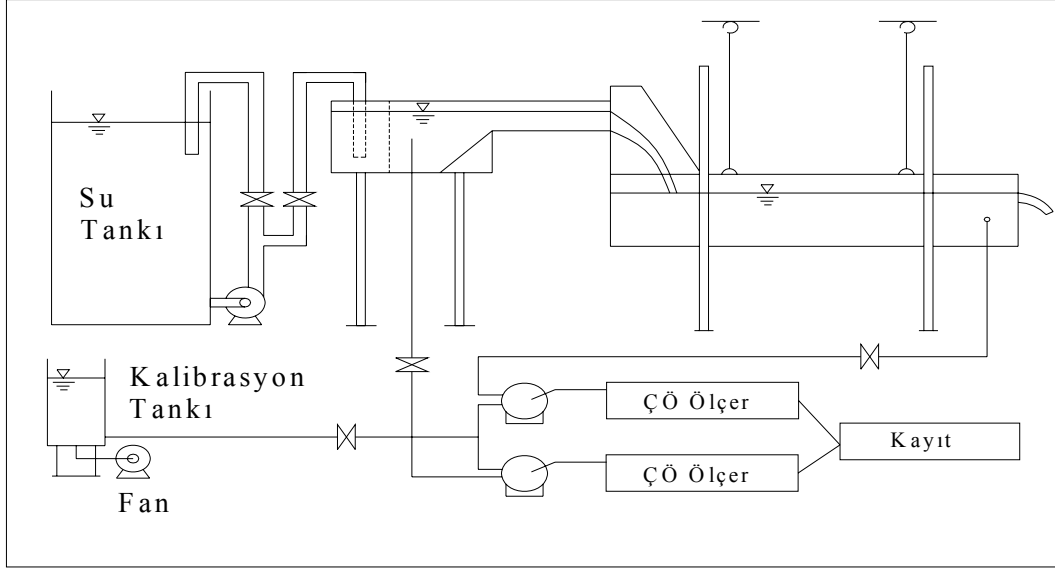
$$E_{20} = 1 - \exp \left[ -0.16F^{2.69} \frac{d^2}{q} \left(1 - \frac{V_0}{\sqrt{2gh}}\right)^{-1} \right] \quad (43)$$

Burada;

d : napın kalınlığı (m)

V<sub>0</sub> : havanın suya aktarılması için ihtiyaç duyulan minimum hız (1.1 m/s)

g : yerçekimi ivmesi (m/s<sup>2</sup>) dir.



Şekil 5. Nakasone (1987)'nin kullandığı model

Wilhems (1988), daha önceki çalışmalarındaki bulduğu denklemi de kullanarak üzerinde kapak bulunan eşikler için şu havalanma denklemini sunmuştur:

$$E_{20} = 1 - \exp(-0.0086(hq/s) - 0.19) \quad (44)$$

Thene ve Gulliver (1990), gaz transferini ölçmek için çözünmüş propan gazı kullanmışlardır. Propan gazını iz sürmek yoluyla hareketini incelemiştirler. Propan gazının da bu tip deneylerde kullanılabileceğini savunarak hava sıcaklığının havalanma verimliliğine etkisinin olmadığını savunmuşlardır ve şu denklemi sunmuşlardır:

$$E_{20} = 1 - \left[ \frac{1}{1 + 0.32 \times 10^{-5} F^{2.08} R^{0.63} \left( 1 - 0.6 \exp(-3.7 \frac{H}{h}) \right)} \right]^{1.115} \quad (45)$$

Burada; H: mansap su derinliğidir.

Gulliver ve Rindels (1993); Gulliver ve Halverson (1989), yuvarlatılmış kretler üzerinde çalışmalar yapmışlardır. Savaklardaki havalanmayla birlikte suya küçük hava kabarcıklarının girdiğini ve bu kabarcıklarında havalanma verimliliğini artırdığını belirlemişlerdir (Şekil 6). Oksijen transferini etkileyen faktörleri; yapı boyunca oluşan yük kaybı, su sıcaklığı ve daha küçük bir mesafede debi ile çıkış suyu derinliği olarak belirlemişlerdir. Saha ve laboratuvar çalışmaları neticesinde havalanma verimliliği için şu denklemi sunmuşlardır:

$$E_{20} = 1 - \exp\left(\frac{0.26h}{1 + 0.22q} - 0.20H\right) \quad (46)$$

Wormleaton ve Soufiani (1998), üçgen labirent savaklar için çalışmalar yapmışlardır. Düşü yüksekliği az olan savaklarda, aynı savak eşik uzunluğunda, üçgen labirent savaklardan geçen debinin diğer normal tipli savaklardan geçenden daha fazla olduğunu saptamışlardır. Üçgen labirent savaklardaki ek eşik uzunluğu ve membadan gelen su jetinin çarpışmasıyla birlikte havalanma verimliliğinin yükseleceğini savunmuşlardır. Yaptıkları laboratuvar çalışmalarında (Şekil 7) havalanma verimliliği için şu denklemi sunmuşlardır:

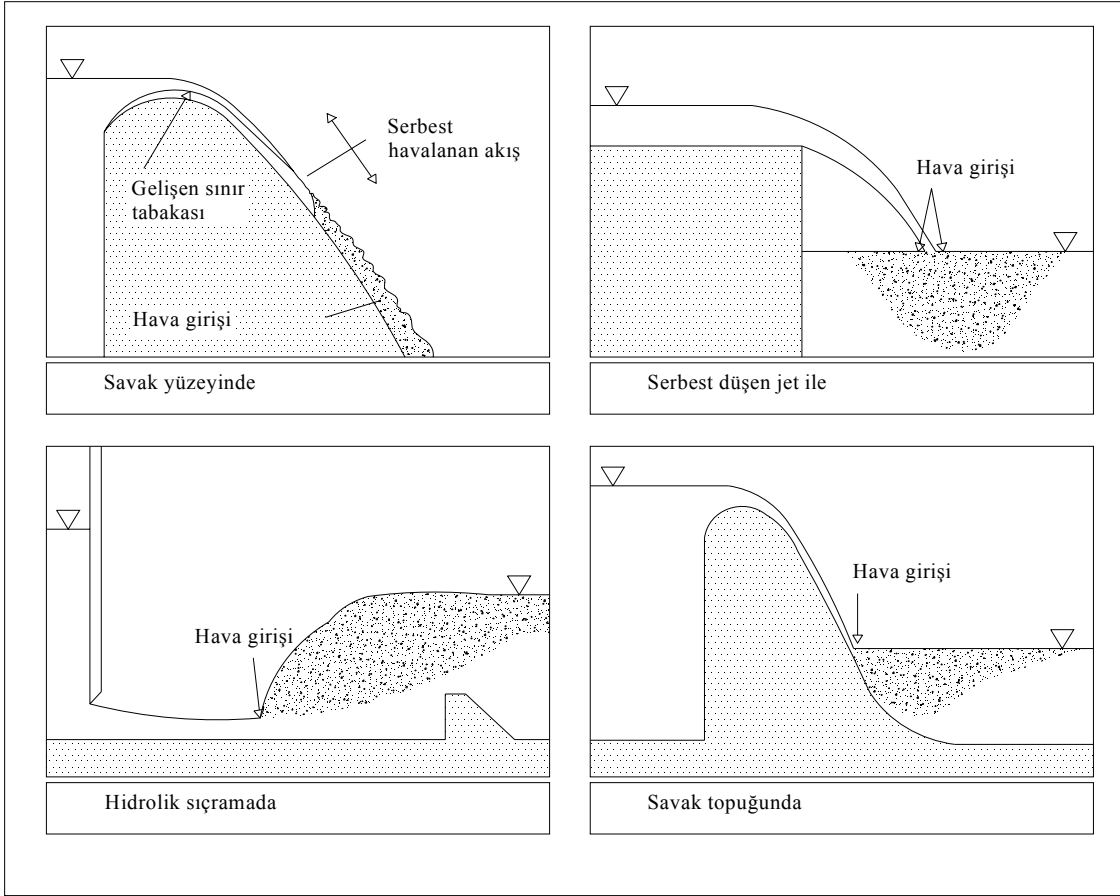
$$E_{20} = 1 - \left(1 + 1.48h^{1.35} Q^{-0.131} \left(\sin \frac{\theta}{2}\right)^{-0.342}\right)^{-1} \quad (47)$$

Burada;

Q : savak debisi (m<sup>3</sup>/s)

θ : üçgen labirent savak tepe açısı (derece)

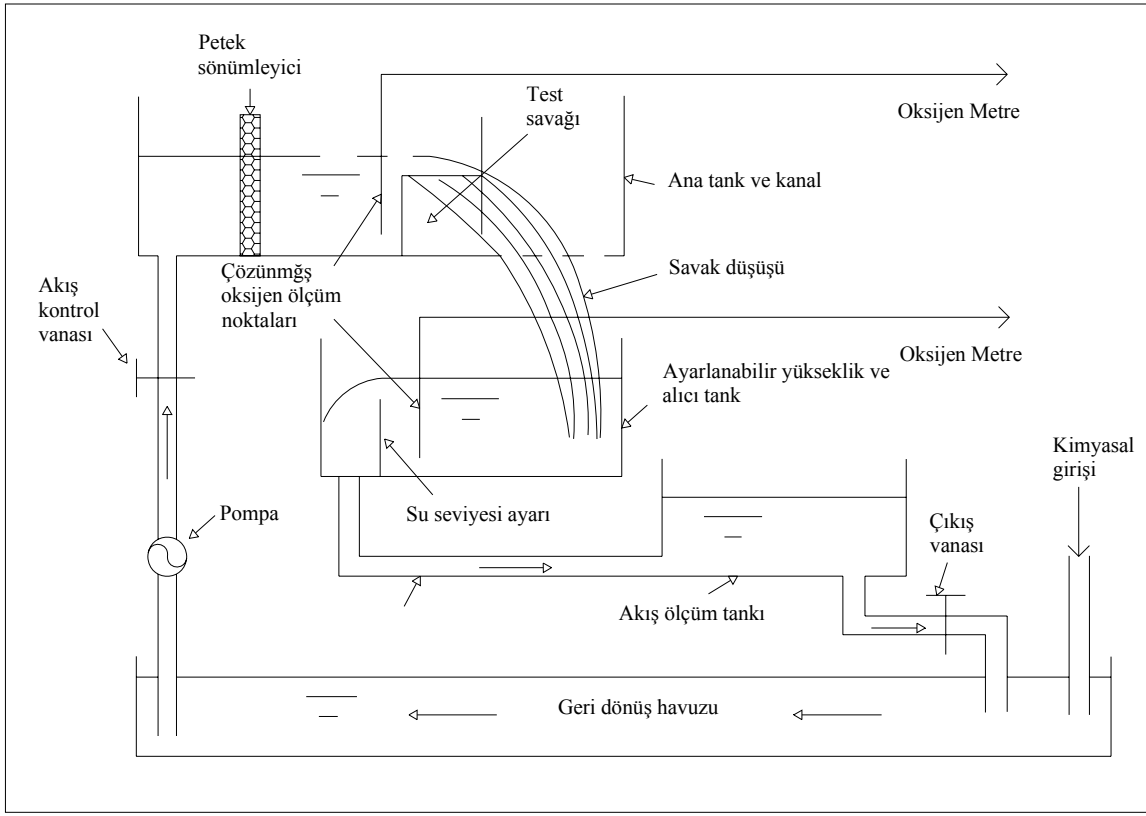
Watson vd (1998), küçük düşü yüksekliğine sahip düz ve pürüzlendirilmiş savaklar için oksijen transferini laboratuvar ortamında (Şekil 8) incelemişlerdir. Debi, düşü yüksekliği ve çıkış suyu derinlikleri değerleri ile oynayarak pürüzlü savaklarda çok daha fazla havalanmanın oluştuğunu gözlemlediler. Çıkış suyu derinliğinin, en uygun derinlik değerinden daha düşük olması durumunda oksijen eksiklik oranının nasıl etkileneceğini inceleyerek havalanma verimliliği için şu denklemi çıkarmışlardır:



Şekil 6. Gulliver ve Rindels(1993)'e göre savaklardaki hava giriş biçimleri

$$E_{20} = 1 - \left(1 + 0.00107(H/h)^{0.70} R^{0.32} F^{2.0}\right)^{-1} \quad (48)$$

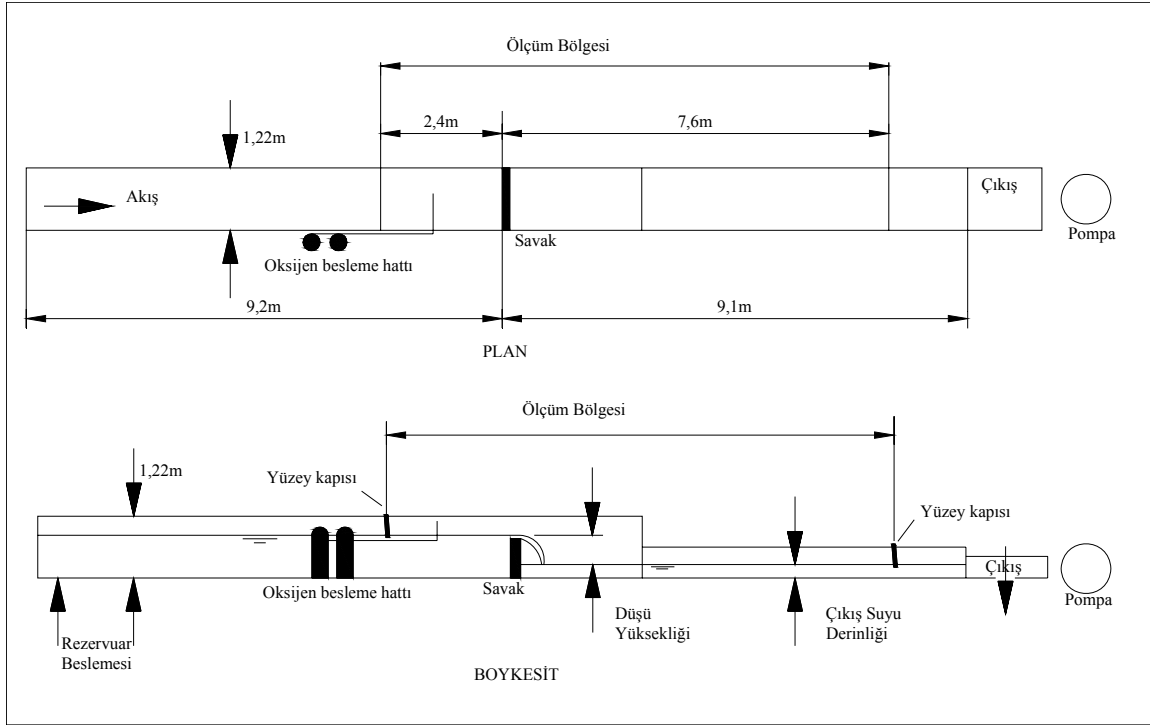
Gulliver vd (1998), farklı savak tiplerinde oluşabilecek oksijen transferini tahmin etmek için literatürdeki 12 denklemi karşılaştırmıştır. Yaptıkları istatistiksel analiz neticesinde, keskin kenarlı savaklar için Avery ve Novak'ın (1978), Ogee profilli (yuvarlatılmış kret) savaklar için Rindels ve Gulliver'in (1991) ve kapaklı savaklar içinde Wilhems'in (1988) havalanma verimliliği için kullandıkları formüllerin en uygun formüller olduklarını tespit etmişlerdir.



Şekil 7. Wormleaton ve Soufiani (1998)'nin kullandıkları model

Geldert vd. (1998), savak mansabında dalış havuzlarında oluşan aşırı oksijen konsantrasyonu (süpersaturasyon) hakkında incelemeler yapmıştır. Columbia ve Snake akarsuları üzerinde yaptıkları saha çalışmaları neticesinde çözünmüş gaz miktarının; savak şekli, dalış havuzu ve hava kabarcıklı su bölgesi tarafından belirlendiği gözlemlenmiştir. Akarsu üzerindeki düşük hızlar, küçültülmüş yüzey alanları ve büyük derinlikler çözünmüş gaz oranını hidrolik yapıya bağlı olmaksızın önemli miktarda artırmakta ve bu yüzden akarsu üzerinde bir model oluşturulması istenildiğinde hidrolik yapı üzerindeki gaz transferinin çok iyi hesaplanması gerektiğini belirtmişlerdir. Belirlenmemesi halinde baraj mansabında oluşan süpersaturasyon olayının canlı yaşamına büyük oranda zarar vereceğini ifade etmişlerdir.

Moog ve Jirka (1999a), hava ve akış halindeki su arasındaki çözünürlüğü düşük olan gazların transferi üzerine çalışmıştır. Sudaki türbülans hareketinin oksijen transferi için en önemli hareket olduğunu belirtmiştir. Yüksek Reynolds sayılarında, örneğin doğal akarsularda, gaz transfer oranının kırıcı yapılar tarafından kontrol edildiğini savunmuştur.



Şekil 8. Watson vd (1998)'in oluşturduğu laboratuvar modeli

Moog ve Jirka (1999b), diğer araştırmacıların ihmal ettiği bir konu olan yüzey pürüzlülüğünün akarsu havalanması üzerine etkileri incelemiştir. Büyük ölçekli pürüzlülüğün, akarsularda enerji yayılımı sağladı gibi aynı zamanda oksijen transfer oranını da artırdığını belirtmiştir. Bu gibi durumlarda havalanmanın, Froude sayısının 1.4'ün üzerine çıkmasıyla başladığını ve Froude sayısının artmasıyla birlikte de arttığını tespit etmiştir.

Wormleaton ve Tsang (2000), dikdörtgen kesitli labirent savaklar üzerindeki havalanma üzerine çalışmışlardır. Laboratuvarında kurdukları dikdörtgen kesitli labirent savak ile yaptıkları çalışmaları neticesinde, düşük debilerde labirent savak geometrisinin havalanmaya etkisinin çok az olduğunu fakat bu savakların normal savaklara oranla çok daha fazla oksijen transferine neden olduğunu saptamışlardır. 1-4.3 l/s debide, 500-1600 mm düşü yüksekliğinde ve 240 mm uzunluğunda savak üzerinde aldıkları sonuçları regresyon ile analiz ederek şu denklemi sunmuşlardır:

$$E_{20} - 1 = \left[ 1 + 1.426 \times 10^{-6} \cdot F^{1.412} \cdot R^{0.610} \right] \quad (49)$$

$$E_{20} = 1 - \left[ 1 + 1.138.H_d^{1.059} . q_w^{-0.096} \right] \quad (50)$$

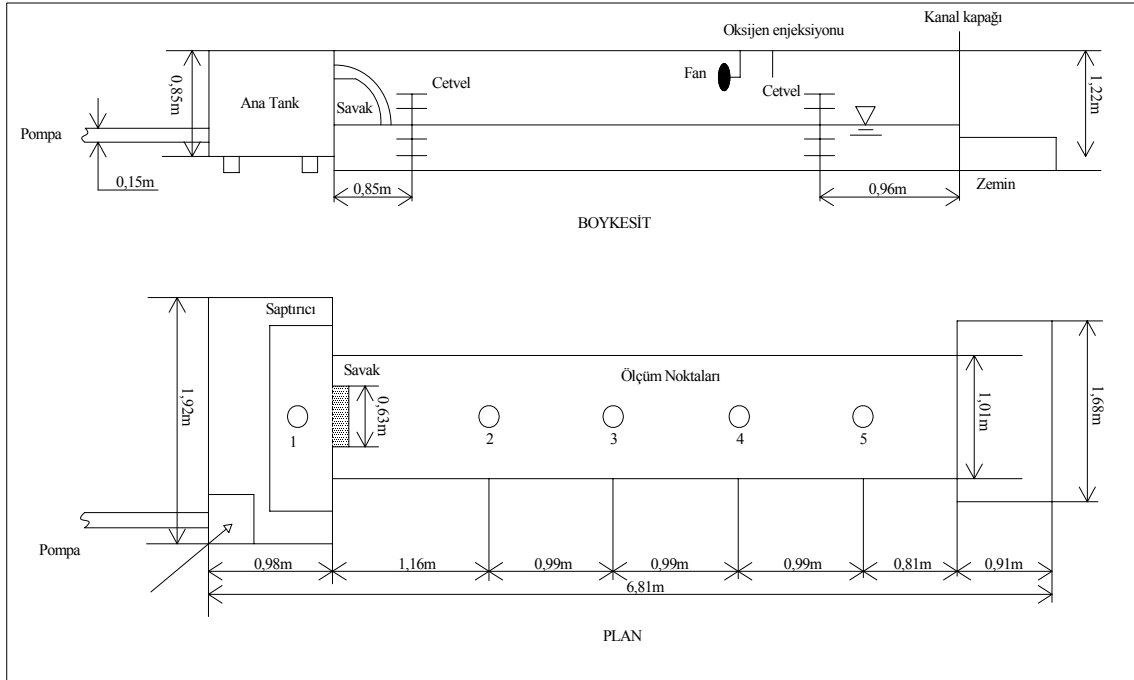
Burada,

$H_d$  : Savak üzerinden düşen jetin düşü yüksekliği

$q_w$  : Akış debisi

Kim ve Walters (2001), küçük düşü yüksekliğine sahip prototip ölçekli savaklarda (Şekil 9) laboratuvar ortamında çalışmışlardır. Oksijen eksiklik oranının ( $r$ ); çıkış suyu derinliğinin, savak yüksekliğinin, Froude sayısının ve düşü yüksekliğinin bir fonksiyonu olduğunu belirterek maksimum oksijen transferinin sağlanması için en uygun çıkış suyu derinliğinin ayarlanması gerektiğini savunmuştur. Çalışmaları neticesinde 20°C için oksijen eksikliği oranını şu şekilde formülize etmiştir:

$$r_{20} = 1 + 0.453F^{0.453} h^{1.117} \left( \frac{H}{h} \right)^{0.475} \quad (51)$$



Şekil 9. Kim ve Walter (2001)'in çalıştığı deney düzeneği

### 1.3.2. Oksijen Eksiklik Oranı

Herhangi bir yapı yada kapakla kontrol edilmeyen kanal veya akarsularda (Şekil 10a), herhangi L uzunluğu boyunca oluşan havalanma şu şekilde ifade edilebilir:

$$\frac{C_s - C_0}{C_s - C_t} = e^{K \cdot t} = e^{\frac{K_L \cdot a_t}{V}} \quad (52)$$

Burada,

$C_0$  :  $t = 0$  anındaki oksijen konsantrasyonu

$C_t$  :  $t = t$  anındaki oksijen konsantrasyonu

$C_s$ , oksijen doygunluk konsantrasyonunu göstermekte olup, su sıcaklığının, çözünmemiş haldeki oksijen basıncının ve su kalitesinin bir fonksiyonudur. Su sıcaklığının oksijen doygunluk konsantrasyonuna normal atmosferik koşullarda etkisi Şekil 11'de gösterilmiştir.

Akarsu yada kanala bir hidrolik yapının eklenmesiyle birlikte su yüzey profili değişir (Şekil 10b). Böyle bir durumdaki akarsu havalanması hidrolik yapıdan önceki ve sonraki havalanmanın birleşimi olarak hesaplanır (Chen vd., 2000). Toplam havalanma şu hali alır :

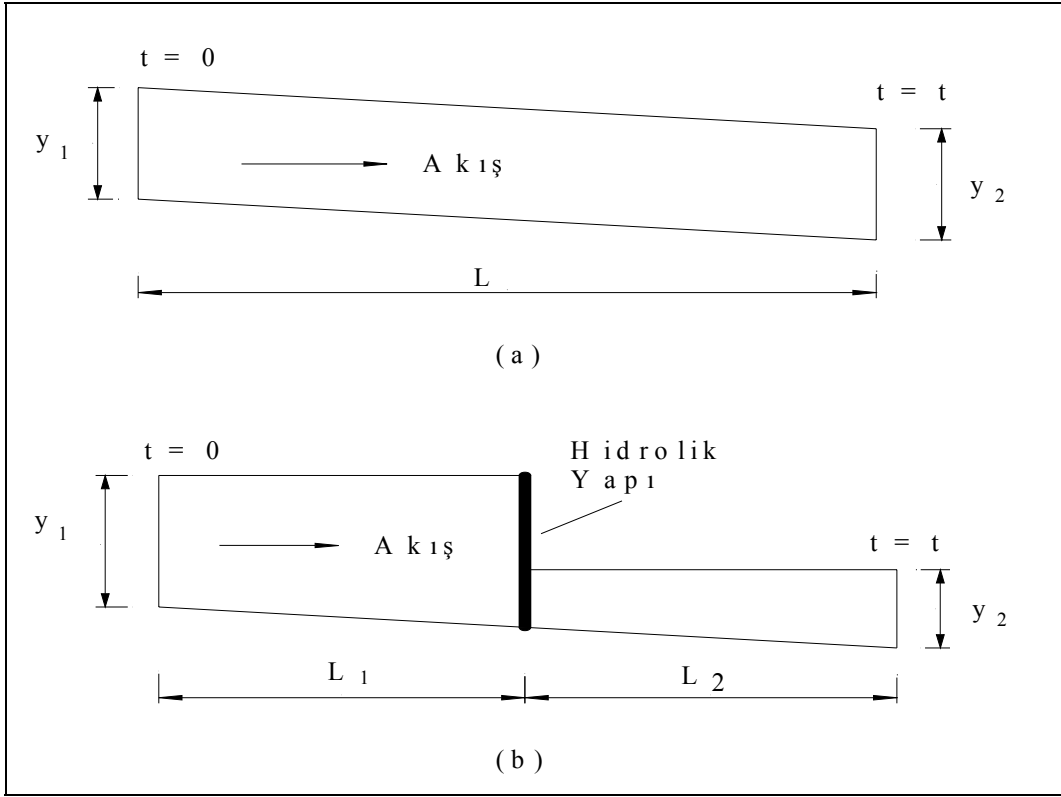
$$\frac{K_L \cdot a_1}{Q} + \frac{K_L \cdot a_2}{Q} \quad (53)$$

Burada;

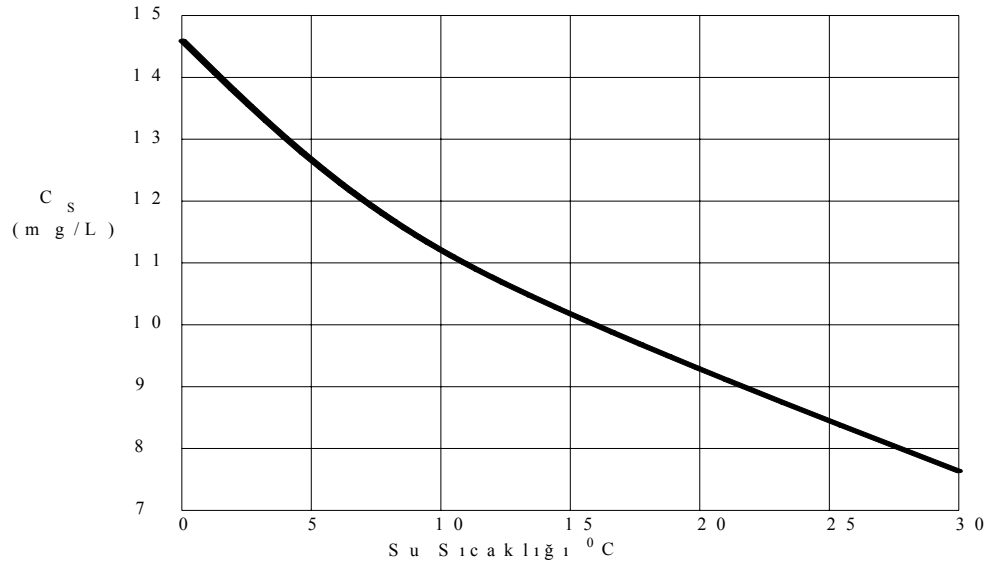
$a_1$  : hidrolik yapıdan önce oluşan hava-su özgül ara kesit yüzeyi

$a_2$  : hidrolik yapıdan sonra oluşan hava-su özgül ara kesit yüzeyi





Şekil 10. Su yüzeyi profili (a) hidrolik yapıdan önce, (b) hidrolik yapıdan sonra



Şekil 11. Oksijen doygunluk konsantrasyonunun sıcaklıkla değişimi (Butcher ve Covington, 1995)

L mesafesi arttıkça  $\frac{K_L \cdot a_1}{Q}$  değeri de artar. Fakat çok kısa mesafelerde  $\frac{K_L \cdot a_1}{Q}$  değeri ihmal edilir ve  $\frac{K_L \cdot a_2}{Q}$  değeri tek havalanma kriteri olur.  $a_2$  değeri hidrolik yapının bir fonksiyonudur. Hidrolik yapıdan dolayı oluşan türbülans ile birlikte değişen  $a_2$  değeri aynı zamanda akışın geçiş zamanının değişmesiyle belirlenen mesafenin de bir fonksiyonudur.

İlk ifadenin ihmal edilmesiyle birlikte denklem (52) ve (53) şu hale gelir:

$$\ln \frac{C_S - C_0}{C_S - C_t} = \frac{K_L \cdot a_2}{Q} \quad (54)$$

Bu denklemde  $C_0$  yerine memba çözülmüş gaz konsantrasyonu ( $C_{US}$ ) ve  $C_t$  yerine mansap çözülmüş gaz konsantrasyonu ( $C_{DS}$ ) yazılabilir. Buna göre (54) numaralı denklem;

$$\frac{C_S - C_{US}}{C_S - C_{DS}} = \frac{K_L \cdot a_2}{Q} \quad (55)$$

haline gelir. İşte bu denklemdeki  $\frac{C_S - C_{US}}{C_S - C_{DS}}$  ifadesi oksijen eksiklik oranı ( $r$ ) ile ifade edilir ve denklem (6)'daki halini alır.

Denklem (6)  $C_{DS}$  üzerinden integre edilirse;

$$r \cdot C_S - r \cdot C_{DS} = C_S - C_{US} \quad (56a)$$

$$-r \cdot dC_{DS} = -dC_{US} \quad (56b)$$

$$r = \frac{dC_{US}}{dC_{DS}} \quad (56c)$$

halini alır. Böylelikle oksijen eksiklik oranı  $K_L$ ,  $a_2$  ve  $Q$ 'nun bir fonksiyonu haline gelir.

### 1.3.3. Çözünmüş Oksijen Transfer Verimi

Oksijen transfer verimi, suyun doymuluk konsantrasyonuna ulaşabilmesi için hidrolik yapının suya oksijen kazandırabilme yeteneği olarak tanımlanabilir. Oksijen transfer verimiyle anlaşılması gereken nokta, suyun memba bölgesindeki oksijen konsantrasyonudur. Havalanma verimliliği araştırılırken memba ve mansap arasındaki çözünmüş oksijen değerleri karşılaştırılarak verim elde edilir. Gameson (1957)'ın ifade ettiği gibi (6) ve (10) numaralı denklemleri bir araya getirilirse;

$$E = \frac{C_{DS} - C_{US}}{C_S - C_{US}} = 1 - \frac{1}{r} \quad (57)$$

denklemini elde edilir. Burada;

$E = 0$  ise yapıda oksijen transferi yoktur,

$E = 1$  ise mansap suyu doymuluğa ulaşmıştır,

$E > 1$  ise mansap suyu aşırı doymuluğa ulaşmıştır (süpersaturasyon).

Ayrıca 15°C'deki oksijen eksiklik oranını ( $r_{15}$ ) kullanarak 20°C'deki oksijen transfer verimini ise şu şekilde ifade edebiliriz (Emiroğlu ve Baylar, 2003).

$$E_{20} = 1 - \frac{1}{r_{15}^{1.115}} \quad (58)$$

### 1.3.4. Oksijen Transferini Etkileyen Faktörler

Hidrolik yapılar üzerindeki havalanmayı etkileyen, hidrolik yapıdan bağımsız olan faktörleri; suyun sıcaklığı, suyun kalitesi, çıkış suyu derinliği, düşü yüksekliği, debi ve su içerisindeki çözünmüş oksijen azalma oranı olarak sıralanabilir.

Ayrıca hidrolik yapıya bağlı olarak oksijen transfer veriminin belirlenmesinde genellikle; hidrolik yapının yeri ve tipi, numunenin alındığı tarih, yapıdan geçen birim debi, memba mansap arasındaki yükseklik farkı, mansap su derinliği, kapak açıklığı, ölçüm yapılan yerdeki barometrik basınç ve nisbi nem, yapının memba ve mansabındaki çözülmüş oksijen konsantrasyonu, çözülmüş oksijen doygunluk konsantrasyonu ve su sıcaklığı gibi değerlere ihtiyaç duyulur (Orlins ve Gulliver, 1997).

Havalanma sırasında oksijen transfer verimliliği suyun sıcaklığına göre değişebilir. Genel olarak su sıcaklığının azalması ile birlikte oksijen konsantrasyonunun arttığını söylenebilir (Vogelaar vd., 2000). Sıcaklığın oksijen transferine etkisi ayrıca tartışılacaktır.

Su yüzeyindeki aktif maddelerin, organik maddelerin ve asılı parçacıkların varlığının havalanma verimliliğini etkilediği gözlenmiştir. Yüzeydeki aktif parçacıklar yüzey gerilimini düşürüp hava-su yüzey alanını engelleyerek ve akışın hidrodinamik özelliklerini etkileyerek bir değişime sebep olurlar. Bu değişimle beraber havalanma ve oksijen transferi etkilenir. Su kalitesinin etkisi bir "Su Kalite Faktörü" kullanılarak, oksijen eksiklik oranını belirlemek için kullanılır. Genel olarak toplam çözülmüş katı konsantrasyon azalması ile su içerisindeki çözülmüş oksijen oranı artarken, su içerisindeki tuz yada klor sudaki çözülmüş oksijeni artırır (Qaisi vd., 1997).

Hidrolik yapının mansap tarafında, hava kabarcıklarının su içerisinde bulunma süresi oksijen transferini direkt olarak etkiler. Bulunma süresi, kabarcıkların izlediği yol ve kabarcıkların penetrasyon derinliği ile doğrudan orantılıdır. Çıkış suyu derinliği savak havalanması için önemli bir faktördür. Bu derinlik arttıkça verimlilik de artar. Yine de kabarcıklar için sonsuz bir derinlik olmayacağı için bu derinlik değerinin belli bir limit değeri vardır. Debi ve düşü yüksekliğinin her kombinasyonu için ortalama bir maksimum derinlik değeri belirlenebilir ve bu değerler limit havalanma verimliliği için olası bir derinlik değerini verir. Avery-Novak (1978) bu derinlik değerinin, düşü yüksekliğinin 0.6 katı olması gerektiğini ve 0.6 kat derinlikten daha büyük derinliklerin etkisi olmadığını belirttiler.

Savaklarda oksijen transferi için düşü yüksekliğinin değeri çok önemlidir. İlk olarak su jeti savaktan çıkar ve mansap su havuzunun yüzeyinde havalanır. Düşü yüksekliği arttıkça jet yüzeyi pürüzlü hale gelir ve jet salınımı başlar, böylece havalanma sağlanır. Bu sonuç, mansap havuzunda daha çok havalanmış akım anlamına gelir. Artan düşü yüksekliği ile jet ilerleyerek ayrı su damlacıklarına ayrılır ve havalanma daha geniş anlamda yürürlükte olur. Jetin

kırılmaya uğraması penetrasyon derinliğini ve dolayısıyla su içerisindeki kabarcıklı bölge alanını azaltır. Bu etki, kabarcıklarla bunları çevreleyen su arasındaki kontak zamanını azaltır ve böylece havalanmada az etki görülür. Yalnız burada jetin kırılma uzunluğunun tam olarak belirlenemediğini belirtmek gerekir. Jet kırılması olayı anidir ve düşü yüksekliğinin üzerinde oluşur.

Basamaklı yapılarda düşü yüksekliği, nap akımı rejimi için basamak yüksekliğine bağlıdır. Nap akımı rejiminde su, bir basamaktan diğerine zıplar ve havalanır. Burada esas olan basamak yüksekliğidir ve sabit bir debi için basamak yüksekliğinin artmasıyla oksijen transferi de artar. Basamak yüksekliğinin artmasıyla gerek jet darbesinde oluşan havalanma etkilenirken gerekse de bir sonraki basamak üzerindeki hidrolik sıçrama olayı gelişir. Bu da gaz transferini direkt olarak artırır. Sıçramalı akım rejimine ise, akım basamaklar üzerinde yapay bir akarsu gibi aktığından burada asıl önemli olan toplam savak yüksekliğidir. Hidrolik yapının yüksekliği arttıkça suya karışan hava miktarı da artmaktadır. Sıçramalı akım rejiminde serbest yüzey havalanması gerçekleştiğinden dolayı serbest yüzey ne kadar fazla olursa havalanmada o kadar fazla olur (Toombes ve Chanson, 2005).

Savaklarda havalanma verimliliğini değiştiren diğer bir faktör de debidir. Debinin yükselmesiyle birlikte havalanma verimliliği düşer. Düşük debilerde jetin kırılması düşü yüksekliğinin artmasıyla olur. Bu da penetrasyon derinliğinin ve kontak süresinin azalmasına, dolayısıyla havalanma verimliliğinin düşmesine yol açar. Basamaklı yapılarda ise durum biraz farklı gelişir. Düşük debilerde basamaklar üzerinde nap akımı gözlenirken yüksek debilerde sıçramalı akım gözlenir ve havalanma verimliliğinin debiye göre değişiminde de bu iki rejim arasındaki farklılıklar gözlenir. Düşük debilerde yani nap akımı rejiminde, debi arttıkça jet darbesi ve hidrolik sıçramanın gelişmesinden dolayı havalanma verimliliği artar. Debi artışında belli bir seviyeden sonra akım sıçramalı akım rejimine dönüşür ve bu rejimde ise debinin artmasıyla birlikte bulunma süresi azalacağından havalanma verimliliği düşer.

Hidrolik yapılarda oksijen transferi ölçümleri, çözülmüş oksijen konsantrasyonu düşük olan membadan mansaba doğru potansiyel oksijen konsantrasyonu için yapılır. Bu durumda Murphy yasasının belirttiğine göre; memba çözülmüş oksijen konsantrasyonu ile doygunluk konsantrasyonu arasındaki fark gün içindeki ölçümlerde, diğer zamanlardaki ölçümlerde büyük olsa bile, çok büyük olmayacaktır (Baylar vd., 2007).

### 1.3.5. Oksijen Transfer Verimine Su Sıcaklığının Etkisi

Gameson vd. (1958) savaklar üzerinde yaptıkları çalışmalarda oksijen transferinin su sıcaklığı ile olan ilişkisi incelemiştir. 15°C ve 20°C de yaptıkları model çalışmalar neticesinde şu bağıntıları geliştirmişlerdir:

$$\ln(1 - E_{15}) = \frac{\ln(1 - E_T)}{1 + 0.018(T - 15)} \quad (59)$$

$$\ln(1 - E_{20}) = \frac{\ln(1 - E_T)}{1 + 0.0165(T - 20)} \quad (60)$$

Burada;

$E_{15}$  : 15°C'deki oksijen transfer verimi

$E_{20}$  : 20°C'deki oksijen transfer verimi

$E_T$  : T°C'deki oksijen transfer verimi

T : Su sıcaklığı

Holler (1970) oksijen eksiklik oranı ile su sıcaklığı arasında bir bağıntı geliştirmiştir:

$$\frac{\ln r_T}{\ln r_{20}} = \frac{K_{L_T}}{K_{L_{20}}} \quad (61)$$

$$\frac{\ln r_T}{\ln r_{20}} = \theta^{(T-20)} \quad (62)$$

Holler (1971) çalışmalarını geliştirerek havalanma verimliliği ile ilgili şu bağıntıyı sunmuştur:

$$\ln(1 - E) = \ln(1 - E_{20})\theta^{(T-20)} \quad (63)$$

Burada  $\theta$  sıcaklık düzeltme katsayısı olarak adlandırılır ve Holler (1971) tarafından 1.0241 değerinin kullanılabileceği belirtilmiştir.

Tebbutt (1977), basamaklı dolusavaklar üzerine yaptığı model çalışmada (Şekil 12) öncelikle havalanma konusu incelemiş daha sonra da oksijen transferinin havalanma ile olan ilişkisini şu denklemlerle göstermiştir:

$$\frac{(r-1)}{(r_{20}-1)} = \frac{E(1-E_{20})}{E_{20}(1-E)} = [1 + 0.0335(T-20)] \quad (64)$$

Gulliver vd. (1990), Holler (1971)'in denkleminin çok iyi sonuçlar vermediğini savunarak daha iyi sonuçlar verdiğini savundukları şu denklemleri geliştirmişlerdir:

$$E_{20} = 1 - (1 - E)^{1/f_T} \quad (65)$$

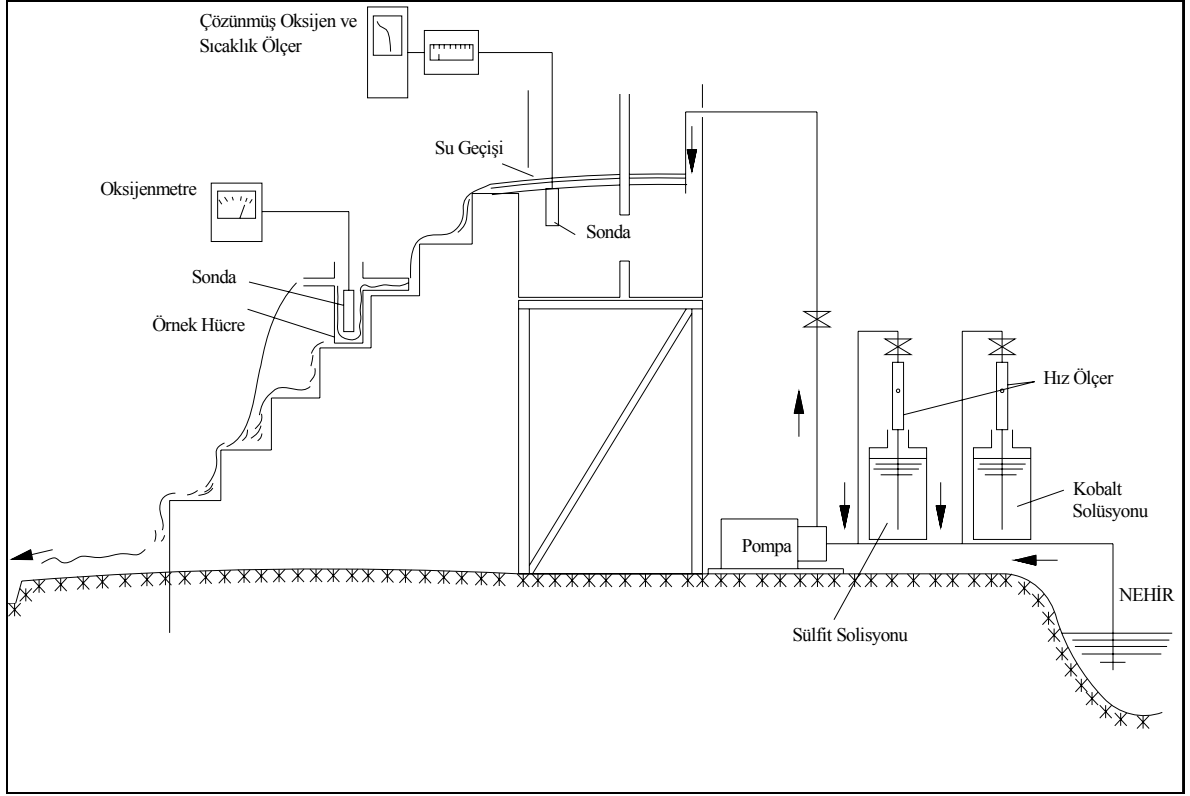
$$f_T = 1.0 + 0.02103(T-20) + 8.261 \times 10^{-5}(T-20)^2 \quad (66)$$

### 1.3.6. Çözünmüş Oksijen Doygunluk Konsantrasyonu

Çözünmüş oksijen konsantrasyonu ( $C_S$ ) akarsular için çok önemli bir su kalitesi parametresidir. Doygunluk konsantrasyonu atmosferik oksijen ile su ortamındaki çözünmüş oksijenin dengede olduğu konsantrasyon olarak tanımlanabilir. Oksijenin su içerisindeki çözünürlüğü kısmi basıncı ile doğru orantılıdır.

Çözünmüş oksijenin doyum konsantrasyonunun doğru olarak belirlenmesi, oksijen eksiklik oranının belirlenmesinde ve dolayısıyla özellikle akarsularda su kirlilik kontrolü çalışmalarında oldukça önemlidir. Genel olarak çözünmüş oksijen doyum konsantrasyonunu şu parametreler etkiler:

- Suyun saflığı
- Suyun sıcaklığı
- Açık hava basıncı



Şekil 12. Tebbutt (1977)'in kullandığı laboratuar modeli

Tatlı sularda 1 atm hava basıncı ve 0°C'de çözülmüş oksijen doymuluk değeri 14.6 mg/l ve 35°C'de 7.0 mg/l olarak belirlenmiştir. 760 mm civa (Hg) basıncında ve %20.9 oksijen ihtiva eden kuru havaya maruz tatlı ve tuzlu suyun çözülmüş oksijen doymuluk konsantrasyonları tablo 4'te verilmiştir.

Çözülmüş oksijen doymuluk konsantrasyonunu doğru olarak belirlemek için Gameson ve Robert (1955) ilk çalışmaları yapmışlardır ve aşağıdaki bağıntıyı geliştirmiştir (Tebbutt, 1972):

$$C_s = \frac{475 - 2.65C_{ds}}{33.5 + T} \quad (67)$$

Burada;  $C_{ds}$  klorür konsantrasyonu (g/l) ve T sıcaklığı belirtmektedir.



Bu denklem 0°C-50°C sıcaklıklar arasında deniz suyu ve temiz sular için kullanılabilir ancak hesaplama hatası oldukça yüksektir.

Committee on Sanitary Engineering Research of the Sanitary Engineering Division (1960), doğal akarsulardaki sıcaklık seviyelerini baz alarak yürüttüğü çalışmalar neticesinde doygunluk konsantrasyonunu daha iyi tespit edebilen şu denklemi geliştirmişlerdir:

$$C_s = 14.652 - 0.41022T + 0.00799T^2 - 0.000077774T^3 \quad (68)$$

Bu denklem de 0°C - 30°C arasındaki sıcaklıklar ve sıfır klorür konsantrasyonu için kullanılabilir ve Gameson ve Robertson (1955)'in denkleminde daha iyi sonuçlar vermektedir.

Amerikan Halk Sağlığı Birliği (APHA) (1998), sonradan geliştirdiği şu denklemle çok daha olumlu sonuçlar almıştır:

$$\ln(C_s) = -139.34411 + \left( \frac{1.575701 \times 10^5}{T} \right) - \left( \frac{6.642308 \times 10^7}{T^2} \right) + \left( \frac{1.243800 \times 10^8}{T^3} \right) - \left( \frac{8.621949 \times 10^{11}}{T^4} \right) \quad (69)$$

Bu denklem üzerinde tuzluluk ve klorür için düzeltmeler yapılarak da şu denklem elde edilmiştir:

$$\ln C_{ss} = \ln(C_s) - C_{hl} \left[ 0.031929 - \left( \frac{19.428}{T} \right) + \left( \frac{3.8673 \times 10^3}{T^2} \right) \right] \quad (70)$$

Burada;

$C_{ss}$  : 1 atm basınçta tuzlu sudaki oksijen doygunluk konsantrasyonu

$T$  : su sıcaklığını (°K) ( Sıcaklık 0-40°C arası değişmektedir.

$C_{cl}$  : % klor oranını göstermektedir.

Tablo 4. Çözünmüş oksijen doygunluk değerinin sıcaklıkla değişimi (Fair vd., 1967)

| Sıcaklık | Tuzluluk – Klorür Konsantrasyonu (mg/l) |      |       |       |       |
|----------|---|------|-------|-------|-------|
|          | 0                                       | 5000 | 10000 | 15000 | 20000 |
| 0        | 14.7                                    | 13.8 | 13.0  | 12.1  | 11.3  |
| 1        | 14.3                                    | 13.5 | 12.7  | 11.9  | 11.1  |
| 2        | 13.9                                    | 13.1 | 12.3  | 11.6  | 10.8  |
| 3        | 13.5                                    | 12.8 | 12.0  | 11.3  | 10.5  |
| 4        | 13.1                                    | 12.4 | 11.7  | 11.0  | 10.3  |
| 5        | 12.8                                    | 12.1 | 11.4  | 10.7  | 10.0  |
| 6        | 12.5                                    | 11.8 | 11.0  | 10.4  | 9.8   |
| 7        | 12.1                                    | 11.5 | 10.8  | 10.2  | 9.6   |
| 8        | 11.8                                    | 11.2 | 10.6  | 10.0  | 9.4   |
| 9        | 11.6                                    | 11.0 | 10.4  | 9.7   | 9.1   |
| 10       | 11.3                                    | 10.7 | 10.1  | 9.5   | 8.9   |
| 11       | 11.0                                    | 10.4 | 9.9   | 9.3   | 8.7   |
| 12       | 10.8                                    | 10.2 | 9.7   | 9.1   | 8.6   |
| 13       | 10.5                                    | 10.0 | 9.4   | 8.9   | 8.4   |
| 14       | 10.3                                    | 9.7  | 9.2   | 8.7   | 8.2   |
| 15       | 10.0                                    | 9.5  | 9.0   | 8.5   | 8.0   |
| 16       | 9.8                                     | 9.3  | 8.8   | 8.4   | 7.9   |
| 17       | 9.6                                     | 9.1  | 8.7   | 8.2   | 7.7   |
| 18       | 9.4                                     | 9.0  | 8.5   | 8.0   | 7.6   |
| 19       | 9.2                                     | 8.8  | 8.3   | 7.9   | 7.4   |
| 20       | 9.0                                     | 8.6  | 8.1   | 7.7   | 7.3   |
| 21       | 8.8                                     | 8.4  | 8.0   | 7.6   | 7.1   |
| 22       | 8.7                                     | 8.3  | 7.8   | 7.4   | 7.0   |
| 23       | 8.5                                     | 8.1  | 7.7   | 7.3   | 6.8   |
| 24       | 8.3                                     | 7.9  | 7.5   | 7.1   | 6.7   |
| 25       | 8.2                                     | 7.8  | 7.4   | 7.0   | 6.5   |
| 26       | 8.0                                     | 7.6  | 7.2   | 6.8   | 6.4   |
| 27       | 7.9                                     | 7.5  | 7.1   | 6.7   | 6.3   |
| 28       | 7.7                                     | 7.3  | 6.9   | 6.6   | 6.2   |
| 29       | 7.6                                     | 7.2  | 6.8   | 6.5   | 6.1   |
| 30       | 7.4                                     | 7.1  | 6.7   | 6.3   | 6.0   |

Hua (1990), hesaplamaları kolaylaştırmak için şu formülü geliştirmiştir:

$$C_s = \exp[-17.015355 + 0.022629T + (3689.38/T) + (0.01166 - (6.544/T))C_{ds}] \quad (71)$$

Bu denklem ise 0°C-50°C arasında deniz suyu ve temiz su için yaklaşık sonuç vermektedir.

### 1.3.7. Doyunluk Konsantrasyonu Değişimi

Hidrolik yapılarda oksijen transferi gerçekleşirken olayın gerçekleştiği bölgenin atmosfer basıncı ve ortalama nisbi neme bağlı olarak oksijen transferi değişmektedir. Atmosfer basıncı ve nemin değişmesi demek oksijen transferi gerçekleşen yapının denizden olan yükseklik farkının olması demektir. Deniz kıyısından yükseklerle çıktıkça, havalandırıcıların havalandırma kapasiteleri düşmektedir. Bu nedenle,  $C_s$ ,  $C_{US}$  ve  $C_{DS}$  ortam şartlarına göre tekrardan düzenlenmesi gerekir (Baylar 2002):

$$C_{s1} = C_s \frac{P - P_w}{760} \quad (72)$$

$$C_{US1} = C_U \frac{P - P_w}{760} \quad (73)$$

$$C_{DS1} = C_d \frac{P - P_w}{760} \quad (74)$$

Burada;

$P$  : Atmosferik basınç (mmHg)

$P_w$  : Su buharı kısmi basıncı (Tablo 5)

$C_s$  : Standart şartlardaki çözünmüş oksijen doyunluk konsantrasyonu

$C_{s1}$  : Ortam şartlarına ayarlanmış çözünmüş oksijen doyunluk konsantrasyonu

$C_{US1}$  : Ortam şartlarına ayarlanmış memba çözünmüş oksijen konsantrasyonu

$C_{DS1}$  : Ortam şartlarına ayarlanmış mansap çözünmüş oksijen konsantrasyonu

APHA (1998), ise değişen basınç değerlerinde çözünmüş oksijen konsantrasyonu değişimi için şu denklemlerin en uygun metot olduğunu belirtmiştir:

$$C_{S1} = C_S \cdot P \left[ \frac{\left(1 - \frac{P_w}{P}\right)(1 - \theta \cdot P)}{(1 - P_w)(1 - \theta)} \right] \quad (75)$$

Su buharı kısmi basıncı ( $P_w$ ) değerinin ise hesaplanmanın aşağıdaki denklemle mümkün olduğunu belirtmiştir:

$$\ln P_w = 11.8571 - \frac{3840.70}{T} - \frac{216.961}{T^2} \quad (76)$$

Ayrıca  $\theta$  parametresini ise şu şekilde hesaplamıştır:

$$\theta = 0.000975 - 1.426 \times 10^{-5} T + 6.436 \times 10^{-8} T^2 \quad (77)$$

Zison (1978), oksijen doygunluk konsantrasyonu için deniz seviyesinden mesafenin fonksiyonu olan şu bağıntıyı sunmuştur:

$$C_{S1} = C_S (1 - 0.1148 \times EL) \quad (78)$$

White (1979), çözünmüş oksijen konsantrasyonu ölçümü yapılacak bölgede atmosferik basıncın bilinmemesi durumunda, eğer bölgenin deniz seviyesinden yüksekliğine biliniyorsa doygunluk konsantrasyonlarının şu şekilde ölçülebileceğini söylemiştir :

$$C_{S1} = C_S \left[ 1 - \frac{(0.0065EL)}{298} \right]^{5.25} \quad (79)$$

$$C_{US1} = C_{US} \left[ 1 - \frac{(0.0065EL)}{298} \right]^{5.25} \quad (80)$$

$$C_{DS1} = C_{DS} \left[ 1 - \frac{(0.0065EL)}{298} \right]^{5.25} \quad (81)$$

Burada;

EL : Ölçüm yapılan bölgenin deniz seviyesinden yüksekliğidir .

Eğer atmosferik basınç, buhar basıncı ve sıcaklı birlikte dikkate alınmıyorsa, atmosferik ve kısmi basınç değerleri bar cinsinden, sıcaklık °C cinsinden, yazılarak çözülmüş oksijen doygunluk konsantrasyonu şu şekilde bulunabilir :

$$C_S = \frac{(510.2 - 0.45T)(P - P_w)}{T + 35} \quad (82)$$

Tablo 5. Hava İçindeki Su Buharının Değişik Sıcaklıklardaki Kısmi Basıncı (Ökten, 1985)

| t (°C) | Buhar Basıncı (mm Hg) | t (°C) | Buhar Basıncı (mm Hg) | t (°C) | Buhar Basıncı (mm Hg) | t (°C) | Buhar Basıncı (mm Hg) |
|--------|-----------------------|--------|-----------------------|--------|-----------------------|--------|-----------------------|
| -20    | 0.96                  | 6      | 7.00                  | 16     | 13.64                 | 26     | 25.2                  |
| -15    | 1.45                  | 7      | 7.49                  | 17     | 14.50                 | 27     | 26.7                  |
| -10    | 2.16                  | 8      | 8.02                  | 18     | 15.50                 | 28     | 28.4                  |
| -5     | 3.17                  | 9      | 8.58                  | 19     | 16.50                 | 29     | 30.1                  |
| 0      | 4.58                  | 10     | 9.21                  | 20     | 17.50                 | 30     | 31.8                  |
| 1      | 4.92                  | 11     | 9.84                  | 21     | 18.7                  | 31     | 33.7                  |
| 2      | 5.29                  | 12     | 10.52                 | 22     | 19.8                  | -      | -                     |
| 3      | 5.68                  | 13     | 11.23                 | 23     | 21.1                  | -      | -                     |
| 4      | 6.09                  | 14     | 11.99                 | 24     | 22.4                  | -      | -                     |
| 5      | 6.53                  | 15     | 12.79                 | 25     | 23.8                  | -      | -                     |

Deniz seviyesinden yukarı kotlara çıkıldıkça çözünmüş oksijen doygunluk konsantrasyonunun değeri azalmaktadır. Suyun tuzluluğu artıkça doygunluk konsantrasyonu düşmektedir. Yine aynı şekilde bu parametrelere bağlı olarak hazırlanmış tablolardan çözünmüş oksijen doygunluk konsantrasyonunun değerine karar verilebilir. Tablo 6 deniz seviyesinde çözünmüş oksijen doygunluk konsantrasyonunun tuzluluk ile değişimini ve tablo 7 çözünmüş oksijen doygunluk konsantrasyonunun deniz seviyesinden mesafesi ile olan değişimini vermektedir (Bewtra vd., 1970; Neal ve Johnson, 1999).

Tablo 6. ÇO doygunluk konsantrasyonunun tuzluluk ile değişimi

| °C | Tuzluluk (g/l) |      |     |     |     |
|----|----------------|------|-----|-----|-----|
|    | 0              | 10   | 20  | 30  | 35  |
| 10 | 11.3           | 10.6 | 9.9 | 9.3 | 9.0 |
| 12 | 10.8           | 10.1 | 9.5 | 8.9 | 8.6 |
| 14 | 10.3           | 9.7  | 9.1 | 8.6 | 8.3 |
| 16 | 9.9            | 9.3  | 8.7 | 8.2 | 8.0 |
| 18 | 9.5            | 8.9  | 8.4 | 7.9 | 7.6 |
| 20 | 9.1            | 8.5  | 8.0 | 7.6 | 7.4 |
| 22 | 8.7            | 8.2  | 7.8 | 7.3 | 7.1 |
| 24 | 8.4            | 7.9  | 7.5 | 7.1 | 6.9 |
| 26 | 8.1            | 7.6  | 7.2 | 6.8 | 6.6 |
| 28 | 7.8            | 7.4  | 7.0 | 6.6 | 6.4 |

#### 1. 4. Hidrolik Yapılarda Gerçekleşen Oksijen Transferi

Hidrolik yapılar üzerinde çok kısa bir mesafede su içerisinde çok büyük oranda gaz transferi gerçekleşmektedir. Gerçekleşen gaz transferinin ne boyutta olacağını tespiti bir çok açıdan önemlidir. Bazı durumlarda örneğin kirlilik oranı yüksek olan akarsularda havalanmanın yüksek olması istenirken daha temiz akarsularda bu istenmeyebilir. Gerçekleşen oksijen transferi hidrolik yapıdan kilometrelerce uzaklıklardaki mesafeyi etkileyebilecek düzeydedir. Savakta oluşacak aşırı oksijen transferi ile birlikte mansap tarafında akarsu boyunca yüksek doygunluk (süpersaturasyon) olabilir. Bu durumdan akarsu üzerinde balık ve diğer canlı yaşamı olumsuz etkilenirler. Basınç farklılıklarından dolayı balıklar bu ortamda yaşayamayıp ölürlür.

Tablo 7. O doygunluk konsantrasyonunun deniz seviyesinden mesafesi ile değişimi

| °C | Deniz seviyesinden olan mesafe (m) |      |      |      |      |      |      |
|----|------------------------------------|------|------|------|------|------|------|
|    | 0                                  | 300  | 600  | 900  | 1200 | 1500 | 1800 |
| 0  | 14.6                               | 14.1 | 13.6 | 13.2 | 12.7 | 12.3 | 11.8 |
| 2  | 13.8                               | 13.3 | 12.9 | 12.4 | 12.0 | 11.6 | 11.2 |
| 4  | 13.1                               | 12.7 | 12.2 | 11.9 | 11.4 | 11.0 | 10.6 |
| 6  | 12.4                               | 12.0 | 11.6 | 11.2 | 10.8 | 10.4 | 10.1 |
| 8  | 11.8                               | 11.4 | 11.0 | 10.6 | 10.3 | 9.9  | 9.6  |
| 10 | 11.3                               | 10.9 | 10.5 | 10.2 | 9.8  | 9.5  | 9.2  |
| 12 | 10.8                               | 10.4 | 10.1 | 9.7  | 9.4  | 9.1  | 8.8  |
| 14 | 10.3                               | 9.9  | 9.6  | 9.3  | 9.0  | 8.7  | 8.3  |
| 16 | 9.9                                | 9.7  | 9.2  | 8.9  | 8.6  | 8.3  | 8.0  |
| 18 | 9.5                                | 9.2  | 8.7  | 8.6  | 8.3  | 8.0  | 7.7  |
| 20 | 9.1                                | 8.8  | 8.5  | 8.2  | 7.9  | 7.7  | 7.4  |
| 22 | 8.7                                | 8.4  | 8.1  | 7.8  | 7.7  | 7.3  | 7.1  |
| 24 | 8.4                                | 8.1  | 7.8  | 7.5  | 7.3  | 7.1  | 6.8  |
| 26 | 8.1                                | 7.8  | 7.5  | 7.3  | 7.0  | 6.8  | 6.6  |
| 28 | 7.8                                | 7.5  | 7.3  | 7.0  | 6.8  | 6.6  | 6.3  |
| 30 | 7.5                                | 7.2  | 7.0  | 6.8  | 6.5  | 6.3  | 6.1  |
| 32 | 7.3                                | 7.1  | 6.8  | 6.6  | 6.4  | 6.1  | 5.9  |
| 34 | 7.1                                | 6.9  | 6.6  | 6.4  | 6.2  | 6.0  | 5.8  |
| 36 | 6.8                                | 6.6  | 6.3  | 6.1  | 5.9  | 5.7  | 5.5  |
| 38 | 6.6                                | 6.4  | 6.2  | 5.9  | 5.7  | 5.6  | 5.4  |
| 40 | 6.4                                | 6.2  | 6.0  | 5.8  | 5.6  | 5.4  | 5.2  |

### 1.4.1. Savakların Yapısal Etkileri

Havalanma işlemi barajların dolusavak yapılarında gerçekleşirler. Bu yüzden savak tipi ve şekli havalanmanın şeklini ve yoğunluğunu önemli ölçüde etkilerler. Savak yapılarının akarsu ve baraj üzerindeki konumları da yine havalanmayı etkileyen faktörlerdendir.

Yine aynı şekilde adı geçen savaklar enkesitte farklı yapılarda olabilirler. Bu farklılıkta, savak üzerinde oluşacak havalanmanın tipini, yerini ve yoğunluğunu değiştirecektir. Bu yüzden hidrolik yapılar yapılırken , akarsu şartları ve akım tipine gibi değerler mutlak suretle birincil şart olarak göz önüne alınmalıdır.

Suyun mabdan mansaba düşme yüksekliğinin belirli bir kritik değeri aşması sonucu, serbest düşen su jeti parçacıklar haline gelmekte ve mansapta küçük bir penetrasyon derinliği oluşturmaktadır. Dolayısıyla hava kabarcıkları ile mansap suyu daha az temas halinde olduğundan, oksijen transfer veriminin artış oranı azalmaktadır. Bu nedenle büyük düşme yüksekliğinin olduğu yerlerde savak seçimine dikkat edilmelidir. Ayrıca, batmış akım durumunun olduğu bir kapaklı eşikte hava girişi, dolayısıyla oksijen transferi az olacağından bu akım şartını oluşturacak bir yapı yapılması uygun değildir.

### 1.4.2. Dolusavak Tipinin Oksijen Transferine Etkisi

Dolusavaklar, taşkın sularını kontrollü bir şekilde akarsulara aktarmaya yarayan hidrolik yapılardır. Genellikle barajların bir parçası oldukları gibi akarsular üzerinde bağımsız elemanlar olarak da görülebilirler. Genel anlamda kontrollü ve kontrolsüz savaklar olarak ikiye ayrılabilirler. Bunun anlamı bir kapak yada benzeri yapıyla suyun geçişinin kontrolüdür.

Barajın ve yapılan vadinin jeolojik durumuna ve nehrin konumuna göre dolusavak tipi farklılıklar gösterir. Bu tip şartlara göre seçilen dolusavaklarda gerçekleşen oksijen transferi akarsu suyu kalitesi ve ekolojik denge açısından önemlidir.

Düşülü dolusavaklarda akışın havalanması serbest yüzey havalanması, dalan jet ve hidrolik sıçrama ile olur. Havalanma verimliliği oldukça yüksektir. Savak yüksekliği yani düşü mesafesi önemli bir parametredir. Yükseklik arttıkça havalanma süresi artacak ve suya



nüfus eden oksijen oranı da artacaktır. Ayrıca artan çıkış suyu derinliği ve dalan jetin etkisiyle beraber de oksijen transferi verimi yükselecektir (Wiebe, 1939; Wiebe, 1940).

Üçgen labirent savaklardaki ek eşik uzunluğu ve mambadan gelen su jetinin çarpışmasıyla birlikte havalanma verimliliğinin yükseleceğini savunulmuştur. Düşük debilerde labirent savak geometrisinin havalanmaya etkisinin çok az olduğunu fakat bu savakların normal savaklara oranla çok daha fazla oksijen transferine neden olduğu araştırmacılar tarafından saptamışlardır (Emiroğlu ve Baylar, 2005).

Basamaklı dolusavaklar, uzun yıllardan beridir enerji sönümlenme ve havalandırma yapıları olarak kullanıla gelmiştir. Basamaklı kaskat yapılar, mühendislikte havalandırma yapıları olarak bilinir. Basamaklı havalandırıcılar, nap akım durumunda yeterli hava kabarcığı girişi, uzun bekleme zamanı ve türbülanslı karışım özelliklerinden dolayı etkili havalandırma yapılarından biridir. Toombes ve Chanson (2000) çalışmalarında, basamaklı yapıların eğimli düz kanallara göre 10 kat daha fazla oksijen verimi sağladıklarını buldular. Bazı arıtma tesisleri demir, manganez ve nitrat uzaklaştırma işleminde suyun oksijenlendirilmesine gerek duyar. Bu basit bir kaskat yapısı ile başarılabilir. Basamaklı havalandırmada, su akımı ince bir formda birçok basamaklar üzerinden aşağılara doğru akar. Küçük debili sistemlerde, suyun oksijen doygunluğuna ulaşmak için toplam yüksekliği 1-2 m olan bir veya birkaç basamaklı yapı yeterli olacaktır. Basamaklı yapı suyun yüzey alanını arttırır ve gazların salınmasına izin verir (Khatsuria, 2005).

Basamaklı dolusavaklarda akış, nap akımı ve sıçramalı akım olma üzere ikiye ayrılır. İki farklı akım rejiminin olmasının ana nedeni akış debisidir. Düşük debilerde nap akım rejimi görülürken yüksek debilerde akış sıçramalı akım rejimine girer. Nap akımı rejiminde akış, ufak serbest düşümlere bölünür. Su bir basamaktan diğerine atlayarak ilerler. Her basamaktan diğerine düşen jet, bir çok durumda hidrolik sıçrama tarafından takip edilir. Jet hava içerisinde dağılınca ve basamaklar üzerinde karışınca, kısmi bir hidrolik sıçrama ile enerji kırılması meydana gelir. Nap akım rejimi için basamakların nispeten geniş olması gerekmektedir. Sıçramalı akım rejiminde, su basamakların yüzeyinden yapışık bir su akımı gibi akar ve basamaklar arasında kalan bölgede, çevrim yapan su tarafından desteklenir. Basamakların dış kenarı akış için bir sınır oluşturur. Bunun yanında basamak üzerindeki çevrıntiler gelişir ve basamak kenarlarından geçen akımdan dolayı oluşan kesme gerilmesini muhafaza ederler.

Basamaklı kanal üzerindeki akış durumu, yüksek seviyede türbülans ve büyük miktarda havalanma olarak tanımlanabilir. Havalanma, hava-su serbest yüzeyi altındaki türbülans hızından dolayı oluşturulur. Bu ara yüz boyunca sürekli olarak hava tutulur ve serbest bırakılır. Havalanma, çevrintinin kinetik enerjisinin yüzey gerilimi ve yerçekimi etkisini yenecek kadar büyüklükte olduğu anda başlar. Serbest yüzeye göre olan türbülans hızı, yüzey gerilimi baskısının üzerine çıkmalı ve kabarcık yükselme hızından büyük olmalıdır (Chanson, 1997).

Nap akımı rejiminde bir basamaklı savak düşünüldüğünde; havalanma, her basamakta dalan jet ile birlikte suyun birbirine karışmasıyla, dalış noktasında ve hidrolik sıçramanın topuğunda oluşur. Basamakların derin olması, yani gölcüklerin oluşması halinde havalanmanın büyük bir kısmı su jeti ile meydana gelir. Sığ ve düz basamaklar için havalanmanın büyük bölümü ise hidrolik sıçramanın topuğunda oluşur (Kaş ve Yıldız, 2000).

Sıçramalı akım rejimindeki bir basamaklı savakta akış, savak üzerinde düz ve pürüzsüz akan bölge ve altında havalanan bölge şeklindedir. Sınır yanında türbülans oluşur ve sınır tabakası, diğer ucu yüzeye ulaşıncaya kadar büyür. Sınır tabakasının dış kenarı serbest yüzeye ulaştığında, türbülans serbest yüzey havalanmasını başlatabilir. Burada havalanmanın başladığı bölge başlangıç bölgesi diye adlandırılır.

Serbest yüzey havalanmasının başlangıç noktasının mansabında su hızlı bir şekilde havalanır ve su yüzeyi köpüklü, beyaz bir renk almış gibi görünür. Bu bölgeye Beyaz Akım adı verilir. Mansaptan uzaklaştıkça akım üniform hale gelir ve hava konsantrasyonu ile hız dağılımı şüt boyunca değişmez. Bu bölge, üniform denge akış bölgesi olarak tanımlanabilir.

Savak üzerindeki sel rejimi durumunda havalanma miktarı önemli bir dizayn parametresidir. Falvey (1980)'e göre, akış hacmindeki havalanmış bölüme etkisinden dolayı ilk olarak serbest yüzeyde oluşan doğal havalanma (self aeration) incelenmelidir. Havalanmayla birlikte akışta bir kabarma oluşur ve bu da yan duvarların belirlenmesinde önemli bir parametredir. Aynı zamanda, sınır tabakası içerisindeki havanın varlığı, akış tabakaları arasındaki kesme gerilmesini azaltır.

Enerji kırıcı yapılara sahip dolusavaklarda havalanma olayı normal düz yüzeyli savaklardan daha fazla olmaktadır. Enerji kırıcı bloklara çarpan su belli bir kabarma yapar ve daha çok atmosferle temas eder ve bu süre zarfında suya daha çok oksijen girer ve havalanma verimi de yükselir (Rogala ve Redowicz, 2002).

Kroon , savaklarda oksijen transfer verimi ile suyun düşme yüksekliği arasındaki ilişkiyi incelemiştir. Bu incelemeleri sonucu suyun düşme yüksekliğinin belli bir değere kadar artması ile oksijen transfer veriminin arttığını ve bu değerden yüksek düşme yüksekliklerinde ise oksijen transfer veriminin azaldığını tespit etmiştir. Bunun nedeni, başlangıçta jetin pürüzsüz olması daha sonra suyun düşme yüksekliğinin artması ile jetin pürüzlü hale gelmesi ve suyun düşme yüksekliğinin artmaya devam etmesi ile de jette dalgalanmaların ve kopmaların oluşmasıdır. Bundan dolayı hava kabarcıkları daha az derinliklere ulaşacak ve su ile temas yüzeylerinin azalması ile oksijen transfer verimi düşecektir. Kroon'un çalışmasında bu yükseklik değerinin 0.8-10 m. arasında olduğunu belirtmiştir. Pöpel (1974) ise, suyun düşme yüksekliğinin 2/3'ü kadar yükseklikteki bir mansap suyu derinliğinden sonraki derinliklerde oksijen transfer veriminin sabit kaldığını belirtmişlerdir (Baylar, 2002).

Avery ve Novak (1978), oksijen transfer veriminin debinin artması ile birlikte azaldığını belirtmiş, bununla beraber jette kırılmalar meydana getirebilecek kadar küçük debilerde ise suyun düşme yüksekliğinin artması ile oksijen transfer verimi azalmakta olduğunu söylemiştir.

### **1.4.3. Memba ve Mansap Arasındaki Çözünmüş Oksijen Değeri Farklılıkları**

Hidrolik yapıların bir akarsu üzerindeki konumu itibarıyla çözünmüş oksijen dengesinin değişeceğinden daha önce bahsedilmişti. Hidrolik yapılardaki bir çok etken ÇO dengesini etkilemektedir. Bu yüzden genel anlamda bu değişimi ifade eden bir denklem sunulamamaktadır. Araştırmacılar gerek saha çalışmaları ile gerekse de model çalışmaları ile memba ve mansaptaki çözünmüş oksijen değerlerini ölçmüşler ve değişim nasıl olduğuna dair karar vermeye çalışmışlardır (Technical Memorandum, 1996; EPA, 2002).

Konu üzerinde ilk model ve saha çalışmalarından birini Holler (1970) yapmıştır. Kirlilik yükü fazla olan Hasting Barajı'nda memba ve mansap ÇO değerlerini ölçerek (Tablo 8) oksijen eksiklik oranı üzerinde çalışmalar yapmış ve kendi oluşturduğu laboratuvar modeli ile karşılaştırmalar yapmıştır. Özellikle farklı durumlar için oksijen eksiklik oranı ile ilgili bağıntılar geliştirmiştir.

Nakasone (1987), Hollanda'daki Meuse Nehri üzerinde yaptığı çalışmada akarsu üzerindeki çeşitli savakların memba ve mansabındaki çözünmüş oksijen değerlerini ölçmüştür

(Tablo 9). Mansaptaki ÇO konsantrasyonlarının, doygunluk konsantrasyonunun en fazla %90'ı kadar olduklarını tespit etti. Düşük düşü yüksekliklerinde havalanma verimliliği için düşü yüksekliğinin etkili bir değişken olduğunu belirlemiştir.

Chanson ve Toombes (2002) büyük basamaklı savaklar (25 m. uzunluğunda ve 0.5 m.genişliğinde) üzerine yaptıkları çalışmalarda, deneysel sonuçlarını Cargill (1994), Hauser ve Morris (1995), Hauser vd. (1992), Rizk ve Hauser (1993), Robinson (1994) ve Hoek vd., (1992)'in saha çalışmaları ile (Tablo 10) karşılaştırarak havalanma verimliliğinin düz savaklara oranla çok yüksek olduklarını tespit etmişlerdir.

Tablo 8. Hasting Barajı memba ve mansabında ölçülen ÇO değerleri (Holler 1970)

| Nokta | Q<br>(m <sup>3</sup> /s) | C <sub>US</sub><br>(mg/l) | C <sub>DS</sub><br>(mg/l) | C <sub>S</sub><br>(mg/l) | r <sub>T</sub> |
|-------|--------------------------|---------------------------|---------------------------|--------------------------|----------------|
| 1     | 59.46                    | 2.40                      | 5.40                      | 14.20                    | 1.34           |
| 2     | 56.63                    | 2.10                      | 6.70                      | 14.20                    | 1.61           |
| 3     | 56.63                    | 2.05                      | 6.60                      | 14.20                    | 1.60           |
| 4     | 56.63                    | 1.20                      | 4.85                      | 14.20                    | 1.39           |
| 5     | 50.97                    | 2.10                      | 6.70                      | 14.20                    | 1.62           |
| 6     | 50.97                    | 1.35                      | 4.70                      | 14.20                    | 1.36           |
| 7     | 48.13                    | 0.80                      | 4.80                      | 14.20                    | 1.43           |
| 8     | 48.13                    | 0.55                      | 4.60                      | 14.20                    | 1.43           |
| 9     | 59.46                    | 0.35                      | 4.25                      | 13.70                    | 1.41           |
| 10    | 59.46                    | 0.10                      | 4.70                      | 14.20                    | 1.49           |
| 11    | 62.30                    | 0.15                      | 3.60                      | 13.70                    | 1.34           |
| 12    | 56.63                    | 0.50                      | 5.20                      | 14.20                    | 1.52           |
| 13    | 62.30                    | 0.75                      | 5.15                      | 13.70                    | 1.52           |
| 14    | 59.46                    | 0.00                      | 3.95                      | 13.70                    | 1.41           |
| 15    | 62.30                    | 0.50                      | 4.50                      | 13.50                    | 1.45           |
| 16    | 62.30                    | 0.50                      | 4.55                      | 13.50                    | 1.45           |
| 17    | 62.30                    | 1.75                      | 6.05                      | 13.70                    | 1.56           |
| 18    | 62.30                    | 1.40                      | 5.60                      | 13.10                    | 1.56           |
| 19    | 62.30                    | 2.85                      | 6.80                      | 13.50                    | 1.59           |

Tablo 9. Nakasone (1987) tarafından çeşitli savakların memba ve mansabında ölçülen ÇO. değerleri

| Yapının Adı      | T (°C) | C <sub>US</sub> (mg/l) | C <sub>DS</sub> (mg/l) | Q (m <sup>3</sup> /m.s) | h (m) | h <sub>M</sub> (m) |
|------------------|--------|------------------------|------------------------|-------------------------|-------|--------------------|
| Borgharen Savağı | 21     | 5.38                   | 7.81                   | 1.04                    | 5.03  | 0.67               |
|                  | 19     | 5.41                   | 8.11                   | 1.54                    | 5.00  | 0.85               |
|                  | 6      | 9.89                   | 10.85                  | 1.32                    | 4.89  | 1.01               |
|                  | 18     | 6.89                   | 8.26                   | 2.33                    | 4.44  | 1.51               |
|                  | 17     | 4.97                   | 8.43                   | 0.16                    | 5.71  | 0.30               |
|                  | 19     | 6.22                   | 7.12                   | 1.89                    | 4.75  | 0.96               |
|                  | 15     | 6.15                   | 8.78                   | 1.01                    | 4.66  | 1.07               |
|                  | 12     | 7.20                   | 9.39                   | 0.70                    | 4.90  | 0.79               |
|                  | 20     | 6.10                   | 7.96                   | 0.93                    | 4.90  | 1.54               |
|                  | 20     | 5.13                   | 7.87                   | 0.81                    | 4.78  | 0.90               |
|                  | 20     | 4.24                   | 7.87                   | 0.13                    | 5.78  | 0.20               |
|                  | 9      | 5.37                   | 9.62                   | 0.07                    | 5.39  | 0.00               |
|                  | 15     | 7.71                   | 7.81                   | 1.67                    | 4.80  | 1.03               |
|                  | 12     | 5.42                   | 9.28                   | 0.25                    | 5.55  | 0.45               |
|                  | 12     | 5.11                   | 9.07                   | 0.23                    | 5.63  | 0.26               |
|                  | 12     | 8.66                   | 9.39                   | 2.81                    | 4.09  | 1.71               |
|                  | 20     | 6.01                   | 7.87                   | 1.32                    | 4.84  | 1.06               |
|                  | 19     | 5.14                   | 7.57                   | 3.00                    | 4.69  | 0.89               |
|                  | 18.5   | 6.01                   | 8.10                   | 1.09                    | 5.21  | 0.71               |
|                  | 11     | 6.83                   | 9.28                   | 0.39                    | 5.38  | 0.48               |
|                  | 21.5   | 5.42                   | 7.66                   | 0.33                    | 5.71  | 0.34               |
|                  | 19     | 4.96                   | 8.11                   | 0.52                    | 5.41  | 0.45               |
|                  | 18.5   | 5.82                   | 7.83                   | 0.56                    | 5.35  | 0.60               |
|                  | 15.5   | 5.60                   | 8.31                   | 0.67                    | 5.27  | 0.67               |
|                  | 21     | 5.03                   | 7.81                   | 1.04                    | 4.97  | 0.92               |
|                  | 23.5   | 5.91                   | 7.40                   | 0.19                    | 5.62  | 0.32               |
|                  | 11     | 6.94                   | 9.50                   | 0.68                    | 5.25  | 0.68               |
|                  | 11     | 7.26                   | 9.40                   | 1.17                    | 4.78  | 0.95               |
|                  | 9      | 7.94                   | 9.85                   | 1.48                    | 4.66  | 1.11               |
|                  | 17     | 5.53                   | 8.34                   | 0.83                    | 4.96  | 0.75               |
| 17               | 6.28   | 8.43                   | 1.55                   | 4.96                    | 1.14  |                    |
| 24               | 4.37   | 7.18                   | 0.52                   | 5.29                    | 0.56  |                    |
| 21               | 5.38   | 7.38                   | 0.57                   | 5.19                    | 0.59  |                    |
| 12               | 6.05   | 8.55                   | 0.51                   | 5.17                    | 0.55  |                    |
| Lith Savağı      | 9      | 8.84                   | 9.06                   | 7.83                    | 1.52  | 7.48               |
|                  | 13     | 6.22                   | 6.63                   | 6.01                    | 1.73  | 6.90               |
| Hague Kaskatı    | 10.1   | 3.1                    | 8.7                    | 0.0273                  | 1.00  | 0.66               |

Burada; h: suyun düşü yüksekliği, h<sub>M</sub>: çıkış suyu derinliğidir.

Tablo 10. Basamaklı savaklarda havalanma verimliliği (Chanson ve Toombes 2002)

| Savak  | Amaç   | Özellikler  | Performans   |
|--|--|---|--|
| Calumet Waterway Savağı, ABD                 | 5 adet havalandırma kaskatı, Boşaltım kanalının oksijenlendirilmesi amaçlı                 | Havuzlu Basamaklar<br>11.6 m <sup>3</sup> /s<br>(4 basamak h =1m.)<br>1.59 m <sup>3</sup> /s<br>(4 basamak h =1 m.)<br>13.7 m <sup>3</sup> /s<br>(3 basamak h =1.5m.)<br>13.7 m <sup>3</sup> /s<br>(3 basamak h =1.5m.)<br>16.4 m <sup>3</sup> /s<br>(4 basamak h =1m.) | E <sub>15</sub> = 0.95<br>(3 basamak)<br><br>E = 1.0<br>(4 basamak)<br><br>Q = 0.021 m <sup>2</sup> /s |
| Canyon Savağı, ABD                           | Hidroelektrik santral Mansabında türbin suyunun oksijenlendirilmesi amaçlı                 | Kret Uzunluğu:118m<br>h =1m.<br>Dalış havuzu derinliği : 1.9m.<br>Dizayn akış koşulları<br>0.14 m <sup>3</sup> /s   | E <sub>15</sub> = 0.50- 0.65<br><br>Q = 3 -14 m <sup>3</sup> /s  |
| Chatuge Savağı, ABD                          | Hiwassa Akarsui hidroelektrik santral mansabında türbin suyunun oksijenlendirilmesi amaçlı | Tek düşü h = 2.9 m.<br>Dalış havuzu derinliği : 1.1m<br>Dizayn akış koşulları<br>1.2 m <sup>3</sup> /s  | E <sub>15</sub> = 0.63-0.73<br><br>Q = 14 - 40 m <sup>3</sup> /s                                       |
| Petit-Saut Havalanma Savağı Fransız Guyanası | Petit-Saut barajı mansabında türbin suyunun oksijenlendirilmesi ve metan giderilmesi       | İki düşü h = 2 m.<br>Dizayn akış koşulları<br>110 m <sup>3</sup> /s   | E <sub>metan</sub> = %80<br>(Başlangıç metan seviyesi > 10 g/m <sup>3</sup> )                          |
| Güney Houlston Savağı, ABD                   | Hidroelektrik santral mansabında türbin suyunun oksijenlendirilmesi amaçlı                 | Kret uzunluğu:640m.<br>Tek düşü h = 2.3 m.<br>Dalış havuzu derinliği:0.91-1.37m.<br>q <sub>w</sub> <0.185 m <sup>2</sup> /s   | E <sub>15</sub> = 0.55 – 0.70<br><br>Q =14 –68 m <sup>3</sup> /s                                       |

Gulliver ve Rindels (1993) 14 farklı hidrolik yapıdan aldıkları değerleri analiz etmişlerdir (Tablo 11). Oksijen transfer veriminin ortalama %76 olduğunu belirterek havalanma mesafesinin ( $L_h$ ) de önemine değinmiş bu mesafe boyunca serbest yüzey havalanmasının oluşacağını belirtmiştir.

Tablo 11. Gulliver ve Rindels (1993)'in ölçtükleri havalanma verimlilikleri

| Hidrolik Yapı            | Yapının Tipi          | h (m) | Q (cm.s /m) | E    | $h_M$ (m) | $L_h$ (m) | T (°C) | $E_{20}$ |
|--------------------------|-----------------------|-------|-------------|------|-----------|-----------|--------|----------|
| Kost Barajı              | Ogee Kretli Dolusavak | 4.01  | 0.12        | 0.41 | 0.2       | 3.4       | 0.2    | 0.58     |
|                          |                       | 3.98  | 0.14        | 0.39 | 0.3       | 3.4       | 1.8    | 0.54     |
|                          |                       | 3.96  | 0.16        | 0.41 | 0.3       | 3.4       | 0.2    | 0.58     |
|                          |                       | 3.98  | 0.09        | 0.43 | 0.2       | 3.4       | 0.1    | 0.60     |
|                          |                       | 3.94  | 0.08        | 0.45 | 0.3       | 3.4       | 0.3    | 0.62     |
|                          |                       | 3.97  | 0.11        | 0.40 | 0.3       | 3.4       | 0.2    | 0.56     |
| St.Cloud Barajı          | Ogee Kretli Dolusavak | 5.32  | 0.66        | 0.53 | 0.2       | 5.8       | 0.7    | 0.70     |
|                          |                       | 5.35  | 0.83        | 0.55 | 0.3       | 5.8       | 1.0    | 0.72     |
|                          |                       | 4.98  | 1.06        | 0.45 | 0.2       | 3.1       | 0.1    | 0.62     |
|                          |                       | 5.23  | 0.42        | 0.50 | 0.5       | 3.1       | 0.1    | 0.68     |
| Elk River Barajı         | Ogee Kretli Dolusavak | 4.17  | 0.14        | 0.67 | 1.7       | 4.1       | 0.5    | 0.83     |
|                          |                       | 4.17  | 0.15        | 0.64 | 1.7       | 4.0       | 0.2    | 0.81     |
|                          |                       | 4.32  | 0.13        | 0.58 | 1.5       | 4.0       | 0.5    | 0.75     |
|                          |                       | 3.69  | 0.18        | 0.59 | 2.2       | 4.0       | 1.5    | 0.75     |
|                          |                       | 4.47  | 0.21        | 0.56 | 1.4       | 4.0       | 0.3    | 0.74     |
|                          |                       | 4.58  | 0.14        | 0.59 | 1.3       | 4.0       | 0.5    | 0.76     |
|                          |                       | 4.52  | 0.17        | 0.56 | 1.3       | 4.0       | 0.1    | 0.74     |
| Amery Barajı             | Kapaklı Eşik          | 3.32  | 2.04        | 0.39 | 0.0       | 7.6       | 0.7    | 0.55     |
| Coon Rapids Barajı       | Ogee Kretli Dolusavak | 3.79  | 1.25        | 0.50 | 0.9       | 0.0       | 0.5    | 0.67     |
|                          |                       | 3.79  | 1.25        | 0.60 | 4.2       | 0.0       | 0.5    | 0.77     |
|                          |                       | 2.20  | 1.74        | 0.51 | 2.7       | 0.0       | 0.3    | 0.68     |
| Shady Lake Barajı        | Ogee Kretli Dolusavak | 5.16  | 0.13        | 0.65 | 1.2       | 3.4       | 0.1    | 0.82     |
|                          |                       | 5.16  | 0.14        | 0.68 | 1.3       | 3.4       | 0.1    | 0.84     |
| New Richmond Barajı      | Yarıktan Sızma        | 3.09  | 0.11        | 0.48 | 1.5       | 4.6       | 0.2    | 0.65     |
| Northfield Barajı        | Ogee Kretli Dolusavak | 2.75  | 0.05        | 0.50 | 0.7       | 2.7       | 0.5    | 0.67     |
| Minnehaha Kontrol Yapısı | Radyal Kapak          | 0.67  | 1.44        | 0.28 | 0.4       | -         | 0.1    | 0.41     |
| Rapidan Barajı           | Ogee Kretli Dolusavak | 17.69 | -           | 0.93 | 0.3       | 18.3      | 1.1    | 0.99     |
| Byllesby Barajı          | Bileşik Yapı          | 16.52 | -           | 0.92 | 0.3       | 16.5      | 1.0    | 0.98     |

Tablo 11'un devamı

| Hidrolik Yapı              | Yapının Tipi          | h (m) | Q (cm.s /m) | E    | h <sub>M</sub> (m) | L <sub>h</sub> (m) | T (°C) | E <sub>20</sub> |
|----------------------------|-----------------------|-------|-------------|------|--------------------|--------------------|--------|-----------------|
| Faribault Woolen Değirmeni | Ogee Kretli Dolusavak | 2.77  | 0.08        | 0.28 | 0.3                | 1.8                | 0.8    | 0.41            |
|                            |                       | 2.62  | 0.13        | 0.33 | 0.5                | 1.8                | 1.7    | 0.46            |
|                            |                       | 2.75  | 0.10        | 0.37 | 0.4                | 1.8                | 0.02   | 0.53            |
|                            |                       | 2.75  | 0.08        | 0.43 | 0.3                | 1.8                | 0.2    | 0.60            |
| Anoka Rum Nehri            | Ogee Kretli Dolusavak | 4.00  | 0.74        | 0.63 | 3.6                | 0.3                | 0.1    | 0.80            |
|                            |                       | 3.97  | 1.02        | 0.65 | 3.5                | 0.3                | 0.1    | 0.82            |
|                            |                       | 3.85  | 1.70        | 0.68 | 3.7                | 0.3                | 0.1    | 0.84            |
|                            |                       | 3.74  | 2.35        | 0.54 | 3.8                | 0.3                | 0.1    | 0.72            |
|                            |                       | 3.73  | 2.96        | 0.44 | 3.7                | 0.3                | 0.1    | 0.61            |
|                            |                       | 3.63  | 3.21        | 0.40 | 3.8                | 0.3                | 0.1    | 0.56            |
|                            |                       | 4.10  | 0.89        | 0.68 | 3.5                | 0.3                | 0.1    | 0.84            |
|                            |                       | 3.15  | 0.41        | 0.62 | 3.6                | 0.3                | 0.2    | 0.79            |
|                            | 3.16                  | 0.37  | 0.68        | 3.6  | 0.3                | 0.2                | 0.84   |                 |
|                            | 3.13                  | 0.60  | 0.59        | 3.6  | 0.3                | 0.2                | 0.76   |                 |
|                            | Düz Savak             | 3.14  | 0.18        | 0.57 | -                  | -                  | 0.2    | 0.75            |
|                            |                       | 3.14  | 0.18        | 0.59 | -                  | -                  | 0.2    | 0.76            |
|                            |                       | 3.13  | 0.20        | 0.57 | -                  | -                  | 0.2    | 0.75            |
|                            |                       | 3.13  | 0.20        | 0.55 | -                  | -                  | 0.2    | 0.73            |
| Mississippi Barajı         | Ogee Kretli Dolusavak | 3.23  | 0.20        | 0.55 | 3.4                | -                  | 2.0    | 0.70            |
|                            | Düz Savak             | 3.23  | 1.40        | 0.40 | 4.5                | -                  | 2.0    | 0.54            |

Burada; L<sub>h</sub> : Havalanma uzunluğudur.

## 1.5. Akarsu Havalanması

### 1.5.1. Akarsuların Kirlenmesi

Evsel ve endüstriyel atık sular çeşitli şekillerde, çeşitli alıcı ortamlara (deniz, akarsu, arazi, yer altı gibi) deşarj edilirler. Fakat en aygın olarak bir düzey suyuna yani akarsu yada denize deşarj edilirler. Herhangi bir temiz su, belli bir miktardaki kirliliği ciddi bir şekilde etkilenmeden özümseyebilir. Çünkü her ortamın kendi kendini temizleme kapasitesi ve buna bağlı bir zincir vardır.



İçinde çok az sayıda organik madde ihtiva eden akarsularda canlıları besleyici çok az madde vardır. Her ne kadar bu tip akarsularda da çok çeşitli organizmalar yaşasa da bunların sayıları sınırlıdır. Çok miktarda organik madde ihtiva eden akarsularda çok miktarda bakteri bulunacağından bu akarsular balıklar ve sığ sularda yaşayan bitkiler için elverişli değildir. Kendi kendini temizleme neticede organik malzemeleri düzenleyerek dengeli bir ortam kuracaktır. Atığın özelliği ve alıcı ortam suyunun özelliği arıtma tipi ve derecesini etkileyecektir.

Kirlenmeye neden olan maddelerin özelliklerini şu şekilde verebiliriz:

1. Toksik bileşikler ve maddeler suda biyolojik aktivitenin yok olmasına veya yavaşlamasına neden olur. Bu toksik bileşiklerin çoğu endüstriyel atıklardan ileri gelir. Bunlar arasında metal endüstrisinden gelen ağır metaller, gaz ve kok fabrikalarından gelen fenoller, zirai mücadele ilaçları sayılabilir. Bazı tür algler de suya toksin verdiklerinden bu tip sulardan su almak uygun olmayabilir.
2. Suyun oksijen dengesini etkileyen maddeler;
  - a) Çözünmüş oksijeni kullanan maddeler: Biyolojik yönden bozunan organik maddeler veya inorganik indirgeyici maddeler.
  - b) Yeniden oksitlenmeyi önleyici maddeler: Sudaki çözünmüş oksijen atmosferden transfer edilir. Yağlar, deterjanlar ve benzeri maddeler suyun yüzeyinde koruyucu bir film tabaka oluşturarak oksijenin suya transferini engellerler ve oksijen kullanan maddelerin etkilerini büyütürler.
  - c) Suyun çözünmüş oksijene doyma konsantrasyonu suyun ısısı ile ters orantılı olduğundan, ortama yapılan sıcak deşarjlar oksijen dengesini bozarlar.
3. Yüksek konsantrasyonlu hareketsiz askıdaki ve çözünmüş katı maddeler, örneğin kil, akarsu yatağını kaplayarak balıklar ve su yaşamı için besin büyümesini engeller veya zehirlenmesine neden olabilir. Ayrıca maden yataklarından gelen asitli sular, örneğin altın veya gümüş madeni, mansap tarafından alınacak içme veya kullanma suyunu da olumsuz yönde etkiler (Tebbutt, 1977).

Atık sularla kirlenme dikkate alındığında ÇO düşmesi yanında diğer etkilerde göz önünde bulundurulmalıdır. Mevcut seyrelmeye bağımlı olarak çözünmüş katı maddelerde, organik madde içeriğinde, azot ve fosfat gibi besleyicilerde, renk ve bulanıklıkta da önemli

yükselmeler olur. Bütün bu bileşikler su kalitesine özellikle su alma bakımından ciddi şekilde etki eder. Göllerde ve ağır hareket eden sularda besleyici birikimi çok ciddi bir problemdir fakat akarsularda o kadar değildir (Gallagher ve Thuman, 2001; Gillot vd., 2000)).

Sanayileşmiş bölgelerde akarsular çok kirlenmekte ve bu durum sistemi kötü yönde etkilemektedir. Böyle bir sistemde akarsu kirlenmesinin önlenmesi veya azaltılması kaçınılmazdır. Fakat bu işlem pahalı ve uzun yıllar alabilecek çalışmalardır. Bu yüzden akarsuların kullanım maksatlarına göre sınıflandırmaları gerekir. Sınıflandırmada; içme ve kullanma suyu, endüstri suyu, ticari balıkçılık, sulama, rekreasyon ve piknik, nakliyat ve atık deşarjı olarak bir sıralama kullanılması uygun olmaktadır.

Akarsuların kirlenmesi ile birlikte; su kaynakları kirlenmekte, arıtma tesislerine ilave yük gelmekte, rekreasyon kullanım alanları azalmakta, balık yaşamı etkilenmekte, görünüş ve koku bakımından rahatsız edici durumlar ortaya çıkmaktadır.

### **1.5.2. Akarsularda Kendi Kendine Temizlenme Olayı**

Organik maddelerin yüzey suyu tarafından özümlemesi doğal bir olaydır ve su içerisindeki canlı yaşamı için çok büyük önemi vardır. Yalnızca suyun kendi kendini temizleme kapasitesi aşıldığında problemler görülebilir.

Kendi kendini temizleme olayında şu işlemlerden bir veya birkaçı görülebilir:

1. Biyolojik veya mekanik flokülasyonun yardımcı olduğu çökeltme durumunda anaerobik taban birikintisi oluşur. Bu birikinti tekrar yukarı kalkar ve suya karışırsa yüksen oksijen talebine neden olur.
2. İndirgeyici maddelerin kimyasal oksitlenmesi
3. Şartların uygun olmaması halinde patojenik organizmaların hızla ölmeleri sonucunda bakteri azalmasının meydana gelmesi
4. Kendi kendine temizlenme olayındaki en önemli proses olan biyokimyasal oksitlenmenin meydana gelmesi. Ciddi kirlenmeleri önlemek için aerobik şartları muhafaza etmek gerekir. Çünkü sudaki çözülmüş oksijen büyük önem taşımaktadır. Çözülmüş oksijen; ısı BOİ, tuzluluk ve en önemlisi havalandırma ile kontrol edilir (Thomas, 1950; Lee, 1951; Heukelekian ve Gelman, 1955; Berkün, 1974).

Herhangi bir sebeple akarsudaki çözünmüş oksijen doyma sınırının altına düştüğünde, su tekrardan atmosferle temas geçirilirse çözünmüş oksijen doymuluk konsantrasyonuna yaklaşır. Sıvı içerisindeki bir gazın çözünebilirliği Henry Kanunu'na tabidir (Denklem 3).

Denklem (4,7,8 ve 52)'de belirtildiği gibi havalandırma işlemi kütle transfer katsayısı denilen bir parametreyle yürütülür.  $K_L.a_t$ , birim yüzey alanına isabet eden her bir birim ÇO azlığını ölçen bir ifadedir ve havalandırma derinliği olarak da bilinir. Tablo 12'de  $K_L.a_t$  için tipik değerler verilmiştir.

İngiltere'de yapılan araştırmalar sonucunda bu ifadenin bağıntıyla hesaplanabileceği fakat yaklaşık değerler aldığı görülmüştür. Isıda görülen bir derecelik bir artış  $K_L.a_t$  değerini % 2 artırmakta ve yine aynı şekilde ısıdaki düşüş havalandırma verimliliğini düşürmektedir (Tebbutt, 1977)..

Akarsuların araştırılmasındaki problemlerden birisi de akımın havalandırma özelliğinin tayinidir. Çözünme sadece su-hava temas yüzeyinde olur. İnce bir su filmi kısa sürede doymuş hale geçer. Daha sonraki havalandırma su kütlesine oksijenin yayınımlı şeklinde olur. Bu işlem yavaş bir süreçte olur fakat türbülanslı akarsularda doymuş tabaka kırılır ve havalandırma daha çabuk olur (Rajaratnam, 1978; Bansal, 1973; Benson ve Kruse, 1984).

Tablo 12.  $K_L.a_t$  için tipik değerler (Tebbutt, 1984)

|                             | $K_L.a_t$ (mm/saat) |
|-----------------------------|---------------------|
| Durgun su                   | 4-6                 |
| Kanallardaki su (0.6 m/dk)  | 10                  |
| Yavaş akan kirlenmiş akarsu | 20                  |
| Kanallardaki su (10 m/dk)   | 75                  |
| Açık deniz                  | 130                 |
| Kanallardaki su (15 m/dk)   | 300                 |
| Türbülanslı akarsular       | 300-2000            |
| 30° eğimle akan akarsular   | 700-3000            |

Yan dereler ve yer yüzeyinden akan yağmur suları ile yer altından gelen sular, bol miktarda ihtiva ettiği çözünmüş oksijeni esas akarsu kısmına taşıyarak onun oksijen kaynaklarından biri olurlar. Fakat bir akarsuda asıl oksijen kaynağı suların doğal havalanması sayesinde atmosferden sağlanan oksijen ile su bitkileri ve alglerin fotosentez yoluyla sağladıkları oksijendir. Atmosferden sağlanan oksijen miktarı, çözünmüş oksijen konsantrasyonu ile doygunluk konsantrasyonu arasındaki farkla orantılıdır. Fotosentez yoluyla sağlanan oksijen miktarı , alg sayısının ve alglere ulaşan güneş ışığı miktarının bir fonksiyonudur (Nas, 2000).

### 1.5.3. Oksijen Eğrisi

Eğer akarsu atık verilmeden oksijene doymuş durumdaysa, deşarj edilen kirlilik çözünmüş oksijeni doyma sınırının altına düşürecek ve havalandırma tekrar başlayacaktır. Eğer doyma açığı büyürse havalandırma hızı da büyüyecektir. Daha sonra oksijenin giderilmesi ve havalandırmanın birbirine eşit olduğu kritik bir noktaya ulaşılacaktır. Bu kritik noktada ÇO minimum olacaktır. Zaman gittikçe de ÇO büyüyecektir.

Streeter ve Phelps (1925), tarafından Ohio Nehri üzerinde başlatılan ilk çalışma bu konuda kullanılan en önemli denklemi ortaya çıkarmıştır. Araştırmacılar, biyokimyasal enerji ihtiyacının (BOİ) sadece biyolojik oksitlenme ile giderildiği ve havalanma ile çözünmüş oksijenin yer değiştirdiği kabulünü yaparak şu denklemi geliştirmişlerdir:

$$\frac{dD}{dt} = k_1.L - k_2.D \quad (83)$$

Burada;

D : t zamanında ÇO açığı

L : Nihai BOİ

$k_1$  : BOİ reaksiyon hızı katsayısı (e tabanına göre)

$k_2$  : Havalanma katsayısı (e tabanına göre)

(83) numaralı denklemin integrali alınır;

$$D = \frac{k_1.L_0}{k_2 - k_1} (e^{-k_1.t} - e^{-k_2.t}) + D_0.e^{-k_2.t} \quad (84)$$

ve (84) numaralı denklem 10 tabanına göre değişimi yapılırsa;

$$D = \frac{K_1.L_0}{K_2 - K_1} (10^{-K_1.t} - 10^{-K_2.t}) + D_0.10^{-K_2.t} \quad (85)$$

Burada,  $D_0$  ve  $L_0$  değerleri  $t = 0$  anındaki değerlerdir.  $K_1$  ve  $K_2$  ise  $k_1$  ve  $k_2$  sabitlerinin 10 tabanına dönüştürülmüş halleridir ( $k = 0.4343.K$ ). Oksijen açığının maksimum olduğu kritik nokta ise şu bağıntılarla verilebilir:

$$D_{kr} = \frac{K_1}{K_2}.L_0.10^{-K_1.T_{kr}} \quad (86)$$

$$T_{kr} = \frac{1}{K_2 - K_1} \log \left\{ \frac{K_2}{K_1} \left[ 1 - \frac{D_0(K_2 - K_1)}{L_0.K_1} \right] \right\} \quad (87)$$

(84) ve (85) numaralı denklem literatürde Oksijen Eğrisi yada SAG Eğrisi olarak bilinen denklemlerdir. Bu bağıntı teoride, her ne kadar bir çok yerde kullanılmaktaysa da aslında sadece dikkate alınan kesimin seyrelme ve kirlilik yükünde bir değişim olmayacağı durumlar esas alınarak oluşturulmuştur (Berkün ve Tebbutt, 1976; Adrian ve Sanders, 1992; Adrian ve Sanders, 1998).

### 1.5.3.1. Oksijen Eğrisini Etkileyen Faktörler

Oksijen eğrisi etkileyen faktörleri şu şekilde sıralayabiliriz:

1. Yüzey akımına BOİ ilavesi
2. Oksijen talebini karşılamak için taban çamuru tarafından ÇO emilmesi
3. Taban birikintilerinin çözünebilir organik madde yayarak BOİ'yi yükseltmesi
4. Tabanda oluşan gazların çözülmüş oksijeni gidermesi
5. Bitkilerin fotosentezi ile ÇO ilavesi
6. Geceleri bitkilerin ÇO giderimi
7. Boyuna dağılımla ÇO ve BOİ'nin sürekli olarak bozulması

Dobbins (1964) tarafından yapılan araştırmalarda temiz akarsularda BOİ ve ÇO'nun boyuna dağılımlarının ihmal edilebileceğini göstermiştir. Yüzey havalanmasının hassas ölçümü büyük önem taşımaktadır. Taban çamurlarının oksijen talebine etkisi sığ ve geniş kanallarda kayda değer olmakla beraber dar ve derin kanallarda göreceli olarak azdır.

### 1.5.3.2. Oksijen Eğrisinin Zamana Göre Değişimi

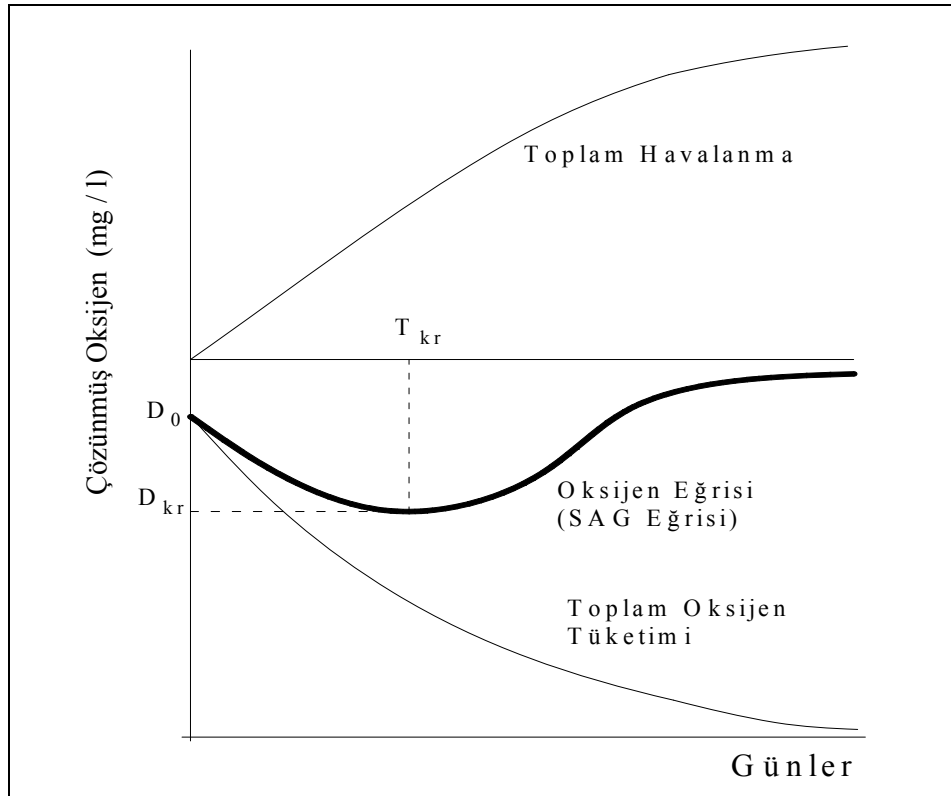
Bünyesine atık maddeler eklenen bir akarsudaki çözülmüş oksijen konsantrasyonu azalır. Bunun nedeni oksijen tüketilme hızının oksijenin üretilme hızından daha fazla olmasıdır. Düşmeye devam eden oksijen konsantrasyonu bir süre sonra minimum seviyeye ulaşır. Bu noktada çözülmüş oksijen açığı değeri en üst seviyededir. Buna kritik çözülmüş oksijen açığı denir. Suyun başlangıç noktasından kritik oksijen açığının olduğu noktaya kadar geçen zamana ise kritik zaman ( $T_{kr}$ ) adı verilir. Kritik seviyeden sonra toplam havalanma toplam oksijen tüketiminin üzerine çıkarak ÇO konsantrasyonu değerini tekrardan artırmaya başlar (Adrian vd., 2004) (Şekil 13).

### 1.5.4. Havalandırma Katsayısı $K_2$ 'nin Tayini

Nehrin bir bölümünü etkileyen iki noktadaki oksijen açıklarının ve suyun bu iki nokta arasındaki mesafeyi kat etmesi için gerekli zamanın belirlenmesi halinde  $K_2$ , ilk yaklaşım olarak şu denklemlerle ifade edilebilir:

$$K_2 = \frac{\log D - \log D_0}{t} \quad (88)$$

$K_2$  katsayısı akarsuyun karakteristikleri yardımıyla bulunabileceği gibi, literatürde bir çok araştırmacı tarafından geliştirilen ampirik formüller yardımıyla da bulunabilir. Streeter ve Phelps (1925), tarafından Ohio Nehri üzerinde öncü çalışmanın ardından bir çok araştırmacı yaptıkları çalışmalar ile  $K_2$  tahminine yardımcı olacak formülleri ve ortalama değerleri geliştirmişlerdir (Tablo 13 ve 14).



Şekil 13. Akarsularda çözünmüş oksijen konsantrasyonunun zamana göre değişimi

Tablo 13. Çeşitli durumlar için verilen tahmini  $k_2$  değerleri (Nas, 2000)

|  | $k_2$     |
|--|-----------|
| Küçük havuzlar ve seddeler arkasında kabaran sular | 0.10-0.23 |
| Durgun akarsular ve büyük göller                   | 0.23-0.35 |
| Düşük hızlı büyük akarsular                        | 0.35-0.46 |
| Normal hızlı büyük akarsular                       | 0.46-0.69 |
| Hızlı akarsular                                    | 0.69-1.15 |
| Vahşi dereler ve çağlayanlar                       | >1.15     |

Tablo 14. Havalanma katsayısı  $K_2$  tahmini için geliştirilmiş formüller

| Kaynaklar                       | Havalanma Katsayısı Denklemleri   |
|---------------------------------|---|
| O'Connor ve Dobbins (1958)      | $K_2 = 3.90V^{0.5} H^{-1.5}$  |
| Churchill vd. (1962)            | $K_2 = 5.010V^{0.969} H^{-1.673}$   |
| Krenkel ve Orlob (1962)         | $K_2 = 173(S.V)^{0.404} H^{-0.66}$  |
| Owens vd. (1964)                | $K_2 = 5.35V^{0.67} H^{-1.85}$  |
| Langbein ve Durum (1967)        | $K_2 = 5.14V.H^{-1.33}$   |
| Cadwallader ve McDonnell (1969) | $K_2 = 186(S.V)^{0.5} H^{-1}$   |
| Thackston ve Krenkel (1969)     | $K_2 = 24.9(1 + Fr^{0.5})V^*.H^{-1}$  |
| Parkhurst ve Pomeroy (1972)     | $K_2 = 23(1 + 0.17Fr^2)(S.V)^{0.375} H^{-1}$  |
| Tsivoglou ve Wallace (1972)     | $K_2 = 31200(S.V) \rightarrow \rightarrow Q < 0.28m^3/s$<br>$K_2 = 15200(S.V) \rightarrow \rightarrow Q > 0.28m^3/s$                                |
| Smooth (1988)                   | $K_2 = 543S^{0.6236}V^{0.5325} H^{-0.7258}$   |
| Moog ve Jirka (1998)            | $K_2 = 1740V^{0.46}S^{0.79}H^{0.74} \rightarrow \rightarrow S > 0.00$<br>$K_2 = 5.59S^{0.16}H^{0.73} \rightarrow \rightarrow S < 0.00$              |
| Jha vd. (2004)                  | $K_2 = 0.603286V^{0.4}S^{-1.0}H^{0.154} \rightarrow \rightarrow Fr < 1$<br>$K_2 = 866.307V^{1.393}S^{-0.173}H^{0.8} \rightarrow \rightarrow Fr > 1$ |

Burada; S eğim, H akım derinliğini ve  $V^*$  sürtünme hızını belirtmektedir.



Sıcaklıktaki artış oksijenin suda yayılmasını kolaylaştıracağından atmosferden alınan oksijenin miktarını artırır. Havalanma katsayısı da sıcaklık değişimleri ile birlikte değişim gösterir. Bu değişim şu şekilde ifade edilebilir:

$$(k_2)_{(T)} = (k_2)_{(20)} \cdot e^{\theta(T-20)} \quad (89a)$$

$$(K_2)_{(20)} = (K_2)_{(T)} / \theta^{(T-20)} \quad (89b)$$

$\theta$  değeri çeşitli ölçümlerle tespit edilmektedir ve saf su için  $\theta = 1.024$  değeri verilebilmektedir.

Akarsularda  $K_2$  ölçümleri genellikle suya verilen soygazların takip edilmesi metoduyla ölçülmektedir (Noble gas tracers method). Bu metodun avantajı her türlü kirliliğe sahip akarsularda kullanılabilmesi, nitrifikasyon, fotosentez ve BOİ'den etkilenmemesidir. Dezavantajı ise maliyetli bir yöntem olması ve enjeksiyon zorlukları nedeniyle sadece küçük akarsularda uygulanabilen bir yöntem olmasıdır. Araştırmacılar tarafından geçmişte bu yöntemle bulunan  $K_2$  katsayıları tablo 15'te verilmiştir. Ayrıca yine bu yöntemle Reid vd. (2007) tarafından Lagan Nehrinde bulunan  $K_2$  değerleri de tablo 16'da verilmiştir.

#### 1.5.4.1. Havalandırma Katsayısı $K_2$ 'yi Etkileyen Faktörler

Yapılan çalışmalar,  $K_2$ 'nin derinlik arttıkça azalacağını ve hız arttıkça  $K_2$ 'nin hızın karekökü değeri ile orantılı olarak artacağını göstermiştir. Bu iki değişimden, en düşük  $K_2$  değerinin derin sularda ve yüksek hızlarda, en yüksek  $K_2$  değerinin ise sığ sularda ve düşük hızlarda olacağı sonucu çıkmaktadır.

$K_2$  değeri ile ilgili tablolardan göze çarpan en önemli şey, değerler arasındaki önemli farklılıklardır. Araştırmacılar tarafından bulunan  $K_2$  değerleri arasında belirgin ayrılıklar vardır. Bu farklılıkların çok çeşitli sebepleri vardır. Bunların başında, her denklemin farklı şartlar altında oluşturulmuş olmalarıdır. Akarsu hızı, akış derinliği, debi gibi değerlerde bir standart oluşturulmamıştır. Değer ayrılıklarının yanında değer aralıkları da çok farklı kullanılmıştır (McBride, 2002; Gualtieri vd., 2002; Chern ve Yang, 2004).

Tablo 15. Saha çalışmaları ile bulunmuş  $K_2$  değerleri

| Akarsu                       | Q<br>(m <sup>3</sup> /s) | V<br>(m/s)                          | Derinlik<br>(m)                     | Soygaz                                    | $K_2$                         | Kaynak                           |
|------------------------------|--------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|---|-------------------------------|----------------------------------|
| Jackson<br>(Virginia,USA)    | 0.05                     | 0.13                                | 0.69                                | Kripton                                   | 3.3                           | Tsivoglou<br>vd. (1968)          |
| Bonner<br>(Wisconsin,USA)    | 0.05                     | 0.3                                 | 0.3                                 | Propan                                    | 7.4                           | Grant ve<br>Skavroneck<br>(1980) |
| Waiohewa<br>(New Zealand)    | 0.3                      | 0.2-0.23                            | 0.35                                | Metil<br>Klorit                           | 11.1±1.4                      | Wilcock<br>(1984)                |
| Waipa<br>(New Zealand)       | 36                       | 0.35-0.34<br>0.31-0.34<br>0.24-0.31 | 2.82-3.78<br>3.78-3.82<br>3.82-4.10 | Metil<br>Klorit                           | 1.4±0.7<br>0.4±0.3<br>0.3±0.2 | Wilcock<br>(1984)                |
| Waiotapu<br>(New Zealand)    | 3.5                      | 0.38-0.40<br>0.40-0.46<br>0.33-0.46 | 0.79-0.80<br>0.75-0.80<br>0.64-0.75 | Metil<br>Klorit                           | 7.7±1.1<br>8.0±0.9<br>3.9±1.3 | Wilcock<br>(1988)                |
| Walker Branch<br>(Tenn.,USA) | 0.02                     | 0.06                                | 0.1                                 | SF <sub>6</sub><br>(Sülfür<br>Hexaflorit) | 134                           | Wanninkhof<br>vd. (1990)         |
| River Lagan<br>(N.Ireland)   | 2.88                     | 0.36                                | 0.5                                 | Kripton                                   | 7.6<br>28.4<br>11.2           | Murphy<br>(2003)                 |

Tablo 16. Reid vd. (2007) tarafından Lagan Nehrinden bulunan  $K_2$  değerleri

| Tarih      | Q (m <sup>3</sup> /s) | T (°C) | ( $K_2$ ) <sub>(20)</sub> (gün <sup>-1</sup> ) |
|------------|-----------------------|--------|--|
| 19/11/2004 | 7.46                  | 7.6    | 34   |
| 10/12/2004 | 4.13                  | 8.0    | 33   |
| 10/12/2004 | 4.13                  | 8.0    | 37   |
| 04/02/2005 | 4.02                  | 7.8    | 3  |
| 11/02/2005 | 4.69                  | 6.4    | 59   |
| 11/02/2005 | 4.69                  | 6.4    | 69   |
| 18/02/2005 | 6.29                  | 6.1    | 24   |
| 04/03/2005 | 4.09                  | 5.3    | 9  |
| 22/04/2005 | 11.09                 | 8.8    | 68   |
| 22/04/2005 | 10.67                 | 9.2    | 80   |

Bir çok model çalışma laboratuvarlarda temiz su üzerine yapılmıştır. Saha çalışmalarında ise akarsu bünyesindeki sucul yaşam ve buna bağlı organik madde miktarları her seferinde farklı olmaktadır ve kirlilik derecesi denklemleri etkilemektedir.

Genelde, hesaplarda ortalama hız ve derinlik hesabı yapılarak  $K_2$  oluşturulmaya çalışılmıştır. Farklı hız ve derinlik değerleri doğal olarak farklı  $K_2$  değerini beraberinde getirmektedir. Yine aynı şekilde membadaki çözünmüş oksijen seviyesi ve suyun sıcaklığı da her modelde farklı olduğundan her araştırmada farklı  $K_2$  değerleri elde edilmiştir.

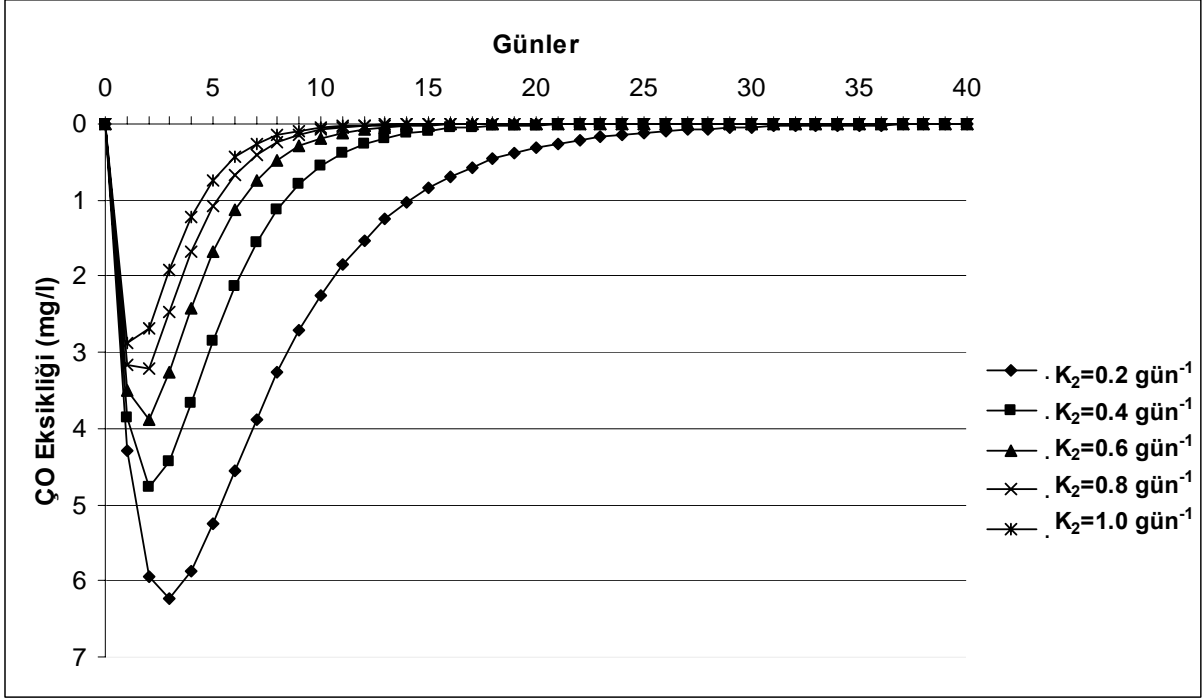
Ampirik formüller ortalama havalanma derinliği hesaba katılarak oluşturulur. Yüzey alanı ve kanal geometrisi genellikle ihmal edilir. Fakat oksijen transferi hava-su ara yüzünde gerçekleşir ve bu ara yüzü belirleyen parametre de direk yüzey alanıdır. Yüzey alanı doğrusal bir yüzey kabul edilir fakat akarsularda böyle bir durum çoğunlukla oluşmaz. Sığ derinliklerde, düzensiz akarsu yataklarında ve rüzgar alan akarsularda yüzey alanı çok düzensiz şekillerde olabilir (Abusam vd., 2001).

Araştırmacıların en çok ihmal ettikleri durum, rüzgar hızının havalanma katsayısına olan etkisidir. Az sayıda araştırmacının büyük akarsularda yaptıkları araştırmalara göre, çok sert esen bir rüzgar havalanma katsayı  $K_2$ 'yi beklenen değerinden 20 kat kadar daha yükseltebilmektedir (Mohamed, 2000; Kim ve Ra, 2005).

Saha çalışmalarından elde edilen  $K_2$  değerleri ve çıkarılan denklemlere genel olarak bakıldığında yalnızca basit akış parametreleri, örneğin ortalama derinlik ve ortalama hız gibi, kullanıldığı görülmektedir. Bu yüzden, bu tip çalışmalarda en azından bir hidrolik parametrenin bile ihmal edilmesi durumunda, bulunan  $K_2$  değerinin güvenilirliği azalmaktadır.

#### **1.5.4.2. Havalandırma Katsayısı $K_2$ 'nin Oksijen Eğrisine Etkileri**

Berkün ve Aras (2007) yaptıkları çalışmada, oksijen eğrisinin (SAG) denkleminde  $K_2$  havalanma katsayısının etkisini incelemiştirlerdir. Farklı  $K_2$  değerleri altında çözünmüş oksijen eksikliği değerleri bulunarak havalandırma katsayısının oksijen eğrisine etkisi grafiksel olarak sunulmuştur (Şekil 14).  $K_2$  değerinin yükseldikçe ve bire yaklaştıkça oksijen eksikliğin daha kısa mesafede yok olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 14. Çözünmüş oksijen eğrisinin farklı havalandırma katsayısı ( $K_2$ ) değerleri altında değişimi

Ayrıca yaptıkları çalışmada, çözünmüş oksijen eğrisinin, seçilen parametreler ve ölçüm tekniklerinin değişimine karşı çok hassas olduğunu belirterek  $K_2$  katsayısındaki ufak değişimlerin oksijen eğrisine önemli etkileri olacağını savunmuşlardır.

## 2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

### 2.1. Hidrolik Yapılarla Birlikte Oluşan Akarsu Havalanması

Akarsulardaki oksijen dengesi, asıl olarak, akarsudaki mevcut oksijen ile suya oksijen sağlayacak kaynağın bir fonksiyonudur. Bu kaynakları; hava ile su arasında gerçekleşen oksijen transferi, su içerisindeki bitkilerin oluşturduğu fotosentez, su sıcaklığının değişmesi (su sıcaklığının azalması ile birlikte mikrobiyolojik aktivite azalır ve oksijen doygunluk potansiyeli artar) ve kirlenmemiş sulardan gelen suyun akarsuya karışması ve akarsu suyunu seyreltmesi olarak sayabiliriz (Nemerow, 1974).

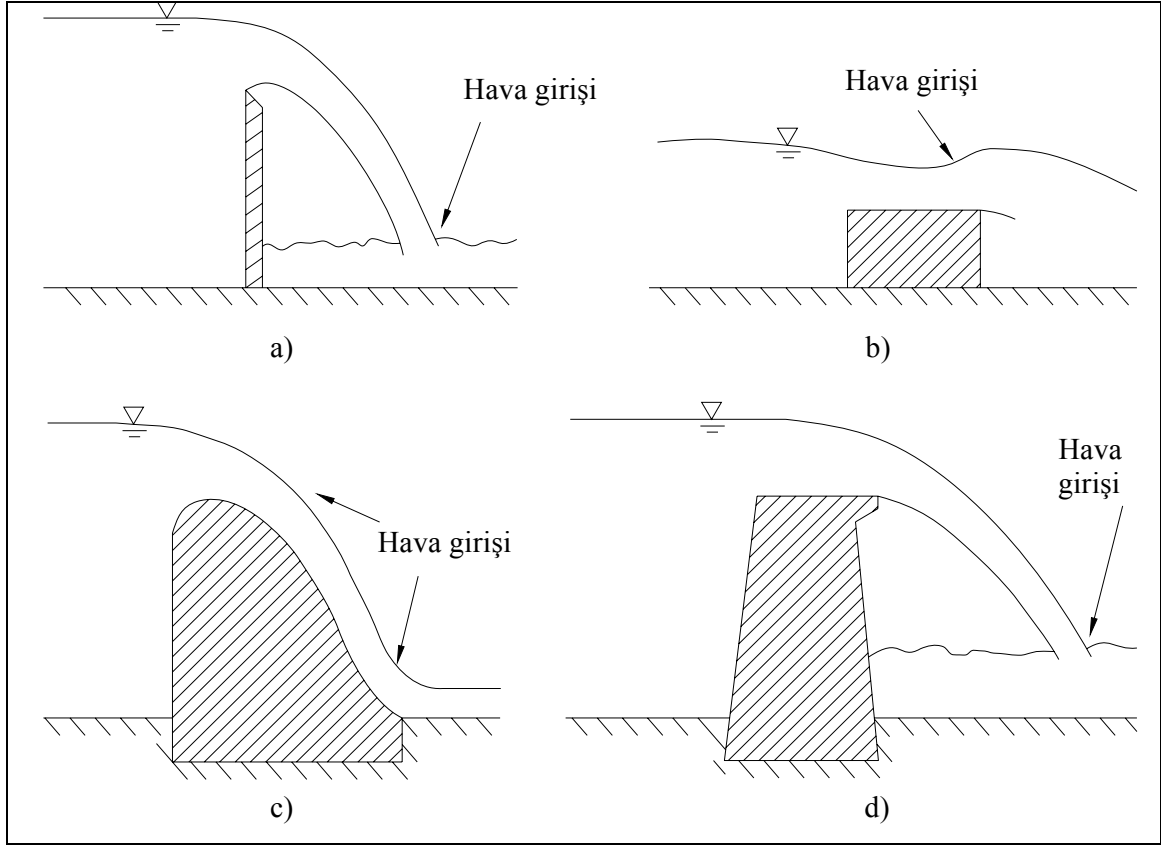
Genel olarak akarsulardaki çözünmüş oksijen konsantrasyonu, kontrolsüz kirletilen akarsular haricinde, doygunluk konsantrasyonun yakınında veya biraz üstündedir. Bunun anlamı, akarsulardaki çözünmüş oksijenin en önemli kaynağının atmosfer olduğudur. Küçük ve kirlilik yükü az olan akarsularda doygunluk konsantrasyonu oldukça yüksektir. Bununla birlikte yüzey alanı da havalanma için önemli bir parametredir. Küçük yüzey alanına sahip akarsularda suya oksijen geçişi azalacaktır (Aras ve Berkün, 2008).

Hidrolik yapıların üzerinde oluşan havalanma ile birlikte su içerisindeki çözünmüş oksijen miktarının artacağı genel bilgiler kısmında verilmişti. Hidrolik yapının cinsine göre havalanmanın oranı ve çözünmüş oksijen transferi miktarı değişebilir. Burada önemli olan husus, yapılacak olan hidrolik yapının akarsu şartlarına uygun olmasıdır (Chapra ve Runkel, 1999).

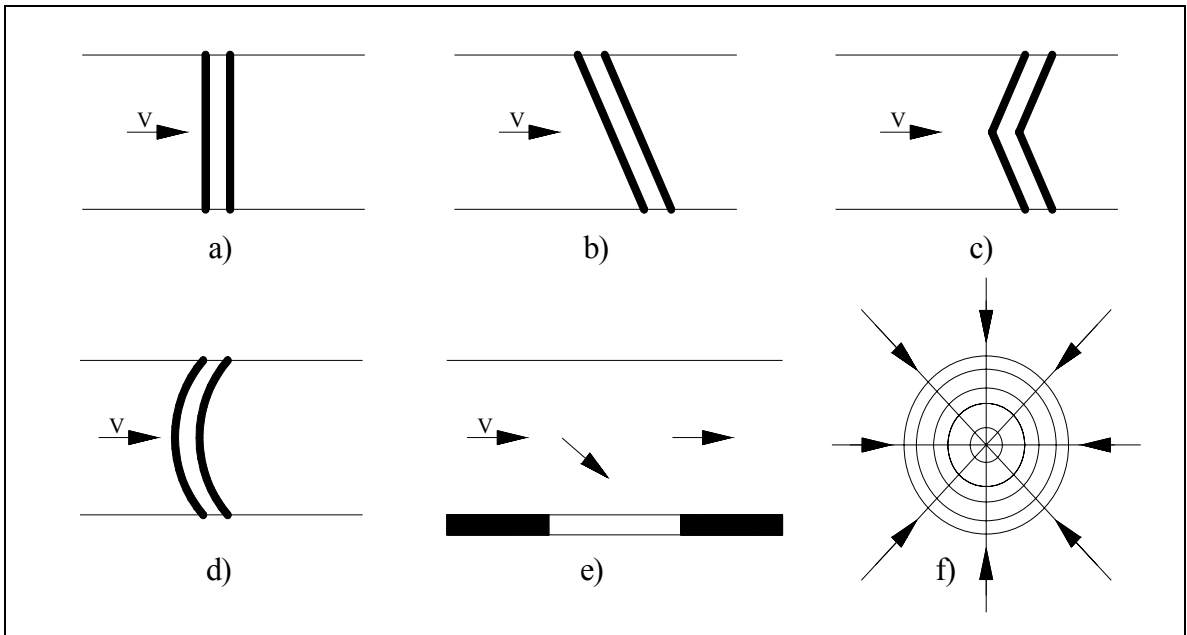
Savaklar çeşitli durumlara göre sınıflandırılabilirler.

Bunları;

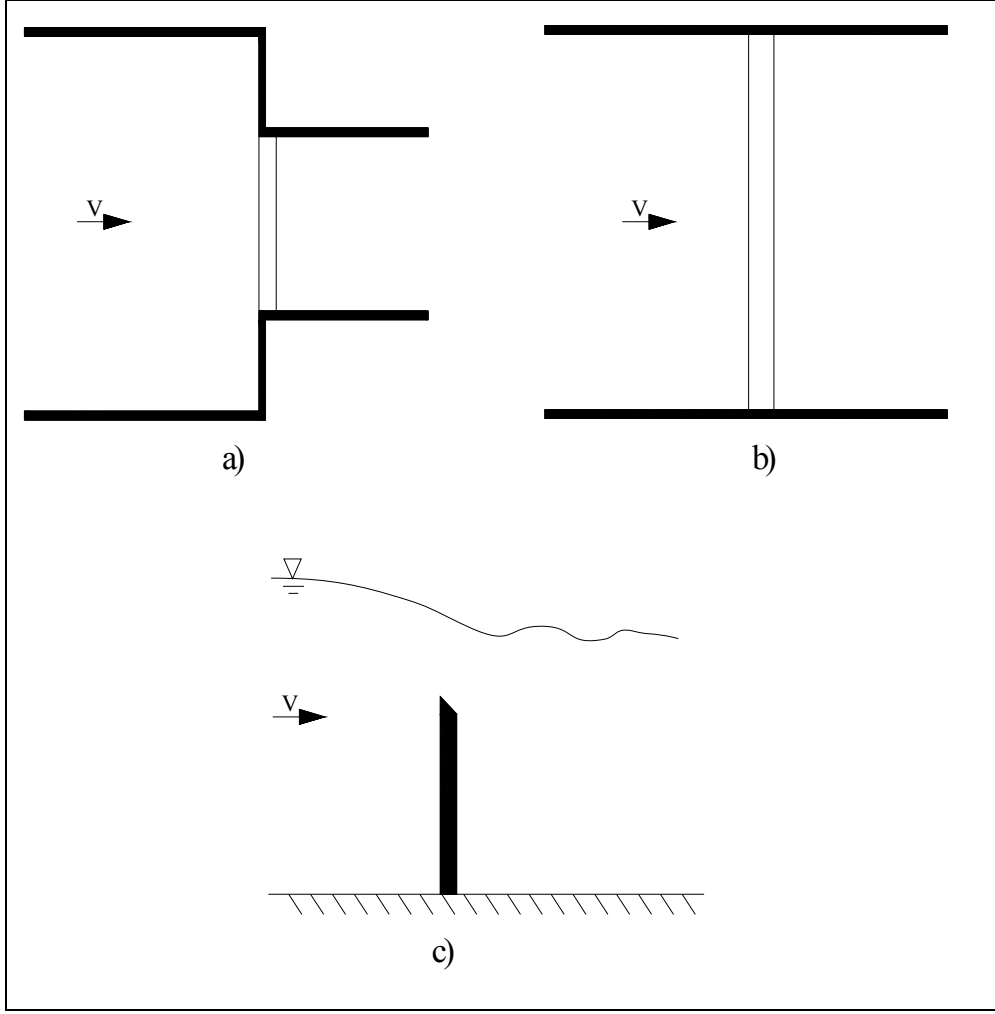
- Kret şekline ve genişliğine göre savaklar (Şekil 15)
- Kretin plandaki yerine göre savaklar (Şekil 16)
- Boşaltım kanalının yönü ve yerine göre savaklar (Şekil 17)
- Savak üzerinden geçen akımın şekline göre savaklar olarak sıralayabiliriz (Şekil 18) (Kövári, 1983).



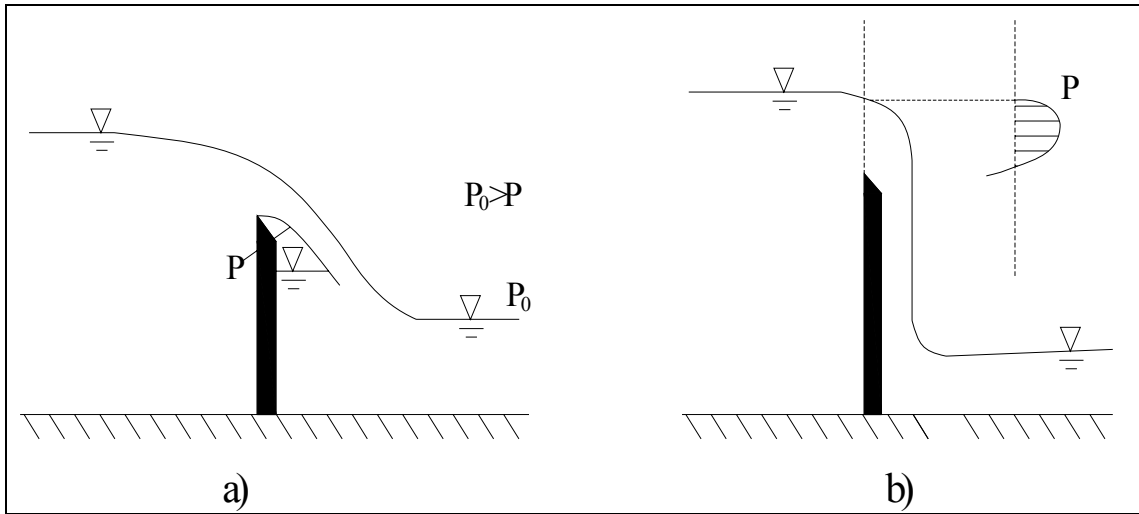
Şekil 15. Kret şekline ve genişliğine göre savaklar: a) keskin kenarlı savaklar, b) taban eşikleri, c) ogee profilli (yuvarlatılmış yüzey) savaklar d) geniş kretli savaklar



Şekil 16. Kretin plandaki yerine göre olan savaklar: a) dikey savaklar, b) eğik savaklar, c) kırıklı savaklar, d) eğimli savaklar, e) yan savaklar f) dairesel savaklar



Şekil 17. Boşaltım kanalının yönü ve yerine göre savaklar: a) yandan daralmalı kanallar, b) daralmasız kanallar, c) alttan daralmalı kanallar



Şekil 18. Savak üzerinden geçen akışın şekline göre savaklar: a) az havalanmış ve batık jetli savaklar, b) havalanmamış yapışık jetli savaklar

Basamaklı dolusavaklarda havalanma olayı diğer savaklardan farklılık gösterir. Suyu oksijen girişi hem serbest yüzeyden olurken hem de basamaklar arasındaki çevrıntiler arasında olur. Suyun debisi ve savağın yapısal özellikleri çözünmüş oksijen transferinde belirleyici rol oynar (Şekil 19)

Gerek saha çalışmalarında akarsulardan alınan ölçümler gerekse de laboratuvar ortamında model çalışmadan alınan ölçümlerde, suyun sıcaklığının farklı olmasından dolayı havalanma verimlilikleri arasında farklılıklar olabilir. Bu farklılıkların önüne geçmek için 20°C için oluşturulmuş formüller kullanılarak ( $E_{20}$ ) havalandırma verimlilikleri normalize edilebilir.

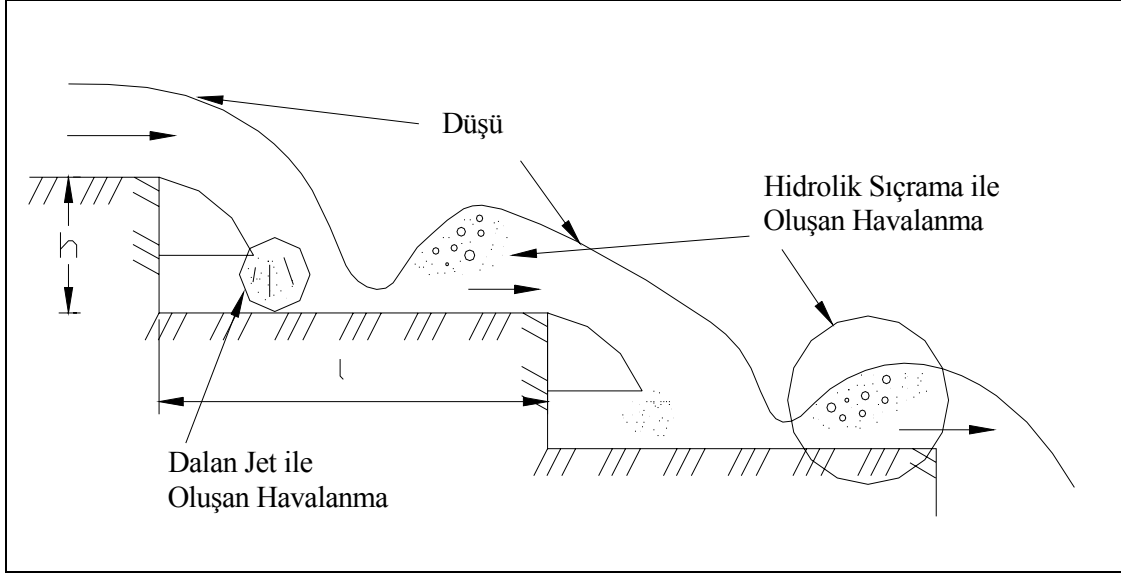
Dolusavak havalanmasında oksijen transferini etkileyen parametreler; su sıcaklığı, düşü yüksekliği, çıkış suyu derinliği, debi, çözünmüş oksijen eksikliği, memba-mansap arası su kalitesi farklılığı ve savak tipi olarak verilebilir. Bu çalışmada oluşturulan model çalışmada bu tip parametreler incelenerek akarsu suyu çözünmüş oksijen dengesi üzerine etkileri incelenmiştir.

## 2.2. Materyal ve Metot

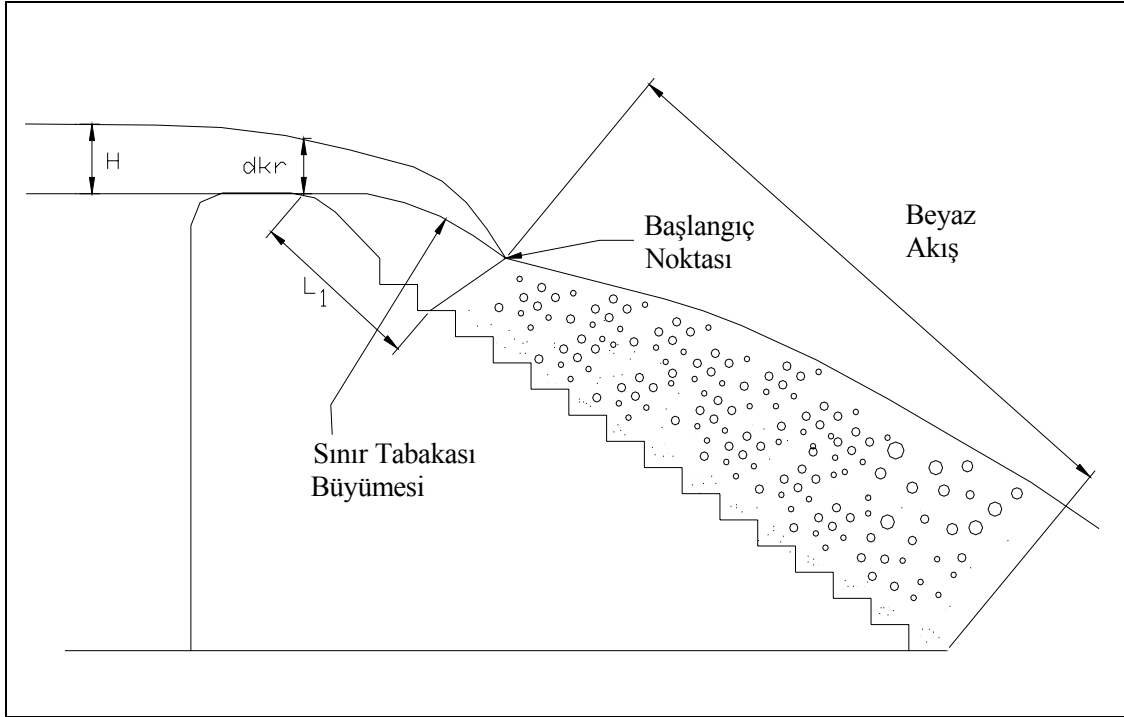
Çalışmamız 3 ana bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümü laboratuvar çalışması, ikinci bölümü laboratuvar çalışmasından elde edilen değerlerin matematiksel modellemesi ve üçüncü bölümü de bilgisayar programı oluşturmaktadır.

Laboratuarda ufak boyutlu bir kanal içerisinde düz ve basamaklı iki savak modelli hidrolik yapılar oluşturulmuştur. Bu modeller üzerinde çeşitli debilerde su geçirilerek savakların membasında ve hemen mansabında oluşan çözünmüş oksijen konsantrasyonları ölçülmüştür. Ölçülen bu değerlerle önce oksijen eksiklik oranı ve havalanma verimlilikleri hesap edilmiş daha sonrada bu değerler 20° için uygun hale getirilmiştir. Elde edilen bu değerler daha önceki araştırmacılar elde ettiği değerlerle karşılaştırılmıştır. Daha sonra, kanal boyunca belirli aralıklarla belirli noktalarda ölçümler alınmaya devam edilmiş, kanal boyunca çözünmüş oksijen konsantrasyonunun değişimi incelenmiştir.





(a) Tam oluşmuş bir hidrolik sıçramada oluşan nap akımındaki havalanma



(b) Sıçramalı akım rejiminde havalanma

Şekil 19. Basamaklı dolusavaklarda havalanma durumu

İkinci bölümde, kanal boyunca ölçülen değerler ışığında, çözünmüş oksijen konsantrasyonunun nasıl bir değişim göstereceğini hesaplayabileceğimiz bir matematiksel modelleme geliştirilmeye çalışılmıştır. Bu modelleme yapılırken çözünmüş oksijen konsantrasyonu değerlerinin yanı sıra diğer parametreler de göz önünde bulundurulmuştur. Analizler sonrasında, model incelenen tüm etkenlerin dahil olduğu bir eğri ve denklem çıkartılmıştır. Bu denklem yardımıyla, bir savağın mansabında herhangi bir noktadaki çözünmüş oksijen konsantrasyonunun değerinin ne olacağı konusunda bir hesaplama yapılabileceği görülmüştür.

Son bölümde ise, akarsulardaki çözünmüş oksijen dengesinin, akarsulara yapılacak atıksu arıtma tesislerinin optimizasyonuna etkileri incelenmiştir. Daha önce Revelle (1967) tarafından geliştirilmiş olan bir lineer programlamadan yararlanılarak yeni bir programlama yapılmıştır. Genetik algoritma metodu kullanılarak geliştirilen modelde bir havza için atıksu arıtma tesislerinin çözünmüş oksijen dengesi ve maliyet analizi yapılmıştır.

Çalışmada çözünmüş oksijen transferi için yapılan çalışmalar incelendikten sonra hesaplamalar için bir takım kabuller yapılmıştır. Hesaplamalarda memba ve mansap arasındaki çözünmüş oksijen havalanma verimliliğini ve oksijen eksiklik oranını hesaplarken daha önce vermiş olduğumuz (57) numaralı denklem kullanılmıştır. Hava ve su arasındaki oksijen transferi sıcaklığın bir fonksiyonu olduğu için, havalandırma verimliliği 20°C'ye (65) ve (66) numaralı denklemlerle uyarlanmıştır. Yapılan bu uyarlamalarla birlikte, genel bilgiler kısmında tablolar halinde verilen ve daha önceki araştırmacılar tarafından bulunmuş olan havalandırma verimlilikleri ile bir karşılaştırma yapılması mümkündür.

Mansap suyu derinliği havalanma için önemli parametredir, fakat belli bir derinlikten sonrasında önemini kaybeder. Pöpel (1974), mansap su derinliğinin, düşü yüksekliğinin 2/3'ü kadar olduğu durumlardan sonraki yüksekliklerde havalanma verimliliğinin sabit kaldığını belirtmişlerdir. Çalışmamızda mansap suyu yüksekliği bu yüksekliğin üzerine çıkmadığı için çıkış suyu derinliği için bir sınırlama getirmeye gerek kalmamıştır.

Savak tipi de havalanma için önemli bir parametredir. Savak tipi ile birlikte savağın geometrisi ve boyutları havalanma verimliliğini ve dolayısıyla akarsu içindeki çözünmüş oksijen dengesini önemli ölçüde etkilerler. Çalışmamızda, düz tabanlı ve basamaklı savak olmak üzere iki ayrı savak modeli geliştirilmiş ve bu modeller üzerinde çalışmalar yapılmıştır.

### 2.3. Deney Düzenegi

Deneyler Karadeniz Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Hidrolik Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneylerin amacı, oksijen konsantrasyonunun hidrolik yapılarda memba-mansap arasında nasıl bir sıçrama yaptığı ve dolayısıyla havalanma verimliliğini belirlemek, daha sonra ise yapıdan uzaklaştıkça kanal boyunca bu değerlerin nasıl bir eğri çizdiğini göstermek ve bunların düz savaklarla basamaklı olanlar arasındaki değer farklılıklarını belirlemektir.

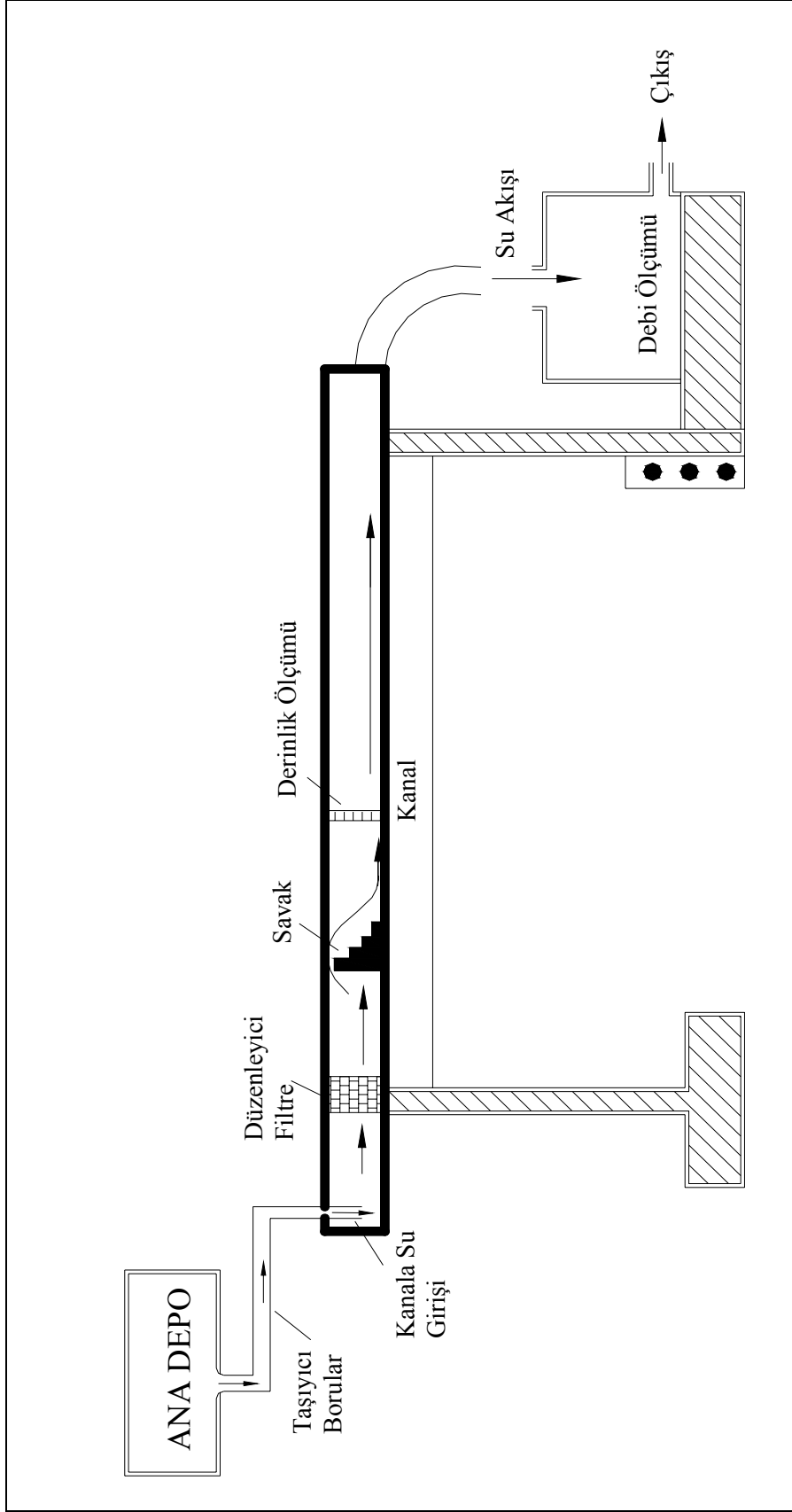
Deney düzenegi, geri dönüşsüz açık bir kanaldan oluşmaktadır. Kanalın ölçüleri 400x15x7.5 cm.'dir. Su; bir motor ile ana depodan aktarılarak kanalın ucuna verilmekte, burada bir düzenleyiciden geçtikten sonra savağa ulaşmakta ve savaktan aştıktan sonra kanal boyunca ilerleyip kanal sonundan ölçü kovanına düşmektedir. Burada suyun debisi hesaplanır. Ölçü deposundan geçen su borular ile kanaldan uzaklaştırılmaktadır (Şekil 20).

Kanal düzenegi oluşturulduktan sonra, hidrolik yapının oluşturulacağı yere ayrı ayrı düz ve basamaklı savaklar konularak ölçüm noktalarında çözünmüş oksijen konsantrasyonu oksijen metre ile ölçülmüştür. Ölçümlerde HACH HQ10 ölçüm cihazı ile kullanılmıştır. Su sıcaklığı 10°C olarak ölçülmüş ve ilgili tablolardan çözünmüş oksijen doygunluk konsantrasyonu ( $C_s$ ) 11.3 mg/l olarak bulunmuştur.

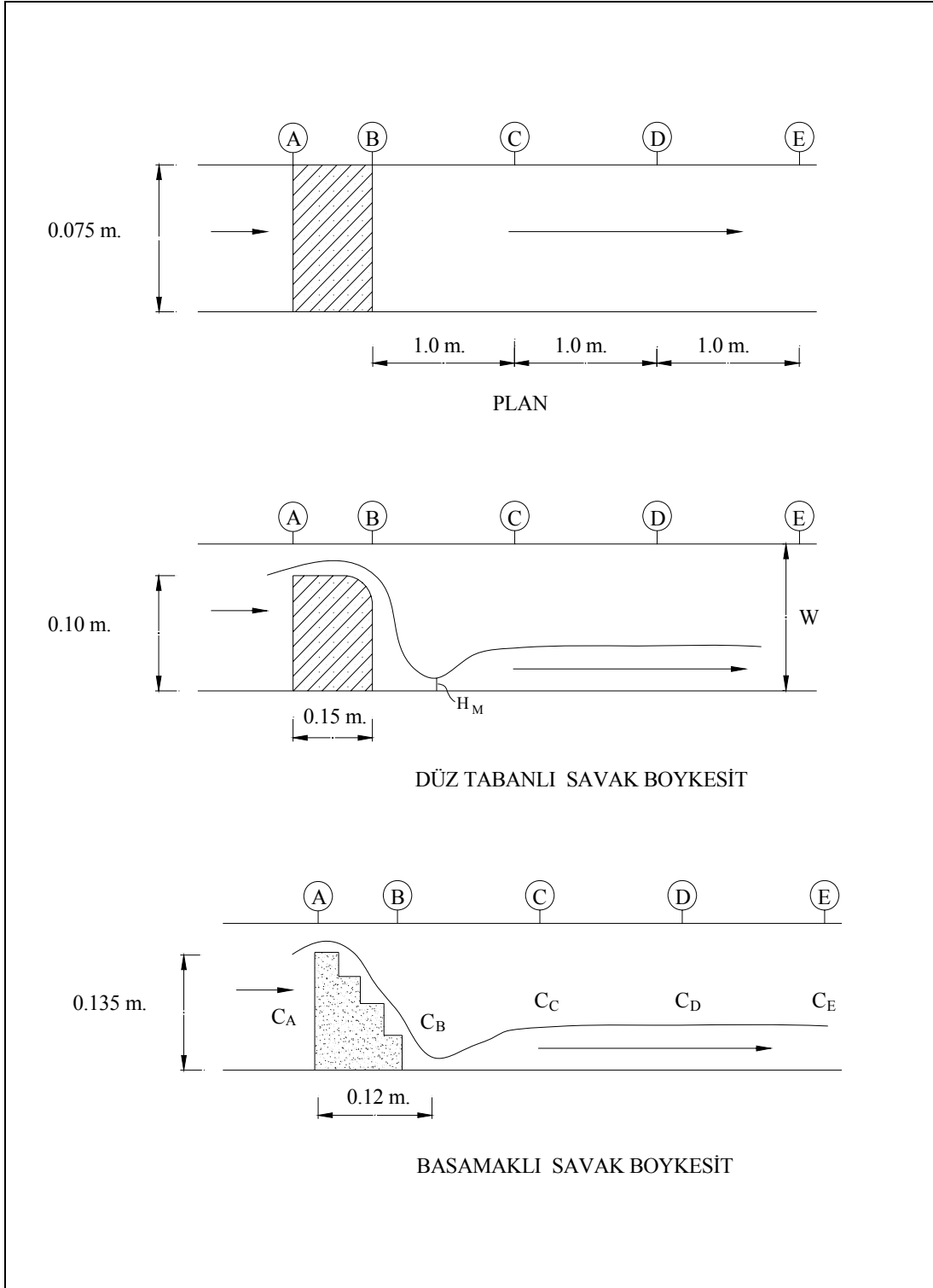
Ölçüm noktaları kanal boyunca 5 noktadan oluşmaktadır: Membada yer alan bir nokta ( A noktası), hemen mansapta yer alan bir nokta ( B noktası) ve kanal boyunca yer alan 3 nokta ( C, D ve E noktaları) (Şekil 21).

A ve B noktalarındaki ölçümler yardımıyla memba mansap arasındaki havalanma verimliliği hesaplanmış (E) ve daha sonra diğer sonuçlarla sağlıklı bir karşılaştırma yapabilmek için 20°C deki havalanma verimliliğine ( $E_{20}$ ) optimize edilmiştir.

B, C, D ve E noktalarından alınan çözünmüş oksijen konsantrasyonu değerleri ve kanal üzerindeki diğer parametreler ile (debi, düşü yüksekliği, kanal genişliği, çıkış suyu derinliği, kanal uzunluğu) bir matematik model oluşturulmuştur. Bütün bu değerler bir araya getirilerek, kanal üzerindeki herhangi bir noktadaki çözünmüş oksijen konsantrasyonunu belirlemeye çalışan denklemler ve eğriler geliştirilmiştir. Bu denklemler, akarsu üzerindeki çok uzak noktalarda dahi çözünmüş oksijen konsantrasyonunu tahmin etmeye yardımcı olacak denklemlerdir.



Şekil 20. Deney düzeneği



Şekil 21. Kanal plan ve boykesiti

#### 2.4. DeneYlerin Uygulanışı ve Sonuçlar

Oluşturulan modelde kanal üzerine 2 farklı savak tipi kullanılmıştır. Birincisi düz tabanlı dşl savak, ikincisi basamaklı savaktır. Düşülü düz tabanlı savak 15 x 10 x 7.5 cm. boyutlarında, basamaklı olanı ise 12 x 13.5 x 7.5 cm. boyutlarındadır. İki farklı savak modelinin kullanılmasının amacı farklı savak tiplerinin karşılaştırılabilmesidir.

Kanala su sağlayan ana depo yaklaşık 50 m<sup>3</sup> hacminde olup ölçümler boyunca gerekli suyu sağlamaktadır. Depodaki su doldurulduktan sonra bir süre dinlendirilmiş daha sonra kanalda ölçümlere geçilmiştir. Bunun amacı depodaki suyun znm oksijen konsantrasyonunun normal seviyeler inmesidir. Dinlendirilmiş suyun kanal başındaki znm oksijen konsantrasyonu 6.5 mg/l'dir. Bu değer çalışmalarımız için uygun bir değerdir. Su sıcaklığına göre seçilen oksijen doygunluk konsantrasyonu 11.3 mg/l olduğuna göre aradaki fark, ölçümler için engel teşkil etmemektedir. Havalandırma verimliliğini doğru bir şekilde hesaplayabilmemiz için znm oksijen doygunluk konsantrasyonu ile membadaki znm oksijen konsantrasyonu arasındaki farkın 2.5 mg/l'den fazla olması gerekmektedir.

Suyun kanala verildiği noktadaki düzenleyici suyun kanala homojen bir şekilde verilmesini sağlamaktadır. Depodan kanal gelen borulardaki vana yardımıyla debi değerleri ayarlanmıştır. Debinin llmesi işlemi, kanal sonundaki ufak depoda yapılmaktadır. Ölçülü depoya geçen su bir kronometre yardımıyla l/sn cinsinden hesaplanmaktadır.

Oksijen metre, yeni ölçüm prensibi LDO (Luminescent Dissolved Oxygen) sayesinde kalibrasyona ve elektrolit değiştirmeye gerek kalmadan ölçüm yapmaya müsaade etmektedir. Standart optik oksijen ölçüm sensörü sayesinde oksijen metrede membran tıkanması veya herhangi bir sıcaklık değişim problemi yaşanmamıştır. Oksijen metre -10-110°C arasında ve 0-20 mg/l arasında (%0-200) 0.1 mg/l hassasiyette ölçüm yapabilme özelliklerine sahiptir. Bu zellikleri ile oksijen metre, laboratuvar dışında da saha ölçümleri yapabilme özelliklerine sahiptir.

Yine oksijen metre aleti yardımı ile suyun sıcaklığı 10°C llmştr. Yukarıda belirtildiği gibi suyun sıcaklığını biliyor olmamız, oksijen doygunluk konsantrasyonunu ve dolayısıyla havalanma verimliliğini belirlememiz açısından önemlidir. İlgili tablolardan doygunluk konsantrasyonu belirlenmiştir.

Ölçümler her defasında sabit bir debide yapılmıştır. Ölçüm vanasından 5 farklı debi değeri seçilmiş ( $Q_1 = 0.10$ ,  $Q_2 = 0.15$ ,  $Q_3 = 0.20$ ,  $Q_4 = 0.32$ ,  $Q_5 = 0.40$  lt/sn) ve kanala verilmiştir. Debi sabitlendikten bir süre sonra sırasıyla A, B, C, D, E noktalarında çözünmüş oksijen konsantrasyonu oksijen metre ile ölçülmüştür. Oksijen metrenin probunun suya daldırılmasıyla beraber bir süre beklendikten sonra seçilen noktalarda çözünmüş oksijen değerinin ölçümü yapılmıştır.

Kanala yerleştirilen iki farklı savak modelinde aynı debi değerleri kullanılarak aynı noktalarda ölçümler yapılmıştır. Ana depodan gelerek düzenleyiciden geçen su savak üzerinden aşarak kanal boyunca ilerleyerek kanaldan atılmaktadır. Farklı debiler altında aynı noktalarda, bir çok kere oksijen metre ile ölçümler yapılarak hata oranı düşürülmeye çalışılmıştır.

Yapılan ölçüm sonuçlarına göre düz ve basamaklı savak modelinden elde edilen havalanma verimlilikleri, oksijen eksikliği oranları değerleri tablo 21 ve 22’de, havalanma yüzdeleri tablo 23 ve 24’te verilmiştir. Tabloda memba (A noktası) ve mansapta (B noktası) ölçülen çözünmüş oksijen konsantrasyonları değerleri yardımıyla önce oksijen eksiklik oranı ( $r$ ) ve havalanma verimliliği değerleri ( $E$ ) hesaplanmıştır. Daha sonra 20°C’deki havalanma verimlilikleri ile karşılaştırma yapılabilmesi için 20°C’ye normalize ( $E_{20}$ ) edilmiştir. Şekil 22-25’de savaklardaki havalanma verimliliklerinin debiye göre değişimleri incelenmiş, şekil 26-35’te iki farklı savak tipinde havalanma verimlilikleri değerleri karşılaştırılmıştır. Şekil 36-39’de ise havalanma yüzdeleri kıyaslanmıştır.

Savaktan çıkan su hemen mansapta dalan jet olarak gözlenmekte ve debinin şiddetine göre penetrasyon derinliği artmaktadır. Dalış noktasında hava kabarcıkları gözlenmekte olup yine debiye göre kabarcıklanma uzunluğunda artış gözlenmektedir. Dalış noktasından sonra ufak bir sıçrama yapan su, yine ufak bir eğri çizerek gerekli yüksekliğe erişmektedir.

Basamaklı savaklarda ise durum biraz farklıdır. Bunun sebebi debiye göre akım rejiminin farklılık göstermesidir. Küçük debilerde akış bir basamaktan diğerine akarak geçmekte (nap akımı) ve havalanma jet ve hidrolik sıçrama ile gerçekleşmektedir. Büyük debilerde akış düz olarak akmakta, basamak kenarları akış için izafi bir taban oluşturmaktadır (sıçramalı akım). Su akışı sırasında basamak aralarında kalan bölgelerde çevrıntilerle ve üst yüzeyde de yüzey havalanması ile havalanma sağlanmaktadır.

Savak sonrası ölçülen çıkış suyu derinlikleri tablo 25 ve 26’da verilmiştir. Şekil 40-49 da havalanma verimliliği-çıkış suyu derinliği ilişkisi irdelenmiştir. Şekil 50-56’da ise debinin çıkış suyu derinliğine etkisi incelenmiştir.

Tablo 17. Düz tabanlı savakta memba ve mansap çözünmüş oksijen konsantrasyonu değerleri ve havalanma verimlilikleri

| DEBİ              | Ölçüm No | $C_A (C_{US})$<br>(mg/l) | $C_B (C_{DS})$<br>(mg/l) | $C_S$<br>(mg/l) | r      | E     | $E_{20}$ |
|-------------------|----------|--------------------------|--------------------------|-----------------|--------|-------|----------|
| $Q_1 = 0.10$ l/sn | 1        | 6.5                      | 13.5                     | 11.3            | -2.182 | 1.458 | 1.376    |
|                   | 2        | 6.5                      | 13.5                     | 11.3            | -2.182 | 1.458 | 1.376    |
|                   | 3        | 6.5                      | 13.5                     | 11.3            | -2.182 | 1.458 | 1.376    |
|                   | 4        | 6.5                      | 13.6                     | 11.3            | -2.087 | 1.479 | 1.398    |
|                   | 5        | 6.5                      | 13.6                     | 11.3            | -2.087 | 1.479 | 1.398    |
|                   | 6        | 6.5                      | 13.6                     | 11.3            | -2.087 | 1.479 | 1.398    |
|                   | 7        | 6.5                      | 13.7                     | 11.3            | -2.000 | 1.500 | 1.420    |
|                   | 8        | 6.5                      | 13.7                     | 11.3            | -2.000 | 1.500 | 1.420    |
|                   | 9        | 6.5                      | 13.6                     | 11.3            | -2.087 | 1.479 | 1.398    |
|                   | 10       | 6.5                      | 13.7                     | 11.3            | -2.000 | 1.500 | 1.420    |
|                   | 11       | 6.5                      | 13.6                     | 11.3            | -2.087 | 1.479 | 1.398    |
|                   | 12       | 6.5                      | 13.8                     | 11.3            | -1.920 | 1.521 | 1.442    |
|                   | 13       | 6.5                      | 13.8                     | 11.3            | -1.920 | 1.521 | 1.442    |
|                   | 14       | 6.5                      | 13.9                     | 11.3            | -1.846 | 1.542 | 1.464    |
|                   | 15       | 6.5                      | 13.9                     | 11.3            | -1.846 | 1.542 | 1.464    |
| $Q_2 = 0.15$ l/sn | 1        | 6.5                      | 13.7                     | 11.3            | -2.000 | 1.500 | 1.420    |
|                   | 2        | 6.5                      | 13.7                     | 11.3            | -2.000 | 1.500 | 1.420    |
|                   | 3        | 6.5                      | 13.8                     | 11.3            | -1.920 | 1.521 | 1.442    |
|                   | 4        | 6.5                      | 13.9                     | 11.3            | -1.846 | 1.542 | 1.464    |
|                   | 5        | 6.5                      | 13.9                     | 11.3            | -1.846 | 1.542 | 1.464    |
|                   | 6        | 6.5                      | 14.0                     | 11.3            | -1.778 | 1.563 | 1.486    |
|                   | 7        | 6.5                      | 14.0                     | 11.3            | -1.778 | 1.563 | 1.486    |
|                   | 8        | 6.5                      | 14.1                     | 11.3            | -1.714 | 1.583 | 1.509    |
|                   | 9        | 6.5                      | 14.1                     | 11.3            | -1.714 | 1.583 | 1.509    |
|                   | 10       | 6.5                      | 14.2                     | 11.3            | -1.655 | 1.604 | 1.532    |
|                   | 11       | 6.5                      | 14.2                     | 11.3            | -1.655 | 1.604 | 1.532    |
|                   | 12       | 6.5                      | 14.2                     | 11.3            | -1.655 | 1.604 | 1.532    |
|                   | 13       | 6.5                      | 14.2                     | 11.3            | -1.655 | 1.604 | 1.532    |
|                   | 14       | 6.5                      | 14.3                     | 11.3            | -1.600 | 1.625 | 1.555    |
|                   | 15       | 6.5                      | 14.3                     | 11.3            | -1.600 | 1.625 | 1.555    |
| $Q_3 = 0.20$ l/sn | 1        | 6.5                      | 13.9                     | 11.3            | -1.846 | 1.542 | 1.464    |
|                   | 2        | 6.5                      | 13.9                     | 11.3            | -1.846 | 1.542 | 1.464    |
|                   | 3        | 6.5                      | 14.1                     | 11.3            | -1.714 | 1.583 | 1.509    |
|                   | 4        | 6.5                      | 14.0                     | 11.3            | -1.778 | 1.563 | 1.486    |
|                   | 5        | 6.5                      | 14.1                     | 11.3            | -1.714 | 1.583 | 1.509    |
|                   | 6        | 6.5                      | 14.2                     | 11.3            | -1.655 | 1.604 | 1.532    |
|                   | 7        | 6.5                      | 14.2                     | 11.3            | -1.655 | 1.604 | 1.532    |
|                   | 8        | 6.5                      | 14.3                     | 11.3            | -1.600 | 1.625 | 1.555    |



Tablo 17'nin devamı

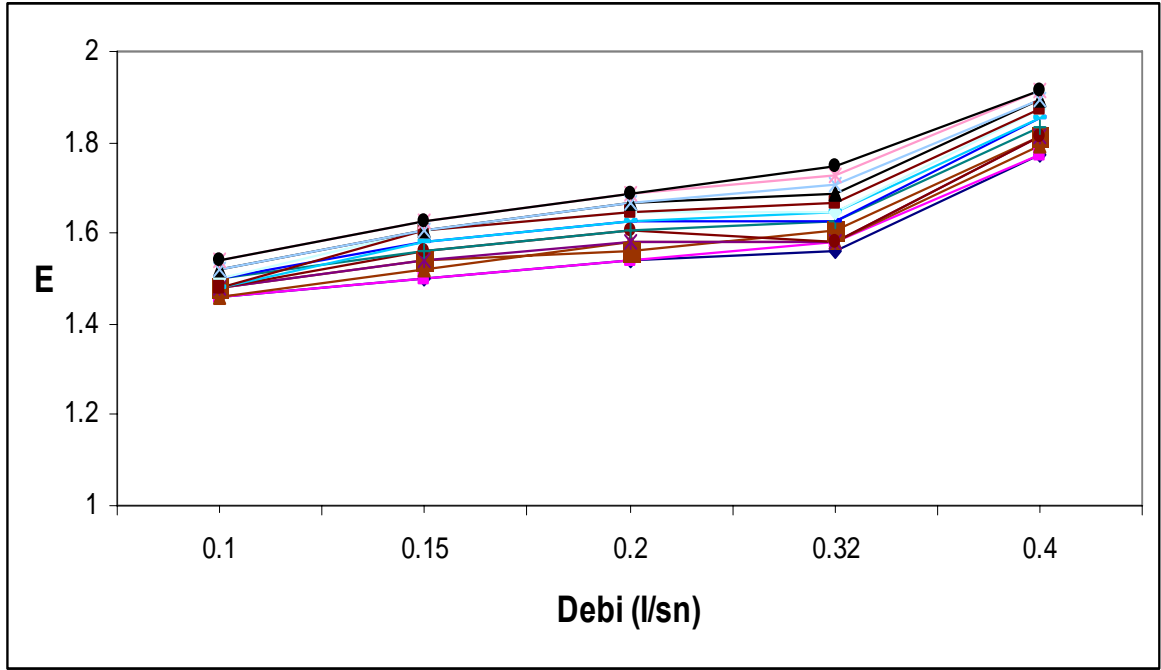
| DEBİ                       | Ölçüm No | C <sub>A</sub> (C <sub>US</sub> ) (mg/l) | C <sub>B</sub> (C <sub>DS</sub> ) (mg/l) | C <sub>S</sub> (mg/l) | r      | E     | E <sub>20</sub> |
|----------------------------|----------|--|--|-----------------------|--------|-------|-----------------|
| Q <sub>3</sub> = 0.20 l/sn | 9        | 6.5                                      | 14.3                                     | 11.3                  | -1.600 | 1.625 | 1.555           |
|                            | 10       | 6.5                                      | 14.4                                     | 11.3                  | -1.548 | 1.646 | 1.578           |
|                            | 11       | 6.5                                      | 14.4                                     | 11.3                  | -1.548 | 1.646 | 1.578           |
|                            | 12       | 6.5                                      | 14.5                                     | 11.3                  | -1.500 | 1.667 | 1.602           |
|                            | 13       | 6.5                                      | 14.5                                     | 11.3                  | -1.500 | 1.667 | 1.602           |
|                            | 14       | 6.5                                      | 14.6                                     | 11.3                  | -1.455 | 1.688 | 1.625           |
|                            | 15       | 6.5                                      | 14.6                                     | 11.3                  | -1.455 | 1.688 | 1.625           |
| Q <sub>4</sub> = 0.32 l/sn | 1        | 6.5                                      | 14.0                                     | 11.3                  | -1.778 | 1.563 | 1.486           |
|                            | 2        | 6.5                                      | 14.1                                     | 11.3                  | -1.714 | 1.583 | 1.509           |
|                            | 3        | 6.5                                      | 14.1                                     | 11.3                  | -1.714 | 1.583 | 1.509           |
|                            | 4        | 6.5                                      | 14.2                                     | 11.3                  | -1.655 | 1.604 | 1.532           |
|                            | 5        | 6.5                                      | 14.1                                     | 11.3                  | -1.714 | 1.583 | 1.509           |
|                            | 6        | 6.5                                      | 14.1                                     | 11.3                  | -1.714 | 1.583 | 1.509           |
|                            | 7        | 6.5                                      | 14.3                                     | 11.3                  | -1.600 | 1.625 | 1.555           |
|                            | 8        | 6.5                                      | 14.3                                     | 11.3                  | -1.600 | 1.625 | 1.555           |
|                            | 9        | 6.5                                      | 14.4                                     | 11.3                  | -1.548 | 1.646 | 1.578           |
|                            | 10       | 6.5                                      | 14.4                                     | 11.3                  | -1.548 | 1.646 | 1.578           |
|                            | 11       | 6.5                                      | 14.5                                     | 11.3                  | -1.500 | 1.667 | 1.602           |
|                            | 12       | 6.5                                      | 14.6                                     | 11.3                  | -1.455 | 1.688 | 1.625           |
|                            | 13       | 6.5                                      | 14.7                                     | 11.3                  | -1.412 | 1.708 | 1.649           |
|                            | 14       | 6.5                                      | 14.8                                     | 11.3                  | -1.371 | 1.729 | 1.673           |
|                            | 15       | 6.5                                      | 14.9                                     | 11.3                  | -1.333 | 1.750 | 1.697           |
| Q <sub>5</sub> = 0.40 l/sn | 1        | 6.5                                      | 15.0                                     | 11.3                  | -1.297 | 1.771 | 1.722           |
|                            | 2        | 6.5                                      | 15.0                                     | 11.3                  | -1.297 | 1.771 | 1.722           |
|                            | 3        | 6.5                                      | 15.1                                     | 11.3                  | -1.263 | 1.792 | 1.746           |
|                            | 4        | 6.5                                      | 15.2                                     | 11.3                  | -1.231 | 1.813 | 1.771           |
|                            | 5        | 6.5                                      | 15.2                                     | 11.3                  | -1.231 | 1.813 | 1.771           |
|                            | 6        | 6.5                                      | 15.2                                     | 11.3                  | -1.231 | 1.813 | 1.771           |
|                            | 7        | 6.5                                      | 15.3                                     | 11.3                  | -1.200 | 1.833 | 1.796           |
|                            | 8        | 6.5                                      | 15.4                                     | 11.3                  | -1.171 | 1.854 | 1.821           |
|                            | 9        | 6.5                                      | 15.4                                     | 11.3                  | -1.171 | 1.854 | 1.821           |
|                            | 10       | 6.5                                      | 15.5                                     | 11.3                  | -1.143 | 1.875 | 1.846           |
|                            | 11       | 6.5                                      | 15.5                                     | 11.3                  | -1.143 | 1.875 | 1.846           |
|                            | 12       | 6.5                                      | 15.6                                     | 11.3                  | -1.116 | 1.896 | 1.871           |
|                            | 13       | 6.5                                      | 15.6                                     | 11.3                  | -1.116 | 1.896 | 1.871           |
|                            | 14       | 6.5                                      | 15.7                                     | 11.3                  | -1.091 | 1.917 | 1.897           |
|                            | 15       | 6.5                                      | 15.7                                     | 11.3                  | -1.091 | 1.917 | 1.897           |

Tablo 18. Basamaklı savakta memba ve mansap çözünmüş oksijen konsantrasyonu değerleri ve havalanma verimlilikleri

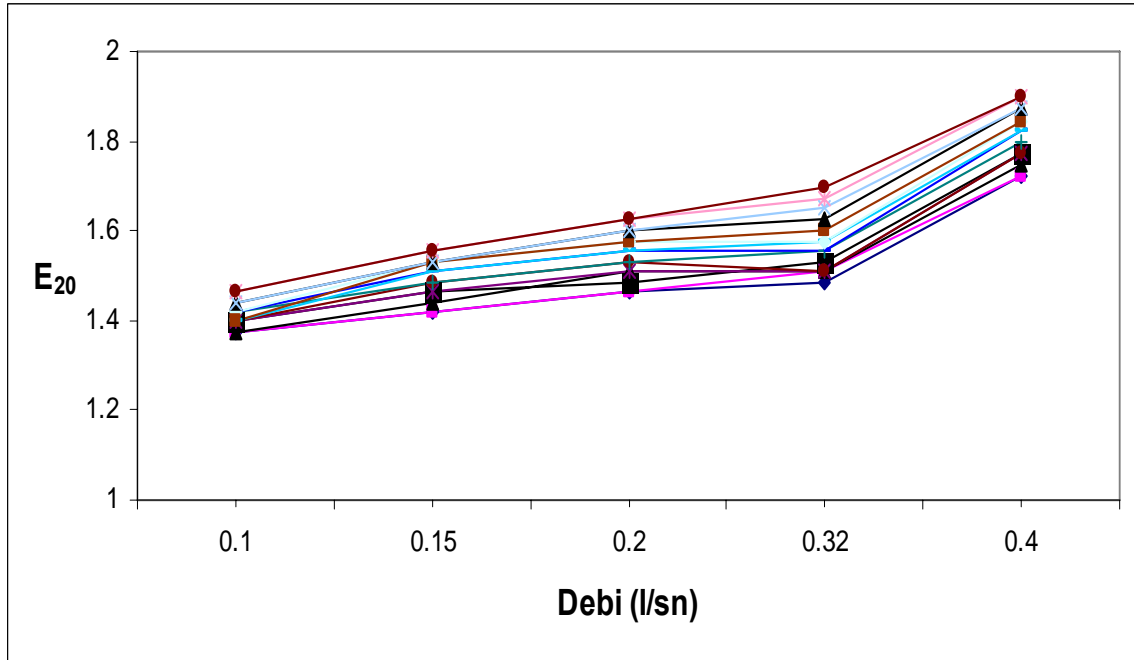
| DEBİ   | Ölçüm No | $C_A (C_{US})$<br>(mg/l) | $C_B (C_{DS})$<br>(mg/l) | $C_S$<br>(mg/l) | r      | E     | $E_{20}$ |
|--|----------|--------------------------|--------------------------|-----------------|--------|-------|----------|
| $Q_1 = 0.10$ l/sn<br><br>( Nap Akım<br>Rejimi) | 1        | 6.5                      | 13.8                     | 11.3            | -1.920 | 1.521 | 1.442    |
|  | 2        | 6.5                      | 13.8                     | 11.3            | -1.920 | 1.521 | 1.442    |
|  | 3        | 6.5                      | 13.9                     | 11.3            | -1.846 | 1.542 | 1.464    |
|  | 4        | 6.5                      | 13.9                     | 11.3            | -1.846 | 1.542 | 1.464    |
|  | 5        | 6.5                      | 13.9                     | 11.3            | -1.846 | 1.542 | 1.464    |
|  | 6        | 6.5                      | 14.0                     | 11.3            | -1.778 | 1.563 | 1.486    |
|  | 7        | 6.5                      | 14.0                     | 11.3            | -1.778 | 1.563 | 1.486    |
|  | 8        | 6.5                      | 13.9                     | 11.3            | -1.846 | 1.542 | 1.464    |
|  | 9        | 6.5                      | 14.1                     | 11.3            | -1.714 | 1.583 | 1.509    |
|  | 10       | 6.5                      | 14.1                     | 11.3            | -1.714 | 1.583 | 1.509    |
|  | 11       | 6.5                      | 14.2                     | 11.3            | -1.655 | 1.604 | 1.532    |
|  | 12       | 6.5                      | 14.1                     | 11.3            | -1.714 | 1.583 | 1.509    |
|  | 13       | 6.5                      | 14.2                     | 11.3            | -1.655 | 1.604 | 1.532    |
|  | 14       | 6.5                      | 14.1                     | 11.3            | -1.714 | 1.583 | 1.509    |
|  | 15       | 6.5                      | 14.3                     | 11.3            | -1.600 | 1.625 | 1.555    |
| $Q_2 = 0.15$ l/sn<br><br>( Nap Akım<br>Rejimi) | 1        | 6.5                      | 13.9                     | 11.3            | -1.846 | 1.542 | 1.464    |
|  | 2        | 6.5                      | 14.0                     | 11.3            | -1.778 | 1.563 | 1.486    |
|  | 3        | 6.5                      | 14.1                     | 11.3            | -1.714 | 1.583 | 1.509    |
|  | 4        | 6.5                      | 14.2                     | 11.3            | -1.655 | 1.604 | 1.532    |
|  | 5        | 6.5                      | 14.2                     | 11.3            | -1.655 | 1.604 | 1.532    |
|  | 6        | 6.5                      | 14.3                     | 11.3            | -1.600 | 1.625 | 1.555    |
|  | 7        | 6.5                      | 14.3                     | 11.3            | -1.600 | 1.625 | 1.555    |
|  | 8        | 6.5                      | 14.4                     | 11.3            | -1.548 | 1.646 | 1.578    |
|  | 9        | 6.5                      | 14.4                     | 11.3            | -1.548 | 1.646 | 1.578    |
|  | 10       | 6.5                      | 14.5                     | 11.3            | -1.500 | 1.667 | 1.602    |
|  | 11       | 6.5                      | 14.5                     | 11.3            | -1.500 | 1.667 | 1.602    |
|  | 12       | 6.5                      | 14.6                     | 11.3            | -1.455 | 1.688 | 1.625    |
|  | 13       | 6.5                      | 14.6                     | 11.3            | -1.455 | 1.688 | 1.625    |
|  | 14       | 6.5                      | 14.7                     | 11.3            | -1.412 | 1.708 | 1.649    |
|  | 15       | 6.5                      | 14.8                     | 11.3            | -1.371 | 1.729 | 1.673    |
| $Q_3 = 0.20$ l/sn<br><br>( Nap Akım<br>Rejimi) | 1        | 6.5                      | 14.1                     | 11.3            | -1.714 | 1.583 | 1.509    |
|  | 2        | 6.5                      | 14.1                     | 11.3            | -1.714 | 1.583 | 1.509    |
|  | 3        | 6.5                      | 14.2                     | 11.3            | -1.655 | 1.604 | 1.532    |
|  | 4        | 6.5                      | 14.2                     | 11.3            | -1.655 | 1.604 | 1.532    |
|  | 5        | 6.5                      | 14.3                     | 11.3            | -1.600 | 1.625 | 1.555    |
|  | 6        | 6.5                      | 14.4                     | 11.3            | -1.548 | 1.646 | 1.578    |
|  | 7        | 6.5                      | 14.4                     | 11.3            | -1.548 | 1.646 | 1.578    |
|  | 8        | 6.5                      | 14.5                     | 11.3            | -1.500 | 1.667 | 1.602    |

Tablo 18'in devamı

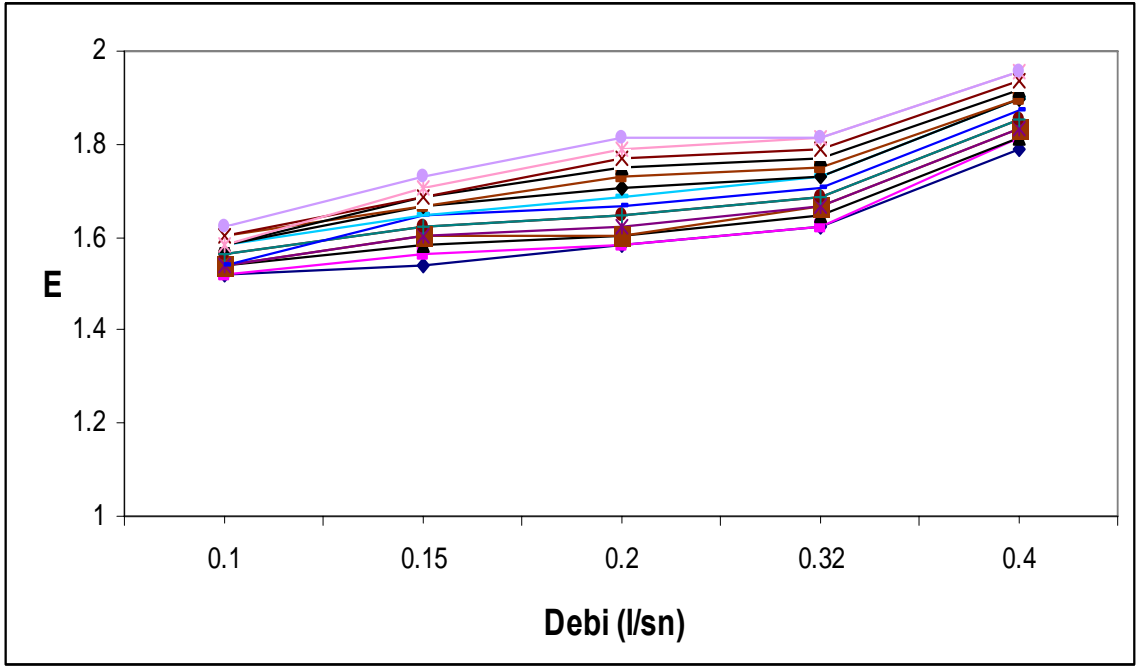
| DEBİ   | Ölçüm No | C <sub>A</sub> (C <sub>US</sub> ) (mg/l) | C <sub>B</sub> (C <sub>DS</sub> ) (mg/l) | C <sub>S</sub> (mg/l) | r      | E     | E <sub>20</sub> |
|--|----------|--|--|-----------------------|--------|-------|-----------------|
| Q <sub>3</sub> = 0.20 l/sn<br>( Nap Akım Rejimi)       | 9        | 6.5                                      | 14.6                                     | 11.3                  | -1.455 | 1.688 | 1.625           |
|  | 10       | 6.5                                      | 14.7                                     | 11.3                  | -1.412 | 1.708 | 1.649           |
|  | 11       | 6.5                                      | 14.8                                     | 11.3                  | -1.371 | 1.729 | 1.673           |
|  | 12       | 6.5                                      | 14.9                                     | 11.3                  | -1.333 | 1.750 | 1.697           |
|  | 13       | 6.5                                      | 15.0                                     | 11.3                  | -1.297 | 1.771 | 1.722           |
|  | 14       | 6.5                                      | 15.1                                     | 11.3                  | -1.263 | 1.792 | 1.746           |
|  | 15       | 6.5                                      | 15.2                                     | 11.3                  | -1.231 | 1.813 | 1.771           |
| Q <sub>4</sub> = 0.32 l/sn<br>( Sıçramalı Akım Rejimi) | 1        | 6.5                                      | 14.3                                     | 11.3                  | -1.600 | 1.625 | 1.555           |
|  | 2        | 6.5                                      | 14.3                                     | 11.3                  | -1.600 | 1.625 | 1.555           |
|  | 3        | 6.5                                      | 14.4                                     | 11.3                  | -1.548 | 1.646 | 1.578           |
|  | 4        | 6.5                                      | 14.5                                     | 11.3                  | -1.500 | 1.667 | 1.602           |
|  | 5        | 6.5                                      | 14.5                                     | 11.3                  | -1.500 | 1.667 | 1.602           |
|  | 6        | 6.5                                      | 14.6                                     | 11.3                  | -1.455 | 1.688 | 1.625           |
|  | 7        | 6.5                                      | 14.6                                     | 11.3                  | -1.455 | 1.688 | 1.625           |
|  | 8        | 6.5                                      | 14.7                                     | 11.3                  | -1.412 | 1.708 | 1.649           |
|  | 9        | 6.5                                      | 14.8                                     | 11.3                  | -1.371 | 1.729 | 1.673           |
|  | 10       | 6.5                                      | 14.8                                     | 11.3                  | -1.371 | 1.729 | 1.673           |
|  | 11       | 6.5                                      | 14.9                                     | 11.3                  | -1.333 | 1.750 | 1.697           |
|  | 12       | 6.5                                      | 15.0                                     | 11.3                  | -1.297 | 1.771 | 1.722           |
|  | 13       | 6.5                                      | 15.1                                     | 11.3                  | -1.263 | 1.792 | 1.746           |
|  | 14       | 6.5                                      | 15.2                                     | 11.3                  | -1.231 | 1.813 | 1.771           |
|  | 15       | 6.5                                      | 15.2                                     | 11.3                  | -1.231 | 1.813 | 1.771           |
| Q <sub>5</sub> = 0.40 l/sn<br>( Sıçramalı Akım Rejimi) | 1        | 6.5                                      | 15.1                                     | 11.3                  | -1.263 | 1.792 | 1.746           |
|  | 2        | 6.5                                      | 15.2                                     | 11.3                  | -1.231 | 1.813 | 1.771           |
|  | 3        | 6.5                                      | 15.2                                     | 11.3                  | -1.231 | 1.813 | 1.771           |
|  | 4        | 6.5                                      | 15.3                                     | 11.3                  | -1.200 | 1.833 | 1.796           |
|  | 5        | 6.5                                      | 15.3                                     | 11.3                  | -1.200 | 1.833 | 1.796           |
|  | 6        | 6.5                                      | 15.4                                     | 11.3                  | -1.171 | 1.854 | 1.821           |
|  | 7        | 6.5                                      | 15.4                                     | 11.3                  | -1.171 | 1.854 | 1.821           |
|  | 8        | 6.5                                      | 15.5                                     | 11.3                  | -1.143 | 1.875 | 1.846           |
|  | 9        | 6.5                                      | 15.6                                     | 11.3                  | -1.116 | 1.896 | 1.871           |
|  | 10       | 6.5                                      | 15.6                                     | 11.3                  | -1.116 | 1.896 | 1.871           |
|  | 11       | 6.5                                      | 15.6                                     | 11.3                  | -1.116 | 1.896 | 1.871           |
|  | 12       | 6.5                                      | 15.7                                     | 11.3                  | -1.091 | 1.917 | 1.897           |
|  | 13       | 6.5                                      | 15.8                                     | 11.3                  | -1.067 | 1.938 | 1.922           |
|  | 14       | 6.5                                      | 15.9                                     | 11.3                  | -1.043 | 1.958 | 1.948           |
|  | 15       | 6.5                                      | 15.9                                     | 11.3                  | -1.043 | 1.958 | 1.948           |



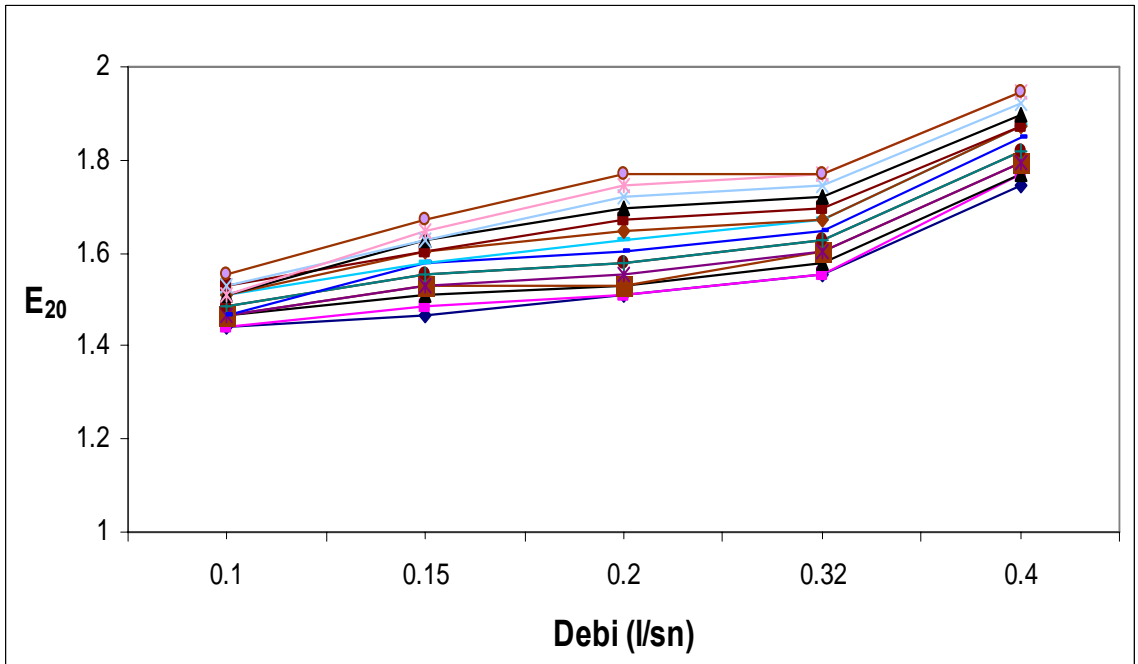
Şekil 22. Düz tabanlı savakta debi-havalandırma verimliliği ilişkisi



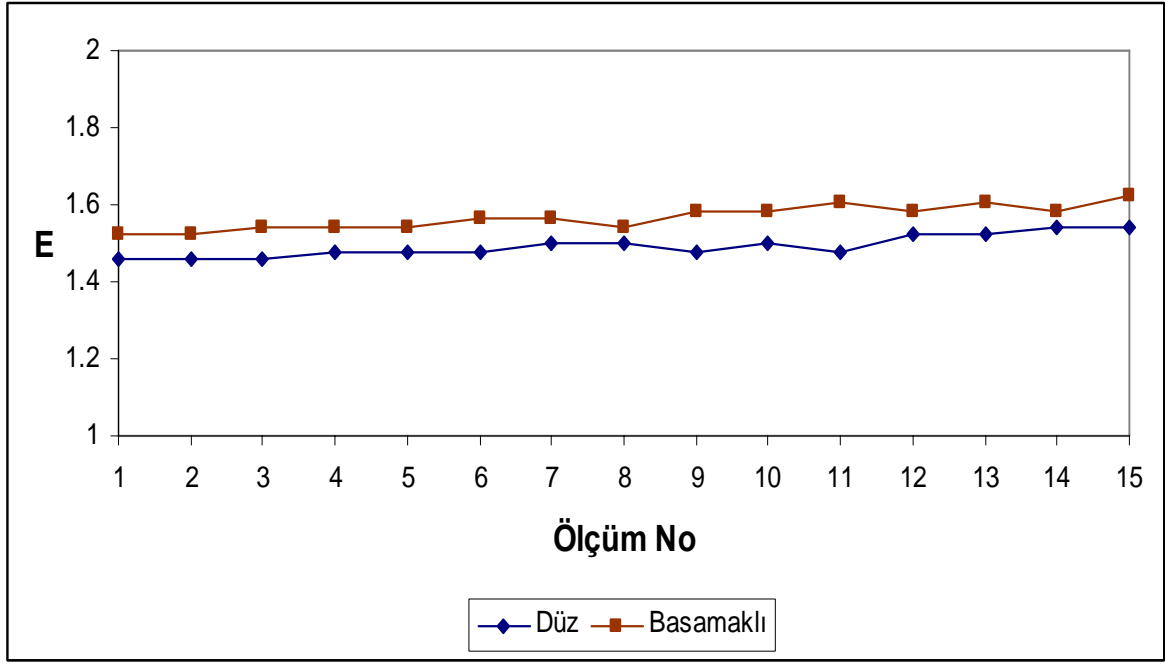
Şekil 23. Düz tabanlı savakta debi-E<sub>20</sub> ilişkisi



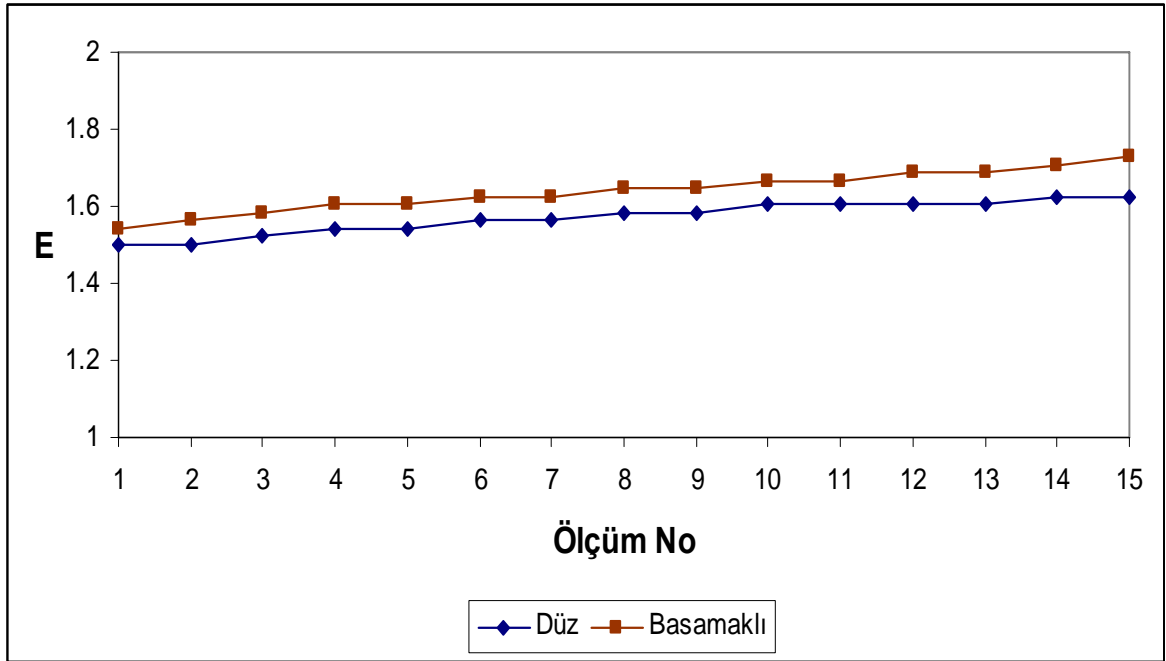
Şekil 24. Basamaklı savakta debi-havalanma verimliliği ilişkisi



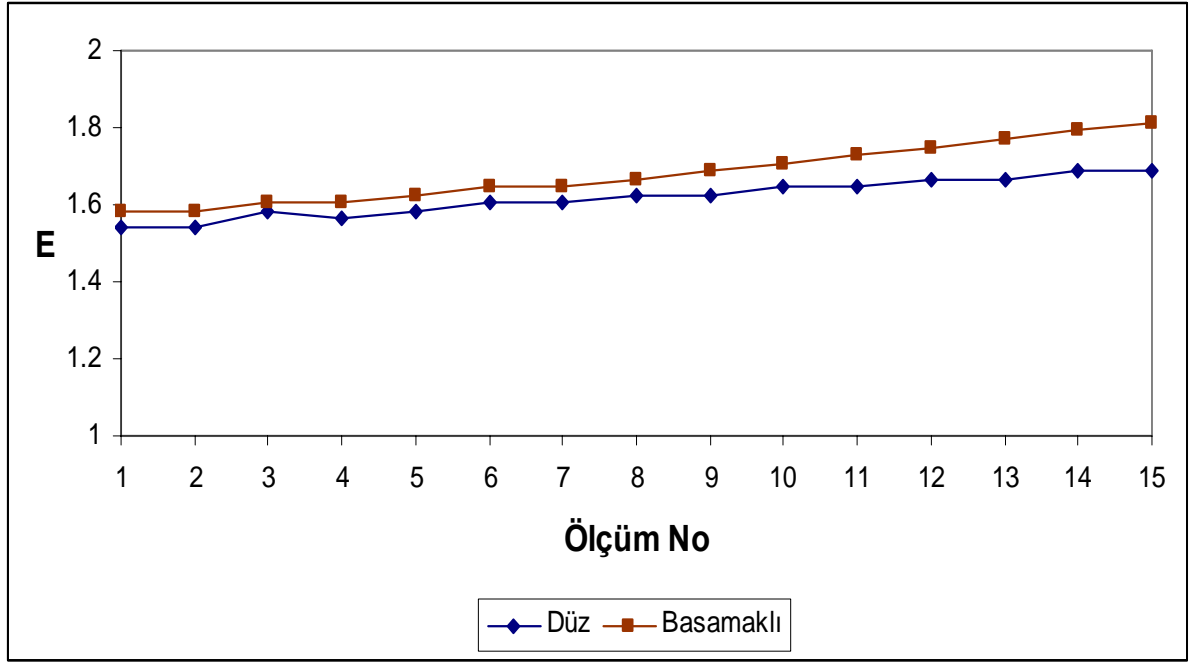
Şekil 25. Basamaklı savakta debi- $E_{20}$  ilişkisi



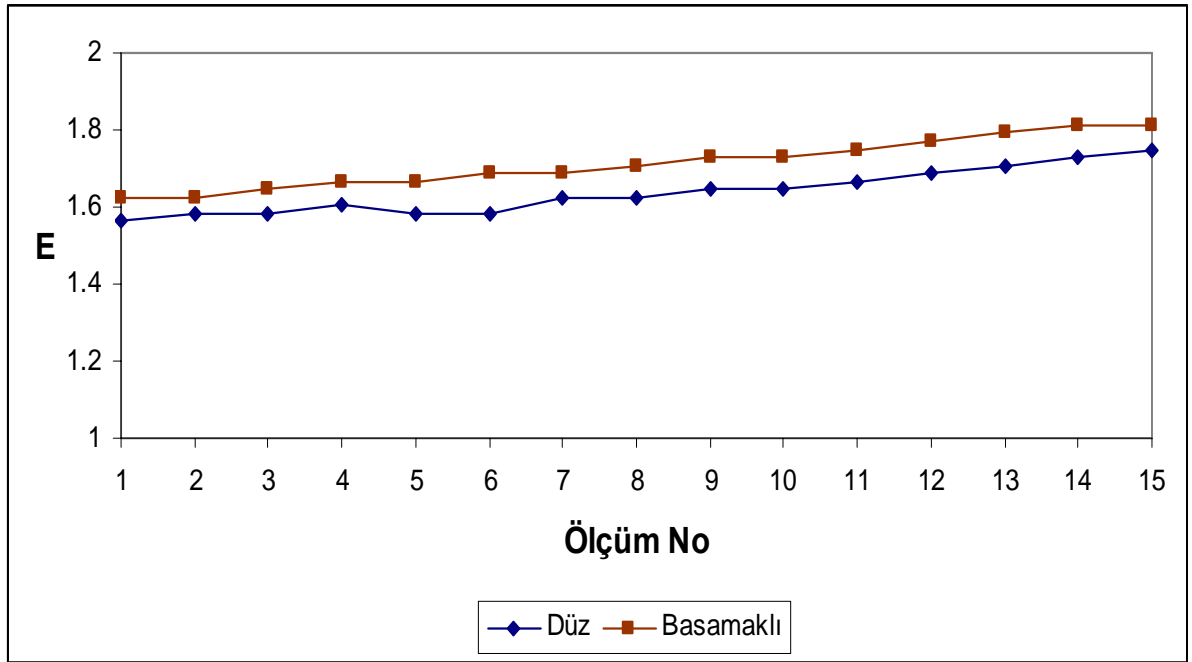
Şekil 26. Savaklarda havalanma verimliliklerinin karşılaştırılması ( $Q_1 = 0.10$  l/sn)



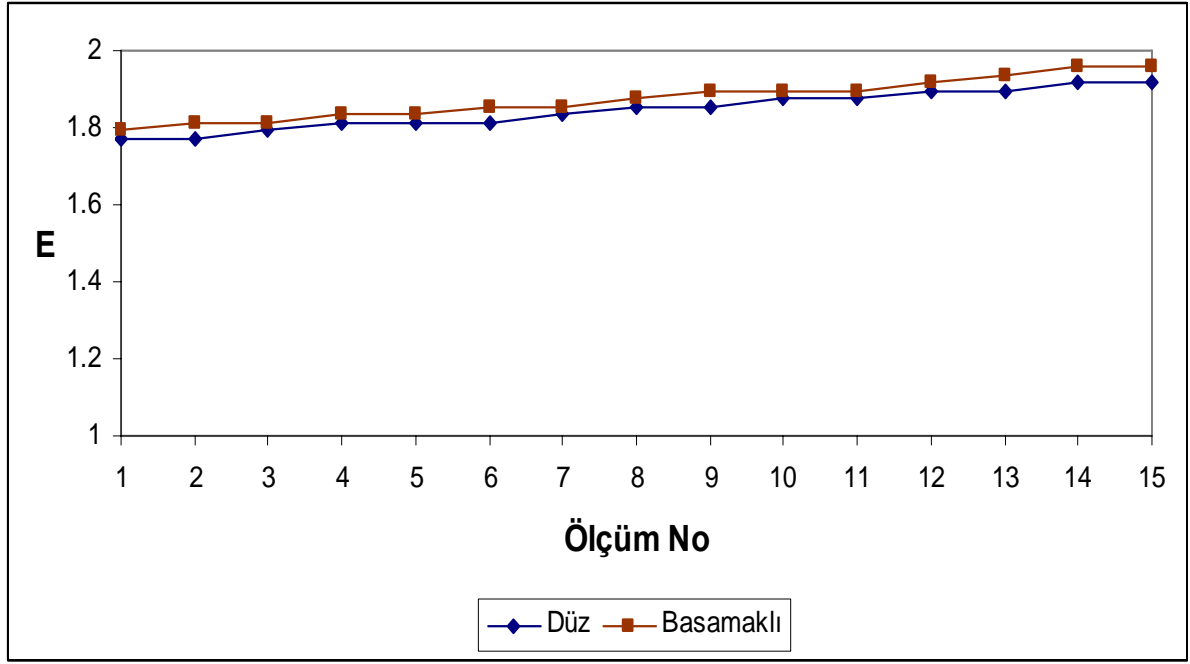
Şekil 27. Savaklarda havalanma verimliliklerinin karşılaştırılması ( $Q_2 = 0.15$  l/sn)



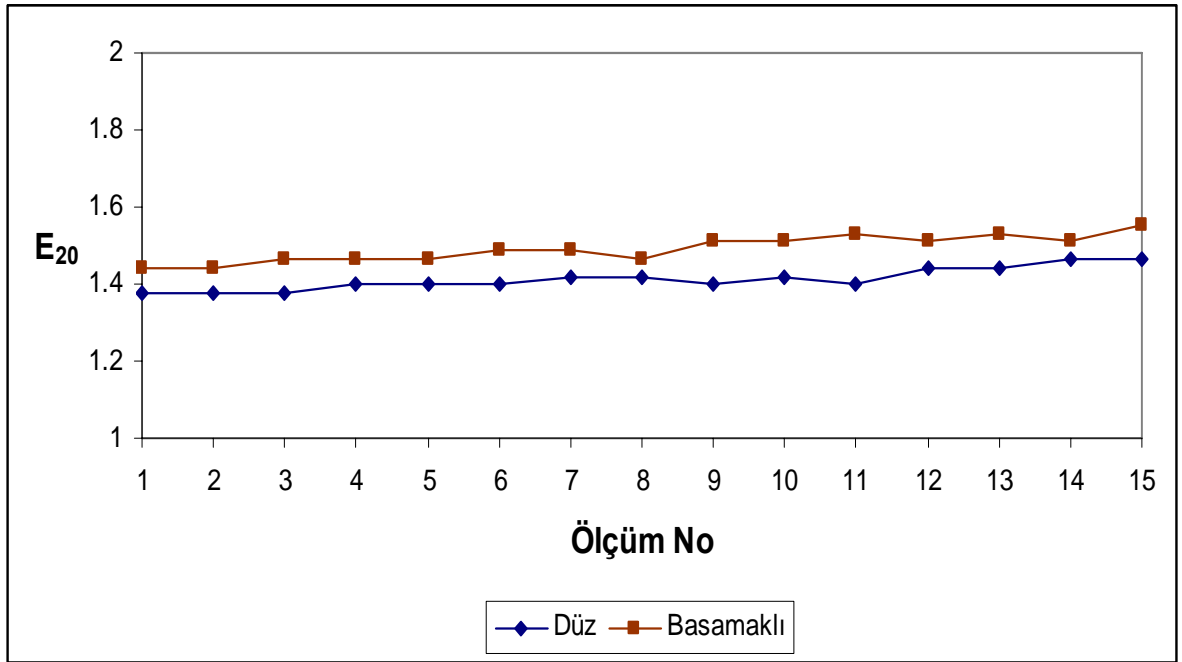
Şekil 28. Savaklarda havalanma verimliliklerinin karşılaştırılması ( $Q_3 = 0.20$  l/sn)



Şekil 29. Savaklarda havalanma verimliliklerinin karşılaştırılması ( $Q_4 = 0.32$  l/sn)

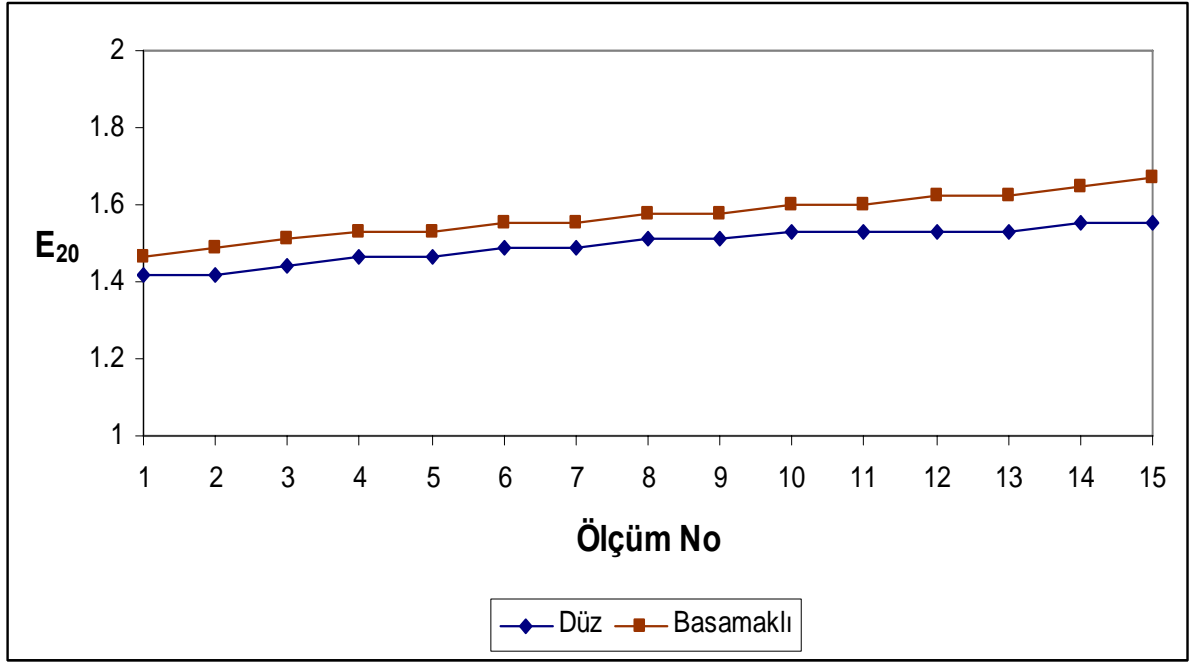


Şekil 30. Savaklarda havalanma verimliliklerinin karşılaştırılması ( $Q_5 = 0.40$  l/sn)

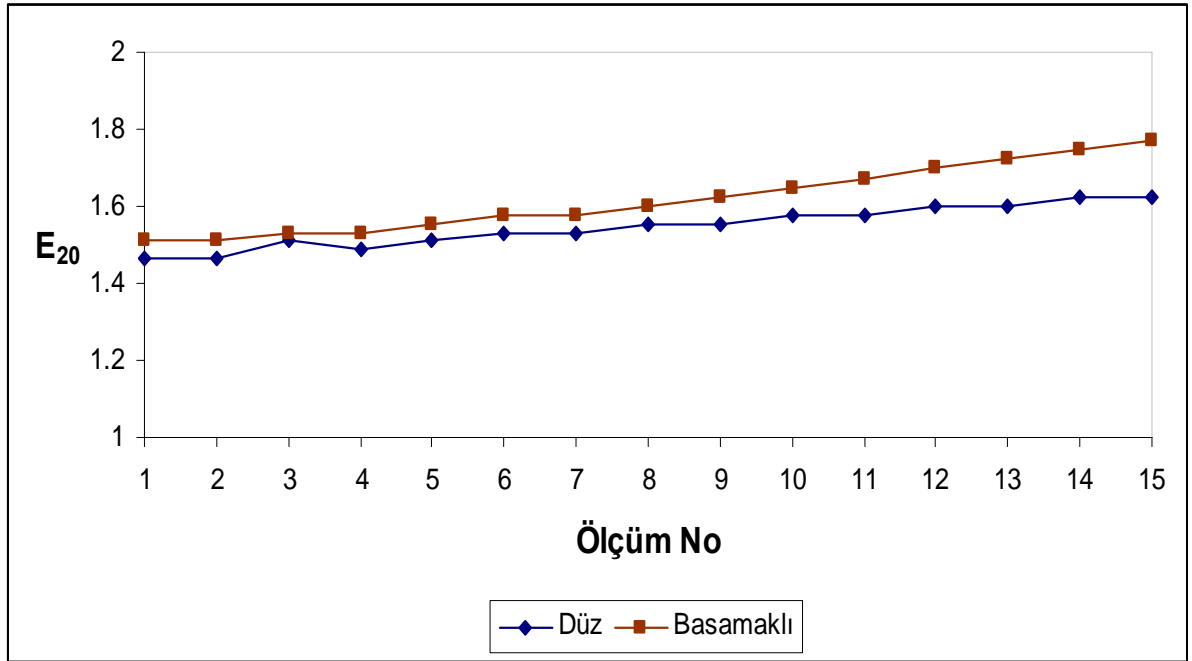


Şekil 31. Savaklarda  $E_{20}$  verimliliklerinin karşılaştırılması ( $Q_1 = 0.10$  l/sn)

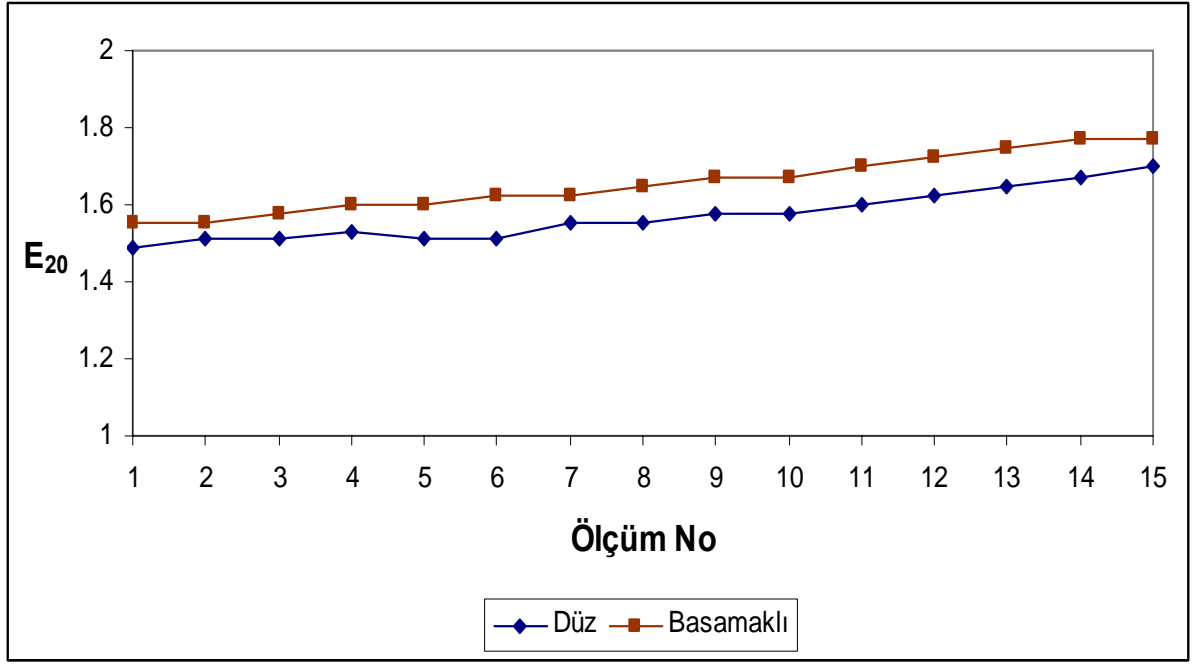




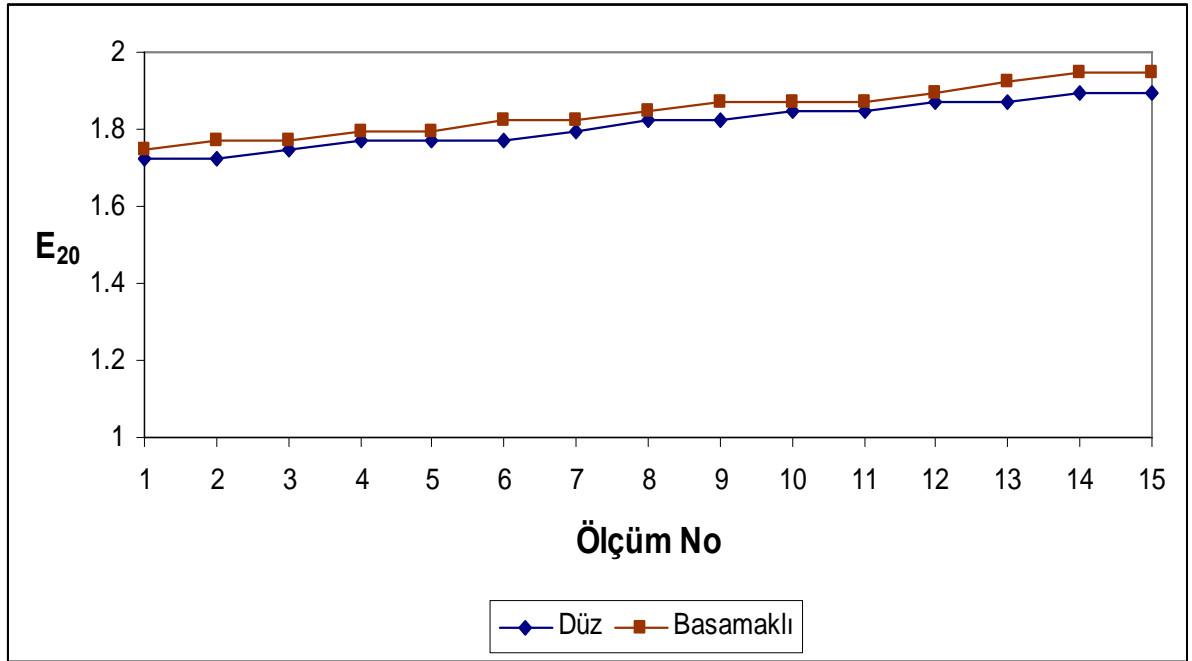
Şekil 32. Savaklarda  $E_{20}$  verimliliklerinin karşılaştırılması ( $Q_2 = 0.15$  l/sn)



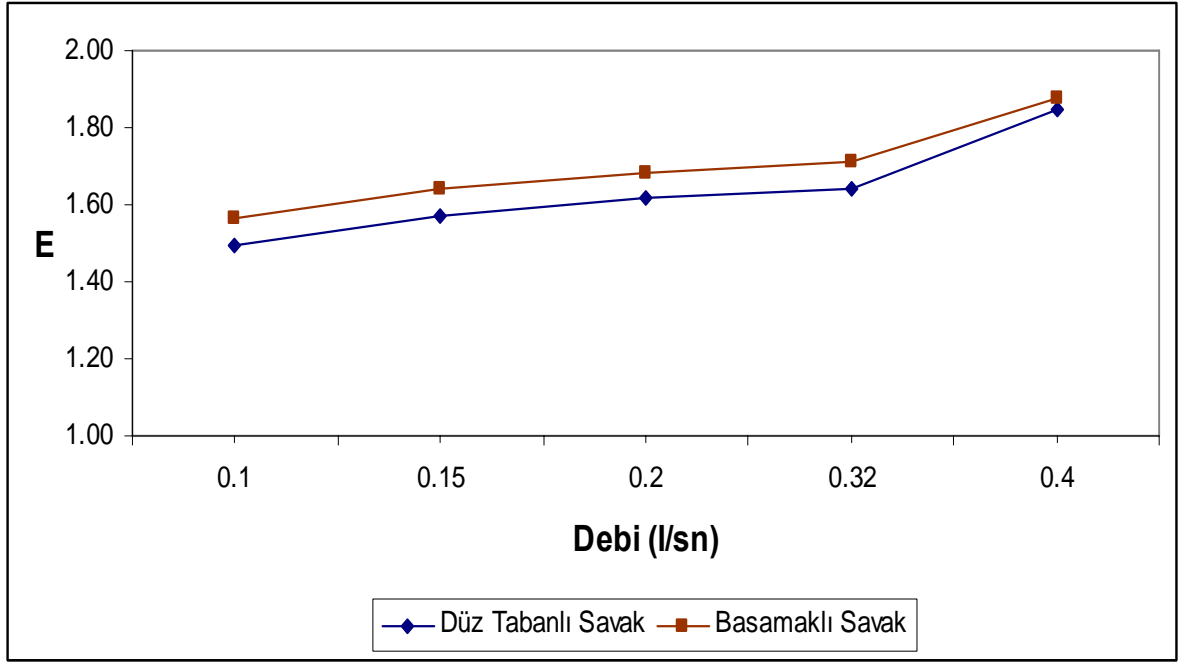
Şekil 33. Savaklarda  $E_{20}$  verimliliklerinin karşılaştırılması ( $Q_3 = 0.20$  l/sn)



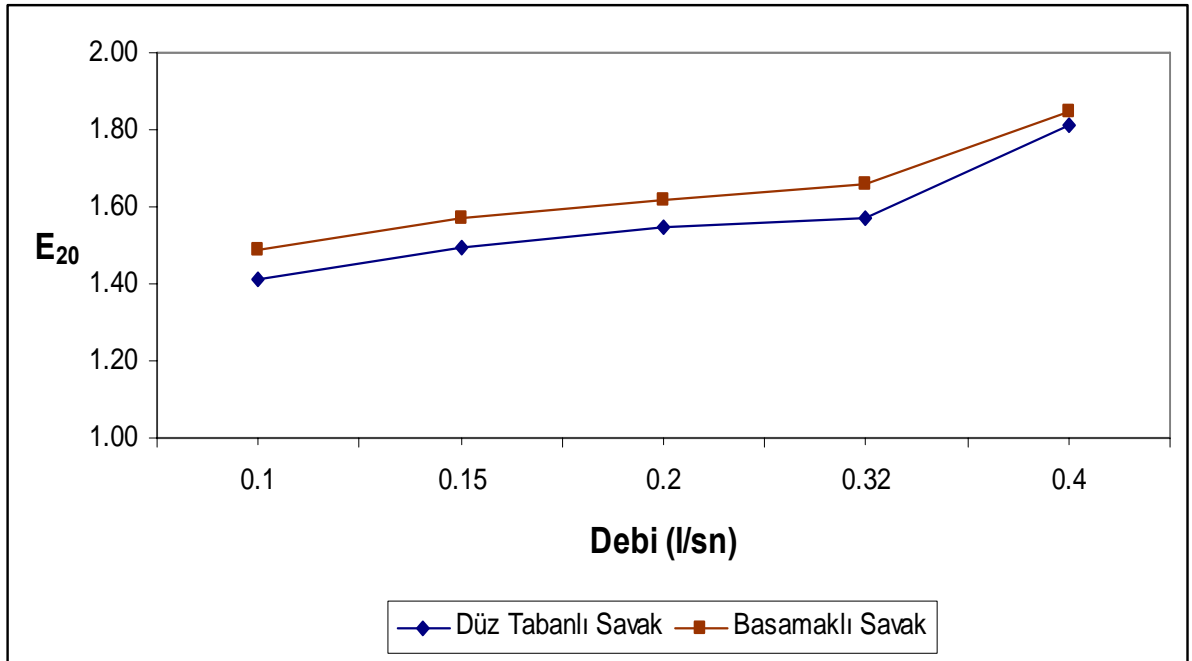
Şekil 34. Savaklarda  $E_{20}$  verimliliklerinin karşılaştırılması ( $Q_4 = 0.32$  l/sn)



Şekil 35. Savaklarda  $E_{20}$  verimliliklerinin karşılaştırılması ( $Q_5 = 0.40$  l/sn)



Şekil 36. Savaklarda ortalama havalanma verimliliklerinin debi ile ilişkisi



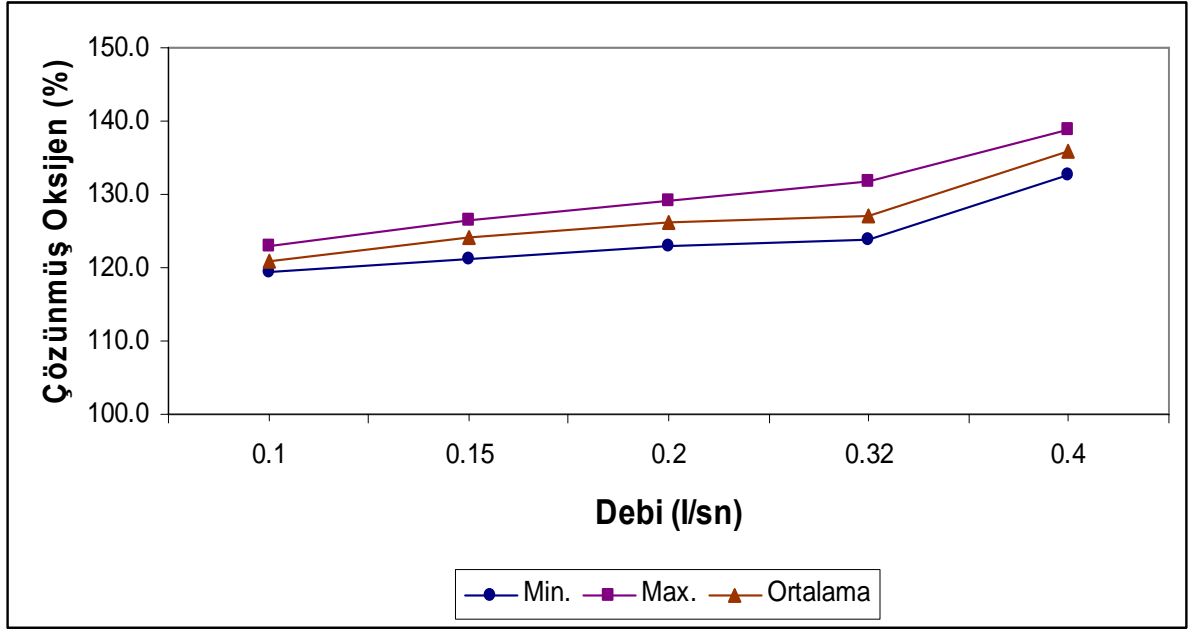
Şekil 37. Savaklarda ortalama E<sub>20</sub> verimliliklerinin debi ile ilişkisi

Tablo 19. Düz tabanlı savakta topukta oluşan havalanma yüzdeleri

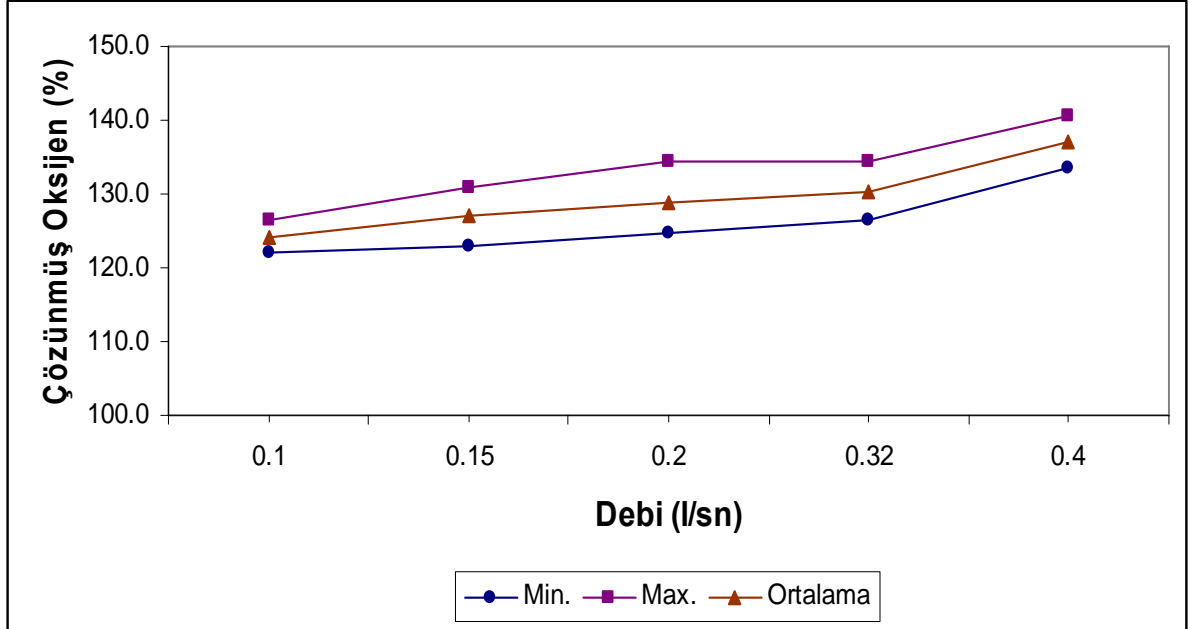
| Debi              | Çözünmüş Oksijen Konsantrasyon Yüzdeleri (%) |   |   | Max. – Min. – Ort. Konsantrasyon (%)                   |
|-------------------|--|---|---|--|
| $Q_1 = 0.10$ l/sn | 119.5<br>119.5<br>119.5<br>120.4<br>120.4    | 120.4<br>121.2<br>121.2<br>120.4<br>121.2 | 120.4<br>122.1<br>122.1<br>123.0<br>123.0 | Min : 119.5<br><br>Max: 123.0<br><br><b>Ort: 120.9</b> |
| $Q_2 = 0.15$ l/sn | 121.2<br>121.2<br>122.1<br>123.0<br>123.0    | 123.9<br>123.9<br>124.8<br>124.8<br>125.7 | 125.7<br>125.7<br>125.7<br>126.5<br>126.5 | Min : 121.2<br><br>Max: 126.5<br><br><b>Ort: 124.2</b> |
| $Q_3 = 0.20$ l/sn | 123.0<br>123.0<br>124.8<br>123.9<br>124.8    | 125.7<br>125.7<br>126.5<br>126.5<br>127.4 | 127.4<br>128.3<br>128.3<br>129.2<br>129.2 | Min : 123.0<br><br>Max: 129.2<br><br><b>Ort: 126.3</b> |
| $Q_4 = 0.32$ l/sn | 123.9<br>124.8<br>124.8<br>125.7<br>124.8    | 124.8<br>126.5<br>126.5<br>127.4<br>127.4 | 128.3<br>129.2<br>130.1<br>131.0<br>131.9 | Min : 123.9<br><br>Max: 131.9<br><br><b>Ort: 127.1</b> |
| $Q_5 = 0.40$ l/sn | 132.7<br>132.7<br>133.6<br>134.5<br>134.5    | 134.5<br>135.4<br>136.3<br>136.3<br>137.2 | 137.2<br>138.1<br>138.1<br>138.9<br>138.9 | Min : 132.7<br><br>Max: 138.9<br><br><b>Ort: 135.9</b> |

Tablo 20. Basamaklı savakta topukta oluşan havalanma yüzdeleri

| Debi              | Çözünmüş Oksijen Konsantrasyon Yüzdeleri (%) |   |   | Max. – Min. – Ort. Konsantrasyon (%)           |
|-------------------|--|---|---|--|
| $Q_1 = 0.10$ l/sn | 122.1<br>122.1<br>123.0<br>123.0<br>123.0    | 123.9<br>123.9<br>123.0<br>124.8<br>124.8 | 125.7<br>124.8<br>125.7<br>124.8<br>126.5 | Min : 122.1<br>Max: 126.5<br><b>Ort: 124.1</b> |
| $Q_2 = 0.15$ l/sn | 123.0<br>123.9<br>124.8<br>125.7<br>125.7    | 126.5<br>126.5<br>127.4<br>127.4<br>128.3 | 128.3<br>129.2<br>129.2<br>130.1<br>131.0 | Min : 123.0<br>Max: 131.0<br><b>Ort: 127.1</b> |
| $Q_3 = 0.20$ l/sn | 124.8<br>124.8<br>125.7<br>125.7<br>126.5    | 127.4<br>127.4<br>128.3<br>129.2<br>130.1 | 131.0<br>131.9<br>132.7<br>133.6<br>134.5 | Min : 124.8<br>Max: 134.5<br><b>Ort: 128.9</b> |
| $Q_4 = 0.32$ l/sn | 126.5<br>126.5<br>127.4<br>128.3<br>128.3    | 129.2<br>129.2<br>130.1<br>131.0<br>131.0 | 131.9<br>132.7<br>133.6<br>134.5<br>134.5 | Min : 126.5<br>Max: 134.5<br><b>Ort: 130.3</b> |
| $Q_5 = 0.40$ l/sn | 133.6<br>134.5<br>134.5<br>135.4<br>135.4    | 136.3<br>136.3<br>137.2<br>138.1<br>138.1 | 138.1<br>138.9<br>139.8<br>140.7<br>140.7 | Min : 133.6<br>Max: 140.7<br><b>Ort: 137.2</b> |



Şekil 38. Düz tabanlı savakta topukta oluşan çözülmüş oksijen yüzdeleri



Şekil 39. Basamaklı savakta topukta oluşan çözülmüş oksijen yüzdeleri

Tablo 21. Düz tabanlı savakta oluşan çıkış suyu derinlikleri

| Debi                 | Ölçüm No | Düşü Yüksekliği (m) | E <sub>20</sub> | Sıcaklık (°C) | h <sub>M</sub> (m) |
|----------------------|----------|---------------------|-----------------|---------------|--------------------|
| $Q_1 = 0.10$<br>l/sn | 1        | 0.10                | 1.376           | 10            | 0.019              |
|                      | 2        | 0.10                | 1.376           | 10            | 0.019              |
|                      | 3        | 0.10                | 1.376           | 10            | 0.019              |
|                      | 4        | 0.10                | 1.398           | 10            | 0.020              |
|                      | 5        | 0.10                | 1.398           | 10            | 0.020              |
|                      | 6        | 0.10                | 1.398           | 10            | 0.020              |
|                      | 7        | 0.10                | 1.420           | 10            | 0.022              |
|                      | 8        | 0.10                | 1.420           | 10            | 0.022              |
|                      | 9        | 0.10                | 1.398           | 10            | 0.023              |
|                      | 10       | 0.10                | 1.420           | 10            | 0.022              |
|                      | 11       | 0.10                | 1.398           | 10            | 0.021              |
|                      | 12       | 0.10                | 1.442           | 10            | 0.021              |
|                      | 13       | 0.10                | 1.442           | 10            | 0.023              |
|                      | 14       | 0.10                | 1.464           | 10            | 0.023              |
|                      | 15       | 0.10                | 1.464           | 10            | 0.023              |
| $Q_2 = 0.15$<br>l/sn | 1        | 0.10                | 1.420           | 10            | 0.025              |
|                      | 2        | 0.10                | 1.420           | 10            | 0.025              |
|                      | 3        | 0.10                | 1.442           | 10            | 0.025              |
|                      | 4        | 0.10                | 1.464           | 10            | 0.025              |
|                      | 5        | 0.10                | 1.464           | 10            | 0.025              |
|                      | 6        | 0.10                | 1.486           | 10            | 0.025              |
|                      | 7        | 0.10                | 1.486           | 10            | 0.026              |
|                      | 8        | 0.10                | 1.509           | 10            | 0.026              |
|                      | 9        | 0.10                | 1.509           | 10            | 0.026              |
|                      | 10       | 0.10                | 1.532           | 10            | 0.026              |
|                      | 11       | 0.10                | 1.532           | 10            | 0.027              |
|                      | 12       | 0.10                | 1.532           | 10            | 0.026              |
|                      | 13       | 0.10                | 1.532           | 10            | 0.027              |
|                      | 14       | 0.10                | 1.555           | 10            | 0.027              |
|                      | 15       | 0.10                | 1.555           | 10            | 0.028              |
| $Q_3 = 0.20$<br>l/sn | 1        | 0.10                | 1.464           | 10            | 0.028              |
|                      | 2        | 0.10                | 1.464           | 10            | 0.028              |
|                      | 3        | 0.10                | 1.509           | 10            | 0.028              |
|                      | 4        | 0.10                | 1.486           | 10            | 0.029              |
|                      | 5        | 0.10                | 1.509           | 10            | 0.028              |
|                      | 6        | 0.10                | 1.532           | 10            | 0.029              |
|                      | 7        | 0.10                | 1.532           | 10            | 0.030              |
|                      | 8        | 0.10                | 1.555           | 10            | 0.030              |

Tablo 21'in devamı

| Debi                 | Ölçüm No | Düşü Yüksekliği (m) | E <sub>20</sub> | Sıcaklık (°C) | h <sub>M</sub> (m) |
|----------------------|----------|---------------------|-----------------|---------------|--------------------|
| $Q_3 = 0.20$<br>l/sn | 9        | 0.10                | 1.555           | 10            | 0.030              |
|                      | 10       | 0.10                | 1.578           | 10            | 0.032              |
|                      | 11       | 0.10                | 1.578           | 10            | 0.032              |
|                      | 12       | 0.10                | 1.602           | 10            | 0.032              |
|                      | 13       | 0.10                | 1.602           | 10            | 0.032              |
|                      | 14       | 0.10                | 1.625           | 10            | 0.032              |
|                      | 15       | 0.10                | 1.625           | 10            | 0.033              |
| $Q_4 = 0.32$<br>l/sn | 1        | 0.10                | 1.486           | 10            | 0.035              |
|                      | 2        | 0.10                | 1.509           | 10            | 0.036              |
|                      | 3        | 0.10                | 1.509           | 10            | 0.036              |
|                      | 4        | 0.10                | 1.532           | 10            | 0.036              |
|                      | 5        | 0.10                | 1.509           | 10            | 0.035              |
|                      | 6        | 0.10                | 1.509           | 10            | 0.035              |
|                      | 7        | 0.10                | 1.555           | 10            | 0.036              |
|                      | 8        | 0.10                | 1.555           | 10            | 0.036              |
|                      | 9        | 0.10                | 1.578           | 10            | 0.037              |
|                      | 10       | 0.10                | 1.578           | 10            | 0.038              |
|                      | 11       | 0.10                | 1.602           | 10            | 0.038              |
|                      | 12       | 0.10                | 1.625           | 10            | 0.039              |
|                      | 13       | 0.10                | 1.649           | 10            | 0.038              |
|                      | 14       | 0.10                | 1.673           | 10            | 0.039              |
|                      | 15       | 0.10                | 1.697           | 10            | 0.039              |
| $Q_5 = 0.40$<br>l/sn | 1        | 0.10                | 1.722           | 10            | 0.037              |
|                      | 2        | 0.10                | 1.722           | 10            | 0.037              |
|                      | 3        | 0.10                | 1.746           | 10            | 0.037              |
|                      | 4        | 0.10                | 1.771           | 10            | 0.038              |
|                      | 5        | 0.10                | 1.771           | 10            | 0.038              |
|                      | 6        | 0.10                | 1.771           | 10            | 0.038              |
|                      | 7        | 0.10                | 1.796           | 10            | 0.039              |
|                      | 8        | 0.10                | 1.821           | 10            | 0.039              |
|                      | 9        | 0.10                | 1.821           | 10            | 0.039              |
|                      | 10       | 0.10                | 1.846           | 10            | 0.040              |
|                      | 11       | 0.10                | 1.846           | 10            | 0.040              |
|                      | 12       | 0.10                | 1.871           | 10            | 0.040              |
|                      | 13       | 0.10                | 1.871           | 10            | 0.041              |
|                      | 14       | 0.10                | 1.897           | 10            | 0.041              |
|                      | 15       | 0.10                | 1.897           | 10            | 0.040              |

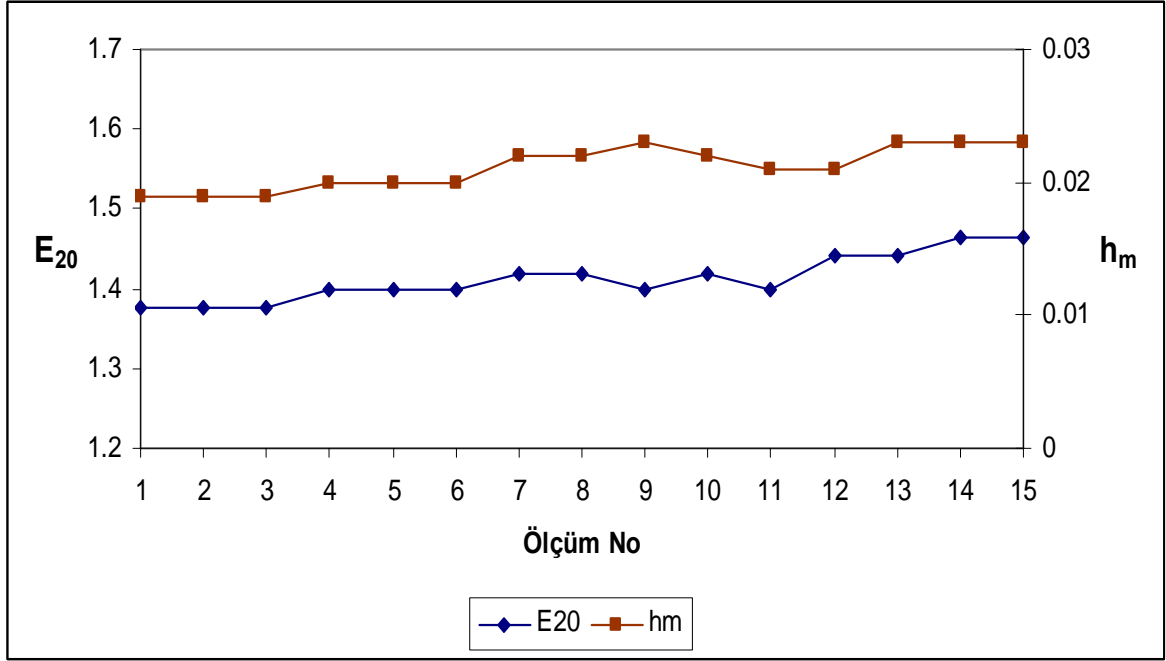


Tablo 22. Basamaklı savakta oluşan çıkış suyu derinlikleri

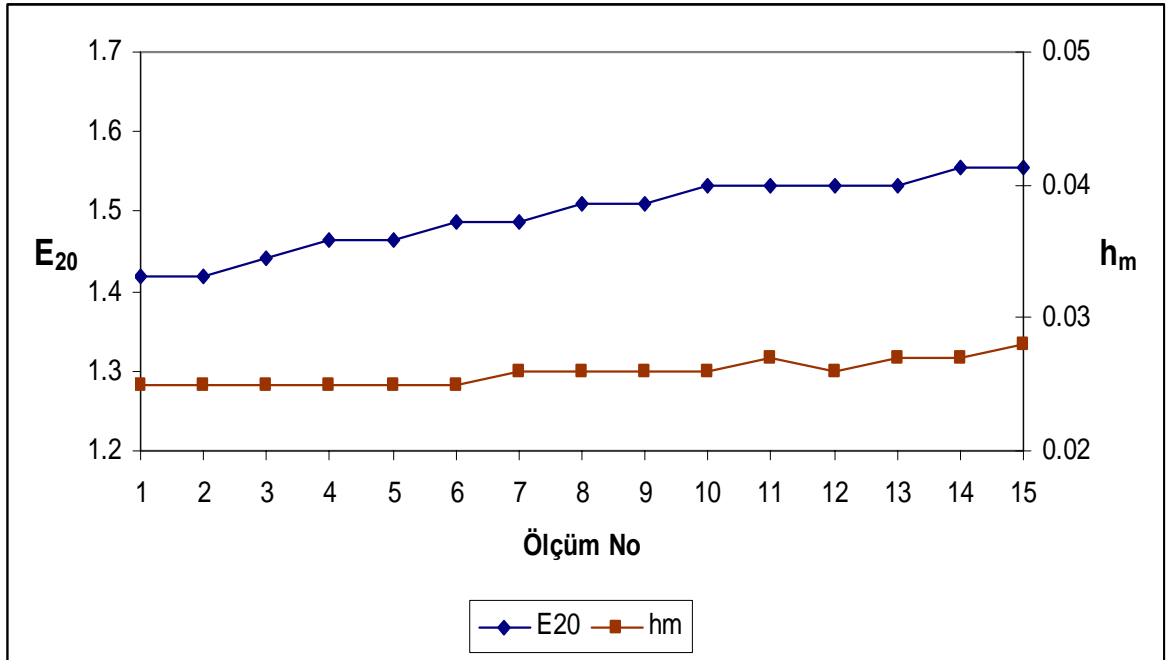
| Debi                 | Ölçüm No | Düşü Yüksekliği (m) | E <sub>20</sub> | Sıcaklık (°C) | h <sub>M</sub> (m) |
|----------------------|----------|---------------------|-----------------|---------------|--------------------|
| $Q_1 = 0.10$<br>l/sn | 1        | 0.135               | 1.442           | 10            | 0.016              |
|                      | 2        | 0.135               | 1.442           | 10            | 0.016              |
|                      | 3        | 0.135               | 1.464           | 10            | 0.017              |
|                      | 4        | 0.135               | 1.464           | 10            | 0.019              |
|                      | 5        | 0.135               | 1.464           | 10            | 0.019              |
|                      | 6        | 0.135               | 1.486           | 10            | 0.019              |
|                      | 7        | 0.135               | 1.486           | 10            | 0.020              |
|                      | 8        | 0.135               | 1.464           | 10            | 0.020              |
|                      | 9        | 0.135               | 1.509           | 10            | 0.020              |
|                      | 10       | 0.135               | 1.509           | 10            | 0.021              |
|                      | 11       | 0.135               | 1.532           | 10            | 0.022              |
|                      | 12       | 0.135               | 1.509           | 10            | 0.023              |
|                      | 13       | 0.135               | 1.532           | 10            | 0.023              |
|                      | 14       | 0.135               | 1.509           | 10            | 0.022              |
|                      | 15       | 0.135               | 1.555           | 10            | 0.023              |
| $Q_2 = 0.15$<br>l/sn | 1        | 0.135               | 1.464           | 10            | 0.022              |
|                      | 2        | 0.135               | 1.486           | 10            | 0.023              |
|                      | 3        | 0.135               | 1.509           | 10            | 0.023              |
|                      | 4        | 0.135               | 1.532           | 10            | 0.024              |
|                      | 5        | 0.135               | 1.532           | 10            | 0.024              |
|                      | 6        | 0.135               | 1.555           | 10            | 0.025              |
|                      | 7        | 0.135               | 1.555           | 10            | 0.025              |
|                      | 8        | 0.135               | 1.578           | 10            | 0.025              |
|                      | 9        | 0.135               | 1.578           | 10            | 0.025              |
|                      | 10       | 0.135               | 1.602           | 10            | 0.026              |
|                      | 11       | 0.135               | 1.602           | 10            | 0.026              |
|                      | 12       | 0.135               | 1.625           | 10            | 0.026              |
|                      | 13       | 0.135               | 1.625           | 10            | 0.027              |
|                      | 14       | 0.135               | 1.649           | 10            | 0.027              |
|                      | 15       | 0.135               | 1.673           | 10            | 0.027              |
| $Q_3 = 0.20$<br>l/sn | 1        | 0.135               | 1.509           | 10            | 0.023              |
|                      | 2        | 0.135               | 1.509           | 10            | 0.024              |
|                      | 3        | 0.135               | 1.532           | 10            | 0.024              |
|                      | 4        | 0.135               | 1.532           | 10            | 0.025              |
|                      | 5        | 0.135               | 1.555           | 10            | 0.026              |
|                      | 6        | 0.135               | 1.578           | 10            | 0.028              |
|                      | 7        | 0.135               | 1.578           | 10            | 0.027              |
|                      | 8        | 0.135               | 1.602           | 10            | 0.028              |

Tablo 22'nin devamı

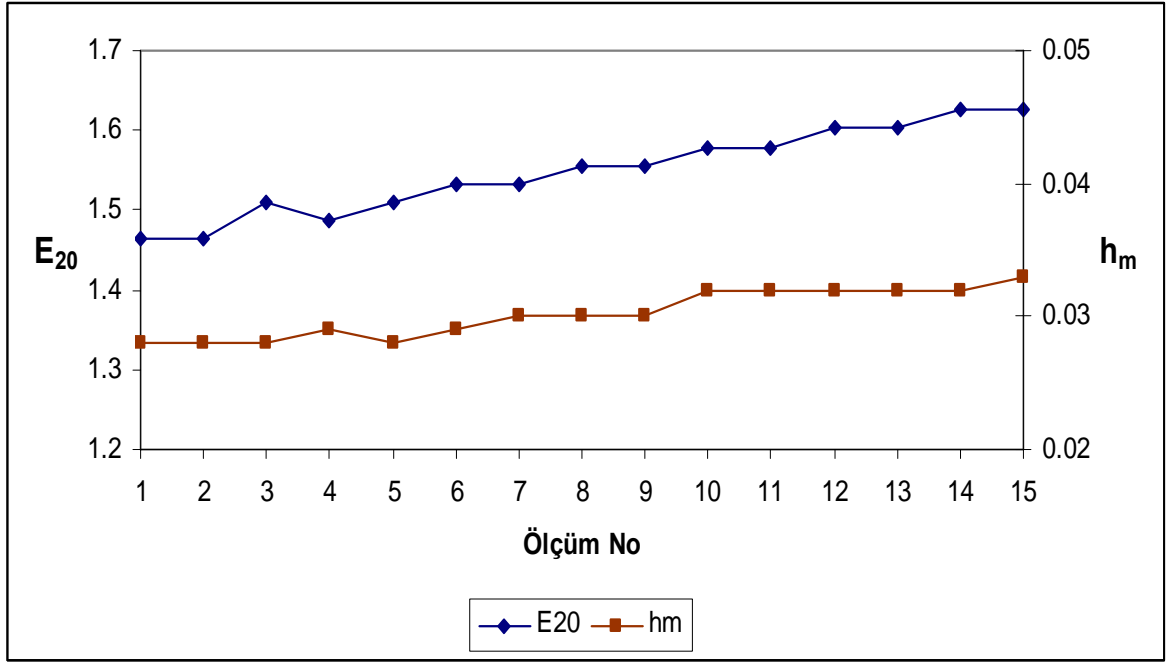
| Debi                 | Ölçüm No | Düşü Yüksekliği (m) | E <sub>20</sub> | Sıcaklık (°C) | h <sub>M</sub> (m) |
|----------------------|----------|---------------------|-----------------|---------------|--------------------|
| $Q_3 = 0.20$<br>l/sn | 9        | 0.135               | 1.625           | 10            | 0.029              |
|                      | 10       | 0.135               | 1.649           | 10            | 0.030              |
|                      | 11       | 0.135               | 1.673           | 10            | 0.030              |
|                      | 12       | 0.135               | 1.697           | 10            | 0.031              |
|                      | 13       | 0.135               | 1.722           | 10            | 0.031              |
|                      | 14       | 0.135               | 1.746           | 10            | 0.032              |
|                      | 15       | 0.135               | 1.771           | 10            | 0.032              |
| $Q_4 = 0.32$<br>l/sn | 1        | 0.135               | 1.555           | 10            | 0.026              |
|                      | 2        | 0.135               | 1.555           | 10            | 0.027              |
|                      | 3        | 0.135               | 1.578           | 10            | 0.027              |
|                      | 4        | 0.135               | 1.602           | 10            | 0.029              |
|                      | 5        | 0.135               | 1.602           | 10            | 0.030              |
|                      | 6        | 0.135               | 1.625           | 10            | 0.032              |
|                      | 7        | 0.135               | 1.625           | 10            | 0.032              |
|                      | 8        | 0.135               | 1.649           | 10            | 0.033              |
|                      | 9        | 0.135               | 1.673           | 10            | 0.034              |
|                      | 10       | 0.135               | 1.673           | 10            | 0.035              |
|                      | 11       | 0.135               | 1.697           | 10            | 0.035              |
|                      | 12       | 0.135               | 1.722           | 10            | 0.036              |
|                      | 13       | 0.135               | 1.746           | 10            | 0.036              |
|                      | 14       | 0.135               | 1.771           | 10            | 0.036              |
|                      | 15       | 0.135               | 1.771           | 10            | 0.036              |
| $Q_5 = 0.40$<br>l/sn | 1        | 0.135               | 1.746           | 10            | 0.027              |
|                      | 2        | 0.135               | 1.771           | 10            | 0.028              |
|                      | 3        | 0.135               | 1.771           | 10            | 0.028              |
|                      | 4        | 0.135               | 1.796           | 10            | 0.029              |
|                      | 5        | 0.135               | 1.796           | 10            | 0.030              |
|                      | 6        | 0.135               | 1.821           | 10            | 0.031              |
|                      | 7        | 0.135               | 1.821           | 10            | 0.032              |
|                      | 8        | 0.135               | 1.846           | 10            | 0.033              |
|                      | 9        | 0.135               | 1.871           | 10            | 0.033              |
|                      | 10       | 0.135               | 1.871           | 10            | 0.034              |
|                      | 11       | 0.135               | 1.871           | 10            | 0.035              |
|                      | 12       | 0.135               | 1.897           | 10            | 0.035              |
|                      | 13       | 0.135               | 1.922           | 10            | 0.036              |
|                      | 14       | 0.135               | 1.948           | 10            | 0.037              |
|                      | 15       | 0.135               | 1.948           | 10            | 0.037              |



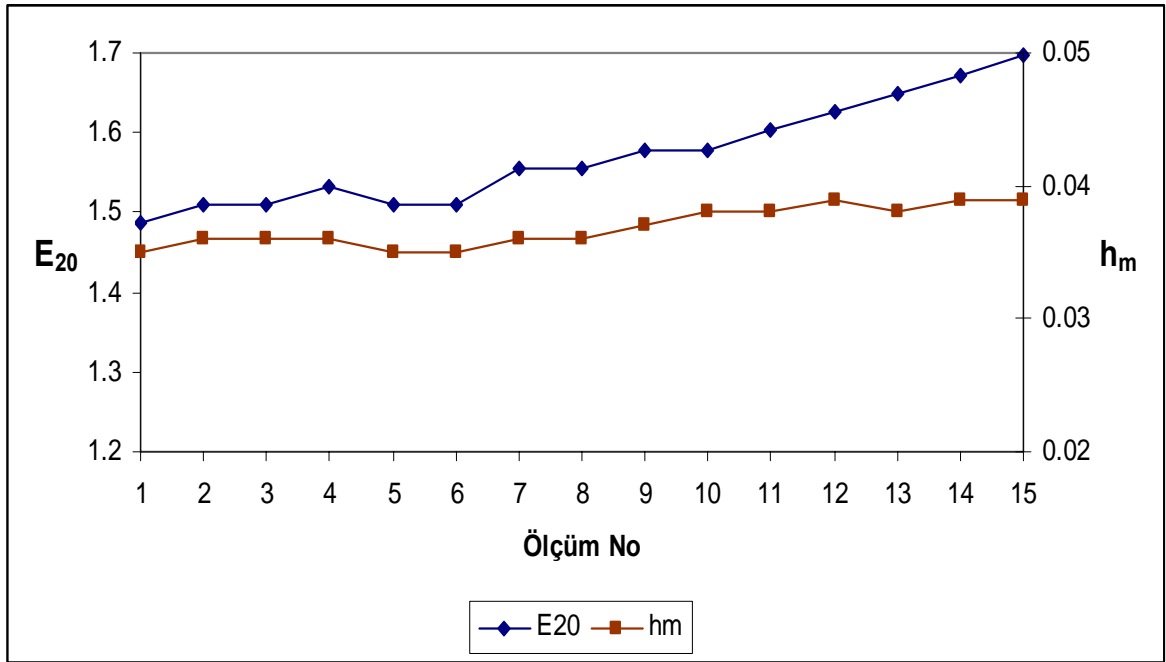
Şekil 40. Düz tabanlı savakta çıkış suyu derinliğinin havalanmaya etkisi ( $Q_1 = 0.10$  l/sn)



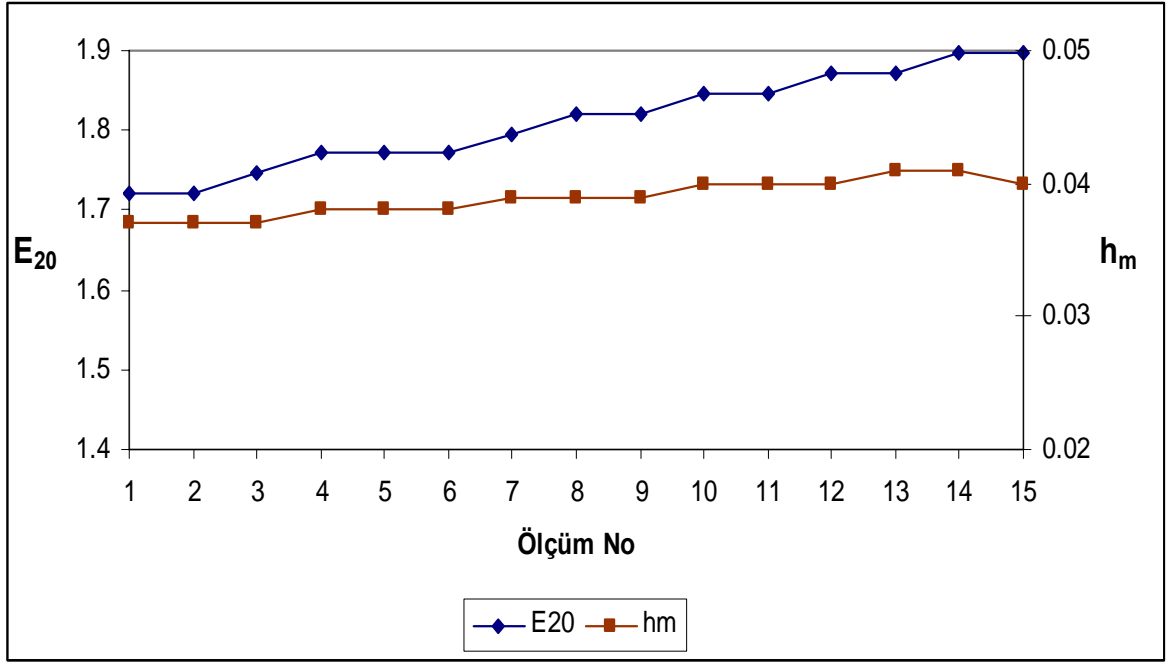
Şekil 41. Düz tabanlı savakta çıkış suyu derinliğinin havalanmaya etkisi ( $Q_2 = 0.15$  l/sn)



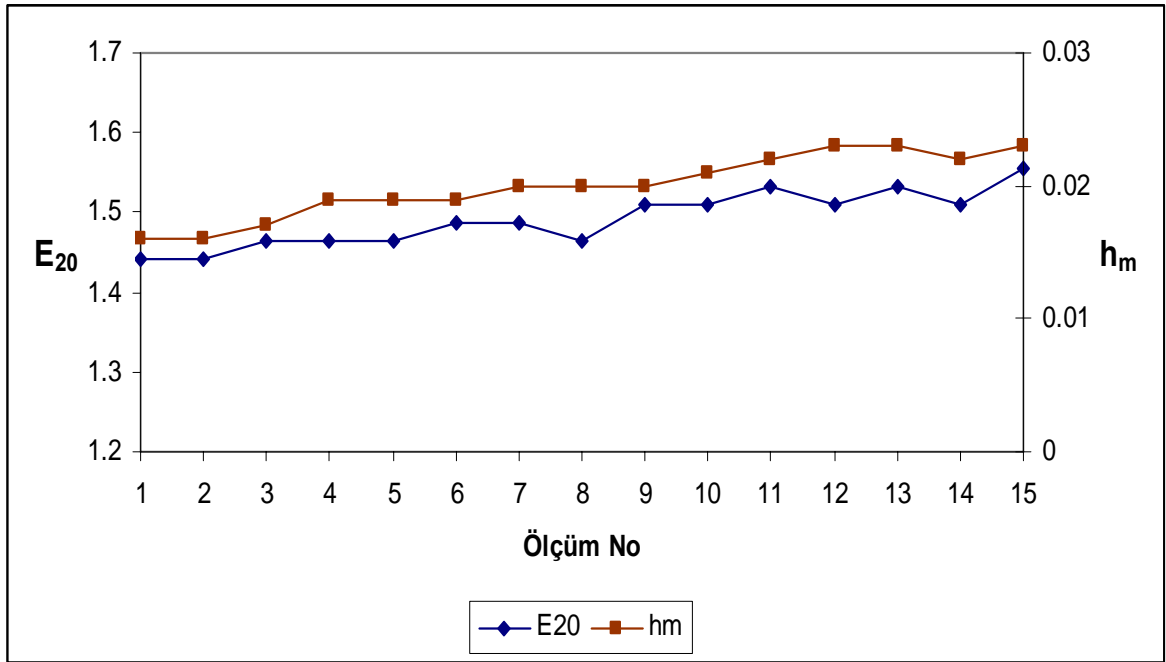
Şekil 42. Düz tabanlı savakta çıkış suyu derinliğinin havalanmaya etkisi ( $Q_3 = 0.20$  l/sn)



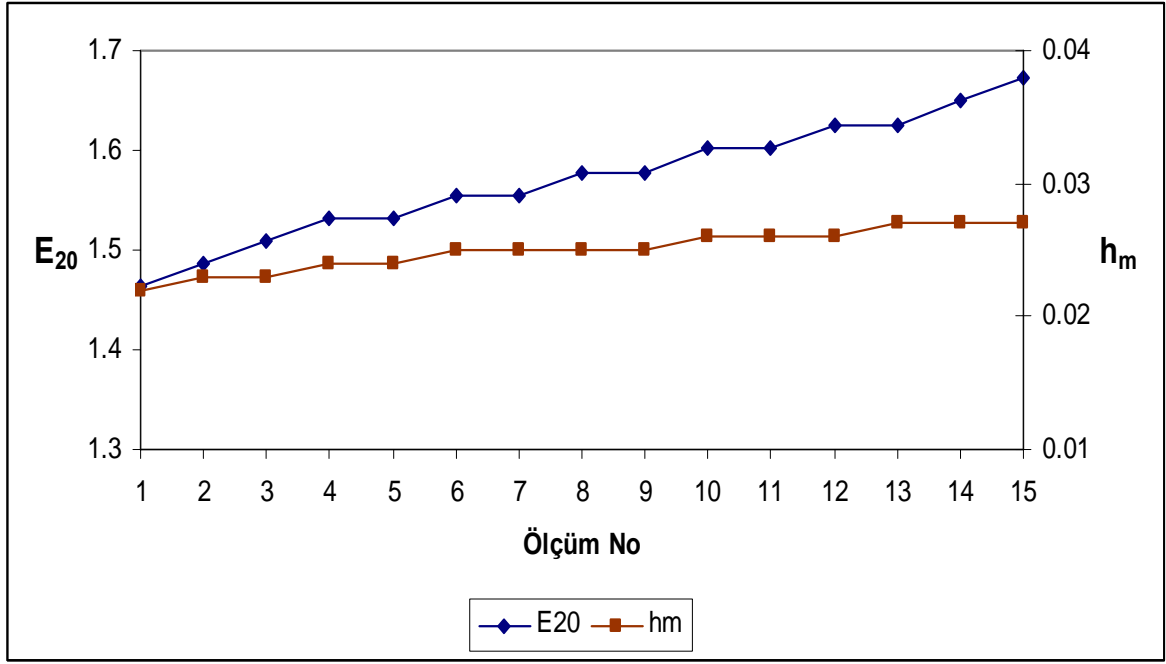
Şekil 43. Düz tabanlı savakta çıkış suyu derinliğinin havalanmaya etkisi ( $Q_4 = 0.32$  l/sn)



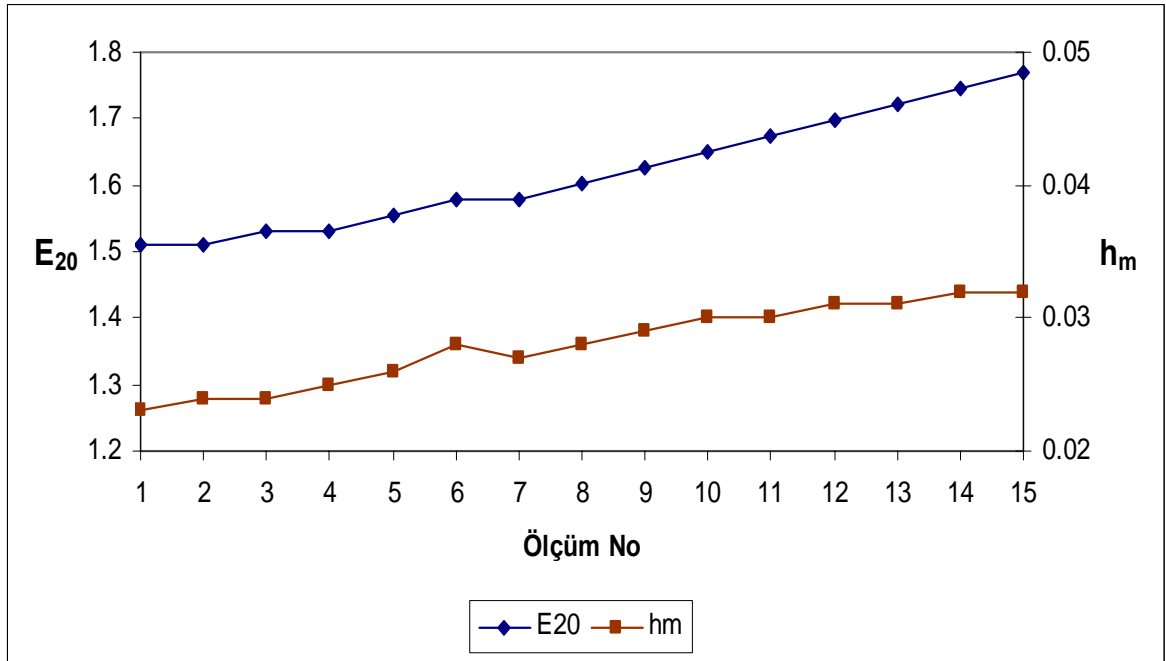
Şekil 44. Düz tabanlı savakta çıkış suyu derinliğinin havalanmaya etkisi ( $Q_5 = 0.40$  l/sn)



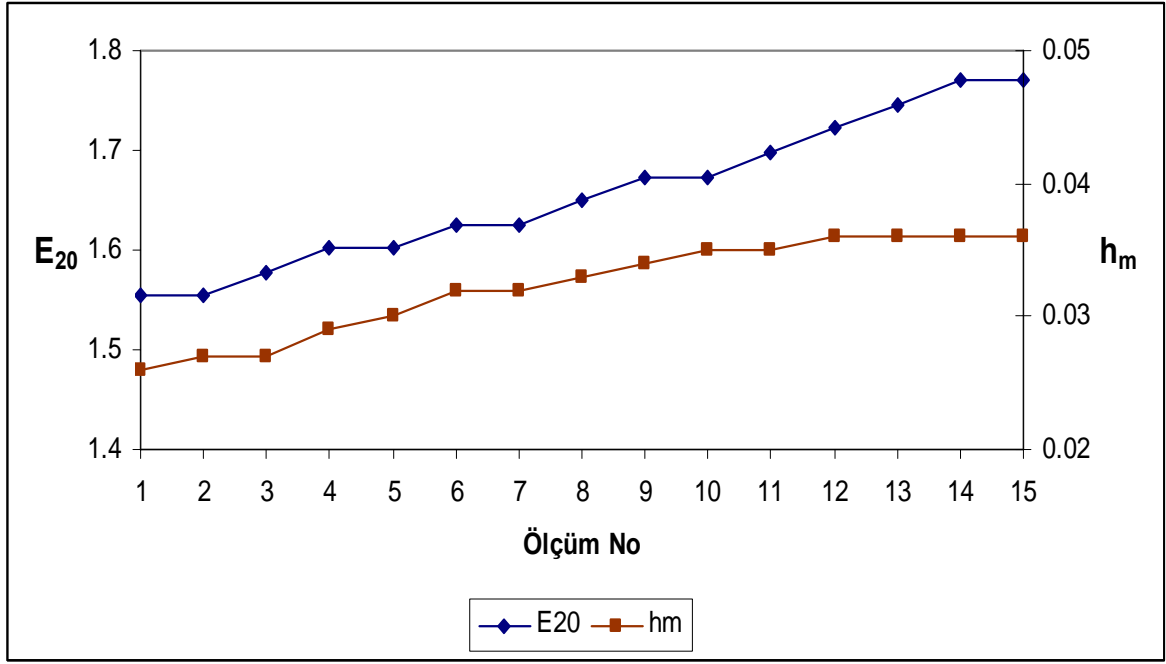
Şekil 45. Basamaklı savakta çıkış suyu derinliğinin havalanmaya etkisi ( $Q_1 = 0.10$  l/sn)



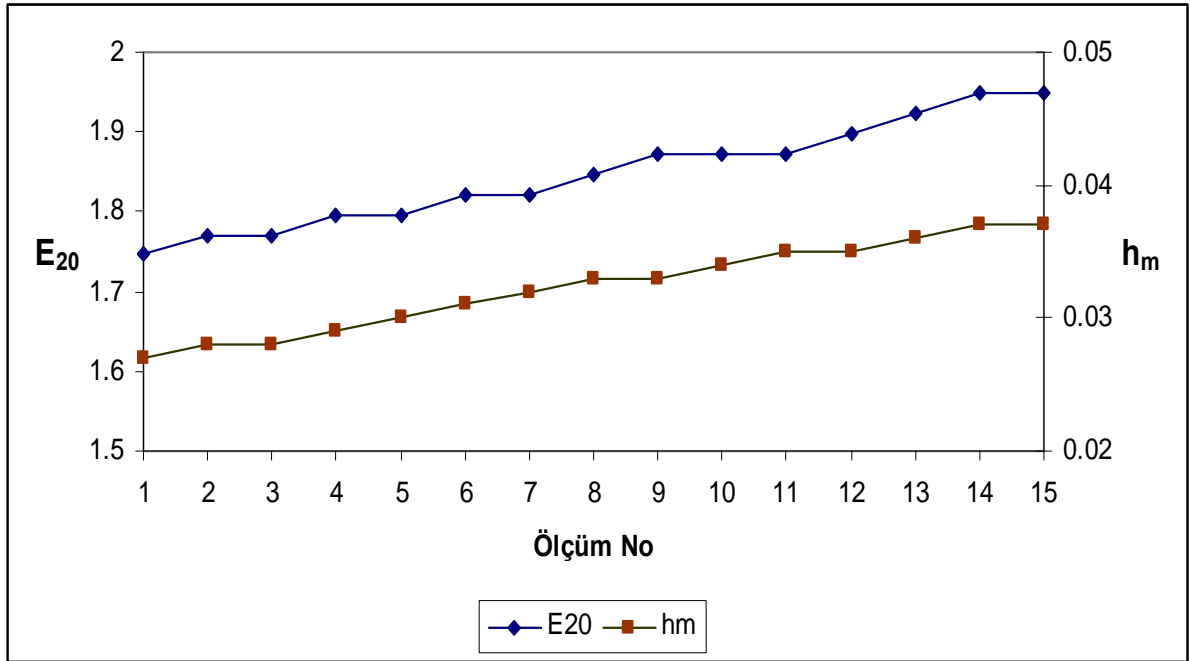
Şekil 46. Basamaklı savakta çıkış suyu derinliğinin havalanmaya etkisi ( $Q_2 = 0.15$  l/sn)



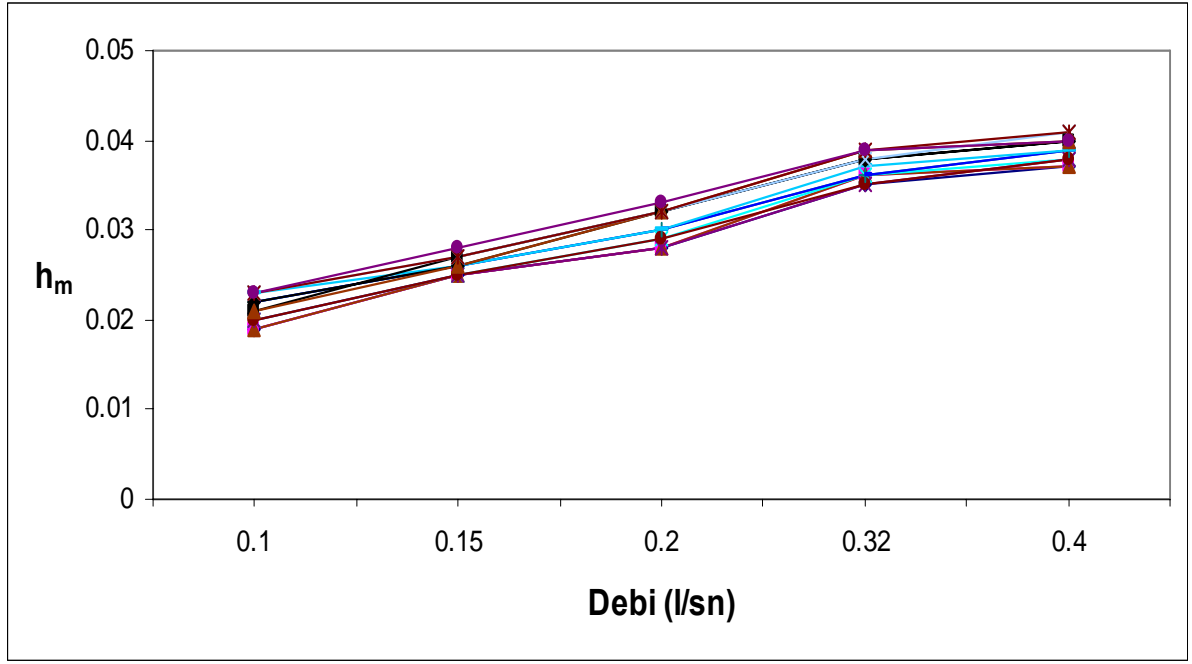
Şekil 47. Basamaklı savakta çıkış suyu derinliğinin havalanmaya etkisi ( $Q_3 = 0.20$  l/sn)



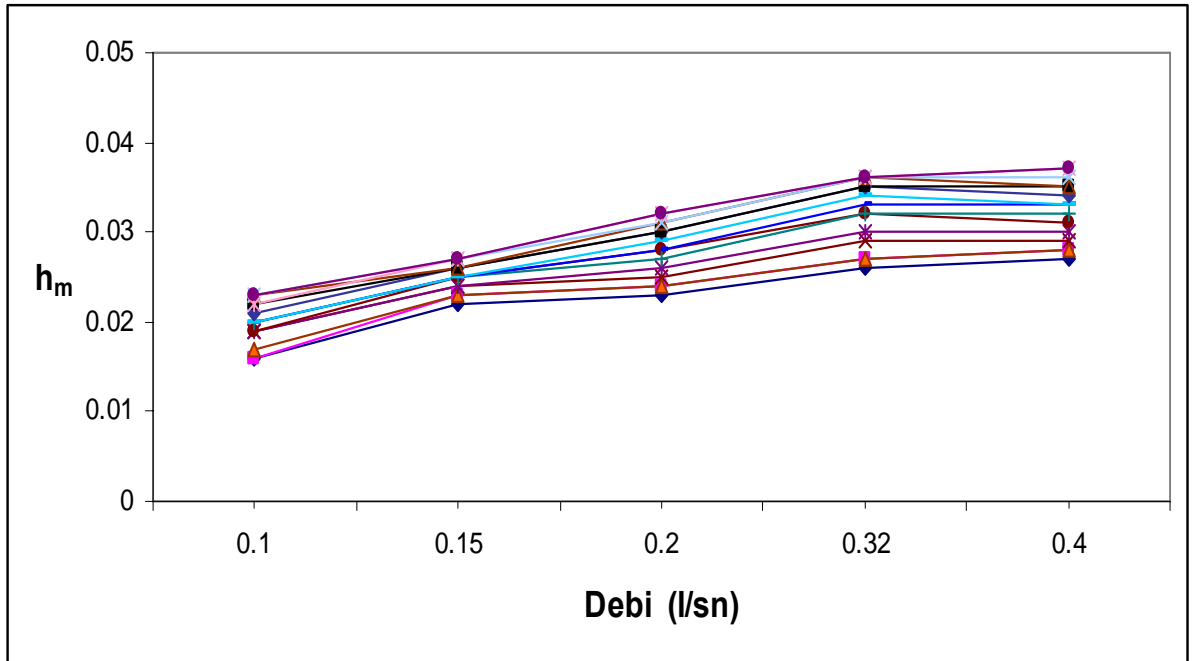
Şekil 48. Basamaklı savakta çıkış suyu derinliğinin havalanmaya etkisi ( $Q_4 = 0.32$  l/sn)



Şekil 49. Basamaklı savakta çıkış suyu derinliğinin havalanmaya etkisi ( $Q_5 = 0.40$  l/sn)

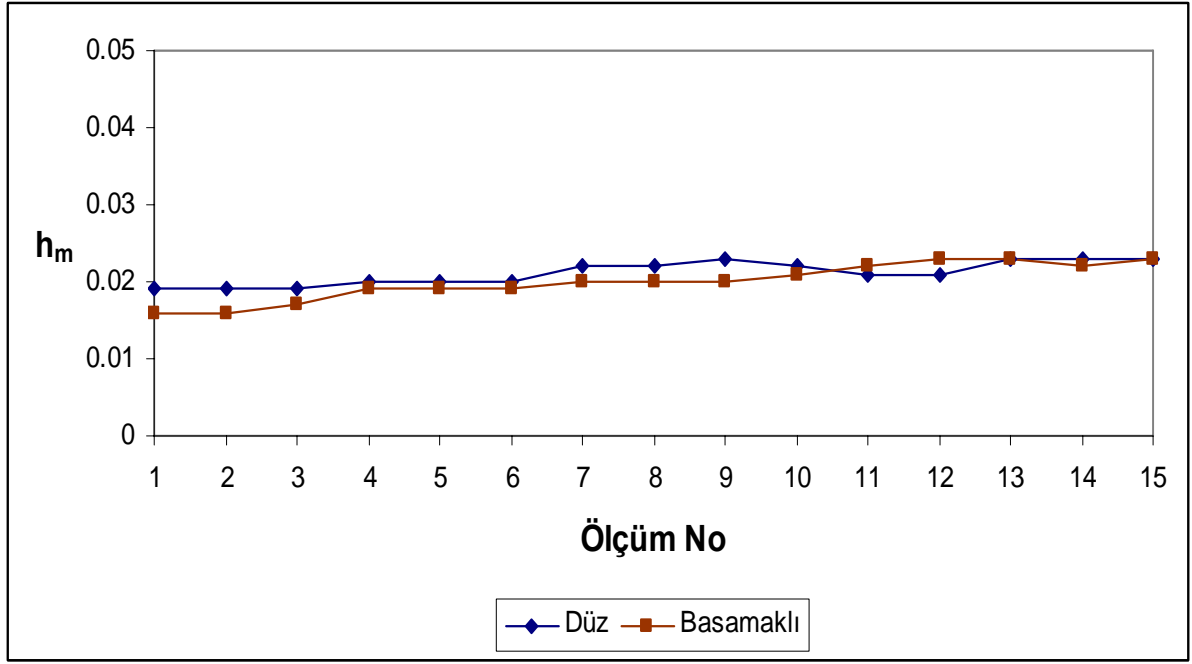


Şekil 50. Düz tabanlı savakta debi-çıkış suyu derinliği ilişkisi

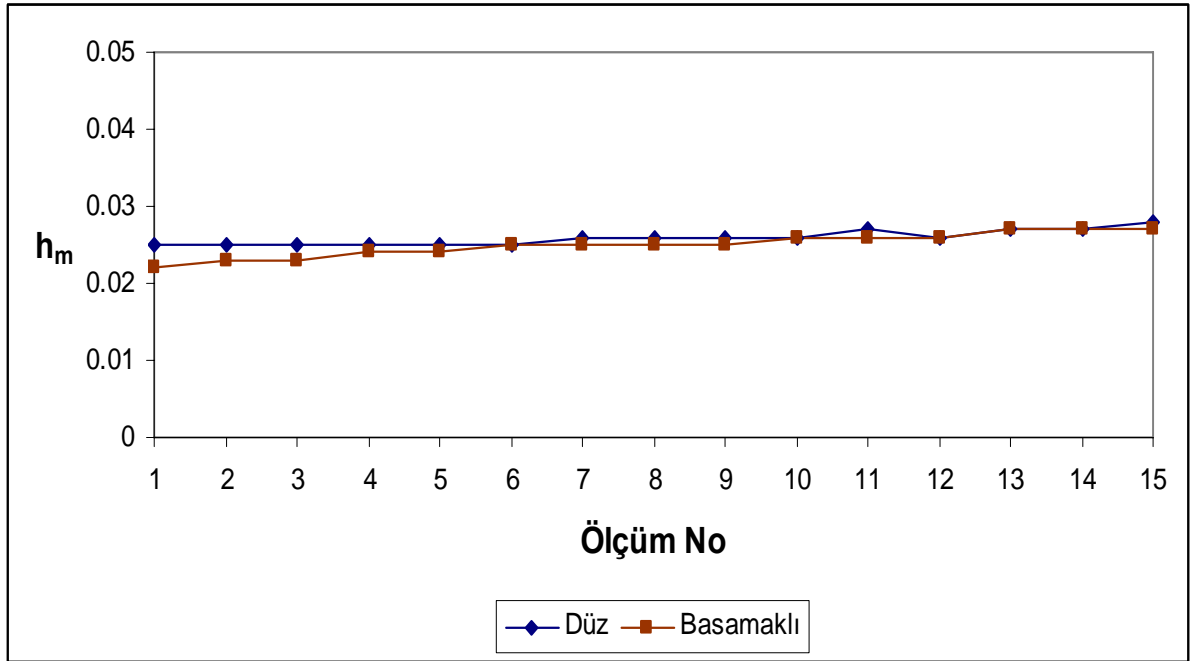


Şekil 51. Basamaklı savakta debi-çıkış suyu derinliği ilişkisi

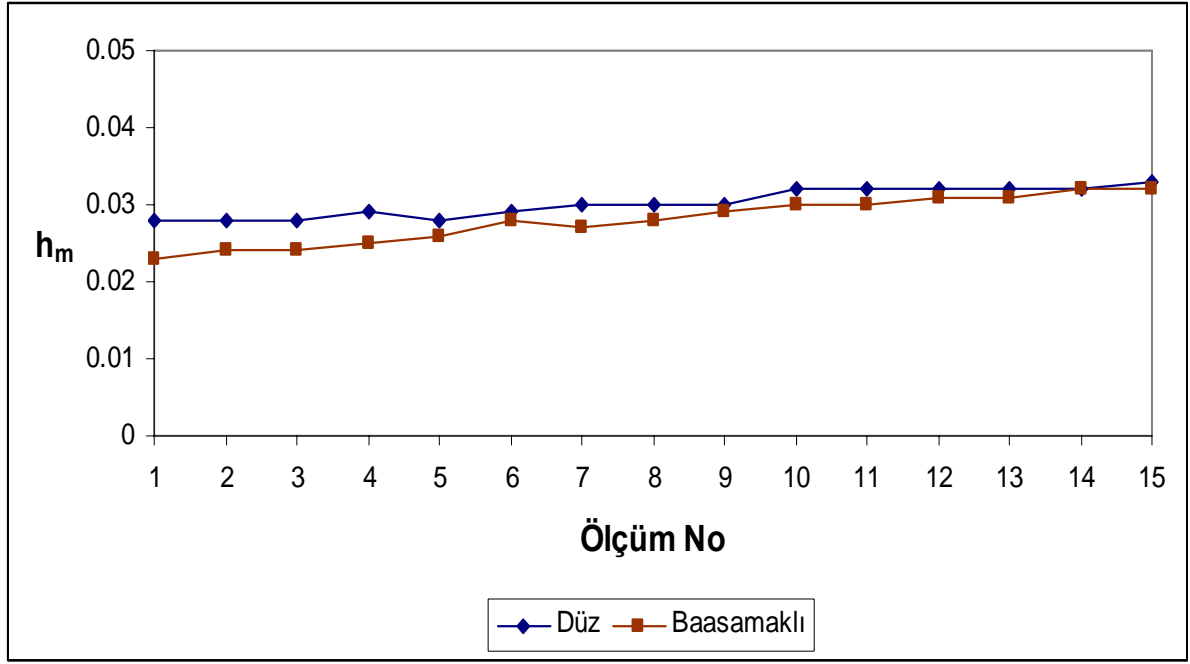




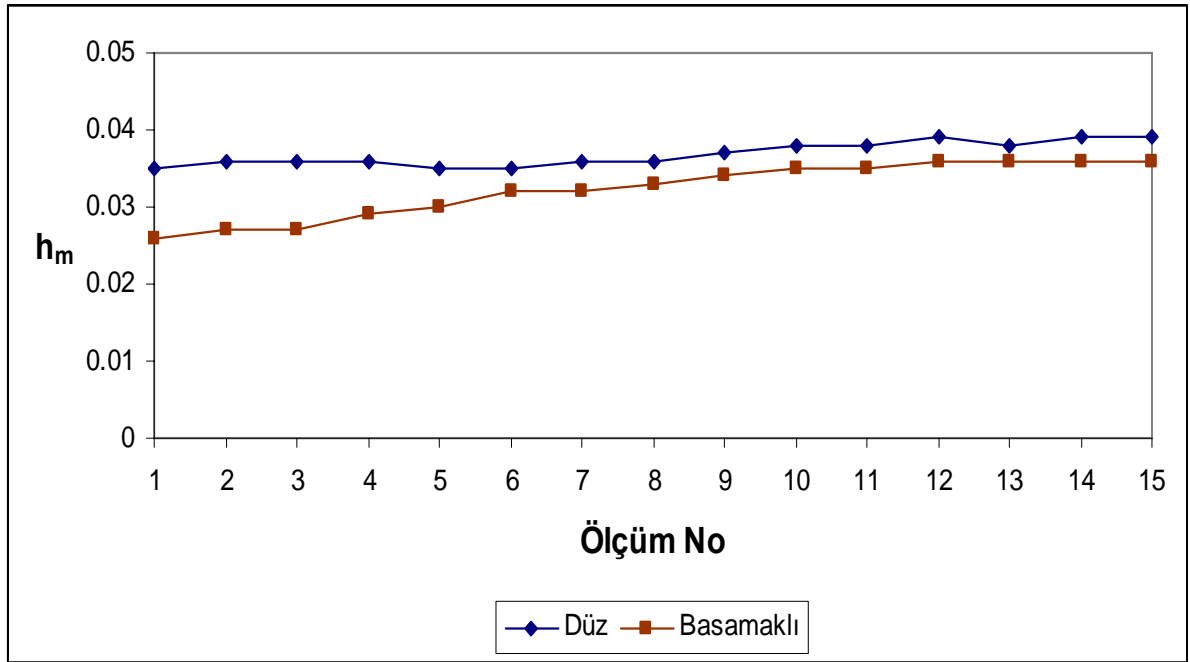
Şekil 52. Savaklarda çıkış suyu derinliklerinin karşılaştırılması ( $Q_1 = 0.10$  l/sn)



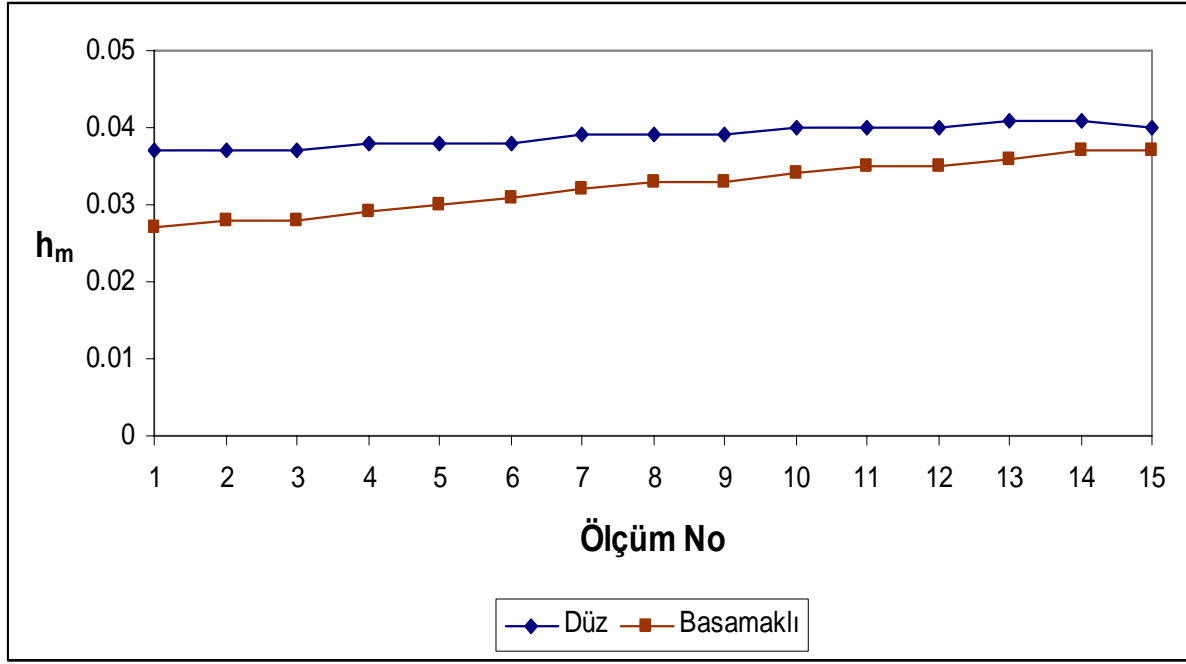
Şekil 53. Savaklarda çıkış suyu derinliklerinin karşılaştırılması ( $Q_2 = 0.15$  l/sn)



Şekil 54. Savaklarda çıkış suyu derinliklerinin karşılaştırılması ( $Q_3 = 0.20$  l/sn)



Şekil 55. Savaklarda çıkış suyu derinliklerinin karşılaştırılması ( $Q_4 = 0.32$  l/sn)



Şekil 56. Savaklarda çıkış suyu derinliklerinin karşılaştırılması ( $Q_5 = 0.40$  l/sn)

#### 2.4.1. Kanal Boyunca Akış

Model çalışma üzerinde oluşturulan savakların memba ve mansabında yapılan ölçümlerden sonra kanal boyunca belirtilen noktalarda çözülmüş oksijen konsantrasyonunun ölçülmesine geçilmiştir. Düz ve basamaklı savakların memba ve mansabında ölçülen değerler yardımıyla gerekli hesaplamalar yapıldıktan ve grafikler çizildikten sonra, mansap boyunca akışın durumu incelenecektir.

Daha önce belirtilen B, C, D ve E noktalarında yine daha önceki ölçümlerde olduğu gibi farklı zamanlarda 15 farklı ölçüm alınmıştır. Mansap noktasında aşırı konsantrasyona ulaşan akımımız, hidrolik yapıdan uzaklaştıkça doygunluk değerine yaklaşacaktır. Kanal boyunca akan suyun çözülmüş oksijen konsantrasyonu azalma eğilimindedir. Bunun nedeni doygunluk konsantrasyonunun çok üstünde olan su, önce doygunluk konsantrasyonuna ulaşacak ve daha sonra da yeterli yüzey havalanmasını sağlayamazsa doygunluk değerinin altına düşecektir.

Tablo 27 ve 28'de kanal boyunca belirlenen noktalardaki çözülmüş oksijen konsantrasyonu değerleri verilmiştir (Şekil 57-66). Tablo 29 ve 30'da ise her bir debi değeri için kanalda oluşan minimum ve maksimum konsantrasyon değerleri gösterilmiştir (Şekil 67-71).

Tablodaki değerler incelendiğinde hem düz savak hem de basamaklı savaklar için mansap tarafında aşıru bir oksijen konsantrasyonu olduğunu görüyoruz. Membadan gelen su mansapta çok yüksek değerlere ulaşmakta ve mansaptan uzaklaşıldıkça bu değer kademeli olarak düşmektedir.

Düz savakta 0.10 lt/sn'lik debi için oksijen konsantrasyonu 13.5 mg/Lt iken maksimum debide bu değer 15.5 mg/Lt olmaktadır. Debi artışıyla birlikte sudaki oksijen konsantrasyonu artmaktadır. Düşük debide jetin hızı yavaş, penetrasyon derinliği küçük iken debi arttıkça jet hızı ve açısıyla birlikte penetrasyon derinliği de artar. Bu durumda havalanma dalış anında ve jet salınımı ile olur. Mansaptan uzaklaşıldıkça konsantrasyon değeri azalmaktadır fakat deney düzeneğinin küçük olması sebebiyle suyun aşıru konsantrasyondan kurtulduğu durum gözlenememiştir.

Basamaklı savakta ise durum farklıdır. 0.10 lt/sn'lik debide akım nap rejiminde oluşmuş hemen mansapta (B noktası) gözlenen konsantrasyon değeri, sıfır eğim için 13.8 mg/Lt olmuştur. Yine aynı şekilde 0.15 ve 0.20 lt/sn'lik debilerde de nap akım rejimi gözlenmiş ve oksijen konsantrasyonunda bir artış oluşmuştur. Bunun sebebi debinin artmasıyla jet hızının artması, dalışın gerçekleşmesi ve hidrolik sıçramanın daha uzun ve etkili gerçekleşmesidir. Nap akımı rejiminde su bir basamaktan diğerine akmakta ve havalanma basamaklar üzerinde gerçekleşmektedir. Basamağın dikey kenarından çıkan jet diğer basamağın üzerine düşmekte ve burada kısmi bir hidrolik sıçrama oluşturmaktadır. Debinin belli bir değeri geçmesinden sonra akım rejimi değişmekte, 0.32 ve 0.40 lt/sn'lik debilerde akım sıçramalı akım rejimine geçmektedir. Havalanma , düz bir akış gösteren akımın yüzeyinde serbest havalanma şeklinde ve bu akışın altında, basamakların arasında kalan bölgede çevrintiler aracılığı ile olmaktadır. Hava kabarcıkları yüzeye yakın bölgede, mansabın hemen başlangıcından itibaren gözükmektedir.

Tablolarda verilen değerler daha sonra grafikler ile açıklanmaya ve analiz edilmeye çalışılmıştır. Çözünmüş oksijen konsantrasyonun kanal boyunca yani bir akarsu boyunca farklı debiler ve mesafeler ile nasıl değişeceğini belirlememize yardımcı olacak matematiksel modele geçilmiş ve ilgili denklemler ile eğriler çıkarılmıştır.

Tablo 23. Düz tabanlı savakta kanal boyunca oluşan çözülmüş oksijen konsantrasyonu değerleri

| DEBİ              | Ölçüm No | C <sub>B</sub><br>(mg/l) | C <sub>C</sub><br>(mg/l) | C <sub>D</sub><br>(mg/l) | C <sub>E</sub><br>(mg/l) |
|-------------------|----------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| $Q_1 = 0.10$ l/sn | 1        | 13.5                     | 13.1                     | 13.0                     | 12.8                     |
|                   | 2        | 13.5                     | 13.2                     | 13.1                     | 12.8                     |
|                   | 3        | 13.5                     | 13.2                     | 13.1                     | 12.9                     |
|                   | 4        | 13.6                     | 13.2                     | 13.0                     | 12.9                     |
|                   | 5        | 13.6                     | 13.2                     | 13.1                     | 12.9                     |
|                   | 6        | 13.6                     | 13.3                     | 13.1                     | 13.0                     |
|                   | 7        | 13.7                     | 13.3                     | 13.2                     | 13.1                     |
|                   | 8        | 13.7                     | 13.3                     | 13.2                     | 13.1                     |
|                   | 9        | 13.6                     | 13.2                     | 13.1                     | 13.0                     |
|                   | 10       | 13.7                     | 13.3                     | 13.1                     | 13.0                     |
|                   | 11       | 13.6                     | 13.3                     | 13.3                     | 13.1                     |
|                   | 12       | 13.8                     | 13.4                     | 13.3                     | 13.1                     |
|                   | 13       | 13.8                     | 13.4                     | 13.4                     | 13.2                     |
|                   | 14       | 13.9                     | 13.5                     | 13.4                     | 13.3                     |
|                   | 15       | 13.9                     | 13.6                     | 13.5                     | 13.4                     |
| $Q_2 = 0.15$ l/sn | 1        | 13.7                     | 13.5                     | 13.2                     | 13.0                     |
|                   | 2        | 13.7                     | 13.5                     | 13.3                     | 13.0                     |
|                   | 3        | 13.8                     | 13.6                     | 13.3                     | 13.1                     |
|                   | 4        | 13.9                     | 13.6                     | 13.3                     | 13.1                     |
|                   | 5        | 13.9                     | 13.7                     | 13.4                     | 13.1                     |
|                   | 6        | 14.0                     | 13.7                     | 13.4                     | 13.2                     |
|                   | 7        | 14.0                     | 13.8                     | 13.5                     | 13.3                     |
|                   | 8        | 14.1                     | 13.8                     | 13.6                     | 13.3                     |
|                   | 9        | 14.1                     | 13.9                     | 13.6                     | 13.3                     |
|                   | 10       | 14.2                     | 13.9                     | 13.6                     | 13.4                     |
|                   | 11       | 14.2                     | 13.9                     | 13.6                     | 13.5                     |
|                   | 12       | 14.2                     | 14.0                     | 13.7                     | 13.6                     |
|                   | 13       | 14.2                     | 14.1                     | 13.8                     | 13.6                     |
|                   | 14       | 14.3                     | 14.1                     | 13.8                     | 13.6                     |
|                   | 15       | 14.3                     | 14.1                     | 13.9                     | 13.7                     |
| $Q_3 = 0.20$ l/sn | 1        | 13.9                     | 13.7                     | 13.4                     | 13.2                     |
|                   | 2        | 13.9                     | 13.7                     | 13.5                     | 13.2                     |
|                   | 3        | 14.1                     | 13.8                     | 13.5                     | 13.3                     |
|                   | 4        | 14.0                     | 13.8                     | 13.6                     | 13.4                     |
|                   | 5        | 14.1                     | 13.8                     | 13.6                     | 13.4                     |
|                   | 6        | 14.2                     | 13.9                     | 13.7                     | 13.5                     |
|                   | 7        | 14.2                     | 14.0                     | 13.8                     | 13.6                     |
|                   | 8        | 14.3                     | 14.1                     | 13.8                     | 13.6                     |

Tablo 23'ün devamı

| DEBİ              | Ölçüm No | C <sub>B</sub><br>(mg/l) | C <sub>C</sub><br>(mg/l) | C <sub>D</sub><br>(mg/l) | C <sub>E</sub><br>(mg/l) |
|-------------------|----------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| $Q_3 = 0.20$ l/sn | 9        | 14.3                     | 14.1                     | 14.0                     | 13.8                     |
|                   | 10       | 14.4                     | 14.1                     | 14.0                     | 13.9                     |
|                   | 11       | 14.4                     | 14.2                     | 14.0                     | 13.9                     |
|                   | 12       | 14.5                     | 14.2                     | 14.1                     | 14.0                     |
|                   | 13       | 14.5                     | 14.3                     | 14.1                     | 14.0                     |
|                   | 14       | 14.6                     | 14.4                     | 14.2                     | 14.1                     |
|                   | 15       | 14.6                     | 14.4                     | 14.3                     | 14.1                     |
| $Q_4 = 0.32$ l/sn | 1        | 14.0                     | 13.7                     | 13.5                     | 13.2                     |
|                   | 2        | 14.1                     | 13.7                     | 13.5                     | 13.3                     |
|                   | 3        | 14.1                     | 13.8                     | 13.5                     | 13.3                     |
|                   | 4        | 14.2                     | 13.9                     | 13.6                     | 13.4                     |
|                   | 5        | 14.1                     | 13.9                     | 13.6                     | 13.4                     |
|                   | 6        | 14.1                     | 14.0                     | 13.7                     | 13.5                     |
|                   | 7        | 14.3                     | 14.1                     | 13.7                     | 13.5                     |
|                   | 8        | 14.3                     | 14.1                     | 13.8                     | 13.6                     |
|                   | 9        | 14.4                     | 14.1                     | 13.9                     | 13.7                     |
|                   | 10       | 14.4                     | 14.2                     | 13.9                     | 13.7                     |
|                   | 11       | 14.5                     | 14.3                     | 14.0                     | 13.8                     |
|                   | 12       | 14.6                     | 14.3                     | 14.2                     | 13.9                     |
|                   | 13       | 14.7                     | 14.4                     | 14.2                     | 14.0                     |
|                   | 14       | 14.8                     | 14.5                     | 14.3                     | 14.1                     |
|                   | 15       | 14.9                     | 14.6                     | 14.3                     | 14.1                     |
| $Q_5 = 0.40$ l/sn | 1        | 15.0                     | 14.6                     | 14.3                     | 14.0                     |
|                   | 2        | 15.0                     | 14.6                     | 14.3                     | 14.0                     |
|                   | 3        | 15.1                     | 14.7                     | 14.3                     | 14.1                     |
|                   | 4        | 15.2                     | 14.7                     | 14.4                     | 14.2                     |
|                   | 5        | 15.2                     | 14.8                     | 14.5                     | 14.2                     |
|                   | 6        | 15.2                     | 14.9                     | 14.5                     | 14.2                     |
|                   | 7        | 15.3                     | 14.9                     | 14.6                     | 14.2                     |
|                   | 8        | 15.4                     | 14.9                     | 14.6                     | 14.3                     |
|                   | 9        | 15.4                     | 15.0                     | 14.6                     | 14.4                     |
|                   | 10       | 15.5                     | 15.1                     | 14.7                     | 14.5                     |
|                   | 11       | 15.5                     | 15.1                     | 14.8                     | 14.5                     |
|                   | 12       | 15.6                     | 15.2                     | 14.9                     | 14.6                     |
|                   | 13       | 15.6                     | 15.3                     | 14.9                     | 14.6                     |
|                   | 14       | 15.7                     | 15.3                     | 15.0                     | 14.7                     |
|                   | 15       | 15.7                     | 15.3                     | 15.0                     | 14.8                     |

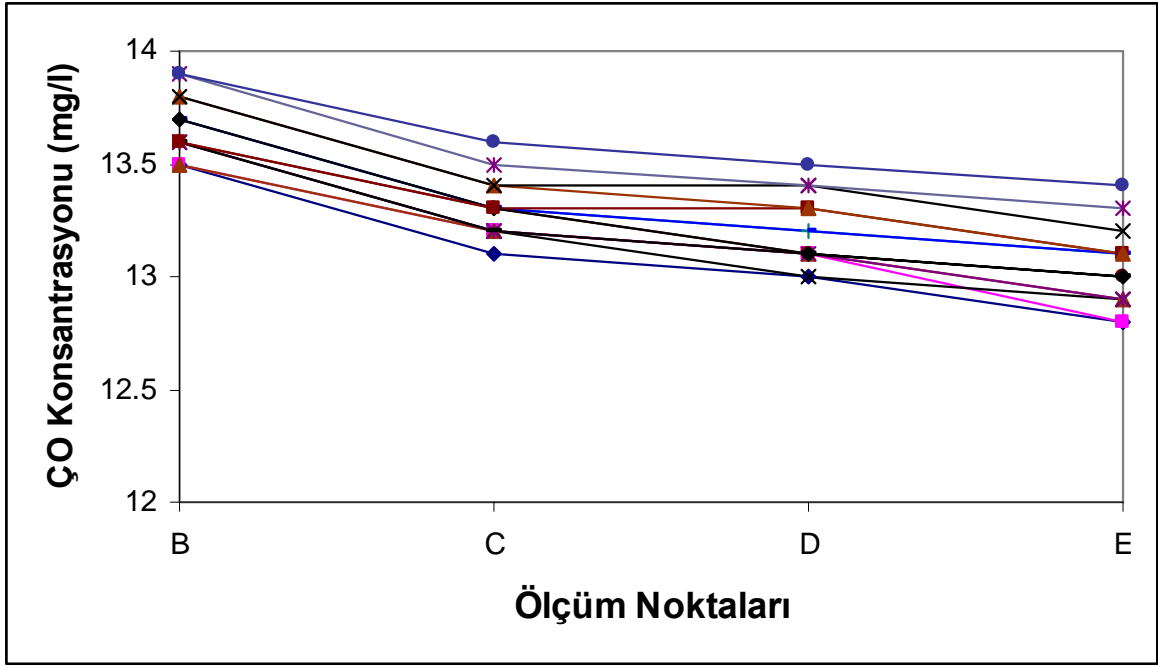
Tablo 24. Basamaklı savakta kanal boyunca oluşan çözülmüş oksijen konsantrasyonu değerleri

| DEBİ              | Ölçüm No | C <sub>B</sub><br>(mg/l) | C <sub>C</sub><br>(mg/l) | C <sub>D</sub><br>(mg/l) | C <sub>E</sub><br>(mg/l) |
|-------------------|----------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| $Q_1 = 0.10$ l/sn | 1        | 13.8                     | 13.6                     | 13.3                     | 13.0                     |
|                   | 2        | 13.8                     | 13.7                     | 13.4                     | 13.2                     |
|                   | 3        | 13.9                     | 13.8                     | 13.5                     | 13.2                     |
|                   | 4        | 13.9                     | 13.8                     | 13.6                     | 13.2                     |
|                   | 5        | 13.9                     | 13.8                     | 13.7                     | 13.3                     |
|                   | 6        | 14.0                     | 13.8                     | 13.7                     | 13.3                     |
|                   | 7        | 14.0                     | 13.9                     | 13.8                     | 13.4                     |
|                   | 8        | 13.9                     | 13.8                     | 13.8                     | 13.4                     |
|                   | 9        | 14.1                     | 13.9                     | 13.7                     | 13.5                     |
|                   | 10       | 14.1                     | 14.0                     | 13.8                     | 13.5                     |
|                   | 11       | 14.2                     | 14.0                     | 13.9                     | 13.5                     |
|                   | 12       | 14.1                     | 14.0                     | 14.0                     | 13.6                     |
|                   | 13       | 14.2                     | 14.1                     | 14.0                     | 13.7                     |
|                   | 14       | 14.1                     | 14.1                     | 14.0                     | 13.7                     |
|                   | 15       | 14.3                     | 14.2                     | 14.1                     | 13.8                     |
| $Q_2 = 0.15$ l/sn | 1        | 13.9                     | 13.7                     | 13.4                     | 13.2                     |
|                   | 2        | 14.0                     | 13.7                     | 13.5                     | 13.2                     |
|                   | 3        | 14.1                     | 13.8                     | 13.5                     | 13.3                     |
|                   | 4        | 14.2                     | 13.8                     | 13.6                     | 13.3                     |
|                   | 5        | 14.2                     | 13.9                     | 13.6                     | 13.4                     |
|                   | 6        | 14.3                     | 13.9                     | 13.7                     | 13.5                     |
|                   | 7        | 14.3                     | 14.0                     | 13.8                     | 13.5                     |
|                   | 8        | 14.4                     | 14.0                     | 13.9                     | 13.6                     |
|                   | 9        | 14.4                     | 14.1                     | 13.9                     | 13.6                     |
|                   | 10       | 14.5                     | 14.2                     | 14.0                     | 13.7                     |
|                   | 11       | 14.5                     | 14.3                     | 14.0                     | 13.8                     |
|                   | 12       | 14.6                     | 14.3                     | 14.1                     | 13.9                     |
|                   | 13       | 14.6                     | 14.4                     | 14.2                     | 13.9                     |
|                   | 14       | 14.7                     | 14.5                     | 14.2                     | 14.0                     |
|                   | 15       | 14.8                     | 14.6                     | 14.3                     | 14.1                     |
| $Q_3 = 0.20$ l/sn | 1        | 14.1                     | 13.9                     | 13.7                     | 13.6                     |
|                   | 2        | 14.1                     | 13.9                     | 13.8                     | 13.7                     |
|                   | 3        | 14.2                     | 14.0                     | 13.9                     | 13.8                     |
|                   | 4        | 14.2                     | 14.0                     | 13.9                     | 13.9                     |
|                   | 5        | 14.3                     | 14.1                     | 14.0                     | 13.9                     |
|                   | 6        | 14.4                     | 14.2                     | 14.0                     | 14.0                     |
|                   | 7        | 14.4                     | 14.3                     | 14.1                     | 14.0                     |
|                   | 8        | 14.5                     | 14.3                     | 14.2                     | 14.1                     |

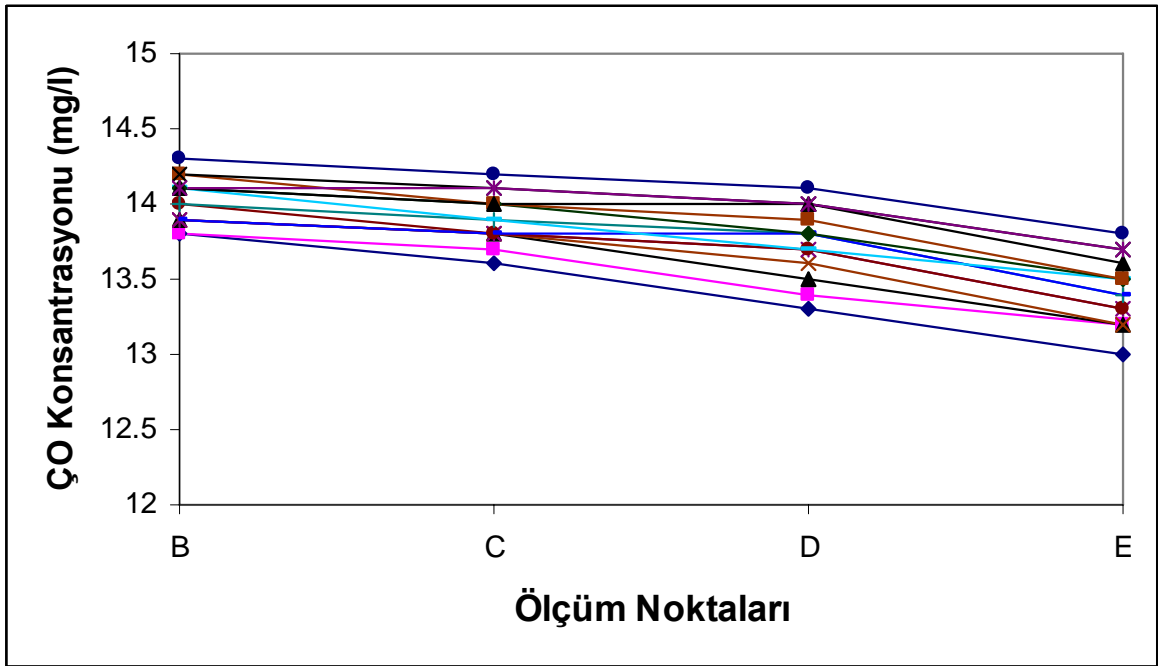
Tablo 24'ün devamı

| DEBİ              | Ölçüm No | C <sub>B</sub><br>(mg/lt) | C <sub>C</sub><br>(mg/lt) | C <sub>D</sub><br>(mg/lt) | C <sub>E</sub><br>(mg/lt) |
|-------------------|----------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| $Q_3 = 0.20$ l/sn | 9        | 14.6                      | 14.4                      | 14.1                      | 14.1                      |
|                   | 10       | 14.7                      | 14.5                      | 14.2                      | 14.1                      |
|                   | 11       | 14.8                      | 14.5                      | 14.3                      | 14.2                      |
|                   | 12       | 14.9                      | 14.6                      | 14.3                      | 14.3                      |
|                   | 13       | 15.0                      | 14.6                      | 14.4                      | 14.4                      |
|                   | 14       | 15.1                      | 14.7                      | 14.5                      | 14.4                      |
|                   | 15       | 15.2                      | 14.8                      | 14.6                      | 14.5                      |
| $Q_4 = 0.32$ l/sn | 1        | 14.3                      | 14.0                      | 13.7                      | 13.5                      |
|                   | 2        | 14.3                      | 14.1                      | 13.8                      | 13.5                      |
|                   | 3        | 14.4                      | 14.1                      | 13.8                      | 13.6                      |
|                   | 4        | 14.5                      | 14.2                      | 13.9                      | 13.7                      |
|                   | 5        | 14.5                      | 14.3                      | 13.9                      | 13.7                      |
|                   | 6        | 14.6                      | 14.4                      | 13.9                      | 13.8                      |
|                   | 7        | 14.6                      | 14.4                      | 14.0                      | 13.9                      |
|                   | 8        | 14.7                      | 14.4                      | 14.1                      | 13.9                      |
|                   | 9        | 14.8                      | 14.5                      | 14.1                      | 14.0                      |
|                   | 10       | 14.8                      | 14.6                      | 14.2                      | 14.1                      |
|                   | 11       | 14.9                      | 14.6                      | 14.3                      | 14.1                      |
|                   | 12       | 15.0                      | 14.6                      | 14.3                      | 14.2                      |
|                   | 13       | 15.1                      | 14.7                      | 14.5                      | 14.3                      |
|                   | 14       | 15.2                      | 14.8                      | 14.5                      | 14.4                      |
|                   | 15       | 15.2                      | 14.9                      | 14.6                      | 14.4                      |
| $Q_5 = 0.40$ l/sn | 1        | 15.1                      | 14.9                      | 14.7                      | 14.6                      |
|                   | 2        | 15.2                      | 15.0                      | 14.8                      | 14.7                      |
|                   | 3        | 15.2                      | 15.0                      | 14.8                      | 14.7                      |
|                   | 4        | 15.3                      | 15.1                      | 14.9                      | 14.7                      |
|                   | 5        | 15.3                      | 15.1                      | 15.0                      | 14.9                      |
|                   | 6        | 15.4                      | 15.2                      | 15.0                      | 14.9                      |
|                   | 7        | 15.4                      | 15.3                      | 15.1                      | 15.0                      |
|                   | 8        | 15.5                      | 15.3                      | 15.1                      | 15.0                      |
|                   | 9        | 15.6                      | 15.3                      | 15.2                      | 15.0                      |
|                   | 10       | 15.6                      | 15.4                      | 15.2                      | 15.1                      |
|                   | 11       | 15.6                      | 15.5                      | 15.2                      | 15.2                      |
|                   | 12       | 15.7                      | 15.5                      | 15.3                      | 15.2                      |
|                   | 13       | 15.8                      | 15.5                      | 15.3                      | 15.3                      |
|                   | 14       | 15.9                      | 15.6                      | 15.3                      | 15.3                      |
|                   | 15       | 15.9                      | 15.6                      | 15.4                      | 15.3                      |

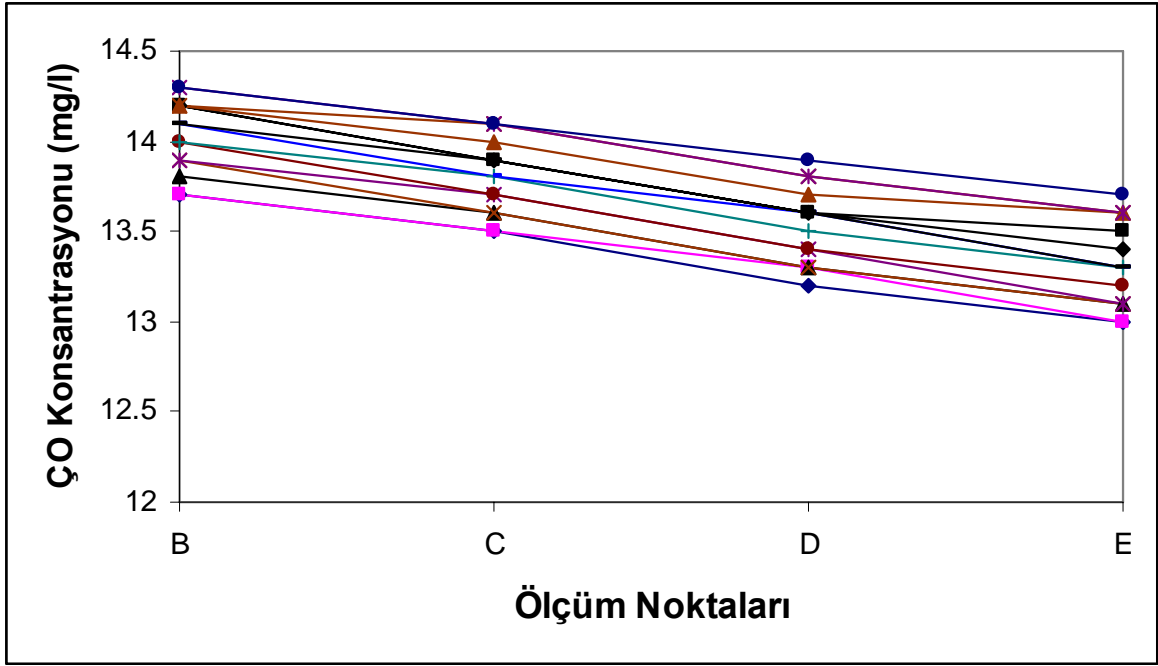




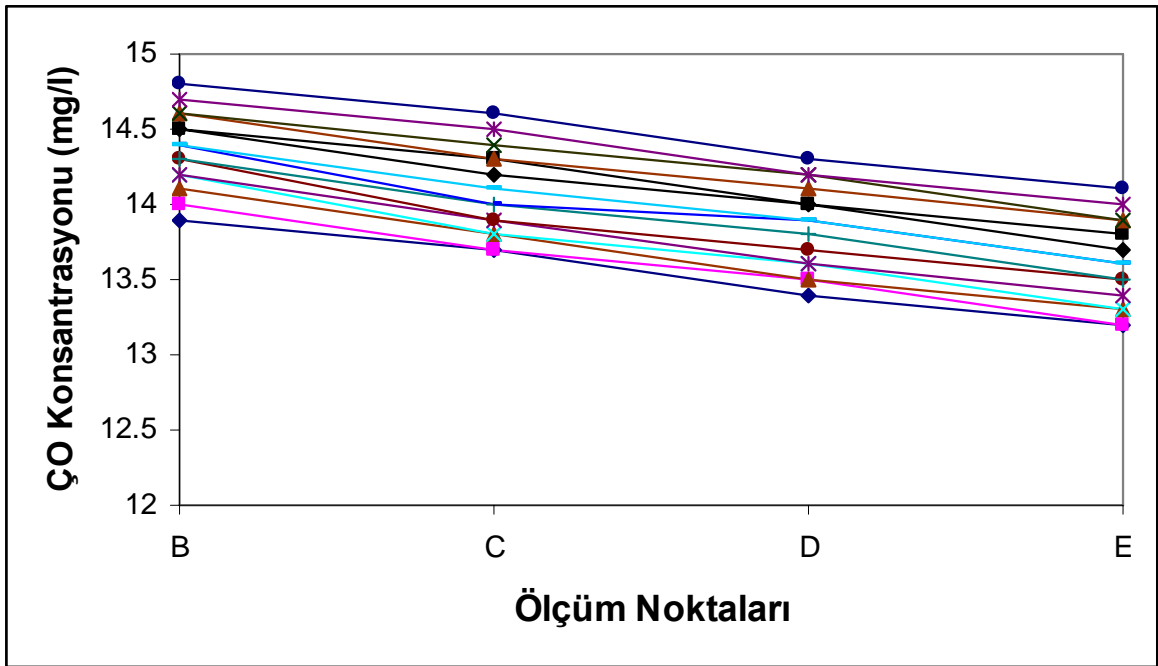
Şekil 57. Düz tabanlı savakta kanal boyunca ÇO konsantrasyonu değişimi ( $Q_1 = 0.10$  l/sn)



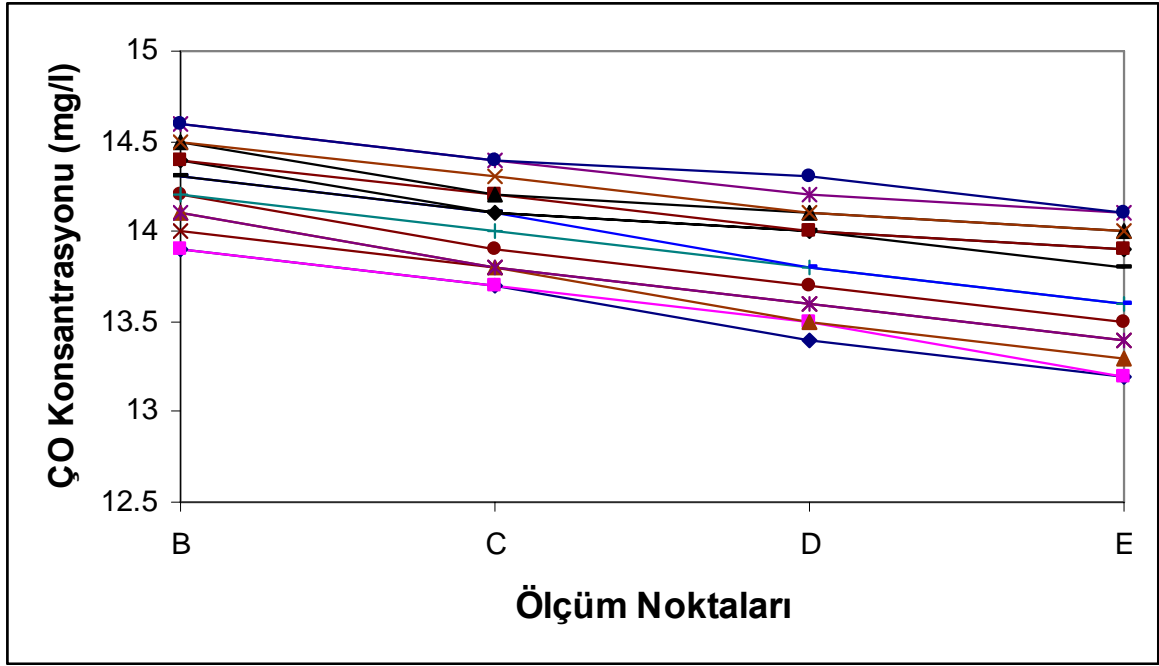
Şekil 58. Basamaklı savakta kanal boyunca ÇO konsantrasyonu değişimi ( $Q_1 = 0.10$  l/sn)



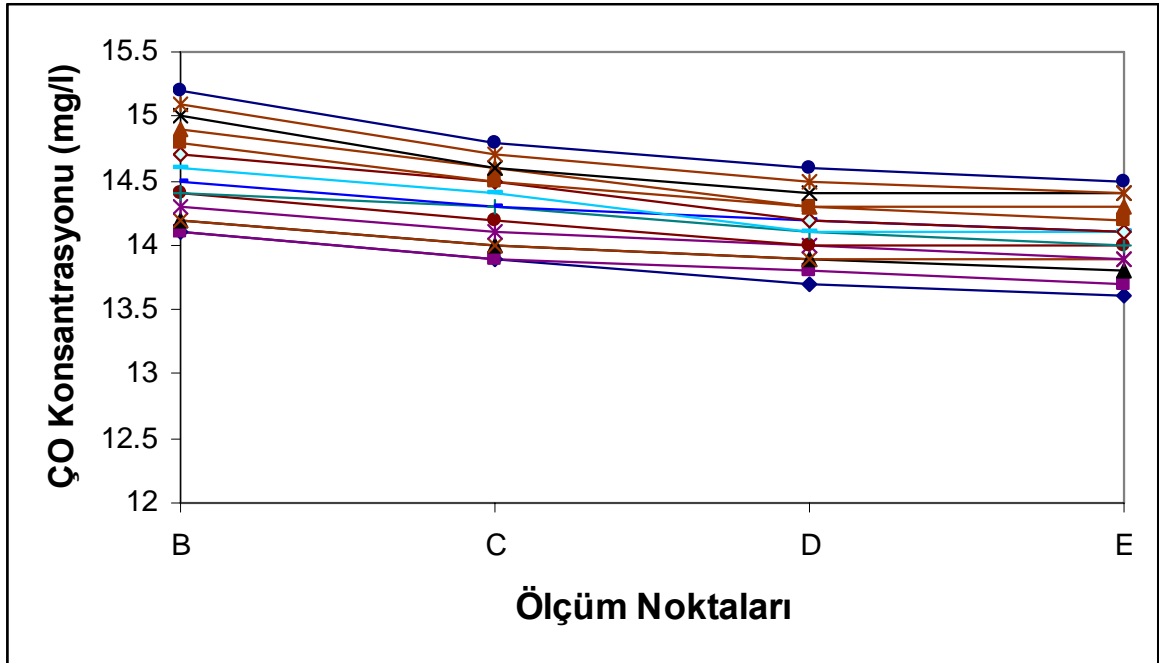
Şekil 59. Düz tabanlı savakta kanal boyunca ÇO konsantrasyonu değişimi ( $Q_2 = 0.15$  l/sn)



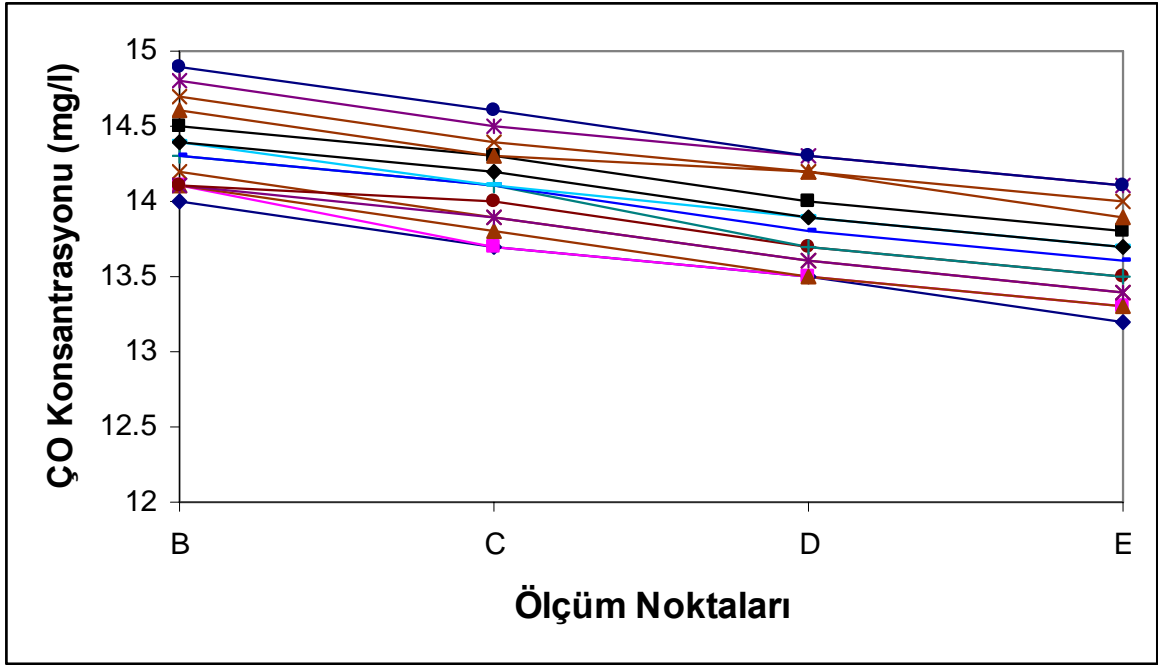
Şekil 60. Basamaklı savakta kanal boyunca ÇO konsantrasyonu değişimi ( $Q_2 = 0.15$  l/sn)



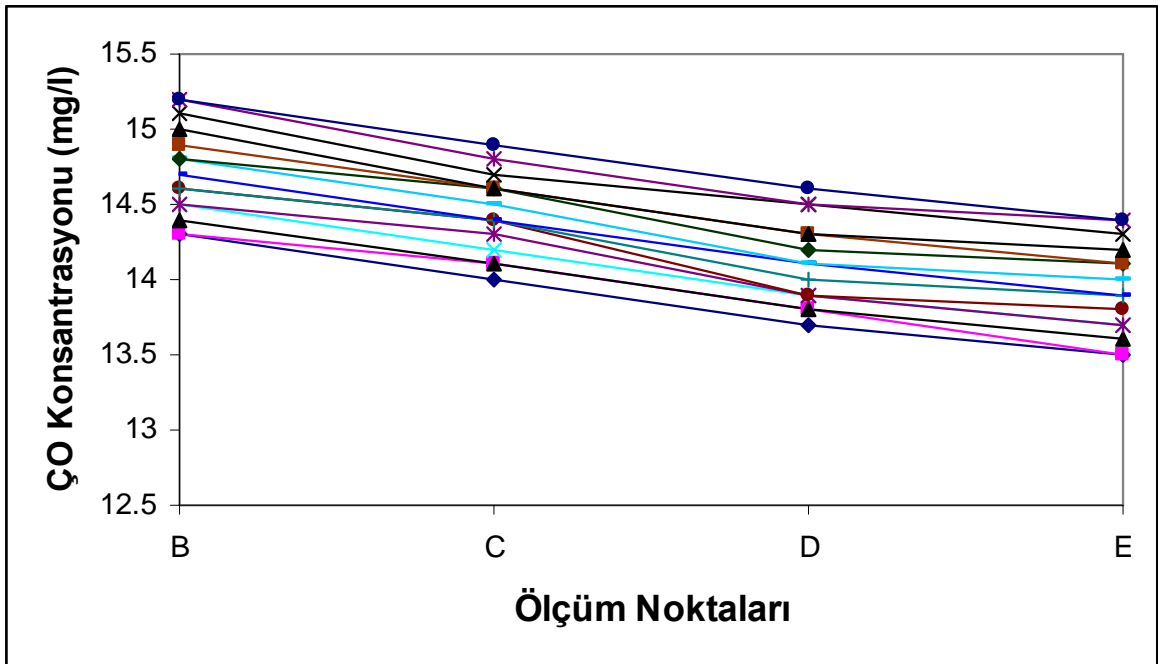
Şekil 61. Düz tabanlı savakta kanal boyunca ÇO konsantrasyonu değişimi ( $Q_3 = 0.20$  l/sn)



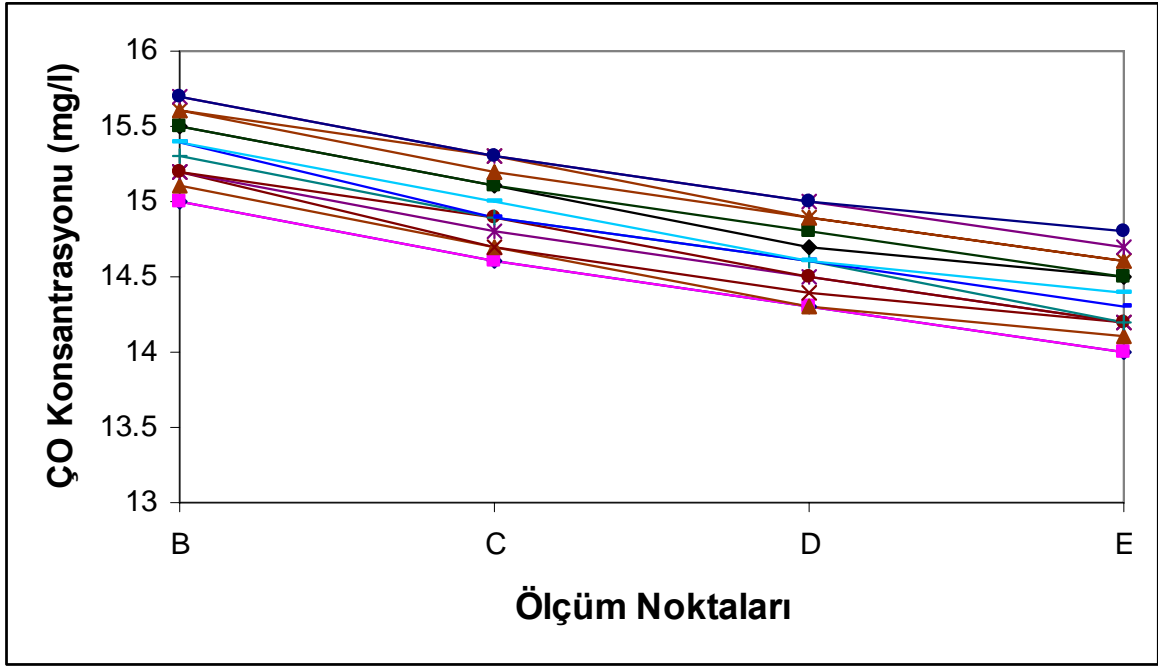
Şekil 62. Basamaklı savakta kanal boyunca ÇO konsantrasyonu değişimi ( $Q_3 = 0.20$  l/sn)



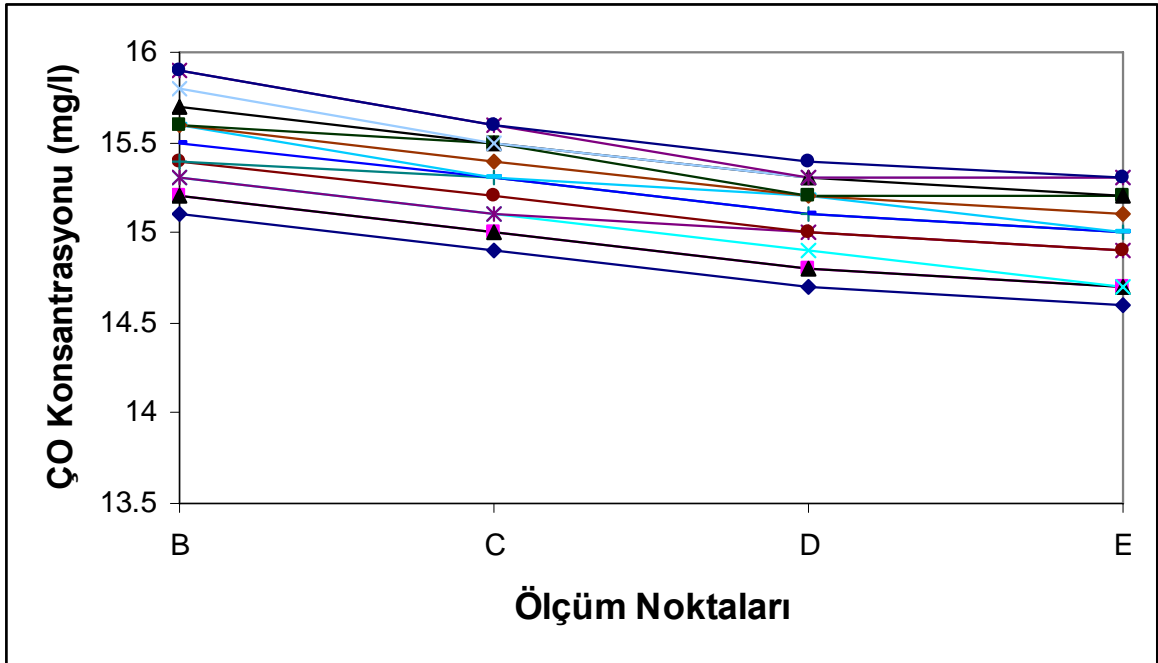
Şekil 63. Düz tabanlı savakta kanal boyunca ÇO konsantrasyonu değişimi ( $Q_4 = 0.32$  l/sn)



Şekil 64. Basamaklı savakta kanal boyunca ÇO konsantrasyonu değişimi ( $Q_4 = 0.32$  l/sn)



Şekil 65. Düz tabanlı savakta kanal boyunca ÇO konsantrasyonu değişimi ( $Q_5 = 0.40$  l/sn)



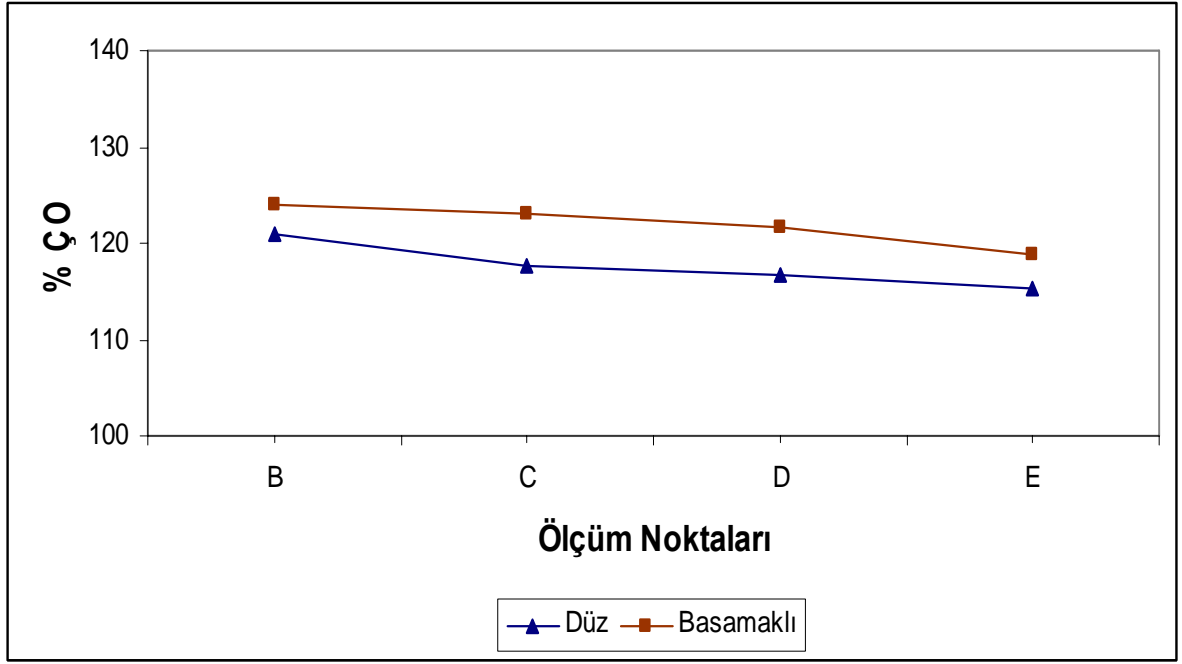
Şekil 66. Basamaklı savakta kanal boyunca ÇO konsantrasyonu değişimi ( $Q_5 = 0.40$  l/sn)

Tablo 25. Düz tabanlı savakta kanal boyunca oluşan CO konsantrasyon yüzdeleri

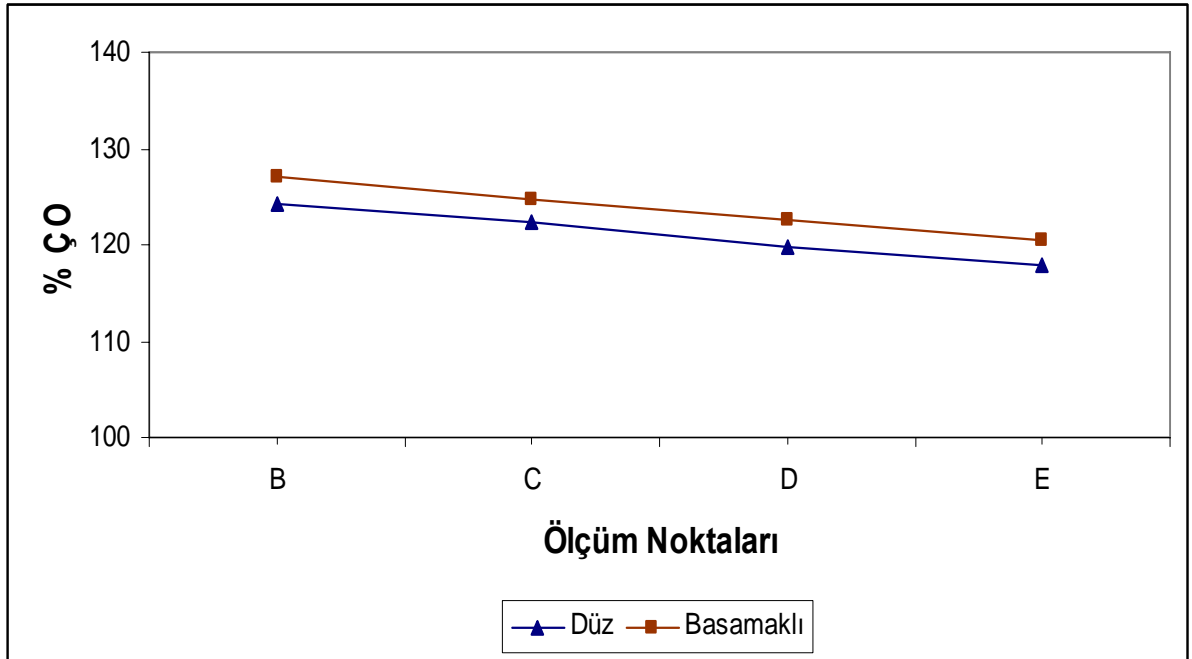
| DEBİ              |                 | C <sub>B</sub><br>(%) | C <sub>C</sub><br>(%) | C <sub>D</sub><br>(%) | C <sub>E</sub><br>(%) |
|-------------------|-----------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| $Q_1 = 0.10$ l/sn | Min.            | 119.5                 | 115.9                 | 115.0                 | 113.3                 |
|                   | Max.            | 123.0                 | 120.4                 | 119.5                 | 118.6                 |
|                   | <i>Ortalama</i> | <i>120.9</i>          | <i>117.7</i>          | <i>116.8</i>          | <i>115.4</i>          |
| $Q_2 = 0.15$ l/sn | Min.            | 121.2                 | 119.5                 | 116.8                 | 115.0                 |
|                   | Max.            | 126.5                 | 124.8                 | 123.0                 | 121.2                 |
|                   | <i>Ortalama</i> | <i>124.2</i>          | <i>122.2</i>          | <i>119.8</i>          | <i>117.9</i>          |
| $Q_3 = 0.20$ l/sn | Min.            | 123.0                 | 121.2                 | 118.6                 | 116.8                 |
|                   | Max.            | 129.2                 | 127.4                 | 126.5                 | 124.8                 |
|                   | <i>Ortalama</i> | <i>126.3</i>          | <i>124.2</i>          | <i>122.5</i>          | <i>120.9</i>          |
| $Q_4 = 0.32$ l/sn | Min.            | 123.9                 | 121.2                 | 119.5                 | 116.8                 |
|                   | Max.            | 131.9                 | 129.2                 | 126.5                 | 124.8                 |
|                   | <i>Ortalama</i> | <i>127.1</i>          | <i>124.8</i>          | <i>122.5</i>          | <i>120.6</i>          |
| $Q_5 = 0.40$ l/sn | Min.            | 132.7                 | 129.2                 | 126.5                 | 123.9                 |
|                   | Max.            | 138.9                 | 135.4                 | 132.7                 | 130.9                 |
|                   | <i>Ortalama</i> | <i>135.9</i>          | <i>132.4</i>          | <i>129.4</i>          | <i>127.0</i>          |

Tablo 26. Basamaklı savakta kanal boyunca oluşan ÇO konsantrasyon yüzdeleri

| DEBİ              |                 | C <sub>B</sub><br>(%) | C <sub>C</sub><br>(%) | C <sub>D</sub><br>(%) | C <sub>E</sub><br>(%) |
|-------------------|-----------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| $Q_1 = 0.10$ l/sn | Min.            | 122.1                 | 120.4                 | 117.7                 | 115.0                 |
|                   | Max.            | 126.5                 | 125.7                 | 124.8                 | 122.1                 |
|                   | <i>Ortalama</i> | <i>124.1</i>          | <i>123.0</i>          | <i>121.7</i>          | <i>118.8</i>          |
| $Q_2 = 0.15$ l/sn | Min.            | 123.0                 | 121.2                 | 118.6                 | 116.8                 |
|                   | Max.            | 130.9                 | 129.2                 | 126.5                 | 124.8                 |
|                   | <i>Ortalama</i> | <i>127.1</i>          | <i>124.6</i>          | <i>122.5</i>          | <i>120.4</i>          |
| $Q_3 = 0.20$ l/sn | Min.            | 124.8                 | 123.0                 | 121.2                 | 120.4                 |
|                   | Max.            | 134.5                 | 130.9                 | 129.2                 | 128.3                 |
|                   | <i>Ortalama</i> | <i>128.9</i>          | <i>126.7</i>          | <i>125.1</i>          | <i>124.5</i>          |
| $Q_4 = 0.32$ l/sn | Min.            | 126.5                 | 123.9                 | 121.2                 | 119.5                 |
|                   | Max.            | 134.5                 | 131.9                 | 129.2                 | 127.4                 |
|                   | <i>Ortalama</i> | <i>130.3</i>          | <i>127.8</i>          | <i>124.8</i>          | <i>123.3</i>          |
| $Q_5 = 0.40$ l/sn | Min.            | 133.6                 | 131.9                 | 130.1                 | 129.2                 |
|                   | Max.            | 140.7                 | 138.1                 | 136.3                 | 135.4                 |
|                   | <i>Ortalama</i> | <i>137.2</i>          | <i>135.3</i>          | <i>133.5</i>          | <i>132.7</i>          |

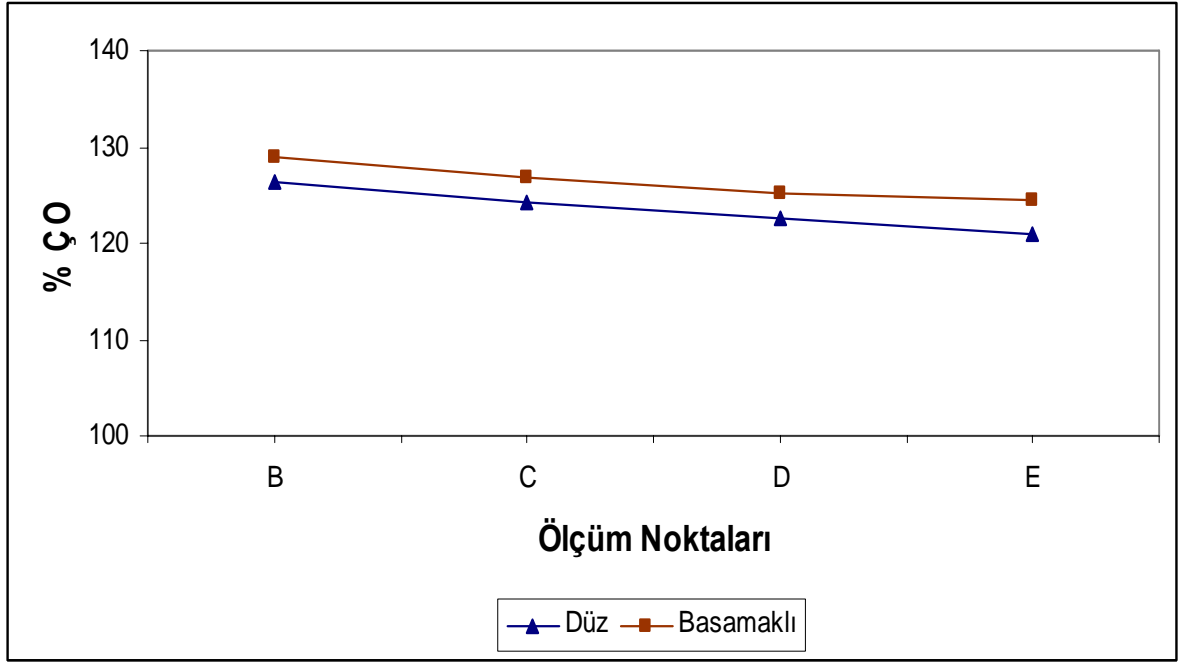


Şekil 67. Savaklardaki ortalama ÇO yüzdeliklerinin karşılaştırılması ( $Q_1 = 0.10$  l/sn)

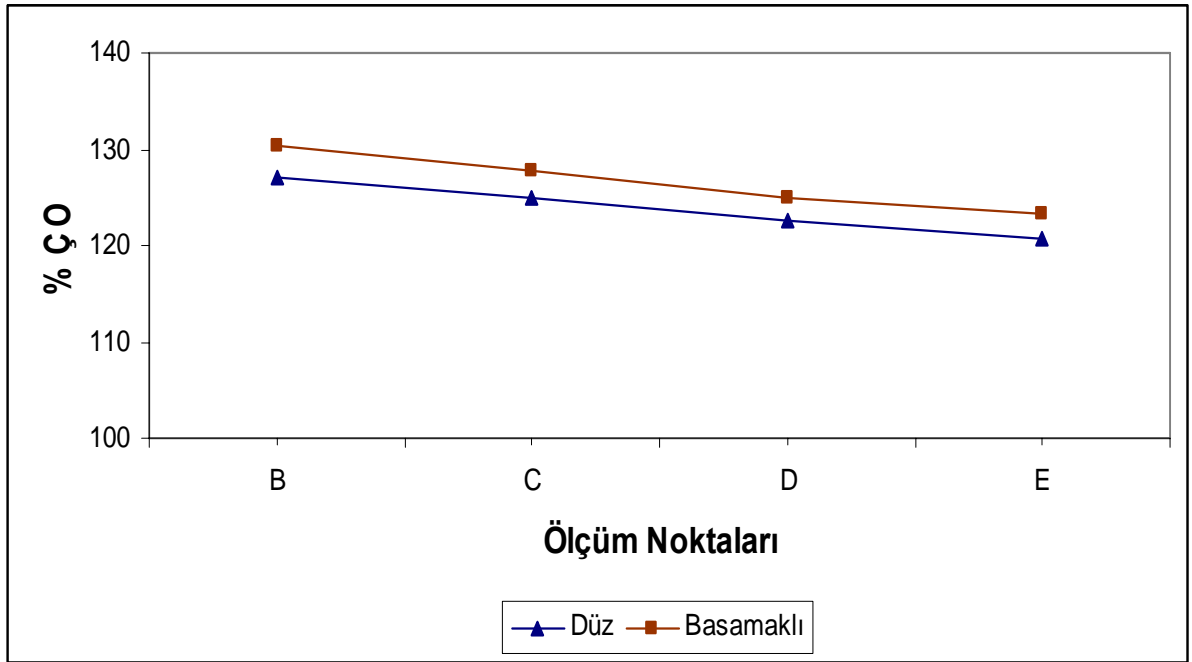


Şekil 68. Savaklardaki ortalama ÇO yüzdeliklerinin karşılaştırılması ( $Q_2 = 0.15$  l/sn)

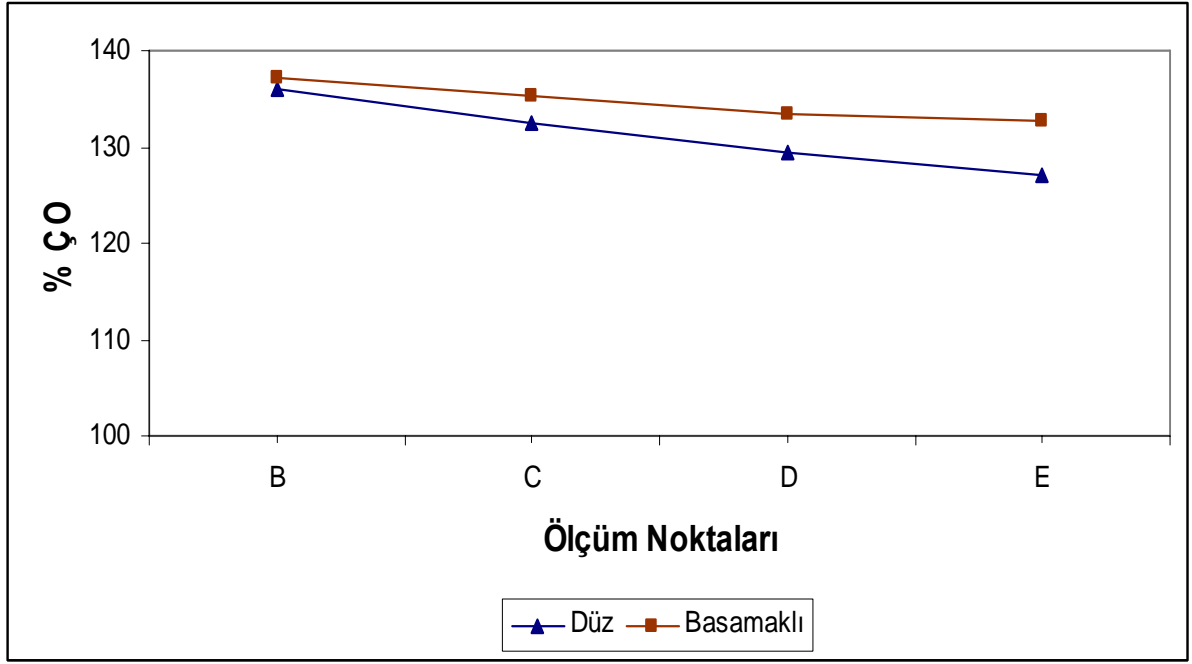




Şekil 69. Savaklardaki ortalama ÇO yüzdeliklerinin karşılaştırılması ( $Q_3 = 0.20$  l/sn)



Şekil 70. Savaklardaki ortalama ÇO yüzdeliklerinin karşılaştırılması ( $Q_4 = 0.32$  l/sn)



Şekil 71. Savaklardaki ortalama ÇO yüzdelerinin karşılaştırılması ( $Q_5 = 0.40$  l/sn)

#### 2.4.2. Mansap Çözünmüş Oksijen Konsantrasyonu

Kanal boyunca akan su üzerinde toplam 5 noktadan alınan ölçümler neticesinde, öncelikle memba mansap arasındaki ölçümlerle havalanma verimliliği bulunmuş daha bu havalanma verimliliği 20°C için optimize edilmişti. Düz ve basamaklı savakların havalanma verimlilikleri arasındaki farklılıklar grafikler aracılığıyla gösterilmeye çalışılmıştır. Debi ve çıkış suyu derinlikleri gibi parametrelerinin havalanma verimliliğine etkisi incelendikten sonra kanal üzerindeki diğer noktalarda yapılan ölçümlerin irdelenmesine geçilmiştir.

İki farklı savak tipinden 4 ayrı noktada elde edilen çözünmüş oksijen konsantrasyonu değerlerinin değişimleri şekil 60-69'da, konsantrasyon yüzdeleri arasındaki farkta şekil 70-74'de grafiklerle ifade edilmeye çalışılmıştır.

Çalışmaların bundan sonraki kısmında amaç, çözünmüş oksijen konsantrasyonu değerlerinin kanal boyunca nasıl değiştiğini belirlemek ve bu değişimi matematiksel denklemler ve grafiklerle ifade etmektir.

## 2.5. Hidrolik Yapıdan Sonra Çözünmüş Oksijen Değişiminin Analizi

Akarsu üzerindeki hidrolik yapıdan sonra oluşan çözünmüş oksijen dengesinin, hidrolik yapıdan uzaklaştıkça değişimi ifade etmek oldukça zor ve hassas bir konudur. Çünkü her nehri etkileyen etkenlerin sayısı ve yapısı farklıdır. Çözünmüş oksijen dengesini belirleyebilmek için bütün parametreleri her an için işine katmak mümkün değildir.

Hidrolik yapının yapısal özelliklerinde çok farklılıklar olabilir ve bu farklılıklar çözünmüş oksijen dengesinde önemli değişiklikler yapar. Savaklanmayı sağlayan yapının her bir boyutu ve özellikleri işine katılmalı, her bir savak modeli için ayrı bir model oluşturulmalıdır. Mevsim değişikliklerinde su sıcaklığının değişmesiyle birlikte, su sıcaklığı parametresi işine girer. Bu durumda her bir sıcaklık için ölçümlerin yapılması, modelin kurulmasında önemlidir.

Yine aynı şekilde hidrolik yapıdan uzaklık, yağış sıklığı, derinlik, mansaptaki su kalitesi, bitkisel ortam, balık yaşamı gibi bir çok etken akarsu suyu kalitesine etki ederler. Bu yüzden, hidrolik yapıdan uzaklaştıkça sudaki çözünmüş oksijen miktarının nasıl bir eğri gösterdiğini belirleyebilmek oldukça güçtür. Araştırmacılar tarafından bu konuda kesin olarak kabullenilmiş denklem takımları ya da eğriler yoktur. Saha çalışmaları ve laboratuvar ortamında model çalışmalardan elde edilen veriler yardımıyla tahminlerde bulunmaya yarayan tablolar ve denklemler geliştirmişlerdir.

Saha çalışmalarından elde edilen çözünmüş oksijen değerleri daha önce genel bilgiler kısmında tablolar halinde verilmiştir. Saha çalışmalarındaki veriler yardımıyla istatistiksel bir metod geliştiren ve regresyon analizi yapan Lantagne (2002), hidrolik yapının mansabında akarsu boyunca çözünmüş oksijen transferi dengesini belirleyebilen denklem takımları geliştirmiştir.

Lantagne (2002), Ipswich Nehri üzerinde yaptığı çalışmada; su sıcaklığı, akarsu uzunluğu, 28 günlük yağış ve su derinliği gibi değerlerin çözünmüş oksijen dengesi üzerindeki en önemli etkenler olduğunu belirledi. Oluşturduğu regresyon analizi için; etkisinin çok az olduğunu düşündüğü, zaman, önceki yağışlar, arazi büyüklüğü, suyun hızı, havalanma katsayısı, memba suyu özellikleri ve tarih gibi parametreleri ihmal etti.

Yapılan ölçümler neticesinde Ipswich Nehri'ndeki fotosentetik oksijen üretiminin 0.82 – 1.8 mg/l/gün olarak belirlenmiştir. Düşük çözünmüş oksijen seviyesinin olduğu bu akarsuda  $R^2$  metodunu kullanarak akarsu suyu kalitesi standartlarını belirlemeye çalışmıştır.

Massachusetts Çevre Koruma Ofisi, Ipswich Nehri'ndeki su kalitesini, Sylvania Barajı'nın öncesi ve sonrası olmak üzere iki su kalitesi faktörüne ayırmıştır. Barajın memba kısmında kalan kısmı için Sınıf B, mansap tarafı için Sınıf SA kavramlarını oluşturmuştur. Sınıf SA, Sınıf B'ye göre balıklar ve diğer canlı yaşamı için çok daha yüksek standartlı bir ortamdır ve içme suyu temini için uygun bir sudur. Bu sınıflar için bilgiler tablo 31'de verilmiştir.

Lantagne (2002), Ipswich nehri üzerindeki 26 ölçüm noktasından 1968-2000 yılları arasında yapılan çözülmüş oksijen değerlerini ve hesaba kattığı diğer parametrelerin değerlerini toplamıştır. Elde ettiği bu değerlerle analize başlamıştır. 1998 yılına kadar olan verileri hesaba katarak, akarsu üzerindeki bir noktada çözülmüş oksijen konsantrasyonunu tahmin etmeye yarayan şu denklemi geliştirmiştir:

$$DO = 13 - 0.27T - 0.25RF - 0.11H_s - 0.069L_R \quad (90)$$

1999 yılına kadar olan verilerle su derinliği faktörünü ihmal ederek şu denklemi oluşturmuştur:

$$DO = 13 - 0.26T - 0.21RF - 0.08L_R \quad (91)$$

Son olarak 2000 yılına kadar olan verileri kullanarak yağış oranının faktörünü ihmal ederek şu denklemi çıkartmıştır:

$$DO = 12 - 0.27T - 0.07L_R \quad (92)$$

Burada;

$DO$  : Çözülmüş oksijen miktarı (mg/l)

$T$  : Suyun sıcaklığı (°C)

$RF$  : 28 günlük yağış miktarı (inç)

$H_s$  : Su derinliği (feet)

$L_R$  : Hidrolik yapıdan uzaklık (km)

Tablo 27. Massachusetts çözünmüş oksijen standartları (DEP, 2000)

|                                     | Standartlar                |                            |
|-------------------------------------|----------------------------|----------------------------|
|                                     | Sınıf B                    | Sınıf SA                   |
| Uygunluk                            | Sıcak Su Balıkçılığı       | Tüm Sucul Yaşam            |
| Çözünmüş Oksijen Konsantrasyonu     | 5.0 mg/l'den yüksek olmalı | 6.0 mg/l'den yüksek olmalı |
| Çözünmüş Oksijen Doygunluk Derecesi | %60'ın altına düşmemeli    | %75'in altına düşmemeli    |

## 2.6. Çözünmüş Oksijen Değişiminin Matematiksel Modellenmesi

### 2.6.1. Regresyon Analizi

Kanal boyunca deney sonuçlarından elde edilen değerler yukarıda bahsedilen matematiksel modellere uygulanacaktır. Burada amaç, öncelikle debi değişimine göre çözünmüş oksijen konsantrasyonunun nasıl bir eğri çizdiğini belirlemek ve denklemini çıkartmaktır. Bu işlem yapılırken, birinci, ikinci, üçüncü, dördüncü ve üssel dereceden denklemler çıkartılacak ve birbirleriyle karşılaştırılacaktır. Daha sonra ise, çözünmüş oksijen konsantrasyonu değişiminin kanal boyunca mesafe olarak değişimi incelenerek aynı şekilde modellenmesi yapılacaktır.

Sırasıyla uygulanacak formlar şunlardır:

1. Lineer (1.Derece)
2. Quadratik (2.Derece)
3. Kübik (3.Derece)
4. 4.Derece
5. Exponansiyel (Üssel)

Yukarıda bahsedilen 5 formun, kanal boyunca ölçülen çözünmüş oksijen konsantrasyonu değişimine uygulanması için MATLAB programa dilinde bir kodlama yazılmış ve bu kodlamaya değerler girilerek şekil 75-113' deki eğri ve denklemler elde edilmiştir.

### 2.6.2. Düz Tabanlı Savak İçin Debi-ÇO Değişiminin Modellenmesi

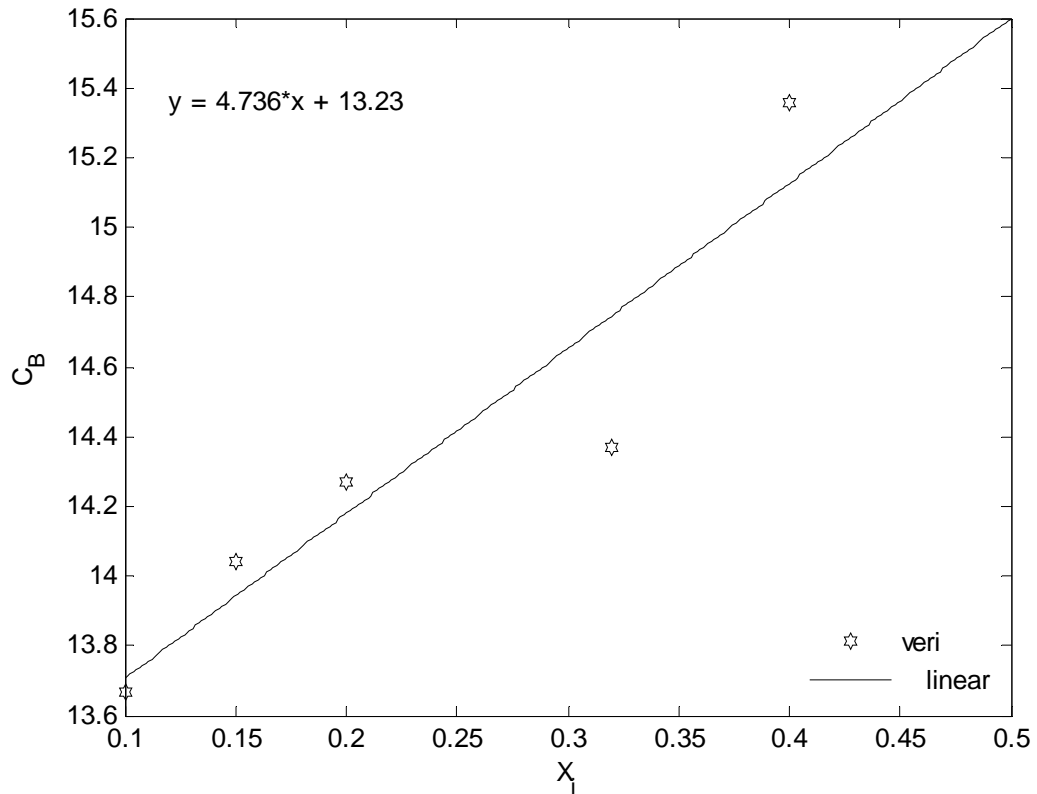
Tablo 27’de verilen konsantrasyon değerleri regresyon analizi yapılarak üzere tablo 32-35’de ortalamalar alınarak verilmiştir. Verilere, yukarıda bahsedilen metotlar uygulandığı takdirde eğriler ve denklemler şu şekilde oluşur:

Tablo 28. B noktası için ortalama konsantrasyonlar

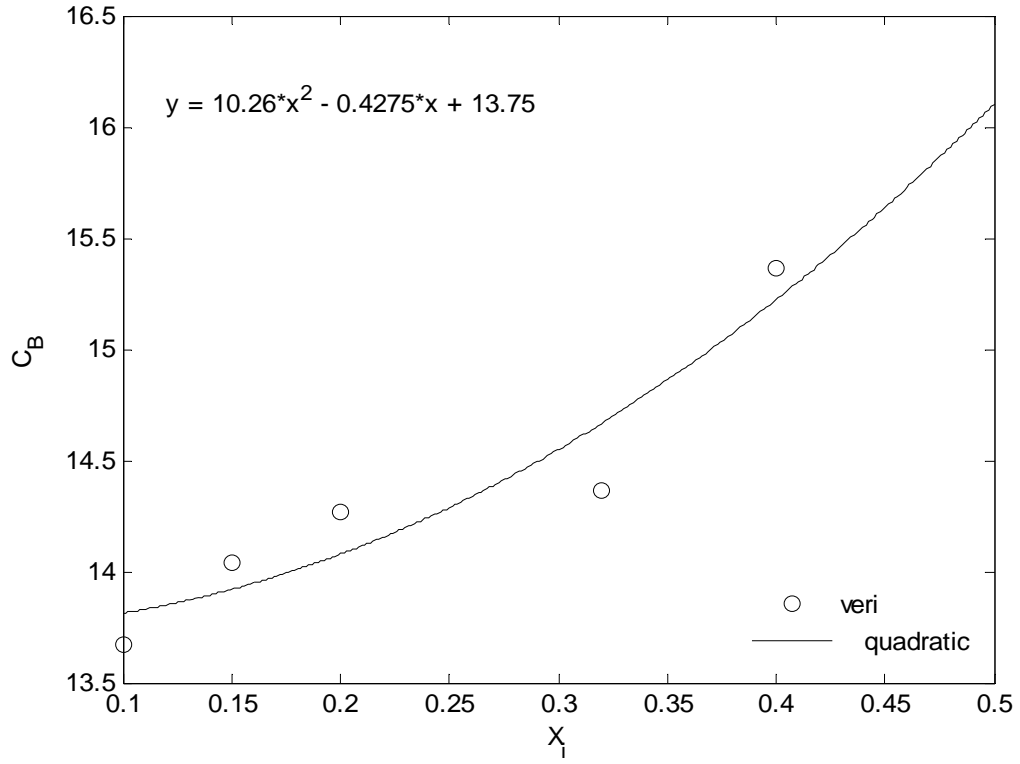
|       |        |       |         |         |       |
|-------|--------|-------|---------|---------|-------|
| $x_i$ | 0.1    | 0.15  | 0.2     | 0.32    | 0.4   |
| $C_B$ | 13.667 | 14.04 | 14.2667 | 14.3667 | 15.36 |

Tablo 29. C noktası için ortalama konsantrasyonlar

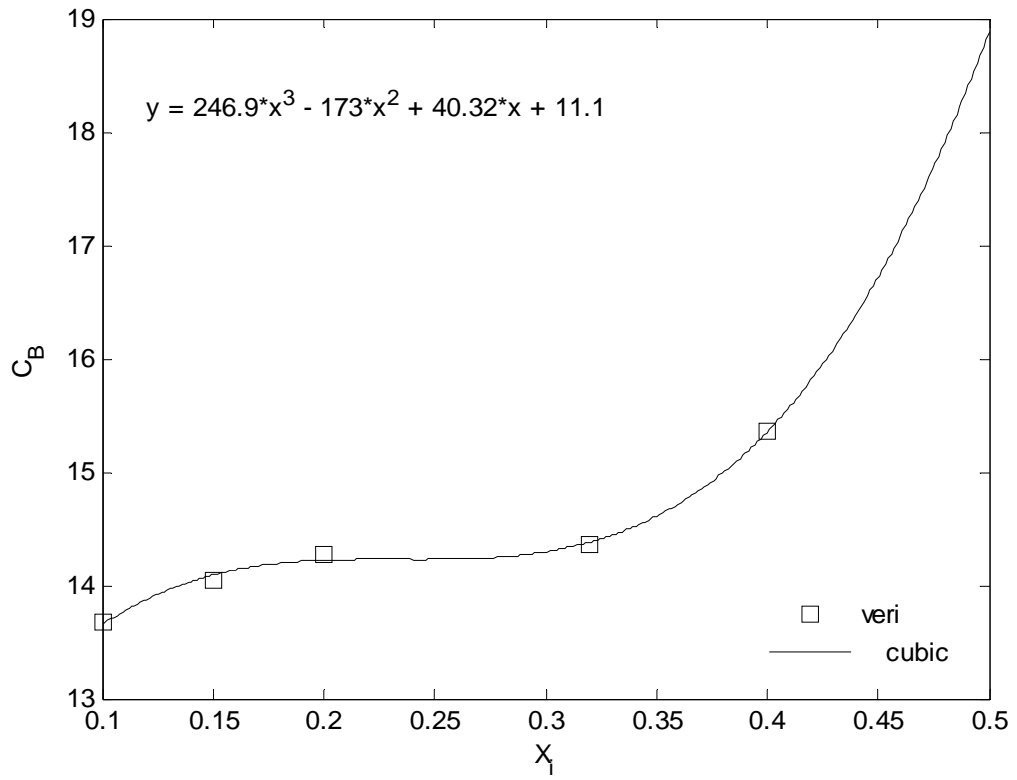
|       |      |         |         |         |         |
|-------|------|---------|---------|---------|---------|
| $x_i$ | 0.1  | 0.15    | 0.2     | 0.32    | 0.4     |
| $C_C$ | 13.3 | 13.8133 | 14.0333 | 14.1067 | 14.9600 |



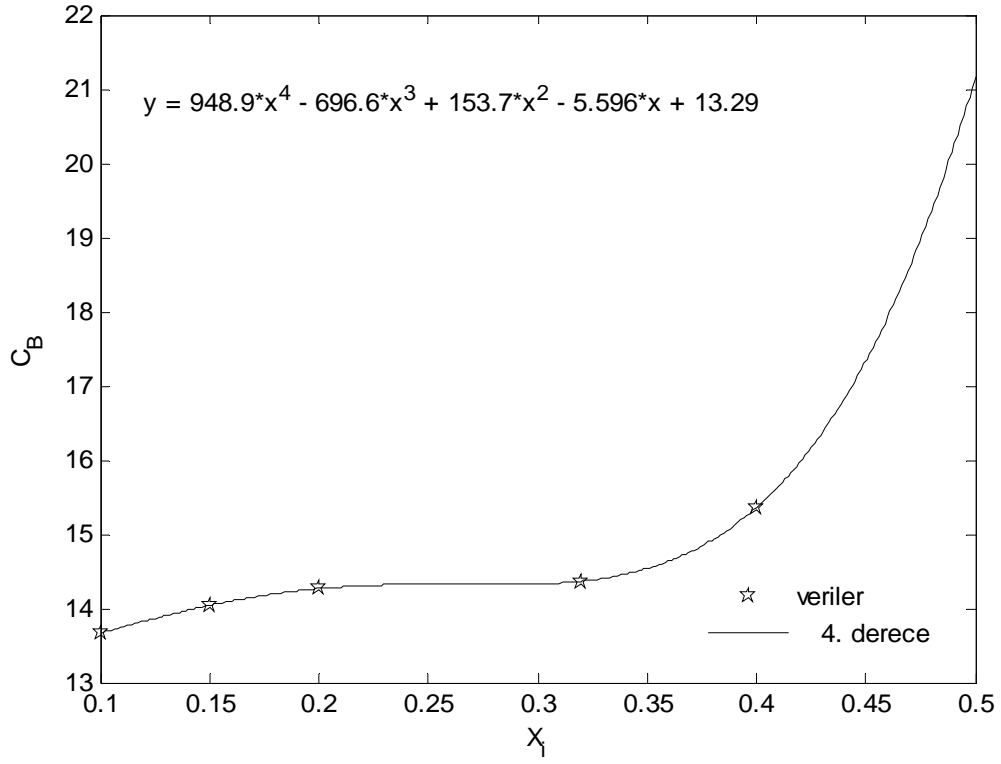
Şekil 72. Düz tabanlı savakta B noktası için lineer form



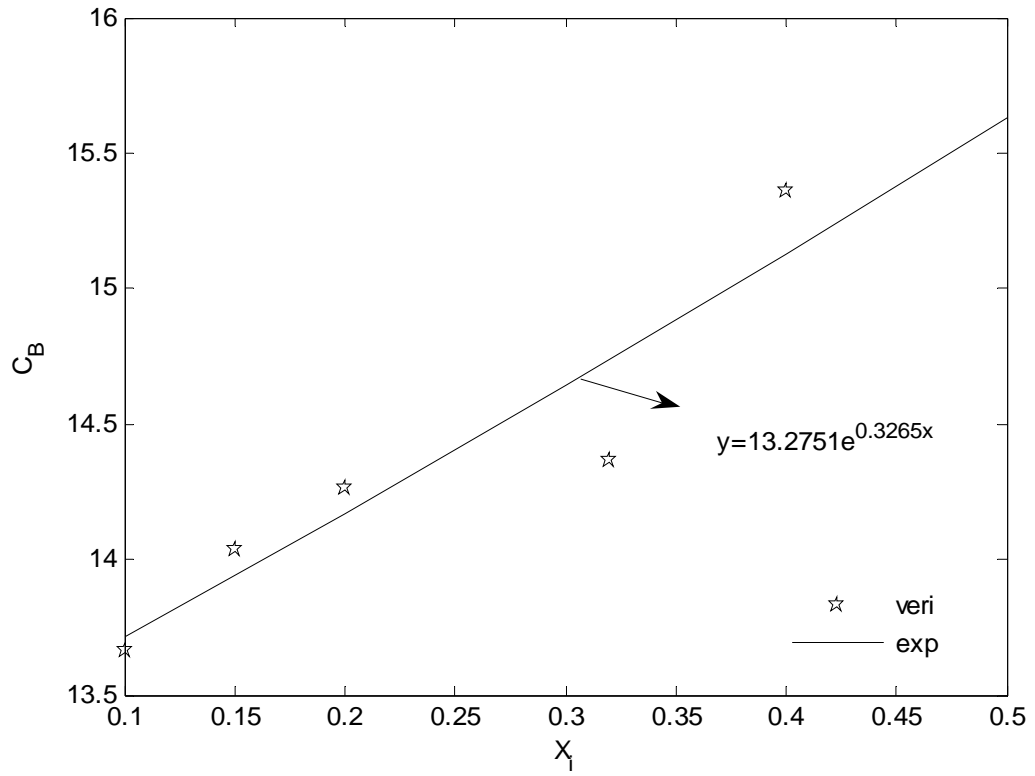
Şekil 73. Düz tabanlı savakta B noktası için quadratik form



Şekil 74. Düz tabanlı savakta B noktası için kübik form

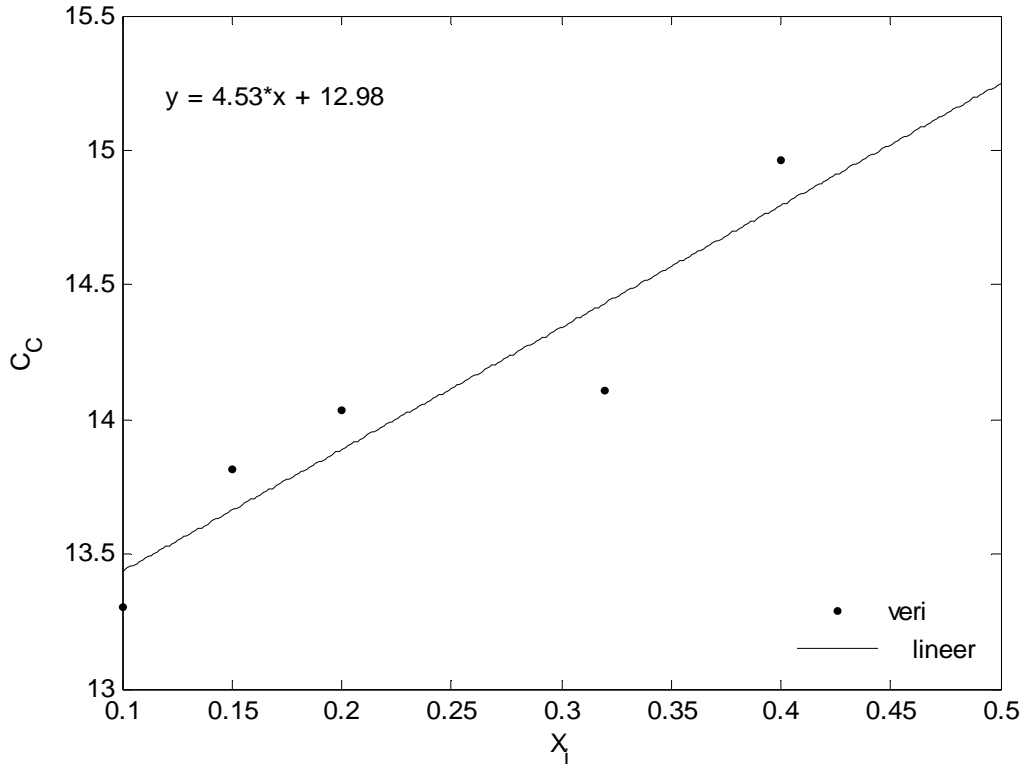


Şekil 75. Düz tabanlı savakta B noktası için 4.derece form

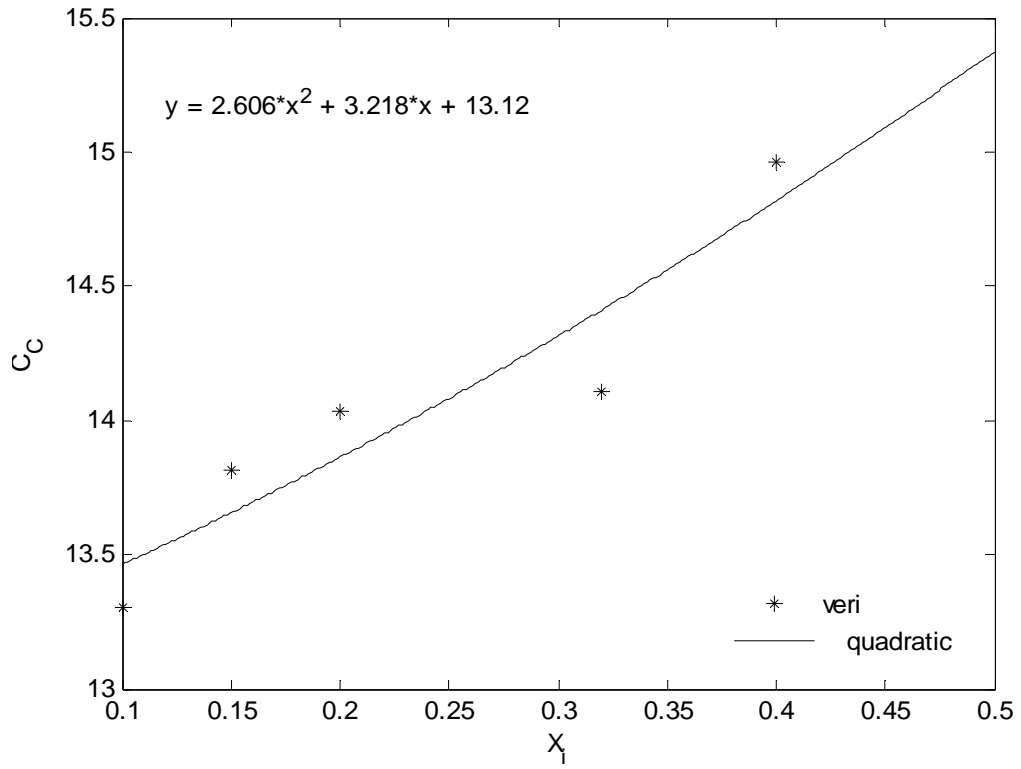


Şekil 76. Düz tabanlı savakta B noktası için exponansiyel form

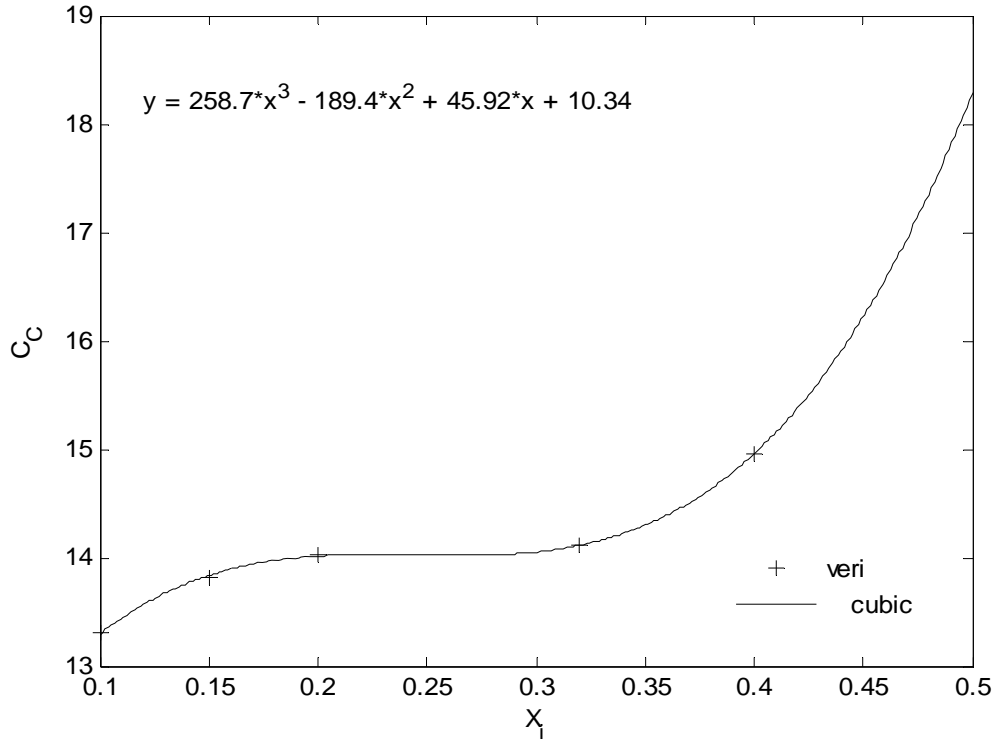




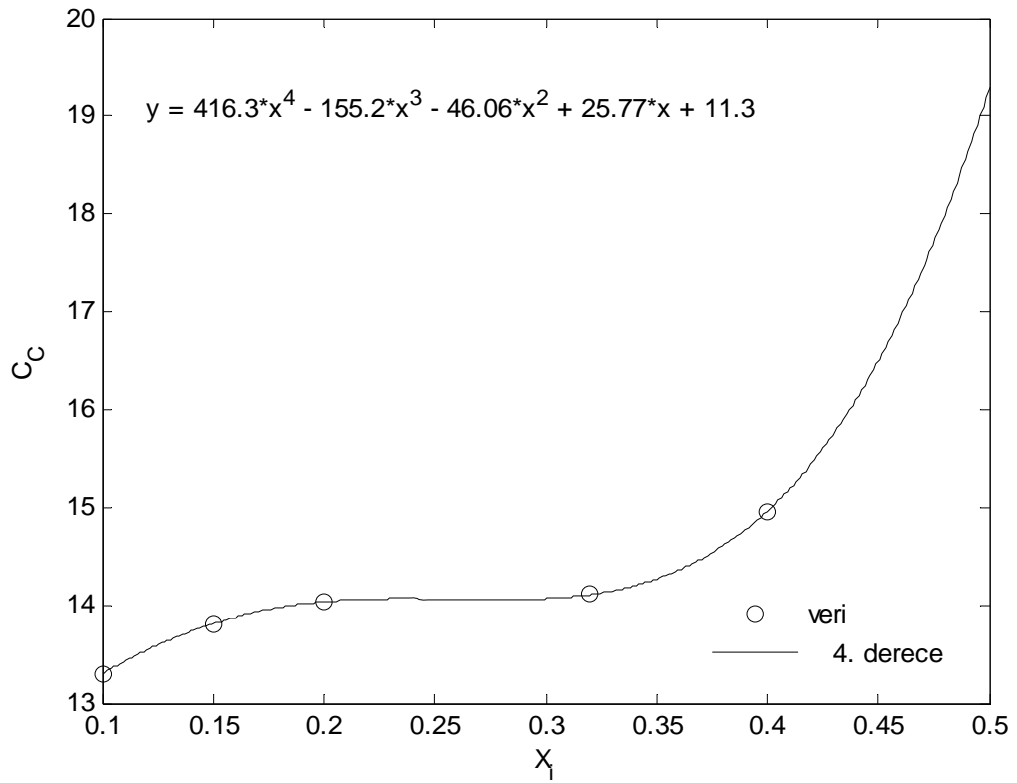
Şekil 77. Düz tabanlı savakta C noktası için lineer form



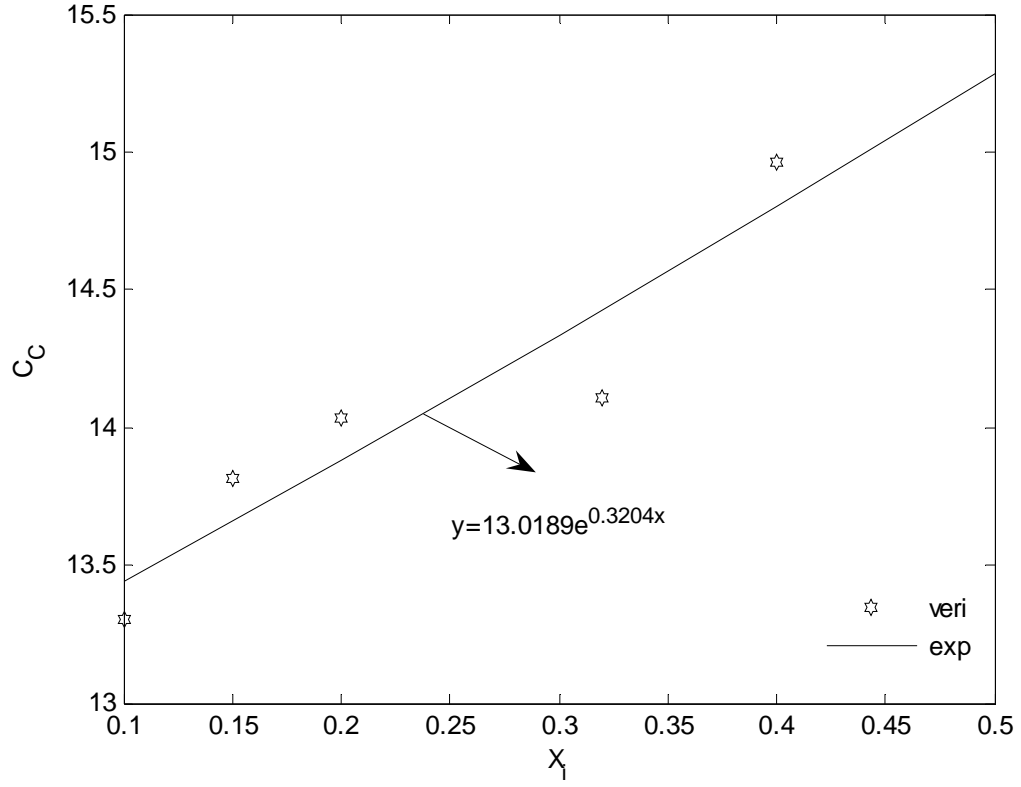
Şekil 78. Düz tabanlı savakta C noktası için quadratik form



Şekil 79. Düz tabanlı savakta C noktası için kübik form



Şekil 80. Düz tabanlı savakta C noktası için 4.derece form



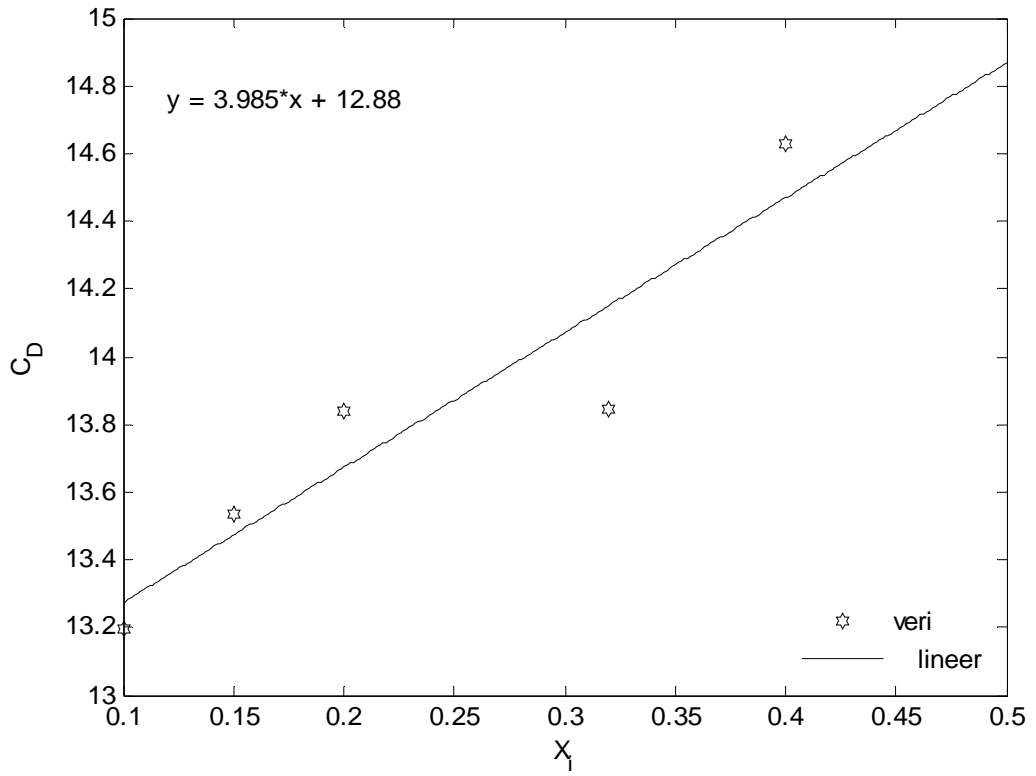
Şekil 81. Düz tabanlı savakta C noktası için exponansiyel form

Tablo 30. D noktası için ortalama konsantrasyonlar

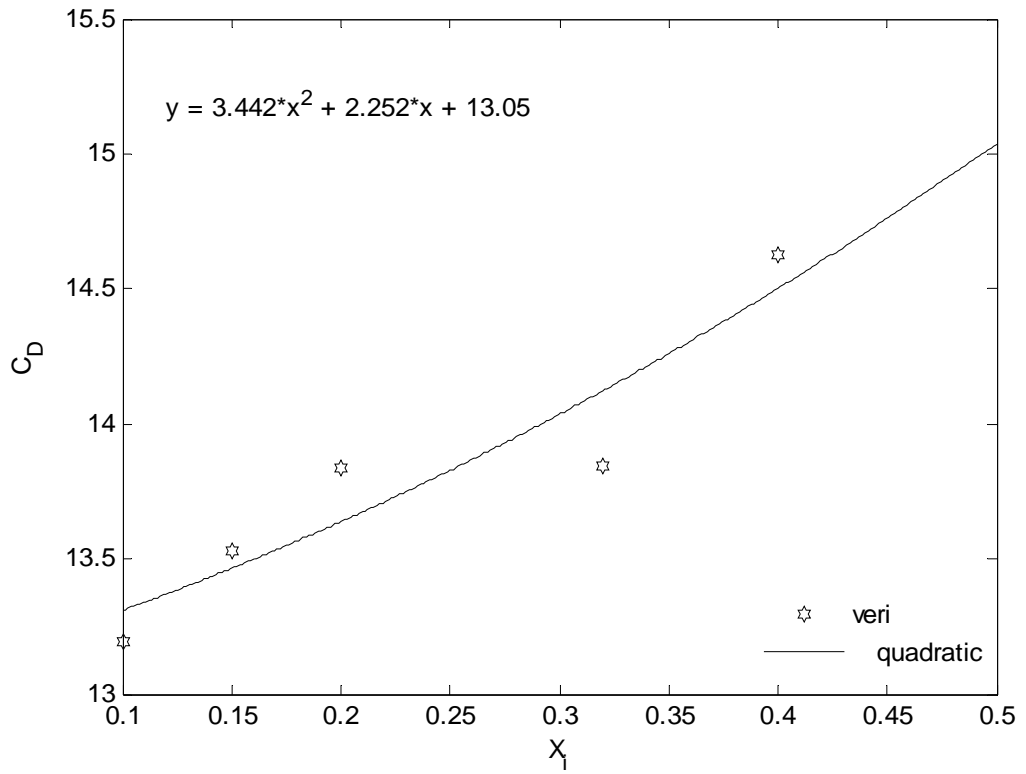
| $x_i$ | 0.1     | 0.15    | 0.2   | 0.32    | 0.4     |
|-------|---------|---------|-------|---------|---------|
| $C_D$ | 13.1933 | 13.5333 | 13.84 | 13.8467 | 14.6267 |

Tablo 31. E noktası için ortalama konsantrasyonlar

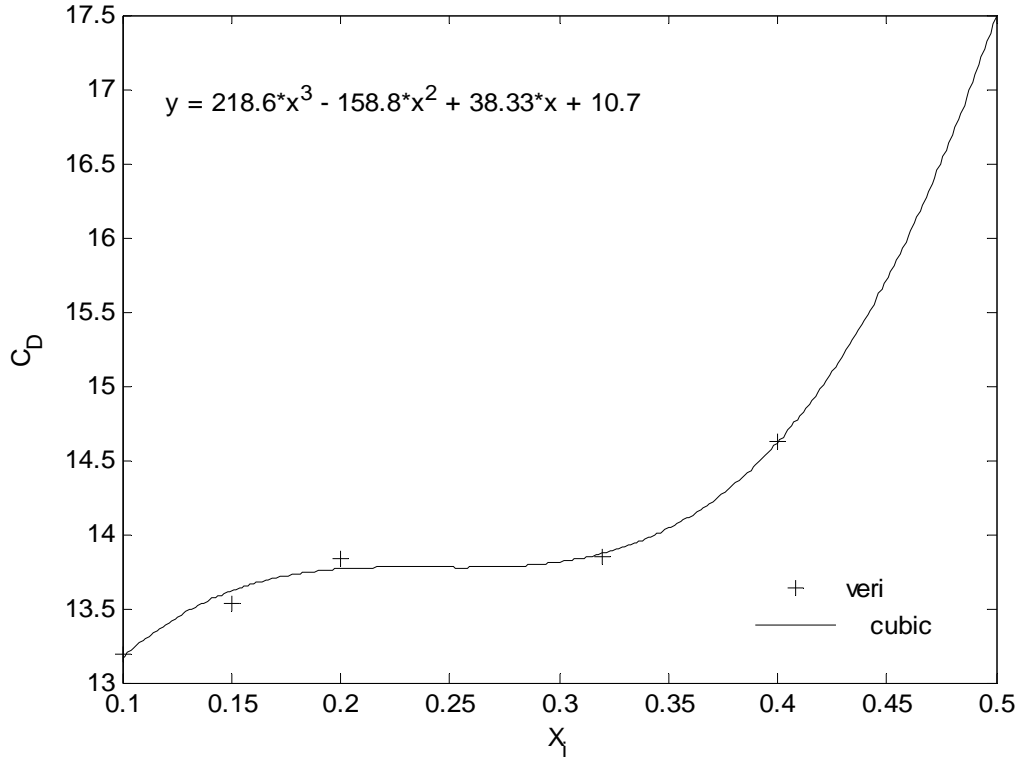
| $x_i$ | 0.1   | 0.15  | 0.2     | 0.32    | 0.4     |
|-------|-------|-------|---------|---------|---------|
| $C_E$ | 13.04 | 13.32 | 13.6667 | 13.6333 | 14.3533 |



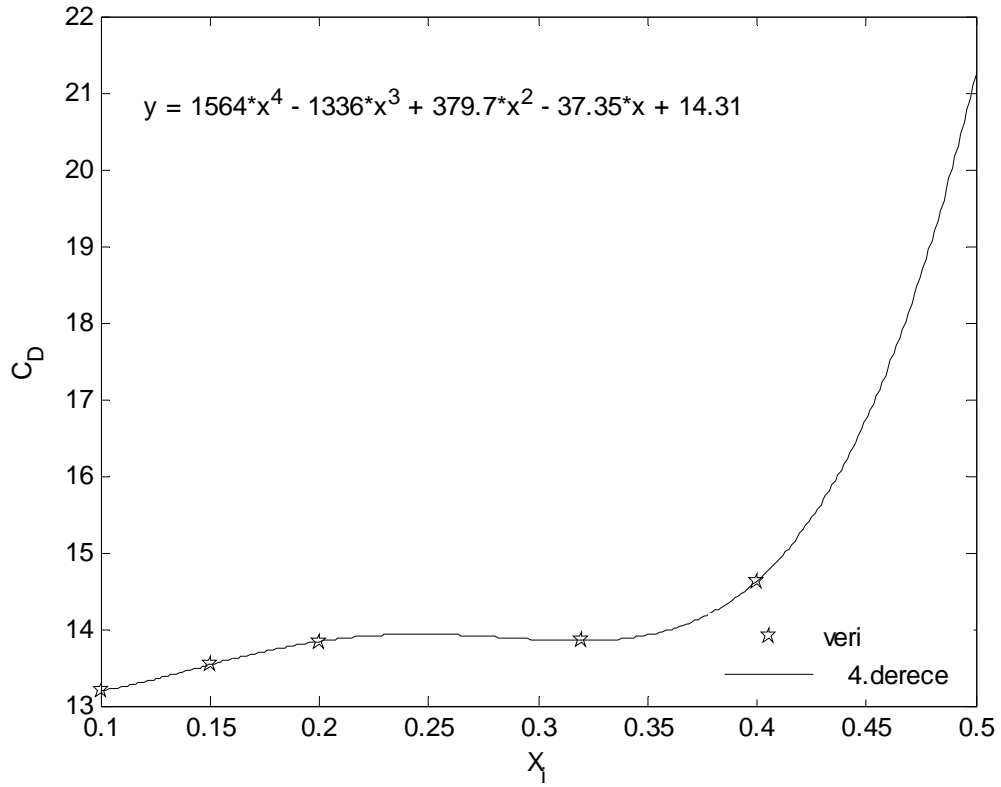
Şekil 82. Düz tabanlı savakta D noktası için lineer form



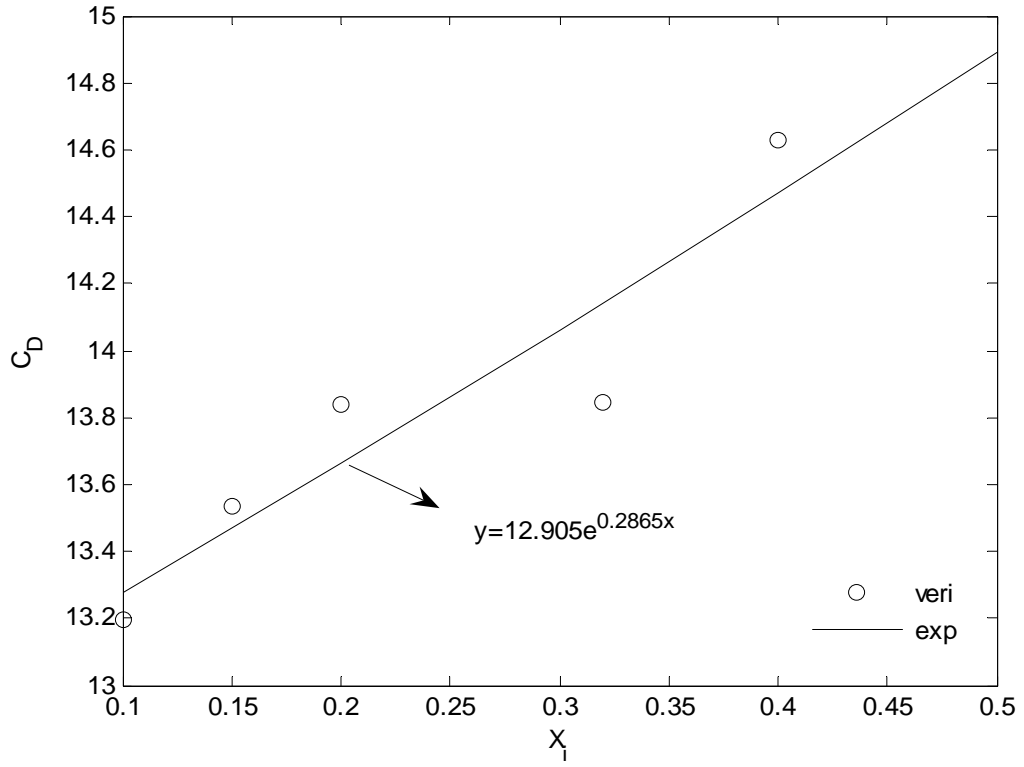
Şekil 83. Düz tabanlı savakta D noktası için quadratik form



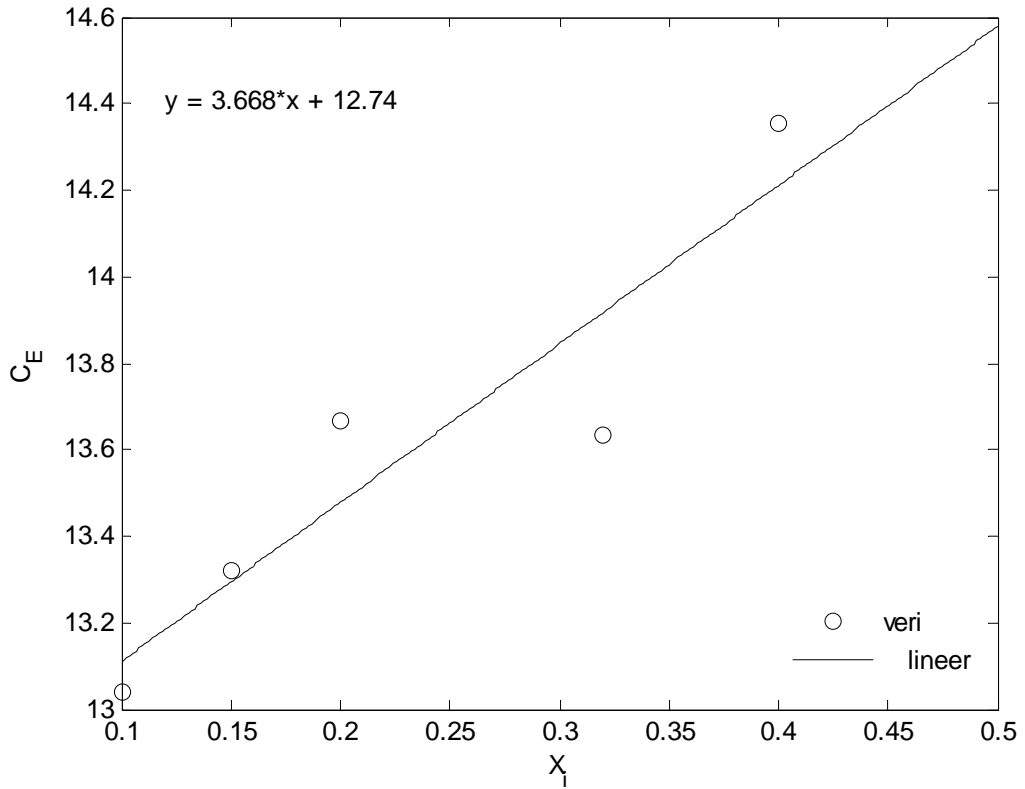
Şekil 84. Düz tabanlı savakta D noktası için kübik form



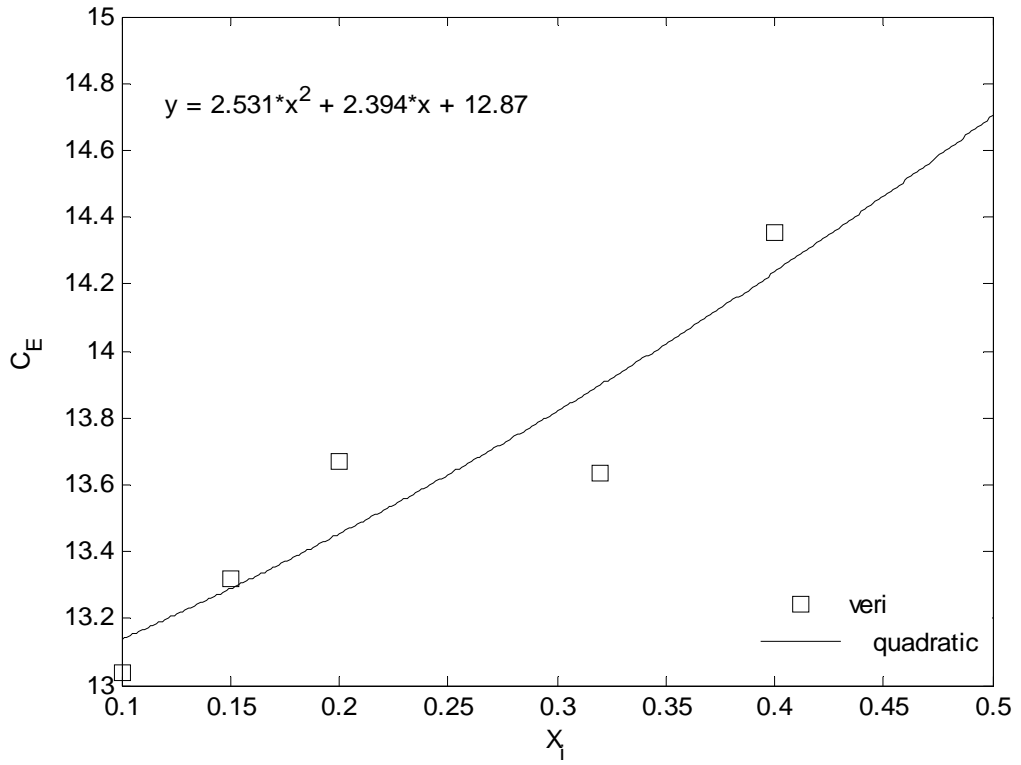
Şekil 85. Düz tabanlı savakta D noktası için 4. derece form



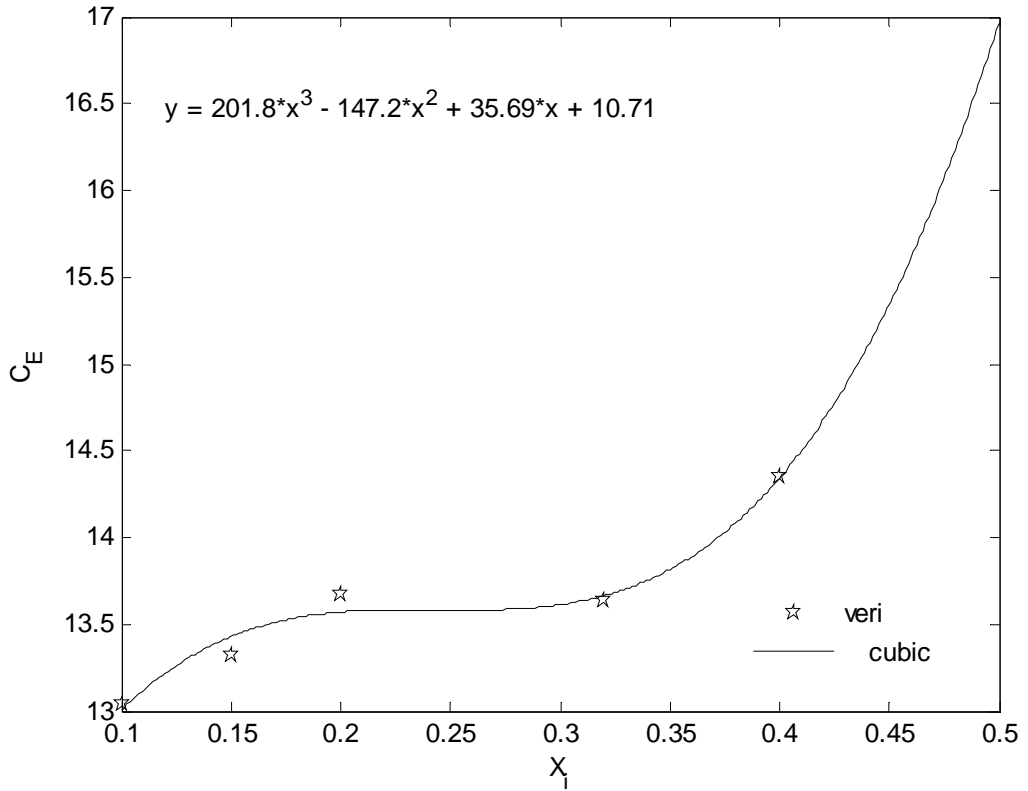
Şekil 86. Düz tabanlı savakta D noktası için exponansiyel form



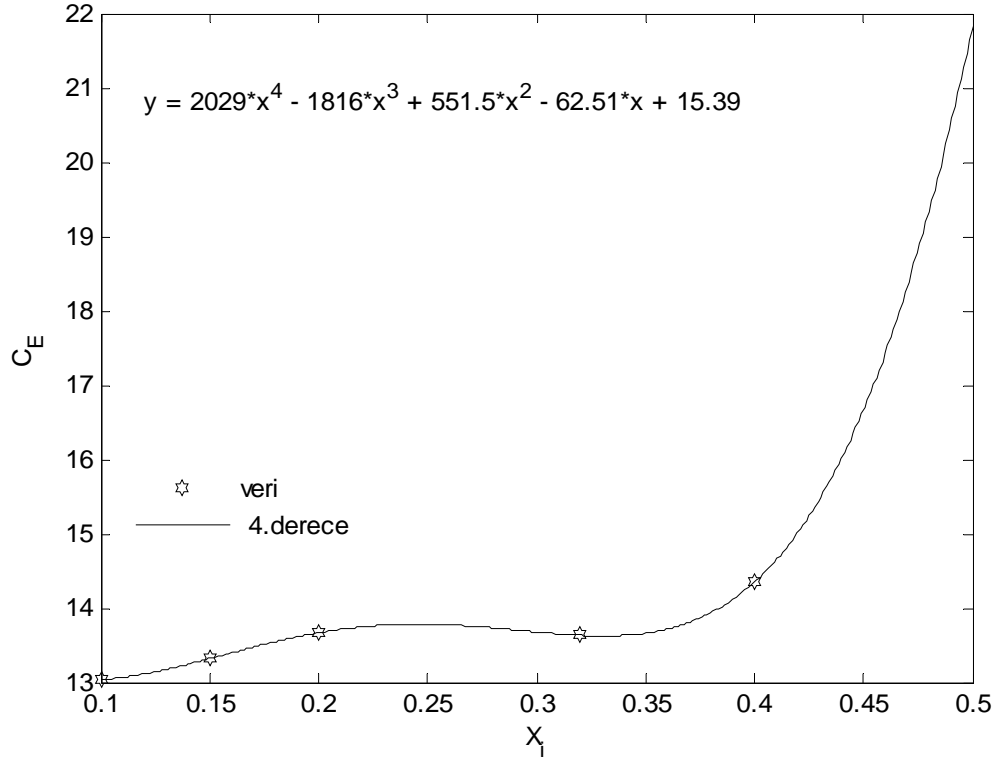
Şekil 87. Düz tabanlı savakta E noktası için lineer form



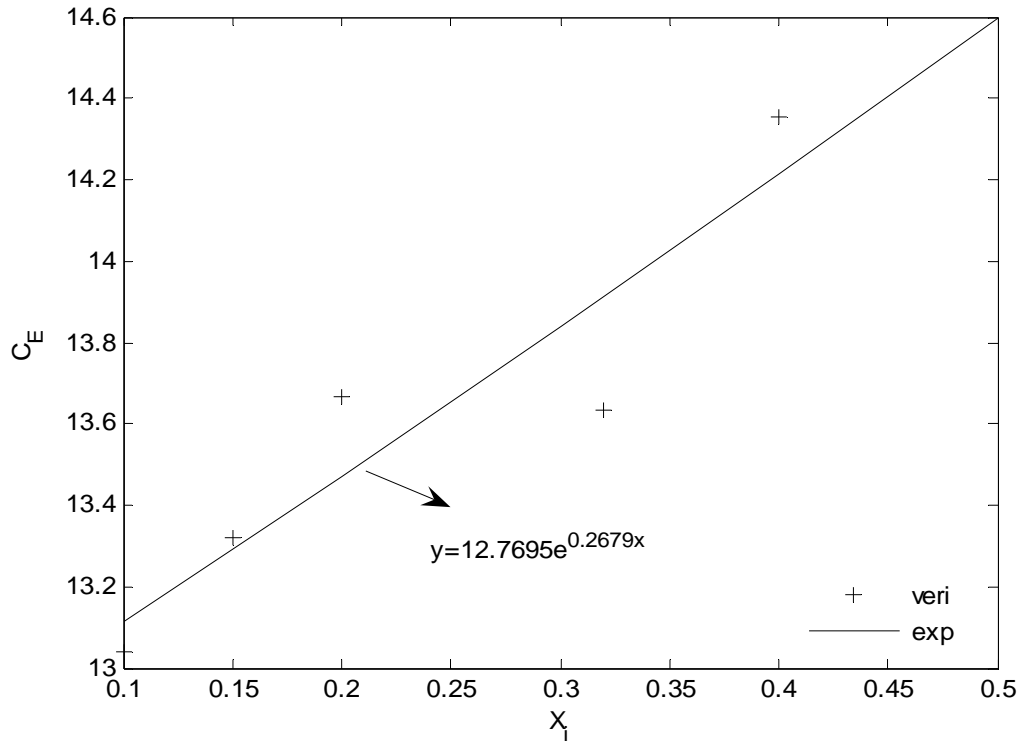
Şekil 88. Düz tabanlı savakta E noktası için quadratik form



Şekil 89. Düz tabanlı savakta E noktası için kübik form



Şekil 90. Düz tabanlı savakta E noktası için 4.derece form



Şekil 91. Düz tabanlı savakta E noktası için exponansiyel form

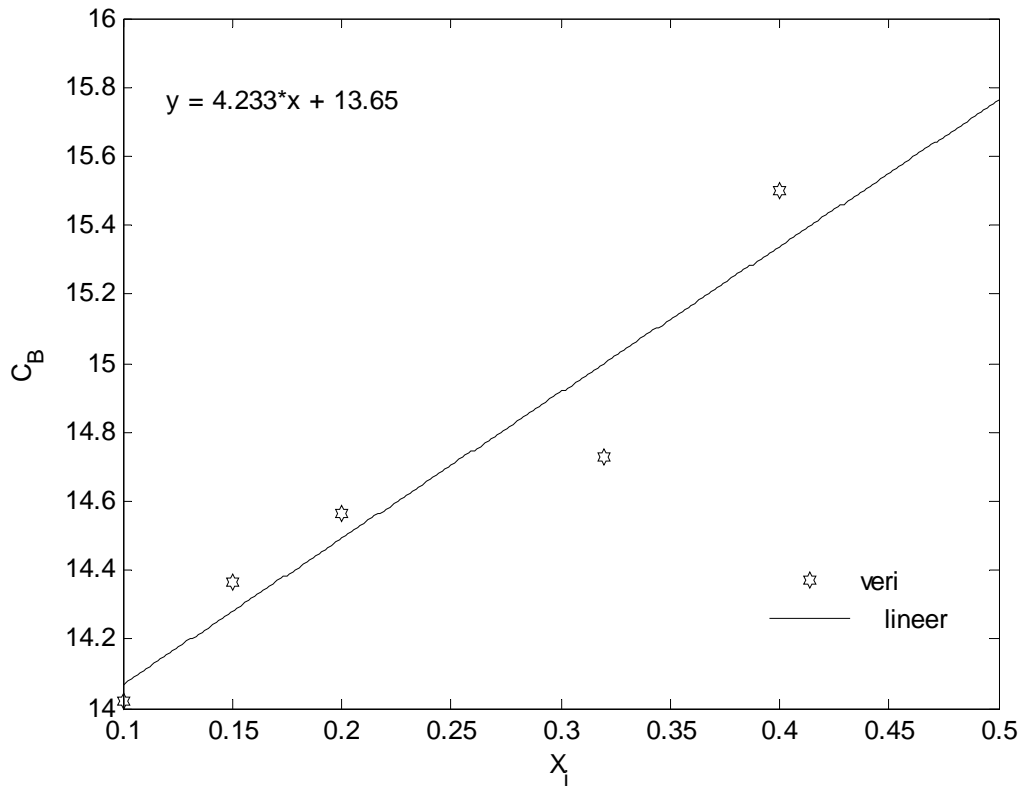


### 2.6.3. Basamaklı Savak İçin Debi-ÇO Değişiminin Modellenmesi

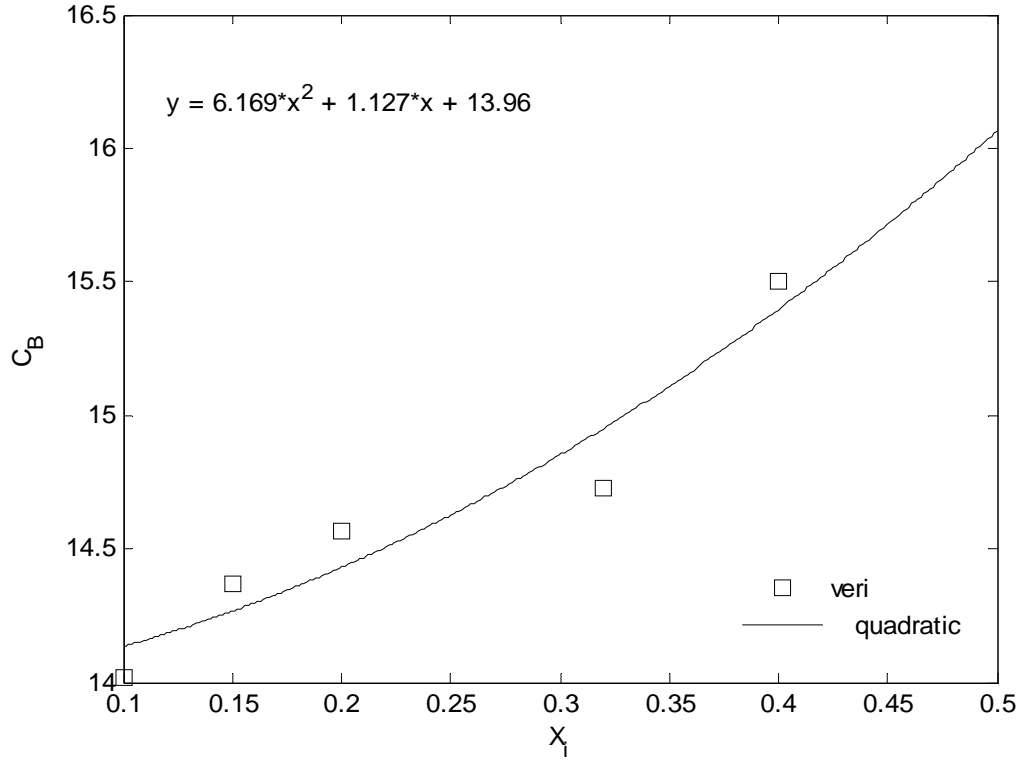
Tablo 28’de verilen kanal boyunca ölçülen çözülmüş oksijen konsantrasyonları değerleri yine düz savakta olduğu gibi, regresyon analizi yapılmak üzere tablo 36-39’da ortalamaları alınmış şekilde verilmiştir.

Tablo 32. B noktası için ortalama konsantrasyonlar (Basamaklı savak)

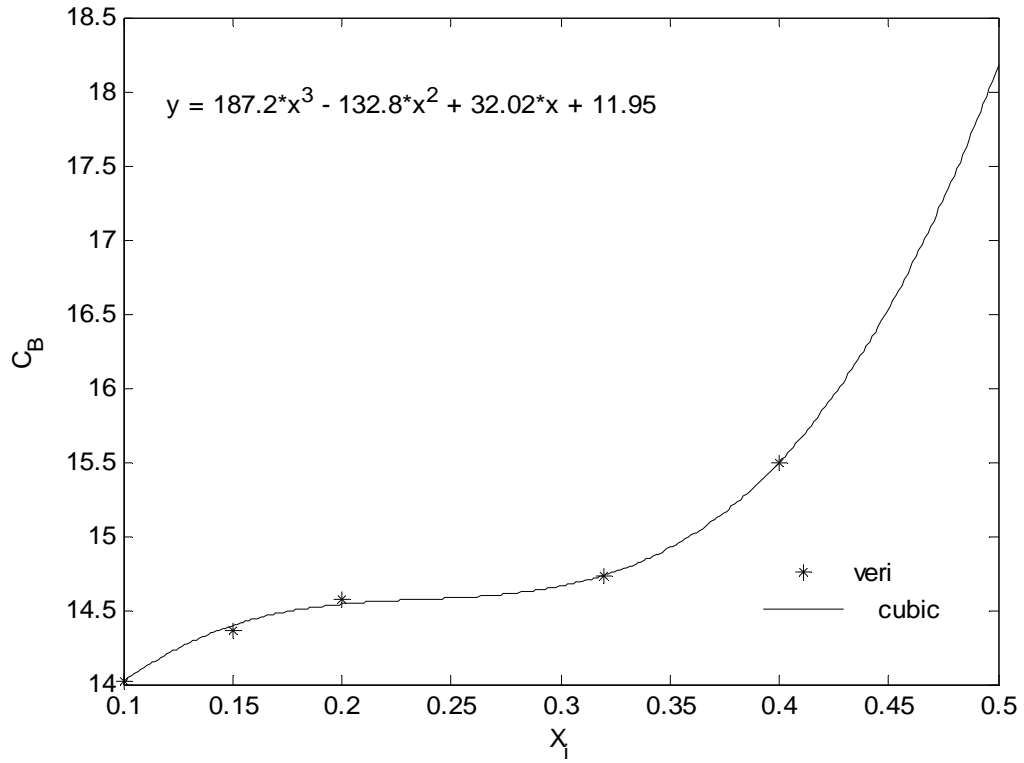
| $x_i$ | 0.1   | 0.15    | 0.2     | 0.32    | 0.4  |
|-------|-------|---------|---------|---------|------|
| $C_B$ | 14.02 | 14.3667 | 14.5667 | 14.7267 | 15.5 |



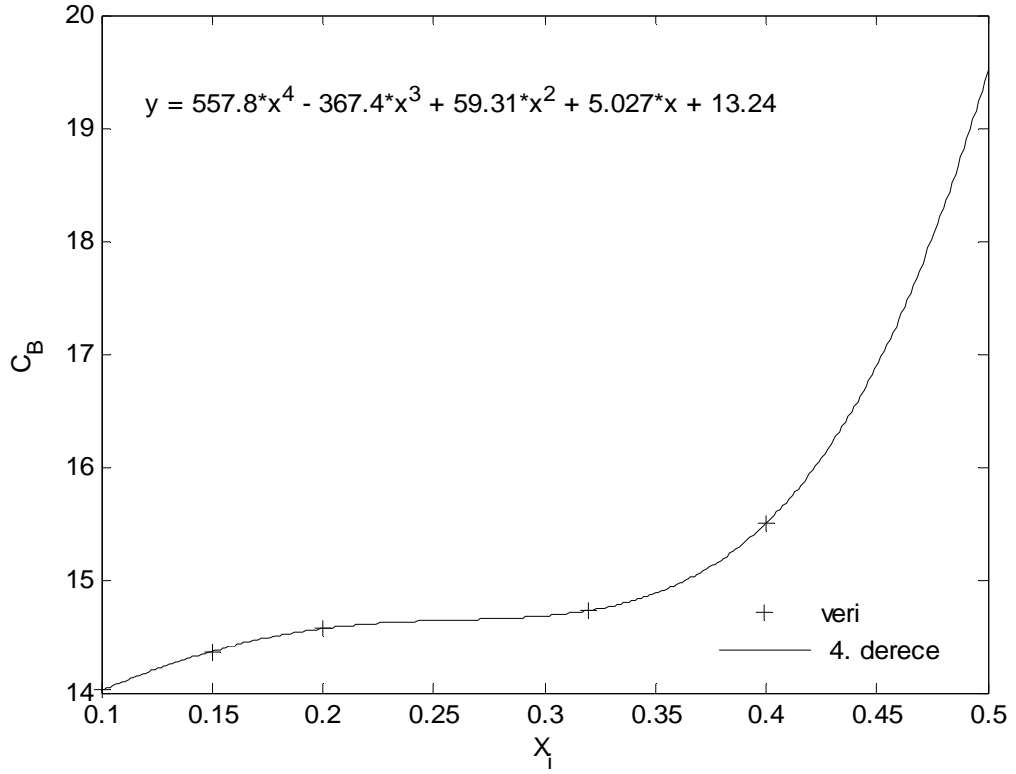
Şekil 92. Basamaklı savakta B noktası için lineer form



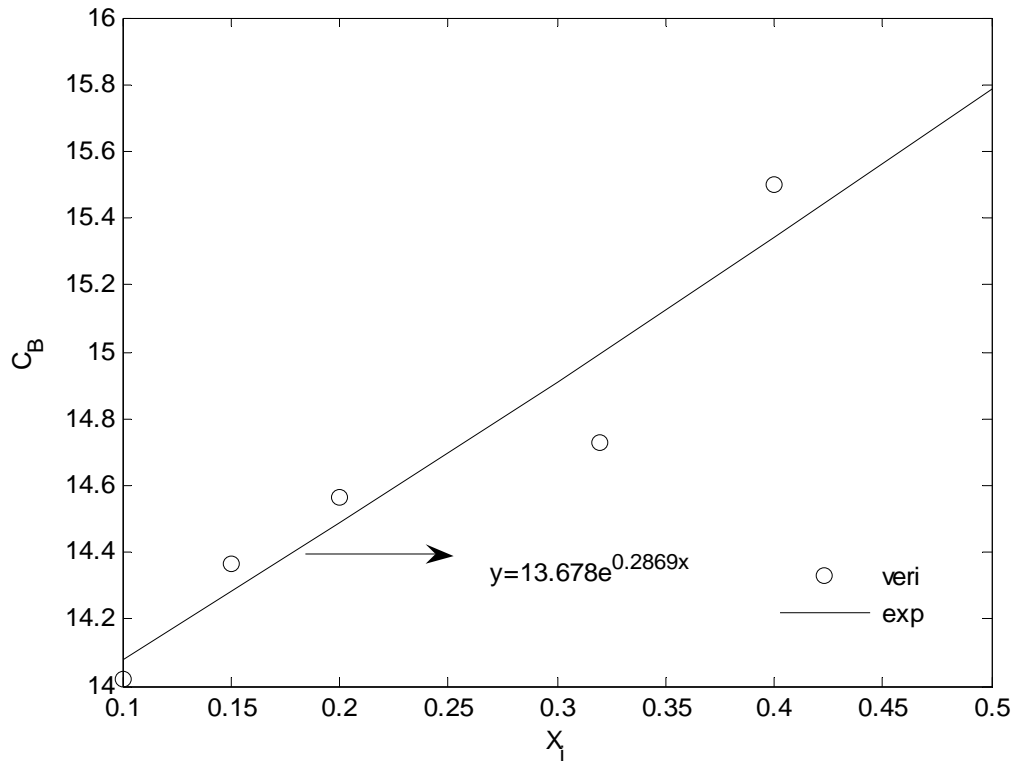
Şekil 93. Basamaklı savakta B noktası için quadratik form



Şekil 94. Basamaklı savakta B noktası için kübik form



Şekil 95. Basamaklı savakta B noktası için 4. derece form



Şekil 96. Basamaklı savakta B noktası için exponansiyel form

Tablo 33. C noktası için ortalama konsantrasyonlar (Basamaklı savak)

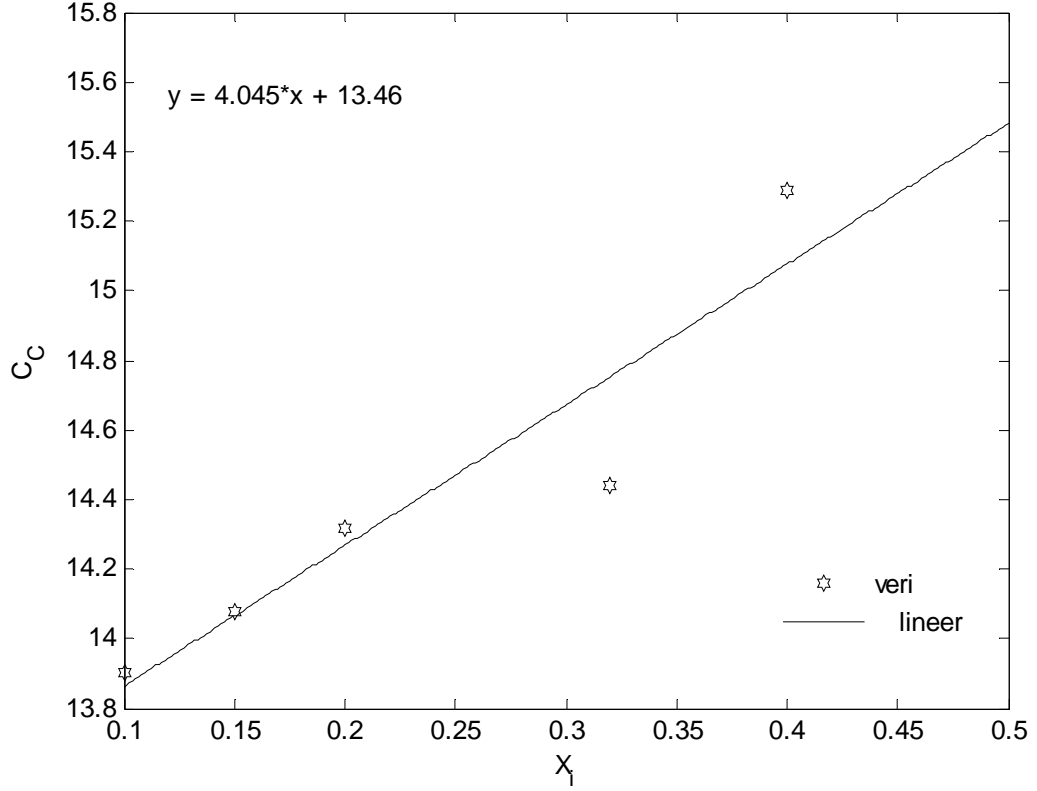
|       |      |       |       |       |         |
|-------|------|-------|-------|-------|---------|
| $x_i$ | 0.1  | 0.15  | 0.2   | 0.32  | 0.4     |
| $C_C$ | 13.9 | 14.08 | 14.32 | 14.44 | 15.2867 |

Tablo 34. D noktası için ortalama konsantrasyonlar (Basamaklı savak)

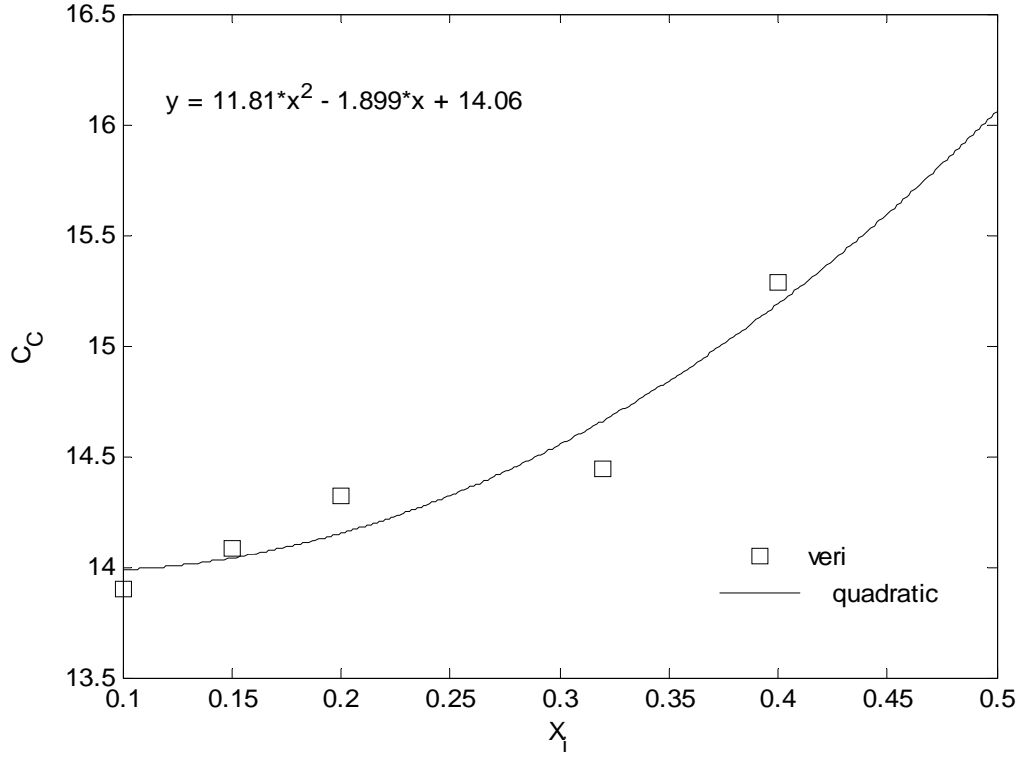
|       |         |         |         |         |         |
|-------|---------|---------|---------|---------|---------|
| $x_i$ | 0.1     | 0.15    | 0.2     | 0.32    | 0.4     |
| $C_D$ | 13.7533 | 13.8467 | 14.1333 | 14.1067 | 15.0867 |

Tablo 35. E noktası için ortalama konsantrasyonlar (Basamaklı savak)

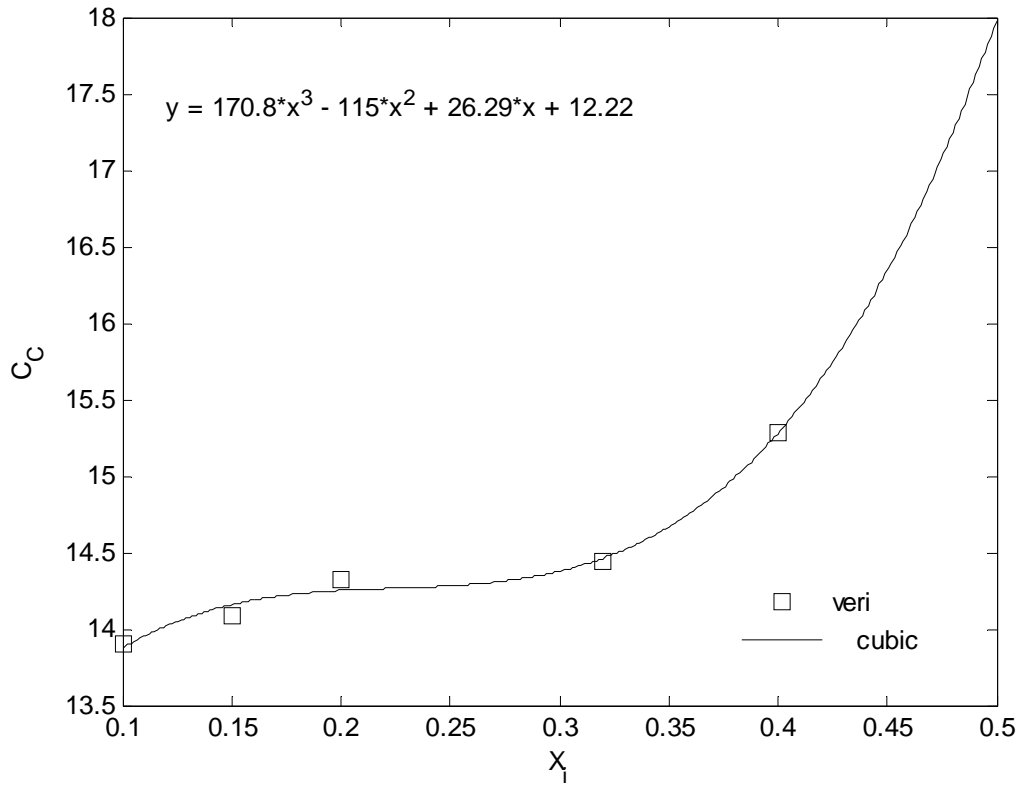
|       |       |      |         |       |         |
|-------|-------|------|---------|-------|---------|
| $x_i$ | 0.1   | 0.15 | 0.2     | 0.32  | 0.4     |
| $C_E$ | 13.42 | 13.6 | 14.0667 | 13.94 | 14.9933 |



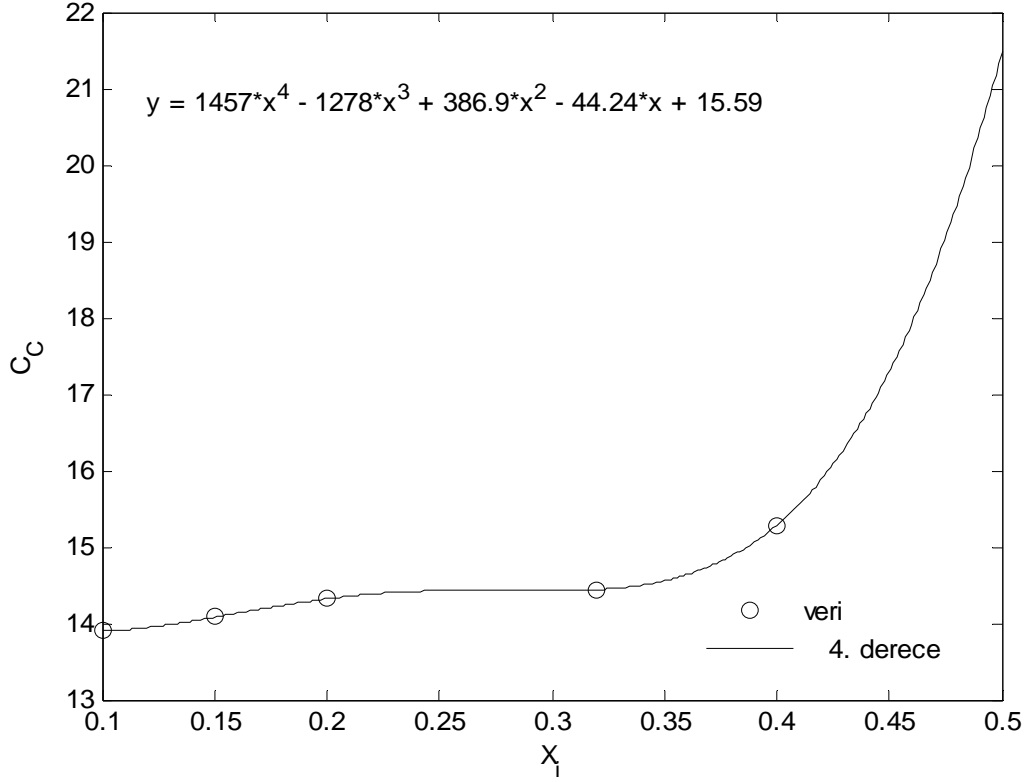
Şekil 97. Basamaklı savakta C noktası için lineer form



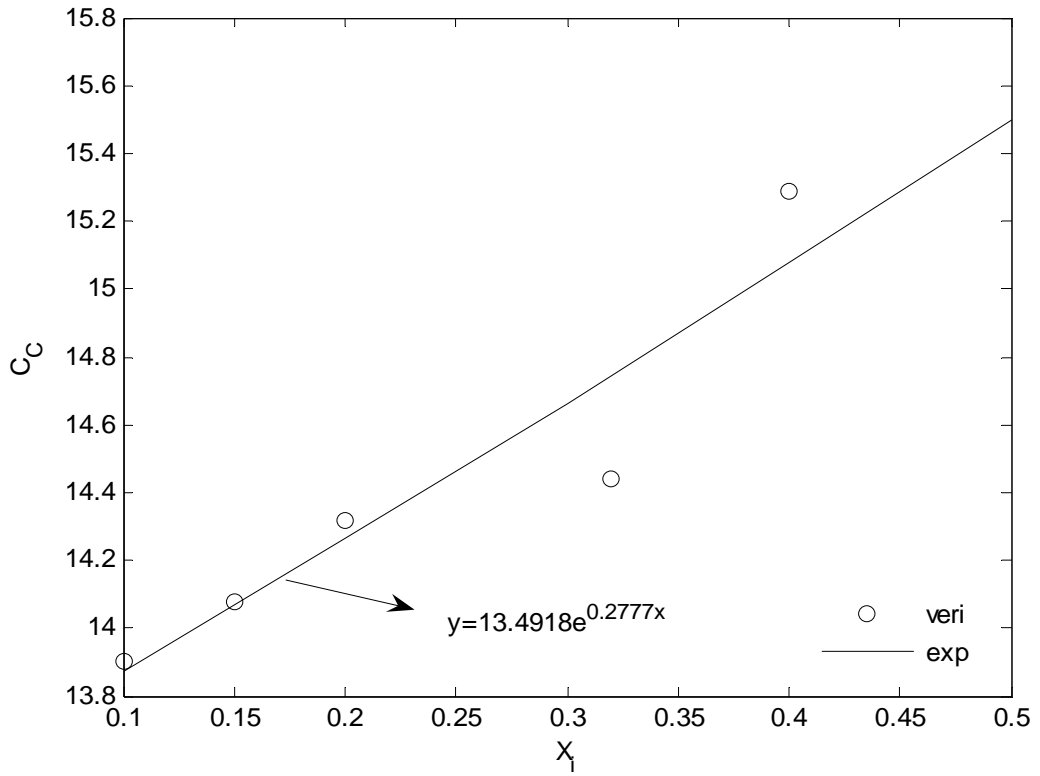
Şekil 98.Basamaklı savakta C noktası için quadratik form



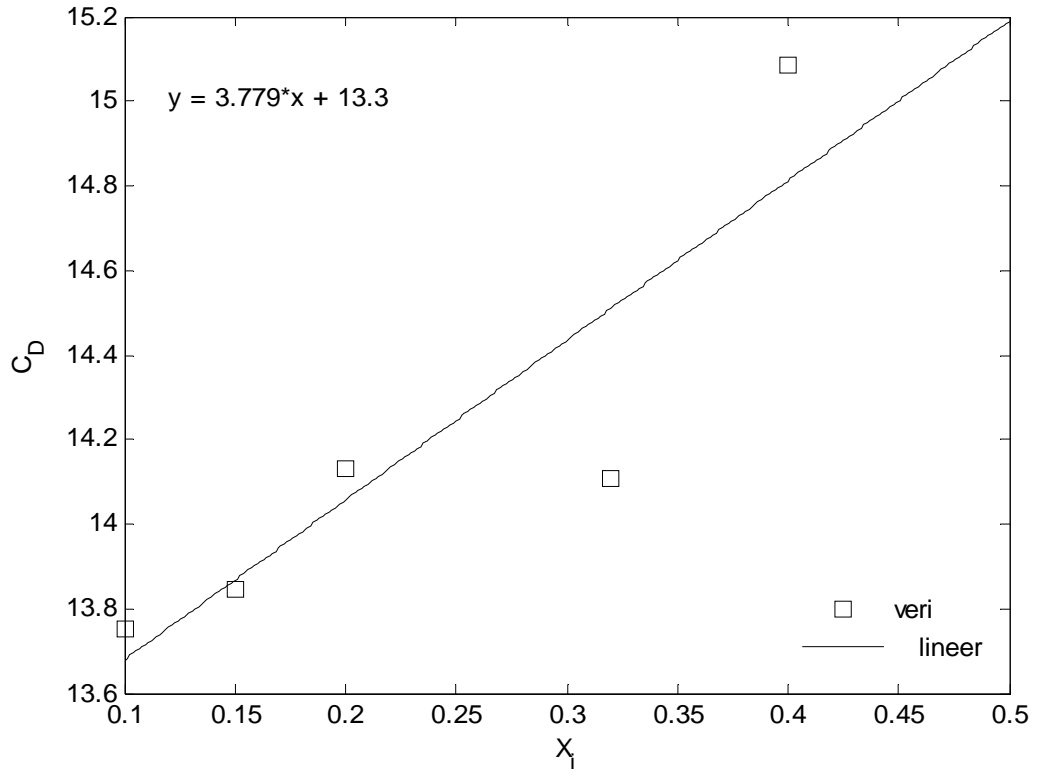
Şekil 99.Basamaklı savakta C noktası için kübik form



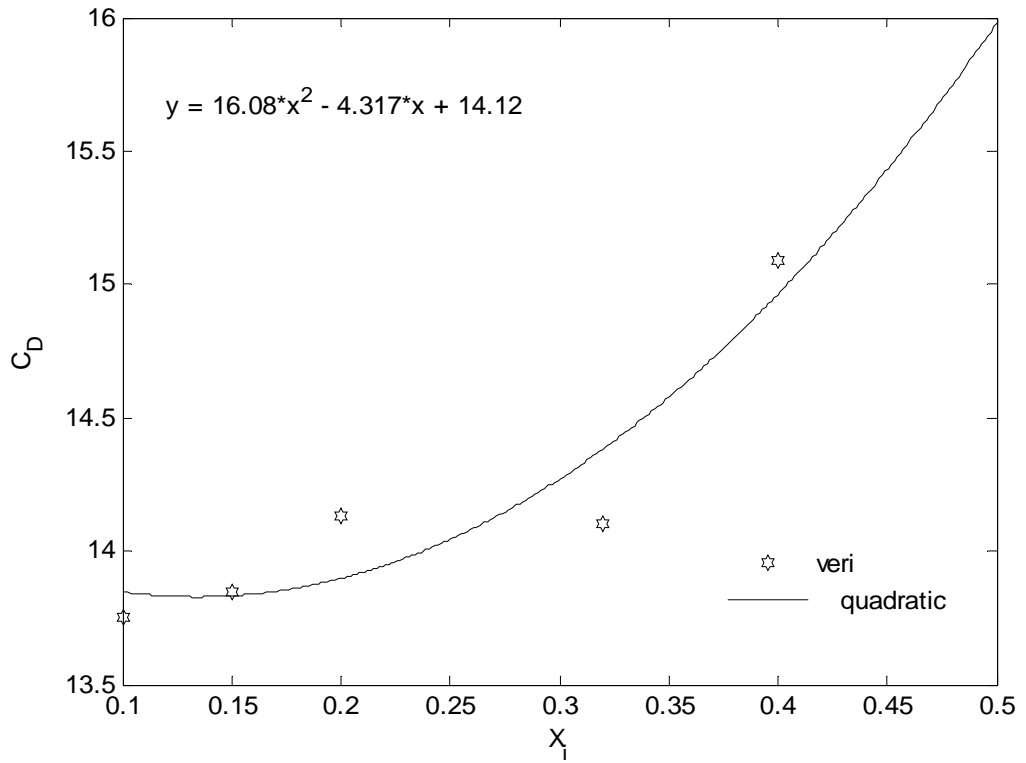
Şekil 100.Basamaklı savakta C noktası için 4.Derece form



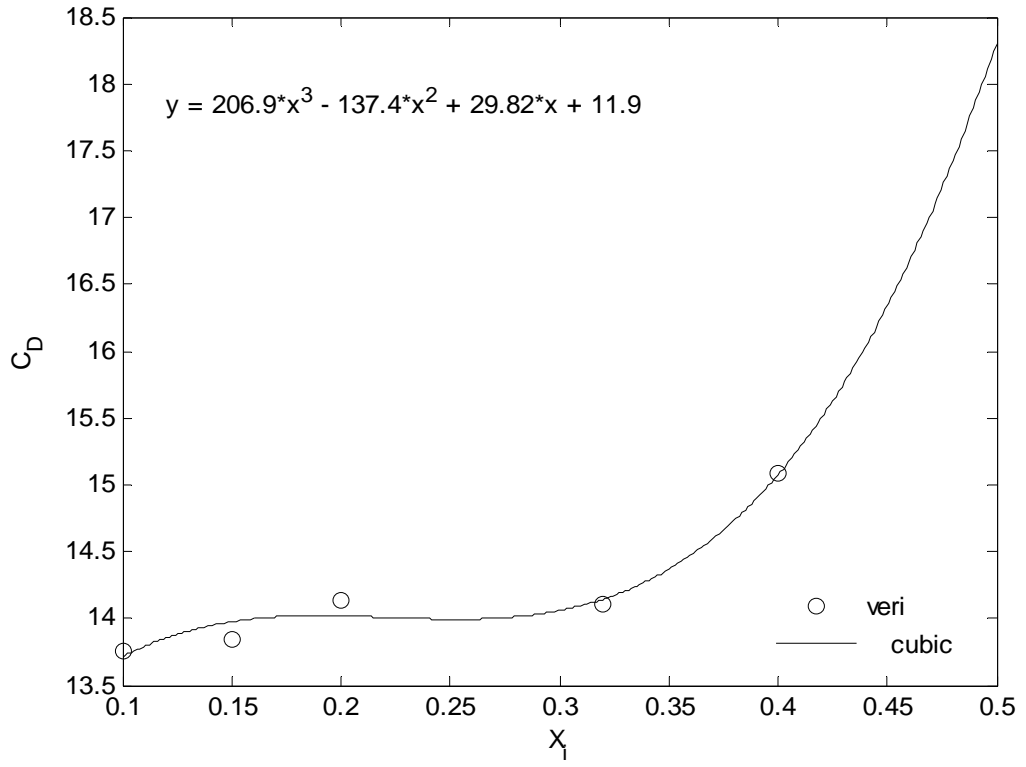
Şekil 101.Basamaklı savakta C noktası için exponansiyel form



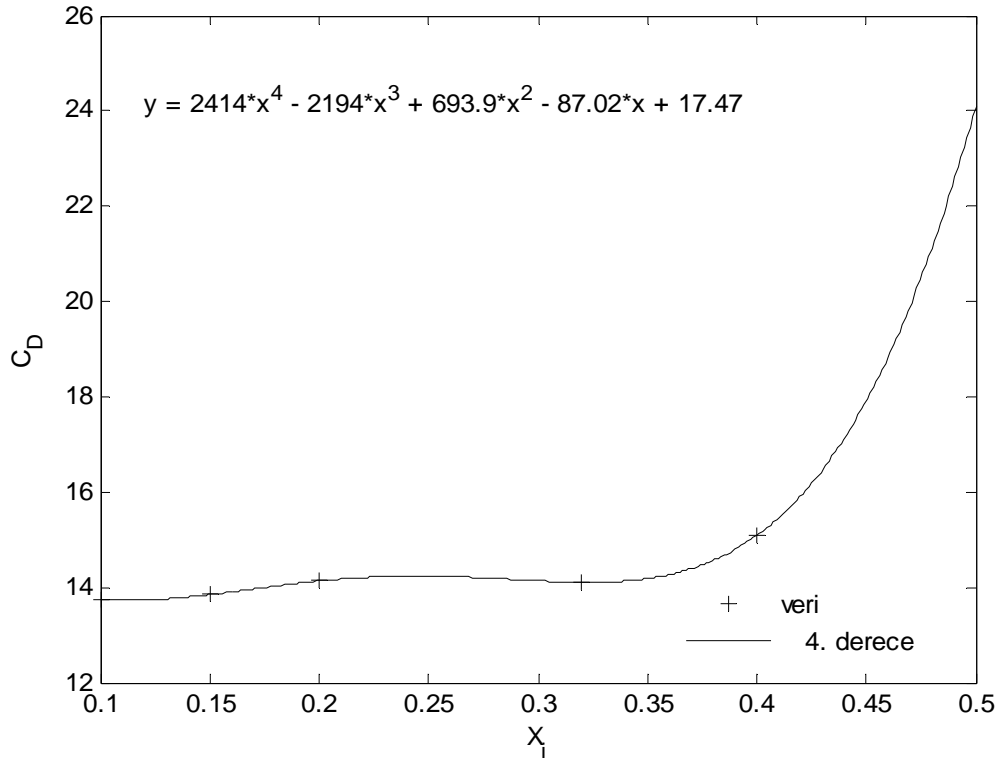
Şekil 102.Basamaklı savakta D noktası için lineer form



Şekil 103.Basamaklı savakta D noktası için quadratik form

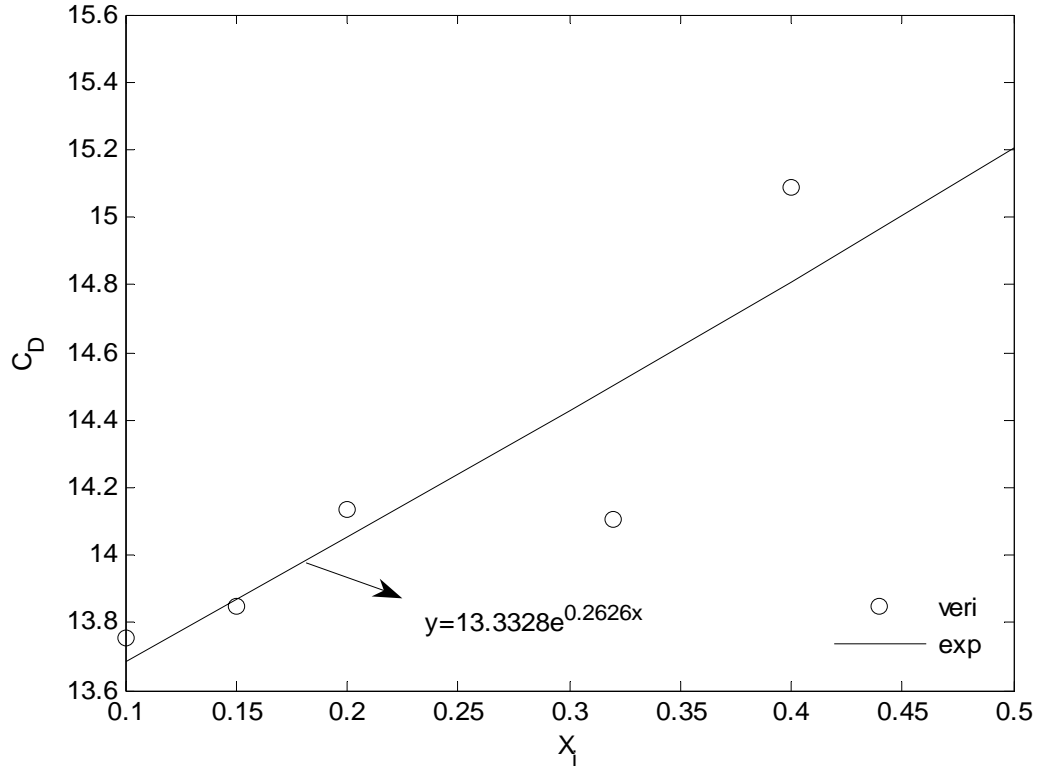


Şekil 104.Basamaklı savakta D noktası için kübik form

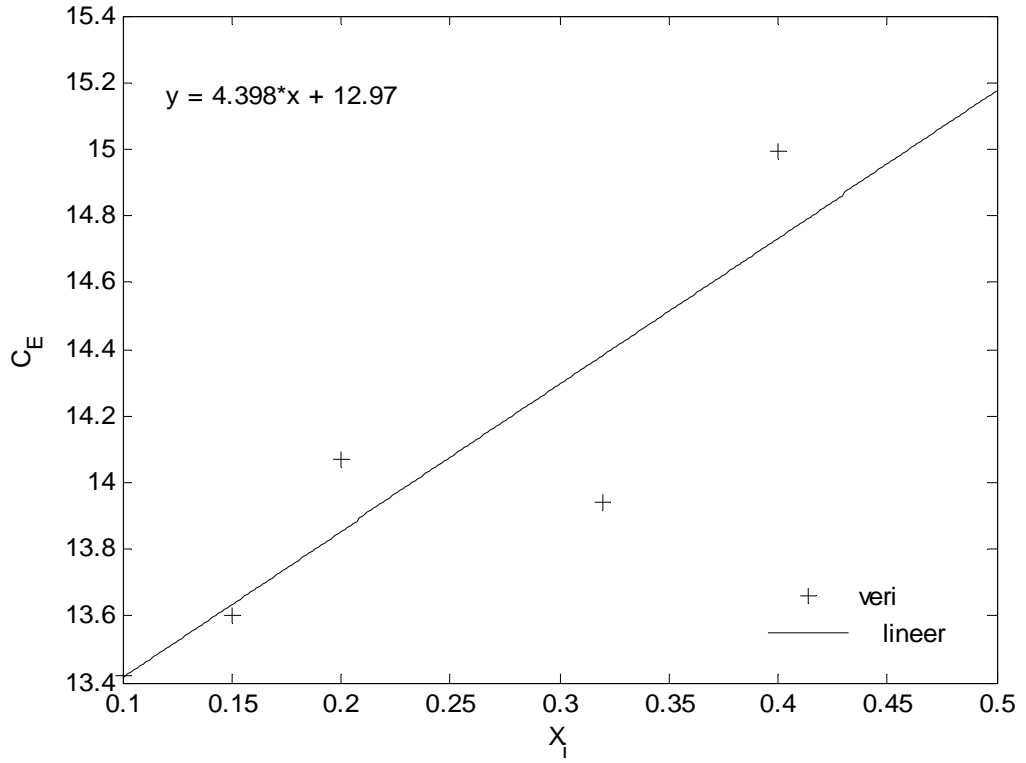


Şekil 105.Basamaklı savakta D noktası için 4. derece form

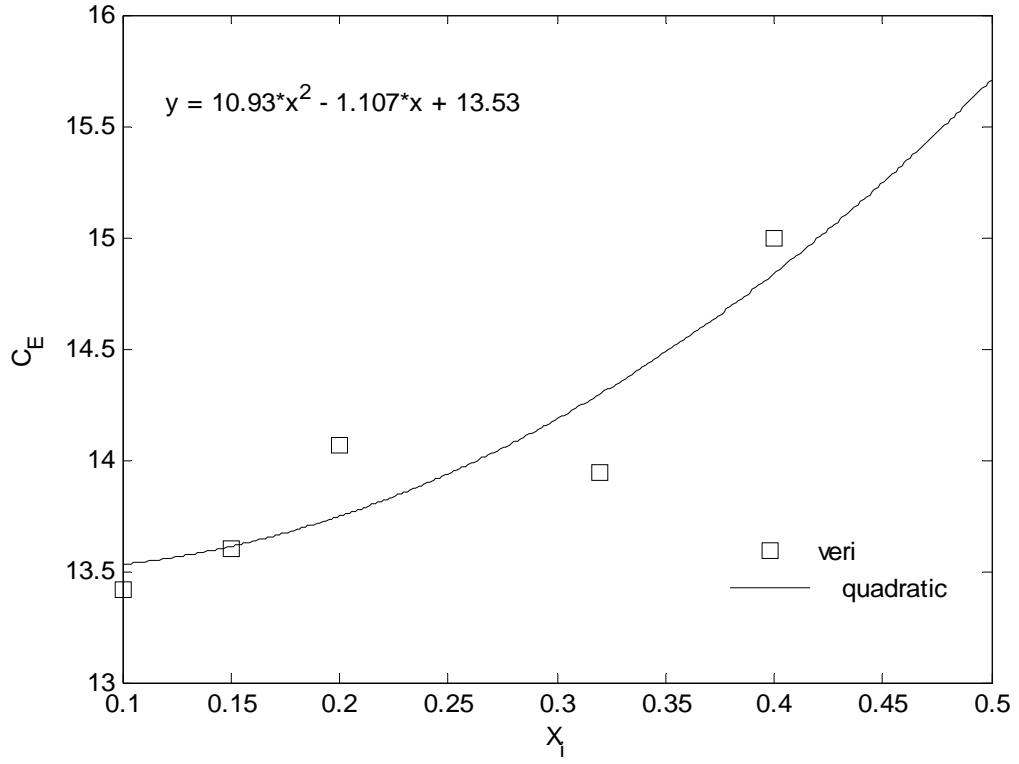




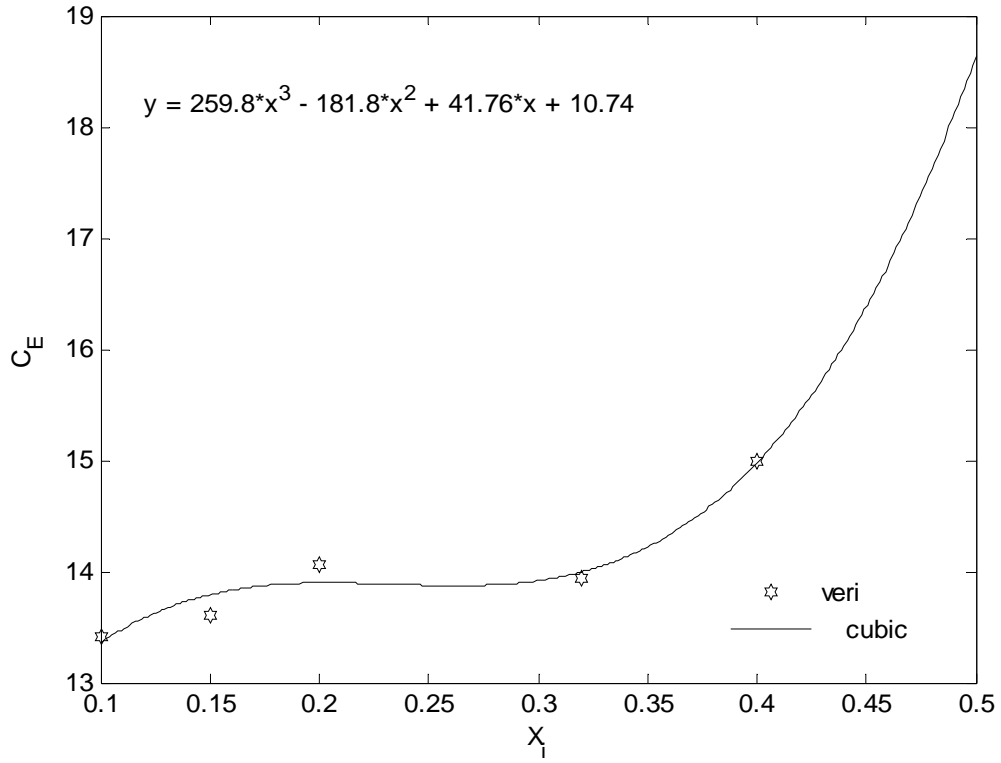
Şekil 106. Basamaklı savakta D noktası için exponansiyel form



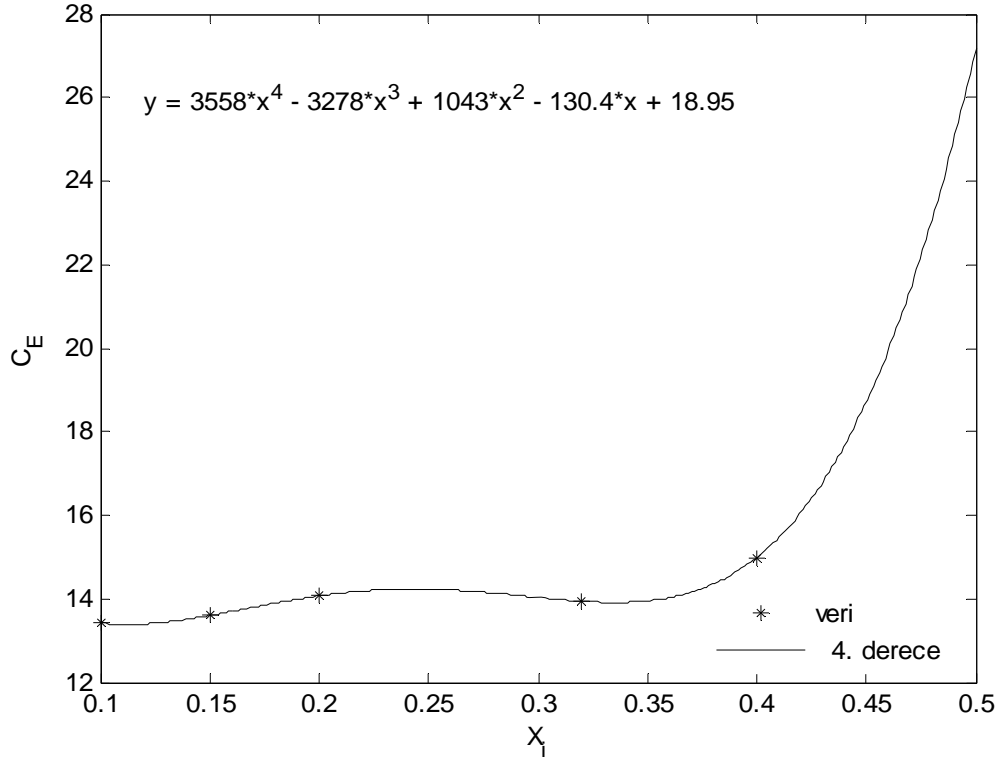
Şekil 107. Basamaklı savakta E noktası için lineer form



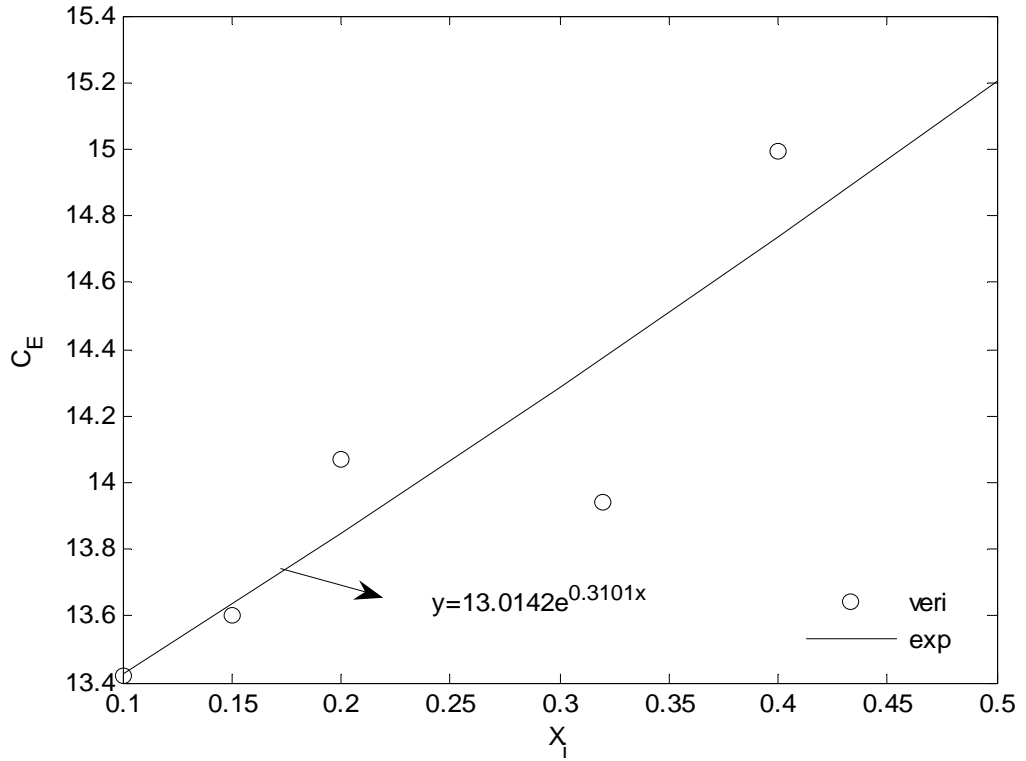
Şekil 108.Basamaklı savakta E noktası için quadratik form



Şekil 109.Basamaklı savakta E noktası için kübik form



Şekil 110. Basamaklı savakta E noktası için 4. derece form



Şekil 111. Basamaklı savakta E noktası için exponansiyel form

### 2.6.4. Debi-ÇO Değişimi İçin Değerlendirme

Kanal üzerinde hidrolik yapının mansabındaki 4 noktada ölçülen çözünmüş oksijen konsantrasyonları ve debi değişimi ile ilgili yapılan regresyon analizi sonucunda, değişimi gösteren eğri ve denklemleri şu şekilde özetleyebiliriz:

Düz Tabanlı Savak için;

- Lineer yaklaşım:

$$f = \begin{cases} 4.736x + 13.23, & C_B \quad 0 \leq t \leq 1 \\ 4.53x + 12.98, & C_C \quad 1 \leq t \leq 2 \\ 3.985x + 12.88, & C_D \quad 2 \leq t \leq 3 \\ 3.668x + 12.74, & C_E \quad 3 \leq t \leq 4 \end{cases} \quad (93)$$

- Quadratik yaklaşım

$$f = \begin{cases} 10.26x^2 - 0.4275x + 13.75, & C_B \quad 0 \leq t \leq 1 \\ 2.606x^2 + 3.218x + 13.12, & C_C \quad 1 \leq t \leq 2 \\ 3.442x^2 + 2.252x + 13.05, & C_D \quad 2 \leq t \leq 3 \\ 2.531x^2 + 2.394x + 12.87, & C_E \quad 3 \leq t \leq 4 \end{cases} \quad (94)$$

- Kübik yaklaşım

$$f = \begin{cases} 246.9x^3 - 173x^2 + 40.32x + 11.1, & C_B \quad 0 \leq t \leq 1 \\ 258.7x^3 - 189.4x^2 + 45.92x + 10.34, & C_C \quad 1 \leq t \leq 2 \\ 218.6x^3 - 158.8x^2 + 38.33x + 10.7, & C_D \quad 2 \leq t \leq 3 \\ 201.8x^3 - 147.2x^2 + 35.69x + 10.71, & C_E \quad 3 \leq t \leq 4 \end{cases} \quad (95)$$

- 4. derece yaklaşım

$$f = \begin{cases} 557.8x^4 - 367.4x^3 + 59.31x^2 + 5.027x + 13.24, & C_B \quad 0 \leq t \leq 1 \\ 1457x^4 - 1278x^3 + 386x^2 - 44.24x + 15.59, & C_C \quad 1 \leq t \leq 2 \\ 2414x^4 - 2194x^3 + 693.9x^2 - 87.02x + 14.47, & C_D \quad 2 \leq t \leq 3 \\ 3558x^4 - 3278x^3 + 1043x^2 - 130.4x + 18.95, & C_E \quad 3 \leq t \leq 4 \end{cases} \quad (96)$$

- Exponansiyel yaklaşım

$$f = \begin{cases} 13.2751e^{0.3265x}, & C_B \quad 0 \leq t \leq 1 \\ 13.0189e^{0.3204x}, & C_C \quad 1 \leq t \leq 2 \\ 12.905e^{0.2865x}, & C_D \quad 2 \leq t \leq 3 \\ 12.7695e^{0.2679x}, & C_E \quad 3 \leq t \leq 4 \end{cases} \quad (97)$$

Basamaklı Savak için :

- Lineer yaklaşım

$$f = \begin{cases} 4.233x + 13.65, & C_B \quad 0 \leq t \leq 1 \\ 4.045x + 13.46, & C_C \quad 1 \leq t \leq 2 \\ 3.779x + 13.3, & C_D \quad 2 \leq t \leq 3 \\ 4.398x + 12.97, & C_E \quad 3 \leq t \leq 4 \end{cases} \quad (98)$$

- Quadratik yaklaşım

$$f = \begin{cases} 6.169x^2 + 1.127x + 13.96, & C_B \quad 0 \leq t \leq 1 \\ 11.81x^2 - 1.899x + 14.06, & C_C \quad 1 \leq t \leq 2 \\ 16.08x^2 - 4.317x + 14.12, & C_D \quad 2 \leq t \leq 3 \\ 10.93x^2 - 1.107x + 13.53, & C_E \quad 3 \leq t \leq 4 \end{cases} \quad (99)$$

- Kübik yaklaşım

$$f = \begin{cases} 187.2x^3 - 132.8x^2 + 32.02x + 11.95, & C_B \quad 0 \leq t \leq 1 \\ 170.8x^3 - 115x^2 + 26.29x + 12.22, & C_C \quad 1 \leq t \leq 2 \\ 206.9x^3 - 137.4x^2 + 29.82x + 11.9, & C_D \quad 2 \leq t \leq 3 \\ 259.8x^3 - 181.8x^2 + 41.76x + 10.74, & C_E \quad 3 \leq t \leq 4 \end{cases} \quad (100)$$

- 4. derece yaklaşım

$$f = \begin{cases} 948.9x^4 - 696.6x^3 + 153.7x^2 - 5.596x + 13.29, & C_B \quad 0 \leq t \leq 1 \\ 416.3x^4 - 155.2x^3 - 46.6x^2 + 25.77x + 11.3, & C_C \quad 1 \leq t \leq 2 \\ 1564x^4 - 1336x^3 + 379.7x^2 - 37.35x + 14.31, & C_D \quad 2 \leq t \leq 3 \\ 2029x^4 - 1816x^3 + 551.5x^2 - 62.51x + 15.39, & C_E \quad 3 \leq t \leq 4 \end{cases} \quad (101)$$

- Exponansiyel yaklaşım

$$f = \begin{cases} 13.2709e^{0.4335x}, & C_B \quad 0 \leq t \leq 1 \\ 13.4918e^{0.2777x}, & C_C \quad 1 \leq t \leq 2 \\ 13.3328e^{0.2626x}, & C_D \quad 2 \leq t \leq 3 \\ 13.0142e^{0.3101x}, & C_E \quad 3 \leq t \leq 4 \end{cases} \quad (102)$$

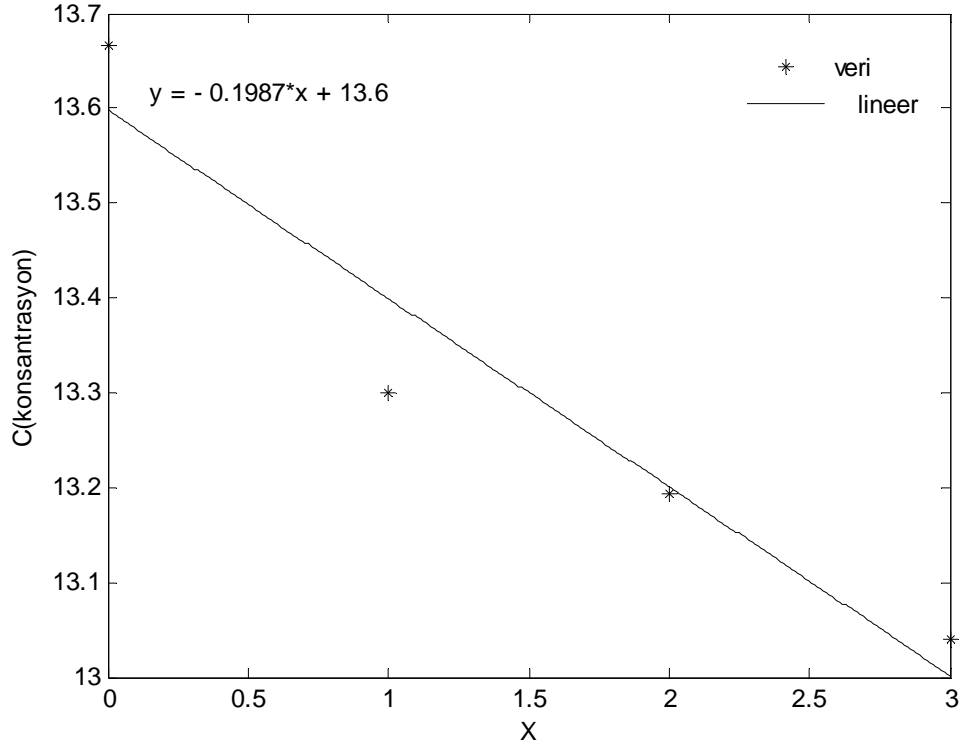
### 2.6.5. Düz Tabanlı Savak İçin ÇO-Mesafe Değişiminin Modellenmesi

Düz tabanlı savakta çözünmüş oksijen konsantrasyonunun kanal boyunca mesafeye bağlı değişimini bulmak için tablo 40'daki verilerden yararlanacağız. Tabloda, daha önce verilen çözünmüş oksijen konsantrasyonu değerlerinin ortalama değerleri görülmektedir. Bu değerler yardımıyla, yine aynı şekilde yukarıda bahsedilen 5 farklı yaklaşımla çözünmüş oksijen konsantrasyonunun mesafeye bağlı olarak nasıl bir eğri çizdiği bulmaya çalışacağız.

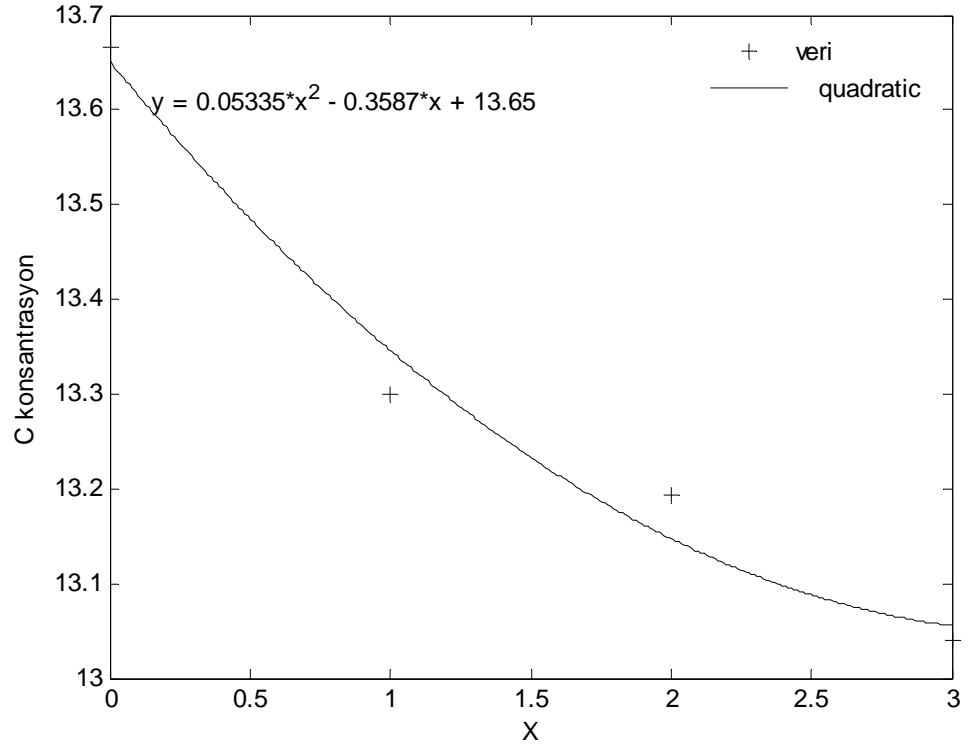
Regresyon analizi yapılırken yapılan analizler her bir debi değeri için ayrı ayrı yapılacak ve denklemleri çıkarılacaktır.

Tablo 36. Düz tabanlı savakta kanal boyunca oluşan ortalama konsantrasyonlar

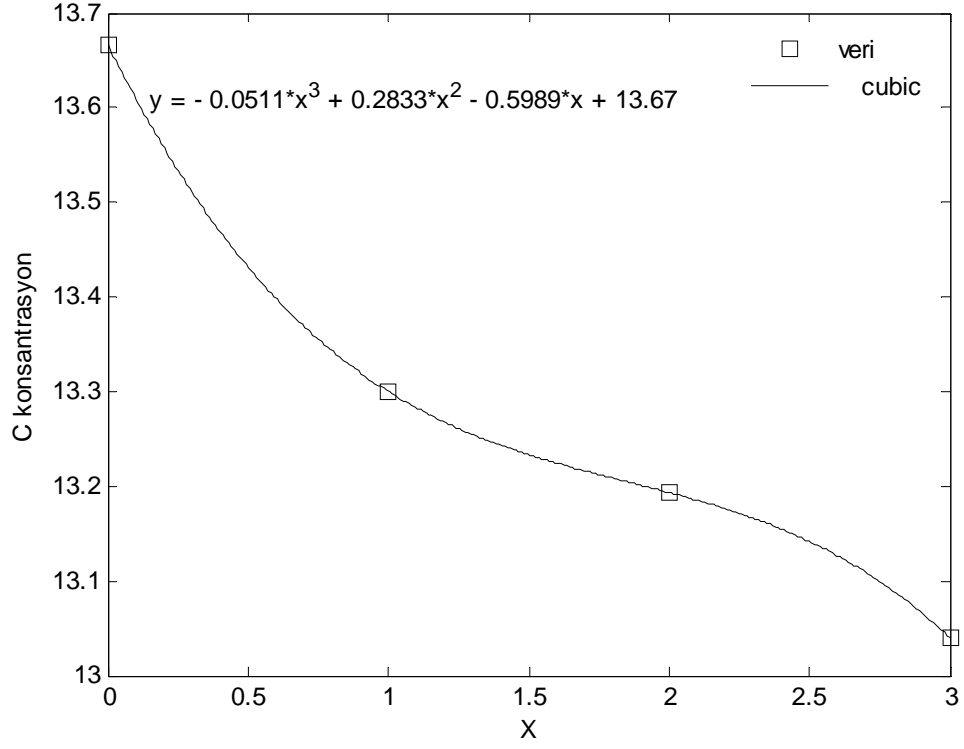
|                   | B       | C       | D       | E       |
|-------------------|---------|---------|---------|---------|
| $Q_1 = 0.10$ l/sn | 13.6667 | 13.3000 | 13.1933 | 13.0400 |
| $Q_2 = 0.15$ l/sn | 14.0400 | 13.8133 | 13.5333 | 13.3200 |
| $Q_3 = 0.20$ l/sn | 14.2667 | 14.0333 | 13.8400 | 13.6667 |
| $Q_4 = 0.32$ l/sn | 14.3667 | 14.1067 | 13.8467 | 13.6333 |
| $Q_5 = 0.40$ l/sn | 15.3600 | 14.9600 | 14.6267 | 14.3533 |



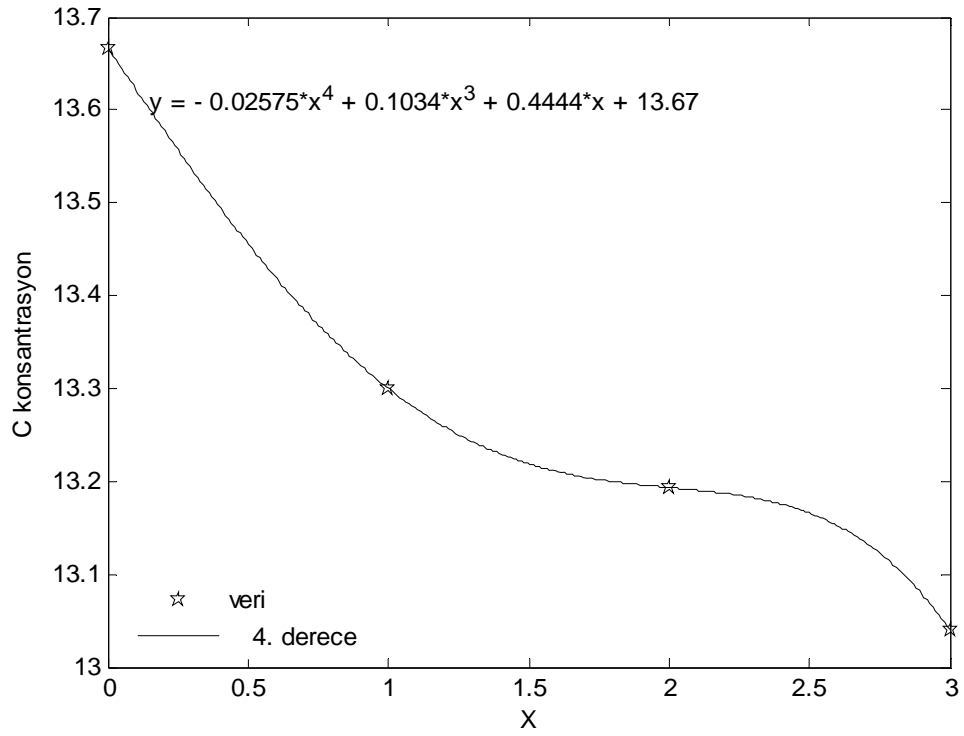
Şekil 112. Düz tabanlı savakta için  $Q_1 = 0.10$  l/sn için lineer form



Şekil 113. Düz tabanlı savakta için  $Q_1 = 0.10$  l/sn için quadratic form

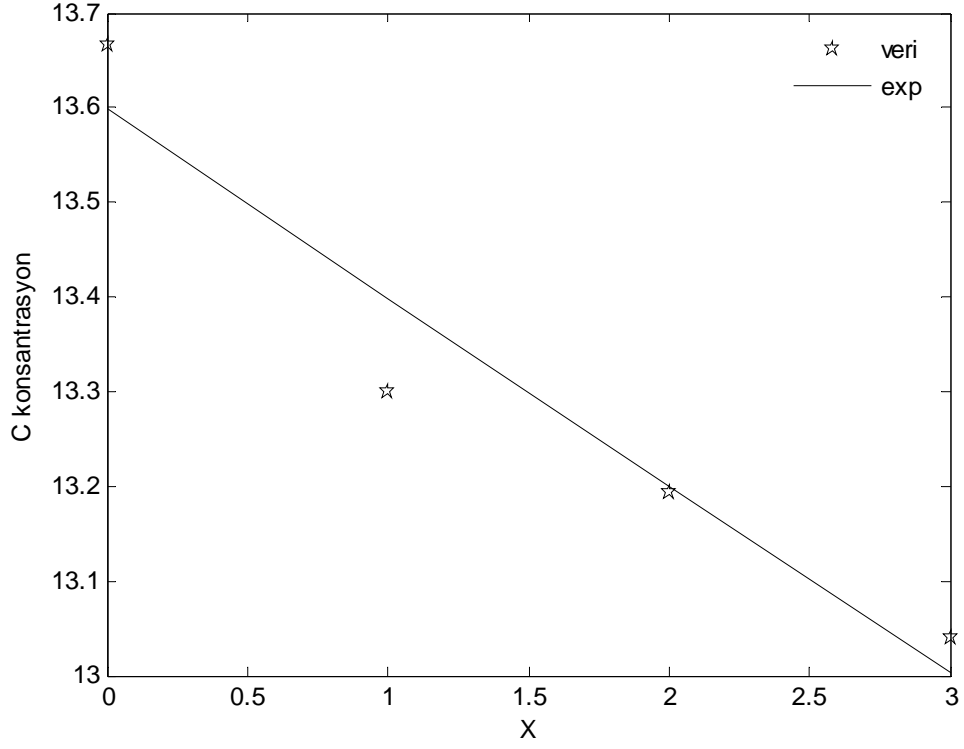


Şekil 114. Düz tabanlı savakta için  $Q_1 = 0.10$  l/sn için kübik form

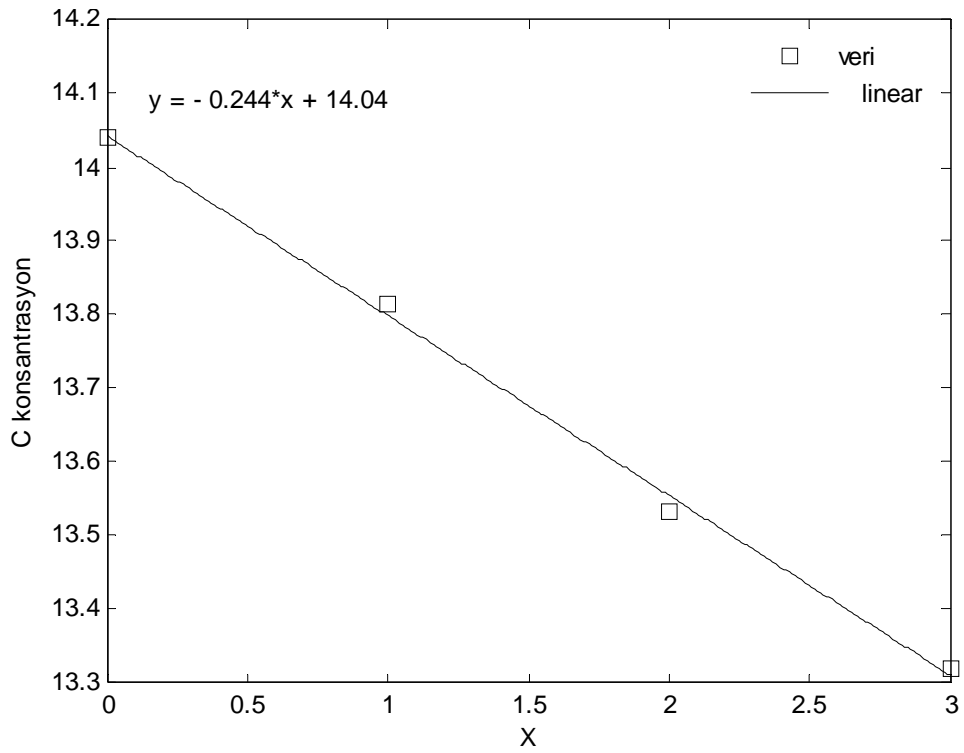


Şekil 115. Düz tabanlı savakta için  $Q_1 = 0.10$  l/sn için 4.derece form

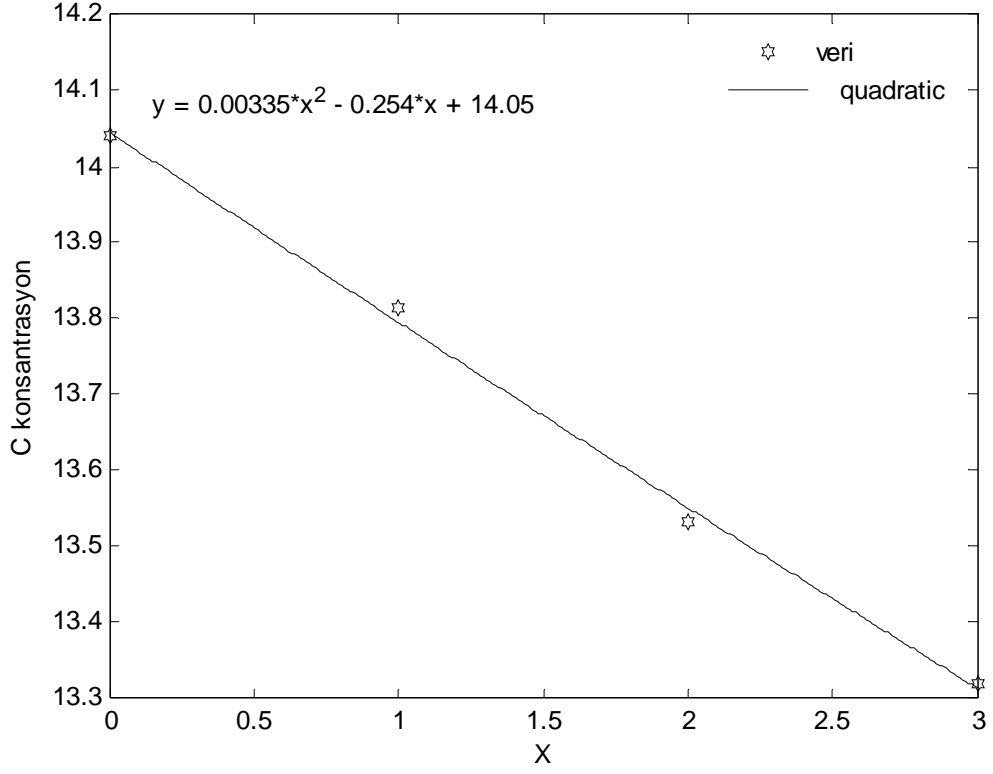




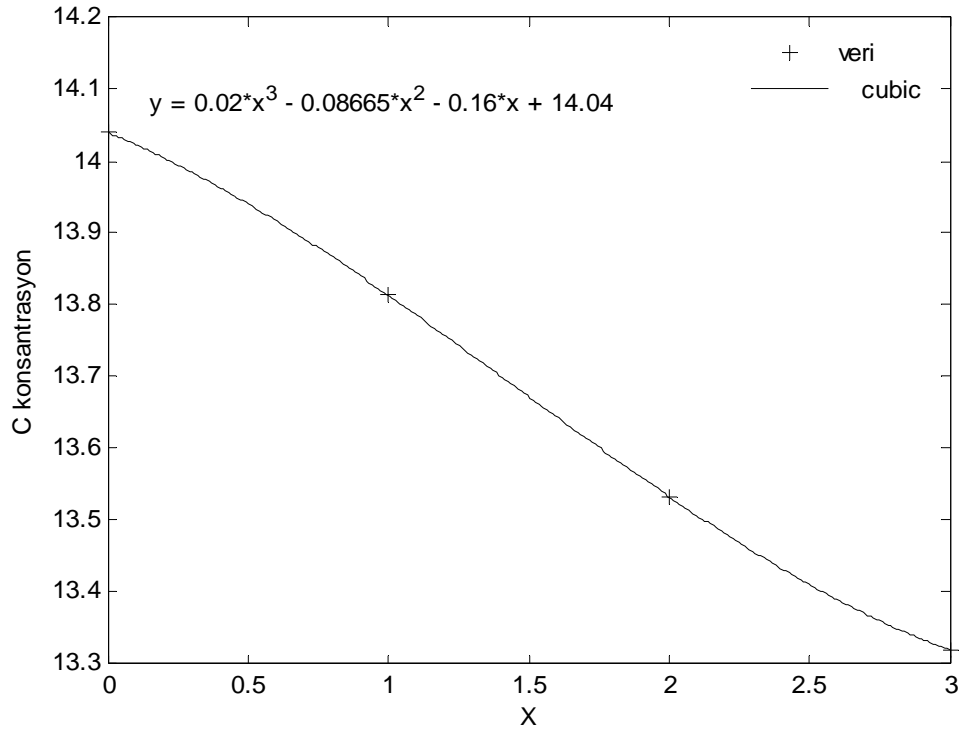
Şekil 116. Düz tabanlı savakta için  $Q_1 = 0.10$  l/sn için exponansiyel form



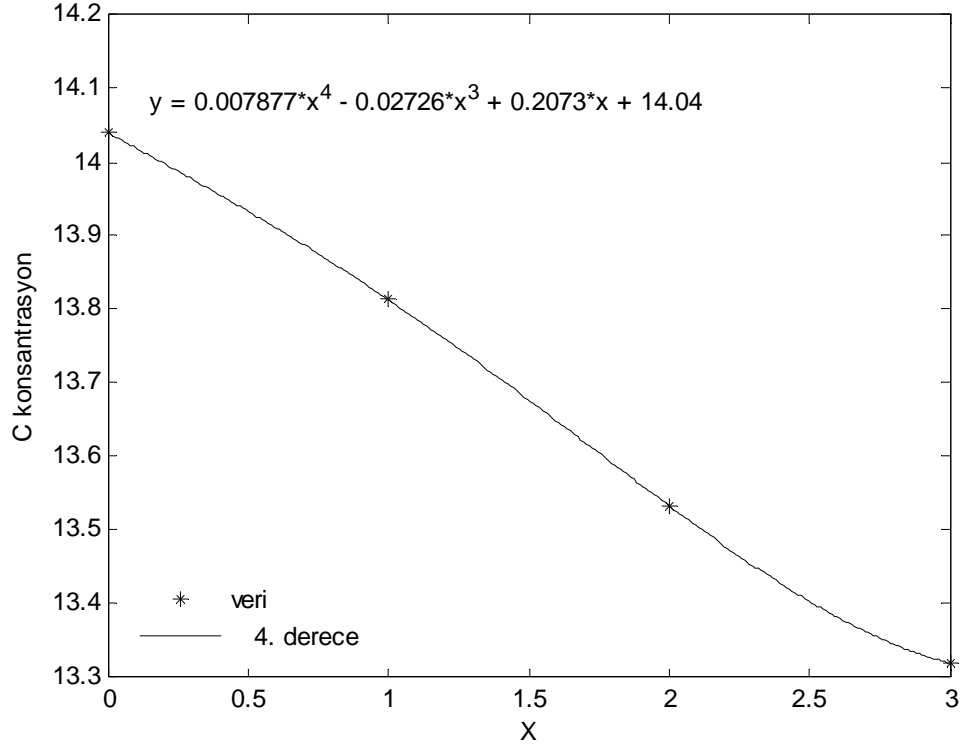
Şekil 117. Düz tabanlı savakta için  $Q_2 = 0.15$  l/sn için linear form



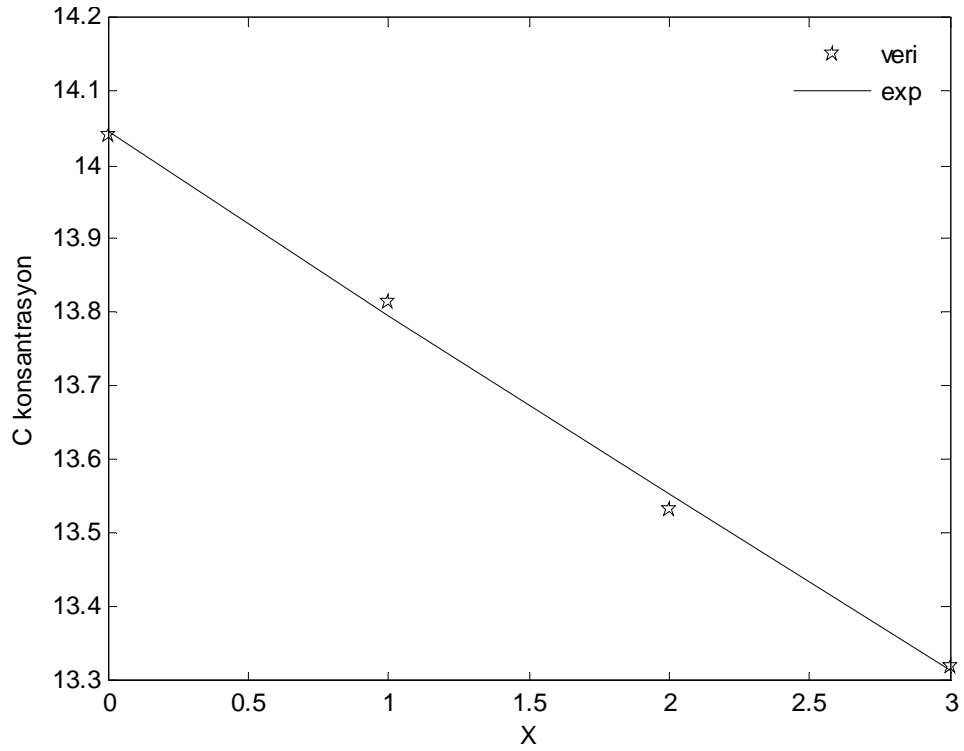
Şekil 118. Düz tabanlı savakta için  $Q_2 = 0.15$  l/sn için quadratik form



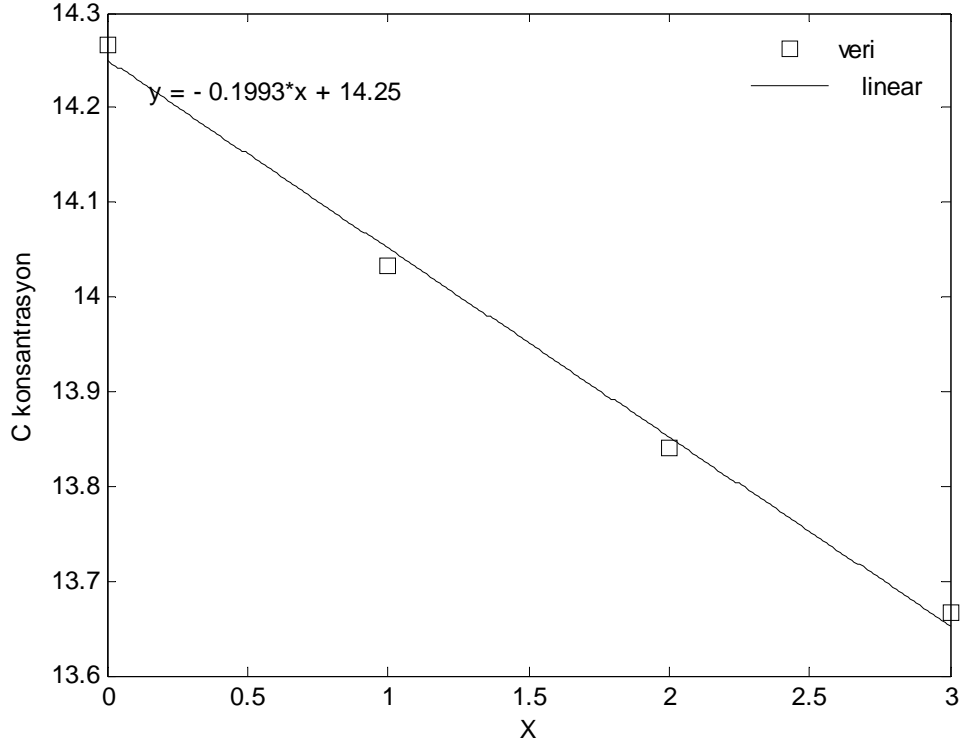
Şekil 119. Düz tabanlı savakta için  $Q_2 = 0.15$  l/sn için kübik form



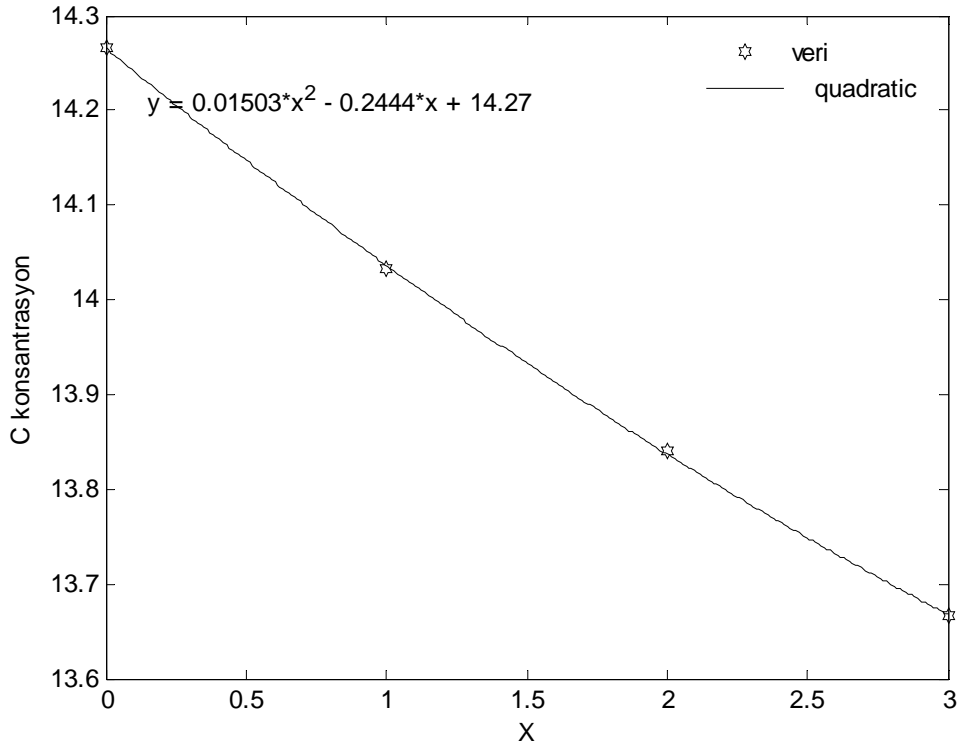
Şekil 120. Düz tabanlı savakta için  $Q_2 = 0.15$  l/sn için 4.derece form



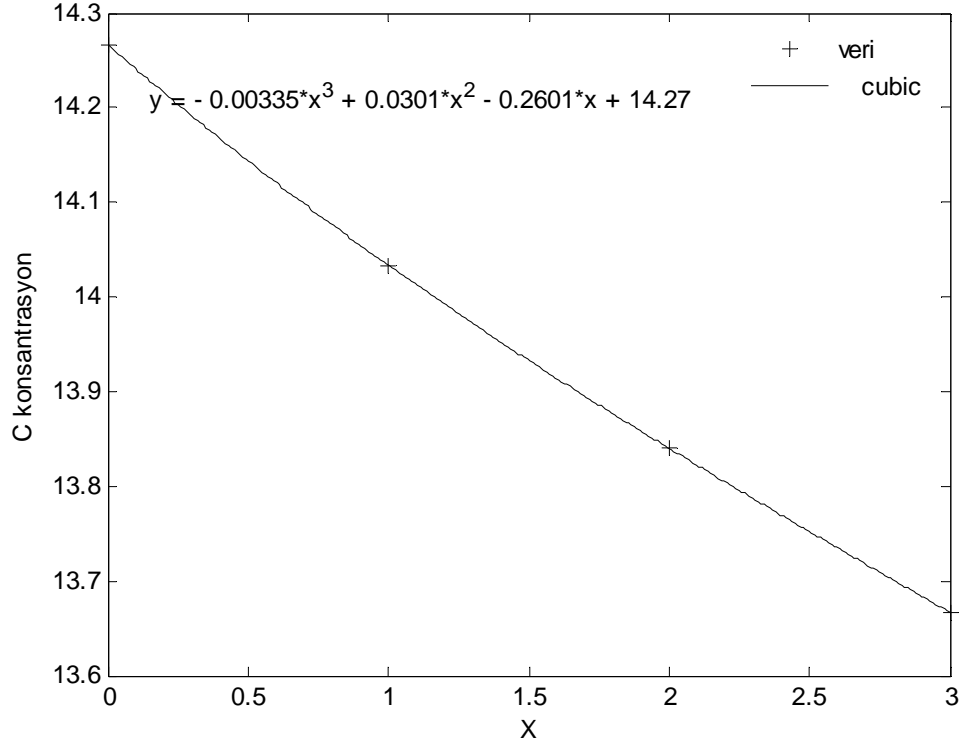
Şekil 121. Düz tabanlı savakta için  $Q_2 = 0.15$  l/sn için exponansiyel form



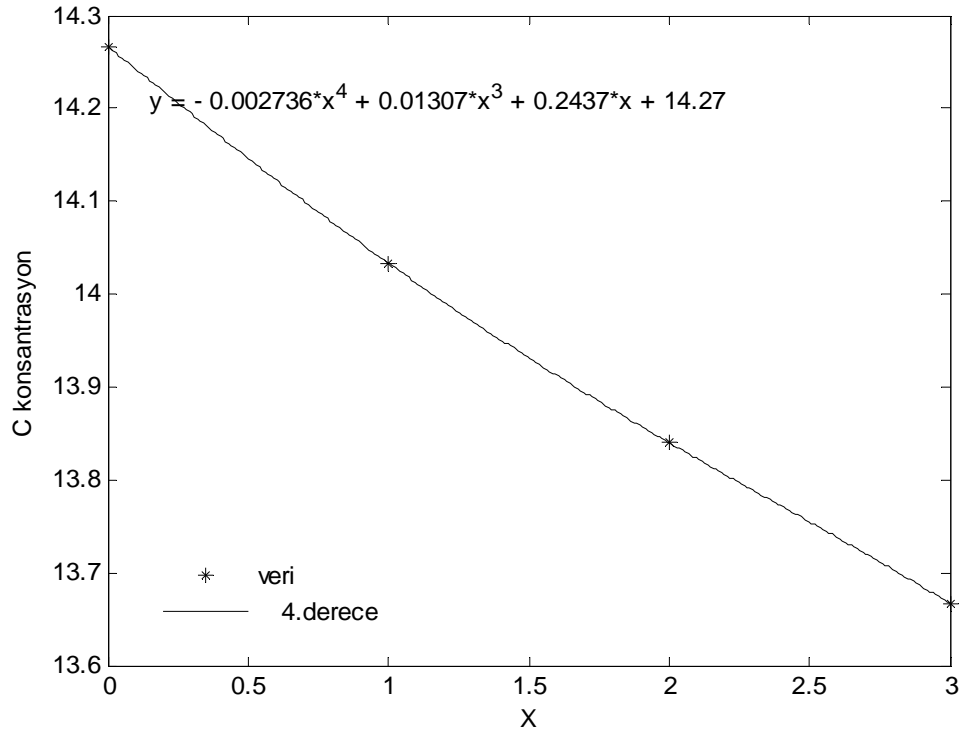
Şekil 122. Düz tabanlı savakta için  $Q_3 = 0.20$  l/sn için linear form



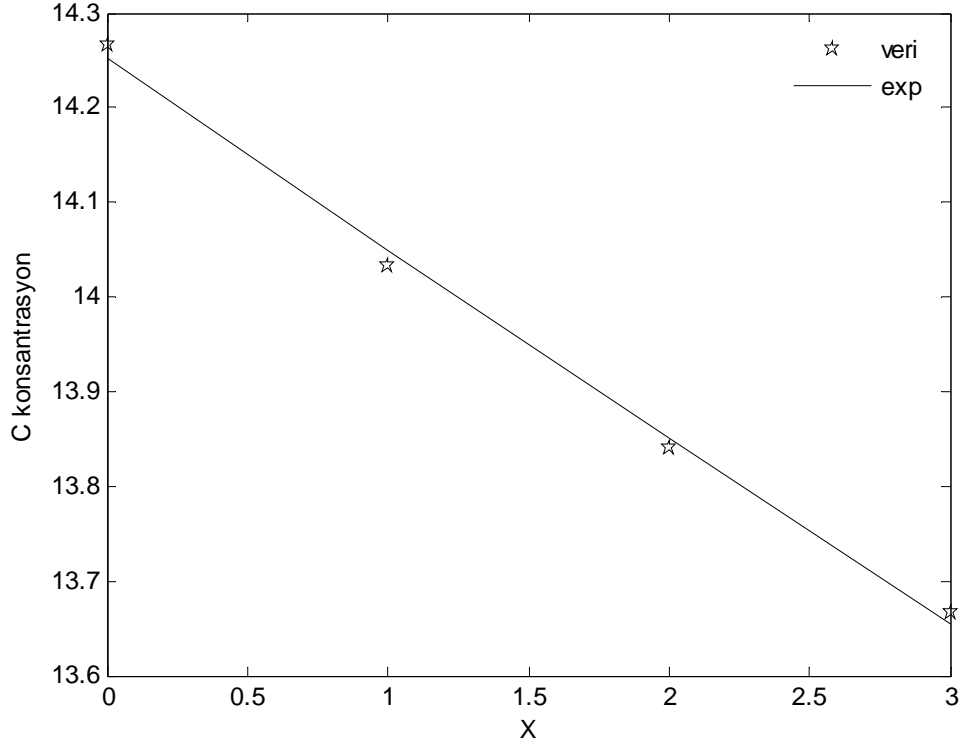
Şekil 123. Düz tabanlı savakta için  $Q_3 = 0.20$  l/sn için quadratik form



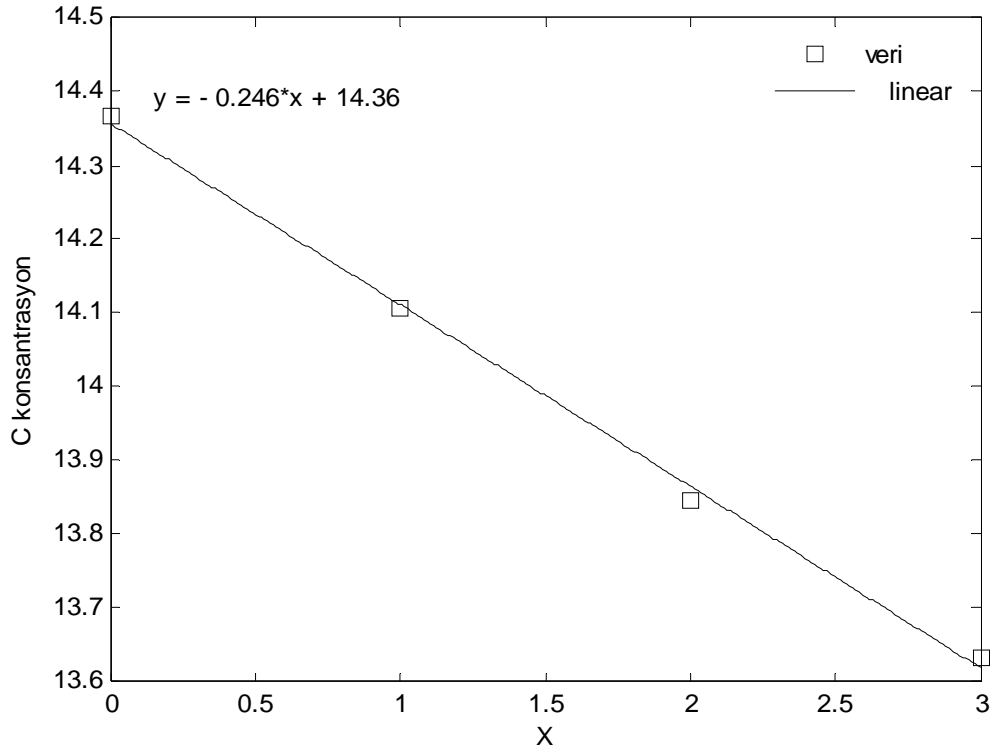
Şekil 124. Düz tabanlı savakta için  $Q_3 = 0.20$  l/sn için kübik form



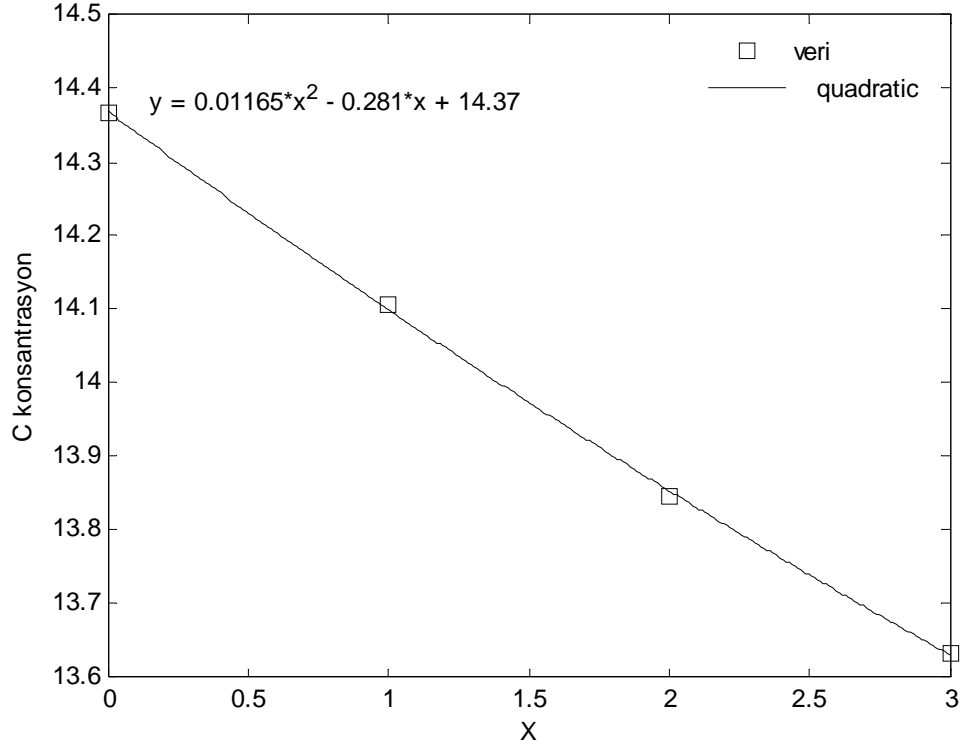
Şekil 125. Düz tabanlı savakta için  $Q_3 = 0.20$  l/sn için 4.derece form



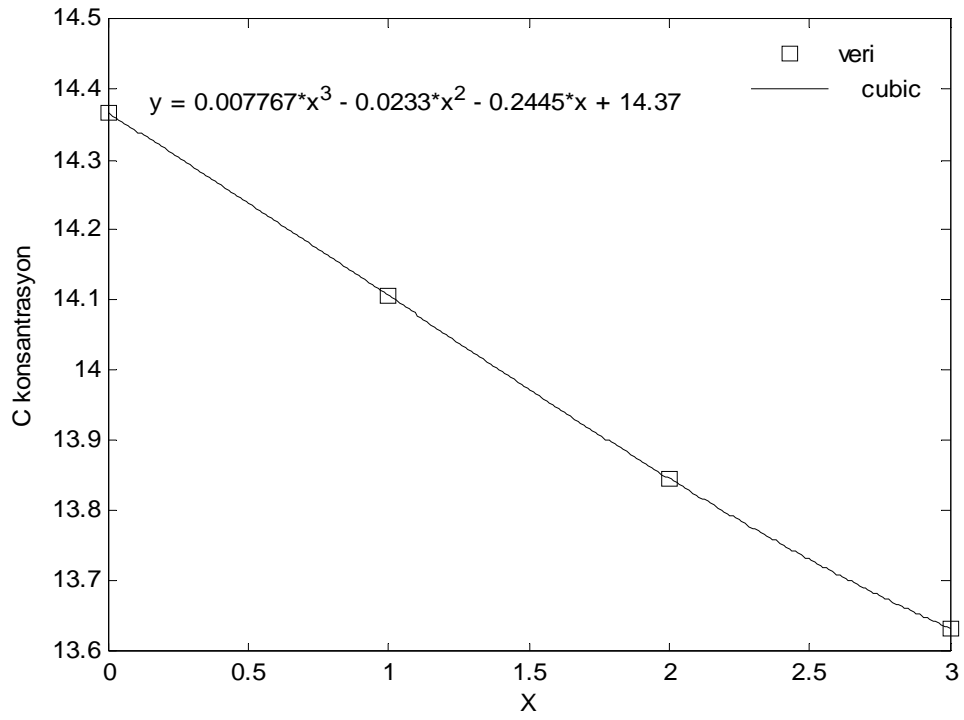
Şekil 126. Düz tabanlı savakta için  $Q_3 = 0.20$  l/sn için exponansiyel form



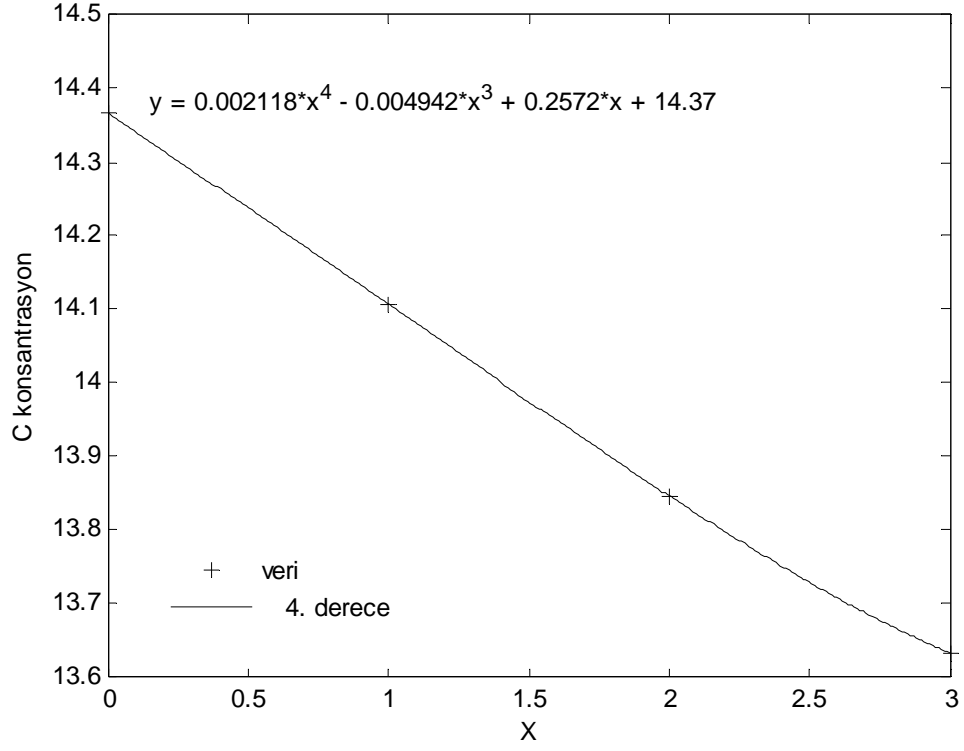
Şekil 127. Düz tabanlı savakta için  $Q_4 = 0.32$  l/sn için lineer form



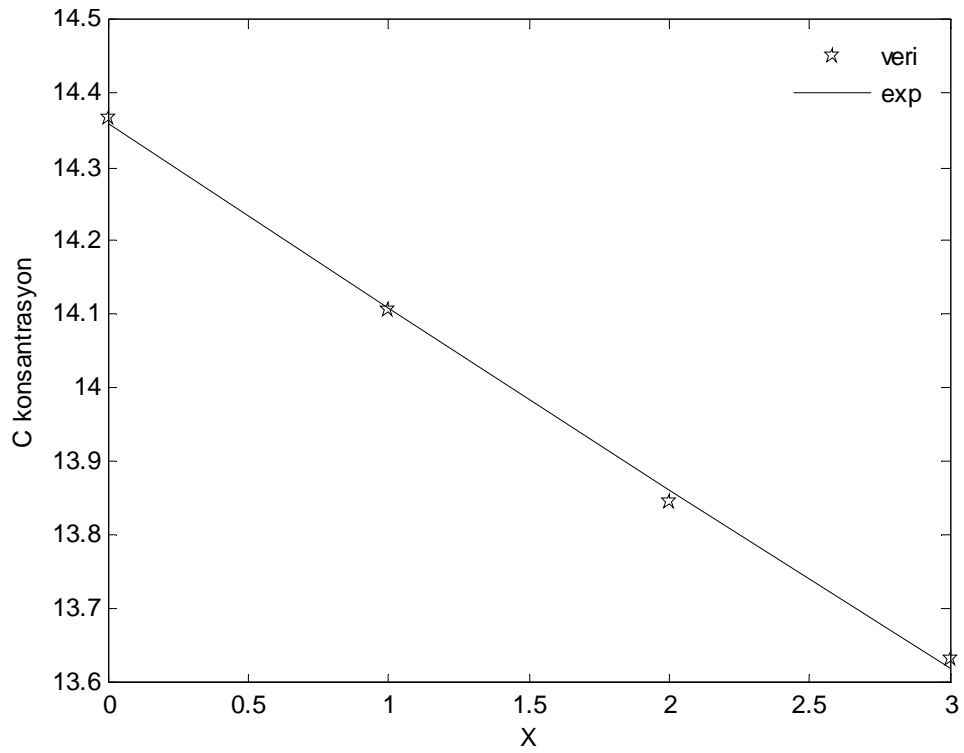
Şekil 128. Düz tabanlı savakta için  $Q_4 = 0.32$  l/sn için quadratic form



Şekil 129. Düz tabanlı savakta için  $Q_4 = 0.32$  l/sn için kübik form

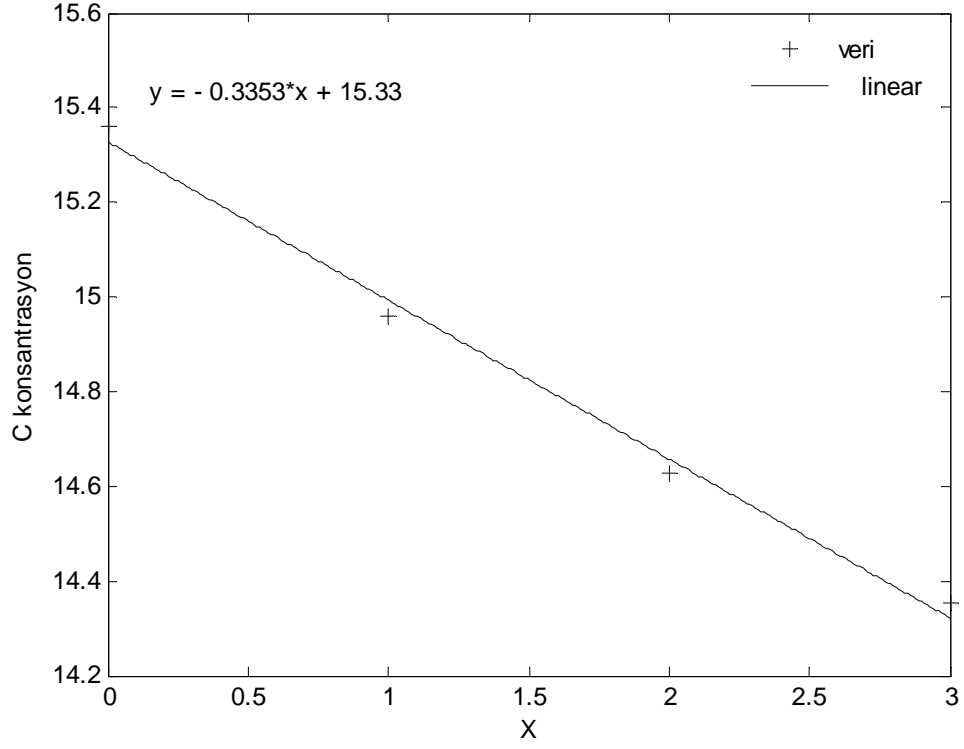


Şekil 130. Düz tabanlı savakta için  $Q_4 = 0.32$  l/sn için 4. derece form

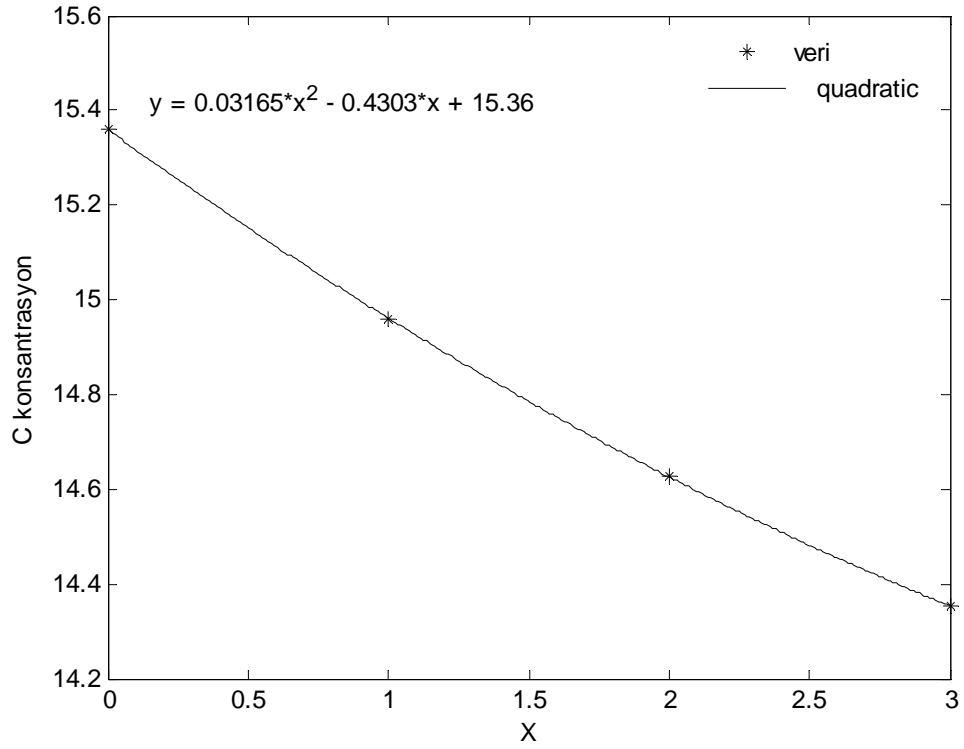


Şekil 131. Düz tabanlı savakta için  $Q_4 = 0.32$  l/sn için exponansiyel form

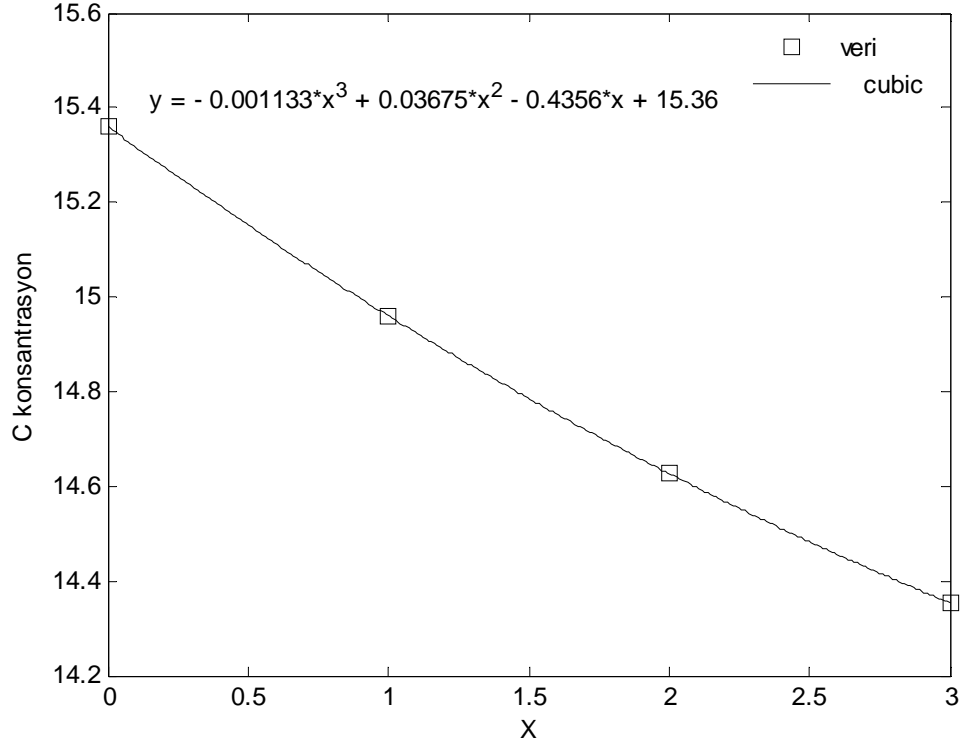




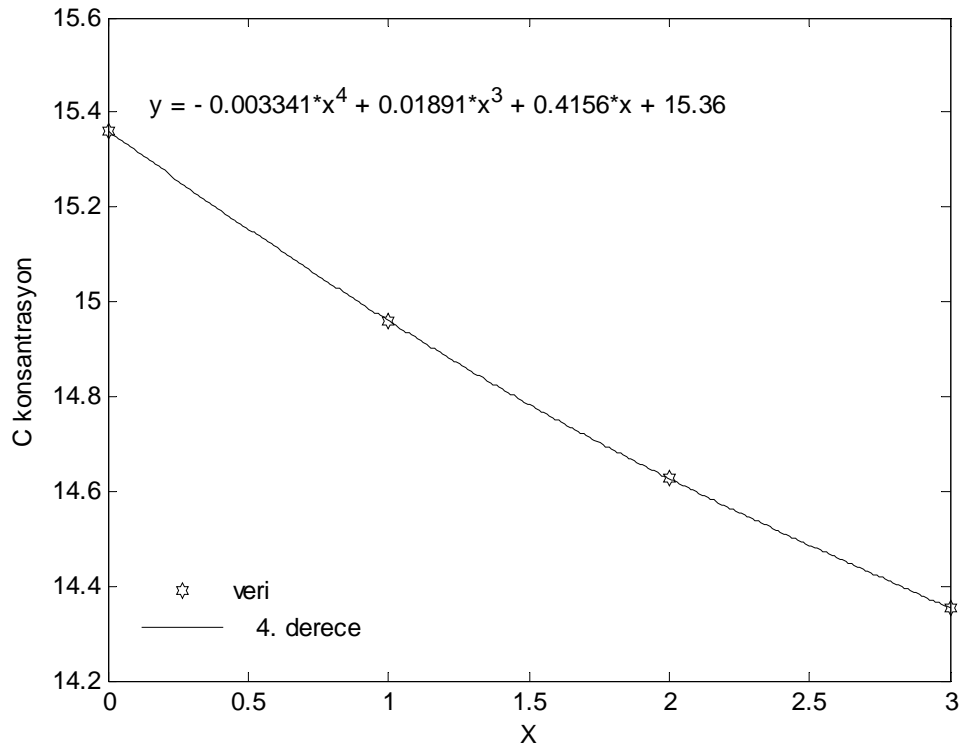
Şekil 132. Düz tabanlı savakta için  $Q_5 = 0.40$  l/sn için linear form



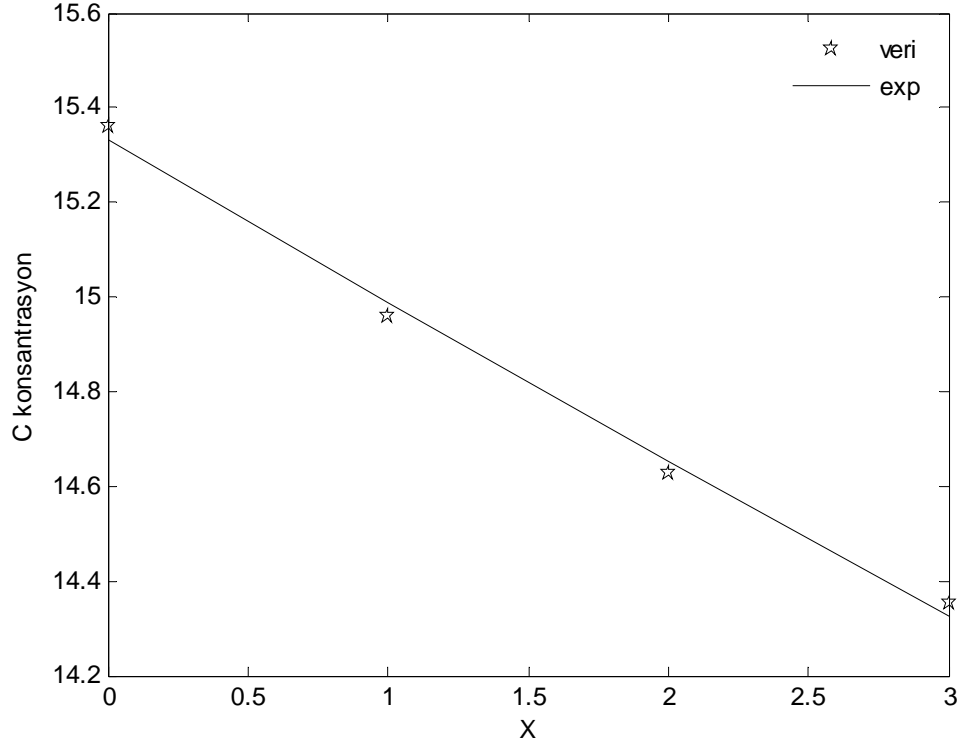
Şekil 133. Düz tabanlı savakta için  $Q_5 = 0.40$  l/sn için quadratik form



Şekil 134. Düz tabanlı savakta için  $Q_5 = 0.40$  l/sn için kübik form



Şekil 135. Düz tabanlı savakta için  $Q_5 = 0.40$  l/sn için 4. derece form



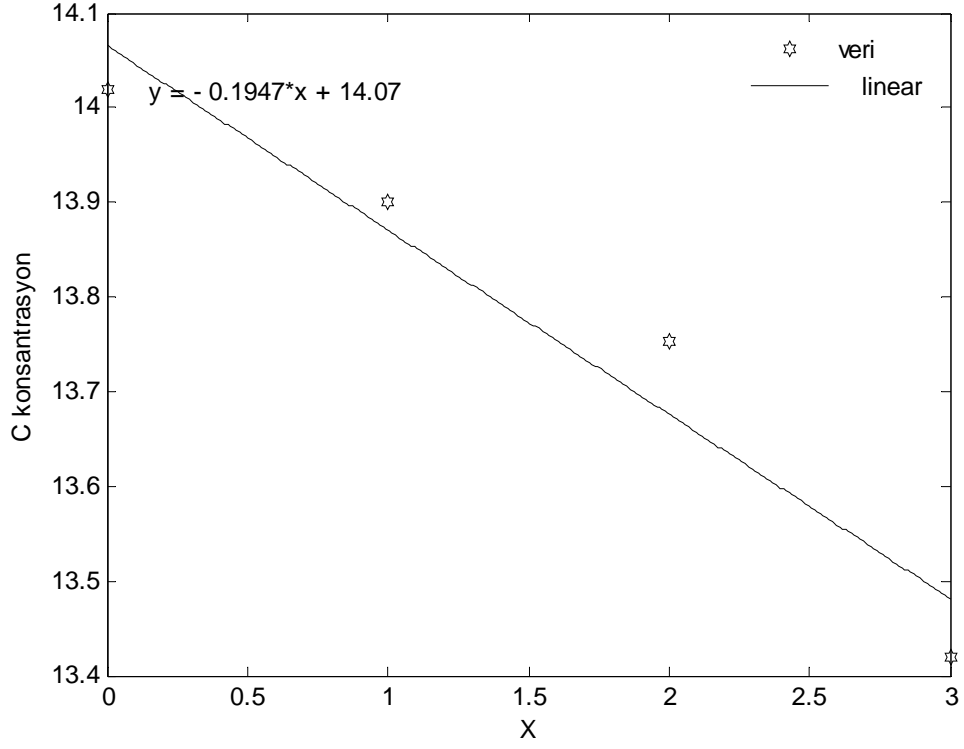
Şekil 136. Düz tabanlı savakta için  $Q_5 = 0.40$  l/sn için exponansiyel form

### 2.6.6. Basamaklı Savak İçin ÇO-Mesafe Değişiminin Modellenmesi

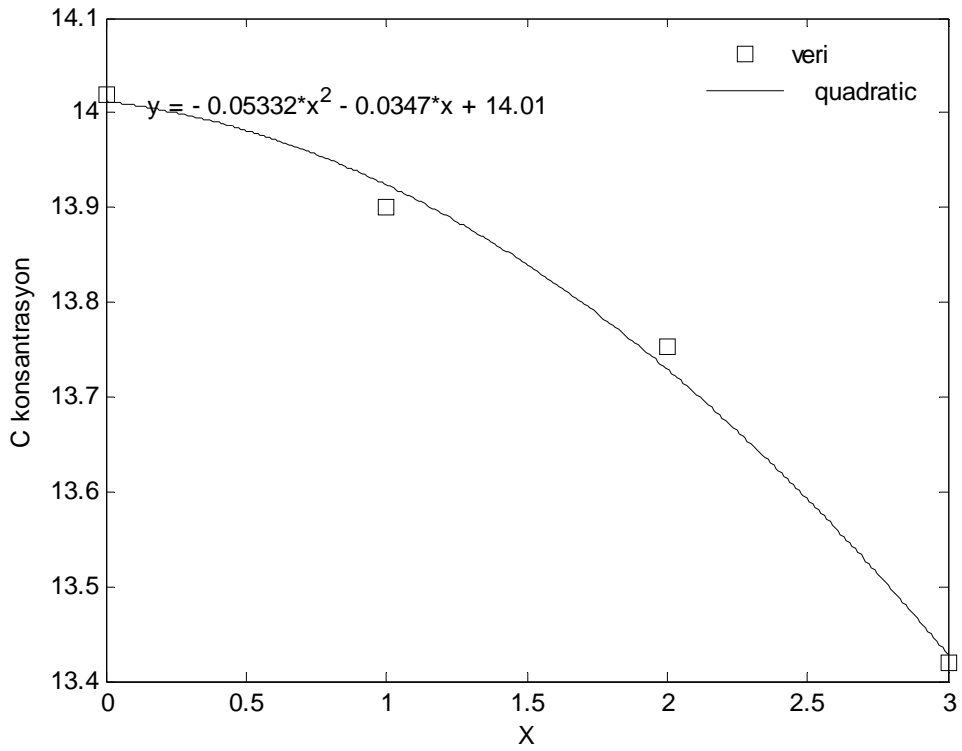
Tablo 41'deki çözülmüş oksijen konsantrasyonu ortalama değerlerinden yararlanılarak, çözülmüş oksijen konsantrasyonunun, basamaklı savağın mansabında mesafeye bağlı olarak değişimini her bir debi değeri için, regresyon analizi yaparak şu şekilde ifade edebiliriz:

Tablo 37. Basamaklı savakta kanal boyunca oluşan ortalama konsantrasyonlar

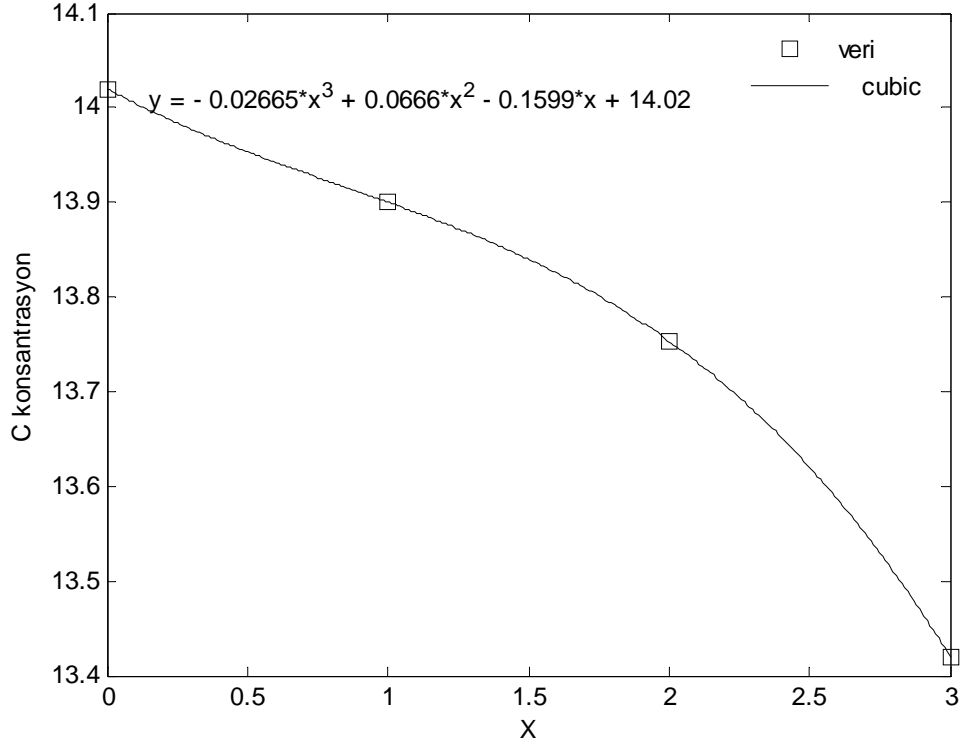
|              | B       | C       | D       | E       |
|--------------|---------|---------|---------|---------|
| $Q_1 = 0.10$ | 14.0200 | 13.9    | 13.7533 | 13.42   |
| $Q_2 = 0.15$ | 14.3667 | 14.08   | 13.8467 | 13.6    |
| $Q_3 = 0.20$ | 14.5667 | 14.32   | 14.1333 | 14.0667 |
| $Q_4 = 0.32$ | 14.7267 | 14.44   | 14.1067 | 13.94   |
| $Q_5 = 0.40$ | 15.5000 | 15.2867 | 15.0867 | 14.9933 |



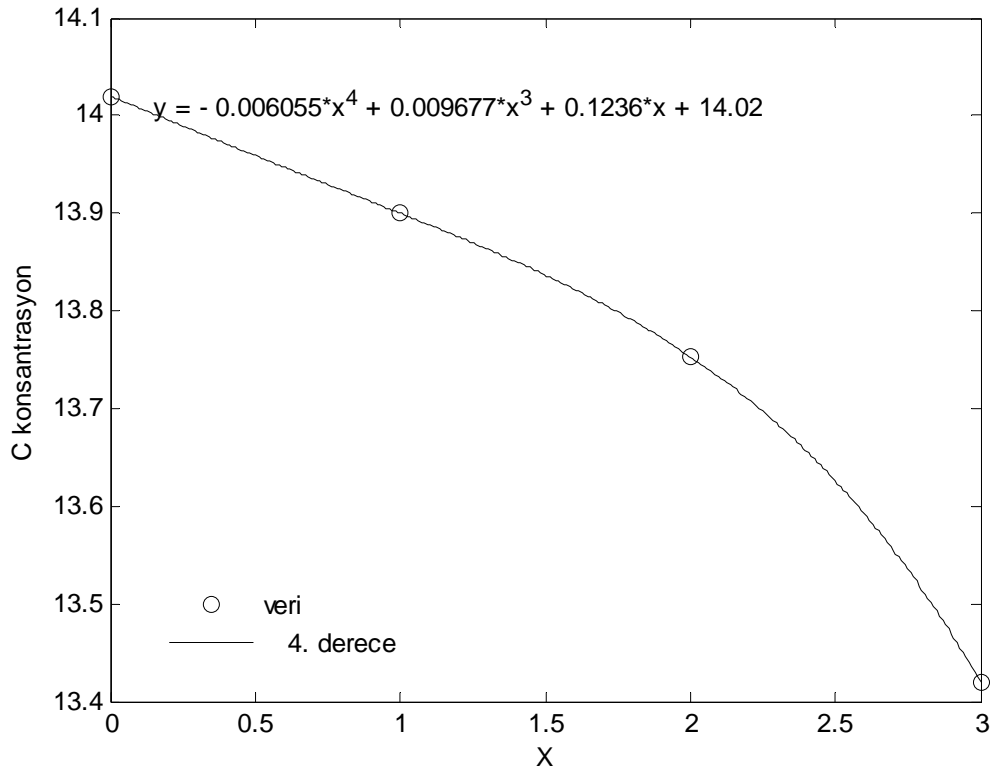
Şekil 137. Basamaklı savakta için  $Q_1 = 0.10$  l/sn için linear form



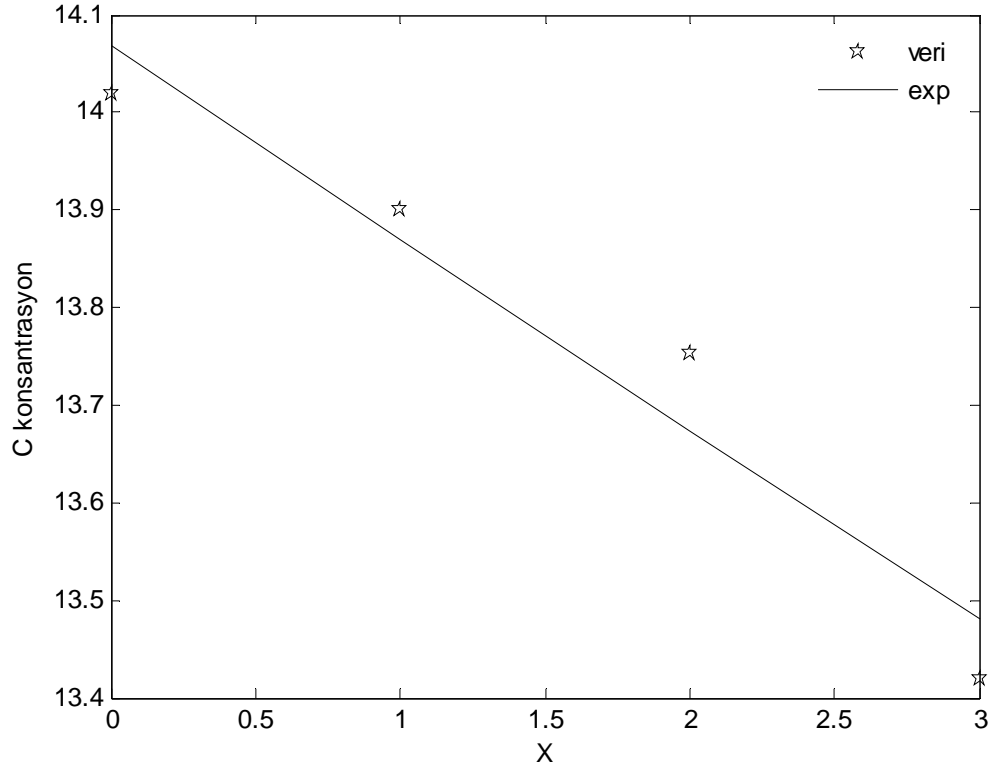
Şekil 138. Basamaklı savakta için  $Q_1 = 0.10$  l/sn için quadratik form



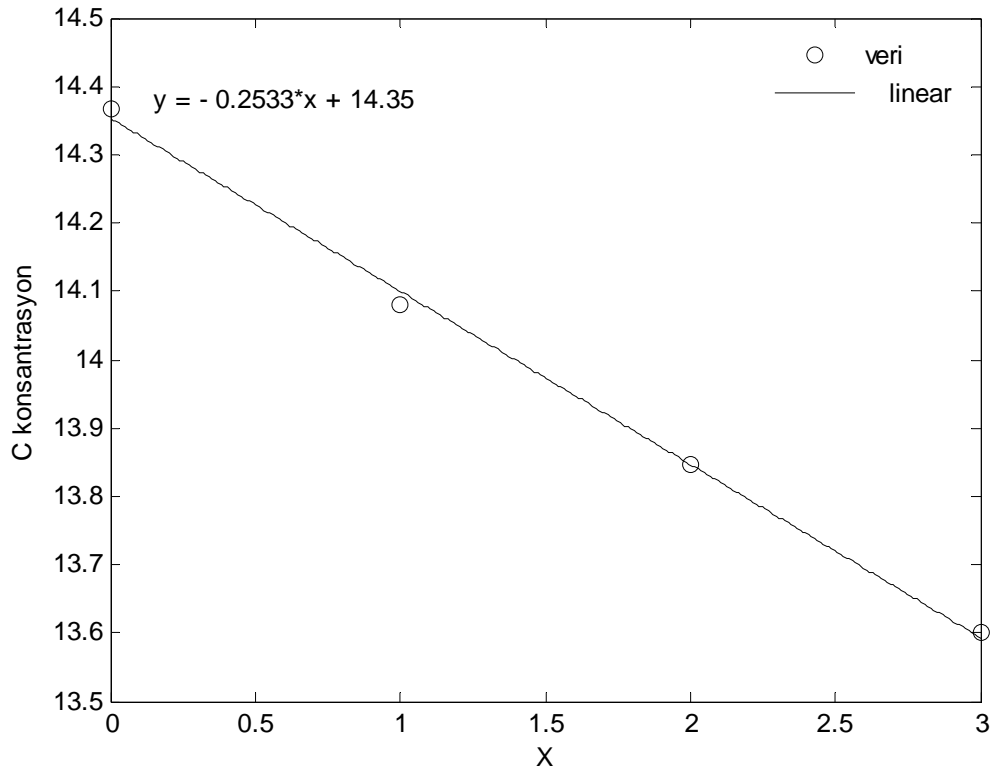
Şekil 139. Basamaklı savakta için  $Q_1 = 0.10$  l/sn için kübik form



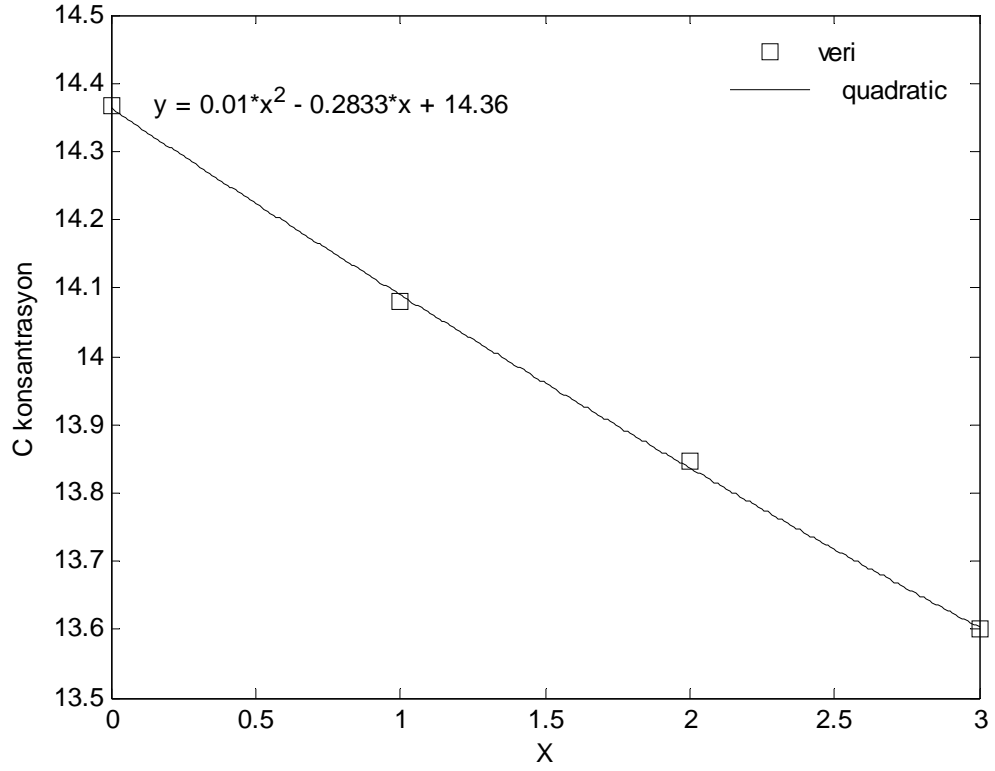
Şekil 140. Basamaklı savakta için  $Q_1 = 0.10$  l/sn için 4. derece form



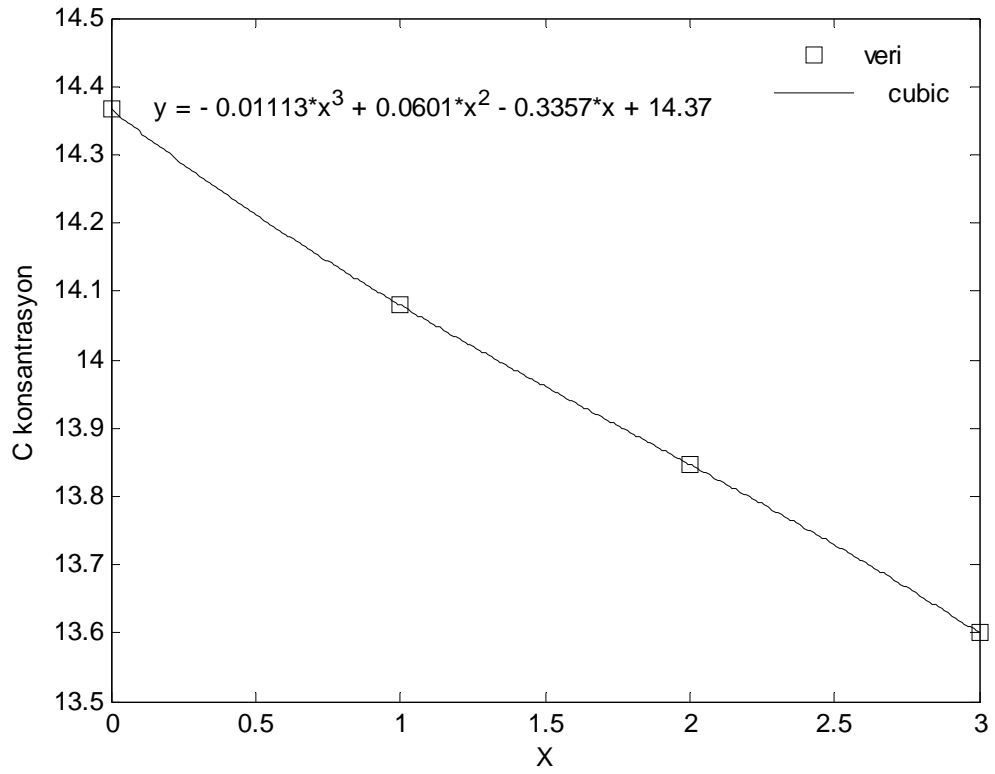
Şekil 141. Basamaklı savakta için  $Q_1 = 0.10$  l/sn için exponansiyel form



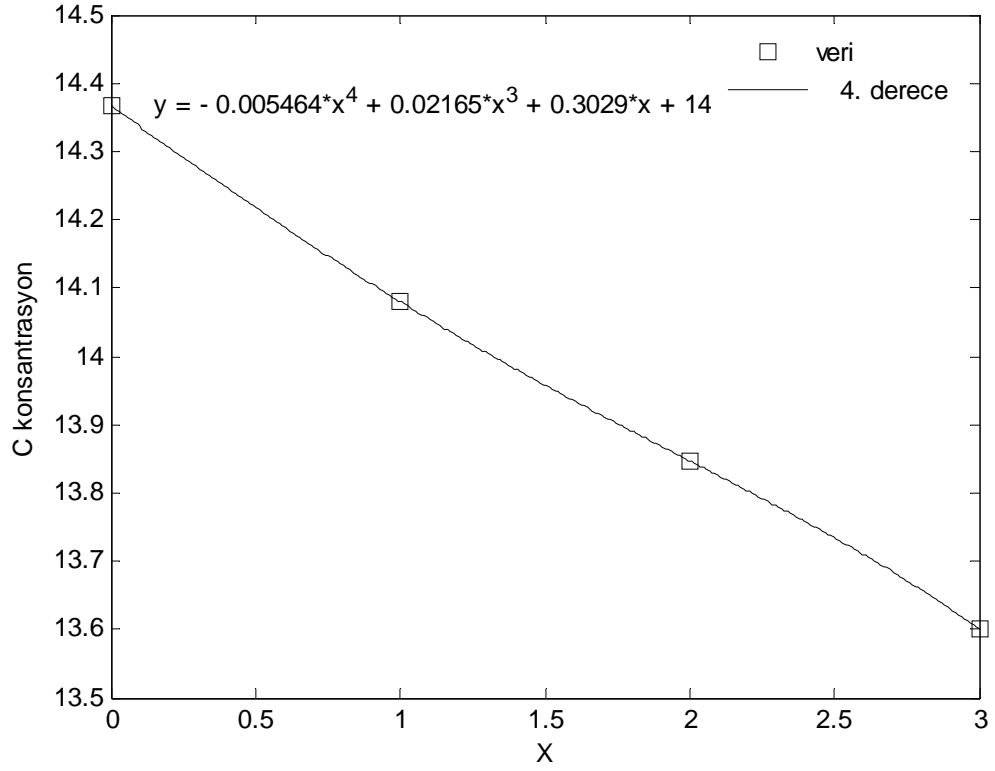
Şekil 142. Basamaklı savakta için  $Q_2 = 0.15$  l/sn için lineer form



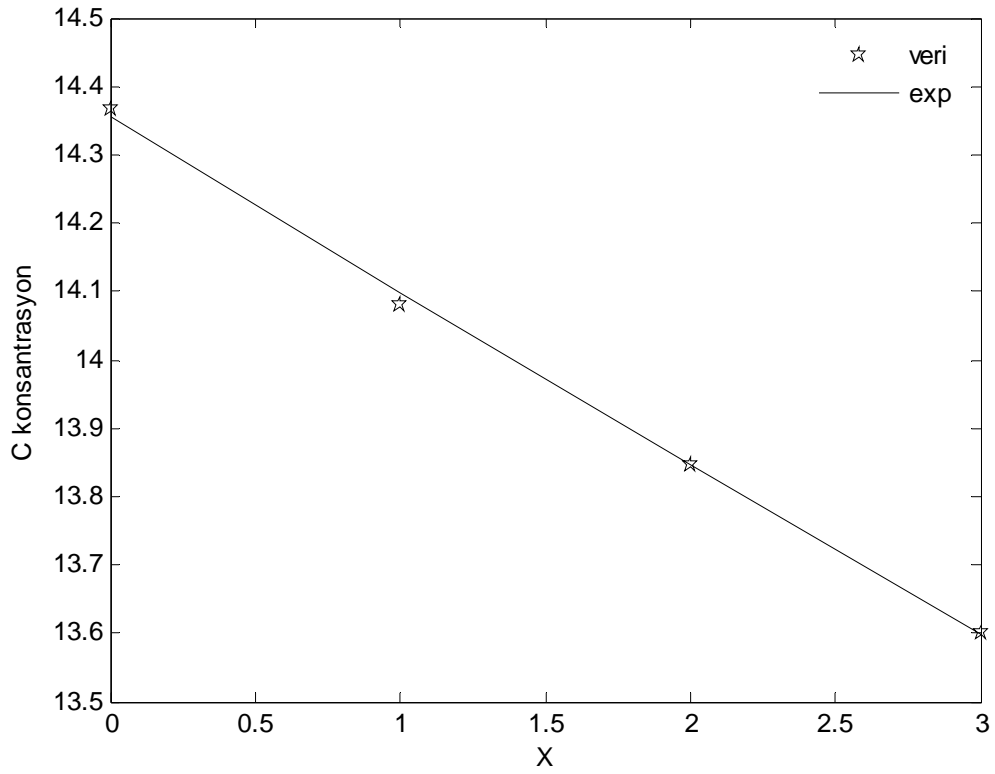
Şekil 143. Basamaklı savakta için  $Q_2 = 0.15$  l/sn için quadratik form



Şekil 144. Basamaklı savakta için  $Q_2 = 0.15$  l/sn için kübik form

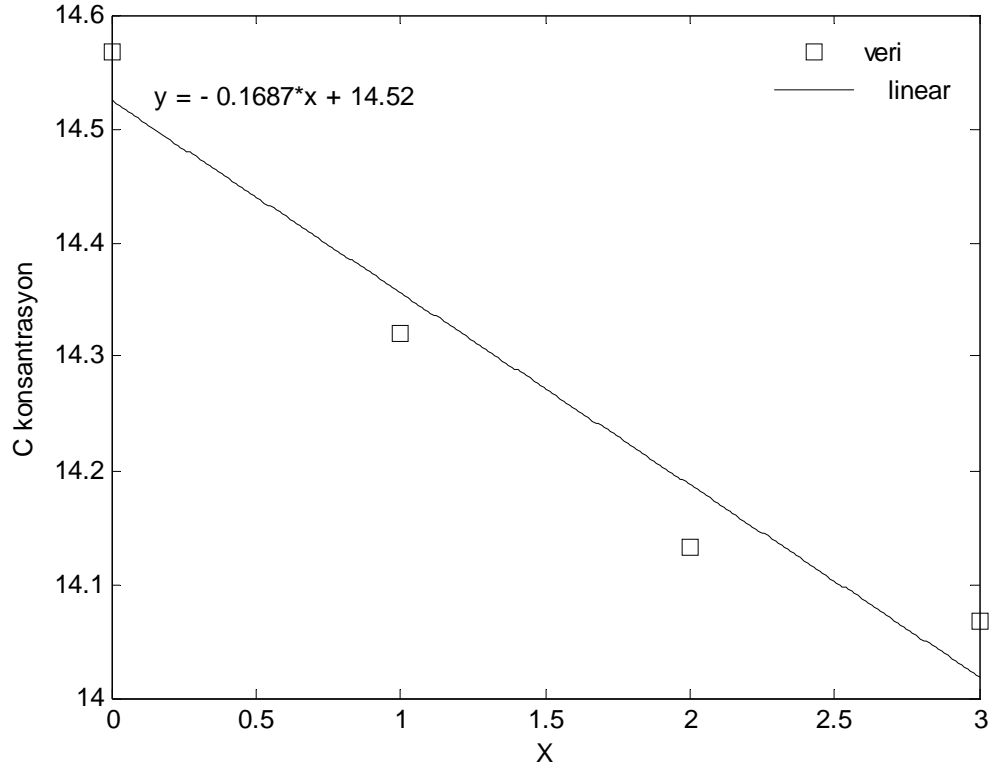


Şekil 145. Basamaklı savakta için  $Q_2 = 0.15$  l/sn için 4. derece form

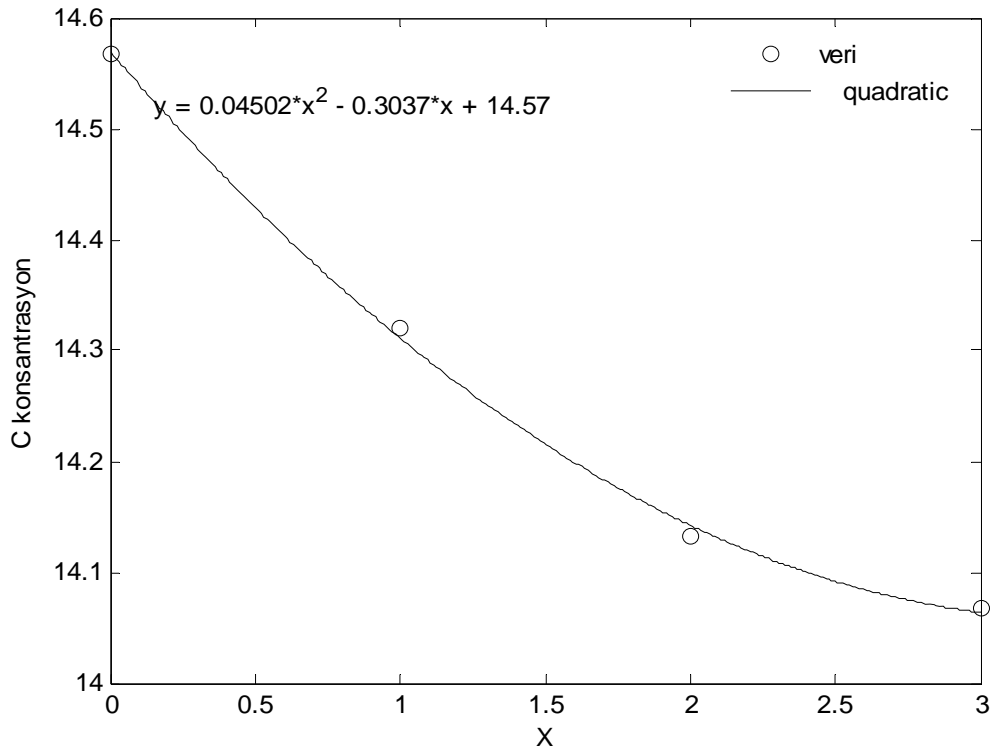


Şekil 146. Basamaklı savakta için  $Q_2 = 0.15$  l/sn için exponansiyel form

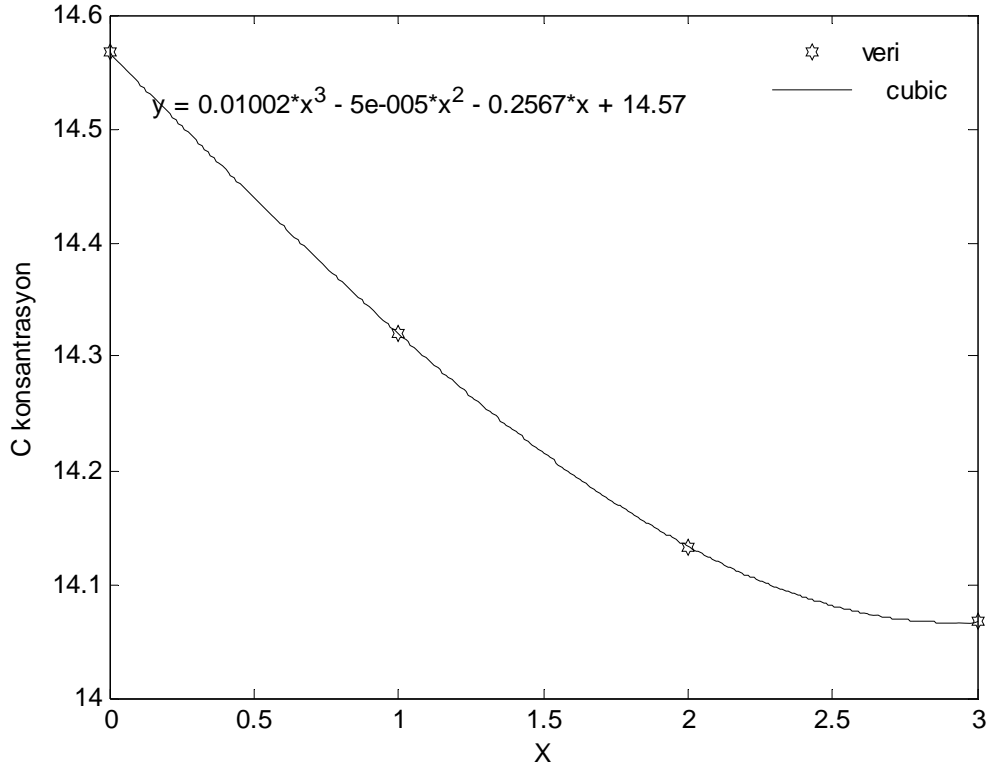




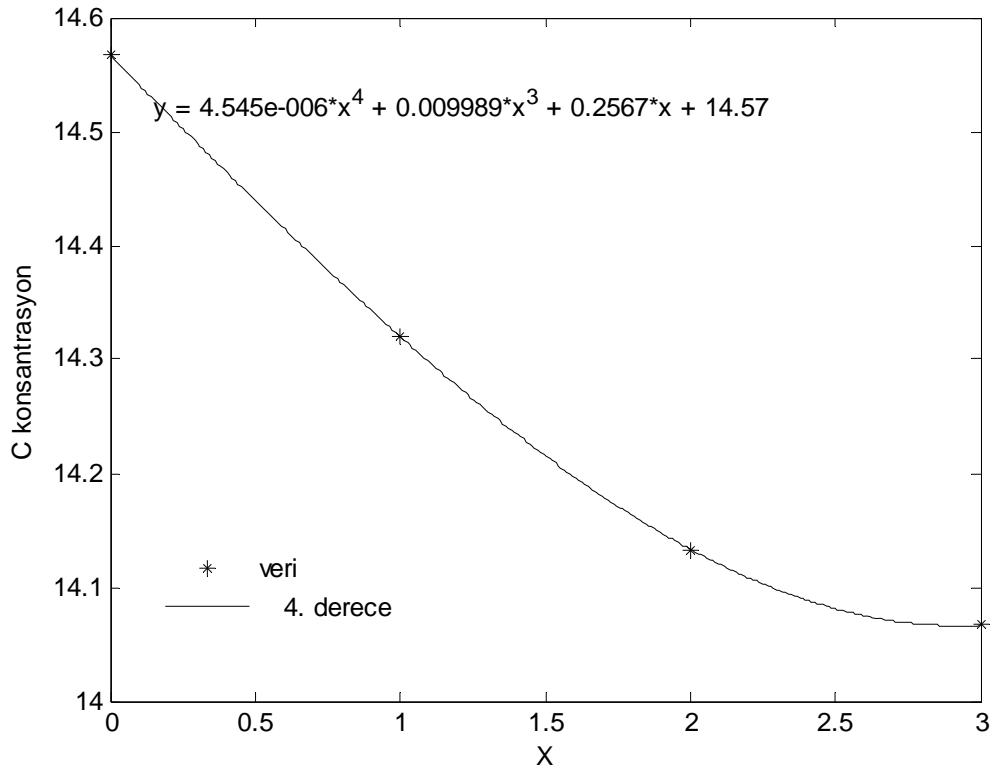
Şekil 147. Basamaklı savakta için  $Q_3 = 0.20$  l/sn için lineer form



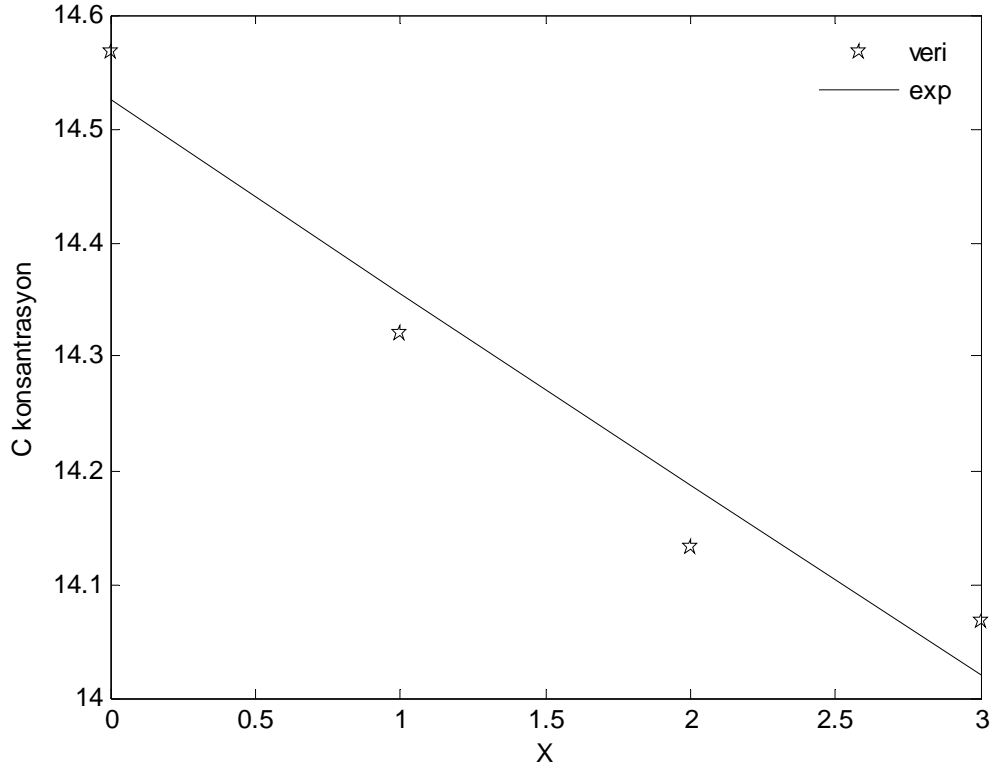
Şekil 148. Basamaklı savakta için  $Q_3 = 0.20$  l/sn için quadratik form



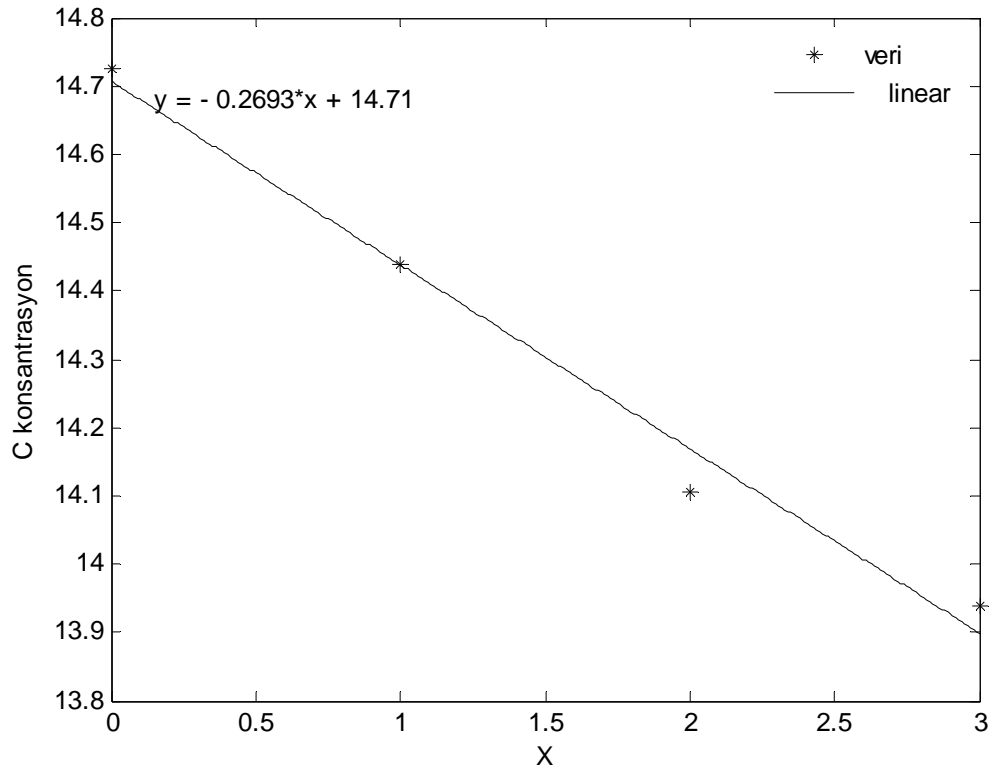
Şekil 149. Basamaklı savakta için  $Q_3 = 0.20$  l/sn için kübik form



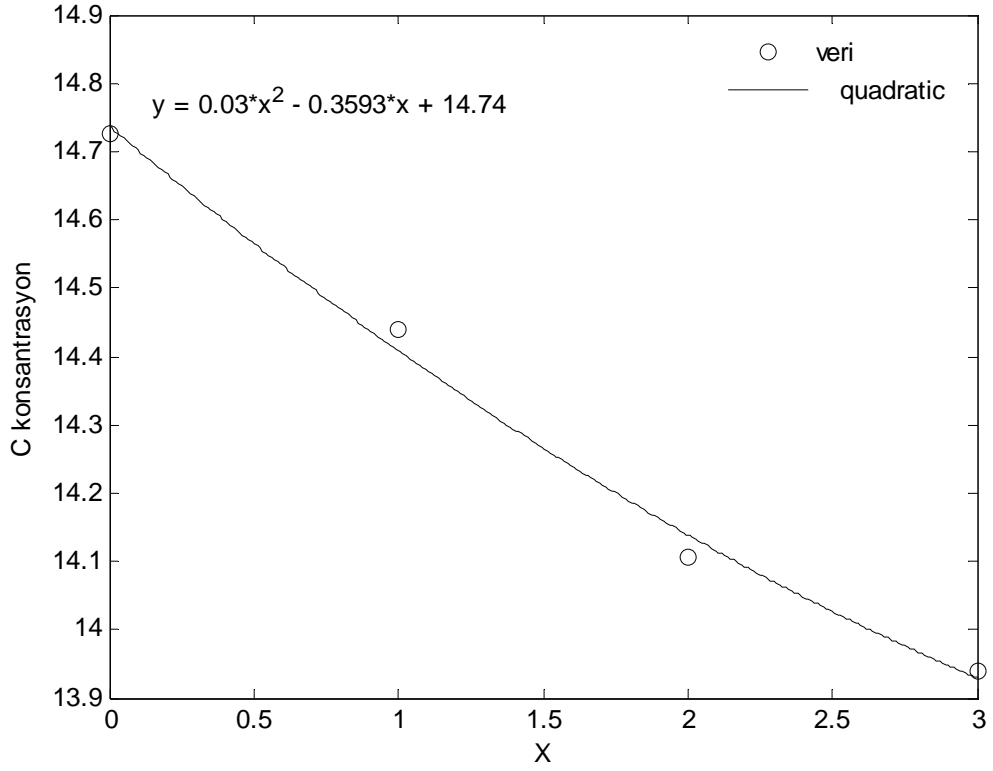
Şekil 150. Basamaklı savakta için  $Q_3 = 0.20$  l/sn için 4.derece form



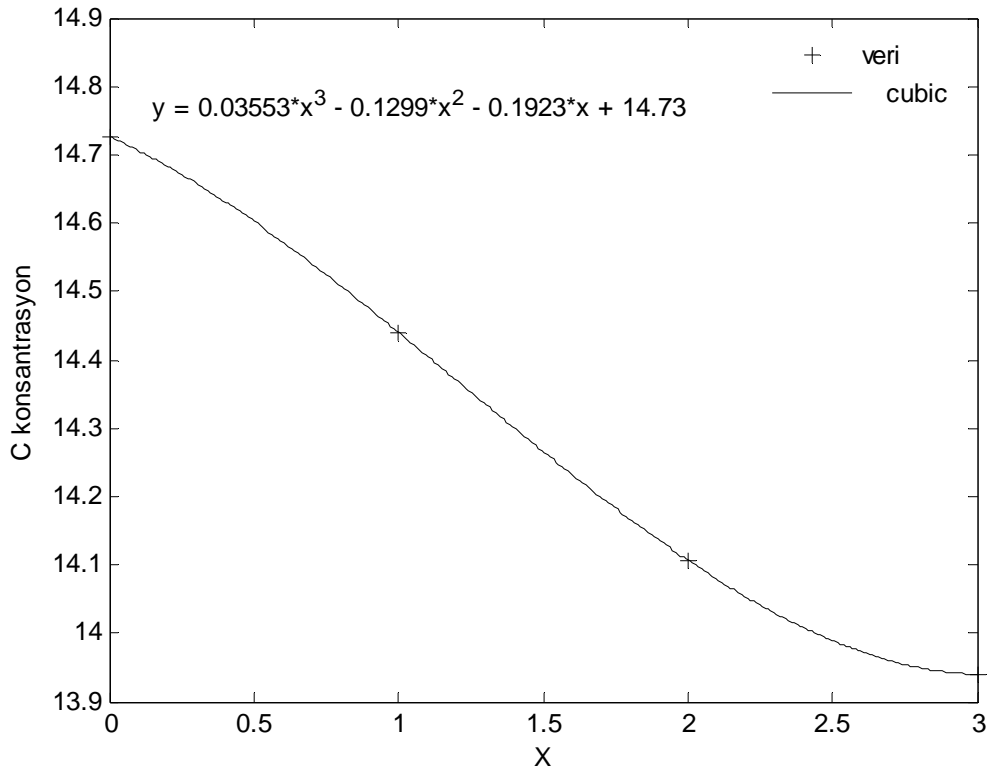
Şekil 151. Basamaklı savakta için  $Q_3 = 0.20$  l/sn için exponansiyel form



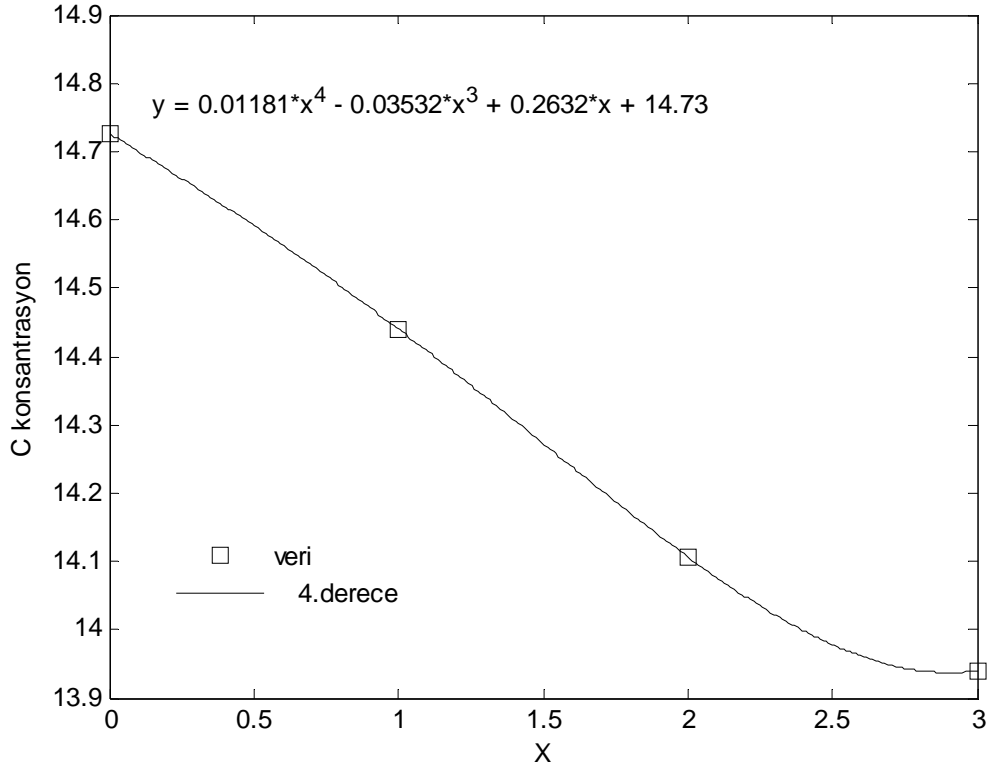
Şekil 152. Basamaklı savakta için  $Q_4 = 0.32$  l/sn için lineer form



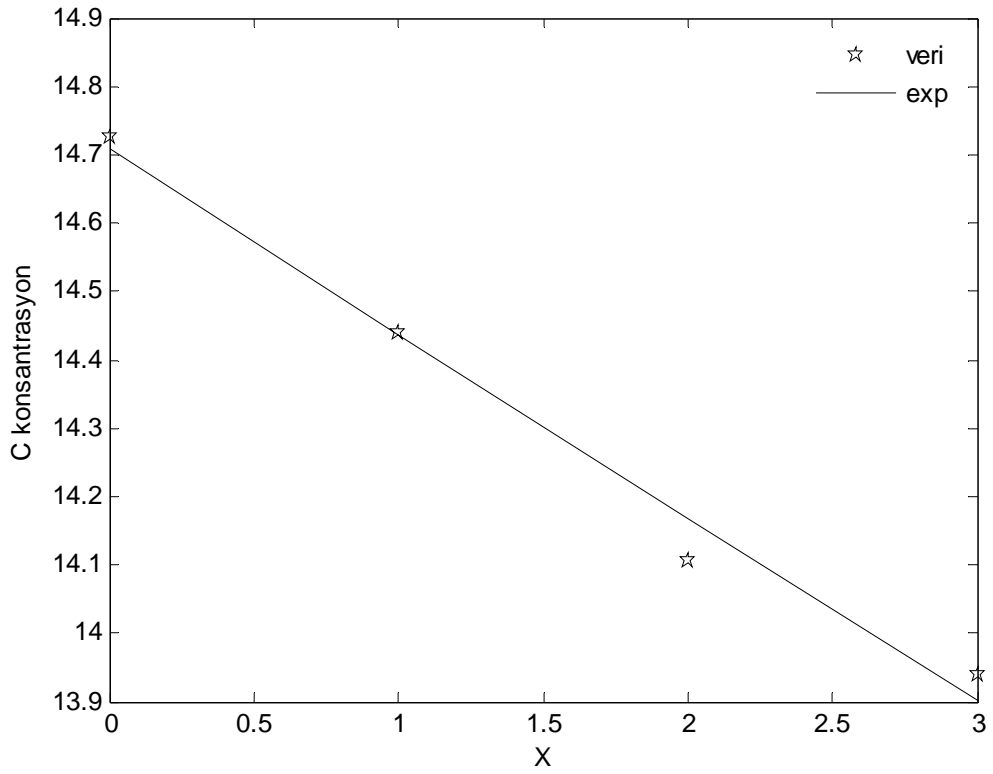
Şekil 153. Basamaklı savakta için  $Q_4 = 0.32$  l/sn için quadratic form



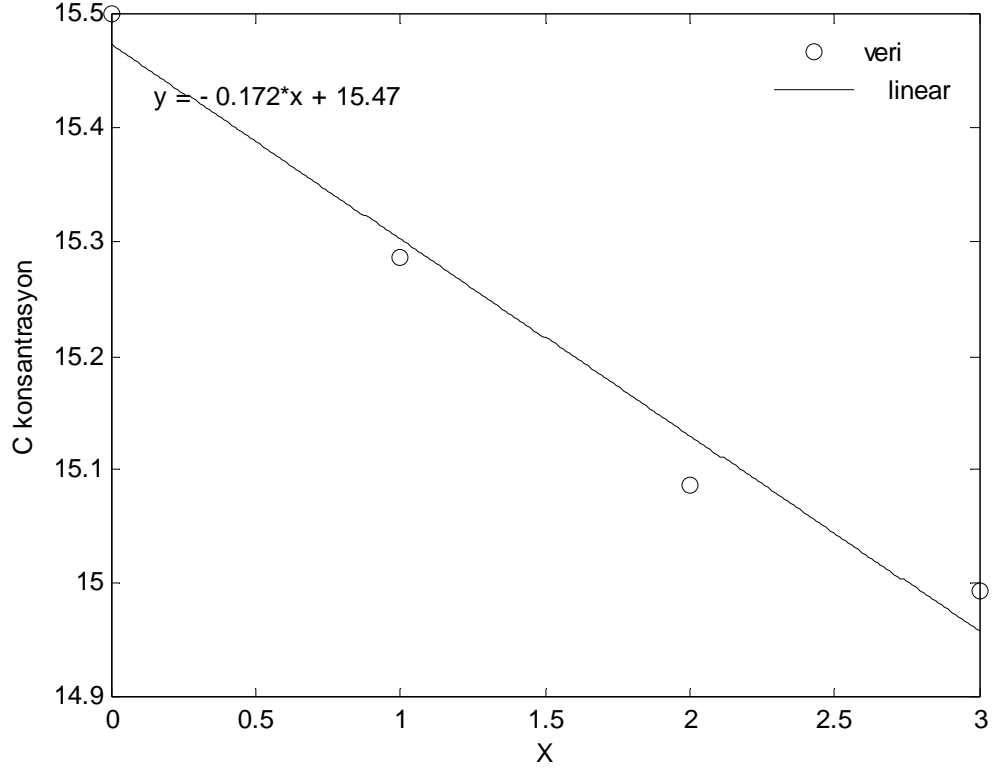
Şekil 154. Basamaklı savakta için  $Q_4 = 0.32$  l/sn için kübik form



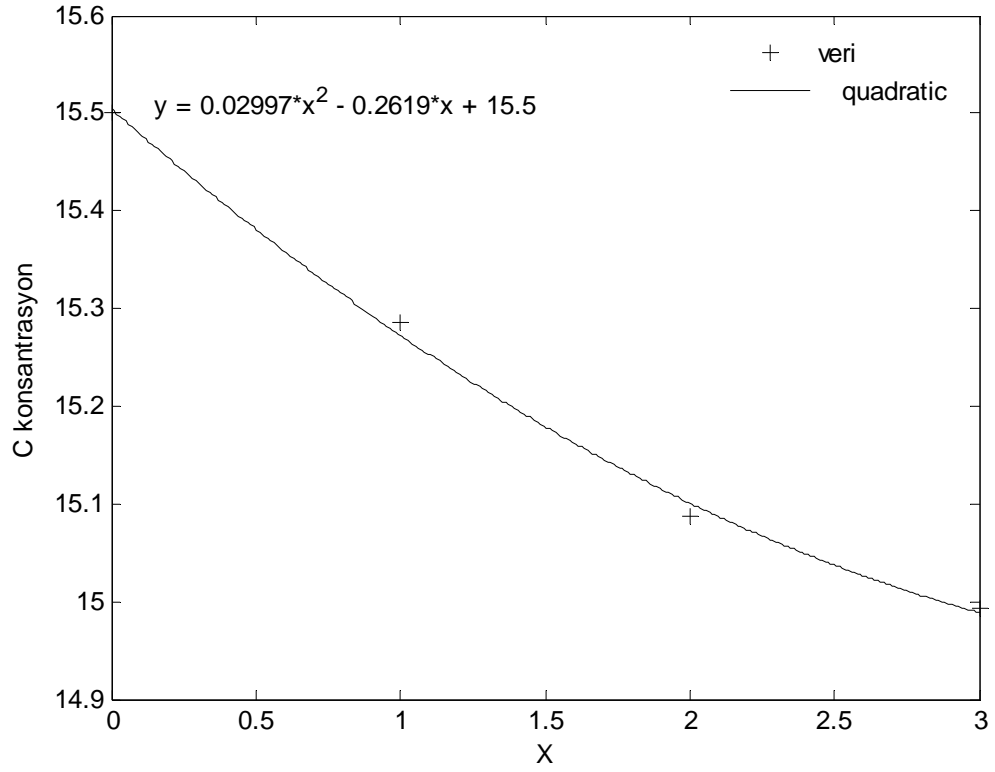
Şekil 155. Basamaklı savakta için  $Q_4 = 0.32$  l/sn için 4. derece form



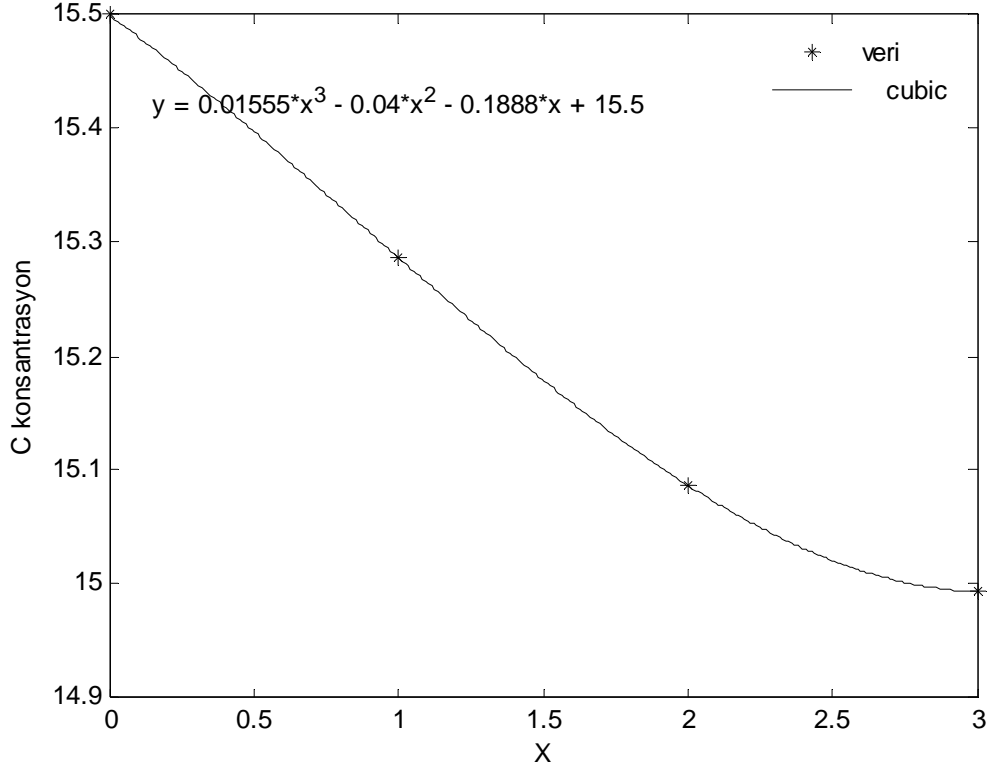
Şekil 156. Basamaklı savakta için  $Q_4 = 0.32$  l/sn için exponansiyel form



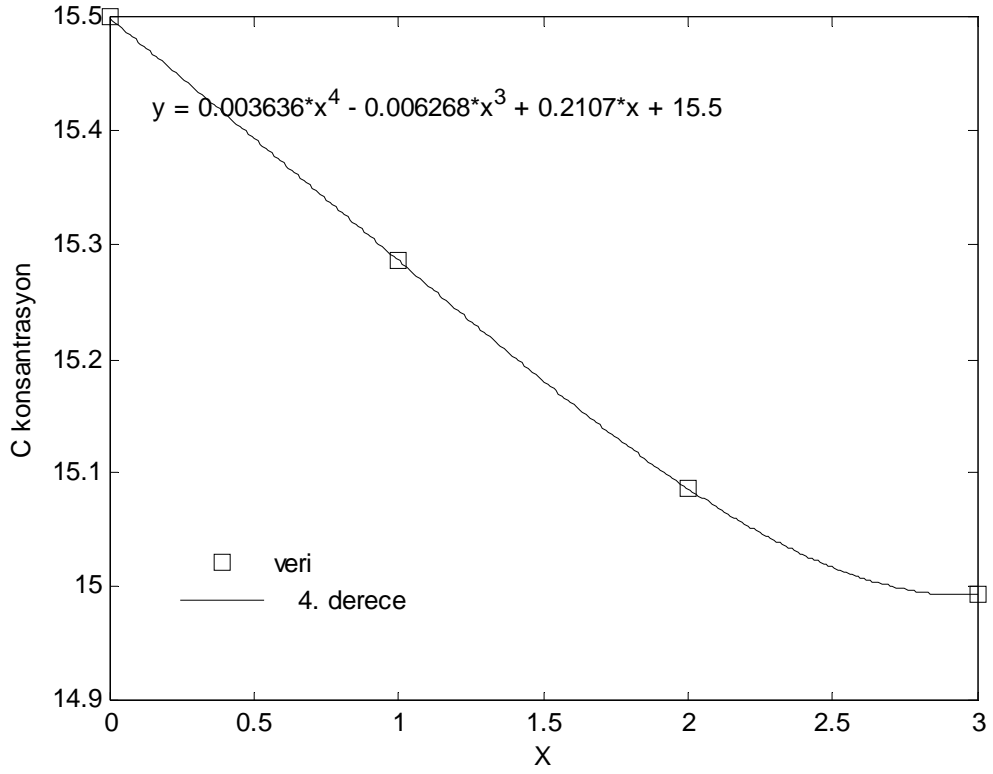
Şekil 157. Basamaklı savakta için  $Q_5 = 0.40$  l/sn için lineer form



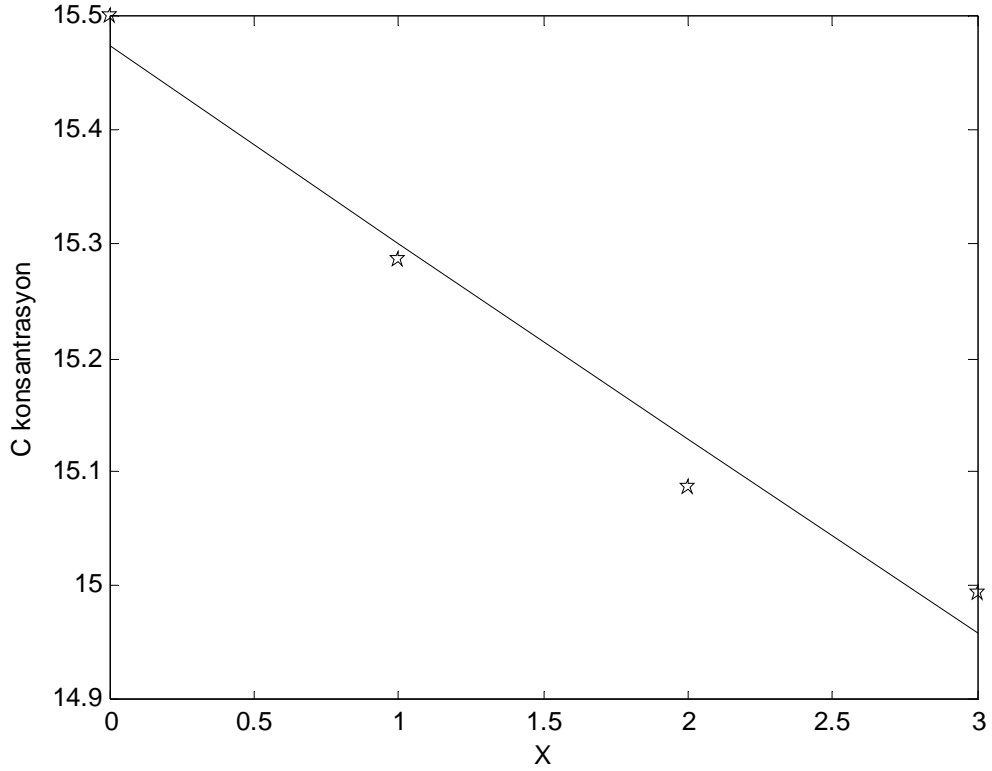
Şekil 158. Basamaklı savakta için  $Q_5 = 0.40$  l/sn için quadratic form



Şekil 159. Basamaklı savakta için  $Q_5 = 0.40$  l/sn için kübik form



Şekil 160. Basamaklı savakta için  $Q_5 = 0.40$  l/sn için 4. derece form



Şekil 161. Basamaklı savakta için  $Q_5 = 0.40$  l/sn için exponansiyel form

### 2.6.7. ÇO-Mesafe Değişimi İçin Değerlendirme

Kanal üzerinde hidrolik yapının mansabındaki 4 noktada ölçülen çözünmüş oksijen konsantrasyonlarının kanal boyunca farklı debi değerleri altında, yapılan regresyon analizi sonucunda, değişimini gösteren eğri ve denklemleri şu şekilde özetleyebiliriz:

Düz Tabanlı Savak için;

- $Q_1 = 0.10$  l/sn için eğri denklemleri:

$$F(X) = Y = \begin{cases} -0.1987X + 13.6 \\ 0.05335X^2 - 0.3587X + 13.65 \\ -0.0511X^3 + 0.2833X^2 - 0.989X + 13.67 \\ -0.02575X^4 + 0.1034X^3 + 0.4444X + 13.67 \\ 13.5983e^{-0.0145X} \end{cases} \quad (103)$$



- $Q_2 = 0.15$  l/sn için eğri denklemleri:

$$F(X) = Y = \begin{cases} -0.244X + 14.04 \\ 0.00335X^2 - 0.254X + 14.05 \\ 0.02X^3 - 0.08665X^2 - 0.16X + 14.04 \\ 0.007877X^4 - 0.027X^3 + 0.2073X + 14.04 \\ 14.0448e^{-0.0178X} \end{cases} \quad (104)$$

- $Q_3 = 0.20$  l/sn için eğri denklemleri:

$$F(X) = Y = \begin{cases} -0.1993X + 14.25 \\ 0.01503X^2 - 0.2444X + 14.27 \\ -0.00335X^3 + 0.0301X^2 - 0.2601X + 14.27 \\ 0.002736X^4 + 0.01307X^3 + 0.2437X + 14.27 \\ 14.2519e^{-0.0143X} \end{cases} \quad (105)$$

- $Q_4 = 0.32$  l/sn için eğri denklemleri:

$$F(X) = Y = \begin{cases} -0.2466X + 14.36 \\ 0.01165X^2 - 0.281X + 14.37 \\ 0.007767X^3 - 0.0233X^2 - 0.2445X + 14.37 \\ 0.002118X^4 - 0.004942X^3 + 0.2572X + 14.37 \\ 14.3593e^{-0.0176X} \end{cases} \quad (106)$$

- $Q_5 = 0.40$  l/sn için eğri denklemleri:

$$F(X) = Y = \begin{cases} -0.3353X + 15.33 \\ 0.03165X^2 - 0.4303X + 15.36 \\ -0.001133X^3 + 0.03675X^2 - 0.4536X + 15.36 \\ -0.003341X^4 + 0.0189X^3 + 0.4156X + 15.36 \\ 15.3310e^{-0.0226X} \end{cases} \quad (107)$$

Basamaklı Savak için;

- $Q_1 = 0.10$  l/sn için eğri denklemleri:

$$F(X) = Y = \begin{cases} -0.1947X + 14.07 \\ -0.05332X^2 - 0.0347X + 14.01 \\ -0.02665X^3 + 0.0666X^2 - 0.1599X + 14.02 \\ -0.006055X^4 + 0.009677X^3 + 0.1236X + 14.02 \\ 13.5983e^{-0.0145X} \end{cases} \quad (108)$$

- $Q_2 = 0.15$  l/sn için eğri denklemleri:

$$F(X) = Y = \begin{cases} -0.2533X + 14.35 \\ 0.001X^2 - 0.2833X + 14.36 \\ -0.01113X^3 + 0.0601X^2 - 0.3357X + 14.37 \\ -0.005464X^4 + 0.02165X^3 + 0.3029X + 14 \\ 14.3555e^{-0.0181X} \end{cases} \quad (109)$$

- $Q_3 = 0.20$  l/sn için eğri denklemleri:

$$F(X) = Y = \begin{cases} -0.1687X + 14.52 \\ 0.04502X^2 - 0.3037X + 14.57 \\ 0.0102X^3 - 0.00005X^2 - 0.2567X + 14.57 \\ 0.000004545X^4 + 0.009989X^3 + 0.2567X + 14.57 \\ 14.525e^{-0.0118X} \end{cases} \quad (110)$$

- $Q_4 = 0.32$  l/sn için eğri denklemleri:

$$F(X) = Y = \begin{cases} -0.2693X + 14.71 \\ 0.03X^2 - 0.3593X + 14.74 \\ 0.03553X^3 - 0.1299X^2 - 0.1923X + 14.73 \\ 0.01181X^4 - 0.03532X^3 + 0.2632X + 14.73 \\ 14.7093e^{-0.0188X} \end{cases} \quad (111)$$

- $Q_5 = 0.40$  l/sn için eğri denklemleri:

$$F(X) = Y = \begin{cases} -0.172X + 15.47 \\ 0.02997X^2 - 0.2619X + 15.5 \\ 0.01555X^3 - 0.04X^2 - 0.1888X + 15.5 \\ 0.003636X^4 - 0.006268X^3 + 0.2107X + 15.5 \\ 15.4752e^{-0.0113X} \end{cases} \quad (112)$$

### 2.6.8. Regresyon Analizi İçin Değerlendirme

Kanal üzerindeki 4 noktadan ölçülen çözülmüş oksijen konsantrasyonlarının değişimleri incelemek için regresyon analizi 5 farklı metotla yapılmıştır. Matlab programı altında oluşturulan denklem ve eğriler, amaçlanan hedefler doğrultusunda kullanılabilirler.

Yapılan ilk analizde her noktadaki debi değişimi incelenmiştir. Debi değişimine göre belirlenen denklem takımları yardımıyla hidrolik yapının mansabında, debi değimiyle birlikte çözülmüş oksijenin nasıl değişebileceğinin belirleyebilmekteyiz. Herhangi bir debi için çözülmüş oksijen konsantrasyonunu bu denklemler ile tahmin edebilmekteyiz. Yine aynı şekilde, yapılan ikinci analizle birlikte, hidrolik yapıdan herhangi bir uzaklıktaki çözülmüş oksijen konsantrasyonu için tahminler yapılabilmektedir. Bulunan denklem takımları için hangi denklemin daha yaklaşık sonuç verebileceği, bulgular ve irdeleme bölümünde incelenmiştir.

Örneğin, kanalda hidrolik yapıdan 2.1 m. uzaklıktaki çözülmüş oksijen konsantrasyonları için tahmin yapmak istersek:

- Lineer için :  $F(2.1) = 13.1827$  mg/l
- Quadratik için :  $F(2.1) = 13.1320$  mg/l
- Kübik için :  $F(2.1) = 12.3692$  mg/l
- Dördüncü derece :  $F(2.1) = 15.0600$  mg/l
- Exponansiyel :  $F(2.1) = 13.1905$  mg/l

olmaktadır.

## 2.7. Arıtma Tesislerinin Genetik Algoritma ile Optimizasyonu

Akarsularda kilometreler boyunca oluşan çözünmüş oksijen konsantrasyonu, akarsulara yapılacak arıtma tesislerinin boyutlandırılması açısından çok büyük önem teşkil etmektedir. Kirlilik yükü çok fazla olan bir akarsu ile, üzerinde havalanma sağlayan bir çok hidrolik yapının olduğu bir nehrin aynı şekilde değerlendirilmesi doğru olmaz. Çözünmüş oksijen konsantrasyonu yaklaşık olarak belirlenebilen bir akarsuda arıtma tesisleri yapılırken gereksiz büyüklükte veya küçüklükte bir boyutlandırma yapılmaz.

Artan kirlilik ve azalan su kaynakları, çalışmaları kirliliğin tespiti, giderilmesi ve kaynakların iyileştirilmesi yönünde ciddi önlemler almaya yönlendirmektedir. Başlangıcını kirleticilerin meydana getirdiği kirlilik miktarının tespitinin oluşturduğu bu sistemler, arıtma tesislerinin çeşitliliği, çevresel ve ekonomik şartlarla daha da karmaşık bir hal alabilmektedir. Bu konuda yapılan çalışmalar günümüzde de hızından hiçbir şey kaybetmeden devam etmektedir. Ülkemizde ve diğer ülkelerde deşarj standartlarının belirlenmiş olması, kontrol mekanizmalarının çalıştırılabilmesi ve toplumsal olarak çevresel bilincin artması kısa vadede olmasa da umut verici gelişmeler olarak karşımıza çıkmaktadır.

Bu çalışmada, hidrolik yapının mansabında kalan bölgede yani akarsu boyunca, çözünmüş oksijen konsantrasyonunun değişimi incelenmiştir. İncelemede nehre bir veya birden fazla noktada deşarj edilen atık suların arıtılacağı arıtma tesislerinin optimizasyonunu sağlayan bir bilgisayar programı geliştirilmiştir. Program olarak Java tabanlı bir program kullanılarak, sistem için bir genetik algoritma geliştirilmiş ve maliyet açısından bir optimizasyon gerçekleştirilmiştir.

Revelle vd. (1967) tarafından gerçekleştirilen ve lineer programlama ile optimizasyon sağlayan sistem çalışmamıza temel olmaktadır. Bu çalışmada kullanılan değerler bizim çalışmamızda da baz alınmış ve genetik algoritma kullanılarak daha yüksek standartlı bir akarsu kalitesi sağlanmıştır.

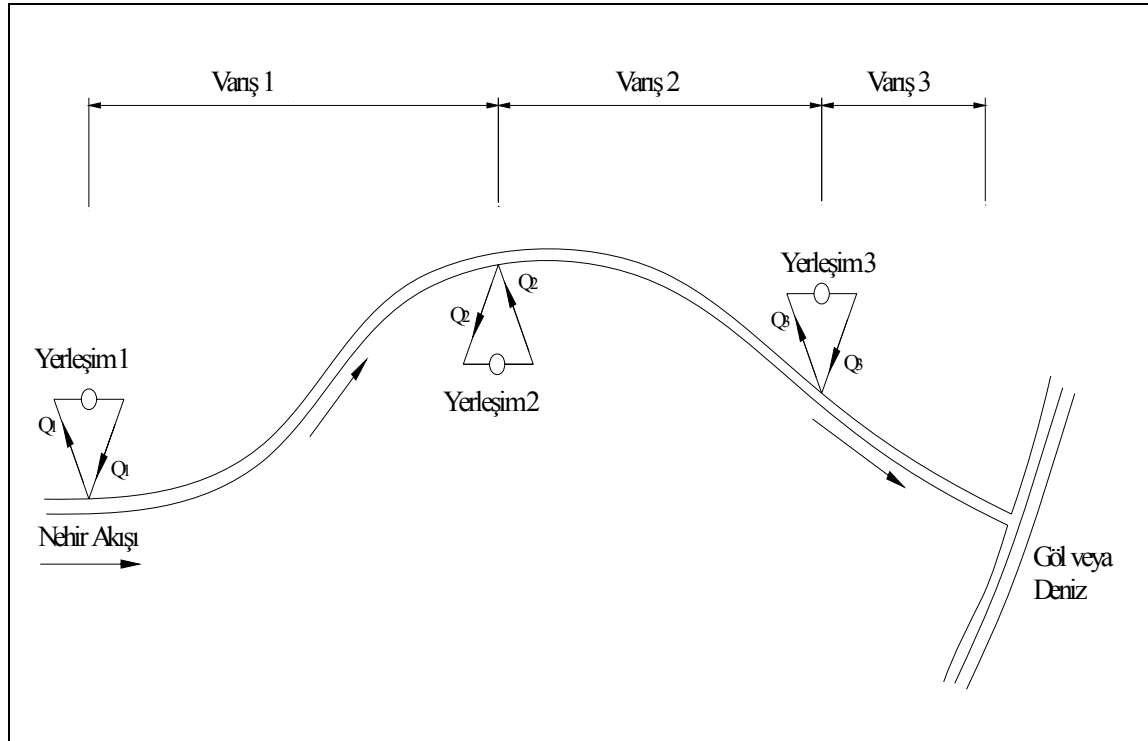
### 2.7.1. Yöntem ve Çalışmanın Amacı

Revelle vd. (1967) tarafından gerçekleştirilen ve lineer programlama ile optimizasyon sağlayan yöntem çalışmamızın esasını oluşturmaktadır. Bu yöntemde akarsu özelliklerinin (debi, yerleşimler arası uzaklık, çözünmüş oksijen değeri, doygunluk değeri, müsaade

edilen oksijen eksikliği değeri biyokimyasal oksijen ihtiyacı konsantrasyonu vb.) ve atık suyun özelliklerinin bilinmesi durumunda gerekli denklemlerle ve sınır şartlarıyla, yapımı düşünülen arıtma tesislerinin yer ve maliyetlerinin optimizasyonu sağlanmaktadır (Mulligan ve Brown, 1998; Pelletier vd., 2006). Şekil 166'de varsayılan akarsu havzası şematik olarak gösterilmiştir.

Çalışmamızda, hidrolik yapılarda gerçekleşen oksijen transferi incelenmektedir. Daha sonra incelenen oksijen transferinin akarsu boyunca değişimi araştırılmaktadır. Bu noktada, hidrolik yapının mansabında kalan bölgede çözülmüş oksijen konsantrasyonu değerinin değişimi önemlidir. Bu değişim akarsularda oksijen (SAG) eğrisi adı verilen eğrilerle incelenir.

Akarsu içerisindeki denge oksijen konsantrasyonu (saturasyon), sıcaklık, tuzluluk ve atmosferik basıncın bir fonksiyonudur. Çözülmüş oksijen konsantrasyonu bu değer altına indiğinde oksijen transferi başlar. Denge konsantrasyonu ile mevcut konsantrasyon arasındaki oran olan eksiklik oranı, havalanma ile doğru orantılıdır yani yüksek eksiklik oranında daha fazla havalanma oluşur (Camp, 1965; Önal, 2000; Berkün ve Önal, 2004).



Şekil 162. Akarsu havzasının şematik olarak gösterimi

Alıcı ortamın ve deşarj edilen atık suların nitelik ve niceliklerindeki değişimlerle oksijen eksikliklerinin SAG eğrisiyle hesaplandığı (Li 1962), sınır şartlarının gerekli formülasyonlara uygulanabilirliği, akarsu sistemine karışan sınırsız karışımların oluşturduğu konfigürasyonların kolayca ve çok kısa bir sürede hesaplanabildiği yöntemin genetik algoritma yardımıyla oluşturulması ve koşturulmasıdır. Oluşturulan yöntemle birlikte, daha önce yapılmış olan lineer programlama yöntemleri karşılaştırılarak bir analizi yapılacaktır (Cho vd, 2004, McNamara, J.R., 1976).

### 2.7.2. Optimizasyonda Kullanılan Bağlantılar

Koşturulan programda kullanılan bağlantılar aşağıdaki gibidir:

$$\sum_{s=1}^n a_s \varepsilon_s \quad (113)$$

$$\varepsilon_s + \frac{1}{P_s} M_s = 1 \quad (114)$$

$$Q.D_s - (Q - Q_s).E_{s-1} = T_s \cdot Q_s \quad (115)$$

$$Q.L_s - Q_s.M_s - (Q - Q_s).F_{s-1} = 0 \quad (116)$$

$$D = \frac{k_s}{r_s - k_s} (e^{-k_s x} - e^{-r_s x}) L_s + (e^{-r_s x}) D_s \quad (117)$$

$$\alpha_1 = \frac{k_1}{r_1 - k_1} (e^{-k_1 x_I} - e^{-r_1 x_I}) \quad (118)$$

$$D(x_I) = \alpha_1 L_1 + (e^{-r_1 x_I}) D_1 \quad (119)$$

$$\alpha_{II} = \frac{k_1}{r_1 - k_1} (e^{-k_1 x_{II}} - e^{-r_1 x_{II}}) \quad (120)$$

$$D(x_{II}) = \alpha_{II} L_1 + (e^{-r_1 x_{II}}) D_1 \quad (121)$$

$$D_S \leq D_A^S \quad (122)$$

$$E_1 = \frac{k_1}{r_1 - k_1} (e^{-k_1 x_{II}} - e^{-r_1 x_{II}}) L_1 + (e^{-r_1 x_{II}}) D_1 \quad (123)$$

$$E_1(Q - Q_2) + T_2 Q_2 = D_2 Q_2 \quad (124)$$

$$L = L_1 (e^{-k_1 x}) \quad (125)$$

$$F_S = L_S \cdot e^{-k_S x_{II}} \quad (126)$$

$$E_2 = \frac{k_2}{r_2 - k_2} (e^{-k_2 y_{II}} - e^{-r_2 y_{II}}) L_2 + (e^{-r_2 y_{II}}) D_2 \quad (127)$$

$$E_2 \cdot (Q - Q_3) + T_3 Q_3 = D_3 Q_3 \quad (128)$$

$$Y_S = a_S \varepsilon_S + c_S \quad (129)$$

Burada;

$\varepsilon_S$  : Arıtma verimi

$a_S$  : Akarsularda BOİ giderimi için fiyat eğrisinin lineer kısmının eğimi

$P_S$  : Tesisin giriş BOİ Konsantrasyonu (mg/lt)

$M_S$  : Tesisin çıkış BOİ Konsantrasyonu (mg/lt)

$Q$  : Nehrin debisi (m<sup>3</sup>/gün)

$D_S$  : s. varış noktasının başlangıcındaki O<sub>2</sub> eksikliği (mg/lt)

$Q_S$  : Atık suyun deşarj debisi (m<sup>3</sup>/gün)

$E_s$  : s. varış noktasının sonundaki  $O_2$  eksikliği (mg/lt)

$T_s$  : Atık suyun oksijen eksikliği (mg/lt)

$L_s$  :Atıksu ile karıştıktan sonra s. varış noktasının başlangıcındaki BOİ konsantrasyonu (mg/lt)

$F_s$  : s. varış noktasının sonundaki BOİ konsantrasyonu (mg/lt)

$k_s$  : Biyooksidasyon sabiti ( $\text{gün}^{-1}$ )

$r_s$  : Havalanma hız sabiti ( $\text{gün}^{-1}$ )

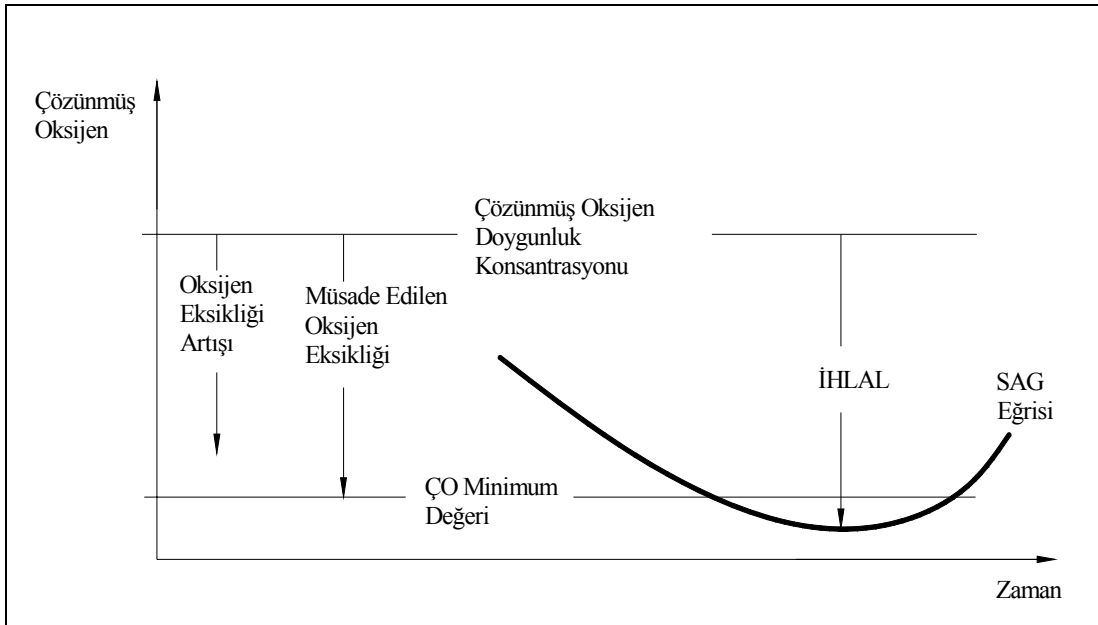
$x_t$  : s varış noktasına olan uzaklığın yarısı için geçen süre (gün)

$\alpha$  : s varış noktasına olan uzaklığı için geçen süre (gün)

$D_A$  : Müsaade edilebilen oksijen eksikliği (mg/lt) (Şekil 167)

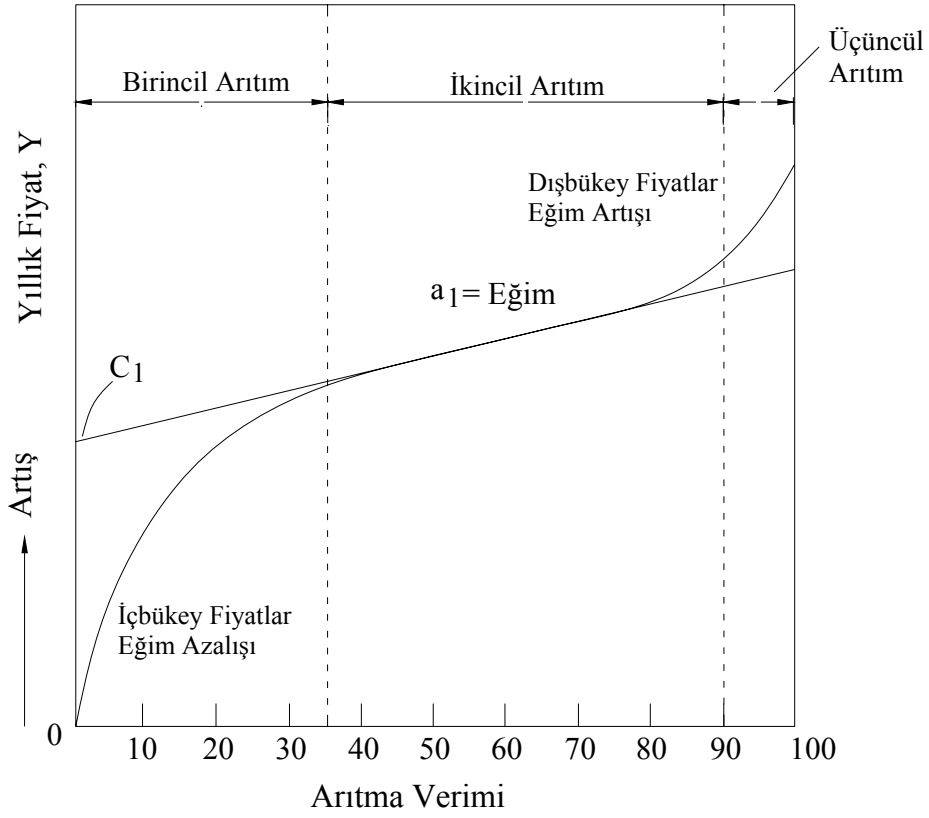
$Y$  : Fiyat fonksiyonu (Şekil 168)

$c$  : BOİ giderimi için fiyat eğrisinin lineer kısmının düşey ekseni kestiği değer



Şekil 163. Müsaade edilir çözülmüş oksijen eksikliği oranının şematik gösterilmesi





Şekil 164. Tipik fiyat eğrisi

### 2.7.3. Sınır Şartları

Minimum toplam fiyatı elde etmek için kurulan denklem takımlarında aşağıdaki sınır şartları gözetilmektedir:

$$\text{Min. Toplam Fiyat} = \text{Min} (a_1 \cdot \varepsilon_1 + a_2 \varepsilon_2) \quad (130)$$

$$u_0 + u_1 \varepsilon_1 \geq 6 \quad (131)$$

$$s_0 + s_1 \varepsilon_1 + s_2 \varepsilon_2 \geq 4 \quad (132)$$

$$\varepsilon_1 \geq 0 \quad (133)$$

$$\varepsilon_2 \geq 35 \quad (134)$$

$$\varepsilon_1 \leq 100 \quad (135)$$

$$\varepsilon_2 \leq 100 \quad (136)$$

Burada;

$u_0$  : I noktasındaki çözülmüş oksijen konsantrasyonu (mg/lt)

$u_1$  : I noktasındaki çözülmüş oksijen konsantrasyonu değişimi(mg/lt)

$s_0$  : II noktasındaki çözülmüş oksijen konsantrasyonu (mg/lt)

$s_1$  : II noktasındaki çözülmüş oksijen konsantrasyonu değişimi (mg/lt) (Yerleşim 1'den gelen)

$s_2$  : II noktasındaki çözülmüş oksijen konsantrasyonu değişimi (mg/lt) (Yerleşim 2'den gelen) dir.

Problemin çözülmesi ve sınır şartlarının uygulanabilmesi için sayısal olarak bazı değerlerin sabit olarak kabul edilmesi gerekmektedir. Buna göre;  $u_0=1$ mg/lt,  $u_1=0.1$  mg/lt,  $s_0=2$  mg/lt,  $s_1=0.02$  mg/lt,  $s_2=0.02$  mg/lt alınırsa sınır şartları şu hali alır:

$$1 + 0.1.\varepsilon_1 \geq 6 \quad \rightarrow \varepsilon_1 \geq 50 \quad (137)$$

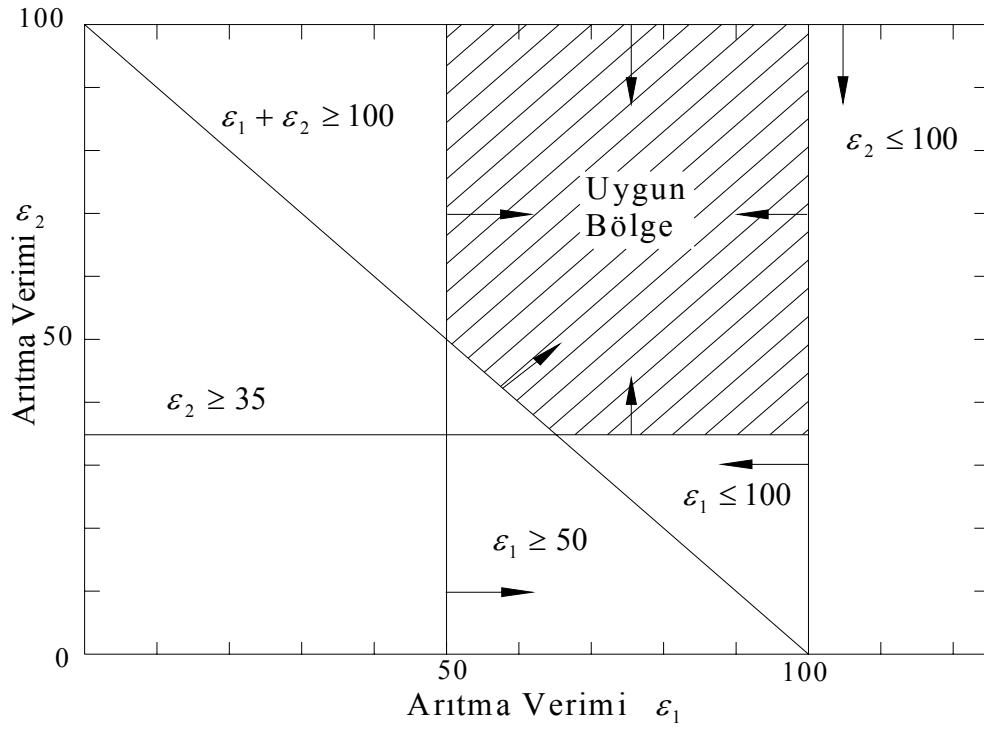
$$2 + 0.02\varepsilon_1 + 0.02\varepsilon_2 \geq 4 \quad \rightarrow \varepsilon_1 + \varepsilon_2 \geq 100 \quad (138)$$

$$\varepsilon_2 \geq 35 \quad (139a)$$

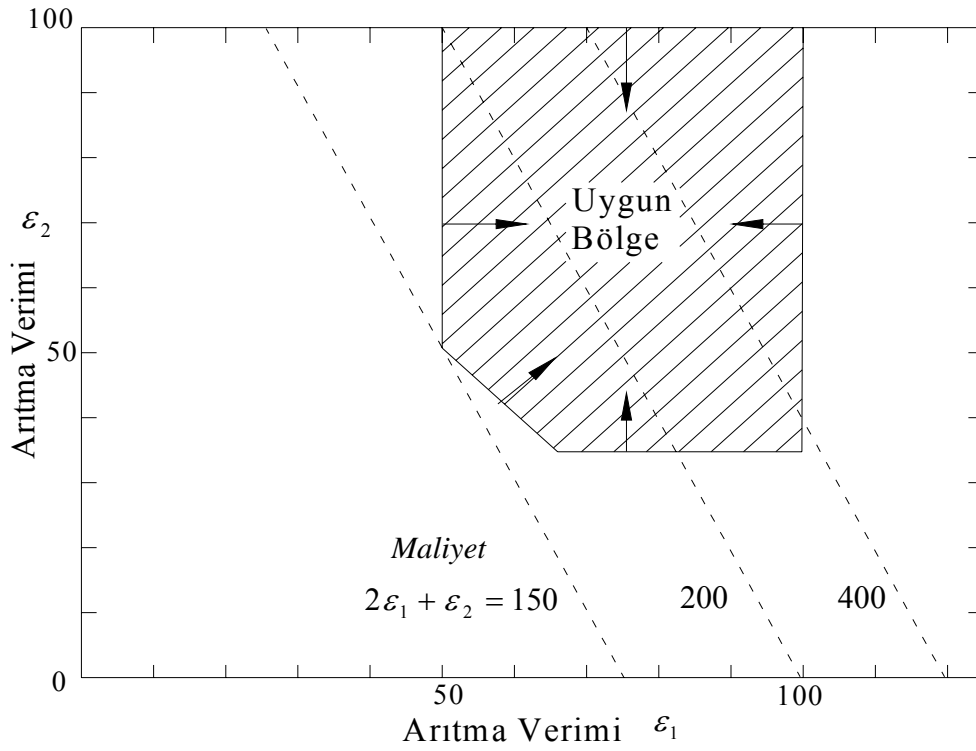
$$\varepsilon_1 \leq 100 \quad (139b)$$

$$\varepsilon_2 \leq 100 \quad (139c)$$

Sınır şartları ve bu sınır şartlarının amaç (maliyet) fonksiyonu ile olan ilişkileri şekil 169 ve 170'de gösterilmiştir.



Şekil 165. Sınır şartlarının grafiksel gösterimi



Şekil 166. Hedef maliyet fonksiyonu uygun bölgesinin grafiksel gösterimi

### 2.7.4. Yapılan Kabuller

Problemde, 3 yerleşim yerinden gelen deşarja göre hesaplamalar yapılmıştır. Buna göre denklemlerde yer alan ifadeler için Tablo 42 ve 43’de verilen rakamsal değerler kabul edilerek program koşturulmuştur.

Tablo 38. Optimizasyon problemi için kullanılacak olan temel veriler

| Parametre                             | Değer               |
|---------------------------------------|---------------------|
| Akarsu Debisi                         | $Q = 1514m^3 / gün$ |
| İlk noktadaki oksijen eksikliği       | $E_0 = 0.50mg / l$  |
| İlk noktadaki BOI                     | $F_0 = 1.00mg / l$  |
| Müsaade edilen oksijen konsantrasyonu | $D_A = 4.0mg / l$   |
| Oksijen doygunluk Konsantrasyonu      | $C_S = 8.5mg / l$   |

Tablo 39. Optimizasyon problemi için kullanılacak olan ara veriler

| Parametre                                    | Değerler                       |                                |                                |
|--|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
|  | 1.Nokta                        | 2.Nokta                        | 3.Nokta                        |
| Biyooksidasyon sabiti ( $gün^{-1}$ )         | $k_1 = 0.30$                   | $k_2 = 0.27$                   | $k_3 = 0.25$                   |
| Havalanma sabiti ( $gün^{-1}$ )              | $r_1 = 0.40$                   | $r_2 = 0.45$                   | $r_3 = 0.65$                   |
| Yarılma süresi (gün)                         | $x_I = 0.40$                   | $y_I = 1.00$                   | $z_I = 0.60$                   |
| Ulaşım süresi (gün)                          | $x_{II} = 0.80$                | $y_{II} = 2.00$                | $z_{II} = 1.20$                |
|  | <b>1.Yerleşim</b>              | <b>2.Yerleşim</b>              | <b>3.Yerleşim</b>              |
| Maliyet Fonksiyonu                           | $Y_1 = a_1\varepsilon_1 + c_1$ | $Y_2 = a_2\varepsilon_2 + c_2$ | $Y_3 = a_3\varepsilon_3 + c_3$ |
| Fiyat eğrisinin eğimi                        | $a_1 = 425000$                 | $a_2 = 352000$                 | $a_3 = 451000$                 |
| Fiyat eğrisinin düşey eksenini kestiği değer | $c_1 = 347000$                 | $c_2 = 425000$                 | $c_3 = 28000$                  |
| Deşarj debisi ( $m^3/gün$ )                  | $Q_1 = 118.5$                  | $Q_2 = 139.3$                  | $Q_3 = 48.9$                   |
| Tesisin giriş BOİ Konsantrasyonu (mg/l)      | $P_1 = 284$                    | $P_2 = 408$                    | $P_3 = 121$                    |
| Atık suyun oksijen eksikliği                 | $T_1 = 7.00$                   | $T_2 = 7.00$                   | $T_3 = 7.00$                   |

### 2.7.5. Program Çıktıları

Tablo 42 ve 43’de Revelle vd. (1967)’nin yaptığı çalışmada kullandığı standart değerler kullanılmıştır. Bu değerler yardımıyla, daha önce çıkardığımız denklemler genetik algoritma ile bilgisayarda koşturulmuş ve sonuçlar çıkartılmıştır. Tablo 44’de Revelle vd. (1967)’nin lineer programlama yardımıyla yaptığı analiz sonuçları ile bu çalışmada kullanılan genetik algoritma sonuçlarının bir kıyaslaması gösterilmektedir.

Algoritmanın koşturulması esnasında elde edilen, mümkün olan en yaklaşık sonuçlar ise şekil 171’de gösterilmiştir.

### 2.7.6. Sonuçlar ve Programın Analizi

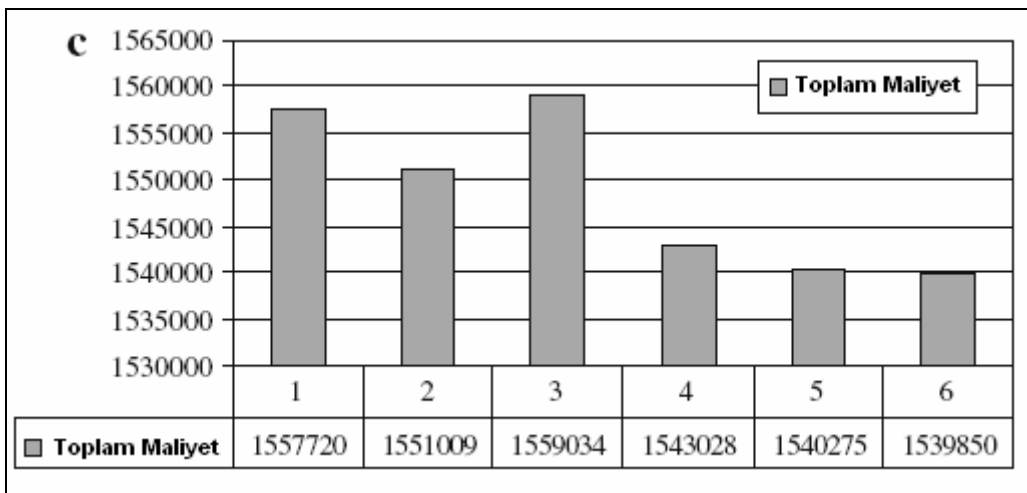
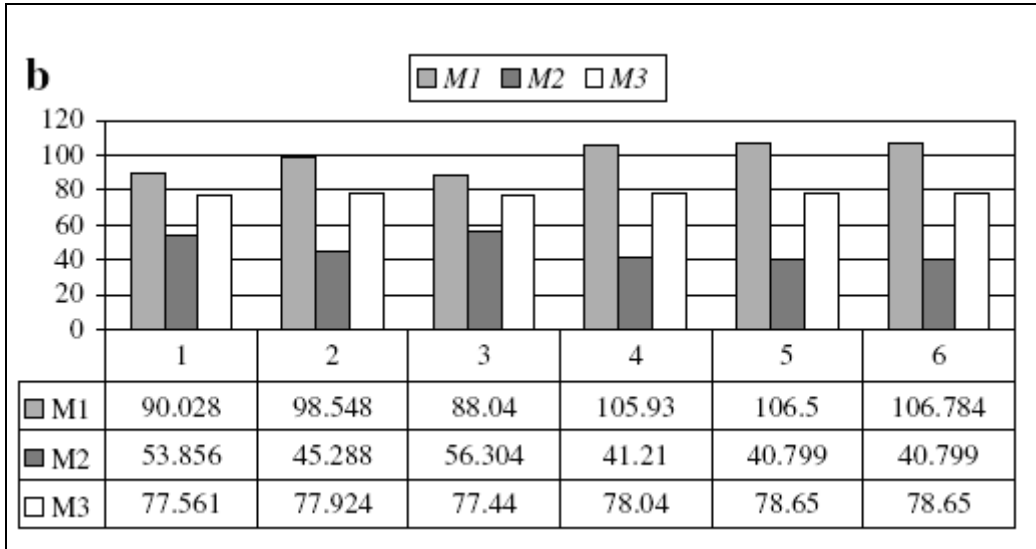
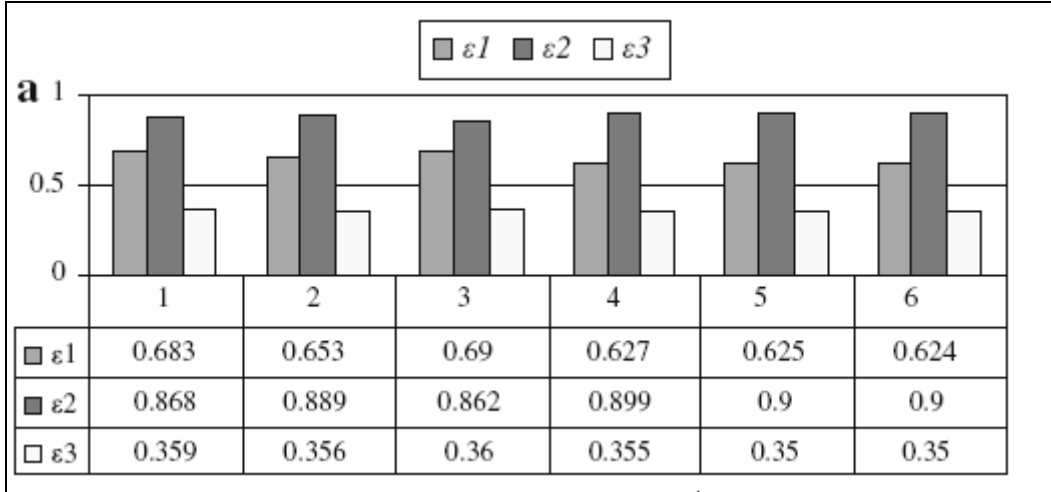
Nehrin ve atık suyun özelliklerinin (çözünmüş oksijen konsantrasyonu), bilinmesi durumunda, Revelle (1967) tarafından geliştirilen formülasyonlar ve sınır şartlarıyla, yapımı düşünülen arıtma tesislerinin yer ve maliyet optimizasyonu lineer programlamanın dışında genetik algoritma yardımıyla da yapılabileceği bu programla kanıtlanmıştır.

Programın koşturulması sırasında sınır şartları tamamen korunmuş ve herhangi bir ihlal olmamıştır. Revelle’nin uyguladığı lineer programda ufak bir ihlale göz yumulmuş ve bu yüzden maliyet daha düşük çıkmıştır.

Program koşturulması esnasında alınan sabit değerler yine literatürden alınarak, lineer programdan genetik algoritmaya bir geçiş yapılmıştır. İstenildiği takdirde saha çalışmaları yapılarak ya da özellikleri bilinen akarsuların verileri alınarak geliştirdiğimiz algoritmaya adapte edilerek, sisteme konulacak atıksu arıtma sistemlerinin yer ve maliyet optimizasyonu özellikli olarak edilebilir (Aras vd., 2007)..

Optimizasyon problemimizde, akarsu boyunca oluşan çözünmüş oksijen profili daha önce oluşturulan lineer programlama da, müsaade edilen konsantrasyon değerinin altına düşmesine izin verilse de bizim oluşturduğumuz algoritmada buna müsaade edilmemiş ve hiçbir şekilde çözünmüş oksijen konsantrasyonu 4.00 mg/l’nin altına düşmemiştir (Şekil 172). Bundan dolayı da maliyet, diğer programlamadan az da olsa biraz fazla çıkmıştır.

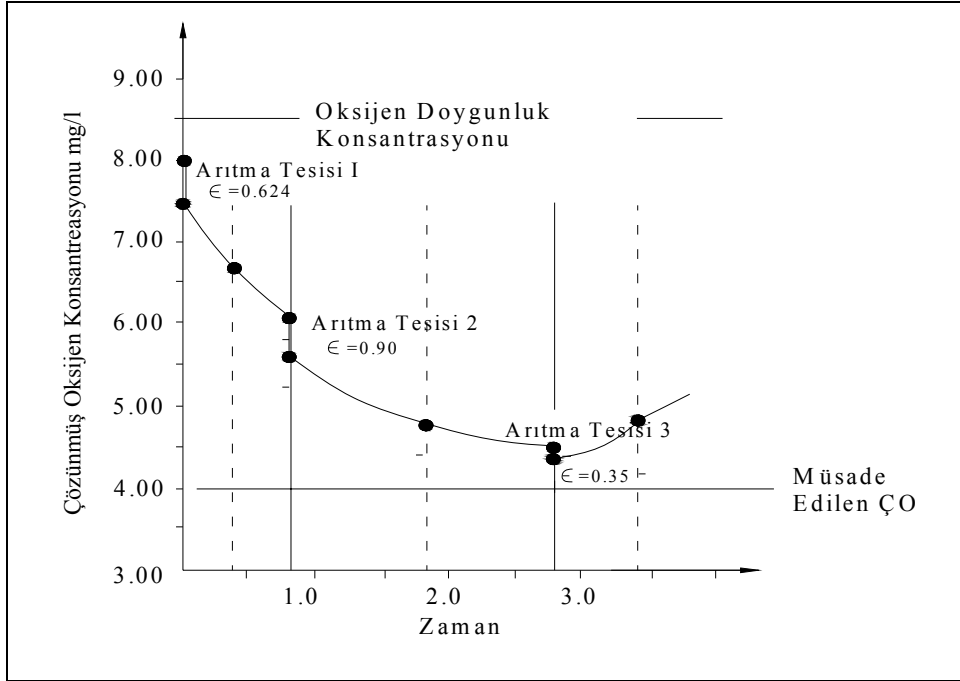
Elde edilen sonuçlara göre, genetik algoritma yardımıyla akarsu suyu kalitesi standartlarına uygun olarak, bir arıtma sistemi maliyet analizini, lineer programlamadan daha uygun sonuçlar verdiği anlaşılmıştır. Hazırladığımız program ile, istenilen veriler değiştirilerek, istediğimiz bir akarsu üzerinde bir su kalitesi modeli kurulabilir .



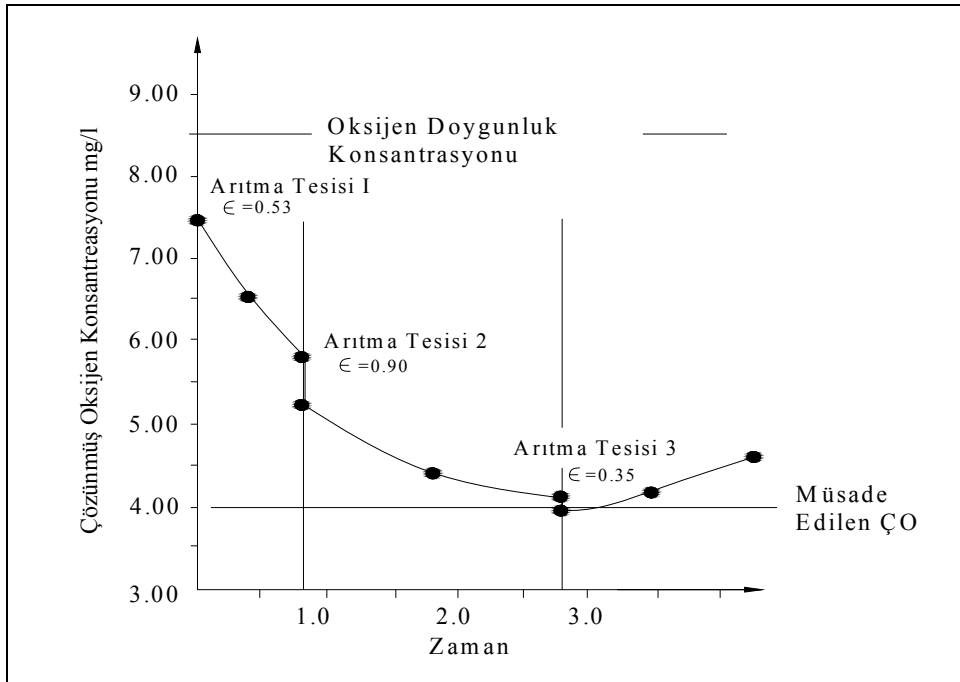
Şekil 167. Mümkün olan optimum çözümler; a)Havalanma verimliliği, b)BOI konsantrasyonu, c)Maliyet değerleri.

Tablo 40. Optimizasyon probleminin sonuçları ve lineer programlama ile karşılaştırılması

| <b>Genetik Algoritma</b>                   |                         |                        |                         |
|--|-------------------------|------------------------|-------------------------|
| Parametreler                               | <i>1.Nokta</i>          | <i>2.Nokta</i>         | <i>3.Nokta</i>          |
| Başlangıçtaki BOI (mg/l)                   | $L_1 = 9.28$            | $L_2 = 10.38$          | $L_3 = 8.39$            |
| Sondaki BOI (mg/l)                         | $F_1 = 7.298$           | $F_2 = 6.049$          | --                      |
| Başlangıçtaki oksijen eksikliği (mg/l)     | $D_1 = 1.01$            | $D_2 = 2.837$          | $D_3 = 3.9968$          |
| Orta noktadaki oksijen eksikliği (mg/l)    | $D(x_1) = 1.827$        | $D(y_1) = 3.767$       | $D(z_1) = 3.669$        |
| Sondaki oksijen eksikliği (mg/l)           | $E_1 = 2.40$            | $E_2 = 3.89$           | --                      |
|  | <i>1.Yerleşim</i>       | <i>2.Yerleşim</i>      | <i>3.Yerleşim</i>       |
| Havalanma verimliliği                      | $\varepsilon_1 = 0.624$ | $\varepsilon_2 = 0.90$ | $\varepsilon_3 = 0.350$ |
| BOI Konsantrasyonu (mg/l)                  | $M_1 = 106.784$         | $M_2 = 40.799$         | $M_3 = 78.65$           |
| Toplam Maliyet (\$)                        | 1539850                 |                        |                         |
| <b>Lineer Programlama (Revelle (1967))</b> |                         |                        |                         |
|  | <i>1.Nokta</i>          | <i>2.Nokta</i>         | <i>3.Nokta</i>          |
| Başlangıçtaki BOI (mg/l)                   | $L_1 = 11.31$           | $L_2 = 11.83$          | $L_3 = 11.27$           |
| Sondaki BOI (mg/l)                         | $F_1 = 8.90$            | $F_2 = 9.03$           | --                      |
| Başlangıçtaki oksijen eksikliği (mg/l)     | $D_1 = 1.01$            | $D_2 = 3.17$           | $D_3 = 4.50$            |
| Orta noktadaki oksijen eksikliği (mg/l)    | $D(x_1) = 2.04$         | $D(y_1) = 4.25$        | $D(z_1) = 4.34$         |
| Sondaki oksijen eksikliği (mg/l)           | $E_1 = 2.78$            | $E_2 = 4.42$           | --                      |
|  | <i>1.Yerleşim</i>       | <i>2.Yerleşim</i>      | <i>3.Yerleşim</i>       |
| Havalanma verimliliği                      | $\varepsilon_1 = 0.53$  | $\varepsilon_2 = 0.90$ | $\varepsilon_3 = 0.350$ |
| BOI Konsantrasyonu (mg/l)                  | $M_1 = 133.0$           | $M_2 = 40.70$          | $M_3 = 78.70$           |
| Toplam Maliyet (\$)                        | 1501000                 |                        |                         |



(a)



(b)

Şekil 168. Akarsu havzasındaki çözülmüş oksijen profili; a) Genetik algoritma ile çözüm, b) Lineer programa ile çözüm.



### 3. BULGULAR VE İRDELEME

Kanal boyunca ölçülen çözünmüş oksijen konsantrasyonları değerleri ile oluşturulan regresyon analizi modelinin anlamlılık derecelerini belirlemek için, en küçük kareler yöntemine göre; regresyon hatasının büyüklüğünü, tahmini standart hatasını, determinasyon ve korelasyon katsayısını hesaplamak gerekir. Buna göre örneğin; debi değişimine göre çözünmüş oksijen değişimini inceleyen denklemlerden B noktasını örnek alırsak tablo 45'teki değerleri elde ederiz.

Tablo 41. B noktası için lineer regresyon hatalar toplamları

| $x_i$  | $C_B(y)$ | $(y_i - \bar{y})^2$ | $(y_i - a_0 - a_1x_i)^2$ |
|--------|----------|---------------------|--------------------------|
| 0.1    | 13.667   | 0.4530              | 0.0013                   |
| 0.15   | 14.04    | 0.0900              | 0.0099                   |
| 0.2    | 14.2667  | 0.0054              | 0.0080                   |
| 0.32   | 14.3667  | 0.0007              | 0.1435                   |
| 0.4    | 15.36    | 1.0402              | 0.0555                   |
| $\sum$ | 71.7004  | 1.5894              | 0.2183                   |

$$\sum x_i = 1.1700, \quad \bar{x} = \frac{1.17}{5} = 0.234$$

$$\sum y_i = 71.7004, \quad \bar{y} = \frac{71.7004}{5} = 14.3401$$

$$\text{Regresyon hatasının büyüklüğü: } S_r = \sum_{i=1}^n e_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - a_0 - a_1x_i)^2 = 0.2183$$

$$\text{Standart sapma } S_y = \sqrt{\frac{\sum (y_i - \bar{y})^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{1.5894}{5-1}} = 0.6304$$

$$\text{Tahminin standart hatası; } S_{y/x} = \sqrt{\frac{S_r}{n-2}} = \sqrt{\frac{0.2183}{5-2}} = 0.2697 \text{ olur.}$$

Böylece,  $S_{y/x} < S_y$  olduğu için doğrusal regresyon modeli anlamlıdır. İyileşmenin boyutu aşağıdaki gibi belirlenir.

Determinasyon katsayısı ;

$$r^2 = \frac{\sum(y_i - \bar{y})^2 - S_r}{\sum(y_i - \bar{y})^2} = 0.8627$$

ve r korelasyon katsayısı:

$$r = \sqrt{0.8627} = 0.9288$$

Bu sonuçlar, orijinal belirsizliğin yüzde 92.88'nin doğrusal modelle açıklandığını göstermektedir.

Aynı işlemleri diğer denklem takımları için uygularsak tablo 46-48'deki değerleri elde ederiz:

Tablo 42. Düz tabanlı savak için Debi-ÇO değişimi için hata analizi

| YÖNTEM       | Regresyon Hatasının Büyüklüğü | Standart Sapma | Tahminin Standart Hatası | Determinasyon Katsayısı | Korelasyon Katsayısı |
|--------------|-------------------------------|----------------|--------------------------|-------------------------|----------------------|
| Lineer       | 0.2183                        | 0.6304         | 0.2697                   | 0.8627                  | 0.9288               |
| Quadratik    | 0.1801                        | 0.6304         | 0.3001                   | 0.8867                  | 0.9416               |
| Kübik        | 0.0052                        | 0.6304         | 0.0721                   | 0.9967                  | 0.9984               |
| 4.Derece     | 0.4846                        | -              | -                        | -                       | -                    |
| Exponansiyel | 0.2127                        | -              | -                        | -                       | -                    |

Tablo 43. Basamaklı savak için Debi-ÇO değişimi için hata analizi

| YÖNTEM       | Regresyon Hatasının Büyüklüğü | Standart Sapma | Tahminin Standart Hatası | Determinasyon Katsayısı | Korelasyon Katsayısı |
|--------------|-------------------------------|----------------|--------------------------|-------------------------|----------------------|
| Lineer       | 0.1162                        | 0.5503         | 0.1968                   | 0.9041                  | 0.9508               |
| Quadratik    | 0.1023                        | 0.5503         | 0.2262                   | 0.9156                  | 0.9568               |
| Kübik        | 0.0001245                     | 0.5503         | 0.0112                   | 0.9999                  | 0.9999               |
| 4.Derece     | 0.4796                        | -              | -                        | -                       | -                    |
| Exponansiyel | 0.4262                        | -              | -                        | -                       | -                    |

Bu sonuçlara bakılarak 3.derece (kübik) polinomun, Debi-Çözünmüş Oksijen değişimi için mükemmel sonuçlar gösterdiği söylenebilir.

Tablo 44. Çözünmüş Oksijen-Mesafe değişimi için hata analizi

| YÖNTEM       | Regresyon Hatasının Büyüklüğü | Standart Sapma | Tahminin Standart Hatası | Determinasyon Katsayısı | Korelasyon Katsayısı |
|--------------|-------------------------------|----------------|--------------------------|-------------------------|----------------------|
| Lineer       | 0.0965                        | 0.5657         | 0.2197                   | 0.8994                  | 0.9484               |
| Quadratik    | 0.0852                        | 0.5657         | 0.2918                   | 0.9113                  | 0.9546               |
| Kübik        | 2.1955                        | -              | -                        | -                       | -                    |
| 4.Derece     | 11.1720                       | -              | -                        | -                       | -                    |
| Exponansiyel | 0.0963                        | 0.5657         | 0.2194                   | 0.8990                  | 0.9480               |

Bu sonuçlara bakılarak ikinci derece (quadratik) polinomun, Çözünmüş Oksijen-Mesafe değişimi için çok iyi sonuçlar gösterdiği söylenebilir.

#### 4. SONUÇLAR

Yapılan literatür taraması, deneysel çalışmalar, matematik model ve genetik algoritmaya dayalı bilgisayarlı maliyet analizinden sonra elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir :

1. Basamaklı dolusavaklar üzerinde oluşan toplam havalanma, düz tabanlı olanlar ile karşılaştırıldığında havalanma miktarı önemli derecede artmaktadır. Düz tabanlı savaklarda mansapta ortalama hava konsantrasyonu farklı debiler altında % 120.9-135.9 değerleri arasında değişirken, basamaklı savakta bu değer % 124.1- 137.2 arasında değişmektedir. Düz tabanlı savakta minimum havalanma yüzdesi % 119.5; maksimum havalanma yüzdesi 138.9 olarak bulunurken, basamaklı savakta minimum değer % 122.1 ve maksimum değer 140.7 olarak bulunmuştur.

2. Savaklarda artan debi miktarı ile havalanma miktarının arttığı tespit edilmiştir. 20°C için ayarlanmış  $E_{20}$  havalanma verimliliği değeri;  $Q_1 = 0.10$  l/sn lik debide düz tabanlı savak için 1.376-1.474 değerleri arasında, basamaklı savak için 1.442-1.555 değerleri arasında değişmektedir. Debinin  $Q_2 = 0.15$  l/sn olması halinde düz tabanlı savakta 1.420-1.555, basamaklı savakta 1.464-1.673 değerleri arasına çıkmaktadır. Yine aynı şekilde diğer debilerde de artış devam etmekte ve en yüksek debi değeri olan  $Q_5 = 0.40$  l/sn'de,  $E_{20}$  oranları düz tabanlı savakta 1.722-1.897, basamaklı savakta 1.746-1.948 değerleri arasında değişmektedir. Bu değerlerden de anlaşılacağı üzere debi artışı havalanma miktarı üzerinde ciddi bir şekilde doğru orantılı olarak etkisi vardır.

3. Hidrolik yapının mansap tarafında, hava kabarcıklarının su içerisinde bulunma süresi oksijen transferini direkt olarak etkiler. Bulunma süresi, kabarcıkların izlediği yol ve kabarcıkların penetrasyon derinliği ile doğrudan orantılıdır. Çıkış suyu derinliği savak havalanması için önemli bir faktördür. Bu derinlik arttıkça verimliliğin arttığı gözlenmiştir. Düz tabanlı savakta çıkış suyu derinliği 0.019 m ile 0.040 m. arasında değişirken havalanma verimliliği değeri  $E_{20}$  de 1.376 ile 1.897 arasında değişmiştir. Basamaklı savakta da benzer şekilde çıkış suyu derinliğinin artmasıyla beraber havalanma verimliliği değeri artmıştır. Çıkış suyu derinliği 0.016 m.'den 0.037 m.'ye çıkarken  $E_{20}$  değeri de 1.442-1.948 değerleri arasında artış göstermiştir.

4. Uzun yıllardır süren laboratuvar ve saha çalışmalarına rağmen araştırmacıların yaptıkları çalışmalar sonucunda, akarsu üzerindeki çözülmüş oksijen dengesini tahmin edebilen kesin bir denklem geliştirilememiştir. Sonuçlar genelde tablolar halinde yada ampirik formüller şeklinde sunulmuştur.

Çalışmamızda, eldeki sonuçlar kullanılarak yapılan regresyon analizi sonucunda, kanal mansabında ve kanal boyunca debi değişiminin çözülmüş oksijen transferine etkisini belirleyen ve yine kanal boyunca mesafenin çözülmüş oksijen konsantrasyonunu belirleyen denklem ve eğri takımları çıkartılmıştır. Çıkartılan eğri ve denklem takımlarından, Debi-Çözülmüş oksijen değişimi için en iyi sonucu kübik yaklaşım vermektedir. Buna göre;

$$f = \begin{cases} 246.9x^3 - 173x^2 + 40.32x + 11.1, & C_B \quad 0 \leq t \leq 1 \\ 258.7x^3 - 189.4x^2 + 45.92x + 10.34, & C_C \quad 1 \leq t \leq 2 \\ 218.6x^3 - 158.8x^2 + 38.33x + 10.7, & C_D \quad 2 \leq t \leq 3 \\ 201.8x^3 - 147.2x^2 + 35.69x + 10.71, & C_E \quad 3 \leq t \leq 4 \end{cases}$$

ve

$$f = \begin{cases} 187.2x^3 - 132.8x^2 + 32.02x + 11.95, & C_B \quad 0 \leq t \leq 1 \\ 170.8x^3 - 115x^2 + 26.29x + 12.22, & C_C \quad 1 \leq t \leq 2 \\ 206.9x^3 - 137.4x^2 + 29.82x + 11.9, & C_D \quad 2 \leq t \leq 3 \\ 259.8x^3 - 181.8x^2 + 41.76x + 10.74, & C_E \quad 3 \leq t \leq 4 \end{cases}$$

denklem takımları ile en yaklaşık sonucu elde etmek mümkündür. Çözülmüş oksijen-Mesafe içi çıkartılan denklem takımlarında ise en iyi sonucu ikinci derece (kuadratik) yaklaşımın verdiği görülmüştür. Buna göre;

$$F(X) = Y = \begin{cases} 0.05335x^2 - 0.3587x + 13.65 \\ 0.00335x^2 - 0.254x + 14.05 \\ 0.01503x^2 - 0.2444x + 14.27 \\ 0.01165x^2 - 0.281x + 14.37 \\ 0.03165x^2 - 0.4303x + 15.36 \end{cases}$$

ve

$$F(X) = Y = \begin{cases} -0.5332x^2 - 0.0347x + 14.01 \\ 0.001x^2 - 0.2833x + 14.36 \\ 0.04502x^2 - 0.3037x + 14.57 \\ 0.03x^2 - 0.3593x + 14.74 \\ 0.02997x^2 - 0.2619x + 15.5 \end{cases}$$

denklem takımları ile en yaklaşık sonuç elde edilmektedir.

5. Nehrin çözülmüş oksijen konsantrasyonu, bilinmesi durumunda, yapımı düşünülen arıtma tesislerinin yer ve maliyet optimizasyonu lineer programlamanın dışında genetik algoritma yardımıyla da yapılabileceği yapılan programla kanıtlanmıştır. Genetik algoritma yardımıyla akarsu suyu kalitesi standartlarına uygun olarak, bir arıtma sisteminin maliyet analizini, lineer programlamadan daha uygun sonuçlar vermektedir.

Kurulan model ile birlikte su kalitesi standartlarını altına düşmeden yani 4.0 mg/l çözülmüş oksijen değerinin altına inmeden arıtma sistemlerinin maliyet analiz yapılmış literatürdeki lineer programlardan daha iyi bir su kalitesi üzerinde sonuç çıkartılmıştır. Program sonunda oluşan maliyet ise diğer program sonuçlarından biraz fazla olarak 1539850 \$ çıkmıştır. Fakat bu fazlalık, akarsu suyu kalitesi ile karşılaştırıldığında tahammül edilebilecek bir fazlalıktır.

Kullanılan algoritma, bir su kalitesi modeli yönetimi için genetik algoritmanın kullanılabileceğini göstermiş ve diğer matematik yöntemlerden daha verimli olabileceğini göstermiştir. Hazırladığımız program ile, istenilen veriler değiştirilerek, istediğimiz bir akarsu üzerinde bir su kalitesi modeli kurulabilecektir.

## 5. ÖNERİLER

Yapılan teorik ve uygulamalı çalışmalar neticesinde, bundan sonraki çalışmalarda şu hususların dikkate alınması önerilebilir:

1. Kanal kapasitesi bakımından debi değeri, ufak bir aralıkta ve ufak değerlerde gerçekleştirilmiştir. Debi değerlerinin daha büyük aralıklarda gerçekleştirilmesi halinde sonuçlarda daha fazla netlik görülecektir.

2. Seçilen savaklarda ölçüler sabit alınmıştır. Savak ölçüleri değiştirilmek sureti ile hidrolik yapı dizaynının çözünmüş oksijene etkisi incelenebilir. Aynı şekilde farklı savak tipi seçilerek (örneğin labirent savak) sadece o savak tipinin çözünmüş oksijen transferine etkisi irdelenebilir. Her bir savak tipi için farklı bir tez çalışmasının yapılabileceği söylenebilir.

3. Savak tipini değiştirmeden sadece düşü yüksekliği değiştirilerek düşü yüksekliğinin; su sıcaklığı değiştirilerek de su sıcaklığının çözünmüş oksijen transferine etkisi incelenebilir.

4. Saha çalışmaları yapılarak, gerçek veriler kullanmak suretiyle oluşturulacak matematik modellemeyle, çözünmüş oksijen değişimine ait daha hassas neticeler veren denklem takımları geliştirebilir.

5. Akarsu üzerinden alınan verilerle oluşturulacak algoritma ile gerçek bir havza üzerinde atıksu arıtma sistemlerinin maliyet optimizasyonu yapılabilir.

## 6. KAYNAKLAR

- Aziz, O.A., Wilson, B.N. ve Gulliver, J.S., 2007. Calibration and Validation of an Empirical Dissolved Oxygen Model, Journal of Environmental Engineering, ASCE, 133, 7, 698-710.
- Abusam, A., Keesman, K.J., Meinema, K. ve Straten, G.V., 2001. Oxygen Transfer Rate Estimation in Oxidation Ditches from Clean Water Measurement, Water Research, 35, 8, 2058-2064.
- Adrian D.D. ve Sanders T.G., 1992. Oxygen sag equation for half order BOD kinetics. Journal of environmental systems, 22, 4, 341-345.
- Adrian D.D. ve Sanders T.G., 1998. Oxygen Sag equation for second order BOD decay. Water Research, 32,840.
- Adrian, D.D., Roider, E.M. ve Sanders, T.G., 2004. Oxygen Sag Models for Multiorder Biochemical Oxygen Demand Reactions, J.Environmental Engineering, ASCE, 130,7, 784-791.
- APHA (American Public Health Association), 1998. Standart Methods for the Examination of Water and Wastewater, 20.ed., Washington, USA.
- Aras, E., 2003, Barajlarda Basamaklı Dolusavak Uygulamaları ile Oluşan Aerasyon ve Akarsu Reaerasyonu Üzerine Etkileri, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Aras, E., Toğan, V., ve Berkün, M., 2007. River Water Quality Management Model Using Genetic Algorithm, Environmental Fluid Mechanics, 7, 5, 439-450.
- Aras, E. ve Berkun, M., 2008. Spillway and Metal Toxicity Influenced Stream Reaeration, Journal of Environmental Engineering-ASCE, 134, 9, 809-811.
- Avery, S.T. ve Novak, P., 1978. Oxygen Transfer at Hydraulics Structures, Journal of the Hydraulic Division, ASCE, 104, HY11, 1521-1540.
- Bağatur, T., 2000. Su Jeti ile Havalandırma Sisteminde Ağzılık Tipinin Havalandırma Performansına Etkisi, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- Bansal, M.K., 1973. Atmospheric Reaeration in Natural Streams, Water Research, Elsevier, 7, 5, 769-782.
- Baylar, A., 2002. Savak Havalandırıcılarında Tip Seçiminin Oksijen Transferine Etkisinin İncelenmesi, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.



- Baylar, A., Bagatur, T. ve Emiroğlu, M.E., 2007. Prediction of Oxygen Content of Nappe, Transition, and Skimming Flow Regimes in Stepped-Channel Chutes, Journal Of Environmental Engineering And Science, 6, 2, 201-208 .
- Benson, B.B. ve Kruse, D., 1984. The Concentration and Isotopic Fractionation of Oxygen Dissolved in Freshwater and Seawater in Equilibrium with the Atmosphere, Limnology and Oceanography, 29,620.
- Berkün M., 1974. Respirometric measurement of BOD. Ph.D. Thesis, Birmingham University, Civil Engineering Department, İngiltere.
- Berkün M. ve Tebbutt T.H.Y., 1976. Respirometric determination of BOD. Water Research, 10, 613-617.
- Berkün, M. ve Önal, A., 2004. Effects of İnorganic Metals on Respirometric Oxygen Uptake and Related Sag Curve Formations in Streams, Water SA, 30, 2, 273-278.
- Berkün, M., 2005. Effects of Ni, Cr, Hg, Cu, Zn, Al, on the dissolved oxygen balance of streams, Chemosphere, Elsevier, 59, 207-215.
- Berkun, M. ve Aras, E., 2007. Parametric Evaluation Of Stream Water Dissolved Oxygen Deficit Profile, Environmental Management Science, Mary Ann Liebert, 24, 10, 1389-1398.
- Bewtra, J.K., Nicholas, W.R. ve Polkowski, L.B., 1970. Effect of Temperature on Oxygen Transfer in Water, Water Research, Elsevier, 4, 1, 115-123.
- Bowie, G.L., Mills, W.B., Porcella, D.B., Campell, C.L., Pagenkopf, J.R., Rupp, G.L., Johnson, K.M., Chan, P.W.H., Gherini, S.A. ve Chamberlain, C.E., 1985. Rates, Constants and Kinetics Formulations in Surface Water Quality Modeling. Second Edition, Environmental Research Laboratory, Office of Research and Development, United States Environmental Protection Agency, Athens, Georgia,
- Brattberg, T. ve Chanson, H., 1998. Air Entrapment and Air Buble Dispersion at Two Dimensional Plunging Water Jet, Chemical Engineering Science, 53, 24, 4113-4127.
- Butcher, J.B. ve Covington, S., 1995. Dissolved Oxygen Analysis With Temperature Dependence, Journal of Environmental Engineering, ASCE, 121,10, 756-759.
- Butts,T.A. ve Evans, R.L., 1983. Small Stream Channel Dam Aeration Characteristic, Journal of Environmental Engineering, ASCE, 109,3, 555-572.
- Cadwallader, T.E. ve McDonnell, A.J., 1969. A multivariate analysis of reaeration Data, Water Research, 3, 731-742.
- Camp, T.R., 1965. Field Estimates of Oxygen Balance Parameters For Polluted Streams, Journal of Sanitary Engineering, ASCE, 91, SA5, Symposium Paper.

- Cargill, G.D., 1994. Water Quality in the Wind City, Water Environment & Technology, 6, 9, 52-56.
- Chamani, M.R. ve Beirami, M.K., 2002. Flow Characteristic at Drops, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 128,8, 788-791.
- Chanson, H., 1994. Hydraulic Design of Stepped Cascade, Channels, Weirs and Spillways, Elsevier Science Ltd., 261s., Oxford, England.
- Chanson, H., 1995. Air-Water Gas Transfer at Hydraulic Jump With Partially Developed Inflow, Water Resources Research, Pergamon, 29,10, 2247-2254.
- Chanson, H., 1997. Air Bubble Entrainment in Open Channels: Flow Structure and Bubble Size Distributions, Int. Journal of Multiphase Flow, Pergamon, 23,1, 193-203.
- Chanson, H. ve Toombes, L., 2002. Experimental Study of Gas Liquid Interfacial Properties in a Stepped Cascade Flow, Environmental Fluid Mechanics, Kluwer Academics, 2, 241-263.
- Chapra, S.C. ve Di Toro, D.M., 1991. Delta Method For Estimating Primary Production, Respiration and Reaeration in Streams, Journal of Environmental Engineering, ASCE, 117,5, 640-655.
- Chapra, S.C. ve Runkel, R.L., 1999. Modeling Impact of Storage Zones On Stream Dissolved Oxygen, Journal of Environmental Engineering, ASCE, 125,5, 415-419.
- Chapra, S., Pelletier, G.J. ve Tao, H., 2005. A Modeling Framework for Simulating River and Stream Water Quality, Çevresel Modelleme Ders Notları, Çeviri: Ayşe Muhammetoğlu ve Özgür Bülent Yalçın.
- Chaudhury, R.R., Sobrinho, J.A.H., Wright, R.M. ve Sreenivas, M., 1998. Dissolved Oxygen Modeling of The Blackstone River (Northeastern United States), Water Resources Research, Pergamon, 32,8, 2400-2412.
- Chen G.H., Leong M.I., Liu J., Huang J.C., Lo I.M.C. ve Yen B.C., 2000. Oxygen deficit determinations for major river in eastern Hong Kong, China. Chemosphere, 41, 7-13.
- Chern, J. ve Yang, S.P., 2004. Measuring and Modeling of Oxygen Transfer Rate in a Drop Structure, Industrial Engineering Chemistry Research, ACSP, 43, 7657-7663.
- Cho, J.H., Sung, K.S. ve Ha, S.R., 2004. A River Water Quality Management Model for Optimising Regional Wastewater Using A Genetic Algorithm, Journal of Environmental Management, 73, 229-242.
- Churchill, M.A., Elmore, H.L. ve Buckingham, R.A., 1962. The prediction of Stream Reaeration Rates, Journal of the Sanitary Engineering Division, ASCE, 88, SA4, 1-46.

- Cubillo, F., Rodriguez B., ve Barnwell, T.O., 1992. A System for Control of River Water Quality for the Community of Madrid Using QUAL2E, Water Science and Technology, 26, 1867-1873.
- Cummings, P.D. ve Chanson, H., 1999. An Experimental Study of Individual Air Bubble Entrainment at A Planar Plunging Jet, Institution of Chemical Engineers Trans., 77.
- DEP, Massachusetts Department of Environmental Protection, 2000. Massachusetts Surface Water Quality Standards, (www.state.ma.us).
- Department of the Environmental Water Research Laboratory, (DEWRL), 1973. Notes on water pollution, Aeration at weirs, DEWRL, Elder Way, Stevenage, Herts., England, June, No. 61.
- Dobbins, W.E., 1964. BOD and Oxygen Relationships in Streams, Journal of Sanitary Engineering, ASCE, 90, SA3, 39-49.
- Drolc, A. ve Koncan, J.Z., 1996. Water Quality Modeling of River Sava, Slovenia, Water Research, 30,11, 2587-2592.
- Duan, Z., 2007. Evaluation and Development of Methods for Prediction of Reaeration in Estuaries, PhD Thesis, Mississippi State University, Department of Civil and Environmental Engineering, USA.
- Eiger, S., 1995. 2D Advective Diffusive Transport of Dissolved Oxygen in Channels, Journal of Environmental Engineering, ASCE, 121,9, 668-670.
- Elsawy, E.M. ve McKeogh, E.J., 1977. Study of Self Aerated Flow with Regard to Modelling Criteria, Proceedings 17. Congress Int. Assn. for Hydr. Res., IAHR, 60, 475-482, Delft, The Netherlands.
- Emiroğlu, M.E. ve Baylar, A., 2003. Study of Aeration Performance of Open Channel Chutes Equipped with a Flip Bucket, Turkish Journal of Eng. Environmental Science., Tübitak, 27, 189-200.
- Emiroğlu, M.E. ve Baylar, A., 2005. Influence of Included Angle and Sill Slope on Air Entrainment of Triangular Planform Labyrinth Weirs, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 131,3, 184-189.
- EPA, U.S. Environmental Protection Agency, 2002. Ocmulgee River Basin Dissolved Oxygen TMDLs, Georgia Department of Natural Resources Environmental Protection Division, Atlanta, Georgia.
- Erwine, D.A. ve Elsayy, E.M., 1975. The Effects of falling Nappe on River Aeration, Proceeding XVI. Congress Int. Assn. for Hydr. Res., IAHR, 3, 390-397, Delft, The Netherlands.
- Essery, I.T.S. ve Horner, M.W., 1978. The Hydraulics Design of Stepped Spillways, CIRIA Report, No.33, London.

- Fair G.M., 1936. The log-difference method estimating the constants of the first stage BOD curve. Sewage Works Journal, 8, 430-435.
- Fair G.M., 1967. The dissolved oxygen sag - an analysis. Sewage Works Journal, 11, 445.
- Falvey, H.T., 1980, Air Water Flow in Hydraulic Structure, USBR Eng. Monograph, No. 41, Denver, USA.
- Foree, E.G., 1976. Reaeration and Velocity Prediction For Small Streams, Journal of Environmental Engineering, ASCE, 102, EE5, 937-952.
- Gallagher, T.W. ve Thuman, A.J., 2001. Jackson River Modeling: A 50-Year Perspective, TMDL Science Issues Conference, Water Environment Federation, 1-14, St. Louis.
- Gameson, A.L.H. ve Robertson, K.G., 1955. The Solubility of Oxygen in Pure Water and Sea Water, Journal of Applied Chemistry, 5, 502.
- Gameson, A.L.H., 1957. Weirs and The Aeration of Rivers, J. Institute of Water Engineering, 11,5, 477-490.
- Gameson, A.L.H., Vandyke, K.G. ve Ogden, C.G., 1958. The Effect of Temperature on Aeration at Weirs, Water Engineering, 62, 489-492.
- Geldert, D.A., Gulliver, J.S. ve Wilhelms, S.C., 1998. Modeling Dissolved Gas Supersaturation below Spillway Plunge Pools, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 124, 5, 513-521.
- Gillot, S., Capela, S. ve Heduit, A., 2000. Effect of Horizontal Flow on Oxygen Transfer in Clean Water and in Clean Water with Surfactant, Water Research, 34, 2, 678-683.
- Grant, R.S. ve Skavroneck, S., 1980. Comparison of Tracer Methods and Predictive Equations for Determination of Stream Reaeration Coefficient on Three Small Streams in Wisconsin, U.S. Geological Survey Water Resources Investigations, 80, 19, 36s.
- Gualtieri, C., Gualtieri, P. ve Doria, G.P., 2002. Dimensional Analysis of Reaeration Rate in Streams, Journal of Environmental Engineering, ASCE, 128, 1, 12-18.
- Gulliver, J.S. ve Halverson, M.J., 1989. Air-Water Gas Transfer in Open Channels, Water Resources Research, 25,8, 1783-1793.
- Gulliver, J.S., Thene, J.R. ve Rindels, A.J., 1990. Indexing Gas Transfer In Self-Aerated Flows, Journal of Environmental Engineering, ASCE, 116,3, 503-521.
- Gulliver, J.S. ve Rindels, A.J., 1993. Measurement of Air-Water Oxygen Transfer at Hydraulic Structures, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 119,3, 327-347.

- Gulliver, J.S., Wilhelms, S.C. ve Parkhill, K.L, 1998. Predictive Capabilities in Oxygen Transfer at Hydraulic Structure, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 124,7,664-671.
- Hager, W.H., 1983. Hydraulics of Plane Free Overfall, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 109, 12, 1683-1697.
- Hauser, G.E., Shane, R.M., Niznik, R.A. ve Brock, W.G., 1992. Innovative Reregulation Weirs, Civil Engineering, ASCE, 62, 5, 64-66.
- Hauser, G.E. ve Morris, D.I., 1995. High Performance Aerating Weirs for Dissolved Oxygen Improvement, Proceedings Int. Cong. On Hydropower, Waterpower95, ASCE, 2, 1696-1705.
- Heukelekian H. ve Gelman I., 1955. Studies of biochemical oxidation by direct methods. Sewage and Industrial Wastes, 23, 1267.
- Hibbs, H.E. ve Gulliver, J.S., 1997. Prediction of Effective Saturation Concentration at Spillway Plunge Pools, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 123,11, 940-949.
- Hoek, J.P., Kappelhof, J.W.N.M. and Hijnen, W.A.M. 1992. Biological nitrate removal from ground water by sulphur/limestone denitrification, Journal of Chem. Tech. Biotechnology., 54, 197-200.
- Holler, A.G., 1970. Reaeration of Discharge through Hydraulics Structures, PhD Thesis, University of Cincinnati, Ohio.
- Holler, A.G., 1971. The Mechanism Describing Oxygen Transfer from the Atmosphere to Discharge Through Hydraulic Structures, Proceeding XIV Congress, 373-382, International Association for Hydraulic Research, Paris, France.
- Hua, H., 1990. Accurate Method for Calculation of Saturation DO, Journal of Environmental Engineering, ASCE, 116, 5, 988-990.
- Igouzal M. ve Maslouhi A., 2005. Elaboration of Management Tool of a Reservoir Dam on the Sebou River (Morocco) Using an Implicit Hydraulic Model, Journal Of Hydraulic Research, 43, 2, 125-130.
- İnkayalı, N.G. ve Budak, F., 2003. Doğu Adana Atıksu Arıtma Tesisi Çıkış Sularının Aşağı Seyhan Nehri Su Kalitesine Etkisi, I.Ulusal Su Mühendisliği Sempozyumu Bildiriler Kitabı, 81-90, 22-26 Eylül 2003, İzmir.
- Jha, R., Ojha, C.S.P. ve Bhatia, K.K.S., 2004. A Supplementary Approach for Estimating Reaeration Rate Coefficients, Hydrological Processes, 18, 65-79.
- Jorgansen, S.E. ve Gromiec, M.J., 1989. Mathematical Submodel in Water Quality Systems, Elsevier Science Publishing Co., 408s, New York, NY, United States.

- Jun, K.S. ve Jain, S.C., 1993. Oxygen Transfer in Bubly Turbulent Shear Flow, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 119,1, 21-36.
- Kaş, I. ve Yıldız, D., 2000. Basamaklı Dolusavaklardaki Akım Koşulları ve Projelendirme Kriterleri, DSİ Genel Müdürlüğü, Teknik Araştırma ve Kalite Kontrol Dairesi Başkanlığı, Yayın No.Hİ-937, Ankara.
- Khatsuria, R.M., 2005. Hydraulics of Spillways and Energy Dissipators, Marcel Dekker, CRC Press, 95-127, USA.
- Kim, J. ve Walters, R.W., 2001. Oxygen Transfer at Low Drop Weirs, Journal of Environmental Engineering, ASCE, 127,7, 604-610.
- Kim, Y.K. ve Ra, D.G., 2005. Water Surface Contacting Cover System - The Basic Study for Improving the Oxygen Transfer Coefficient and the BOD removal Capacity, Water Research, 39, 1553-1559.
- Krenkel, P.A. ve Orlob, G.T., 1962. Turbulent diffusion and the reaeration rate coefficient, Journal of the Sanitary Engineering Division, ASCE, 88, 2, 53-116.
- Kökpınar, M.A., 1996. Air Entrainment in High Speed Free Surface Flows, Doktora Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara.
- Kövári, J., 1983. Inland Aquaculture Engineering, FAO, Food and Agriculture Organization of the United Nations Rome, Italy .
- Langbein, W.B. ve Durum, W.H., 1967. The Aeration Capacity of Stream, USGS Circular No.542, United States, Geological Survey, Washington DC.
- Lantagne, D.S., 2002. A Multivariate Regression Analysis of Dissolved Oxygen in the Ipswich River Mainstream, Ipswich River Watershed Association, 75s, 240 Country Road, Ipswich MA.
- Lee J.D., 1951. Simplified method for analysis of BOD data. Sewage and Industrial Wastes, 23, 2, 164.
- Lewis, W.K. ve Whitman, W.G., 1924. Principles of Gas Absorption, Ind. and Engineering Chemical, 16,12, 1215-1220.
- Li, W.H., 1962. Unsteady Dissolved Oxygen Sag in a Stream, Journal of Sanitary Eng. Div., ASCE, 88, SA3.
- Lung, W., 1996. Postaudit of Upper Mississippi River BOD/DO Model, Journal of Environmental Engineering, ASCE, 122, 5, 350-358.
- Markofsky, M. and Kobus, H., 1978. Unified Presentation of Weir-Aeration Data, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 104, 562-567.

- Mahendraker, V., Mavinic, D.S. ve Hall, K.J., 2005. Comparison of Oxygen Transfer Parameters Determined from the Steady State Oxygen Uptake Rate and Non-Steady State Changing Power Level Methods, Journal of Environmental Engineering, ASCE, 131,5, 692-701.
- McBride, G.B., 2002. Calculating Stream Reaeration Coefficients from Oxygen Profiles, Journal of Environmental Engineering, ASCE, Technical Notes, 128, 4, 384-386.
- McBride, G.B. ve Chapra, S.C., 2005. Rapid Calculation of Oxygen in Streams: Approximate Delta Method, Journal of Environmental Engineering, ASCE, 131, 3, 336-342.
- McNamara, J.R., 1976. Optimization Model for Regional Water Quality Management, Water Resources Research, 12, 2, 125-134.
- Melching, C.S. ve Flores H.E., 1999. Reaeration Equations Derived from US. Geological Survey Database, Journal of Environmental Engineering, ASCE, 125, 5, 407-414.
- Mohamed M., 2000. Comparison Of Field Measurements to Predict Reaeration Coefficients,  $K_2$ , In The Application Of Water Quality Model, Qual2e, to A Tropical River. PhD Thesis, Colorado University, Department of Earth Resources.
- Moog, D.B. ve Jirka, G.H., 1998. Analysis of Reaeration Equations Using Mean Multiplicative Error, Journal of Environmental Engineering, ASCE, 112, 2, 104-110.
- Moog, D.B. ve Jirka, G.H., 1999a. Air-Water Gas Transfer in Uniform Channel Flow, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 125,1, 3-10.
- Moog, D.B. ve Jirka, G.H., 1999b. Stream Reaeration in Nonuniform Flow: Macroroughness Enhancement, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 125,1, 11-16.
- Mulligan, A.E. ve Brown, L.C., 1998. Genetic Algorithms for Calibrating Water Quality Models, Journal of Environmental Engineering, ASCE, 124, 3, 202-211.
- Murphy, J.L., 2003. The Use of Krypton as a Tracer to Quantify Reaeration in Surface Waters, PhD Thesis, Queen's University Belfast, UK.
- Muslu, Y., 1985. Su Temini ve Çevre Sağlığı Cilt 2, İTÜ Kütüphanesi, Sayı:1302, İstanbul
- Nakasone, H., 1987. Study of Aeration at Weirs and Cascades, Journal of Environmental Engineering, ASCE, 113,1, 64-81.
- Nas, S.S., 2000. Hidrolik ve Biyolojik Parametre Değişimlerinin Akarsularda Su Kalitesine ve Arıtma Tesisi Optimizasyonuna Etkisi, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.

- Neal, B. ve Johnson, T., 1999. South Platte River Segment 15 Improvements to Enhance Water Quality, Colarado Riparian Association, Green Online, 10,2.
- Nemerow, N.L., 1974. Scientific Stream Pollution Analysis, Hemisphere Publishing Corporation, Washington.
- Neto, I.E.L., Zhu, D.Z., Rajaratnam, N., Yu, T., Spafford, M. ve McEachern, P., 2007. Dissolved Oxygen Downstream of an Effluent Outfall in an Ice-Covered River: Natural and Artificial Aeration, Journal of Environmental Engineering, ASCE, 133, 11, 1051-1060.
- O'Connor, D.J., ve Dobbins, W.E., 1956. Mechanism of Reaeration in Natural Streams, Journal of the Sanitary Engineering Division, ASCE, 82, SA6.
- Orlins, J.J. ve Gulliver, J.S.,1997. Prediction of Dissolved Gas Concentrations Downstream of A Spillway”, Proceedings, XXVII. IAHR Congress, 524-529, New York.
- Owens, M., Edwards, R.W., ve Gibbs, J.W., 1964. Some Reaeration Studies in Streams, International Journal of Air and Water Pollution, 8, 8-9, 469-486.
- Ökten, G., 1985. Ocak havasının sıcaklığının içerdiği nem miktarının ısı içeriğinin belirlenmesi. Madencilik Dergisi, 24, 2, 27-32.
- Önal A., 2000. Effects of metal toxicity on the self purification capacity of rivers. MSc Thesis, Karadeniz(Black Sea) Technical University, Civil Engineering Department.
- Parkhurst, J.D. ve Pomeroy, R.D., 1972. Oxygen absorption in Streams, Journal of the Sanitary Engineering Division, ASCE, 98, 1, 101-124.
- Pelletier, G.J., Chapra, S.C. ve Tao, H., 2006. Qual2Kw- A Framework for Modeling Water Quality in Streams and Rivers Using A Genetic Algorithm for Calibration, Environmental Modelling-Software, 21, 3, 419-425.
- Pöpel, H.J., 1974. Aeration and Gas Transfer, Delf University of Technology, 169s. Hollanda.
- Preul, H.C. and Holler, A.G., 1969. Reaeration through Low Dams in the Ohio River, Proceeding, Industrial Waste Conference, Purdue Univ., South Bend, Ind, 1249-1270.
- Qaisi, K.M., Constant, W.D. ve Thibodeaux, L.J., 1997. Impact of Barge Traffic on Stream Reaeration: Laboratory Experiments, Journal of Environmental Engineering, ASCE, 123,7, 716-719.
- Rahmé, Z.G., Zytner, R.G., Corsi,R.L. ve Isfahani, M.M., 1997. Predicting Oxygen Uptake and VOC Emissions at Enclosed Drop Structures, Journal of Environmental Engineering, ASCE, 123,1, 47-53.



- Rajaratnam, S.K., 1978. Design of Spillways for Reaeration of Polluted Waters, CIRIA Report, No.72, London.
- Rajaratnam, N. ve Albers, C., 1998. Water Distribution in Very High Velocity Water Jets in Air, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 124,6, 647-650.
- Reid, S.E., Mackinnon, P.A. ve Elliot, T., 2007. Direct Measurement of Reaeration Rates Using Noble Gas Tracers in The River Lagan, Northern Ireland, Water and Environment Journal, 21, 182-191.
- Rein, M., 1998. Turbulent Open Channel Flows: Drop Generation and Self Aeration, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 124,1, 98-102.
- Revelle, S.C., Loucks, D.P. ve Lynn, W.R., 1967. A Management Model For Water Quality, Journal of WPCF, 1164-1183.
- Rindels, A.J. ve Gulliver J.S., 1991. Oxygen Transfer at Spillways, Proc., Air-Water Mass Transfer, ASCE, New York.
- Robinson, R., 1994. Chicago's Waterfalls, Civil Engineering, ASCE, 64, 7, 36-39.
- Rogala, R. ve Redowicz, W., 2002. Rehabilitation of the dam cascade in Pilchowice, 5th International Conference on Hydro-Science and Engineering, Eylül, Varşova, Polonya.
- Sene, K.J., 1988. Air Entrainment by Plunging Jets, Chemical Engineering Science, 43, 2615-2623.
- Smooth, J.L., 1988. An Examination of Streams Reaeration Rate Coefficient and Hydraulic Conditions in a Pool and Riffle Stream, PhD Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, VA.
- Sousa, C., Lopes, R., Matos, J. ve Almeida, M.D., 2003. Reaeration by Vertical Free-Fall Drops in Circular Channels.: A Model Study, Proceeding XXX. IAHR Congress, Theme B, 361-367, Thessaloniki, Greece.
- Streeter H.W. and Phelps E.B., 1925. A study of the pollution and natural purification of Ohio river, III. Factors concerned in the phenomena of oxidation and reaeration. Bulletin 146. Public Health Service, Washington, DC, U.S.A.
- Tang, N.H., Nirmalakhandan, N. ve Speece, R.E., 1995. Weir Aeration: Models and Unit Energy Consumption, Journal of Environmental Engineering, ASCE, 121,2, 196-199.
- Tebbutt, T.H.Y., 1972. Some Studies on Reaeration in Cascades, Water Research, Pergamon Press, 6, 297-304, England.

- Tebbutt, T.H.Y., 1977. Principles of Water Quality Control, Second Edition, Pergamon Press, 201s., Oxford, England.
- Tebbutt, T.H.Y., 1984. Su Kalitesi Kontrol Prensipleri, Çeviri: İnş. Yük. Müh. Vahap Balman, Bizim Büro Basımevi, 146s., Ankara.
- Technical Memorandum, 1996. Modeling Special Studies: 1994-95 Time of Travel and Stream and Dam Reaeration Studies, Rouge River National Wet Weather Demonstration Project, Wayne County, Michigan.
- Thackston, E.L. ve Krenkel, P.A., 1969. Reaeration Prediction in Natural Streams, Journal of the Sanitary Engineering Division, ASCE, 95, 1, 65-93.
- Thackston, E.L. ve Dawson J.W., 2001. Recalibration of A Reaeration Equation, Journal of Environmental Engineering, ASCE, 127,4, 317-321.
- Thene, J.R., 1988. Gas Transfer at Weirs Using Hydrocarbon Gas Tracer Method with Head-Space Analysis, PhD Thesis, University of Minnesota, Minneapolis.
- Thene, J.R. ve Gulliver, J.S., 1990. Gas Transfer Measurement Using Head-Space Analysis of Propane, J.Environmental Engineering, ASCE, 116,6, 1107-1124.
- Theriault E.J., 1927. The dissolved oxygen demand of polluted rivers. Bulletin 173. Public Health service, Washington, DC, U.S.A.
- Thomas H.A., 1950. Graphical determination of BOD curve constants. Water and Sewage Works, 97,123.
- Thompson, E.J. ve Gulliver, J.S., 1997. Oxygen Transfer Similitude for Vented Hydroturbine, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 123,6, 529-538.
- Toombes, L. ve Chanson, H., 2000. Air-Water Flow and Gas Transfer at Aeration Cascades: A comparative study of smooth and stepped chutes, Int Workshop on Hydraulics of Stepped Spillways, Balkema, Rotterdam, The Netherlands, 77-84.
- Toombes, L. ve Chanson, H., 2005. Air-Water Mass Transfer on a Stepped Waterway, Journal of Environmental Engineering, ASCE, 131, 10, 1377-1386.
- Townson, J.M., 1991. Free Surface Hydraulics, Chapman&Hall, Northway Andover Hampshire, 216s, England.
- Tsivoglou, E.C., Cohen, J.B., Shearer, S.D. ve Godsil, P.J., 1968. Tracer Measurement of Stream Reaeration, II. Field Studies, Journal of Water Pollution Control Federation, 40, 2, 285-305.
- Tsivoglou, E.C. and Wallace, J.R., 1972. Characterization of Stream Reaeration Capacity, USEPA Rep. No. R3-72-012, U.S. Environmental Protection Agency, Washington DC.

- Urban, A.L., Gulliver, J.S. ve Johnson, D.W., 2008. Modeling Total Dissolved Gas Concentration Downstream of Spillways, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 134,5, 550-561.
- Uslu O., Türkman A., 1987. “Su kirliliği ve Kontrolü”, TC Başbakanlık Çevre Genel Müdürlüğü Yayınları Eğitim Dizisi-1, Ankara
- Van Orden, G.N. ve Uchirin, C.G., 1993. The Study of Dissolved Oxygen Dynamics in the Whippany River, New Jersey Using the QUAL2E model, Ecological Modeling, 70, 1-2, 1-17.
- Vogelaar, J.C.T., Klapwijk, A., Lier, J.B.V. ve Rulkens, W.H., 2000. Temperature Effects on The Oxygen Transfer Rate Between 20 and 55<sup>0</sup>C, Water Resorces Research, Pergamon, 34,3, 1037-1041.
- Wanninkhof, R., Mulholland, P.J. ve Elwood, J.W. 1990. Gas Exchange Rates for a First Order Stream Determined with Deliberate Natural Tracers, Water Resources, 26, 7, 1621-1630.
- Watson, C.C., Walters, R.W. and Hogan, S.A., 1998. Aeration Performance of Low Drop Weirs, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 124, 1, 65-71.
- White, E.M., 1979. Fluid Mechanics, McGraw-Hill, Inc., New York, N.Y., 63-65.
- Wiebe, A. H. 1939. Dissolved Oxygen Profiles at Norris Dam and in the Big Creek Sector of Norris Reservoir (1937), with a Note on the Oxygen Demand of the Water (1938), The Ohio Journal of Science, 39, 1, 27-36
- Wiebe, A. H. 1940. The effect of density currents upon the vertical distribution of temperature and dissolved oxygen in Norris Reservoir. Journal of Tenn. Acad. Science, 15, 3, 301–308.
- Wilcock, R.J., 1984. Reaeration Studies on Some New Zealand River using Methyl Chloride as a Gas Tracer, In Brutsaert, W., ve Jirka, G.H., (ed) Gas Transfer and Water Surfaces, 413-420, Reidel Publishing Company, Dordrecht.
- Wilcock, R.J., 1988. Study of River Reaeration At Different Flow Rates, Journal of Environmental Engineering, ASCE, 114,1, 91-104.
- Wilhems, S.C. and Smith, D.R., 1981. Reaeration of Through Gated-Conduit Outlet Works, Tech Rep. No E-81-5, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, Miss.
- Wilhems, S.C., 1988. Reaeration of Low-Head Gated Structures Preliminary Results, Water Operations Technical Support, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, Miss.
- Wormleaton, P.R. ve Soufiani, E., 1998. Aeration Performance of Triangular Planform Labyrinth Weirs, Journal of Environmental Engineering, ASCE, 124,8, 709-719.

- Wormleaton, P.R. ve Tsang, C.C., 2000. Aeration Performance of Rectangular Planform Labyrinth Weirs, Journal of Environmental Engineering, ASCE, 126,5, 456-465.
- Zison, S.W., 1978. Rates, Constants and Kinetic Formulations in Surface Water Quality Modeling. Environmental Research Laboratory, Office of Research and Development, United States Environmental Protection Agency.

## ÖZGEÇMİŞ

Egemen ARAS 1978 yılında Ankara’da doğdu. İlkokulu Zeynepkamil İlkokulunda, ortaokul ve liseyi İstanbul Haydarpaşa Lisesinde bitirdi. 1995 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümünü kazandı. Bu bölümde öğrenimini 1999 yılı bahar yarıyılında tamamladı ve aynı yıl yüksek lisans eğitimine başladı. 2000 yılı Ekim ayında KTÜ İnşaat Mühendisliği Bölümünde, Fen Bilimleri Enstitüsüne bağlı Araştırma Görevlisi olarak çalışmaya başladı. 2003 yılında yüksek lisansını tamamladıktan sonra aynı bölümde Hidrolik Anabilim dalında doktora eğitime başladı. 2006 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Gümüşhane Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümünde Öğretim Görevlisi olarak ders vermeye başladı. 2006-2007 öğretim döneminde Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’ndaki üstün nitelikli bilimsel çalışmaları nedeniyle Lisansüstü Başarı Ödülü verildi. 2007 yılı bahar yarıyılı sonunda Anadolu Üniversitesi İktisat Fakültesi Kamu Yönetimi Bölümünden lisans diploması aldı. 2008 yılında Gümüşhane Üniversitesi’nin kurulmasıyla birlikte, halen buradaki öğretim görevliliği görevini sürdürmektedir. Bir çok uluslararası yayını bulunan Egemen Aras evlidir ve yabancı dil olarak iyi derecede İngilizce bilmektedir.