T.C.
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ-CERRAHPAŞA
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

GÖL-AKİFER ETKİLEŞİMLERİNİN SAYISAL ve DENEYSEL YÖNTEMLERLE İNCELENMESİ

İnci YALÇIN

DANIŞMAN
Prof. Dr. Cevza Melek KAZEZYILMAZ ALHAN

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

İnşaat Mühendisliği Programı

İSTANBUL-2021

Bu çalışma, 28.06.2021 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, İnşaat Mühendisliği Programında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

Prof. Dr. Cevza Melek KAZEZYILMAZ ALHAN(Danışman)
İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa
Mühendislik Fakültesi

Dr. Öğr. Üyesi Uğur BOYRAZ
İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa
Mühendislik Fakültesi

Prof. Dr. Gökmen TAYFUR
İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü
Mühendislik Fakültesi

Unvan Adı SOYADI
Üniversite
Fakülte

Unvan Adı SOYADI
Üniversite
Fakülte

20.04.2016 tarihli Resmi Gazete'de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince; Bu Lisansüstü teze, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa'nın abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun rapor alınmıştır.

ÖNSÖZ

Yaşamım boyunca beni her zaman destekleyen ve karşılıksız seven annem Faika ÇAKMUR'a bu tez sürecinde büyük bir sabırla yanımda olduğu için sonsuz teşekkürlerimi, saygılarımı ve sevgilerimi sunuyorum. Bu tezi canım anneme armağan ediyorum.

Her zaman elinden gelenin fazlasını yapan, desteğiyle bana güç veren ve bu yolda benimle yürüyen hayat arkadaşım Kıvanç Cem ÇEKEN'e en içten teşekkürlerimi sunarım.

Bu süreçte bana her zaman yol gösteren, bilgi birikimine ve bilime olan tutkusuna hayran olduğum, her konuda bizlere ilham olan çok kıymetli saygıdeğer hocam ve bilim insanı Prof. Dr. Cevza Melek KAZEZYILMAZ ALHAN'a sonsuz teşekkür eder, saygılarımı sunarım.

Tez çalışmam boyunca değerli bilgi birikimlerini benden esirgemeyen ve çalışmam konusunda yol gösterici bilgiler sunan sayın Dr. Öğr. Üyesi Uğur BOYRAZ'a teşekkürü borç bilirim.

Tezime başladığım ilk günden itibaren bana her konuda sabırla yardımcı olan, bilgisini paylaşıp her koşulda yanımda olan değerli arkadaşım Hekmatullah MOHAMMADI'ye sonsuz teşekkürlerimi sunuyorum.

Haziran 2021 İnci YALÇIN

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ ..... **iv**
İÇİNDEKİLER ..... **v**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **viii**
TABLO LİSTESİ ..... **xiv**
SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ ..... **xv**
ÖZET ..... **xvii**
SUMMARY ..... **xix**
1. GİRİŞ **1**
2. GENEL KISIMLAR **4**
2.1. YERALTI SUYU 4
2.2. GÖL-YERALTI SUYU ETKİLEŞİMLERİ 5
2.3. GÖL-YERALTI SUYU ETKİLEŞİMİ ÜZERİNE YAPILAN ÇALIŞMALAR 6
2.3.1. Kavramsal Çalışmalar 7
2.3.2. Deneysel Çalışmalar 8
2.3.3. Saha Çalışmaları 8
2.4. HİDROLOJİ DENEY DÜZENEĞİ 9
2.5. MODFLOW PROGRAMI 12
2.5.1. Yeraltı Suyu Akımı 12
2.5.2. MODFLOW Denklemleri 14
2.5.2.1. Yeraltı Suyu Akımı Denklemi 14
2.5.2.2. Sonlu Farklar Yöntemi 15
2.5.2.3. Göl-Akifer Arasında Sızma 15
2.5.2.4. Su Bütçesi 18
3. MALZEME VE YÖNTEM **19**
3.1. LABORATUVAR DENEYLERİ 19
3.1.1. Zemin Türünün Belirlenmesi 19
3.1.1.1. Dane Dağılımı Tayini 20
3.1.1.2. Zemin Parametrelerinin Belirlenmesi 21
3.1.2. Göl Yatağı 23
3.1.3. Toprağın ve Göl Materyalinin Yerleştirilmesi 24

3.1.4. Geliştirilen Senaryolar 26
3.1.4.1. Deney I ve Deney V 29
3.1.4.2. Deney II ve Deney VI 31
3.1.4.3. Deney III ve Deney VII 33
3.1.4.4. Deney IV ve Deney VIII 33
3.2. DENEY DÜZENEĞİNİN SAYISAL MODEL KURULUMU 34
3.3. KAVRAMSAL MODEL KURULUMU 39
4. BULGULAR 45
4.1. DENEYSEL BULGULAR 45
4.1.1. Deney I 46
4.1.2. Deney II 47
4.1.3. Deney III 48
4.1.4. Deney IV 49
4.1.5. Deney V 50
4.1.6. Deney VI 51
4.1.7. Deney VII 51
4.1.8. Deney VIII 52
4.1.9. Deneysel Bulguların Karşılaştırılması 53
4.2. DENEY DÜZENEĞİNİN SAYISAL MODEL BULGULARI 58
4.2.1. Deney I Modeli 58
4.2.2. Deney II Modeli 61
4.2.3. Deney III Modeli 64
4.2.4. Deney IV Modeli 67
4.2.5. Deney V Modeli 70
4.2.6. Deney VI Modeli 73
4.2.7. Deney VII Modeli 76
4.2.8. Deney VIII Modeli 79
4.2.9. Özgül Verimlilik Değerinin Kalibrasyon ile Belirlenmesi 82
4.3. KAVRAMSAL MODEL BULGULARI 84
4.3.1. Kavramsal Model I 84
4.3.2. Kavramsal Model II 85
4.3.3. Kavramsal Model III 87
4.3.4. Kavramsal Model IV 88
4.3.5. Kavramsal Model V 90

4.3.6. Kavramsal Model VI 91
4.3.7. Kavramsal Model VII 93
4.3.8. Kavramsal Model VIII 94
4.3.9. Kavramsal Model Bulgularının Karşılaştırılması 96
4.4. DENEYSEL, SAYISAL VE KAVRAMSAL MODELLERİN TARTIŞILMASI 100
5. TARTIŞMA VE SONUÇ 104
KAYNAKLAR 105
ÖZGEÇMİŞ 109

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1: (a) Besleyen yeraltı suyu, (b) Aynı anda hem besleyen hem beslenen yeraltı suyu, (c) Doğrudan beslenen yeraltı suyu, (d) Süzülme ile beslenen yeraltı suyu (Gültekin, 2015) 6

Şekil 2.2: Hidroloji Deney Düzeneği 10

Şekil 2.3: Hidroloji Deney Düzeneği Eskizi (Hydrology Apparatus User Guide) 11

Şekil 2.4: Hidroloji Deney Düzeneği'nde kuyular ve piyezometreler (Hydrology Apparatus User Guide) 11

Şekil 2.5: Göl ve akiferdeki bir nokta arasındaki sızıntı akısının tahmin edilmesinde kullanılan kavramlar (Merritt ve Konikow, 2000) 16

Şekil 3.1: (a) Laboratuvar kumu, (b) Doğal yıkanmış kum 20

Şekil 3.2: Doğal yıkanmış kum için elek analizi sonuçları 21

Şekil 3.3: Sabit yeraltı suyu seviyesi 22

Şekil 3.4: Göl yatağı materyali 23

Şekil 3.5: Kil karışımlı yatak 24

Şekil 3.6: Hidroloji Deney Düzeneği havza alanı 24

Şekil 3.7: Havza alanında deliklerin kaplanması 25

Şekil 3.8: Göl-akifer sistemi 25

Şekil 3.9: Göl yatağı olmadan deneyler (a) Deney I-İki kenardan sabit yük ile beslenen kuru zemin ve göl, (b) Deney II-3 cm YASS olan akifer ve boş gölün yağış altında etkileşimi, (c) Deney III-Akiferi besleyen göl, (d) Deney IV-Akiferi yağış altında besleyen göl 27

Şekil 3.10: Göl yatağı eklenmiş deneyler (a) Deney V-İki kenardan sabit yük ile beslenen kuru zemin ve göl, (b) Deney VI-3 cm YASS olan akifer ve boş gölün yağış altında etkileşimi, (c) Deney VII-Akiferi besleyen göl, (d) Deney VIII-Akiferi yağış altında besleyen göl 28

Şekil 3.11: Deney I düzeneği 30

Şekil 3.12: Deney V düzeneği 31

Şekil 3.13: Başlangıç koşulu olan 3 cm yeraltı suyu seviyesi.....32

Şekil 3.14: Yağış anında göl-akifer sistemi 32

Şekil 3.15: Deney III düzeneği.....33

Şekil 3.16: Deney IV düzeneği 34

Şekil 3.17: MODFLOW ile deney düzeneğine ait sayısal model 35

Şekil 3.18: Akiferde göl ve piyezometrelerin konumu 37

Şekil 3.19: Sayısal modelde GHB paketi ile tanımlanan sabit su yükseklikleri 38

Şekil 3.20: Kavramsal model akifer.....41

Şekil 3.21: (a) Kavramsal Model I, (b) Kavramsal Model II, (c) Kavramsal Model III, (d) Kavramsal Model IV 42

Şekil 3.22: (a) Kavramsal Model V, (b) Kavramsal Model VI, (c) Kavramsal Model VII, (d) Kavramsal Model VIII 43

Şekil 4.1: Piyezometrelerin numaralandırılması 45

Şekil 4.2: Deney I'e ait zamana bağlı yeraltı su seviyesi değerlerini gösteren piyezometreler (a) 17. dakikada YASS, (b) 30. dakikada YASS, (c) 62. dakikada YASS, (d) 137. dakikada YASS 46

Şekil 4.3: Deney II'ye ait zamana bağlı yeraltı su seviyesi değerlerini gösteren piyezometreler a) Başlangıç koşulu YASS 3 cm b) 1.dakikada YASS c) 7.dakikada YASS d) 40.dakikada YASS.....47

Şekil 4.4: Deney III'e ait zamana bağlı yeraltı su seviyesi değerlerini gösteren piyezometreler (a) 2. dakikada YASS, (b) 3. dakikada YASS, (c) 5. dakikada YASS, (d) 23. dakikada YASS.....48

Şekil 4.5: Deney IV'e ait zamana bağlı yeraltı su seviyesi değerlerini gösteren piyezometreler (a) 2. dakikada YASS, (b) 3. dakikada YASS, (c) 4. dakikada YASS, (d) 7.5. dakikada YASS.....49

Şekil 4.6: Deney V'e ait zamana bağlı yeraltı su seviyesi değerlerini gösteren piyezometreler (a) 17. dakikada YASS, (b) 30. dakikada YASS, (c) 62. dakikada YASS, (d) 137. dakikada YASS.....50

Şekil 4.7: Deney VI'ya ait zamana bağlı yeraltı su seviyesi değerlerini gösteren piyezometreler (a) Başlangıç koşulu YASS 3 cm, (b) 1. dakikada YASS, (c) 7. dakikada YASS, (d) 40. dakikada YASS 51

Şekil 4.8: Deney VII'ye ait zamana bağlı yeraltı su seviyesi değerlerini gösteren piyezometreler (a) 2. dakikada YASS, (b) 3. dakikada YASS, (c) 5. dakikada YASS, (d) 23. dakikada YASS.....52

Şekil 4.9: Deney VIII'e ait zamana bağlı yeraltı su seviyesi değerlerini gösteren piyezometreler (a) 2. dakikada YASS, (b) 3. dakikada YASS, (c) 4. dakikada YASS, (d) 7.5. dakikada YASS.....53

Şekil 4.10: Deney I ve Deney V'in farklı zamanlara ait piyezometre değerlerinin karşılaştırması (a) 17. dakika, (b) 30. dakika, (c) 62. dakika, (d) 137. dakika.....54

Şekil 4.11: Deney II ve Deney VI'nın farklı zamanlara ait piyezometre değerlerinin karşılaştırması (a) Başlangıç koşulu, (b) 1. dakika, (c) 7. dakika, (d) 40. dakika.....55

Şekil 4.12: Deney III ve Deney VII'nin farklı zamanlara ait piyezometre değerlerinin karşılaştırması (a) 2. dakika, (b) 3. dakika, (c) 5. dakika, (d) 23. dakika.....56

Şekil 4.13: Deney IV ve Deney VIII'in farklı zamanlara ait piyezometre değerlerinin karşılaştırması (a) 2. dakika, (b) 3. dakika, (c) 4. dakika, (d) 7.5. dakika.....57

Şekil 4.14: Deney I Modeli ile hesaplanmış olan farklı zamanlara ait yeraltı suyu dağılımı plan görünümü (a) 17. dakika, (b) 30. dakika, (c) 62. dakika, (d) 137. dakika 59

Şekil 4.15: Deney I Modeli ile hesaplanmış olan farklı zamanlara ait yeraltı suyu dağılımı kesit görünümü (a) 17. dakika, (b) 30. dakika, (c) 62. dakika, (d) 137. dakika 60

Şekil 4.16: Deney I için deneysel bulgular ile sayısal model bulgularının farklı zamanlar için karşılaştırması (a) 17. dakika, (b) 30. dakika, (c) 62. dakika, (d) 137. dakika.....61

Şekil 4.17: Deney II Modeli ile hesaplanmış olan farklı zamanlara ait yeraltı suyu dağılımı plan görünümü (a) Başlangıç, (b) 1. dakika, (c) 7. dakika, (d) 40. dakika 62

Şekil 4.18: Deney II Modeli ile hesaplanmış olan farklı zamanlara ait yeraltı suyu dağılımı kesit görünümü (a) Başlangıç, (b) 1. dakika, (c) 7. dakika, (d) 40. dakika.....63

Şekil 4.19: Deney II için deneysel bulgular ile sayısal model bulgularının farklı zamanlar için karşılaştırması (a) Başlangıç, (b) 1. dakika, (c) 7. dakika (d) 40. dakika 64

Şekil 4.20: Deney III Modeli ile hesaplanmış olan farklı zamanlara ait yeraltı suyu dağılımı plan görünümü (a) 2. dakika, (b) 3. dakika, (c) 5. dakika, (d) 23. dakika.....65

Şekil 4.21: Deney III Modeli ile hesaplanmış olan farklı zamanlara ait yeraltı suyu dağılımı kesit görünümü (a) 2. dakika, (b) 3. dakika, (c) 5. dakika, (d) 23. dakika.....66

Şekil 4.22: Deney III için deneysel bulgular ile sayısal model bulgularının farklı zamanlar için karşılaştırması (a) 2. dakika, (b) 3. dakika, (c) 5. dakika (d) 23. dakika 67

Şekil 4.23: Deney IV Modeli ile hesaplanmış olan farklı zamanlara ait yeraltı suyu dağılımı plan görünümü (a) 2. dakika, (b) 3. dakika, (c) 4. dakika, (d) 7.5. dakika.....68

Şekil 4.24: Deney IV Modeli ile hesaplanmış olan farklı zamanlara ait yeraltı suyu dağılımı kesit görünümü (a) 2. dakika, (b) 3. dakika, (c) 4. dakika, (d) 7.5. dakika.....69

Şekil 4.25: Deney IV için deneysel bulgular ile sayısal model bulgularının farklı zamanlar için karşılaştırması (a) 2. dakika, (b) 3. dakika, (c) 4. dakika, (d) 7.5. dakika 70

Şekil 4.26: Deney V Modeli ile hesaplanmış olan farklı zamanlara ait yeraltı suyu dağılımı plan görünümü (a) 17. dakika, (b) 30. dakika, (c) 62. dakika, (d) 137. dakika 71

Şekil 4.27: Deney V Modeli ile hesaplanmış olan farklı zamanlara ait yeraltı suyu dağılımı kesit görünümü (a) 17. dakika, (b) 30. dakika, (c) 62. dakika, (d) 137. dakika 72

Şekil 4.28: Deney V için deneysel bulgular ile sayısal model bulgularının farklı zamanlar için karşılaştırması (a) 17. dakika, (b) 30. dakika, (c) 62. dakika, (d) 137. dakika 73

Şekil 4.29: Deney VI Modeli ile hesaplanmış olan farklı zamanlara ait yeraltı suyu dağılımı plan görünümü (a) Başlangıç, **(**b) 1. dakika, (c) 7. dakika, (d) 40.dakika 74

Şekil 4.30: Deney VI Modeli ile hesaplanmış olan farklı zamanlara ait yeraltı suyu dağılımı kesit görünümü (a) Başlangıç, (b) 1. dakika, (c) 7. dakika, (d) 40.dakika.....75

Şekil 4.31: Deney VI için deneysel bulgular ile sayısal model bulgularının farklı zamanlar için karşılaştırması (a) Başlangıç, (b) 1. dakika, (c) 7. dakika, (d) 40. dakika 76

Şekil 4.32: Deney VII Modeli ile hesaplanmış olan farklı zamanlara ait yeraltı suyu dağılımı plan görünümü (a) 2. dakika, (b) 3. dakika, (c) 5. dakika, (d) 23. dakika.....77

Şekil 4.33: Deney VII Modeli ile hesaplanmış olan farklı zamanlara ait yeraltı suyu dağılımı kesit görünümü (a) 2. dakika, (b) 3. dakika, (c) 5. dakika, (d) 23. dakika.....78

Şekil 4.34: Deney VII için deneysel bulgular ile sayısal model bulgularının farklı zamanlar için karşılaştırması (a) 2. dakika, (b) 3. dakika, (c) 5. dakika, (d) 23. dakika 79

Şekil 4.35: Deney VIII Modeli ile hesaplanmış olan farklı zamanlara ait yeraltı suyu dağılımı plan görünümü (a) 2. dakika, (b) 3. dakika, (c) 4. dakika, (d) 7.5. dakika.....80

Şekil 4.36: Deney VIII Modeli ile hesaplanmış olan farklı zamanlara ait yeraltı suyu dağılımı kesit görünümü (a) 2. dakika, (b) 3. dakika, (c) 4. dakika, (d) 7.5. dakika.....81

Şekil 4.37: Deney VIII için deneysel bulgular ile sayısal model bulgularının farklı zamanlar için karşılaştırması (a) 2. dakika, (b) 3. dakika, (c) 4. dakika, (d) 7.5. dakika 82

Şekil 4.38: Deney I için deneysel bulgular ve farklı S_y değerleri ile oluşturulan sayısal model bulgularının farklı zamanlar için karşılaştırması (a) 17. dakika, (b) 30. dakika, (c) 62. dakika, (d) 137. dakika 83

Şekil 4.39: Deney III için deneysel bulgular ve farklı S_y değerleri ile oluşturulan sayısal model bulgularının farklı zamanlar için karşılaştırması (a) 2. dakika, (b) 3. dakika, (c) 5. dakika, (d) 23. dakika.....83

Şekil 4.40: Kavramsal Model I ile hesaplanmış olan farklı zamanlara ait yeraltı suyu dağılımı plan görünümü (a) 10. gün, (b) 100. gün, (c) 500. gün, (d) 2500. gün 84

Şekil 4.41: Kavramsal Model I ile hesaplanmış olan farklı zamanlara ait yeraltı suyu dağılımı kesit görünümü (a) 10. gün, (b) 100. gün, (c) 500. gün, (d) 2500. gün.....85

Şekil 4.42: Kavramsal Model II ile hesaplanmış olan farklı zamanlara ait yeraltı suyu dağılımı plan görünümü (a) 10. gün, (b) 100. gün, (c) 500. gün, (d) 900. gün 86

Şekil 4.43: Kavramsal Model II ile hesaplanmış olan farklı zamanlara ait yeraltı suyu dağılımı kesit görünümü (a) 10. gün, (b) 100. gün, (c) 500. gün, (d) 900. gün.....86

Şekil 4.44: Kavramsal Model III ile hesaplanmış olan farklı zamanlara ait yeraltı suyu dağılımı plan görünümü (a) 10. gün, (b) 100. gün, (c) 500. gün, (d) 5000. gün 87

Şekil 4.45: Kavramsal Model III ile hesaplanmış olan farklı zamanlara ait yeraltı suyu dağılımı kesit görünümü (a) 10. gün, (b) 100. gün, (c) 500. gün, (d) 5000. gün.....88

Şekil 4.46: Kavramsal Model IV ile hesaplanmış olan farklı zamanlara ait yeraltı suyu dağılımı plan görünümü (a) 10. gün, (b) 100. gün, (c) 300. gün, (d) 450. gün 89

Şekil 4.47: Kavramsal Model IV ile hesaplanmış olan farklı zamanlara ait yeraltı suyu dağılımı kesit görünümü (a) 10. gün, (b) 100. gün, (c) 300. gün, (d) 450. gün.....89

Şekil 4.48: Kavramsal Model V ile hesaplanmış olan farklı zamanlara ait yeraltı suyu dağılımı plan görünümü (a) 10. gün, (b) 100. gün, (c) 500. gün, (d) 2500. gün 90

Şekil 4.49: Kavramsal Model V ile hesaplanmış olan farklı zamanlara ait yeraltı suyu dağılımı kesit görünümü (a) 10. gün, (b) 100. gün, (c) 500. gün, (d) 2500. gün.....91

Şekil 4.50: Kavramsal Model VI ile hesaplanmış olan farklı zamanlara ait yeraltı suyu dağılımı plan görünümü (a) 10. gün, (b) 100. gün, (c) 500. gün, (d) 900. gün 92

Şekil 4.51: Kavramsal Model VI ile hesaplanmış olan farklı zamanlara ait yeraltı suyu dağılımı kesit görünümü (a) 10. gün, (b) 100. gün, (c) 500. gün, (d) 900. gün.....92

Şekil 4.52: Kavramsal Model VII ile hesaplanmış olan farklı zamanlara ait yeraltı suyu dağılımı plan görünümü (a) 10. gün, (b) 100. gün, (c) 500. gün, (d) 5000. gün 93

Şekil 4.53: Kavramsal Model VII ile hesaplanmış olan farklı zamanlara ait yeraltı suyu dağılımı kesit görünümü (a) 10. gün, (b) 100. gün, (c) 500. gün, (d) 5000. gün.....94

Şekil 4.54: Kavramsal Model VIII ile hesaplanmış olan farklı zamanlara ait yeraltı suyu dağılımı plan görünümü (a) 10. gün, (b) 100. gün, (c) 300. gün, (d) 450. gün 95

Şekil 4.55: Kavramsal Model VIII ile hesaplanmış olan farklı zamanlara ait yeraltı suyu dağılımı kesit görünümü a) 10. gün b) 100. gün c) 300. gün d) 450. gün.....95

Şekil 4.56: Gölden akifer kıyısana kadar belirlenen lokasyonlar.....96

Şekil 4.57: Kavramsal Model I ve Kavramsal Model V'in farklı zamanlara ait piyezometre değerlerinin karşılaştırması (a) 10. gün, (b) 100. gün, (c) 500. gün, (d) 2500. gün 97

Şekil 4.58: Kavramsal Model II ve Kavramsal Model VI'nın farklı zamanlara ait piyezometre değerlerinin karşılaştırması (a) 10. gün, (b) 100. gün, (c) 500. gün, (d) 900. gün 98

Şekil 4.59: Kavramsal Model III ve Kavramsal Model VII'nin farklı zamanlara ait piyezometre değerlerinin karşılaştırması (a) 10. gün, (b) 100. gün, (c) 500. gün, (d) 5000. gün 99

Şekil 4.60: Kavramsal Model IV ve Kavramsal Model VIII'in farklı zamanlara ait piyezometre değerlerinin karşılaştırması (a) 10. gün, (b) 100. gün, (c) 300. gün, (d) 450. gün 100

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 3.1: Deneylere ait değerler 29

Tablo 3.2: MODFLOW'a tanımlanan akifer parametrelerinin değerleri.....36

Tablo 3.3: MODFLOW'da tanımlanan parametre değerleri 39

Tablo 3.4: Kavramsal modelde akifere ait parametre değerleri.....40

Tablo 3.5: Kavramsal model senaryoları.....44

SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

Simgeler **Açıklama**

A : Hücrenin Yatay veya Düşey Kesit Alanı.
A_s : Gölün Yüzey Alanı
b : Göl Yatağı Kalınlığı
c : İletimlilik
c_a : Akiferin İletimliliği
c_b : Göl Yatağı İletimliliği
e : Göl Yüzeyinde Meydana Gelen Buharlaşma Miktarı
h, h_a : Akiferdeki Yeraltı Suyu Yükü
h_l : Göl Su Seviyesi
K, K_a : Akiferin Hidrolik İletkenliği
K_b : Göl Yatağının Hidrolik İletkenliği
K_h : Akiferin Yatay Yöndeki Hidrolik İletkenliği
K_v : Akiferin Düşey Yöndeki Hidrolik İletkenliği
$K_{xx, yy, zz}$: Akiferin xx/yy/zz Yönündeki Hidrolik İletkenliği
l : Akımın Gerçekleştiği Mesafe
M : Göl-Akifer Hücre Arayüzü Sayısı
n : Porozite
N : Düğüm Noktalarındaki Yeraltı Suyu Yükü Değeri
p : Göle Giren Yağış Miktarı
q : Sızma Hızı
Q : Sızma Debisi
Q_{si} : Göle Nehirlerden Giren Su Miktarı
Q_{so} : Gölden Nehirlere Giden Su Miktarı
rnf : Göle Giren Yüzeysel Akış Miktarı
S_s : Akiferin Özgül Depolama Miktarı
sp : Göl-Akifer Arasındaki Net Sızma Miktarı
S_y : Özgül Verimlilik
t : Zaman
w : Gölden Çekilen Su Miktarı
W : Yeraltı Suyu Denkleminde Kaynak/Kuyu Terimi.
x : Kartezyen Koordinatlarda x Boyutu.

y : Kartezyen Koordinatlarda y Boyutu.

z : Kartezyen Koordinatlarda z Boyutu.

Kısaltmalar	**Açıklama**
cm	: Santimetre
dk	: Dakika
GHB	: General Head Boundary
km	: Kilometre
l	: Litre
LAK2	: Lake Package 2
LAK3	: Lake Package 3
LAK7	: Lake Package 7
LPF	: Layer Property Flow
m	: Metre
MODFLOW	: Modular Three-Dimensional Finite-Difference Ground-Water Flow Model
MT3D	: Modular Transport 3-Dimensional
PCG	: Preconditioned Conjugate Gradient
RCH	: Recharge
s	: Saniye
TIN	: Triangulated Irregular Network
YASS	: Yeraltı Suyu Seviyesi

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

GÖL-AKİFER ETKİLEŞİMLERİNİN SAYISAL ve DENEYSEL YÖNTEMLERLE İNCELENMESİ

İnci YALÇIN

İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman : Prof. Dr. Cevza Melek KAZEZYILMAZ ALHAN

Su kaynaklarının kısıtlı olduğu günümüzde yeraltı suları, en büyük tatlı su rezervlerinden biri durumundadır. İçme suyu, tarımsal sulama ve diğer sektörlerde kullanımı göz önüne alındığında yeraltı suyunun korunması ve geliştirilmesi gereken başlıca su kaynaklarından olduğu görülmektedir. Özellikle serbest yüzeyli akiferde bulunan yeraltı suyu, yüzey suyuyla sürekli etkileşim içerisindedir. Bu etkileşimin su temini ve su kalitesi üzerinde etkili olduğu bilinmekte olup yüzey suyu-yeraltı suyu etkileşimleri içeren sistemlerin hidrolojik davranışlarının incelenmesi ve anlaşılması gerekmektedir. Bu çalışmada yüzey suyu-yeraltı suyu etkileşiminin yoğun olarak gözlendiği göl-akifer sistemi deneysel ve sayısal yöntemlerle incelenmiştir. İlk olarak hidroloji deney düzeneğinde göl-akifer sistemi oluşturularak sabit yük sınır koşulu ve yağış olduğu durum için yeraltı suyu hareketi iki boyutlu olarak gözlemlenmiştir. Yapılan deneylerde zaman içerisinde akifer ve göl içerisinde su seviyesi değişimi ve farklı noktalarda piyezometrik yükseklikler okunarak ortaya konulmuştur. Sonra, yeraltı suyu akımını 3 boyutlu olarak modelleme imkanı sunan MODFLOW programı ile kurulu deney düzeneğinin sayısal modeli oluşturulmuştur. Sayısal ve deneysel yöntemlerden elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak MODFLOW ile kurulmuş olan modelin kalibrasyonu sağlanmıştır. Son olarak, MODFLOW ile büyük ölçekli kavramsal bir göl-akifer sistemi modeli oluşturularak yüzey suyu-yeraltı suyu etkileşiminin havza büyüklüğündeki bölgeler için hidrolojik davranışı ve farklı koşulların göl-akifer sistemine etkisi simülasyonlarla gösterilmiştir. Deneysel çalışmalar kendi içinde karşılaştırıldığında hidrolik yük farkının, yağışın ve göl yatağının göl-akifer etkileşimi üzerinde önemli etkiye sahip olduğu görülmüştür.

Bu etkilerin zamana ve konuma bağlı olduğu anlaşılmıştır. Göl çevresinde etkiler daha yoğun gözlemlenirken akifer sınırlarına doğru azalmaktadır. Deney sonuçları ile sayısal model sonuçları birbirine yakın çıkmıştır. Sonuç olarak MODFLOW'un hidroloji deney düzeneğini yeterli ölçüde temsil edebildiği görülmüştür. Sayısal modellemede en önemli parametrenin özgül verimlilik olduğu anlaşılmıştır. Sayısal modellemeler her durumda göl ve akiferin karşılıklı birbirini beslediğini göstermiştir. Kavramsal modellerde alan boyutunun etkisi ve özellikle göl yatağının etkileşimi yavaşlatma etkisi daha net bir şekilde görülmüştür.

Haziran 2021, 129 sayfa.

Anahtar kelimeler: Göl-Akifer Sistemi, Yüzey Suyu-Yeraltı Suyu Etkileşimi, MODFLOW, Hidroloji Deney Düzeneği

SUMMARY

M.Sc. THESIS

INVESTIGATION OF LAKE-AQUIFER INTERACTIONS with NUMERICAL and EXPERIMENTAL METHODS

İnci YALÇIN

Istanbul University-Cerrahpasa

Institute of Graduate Studies

Department of Civil Engineering

Supervisor : Prof. Dr. Cevza Melek KAZEZYILMAZ ALHAN

Groundwater is one of the largest freshwater reserves on earth and plays a crucial role within limited water resources. Considering its use in drinking water, agricultural irrigation and other sectors, protection and improvement of groundwater is utmost importance. Especially the groundwater in the uncofined aquifer is in constant interaction with the surface water. This interaction is particularly effective on water supply and water quality, and it is necessary to examine and understand the hydrological behavior of the systems subject to surface water-groundwater interactions. In this study, the lake-aquifer system, where the surface water-groundwater interaction is, was investigated by experimental and numerical methods. First, a lake-aquifer system was formed in the hydrology apparatus, and groundwater movement was observed in two dimensions under constant head boundary conditions and precipitation. During the experiments, the water level changes in the aquifer and the lake in time were recorded by reading the piezometric levels at different points. Then, a numerical model of the hydrology apparatus was generated with the MODFLOW program, which offers the opportunity to model the 3 dimensional groundwater flow. The model generated with MODFLOW was calibrated by comparing the numerical and experimental results. Finally, a large-scale conceptual lake-aquifer system model was generated with MODFLOW, and the hydrological behavior of surface water-groundwater interaction for wateshed scale regions and the effects of different conditions on the lake-aquifer system were shown with simulations. Based on the comparison among the experimental studies, it is observed that the hydraulic head difference, precipitation

and lake bed have a significant effect on the lake-aquifer interaction. These effects are time and space dependent. While the effects are observed more intense around the lake, they decrease towards the aquifer boundaries. The experimental and numerical model results are in good agreement. As a result, it is observed that MODFLOW can represent the hydrology apparatus fairly well. It is understood that the most important parameter in numerical modeling is specific yield. Numerical models have shown that in all cases, the lake discharges the aquifer or vice versa. In conceptual models, the effect of field size and especially the effect of the lake bed on slowdown the interaction become clear.

June 2021, 129 pages.

Keywords: Lake-Aquifer System, Surface-Ground Water Interactions, MODFLOW, Hydrology Apparatus

1. GİRİŞ

Yeraltı suyu, en önemli su kaynaklarımızdan olup hidrolojik döngü içerisinde önemli bir rol oynamaktadır (Kazezyılmaz-Alhan ve Medina, 2008). Akarsular, göller, rezervuarlar ve sulak alanlar olmak üzere tüm yüzey suları ile yeraltı suları, su miktarını ve kalitesini etkileyen sürekli bir dinamik etkileşim içindedir (Sophocleous, 2002). Su kaynaklarının yönetiminde yüzey suları ve yeraltı suları, birbirinden bağımsız kaynaklar olarak değerlendirilmektedir. Oysaki, yüzey ve yeraltı suları etkileşim içerisinde olduklarından su kaynaklarının gelişimi arttıkça, bu kaynaklardan birinin geliştirilmesinin diğerini önemli ölçüde etkilediği açıktır (Winter ve diğ., 1999). Bu nedenle günümüzde yeraltı suyu ve yüzey suyunun tek bir kaynak olarak ele alınmasının önemi artmaktadır (Ala-aho ve diğ., 2015). Bu durum, iki su kaynağı arasındaki etkileşimin fiziksel mekanizmasının anlaşılır hale gelmesini gerektirmektedir. Ayrıca bu etkileşimlerin simülasyonu için güvenilir yöntemlere ihtiyaç duyulmaktadır (El-Zehairy ve diğ., 2017).

Her tip yüzey suyunun yeraltı suyu ile etkileşimi farklı davranış göstermektedir. En karmaşık etkileşime sahip olanlardan biri doğal ve yapay göllerdir. Göl ve akifer arasındaki su geçişi farklı biçimlerde olabilir. Göl yatağından göl çanağına doğru yeraltı suyu deşarjı, göl çanağından akifere doğru yeraltı suyu reşarjı veya her ikisi birlikte görülebilir. Yüzey suyu ile yeraltı suyu arasında genellikle akış mevcuttur, ancak etkileşimleri gözlemlemek ve ölçmek zordur (Winter ve diğ., 1999). Etkileşimi analiz etmenin yöntemlerinden biri göl yatağındaki sızmayı ölçmektir. Sızmayı ölçmek için literatürde yapılan çalışmalarda sızma ölçer (Belanger, 1985) ve kimyasal izleyiciler kulanılmıştır (Corbett ve diğ., 1999; Kolak ve diğ., 1999). Ancak bu yöntemler heterojen yapıya sahip akiferlerde yetersiz kalmakta ve mekansal çalışmalarda uygulaması zorlaşmaktadır. Göl-yeraltı suyu etkileşimlerinin fiziksel mekanizmasını anlayabilmek için, gölün ve onu çevreleyen zeminin hidrojeolojik koşullarını ve karakterizasyonunu dikkate alarak entegre hidrolik ve hidrolojik modellerin oluşturulmasına ihtiyaç vardır. Bu modellerin önemli bir bölümü MODFLOW programı ve bu programa entegre edilen paket programlarla gerçekleştirilmektedir. Bu program ile birçok sayısal çalışma yapılmıştır. Bu çalışmaların çoğu su bütçesi hesabı (Harvey ve diğ., 1997a; Corbett ve diğ., 1997; Shaw ve Prepas, 1990b; Krabbenhoft ve diğ., 1990a; Council, 1997) olmakla birlikte fiziksel parametrelerin etkileşime etkisini araştıran çalışmalar (Winter, 1976; Winter, 1978;

Winter, 1983; Winter ve Pfannkuch, 1984b; Cheng ve Anderson, 1994; Nield ve diğ., 1994; Genereux ve Bandopadhyay, 2000; El-Zehairy ve diğ., 2017) da mevcuttur. Fiziksel dinamiklerin etkileşime etkisi analiz edilirken göl yatağı sedimenti, şekli ve eğimi, göl su seviyesi gibi göl parametreleri ve akifer hidrolik iletkenliği, anizotropi oranı, homojenliği, yeraltı suyu seviyesi gibi akifer parametreleri ve bunların dışında yağış, buharlaşma gibi faktörlerin etkileri üzerinde durulmuştur. MODFLOW ile yapılan bu çalışmalarda göl hidroliğinin simülasyonu için Yüksek Hidrolik İletkenlik (High K Method), Sabit Su Yüksekliği (Constant Head) veya Göl Paketi (Lake Package) gibi farklı yaklaşımlar kullanılmıştır. Ancak Yüksek Hidrolik İletkenlik ve Sabit Su Yüksekliği yöntemleri yetersiz kalmaktadır. Etkileşim analizinde en önemli etken sızmadır ve bu yöntemler sızmadan ve göl bütçesi hesabından bağımsız hesap yaparlar. Ayrıca bu yöntemler göl dibinde sediment birikmesi sonucunda meydana gelen, karakteristikleri akiferden farklı bir göl yatağının varlığını dikkate almadan modelleme yapılmaktadır. Bu nedenle tüm bu hususları dikkate alarak modelleme yapılabilen MODFLOW'un göl paketi ile yapılan analizlerin güvenilirliği daha fazladır.

Yeraltı suyunun davranışını gözlemleyebilmek üzere deneysel çalışmalar da büyük önem taşımaktadır. Saha çalışması, deneysel çalışmaya kıyasla verilerin elde edilmesi ve çalışma şartlarının zorluğu açısından her zaman elverişli olmamaktadır. Yeraltı suyunu gözlemlemek amaçlı yapılan deneysel çalışmalara literatürde az rastlanmaktadır. Mevcut çalışmaların çoğu nehir-akifer sistemi üzerine kuruludur (Boyraz, 2017). Göl-akifer etkileşimi üzerine çalışmalar çok kısıtlıdır (Li ve diğ., 2001).

Bu tez çalışmasında yukarıda bahsedilen konulara katkıda bulunmak amacıyla göl-akifer sisteminde oluşan yüzey suyu-yeraltı suyu etkileşimleri ve farklı parametrelerin bu etkileşimlere etkileri sayısal ve deneysel yöntemler ile araştırılmıştır. Özellikle göl yatağı durumunu belirleyen hidrolik iletkenlik ve göl yatağı kalınlığı, göl suyu ve yeraltı suyu arasındaki hidrolik yük farkı, yağış parametrelerinin etkilerini gözlemlemek üzere farklı senaryolar oluşturulmuştur. Bu kapsamda ilk olarak fiziksel mekanizmaların göl-akifer etkileşimleri üzerindeki etkilerini gözlemlemek üzere Hidroloji Deney Düzeneği ile deneyler yapılmıştır. Bu deney düzeneği yağış, yüzeysel akış, nehir akışı gibi farklı hidrolojik koşulların yeraltı suyu üzerindeki dağılımına etkisini gözlemlemeye olanak sağlamaktadır. Deneylerin yapılabilmesi için uygun şekilde cihazın düzenlenmesi, zeminin ve materyallerin seçimi

yapılmıştır. Göl-akifer etkileşiminin fiziksel modelini oluşturabilmek için deney düzeneğinde serbest yüzeyli akiferin ortasına yarım küre şeklinde göl çanağı oluşturulmuş ve farklı koşullar altında göl içindeki yüzey suyu ve akiferdeki yeraltı su seviyesi değişimi farklı noktalarda piyezometrik ölçümler yapılarak gözlemlenmiştir. Deney düzeneğinde, göl yatağının olmadığı ve olduğu durumlar için deneyler tekrar edilmiştir. Akifer ve göl arasındaki yük farkının oluşturacağı etkileri gözlemlemek için akiferin beslediği ve beslendiği durumlarda deneyler yapılmıştır. Ayrıca, deneyler yağışın etkisini görmek üzere yağmurlama ile birlikte tekrar edilmiştir.

Yapılan deneylerin sayısal modelleri MODFLOW programında LAK3 paketi kullanılarak oluşturulmuştur. Deney sonuçları ile sayısal modelleme sonuçları karşılaştırılmış ve tartışılmıştır. Ayrıca, deney sonuçlarına göre MODFLOW ile kurulmuş olan modelin kalibrasyonu yapılmıştır. İlaveten, göl yatağının olduğu ve olmadığı deney sonuçları kendi içlerinde karşılaştırılarak değerlendirilmiştir.

Son olarak MODFLOW ile göl-akifer sistemi içeren büyük ölçekli kavramsal modeller oluşturulmuştur. Oluşturulan modeller ile yüzey suyu-yeraltı suyu etkileşiminin havza büyüklüğündeki bölgelerde hidrolojik davranışı ve farklı koşullar altında göl-akifer sisteminin davranışı incelenmiştir. Bu kapsamda, havza sınır koşulunun sabit yük olduğu durum ve havza üzerinde düşen yağış altında göl su seviyesinin yeraltı su seviyesine göre yukarıda ya da aşağıda kaldığı zaman oluşan yeraltı suyunun beslenme ya da besleme durumu incelenmiştir.

2. GENEL KISIMLAR

Tezin bu bölümünde yeraltı suyuyla ilgili olarak temel bilgiler verilmiş olup çalışmanın amacını oluşturan yüzey suyu ile bağlantısı ve etkileşimi açıklanmıştır. Göl-akifer etkileşimleri üzerinde etkisi olan parametreler ile ilgili literatürde yapılan çalışmalara yer verilmiştir.

2.1.YERALTI SUYU

Yeraltı suları hidrolojik döngünün önemli bir parçasını oluşturmaktadır. Yeraltı suyu, toprakta akifer adı verilen ve su taşıyan bölgelerde bulunur ve suyun iletimi için kanal, depolanması için rezervuar olarak işlev görür. Jeolojik tabaka su muhtevası bakımından doymuş ve doymamış bölge olarak sınıflandırılır. Yüzey suyu veya yağışla gelen su yeryüzünden sızarak önce doymamış bölgeye gelir. Bu bölgede zemin boşlukları hava ve su ile doludur. Yerçekimi etkisiyle aşağı doğru hareketine devam eden su, doymuş bölgeye erişir. Bu bölge yeraltı suyu bölgesi olarak adlandırılır. Burada hidrostatik basınç altında tüm boşluklar su ile doludur. Doymuş bölgenin üst yüzeyine yeraltı suyu yüzeyi denir; bu yüzey boyunca boşluklardaki suyun basıncı atmosfer basıncına eşittir. Doygun bölge, alttaki geçirimsiz katmana kadar uzanır. Doymuş bölgede su, hidrolik koşullar tarafından belirlenen bir yönde hareket eder. Yeraltı sularının akışı yerüstü sularından farklı olup, piyezometrik yüzeyin eğimi doğrultusunda meydana gelmektedir. Yeraltı sularının akış hızı oldukça düşük olup, laminar akım koşulunu sağlamaktadır. Yeraltı suyunun bir noktadan diğerine ulaşması, geçtiği ortamın permeabilitesine bağlı olarak uzun zaman alabilmektedir. Yeraltı suyunun doğal boşalımı nehir, göl ve okyanus gibi yüzey su kütlelerine doğru akarak gerçekleşir. Yüzeye yakın bölgede buunan yeraltı suyu, toprağın içinden buharlaşma ve vejetasyondan terleme yoluyla doğrudan atmosfere dönebilir. Kuyulardan pompalama, yeraltı suyunun ana yapay boşaltımını oluşturur. Yeraltı suyu miktarı ve akışı, yeraltı suyu havzasının jeolojik, topoğrafik ve hidrolojik karakteristiklerine göre belirlenir (Boyraz, 2010; Freeze ve Cherry, 1979; Todd ve Mays, 2005; Viessman ve Lewis, 2012; Bayazıt, 2013; Gültekin, 2015).

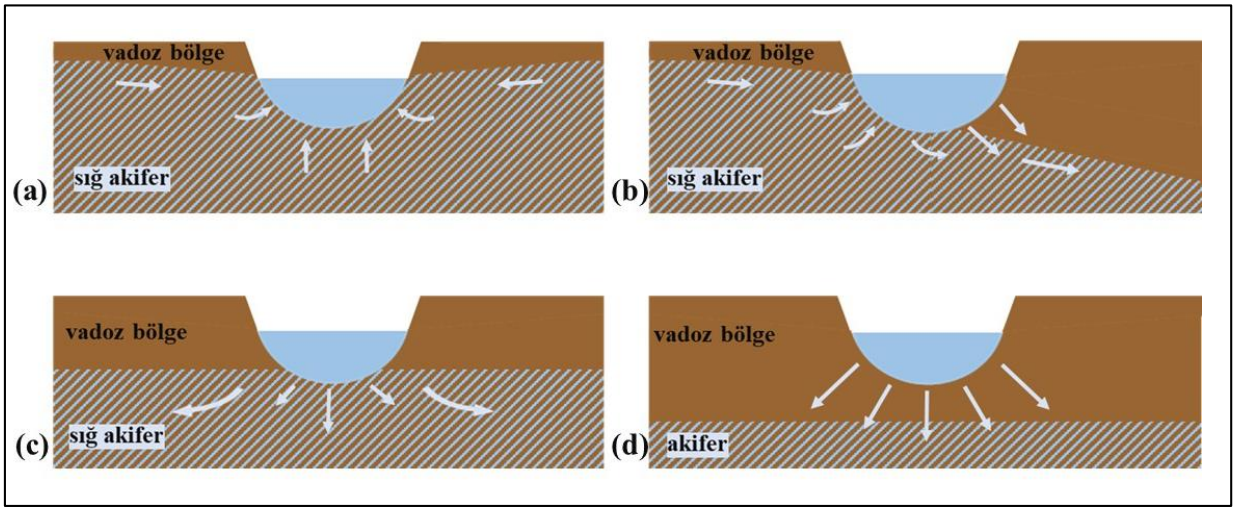
Yeraltı suyunun görüldüğü jeolojik oluşum akiferlerdir. Akifer, gözenekli olmaları nedeniyle su taşıyabilen ve taşıdığı suyun önemli bir kısmını kuyu, galeri gibi yapılarla alınabilecek şekilde iletebilecek düzeyde hidrolik iletkenliğe sahip olan geçirimli jeolojik birimlerdir. Çakıl, kum, çakıltaşı, kumtaşı gibi jeolojik malzemeler akifer özelliği gösterirler. Akiferler, yüzey suyunun sızarak ulaştığı bölgeler için serbest yüzeyli ve iki geçirimsiz tabaka arasında kalan

bölgeler için basınçlı olarak sınıflandırılır. Sızıntılı akifer ise iki türün bir kombinasyonunu temsil eder (Todd ve Mays, 2005; Gültekin, 2015).

Serbest yüzeyli akifer, üstte yeraltı suyu tablası, tabanında geçirimsiz bir tabaka ile sınırlandırılan gözenekli ortamı ifade eder. Doğrudan üzerlerindeki yüzeyde yer alan sulardan ve yağışlardan beslenirler. Üstten herhangi bir geçirimsiz birimin bulunmaması nedeniyle, su tablasındaki basınç atmosferik basınca eşittir. Bu nedenle yeraltı suyu akımı serbest yüzeyli açık kanal akımına benzer. Basınçlı akifer, üstten ve alttan geçirimsiz tabaka ile sınırlandırılmıştır. Burada yeraltı suyu atmosferik basınçtan daha büyük basınç altında bulunmaktadır. Bu bakımdan basınçlı akiferlerdeki akım, borulardaki basınçlı akıma benzer. Akiferdeki suyun hidrostatik basınç seviyesi, basınçlı akiferin piyezometrik yüzeyidir. Basınçlı akifer içine giren bir kuyudaki su seviyesi, bu noktada piyezometrik yüzeyin yüksekliğini tanımlar. Bu kuyulardaki statik su yüzeyine piyezometre yüzeyi denir. Piyezometrik yüzey üst geçirimsiz tabakanın altına düştüğünde, basınçlı akifer haline gelir. Basınçlı akiferler, gözenekli ortamın yeryüzüne açıldığı (yüzeylendiği) alandan beslenirler. Basınçlı akiferlere nüfuz eden kuyulardaki su yükselmeleri ve düşmeleri, depolama hacimlerindeki değişikliklerden ziyade öncelikle basınç değişikliklerinden kaynaklanır. Akiferleri üstten ve alttan sınırlayan birimler her zaman geçirimsiz olmayabilir. Akitard türü, yarı geçirimli malzemelerden oluşan birimlerin akiferleri sınırladığı durumlarda, akiferler alttan veya üstten belirli oranlarda su kaybederler veya kazanırlar. Bu tür akiferler sızıntılı akifer olarak adlandırılırlar (Freeze ve Cherry, 1979; Gültekin, 2015; Delleur, 2007).

2.2.GÖL-YERALTI SUYU ETKİLEŞİMLERİ

Yeraltı suları, yağışlar ve yüzey sularının yeraltına gözenekli ortamlardan yayılı olarak sızması veya kırık-çatlak, boşluk, mağara gibi jeolojik yapılardan doygun bölgeye ulaşmasıyla beslenirler. Yeraltı suları, yüzey altındaki döngülerini tamamladıktan sonra kaynaklar, sulak alanlar, obruk, vs. gibi yapılar ile tekrar yüzey suyuna karışırlar. Yüzey suyu ve yeraltı suyu birbirine bağlıdır. Bir bileşendeki değişikliklerin diğeri üzerinde geniş kapsamlı etkileri olmaktadır. Bu nedenle havza yönetimi, taşkın kontrolü ve su kaynaklarının gelişimi açısından yapılan çalışmalarda yeraltı-yüzey suyu etkileşimlerinin rolü önemlidir (Freeze ve Cherry, 1979; Viesman ve Lewis, 2012; ;Todd ve Mays, 2005; Boyraz, 2010). Yeraltı suları yüzey suları ile dört farklı şekilde beslenim-boşalım (recharge-discharge) ilişkisine sahiptir (Şekil 2.1).



Şekil 2.1: (a) Besleyen yeraltı suyu, (b) Aynı anda hem besleyen hem beslenen yeraltı suyu, (c) Doğrudan beslenen yeraltı suyu, (d) Süzülme ile beslenen yeraltı suyu (Gültekin, 2015).

Bu temel etkileşimler tüm yüzey suları için benzer olsa da, etkileşimler çeşitli şekillerde farklılık gösterir. Doğal göllerin su seviyesi, akarsuların su seviyesi kadar hızlı değişmez; bu nedenle göl kenarında oluşan depolama alanları akarsulardakinden daha az önemlidir. Buharlaşmanın genellikle göldeki su seviyeleri üzerinde akarsudaki su seviyelerine göre daha büyük bir etkisi vardır, çünkü göllerin yüzey alanı genellikle akarsularınkinden daha büyük ve daha az gölgelidir ve göl suyu bir akarsuyun ulaştığı kadar kolay bir şekilde doldurulamamaktadır. Göller, peyzajın birçok farklı yerinde bulunabilir ve bunlarla ilişkili karmaşık yeraltı suyu akış sistemlerine sahip olabilir. Ayrıca, göl çökeltileri genellikle akarsulardan daha büyük hacimde organik birikintilere sahiptir. Bu zayıf geçirgen organik yataklar, su ve çözünen maddelerin sızıntı ve biyojeokimyasal değişimlerinin dağılımını akarsulardan daha fazla etkileyebilir (Winter ve diğ., 1999; Tartakovsky ve Cushman, 2016; Akhbari, 2011).

2.3.GÖL-AKİFER ETKİLEŞİMİ ÜZERİNE YAPILAN ÇALIŞMALAR

Göl-akifer etkileşimleri üzerine yapılan çalışmaların birçoğu saha çalışmalarından oluşmaktadır. İlaveten, uzun yıllara ait verilerin bulunduğu bölgelerin göl-yeraltı suyu bütçesi, sayısal modeller ile hesaplanarak bölge analizi ve su yönetimine katkı sağlamak amaçlanmıştır. Ancak karmaşık bir sistem olması nedeniyle yeraltı suyunun yüzey suyu ile olan ilişkisinin hidrolik açıdan detaylı analiz edilmesi gerekmektedir. Burada en önemlisi doğal ve yapay faktörlerin bu etkileşim üzerindeki etkisini belirlemektir. Doğal faktörler yağmur, buharlaşma,

toprak tipi iken yapay faktörler göl düzenleme, kuyu açılarak yeraltı suyundan faydalanma gibi durumlardır. Su kaynakları geliştirme çalışmaları her geçen gün önem kazandıkça bu parametrelerin etkilerinin anlaşılmasına daha çok ihtiyaç duyulmaktadır. Literatürde kavramsal ve deneysel çalışmalara, saha çalışmalarına kıyasla daha az odaklanılmıştır. Bu tez kapsamında daha önce yapılan çalışmalar kaynak alınarak farklı yaklaşımlar geliştirilmiştir.

2.3.1. Kavramsal Çalışmalar

Göl ve akifer etkileşimlerinin incelenmesinde sayısal yaklaşımlar içeren ilk çalışmalar Winter (1976) tarafından yapılmıştır. Çalışmada iki boyutlu bir model kullanmıştır. Çalışmaya göre göl tabanının altındaki akışın sürekliliği, göl ve yeraltı suyu etkileşimini kontrol eden faktördür. Bu sürekliliği belirleyen en önemli faktör minimum hidrolik potansiyel noktası olan durgun noktadır. Her ne kadar yapılan bu ilk çalışma iki boyutlu model içerse de tipik bir göl çanağı ideal olarak yarım küre şeklinde olduğundan göl-akifer sistemi için üç boyutlu modellerin oluşturulması gerekmektedir. İki boyutlu modeller daha çok nehir-yeraltı suyu etkileşimini anlamak için elverişlidir. Dolayısıyla, bir sonraki çalışmasında Winter (1978) göl çevresindeki yeraltı suyu akımını üç boyutlu modellemiştir. Bu çalışmasında, ilk aşamada homojen ve anizotropik yeraltı suyu sisteminin detaylı analizini yapmıştır. İkinci aşamada akiferde belli bir alanın iletkenliğini yükseltmiş, bu alanın boyutlarını ve sistem içindeki konumunu- değiştirerek boyut-konum faktörlerinin etkisini incelemiştir. Durgun alan bölgesinin uzunluğunun gölün geometrisi tarafından kontrol edildiği, yüksek hidrolik iletkenliğe sahip akiferin konumu ve boyutunda yapılan değişikliğin göl içine ve dışına sızma üzerinde önemli etkilere sahip olduğu görülmüştür. Bir diğer çalışmasında Winter (1983) değişken doygunluktaki akifer ile göl etkileşimini incelemiştir. Buna göre sızma, doymamış bölgenin kalınlığına bağlıdır. Bu durumun yüzey suyu üzerinde etkisi bulunmaktadır.

Winter ve Pfannkuch (1984-b) anizotropinin ve sistem geometrisinin göl yatağındaki sızmaya etkisini araştırmıştır. Farklı geometrilere ve farklı anizotropi katsayılarına sahip göl-yeraltı suyu sistemleri modellenmiştir. Çalışma, anizotropi oranı düştükçe gölden akifere sızmanın azaldığını, yeraltı suyu akış sisteminin derinliğinin arttığını göstermiştir.

Cheng ve Anderson (1994) göl-akifer sisteminde gölün havza içindeki pozisyonunun, etkileşime etkisini araştırmıştır. Bir havzanın üst, orta ve alt kısımlarında yer alan üç göl çevresindeki yeraltı suyu akışının MODFLOW ile simülasyonu yapılmıştır. Modelde yağış,

buharlaşma ve göldeki dalgalanmaların yeraltı suyuna etkileri araştırılmıştır. Sonuçlar, göl pozisyonunun yeraltı suyu bütçesi açısından önemli olduğunu göstermiştir. Yeraltı suyunun alt bölgede yer alan göl ile su alışverişinin yukarı bölgede yer alan göllere göre daha fazla olduğu görülmüştür.

Genereux ve Bandopadhyay (2001) etkileşimi etkileyen parametreler üzerine kapsamlı bir analiz yapmıştır. Göl karakteristikleri (derinlik, yatak eğimi, düşük iletkenliğe sahip sediment, bölgesel yeraltı suyu eğimine göre asimetrik göl yatağının yönelimi) ve akifer karakteristikleri (anizotropi ve heterojenlik) değiştirilerek farklı senaryolar oluşturulmuştur. MODFLOW ile geliştirilen modellerde göl için sabit yüzey suyu yüksekliği tanımlanmıştır. Gölden uzaklaştıkça sızma hızında düşme görülmüştür. Sızma dağılımında akifer ve göl yatağı faktörlerinin aynı ölçüde öneme sahip olduğu görülürken göl derinliğinin sızma hızında ya da dağılımında önemli bir etkiye sahip olmadığı anlaşılmıştır.

2.3.2. Deneysel Çalışmalar

Li ve diğ. (2001) sızma yüzeyi eğiminin etkisini analiz etmek ve yeraltı suyu ve kirleticilerin göle deşarjını daha iyi anlamak için laboratuvarda bir deney gerçekleştirmiş ve deney sonuçlarını sayısal modelleme sonuçları ile karşılaştırmıştır. Beş farklı sızma yüzeyi eğimi için deneyler gerçekleştirilmiştir. Sızma yüzeyindeki klorür konsantrasyonu ve yeraltı suyu sızma hızı dağılımı için MODFLOW ve MT3D ile simülasyon yapılmıştır. Göl simülasyonu için Yüksek İletkenlik Tekniği olarak adlandırılan ve gölü temsil edecek hücrelere çok yüksek iletkenlik değeri atayarak oluşturulan model kullanılmıştır. Sonuçlara göre sızma yüzeyinin eğimi, sızma hızının büyüklüğü ve dağılımında büyük etkiye sahiptir. Sızma yüzeyi eğimi arttıkça, maksimum hız süratle düşmüş ve hız değişimi daha fazla olmuştur.

2.3.3. Saha Çalışmaları

Council (1997), Wisconsin'de bir maden işletmesinden kaynaklanan yeraltı suyu çekilmesinin sonucunda dört göldeki su seviyesindeki düşüşü tahmin etmek için, MODFLOW ile entegre LAK2 paketini kullanmıştır. Kararlı durumda yeraltı suyu ve göl suyu seviyelerinin gözlemlenen değerler ile uyumlu olduğu görülmüştür. Modelin kararlı hale ulaşması için gerekli olan zamanı hesaplamak amacıyla sistem kararsız durumda çalıştırılmıştır. Sonuçlara göre sistem 6 sene sonra kararlı hale ulaşmaktadır. Ayrıca maden faaliyetleri durdurulduktan 6 sene sonra sistemin eski haline döneceği sonucuna varılmıştır.

El-Zehairy ve diğerleri (2017) yapay göllerin yeraltı suyuyla etkileşimini incelemiştir. Çalışma için seçilen Turawa Lake, bir nehir üzerine akış düzenlemesi, elektrik enerjisi üretimi ve turistik amaçlı inşa edilmiştir. Bu özellikleriyle literatürde yapılan en kompleks modelleme çalışmaları arasında yer almıştır. MODFLOW'da LAK7 paketi ile model kurulmuştur. Göl suyu dalgalanmasının, yeraltı suyu üzerindeki etkisini karakterize etmek ve sınır genişlemesinin etkisini analiz etmek amaçlanmıştır. Yapay gölde, doğal göle kıyasla akifere sızma daha fazla olmuştur. Bu etkileşim, göl yatak iletkenliğine, yatak şekline, göle giren ve çıkan arasındaki dengeye, yağış ve buharlaşma etkilerine bağlıdır. Su seviyesindeki büyük ve hızlı değişimler, etkileşim üzerinde etkilidir.

Gong ve diğerleri (2015) kapalı bir havzada göl-yeraltı suyu etkileşiminin iklim değişikliğine tepki süresini ve etkin parametreleri belirleme üzerine çalışmışlardır. Tepki süresi, göl davranışını anlama ve karakterize etmeye yardımcı olur. Amerika'daki kır gölleri için kavramsal model MODFLOW-2005 ve LAK7 ile oluşturulmuştur. Hidrojeolojik sistemde önemli olan parametrelerin (hidrolik iletkenlik, göl yatağındaki sızma (leakance) ve reşarj (recharge) değeri tepki süresine etkilerini anlamak için farklı modeller kurulmuştur. Reşarj artışında gölün tepki süresindeki gecikme, yeraltı suyundakinden daha uzundur. Dengeye en hızlı ulaşılan yer göl kıyısı ile kıyıya en uzak nokta arasındaki noktada meydana gelmiştir. Akifer ve göl yatağı iletkenliği eşit olarak arttığında sistemin tepki süresi azalmıştır. Göl yatağı iletkenliği azaldıkça gölün tepki süresi artmıştır. Gölün yeraltı suyu üzerindeki etkisi küçük ve yereldir. Göl ve yeraltı suyu ortak bir sistem olmasına rağmen tepki süreleri farklıdır. Yeraltı suyundaki düzelme göle göre daha hızlı olmuştur.

2.4.HİDROLOJİ DENEY DÜZENEĞİ

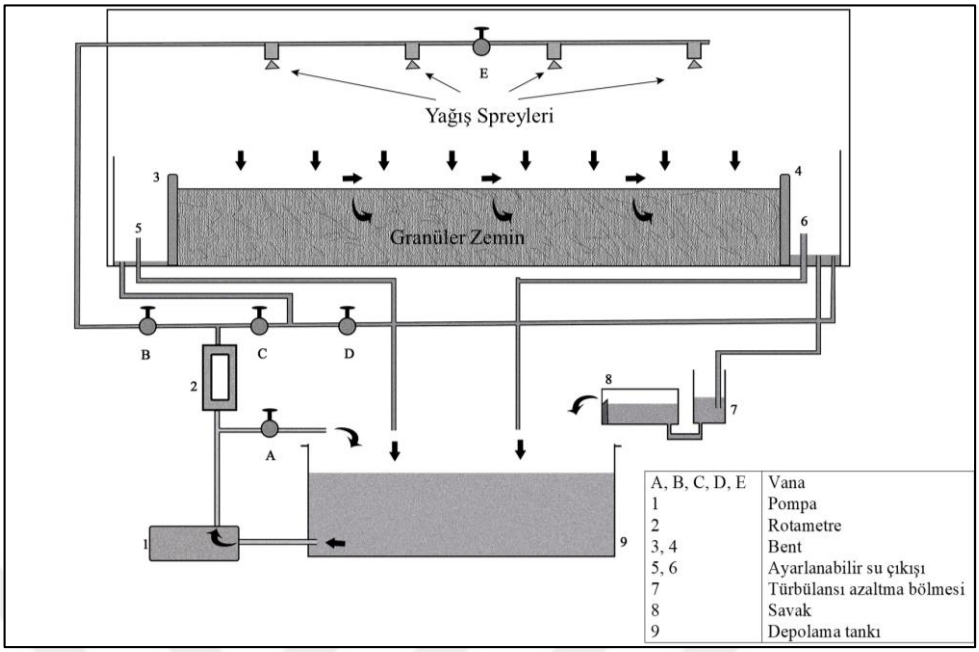
Göl-akifer sisteminde oluşan yüzey suyu-yeraltı suyu etkileşimleri laboratuvar ortamında Hidroloji Deney Düzeneği kullanılarak gözlemlenmiştir (Şekil 2.2). Cihaz üstten yağış verilebilen bir kum haznesi (havza alanı) ve altta bir su haznesinden oluşmaktadır. Yüzey suyu, yeraltı suyu, yağış, yüzeysel akış gibi hidrolojik koşulları incelemeye imkan sağlamaktadır.



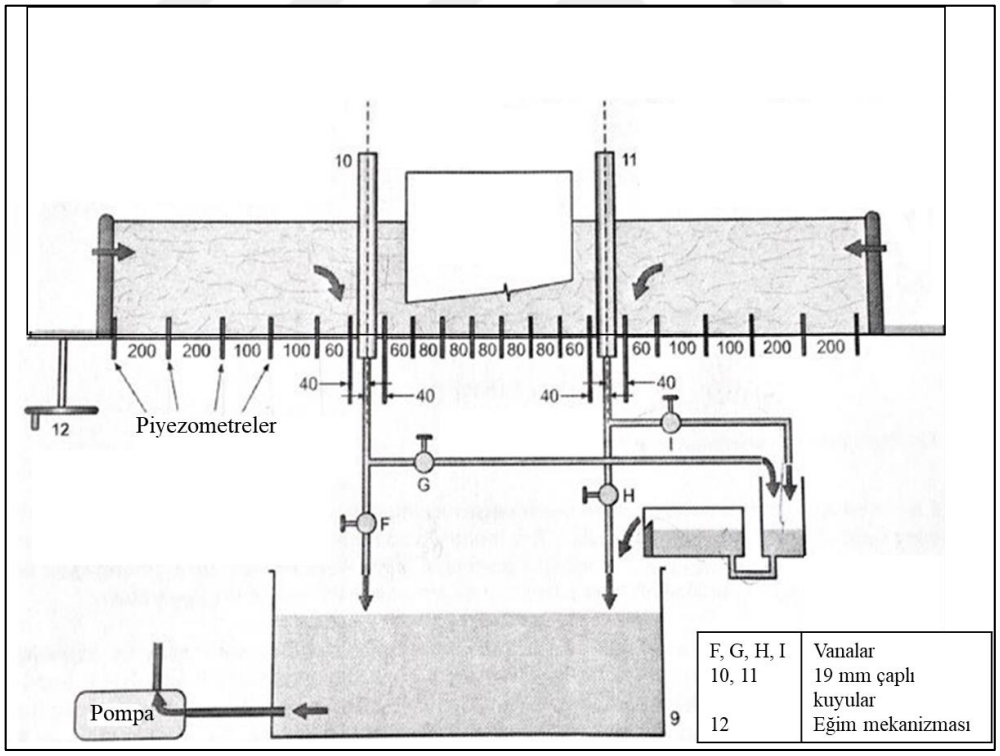
Şekil 2.2: Hidroloji Deney Düzeneği.

Hidroloji Deney Düzeneğinin özellikleri şu şekilde özetlenebilir:

- 2x1 m ölçülerinde, 0.18 m yüksekliğinde, eğimi ayarlanabilen, paslanmaz çelik bir tank (havza alanı) bulunur. Bu tank, deneye uygun zemin ile doldurulur.
- Çelik tankın altında, 220 lt kapasiteye sahip su tankı, üstte havza üzerinde yağış sağlayan 8 adet yağış spreyi bulunur (Şekil 2.3).
- Havza alanının her iki ucunda, su girişi ve/veya çıkışı için su giriş delikleri olan savak plakaları ile havzadan ayrılmış uç bölmeler vardır.
- Havza alanı üstten yağış ile ve/veya tankın uçlarından gelen yeraltı suyu akışı ile beslenebilir.
- Yeraltı suyu yüksekliğini ölçmek için havza alanının merkez hattı boyunca sıra halinde 20 adet piyezometre bulunur (Şekil 2.4).
- Havza alanının ortasında kuyu deneyleri için iki adet kuyu bulunmaktadır.
- Hazneden su alıp havza alanı uçlarına ve yağış borularına ileten bir pompa bulunur.
- Havza çıkışındaki veya kuyulardaki akışı ölçmek için dikdörtgen bir savak bulunur.



Şekil 2.3: Hidroloji Deney Düzeneği Eskizi (Hydrology Apparatus User Guide).



Şekil 2.4: Hidroloji Deney Düzeneği'nde kuyular ve piyezometreler (Hydrology Apparatus User Guide).

2.5.MODFLOW Programı

Amerika Birleşik Devletleri Jeolojik Araştırma Dairesi (United States Geological Survey) (USGS) tarafından geliştirilen MODFLOW programı, üç boyutlu yeraltı suyu denklemini sonlu fark yöntemi ile sayısal olarak çözmektedir (Harbaugh ve diğ., 2000). Program, farklı sınır koşulları ve çok çeşitli girdi seçenekleri ile kararlı ve kararsız yeraltı suyu akımının simülasyonunu yapabilmektedir (Creer, 2019). Program ilk olarak bir yeraltı suyu akış modeli olarak tasarlanmıştır. Daha sonra kapsamı, kirlilik taşınımı ve parametre tahmini gibi analizleri yapabilecek alt modüller dahil edilerek genişletilmiştir (Harbough, 2005). Programdaki temel modüller Yeraltı Suyu Akımı, Gözlem ve Yüzey Suyu Öteleme modülleridir (Winston, 2018).

2.5.1. Yeraltı Suyu Akımı

Yeraltı suyu akımı denkleminin ve bu denklemle entegre çalışan ilgili denklemlerin çözümünü sağlayan kodlar bu modülde yer almaktadır. Modül farklı aşamalara ve bu aşamalar için geliştirilen paketlere ayrılmaktadır. Her bir paket, hidrolojik sistemdeki bir özellik ile ilgilidir (Mylopoulos ve diğ., 2007). Bu sürecin aşamaları:

- Temel Paket (Basic Package)
- Akım Paketleri (Flow Packages)
- Sınır Koşulu Paketleri (Boundary Condition Packages)
- Çözücü (Solver)
- Çıktı Kontrolü (Output Control)

Temel Paket: Programın işleyişi ve kontrolü için gereklidir. Bu paket akım tipi, simülasyon zaman aralığı, yeraltı suyu başlangıç seviyesi gibi girdileri yönetir. Bu girdiler, yeraltı suyu akımı sürecinde ve diğer süreçlerde kullanılır (Harbough, 2005).

Akım Paketleri: Akifer hücrelerinin aralarındaki akımın simülasyonunu yapan paketleridir. Hidrolik iletkenlik veya iletimlilik gibi akifer özellikleri burada tanımlanır. Bu çalışmada yeraltı suyu akımı hesabı için Katman Özellikli Akım (Layer Property Flow) (LPF) Paketi seçilmiştir. Bu paket ile her bir katman için yatay ve düşey yönler için ayrı hidrolik iletkenlik değerleri tanımlanır. MODFLOW, iletkenlik değerleri ve katman geometrisini kullanarak her hücre için iletimlilik (conductance) parametresini hesaplar. Katman, basınçlı veya serbest yüzeyli akifer olarak tanımlanabilir

(http://gmsdocs.aquaveo.com/GMS_User_Manual_v10.2.pdf). Ayrıca bu paket, kuruyan hücrelerin yeniden ıslanmasına izin vermektedir. Islak/kuru değeri, ıslanmanın gerçekleşeceği hücre tarafına göre atanır. Hücrenin alt tarafından ıslanması isteniyorsa -1, yan taraflardan ıslanması isteniyorsa 0 ve üst taraftan ıslanması isteniyorsa 1 değeri yazılır.

Sınır Koşulu Paketleri: Problemin tanımlı olduğu fiziksel alan koşullarının simülasyonunu yapabilmek için özel sınır koşulu paketleri kullanılmaktadır. Bunlar sabit veya zamanla değişen yeraltı suyu seviyeleri, yağış, kuyu, boşaltım, nehir, rezervuar, buharlaşma, akarsu akım ötelemesi ve göl paketleridir. Bu çalışma kapsamında Genel Yük Koşulu (General Head Boundary) (GHB), Beslenme (Recharge) (RCH) ve Göl (Lake) (LAK3) paketleri kullanılmıştır (http://gmsdocs.aquaveo.com/GMS_User_Manual_v10.2.pdf).

GHB paketi, yeraltı suyu modeline, sistem tarafından etkilenmeyen farklı bir su kaynağı eklemek için kullanılır. Pakete sabit bir yeraltı suyu seviyesi ve iletimlilik (conductance) değerleri tanımlanır. RCH paketi, yağmur suyunun sızma yolu ile akifere dolmasını sağlamak için kullanılır. Bu değer yeraltı suyu sistemine giren suyu temsil etmektedir. LAK3 paketi göl-akifer sistemini, göl yatağındaki sızma miktarına dayanan su bütçesi hesabı ile analiz eder. Paket, su seviyesindeki düşüşü ve yükselişi dikkate alır. Buna göre hücre kuruyabilir ve yeniden ıslanabilir. Bu pakette başlangıç, en düşük ve en yüksek göl su seviyeleri ve göl yatağı sızıntı parametresi (leakance) gibi göle ait girdiler tanımlanmaktadır (Merritt ve Konikow, 2000).

Çözücü paket: MODFLOW sonlu farklar yöntemlerine dayalı birden fazla çözüm yöntemi içerir. Bu çalışmada, açık çözüm yöntemi sunan Önkoşullu Eşlenik Gradyan Yöntemi (Preconditioned Conjugate Gradient) (PCG) Paketi kullanılmıştır. İterasyon sayıları ve hassasiyet derecesi arttırılarak çözümün doğru sonuca en yakın şekilde hesaplanması sağlanmaktadır.

Çıktı Kontrolü Paketi: Program çıktısını elde etmek için farklı yöntemler mevcuttur. Çıktı Kontrolü (Output Control) seçeneği, sistemdeki tüm aşamalara ait sonuç değerlerini verir. Eğer kullanıcı belli başlı değerler ile ilgileniyorsa LAK3 paketi ile kullanılan Ölçü (Gage) çözücü paketi kullanabilir (Winston, 2018).

2.5.2. MODFLOW Denklemleri

Bu bölümde genel yeraltı suyu denklemi ve denklemin serbest yüzeyli akifer için düzenlenmiş hali anlatılmıştır. Daha sonra bu denklemin sonlu farklar yöntemi ile çözüm mantığı açıklanmıştır. Sayısal modelde göl-akifer arasındaki sızma ve göl bütçesi hesabı için dikkate alınan formüller verilmiştir.

2.5.2.1. Yeraltı Suyu Akımı Denklemi

Doymuş gözenekli bir ortamda üç boyutlu yeraltı suyu akımını temsil eden kısmi diferansiyel denklem, süreklilik denklemi ve Darcy Yasası'nın bir kombinasyonu olarak aşağıdaki gibi ifade edilir (Council, 1997):

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(K_{xx}\frac{\partial h}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(K_{yy}\frac{\partial h}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(K_{zz}\frac{\partial h}{\partial z}\right)+Q=S_s\frac{\partial h}{\partial t} \quad (2.1)$$

Denklemde K_{xx}, K_{yy} ve K_{zz} akiferin *x, y, z* doğrultularındaki hidrolik iletkenliği (L/T); h hidrolik yük (L); Q sisteme giriş ya da çıkış yapan hacimsel su girişini ya da kaybını ifade eden kaynak/kuyu terimidir (1/T). Q>0 ise yeraltı suyu sistemine su girişi (beslenme) ve Q<0 ise sistemden su kaybını (boşalım) ifade eder. S_s akiferin özgül depolama miktarı (1/L), t zamanı (T) ifade etmektedir.

K_{xx}, K_{yy}, K_{zz} ve $S_s$yere bağlı (x, y, z) değişen fonksiyonlardır. Q ise hem yer hem de zamana bağlı (x, y, z, t) değişen bir fonksiyondur. Denklem, heterojen ve anizotropik zeminde, kararsız akımda yeraltı suyu hareketini tanımlar (Council, 1997; Todd ve Mays, 2005; McDonald ve Harbaugh, 1988).

Serbest yüzeyli akifer için genel yeraltı suyu akımı denkleminin düzenlenmesi gerekmektedir. Bu denklem *Boussinesq Denklemi* olarak adlandırılmaktadır (Boyraz, 2017).

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(K_{xx}h\frac{\partial h}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(K_{xx}h\frac{\partial h}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(K_{zz}h\frac{\partial h}{\partial z}\right)+Q=S_y\frac{\partial h}{\partial t} \quad (2.2)$$

Denklemde yer alan S_y özgül verimlilik, S_s teriminin h su derinliği ile çarpımına eşittir ve boyutsuzdur.

Yeraltı suyu denklemi göl-akifer sistemi için farklı sınır ve başlangıç koşulları için farklı şekilde çözümlenir. Genel denklem, her problemin başlangıç ve sınır koşullarına göre özelleştirilmiş olur.

2.5.2.2.Sonlu Farklar Yöntemi

Denklem (2.1)'in analitik çözümünün mümkün olmaması üzerine sayısal çözüm yöntemine ihtiyaç duyulmuştur. MODFLOW'da yeraltı suyu akımı denklemi sonlu farklar yöntemi kullanılarak çözülür. Bu yöntem, yeraltı suyu akımının oluştuğu sistemi hücrelere bölerek hesap yapar.

Bu yöntemde denklem (2.1) ile tanımlanan sürekli sistem, uzay ve zamanda sonlu ayrık noktalar kümesi ile değiştirilir. Kısmi türevler, düğüm noktalarındaki yeraltı suyu seviyelerindeki farklılıklardan hesaplanan terimler ile değiştirilir. Her hücre için yeraltı suyunun hesaplandığı düğüm adı verilen tek bir nokta vardır. Yöntemde N bilinmeyenli N adet denklem sistemi formüle edilir. N adet bilinmeyen, düğüm noktalarındaki yeraltı suyu yükü değerleridir (Todd ve Mays, 2005; McDonald ve Harbaugh, 1988; Harbaugh ve diğ., 2000; Yağbasan, 2007).

2.5.2.3.Göl ve Akifer Arasında Sızma

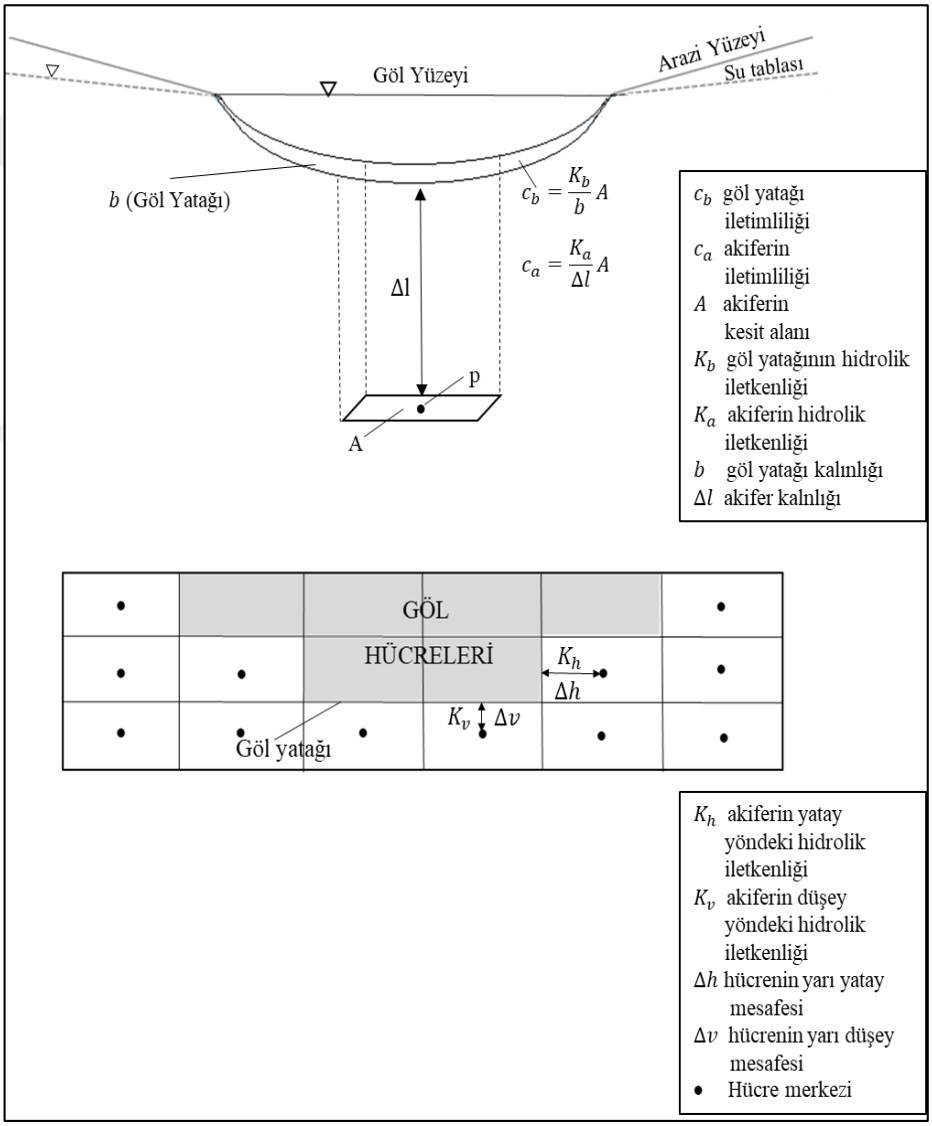
Göl ve akifer arasındaki sızma miktarı, iki sistem arasındaki su seviyeleri farkı ile belirlenir. Bu su seviyeleri zamana göre değişkenlik göstermektedir. Hidrolojik çevrime bağlı olarak sızma gölden akifere, akiferden göle veya her ikisi birlikte gerçekleşebilir. Tüm durumlar için sızma değeri Darcy Kanunu ile belirlenir:

$$q = K\frac{h_l - h_a}{\Delta l} \tag{2.3}$$

Denklemde q sızma hızı (L/T); K akiferin hidrolik iletkenliği (L/T); h_l göl su seviyesi (L); h_a akiferdeki yeraltı suyu yükü (L); Δl, h_l ve h_a'nın ölçüldüğü noktalar arasındaki mesafedir (L). Denklem (2.3)'de hesaplanan sızma hızı, sızma gölden akifere olduğu durumda pozitif değer alır ($h_l > h_a$). Sızma hızı kullanılarak sızma debisi Q (L^3/T) aşağıdaki şekilde hesaplanır:

$$Q = qA = \frac{KA}{\Delta l}(h_l - h_a) = c(h_l - h_a) \tag{2.4}$$

Burada, $c = KA/\Delta l$ iletimlilik (conductance) (L^2/T); $K/\Delta l$ sızıntı (leakance) (T^{-1}) olarak adlandırılır. A yatay (X-Y) veya dikey (X-Z veya Y-Z) koordinat düzlemlerinden birinde bir hücre yüzünün kesit alanıdır (Şekil 2.5). LAK3 paketinde sistem çalıştırılmadan önce yatay göl/akifer hücre arayüzleri için parametre girişine dayalı olarak iletimlilik parametresinin değerleri hesaplanır. Dikey arayüzler için birim kalınlık başına iletimlilik parametresinin değerleri bu aşamada hesaplanır. Daha sonra sistem çalıştırıldığında iletimlilik parametresi, sızma oranı hesabının bir parçası olarak göle bitişik akifer hücrelerinin ıslak yüzey kalınlıkları ile çarpılır.



Şekil 2.5: Göl ve akiferdeki bir nokta arasındaki sızıntı akısının tahmin edilmesinde kullanılan kavramlar (Merritt ve Konikow, 2000).

Göl Paketi'nde göl veya akifer, bir hücrenin tüm hacmini kaplar ve bir hücrede ikisi aynı anda tanımlanamaz. Göl yatağı, atanan sızıntı değeriyle tanımlanır ve modelde açık bir boyuta sahip olacak şekilde belirtilmemiştir. Sızıntı, göl yatağı iletkenliğinin yatak kalınlığına oranıdır ve göl paketine kullanıcı tarafından tanımlanacağı için hassas bir şekilde belirlenmesi gerekmektedir.

Pakette suyun göl yatağından akifere doğru (veya tam tersi) yatay veya düşey hareketinin oldukça farklı iki malzeme arasında meydana geldiği kabul edilir: 1. Birkaç santimetreden metreye varan kalınlıkta nispeten geçirimsiz sedimentten oluşan bir göl yatağı, 2. Akifer malzemesi. Her ortama uygun bir iletimlilik (conductance) değeri belirlemek gerekmektedir. Göl yatağının iletimlilik değeri şu şekilde hesaplanır:

$$c_b = \frac{K_b A}{b} \tag{2.5}$$

Burada, K_b göl yatağının hidrolik iletkenliği, b göl yatağı kalınlığı, A ortak kesit alanıdır.

Akiferin iletimlilik değeri ise aşağıdaki formülle hesaplanır:

$$c_a = \frac{K_a A}{\Delta l} \tag{2.6}$$

Burada, K_a akiferin hidrolik iletkenliği, Δl akiferdeki yeraltı suyu seviyesinin h_a ölçüldüğü noktaya kadar olan mesafedir.

Yeraltı suyunun ölçüldüğü akiferdeki ve göldeki noktalar arasındaki tüm yolun eşdeğer iletimlilik değeri, c (McDonald ve Harbaugh, 1988) ise aşağıda verilmiş olan denklemlerle hesaplanır:

$$\frac{1}{c} = \frac{1}{c_b} + \frac{1}{c_a} \tag{2.7}$$

veya

$$c = \frac{A}{\frac{b}{K_b} + \frac{\Delta l}{K_a}} \tag{2.8}$$

Burada, Δl hücre boyutunun yarısıdır, A, l hareket mesafesine dik bir düzlemdeki hücrenin kesit alanıdır ve K_a, akiferin Δl yönündeki hidrolik iletkenliğidir (yatay K_h veya dikey K_v).

2.5.2.4.Su Bütçesi

Göl Paketi, her zaman aralığının sonunda gölün su bütçesini güncelleyerek göl-akifer etkileşimini simüle eder. Göl su bütçesi, yeraltı suyu bütçesinden bağımsız olarak hesaplanır. Bu bütçe hesabında gölün su kazancı ve kaybı hesaplanır. Göl paketine dahil edilen su bütçesinin hesabı için kullanılan denklemde, göl su seviyesi her zaman aralığı için güncellenir. Bu denklemin açık şekli aşağıdaki gibidir:

$$h_l^n = h_l^{n-1} + \Delta t \frac{p - e + rnf - w - sp + Q_{si} - Q_{so}}{A_s} \quad (2.9)$$

Denklemde h_l^n ve h_l^{n-1} mevcut zaman ve bir önceki zaman aralığındaki göl su seviyeleri (L); Δt zaman aralığı uzunluğu (T); p göle giren yağış miktarı (L^3/T); e göl yüzeyinde meydana gelen buharlaşma miktar (L^3/T); rnf göle giren yüzeysel akış miktarı (L^3/T); w gölden çekilen su miktarı (L^3/T); Q_{si} göle nehirlerden giren su miktarı (L^3/T); Q_{so} gölden nehirlere giden su miktarı (L^3/T); A_s zaman aralığı başındaki gölün yüzey alanı (L^2); sp göl-akifer arasındaki net sızma miktarıdır (L^3/T). Gölden akifere sızma olduğu durumlarda sp pozitif değer alır.

Net sızma miktarı, sp, M adet göl-akifer hücre arayüzü için ayrı ayrı sızıntı terimlerinin toplamı olarak hesaplanır:

$$sp = \sum_m^M c_m(h_l - h_{am}) \quad (2.10)$$

Denklemde h_{am} m. arayüzde akifer hücresindeki yeraltı suyu seviyesini; c_m m. arayüzdeki iletimliliği temsil eder. Her zaman adımı sonunda göl su seviyesi tahmini için açık, yarı-kapalı ve kapalı yöntemler kullanılabilir.

3. MALZEME VE YÖNTEM

Bu bölümde yeraltı suyu dağılımını modellemek ve göl-akifer etkileşimlerinin farklı koşullar altındaki davranışını gözlemlemek üzere Hidroloji Deney Düzeneği ile yapılan deneyler ve deneylerin sayısal modelleri anlatılmıştır.

3.1.LABORATUVAR DENEYLERİ

Göl-akifer etkileşiminin gözlemlenebileceği deney sistemi, Hidrolik Laboratuvarında Hidroloji Deney Düzeneği'ne temsili göl yatağı ve çanağı entegre edilerek oluşturulmuştur. Ayrıca göl-akifer etkileşimi için elverişli ortamı sağlayacak toprak tipi ve özellikleri belirlenmiştir. Temel deney düzeneği kurulumu tamamlandıktan sonra farklı parametrelerin göl-akifer etkileşimi üzerindeki etkilerini incelemek üzere deneyler yapılmıştır.

3.1.1. Zemin Türünün Belirlenmesi

Yeraltı suyu akımını gözlemlemek için yapılan deneylerde kullanılan toprak tipinin özelliklerinin belirlenmesi, akifer içinde yeraltı suyu davranışının doğru biçimde anlaşılabilmesi için önem arz etmektedir. Bu çalışma kapsamında kurulan sayısal modellerde akifer homojen, izotropik ve serbest yüzeyli olarak kabul edilmiştir. Bu nedenle deneylerde kullanılacak toprak tipinin de bu kabuller ile uyumlu olması gerekmektedir.

Deneylerde kullanılacak toprak tipi için ilk olarak laboratuvar kumu seçilmiştir (Şekil 3.1-a). Bu zeminin kil ve silt oranı %3.7 ve geri kalan kısmı tamamen kumdur. Dane boyutları dağılımı 0.5-1 mm arasında değişmektedir. Porozite değeri 0.38, hidrolik iletkenlik değeri 0.083 cm/s, özgül depolama katsayısı $2x10^{-4}$ 1/m'dir. Ancak, zemin gevşek ve kohezyonsuz olduğundan kompakte olmamakta ve bu nedenle göl-akifer etkileşimini gözlemlemek için elverişli ortam oluşturulamamaktadır. Ayrıca laboratuvar kumu kullanıldığında yeraltı suyu akımı hızlı bir şekilde kararlı akıma ulaştığı için kararsız akım incelemelerinde bu kum ile iyi sonuç alınamayınca daha iyi derecelenmiş bir kuma ihtiyaç duyulmuştur. Buna istinaden toprak tipi seçiminde ikinci olarak doğal yıkanmış kum seçilmiş ve mekanik özelliklerinin incelemesi yapılmıştır (Şekil 3.1-b).

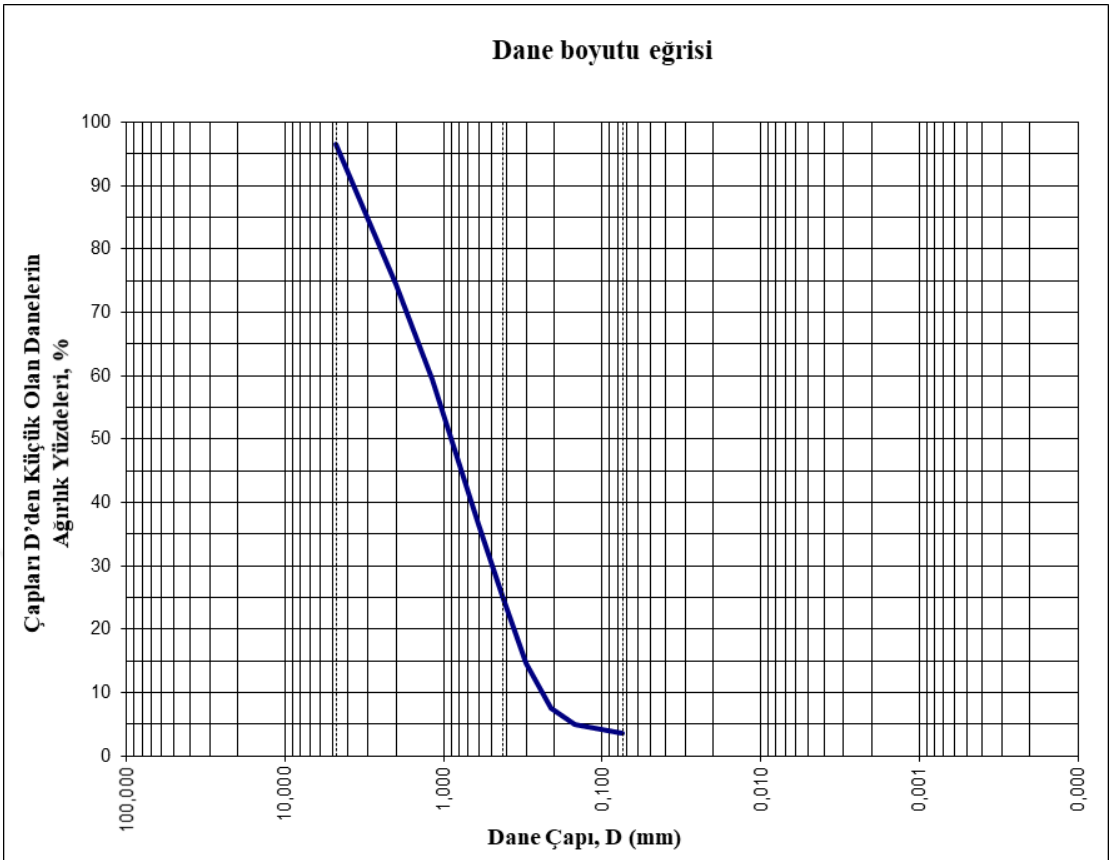


Şekil 3.1: (a) Laboratuvar Kumu, (b) Doğal Yıkanmış Kum.

Yeraltı suyunun analizi ve deney düzeneğinin sayısal modeller ile oluşturulabilmesi için bu toprak tipine ait hidrolik iletkenlik, porozite, özgül depolama ve özgül verimlilik değerlerinin belirlenmesi gerekmektedir. Seçilen zemine ait gerekli parametreler ilgili deneyler yapılarak ve literatür bilgilerinden yararlanılarak belirlenmiştir.

3.1.1.1.Dane Dağılımı Tayini

Deneyde kullanılmak üzere seçilen toprak tipinin uygunluğunu tespit etmek amacıyla doğal yıkanmış kum ile laboratuvarda elek analizi deneyi yapılmıştır. 1 kg numune kum 24 saat süreyle 100^0C'de etüvde kurutulmuştur. 24 saat sonra etüvden çıkartılarak tartılmış ve elek analizi yapılmıştır. Doğal yıkanmış kuma ait elek analizi sonuçları Şekil 3.2'de verilmiştir. Kumun derecelenme katsayısı (C_r) 0.8'dir. Laboratuvar kumu ile karşılaştırıldığında daha iyi derecelenmiş bir kum olduğu görülmektedir.



Çakıl %	Kum %	Silt & Kil%	D_{10}	D_{30}	D_{50}	D_{60}	C_u	C_r
3.5	92.9	3.6	0.25	0.5	0.9	1.2	4.8	0.8

Şekil 3.2: Doğal yıkanmış kum için elek analizi sonuçları.

3.1.1.2.Zemin Parametrelerinin Belirlenmesi

Doğal yıkanmış kumun hidrolik iletkenliğini belirlemek için deney düzeneğinde yeraltı suyu debisi ölçülmüş ve Darcy kanunundan yararlanılmıştır. Darcy yönteminin uygulanabilmesi için yeraltı suyu seviyesinin sabit bir değere ulaşması gerekmektedir. Bu nedenle kumla dolu olan havza alanı sınırlarından birinde sabit besleme yapılmış; karşı sınırda ise çıkışa izin verilmiştir. Deney düzeneğindeki savakta su seviyesi kontrol edilerek yeraltı suyunun sabitlenmesi beklenmiştir.



Şekil 3.3: Sabit yeraltı suyu seviyesi.

Yeraltı suyu Şekil 3.3'te görülen değerlerde sabitlendikten sonra savaktan boşalan su 1 dakika boyunca bir beher yardımıyla toplanmış ve su miktarı kaydedilmiştir. Aynı işlem 3 defa tekrarlanmış ve Darcy Kanunu ile iletkenlik saptanmıştır.

$$q = K\frac{\Delta h}{\Delta x} \tag{2.3}$$

$$Q = q\mathrm{A} \tag{2.4}$$

Burada Q debi olup savaktan 1 dakika boyunca behere toplanan su miktarıdır. A havza alanıdır. Δh havza alanının her iki ucundaki piyezometre su seviyeleri farkıdır (Şekil 3.3). Δx ise iki uçtaki piyezometreler arasındaki yatay mesafedir. Deney sırasında Q =1.04x10^{-6} m^3/sn, A=1800 cm^2, Δh = 18 cm, Δx = 200 cm olarak ölçülmüştür. Bu değerler kullanılarak yapılan hesaplamalar sonucu hidrolik iletkenlik değeri 1.9x10^{-4} m/s olarak bulunmuş olup deneyler için uygun olduğu görülmüştür. Zemine ait porozite değeri daha önce literatürde bu kum ile yapılmış olan başka bir çalışmadan elde edilmiştir (Boyraz, 2017). Bu çalışmada porozite deneyi yapılmış ve değeri 0.23 olarak bulunmuştur. Özgül depolama katsayısı, zemin tipine uygun olarak literatürden belirlenmiştir. Buna göre özgül depolama katsayısı 1x10^{-4} 1/m'dir (Yağbasan, 2007). Özgül verimlilik değeri, sayısal modelleme aşamasında kalibrasyon yöntemi ile belirlenmiş ve bulgular bölümünde anlatılmıştır.

3.1.2. Göl Yatağı

Deneyde göl çanağını oluşturabilmek için doğal yıkanmış kum ile dolu havza alanının tam ortasına yarım küre şeklinde bir boşluk açılmıştır. Sisteme su doldurulduğu zaman kum göl çanağı boşluğuna akacağı için kumu tutacak ve akışını engelleyecek bir materyale ihtiyaç duyulmuştur. Buna istinaden göl çanağına yarım küre şeklinde, çapı 32.5 cm ve yüksekliği 15 cm olan delikli plastik malzeme yerleştirilmiştir (Şekil 3.4). Göl taban kotunun altında akifer kalınlığı 3 cm olacak şekilde göl çanağını temsil eden malzeme havza alanına yerleştirilmiştir. Yerleştirilmeden önce, kumun göl çanağına dolmasını engellemek amacıyla plastik malzemenin etrafı 200 mikron naylon malzeme ile kaplanmıştır. İlk dört deney, göl tabanı ile akiferin sürekli olduğu durum için gerçekleştirilmiştir. Sonraki dört deneyde ise göl tabanında sediment birikimi sonucu akifer ve gölü ayıran bir yatak oluştuğu varsayılmıştır. Bu göl yatağı modeli için aynı tip delikli plastik materyalin küçük boyu, aralarında 0.5 cm boşluk olacak şekilde diğerinin içine yerleştirilmiştir. Küçük plastik materyalin çapı 31.5 cm, yüksekliği ise 14 cm'dir.



Şekil 3.4: Göl yatağı materyali.

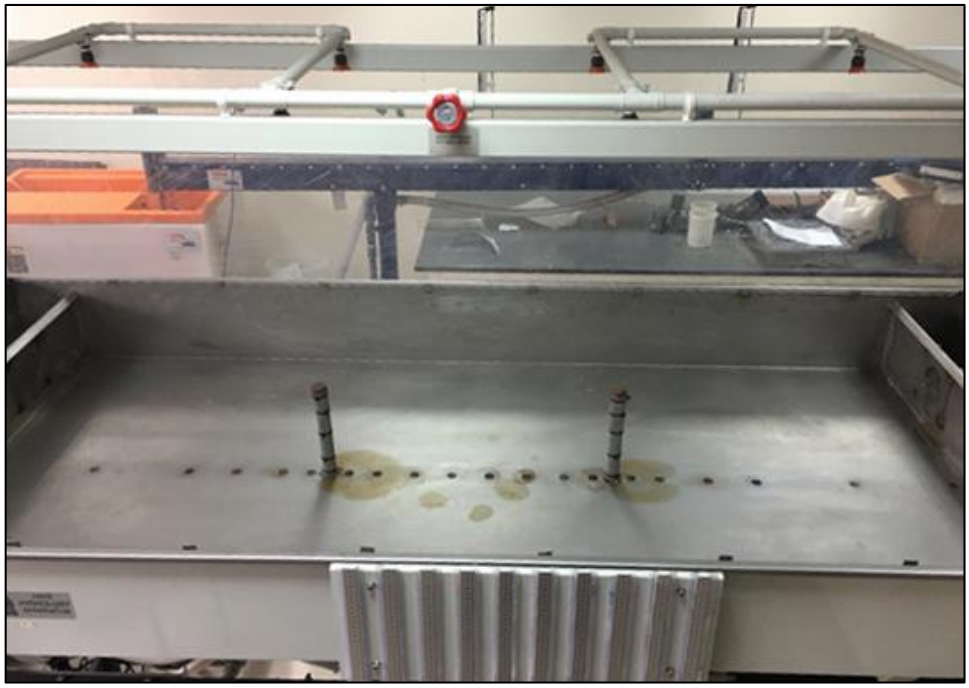
Göl yatağının genellikle akifer zemininden daha geçirimsiz olduğu bilinmektedir. Bu amaçla kuma %5 oranında kil karıştırılıp iki plastik materyal arasında kalan boşluğa yerleştirilmiştir (Şekil 3.5).



Şekil 3.5: Kil karışımlı yatak.

3.1.3. Toprağın ve Göl Materyalinin Yerleştirilmesi

Cihazın mevcut durumda filtre delikleri laboratuvar kumunun dane çapına uygun büyüklüktedir (Şekil 3.6). Doğal yıkanmış kumun dane çapının daha ince olması, cihazda belli düzenlemeler gerektirmiştir. İlk olarak havza alanı tabanındaki piyezometre deliklerinin tıkanmaması için delikler 200 mikron elek teli ile kaplanmıştır. Aynı şekilde havza alanı uçlarındaki su girişi delikleri ve kuyuların etrafı da elek teli ile kaplanmıştır (Şekil 3.7).

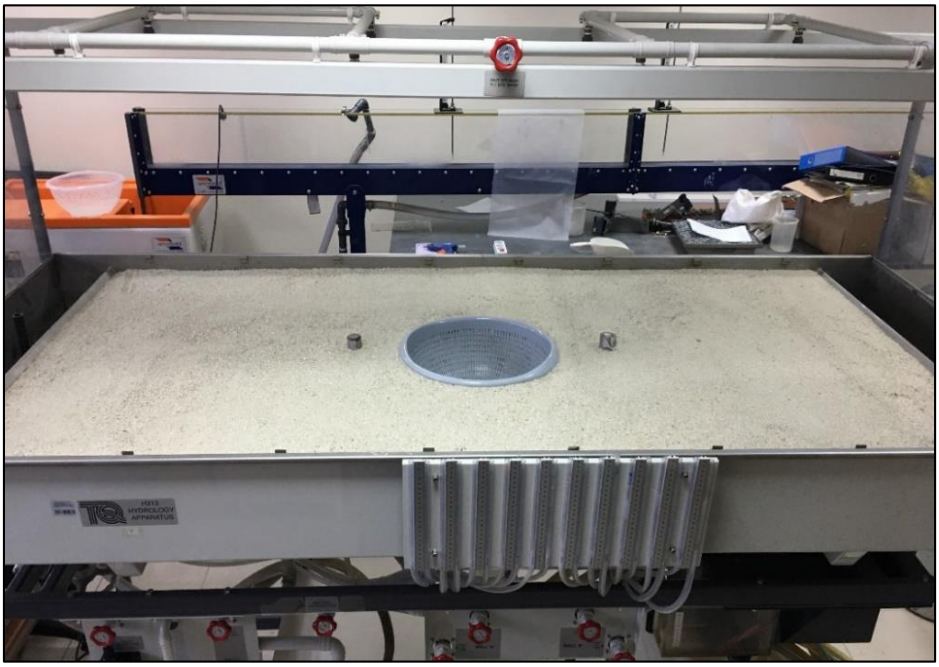


Şekil 3.6: Hidroloji Deney Düzeneği havza alanı.



Şekil 3.7: Havza alanında deliklerin kaplanması.

Kaplama işleminden sonra havza alanı akiferi temsil etmek üzere seçilen doğal kum ile doldurulmuştur. Ayrıca alanın tam ortasına, göl taban kotunun altında 3 cm kum olacak şekilde göl tabanı materyali yerleştirilmiştir (Şekil 3.8).

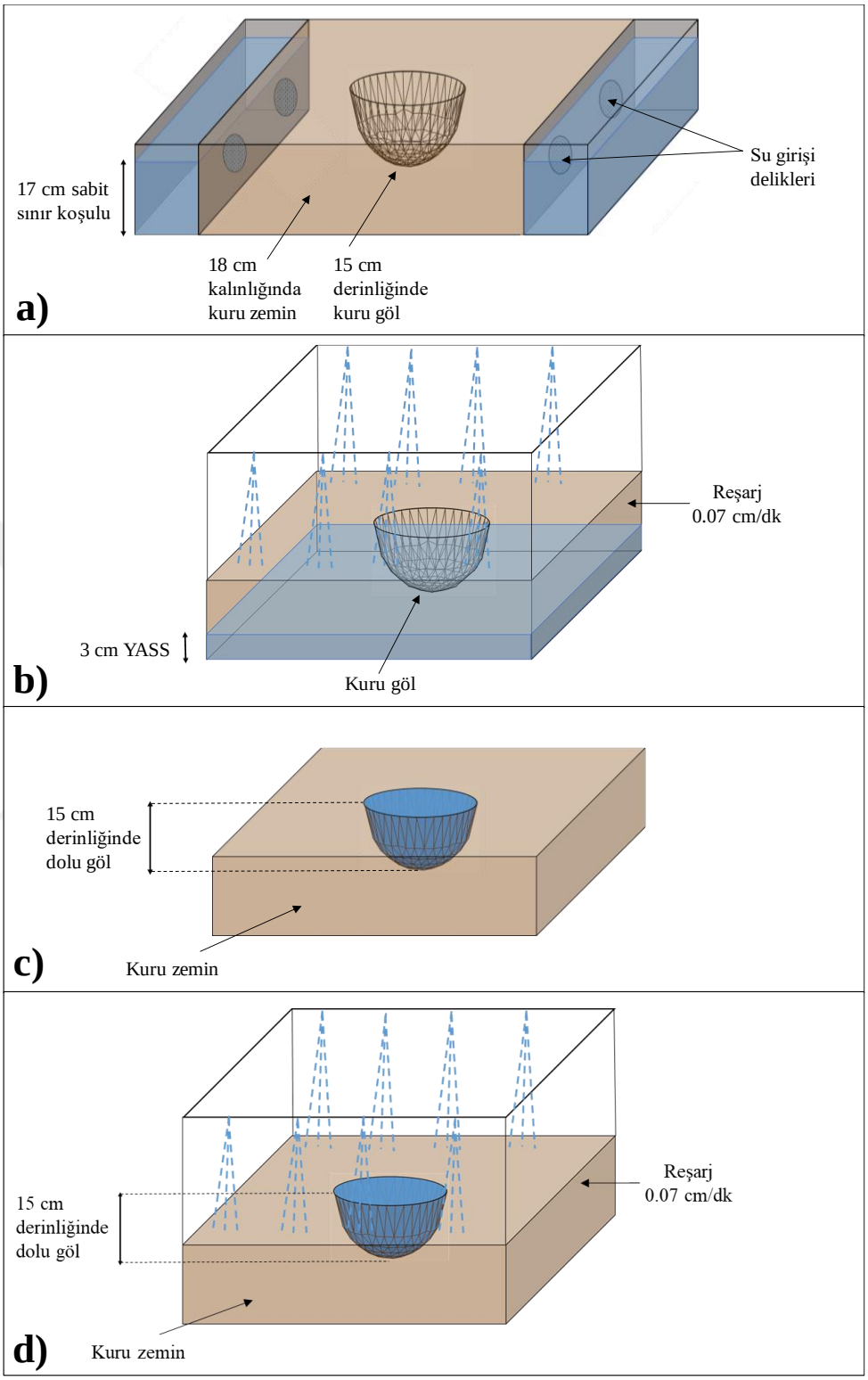


Şekil 3.8: Göl-akifer sistemi.

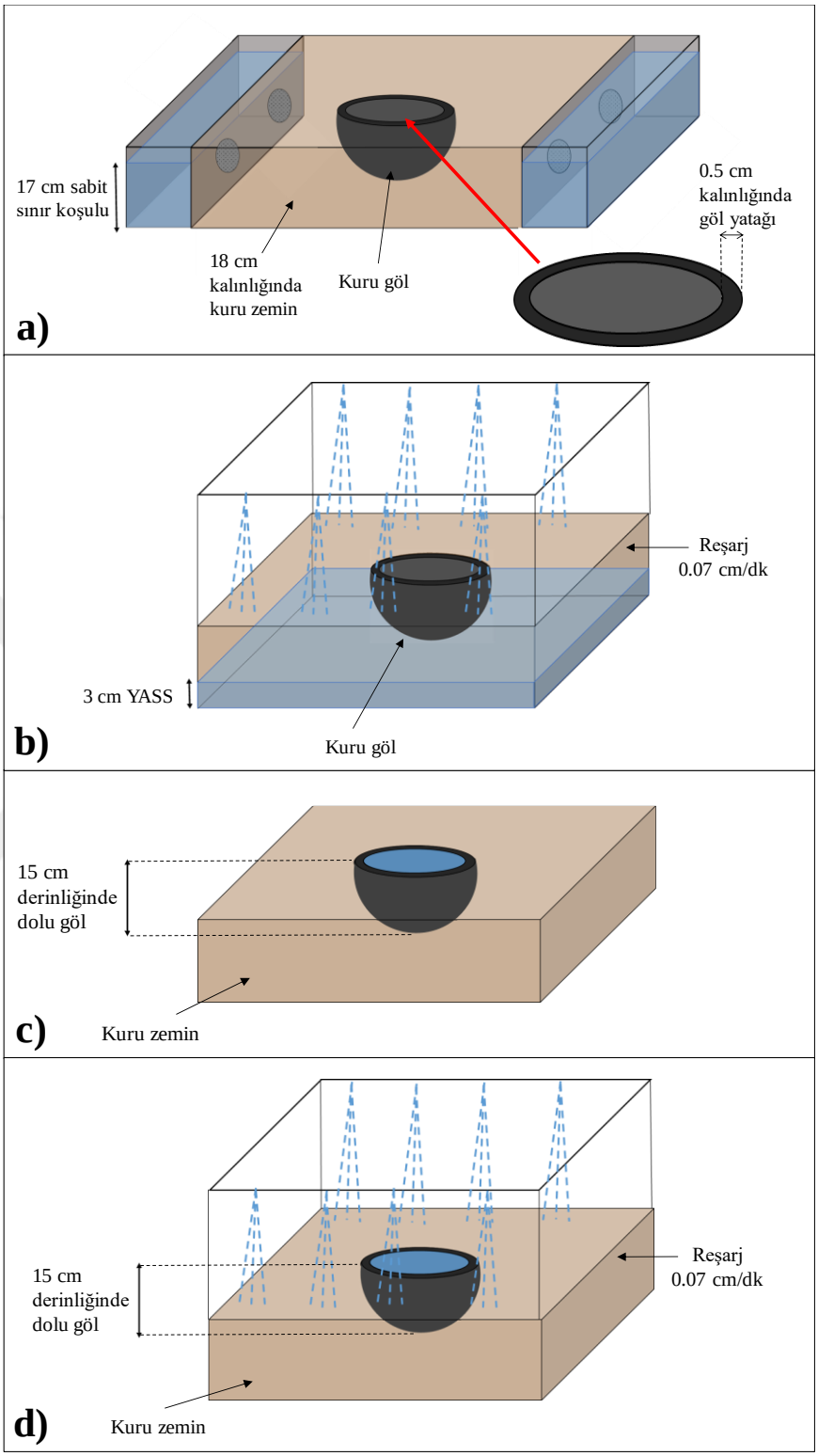
3.1.4. Geliştirilen Senaryolar

Literatürde yer alan ve göl-akifer etkileşimini inceleyen bazı çalışmalar göl tabanında sediment birikmesi sonucu göl tabanında akiferin toprak tipinden farklı bir toprak tipinde göl yatağı olduğunu dikkate almıştır. Bazı çalışmalar ise göl yatağındaki toprak tipinin akifer toprak tipi ile aynı özelliklere sahip olduğunu varsaymıştır. Bazı çalışmalar ise farklı özelliklere sahip çeşitli göl yataklarının göl-akifer etkileşimine etkilerini incelemiştir. Fakat göl yatağının akifer toprak tipi ile aynı ve farklı toprak tiplerinden oluşmasına ilişkin iki farklı durum için kıyas yapılmamıştır. Bu nedenle bu çalışmada deneyler bu iki farklı durum için yapılmıştır.

Sıcaklık nedeniyle bazı bölgelerde yüzey suları kuruyabilir, bu durumda akifer yüzey suyunu besler. Bazı bölgelerde kuyulardan çekilen fazla su nedeniyle yeraltı suyu kuruyabilir. Bu durumda akifer yüzey suyundan beslenir. Bu koşullar göz önüne alınarak deneyler senaryolar akiferin gölü beslemesi ve gölün akiferi beslemesi olacak şekilde yapılmıştır. Bu durumlara ek olarak yağışın da etkileşime etkisi incelenmiştir. Bu senaryolar dikkate alınarak yapılmış olan 8 adet deneye ait şematik düzenek Şekil 3.9 ve Şekil 3.10'da gösterilmiştir. Deney düzeneklerinde kullanılan parametre değerleri Tablo 3-1'de sunulmuştur.



Şekil 3.9: Göl yatağı olmadan deneyler (a) Deney I-İki kenardan sabit yük ile beslenen kuru zemin ve göl, (b) Deney II-3 cm YASS olan akifer ve boş gölün yağış altında etkileşimi, (c) Deney III-Akiferi besleyen göl, (d) Deney IV-Akiferi yağış altında besleyen göl.



Şekil 3.10: Göl yatağı eklenmiş deneyler (a) Deney V-İki kenardan sabit yük ile beslenen kuru zemin ve göl, (b) Deney VI-3 cm YASS olan akifer ve boş gölün yağış altında etkileşimi, (c) Deney VII-Akiferi besleyen göl, (d) Deney VIII-Akiferi yağış altında besleyen göl.

İlk 4'lü deney seti için gölü akiferden ayıran farklı bir toprak tipine sahip bir göl yatağının olmadığı varsayılarak deney düzenekleri kurulmuştur. Göl taban kotunun altında akifer kalınlığı 3 cm olacak şekilde düzenek oluşturulmuştur. Akifer kalınlığı 18 cm'dir. Deney başlangıç koşulu doygun zemin olarak belirlenmiş ve deney sistemi buna uygun olarak çalıştırılıp piyezometrelerdeki su seviyeleri kayıt edilmiştir.

İkinci 4'lü deney seti için göl tabanında sediment birikmesi sonucu akiferden daha geçirimsiz bir yatağın oluşması durumunu temsil etmek amacıyla havza alanının ortasına yerleştirilmiş olan plastik materyalin üzerine daha küçük olan ikinci bir plastik materyal yerleştirilmiştir. Arada kalan 0.5 cm'lik boşluk, yatağın akifer zemininden daha geçirimsiz olmasını sağlamak amacıyla kum+kil karışımı ile doldurulmuştur. İlk 4'lü deney setinde kullanılan değerler ile deneyler tekrarlanmış ve göl yatağının etkileşime etkisi incelenmiştir. Geliştirilen senaryolara ait değerler Tablo 3-1'de yer almaktadır.

Tablo 3-1: Deneylere ait değerler.

Deney No	Göl Yatağı Kalınlığı (cm)	Yeraltı Suyu Seviyesi (cm)	Göl Su Seviyesi (cm)	Sabit Sınır Koşulu (cm)	Reşarj (cm/dk)
Deney 1	0	-	-	17	-
Deney 2		3	-	-	0.07
Deney 3		-	18	-	-
Deney 4		-	18	-	0.07
Deney 5	0.5	-	-	17	-
Deney 6		3	-	-	0.07
Deney 7		-	18	-	-
Deney 8		-	18	-	0.07

Deney sistemi tanımlanmış farklı koşullar için çalıştırılıp piyezometrelerdeki su seviyeleri kayıt edilmiştir. Deney süreleri, yeraltı suyunun kararlı akıma ulaşma süresine göre farklılık göstermektedir.

3.1.4.1.Deney I ve Deney V

Bu deneylerde başlangıç koşulu olarak kuru durumdaki akifer ve kuru durumdaki göl için göl-akifer etkileşimi gözlemlenmiştir. Deney düzeneğinin iki kısa kenarındaki sınırlarda su giriş

delikleri açıktır. Tüm deney süresi boyunca akifer her iki sınırdan 17 cm'lik sabit su ile eşit miktarda beslenmiştir. İki sınırdan merkeze doğru beslenen akiferden göl çanağına akım oluşmuştur. Zaman içinde yükselen su seviyesi, göl ve akiferdeki su seviyeleri eşitleninceye kadar piyezometrelerden gözlenip kayıt edilmiştir. Deney I'de deney göl yatağı olmayan durum için (Şekil 3.11), Deney V'te ise deney göl yatağı olan durum için yapılmıştır (3.12). Her iki modelde de kararlı akıma 4 saat sonunda ulaşılmıştır.



Şekil 3.11: Deney I düzeneği.

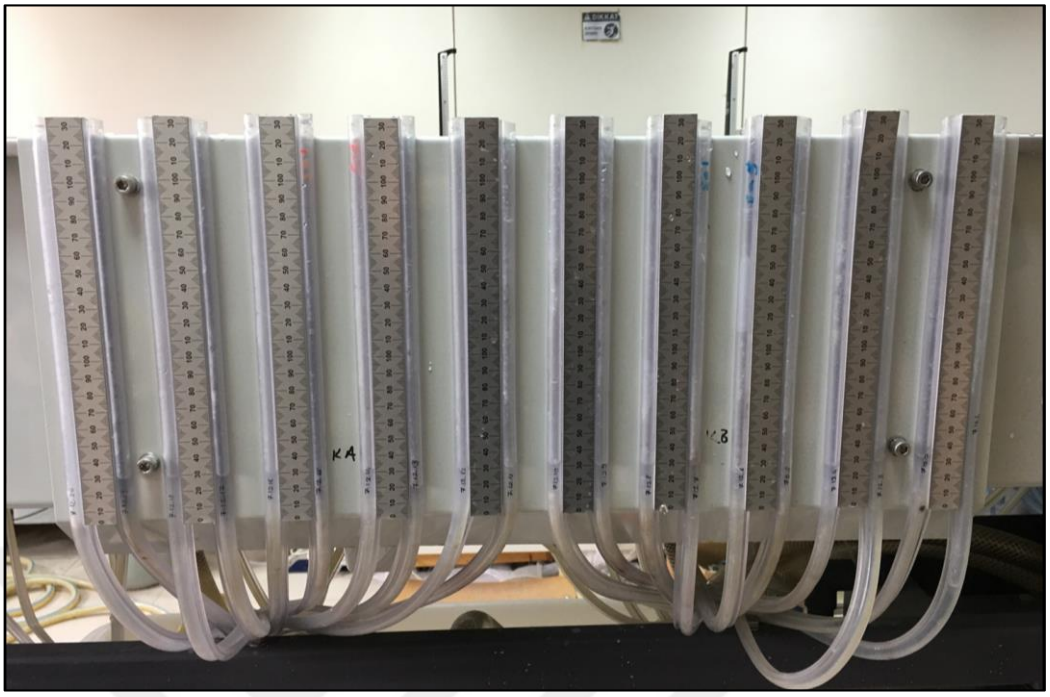


Şekil 3.12: Deney V düzeneği.

3.1.4.2.Deney II ve Deney VI

Bu deneylerde başlangıç koşulu akiferde 3 cm yüksekliğinde yeraltı su seviyesi ve göl çanağı kuru olarak belirlenmiştir. Başlangıçtaki piyezometre değerleri Şekil 3.13'de görülmektedir. Akiferin tüm sınır koşulları geçirimsiz olarak belirlendiğinden havza alanı kenarlarındaki su girişi delikleri kapatılmıştır. Göl-akifer alanına sadece yağmurlama sistemi ile oluşturulan yağış ile su girişi oluşturulmuştur (Şekil 3.14).

Yağış şiddeti yağmurlama sistemi borularından çıkan su ölçülerek 0.07 cm/dk olarak hesaplanmıştır. Yağış 8 dakika boyunca devam etmiştir. Yüzeyde göllenme başladığı anda yağış kesilmiştir. Hem yağış sırasında hem de sonrasında 1 saat boyunca yeraltı suyu ve göl suyu seviyelerindeki değişim piyezometrelerden okunmuştur. Model II de deney göl yatağı olmayan durum için Model VI da ise deney göl yatağı olan durum için yapılmıştır.



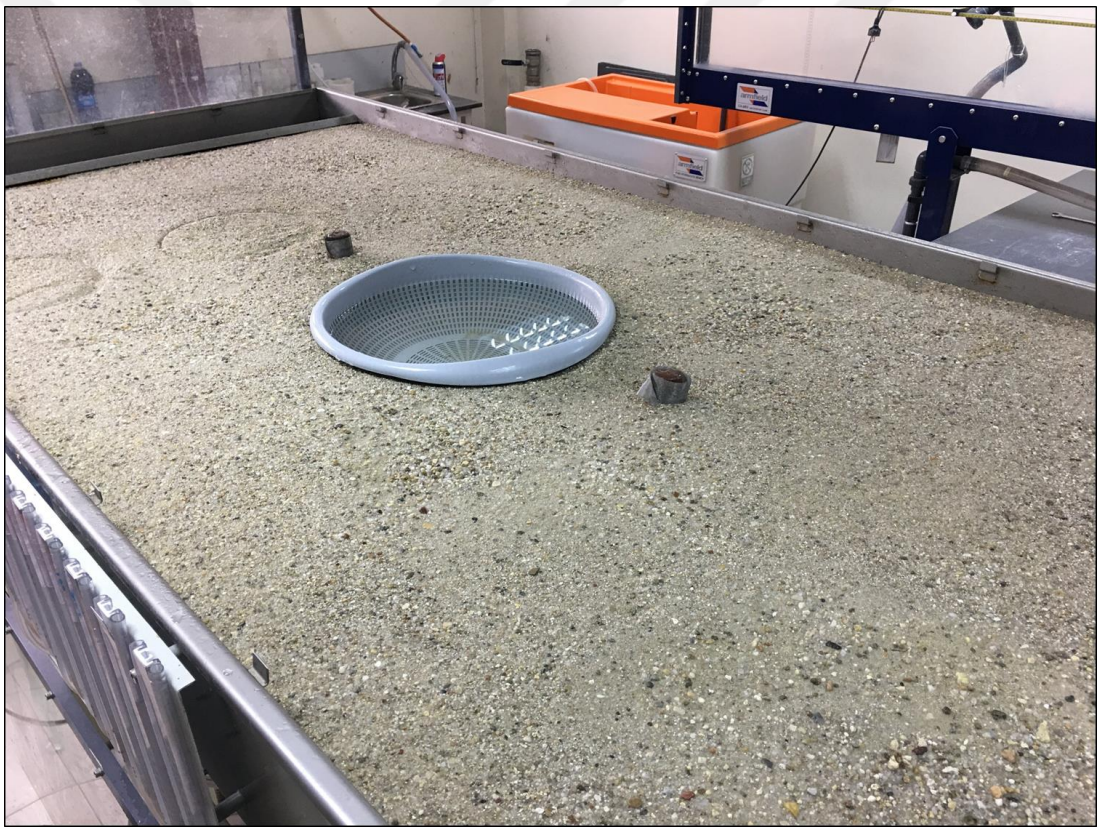
Şekil 3.13: Başlangıç koşulu olan 3 cm yeraltı suyu seviyesi.



Şekil 3.14: Yağış anında göl-akifer sistemi.

3.1.4.3.Deney III ve Deney VII

Bu deneylerde kuru akiferin göl suyu tarafından beslenmesi gözlemlenmiştir. Havza alanını her iki taraftan besleyen su kaynağı kapatılmış ve akiferin tüm sınır koşulları geçirimsiz olarak oluşturulmuştur. Başlangıç koşulu olarak sistemde sadece göl çanağında maksimum su derinliği 15 cm ve toplam 11 lt su bulunmaktadır. Akifer yalnızca göl suyu ile beslenmektedir. Gölden akifere doğru oluşan akım nedeniyle akiferde zaman içinde su seviyesi değişimi piyezometrelerden takip edilmiştir. Göl-akifer sisteminde deney başladıktan 23 dakika sonra kararlı akıma ulaşılmıştır. Model III'de deney göl yatağı olmayan durum için (Şekil 3.15) Model VII'de ise deney göl yatağı olan durum için yapılmıştır.

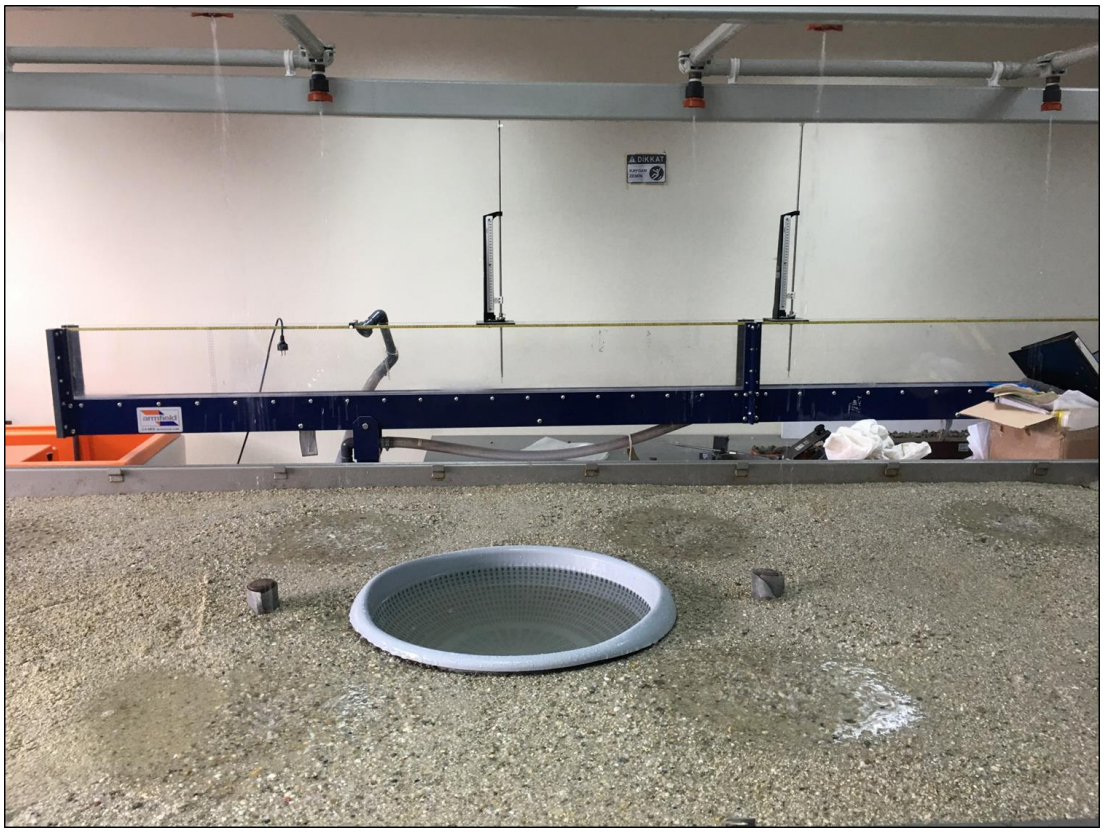


Şekil 3.15: Deney III düzeneği.

3.1.4.4.Deney IV ve Deney VIII

Bu deneylerde kuru akiferin yağış durumunda göl suyu tarafından beslenmesi gözlemlenmiştir. Havza alanını her iki taraftan besleyen su kaynağı kapatılmış ve akiferin tüm sınır koşulları geçirimsiz olarak oluşturulmuştur. Başlangıç koşulu olarak sistemde sadece göl çanağında maksimum su derinliği 15 cm ve toplam 11 lt su bulunmaktadır. Akifer göl suyu ve yağış ile

beslenmektedir (Şekil 3.16). Gölden akifere doğru oluşan akım nedeniyle akiferde zaman içinde su seviyesi değişimi piyezometrelerden takip edilmiştir. Yağış şiddeti yağmurlama sistemi borularından çıkan su ölçülerek 0.07 cm/dk olarak hesaplanmıştır. Yağış 7.5 dakika boyunca devam etmiştir. Yüzeyde göllenme başladığı anda yağış kesilmiştir. Hem yağış sırasında hem de sonrasında 40 dakika boyunca yeraltı suyu ve göl suyu seviyelerindeki değişim piyezometrelerden okunmuştur. Model IV'de deney göl yatağı olmayan durum için Model VIII'de ise deney göl yatağı olan durum için yapılmıştır.



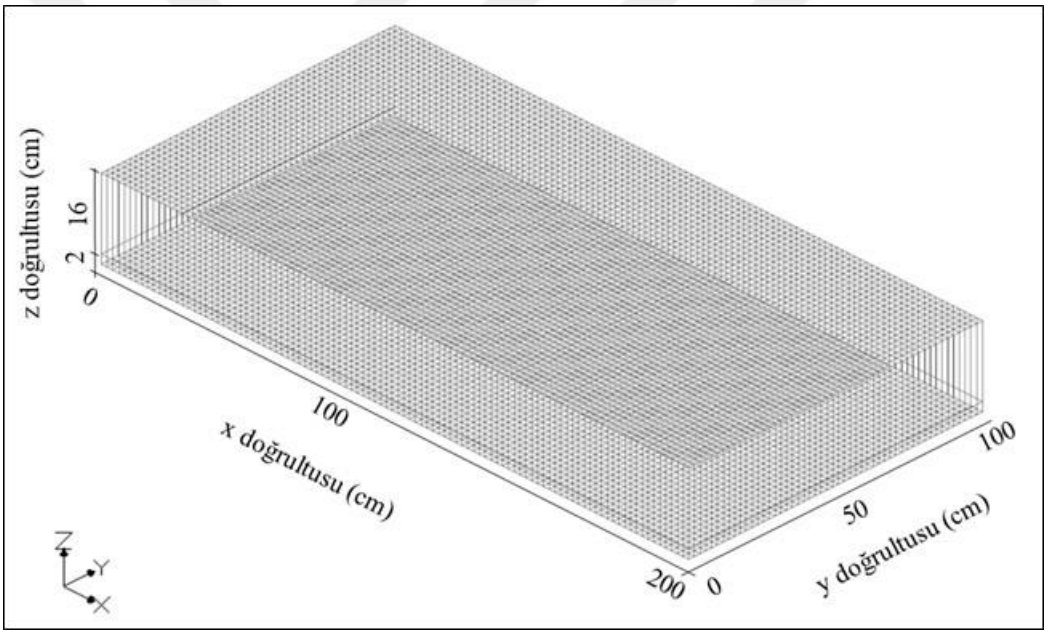
Şekil 3.16: Deney IV düzeneği.

3.2.DENEY DÜZENEĞİNİN SAYISAL MODEL KURULUMU

Çalışmanın bu aşamasında, yapılan deneylerin sayısal modellemesi MODFLOW ile oluşturularak yüzey suyu-yeraltı suyu etkileşimleri ve göl-akifer sisteminde yeraltı suyu hareketi incelenmiştir. Deney sonuçları ile sayısal model sonuçları karşılaştırılmıştır. Böylelikle

MODFLOW programının göl-akifer sistemini modelleyebilme yeteneği değerlendirilmiş ve tartışılmıştır. Sayısal model MODFLOW-2000 ile aşağıdaki adımlar ile oluşturulmuştur:

- Deney cihazının boyutları MODLFOW programına girdi olarak tanımlanmıştır. Akiferin yatay düzlemdeki boyutları 1x2 m ve kalınlığı 18 cm'dir. Akifer alanı, 2x2 cm olacak şekilde hücrelere bölünmüştür.
- Modele serbest yüzeyli akifer tek katman olarak tanımlanmıştır. Ancak, modelde göl tanımının yapılabilmesi için kullanılan LAK3 paketinde bir hücreye göl ve akifer ortak olarak tanımlanamadığından göl tanımı için modelde ikinci bir katman oluşturulmuştur. Buna göre alt katman kalınlığı 2 cm, üst katman kalınlığı ise 16 cm olarak seçilmiştir (Şekil 3.17).



Şekil 3.17: MODFLOW ile deney düzeneğine ait sayısal model.

- Akifer boyutlarını tanımladıktan sonra temel paket (Basic Package) penceresinde ilk olarak akım tipi kararsız akım olarak belirlenmiştir. Simülasyon için zaman adımı ve uzunluğu tanımlanmıştır. Bu parametreler her model için farklı değer almıştır.
- Göl-akifer sisteminde yeraltı suyu hareketinin simülasyonunun yapılabilmesi için, kaynak ve kayıpların yanı sıra göl yatağı ve akifer özelliklerinin belirlenmesine ihtiyaç vardır. Bu özelliklerin tanımlanması için Akım (Flow) paketi, Çözücü (Solver) paketi ve Sınır Koşulları (Boundary Conditions) paketleri kullanılmıştır.

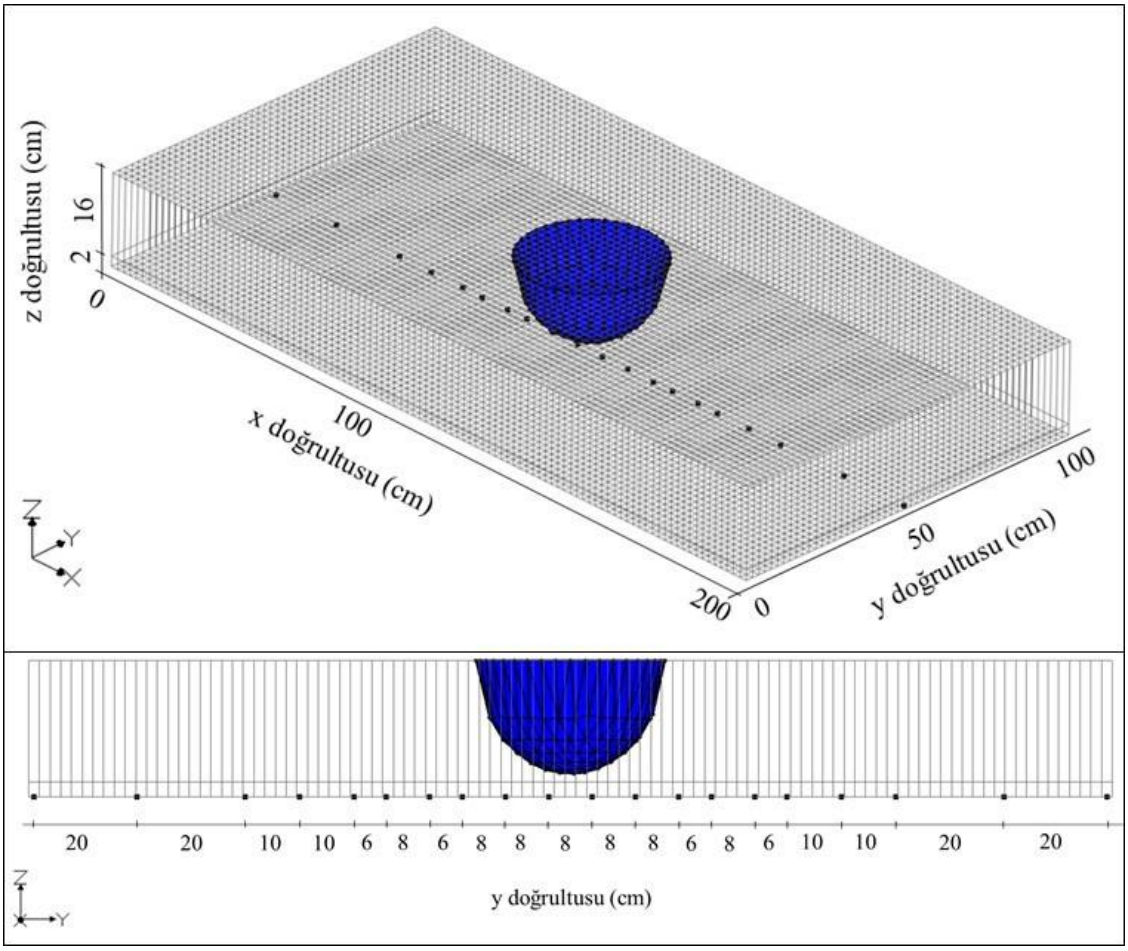
- Yeraltı suyu akımı hesabı için Katman Özelliği Akımı (Layer Property Flow) (LPF) paketinde akifer karakteristiklerini temsil eden yatay iletkenlik (K_h), düşey iletkenlik (K_v), özgül depolama katsayısı (S_s) ve özgül verimlilik değeri (S_y) tanımlanmıştır. Özgül verimlilik değeri MODFLOW'da kalibrasyon sonucu elde edilmiştir. Serbest yüzeyli akifer tanımlayabilmek için katman tipi olarak Çevrilebilir (Convertible) seçilmiştir. Sistem izotropik olarak tanımlanmıştır. Kuruyan akifer hücrelerinin yeniden ıslanabilmesi için 'Allow wetting of cells' seçeneği aktif edilerek ıslanma yönü (wet/dry flag) değeri atanmıştır. Kuruyan akifer hücrelerinin tabandan ıslanabilmesi için bu değer -1 alınmıştır. Akifer parametrelerinin değerleri Tablo 3.2'de görülmektedir.

Tablo 3-2: MODFLOW'a tanımlanan akifer parametrelerinin değerleri.

Parametre	**Değer**
Yatay hidrolik iletkenlik K_x (cm/dak)	1.14
Özgül depolama katsayısı S_s (1/m)	$1x10^{-4}$
Özgül verimlilik değeri S_y	0.015
Porozite n	0.23
Hücrenin ıslanma yönü (Wet/Dry flag)	-1

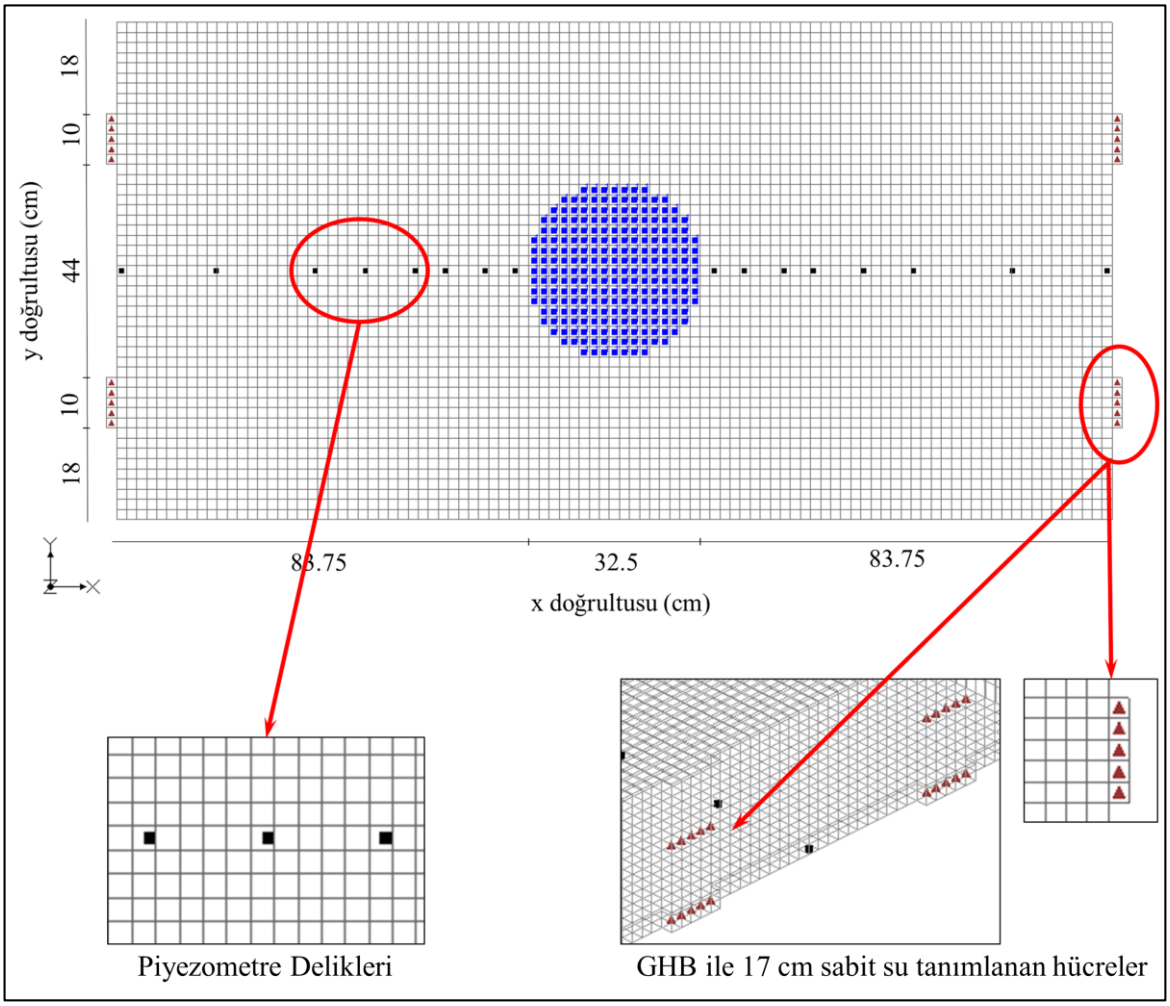
- MODFLOW yazılımının ilk versiyonlarında, akım istenmeyen hücreler için sınır koşulu olarak inaktif seçilmesi gerekirdi. Bu çalışmada kullanılan versiyonda ise tüm sınırlardaki hücrelerde akım olmadığı varsayılmakta ve akım olmayan koşuldan farklı bir durum var ise ilgili hücrelere farklı sınır koşulu tanımlanmaktadır.

  Sayısal modellemede yüzey suyunun temsil edilebilmesi için göl bölgesinde sınır koşulu olarak LAK3 paketi kullanılmıştır. Modelde göl çanağının tanımı için 32.5 cm çapında 15 cm yüksekliğinde yarım elipsoid bölge içinde üçgenleştirilmiş düzensiz ağ (TIN) şeklinde ile hücreler oluşturulmuştur (Şekil 3.18).



Şekil 3.18: Akiferde göl ve piyezometrelerin konumu.

- MODFLOW ile yapılan modelde göl hücrelerini tanımlayabilmek için Göl (Lake) paketinde TIN şeklinde oluşturulan hücreler inaktif olarak tanımlanır. Yani, otomatik olarak sıfır atanan IBOUND değerleri yerine, Lake ID değerleri 1 olarak değişir. Bu durum o hücrenin artık akifer değil göl hücresi olduğu anlamına gelir.
- Modelde göl yüzey alanı yaklaşık 0.1 m^2'dir. Göl çanağı içinde başlangıç su seviyesi, minimum ve maksimum su yüksekliği ve sızıntı (leakance) değerleri Göl (Lake) paketinde tanımlanmıştır. Lake paketine tanımlanan göl parametreleri, incelenen modellere göre değişmektedir.
- Akiferin iki uçtaki su girişi deliklerinden sabit su seviyesi ile beslendiği deneyler için sayısal modelde bu koşul Genel Yük Sınırı (General Head Boundary) (GHB) paketi ile tanımlanmıştır. Paket ile akiferin iki kısa kenarı boyunca oluşturulmuş hücrelerin lokasyon olarak beslenme noktaları ile eşleşenlerinde sabit su yüksekliği tanımlanmıştır (Şekil 3.19).



Şekil 3.19: Sayısal modelde GHB paketi ile tanımlanan sabit su yükseklikleri.

- Yağış anındaki etkileşimin sayısal modeli için Reşarj (Recharge) (RCH) paketi kullanılmıştır. Yağış değeri göl hücrelerine doğrudan tanımlanırken yağış nedeniye yüzeyde oluşan sızmayı tanımlamak için akiferin yüzey boyunca oluşturulmuş hücrelerinde RCH paketi aktif hale getirilerek ilgili değer girilmiştir.
- Çözücü (Solver) olarak yapılan ön simülasyonlar sonucu en uygun yöntem olarak PCG seçilmiştir. Burada iç iterasyon sayısı 50, dış iterasyon sayısı ise 25 olarak tanımlanmıştır.
- Çıktı Kontrolü (Output Control) seçeneği olarak Ölçü (Gage) paketi aktif hale getirilmiştir. Göl seviyesi, yüzey alanı, sızan su miktarı gibi belirli değişkenlerin simülasyon sonuçları oluşan çıktı dosyasından okunmuştur.

Her modele ait tanımlanan parametre değerleri Tablo 3-3'de yer almaktadır.

Tablo 3-3: MODFLOW'da tanımlanan parametre değerleri

Model No	Göl Yatağı Kalınlığı *b* (cm)	Göl Yatağı Hidrolik İletkenliği K_{yatak} (cm/dk)	Sızıntı (Leakance) (1/dk)	Yeraltı Suyu Seviyesi (cm)	Göl Su Seviyesi (cm)	Sabit Su Yüksekliği (cm)	Reşarj (cm/dk)
Model 1	$2.5x10^{-8}$ ~0	0.025	10^6	-	-	17	-
Model 2				3	-	-	0.07
Model 3				-	18	-	-
Model 4				-	18	-	0.07
Model 5	0.5		0.05	-	-	17	-
Model 6				3	-	-	0.07
Model 7				-	18	-	-
Model 8				-	18	-	0.07

3.3.KAVRAMSAL MODEL KURULUMU

Bu bölümde göl-akifer etkileşimi üzerinde etkin olan parametrelerin etki miktarı ve alanını incelemek üzere büyüklüğü havza ölçeğinde olan kavramsal bir göl-akifer modeli oluşturulmuştur. Kavramsal modellerde toprak tipi parametrelerinin değerleri, literatürden ve önceki saha çalışmalarından yola çıkarak doğal zemin karakteristiğini yansıtacak şekilde belirlenmiştir.

Kavramsal model yine MODFLOW-2000 ile oluşturulmuştur. Modelin kurulum aşamaları aşağıda adım adım açıklanmıştır:

- Akifer alanı 1x1 km^2 olarak modelde tanımlanmıştır. Hücre boyutları 10x10 m olacak şekilde alan bölünmüştür.
- Akifer kalınlığı 10 m'dir. Modelde akifer, serbest yüzeyli ve tek katman olarak tasarlanmıştır. Göl alanının tanımı için LAK3 paketinde koşullara uygun olarak ikinci bir katman oluşturulmuştur. Buna göre alt katman kalınlığı 1 m, üst katman kalınlığı ise 9 m olarak boyutlandırılmıştır.

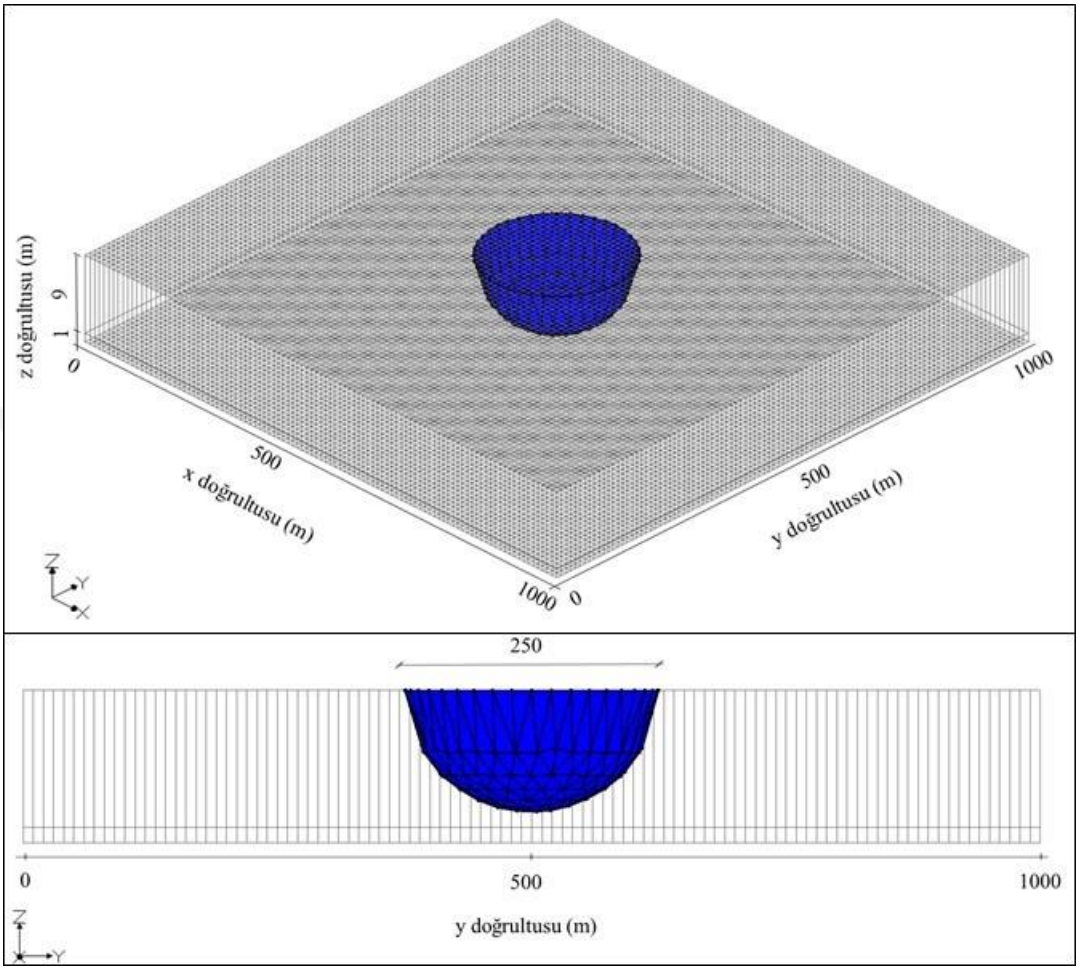
- Akifer boyutlarını tanımladıktan sonra temel paket (Basic Package) penceresinde ilk olarak akım tipi kararsız akım olarak belirlenmiştir. Simülasyon için zaman adımı ve uzunluğu tanımlanmıştır. Bu parametreler her model için farklı değer almıştır.
- Göl-akifer sisteminde yeraltı suyu hareketinin simülasyonunun yapılabilmesi için, kaynak ve kayıpların yanı sıra göl yatağı ve akifer özelliklerinin belirlenmesine ihtiyaç vardır. Bu özelliklerin tanımlanması için Akım (Flow) paketi, Çözücü (Solver) paketi ve Sınır Koşulları (Boundry Conditions) paketleri kullanılmıştır.
- Yeraltı suyu akımı hesabı için Katman Özelliği Akımı (Layer Property Flow) (LPF) paketinde akifer karakteristiklerini temsil eden yatay iletkenlik (K_h), düşey iletkenlik (K_v), özgül depolama katsayısı (S_s) ve özgül verimlilik değeri (S_y) tanımlanmıştır. Serbest yüzeyli akifer tanımlayabilmek için katman tipi olarak Çevrilebilir (Convertible) seçilmiştir. Sistem izotropik olarak tanımlanmıştır. Kuruyan akifer hücrelerinin yeniden ıslanabilmesi için 'Allow wetting of cells' seçeneği aktif edilerek ıslanma yönü (wet/dry flag) değeri atanmıştır. Kuruyan akifer hücrelerinin tabandan ıslanabilmesi için bu değer -1 alınmıştır. Akifer parametrelerinin değerleri Tablo 3.4'de görülmektedir.

Tablo 3-4: Kavramsal modelde akifere ait parametre değerleri.

Parametre	Değer
Yatay hidrolik iletkenlik K_x (m/gün)	1
Özgül depolama katsayısı S_s (1/m)	$1x10^{-4}$
Özgül verimlilik değeri S_y	0.21
Porozite n	0.3
Hücrenin ıslanma yönü (Wet/Dry Flag)	-1

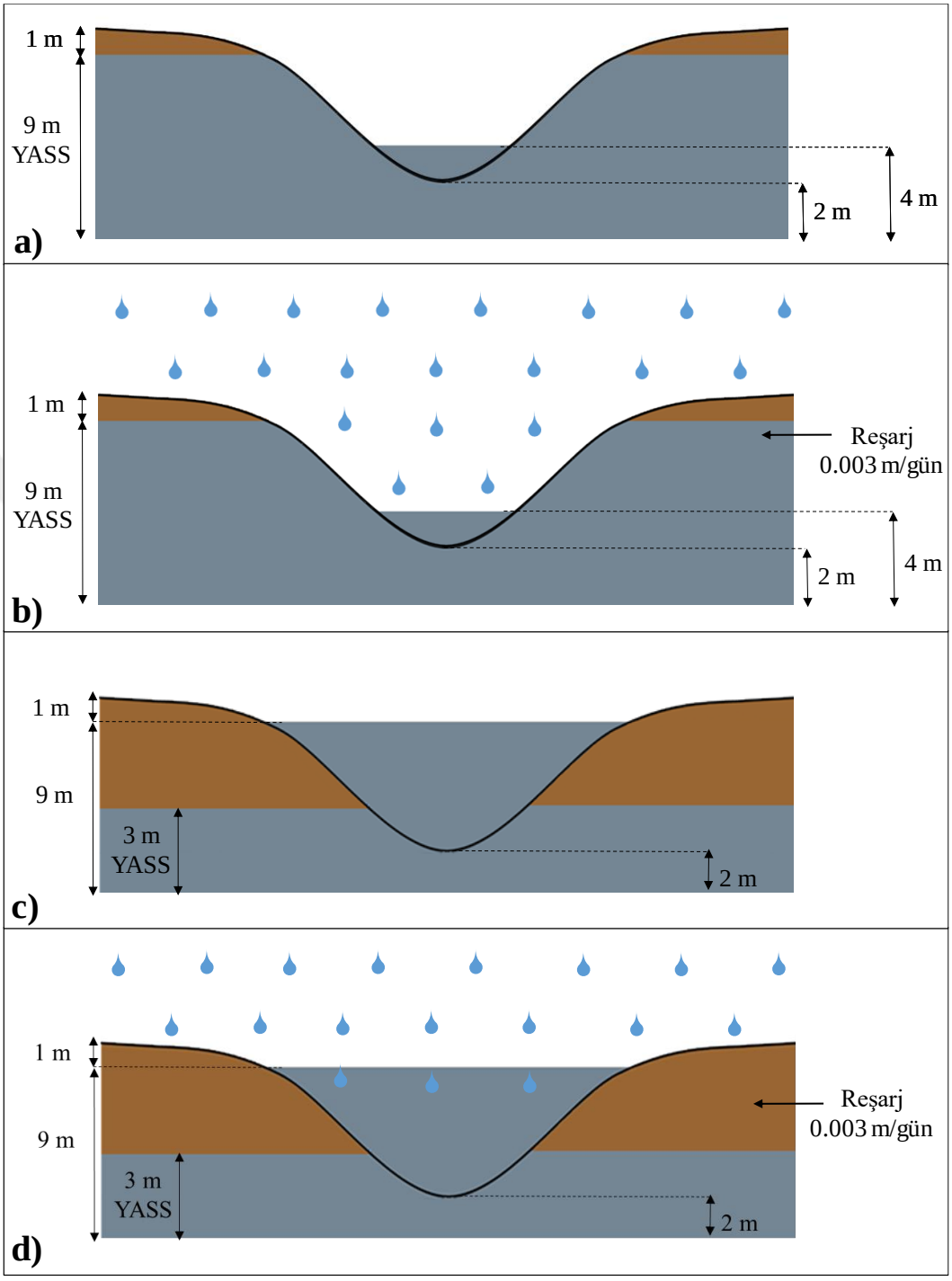
- Sayısal modellemede yüzey suyunun temsil edilebilmesi için göl bölgesinde sınır koşulu olarak LAK3 paketi kullanılmıştır. Modelde göl çanağının tanımı için 250 m çapında 8 m yüksekliğinde yarım elipsoid bölge içinde üçgenleştirilmiş düzensiz ağ (TIN) şeklinde ile hücreler oluşturulmuştur.
- Modelde göl yüzey alanı yaklaşık 48000 m^2'dir. Göl çanağı içinde başlangıç su seviyesi, minimum ve maksimum su yüksekliği ve sızıntı (leakance) değerleri Göl (Lake)

paketinde tanımlanmıştır. Lake paketine tanımlanan göl parametreleri, incelenen modellere göre değişmektedir.

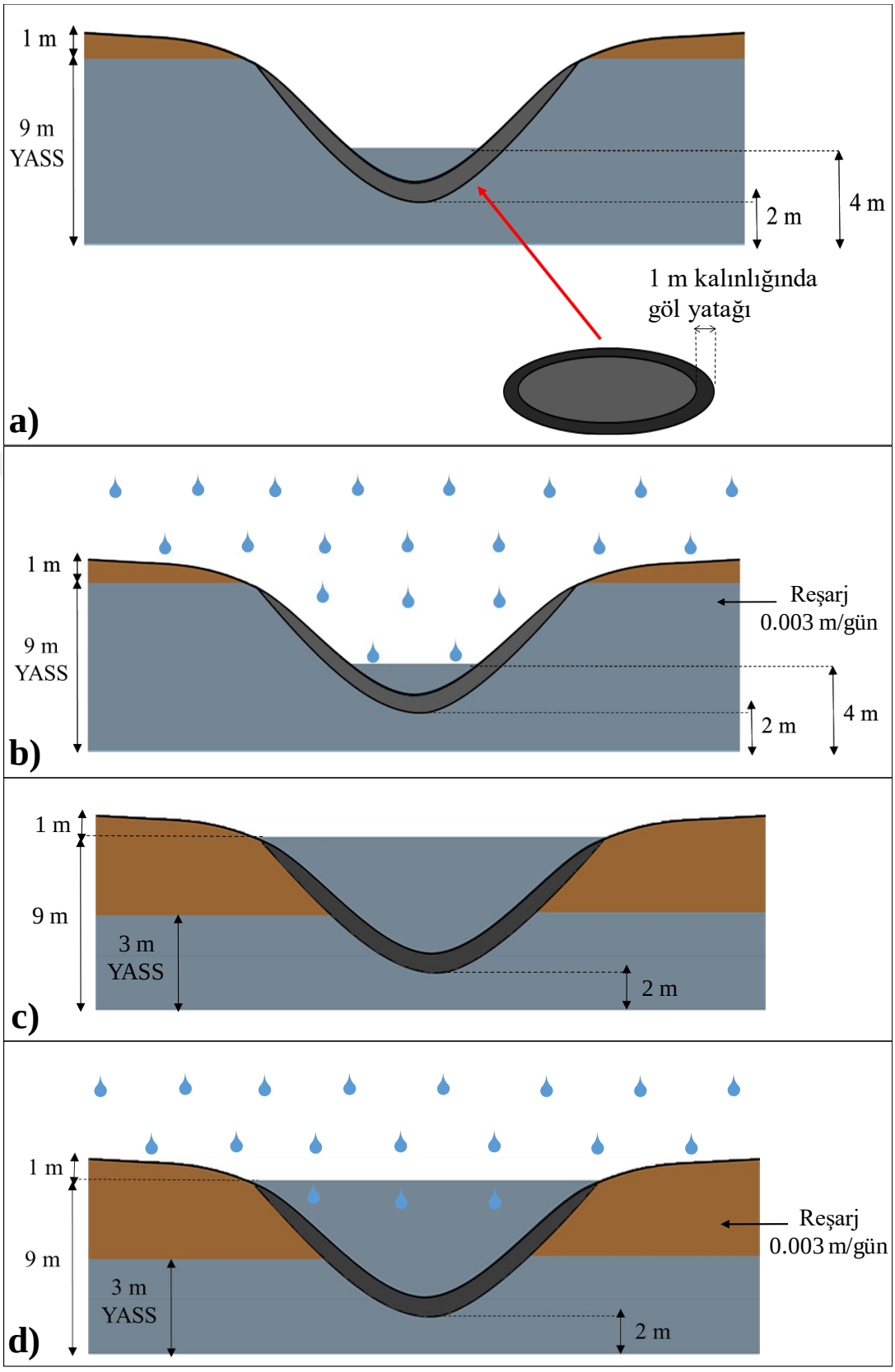


Şekil 3.20: Kavramsal model akifer.

- Yağış anındaki etkileşimin sayısal modeli için Reşarj (Recharge) (RCH) paketi kullanılmıştır. Yağış değeri göl hücrelerine doğrudan tanımlanırken yağış nedeniye yüzeyde oluşan sızmayı tanımlamak için akiferin yüzey boyunca oluşturulmuş hücrelerinde RCH paketi aktif hale getirilerek ilgili değer girilmiştir.
- Çözücü (Solver) olarak yapılan ön simülasyonlar sonucu en uygun yöntem olarak PCG seçilmiştir. Burada iç iterasyon sayısı 50, dış iterasyon sayısı ise 25 olarak tanımlanmıştır.
- Çıktı Kontrolü (Output Control) seçeneği olarak Ölçü (Gage) paketi aktif hale getirilmiştir. Göl seviyesi, yüzey alanı, sızan su miktarı gibi belirli değişkenlerin simülasyon sonuçları oluşan çıktı dosyasından okunmuştur.



Şekil 3.21: (a) Kavramsal Model I, (b) Kavramsal Model II, (c) Kavramsal Model III, (d) Kavramsal Model IV.



Şekil 3.22: (a) Kavramsal Model V, (b) Kavramsal Model VI, (c) Kavramsal Model VII, (d) Kavramsal Model VIII.

Parametrelerin etkilerini analiz etmek üzere farklı senaryolar oluşturulmuştur. Bu modellere ait bilgiler Tablo 3-5'de sunulmuştur.

Tablo 3-5: Kavramsal model senaryoları.

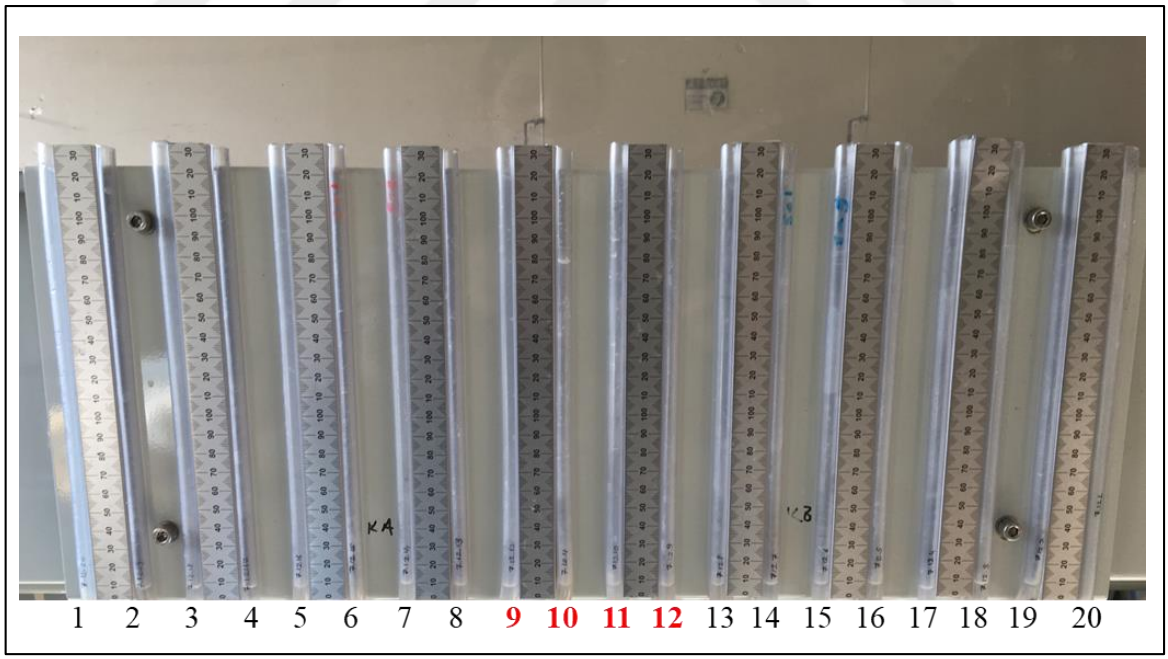
Model No	**Göl Yatağı Kalınlığı *b* (m)**	**Göl Yatağı Hidrolik İletkenliği K_{yatak} (m/gün)**	**Sızıntı (Leakance) (1/m)**	**Yeraltı Suyu Seviyesi YASS (m)**	**Göl Su Seviyesi (m)**	**Reşarj (m/gün)**
Model 1	~ 0	0.01	$1x10^6$	9	4	-
Model 2				9	4	0.003
Model 3				3	9	-
Model 4				3	9	0.003
Model 5	1		0.01	9	4	-
Model 6				9	4	0.003
Model 7				3	9	-
Model 8				3	9	0.003

4. BULGULAR

Bu bölümde tez kapsamında yapılmış olan deneylerden ve deney düzeneğini temsil eden sayısal modellerden elde edilen bulgular sunulmuş ve sonrasında elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. İlaveten, MODFLOW ile kurulmuş olan kavramsal modeller ile elde edilen bulgular sunulmuştur.

4.1. DENEYSEL BULGULAR

İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa İnşaat Mühendisliği Bölümü Hidrolik Laboratuvarı'nda Hidroloji Deney Düzeneği ile gerçekleştirilen 8 adet deney çıktısı bu bölümde sunulmuştur. Yapılan deneylerde zamana bağlı olarak değişen yeraltı su seviyesi değerlerinin okunduğu piyezometrelerin fotoğrafları verilmiştir. Ayrıca, deneylerin kendi aralarında kıyaslaması grafikler halinde sunulmuştur. Piyezometreler Şekil 4.1'de görüldüğü gibi numaralandırılmıştır ve grafiklerde bu şekilde yatay eksende numara ile belirtilmiştir. Orta bölgedeki 9, 10, 11 ve 12 numaralı piyezometreler gölün bulunduğu bölgede yer alır.

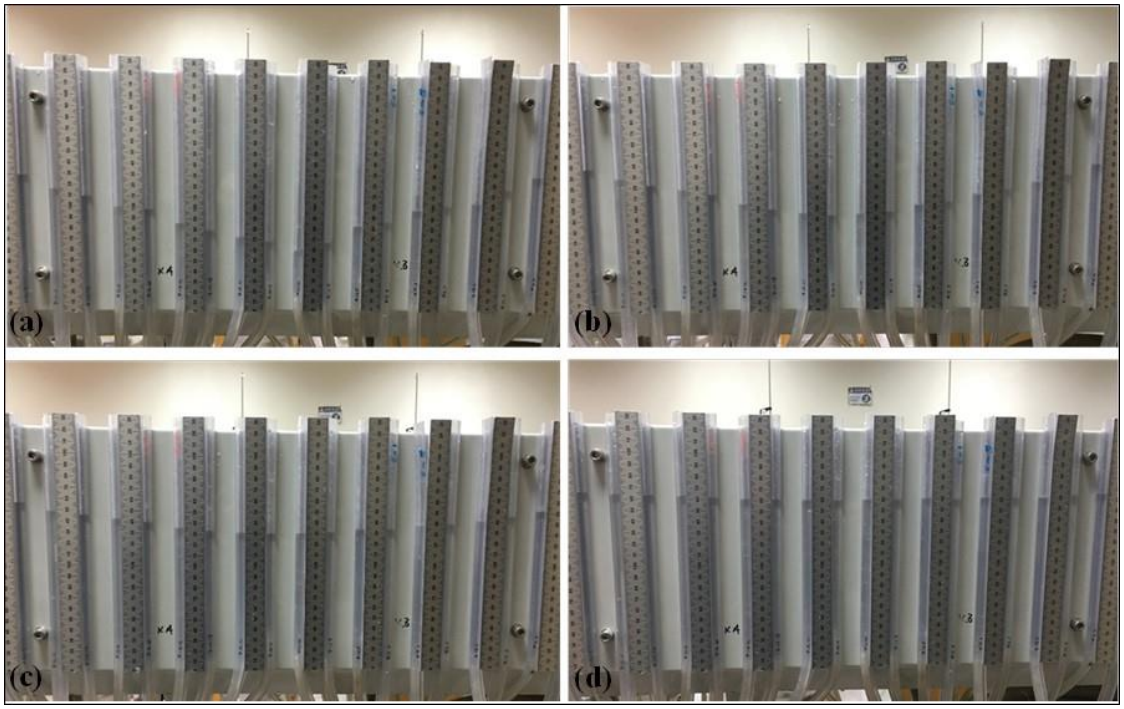


Şekil 4.1: Piyezometrelerin numaralandırılması.

4.1.1. Deney I

Şekil 4.2'de Deney I sırasında farklı zamanlarda okunmuş piyezometre değerleri görülmektedir. Her iki uçtan sabit yük ile beslenen akifer gölü beslemiştir. Suyun akiferde dağılım hızının zamana ve konuma göre değiştiği görülmektedir. Akiferin sabit su kaynağı tarafından beslenen sınırlarında yeraltı su seviyesi hızlı yükselmiştir. Bu sınırlardan orta kısma yani göle doğru yaklaştıkça piyezometrelerde su seviyesi yükselmesi yavaşlamış yani akiferde su ilerleme hızı düşmüştür. Ayrıca zaman ilerledikçe akifer doygun hale geldiği için piyezometrelerde su seviyesi yükselmesi giderek yavaşlamış ve akım kararlı hale ulaşınca yeraltı su seviyesi sabitlenmiştir.

Şekilde görüldüğü üzere deney başladıktan 17 dakika sonra göle yakın piyezometrelerde yükselme 6.5 cm seviyelerine ulaşmışken 30.dakikada gölün bulunduğu noktada piyezometrede su 9.5 cm seviyesine çıkmıştır. Su seviyesindeki yükselme ilk dakikalara kıyasla düşük hızda devam etmiştir. 62. dakikada gölde su seviyesi 13 cm'ye ulaşmıştır. Sistemin kararlı duruma yaklaştığı 137. dakikada akiferin su kaynağına yakın noktalarında su seviyesi 17 cm iken gölde 16 cm'dir. Sistemin kararlı hale gelip tüm noktalarda su seviyesinin 17 cm'ye ulaşması 4 saat sonunda gerçekleşmiştir.

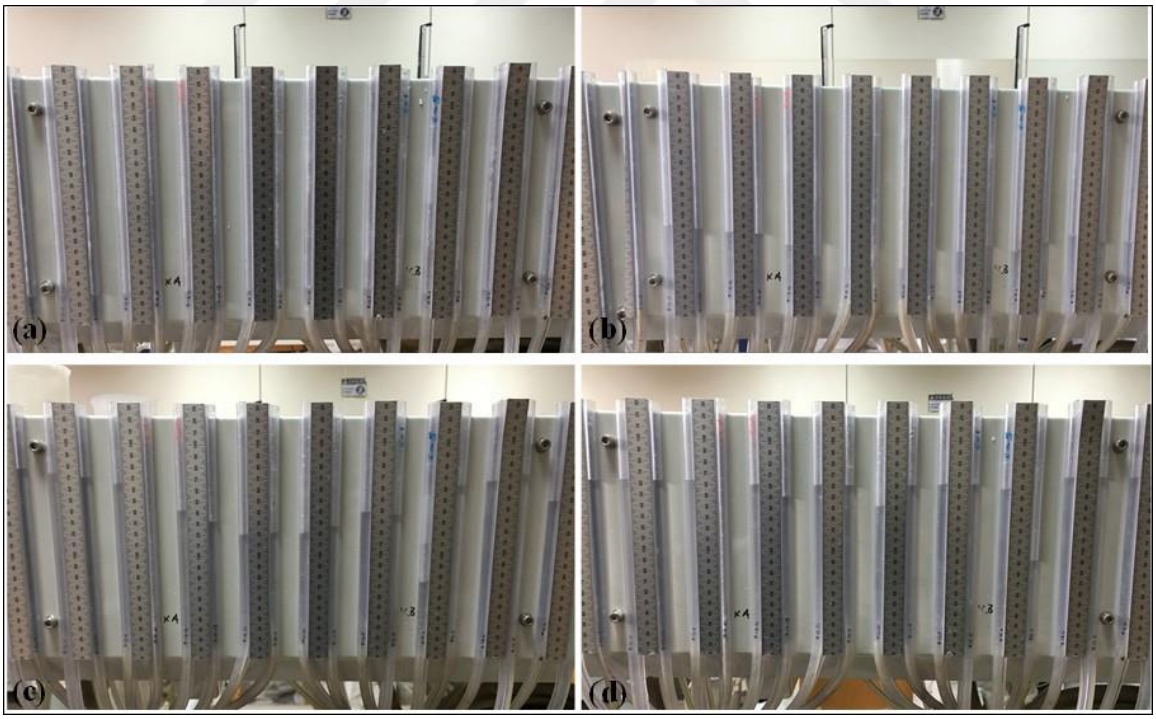


Şekil 4.2: Deney I'e ait zamana bağlı yeraltı su seviyesi değerlerini gösteren piyezometreler (a) 17. dakikada YASS, (b) 30. dakikada YASS, (c) 62. dakikada YASS, (d) 137. dakikada YASS.

4.1.2. Deney II

Şekil 4.3'de Deney II için piyezometre değerleri deneyin başlangıç anından kararlı duruma ulaştığı ana kadar çeşitli zamanlar için gösterilmektedir. Deneyde başlangıç koşulu olarak yeraltı suyu seviyesi tüm noktalarda 3 cm'dir (Şekil 4.3-a). Yağış başladığı andan itibaren su hızlı bir şekilde yükselmeye başlamıştır. 1. dakikada gölde su seviyesi 5 cm iken akiferin göle uzak noktalarında 9.4 cm değerine yükselmiştir. Su yüksekliğinin akifer sınırlarında 7. dakikada 18 cm'ye ulaştığı anda yüzeysel akış oluşmaması için yağış durdurulmuştur. Yağış kesildiği anda gölde su seviyesi 12.3 cm'dir.

Su yükseliş hızı akiferde ve gölde farklılık göstermiştir. Gelen yağış akiferin gözeneklerini doldurup hızlı bir şekilde yükselirken gölde düşük hızda yükselmiştir. Göl ilk 7 dakika boyunca hem yağmur hem de akifer tarafından beslenirken yağış kapatıldıktan sonra sadece akifer tarafından beslenmeye devam etmiştir. Deney 40. dakikada 16 cm seviyelerinde kararlı duruma ulaşmıştır.

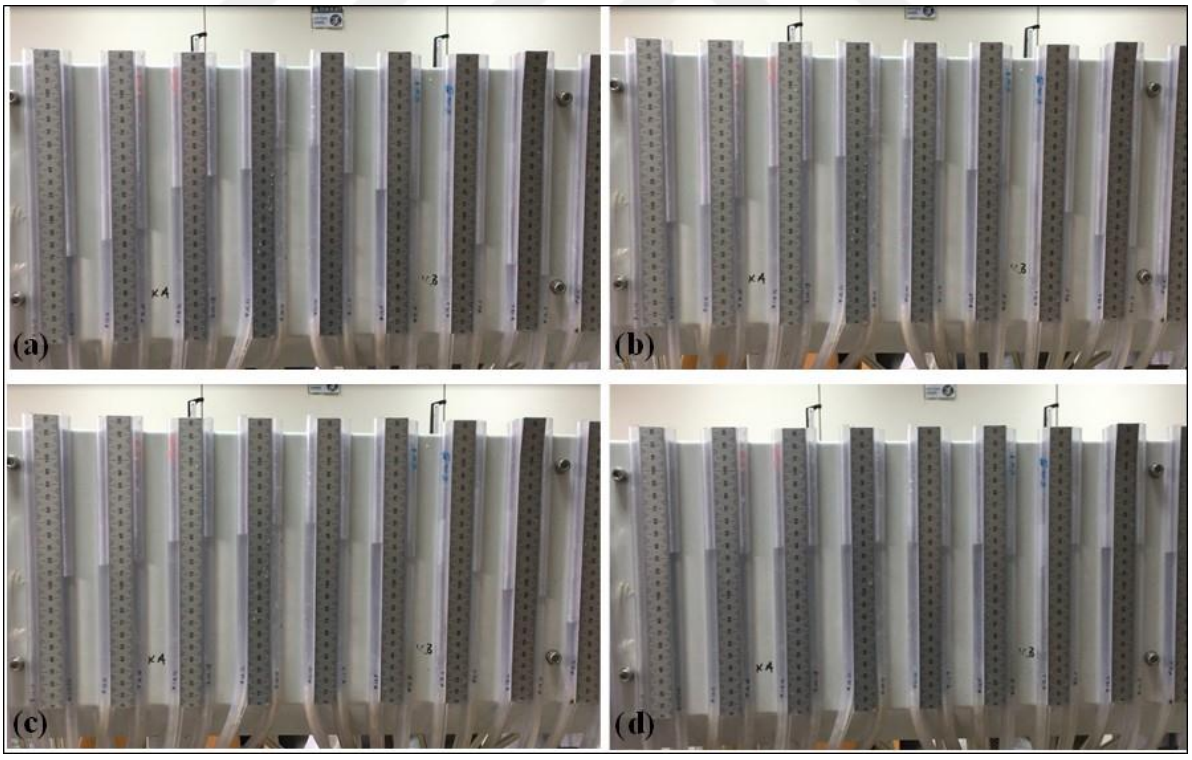


Şekil 4.3: Deney II'ye ait zamana bağlı yeraltı su seviyesi değerlerini gösteren piyezometreler (a) Başlangıç koşulu YASS 3 cm, (b) 1. dakikada YASS, (c) 7. dakikada YASS, (d) 40. dakikada YASS.

Dengeye ulaştıktan sonra zamanla suyun çökmesi için bir süre daha gözlem devam etmiş, ancak düzenek doğadaki akiferlere kıyasla çok küçük olması nedeniyle su seviyesinde herhangi bir alçalma görülmemiştir.

4.1.3. Deney III

Göl tarafından beslenen akiferde suyun zamana bağlı yüksekliği Şekil 4.4'de görülmektedir. Gölde 15 cm yüksekliğindeki 11 lt su, kuru akifere hızlı bir şekilde dağılmaktadır. Bu iletim hızı deney süresini oldukça kısaltmıştır. Başlangıçta göl üst kotu 18 cm iken deney başladıktan 2 dakika sonra gölün orta noktasında su seviyesi yaklaşık olarak 16 cm, göl kıyısında 13 cm'ye düşmüş, akifer sınırlarında 2.3 cm'ye yükselmiştir. Göl suyu 2 dakika içerisinde her noktada seviyeyi yükseltecek kadar hızlı iletilmiştir. Bu duruma yer çekiminin etkisi bulunmaktadır. 3. dakikada gölde su seviyesi 15.5 cm, akifer sınırlarında yaklaşık 4.3 cm yüksekliktedir. Zamanla göl su seviyesi alçalıp akifer su seviyesi yükselmiş ve kararlı duruma ulaşana kadar devam etmiştir.

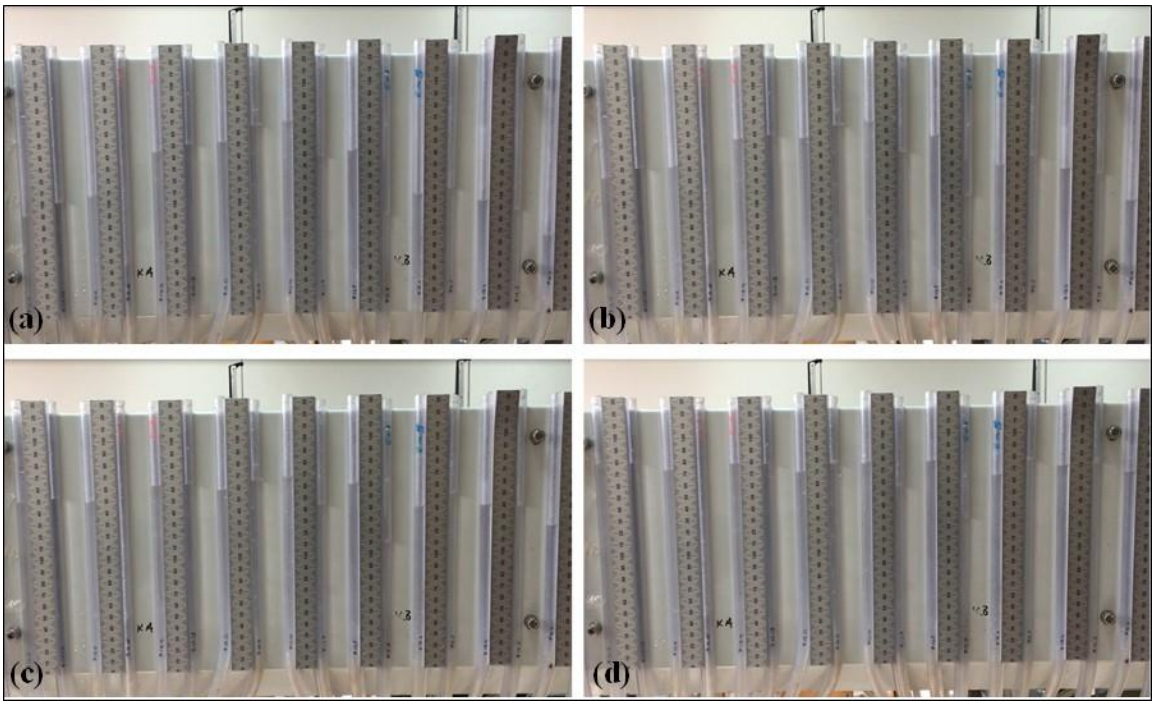


Şekil 4.4: Deney III'e ait zamana bağlı yeraltı su seviyesi değerlerini gösteren piyezometreler (a) 2. dakikada YASS, (b) 3. dakikada YASS, (c) 5. dakikada YASS, (d) 23. dakikada YASS.

Akifer beslenmeye devam ederken doygun hale geldikçe su seviyesi ilk dakikalara kıyasla daha yavaş bir şekilde yükselmeye devam etmiştir. 5. dakikada gölde su 15 cm seviyesinde iken akifer sınırında 7 cm'dir. Deney 23. dakikada yaklaşık 14 cm'de kararlı duruma ulaşmıştır.

4.1.4. Deney IV

Gölün akiferi yağış altında beslediği Deney IV'e ait zamana bağlı su seviyesi değerleri Şekil 4.5'de verilmiştir. Yer çekimi etkisiyle göldeki suyun akifere hızlı bir şekilde dağılmasına ek olarak yağış eklenmesiyle kısa sürede kararlı duruma ulaşılmıştır. Deney başlangıcından 2 dakika sonra gölde su seviyesi 16.5 cm iken akiferin sınırlarında 9 cm'dir. Düzenekte göl bölgesi akifere kıyasla daha az yağış almaktadır. Bu nedenle 2, 3 ve 4. dakikalarda göl su yüksekliği değeri yaklaşık olarak aynı değerdedir. Akifer sınırlarında su seviyesi 3. dakikada 12.6 cm ve 4. dakikada 15 cm olarak okunmuştur. Yeraltı suyunun yükselme hızı, yağış etkisiyle aynı hızda devam etmiştir. 7.5 dakikaya gelindiğinde neredeyse tüm noktalarda yeraltı suyu 18 cm değerine ulaşmış ve yağış kapatılmıştır. Zamanla suyun zeminde çökmesini gözlemlemek üzere bir süre gözlem devam etmiş ancak akifer çok ince olduğu için bir değişim meydana gelmemiştir.

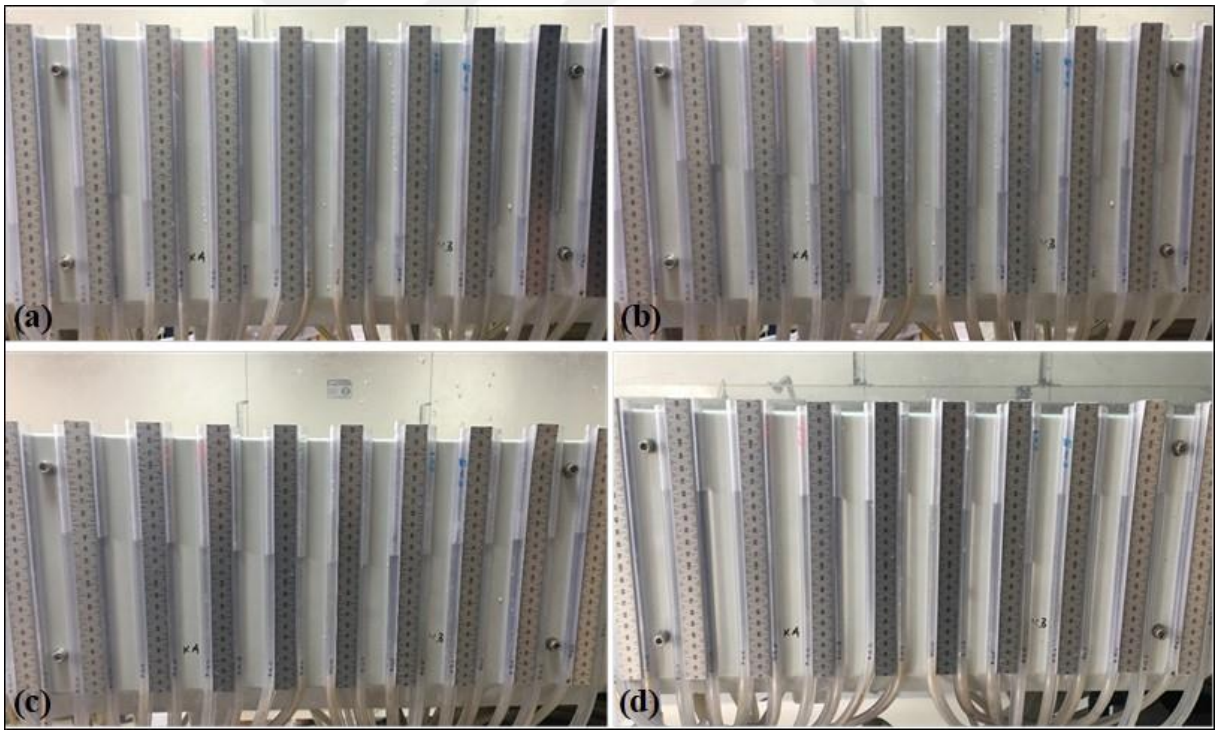


Şekil 4.5: Deney IV'e ait zamana bağlı yeraltı su seviyesi değerlerini gösteren piyezometreler (a) 2. dakikada YASS, (b) 3. dakikada YASS, (c) 4. dakikada YASS, (d) 7.5. dakikada YASS.

4.1.5. Deney V

Deney I sistemine göl yatağı dahil edilerek gerçekleştirilen Deney V'e ait farklı zamanlarda okunmuş piyezometre değerleri Şekil 4.6'da verilmiştir. İlk deneyde olduğu gibi suyun akiferde dağılım hızının zamana ve konuma göre değiştiği görülmektedir. Bu değişimin hızı göl yatağı faktörü nedeniyle Deney I'e göre farklılık göstermektedir.

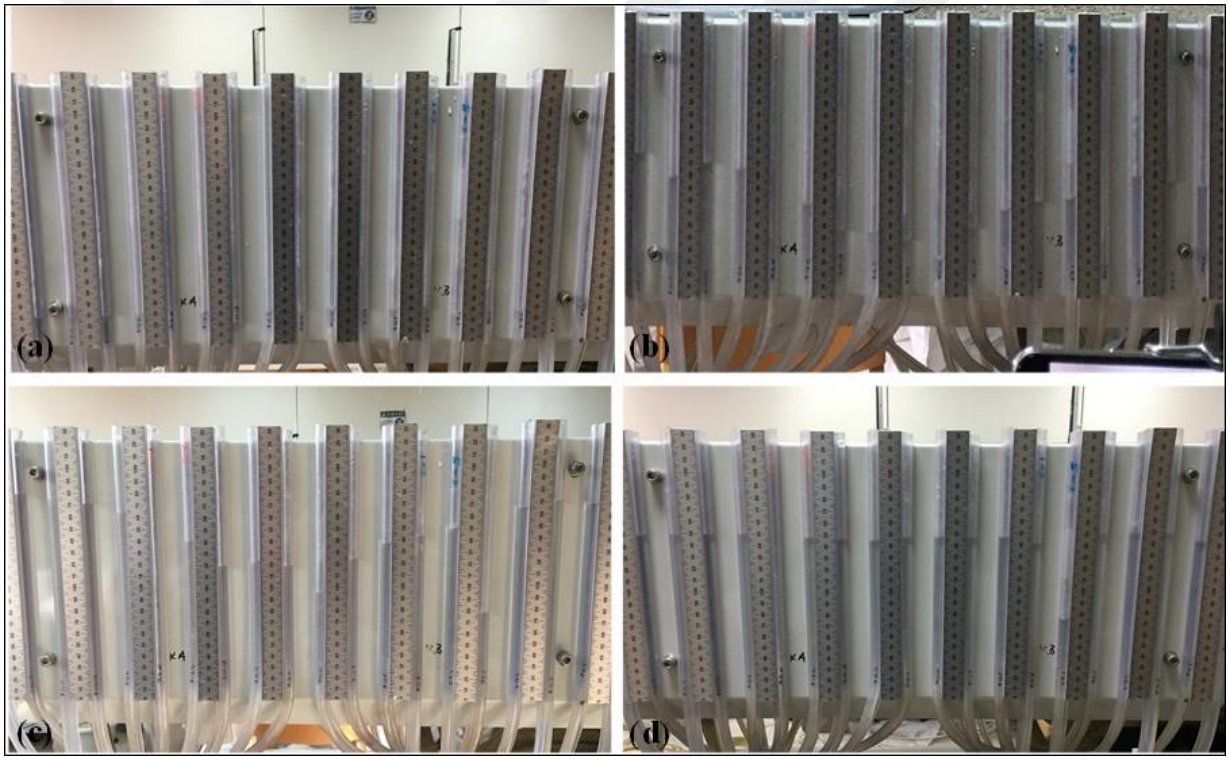
Şekilde görüldüğü üzere deney başladıktan 17 dakika sonra göle yakın piyezometrelerde su seviyesindeki yükselme 6 cm'ye ulaşırken 30. dakikada gölün bulunduğu noktada 8-8.5 cm'ye çıkmıştır. Su seviyesindeki yükselme ilk dakikalara kıyasla düşük hızda devam etmiştir. 62. dakikada gölde su seviyesi 12 cm'ye ulaşmıştır. 137. dakikada göldeki su seviyesi 15 cm iken akifer sınırlarında 16.4 cm'dir. Yeraltı suyu akımının kararlı hale gelmesi ve göl-akifer sisteminde tüm noktalarda yeraltı suyu seviyesinin 17 cm'de sabitlenmesi, göl yatağı olması nedeniyle 4 saatten daha uzun sürede gerçekleşmiştir.



Şekil 4.6: Deney V'e ait zamana bağlı yeraltı su seviyesi değerlerini gösteren piyezometreler (a) 17. dakikada YASS, (b) 30. dakikada YASS, (c) 62. dakikada YASS, (d) 137. dakikada YASS.

4.1.6. Deney VI

Deney II sistemine göl yatağı dahil edilerek gerçekleştirilen Deney VI'ya ait piyezometre değerleri başlangıç anından dengeye ulaştığı ana kadar Şekil 4.7'de görülmektedir. 1. dakikada gölde su seviyesi 4.7 cm iken akiferin sınırlarına doğru 10-11 cm değerine yükselmiştir. Akiferde suyun, göle kıyasla daha hızlı yükselmesi üzerine göl hem yağış hem de akifer tarafından beslenmektedir. Yaklaşık 7. dakikada akifer sınırlarında su seviyesi 18 cm'ye ulaşmış ve yağış durdurulmuştur. Bu anda göl seviyesi 11.2 cm değerindedir. Göl, kararlı duruma ulaşana kadar akifer tarafından beslenmeye devam etmiştir. Deneyde 40. dakikada, yeraltı suyu seviyesi yaklaşık 15 cm'de iken kararlı duruma ulaşılmıştır.

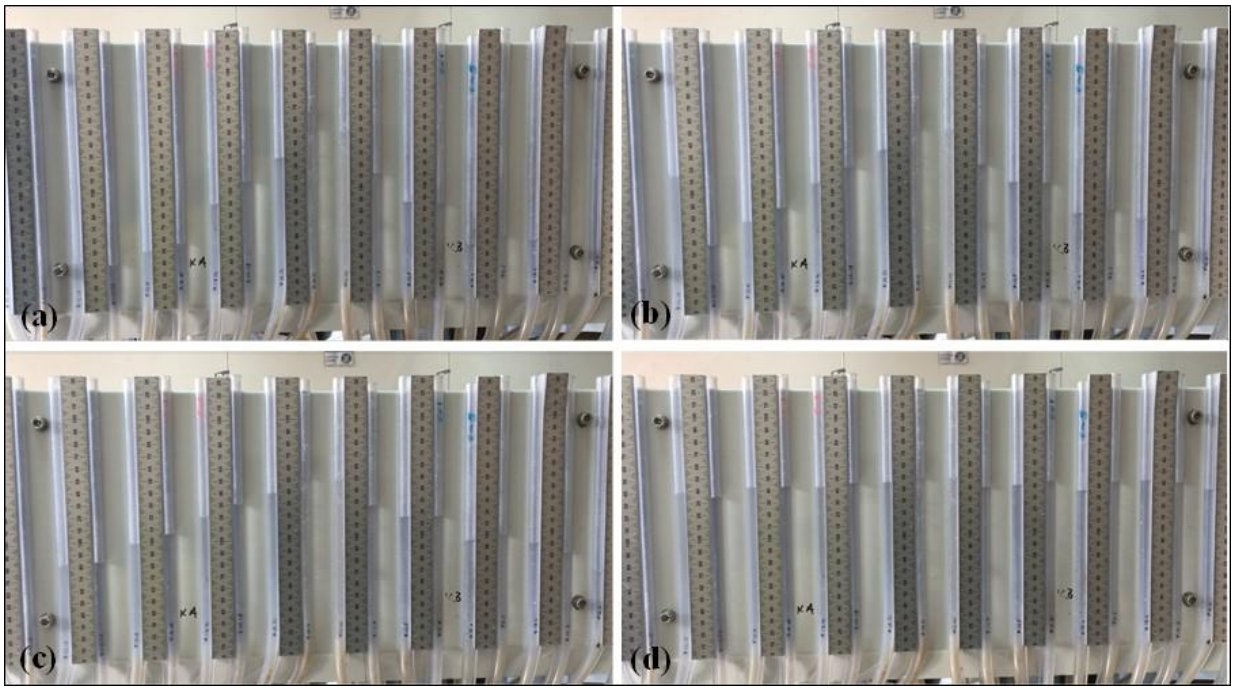


Şekil 4.7: Deney VI'ya ait zamana bağlı yeraltı su seviyesi değerlerini gösteren piyezometreler (a) Başlangıç koşulu 3 cm YASS, (b) 1. dakikada YASS, (c) 7. dakikada YASS, (d) 40. dakikada YASS.

4.1.7. Deney VII

Deney III sistemine göl yatağı dahil edilerek gerçekleştirilen Deney VII'e ait farklı zamanlarda okunmuş piyezometre değerleri Şekil 4.8'de verilmiştir. Deney başladıktan 2 dakika sonra gölde su seviyesi 16 cm, göl kıyısında yaklaşık 11 cm ve akifer sınırlarında 2 cm değerindedir. Zamanla göl seviyesi alçalmış, akifer su seviyesi yükselmiştir. 3. dakikada gölde su yüksekliği

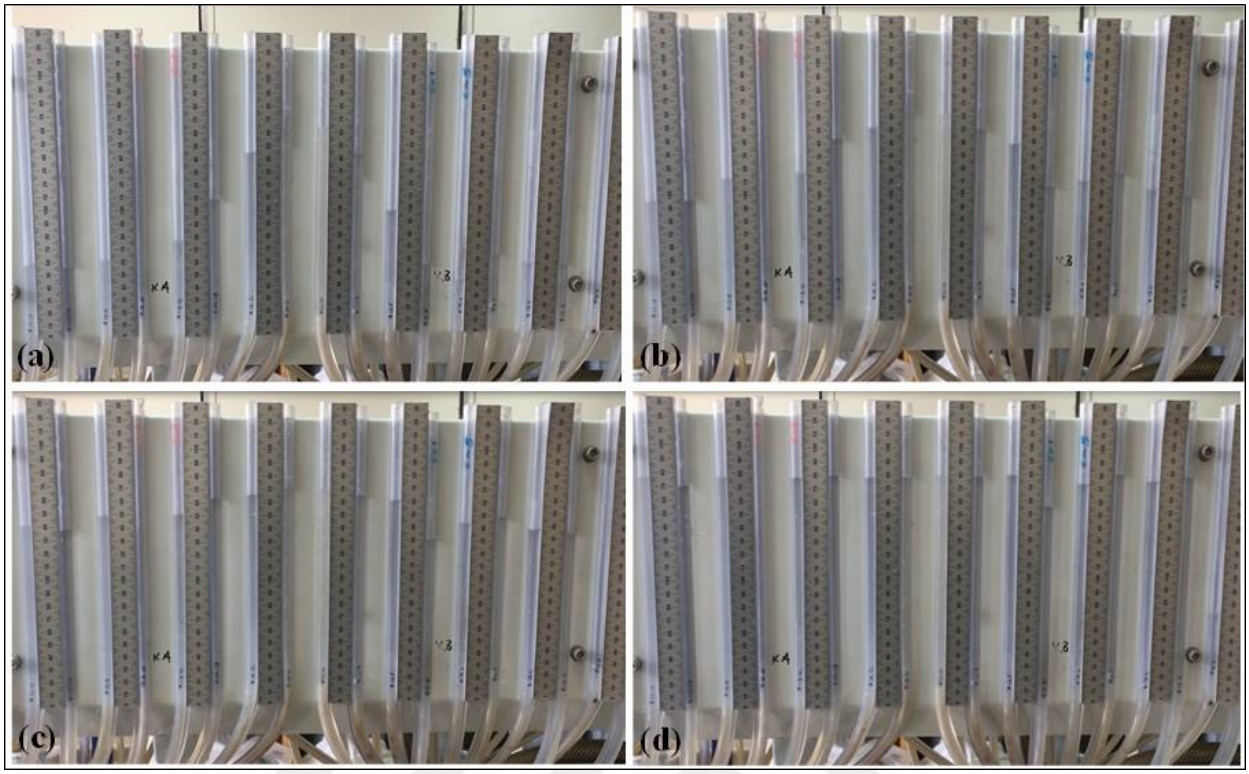
15.5 cm, göle uzak noktalarda yaklaşık 4.2 cm yüksekliktedir. Su dağılımı hızı zamanla düşmüştür. 5. dakikada gölde su 15.3 cm seviyesinde iken akifer sınırında 6.5 cm'dir. 23. dakikaya gelindiğinde gölde su yüksekliği 15 cm olup akifer sınırlarında 13 cm değerindedir ve deney henüz kararlı duruma ulaşmamıştır.



Şekil 4.8: Deney VII'ye ait zamana bağlı yeraltı su seviyesi değerlerini gösteren piyezometreler (a) 2. dakikada YASS, (b) 3. dakikada YASS, (c) 5. dakikada YASS, (d) 23. dakikada YASS.

4.1.8. Deney VIII

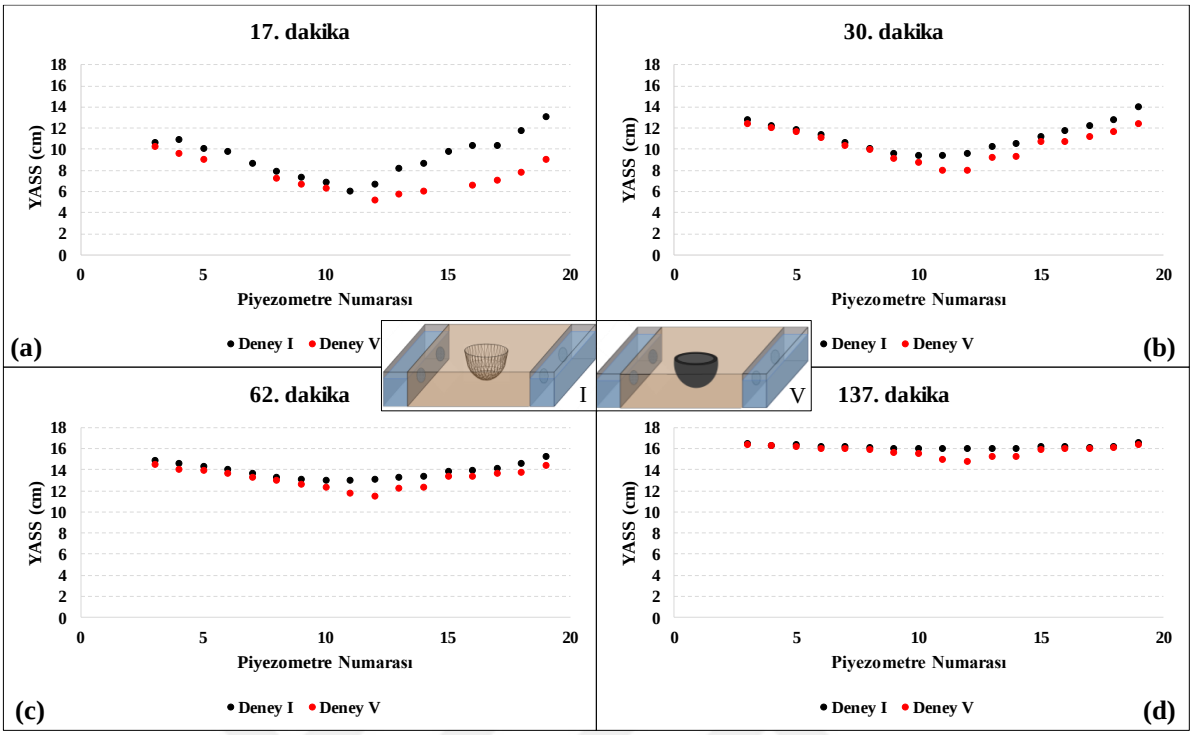
Deney IV sistemine göl yatağı dahil edilerek gerçekleştirilen Deney VIII'e ait farklı zamanlarda okunmuş piyezometre değerleri Şekil 4.9'da verilmiştir. Deney IV'de olduğu gibi dolu göl ve yağışın etkisiyle su akiferde hızlı bir şekilde dağılmıştır. Şekil 4.9-a'da görülen 2. dakikaya göre göl yatağı, gölden akifere akışı bir miktar engellemiş ve yeraltı suyu yağış etkisiyle yükselmiştir. Bu anda gölde su seviyesi 16.5 cm iken akiferin sınırlarında 5.4 cm'dir. 3. dakikada gölde su seviyesi yine 16.5 cm iken akiferde 9.5 cm'ye yükselmiştir. 4. dakikada göl su seviyesi 17 cm, akifer sınırında 13.3 cm'dir. 7.5. dakikaya gelindiğinde göl su seviyesi 18 cm'ye yükselmiş olup akifer sınırlarında 17 cm'dir ve henüz kararlı duruma ulaşılmamıştır.



Şekil 4.9: Deney VIII'e ait zamana bağlı yeraltı su seviyesi değerlerini gösteren piyezometreler (a) 2. dakikada YASS, (b) 3. dakikada YASS, (c) 4. dakikada YASS, (d) 7.5. dakikada YASS.

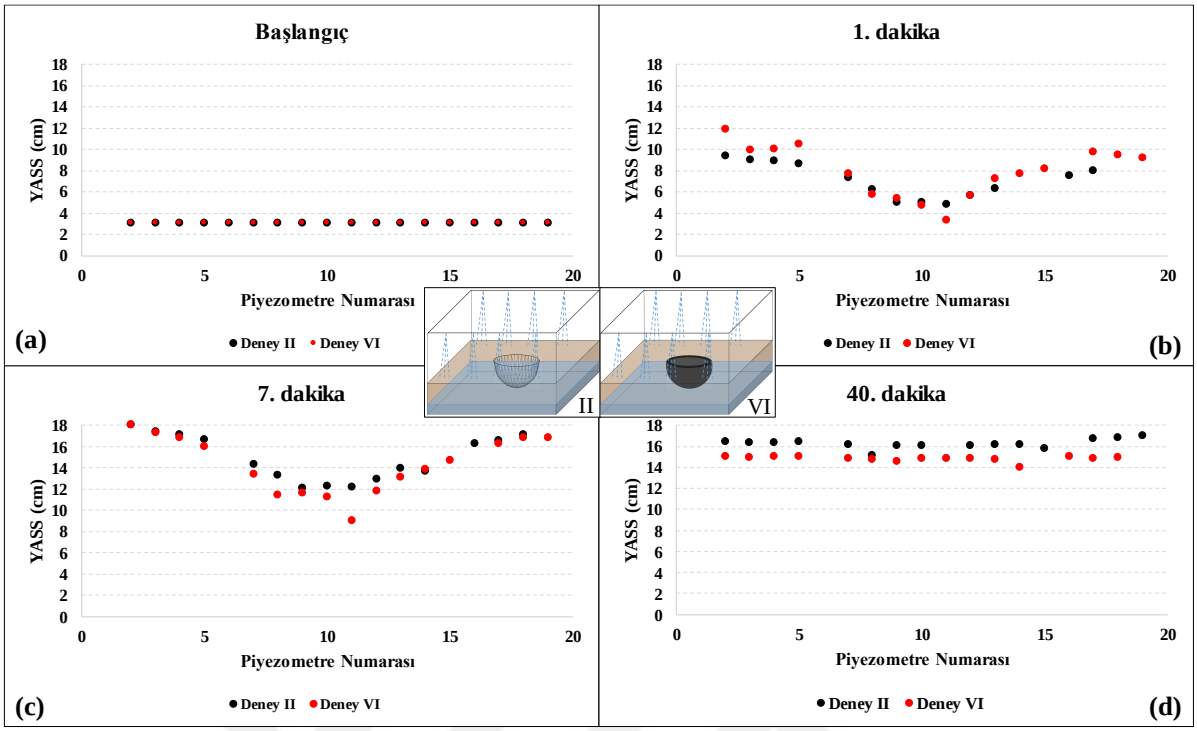
4.1.9. Deneysel Bulguların Karşılaştırması

Deney I ve Deney V'e ait farklı zamanlarda ölçülmüş yeraltı su seviyeleri karşılaştırmalı olarak Şekil 4.10'da verilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere göl yatağı etkisiyle Deney V'deki yeraltı su seviyesi okumaları Deney I'deki yeraltı su seviyesi okumalarına göre aşağıda kalmaktadır. Deney başlangıcında Şekil 4.10-a'da görüldüğü üzere Deney I ile Deney V arasındaki yeraltı su seviyesi farkı daha belirgin iken zaman ilerledikçe iki deney sırasında okunan yeraltı su seviyesi birbirine yakınlaşmıştır. Ancak gölün bulunduğu bölgede ilerleyen zaman diliminde de farklılık devam etmiştir. 17. dakikada Deney I'de gölde su seviyesi 7 cm, Deney V'de ise 6 cm olarak okunmuştur. Kararlı duruma yaklaşıldığında Deney I'de su seviyesi göl bölgesinde 16 cm iken Deney V'de 15 cm olarak gözlenmiştir. Buna istinaden göl yatağı bulunduğu durumda akiferin gölü besleme miktarı, göl yatağının bulunmadığı duruma göre daha az miktarda olduğu anlaşılmıştır.



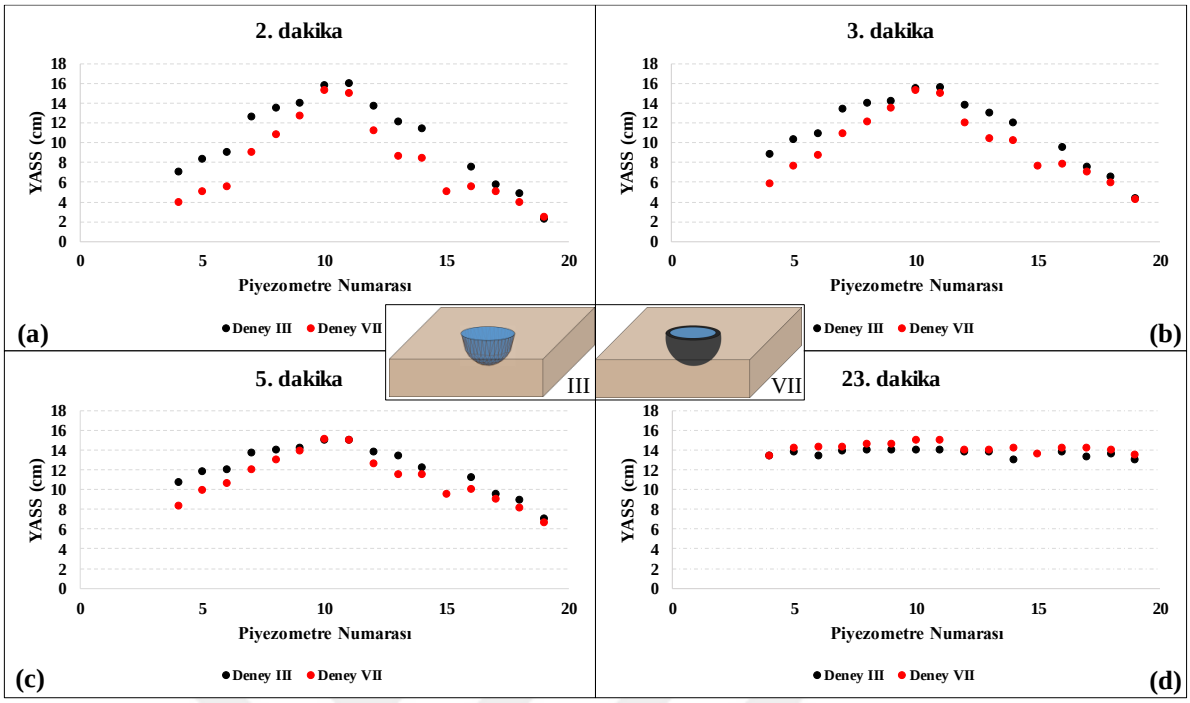
Şekil 4.10: Deney I ve Deney V'in farklı zamanlara ait piyezometre değerlerinin karşılaştırması (a) 17. dakika, (b) 30. dakika, (c) 62. dakika, (d) 137. dakika.

Deney II ve Deney VI'ya ait farklı zamanlarda ölçülmüş yeraltı su seviyeleri karşılaştırmalı olarak Şekil 4.11'de verilmiştir. Başlangıç koşulu ve yağış miktarı iki deneyde de aynıdır ancak Deney VI'da göl yatağının dahil edilmesiyle su seviyelerinde farklılıklar yaşanmıştır. Yatak nedeniyle akiferden göle akış daha az miktarda olmuştur. Bu da akifer sınırlarında su seviyesinin Deney II'ye göre daha hızlı yükselmesine neden olmuştur. Deney VI'da 1. ve 7. dakikalarda akiferin sınır kısımlarında su Deney II'ye kıyasla daha yüksek, göl bölgesinde daha alçak seviyededir. Göl yatağının olduğu deneyde ise akifer sınırları daha hızlı 18 cm'ye ulaştığı için yağış süresi diğer deneyden kısadır. Yani göl yatağının olduğu deneyde sisteme daha az su girişi olmuştur. Sistemin dengeye ulaştığı 40. dakikada görülen fark bundan kaynaklanmaktadır.



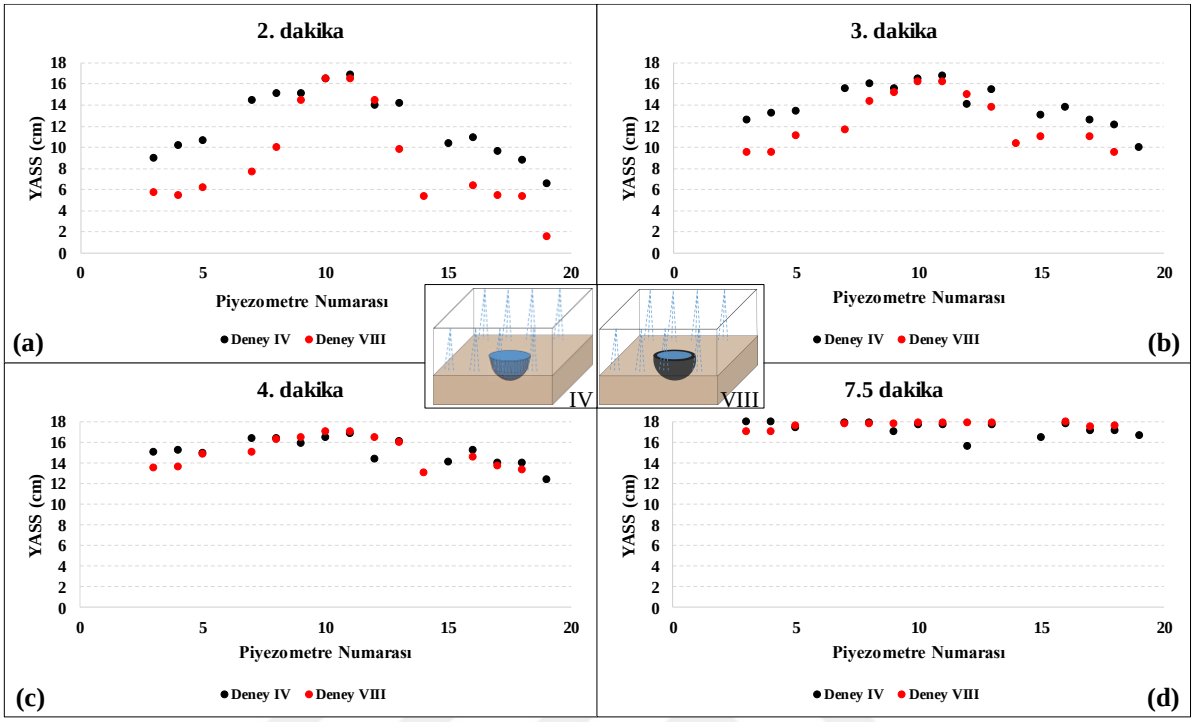
Şekil 4.11: Deney II ve Deney VI'nın farklı zamanlara ait piyezometre değerlerinin karşılaştırması (a) Başlangıç koşulu, (b) 1. dakika, (c) 7. dakika, (d) 40. dakika.

Deney III ve Deney VII'ye ait farklı zamanlarda ölçülmüş yeraltı su seviyeleri karşılaştırmalı olarak Şekil 4.12'de verilmiştir. Göl yatağının göl-akifer arasındaki akışa olan etkisi grafiklerde açıkça görülmektedir. Yatağın olmadığı Deney III'te göldeki suyun akifere dağılımı geniş bir açıda ilerlerken yatağın dahil edildiği Deney VII'de bu dağılım daha dar bir şekilde ilerlemiştir. Bu fark ilk dakikalarda daha belirgin iken zamanla azalmış ve su seviyeleri birbirlerine yaklaşmıştır. 2. dakikada akifer sınırlarında su yükseklikleri Deney III için 2.3 cm, Deney VII için ise 2 cm'dir. 2. dakikada göl su seviyesi yaklaşık olarak 16 cm olup fark göl kenarlarında daha belirgindir. Deney III'de kararlı duruma ulaşılan 23. dakikada sistemde su seviyesi 14 cm iken Deney VII henüz kararlı duruma ulaşmamıştır ve göl seviyesi 15 cm, akifer su yüksekliği 13 cm değerindedir.



Şekil 4.12: Deney III ve Deney VII'nin farklı zamanlara ait piyezometre değerlerinin karşılaştırması (a) 2. dakika, (b) 3. dakika, (c) 5. dakika, (d) 23. dakika.

Deney IV ve Deney VIII'e ait farklı zamanlarda ölçülmüş yeraltı su seviyeleri karşılaştırmalı olarak Şekil 4.13'de verilmiştir. Deneylerde akifer hem göl hem de yağış tarafından beslendiği için sistem kararlı duruma kısa bir sürede ulaşmıştır. Göl yatağının etkisi grafiklerde görüldüğü üzere suyun gölden akifere geçişine bir miktar engel olmuştur. Yatak bulunan modellerde yeraltı suyu, diğer modellere göre daha yavaş yükselmiştir. Deney başında aradaki fark fazla olup zamanla fark azalmıştır. 7.5. dakikada Deney IV'de tüm noktalar yaklaşık 18 cm'ye ulaşmış iken Deney VIII'de göl suyu 18 cm'de olup akifer sınırlarında su seviyesi 17 cm'dedir ve henüz kararlı duruma ulaşmamıştır.



Şekil 4.13: Deney IV ve Deney VIII'in farklı zamanlara ait piyezometre değerlerinin karşılaştırması (a) 2. dakika, (b) 3. dakika, (c) 4. dakika, (d) 7.5. dakika.

Deney I ve Deney II'e ait zamana bağlı yeraltı suyu dağılımları karşılaştırılmıştır. Deney I'de sistemde başlangıç yeraltı suyu seviyesi 0 cm olması ve kenarlarda bulunan küçük bölmelerden akiferin besleniyor oluşu deneyin kararlı duruma ulaşma süresini 4 saate çıkarmıştır. Deney II'de ise başlangıç yeraltı suyu seviyesinin 3 cm olması ve yağışın dahil edilmesiyle yeraltı suyu çok daha hızlı beslenmiştir, dolayısıyla da kararlı akıma çok daha hızlı ulaşılmıştır. Yağış sırasında 40. dakikada kararlı akıma ulaşıldığı görülmüştür. Yağışın akifer boşluklarını çok hızlı doldurup yeraltı suyu seviyesini göl su seviyesinin üzerine çıkarması, Deney II'nin Deney I gibi davranmasına neden olmuştur.

Deney I ve Deney III'e ait zamana bağlı yeraltı suyu dağılımları karşılaştırılmıştır. Deney I'de tüm sistemin beslenmesi süresi 4 saati aşkın iken, dolu bir gölün akiferi beslemesi çok daha kısa bir zamanda gerçekleşmiştir. Göl, yer çekimi etkisiyle hem yanlardan hem de alt kısımdan akiferi besleyerek 23 dakikada yeraltı suyu seviyesinin 14 cm'ye ulaşmasını sağlamıştır.

Deney II ve Deney IV'e ait zamana bağlı yeraltı suyu dağılımları karşılaştırılmıştır. Her iki deney de yağış durumunda gerçekleştirilmiştir. Yağış süresi her iki deney de yaklaşık olarak

aynıdır. Deney II'de başlangıç koşulu 3 cm yeraltı suyu iken Deney IV'de 15 cm derinliğinde göl suyu bulunmaktadır. Bu da Deney IV'ün başlangıçta daha fazla su miktarı içermesi demektir. Bu nedenle Deney IV 7 dakikada kararlı duruma ulaşırken aynı sürede Deney II'de yalnızca akifer sınırlarında su seviyesi 18 cm'dedir.

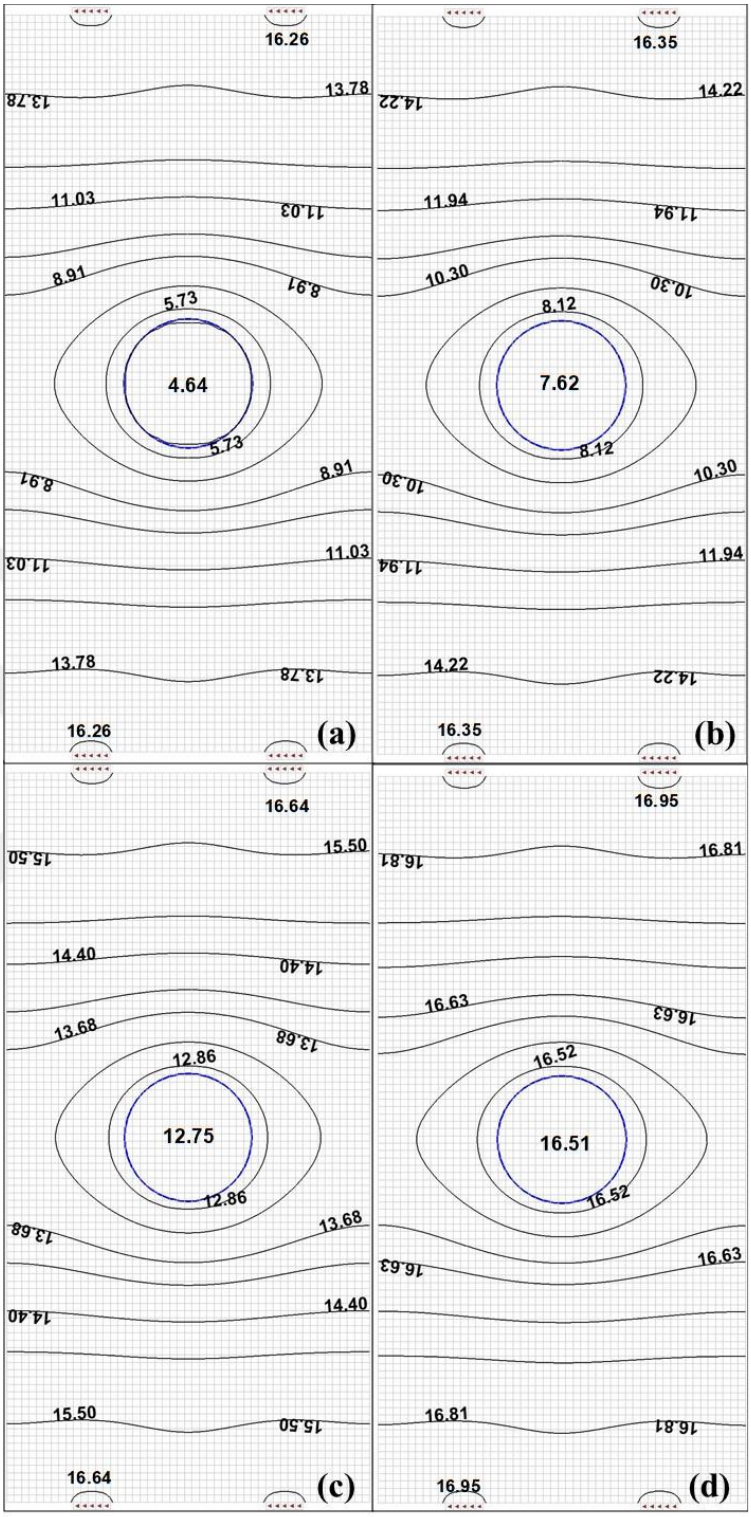
Deney III ve Deney IV'e ait zamana bağlı yeraltı suyu dağılımları karşılaştırılmıştır. Her ikisinde de göl akiferi beslemekte olup Deney IV'e yağış dahil edilmiştir. Yağış olmadığında deney kararlı duruma 23 dakikada ulaşırken yağış olduğunda akifer hızla dolarak 7.5 dakikada kararlı akıma ulaşılmıştır. Akiferin gözenekli bir yapı oluşu nedeniyle yeraltı suyunun yağış ile çok hızlı bir şekilde yükselmesine neden olmuştur.

4.2.DENEY DÜZENEĞİNİN SAYISAL MODEL BULGULARI

Yapılan deneylerin MODFLOW ile sayısal modellemesi yapılmış; zamana bağlı değişen yeraltı su seviyesi dağılımları verilerek açıklanmış ve bu sayısal bulgular ile deneysel bulgular karşılaştırılmıştır.

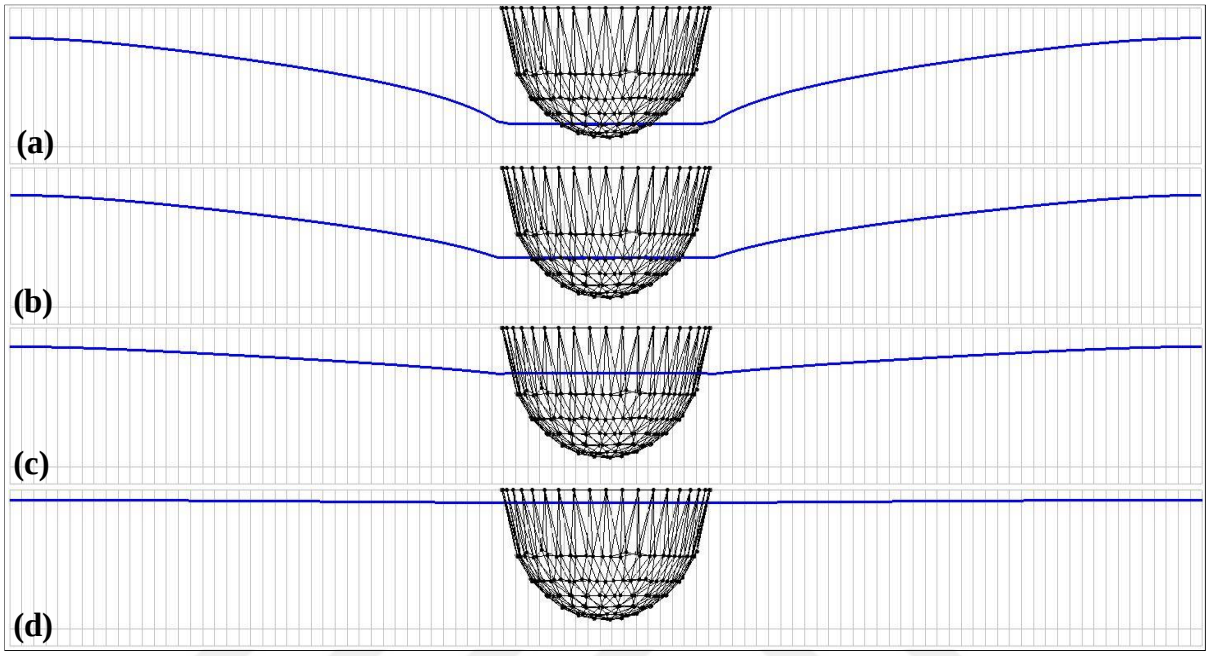
4.2.1. Deney I Modeli

Deney I için oluşturulmuş MODFLOW modelinden elde edilen farklı zamanlar için akifer içerisindeki yeraltı su seviyesi dağılımı Şekil 4.14'de sunulmuştur. Akifer alanı boyunca simetrik bir yeraltı su seviyesi dağılımı görülmektedir. Suyun akiferde dağılım hızının zamana ve konuma göre değiştiği sayısal modellerde de görülmektedir. Şekilde görüldüğü üzere 17.dakikada akifer sınırlarında beslenen kısımlarda su 16 cm seviyelerinde iken gölün bulunduğu bölgede yaklaşık 5 cm seviyelerine ulaşmıştır. Piyezometrik seviye gölün bulunduğu bölgede 30. dakikada 9.4 cm'ye, 62.dakikada ise 13 cm seviyelerine yükselmiştir. Şekil 4.14-d'de görüldüğü üzere sistemin kararlı duruma yaklaştığı 137. dakikada göl alanında su seviyesi 16.5 cm iken akiferin sınırlarında yaklaşık 17 cm değerindedir.



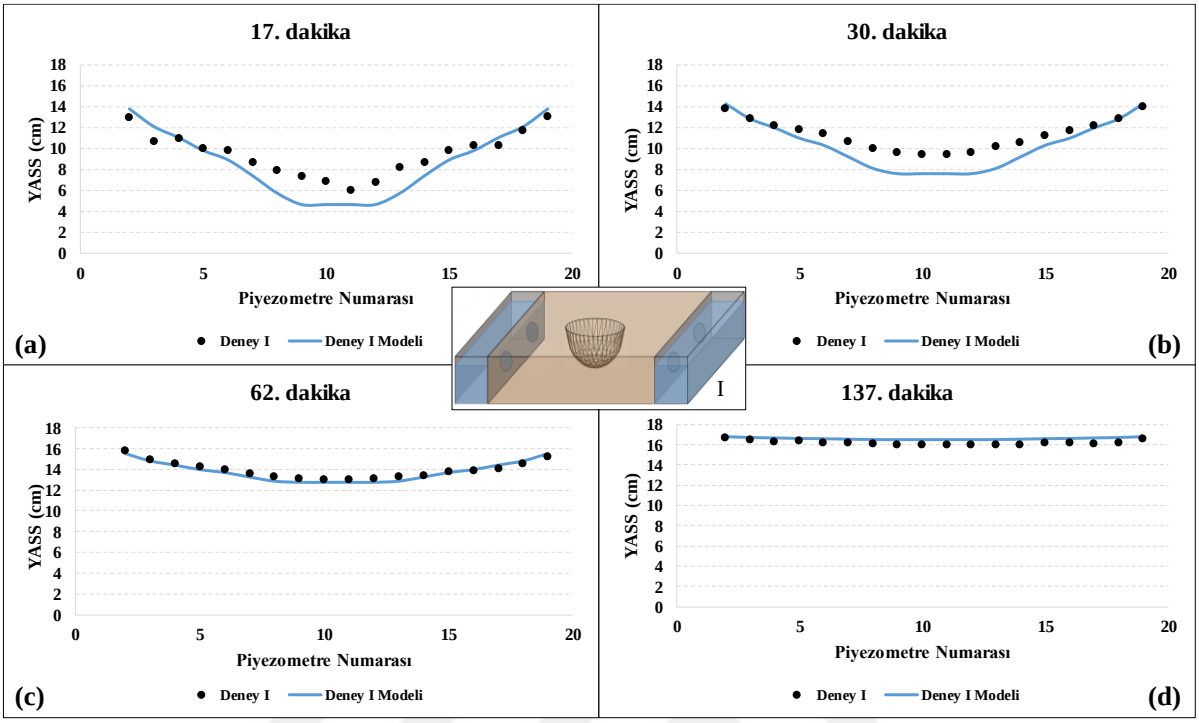
Şekil 4.14: Deney I Modeli ile hesaplanmış olan farklı zamanlara ait yeraltı suyu dağılımı plan görünümü (a) 17. dakika, (b) 30. dakika, (c) 62. dakika, (d) 137. dakika.

Şekil 4.15'de MODFLOW ile yapılan sayısal model sonucu farklı zaman dilimlerine ait yeraltı su seviyesinin kesit dağılımı görülmektedir. Şekil 4.16'da sayısal model bulguları ile deneysel bulgular karşılaştırılarak verilmiştir.



Şekil 4.15: Deney I Modeli ile hesaplanmış olan farklı zamanlara ait yeraltı suyu dağılımı kesit görünümü (a) 17. dakika, (b) 30. dakika, (c) 62. dakika, (d) 137. dakika.

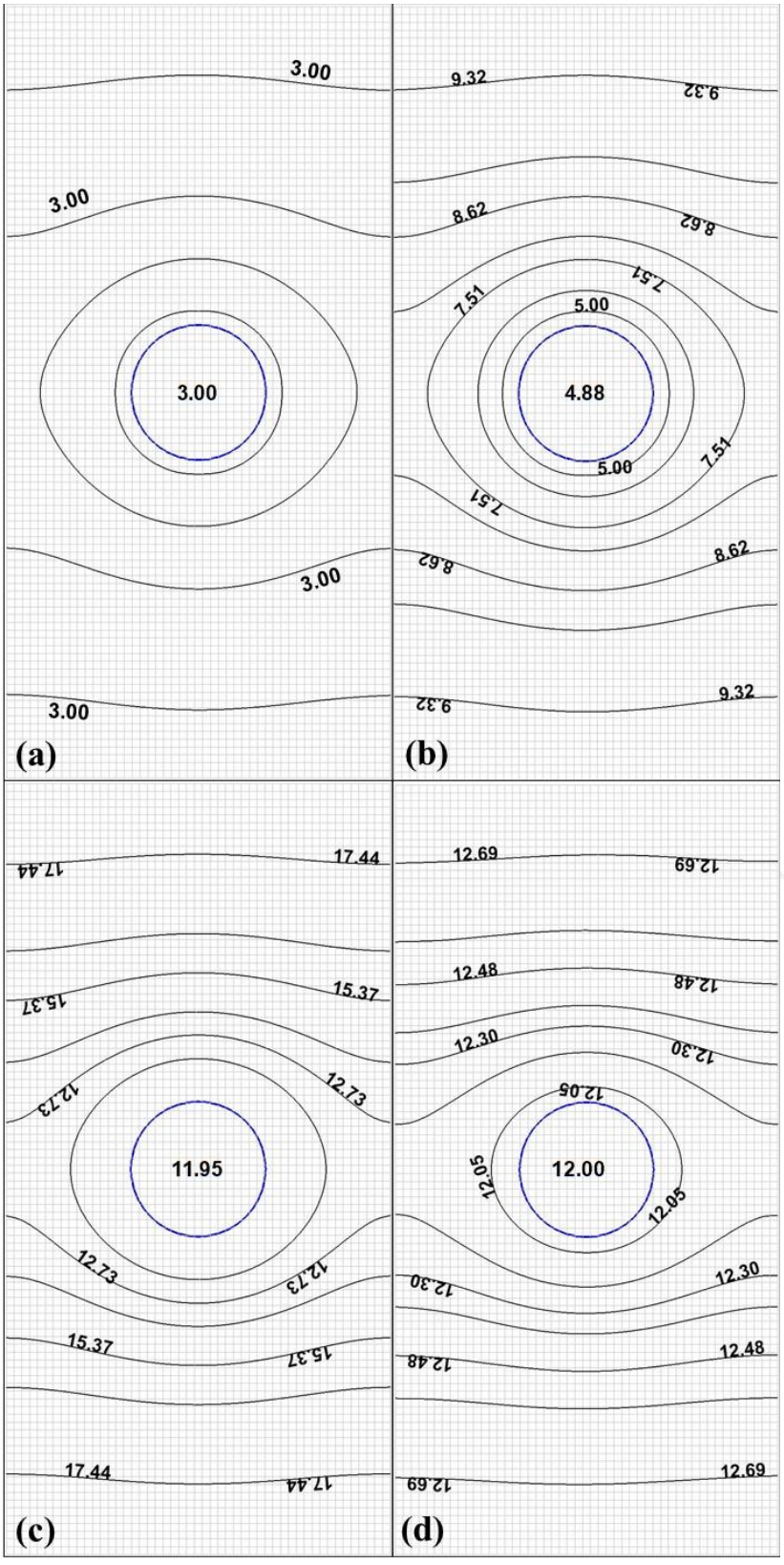
Şekil 4.16'da görüldüğü üzere deney sonuçları ile sayısal model sonuçları birbirine yakın çıkmıştır. Dolayısıyla MODFLOW, göl-akifer etkileşimini modellemede iyi bir performansa sahiptir. Şekil 4.16-a'da 17. dakika için karşılaştırma yapılmıştır ve göle yakın yerlerde sayısal model ile deney arasında bir miktar farklılık gözlemlenmiştir. Piyezometre okumaları gölün bulunduğu yerde 6.5 cm iken sayısal model yeraltı su seviyesini 5 cm olarak hesaplamıştır. Zaman ilerledikçe Şekil 4.16-b'de görüldüğü üzere gölün bulunduğu yerde sayısal bulgular ile deneysel bulgular biraz daha yakınlaşmıştır. Sayısal model su seviyesini yaklaşık olarak 8 cm hesaplarken piyezometreden 9.4 cm okunmuştur. Zaman ilerledikçe 62. dakikada sayısal ve deneysel bulgular birbirine çok daha yakındır. Gölün bulunduğu lokasyonda su seviyesi hem deneysel hem de sayısal olarak 13 cm olarak bulunmuştur. 137. dakikada ise kararlı akıma yaklaşıldığı sırada piyezometre 16 cm, model 16.5 cm değerlerini almıştır.



Şekil 4.16: Deney I için deneysel bulgular ile sayısal model bulgularının farklı zamanlar için karşılaştırması (a) 17. dakika, (b) 30. dakika, (c) 62. dakika, (d) 137. dakika.

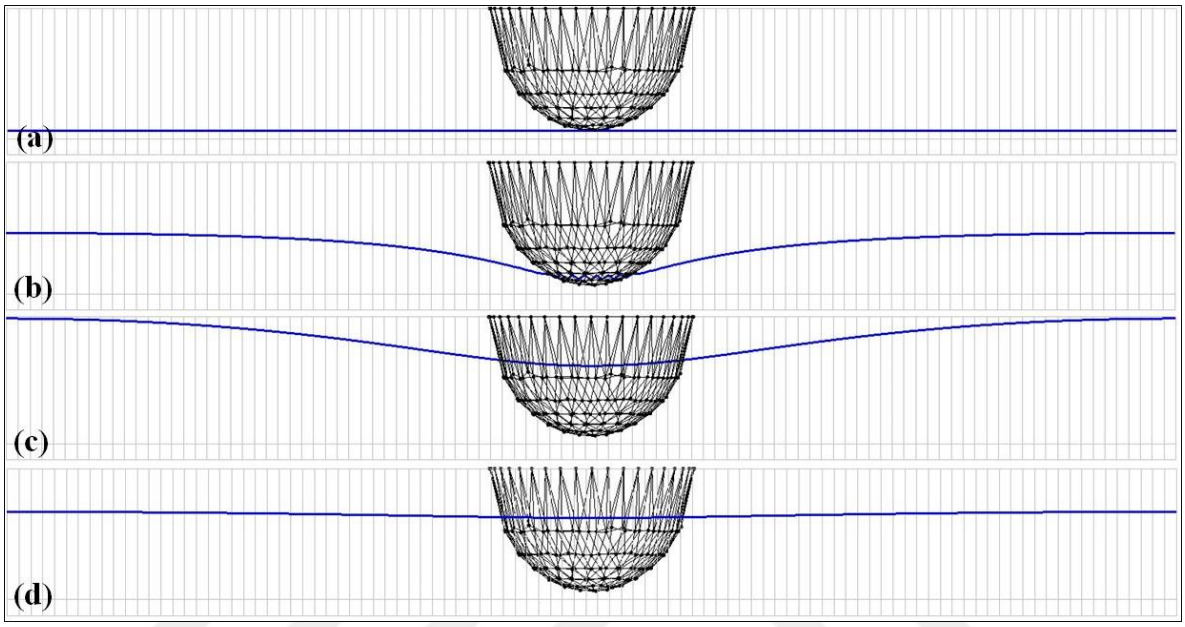
4.2.2. Deney II Modeli

Deney II için oluşturulan MODFLOW modelinden başlangıç anından kararlı ana ulaşana kadarki yeraltı suyu dağılımı Şekil 4.17'de sunulmuştur. Modelde, deneyde olduğu gibi başlangıç koşulu olarak her noktada su yüksekliği 3 cm'dir (Şekil 4.17-a). Akifer boşluklu bir yapıya sahip olması nedeniyle gelen yağış hızla akiferi doldurmuştur. Başlangıçta göl yağışla beslenirken, akiferdeki suyun yükselmesi ile birlikte hem yağış hem akifer tarafından beslenmeye başlamıştır. 1. dakikada göldeki su 3 cm'den 4.88 cm'ye çıkarken, akifer sınırları 9.32 cm'ye ulaşmıştır. Göl çevresinde akifer gölü beslediği için su seviyesi düşük, sınırlarda ise yüksektir. 7. dakikada akifer sınır bölgeleri 18 cm'ye ulaşmıştır ve yüzeysel akış olmaması için yağış durdurulmuştur. Model kararlı akıma 40 dakikadan sonra ulaşmıştır (Şekil 4.17-d).



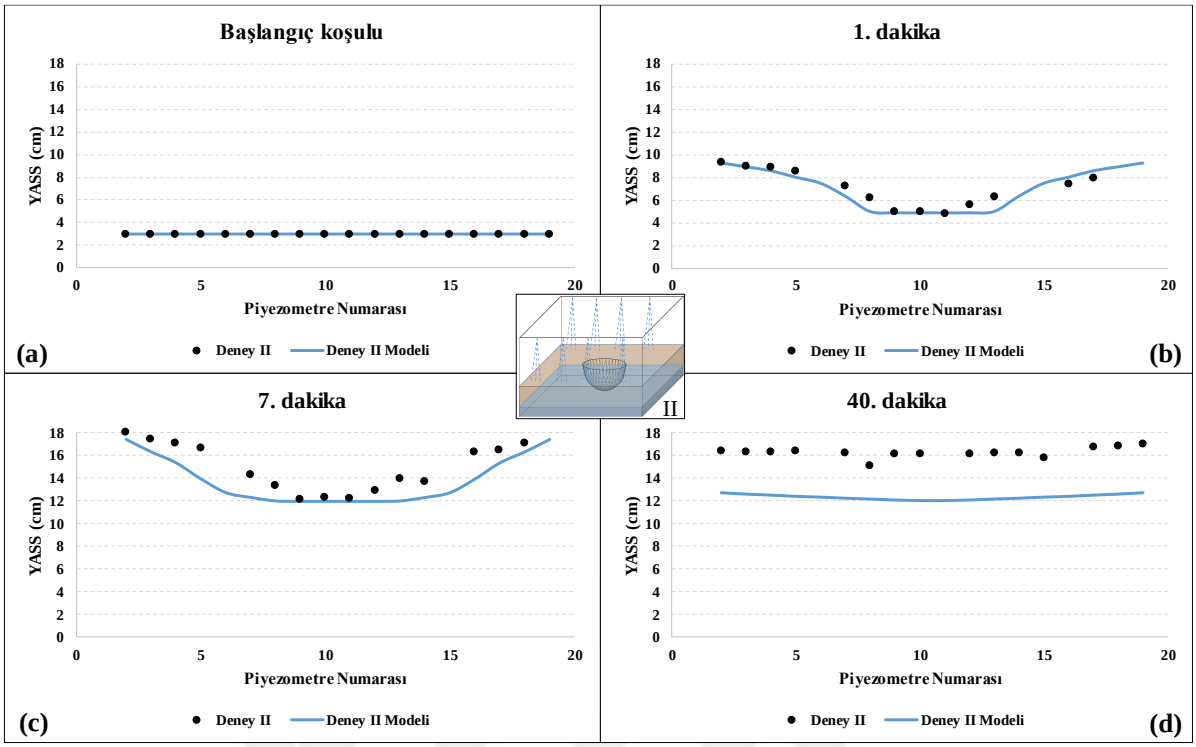
Şekil 4.17: Deney II Modeli ile hesaplanmış olan farklı zamanlara ait yeraltı suyu dağılımı plan görünümü (a) Başlangıç, (b) 1. dakika, (c) 7. dakika, (d) 40. dakika.

Şekil 4.18'de ise Deney II'nin MODFLOW ile yapılan sayısal modelinin farklı zamanlar için kesit dağılımı görülmektedir. Su seviyesinin 3 cm iken yağışla birlikte yükselişi, yağışın sisteme olan etkisini göstermektedir. Şekil 4.19'da sayısal model bulguları ile deneysel bulgular karşılaştırılarak verilmiştir.



Şekil 4.18: Deney II Modeli ile hesaplanmış olan farklı zamanlara ait yeraltı suyu dağılımı kesit görünümü (a) Başlangıç, (b) 1. dakika, (c) 7. dakika, (d) 40. dakika.

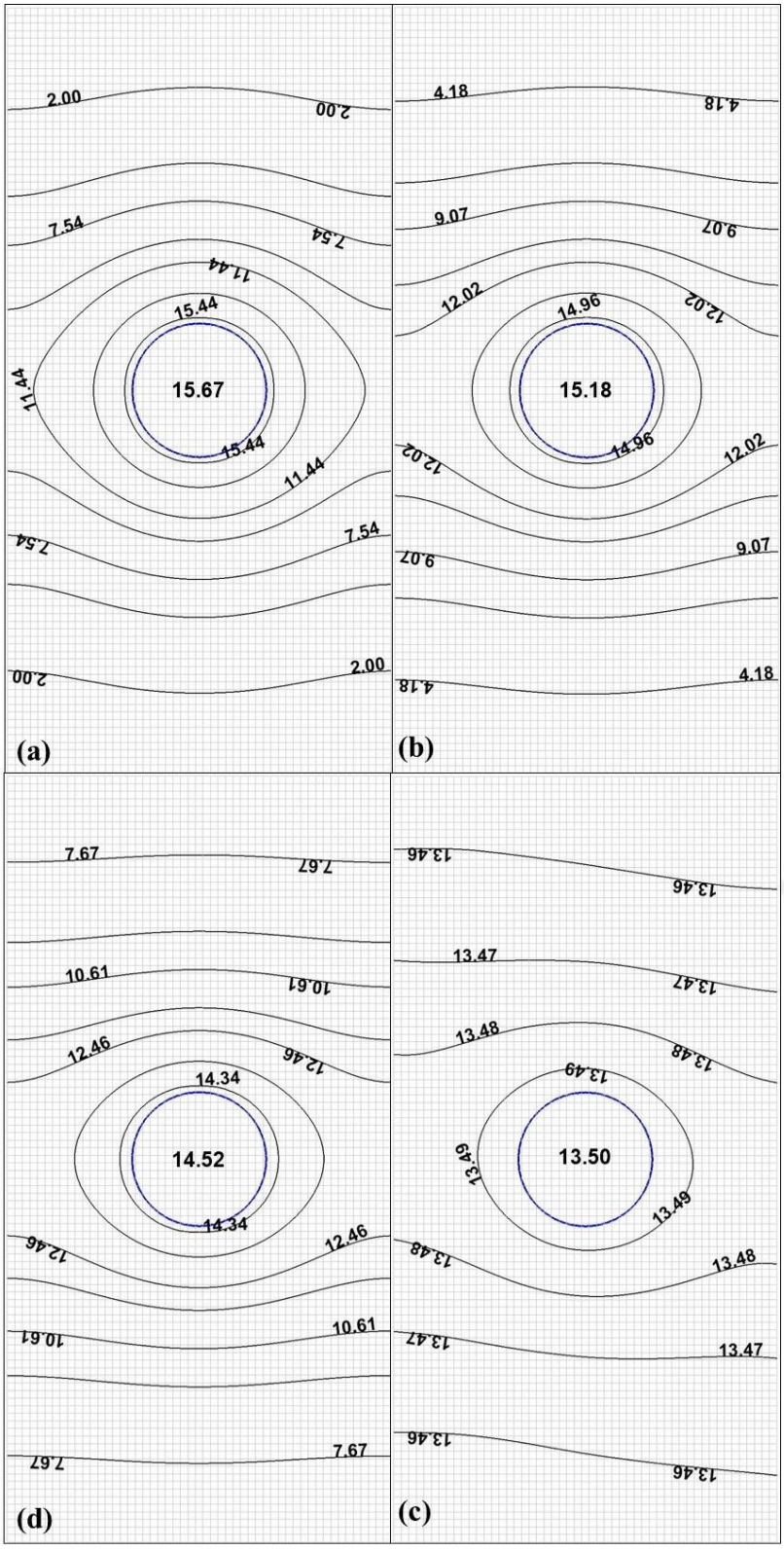
Şekil 4.19-a'da görülen başlangıç koşulu deney ve modelde aynıdır. 1. dakikada elde edilen deney sonuçları ile sayısal model sonuçları yaklaşık olarak aynı değerdedir. Göl merkezinde 5 cm, akifer sınırlarında ise 9.4 cm değerlerindedir (Şekil 4.19-b). Yağışın kapatıldığı 7. dakikada göl bölgesi ve akifer sınırları benzer değerlerde iken arada kalan bölgelerde farklılık meydana gelmiştir. Deneyde 5 numaralı piyezometre 16.6 cm değerinde iken sayısal modelde aynı nokta 14 cm değerini almıştır (Şekil 4.19-c). Akiferde su, göle göre daha hızlı yükseldiği için yağışın kapatıldığı 7.dakikadan sonra akiferin gölü beslemesi ve sistemin dengeye ulaşması için piyezometreler bir süre gözlenmiştir. Deneye göre 40. dakikada 16 cm seviyelerinde kararlı duruma ulaşılmıştır. Suyun zeminde zamanla çökmesi için bir süre daha beklenmiş ancak bir değişim gözlenmemiştir. Bunun nedeni düzeneğin küçük olup yeraltı suyunun sızması için imkan vermemesidir. MODFLOW yeraltı suyunun her zaman sızmaya devam edeceği ilkesi ile çözüm yapar. Bu nedenle kararlı akıma ulaşıldığındaki su seviyesi tahmin edilenden düşüktür (Şekil 4.19-d).



Şekil 4.19: Deney II için deneysel bulgular ile sayısal model bulgularının farklı zamanlar için karşılaştırması (a) Başlangıç, (b) 1. dakika, (c) 7. dakik,a (d) 40. dakika.

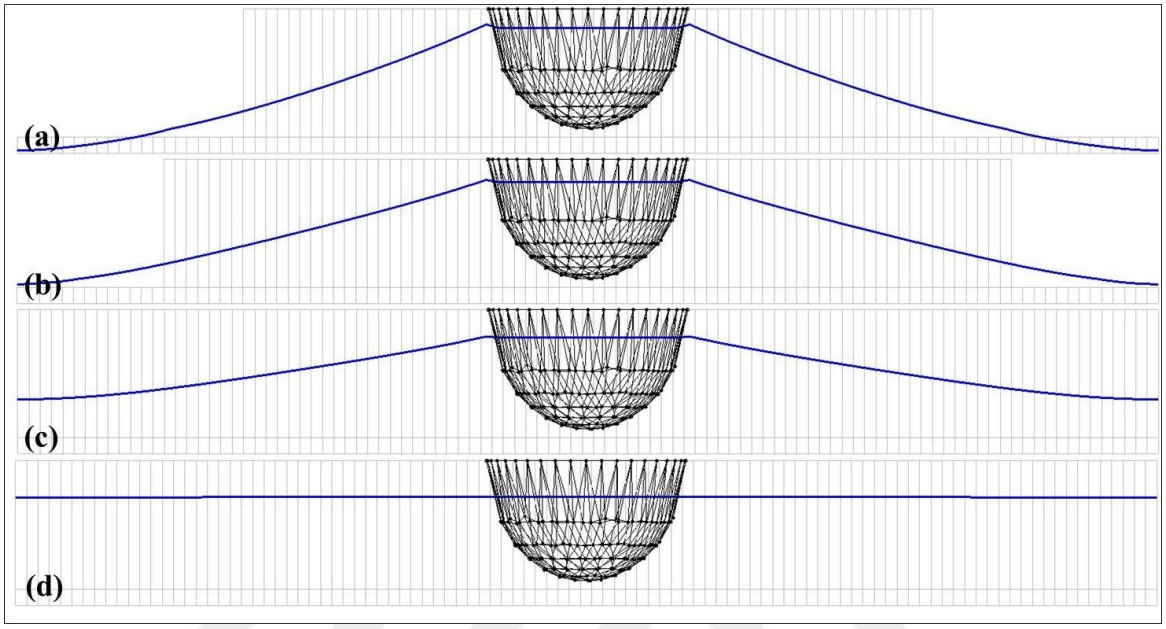
4.2.3. Deney III Modeli

Deney III için oluşturulan MODFLOW modelinden elde edilen farklı zamanlar için akifer içerisindeki yeraltı su seviyesi dağılımı Şekil 4.20'de sunulmuştur. Gölden akifere su akış hızının yüksek olduğu görülmektedir. Yeraltı suyu başlangıç anından itibaren yükselmeye başlamıştır. Şekilde görüldüğü üzere deney başladıktan 2 dakika sonra göl su seviyesi 15.67 cm'ye düşmüş olup akiferin sınıra yakın bölgelerinde 2 cm'ye yükselmiştir. 3. dakikada göl su seviyesi 15.18 cm, 4. dakikada ise 14.52 cm değerlerine düşmüştür. Göl su seviyesinin düşüp akifer yeraltı su seviyesinin yükselmesi, sistem kararlı hale gelinceye kadar devam etmiştir. 23. dakikada sistem dengeye ulaşmış ve tüm noktalarda yeraltı suyu yaklaşık olarak 13.50 cm değerine ulaşmıştır. Akiferin gözenekli bir yapı oluşu nedeniyle kararlı durumda akiferde bu şekilde yüksek bir değer görülmüştür.



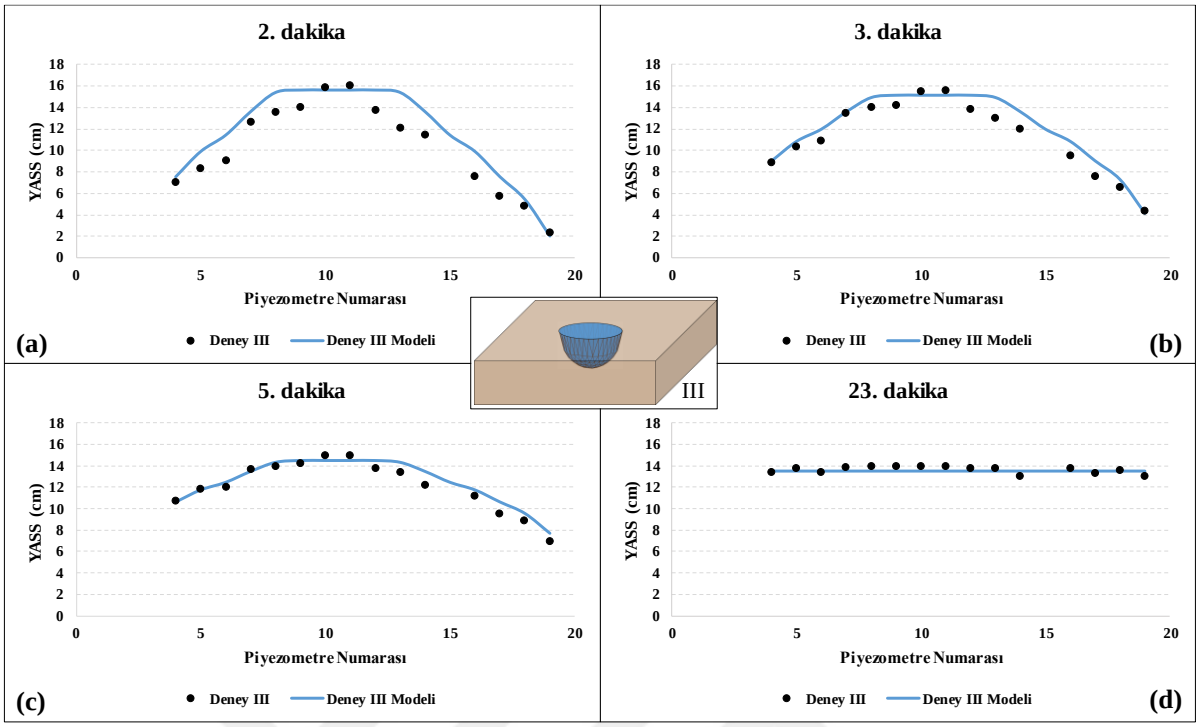
Şekil 4.20: Deney III Modeli ile hesaplanmış olan farklı zamanlara ait yeraltı suyu dağılımı plan görünümü (a) 2. dakika, (b) 3. dakika, (c) 5. dakika, (d) 23. dakika.

Şekil 4.21'de MODFLOW ile yapılan sayısal model sonucu farklı zaman dilimlerine ait yeraltı su seviyesinin kesit dağılımı görülmektedir. Şekil 4.22'de sayısal model bulguları ile deneysel bulgular karşılaştırılarak verilmiştir.



Şekil 4.21: Deney III Modeli ile hesaplanmış olan farklı zamanlara ait yeraltı suyu dağılımı kesit görünümü (a) 2. dakika, (b) 3. dakika, (c) 5. dakika, (d) 23. dakika.

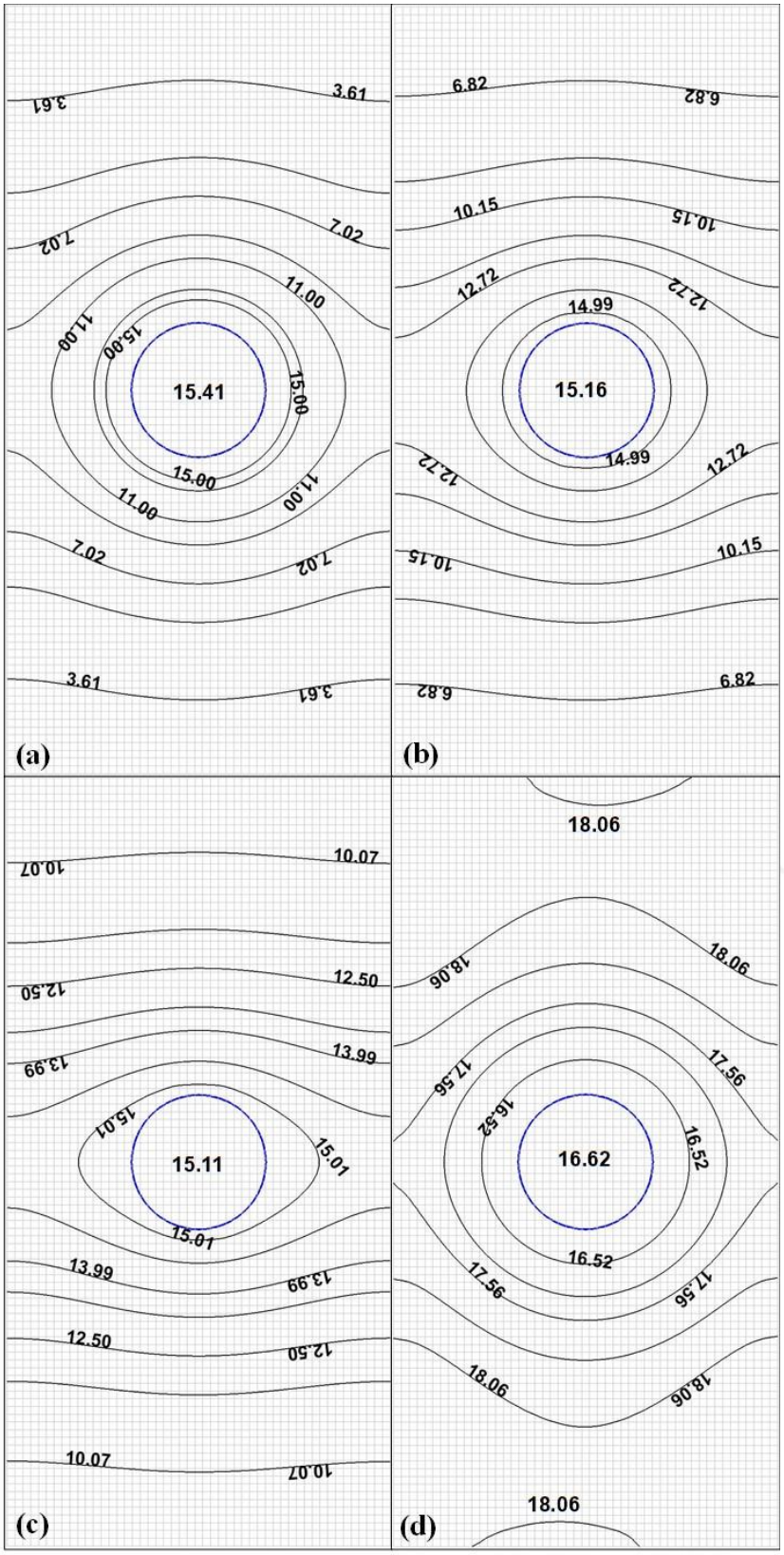
Şekil 4.22'de görüldüğü üzere deney sonuçları ile sayısal model sonuçları birbirine yakın çıkmıştır. 2. dakikada göl kıyısının her iki tarafında bir miktar farklılık meydana gelmiştir. Deneyde bu noktalardaki piyezometreler 13.5 cm'yi gösteriyor iken sayısal modelde 15.44 cm'dir. Göldeki su yüksekliği ile akifer sınır bölgelerindeki su yüksekliği değerleri aynı olup sırasıyla 15.7 cm ve 2 cm'dir (Şekil 4.22-a). Göl kıyısında meydana gelen fark 3. dakikaya gelindiğinde azalmıştır. Göl su seviyesi deneyde 15.5 cm, sayısal modelde 15.2 cm değerlerinde olup akiferi besledikçe düşmeye devam etmektedir (Şekil 4.22-b). Sistemin kararlı hale ulaştığı 23. dakikada deney sonuçları çoğu noktada 13.8 cm değerinde iken sayısal model 13.5 cm değerindedir.



Şekil 4.22: Deney III için deneysel bulgular ile sayısal model bulgularının farklı zamanlar için karşılaştırması (a) 2. dakika, (b) 3. dakika, (c) 5. dakika, (d) 23. dakika.

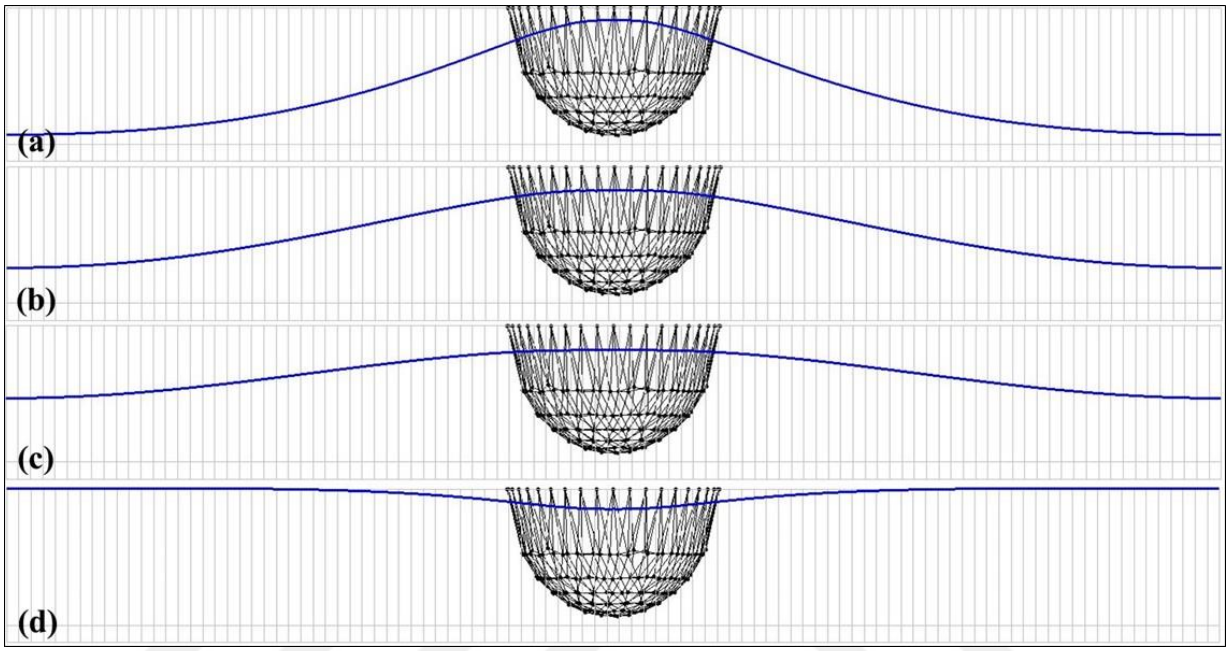
4.2.4. Deney IV Modeli

Deney IV'ün MODFLOW ile oluşturulan sayısal modeli Şekil 4.23'de sunulmuştur. Hem yağış hem de göl ile beslenen akiferin gözenekli yapısı nedeniyle yeraltı suyu ilk andan itibaren hızla yükselmeye başlamıştır. 2. dakikada göl su yüksekliği 15.41 cm'ye düşerken akiferde sınırlara doğru yeraltı suyu seviyesi 3.61 cm yükselmiştir (Şekil 4.23-a). Göldeki düşüş hızı yavaş, akiferde yükselme hızı yüksektir. 3. dakikada göl su seviyesi 15.16 cm, sınır bölgelerde 6.82 cm değerine ulaşmıştır (Şekil 4.23-b). Göl ve akifer arasındaki hidrolik fark zamanla azalmıştır. 4. dakikada göl seviyesi 15.11 cm, akifer ise 10.07 olup gölden akifere akış devam etmektedir (Şekil 4.23-c). Akifer yapısı itibariyle su göle kıyasla daha hızlı yükseldiği için, 7.5 dakika sonra sınır bölgelerde su 18 cm'ye ulaşmıştır. Yüzeysel akış oluşmaması için yağış kesilmiştir. Bu ana kadar göl akiferi beslerken burada göl seviyesi aşağıda kalmış ve dengeye ulaşana kadar akifer tarafından beslenmiştir. Yağış kesildiği anda göl 16.62 cm ve akifer 18 cm değerindedir.



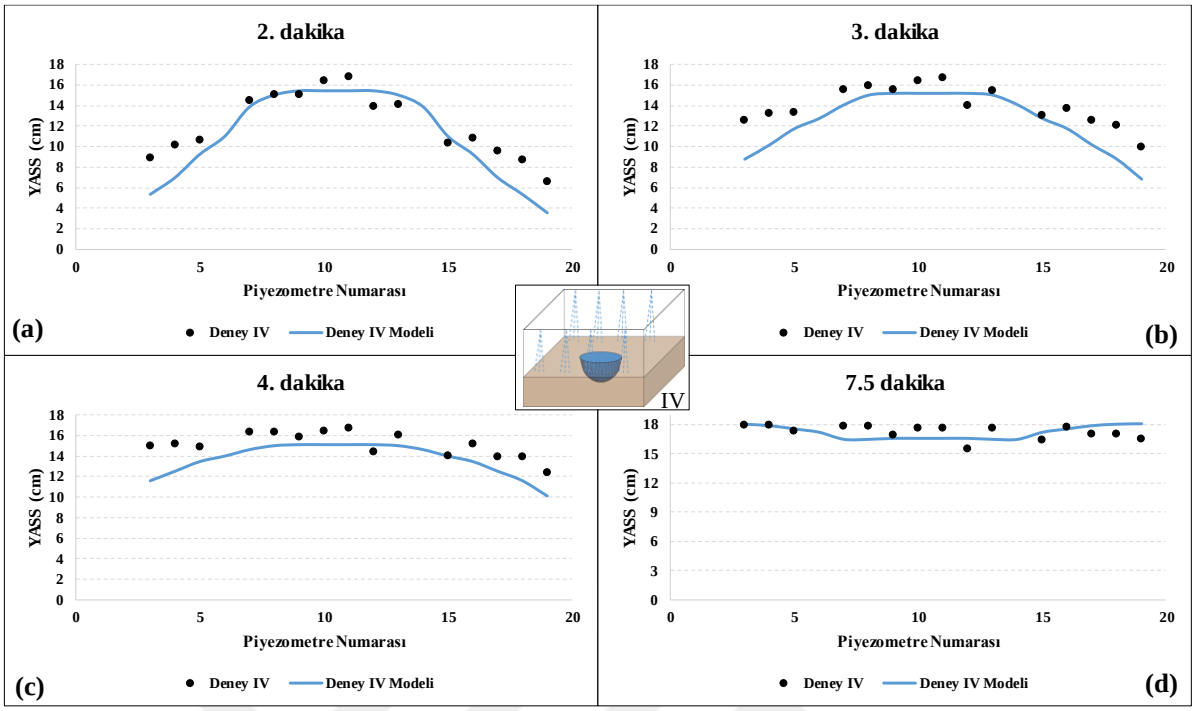
Şekil 4.23: Deney IV Modeli ile hesaplanmış olan farklı zamanlara ait yeraltı suyu dağılımı plan görünümü (a) 2. dakika, (b) 3. dakika, (c) 4. dakika, (d) 7.5. dakika.

Şekil 4.24'de deney ait sayısal modelin sonucu farklı zaman dilimlerine ait yeraltı su seviyesinin kesit dağılımı görülmektedir. Burada görüldüğü gibi yağış akiferi göle kıyasla daha hızlı doldurarak 18 cm'ye ulaşmıştır. Bu ana kadar gölün akiferi beslediği ancak yağış kesildikten sonra bu eğrinin tam tersi görülmektedir.



Şekil 4.24: Deney IV Modeli ile hesaplanmış olan farklı zamanlara ait yeraltı suyu dağılımı kesit görünümü (a) 2. dakika, (b) 3. dakika, (c) 4. dakika, (d) 7.5. dakika.

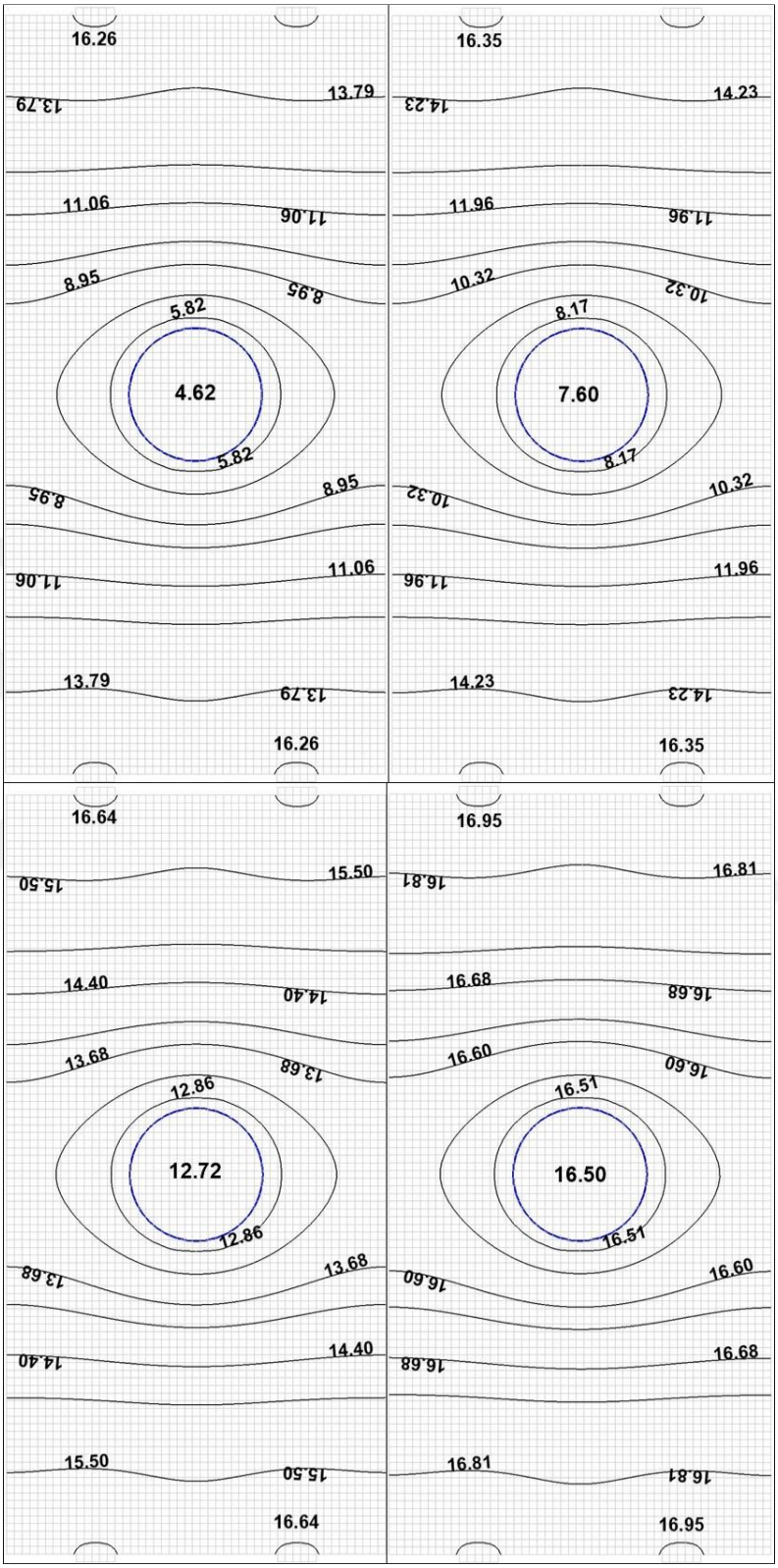
Şekil 4.25'de sayısal model bulguları ile deneysel bulgular karşılaştırılarak verilmiştir. Deney sonuçları ile sayısal model sonuçları arasında farklar gözlemlenmiştir. Sayısal modele göre yağışın kapatıldığı ana kadar akiferin sınır bölgelerinde su seviyesi deneye göre daha yavaş yükselmiştir. Göl su seviyesi de nispeten yukarıda seyretmiştir. 2. dakikada göl su seviyesi deneyde 16.5 cm iken sayısal modele göre 15.4 cm değerindedir. Göl kıyılarında benzer ölçümler görülmektedir. Akifer sınır bölgeleri deneye göre 6.6 cm iken sayısal modele göre 3.6 cm'dedir. (Şekil 4.25-a). Su seviyeleri her noktada yükselirken deney ve sayısal fark oranı yaklaşık olarak aynı değerdedir (Şekil 4.25-b, c). 7.5 dakika sonra deney ve sayısal modelde akifer sınırlarında su yüksekliği 18 cm'ye ulaşmış ve yağış kapatılmıştır. Ayrıca deneyde göl dahil olmak üzere hemen hemen tüm noktalarda 18 cm değeri okunmuş ve sistem kararlı hale gelmiştir. Ancak sayısal modelde göl bölgesi, yağış kapatıldıktan sonra düşük seviyede kaldığı için akifer tarafından beslenmeye başlamıştır. Henüz dengede değildir (Şekil 4.25-d). Bir süre sonra dengeye ulaştığında ise deneye göre daha düşük seviyelerde kalacağı anlaşılmaktadır.



Şekil 4.25: Deney IV için deneysel bulgular ile sayısal model bulgularının farklı zamanlar için karşılaştırması (a) 2. dakika, (b) 3. dakika, (c) 4. dakika, (d) 7.5. dakika.

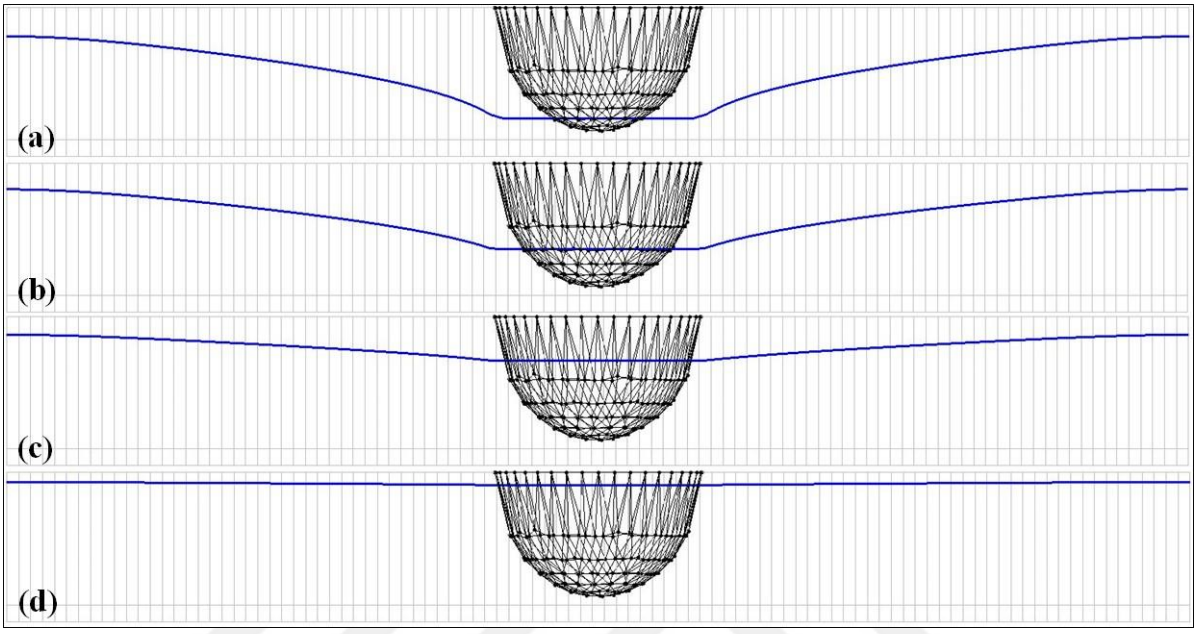
4.2.5. Deney V Modeli

Deney V için oluşturulmuş MODFLOW modelinden elde edilen farklı zamanlar için akifer içerisindeki yeraltı su seviyesi dağılımı Şekil 4.26'da sunulmuştur. Deney I Modeli'ne göl yatağı eklenerek oluşturulan bu modelde, yatağın etkileşime etkisi su yükseklikleri üzerinden incelenmiştir. Şekilde görüldüğü üzere 17. dakikada akifer sınırlarında beslenen bölgelerde su 16.26 cm seviyelerinde iken gölün bulunduğu bölgede 4.60 cm seviyelerine ulaşmıştır. Piyezometrik seviye gölün bulunduğu bölgede 30. dakikada 7.60 cm'ye, 62.dakikada ise 12.73 cm seviyelerine yükselmiştir. Şekil 4.26-d'de görüldüğü üzere sistemin kararlı duruma yaklaştığı 137. dakikada göl alanında su seviyesi 16.5 cm iken akiferin sınırlarında yaklaşık 17 cm değerindedir.



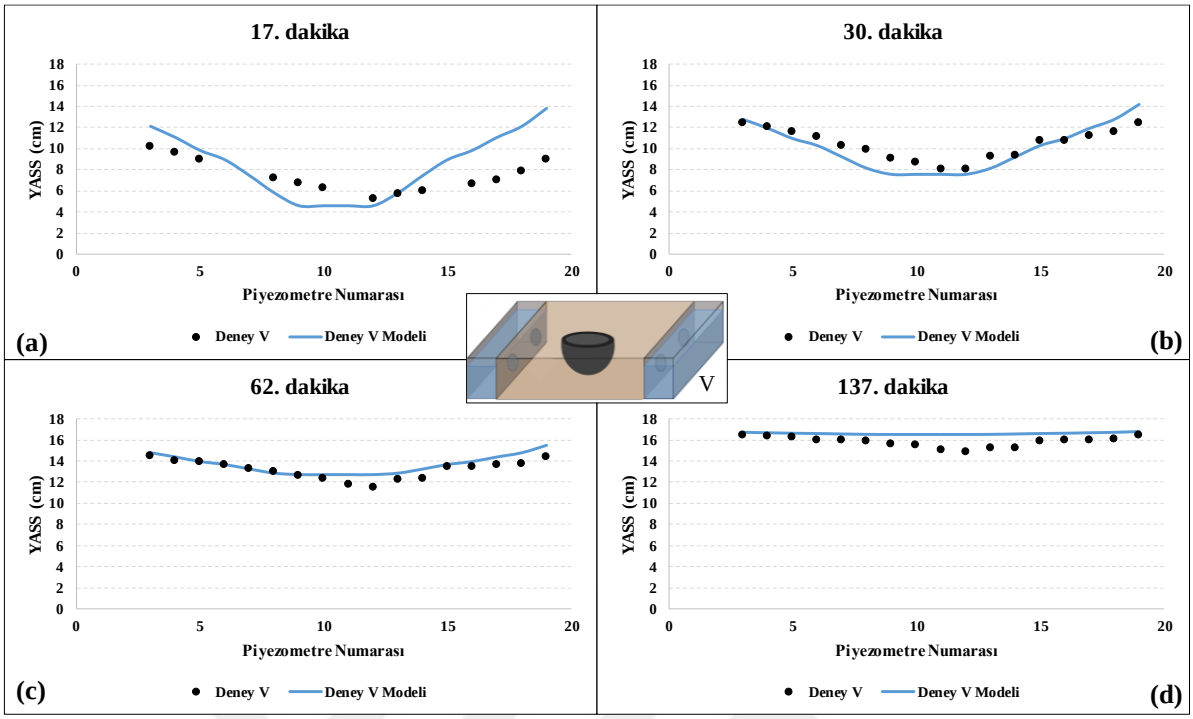
Şekil 4.26: Deney V Modeli ile hesaplanmış olan farklı zamanlara ait yeraltı suyu dağılımı plan görünümü (a) 17.dakika, (b) 30.dakika, (c) 62.dakika, (d) 137.dakika.

Şekil 4.27'de MODFLOW ile yapılan sayısal model sonucu farklı zaman dilimlerine ait yeraltı su seviyesinin kesit dağılımı görülmektedir. Şekil 4.28'de sayısal model bulguları ile deneysel bulgular karşılaştırılarak verilmiştir.



Şekil 4.27: Deney V Modeli ile hesaplanmış olan farklı zamanlara ait yeraltı suyu dağılımı kesit görünümü (a) 17. dakika, (b) 30. dakika, (c) 62. dakika, (d) 137. dakika.

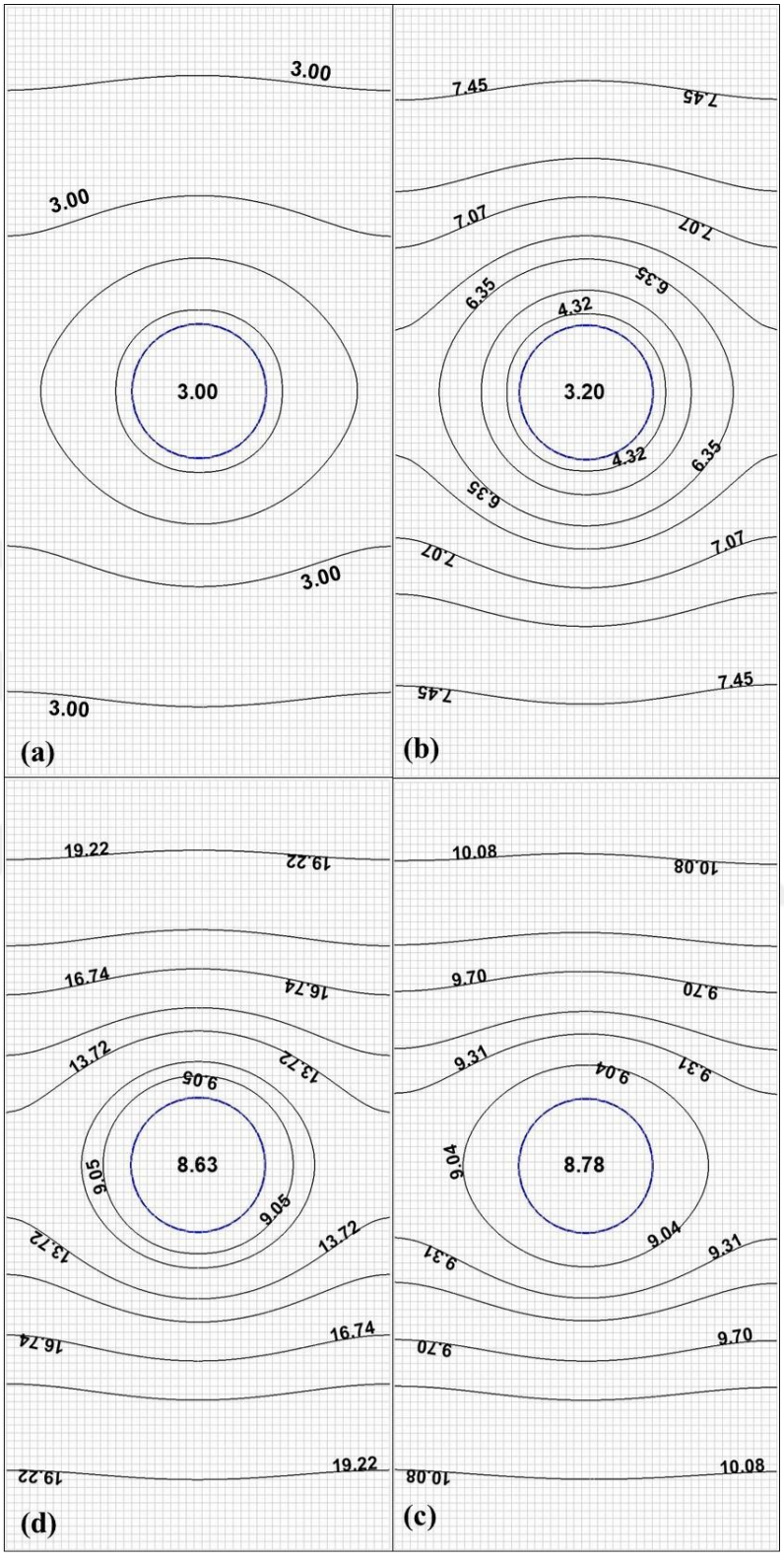
Şekil 4.28'de görüldüğü üzere deney sonuçları ile sayısal model sonuçları arasında ilk dakikalarda farklılıklar meydana gelmiştir. Deneyde piyezometre değerlerinin sayısal model sonuçları gibi simetrik olması beklenirken piyezometrelerde zaman zaman meydana gelen olumsuzluklar nedeniyle simetrik bir su dağılımı gözlemlenememiştir. Farkın görüldüğü 17. dakikada göl bölgesinde deneyde ölçülen değer 6 cm seviyelerinde iken sayısal modelde 4.6 cm değerlerindedir (Şekil 4.28-a). Farklılık sistemin çoğu noktasında zamanla azalırken gölün olduğu bölgede fark görülmeye devam etmektedir. Şekil 4.28-b'de görüldüğü üzere 30. dakikada gölün bulunduğu bölgede su seviyesi 8-8.5 cm seviyelerinde, sayısal modelde 7.6 cm olarak hesaplanmıştır. Zaman ilerledikçe 62. dakikada sayısal ve deneysel bulgular birbirine daha yakındır. Gölün bulunduğu lokasyonda su seviyesi 12.3 cm, sayısal olarak 12.7 cm olarak bulunmuştur (Şekil 4.28-c). 137. dakikada ise sayısal model kararlı duruma ulaşırken deneyde henüz ulaşılmamıştır. Sayısal modelde göl bölgesinde 16.5 cm görülürken deneyde 15.5 cm değerinde su yüksekliği bulunur.



Şekil 4.28: Deney V için deneysel bulgular ile sayısal model bulgularının farklı zamanlar için karşılaştırması (a) 17. dakika, (b) 30. dakika, (c) 62. dakika, (d) 137. dakika.

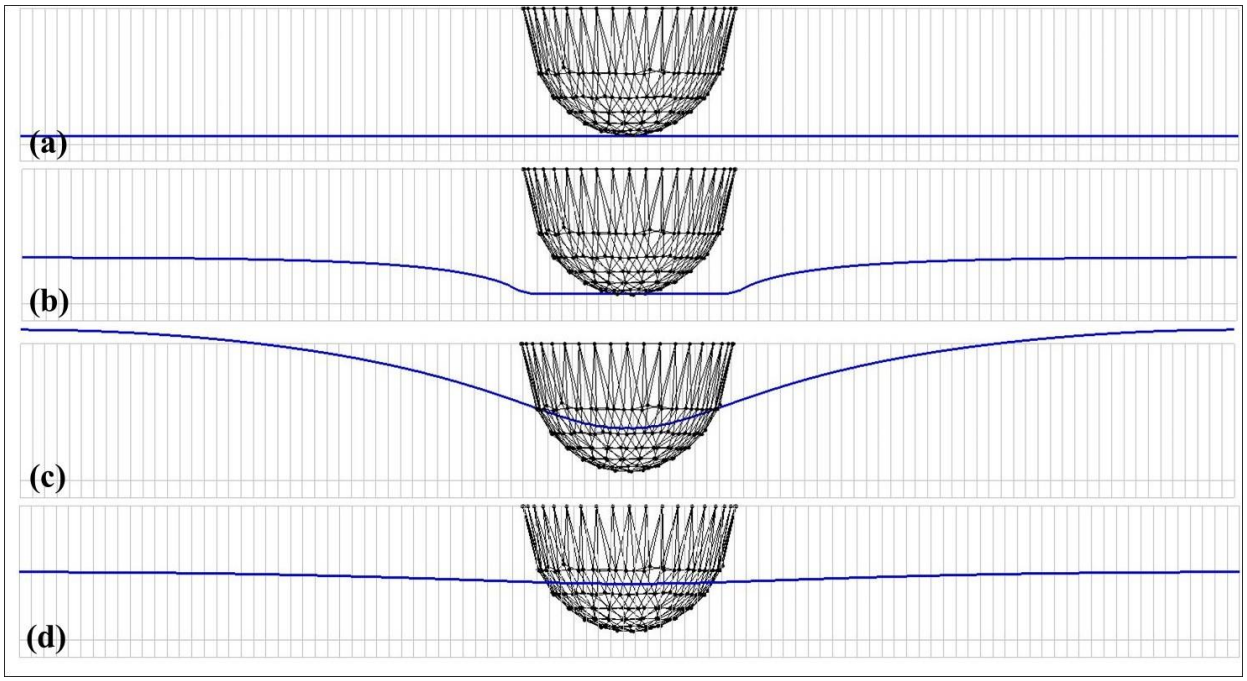
4.2.6. Deney VI Modeli

Deney VI için oluşturulan MODFLOW modelinden başlangıç anından kararlı ana ulaşana kadarki yeraltı suyu dağılımı Şekil 4.29'da sunulmuştur. Modelde, deneyde olduğu gibi başlangıç koşulu olarak her noktada su yüksekliği 3 cm'dir (Şekil 4.29-a). Akifer boşluklu bir yapıya sahip olması nedeniyle gelen yağış hızla akiferi doldurmuştur. Başlangıçta göl yağışla beslenirken, akiferdeki suyun yükselmesi ile birlikte hem yağış hem akifer tarafından beslenmeye başlamıştır. 1. dakikada göldeki su 3 cm'den 3.20 cm'ye çıkarken, akifer sınırları 7.45 cm'ye ulaşmıştır. Göl yatağı akiferden göle akışı kısmen engellemiş, bu nedenle akifer sınır bölgelerinde su hızla yükselmiştir. 7. dakikada akifer sınır bölgeleri maksimum seviye olan 18 cm'yi aşmıştır. Deneyde 7. dakikada yağış kapatıldığı için sayısal modelde de aynı süre sonunda yağış durdurulmuştur. Bu anda göl su seviyesi 8.63 cm değerine ulaşmıştır (Şekil 4.29-c). Yağış durdurulduktan sonra kararlı duruma ulaşılması, göl yatağı nedeniyle 40 dakikayı aşmıştır. Bu anda gölde su seviyesi 8.78 cm, akifer sınırlarında 10 cm'yi aşkındır (Şekil 4.29-d).



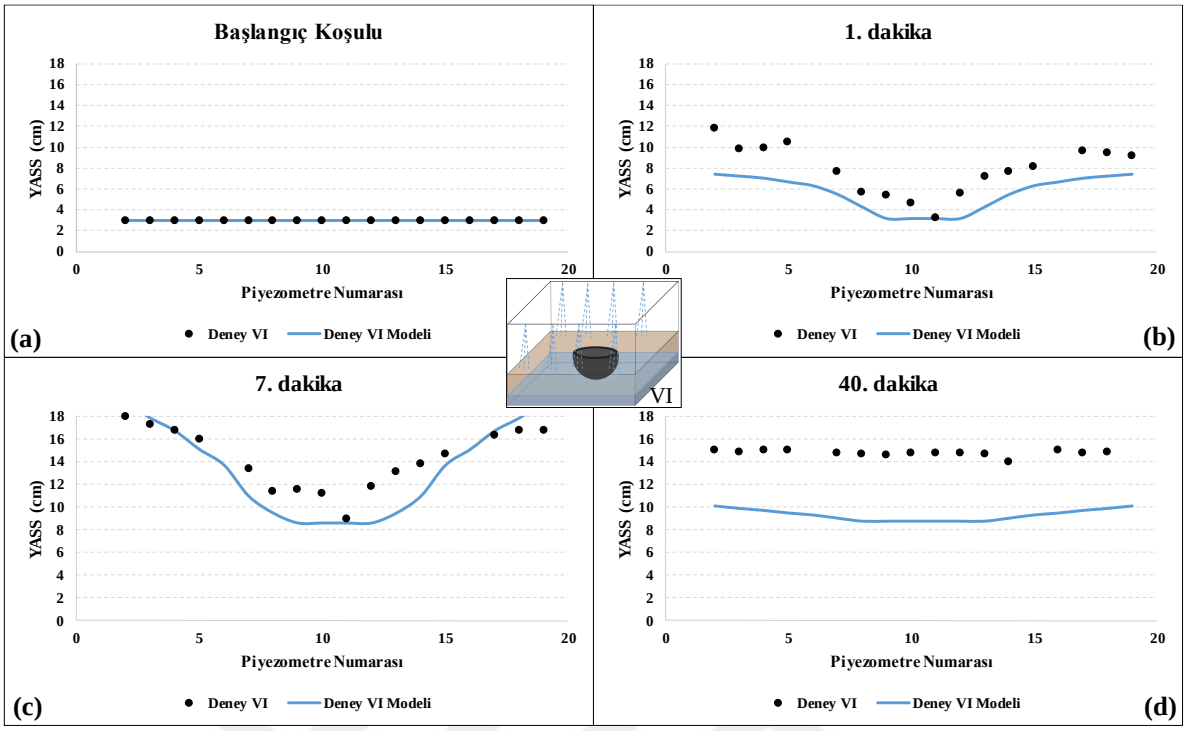
Şekil 4.29: Deney VI Modeli ile hesaplanmış olan farklı zamanlara ait yeraltı suyu dağılımı plan görünümü (a) Başlangıç, (b) 1. dakika, (c) 7. dakika, (d) 40. dakika.

Şekil 4.30'da ise Deney VI'nın MODFLOW ile yapılan sayısal modelinin farklı zamanlar için kesit dağılımı görülmektedir. Su seviyesinin 3 cm iken yağışla birlikte yükselişi, yağışın sisteme olan etkisini göstermektedir. Şekil 4.31'de sayısal model bulguları ile deneysel bulgular karşılaştırılarak verilmiştir.



Şekil 4.30: Deney VI Modeli ile hesaplanmış olan farklı zamanlara ait yeraltı suyu dağılımı kesit görünümü (a) Başlangıç, (b) 1. dakika, (c) 7. dakika, (d) 40.dakika.

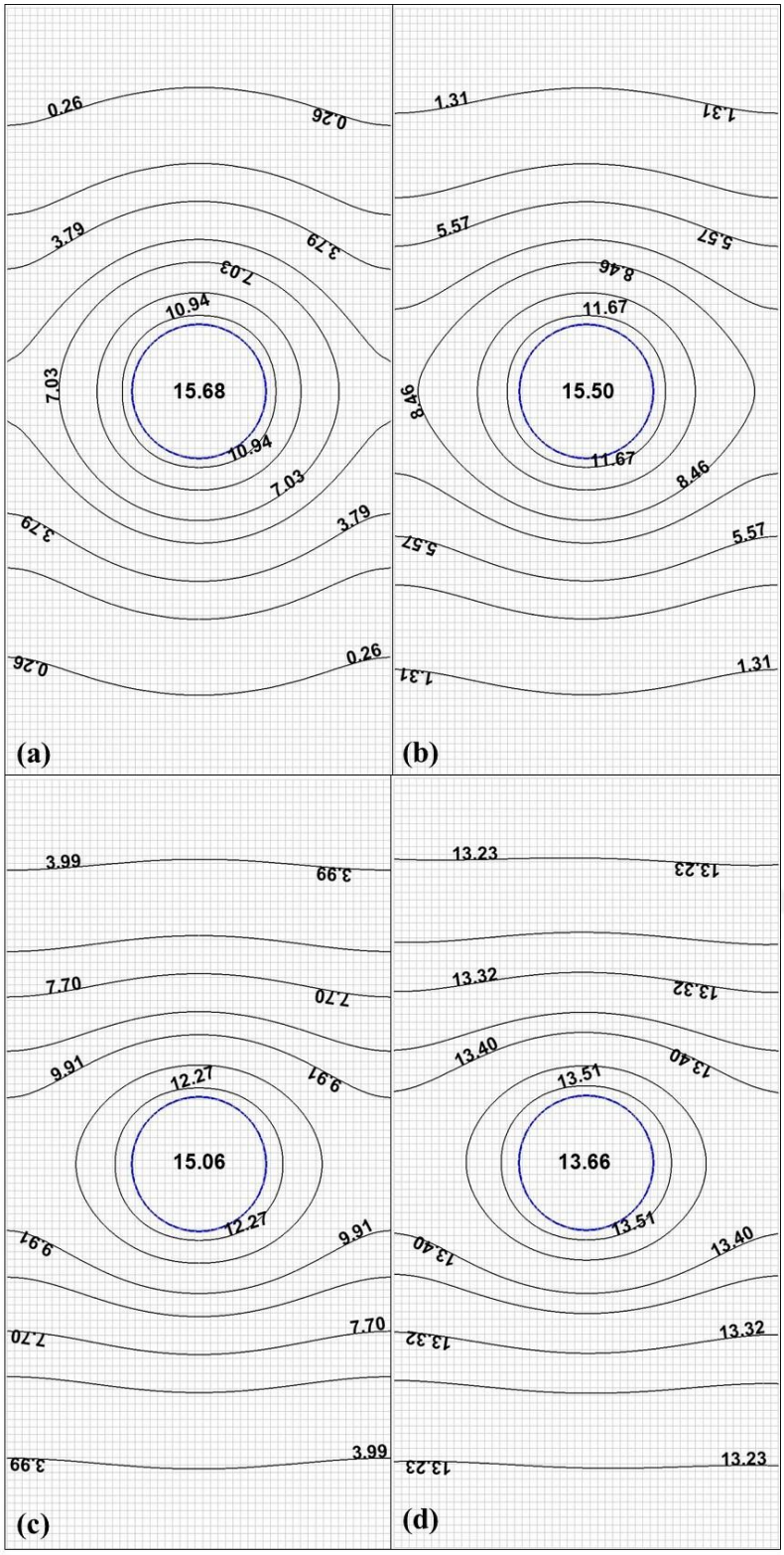
Şekil 4.31-a'da görülen başlangıç koşulu deney ve modelde aynıdır. Yağış başlatıldıktan sonra deney ve sayısal model sonuçları arasında farklılıklar görülmektedir. 1. dakikada hemen her noktada deney sonuçları sayısal model sonuçlarının üzerindedir. Göl bölgesinde su seviyesi deneyde 4.5 cm değerlerinde iken sayısal modelde 3.2 cm değerlerindedir (Şekil 31-b). 7. dakikada akifer sınır bölgelerinde benzer sonuçlar görülürken, göl bölgesinde yine seviye farkı bulunmaktadır. Bu anda sınır bölgelerde su yüksekliği 18 cm'yi aşmış ve yağış kapatılmıştır. Deneyde göl 11 cm, sayısalda 8.63 cm değerlerindedir (Şekil 4.31-c). Akiferde su, göle göre daha hızlı yükseldiği için yağışın kapatıldığı 7.dakikadan sonra akiferin gölü beslemesi ve sistemin dengeye ulaşması için piyezometreler bir süre gözlenmiştir. Deneye göre 40. dakikada 15 cm seviyelerinde kararlı duruma ulaşılmıştır. MODFLOW yeraltı suyunun her zaman sızmaya devam edeceği ilkesi ile çözüm yapar. Bu nedenle yağış kapatıldıktan sonra 40. dakikaya kadar sistem dengelenmeye çalışılırken hem de sızma nedeniyle su seviyesinde düşüş yaşanmıştır. Ayrıca 40.dakikada henüz kararlı akıma ulaşılmamıştır (Şekil 4.31-d).



Şekil 4.31: Deney VI için deneysel bulgular ile sayısal model bulgularının farklı zamanlar için karşılaştırması (a) Başlangıç, (b) 1. dakika, (c) 7. dakika, (d) 40. dakika.

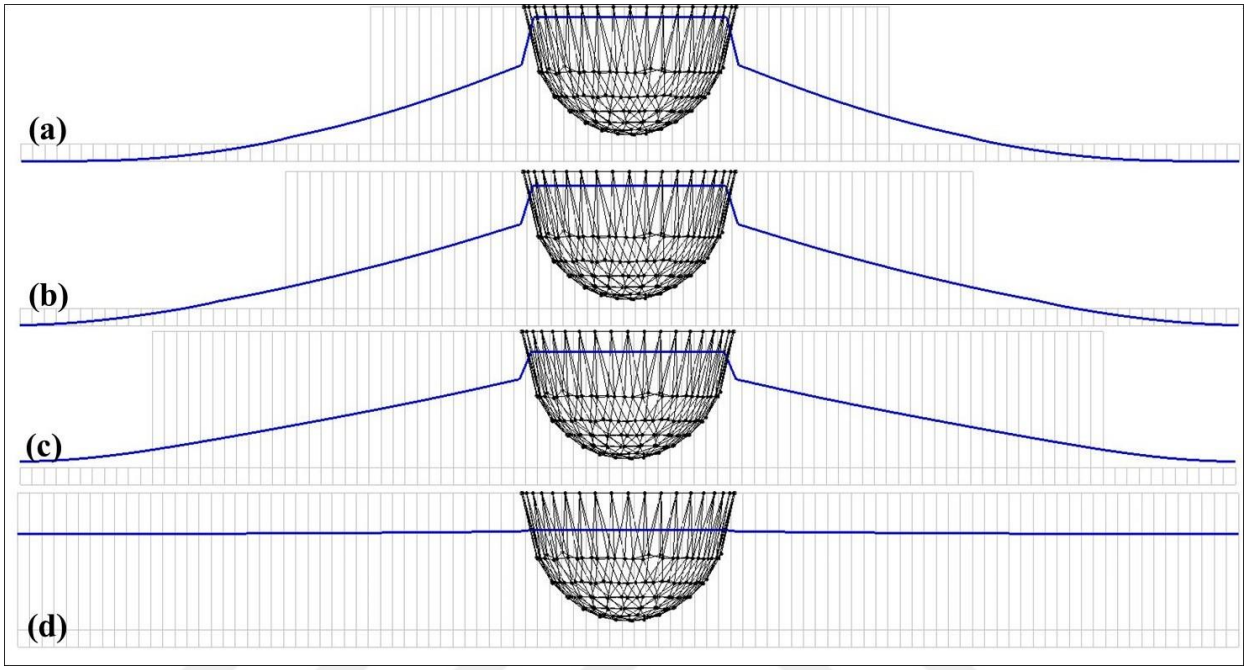
4.2.7. Deney VII Modeli

Deney III sistemine göl yatağı dahil edilerek gerçekleştirilen Deney VII için oluşturulan MODFLOW modelinden elde edilen farklı zamanlar için akifer içerisindeki yeraltı su seviyesi dağılımı Şekil 4.32'de sunulmuştur. Yeraltı suyu başlangıç anından itibaren yükselmeye başlamıştır. Bu yükselme akiferin göle yakın bölgelerinde, sınırlara kıyasla daha fazladır. Şekilde görüldüğü üzere deney başladıktan 2 dakika sonra göl su seviyesi 15.68 cm'ye düşmüş olup akiferin sınıra yakın bölgelerinde henüz 1 cm'nin altındadır (Şekil 4.32-a). 3. dakikada göl su seviyesi 15.50 cm (Şekil 4.32-b), 4. dakikada ise 15.06 cm (Şekil 4.32-c) değerlerine düşmüştür. Göl su seviyesinin düşüp yeraltı su seviyesinin yükselmesi sistem kararlı hale gelinceye kadar devam etmiştir. 23. dakikada sistem kararlı duruma yaklaşmıştır. Yatak nedeniyle göl bölgesinde su seviyesi akifere göre daha yukarı seviyededir (Şekil 4.32-d).



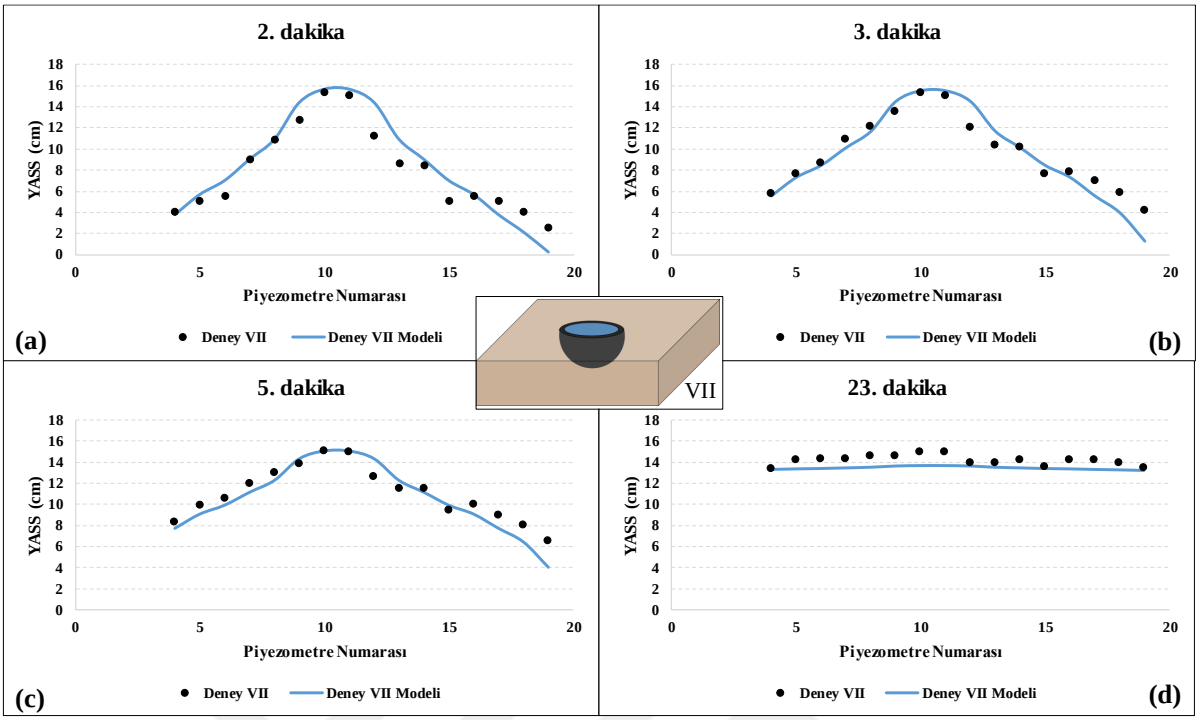
Şekil 4.32: Deney VII Modeli ile hesaplanmış olan farklı zamanlara ait yeraltı suyu dağılımı plan görünümü (a) 2. dakika, (b) 3. dakika, (c) 5. dakika, (d) 23. dakika.

Şekil 4.33'de MODFLOW ile yapılan sayısal model sonucu farklı zaman dilimlerine ait yeraltı su seviyesinin kesit dağılımı görülmektedir. Şekil 4.34'de sayısal model bulguları ile deneysel bulgular karşılaştırılarak verilmiştir.



Şekil 4.33: Deney VII Modeli ile hesaplanmış olan farklı zamanlara ait yeraltı suyu dağılımı kesit görünümü (a) 2. dakika, (b) 3. dakika, (c) 5. dakika, (d) 23. dakika.

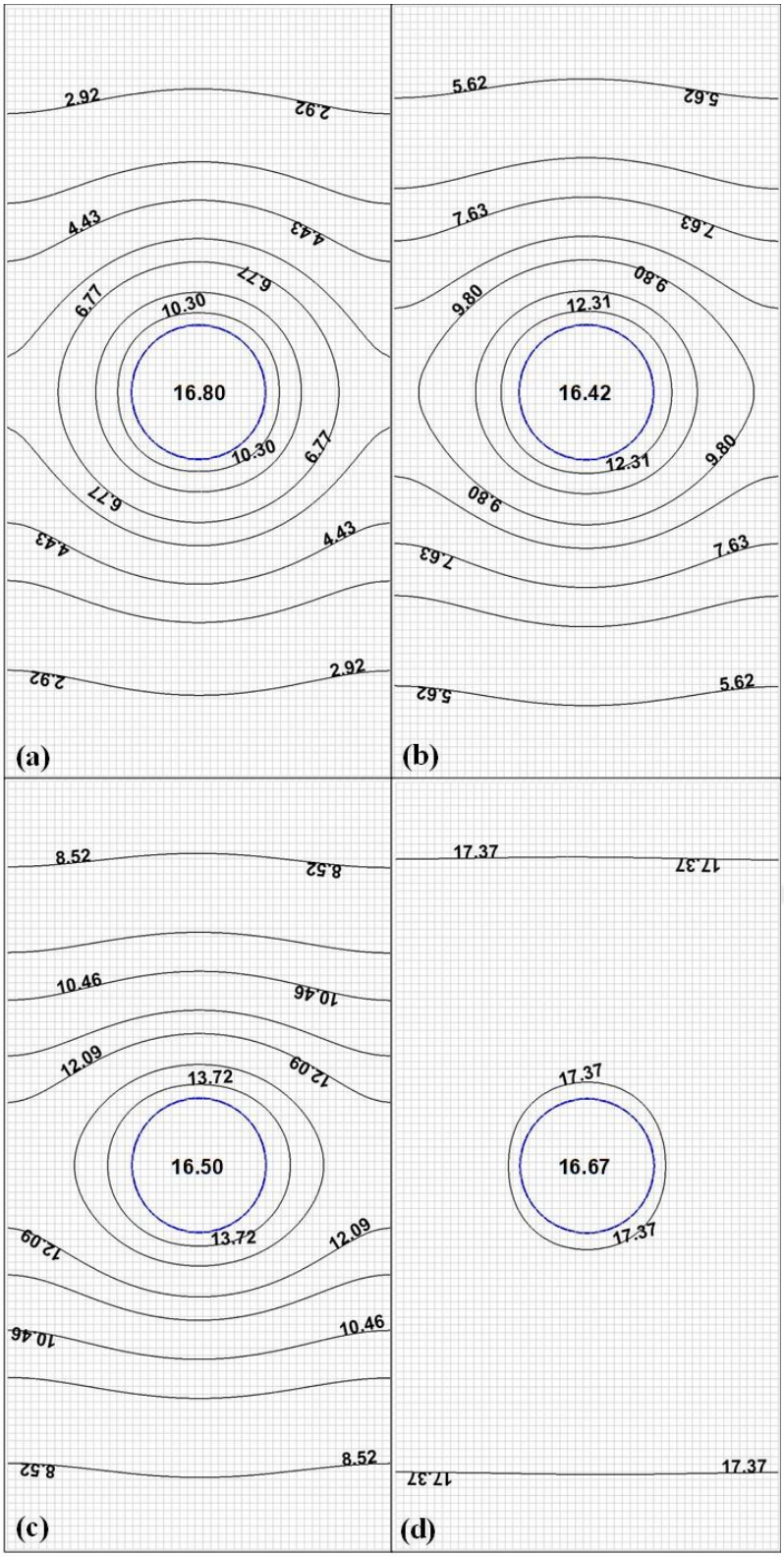
Şekil 4.34'de görüldüğü üzere deney sonuçları ile sayısal model sonuçları birbirine yakın çıkmıştır. Göl yatağının etkisi, akifer sınırları ve göl arasındaki hidrolik yük farkından açıkça görülmektedir. Şekil 4.34-a'da 2. dakika için karşılaştırma yapılmıştır ve göl su seviyesinin deneyde 15.3 cm, sayısal modelde 15.67 cm olup birbiri ile uyumlu olduğu görülmüştür. Gölde düşüş ve akiferde yükseliş devam etmiştir. 3. dakikada akiferi besleyen gölde su seviyesi piyezometrelerden 15.3 cm okunurken sayısal model değeri 15.5 cm'dir (Şekil 4.34-b). 5. dakikada yine her noktada deney ve sayısal model sonuçları benzer olup göl bölgesinde 15.1 cm'yi göstermektedir (Şekik 4.34-c). Kararlı akıma yaklaşıldığı 23. dakikada ise gölde piyezometre 15 cm, model 13.7 cm değerlerini almıştır.



Şekil 4.34: Deney VII için deneysel bulgular ile sayısal model bulgularının farklı zamanlar için karşılaştırması (a) 2. dakika, (b) 3. dakika, (c) 5. dakika, (d) 23. dakika.

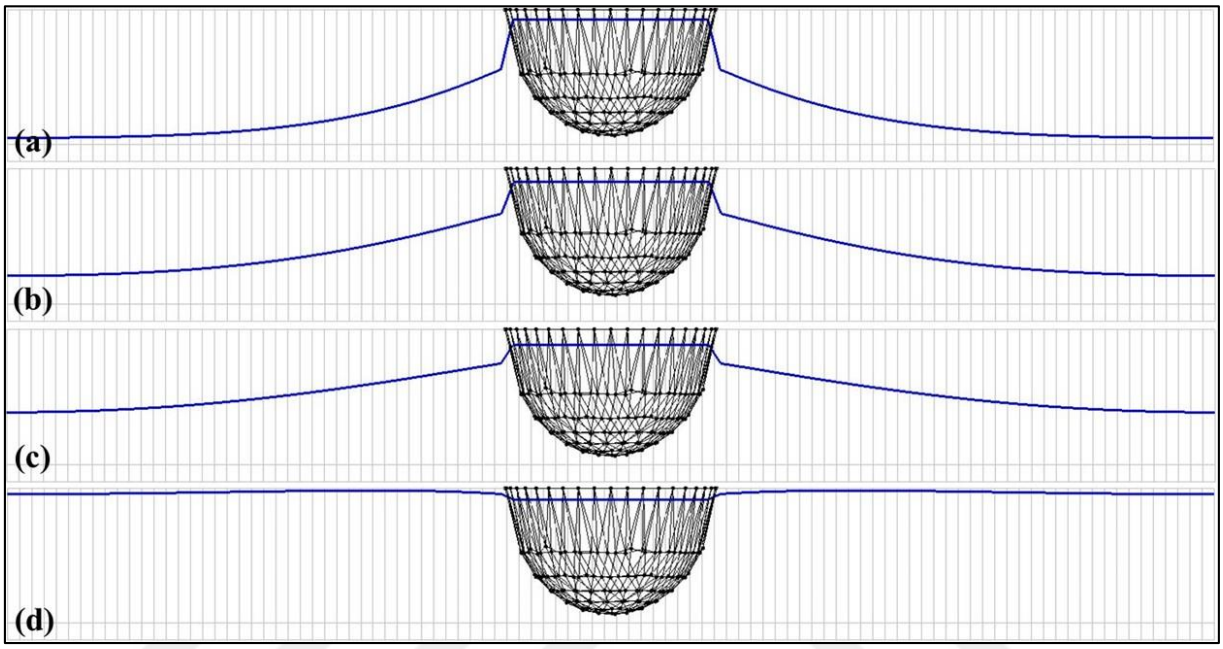
4.2.8. Deney VIII Modeli

Deney IV sistemine göl yatağı dahil edilerek gerçekleştirilen Deney VIII için oluşturulan MODFLOW modelinden elde edilen farklı zamanlar için akifer içerisindeki yeraltı su seviyesi dağılımı Şekil 4.35'de sunulmuştur. Deney IV'de olduğu gibi hem göl hem de yağış ile beslenen akiferde yeraltı suyu ilk andan itibaren hızla yükselmeye başlamıştır. Bu deneyde göl yatağının bu yükselişe etkisi gözlemlemiştir. 2. dakikada göl su yüksekliği 16.8 cm'ye düşerken akiferde sınırlara doğru yeraltı suyu seviyesi yaklaşık 3 cm yükselmiştir (Şekil 4.35-a). Göl yatağı nedeniyle gölden akifere akış yavaştır. 3. dakikada göl su seviyesi 16.42 cm, sınır bölgelerde 5.62 cm değerine ulaşmıştır (Şekil 4.35-b). 4. dakikaya kadar göl su seviyesi düşerken bu andan sonra yükselmeye başlamıştır ve 16.50 cm değerine ulaşmıştır. Akiferde yeraltı suyu da yükselmeye devam etmektedir (Şekil 4.35-c). Deney IV'de göl tarafından daha hızlı beslenen akiferin sınır bölgeleri 18 cm'ye 7.5 dakikada ulaştığı için o anda yağış kesilmiştir. Bu modelde göl yatağı nedeniyle bu süre içerisinde yeraltı suyunun ulaştığı seviye 17.37 cm'dir ve göl su seviyesi 16.67 cm'ye yükselmiştir. Akiferde yeraltı suyu göle kıyasla daha hızlı yükseldiği için besleme akiferden göle olacak şekilde değişmiştir (Şekil 4.35-d).



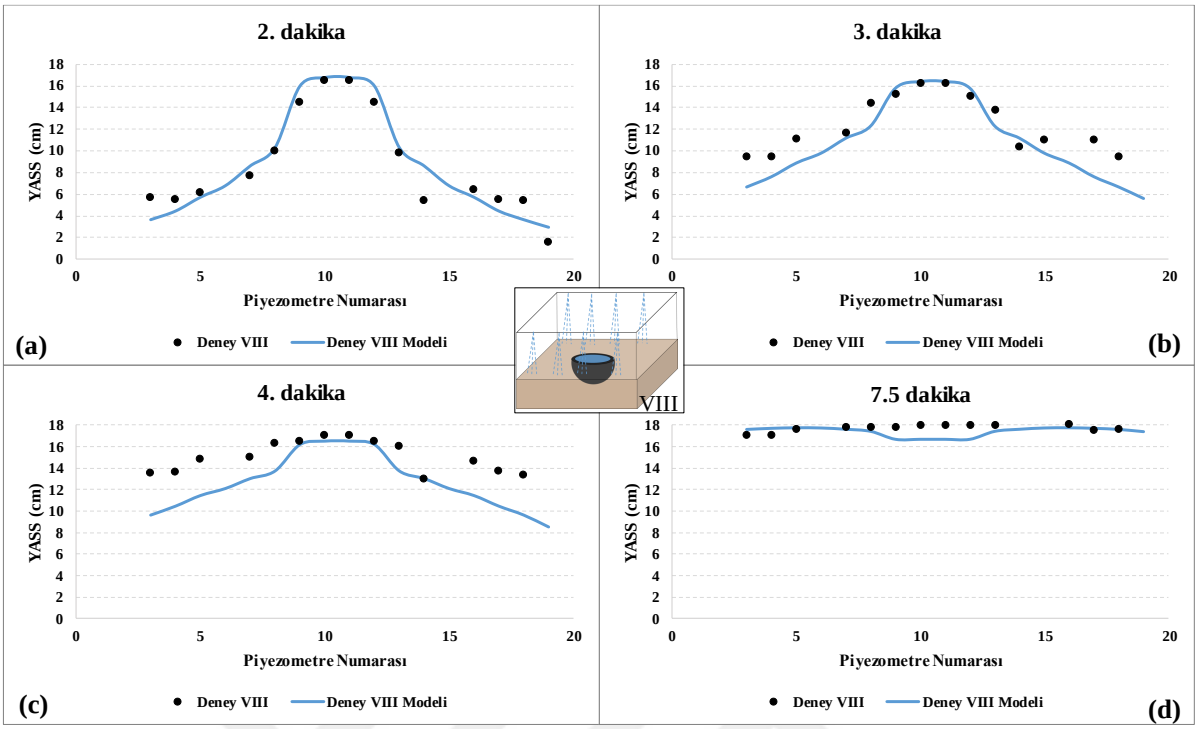
Şekil 4.35: Deney VIII Modeli ile hesaplanmış olan farklı zamanlara ait yeraltı suyu dağılımı plan görünümü (a) 2. dakika, (b) 3. dakika, (c) 4. dakika, (d) 7.5. dakika.

Şekil 4.36'da MODFLOW ile yapılan sayısal model sonucu farklı zaman dilimlerine ait yeraltı su seviyesinin kesit dağılımı görülmektedir. Burada görüldüğü gibi yağış akiferi göle kıyasla daha hızlı doldurarak 17.37 cm seviyesine yükselmiştir. Bu ana kadar gölün akiferi beslediği ancak yağış kesildikten sonra bu durumun tam tersi görülmektedir.



Şekil 4.36: Deney VIII Modeli ile hesaplanmış olan farklı zamanlara ait yeraltı suyu dağılımı kesit görünümü (a) 2. dakika, (b) 3. dakika, (c) 4. dakika, (d) 7.5. dakika.

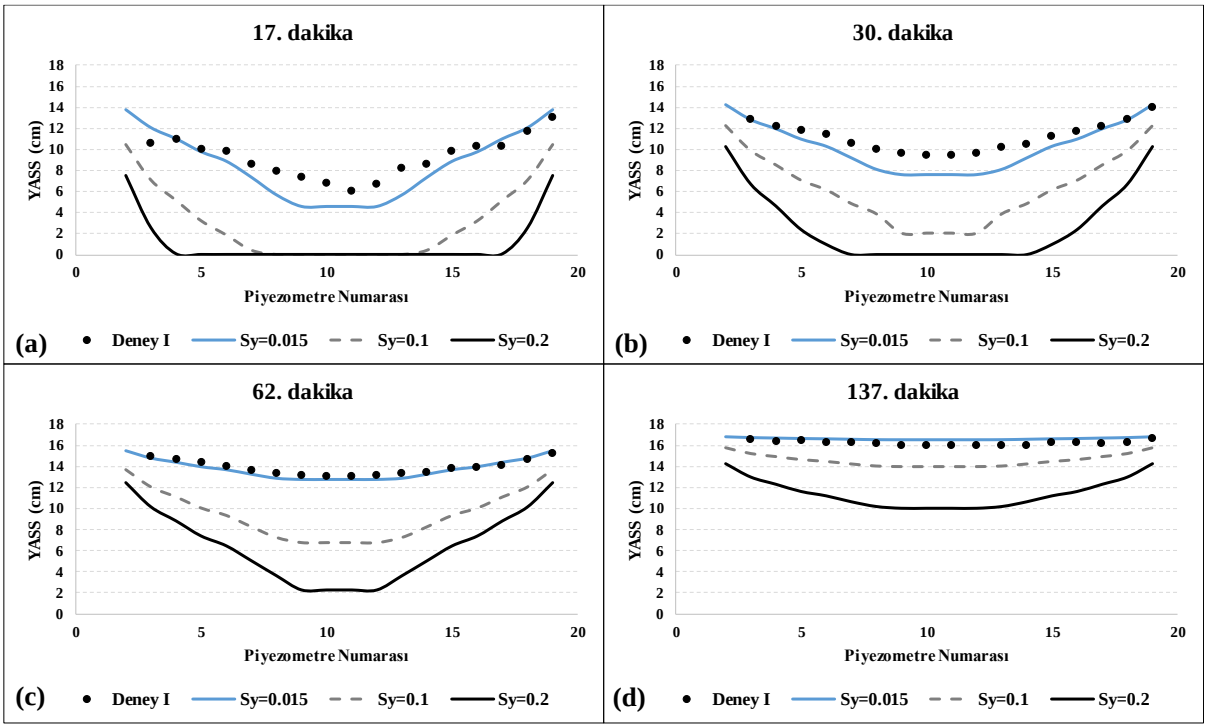
Şekil 4.37'de sayısal model bulguları ile deneysel bulgular karşılaştırılarak verilmiştir. Şekil 4.37-a'da görüldüğü üzere 2. dakikada deney sonuçları ile sayısal model sonuçları birbirine yakın çıkmıştır. Göl su seviyesi her ikisinde de 16.5 cm seviyelerindedir. İlerleyen zamanda deney sonuçları ile sayısal model sonuçları arasında bazı noktalarda farklar gözlemlenmiştir. Sayısal modele göre yağışın kapatıldığı ana kadar akiferin sınır bölgelerinde su seviyesi deneye göre daha yavaş yükselmiştir. Göl bölgesinde sonuçlar benzerdir. 3. dakikada göl su seviyesi 16.3 cm seviyelerinde olup (Şekil 4.37-b) 4. dakikada deneyde 17 cm, sayısal modelde 16.5 cm değerindedir (Şekil 4.37-c). 7.5 dakika sonra deney ve sayısal modelde akifer sınırlarında göl yatağı etkisiyle su yüksekliği 18 cm altındadır. Bu anda deneyde göl bölgesi 18 cm iken sayısal modele göre göl daha düşük seviyededir ve akiferden göle akış vardır (Şekil 4.37-d).



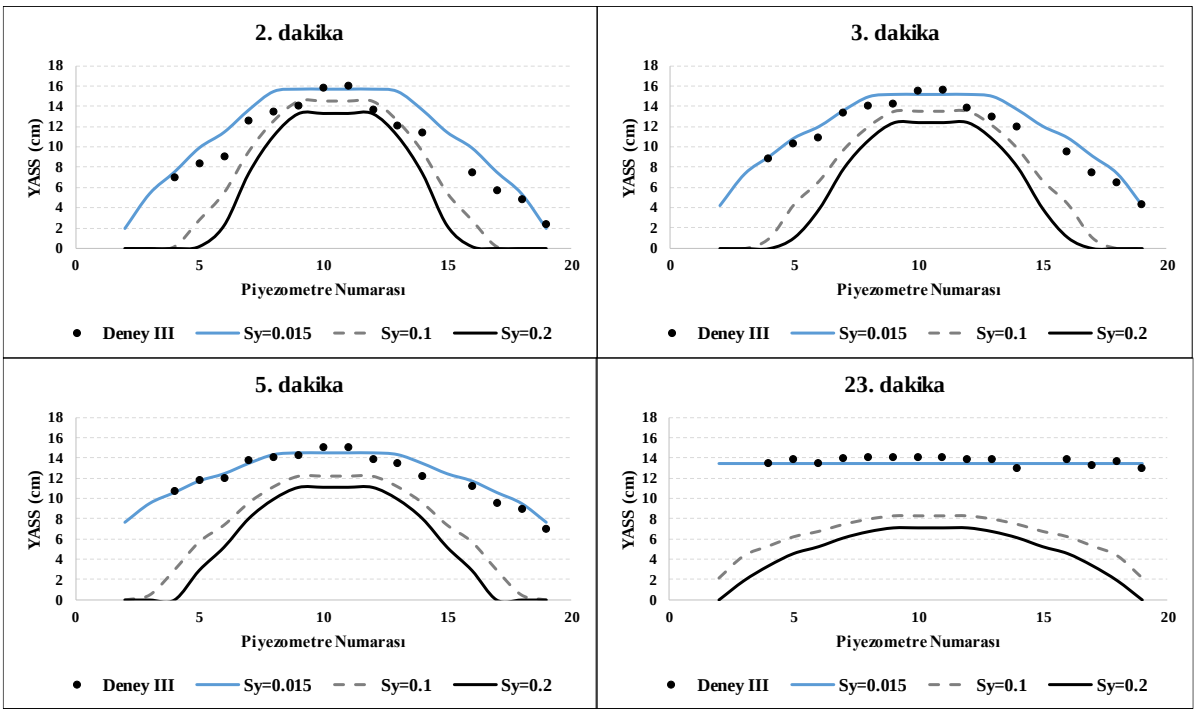
Şekil 4.37: Deney VIII için deneysel bulgular ile sayısal model bulgularının farklı zamanlar için karşılaştırması (a) 2. dakika, (b) 3. dakika, (c) 4. dakika, (d) 7.5. dakika.

4.2.9. Özgül Verimlilik Değerinin Kalibrasyon ile Belirlenmesi

Doğal yıkanmış kuma ait özgül verimlilik değerini belirlemek amacıyla yapılan araştırmalara göre bu değer 0.2-0.3 aralığındadır (Johnson, 1967). MODFLOW'da sayısal model oluşturulurken bu değerler kullanıldığında istenilen sonuca ulaşılamamıştır. Bu nedenle farklı değerler kullanılarak en uygun özgül verimlilik değeri belirlenmiştir. Kalibrasyon sırasında kullanılan değerlerin karşılaştırılması grafikler halinde sunulmuştur. Karşılaştırma S_y=0.2, S_y=0.1 ve S_y=0.015 değerleri için yapılmıştır. Bu değerler tüm deney modelleri üzerinde uygulanmış ve en uygun olan S_y=0.015 seçilmiştir. Şekil 4.38'de Deney I Modeli, Şekil 4.39'da Deney III Modeli üzerinde farklı özgül verimlilik değerleri sonucu zamana bağlı yeraltı suyundaki değişim görülmektedir. Grafiklerden görüldüğü üzere deney düzeneği sayısal olarak modellenirken ince bir alan teşkil etmesi nedeniyle normalden çok daha düşük bir özgül verimlilik değeri deney gözlemleri ile uyum sağlamıştır. Kalibrasyon sonucu belirlenen 0.015 değeri LPF akış paketine tanımlanmıştır.



Şekil 4.38: Deney I için deneysel bulgular ve farklı S_y değerleri ile oluşturulan sayısal model bulgularının farklı zamanlar için karşılaştırması (a) 17. dakika, (b) 30. dakika, (c) 62. dakika, (d) 137. dakika.

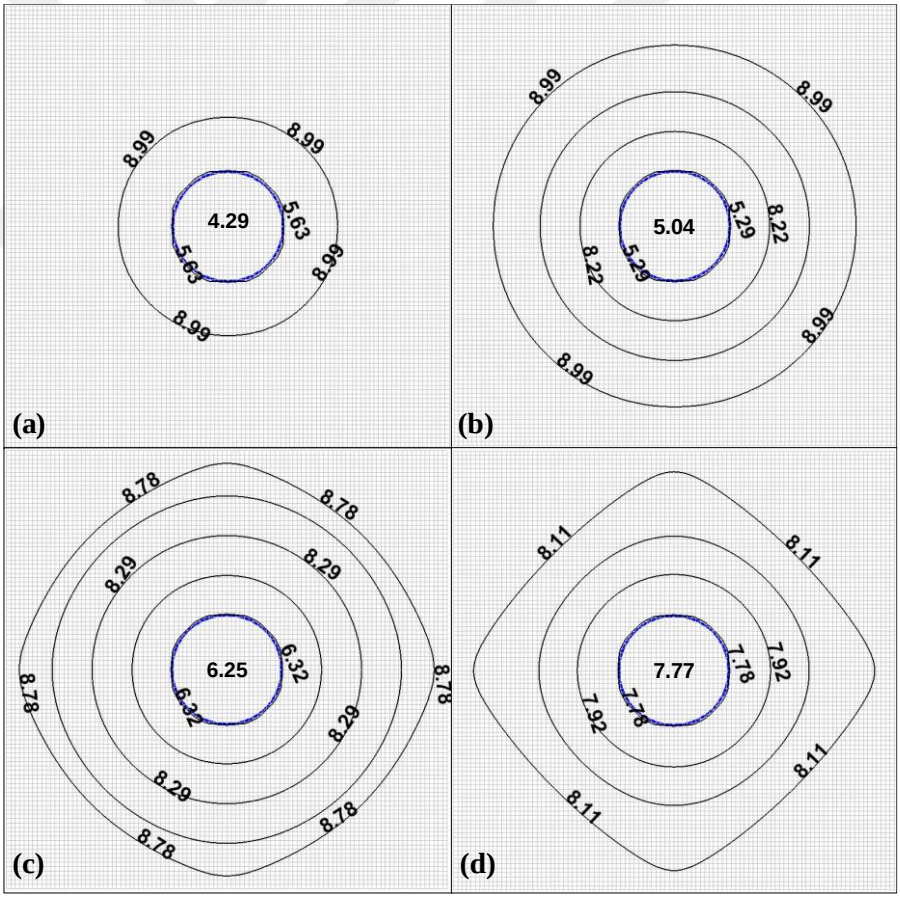


Şekil 4.39: Deney III için deneysel bulgular ve farklı S_y değerleri ile oluşturulan sayısal model bulgularının farklı zamanlar için karşılaştırması (a) 2. dakika, (b) 3. dakika, (c) 5. dakika, (d) 23. dakika.

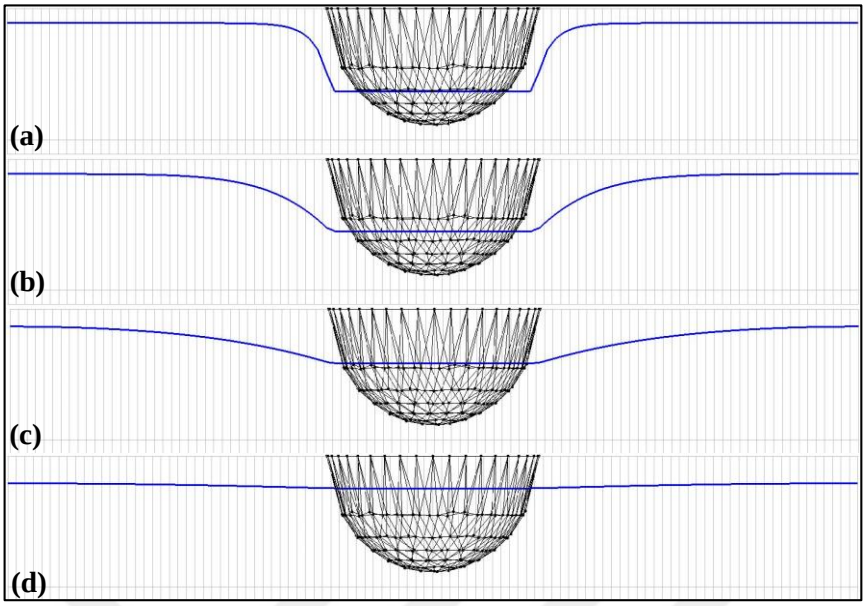
4.3.KAVRAMSAL MODEL BULGULARI

4.3.1. Kavramsal Model I

Akiferin gölü beslediği bu modelde başlangıçta yeraltı suyu seviyesi 9 m, göl su seviyesi 4 m olup göl yatağının olmadığı varsayılmıştır. Farklı zamanlar için yeraltı suyu dağılımı Şekil 4.40'da ve kesit görünümü Şekil 4.41'de verilmiştir. Göl su seviyesi 10. günde 29 cm yükselerek 4.29 m değerine ulaşmıştır. Akiferin göle yakın hücrelerinde su seviyesinde düşme görülmüştür. 100. günde bu değer 5.04 m olup tüm akiferde yeraltı su seviyesinde düşüş başlamıştır. 500. günde göl su seviyesi 6.25 m olup yeraltı suyunun kararlı akıma ulaştığı 2500. günde bu değer 7.77 m'dir. Akiferin gölden uzak noktalarındaki su seviyesi ise 8.11 m değerindedir. Göl su seviyesinin yükselme hızının zamanla düştüğü görülmektedir.



Şekil 4.40: Kavramsal Model I ile hesaplanmış olan farklı zamanlara ait yeraltı suyu dağılımı plan görünümü (a) 10. gün, (b) 100. gün, (c) 500. gün, (d) 2500. gün.

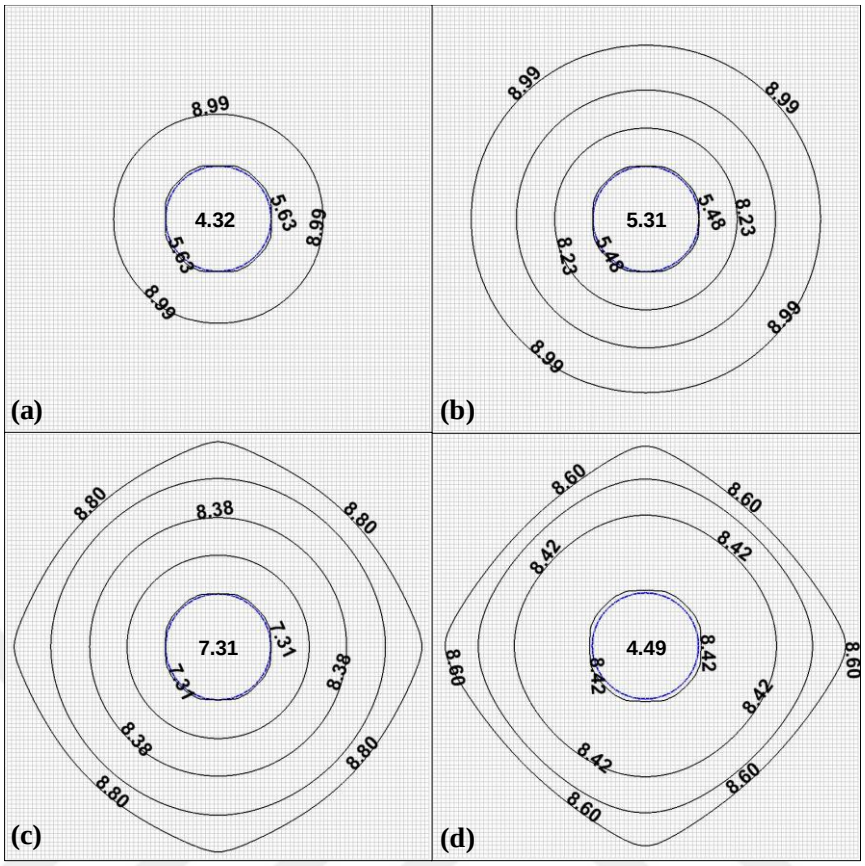


Şekil 4.41: Kavramsal Model I ile hesaplanmış olan farklı zamanlara ait yeraltı suyu dağılımı kesit görünümü (a) 10. gün, (b) 100. gün, (c) 500. gün, (d) 2500. gün.

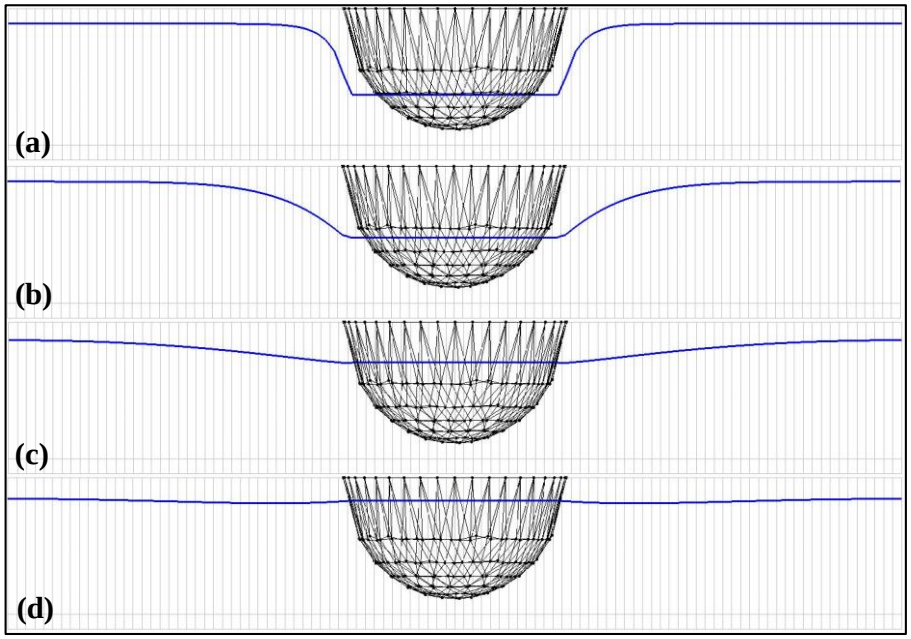
4.3.2. Kavramsal Model II

Akiferin gölü yağış koşulu altında beslediği bu modelde başlangıçta yeraltı suyu seviyesi 9 m, göl su seviyesi 4 m ve yağış 0.003 m/gün olup göl yatağının olmadığı varsayılmıştır. Yağış hem gölü hem de akiferi beslemektedir. Bu yağış değeri toprağın sızma kapasitesinden düşük olduğu için simülasyon süresi boyunca yağış devam etmektedir. Farklı zamanlar için yeraltı suyu dağılımı Şekil 4.42'de verilmiştir. Göl su seviyesi 10. günde 32 cm yükselerek 4.32 m değerine ulaşmıştır. 100. günde bu değer 5.31 m'ye ulaşmış olup akiferin göle uzak noktalarındaki su seviyesinde düşüş başlamıştır. 500. güne gelindiğinde göl su seviyesi 7.31 m'ye yükselmiştir. Akifer yağış ile beslendiği için sınır noktalarında yeraltı suyu düşüş miktarı azdır. Yağış etkisiyle yeraltı suyunun kararlı duruma ulaşması hızlanmıştır. 900. günde 8.5 m seviyelerinde kararlı duruma ulaşılmıştır.

Şekil 4.43'de MODFLOW ile yapılan sayısal model sonucu farklı zaman dilimlerine ait yeraltı su seviyesinin kesit dağılımı görülmektedir. Göl su seviyesinin yükselme hızının zamanla düştüğü görülmektedir. Şekilde görüldüğü üzere kararlı durumda göl su seviyesi, göl kıyısındaki su seviyesinin bir miktar üzerine çıkmıştır.



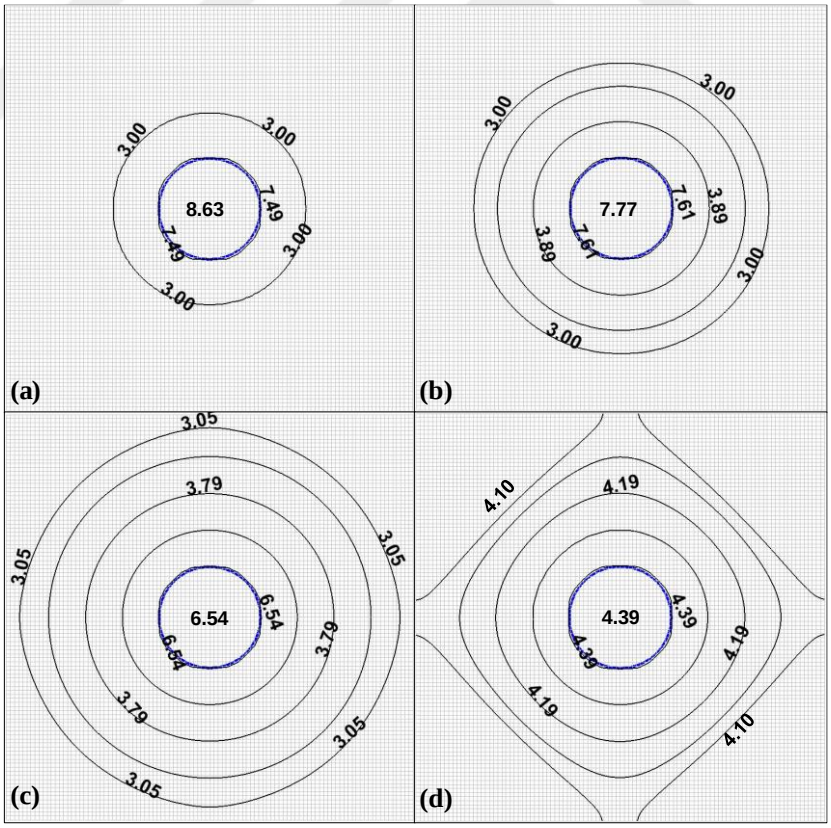
Şekil 4.42: Kavramsal Model II ile hesaplanmış olan farklı zamanlara ait yeraltı suyu dağılımı plan görünümü (a) 10. gün, (b) 100. gün, (c) 500. gün, (d) 900. gün.



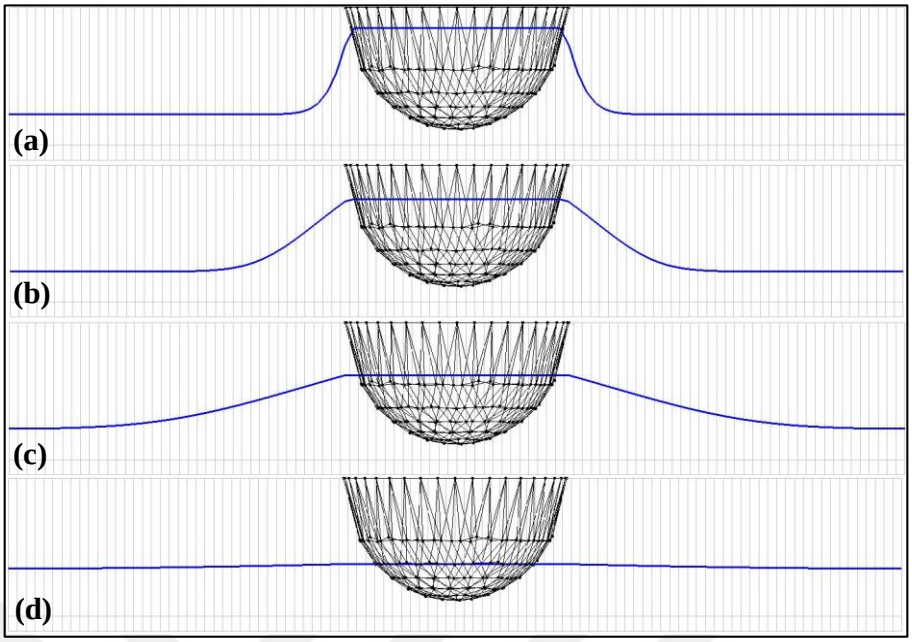
Şekil 4.43: Kavramsal Model II ile hesaplanmış olan farklı zamanlara ait yeraltı suyu dağılımı kesit görünümü (a) 10. gün, (b) 100. gün, (c) 500. gün, (d) 900. gün.

4.3.3. Kavramsal Model III

Gölün akiferi beslediği bu modelde başlangıçta göl su seviyesi 9 m, yeraltı suyu seviyesi 3 m olup göl yatağının olmadığı varsayılmıştır. Şekil 4.44'de farklı zamanlar için yeraltı suyu dağılımı görülmektedir. Gölden beslenen akiferde yeraltı suyu yükselişi yalnızca göl kıyısı boyunca meydana gelmiştir. Akifer sınırlarında 3 cm su seviyesi korunmuştur. 10. günde göl suyu 8.63 m, 100. günde 7.77 m seviyelerine düşmüştür. Gölden akifere akış hızı zamanla daha da yavaşlamıştır. 500. günde göl su seviyesi 6.54 m'ye düşmüş olup akifer sınırlarında yükselmeler başlamıştır. Yeraltı suyu kararlı duruma ancak 5000. günde ulaşmıştır. Bu anda yeraltı suyu yüksekliği 4 m üzerindedir. Bu andan itibaren gölden akifere besleme çok küçük hızlarda devam etmiştir. MODFLOW yeraltı suyunun sürekli sızmaya devam ettiği prensibine göre hesap yapması nedeniyle 5000 gün içerisinde meydana gelen sızmayı hesap ederek bu yükseklik değerine ulaşmıştır. Şekil 4.45'de MODFLOW ile yapılan sayısal model sonucu farklı zaman dilimlerine ait yeraltı su seviyesinin kesit dağılımı görülmektedir.



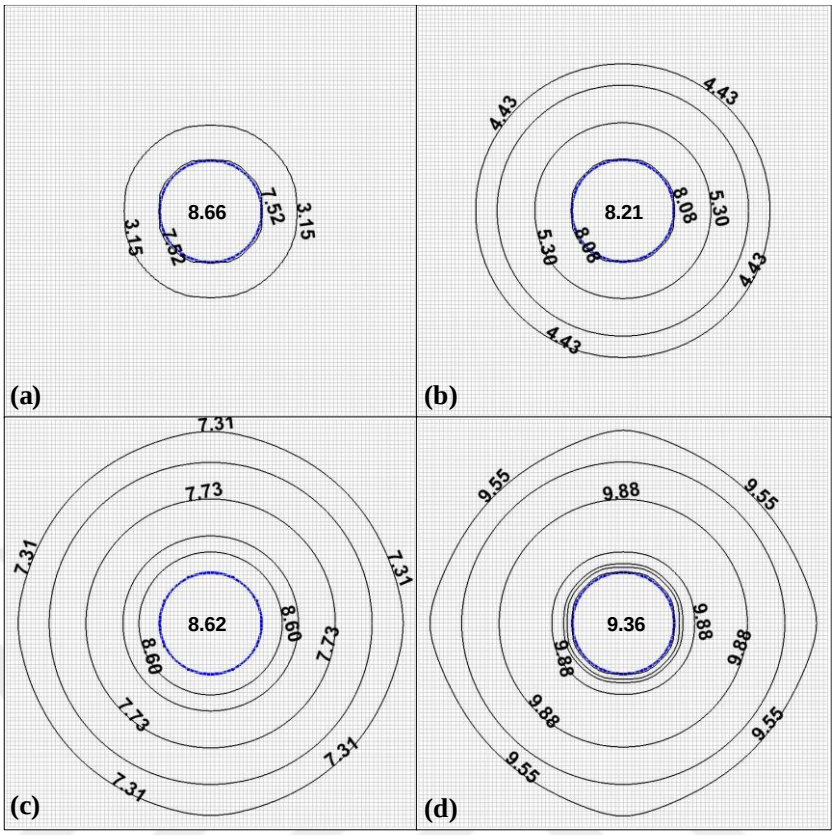
Şekil 4.44: Kavramsal Model III ile hesaplanmış olan farklı zamanlara ait yeraltı suyu dağılımı plan görünümü (a) 10. gün, (b) 100. gün, (c) 500. gün, (d) 5000. gün.



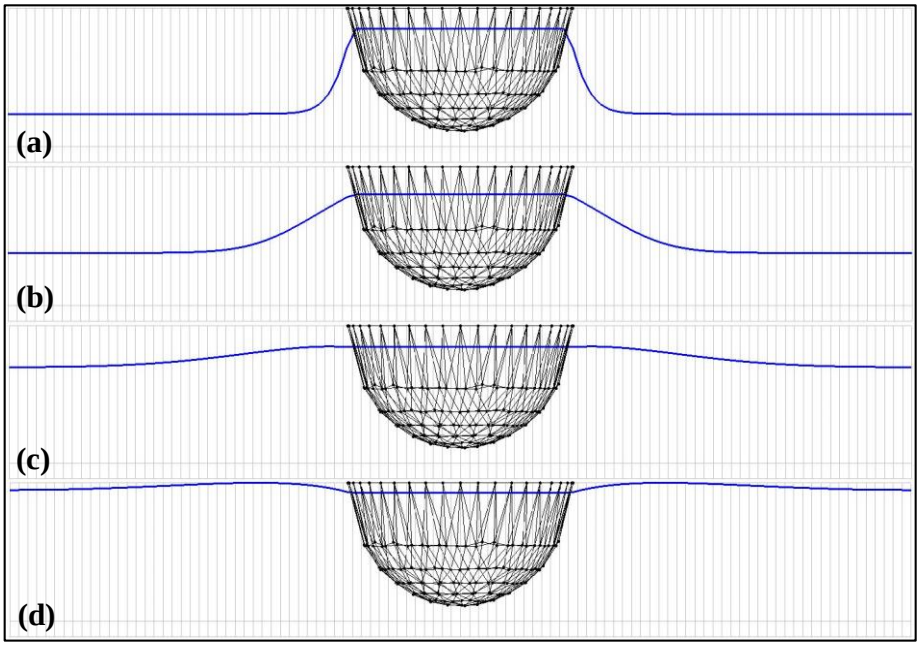
Şekil 4.45: Kavramsal Model III ile hesaplanmış olan farklı zamanlara ait yeraltı suyu dağılımı kesit görünümü (a) 10. gün, (b) 100. gün, (c) 500. gün, (d) 5000. gün.

4.3.4. Kavramsal Model IV

Gölün akiferi yağış durumunda beslediği bu modelde başlangıçta yeraltı suyu seviyesi 3 m, göl su seviyesi 9 m ve yağış miktarı 0.003 m/gün olup göl yatağının olmadığı varsayılmıştır. Farklı zamanlar için yeraltı suyu dağılımı Şekil 4.46'da ve kesit görünümü Şekil 4.47'de verilmiştir. Yağış olmadığı durumda gölün akiferi beslemesi ve kararlı duruma ulaşılması uzun sürede gerçekleşmektedir. Yağış olduğunda tüm sistemde yeraltı suyu hızla yükselmiştir. 10. günde göl su seviyesi 8.66 m'ye düşerken akiferin her noktasında yeraltı suyu seviyesinde artma görülmektedir. 100. günde gölde düşüş devam etmiş ve seviye 8.21 m olarak hesaplanmıştır. Sonrasında yağışın etkisiyle hem gölde hem akiferde yükselme meydana gelmiştir. 300. güne gelindiğinde göl su seviyesi 8.62 m'ye yükselmiştir. Akiferin hem göl hem de yağış ile beslenmesi sonucu 450. günde 9.50 m seviyelerinde kararlı duruma ulaşılmıştır. Şekil 4.47-d'de görüldüğü üzere kararlı durumda göl çevresinde su seviyelerinde yükselmeler görülmüştür.



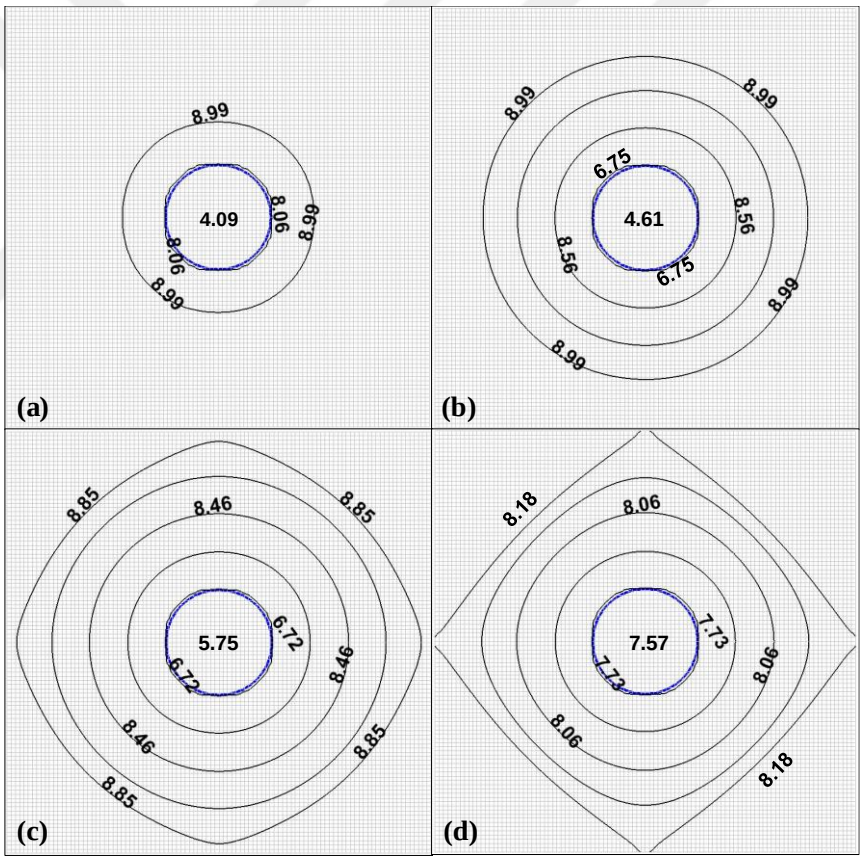
Şekil 4.46: Kavramsal Model IV ile hesaplanmış olan farklı zamanlara ait yeraltı suyu dağılımı plan görünümü (a) 10. gün, (b) 100. gün, (c) 300. gün, (d) 450. gün.



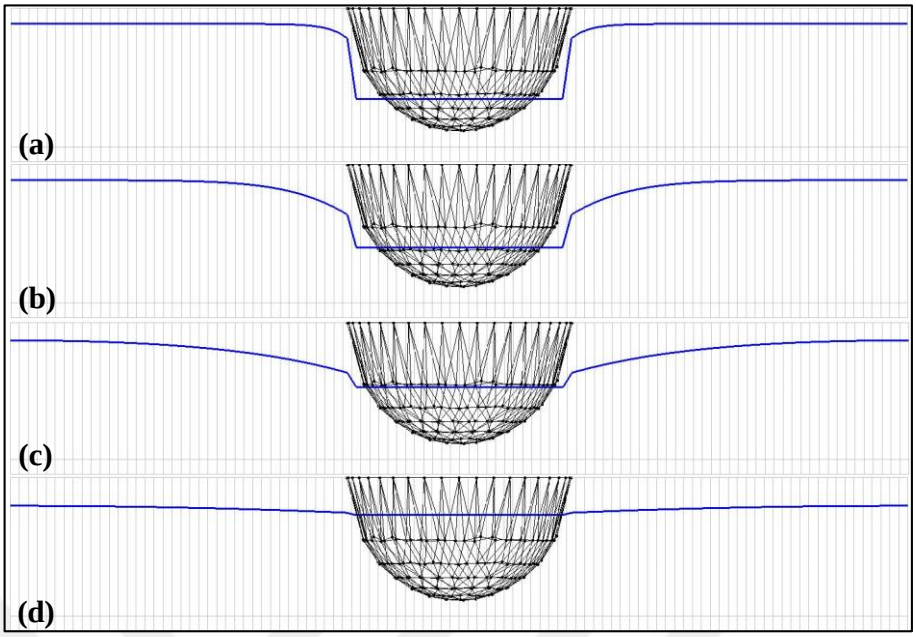
Şekil 4.47: Kavramsal Model IV ile hesaplanmış olan farklı zamanlara ait yeraltı suyu dağılımı kesit görünümü (a) 10. gün, (b) 100. gün, (c) 300. gün, (d) 450. gün.

4.3.5. Kavramsal Model V

Gölün akifer tarafından beslendiği bu modelde göl ile akifer arasında, akiferden daha düşük hidrolik iletkenliğe sahip bir yatak bulunmaktadır. Bu yatağın bulunması durumunda göl-akifer arasındaki su geçiş hızının düştüğü Şekil 4.48'de görülen yeraltı suyu dağılımından ve Şekil 4.49'da görülen yeraltı suyu kesit dağılımından anlaşılmaktadır. 10. günde göl su seviyesinde 9 cm, 100. günde ise 61 cm'lik yükselme meydana gelmiştir. Bu süre boyunca göl kıyısı haricinde akiferde yeraltı suyunda düşüş az seviyededir. 500. güne gelindiğinde göl su seviyesi 5.71 m'ye ulaşmış; artış yavaşlayarak devam etmiş ve 2500. günde 7.57 m seviyesine ulaşmıştır. Akiferin göle uzak noktalarında yeraltı su seviyesi göl su seviyesinden yukarıda olup henüz kararlı duruma ulaşılmamıştır.



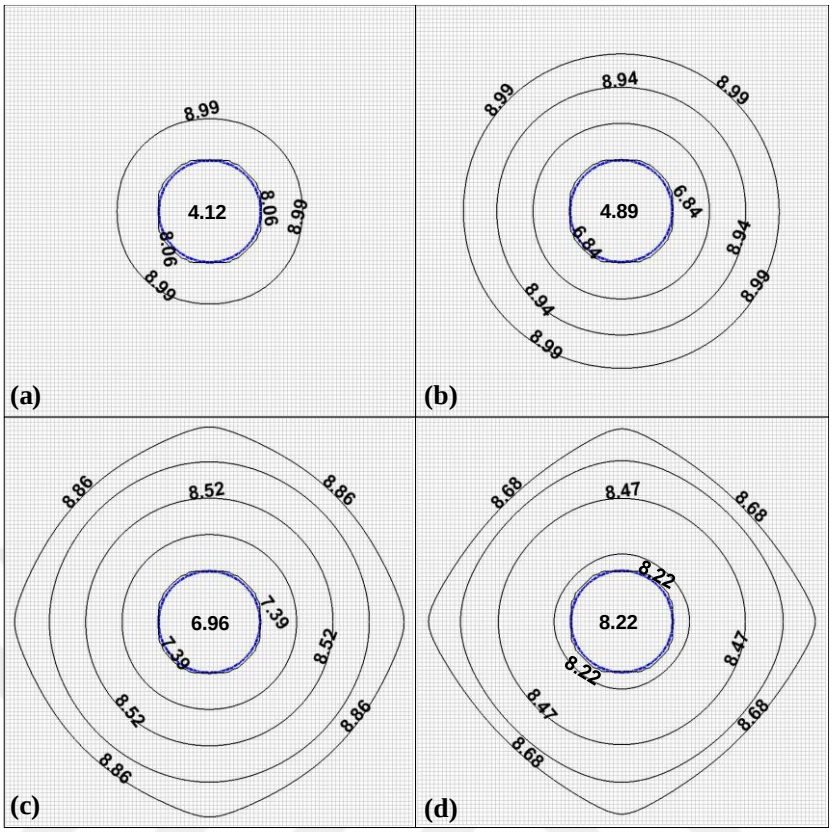
Şekil 4.48: Kavramsal Model V ile hesaplanmış olan farklı zamanlara ait yeraltı suyu dağılımı plan görünümü (a) 10. gün, (b) 100. gün, (c) 500. gün, (d) 2500. gün.



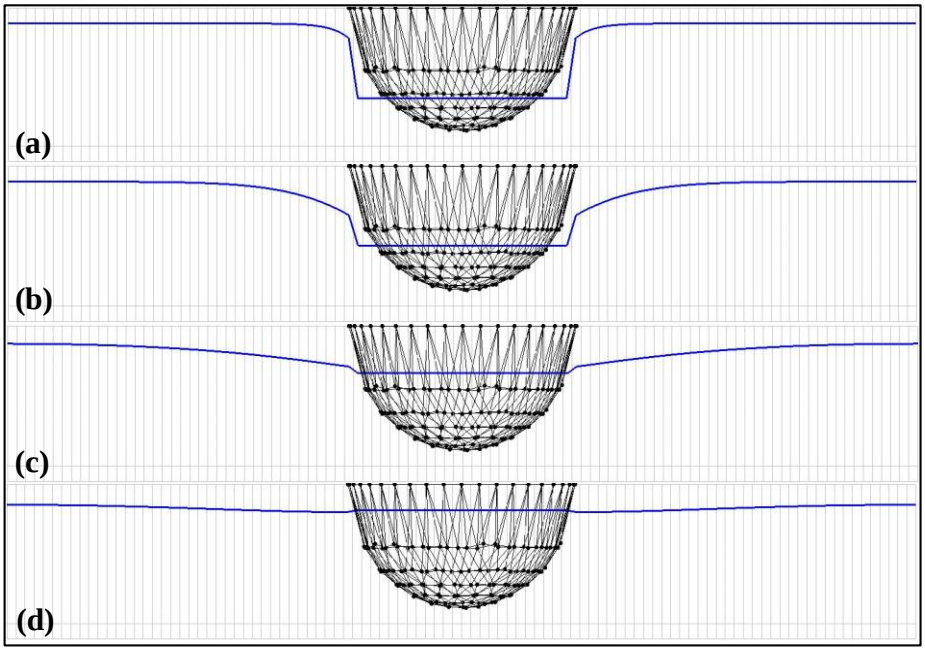
Şekil 4.49: Kavramsal Model V ile hesaplanmış olan farklı zamanlara ait yeraltı suyu dağılımı kesit görünümü (a) 10. gün, (b) 100. gün, (c) 500. gün, (d) 2500. gün.

4.3.6. Kavramsal Model VI

Akiferin gölü yağış durumunda beslediği bu modelde göl ile akifer arasında, akiferden daha düşük hidrolik iletkenliğe sahip bir yatak bulunmaktadır. Bu yatağın bulunması durumunda göl-akifer arasındaki su geçiş hızının düştüğü Şekil 4.50'de görülen yeraltı suyu dağılımından ve Şekil 4.51'de görülen yeraltı suyu kesit dağılımından anlaşılmaktadır. 10. günde göl su seviyesinde 12 cm, 100. günde ise 89 cm'lik yükselme meydana gelmiştir. Bu süre boyunca akifer sınırlarında yeraltı suyunda düşüş yaşanmamıştır. 500. güne gelindiğinde tüm noktalarda yeraltı suyu seviyesinde düşüş yaşanmıştır. Göl su seviyesi ise yükselerek 6.96 m'ye ulaşmıştır. Hem göl yatağının akiferden göle su akışını bir miktar engellemesi, hem de yağış nedeniyle akiferin sınır noktalarında yeraltı suyu düşüş miktarı azdır. Bu noktalarda yeraltı su seviyesi göl su seviyesinden yukarıda olup henüz kararlı duruma ulaşılmamıştır.



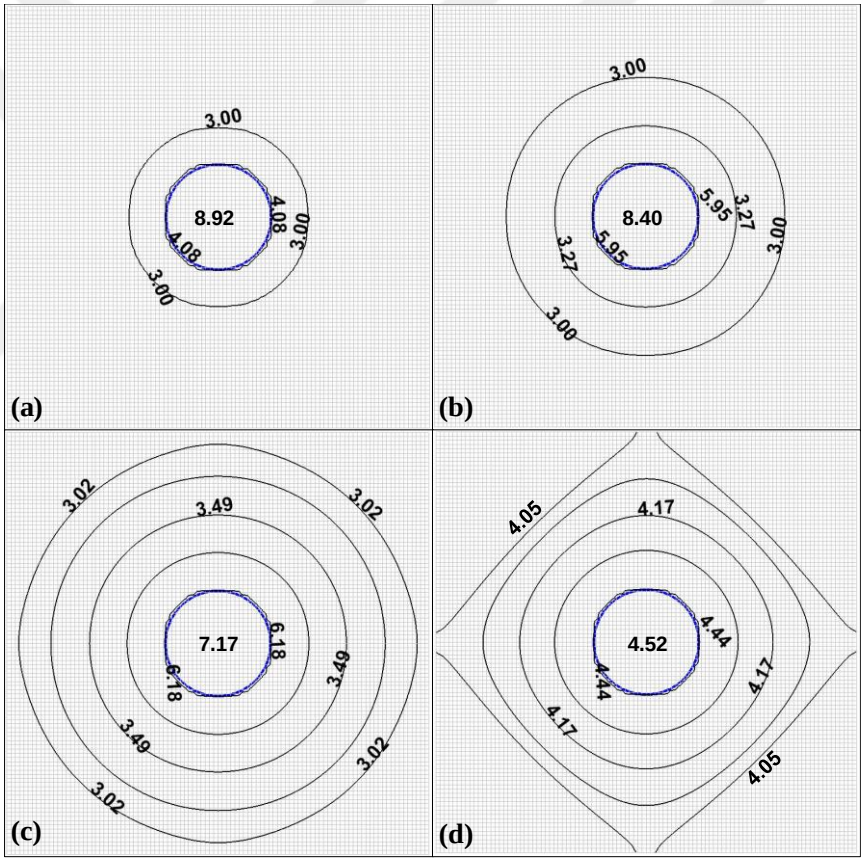
Şekil 4.50: Kavramsal Model VI ile hesaplanmış olan farklı zamanlara ait yeraltı suyu dağılımı plan görünümü (a) 10. gün, (b) 100. gün, (c) 500. gün, (d) 900. gün.



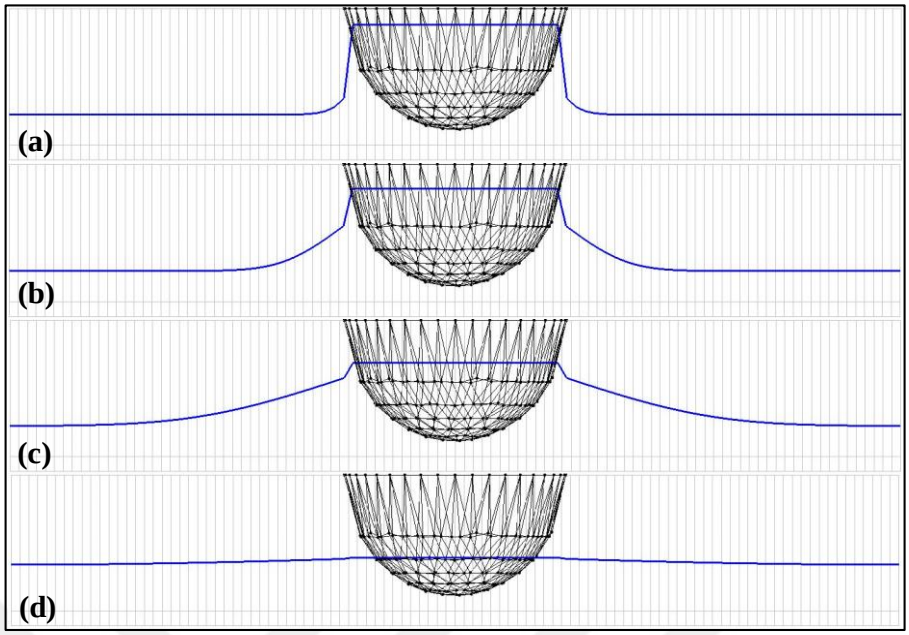
Şekil 4.51: Kavramsal Model VI ile hesaplanmış olan farklı zamanlara ait yeraltı suyu dağılımı kesit görünümü (a) 10. gün, (b) 100. gün, (c) 500. gün, (d) 900. gün.

4.3.7. Kavramsal Model VII

Gölün akiferi beslediği bu modelde göl ile akifer arasında, akiferden daha düşük hidrolik iletkenliğe sahip bir yatak bulunmaktadır. Yatağın göl-akifer arasındaki su geçiş hızına etkisi Şekil 4.52'de görülen yeraltı suyu dağılımından ve Şekil 4.53'de görülen yeraltı suyu kesit dağılımından anlaşılmaktadır. 10. günde göl su seviyesi 8.92 m, 100. günde 8.40 m değerlerine düşerken akiferin göl kıyısına yakın bölgelerinde yeraltı suyu hafif yükselmiştir. Gölden akifere su akışı zamanla yavaşlamıştır. Akiferin göle uzak noktalarında su seviyesinde düşüş 500. günden sonra meydana gelmiştir, göl su seviyesi ise 7.17 m'dedir. 5000. güne gelindiğinde göl ve akifer arasında yaklaşık 50 cm'lik su seviyesi farkı olup henüz kararlı duruma ulaşılmamıştır.



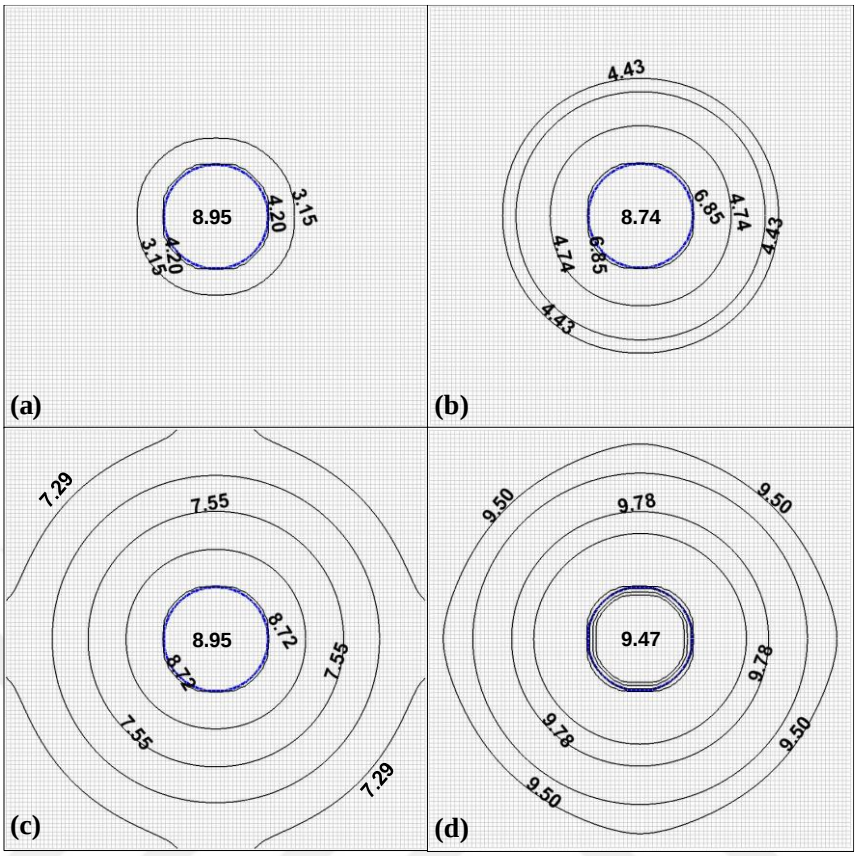
Şekil 4.52: Kavramsal Model VII ile hesaplanmış olan farklı zamanlara ait yeraltı suyu dağılımı plan görünümü (a) 10. gün, (b) 100. gün, (c) 500. gün, (d) 5000. gün.



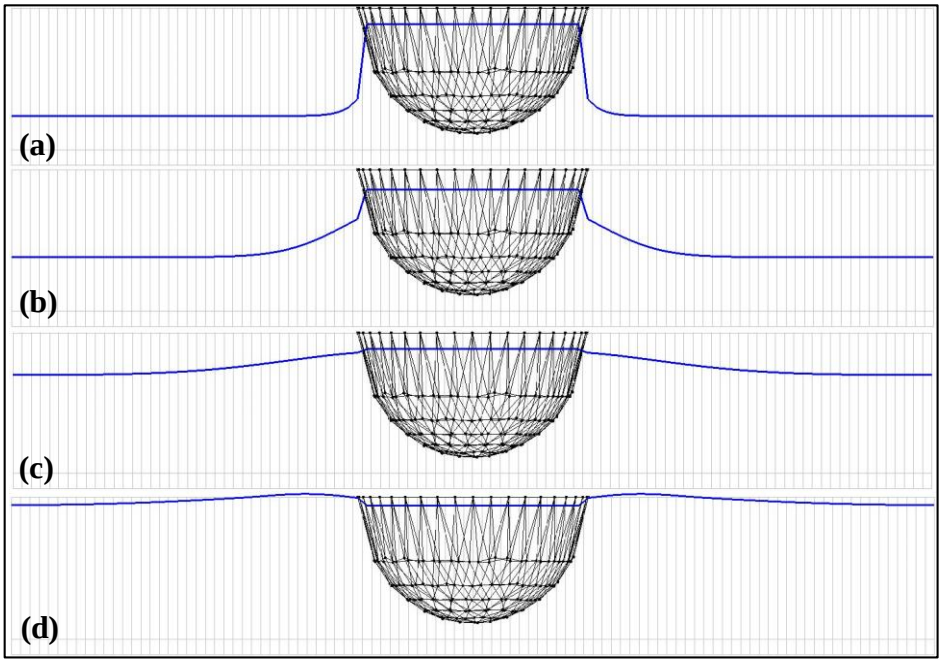
Şekil 4.53: Kavramsal Model VII ile hesaplanmış olan farklı zamanlara ait yeraltı suyu dağılımı kesit görünümü (a) 10. gün, (b) 100. gün, (c) 500. gün, (d) 5000. gün.

4.3.8. Kavramsal Model VIII

Gölün akiferi yağış durumunda beslediği bu modelde göl ile akifer arasında, akiferden daha düşük hidrolik iletkenliğe sahip bir yatak bulunmaktadır. Başlangıçta yeraltı suyu seviyesi 3 m, göl su seviyesi 9 m ve yağış miktarı 0.003 m/gün'dür. Farklı zamanlar için yeraltı suyu dağılımı Şekil 4.54'de ve kesit görünümü Şekil 4.55'de verilmiştir. Göl yatağı etkisiyle gölden akifere su akışı az miktarda gerçekleşmiştir. 10. günde göl su seviyesinde 5 cm'lik bir düşüş görülmüştür. 100. günde göl seviyesi 8.74 m olarak hesaplanmıştır. Bir süre sonra yağışın etkisiyle göl su seviyesinde yükselme başlamıştır. 300. güne gelindiğinde seviye tekrar 8.95 m'ye çıkmıştır. 450. günde ise yaklaşık 9.50 m seviyelerinde kararlı duruma ulaşılmıştır. Şekil 4.55-d'de göl çevresinde bölgesel olarak bir yükseliş görülmektedir.



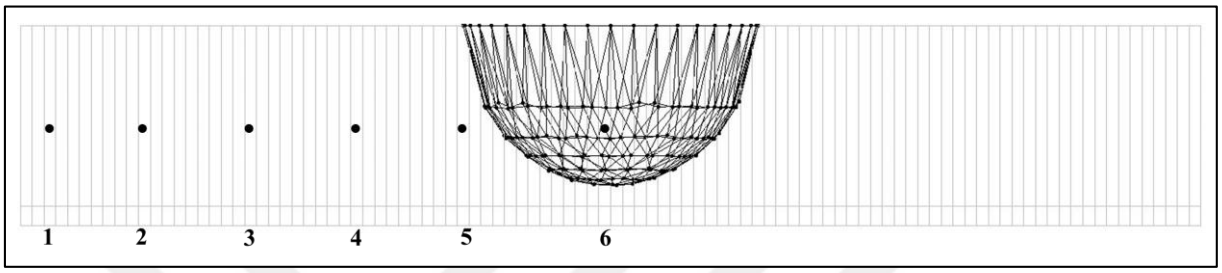
Şekil 4.54: Kavramsal Model VIII ile hesaplanmış olan farklı zamanlara ait yeraltı suyu dağılımı plan görünümü (a) 10. gün, (b) 100. gün, (c) 300. gün, (d) 450. gün.



Şekil 4.55: Kavramsal Model VIII ile hesaplanmış olan farklı zamanlara ait yeraltı suyu dağılımı kesit görünümü (a) 10. gün, (b) 100. gün, (c) 300. gün, (d) 450. gün.

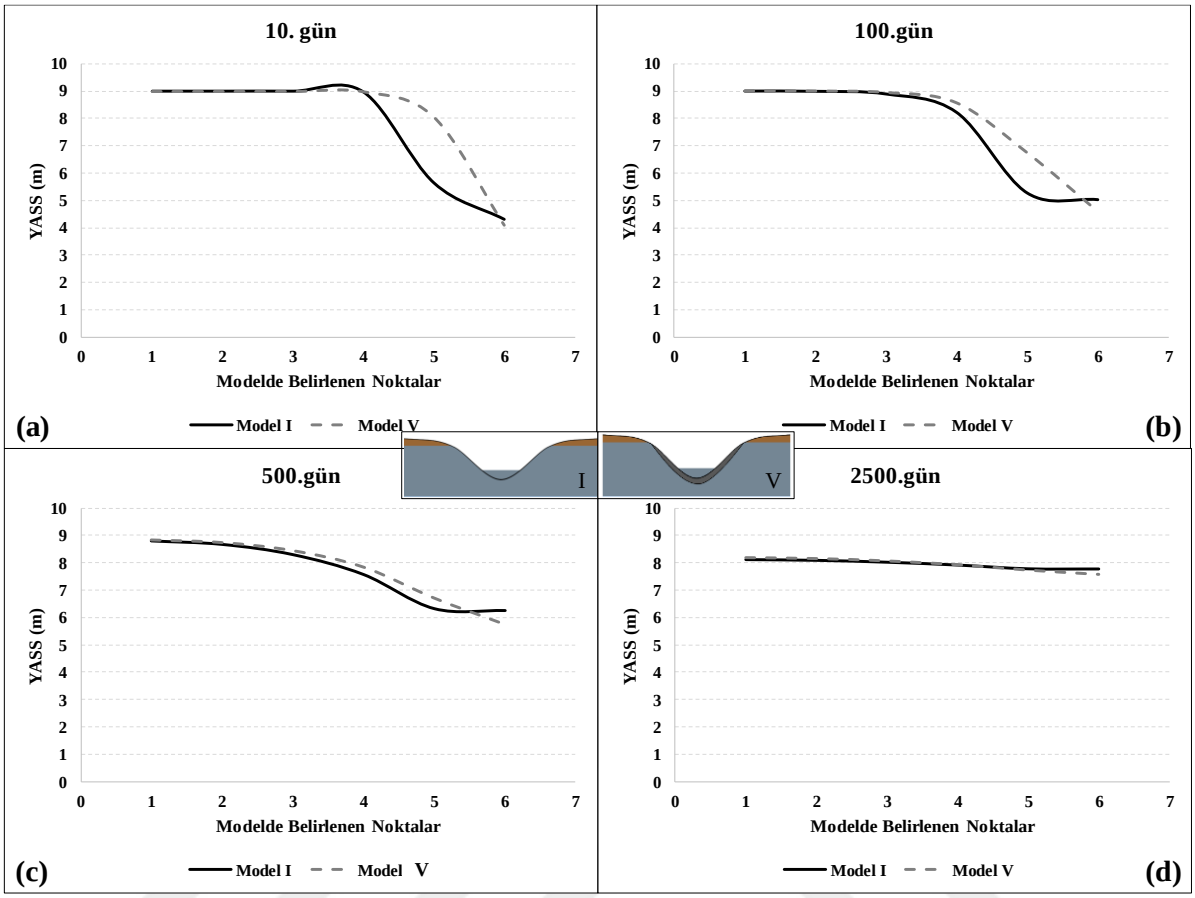
4.3.9. Kavramsal Model Bulgularının Karşılaştırması

Göl yatağı ve yağış gibi parametrelerin göl-akifer etkileşimi üzerindeki etkilerini analiz etmek amacıyla kurulan kavramsal modellerin karşılaştırılması yapılmıştır. göl merkezinden akifer kıyısına kadar belli mesafelerdeki su yükseklikleri okunmuş ve kıyaslanmıştır. okumanın yapıldığı mesafeler Şekil 4.56'da verilmiştir.



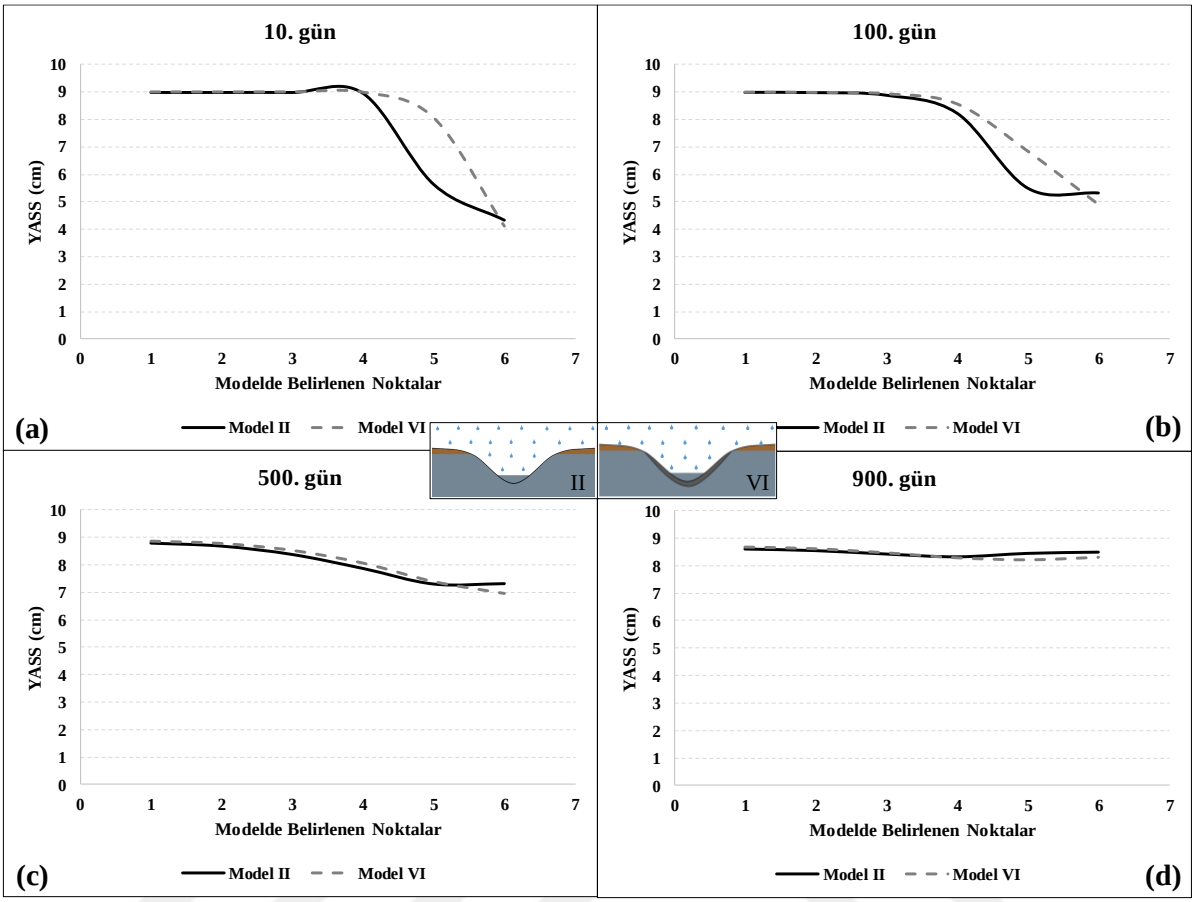
Şekil 4.56: Gölden akifer kıyısına kadar belirlenen lokasyonlar.

İlk olarak Kavramsal Model I ve Kavramsal Model V modelleri karşılaştırılarak akiferin gölü beslediği durumda göl yatağının buna etkisi belirlenmiştir. Şekil 4.57'ye göre göl yatağı özellikle ilk 100 günde akiferden göle akışı kısmen engellemiştir. Zaman ilerledikçe göl yatağı etkisi azalmıştır. Bunun nedeni ilk günlerde yeraltı suyu hızının yüksek olmasıdır. 2500. günde Kavramsal Model I'de göl su seviyesi 7.77 m değerinde iken Model V'de 7.57 m olup göl yatağının olduğu modelde sistemin dengeye ulaşma süresi daha uzundur. Ayrıca göl yatağı etkisinin yerel olduğu yani gölün çevresinde etkili olduğu ve gölden uzaklaştıkça etkinin azaldığı görülmektedir.



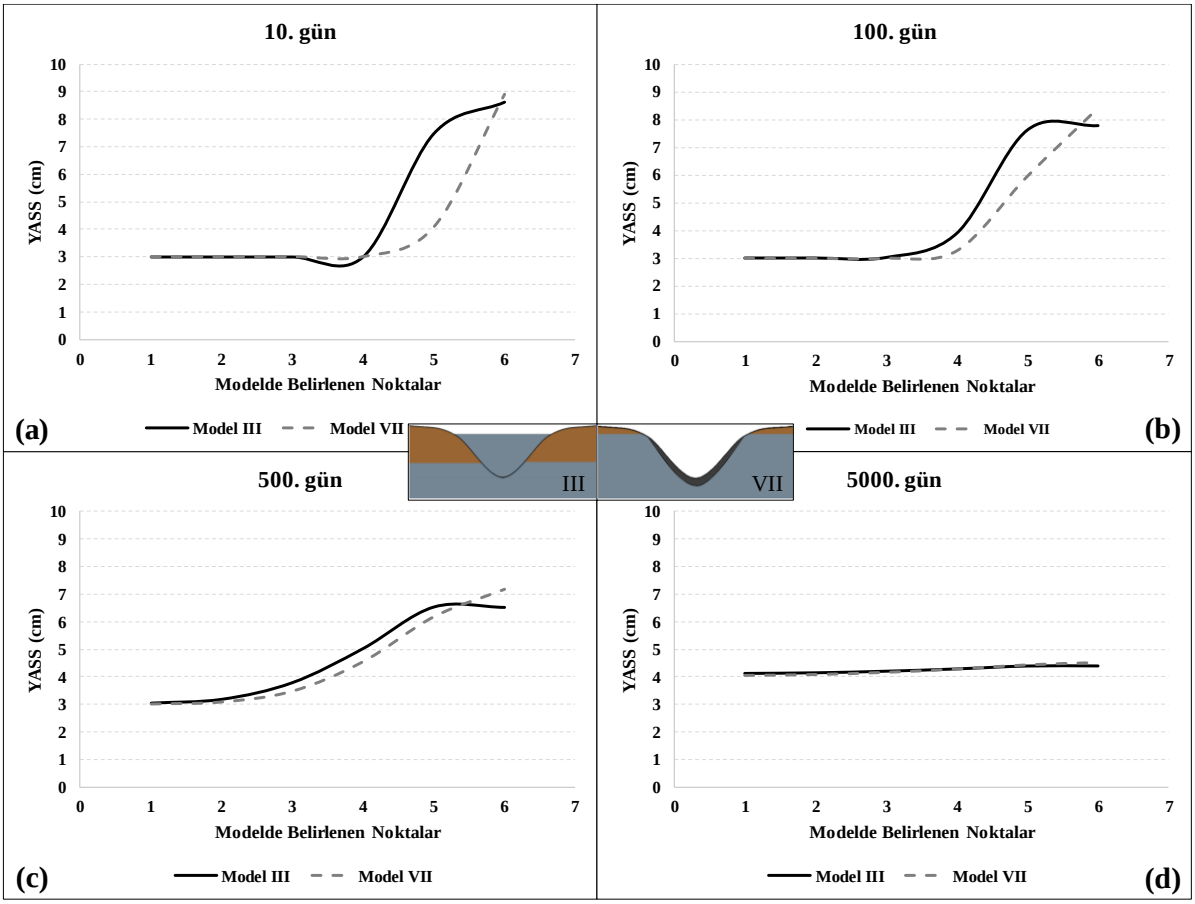
Şekil 4.57: Kavramsal Model I ve Kavramsal Model V'in farklı zamanlara ait piyezometre değerlerinin karşılaştırması (a) 10. gün, (b) 100. gün, (c) 500. gün, (d) 2500. gün.

Kavramsal Model II ve Kavramsal Model VI modelleri karşılaştırılarak akiferin gölü yağış sırasında beslediği durumda göl yatağının buna etkisi belirlenmiştir. Şekil 4.58'e göre göl yatağının etkisi ilk günlerde görülmektedir. Bir önceki karşılaştırmada olduğu gibi yatak etkisi zamanla azalmış ve bulunduğu bölge ile sınırlı kalmıştır. Kavramsal Model II'nin kararlı duruma ulaştığı 900. günde göl su seviyesi 8.49 m iken Kavramsal Model VI'da bu değer 8.22 m olup bu modelin kararlı duruma ulaşma süresi daha uzundur. Göl yatağı akiferden göle akışa bir miktar engel teşkil ettiği için akifer sınırlarında yeraltı suyu görece daha yukarıdadır.



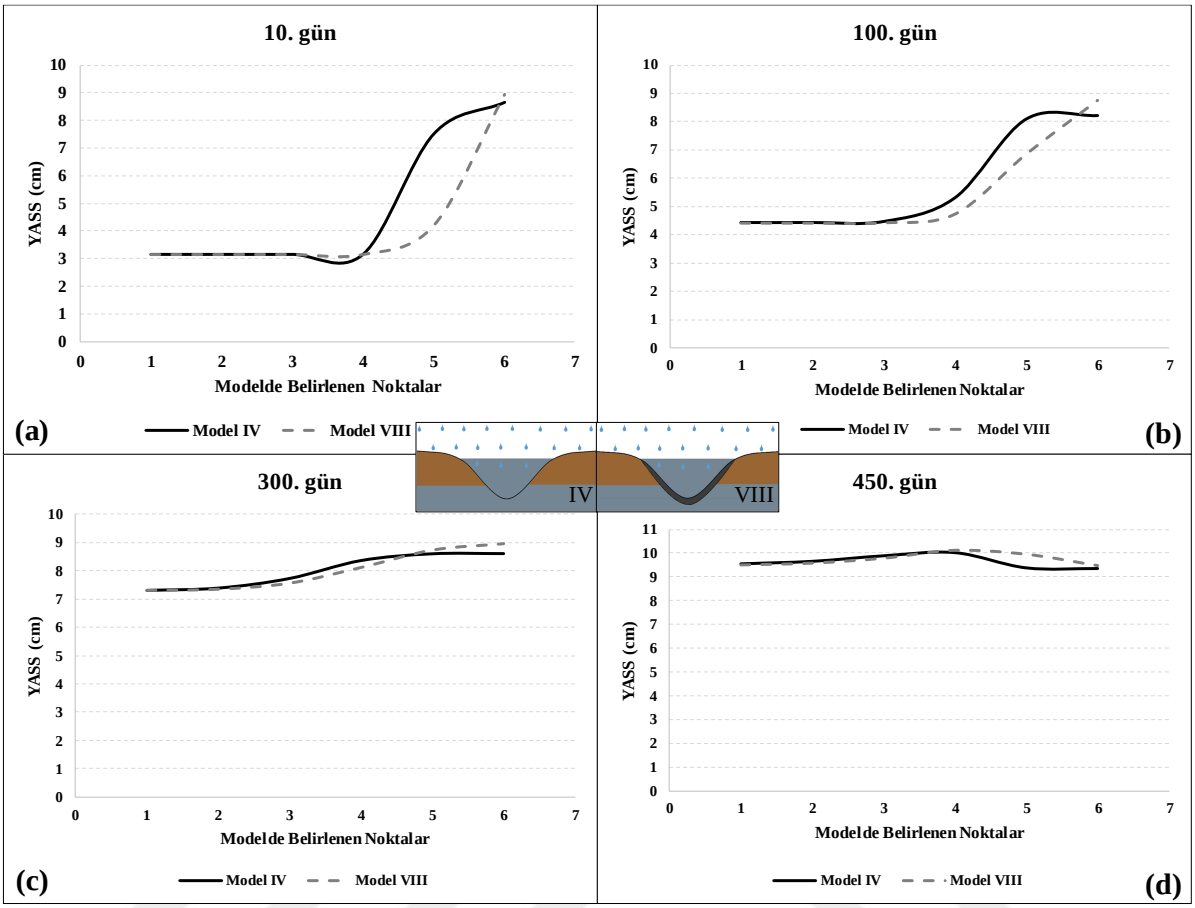
Şekil 4.58: Kavramsal Model II ve Kavramsal Model VI'nın farklı zamanlara ait piyezometre değerlerinin karşılaştırması (a) 10. gün, (b) 100. gün, (c) 500. gün, (d) 900. gün.

Kavramsal Model III ve Kavramsal Model VII modelleri karşılaştırılarak gölün akiferi beslediği durumda göl yatağının buna etkisi belirlenmiştir. Şekil 4.59'a göre göl yatağının 500. güne kadar göl-akifer etkileşimi üzerinde etkisi görülmektedir. Bu süre içerisinde gölden akifere su akışı kısmen engellenmiş, sistemin kararlı duruma ulaşma süresinde geciktirme etkisi olmuştur. Bu etki akiferin sınır noktalarına doğru uzanmaktadır. Tüm zaman adımlarında Kavramsal Model VII'de göl su seviyesinin Kavramsal Model III'e kıyasla daha yukarıda olduğu görülmektedir. Farkın en çok görüldüğü 500. günde göl su seviyeleri arasındaki fark 65 cm olmuştur. Kavramsal Model III'ün kararlı duruma ulaştığı 5000. günde göl su seviyesi 4.39 m iken göl yatağı dahil edildiğinde bu seviye 4.52 m'dir. Sonrasında göl yatağının etkisi azalmaya başlamıştır.



Şekil 4.59: Kavramsal Model III ve Kavramsal Model VII'nin farklı zamanlara ait piyezometre değerlerinin karşılaştırması (a) 10. gün, (b) 100. gün, (c) 500. gün, (d) 5000. gün.

Kavramsal Model IV ve Kavramsal Model VIII modelleri karşılaştırılarak gölün akiferi yağış sırasında beslediği durumda göl yatağının buna etkisi belirlenmiştir. Şekil 4.60'da göl yatağının ilk andan sistem kararlı ana ulaşana kadar gölden akifere su akışı üzerinde etkili olduğu görülmektedir. Göl yatağı özellikle ilk 100 günde akiferden göle su akışını kısmen engellemiştir. Farkın en çok görüldüğü 100. günde göl su seviyeleri arasındaki fark 55 cm olmuştur. Yağış ve gölün yüksek başlangıç seviyesi sonucu sistem kısa sürede kararlı duruma ulaşmıştır. 450. günde Kavramsal Model IV'de göl su seviyesi 9.36 m değerinde iken Model VIII'de 9.47 m olup göl yatağının olduğu modelde sistemin dengeye ulaşma süresi daha uzundur.



Şekil 4.60: Kavramsal Model IV ve Kavramsal Model VIII'in farklı zamanlara ait piyezometre değerlerinin karşılaştırması (a) 10. gün, (b) 100. gün, (c) 300. gün, (d) 450. gün.

4.4. DENEYSEL, SAYISAL VE KAVRAMSAL MODELLERİN TARTIŞILMASI

Çalışmada deneylerden elde edilen gözlemler ile sayısal model çıktıları karşılaştırılmış ve bu bölümde tartışılmıştır. Ayrıca hidrolik yük farkı, yağış ve göl yatağı parametrelerinin göl-akifer etkileşimi üzerindeki etkileri hem deney ve deney modelleri hem de havza büyüklüğündeki modeller üzerinde tartışılmıştır. Sayısal modellerde en önemlisi göl modellenirken göl yatağının kalınlığı göz önüne alınmıştır. Çalışmada yatay düzlemde iki boyutlu akım dikkate alınmıştır. Derinlik yönünde oluşan dikey akım dikkate alınmamıştır. Modeller kararsız durum için gerçekleştirilmiştir.

Deneyler;

- Hidrolik yükün etkileşimler üzerine olan etkisini belirlemek için akiferin gölü beslemesi ve gölün akiferi beslemesi olmak üzere iki farklı durum için deneyler yapılmıştır. Elde edilen

sonuçlardan etkileşimin yönünün hidrolik yükün yüksek olduğu yerden düşük olduğu yere doğru yeraltı suyu akımını sağlayacak şekilde oluştuğu gözlenmiştir. Akiferin her iki taraftan sabit bir şekilde beslenip gölü beslediği deneye kıyasla, gölün akiferi beslemesi daha hızlı bir şekilde gerçekleşmiştir. Göl akiferi beslerken yeraltı suyunun beklenenden yüksek seviyede kararlı duruma ulaşmasının, akiferin düşük poroziteye sahip olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

- Hidrolik yük farkının yağış koşullarında etkileşime etkisini belirlemek amacıyla deneylere yağış eklenmiştir. Akifer gözenekli bir yapı olması nedeniyle gelen yağmur suyu ile hızlı bir şekilde doygunluğa ulaşmıştır. Göl gözenekli bir yapı olmadığı için su yavaş bir hızla yükselirken yeraltı suyu başlangıçta göl seviyesinden düşük de olsa yağışla göl su seviyesinin üzerine çıkmıştır. Yağış, göl-akifer sistemi üzerinde ek bir su kaynağı oluşturduğu için sistem içerisindeki su seviyesini, yağış olmadığı deneylere görece olarak daha hızlı yükseltmekte olduğundan deney süresini de buna bağlı olarak kısaltmaktadır. Yağışın olduğu deneylerde zamanla suyun sızması için bir süre daha gözlem devam etmiş, ancak düzenek doğadaki akiferlere kıyasla çok küçük olması nedeniyle su seviyesinde herhangi bir alçalma görülmemiştir.
- Göl ve akifer arasındaki bir göl yatağının etkileşime etkisini incelemek amacıyla yatağın bulunduğu ve bulunmadığı deneyler yapılmıştır. Bu deneyler kendi aralarında karşılaştırıldığında yatağın etkileşim üzerinde önemli etkisi olduğu görülmüştür. İki su kaynağı arasındaki su alışverişine kısmen engel olup su geçiş hızını yavaşlatmıştır. Yatağın etkileşim üzerindeki etkisinin zamana bağlı olduğu görülmüştür. Deneylerin başlangıcında göl yatağı etkisi fazla iken zamanla azalmıştır. Tüm deneylerde göl yatağının etkisi göl çevresinde görülmüş olup akifer sınırlarına doğru etkisi azalmıştır. Göl yatağı nedeniyle tüm deneylerde kararlı akıma ulaşma süresi uzamıştır. Göl yatağının etkisi gölün akiferi beslediği modellerde daha belirgin olarak görülmüştür. Akiferin yağış altında gölü beslediği deneylerde göl yatağı olduğunda, akiferden göle daha az su akışı olması nedeniyle akifer sınırlarında su yükselişi daha hızlı olmuştur. Bu durumda daha kısa süreli yağış yeterli olmuştur. Buna bağlı sisteme giren su miktarı değişmiştir.
- Tüm deneylerde akiferin doygun hale gelmesi ve yeraltı suyunun ilerleme hızı arasında doğru orantılı bir ilişki bulunmaktadır. Doygun hale geldikçe yeraltı suyu hızı düşmüştür.

Deneylerin Sayısal Modelleri;

- Deney sonuçları ile sayısal model sonuçları birbirine yakın çıkmıştır. Dolayısıyla MODFLOW, göl-akifer etkileşimini modellemede iyi bir performansa sahiptir. Deneylerin sayısal modellemesi yapılırken MODFLOW'da kalibrasyon ile belirlenen özgül verimlilik değerinin model üzerinde önemli derecede etkili olduğu görülmüştür. Bu nedenle özgül verimlilik değerinin belirlenmesi oldukça hassas bir şekilde yapılmalıdır. Özgül verimlilik; akiferden yerçekimi ile drene edilebilecek su hacminin toplam akifer hacmine oranı olması nedeniyle bu parametrenin aldığı değerdeki küçük değişikliklerin dahi yeraltı su seviyesini önemli ölçüde değiştirdiği görülmüştür.
- Sayısal modellemeler her durumda göl ve akiferin karşılıklı birbirini beslediğini göstermiştir. Diğer bir deyişle simülasyon sonucunda net su geçişi akiferden göle olmasına rağmen simülasyon boyunca akiferin gölü beslemesi ve eş zamanlı olarak da gölün tabandan akiferi beslediği görülmüştür. Dolayısıyla akifer ile göl arasında karşılıklı su geçişi vardır.
- Yağış durumunda, deneysel çalışmaların aksine sayısal modellemede yağış kesildikten bir süre sonra yeraltı suyu seviyesinde düşüş görülmüştür. Yağışlı durumlarda yaşanan farklılık deneyin düşey yönde yeraltı suyu hareketine yani perkolasyona imkan vermeyip sayısal modelin ise perkolasyonu dikkate alarak göre hesap yapmasından kaynaklanmaktadır.

Kavramsal Modeller:

- Büyük ölçekli oluşturulan kavramsal modellerde havza bölgelerinde hidrolik yük, yağış ve göl yatağı parametrelerinin göl-akifer etkileşimi üzerindeki etkisini analiz edilmiştir. Bu modellerde alan büyüklüğüne bağlı olarak kararlı duruma ulaşma süresi uzamıştır.
- Akiferin gölü beslediği modelde yaklaşık 7 yıl sonra kararlı duruma ulaşılmıştır. Gölün akiferi beslediği modelde ise bu süre 2 kat artmıştır. İki model arasındaki süre farklılığı modellerin başlangıç anında farklı su miktarı içermesinden kaynaklı olabileceği düşünülmüştür. Bu bakımdan göl-akifer sistemini değerlendirebilmek için dikkate alınması gereken en önemli parametreler başlangıç göl suyu hacmi ve başlangıç yeraltı suyu seviyesi olduğu anlaşılmıştır.
- Kurulan modellerde uzun süreli simülasyon yapılarak göl-akifer sisteminin uzun süreli davranışını incelemek hedeflenmiştir. Buna istinaden modellerde yağış şiddeti, zeminin sızma kapasitesinden daha küçük tanımlanmıştır. Modellere yağış tanımlandığında ek su kaynağı ile birlikte yeraltı suyu hızla yükselmiştir.

- Yağış olmadığı durumda gölün akiferi besleme süresi, akiferin gölü besleme süresinden daha fazladır. Ancak simülasyonlara yağış eklendiğinde bu durumun tam tersi gözlemlenmiştir. Gölün akiferi besleme süresi, akiferin gölü besleme süresinden daha kısa olmuştur. Bu durum şu şekilde açıklanabilir: Akiferin gölü beslediği durumda göl suyunun düşük seviyede olması ve gölün geniş boş hacme sahip olması nedeniyle yağmur suyu öncelikli olarak göl çanağını doldurmaktadır ve netice itibariyle akiferin gölü besleme süresini uzatmaktadır. Diğer yandan gölün akiferi beslediği durum için göl çanağı su ile dolu olup yağmur suyu doğrudan akiferi beslemekte ve eş zamanlı olarak göl de akiferi beslediğinden, bu durumda çok daha hızlı bir şekilde kararlı akıma ulaşılmaktadır.
- Göl yatağının eklenmesiyle birlikte özellikle simülasyonun başlangıcında göl-akifer arasındaki akış göl yatağının olmadığı duruma göre yavaştır. Buna bağlı olarak modellerin kararlı duruma ulaşma süreleri uzamıştır. Zaman ilerledikçe göl yatağı etkisi azalmıştır. Bunun nedeni ilk günlerde yeraltı suyu hızının yüksek olmasıdır. Gölün akiferi beslediği durumlarda göl yatağının etkisi daha belirgin olmuştur. Göl yatağı etkisinin yerel olduğu yani gölün çevresinde etkili olduğu ve gölden uzaklaştıkça etkinin azaldığı görülmektedir.

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu tez kapsamında göl-akifer etkileşimlerinin yeraltı suyu akımı üzerindeki etkileri deneysel ve sayısal yöntemlerle incelenmiştir. Farklı modeller kurularak bu sistemde yer alan ve yeraltı suyu dağılımını etkileyen parametreler araştırılmış ve belirlenmiştir. Deneysel çalışmalar Hidroloji Deney Düzeneği ile yapılmıştır. Deneylerin sayısal modelleri MODFLOW programı ile oluşturulmuştur. Deneyden elde edilen gözlemler ile sayısal model çıktıları karşılaştırılmıştır. Araştırılan parametrelerin havza boyutunda büyük ölçekli bir sistemdeki etkisini incelemek amacıyla MODFLOW ile kavramsal modeller hazırlanmıştır ve sonuçları değerlendirilmiştir. Yapılan deneysel ve sayısal çalışmalar ile aşağıdaki sonuçlara varılmıştır:

- Hidroloji Deney Düzeneği ile göl-akifer etkileşimleri hidrolik yük farkı, yağış ve değişken göl yatağı koşulları altında gözlemlenebilmiştir.
- Deney düzeneği ile yapılan deneyler ve MODFLOW ile yapılan modeller karşılaştırıldığında MODFLOW'un göl-akifer etkileşimini farklı koşullar için modelleyebildiği ortaya konulmuştur.
- MODFLOW ile havza boyutunda modeller kurularak büyük ölçekli göl-akifer sisteminde etkileşimler sayısal olarak gözlemlenmiştir. Buna göre göl-akifer etkileşimi üzerinde hidrolik yük, yağış ve göl yatağı parametrelerinin etkisi bulunmaktadır. Bu etkiler şu şekilde özetlenebilir: 1. Aynı koşullar altında gölün akiferi beslemesi, akiferin gölü beslemesinden daha yavaş ilerlemiştir. 2. Sisteme reşarj eklendiğinde, akiferde yeraltı suyu hızla yükselmiş, göl-akifer etkileşimi hızlanmış ve reşarjın olmadığı duruma göre daha hızlı kararlı duruma ulaşılmıştır. 3. Göl yatağının olduğu durumlarda göl-akifer etkileşimi daha yavaş seyretmiştir. Bu durum sistemin kararlı akıma ulaşmasını geciktirmektedir. Göl yatağı etkisinin zamana ve konuma bağlı olduğu görülmüştür. Etkileşimin ilk zamanlarında daha etkili olup zamanla etkisi azalmıştır. Ayrıca bu etki akifer sınırlarına kıyasla, göl ve çevresinde daha yoğun bir şekilde görülmüştür.

KAYNAKLAR

Akhbari, M., 2011, *Groundwater Hydrology, Engineering, Planning, and Management*, First Edition, CRC Press.

Ala-aho, P., Rossi, P.M., Isokangas, E. ve Klove, B., 2015, Fully integrated surface-subsurface flow modeling of gorundwater-lake interaction in an esker aquifer: model verification with stable isotopes and airborne thermal imaging, *Journal of Hydrology*, 522:391.

Ames, W. F., 2014, *Numerical methods for partial differential equations*, Academic Press, San Diego, USA.

Bayazıt, M., 2003, *Hidroloji*, Birsen Yayınevi, İstanbul, 975-511-364-9.

Belanger, T.V. ve Mikutel, D.F., 1985, On the use of seepage meters to estimate groundwater nutrient loading to lakes, Journal of the American Water Resources Association, 21 (2): 265-272.

Boyraz, U., 2010, *Yüzey suyu-yeraltı suyu etkileşimlerini içeren kavramsal bir nehir akifer modeli [A conceptual stream-aquifer system incorporating surface water-ground water interactions]*. Master Thesis, Istanbul University, Turkey.

Boyraz, U., 2017, *Nehir-akifer etkileşimlerinin hidrodinamiğini belirleyen entegre yaklaşımlar: matematiksel ve deneysel modellemeler* [*Integrated approaches to identify the hydrodynamics of stream-aquifer interactions: mathematical & experimental modeling*], Ph.D. Thesis, Istanbul University, Turkey.

Cheng X., Anderson, M.P., 1993, Numerical simulation of ground-water interaction with lakes allowing for fluctuating lake levels. Ground Water 31:929-933.

Cheng, X. ve Anderson, M., 1994, Simulating the influence of lake position on groundwater fluxes, *Water Resources Research*, 30 (7), 2041-2049.

Corbett, D.R., Chanton, J., Burnett, W., Dillon, K., Rutkowski, C. ve Fourqurean, J.W., 1999, Patterns of groundwater discharge into Florida Bay, *Limnology ve Oceanography*, 44 (4):1045-1055.

Corbett, D.R., Burnett, W.C., Cable, P.H. ve Clark, S.B., 1997, Radon tracing of groundwater input into Par Pond, Savannah River Site, *Journal of Hydrology*, 203 (1-4), 209-227.

Council, G.W., 1997, Simulating Lake-Groundwater Interaction With MODFLOW, Proceedings of the 1997 Georgia Water Resources Conference, held March 20-22, at The University of Georgia.

Creer, J., 2019, GMS:MODFLOW. 15 Ocak 2021 tarihinde https://www.xmswiki.com/wiki/GMS:MODFLOW adresinden erişildi.

Cushman, J.H., Tartakovsky, D.M., 2016, *The Handbook of Groundwater Engineering*, Third Edition, CRC Press, Taylor&Francis Group.

Delleur, J.W., 2007, *The Handbook of Groundwater Engineering*, Second Edition, CRC Press, Taylor&Francis Group.

El-Zehairy, A.A., Lubczynski, M.W. ve Gurwin, J., 2018, Interactions of artificial lakes with groundwater applying an integrated MODFLOW solution, *Hydrogeoly Journal* 26:109-132.

Freeze, R.A., Cherry, J.A., 1979, *Groundwater*, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey 07632.

Genereux, D., Bandopadhyay, I., 2000, Numerical investigation of lake bed seepage patterns: effects of porous medium and lake properties, *Journal of Hydrology*, 241 (2001), 286-303.

Gong, Y., Liu, G., Schwartz, F.W., 2015, Quantifying the response time of a lake-groundwater interacting system to climatic perturbation, *Water*, 7, 6598-6615.

Gültekin, O.Ş., 2015, *Yeraltı suyu miktarındaki değişimin yeraltı suyu kalitesine etkileri ve çözüm önerileri*, Uzmanlık Tezi, T.C. Orman ve Su İşleri Bakanlığı.

Harbaugh, A.W., 2005, MODFLOW-2005, The U.S. Geological Survey Modular Ground-Water Model—the Ground-Water Flow Process, U.S. Geological Survey Tecniques and Methods, 6-A16.

Harbaugh, A.W., Banta, E.R., Hill, M.C., Mcdonald, M.G., 2000, MODFLOW-2000, the U.S. Geological Survey Modular Ground-Water Model—User Guide to Modularization Concepts and the Ground-Water Flow Process: U.S. Geological Survey Open-File Report 00-92, 121 p.

Harvey, F.E., Rudolph, D.L. ve Frape, S.K.,1997a, Measurement of hydraulic properties in deep lake sediments using a tethered pore pressure probe: applications in the Hamilton Harbour, western Lake Ontario, *Water Resources Research*, 33 (8), 1917-1928.

Hunt, R., 2003, Ground water-lake interaction modeling using the LAK3 package for MODFLOW 2000, *Ground Water* 41, 2, pg.114.

Johnson, A. I., 1967, Specific yield: compilation of specific yields for various materials, Geological Survey Water Supply Paper 1662-D, United States Government Printing Office, Washington.

Kazezyılmaz-Alhan, C.M. ve Medina, M.A. JR., 2008, The effect of surface/ground water interactions on wetland sites with different characteristics, *Desalination*, 226, 298-305.

Kolak, J.J., Long, D.T., Matty, J.M., Larson, G.J., Sibley, D.F. ve Councell, T.B., 1999, Ground-water, large-lake interactions in Saginaw Bay, Lake Huron: A geochemical and isotopic approach, *Geological Society of America Bulletin*, 111 (2):177-188.

Krabbenhoft, D.P., Bowser, C.J., Anderson, M.P. ve Valley, J.W., 1990a, Estimating groundwater exchange with lakes 1. The stable isotope mass balance method, *Water Resources Research*, 26 (10), 2445-2454.

Li, Y., Wang, C., Yang, L. ve Li, Y., 2007, Influence of seepage face obliquity on discharge of groundwater and its pollutant into lake from a typical unconfined aquifer, *Journal of Hydrodynamics*, 19 (6):756-761.

McDonald, M.G., Harbaugh, A.W., 1988, A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model: U.S. Geological Survey Techniques of Water-Resources Investigations, book 6, chap. A1, 586 p.

Merritt, L.M., Konikow, L.F., 2000, Documentation of a Computer Program to Simulate Lake-Aquifer Interaction Using the MODFLOW Ground-Water Flow Model and the MOC3D Solute-Transport Model, U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report, 00-4167.

Mylopoulos, N., Mylopoulos, Y., Veranis, N., 2007, Groundwater modeling and management in a complex lake-aquifer system, *Water Resour Manage*, 21:469-494.

Nield, S.P., Townley, L.R. ve Barr, A.D., 1994, A framework for quantitative analysis of surface water-groundwater interaction: flow geometry in a vertical section, *Water Resources Research*, 30 (8), 2461-2475.

Shaw, R.D. ve Prepas, E.E., 1990b, Groundwater-lake interactions 2. Nearshore seepage patterns and the contribution of groundwater to lakes in central Alberta, *Journal of Hydrology*, 119, 121-136.

Sophocleous, M., 2002, Interactions between groundwater and surface water: the state of the science, *Hydrogeology Journal*, 10:348-348.

Todd, D.K., Mays, L.W., 2005, *Groundwater Hydrology*, 3th ed., John Wiley&Sons, Inc, New Jersey, 0-471-05937-4.

Viessman, W., Jr., Lewis, G.L., 2012, *Introduction to Hydrology*, Pearson Education, Inc., Upper Saddle River, NJ 07458.

Winston, R.B., 2018, Online guide to MODFLOW-2005.

Winter, T.C., 1976, Numerical simulation analysis of the interaction of lakes and ground water, *U.S. Geological Survey Professional Paper*, 1001, 1-45.

Winter, T.C., 1978, Numerical simulation of steady state three dimensional groundwater flow near lakes, *Water Resources Research*, 14 (2), 245-254.

Winter, T.C., 1983, The interaction of lakes with variably saturated porous media, *Water Resources Research*, 19 (5), 1203-1218.

Winter, T.C., Harvey, J.W., Franke, O.L. ve Alley, W.M., 1999, Ground water and surface water a single resource, *U.S. Geological Survey Circular 1139*, Denver, Colorado 1999.

Winter, T.C., Pfannkuch, H-O., 1984, Effect of anisotropy and groundwater system geometry on seepage through lake beds: 2. Numerical simulation analysis, *Journal of Hydrology*, 75, 239-253.

Yağbasan, Ö., 2007, *Modelling of Mogan and Eymir lakes aquifer system*, Ph.D. Thesis, Middle East Technical University, Turkey.