



**PORSUK HAVZASINDA YERALTI SUYU-  
YÜZEY SUYU ETKİLEŞİM MODELİNİN  
GELİŞTİRİLMESİ**

**Doktora Tezi**

**Savaş Uğur TEMELLİ**

**Eskişehir, 2024**

**PORSUK HAVZASINDA YERALTI SUYU-YÜZEY SUYU ETKİLEŞİM  
MODELİNİN GELİŞTİRİLMESİ**

**Savaş Uğur TEMELLİ**

**Doktora Tezi**

**İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Hidrolik Bilim Dalı**

**Danışman: Prof. Dr. Mustafa TOMBUL**

**Eskişehir**

**Eskişehir Teknik Üniversitesi**

**Lisansüstü Eğitim Enstitüsü**

**Haziran 2024**

## JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Savaş Uğur TEMELLİ'nin PORSUK HAVZASINDA YERALTI SUYU-YÜZEY SUYU ETKİLEŞİM MODELİNİN GELİŞTİRİLMESİ başlıklı çalışması 07/06/2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından değerlendirilerek "Eskişehir Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliği"nin ilgili maddeleri uyarınca, İnşaat Mühendisliği Anabilim dalında Doktora Tezi olarak kabul edilmiştir.

### Jüri Üyeleri

### Unvan Adı Soyadı

### İmza

|     |                               |
|-----|-------------------------------|
| Üye | : Prof. Dr. Mustafa TOMBUL    |
| Üye | : Doç. Dr. Hakan ŞİRİN        |
| Üye | : Dr. Öğr. Üyesi Emrah PEKKAN |
| Üye | : Dr. Öğr. Üyesi Mesut BARIŞ  |
| Üye | : Dr. Öğr. Üyesi Yasin PAŞA   |

Prof. Dr. Semra KURAMA

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

## DANIşMAN ONAYI

Danişmanlığını yürüttüğüm Doktora ğrencisi Savaş Uğur TEMELLİ, PORSUK HAVZASINDA YERALTI SUYU-YÜZEY SUYU ETKİLEşİM MODELİNİN GELİşTİRİLMESİ başlıklı tez çalışmasını tamamlamıştır. Hazırlamış olduğu tez tarafımda incelenmiş ve öğrencinin tez savunma sınavına alınması bilimsel ve etik açıdan uygun görülmüştür.

Tez Danişmanı

Prof. Dr. Mustafa TOMBUL

## ÖZET

### PORSUK HAVZASINDA YERALTI SUYU-YÜZEY SUYU ETKİLEŞİM MODELİNİN GELİŞTİRİLMESİ

Savaş Uğur TEMELLİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Hidrolik Bilim Dalı

Eskişehir Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Haziran 2024

Danışman: Prof. Dr. Mustafa TOMBUL

Yeraltı suyu ve yüzey suyu etkileşimi, doğal su döngüsünün önemli bir parçasıdır ve su kaynaklarının sürdürülebilir yönetimi açısından oldukça önemlidir. GSFLOW, yeraltı ve yüzey sularının birleşik yönetimini sağlamak için geliştirilmiş, MODFLOW (yeraltı suyu modelleme) ve PRMS (yüzey suyu modelleme) gibi çeşitli alt modellerin entegrasyonunu içeren bir modeldir. Çalışmada, Porsuk Havzası'nda yeraltı suyu ve yüzey suyu etkileşiminin modelini geliştirmek ve süreci detaylandırmak amaçlanmıştır. Modellerin doğruluğu çeşitli metotlarla kalibre edilerek değerlendirilmiştir. MODFLOW modelinin kalibrasyonu hem manuel hem de PEST metotlarıyla yapılmıştır. Gözlenen değerler ile modelleme sonuçları arasındaki uyumu değerlendirmek için, 'Mean Residual', 'Mean Absolute Residual' ve 'RMSR' istatistiksel değerleri sırasıyla 1.45, 1.45 ve 1.49 olarak hesaplanmış ve MODFLOW modelinin doğruluğu belirlenmiştir. PRMS modelinde 1971 su yılı verileri kullanılmış, 1972 su yılı verileri ile kalibre edilmiş ve 1970 su yılı verileri ile doğrulanmıştır. PRMS modelinin kalibrasyon NSE değeri 0.98, validasyon NSE değeri ise 0.97 olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlar, PRMS yüzey suyu modelinin mükemmel bir performans gösterdiğini göstermiştir. GSFLOW etkileşim modelinde; MODFLOW modellemesinin SFR2 paketine ait çıktılar ile PRMS modelinin girdi verileriyle bir etkileşim modeli kurulmuştur. GSFLOW modelinin kalibrasyon periyodu için NSE değeri 0.75, doğrulama periyodu için ise 0.74 olarak elde edilmiştir. Elde edilen değerler, GSFLOW modelinin tatmin edici bir performans sergilediğini göstermiştir.

**Anahtar Sözcükler:** MODFLOW, PRMS, GSFLOW, Yüzey suyu, Yeraltı suyu

## ABSTRACT

### DEVELOPING THE GROUNDWATER-SURFACE WATER INTERACTION MODEL IN THE PORSUK BASIN

Savaş Uğur TEMELLİ

Department of Civil Engineering

Programme in Hydraulic

Eskişehir Technical University, Institute of Graduate Programs, June 2024

Supervisor: Prof. Dr. Mustafa TOMBUL

Groundwater and surface water interaction are crucial components of the natural water cycle and are highly significant for sustainable management of water resources. GSFLOW is a model developed to integrate the management of groundwater and surface water, incorporating various submodels such as MODFLOW and PRMS. In this study, the aim was to develop and detail a model of groundwater and surface water interaction in the Porsuk Basin. The accuracy of the models was evaluated through various calibration methods. The MODFLOW model was calibrated using both manual and PEST methods. The agreement between observed values and modeling results was assessed using statistical measures such as ‘Mean Residual’, ‘Mean Absolute Residual’ and ‘RMSR’ which were calculated as 1.45, 1.45, and 1.49, respectively, indicating the accuracy of the MODFLOW model. For the PRMS model, data from water year 1971 were used for modeling, calibrated using data from 1972, and verified using data from 1970. The calibration NSE value for PRMS was calculated as 0.98, and the validation NSE value was 0.97, demonstrating excellent performance of the PRMS surface water model. In the GSFLOW interaction model, an interaction model was established by integrating MODFLOW outputs from the SFR2 package with input data from the PRMS model. The NSE value for the calibration period of the GSFLOW model was 0.75, and for the validation period, it was 0.74, indicating satisfactory performance of the GSFLOW model.

**Keywords:** MODFLOW, PRMS, GSFLOW, Surface water, Groundwater

## TEŞEKKÜR

Tez çalışmamın her aşamasında büyük bir sabır ve özveriyle, değerli deneyim ve katkılarını hiçbir zaman esirgemeyen danışman hocam Sayın Prof. Dr. Mustafa TOMBUL'a saygılarımı ve teşekkürlerimi sunuyorum.

Çalışma süresince gerçekleştirilen tez izleme komitelerinde yer alarak katkıları ve yapıcı eleştirileriyle çalışmanın gelişimine büyük katkı sunan değerli hocalarım Doç. Dr. Hakan ŞİRİN ve Dr. Öğr. Üyesi Emrah PEKKAN'a teşekkür ederim.

Çalışma boyunca desteklerini esirgemeyen değerli dostum Dr. Öğr. Üyesi Serdar KASAP'a teşekkürlerimi sunarım.

Tez süresi boyunca kıymetli zamanlarını benimle paylaşan, iyi dilekleriyle yanımda olan yol arkadaşım, kıymetlim Kader'e teşekkür ederim.

Tüm eğitim hayatım boyunca maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen, her zaman yanımda olan anne ve babama sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Savaş Uğur TEMELLİ

## **ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ**

Bu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ve kurallara uygun davrandığımı; bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi; bu çalışmanın Eskişehir Teknik Üniversitesi tarafından kullanılan “bilimsel intihal tespit programı”yla tarandığını ve hiçbir şekilde “intihal içermediğini” beyan ederim. Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

Savaş Uğur TEMELLİ

## İÇİNDEKİLER

|                                                                                       | <u>Sayfa</u> |
|---------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| BAŞLIK SAYFASI.....                                                                   | I            |
| JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI .....                                                           | II           |
| DANIŞMAN ONAYI.....                                                                   | III          |
| ÖZET .....                                                                            | IV           |
| ABSTRACT .....                                                                        | V            |
| TEŞEKKÜR.....                                                                         | VI           |
| ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ.....                                      | VII          |
| İÇİNDEKİLER .....                                                                     | VIII         |
| TABLOLAR DİZİNİ .....                                                                 | XI           |
| ŞEKİLLER DİZİNİ .....                                                                 | XII          |
| SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....                                                   | XV           |
| 1. GİRİŞ.....                                                                         | 1            |
| 1.1. Çalışmanın Amacı .....                                                           | 2            |
| 2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR .....                                                            | 4            |
| 2.1. Yeraltı Suyu Modellemesi İle İlgili Gerçekleştirilmiş Çalışmalar .....           | 4            |
| 2.2. Yüzey Suyu Modellemesi İle İlgili Gerçekleştirilmiş Çalışmalar.....              | 6            |
| 2.3. Yeraltı Suyu-Yüzey Suyu Etkileşimi İle İlgili Gerçekleştirilmiş Çalışmalar ..... | 7            |
| 3. MATERYAL VE YÖNTEM .....                                                           | 10           |
| 3.1. Porsuk Havzası .....                                                             | 10           |
| 3.1.1. Havzanın karakteristik özellikleri.....                                        | 11           |
| 3.2. Çalışma Alanı.....                                                               | 12           |
| 3.2.1. İklim .....                                                                    | 12           |
| 3.2.2. Jeoloji .....                                                                  | 12           |
| 3.2.2.1. Jeolojik formasyonlar .....                                                  | 13           |
| 3.2.2.2. Yeraltı jeolojisi.....                                                       | 19           |
| 3.2.3. Hidroloji.....                                                                 | 20           |
| 3.2.3.1. Su kaynakları .....                                                          | 21           |

|                                                                                                                        |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.2.3.2. Akiferler.....                                                                                                | 23 |
| 3.2.3.3. Su tablası, yeraltı suyu seviye değişimleri .....                                                             | 24 |
| 3.2.3.4. Yeraltı suyu işletmesine uygun alanlar .....                                                                  | 25 |
| 3.3. Yeraltı Suyu Ve Modelleme Yöntemleri.....                                                                         | 25 |
| 3.3.1. Yeraltı suyu ve hidrolojik çevrim.....                                                                          | 25 |
| 3.3.2. Akifer kavramı ve yeraltı suyunun hareketi .....                                                                | 28 |
| 3.3.2.1. Yeraltı suyunun hareketi.....                                                                                 | 29 |
| 3.3.3. Yeraltı suyu akış modellemesi .....                                                                             | 32 |
| 3.3.3.1. Yeraltı suyu akış modeli (MODFLOW-2005) .....                                                                 | 32 |
| 3.3.3.2. Yeraltı suyu modeli (MODFLOW-2005) hesaplama adımları.....                                                    | 34 |
| 3.3.3.3. Modelleme yöntemi .....                                                                                       | 35 |
| 3.3.4. Yüzey suyu modellemesi (Yağış-akış modellemesi) .....                                                           | 41 |
| 3.3.4.1. Yüzey suyu akış modeli (PRMS).....                                                                            | 43 |
| 3.3.4.2. Modelin yapısı (PRMS).....                                                                                    | 44 |
| 3.3.4.3. Hidrolojik tepki birimi (HTB, hydrologic response unit – HRU) .....                                           | 44 |
| 3.3.4.4. Yüzey suyu modeli (PRMS) hesaplama adımları.....                                                              | 46 |
| 3.3.5. Yeraltı suyu-yüzey suyu etkileşimi.....                                                                         | 46 |
| 3.3.5.1. Yeraltı suyu-yüzey suyu etkileşim modeli (GSFLOW) .....                                                       | 47 |
| 4. YERALTI SUYU-YÜZEY SUYU ETKİLEŞİM MODELLERİ: UYGULAMA ...                                                           | 49 |
| 4.1. Porsuk Havzası’nda Yeraltı Suyu Akışının GMS Yazılımı İle Modellenmesi (MODFLOW-2005) .....                       | 50 |
| 4.1.1. Kararlı hal (steady state).....                                                                                 | 50 |
| 4.1.1.1. Kararlı hal (steady state) kalibrasyon öncesi model sonuçları.....                                            | 54 |
| 4.1.1.2. Kararlı hal (steady state) kalibrasyonu .....                                                                 | 55 |
| 4.1.2. Kararlı halden (steady state) yeraltı suyu akış modeline geçiş (transient) ve modelleme çalışması.....          | 62 |
| 4.1.2.1. Model uygulaması .....                                                                                        | 63 |
| 4.1.2.2. Stres periyodu .....                                                                                          | 65 |
| 4.1.2.3. Modelin kalibrasyonu .....                                                                                    | 67 |
| 4.1.2.4. Kararlı halden (steady state) yeraltı suyu akış modeline (transient) geçiş ve modelleme sonuçları.....        | 67 |
| 4.1.3. Akarsuyun yeraltı suyu ile etkileşimi.....                                                                      | 69 |
| 4.1.3.1. Etkileşimin modellenmesi ve elde edilen sonuçlar .....                                                        | 69 |
| 4.2. Çalışma Alanında Yüzey Suyu Akışının Modellenmesi (PRMS) Ve Yeraltı Suyu Akışı İle Etkileştirilmesi (GSFLOW)..... | 71 |

|                                                                             |    |
|-----------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.2.1. Modelleme çalışmalarında kullanılan veriler.....                     | 72 |
| 4.2.1.1. CBS platformunda hidrolojik tepki birimlerinin (HTB) oluşturulması | 75 |
| 4.2.2. PRMS model uygulaması .....                                          | 78 |
| 4.2.2.1. PRMS modelin kalibrasyonu ve validasyonu.....                      | 80 |
| 4.2.2.2. PRMS ile modelleme sonuçları .....                                 | 84 |
| 4.2.3. GSFLOW etkileşim modeli uygulaması .....                             | 87 |
| 4.2.3.1. GSFLOW etkileşim modeli sonuçları.....                             | 91 |
| 4.2.3.2. GSFLOW etkileşim modelinin kalibrasyonu ve validasyonu.....        | 91 |
| 5. SONUÇ VE ÖNERİLER .....                                                  | 94 |
| KAYNAKÇA .....                                                              | 98 |
| ÖZGEÇMİŞ .....                                                              |    |

## TABLÖLAR DİZİNİ

### Sayfa

|                                                                                                                             |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tablo 3.1.</b> Porsuk Havzası'nın yıllık su miktarları ve toplam potansiyel değeri (Büyükerşen ve Efelerli, 2008). ..... | 10 |
| <b>Tablo 4.1.</b> Modelde yer alan kuyulara ait bilgiler.....                                                               | 52 |
| <b>Tablo 4.2.</b> İnönü Ovası'nın beslenme – boşalım değerleri (DSİ,1975). .....                                            | 54 |
| <b>Tablo 4.3.</b> Eskişehir Ovası'nın beslenme – boşalım değerleri (DSİ, 1975).....                                         | 54 |
| <b>Tablo 4.4.</b> Modele aktarılan pompaj kuyusu verileri .....                                                             | 64 |
| <b>Tablo 4.5.</b> PRMS zaman serisi verileri (Kavşut, 2019). .....                                                          | 79 |
| <b>Tablo 4.6.</b> Modelleme çalışmasında kullanılan PRMS modülleri .....                                                    | 84 |
| <b>Tablo 4.7.</b> GSFLOW modelleme çalışmasında yer alan unsurlar.....                                                      | 88 |
| <b>Tablo 4.8.</b> GSFLOW modeline aktarılan dosyaların özellikleri .....                                                    | 90 |
| <b>Tablo 5.1.</b> Elde edilen istatistiksel değerlendirme sonuçları .....                                                   | 94 |

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa

|                                                                                                                                                                      |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 3.1. Porsuk Havzası'nın sınırları ve akış ağı .....                                                                                                            | 11 |
| Şekil 3.2. Porsuk Havzası'nın sayısal yükseklik haritası ve akış ağı.....                                                                                            | 11 |
| Şekil 3.3. Hidrolojik çevrim (su döngüsü) (http-2).....                                                                                                              | 26 |
| Şekil 3.4. Hidrolik eğim (Hökelekli, 2010). ....                                                                                                                     | 30 |
| Şekil 3.5. Ayırıklaştırılmış kavramsal bir akifer sistemi (Kavşut, 2019). ....                                                                                       | 34 |
| Şekil 3.6. Yeraltı suyu akış modeli (MODFLOW-2005) hesaplama adımları (Kavşut, 2019).35                                                                              |    |
| Şekil 3.7. Modelleme çalışması için temsili bir harita (http-5).....                                                                                                 | 39 |
| Şekil 3.8. Modelleme çalışması örneği (http-5). ....                                                                                                                 | 40 |
| Şekil 3.9. Oluşturulan kavramsal model (http-5). ....                                                                                                                | 40 |
| Şekil 3.10. A) HTB ve akarsular arasındaki yüzey akışının kademeli akışı, B) Topografyanın<br>yükseklik bantları ve dikdörtgen bir hücre ile kesişimi (http-6). .... | 45 |
| Şekil 3.11. PRMS hesaplama adımları (Kavşut, 2019). ....                                                                                                             | 46 |
| Şekil 4.1. Çalışma alanının hidrojeolojik haritası (DSİ, 1975). ....                                                                                                 | 49 |
| Şekil 4.2. Model yapısının GMS yazılımı içinde oluşturulması .....                                                                                                   | 51 |
| Şekil 4.3. GMS yazılımında gerçekleştirilen kararlı hal modellemesinin bileşenleri.....                                                                              | 51 |
| Şekil 4.4. Hidrolik iletkenlik zonları.....                                                                                                                          | 53 |
| Şekil 4.5. Kararlı hal (kalibrasyon öncesi) modelleme sonuçları .....                                                                                                | 55 |
| Şekil 4.6. Observations (gözlemler) bileşeni diyalogu .....                                                                                                          | 56 |
| Şekil 4.7. Sisteme girilen gözlenen akışların ardından modelin çalıştırılmasıyla elde edilen<br>uyum durumu .....                                                    | 57 |
| Şekil 4.8. Kalibrasyon hedefi (http-8).....                                                                                                                          | 57 |
| Şekil 4.9. Çıkış noktasındaki gözlem kuyusunda hesaplanan (computed) ve gözlenen<br>(observed) değerler.....                                                         | 58 |
| Şekil 4.10. Hesaplanan (computed) ve gözlenen (observed) yükseklik değerleri .....                                                                                   | 58 |
| Şekil 4.11. Akışın hesaplanan (computed) ve gözlenen (observed) değerleri.....                                                                                       | 59 |
| Şekil 4.12. Manuel kalibrasyon sonrası kararlı durum modelleme sonucu .....                                                                                          | 59 |
| Şekil 4.13. PEST kalibrasyonu ile elde edilen optimize hidrolik iletkenlik ve beslenme<br>değerleri.....                                                             | 61 |
| Şekil 4.14. PEST parametre hassasiyeti plot diyagramı .....                                                                                                          | 61 |
| Şekil 4.15. Kararlı durum PEST kalibrasyonu sonrası modelleme sonucu .....                                                                                           | 62 |

|                                                                                                                                                         |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 4.16. 4.Zon bölgesinde akış halindeki beslenme oranı .....                                                                                        | 63 |
| Şekil 4.17. Modele tanımlanan akış verileri.....                                                                                                        | 65 |
| Şekil 4.18. MODFLOW diyalog penceresi.....                                                                                                              | 66 |
| Şekil 4.19. Akış modelinde kalibrasyon için modele girilen gözlem verileri .....                                                                        | 67 |
| Şekil 4.20. Yeraltı suyu yükseklik değişimi-zaman diyagramı .....                                                                                       | 68 |
| Şekil 4.21. Yeraltı suyu akış modeli sonuçları .....                                                                                                    | 68 |
| Şekil 4.22. MODFLOW stream (SFR2) paketi diyalogu.....                                                                                                  | 70 |
| Şekil 4.23. SFR2 paketi ile yapılan modelleme sonucunda hesaplanan akış bütçesi .....                                                                   | 71 |
| Şekil 4.24. Eskişehir Topsis istasyonu yağış ve Eşenkara akış debisi değerleri (1970 su yılı) 73                                                        |    |
| Şekil 4.25. Eskişehir Topsis istasyonu yağış ve Eşenkara akış debisi değerleri (1971 su yılı) 73                                                        |    |
| Şekil 4.26. Eskişehir Topsis istasyonu yağış ve Eşenkara akış debisi değerleri (1972 su yılı) 73                                                        |    |
| Şekil 4.27. Eskişehir Bölge istasyonu yağış ve Eşenkara akış debisi değerleri (1970 su yılı) 74                                                         |    |
| Şekil 4.28. Eskişehir Bölge istasyonu yağış ve Eşenkara akış debisi değerleri (1971 su yılı) 74                                                         |    |
| Şekil 4.29. Eskişehir Bölge istasyonu yağış ve Eşenkara akış debisi değerleri (1972 su yılı) 74                                                         |    |
| Şekil 4.30. Modelleme alanının yükseklik haritası .....                                                                                                 | 75 |
| Şekil 4.31. Modelleme alanının jeolojik yapı haritası .....                                                                                             | 76 |
| Şekil 4.32. Modelleme alanının arazi kullanımı haritası .....                                                                                           | 77 |
| Şekil 4.33. Modelleme alanının eğim haritası.....                                                                                                       | 77 |
| Şekil 4.34. Modelleme alanının HTB haritası.....                                                                                                        | 78 |
| Şekil 4.35. PRMS veri dosyası.....                                                                                                                      | 79 |
| Şekil 4.36. PRMS kontrol dosyası .....                                                                                                                  | 80 |
| Şekil 4.37. PRMS modeli ile yapılan simülasyon sonucunda hesaplanan ve gözlenen akış<br>değerleri (1971 su yılı) .....                                  | 81 |
| Şekil 4.38. PRMS ile modellenen ve Eşenkara akım gözlem istasyonunda ölçülen günlük<br>ortalama akış değerleri (1972 su yılı kalibrasyon periyodu)..... | 82 |
| Şekil 4.39. PRMS modeli kalibrasyonu için NSE (1972 su yılı).....                                                                                       | 82 |
| Şekil 4.40. PRMS ile modellenen ve Eşenkara akım gözlem istasyonunda ölçülen günlük<br>ortalama akış değerleri (1970 su yılı validasyon periyodu) ..... | 83 |
| Şekil 4.41. PRMS modeli validasyonu için NSE (1970 su yılı) .....                                                                                       | 83 |
| Şekil 4.42. PRMS modelleme sonuçları (1970 – 1973).....                                                                                                 | 85 |
| Şekil 4.43. PRMS modelleme sonuçları (1970 su yılı).....                                                                                                | 85 |
| Şekil 4.44. PRMS modelleme sonuçları (1971 su yılı).....                                                                                                | 86 |
| Şekil 4.45. PRMS modelleme sonuçları (1972 su yılı).....                                                                                                | 86 |
| Şekil 4.46. GSFLOW’da akışın bölgeler arasındaki hareketi (Kavşut, 2019). .....                                                                         | 87 |

|                                                                             |    |
|-----------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Şekil 4.47.</b> ‘MODFLOW name file’ diyalogu.....                        | 89 |
| <b>Şekil 4.48.</b> GSFLOW yapı dosyası .....                                | 89 |
| <b>Şekil 4.49.</b> GSFLOW kontrol dosyası.....                              | 90 |
| <b>Şekil 4.50.</b> GSFLOW modelleme sonuçları (1971 su yılı) .....          | 91 |
| <b>Şekil 4.51.</b> GSFLOW modeli kalibrasyonu (1972 su yılı).....           | 92 |
| <b>Şekil 4.52.</b> GSFLOW modeli kalibrasyonu için NSE (1972 su yılı) ..... | 92 |
| <b>Şekil 4.53.</b> GSFLOW modeli validasyonu (1970 su yılı) .....           | 93 |
| <b>Şekil 4.54.</b> GSFLOW modeli validasyonu için NSE (1970 su yılı).....   | 93 |



## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

|                 |                                                                      |
|-----------------|----------------------------------------------------------------------|
| b               | : Akiferin ortalama kalınlığı                                        |
| °C              | : Santigrat                                                          |
| F               | : Fahrenheit                                                         |
| H               | : Hidrolik yük                                                       |
| i               | : Hidrolik eğim                                                      |
| i               | : Satır indeksi                                                      |
| j               | : Sütun indeksi                                                      |
| k               | : Tabaka indeksi                                                     |
| K               | : Permeabilite katsayısı                                             |
| K <sub>xx</sub> | : x eksenı boyunca hidrolik iletkenlik                               |
| K <sub>yy</sub> | : y eksenı boyunca hidrolik iletkenlik                               |
| K <sub>zz</sub> | : z eksenı boyunca hidrolik iletkenlik                               |
| S <sub>s</sub>  | : Özgöl depolama katsayısı                                           |
| T               | : Transmisibilite                                                    |
| V               | : Hız                                                                |
| W               | : Su girişinde veya çıkışında birim hacimdeki yer değıştirme miktarı |
| Q               | : Debi                                                               |
| $\bar{Q}_{obs}$ | : Gözlemlenen akışların zaman serisi ortalaması                      |
| $Q_{obs}(t)$    | : Gözlemlenen akış değeri                                            |
| $Q_{sim}(t)$    | : Model tarafından simüle edilen akış değeri                         |
| ABSCD           | : Avrupa Birliğı Su Çerçeve Direktifi                                |
| CBS             | : Coğrafi Bilgi Sistemleri                                           |
| DSİ             | : Devlet Su İşleri                                                   |
| ED              | : European Datum                                                     |
| EİEİ            | : Elektrik İşleri Etüt İdaresi                                       |
| GMS             | : Groundwater Modeling System                                        |
| GSFLOW          | : Coupled Groundwater and Surface-Water Flow Model                   |
| HEC-HMS         | : Hydrologic Engineering Center- Hydrologic Modeling System          |
| HRU             | : Hydrologic Response Unit                                           |
| HTB             | : Hidrolojik Tepki Birimleri                                         |
| LPF             | : Layer-Property Flow                                                |

|         |                                                               |
|---------|---------------------------------------------------------------|
| MAE     | : Mean Absolute Error                                         |
| ME      | : Mean Error                                                  |
| MGM     | : Meteoroloji Genel Müdürlüğü                                 |
| MODFLOW | : U.S. Geological Survey Modular Finite-Difference Flow Model |
| MTA     | : Maden Tetkik ve Arama                                       |
| NSE     | : Nash–Sutcliffe Model Efficiency Coefficient                 |
| PCG     | : Preconditioned Conjugate Gradient Method                    |
| PEST    | : Parameter Estimation                                        |
| PRMS    | : Precipitation-Runoff Modeling System                        |
| RMSE    | : Root Mean Square Error                                      |
| RMSR    | : Root Mean Square Residuals                                  |
| SYM     | : Sayısal Yükseklik Modeli                                    |
| SWAT    | : Soil and Water Assessment Tool                              |
| USGS    | : United States Geological Survey                             |
| UTM     | : Universal Transverse Mercator                               |
| UZF     | : Unsaturated Zone Flow                                       |

## 1. GİRİŞ

Dünya nüfusunun hızla artması ve gelişen teknolojiye bağlı olarak sanayileşmenin hız kazanması, yeryüzündeki kısıtlı tatlı su kaynaklarının önemini açıkça ortaya koymaktadır. Tatlı su kaynaklarının %68'inden fazlası buzullarda, %0.2'si doğrudan kullanılabilir durumda olan göllerde ve nehirlerde bulunmaktadır. Geriye kalan tatlı su kaynakları ise yerin altında bulunmaktadır (Aytek ve Toprak, 2001). Hızlı nüfus artışı ve sanayileşme, suya olan ihtiyacı artırdığı gibi, beraberinde yarattığı kirlilik nedeniyle de tatlı suyun kullanılabilir miktarlarını olumsuz şekilde etkilemektedir. Kirlenen suyun tekrar kullanılabilir duruma getirilmesi doğal yollarla veya arıtma yöntemleriyle mümkündür. Kirli suyun doğal yollarla kullanılabilir duruma getirilmesi uzun süreler alırken, arıtma yöntemi ile kullanılabilir duruma getirilmesi de enerji ve işgücü gerektirdiğinden maliyetlidir.

Kirliliğe maruz kalan tatlı suyun doğal temizlenme yollarından başlıcası yağıştır. Yağış olayı sonucunda yeryüzünde meydana gelen akışın bir kısmı sel olarak göllere ve denizlere gitmekte, bir kısmı buharlaşarak tekrar atmosfere katılmakta, bir kısmı bitkiler tarafından emilmekte, geriye kalanı ise geçirimli özelliğe sahip yeraltı katmanlarına karışmaktadır. Yüzey suyu kaynaklarının kısıtlı olması, bu kısıtlı suyun depolanmasının maliyetli olması ve çevresel kaygılarla birlikte buharlaşmanın etkisiyle su kaybının fazla olması nedeniyle yeraltı suyuna yönelim zarurieti doğmuştur. Yeraltı su kaynaklarının tüketimi her geçen gün artmaktadır; ancak bu kaynaklar da yüzey suyu kaynakları gibi sınırsız değildir. Dünyanın birçok yerindeki yerleşim bölgelerinde mevcut yeraltı suları açılan kuyular vasıtasıyla başta içme suyu ve tarımsal faaliyetler olmak üzere birçok amaçla kullanılmaktadır. Ancak bu kullanımların bir kısmının düzensiz ve plansız olması, çeşitli problemlerin ortaya çıkmasına neden olmaktadır.

Yeraltı suları ile yüzey suları sürekli ilişki halindedir. Bu ilişki, koşullara bağlı olarak çeşitli şekillerde gerçekleşmektedir. Yeraltı suyunun kullanımı amacıyla açılan kuyularla yeryüzüne çıkarılması, akarsu ve göllerdeki su miktarının azalmasına neden olabilir. Ayrıca yüzey suyunun kirliliği, yeraltı su kalitesini; yeraltı suyunun kirliliği de yüzey suyunun kalitesini olumsuz etkileyebilir (Winter vd., 1998).

Kaynakların hızla tükenmesi, toplumların bilinç düzeylerinin artmasına ve su kaynaklarına olan hassasiyetlerinin yükselmesine neden olmuştur. Bu yüzden yüzey suyu ve yeraltı suyu kaynaklarının birlikte değerlendirilmesi daha önemli hale gelmiştir. Yüzey suyu ile yeraltı suyu arasındaki ilişki çok fazla parametre içerdiğinden oldukça karmaşıktır ve bu ilişkinin modellenmesi güç bir iştir. Bu nedenle, araştırmacılar tarafından gerçekleştirilen çalışmaların birçoğunda yüzey suyu ve yeraltı suyu modelleri birbirlerinden bağımsız olarak gerçekleştirilmiş ve çalışmalarda yüzey veya yeraltı su kaynaklarının sadece birine odaklanılmıştır. SWAT (Soil and Water Assessment Tool), PRMS (Precipitation-Runoff Modeling System) gibi geliştirilen modeller çoğunlukla yüzey sularının simülasyonuna yoğunlaşırken, MODFLOW (U.S. Geological Survey Modular Finite-Difference Flow Model) gibi geliştirilen modeller ise çoğunlukla yeraltı suyu akışının simülasyonuna odaklanmıştır.

Yeraltı suyu ve yüzey suyunun birlikte modellenerek etkileşiminin gerçekleştirilmesi son yıllarda önem kazanmış ve bu alanda gerçekleştirilen çalışmaların büyük bir kısmı yakın zaman diliminde yapılmıştır. Bu etkileşimin oluşturulmasında ve anlaşılmasında kullanılan bütünleşik bir model olan GSFLOW (Coupled Groundwater and Surface-Water Flow Model), PRMS ve MODFLOW modellerinin entegrasyonuna dayanan birleşik bir yeraltı suyu-yüzey suyu etkileşim modelidir. GSFLOW, PRMS ve MODFLOW modelleri gibi USGS (United States Geological Survey) tarafından geliştirilmiştir.

### **1.1. Çalışmanın Amacı**

Bu çalışma, Porsuk Havzası'nın Eskişehir il sınırları içerisinde kalan ve Orta Porsuk olarak adlandırılan bölgesinde, arazi yüzeyi ile yeraltı suyu arasındaki etkileşimi incelemek amacıyla bütünleşmiş bir yeraltı suyu-yüzey suyu modelinin geliştirilmesini amaçlamaktadır. Bu amacı gerçekleştirmek için gerekli olan MODFLOW ve PRMS modellerinin etüt alanına ait simülasyonlarının yapılması hedeflenmiştir.

Porsuk Havzası'nda sulamanın akarsu tüketimi üzerindeki etkisini değerlendirmek için GMS (Groundwater Modeling System) yazılımının arayüzündeki MODFLOW modeli kullanılarak bölgesel, üç boyutlu yeraltı suyunun akış modeli oluşturulmuştur. Nehir akışı ile akifer arasındaki etkileşim, MODFLOW'un SFR2 paketi ile simüle edilmektedir. Simülasyonla birlikte bölgeye ait su bütçesinin hesaplanması da gerçekleştirilecektir.

Klasik yeryüzü suyu akış modelleri yeraltı suyu süreçlerini basitleştirir ve genellikle yanal yeraltı suyu akışını ihmal ederler. Diğer yandan, yeraltı suyu akış modelleri genellikle sabit bir parametre olarak basitleştirilen ve dışarıdan belirtilmesi gereken arazi yüzeyi işlemlerinin fiziksel süreçlerini simüle edemezler. Bu çalışma, nihai olarak bütünleşik bir yüzey suyu-yeraltı suyu modeli olan GSFLOW'u geliştirerek, doğal süreçlerin ve insan faaliyetlerinin yeraltı suyu dinamikleri üzerindeki etkilerini ölçmeyi ve ilerleyen zaman diliminde çalışma bölgesinde yapılması muhtemel faaliyetlere altlık oluşturmayı amaçlamaktadır.

GSFLOW, yeraltı suyu akış modeli MODFLOW ile yüzey suyu akış modeli olan PRMS'in birleştirilmesiyle geliştirilmiştir. PRMS, yüzeyde gerçekleşen yağışı, sıcaklığı ve güneş ışınımını mekânsal olarak dağıtırken, yağışı yüzeysel akış, ara akış, sızma ve buharlaşma gibi bileşenlere ayırır. Ayrıca UZF bileşeni ile zemin tabakası altında doymamış düşey akışı hesaplar. Model ayrıca hidrolojik döngüdeki buharlaşma, terleme ve yeraltı suyunun beslenmesi gibi farklı bileşenleri de simüle edebilir.

## 2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

### 2.1. Yeraltı Suyu Modellemesi İle İlgili Gerçekleştirilmiş Çalışmalar

Çalışma kapsamında gerçekleştirilen literatür araştırması ve kaynak taramaları sonucunda, yeraltı suyu modellemesine yönelik çalışmaların çoğunlukla MODFLOW kullanılarak gerçekleştirildiği görülmüştür. Bu çalışmaların bazıları şu şekilde özetlenebilir:

Bayırtepe vd., (2023), “MODFLOW Yeraltı Suyu Akım Modellemesi: Ezrak Sulak Alanı (Ürdün) İçin Ekosistemin Korunması Yönelik Bir Çalışma” başlıklı çalışmalarında Ürdün'deki Ezrak sulak alanı ve havzasında 2013-2020 yılları arasındaki yeraltı suyu akışını tahmin etmek için sayısal yeraltı suyu akış modeli olan MODFLOW'u kullanmışlardır. Yapılan hassasiyet analizi sonucunda, modeli deneme-yanılma yaklaşımı ile kalibre ettikten sonra PEST (Parameter Estimation) yöntemine tabi tutmuşlardır. Kalibre edilmiş modelin gözlemlerle istatistiksel uyumunun kabul edilebilir aralıkta olduğu belirlenmiştir. Çalışmanın sonuçlarına göre, Ezrak sulak alanında su tablası kotunun zemin kotundan 22 m aşağıda olduğu gözlemlenmiştir. Modellenen zaman aralığında, havza genelinde akiferde depolanan su miktarında artış olmasına rağmen, sulak alan bölgesinde ortalama su seviyesinde yıllık 0.83 m düşüş tespit edilmiştir.

Mohammadi (2022), “Büyükçekmece Havzası İçin Entegre Edilmiş Yüzey Suyu ve Yeraltı Suyu Hidrodinamik Modeli” başlıklı yüksek lisans tezi çalışmasında Büyükçekmece Havzası'nda yüzey suyu ve yeraltı suyu hidrolojik modellemesini gerçekleştirmiştir. Yüzey suyu akışının modellemesinde HEC-HMS, yeraltı suyu akışının modellemesinde ise MODFLOW yazılımını kullanmıştır. HEC-HMS ile farklı yağış şiddetleri altında bölgede oluşan yüzeysel akış ve sulak alan bölgesindeki sızma miktarını belirlemiş ve bu verileri MODFLOW modelinin girdilerinden biri olarak kullanmıştır. Havza özelliklerini tanımlarken havza alanı, eğim, geçirimsizlik, akarsu boyutları, taban eğimi ve pürüzlülük gibi parametreleri HEC-HMS modeline entegre etmiş ve akım gözlem istasyonlarından elde edilen maksimum aylık akım değerlerini modelin kalibrasyonu ve validasyonunda kullanmıştır. HEC-HMS ile havza üzerinde oluşan yüzeysel akış hidrografını ve alt havzalarda oluşan sızma miktarını belirledikten sonra, bataklık bölgesindeki yeraltı suyu akışını MODFLOW modeli ile simüle etmek için akifer sınır koşulları, tabakaların hidrolik iletkenlikleri, porozite ve özgül verim gibi

zemin parametrelerini girmiş ve analizler yapmıştır. Gözlem kuyularında ölçülen yeraltı su seviyelerini kullanarak yeraltı suyu hidrolik modelinin kalibrasyonunu gerçekleştirmiştir. Çalışmanın sonucunda, uzun yıllar boyunca yeraltı su seviyesindeki değişimleri elde etmiş ve 100 yıllık yağış periyodunda HEC-HMS ile taşkın debisini simüle ederek olası taşkın durumlarında yeraltı su seviyesindeki değişiklikleri gözlemlemiştir.

Bingöl (2019), “Antalya, Olympos Antik Kenti Yeraltı Suyu Akımı Modellemesi” başlıklı yüksek lisans tez çalışmasında Antalya-Olympos antik kentinde, bölgedeki arkeolojik çalışmaların sürdürülebilirliğini amaçlayarak, sular altında kalan yapılar için uygulanacak drenaj yöntemleri için bilgiler üretmeyi hedeflemiştir. Çalışma kapsamında, bölgenin geçmiş ve günümüz dönemine ait yeraltı suyu-yüzey suyu ilişkisini incelemek için MODFLOW modelinin arayüzü olan GMS yazılımını kullanarak modelleme yapmıştır.

Aghlmand ve Abbasi (2019), “Application of MODFLOW with Boundary Conditions Analyses Based on Limited Available Observations: A Case Study of Birjand Plain in East Iran” başlıklı çalışmalarında, Birjand bölgesindeki yeraltı suyu akış modelini GMS yazılımının arayüzünde bulunan MODFLOW modelini kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada, akiferin sınır koşullarını tanımladıktan sonra mevcut verileri kullanarak yeraltı suyu akışını kavramsal bir yöntemle simüle etmişlerdir. Hidrolik iletkenlik gibi model parametrelerinin kalibrasyonunda, yedi yıl boyunca gözlenen ve kayıt altına alınan verilerden yararlanmışlardır. Modelin performansını değerlendirmek için ME (Mean Error), MAE (Mean Absolute Error) ve RMSE (Root Mean Square Error) gibi istatistiksel değerleri hesaplamışlardır. Yapılan hesaplamalar sonucunda, model sonuçlarının gözlenen verilerle uyumlu olduğunu belirlemişlerdir. Bu nedenle, Birjand akiferindeki su seviyesi değişikliklerinin zaman içinde güvenilir bir şekilde incelenmesinde bu modelin kullanılabileceğini vurgulamışlardır.

Boughariou vd., (2018), “Modeling aquifer behaviour under climate change and high consumption: Case study of the Sfax region, southeast Tunisia” başlıklı çalışmada, Tunus'un Sfax şehrindeki iklim değişikliği ve yüksek su tüketimi koşullarının akifer davranışı üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Çalışmada, CBS (Coğrafi Bilgi Sistemleri) tekniklerini kullanarak MODFLOW modellemesi gerçekleştirmişlerdir. Yapılan piyezometrik simülasyonlar sonucunda, küresel ölçekte 2020 yılında yaklaşık

0.5 m, yerel olarak ise 2050 yılına kadar 1 m’lik bir su seviyesi düşüşü öngörmüşlerdir. Bu düşüş, özellikle ‘Chaffar’ ve ‘Djbeniana’ bölgelerinde artan su tüketim senaryosu altında daha belirgindir. İki farklı senaryo analizi, 2050 yılına kadar yeraltı suyunun niceliksel olarak bozulabileceğini öngörmektedir. Bu çalışma, Sfax bölgesindeki akifer kaynaklarının sürdürülebilirliği üzerine önemli bulgular sunarak, su yönetimi kararları için bilimsel temel sağlamaktadır.

## **2.2. Yüzey Suyu Modellemesi İle İlgili Gerçekleştirilmiş Çalışmalar**

Çalışma kapsamında gerçekleştirilen literatür araştırması ve kaynak taramalarında, yüzey suyu modellemesi için birçok farklı modelin kullanıldığı tespit edilmiştir. Ancak, çalışmanın gerekliliklerine uygun olması ve güçlü bir temel oluşturması açısından PRMS ile yapılan çalışmalar öncelikli olarak incelenmiştir. Bu modelin kullanıldığı çalışmaların sayısının oldukça az olduğu gözlemlenmiştir. Bu çalışmaların bazıları şu şekilde özetlenebilir:

Roland (2023), “Application of the Precipitation-Runoff Modeling System (PRMS) to Simulate the Streamflows and Water Balance of the Red River Basin, 1980–2016” başlıklı çalışmada, 1980-2016 dönemi için Red River Havzası’ndaki nehir akışını günlük ve aylık zaman ölçeklerinde tahmin etmek amacıyla PRMS modelini kullanmıştır. Ayrıca, doğal ve insan kaynaklı etkilerin nehir akışı ve su bütçesi üzerindeki etkilerini değerlendirmiştir. Roland, aylık zaman serisi için akış ölçümlerinin %67’sini başarıyla kalibre etmiştir. Günlük zaman serisi için ise akış ölçümlerinin %43’ünü başarıyla kalibre etmiştir. Havzanın kuru alanlarındaki düşük akış miktarlarının tahmin edilmesi ve buharlaşma-terleme süreçlerinin doğru şekilde temsil edilmesi gibi zorluklara rağmen, model aylık ve günlük zaman adımlarında değerlendirilen 73 akış ölçümü için sırasıyla %36 ve %26 oranında akışı büyük bir doğrulukla tahmin etmiştir. Ayrıca, su kullanım koşullarına bağlı olarak nehir akış hacimlerinin (örneğin, rezervuar salınımından geri dönüş akışı) Red River ana havzasında, Kızıl Nehir’in kuzey bölgesinde ve Ouachita Nehri’nde arttığını gözlemlemiştir. Su çekilmesinin ise Kızıl Nehir’in havza çıkışına yakın bölgelerinde ve Caney Deresi’nde nehir akışını azalttığını tespit etmiştir.

Van Beusekom ve Viger (2016) tarafından yapılan, “A glacier runoff extension to the Precipitation Runoff Modeling System” başlıklı çalışmada, PRMS modeline buzul akışını simüle etmek için PRMSGlacier modülü eklenmiştir. Bu modül, dağıtılmış

parametreli, fiziksel proseslere dayalı bir hidrolojik simülasyon kodudur. Çalışma, buzul üzerinde detaylı ölçümler veya yüksek hesaplama maliyeti gerektirmeden modelin kullanılabilirliğini korumak amacıyla fiziksel ilkeleri tercih etmiştir. PRMSGlacier modülü, Alaska'daki Wolverine ve Gulkana Glacier havzalarında doğrulamak için geniş veri setlerini kullanarak model performansını test etmiştir. Yapılan doğrulamalar sonucunda, akarsu akışının Nash-Sutcliffe Model Efficiency Coefficient (NSE) değerlerinin 0.87 ve 0.86, kış kütle dengesi simülasyonlarının mutlak sapma oranlarının 0.10 ve 0.08, yaz kütle dengelerinin mutlak sapma oranlarının ise 0.01 ve 0.03 olduğu belirtilmiştir. Bu sonuçlar, PRMSGlacier modülünün buzul akışlarını doğru bir şekilde simüle etme yeteneğini göstermektedir.

Deg Hyo ve II Won (2005) tarafından yapılan, “A Study on PRMS Applicability for Korean River Basin” başlıklı çalışmada, Kore'deki yedi havza üzerinde PRMS modelinin uygulanabilirliği ve simülasyon yeteneği değerlendirilmiştir. Araştırmacılar, model bileşenlerinin temel kavramlarını ve parametrelerini inceleyerek modelin uygulanabilirliğini değerlendirmişler ve model parametrelerinin tahmin edilebilirliğini, kullanılabilir verilere bağlı olarak tartışmışlardır. Çalışmada, bazı parametrelerin ölçülebilir havza özelliklerinden doğrudan tahmin edilebildiği, diğer parametrelerin ise Rosenbrock'un otomatik optimizasyon şemasıyla tahmin edildiği belirtilmiştir. Yapılan simülasyonlar sonucunda, modelden elde edilen akışların gözlemlenen akışlarla uyumlu olduğu gözlemlenmiştir. Kar erimesi modelinin parametreleri için varsayılan değerler kullanılmasına rağmen, kar erimesi simülasyon sonuçlarının da kabul edilebilir düzeyde olduğu belirtilmiştir. Çalışma ayrıca, modelin simülasyon yeteneğinin havza büyüklüğüne duyarlı olmadığını, ancak havza alanının artmasıyla birlikte simülasyon özelliklerinin yarı dağıtık modellere göre daha çok toplu modele yakın olduğunu ortaya koymuştur.

### **2.3. Yeraltı Suyu-Yüzey Suyu Etkileşimi İle İlgili Gerçekleştirilmiş Çalışmalar**

1962 ve 1963 yıllarında araştırmacı Toth tarafından gerçekleştirilen çalışmalar, yeraltı suyu ve yüzey suyu etkileşim modellerinin oluşturulmasına yönelik ilk çalışmalar olarak kabul edilmektedir. Toth, “A Theory of Groundwater Motion in Small Drainage Basins in Central Alberta, Canada” ve “A Theoretical Analysis of Groundwater Flow in Small Drainage Basins” başlıklı çalışmalarıyla; yeraltı suyunun iklim, topografya ve jeolojik faktörlerin etkisi altında nasıl ve ne şekilde kontrol

edildiğini açıklamıştır. Bu çalışmalar, etkileşimin temel prensiplerini ortaya koymaktadır. 1964 yılında araştırmacı Rorabaugh, “Estimating Changes in Bank Storage and Groundwater Contributions to Streamflow” başlıklı çalışmasıyla; nehir akışı ile yeraltı suyu arasındaki ilişkiyi tahmin edebilmek için yöntemler geliştirmiştir.

Yeraltı suyu-yüzey suyu etkileşimine dair fikirler ve çalışmalar ilerleyen zaman içinde gelişim göstermiş ve süreçleri daha iyi temsil etmesi için çeşitli eklenti ve modüller programlara dahil edilmiştir (Prudic, 1989). İlk çalışmalar, su bütçesinin hesaplanması ve yönetimi konularında gerçekleştirilmiştir (Gorelick, 1986). Bu modeller, daha basit bir parametre setiyle temsil edilmiştir. Hidrolojik çevrimde yeraltı ve yerüstü bileşenlere ait süreçlerin, hassas ve gerçeğe en yakın temsiliyeti için karmaşık bütünsel modeller 1986 yılında geliştirilmiştir (Abbott vd., 1986). Yüzey suyu akış modelleri, mevcut yeraltı suyu modellerine (Swain ve Wexler, 1993; Jobson ve Harbaugh, 1999) eklenmiş ve ardından tam bir birleşik yeraltı suyu-yüzey suyu etkileşim süreçlerini simüle eden modeller geliştirilmiştir (Vander Kwaak ve Loague, 2001; Panday ve Huyakorn, 2004; Kollet ve Maxwell, 2006; Jones vd., 2008).

Avrupa Birliği Su Çerçeve Direktifi (ABSÇD) tarafından yayımlanan direktifler, Avrupa Birliği üye ülkelerinin tüm su kaynaklarının korunması ve yönetilmesine dair önemli yönergeler içermektedir. Bu direktifler, son yıllarda yeraltı suyu ve yüzey suyu etkileşimi konusundaki çalışmaların hız kazanmasına önayak olmuş ve direktiflere tabii üye ülkeler arasında bilinç düzeyini artırmıştır.

Kavşut (2019), “Yeraltı Suyu – Yerüstü Suyu Etkileşim Modeli: Silifke – Göksu Deltası Örneği” başlıklı doktora tezi çalışmasında, Göksu Deltası'nda yeraltı suyu ile yüzey suyu etkileşimini araştırmıştır. Çalışmada, GSFLOW birleşik akış modelini kullanarak etkileşim modellemesini gerçekleştirmiştir. Etkileşim öncesinde, yüzey suyu akışı PRMS ile yeraltı suyu akışı ise USGS tarafından geliştirilen Visual MODFLOW Flex kullanılarak modellenmiştir. Ardından bu modelleri kalibre etmiş ve son olarak GSFLOW modelini de kalibre etmiştir. Yapılan modelleme çalışmaları sonucunda, araştırma alanında yeraltı ve yüzey sularının dinamik ve sürekli bir şekilde etkileşim halinde olduğu bulgusuna ulaşmıştır.

Misgana vd., (2016), Etiyopya'daki Rift Vadisi'nde yeraltı suyu ve yüzey suyu etkileşimlerini incelemek için GSFLOW modelini kullanmışlardır. Araştırmaları, modelin bölgedeki su kaynaklarının sürdürülebilir yönetimi için önemli bir araç olduğunu ortaya koymuştur.

Kumar vd., (2014), GSFLOW modelini kullanarak Hindistan'daki Krishna nehir havzasında su kaynaklarının yönetimini değerlendirmişlerdir. Çalışmaları, modelin nehir akifer sistemlerinde su döngüsü süreçlerini doğru bir şekilde simüle ederek, yönetim stratejilerinin geliştirilmesine katkı sağladığını göstermiştir.

Alhan ve Boyraz (2011) "Hidrolojik Modellemede Yüzey Suyu-Yeraltı Suyu Etkileşimlerinin Önemi" başlıklı çalışmalarında; USGS tarafından geliştirilen Visual MODFLOW arayüzünü kullanarak kavramsal bir nehir-akifer modellemesi gerçekleştirmişlerdir. Gerçekleştirilen simülasyonlarda; kavramsal olarak hazırlanmış nehir-akifer bölgesinin hidrolojik davranışını inceleyerek, yeraltı suyu-yüzey suyu etkileşiminin nehir-akifer formasyonunun hidrolojik davranışına olan etkisini araştırmışlardır. Yaptıkları nehir-akifer modeli ile farklı nehir parametreleri için yeraltı su seviyesinin dağılımını ve nehir-akifer arasında oluşan akışları elde etmişlerdir.

### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu bölümde, Porsuk Havzası'nın coğrafi konumu, CBS (Coğrafi Bilgi Sistemi) platformunda elde edilen karakteristik özellikleri, hidrolojisi ve jeolojisi hakkında bilgiler verilmiş; ayrıca modelleme çalışmalarında kullanılan MODFLOW (yeraltı suyu akış modeli), PRMS (yüzey suyu akış modeli) ve bu iki model arasındaki etkileşimi simüle eden GSFLOW (etkileşim modeli) modellerinin prensipleri açıklanmıştır.

#### 3.1. Porsuk Havzası

Modelleme çalışmalarının gerçekleştirildiği etüt alanı olan Orta Porsuk bölgesi (Eskişehir ve İnönü Ovaları), Porsuk Havzası içerisinde yer almaktadır. Sakarya Havzası'nın bir alt havzası olan Porsuk Havzası'nın yüz ölçümü 11.114 km<sup>2</sup>'dir. 29° 38'-31° 59' doğu boylamları ile 38° 44'-39° 99' kuzey enlemleri arasında yer alan havza, doğu-batı yönünde 202 km, kuzey-güney yönünde ise 135 km uzunluğa sahiptir. Eskişehir ve Kütahya illerinin merkezleri ile bu illere bağlı olan 7 ilçenin merkezini ve Afyon, Uşak ve Ankara illerinin içerisinde yer alan bazı bölgeleri kapsamaktadır. %60'ından fazlası dağlık olan havzanın yüzey suları, Porsuk Çayı ve yan kolları tarafından toplanır ve havzanın içerisinde 436 km yol katettikten sonra 660 m kotunda Sakarya Nehri'ne dökülür. Uzun süreli yıllık ortalama yağış yüksekliği 451 mm olan havzanın bu durumundan dolayı su potansiyeli azdır (Bayazıt vd., 2016).

Havzanın yüzey ve yeraltı yıllık su miktarlarına bakış ve toplam potansiyel durumu Tablo 3.1'de gösterilmektedir.

**Tablo 3.1.** Porsuk Havzası'nın yıllık su miktarları ve toplam potansiyel değeri (Büyükerşen ve Efelerli, 2008).

| Durum             | Yıllık su miktarı        |
|-------------------|--------------------------|
| Yüzey suyu        | 481 hm <sup>3</sup> /yıl |
| Yeraltı suyu      | 297 hm <sup>3</sup> /yıl |
| Toplam potansiyel | 778 hm <sup>3</sup> /yıl |

Değerlendirmelere göre, Porsuk Havzası'nda kişi başına düşen su miktarı 865 m<sup>3</sup> olarak hesaplanmıştır. Ülkemiz ortalamasının 1500 m<sup>3</sup>/kişi olduğu düşünüldüğünde, havzanın su fakiri olduğu sonucuna varılmıştır (Büyükerşen ve Efelerli, 2008).

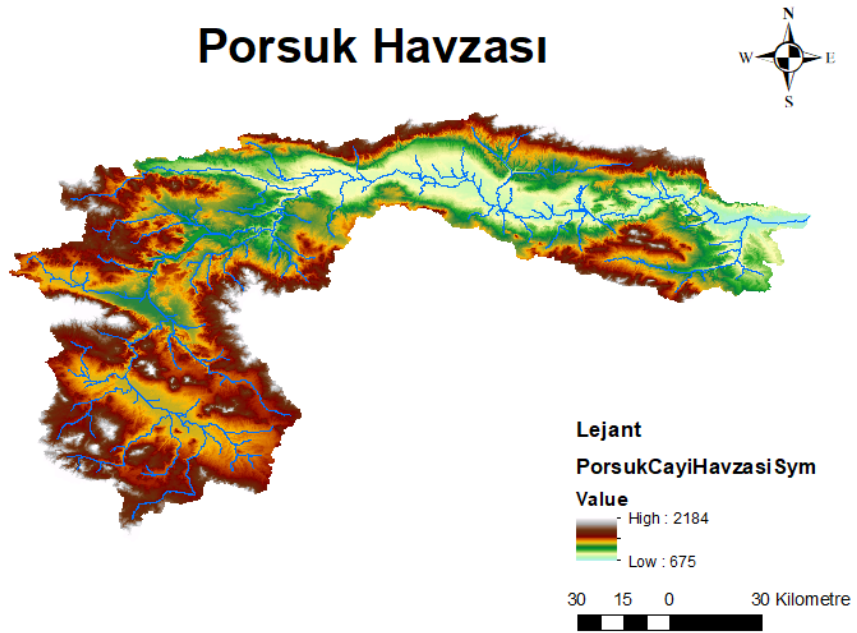
## Porsuk Havzası



Şekil 3.1. Porsuk Havzası'nın sınırları ve akış ağı

### 3.1.1. Havzanın karakteristik özellikleri

## Porsuk Havzası



Şekil 3.2. Porsuk Havzası'nın sayısal yükseklik haritası ve akış ağı

USGS Earth Explorer web portalından (<http-1>) temin edilen uydu görüntüleri CBS platformunda işlenerek Porsuk Havzası'na ait Sayısal Yükseklik Modeli (SYM) oluşturulmuştur (Şekil 3.2). SYM verisi kullanılarak etüt alanı Orta Porsuk bölgesine ait

başta yükseklik, eğim ve bakı gibi modelleme çalışmalarında gereken üç boyutlu haritalar elde edilmiştir. Elde edilen her bir harita ve bu haritalara ait veriler, modelleme çalışmalarında kullanılmak zorunda olan önemli bilgilerdir. Bu verilere yönelik detaylar ve haritalar, dördüncü bölümde açıklanmıştır. Şekil 3.2’de gösterilen SYM incelendiğinde havzanın minimum yüksekliğinin 675 m, maksimum yüksekliğinin ise 2184 m olduğu görülmektedir.

### **3.2. Çalışma Alanı**

Çalışma alanı, Orta Anadolu Bölgesi’nin kuzeybatısında yer almaktadır. Bölge, Porsuk Havzası içinde bulunan Orta Porsuk bölgesinde yer almaktadır. 39° 27’ enlem ve Greenwich meridyenine göre 30° ile 30° 45’ doğu boylamları arasında yer almaktadır. Drenaj alanı 1225 km<sup>2</sup>, ova alanı (eski alüvyonlar dahil) 410 km<sup>2</sup>’dir. Her iki ova da doğu-batı istikametinde uzanmaktadır (DSİ, 1975).

Çalışma alanında önemli yükseltiler şunlardır: İnönü Ovası’nın kuzeybatısında Topçu Tepesi (1064 m), güneybatısında Çalındoruk Tepesi (1281 m), güneyinde Kuzudoruğu Tepesi (1333 m), güneydoğusunda Yeldeğirmeni Tepesi (1230 m), Eskişehir’in kuzeybatısında Yılanlı Tepe (1220 m), kuzeydoğusunda Kapalıkca Tepesi (1250 m), güneydoğusunda ise Yığılçaklı Tepesi (1029 m) (DSİ, 1975).

İnönü Ovası’nda, Porsuk Çayı’nın bir kolu olan Sarısu Deresi bulunmaktadır. Eskişehir Ovası’nda da Porsuk Çayı mevcuttur. Bu iki nehir, Eskişehir’in hemen yanında, şehrin kuzeybatısında birleşerek doğruya doğru akar.

#### **3.2.1. İklim**

Bölgede İç Anadolu karasal iklimi hakimdir. Kışları sert, uzun ve yağışlı; yazları ise sıcak ve kurak geçmektedir. Eskişehir Ovası, İnönü Ovası’na nazaran daha az yağış almaktadır. 1929 – 1972 yılları arasında 43 senelik rasatlara göre ortalama yıllık yağış miktarı 371.4 mm olarak ölçülmüştür. Ortalama günlük sıcaklık 10.8 °C, ortalama buharlaşma miktarı ise 913.5 mm olarak belirlenmiştir. İnönü Ovası’nda ise yıllık ortalama yağış miktarı 479.5 mm, ortalama sıcaklık 10.8 °C, eksik su miktarı 285.8 mm, fazla su miktarı ise 110.8 mm olarak kaydedilmiştir (DSİ, 1975).

#### **3.2.2. Jeoloji**

Yerkürenin oluşumunu, bileşimini, yapısını, hareketlerini ve zaman içindeki değişikliklerini inceleyen bilim dalına jeoloji (yer bilimi) adı verilir (Ketin, 2016).

### **3.2.2.1. Jeolojik formasyonlar**

Jeolojik formasyon, bir veya birden fazla tipte litolojiden oluşan ve yapısındaki belirgin litolojik özelliklerden dolayı komşu birimlerden ayrılabilen kaya birimidir. Kaya malzemesindeki tabakalar, çeşitli yüzey karakteristik özelliklere sahiptir (Ketin, 2016).

Bu bölümde açıklanan ve çalışma alanındaki formasyonlarla ilgili bilgiler, Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü Jeoteknik Hizmetler ve Yeraltı Suları Dairesi Başkanlığı tarafından hazırlanan ve 1975 yılında yayımlanan “Eskişehir ve İnönü Ovaları Hidrojeolojik Etüt Raporu” adlı çalışma ile etüt sahasında yapılan araştırmalar sonucunda derlenmiştir.

#### ***Tortul kayalar***

##### ***Mezozoik***

###### **Jura**

###### **Jura-Fliş:**

Paleozoik üzerine uyumsuz olarak oturur. Etüt sahasının güneydoğusunda, Karacaören köyü civarında, Yıldız Tepesi ve çevresindeki derelerde gözlemlenir. Seri genel olarak kompleks bir yapı gösterir. Volkanik kökenli greler koyu kahverengi renkte ve oldukça sertleşmiştir. Mika ve kuvars taneleri bol miktarda bulunmaktadır. Marnlı ve killi seviyeler basınç etkisiyle yapraklı bir yapı kazanmıştır. Kayalarda belirgin tabakalanma ve şiddetli kıvrımlar görülmektedir. Bu özellikleri, Karacaören köyü yakınlarında gözlemlenmek mümkündür. Fliş serisi üstten Neojen serileriyle uyumsuz olarak sınırlanmıştır ve yaklaşık olarak 600 m kalınlığındadır.

###### **Jura Kalker:**

Fliş serisi üstünde yer yer merccekler halinde, kristallenme derecesi düşük olan kalkerler bulunmaktadır. Bu kalkerler, etüt sahasının orta kısımlarında, Çukurhisar köyü kuzeyinde, Eskişehir çimento fabrikasının yanında ve Yıldız Tepe çevresinde yaklaşık 2.5 km<sup>2</sup>’lik bir alanda görülmektedir. Açık krem ve yer yer hafif kırmızımsı renkte olan bu kalkerler kompakt bir yapıya sahiptir. Çatlakları genellikle kalsit damarları ile dolmuştur. Tabakalanması tektonik etkilerle belirginliğini yitirmiştir. Çimento fabrikası yanındaki kalkerin kalınlığı yaklaşık 40 m’dir.

## ***Senozoik***

### **Paleosen**

#### **Konglomera;**

Eskişehir'in güney sırtlarını oluşturan bir formasyondur ve Paleosen devrinde oluşmuştur. 3. zamanın taban konglomerası olarak bilinen bu formasyon şarap kırmızısı renktedir ve sarımtırak renkli zonları da içermektedir. Taban kısmında daha iri çakıllar bulunur; bu çakıllar genellikle yeşil kayaç kökenlidir ve küt, yuvarlak yapıdadır. Çimento maddesi olarak kil içerir. Formasyon içinde sarımtırak renkte ince bantlar halinde gre ve kilaşı da gözlemlenir. Formasyon güneye doğru eğimlidir. Karacaşehir köyü civarında yapılan ölçümlerde, kuzey 80° batı ve 20° güneybatı doğrultusunda uzanırken, doğu-batı ve 20° güney eğim göstermektedir. Şarap renkli konglomera üstten Eosen ve Neojen serileriyle uyumsuz olarak sınırlanmıştır ve kalınlığı yaklaşık 150 m'dir.

### **Eosen**

#### **Kalker;**

Eskişehir'in güneydoğusu yönünde Paleosen konglomeraları üzerinde diskordan olarak bulunan, Mamuca köyünün batı kısmında, Akçalı düzü tepesinin kuzey eteklerinde çok küçük bir alanda Eosen devrine ait kalker kalıntısına rastlanmıştır. Bu kalker, çok bol miktarda numulites fosili içermekte olup sarımtırak renklidir. Formasyonun yatay bir şekilde olduğu belirlenmiştir. Üstten Neojen formasyonlarıyla uyumsuz sınırlanmıştır ve kalınlığı yaklaşık 30 m civarındadır.

### **Neojen**

#### **Neojen-Konglomera;**

Etüt sahasının büyük bir kısmı konglomera ile kaplanmıştır. Neojen'in tabanını oluşturan konglomeralar, bu devirden önceki morfoloji üzerine oturmuştur. Daha yaşlı çeşitli kayalardan oluşan çakıllar, kalker çimento maddesi ile birleşerek oluşmuştur. Bu konglomera, kirli kırmızı renkte görülmektedir.

Konglomera içinde kum taşı seviyelerine rastlanmaktadır. Bu durumu Eskişehir'in güneydoğusundaki Sarıungur Deresi vadisinde görmek mümkündür. Tabanda kirli sarı renkte kum taşı ile başlayan Neojen, üste doğru tekrar konglomera şeklini almaktadır. Kum taşı kil çimentoludur.

Konglomera genellikle yatay tabakalıdır. Eskişehir Ovası'nda bu tabakalar, İnönü Ovası'nda ise Oklubalı köyünün güneyindeki Ballık Deresi vadisinde kuzeydoğuya 10° eğimli bir yapı kazanmıştır (Kuzey 65° batı, 10° kuzeybatı).

Konglomera, üstten Eskişehir Ovası'nda tüfitlerle konkordan olarak sınırlanmaktadır. İnönü Ovası'nda ise konglomerayı üstten sınırlayan formasyon fliştir. Konglomeranın kalınlığı yaklaşık 120 m civarındadır.

#### Fliş:

Fliş formasyonu, etüt sahasında sadece İnönü Ovası'nın kuzey kısımlarında yer almaktadır. Etüt alanında nispeten küçük bir alanda bulunan bu formasyon, etüt alanının dışında kuzeye doğru geniş sahalar oluşturmaktadır.

Genellikle gevşek dokuda kil taşı, kum taşı, marn ve konglomera şeklinde görülür. Bu değişim 5-10 cm ile 1-2 m arasında değişmektedir.

Flişteki kil taşı genellikle açık yeşil renktedir ve gevşek yapıdadır. Kum taşı açık sarı-açık yeşil renkte olup kalker çimentolu ve gevşek dokuludur. Marnlar killi ve gri renktedir. Konglomera ise kalker çimentolu, yeşil taş ve kalker çakıllıdır.

İnönü'nün kuzey kısımlarında ve İnönü istasyonunun batısında fliş serisi içinde silisleşmiş çok sayıda ağaç fosili bulunmaktadır.

Bu formasyon doğuya doğru değişerek Poyra köyü civarında yumuşak dokulu kil taşı halini almaktadır. Buradaki kil taşının baskın rengi açık yeşildir ve kahverengi zonlar içermektedir. Ayrıca kum taşı ve konglomera bantları da bulunmaktadır.

İnönü'nün kuzeyinde fliş serisinin kuzeydoğu istikametinde tabakalandığı gözlemlenmektedir. Buradan alınan ölçüler kuzey 30° doğu, 35° güneydoğu yönlüdür. Üstten Neojen kalkerleri ile sınırlanan flişin kalınlığı etüt sahası içinde yaklaşık 200 m'dir.

### Kalker:

Neojen formasyonlarının en üst seviyesini oluşturan kalkerler, etüt bölgesinin büyük bir kısmını kaplamaktadır. Eskişehir Havzası'nda tüfitlerin üzerine konkordan olarak yer alırlar ve İnönü Ovası'nın kuzeyinde Neojen'in fliş serisi üzerindedirler.

Bu kalkerler genellikle kirli beyaz renktedir ve yer yer silisleşmeler içerebilir. Tabaka kalınlıkları çok çeşitlidir ve genellikle fosil içermezler. Karstik oluşumları az gelişmiştir. Eskişehir Havzası'nda genellikle yatay durumda bulunurlar, ancak İnönü civarında eğimli olarak gözlemlenebilirler.

Örneğin, İnönü'nün kuzeybatısında Kovalca köyü kuzeyinde alınan ölçü kuzey 70° batı-70° kuzeydoğu, İnönü istasyonu kuzey sırtlarında kuzey 70° batı-35° güneybatı, Poyra köyünün güneyinde Tahir Tepe eteklerinde kuzey 70° doğu-50° güneydoğu, daha doğuda Satılmış köyünün kuzeydoğusundaki Şahit Tepe'de kuzey 45° doğu-75° kuzeybatı, Keskin köyünden Uludere köyüne giden yol güzergahında Karaöz Deresi vadisinde kuzey-güney 60° doğu ve kuzey 50° doğu-55° güneydoğu istikametlerinde görülürler.

Bu kalkerlerin ortalama görünür kalınlığı 200-250 m civarındadır.

### Pliyo-Kuvaterner:

Eski alüvyonlar, etüt sahasının orta kısımlarını oluşturan ovaların çevrelerinde teraslar şeklinde bulunmaktadır. Eskişehir'in kuzeybatısında geniş bir alanda bulunan teraslar daha çok kumlu ve çakıllı karakterdedir. Daha güneyde, Çukurhisar köyü civarında ise teraslar çakıllı killer ile karşılaşmaktadır.

Pliyo-Kuvaterner dönemindeki karasal fasiyes genellikle çapraz tabakalanma gösterir. Bu formasyon, daha yaşlı kayaların parçalarından oluşmuştur. Örneğin, Zincirlikuyu köyü civarındaki seviyelerde bulunan kum ve çakılların çoğu koyu renkli ve volkanik kökenlidir. Çakılların tane çapları genellikle 5 cm'yi geçmezken, kumların ebatları ince ve kaba arasında değişmektedir.

Tüm bu seviyeler doğal olarak sıkışmış durumdadır. Eskişehir civarında terasların görünür kalınlığı yaklaşık 30 m iken, Çukurhisar köyü çevresinde bu kalınlık 50 m'ye kadar ulaşabilir. Etüt edilen sahada eski alüvyon alanı yaklaşık 120 km<sup>2</sup>'yi kapsamaktadır.

### Kuvaterner;

Alüvyon, Sarısu Deresi ile Porsuk Çayı ve bunların yanı sıra diğer yan derelerin taşıdığı ve biriktirdiği malzemelerden oluşmaktadır. İnönü civarında Sarısu vadisinde, doğu-batı istikametinde nispeten dar bir alanda uzanırken, Eskişehir Ovası'nda bu alüvyon daha geniş bir alanı kaplamaktadır. Etüt sahasındaki alüvyon alanı yaklaşık olarak 290 km<sup>2</sup>'dir.

### ***Magmatik kayalar***

#### Ofiyolitik seri;

Ofiyolitik seri, II. zamanın sonunda Kretase döneminde oluşmuş ve etüt sahasının belirli bölgelerinde dağınık olarak görülen bir formasyondur. Bu seri içerisinde Peridotitler, serpantin, gabro ve diyorit gibi çeşitli kayaç türleri bulunmaktadır.

Ofiyolitik seri, sonradan altere olarak serpantinleşmiştir. Serpantinleşmenin daha ileri düzeyde olduğu bölgeler genellikle kırık ve çatlakların geliştiği alanlardır. Magmatik faaliyet sonucunda, yan kayaçlarda çeşitli değişiklikler olmuş ve bu değişimler kontakt metamorf kayaçlarının meydana gelmesine yol açmıştır. Isı, stres ve basınç etkisiyle bu kayaçlar yanmış, kırılmış ve şist bir yapı kazanmıştır. Bu durum, ofiyolitler üzerinde kabuk şeklinde yer yer görülür.

Andezit, Eskişehir'in güneydoğusu istikametinde Mamuca köyünün güneyindeki Sarıungur vadisinde çok küçük bir alanda görülmektedir. Bu andezit örtüsü, Neojen konglomeralarının üzerinde yer almaktadır ve üstten Neojen tüfitleri ile sınırlanmıştır.

Tüfitler, etüt bölgesinin güneydoğusunda ve güneyinde Neojen konglomeralarının üzerinde yaygın olarak bulunurlar. Bu formasyon genellikle kaba taneli olup içinde bol miktarda kum ve zaman zaman iri klastik materyaller içerir. Tüfitlerin sedimanter oluşumunu belirleyen bu özelliklerdir.

Etüt sahasının güneydoğu kısmında, tüfitler içinde sarımtırak renkte kalker bantları da bulunmaktadır. Ayrıca, kayaçlarda silis akıntılarına rastlanması nedeniyle sileks (silis) seviyeleri de mevcuttur. Yatay tabakalı olan tüfitlerin üzerine Neojen kalkerleri gelir.

Etüt sahasında tüfitlerin kalınlığı farklı bölgelerde değişiklik göstermektedir. Doğu kesiminde yaklaşık 40 metre, güney kesiminde ise yaklaşık 150 metre

kalınlığındadır. Bu bilgiler, sahadaki jeolojik yapıların detaylı analizi sonucunda elde edilmiştir.

Bazaltlar, İnönü'nün güneyindeki Kuzudoruğu Tepesi, Eskişehir'in güneybatısındaki Karacaşehir köyü yakınlarındaki Çardakkaya Tepesi ile Eskişehir'in güneydoğusundaki Melemen köyünün kuzeyindeki Çakal Tepe ve Kurt Tepesi gibi yerlerde bulunur. Bu bazaltik oluşumlar, Neojen döneminin son katı olan Pliyosen'e aittir.

Genellikle koyu renkte olan bazaltlar, bazı kısımlarda cüruf benzeri yapıda olup çok kırıklı ve parçalı görünebilirler. Bu kayalar sert bir bünyeye sahiptir ve akma yüzeyleri genellikle yataydır. Bazaltik lavların bu özellikleri, volkanik faaliyet sırasında lavın akışının ve soğumasının karakteristiklerini yansıtır.

### ***Metamorfik kayalar***

#### **Paleozoik;**

#### **Şist;**

Etüt sahasında en yaygın yüzey formasyonları, İnönü Ovası'nın güney kısmının hemen hemen tamamını, Eskişehir Ovası'nın kuzeyini ve güney ucunu kaplayan şistlerdir. Temelini oluşturan bu Paleozoik yaşlı serinin metamorfizma derecesi oldukça yüksektir.

Bu şistlerin büyük bir kısmı mika şistlerinden oluşmaktadır. Ayrıca mavimsi renkte fillitler, klorit şist, glaukofan şist ve kalkşist gibi çeşitli şist türleri de bulunmaktadır. Bu şistler içinde gnays yapı kazanan kısımlar da mevcuttur. Metamorfizma sürecindeki farklı şartlar, bu şistlerin farklı mineral bileşimlerine ve yapısal özelliklere sahip olmasına neden olmuştur.

#### **Mermer;**

Şistler üzerine oturan mermerler, İnönü Ovası'nın güneyinde yaygın bir alanda, Kovalca köyünün üst sırtlarında kuzeyde, Eskişehir'in güneyindeki tepenin etüt sahasının en güney ucunda ve kuzeyde şistler arasında adeseler halinde bulunmaktadır. Bu mermerlerin yaşı MTA tarafından yapılan araştırmada Permo-Karbonifer olarak belirlenmiştir.

Bu mermerler çok sert, bünyeli, kırıklı, çatlaklı ve eklemlidir. Tektonik etkilerden dolayı yoğun kırılma ve parçalanma gösterirler. Tabakalanma belirgin

değildir ve genellikle blok yapı gösterirler. Etüt sahasının batısında Kandilli köyünün güneyinde alınan bir ölçüye göre bu mermerlerin yönü kuzey 75° doğu, 15° güneydoğudur. Sahanın kuzeyindeki şistler arasında bu mermer bloklarına sık sık rastlanmaktadır.

İnönü'nün güneyindeki mermerlerin kalınlığı yaklaşık 350 m iken, Eskişehir'in güneyindeki aynı mermerlerin kalınlığı ise 100 m civarındadır.

### **3.2.2.2. Yeraltı jeolojisi**

Etüt sahasının yeraltı jeolojisi hakkında, açılmış olan sondaj kuyuları, jeolojik etüt ve jeofizik rezistivite etütleri ile bilgi edinilmiştir.

#### **Alüvyon:**

Etüt sahasının orta kısımlarında batıdan doğuya doğru ilerledikçe, İnönü Ovası'nda 20-30 metre kalınlığında alüvyon bulunmaktadır. Bu alüvyonun üst seviyeleri genellikle kil ve siltten oluşurken, derinlere doğru kum ve çakıl miktarı artmaktadır.

Eskişehir Ovası'nda alüvyon kalınlığı, ovanın kıyı kesimlerinde 30-40 m iken, orta kesimlerinde 90 m'ye kadar ulaşmaktadır. Alüvyonun ilk 10 m'si genellikle killi ve az miktarda silt içermektedir. Bu derinlikten sonra ise oldukça kalın kum ve çakıl tabakaları bulunmaktadır. Alüvyonun en alt seviyelerine doğru çakıl miktarı azalırken, kil ve silt miktarı artmaktadır.

#### **Eski alüvyon:**

Eskişehir'in kuzeybatısında geniş bir alanı kaplayan Pliyo-Kuvaterner yaşlı eski alüvyon taraçaları, bu bölgede çok ince olan yeni alüvyonun altında da uzanmaktadır.

#### **Neojen kalker:**

Alüvyonun altında yer yer bu kalkerlere rastlanmaktadır. Kalınlığı 20 ila 100 m arasında değişmektedir. Aşınma nedeniyle ovanın bazı kesimlerinde hiç kalmamıştır.

#### **Neojen flis:**

Yeraltında sadece İnönü Ovası'nda mevcut olduğu tespit edilmiştir. Ovanın kuzeyinde gözlemlenen bu seri güneye doğru alüvyonun altında devam etmekte ve İnönü fayına dayanmaktadır. Azami kalınlığı 300 m olarak belirlenmiştir.

### Neojen konglomera:

Ovanın tabanını teşkil eden ofiyolitik seri ve Paleozoik şist formasyonları üzerinde bu konglomera yer almaktadır. Eskişehir Ovası'nda yapılan araştırma sondajlarının azlığı ve jeofizik rezistivite etüdünde bu konglomeralar ile Neojen kalkerlerinin aynı limitler içinde bulunması nedeniyle kalker-konglomera ayrımı tam olarak yapılamamıştır. Bu konglomeranın azami kalınlığı 200-300 m arasındadır.

Ovanın temelini oluşturan kayalardan ofiyolitik seri, Eskişehir'in batısından İnönü'ye kadar uzanmaktadır. Ofiyolitik seri genellikle 100-200 m derinlikte bulunmakta olup, Çukurhisar köyü civarında daha da derindir.

İnönü Ovası'nda da ofiyolitik seri ile Paleozoik formasyonların birbiriyle olan ilişkisi tespit edilememiştir. İnönü'nün batısındaki saha ile Eskişehir Ovası'nın temelini Paleozoik formasyonlar oluşturmaktadır. Bu formasyonların derinliği 100-300 metre arasında değişmektedir.

Jeofizik etütlerde 350-400 m derinliğe kadar ölçümler yapılmış olmasına rağmen, İnönü Ovası'nın kuzeyinde Çukurhisar köyü civarında, Zincirlikuyu köyü ile Yukarı-Söğütönü köyleri arasında ve Muttalıp köyünün güneydoğusu ile Hasanbey-Çavlım köyleri arasındaki sahalarda temel kayalar bulunamamıştır.

İnönü Ovası'nda jeofizik yöntemlerle tespit edilen doğu-batı doğrultusunda iki gömülü fay, Eskişehir Ovası'nda ise çeşitli yönlü gömülü faylar bulunduğu için yukarıda belirtilen sahalarda çökelmeler fazla olmuştur.

### **3.2.3. Hidroloji**

Yerküre ve çevresinde suyun döngüsünü, dağılımını, fiziksel ve kimyasal özelliklerini, çevre ve canlı yaşamı ile karşılıklı ilişkilerini inceleyen bilim dalına hidroloji denir. Yağış, buharlaşma, yüzey suyu akışı, toprak nemi gibi durumların önemi yanında, bu olayların su dengesine olan etkileri de dikkate alınmalıdır. Örneğin; yeraltı sularının tamamen kullanılması, bitki yaşamını ve türlerini doğrudan etkilemekte ve değişmesine neden olmaktadır (Esendal, 2007).

### **3.2.3.1. Su kaynakları**

#### **Akarsular**

##### İnönü Ovası;

Ovayı batı-doğu istikametinde kat eden Sarısu Deresi, Yirce Dağı eteklerinden doğar, Kandilli köyünde ovaya girer ve Eskişehir-Kütahya yolunun 5. km'sinde Porsuk Çayı'na karışır. Sarısu Deresi üzerinde drenaj sahası dışında kalan DSİ-12-53 Darıdere, DSİ-1-Kandilli, EİE-27 İnönü, DSİ-12-2 Sazova, DSİ-12-7 Ertuğrul Mahallesi akım rasat istasyonları bulunmaktadır.

##### Eskişehir Ovası;

Porsuk Çayı, Eskişehir'in güneybatısında Karacaşehir köyü civarında ovaya girer, Çavlum köyünde etüt sahasını terk eder. Porsuk Çayı üzerindeki akım rasat istasyonları şunlardır: DSİ-12-54 Eşenkara, DSİ-12-21 Porsuk sol ana kanal, DSİ-12-20 Porsuk sağ ana kanal, DSİ-12-59 Benzinlik. Ayrıca Eskişehir içinde taşkın maksadıyla kurulmuş DSİ ve EİE akım rasat istasyonları ile havza çıkışında Porsuk üzerinde Çavlum köyde 2-3 ve 4 numaralı istasyonlar bulunmaktadır.

Havzanın kuzeyinde yer alan Keskin Deresi, Bozdağ eteklerinden başlayarak Muttalip Ovası boyunca akar ve sol ana kanala karışır. Keskin köyünde DSİ-12-88 rasat istasyonu bulunmaktadır.

Havzanın güneyinde Kuyucak köyü civarından doğan Mamuca Deresi, kuzey-güney istikametinde akarak Porsuk Çayı'nın sağ ana kanalına karışır. Mamuca köyünde DSİ-12-14 akım rasat istasyonu bulunmaktadır.

#### **Kaynaklar**

##### Fay kaynakları;

İnönü Ovası'nda, Kandilli ve İnönü arasında uzanan fay hattından çıkan İnönü Büyük Havuz ve İnönü Küçük Havuz kaynakları bulunur. Bu kaynaklar, fay hattı boyunca mermer-şist kantağından ortaya çıkmaktadır. Çimento fabrikası kaynağı ise Çukurhisar'ın 4 km kuzeybatısında yer almakta olup, şistler ile irtibatı olan Jura kalkerlerindeki bir kırık hattından beslenmektedir. Oklubalı ve Sekiören kaynakları da küçük debili olup, kalker çatlaklarından çıkmaktadırlar. Soğukçapınar, Kurbanpınarı ve Girik Deresi kaynakları ise Oklubalı köyü güneyinde bulunmakta olup, serpantinlerdeki eklem sistemlerinden kaynaklanmaktadırlar.

#### Alüvyon kaynakları:

Oklubalı Çayır kaynakları, alüvyonun kumlu ve siltli seviyelerinin killi seviyelerle temas noktasından çıkar. Bu kaynaklar, suyun çıktığı lokasyonda alüvyonun tamamen kil ile kaplı olması nedeniyle, bir yeraltı bariyeri oluşturarak su tablasının yüzeye çıkmasına sebep olur.

Keskin köyünde, Keskin Çayı kenarında alüvyon içinden çıkan kaynak, alüvyonun kumlu seviyelerindeki su tablasının killi seviyelerle kesilmesinden oluşmuştur. Kaynağın çevresi duvarla çevrili ve içinde bir havuz bulunmaktadır.

Satılmış kaynağı alüvyon kaynağıdır ve beslenmesi Sarısu Deresi ile ilişkilidir. Yasak Çiftliği kaynağı da alüvyondan çıkmaktadır ancak beslenmesi kaynağın güneyindeki kalker ve bazaltlardan sağlanmaktadır. Bu bölgede bir vadi boyunca uzanan bazaltlar, Neojen kalkerlerindeki yeraltı suyunu alüvyona boşaltmaktadırlar.

#### Sıcak su kaynakları:

Eskişehir şehir merkezinde alüvyon içinden çıkan sıcak su kaynağı, 220-225 m çapında bir elipsoit alanda dağılır. Bu alanın dışında soğuk su kaynakları bulunmaktadır. Alüvyonların kalınlığı 15-20 m arasında değişir ve içinde 7 m'ye kadar sıcak su bulunabilir. MTA tarafından yapılan 120 m derinliğindeki sondajlarla 25 lt/sn debi elde edilmiştir. Sıcak su kaynağının, muhtemelen 100 m derinlikte serpantin ve mermer-şist kompleksinin kantağından çıktığı düşünülmektedir. Modelleme çalışmalarında, mevcut sıcak su kaynaklarıyla ilgili bazı verilerin yetersiz olması nedeniyle bu kaynaklar simülasyona dahil edilmemiştir.

#### ***Sığ kuyular***

Eskişehir Ovası'ndaki sığ kuyular, Keskin Deresi vadisi boyunca, Yukarı Söğütözü, Aşağı Söğütözü ve Muttalıp köyleri arazilerinde el burguları ile açılmış sondaj kuyularıdır. Bu kuyuların derinlikleri genellikle 6-10 m arasında değişir ve ortalama çapları 0.25 m'dir. Statik su seviyeleri ise 1.33 ila 4.85 m arasında değişmektedir. Bu bölgede toplamda 50 adet sığ sondaj kuyusu bulunmaktadır.

#### ***Sondaj kuyuları***

Eskişehir-İnönü Ovası'nda yeraltı suyunun araştırılması, içme suyu, kullanma suyu ve sanayi suyu ihtiyaçlarını karşılamak amacıyla DSİ tarafından çeşitli yıllarda sondaj kuyuları açılmıştır. Bu kapsamda, 1962-1972 yılları arasında 22 araştırma, 1959-

1973 yılları arasında 14 içme suyu, 1972 yılında 1 sanayi suyu, 1962-1970 yılları arasında 23 drenaj sondaj kuyusu olmak üzere toplamda 60 sondaj kuyusu bulunmaktadır.

Eskişehir Ovası'nda EİEİ tarafından 1955 yılında 2 içme suyu, YSE tarafından 1968 yılında 1 içme suyu, belediye tarafından 1953-1972 yılları arasında 31 içme suyu, İller Bankası tarafından 1965 yılında 1 içme suyu, Sümerbank tarafından 1963 yılında 4 sanayi suyu temini amacıyla sondaj kuyusu açılmıştır.

İnönü Ovası'nda açılan sondaj kuyularının derinlikleri 11-230 m arasında değişmektedir. Bu kuyuların verimleri genellikle 10-24 lt/sn arasındadır.

Eskişehir Ovası'nda ise sondaj kuyularının derinlikleri 11-250 m arasında değişmekte olup, verimleri 10-50 lt/sn arasında değişiklik gösterir.

### **3.2.3.2. Akiferler**

Akiferler, jeolojik birimler içerisinde ekonomik olarak önemli miktarda su depolayabilen ve bu suyu yeterli hızda taşıyarak iletebilen geçirimli özelliklere sahip su taşıyıcı tabakalardır.

#### ***Yeraltı suyu taşıyan formasyonların yayılım, derinlik, kalınlık ve hidrolik özellikleri***

##### **İnönü Ovası:**

Yeraltı suyu bakımından en önemli formasyon alüvyondur. Bu formasyonların kalınlığı genellikle 10-30 m arasında değişir. Sarısu yatağından ova kenarlarına doğru gidildikçe alüvyon kalınlığı azalır. Örneğin, Oklubalı köyünden doğuya doğru uzanan 4 km'lik bir hat boyunca alüvyonun kalınlığı 10-25 m aralığında değişmektedir. Bu alüvyon tabakası genellikle killerden oluşur ve yeraltı suyu içermez.

Yeraltı suyu yönünden ikinci derecede önemli olan formasyon Sarısu eski alüvyonlarıdır. Bu formasyonun sahasal yayılımı; batıdan Satılmış ve Çukurhisar köyleri, kuzeyden Çukurhisar ve Yukarı Söğütönü'nün 1 km kuzeyinden geçen gömülü fay hattı, güneyden de Satılmış, Karagözler ve 17148 No'lu DSİ kuyusuna kadar olan alanla sınırlanmaktadır.

Sarısu eski alüvyonları formasyonunun kalınlıkları genellikle 30-50 metre arasında değişir ve içinde yer yer killi seviyeler bulunur. Formasyonun tabanı genellikle kil ile kaplıdır.

İnönü Ovası'nda esas akiferi teşkil eden alüvyonların ortalama iletkenlik katsayısı 300 m<sup>2</sup>/g'dir. Ancak 5586 No.lu Turgutlar kuyusunda geçilen kalker formasyonunun iletkenlik katsayısı 60 m<sup>2</sup>/g'dir. Ayrıca İnönü Ovası'nın tabanını teşkil eden konglomeraların iletkenlik katsayısı ise 5-70 m<sup>2</sup>/g arasında değişmektedir. Bu değerler, suyun geçirgenliği ve yeraltı suyunun hareket kabiliyeti açısından önemli bir gösterge olarak kullanılır.

#### Eskişehir Ovası;

Yeraltı suyu temin edilen formasyon genellikle alüvyondur ve kalınlığı 5-95 m arasında değişir. En kalın olduğu yer Hasanbey köyünün kuzeyidir. Ovanın batısında, Porsuk ve Sarısu akarsularının birleştiği alanda alüvyon kalınlığı 20 m iken doğusunda Çavlum köyünde 35 m'ye kadar çıkmaktadır. Eskişehir şehir merkezinde ise alüvyonun kalınlığı 15-35 m arasında değişmektedir.

Eskişehir Ovası'nda Pliyosen ve Kuaterner yaşlı terasların iletkenlik katsayısı genellikle 100-360 m<sup>2</sup>/g arasında değişir. Terasların alüvyona yakın kısımlarında iletkenlik katsayısı artış gösterebilir. Örneğin, 5007 No.lu Sağır ve Dilsiz Okulu kuyusunda iletkenlik katsayısı 110 m<sup>2</sup>/g iken, 15774 No'lu Sosyal Sigortalar Hastanesi kuyusunda 220 m<sup>2</sup>/g olarak hesaplanmıştır. Bu terasların depolama katsayısı ise 3x10<sup>-3</sup>tür.

Alüvyonların iletkenlik katsayısı ise genellikle 158-1692 m<sup>2</sup>/g arasında değişir. Sarısu Deresi ile Porsuk Çayı'nın birleştiği alanda ve Porsuk Çayı boyunca açılmış kuyularda ortalama iletkenlik katsayısı yaklaşık 1000 m<sup>2</sup>/g olarak kabul edilebilir.

#### **3.2.3.3. Su tablası, yeraltı suyu seviye değişimleri**

##### ***Yeraltı suyu tablası***

#### İnönü Ovası;

Ovada yeraltı suyunun akışı genellikle batıdan doğuya, yani Sarısu vadisi boyunca gerçekleşmektedir. Sarısu vadisi, İnönü'de bulunan Büyük Havuz kaynağı, Küçük Havuz kaynağı ve İnönü yamaç polozlarından beslenmektedir. Bu nedenle, bu kaynaklar arasında yeraltı suyunun akış yönü Sarısu'ya doğru olmaktadır. Ovada genel olarak yeraltı suyunun akışı da Sarısu'ya doğru gerçekleşmektedir.

#### Eskişehir Ovası;

Ovada yeraltı suyu genellikle batıda Sarısu, Keskin Deresi vadisi ve Pliyosen-Kuaterner yaşlı eski alüvyonlar ile, Sarısu Deresi'nin eski yatağı boyunca ve Porsuk Çayı'ndan beslenmektedir. Ayrıca sağ ve sol ana kanallar ile tali kanallardan da beslenme sağlanmaktadır. Su tablası eğrilerinden, yeraltı suyunun bazı bölgelerde Porsuk Çayı'nı beslediği gözlemlenmiştir.

Havza çıkışında, örneğin Çavlum köyünde, yeraltı suyunun toplam boşalımının Porsuk Çayı'na doğru olduğu belirlenmiştir. Bu durum, yeraltı suyunun hidrolojik döngü içinde Porsuk Çayı'na katkı sağladığını göstermektedir.

#### **3.2.3.4. Yeraltı suyu işletmesine uygun alanlar**

İnönü Ovası'nda I. İşletme sahası, Kandilli'nin 2 km doğusundan başlayıp, 1-1.5 km genişliğindeki dar bir şerit halinde Sarısu boyunca Oklubalı köyüne kadar devam eder. Bu bölgede açılmış sondaj kuyularının debileri ortalama olarak 20 lt/sn civarındadır.

II. İşletme sahası, Oklubalı ve Çukurhisar köyleri arasından başlayıp, Sarısu vadisi boyunca 1 km genişliğinde bir şerit halinde doğuya doğru uzanır ve Sarısu ile Porsuk Nehri'nin birleşme noktasından 1 km batıda sona erer. I. İşletme sahasının özelliklerini taşır.

Eskişehir Ovası işletme sahası ise İnönü Ovası II. İşletme sahasının doğu sınırından başlayıp, güneyde Eskişehir il merkezi, Karacahöyük, Yassıhöyük, Sevinç, Çavlum köylerini, kuzeyde ise Muttalıp köyü ve sol ana kanal boyunca Çavlum'a kadar uzanan bir sahayı kapsar.

Bu bölgelerdeki sondaj kuyularının ortalama debileri 40 lt/sn olarak ölçülmüştür.

### **3.3. Yeraltı Suyu Ve Modelleme Yöntemleri**

#### **3.3.1. Yeraltı suyu ve hidrolojik çevrim**

Yeryüzüne düşen yağışın bir kısmı yüzey akışına geçerek nehirlerle ulaşmakta, bir kısmı toprak tarafından emilmekte, bir kısmı bitkiler tarafından tutulmakta, bir bölümü de yüzeyden aşağı doğru sızma hareketi göstererek mevcut boşluk ve derinliklerde kayaların çatlaklarında, kum, mil ve çakıl gibi malzemelerin aralarındaki boşluklarda depolanmaktadır. Yeraltındaki boşluk ve gözeneklerde tutulan ve çeşitli durumlarda akışa geçebilen sulara yeraltı suları denilmektedir ([http-2](http://2)).

Suyun bulunduğu kaynaktan çeşitli etkenlerle buharlaşması ve atmosferde yayılması, ardından yoğunlaşarak tekrar yeryüzüne dönmesi sürecine hidrolojik çevrim veya su döngüsü denir (http-2).



Şekil 3.3. Hidrolojik çevrim (su döngüsü) (http-2)

Bir bölgede yağış, akış ve buharlaşma miktarları ölçülebilir veya ölçülmüş durumdaysa, yeraltına sızan suların miktarı denklem 3.1’de belirtildiği gibi hesaplanabilir.

$$S = Y - (B + A) \quad (3.1)$$

Denklemde;

- Y: Yağış miktarını,
- B: Buharlaşma miktarını,
- A: Akış miktarını,
- S: Yeraltına sızan suyun miktarını belirtmektedir.

### Yağış:

Yeraltı sularının ana kaynağı yağıştır. Atmosferde serbest halde bulunan su buharının sıvı veya katı formda yeryüzüne düşmesi olayına yağış denir. Yağışın ölçü birimi milimetre (mm) olup, belirli bir zamanda belirli bir birim alana düşen suyun yüksekliğini ifade eder. Bazı durumlarda yağış,  $\text{kg/m}^2$  birimiyle de tanımlanabilir (Erguvanlı ve Yüzer, 1973).

### Buharlaşma:

Herhangi bir sıcaklıkta yüzeyde bulunan sıvı ya da katı bir cismin gaz haline geçmesi olayına buharlaşma denir. Su kaybı olarak bilinen buharlaşma olayı, yeraltı suları jeolojisinde bitkilerin terlemesiyle birlikte incelenir. Terleme, canlılardaki suyun buharlaşması sonucunda gaz haline geçmesidir.

Serbest su yüzeyindeki buharlaşma olayı, sıcaklık, yükseklik, hava akımı ile doğru orantılıdır ve havanın nem oranı, su derinliği, atmosfer basıncı ve eriyik tuz miktarı ile ters orantılı olarak değişir. Buharlaşma miktarı, buharlaşma tavaşı veya özel olarak hazırlanmış su dolu tank ile ölçülebilir. Buharlaşma miktarı genellikle mm/gün olarak ifade edilir (Erguvanlı ve Yüzer, 1973).

### Akış:

Gerçekleşen yağış olayında buharlaşma ve sızma olmadan suyun, topografik özelliklere bağlı olarak çukurlara, göllere, nehirlere, denizlere ve okyanuslara doğru hareket etmesi olayına drenaj denir. Yüzey akışı ile hareket eden sular, diğer kollarla birleşerek çeşitli büyüklüklerde akarsuları oluşturur. Akarsulardaki su miktarı debi olarak adlandırılır. Debi ölçümü genellikle  $\text{m}^3/\text{s}$  birimiyle yapılır ve akarsuların çeşitli bölgelerine yerleştirilen ölçüm eşelleriyle belirlenir. Akarsuların günlük, aylık, yıllık ve ortalama debileri bulunur. Akarsuların rejimi hakkında bilgi edinmek için anahtar eğriler kullanılır.

Akarsular, yeraltı sularını beslediği gibi bazı durumlarda yeraltı suları da akarsuları besleyebilir (Erguvanlı ve Yüzer, 1973).

### Sızma:

Yağışın bir kısmı akışa geçerek yüzey suyunu, bir kısmı da sızarak yeraltındaki çatlaklara ve gözeneklere doğru yeraltı suyunu oluşturmaktadır. Belirli bir alanda yeraltından temin edilmesi düşünülen veya edilen suyun miktarı sızma olayı ile

ilişkilidir. Sızma, yerin altına sızan suyun ‘mm’ cinsinden ifadesidir. Çoğunlukla sızma hesaplamalarında sızma katsayısı kullanılmaktadır.

### **3.3.2. Akifer kavramı ve yeraltı suyunun hareketi**

Yeraltı suyunun yerin altına doğru hareket etmesi için gereken enerjiyi yer çekimi sağlamaktadır. Yeraltı suları, yeryüzünde akışa geçen suların aksine çok daha yavaş hareket ederler. Bu nedenle yeraltı sularının hızı genellikle günlük veya yıllık periyotlarda aldığı mesafe olarak ‘m/yıl’ şeklinde ifade edilir. Yeraltı sularının yavaş hareket etmesi nedeniyle akışları düzgündür (http-3).

Yeraltı sularını depolayabilen ve yeterince hızlı iletebilen geçirgen özelliklere sahip jeolojik birimlere akifer denir. Akiferler, yeraltına sızan suları çekebilme ve tutabilme kapasitesine sahip olmak için yüksek porozite (gözeneklilik) ve permeabilite (geçirgenlik) özelliklerine sahip olmalıdır. Akiferlerde bulunan suyun kullanılabilirliği, akiferin türü, kalınlığı ve doygunluk düzeyine bağlıdır. Akiferler genellikle serbest ve basınçlı olmak üzere iki ana gruba ayrılır (Erguvanlı ve Yüzer, 1973).

#### **Serbest akifer;**

Üst katmanları geçirimli (kireçtaşı, kum, silt ve çakıl) olan yapılarda, altta bulunan geçirimsiz tabakaya doğru su sızmaları ile oluşan akiferlere serbest akifer denilmektedir. Serbest akiferlerin en üst kısmında yağış suyunun içeriye doğru sızmasını engelleyen geçirimsiz bir tabaka yoktur ve atmosfer ile temas halindedir. Alt kısmında ise yarı geçirgen veya geçirimsiz bir tabaka bulunmaktadır. Bu tür akiferlerin içindeki yeraltı suyunun üst kotuna statik su seviyesi adı verilmektedir. Bir bölgede, statik su seviyesi ölçülerek o bölgenin yeraltı su tablası hakkında bilgi sahibi olunmakta ve haritaları oluşturulabilmektedir. Bu haritalar ile yeraltı suyunun dağılışı, akışı görülebilir ve hangi bölgelerden su alınabileceği belirlenebilir (Erguvanlı ve Yüzer, 1973).

#### **Basınçlı akifer;**

İki geçirimsiz tabaka arasında atmosfer basıncından daha yüksek bir basınç altında bulunan yeraltı sularını oluşturan yapıya basınçlı akifer veya artezyen denir. İki geçirimsiz tabaka arasında bulunmaları nedeniyle yeraltında bir basınç oluşur. Yüzeydeki geçirimsiz tabakanın üzerine kuyu açılarak akifere ulaşılması durumunda

yeraltı suyu yüzeye doğru fışkırarak çıkar. Bu tür kuyulara artezyen kuyuları adı verilir (Erguvanlı ve Yüzer, 1973).

### **3.3.2.1. Yeraltı suyunun hareketi**

Yeraltı suları, hidrolojik çevrim içinde belirli bir zaman diliminde beslenme ve kayıplar yaşadığı için denge durumu mevcut değildir. Eğer beslenme ve kayıp olmasaydı, yeraltı suyunun sabit bir su seviyesine sahip olması beklenirdi. Ancak yağış türü, zemin tipleri, topografik koşullar, drenaj şartları, deniz, göl, nehir ve kuyular gibi etkenler nedeniyle farklı bölgelerde yeraltı su seviyelerinde azalma veya artışlar gözlemlenmektedir.

Boşluklu (poröz) veya çatlaklı ortamlarda hareket edebilen yeraltı suları, yerçekimi kuvveti etkisiyle bu ortamlarda hareket edebilirler.

1856 yılında Henry Darcy, silindirik kaplar içinde sıkıştırılmış kum tabakalarında gerçekleştirdiği deneylerle suyun akış hızının hidrolik eğim (i) ile doğru orantılı, akış yolu uzunluğu ile ters orantılı olduğunu deneysel olarak belirlemiştir. Darcy yasası, akiferden su akışının analiz edilmesinde kullanılan bir prensiptir. Bu yasa, kütlenin korunumu ilkesiyle yeraltı suyu akışını basitleştirmektedir.

Hidrolik eğim (i), porozite, permeabilite ve transmisibilite gibi faktörler yeraltı suyunun hareketi üzerinde temel etkiye sahiptir (Erguvanlı ve Yüzer, 1973).

Darcy yasasına göre;

$$q = -k \cdot \frac{dh}{dl} \quad (3.2)$$

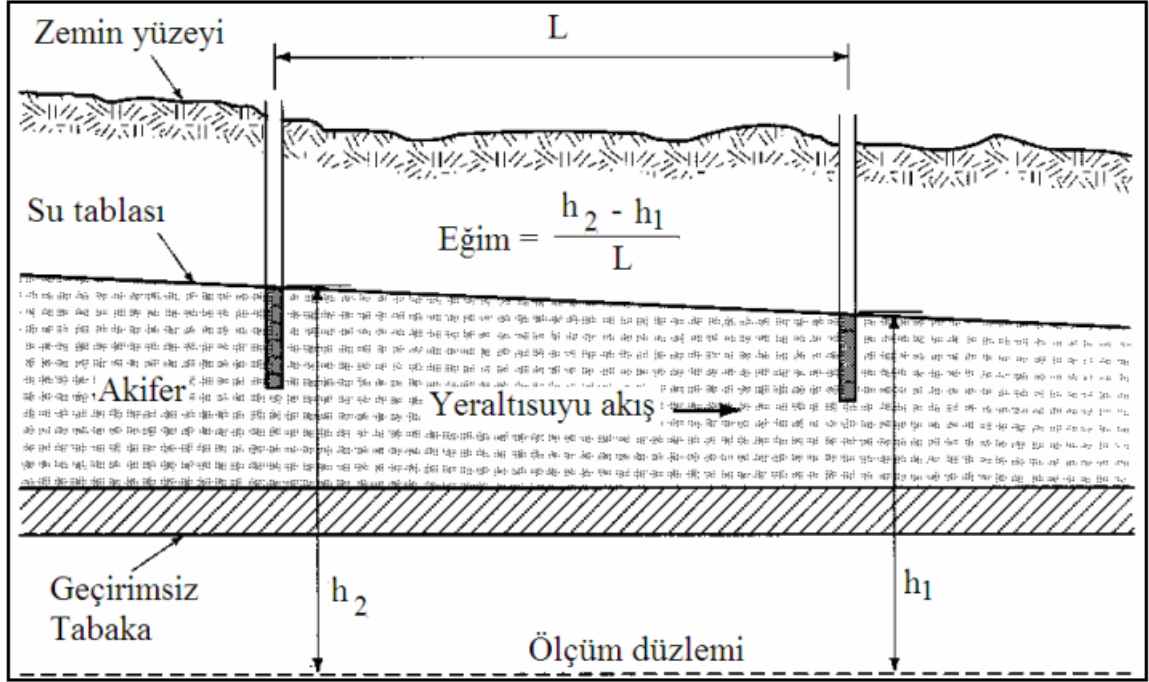
Bağıntısı ile yeraltı suyunun akış hızı hesaplanabilmektedir.

Bağıntıda;

- q: Birim alan başına düşen akış hızı (m/s)
- k: Permeabilite katsayısı veya hidrolik iletkenlik (m/s)
- $\frac{dh}{dl}$ : Hidrolik eğim, yani akış yönündeki hidrolik basın değişimi (boyutsuz)

### Hidrolik eğim (i):

Hidrolik eğim, yeraltında suyun giriş ve çıkış noktaları arasındaki yükseklik farkından oluşan eğimdir (Şekil 3.4). Yüksek su seviyesi ile düşük su seviyesi arasındaki farkın, kesit alanının uzunluğuna oranıdır (Hökelekli, 2010).



Şekil 3.4. Hidrolik eğim (Hökelekli, 2010).

- $h_1$ : Suyun giriş noktasındaki yüksekliği (m),
- $h_2$ : Suyun çıkış noktasındaki yüksekliği (m),
- $L$ : Giriş ve çıkış noktaları arasındaki uzunluk (m),
- $i$ : Hidrolik eğimi (boyutsuz) ifade etmektedir.

### Porozite (Gözeneklilik):

Kütleler içerisinde bulunan boşluk ve çatlaklar porozite olarak adlandırılmaktadır. Yeraltı suyunun hareketinde, miktarında ve elde edilmesinde porozitenin önemli bir rolü bulunmaktadır. Suyun yeraltına doğru sızması ve yeraltındaki hareketi, toprağın ya da kayaların boşluklu ve/veya gözenekli yapıya sahip olmasından kaynaklanmaktadır. Boşlukların ve çatlakların içerisinde sular toplanmaktadır (Hökelekli, 2010).

#### Permeabilite (Geçirimsilik):

Gözenekli bir yapının içinden suyun geçişine izin verme yeteneğine permeabilite denilmektedir. Yapıda suyun akışına yol açabilecek çatlaklar ve boşluklar mevcutsa, geçirgenlik özelliğine sahiptir. Kütlelerin suyu geçirebilme yeteneğine ise kütlenin permeabilitesi denilmektedir. Darcy yasası temel alınarak zemin numunelerinin permeabilite katsayıları hesaplanmaktadır. Bu nedenle Darcy yasasının iyi bir şekilde bilinmesi, yeraltındaki suyun hareketinin anlaşılması açısından önemli bir temel oluşturmaktadır.

$$k = \frac{Q \cdot L}{A \cdot \Delta H \cdot t} \quad (3.3)$$

Permeabilite katsayısı, Denklem 3.3 ile hesaplanmaktadır. Bağlıda;

- $k$ : Permeabilite katsayısı (m/s)
- $Q$ : Suyun geçiş hızı (m<sup>3</sup>/s)
- $L$ : Malzeme içindeki geçişin uzunluğu (m)
- $A$ : Geçiş alanının kesiti (m<sup>2</sup>)
- $\Delta H$ : Hidrolik gradyan (genellikle suyun yükseklik farkı/uzunluk farkı olarak hesaplanır.)
- $t$ : Geçiş süresi (s)

Zemin yapısının önemli karakteristik özelliklerinden biri olan permeabilite katsayısı, arazide ve laboratuvarında gerçekleştirilen çeşitli deneylerle belirlenmektedir (Hökelekli, 2010).

#### Transmisibilite (iletimsilik):

Akiferin su iletim kapasitesi transmisibilite olarak adlandırılır ve 'T' harfi ile gösterilir. Transmisibilite, denklem 3.4'teki bağıntı ile hesaplanmaktadır.

$$T = K \cdot b \quad (3.4)$$

Bağıntıda;

- $T$ : Transmisibilite (m<sup>2</sup>/s),
- $K$ : Akiferin geçirgenlik katsayısı (m/s),
- $b$ : Akiferin ortalama kalınlığını (m) ifade etmektedir.

Transmisibilite değeri, akiferin türüne bağlı olarak değişir. Bir akiferin transmisibilitesi  $10^{-1}$  ile  $10^2$  m<sup>2</sup>/s arasında değişir. T değeri  $10^{-1}$  m<sup>2</sup>/s değerine eşit veya daha küçükse, akiferin yalnızca küçük bir alana su sağlayabileceği düşünülebilir. T değeri  $10$  m<sup>2</sup>/s değerine eşit veya daha büyükse, bu akiferin endüstriyel kullanım, sulama ve şehir suyu temini için uygun olabileceği öngörülebilir (Hökelekli, 2010).

### **3.3.3. Yeraltı suyu akış modellemesi**

Yeraltı suyu akış modellemesi, yeraltı suyu içeren jeolojik ortamın, zamana ve dış etkilere bağlı olarak göstereceği tepkilerin tahmin edilmesine yardımcı simülasyonlardır. Yeraltı suyu modellenerek, yeraltı suyuna ait sayısal ve karakteristik özellikler modelleme sonucunda elde edilebilmektedir. Yeraltı su kaynaklarının ve çevrenin korunması, madencilik, yeraltı suyu kullanımının sürdürülebilirliğinin belirlenmesi gibi durumlarda modelleme çalışmaları araştırmacılar ve karar vericiler tarafından kullanılmaktadır.

#### **3.3.3.1. Yeraltı suyu akış modeli (MODFLOW-2005)**

MODFLOW, yeraltı suyu akışını üç boyutlu olarak simüle etmek amacıyla USGS tarafından geliştirilmiş bir sonlu fark akış modelidir. MODFLOW-2005, bu modelin yeni bir versiyonudur ve ilk sürümü 1984 yılında USGS tarafından yayınlanmıştır. Program, Fortran 90 dilinde yazılmış olup birçok paket ve modülü içermektedir (McDonald ve Harbaugh, 1988; Harbaugh ve McDonald, 1996; Harbaugh vd., 2000). MODFLOW için birçok ticari ve ticari olmayan grafik kullanıcı arayüzü aktif olarak geliştirilmiştir.

MODFLOW-2005, yeraltı suyunun modellenmesinde karmaşık problemleri başarıyla ele alabilen bir yazılımdır. Farklı hidrojeolojik yapıları üç boyutlu olarak modelleyebilme yeteneğine sahiptir. Bu özellik, araştırmacıların karmaşık ve çok sayıda parametre içeren alanları modellemesine olanak tanır. Akarsuyun beslenmesi, deşarjı, pompaj, drenaj, buharlaşma ve terleme gibi süreçler, program kullanılarak sisteme giren ve çıkan akımlar olarak modellenebilir (Harbaugh, 2005). Araştırmacılar, yeraltı su seviyesinin değişimi, akış yönleri ve hidrolik yük dağılımı gibi sonuçları model çıktısı olarak gözlemleyebilir ve inceleyebilir.

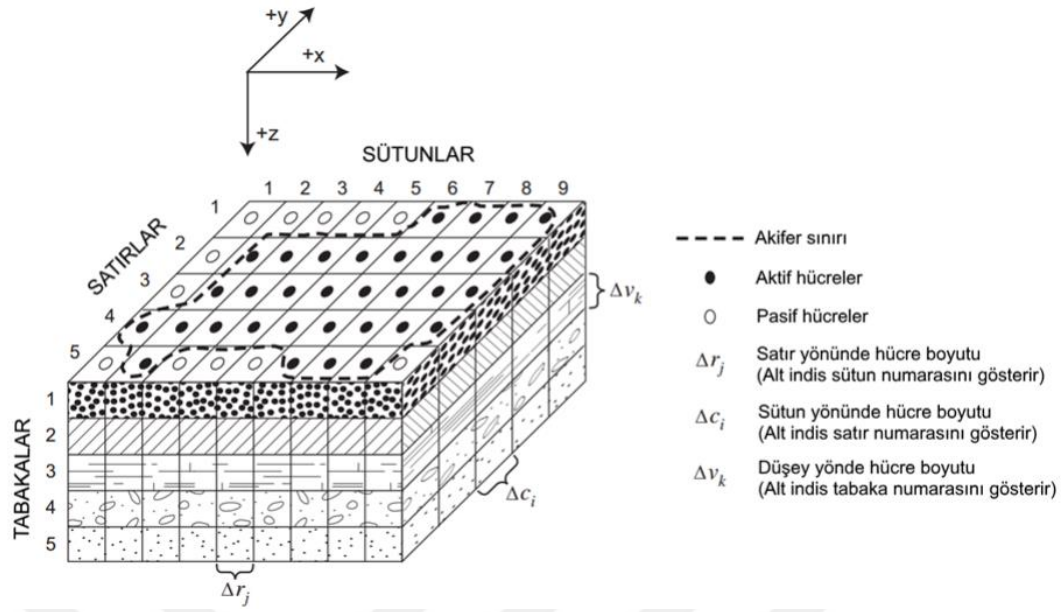
MODFLOW-2005, zamana bağılı olarak üç boyutlu yeraltı suyu akış denkleminin sayısal çözümünü aşağıda gösterilen bağıntıyla (denklem 3.5) hesaplamaktadır.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) + W = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (3.5)$$

- $K_{xx}$ ,  $K_{yy}$  ve  $K_{zz}$ : x, y, z eksenleri boyunca hidrolik iletkenlikleri (L/T),
- h: yeraltı su seviyesi (L),
- W: su girişinde veya çıkışında birim hacimdeki yer değiştirmeyi (1/T),
- $S_s$ : özgül depolama katsayısını (1/L),
- t: zamanı (T) ifade etmektedir.

MODFLOW-2005, yeraltındaki su seviyesini ve akışları hesaplamak için kullanılan ve hücrelerden oluşan bir sonlu fark yöntemini kullanarak akiferi ayrıklaştırmaktadır. Sonlu fark hücre ağı, hidrolik iletkenlik eksenleriyle aynı doğrultuda olmalıdır. Sonlu fark hücreleri, i (satır indeksi), j (sütun indeksi) ve k (tabaka indeksi) harfleriyle gösterilen indislerle numaralandırılmaktadır (Harbaugh, 2005).

Yatay ayrıklaştırma, satır ve sütunlardan oluşan dikdörtgen biçimli hücre ağı kullanılarak gerçekleştirilir. Satırlar, x eksenine paralel olarak ve sütunlar y eksenine paralel olarak hizalanır. Satır indeksi i, y yönünde azalırken sütun indeksi j, x yönünde artar. Düşey ayrıklaştırma ise tabakalarla tanımlanır. Hücre tabakaları, yatay düzleme paralel olarak hizalanır. Tabaka indeksi k, z yönünde artar. Bu nedenle modelin en üst tabakası  $k=1$ 'e denk gelir. Her bir tabakadaki sol üst hücre, birinci satıra ( $i=1$ ) ve birinci sütuna ( $j=1$ ) karşılık gelir. Tabakalar, sabit veya değişken kalınlıkta olabilir (Harbaugh, 2005).

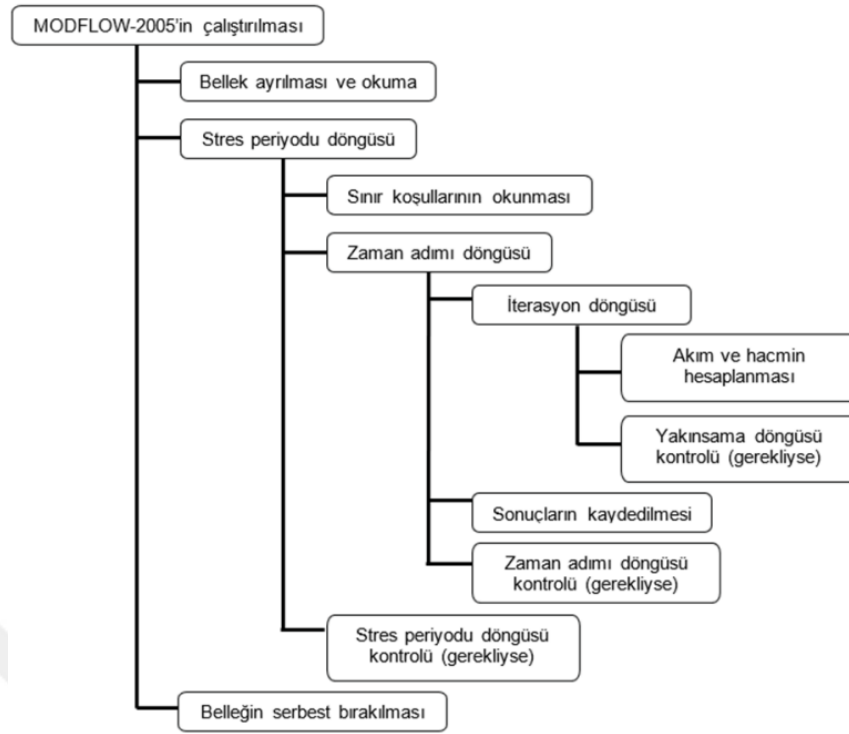


Şekil 3.5. Ayrılaştırılmış kavramsal bir akifer sistemi (Kavşut, 2019).

Modelin sınır koşullarını simüle etmek için kullanılan hücreler, belirli hidrolik yük (specified head) hücreleri ve akış olmayan (no flow) hücreler olarak ikiye ayrılır. Veri girişinde, hidrolik yüklerin değerleri belirtilir. Bu değerler, zaman ve stres periyotları boyunca değişmedikçe sabit kalır. Akış olmayan hücreler, modelin sınırlarını oluşturan ve içeri veya dışarı akışa izin vermeyen hücrelerdir. Bu hücrelerde yeraltı suyu hesaplanmaz. Diğer hücreler ise değişken hidrolik yük hücreleridir. Bu hücrelerde hidrolik yükler hesaplanır ve zamanla değişebilir (Harbaugh, 2005).

### 3.3.3.2. Yeraltı suyu modeli (MODFLOW-2005) hesaplama adımları

Yeraltı suyunun simülasyonu, değişmeyen girdi veri setlerinde yer alan verilerin model tarafından okunmasıyla başlar. Simülasyon için gereken hücre sayısı, stres periyodu ve çözüm metodu tarafından belirlenmelidir. Ardından bilgisayarda bellek ayrılması işlemi gerçekleştirilir. Bellek ayrılması tamamlandıktan sonra, her bir sonlu fark hücresi için sonlu fark hücre ağı, stres periyotları ve zaman adımları ile başlangıç değerlerini (başlangıçtaki yeraltı su tablası değeri, hidrolik özellikler vb.) okur (Şekil 3.6).



Şekil 3.6. Yeraltı suyu akış modeli (MODFLOW-2005) hesaplama adımları (Kavşut, 2019).

### 3.3.3.3. Modelleme yöntemi

MODFLOW kullanılarak bir yeraltı suyu akışının modellenmesi için günümüzde birçok ücretsiz veya ticari amaçla kullanılabilen arayüz bulunmaktadır. Bu arayüzlerin kaynağı ve yöntemi genellikle aynıdır. Örneğin, USGS tarafından geliştirilen Visual MODFLOW ve özel bir ticari kuruluş olan Aquaveo tarafından geliştirilen GMS yazılımı bu arayüzlerin örneklerindendir.

Çalışmada, GMS yazılımı kullanılmıştır. GMS, yeraltı simülasyonlarını üç boyutlu ortamda gerçekleştirmek için gelişmiş bir yazılım sistemidir. Modeller, birçok farklı kaynaktan veri gerektirir. Bu nedenle GMS, çok sayıda dosya türü ile kolayca çalışabilecek şekilde geliştirilmiştir. Bu dosya türleri şunlardır:

- Coğrafi referans ve projeksiyon desteği içeren taramalı görüntüler
- Topografik haritalar ve yükseklik verileri
- Stratigrafi ve jeofizik verileri içeren sondaj verileri
- Yerel MODFLOW dosyaları
- Visual MODFLOW, Groundwater Vistas ve PM Win'den MODFLOW dosyaları
- ArcGIS coğrafi veri tabanları ve şekil dosyaları
- .dwg, .dgn ve .dxf formatlarını içeren CAD dosyaları

GMS’de MODFLOW simülasyonu oluşturmak için iki yaklaşım kullanılmaktadır:

- 1) Hücresel yaklaşım (Grid approach)
- 2) Kavramsal model yaklaşımı (Conceptual model approach)

Hücresel yaklaşım, kaynakları ve diğer model parametrelerini doğrudan üç boyutlu hücre bazında uygulamayı içerir. Kavramsal model yaklaşımı ise modellenen alanın kavramsal bir modelini geliştirmek için harita modülündeki CBS araçlarının kullanılmasını içerir. Kavramsal modeldeki veriler daha sonra hücelere kopyalanır. Çoğu durumda kavramsal model yaklaşımı, hücresel yaklaşımdan daha verimlidir. Ancak hücresel yaklaşım, hücre bazında düzenlemenin gerektiği basit problemler için kullanışlıdır (http-4).

#### ***Kavramsal model yaklaşımı***

GMS’de kavramsal model terimi iki farklı şekilde kullanılmaktadır. Genel anlamda, kavramsal bir model; model alanını, sınır koşullarını ve malzeme bölgelerini içeren modellenecek alanın basitleştirilmiş bir temsidir. Kavramsal model nesnesi, çeşitli bileşenleri içerebilir.

GMS’in harita modülünde yer alan kavramsal model nesnesi, noktalar, çizgiler ve çokgenler gibi özellik nesneleri kullanılarak tanımlanabilir. Kavramsal model, sayısal tablodan bağımsız olarak oluşturulur. Kavramsal model nesnesi tanımlandıktan sonra, kavramsal modele uyacak şekilde otomatik olarak bir hücre oluşturulabilir. Sınır koşulları ve model parametreleri hesaplanır ve uygun hücelere atanır. MODFLOW verileri, kavramsal modelden hücresel modele dönüştürülür. Bu yaklaşım, modelleme sürecinin veri girişini büyük ölçüde otomatikleştirir ve geleneksel MODFLOW modellemesiyle ilişkilendirilen karmaşık hücre veri düzenleme ihtiyacını azaltır veya ortadan kaldırır. Kavramsal model oluşturulduktan ve hücreye dönüştürüldükten sonra, verileri düzenlemek veya gözden geçirmek için MODFLOW menüsündeki paket diyalogları ve etkileşimli düzenleme araçları kullanılabilir.

Eksiksiz bir kavramsal model, çeşitli bileşenlerden oluşur. Tek bir bileşen genellikle kuyular, nehirler ve göller gibi kaynakları tanımlamak için kullanılır. Beslenme bölgelerini tanımlamak için başka bir bileşen veya aynı bileşen kullanılabilir. Her katmandaki hidrolik iletkenlik bölgelerini tanımlamak için ise diğer bileşenler

kullanılabilir. Bu niteliklerin tümü aynı bileşende mevcut olabileceği gibi, herhangi bir sayıda bileşen de kullanılabilir.

Özellik verilerine ek olarak, kavramsal bir model katman yüksekliklerini tanımlamak için dağılım noktaları, kuyular ve katı cisimler gibi başka verileri içerebilir. GMS’de katman yükseklik verilerinin işlenmesi için özel bir araç seti bulunmaktadır. (http-4).

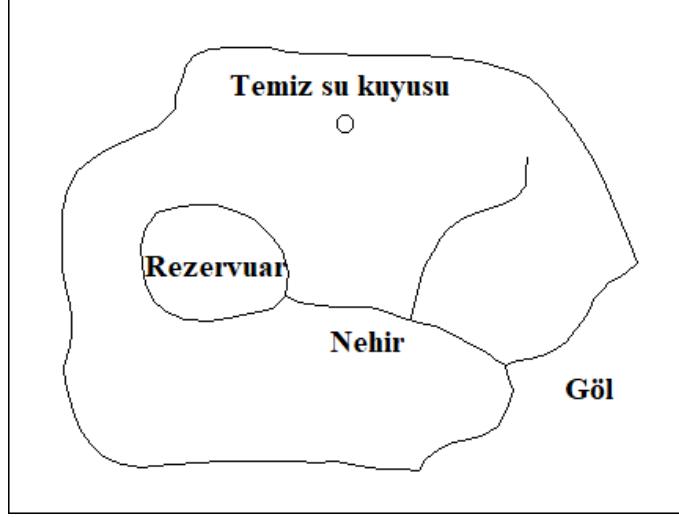
#### Kavramsal model oluşturma safhaları:

- 1) Harita modülünde bir MODFLOW kavramsal modeli oluşturulur.
- 2) Modelin kurulma safhasında hangi bileşenlerin gerekli olduğuna ve bu bileşenlerde hangi özelliklerin gerektiğine karar verilir. Genellikle her biri farklı bir amaca sahip üç bileşenin kullanılması tipiktir. Bir bileşen kuyular, belirlenmiş yük sınırları gibi kaynaklar için kullanılır. Başka bir bileşen beslenme bölgesi için kullanılır, diğeri ise hidrolik iletkenlik için kullanılır. Bununla birlikte, bileşenlerin bu şekilde kullanılması gerekli değildir ve bir bileşen ile ilişkili öznitelikler kullanıcı tarafından tanımlanır; bu nedenle, özniteliklerin herhangi bir kombinasyonu ile bir bileşeni tanımlamak mümkündür. Dolayısıyla, eğer besleme bölgeleri hidrolik iletkenlik bölgeleriyle aynı olsaydı, her ikisi için de tek bir bileşen alanı kullanmak mümkün olurdu.
- 3) Bir arka plan görüntüsü yazılıma aktarılarak kaynaklar oluşturulur. Taranmış bir haritayı veya çalışma alanının havadan çekilmiş bir fotoğrafını temsil eden bir dijital görüntü, görüntü araçları kullanılarak GMS’de içe aktarılabilir ve arka planda görüntülenebilir. Görüntü elde edildikten sonra, arka plan görüntüsünün üzerine model sınırını, nehirleri, gölleri, akış engellerini ve belirtilen su üstü sınırlarını tanımlayan özellik nesneleri oluşturulabilir.
- 4) Beslenme bölgeleri ve buharlaşma-terleme bölgeleri gibi alansal özellikler oluşturulur.
- 5) Hidrolik iletkenlik bölgeleri gibi katman özellikleri oluşturulur.
- 6) Sayısal hücrelerin ana hatlarını kavramsal modele yerleştirmek için hücre çerçevesi (grid frame) kullanılır. Çerçeve kavramsal modeli çevreleyecek şekilde yerleştirilmiştir. Modelin ana eksenini açılı ise çerçeve gerekirse döndürülebilir.

- 7) Hücrelerin konumu, hücre çerçevesi tarafından kontrol edilir ve hücrenin yoğunluğu kullanıcı tarafından belirlenen noktalar (genellikle kuyular) etrafında otomatik olarak ayarlanır.
- 8) Kapsamdaki hücreleri etkinleştirme (activate cells in coverage) komutu kullanılarak etkin bölge tanımlanır. Bu, kavramsal modelin sınırları içindeki tüm hücreleri otomatik olarak etkinleştirerek sınırın dışındaki tüm hücreleri devre dışı bırakmayı sağlar.
- 9) MODFLOW menüsünde yeni simülasyon (new simulation) komutu seçilerek MODFLOW verileri başlatılır. Modellemenin kararlı durum (steady state) veya geçici hal (transient) durumundan hangisi planlanmışsa modelleme şekli belirlenir ve gerekiyorsa stres periyodu dönemleri tanımlanır.
- 10) Sınır koşullarını, stres periyodunu ve malzeme özelliklerini uygun hücrelere otomatik olarak atamak için harita menüsündeki MODFLOW komutu seçilir.
- 11) Katman yüksekliklerini tanımlamak için özel interpolasyon araçları kullanılır.

Kavramsal bir model oluşturmak için yukarıda belirtilen her adım genellikle zahmetli ve uzun zaman alan bir süreçtir. Ancak, yukarıdaki adımların 6. adımından sonra yapılan her işlem kaldırılabilir ve model üzerinde istenilen değişiklikler yapıldıktan sonra tekrar bu aşamadan devam edilebilir. Kavramsal model yaklaşımını daha iyi açıklayabilmek için aşağıda bir örnek uygulamaya yer verilmiştir.

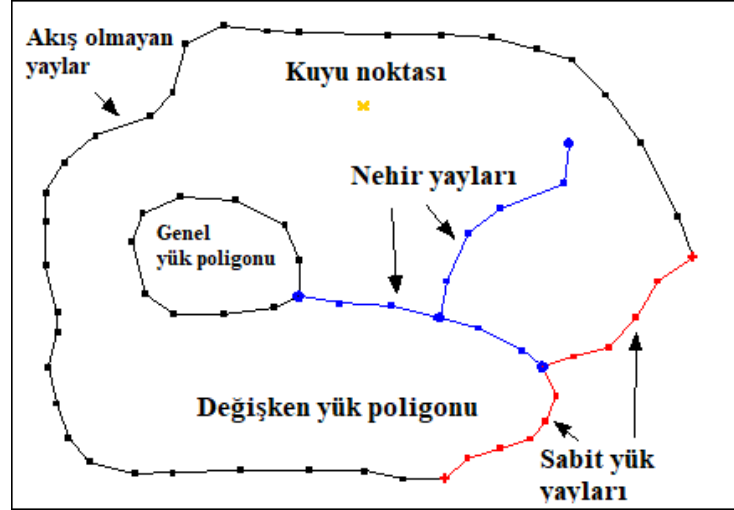
Modelleme çalışmasında kullanılan bölge haritasına dair bir görüntü Şekil 3.7’de gösterilmiştir. Bu altlık haritalar, görüntüler ve fotoğraflar, CBS verileri dahil olmak üzere kaynakların bir arada bulunabilen bilgilerini temsil etmektedir. Bu bilgiler, hidrolojik yer ve bu yerin hidrolojik özelliklerini de içerebilmektedir.



**Şekil 3.7.** Modelleme çalışması için temsili bir harita (<http-5>).

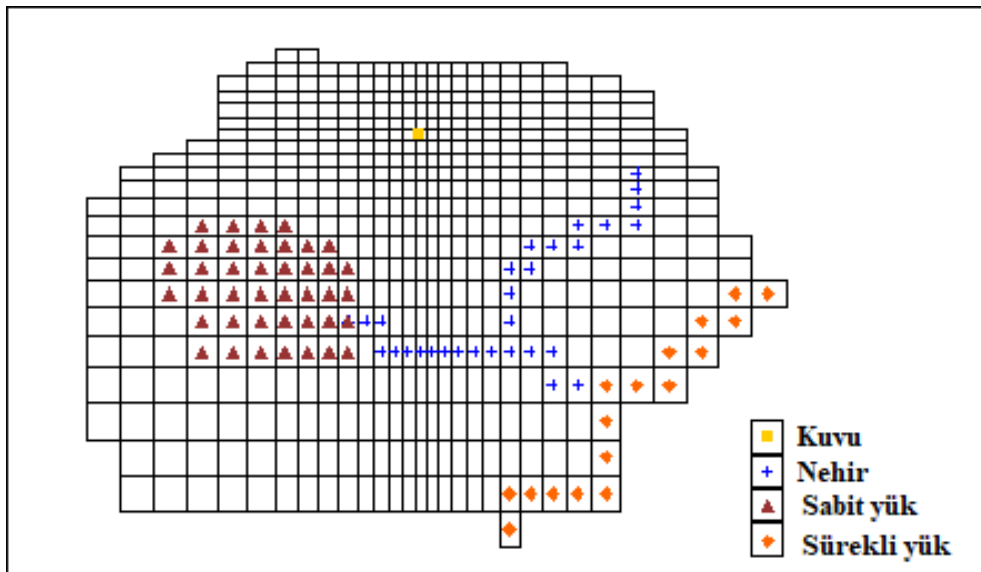
Şekil 3.7’de gösterilen haritada modelleme çalışması içerisinde yer alacak olan su rezervuarı, nehir, kuyu ve göl görülmektedir. Bu harita, kaynakların bir kombinasyonundan elde edilebilecek bilgileri temsil etmektedir. Bu bilgi, hidrolojik özelliklerin konumunun yanı sıra sahanın hidrolojik özelliklerini de içerebilmektedir. Ancak bu bilgi henüz sayısal bir model için yararlı olacak bir biçimde düzenlenmemiştir.

Bu alanın kavramsal modelini oluşturmanın ilk adımı, alandaki hidrolojik özellikleri temsil eden noktalar, çizgiler ve alanlar (çokgenler) oluşturmaktır. Bu noktalara, çizgilere ve alanlara temsil ettikleri özelliğe karşılık gelen tipler atanır. Öznitelik türüne bağlı olarak bu özellik nesnelere yük, konsantrasyon ve iletkenlik gibi parametreler atanır. Ortaya çıkan model Şekil 3.8’de gösterilmektedir. Beslenme bölgeleri ve benzeri değerler diğer bileşenlerde tanımlanacaktır.



Şekil 3.8. Modelleme çalışması örneği (http-5).

Son adım, kavramsal modelde saklanan bilgiyi almak ve sayısal bir modele dönüştürmektir. GMS hem hücre geometrisinin oluşturulmasını hem de hücrenin sınır koşulları ve malzeme parametrelerinin atanmasını otomatikleştirir. Hücrenin yüksek yoğunluğa sahip olması gereken alanlarını belirlemek için hassaslaştırma noktaları kullanılabilir. Modelin alanını temsil eden çokgenleri belirleyerek, bu alanın dışında kalan tüm hücreleri otomatik olarak devre dışı bırakmak mümkündür. Belirtilen özellik nesneleri tarafından kesişen her bir hücreye sınır koşulları uygulanabilir. Hangi hücrelere sınır koşullarının atanacağını belirlemenin yanı sıra, GMS aynı zamanda her bir stres periyodunda geçici bir simülasyona atanacak uygun değerleri de hesaplar. Ortaya çıkan sayısal model Şekil 3.9'da gösterilmektedir.



Şekil 3.9. Oluşturulan kavramsal model (http-5).

Kavramsal model yaklaşımının başlıca faydaları aşağıdaki gibidir:

- 1) Model, hücre çözünürlüğünden bağımsız olarak tanımlanabilir.
- 2) Hücre içindeki nehrin erişim uzunluğuna bağlı olarak bir nehir hücresine uygun iletkenliği atamak için fazla zaman harcamasına gerek yoktur; bu hesaplama sistem tarafından otomatik olarak gerçekleştirilir.
- 3) Kuyular için pompalama oranları gibi geçici parametreler, modelin ayrıklaştırılmasından bağımsız olarak atanabilir. Geçici parametreler, stres periyotlarına karşı zamanın bir eğrisi olarak girilir.
- 4) Kavramsal model, sayısal modele dönüştürüldüğünde gerilimlerin geçici değerleri otomatik olarak uygun gerilim periyotlarına atanır. Kavramsal model, sayısal modelin mekânsal ve zamansal ayrıklaştırılmasından bağımsız olarak tanımlandığından, kavramsal model hızlı ve kolay bir şekilde değiştirilebilir ve saniyeler içinde yeni bir sayısal model oluşturulabilir. Bu durum, normalde bir çözümü değerlendirmek için gereken zamanı alanında çok sayıda alternatif kavramsal modelin değerlendirilmesine olanak sağlar ve doğru, verimli bir modelleme süreciyle sonuçlanır.

Kavramsal modelin bir diğer avantajı, sınır koşullarının hücelere uygulanması yönteminin, MODFLOW ve MT3DMS gibi sonlu fark modellerinde var olan kararsızlığın bir kısmını azaltmasıdır. Yükseklikler için ayrı ayrı değerler girmek, her hücre için değerleri ayrı ayrı tanımlamak zorlu olabilir. Ayrıca, nehrin her bir hücrede geçtiği noktada doğru yüksekliği belirlemek de zor olabilir. Burada cazip olan, küçük hücre gruplarını seçmek ve aynı değerleri grup içindeki tüm hücelere uygulamaktır. Bu yaklaşım, sayısal çözücünün yakınsamasını yavaşlatabilen ve hatta engelleyebilen aşırı bir merdiven basamağı etkisiyle sonuçlanabilir. Nehir gibi doğrusal bir sınır koşulunun boyunca değerleri enterpole etmek için GMS kullanılarak, hücreden hücreye ani değişimlerin olmayacağı kabul edilir ve böylece merdiven basamağı etkisi en aza indirilir. Aynı zamanda, gerçek koşulları daha doğru bir şekilde temsil eden sınır koşullarına sahip bir model üretilir (<http-5>).

#### **3.3.4. Yüzey suyu modellemesi (Yağış-akış modellemesi)**

Yüzey suyu modellemesi, diğer bir deyişle yağış-akış modellemesi, temel olarak havzaya düşen yağış ile akış arasında matematiksel bir ilişki kurmayı amaçlar. Bu amaçla çeşitli yöntemler kullanılır. En basit haliyle, yağış yüksekliklerinin akış

yükseklikleriyle ilişkilendirilmesiyle oluşturulan modeller bulunmaktadır. Ancak bu tür modellerde yağış ve akış verilerini içeren grafiklerde belirgin hata payları gözlemlenebilir. Bunun sebebi, bu ilişkiyi etkileyen diğer parametrelerin varlığıdır. Bu parametrelerin başında zemin türü ve nem gelir.

Zemin içerisindeki nem miktarı, zemin doygunluğunun bir ölçütüdür ve yağışın toprak tarafından ne kadarının emildiğini ve ne kadarının yüzey akışına geçtiğini etkileyen önemli bir faktördür. Dolayısıyla, yağış-akış ilişkisini doğru bir şekilde modellemek için zemin türü ve nem gibi parametrelerin dikkate alınması gereklidir. Bu parametrelerin doğru bir şekilde belirlenmesi, modelin tahmin gücünü artırır ve gerçek dünya koşullarını daha iyi yansıtan sonuçlar elde edilmesini sağlar.

Modelleme sürecinde dikkate alınması gereken önemli faktörlerden bazıları, önceki yağış olayları, yağışın başlangıcında akarsudaki akış miktarı, yağışın süresi ve şiddeti ile zemindeki nem miktarıdır. Bu faktörlerin doğru bir şekilde elde edilip modele dahil edilmesi, yüksek doğruluk ve hassasiyete sahip bir yağış-akış ilişkisi sağlar.

Zemin türü ise zemini oluşturan malzeme, gözenek yapısı ve/veya çatlak miktarını temsil eder ve yağışın zemine sızan miktarını etkileyen önemli bir parametredir (Bayazit, 1995).

Yağış-akış modelleme yöntemleri çeşitlilik gösterir ve havzanın özelliklerine ve yapısına göre farklı modeller kullanılır. Bu modeller genellikle üç ana kategori altında gruplandırılır:

- 1) Parametrik Modeller: Parametrik modeller, düşen yağışın sızma, yüzeysel akış gibi alt bileşenlere nasıl etki ettiğini ayrıntılı olarak analiz eder. Bu modeller, bileşenler arasındaki ilişkiyi detaylı bir şekilde gösterir ancak sistem genellikle karmaşıktır ve bu nedenle bazı kabuller ve varsayımlar yapılması gerekebilir (Bayazit, 1995).
- 2) Klasik Kara Kutu Modeller (Kapalı Kutu Modeller): Kara kutu modellerde, hidrolojik süreçler genellikle ayrıntılı bir şekilde incelenmez. Bu model türünde, havzanın yağıştan akışa dönüştüğü bir sistem olarak kabul edilir. Girdi verileri ile çıktılar arasında matematiksel bir ilişki kurulur. Havzanın davranışı genel bir modelle belirlenmeye çalışılır ve genellikle basitçe yapılandırılmışlardır (Bayazit, 1995).

- 3) Yapay Zekâ Modelleri: Yapay zekâ modelleri, temelde kara kutu modellerine benzer şekilde çalışır ancak kendi içinde farklı yöntemler kullanabilir. Bu modeller, insan beyninin çalışma prensiplerini taklit etmek için çeşitli algoritmalar kullanarak geliştirilmiştir. İnsan düşünme şeklini taklit eden bu modeller, karmaşık ilişkileri öğrenip modelleyebilme yeteneğine sahiptirler.

Bu modeller, yağış-akış ilişkisini anlamak ve tahmin etmek için kullanılan farklı yaklaşımları temsil eder. Hangi modelin kullanılacağı, havzanın özellikleri, veri erişimi ve modelin amacına bağlı olarak belirlenir.

#### **3.3.4.1. Yüzey suyu akış modeli (PRMS)**

PRMS, USGS tarafından geliştirilmiş olan deterministik, dağıtılmış parametrelili, fiziksel tabanlı bir modelleme sistemidir. Bu sistem, yeryüzünde meydana gelen hidrolojik süreçlerin bir fonksiyonu olarak yüzeydeki suyun çevrimini simüle etmek amacıyla tasarlanmıştır. PRMS'in temel amacı, zemin suyu ve yeraltı suyundaki beslenme miktarındaki değişiklikleri, havzanın yağışa karşı tepkisi, akarsu rejimi ve su dengesi gibi faktörleri modellemektir.

PRMS'in başlıca hedefleri şu şekilde sıralanabilir:

- 1) Dağıtılmış iklim verilerine dayalı hidrolojik süreçlerin simülasyonu: PRMS, dağıtılmış iklim verileri (sıcaklık, yağış, güneş radyasyonu vb.) kullanarak bitki örtüsünün, kar örtüsünün ve toprak bölgesinin enerji ve su bütçelerini hesaplar. Bu hesaplamalar, buharlaşma, terleme, yüzey akışı, sızma ve ara akış gibi hidrolojik süreçlerin modellenmesine olanak tanır.
- 2) Havza ölçeğinde hidrolojik su bütçelerinin elde edilmesi: PRMS, değişen zamansal ölçeklerde havza ölçeğinde hidrolojik su bütçelerini belirler. Bu sayede, belirli bir havzanın su döngüsü üzerindeki etkileri zaman içinde nasıl değiştiği anlaşılabilir.
- 3) Diğer modeller veya bilimsel disiplinlerle entegrasyon: PRMS modeli, doğal kaynakların yönetimi için kullanılan diğer modellerle veya farklı bilimsel disiplinlerden modellerle entegre edilebilir. Bu entegrasyonlar, daha kapsamlı ve bütüncül bir analiz yapılmasına olanak tanır ve farklı disiplinlerden gelen verilerin birleştirilmesini sağlar.

PRMS, özellikle su kaynakları yönetimi, çevresel planlama ve su kaynaklarının sürdürülebilir kullanımı gibi alanlarda önemli bir araç olarak kullanılmaktadır.

#### **3.3.4.2. Modelin yapısı (PRMS)**

Ölçülen veya tahmin edilen yağış miktarı ile sıcaklık ve güneş radyasyonu gibi iklim verileri, PRMS modelinde yüzeysel akışı, buharlaşmayı, sızmayı, süblimleşmeyi ve kar erimesini hesaplamak için kullanılan belirleyici unsurlardır (Leavesley vd., 1983). Yağışın türü (yağmur, kar, karla karışık yağmur) sıcaklık verilerine bağlı olarak belirlenir ve modele giriş verisi olarak kullanılabilir. Bitki örtüsü tarafından tutulmayan yağış yüzeydeki havza alanına dağıtılır. Yüzeye ulaşan yağış, kar örtüsüne karışabilir, geçirimsiz bölgelerdeki rezervuarda depolanabilir, yeraltına sızabilir, buharlaşabilir veya yüzey akışına dönüşebilir.

PRMS, suyun akifer tabakaları arasındaki hareketini simüle etmek için matematiksel olarak ampirik kurallar dizisi kullanır. Bu yaklaşım, yeraltı suyu akış denklemleriyle tanımlanan üç boyutlu MODFLOW modeline göre daha basittir.

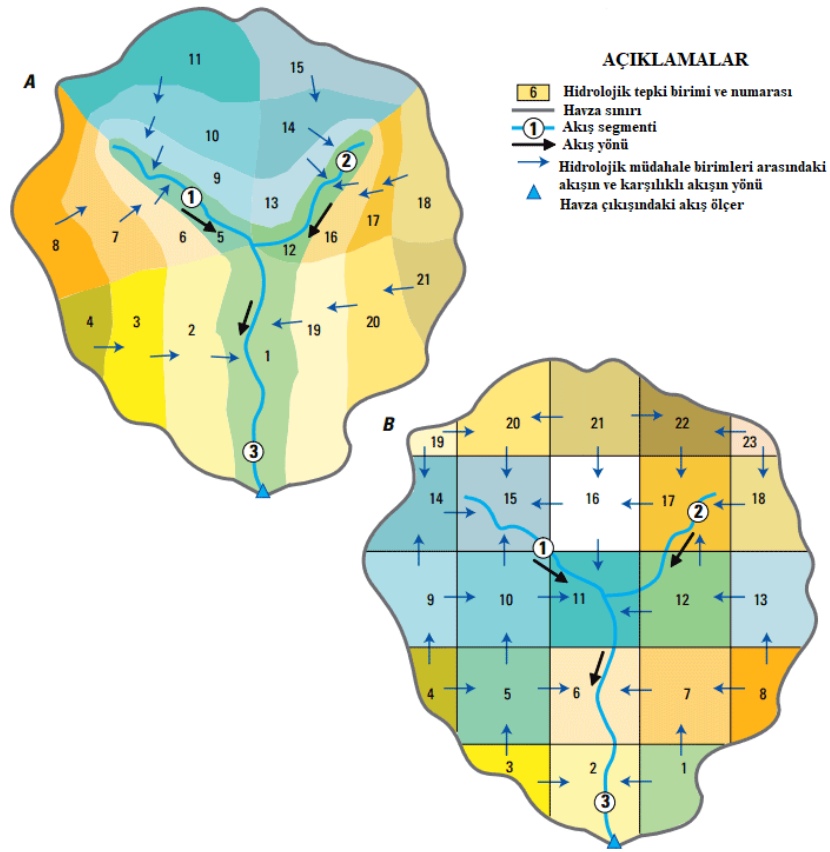
PRMS, yüzey suyunu istenilen çalışma zamanı boyunca ve günlük zaman diliminde çalışma havzasının alt bölgelerindeki hareketini dikkate alır. Meteorolojik veriler olan yağış, sıcaklık vb. ile arazi kullanımı ve bitki örtüsü dağılımı, modele giriş verisi olarak tanıtılarak belirli bir havzadaki su döngüsü modellenenir. Potansiyel buharlaşma ve terleme, sıcaklığın bir fonksiyonu olarak hesaplandığı için sıcaklık verisi model için önemlidir. Sıcaklık değeri aynı zamanda suyun formunu ve davranışını belirler. Örneğin, sıcaklık 0 °C'nin altındaysa yağış kar şeklinde olur ve bu durumda ani sızma veya yüzey akışı olmaz. Kar, kış boyunca zemin veya yeraltı suyu rezervuarı gibi hidrolojik sistem diğer bileşenlerine geçmez; sıcaklık 0 °C'nin üzerine çıktığında erime başlar ve bu süreç model tarafından hesaba katılır. Yağışın geçirimsiz yüzeylere (örneğin asfalt yollar veya beton kaplı alanlar) düşmesi durumunda su doğrudan en yakındaki nehir veya göle doğru hareket eder. Havzanın diğer bölgelerinde ise su zemine sızabilir. Akışın derecesi, model içinde çeşitli ampirik parametreler tarafından belirlenir.

#### **3.3.4.3. Hidrolojik tepki birimi (HTB, hydrologic response unit – HRU)**

Hidrolojik Tepki Birimi (HTB), havzanın arazi kullanımı, jeolojik yapı, toprak morfolojisi, yağış/kar dağılımı, sıcaklık, bitki örtüsü ve drenaj özellikleri gibi faktörler

bakımından homojen olan alt havzalara denir. Havzanın karakteristik özelliklerinin mekânsal değişimi, çalışma alanının HTB'ler şeklinde bölünmesiyle hesaplanır. Su ve enerji dengesi her bir HTB için günlük olarak hesaplanır. HTB'ler sayısal olarak numaralandırılır ve numaralandırma 1'den başlamalı, benzersiz ve ardışık olmalıdır.

HTB'lerde genellikle üç farklı ayrıklaştırma yaklaşımı kullanılır: topolojik yaklaşım, ağ tabanlı yaklaşım ve ayırık yaklaşım. Topolojik yaklaşım, tepe eğimleri ve akış düzlemlerini temsil eden düzensiz poligonlarla oluşturulur. Ağ tabanlı yaklaşım ise düzenli dikdörtgenler kullanılarak yapılır, ayırık yaklaşım ise havzanın karakteristik özelliklerinin kombinasyonuna dayalı olarak benzersiz ve düzensiz poligonlar şeklinde oluşturulur (Viger ve Leavesley, 2007).



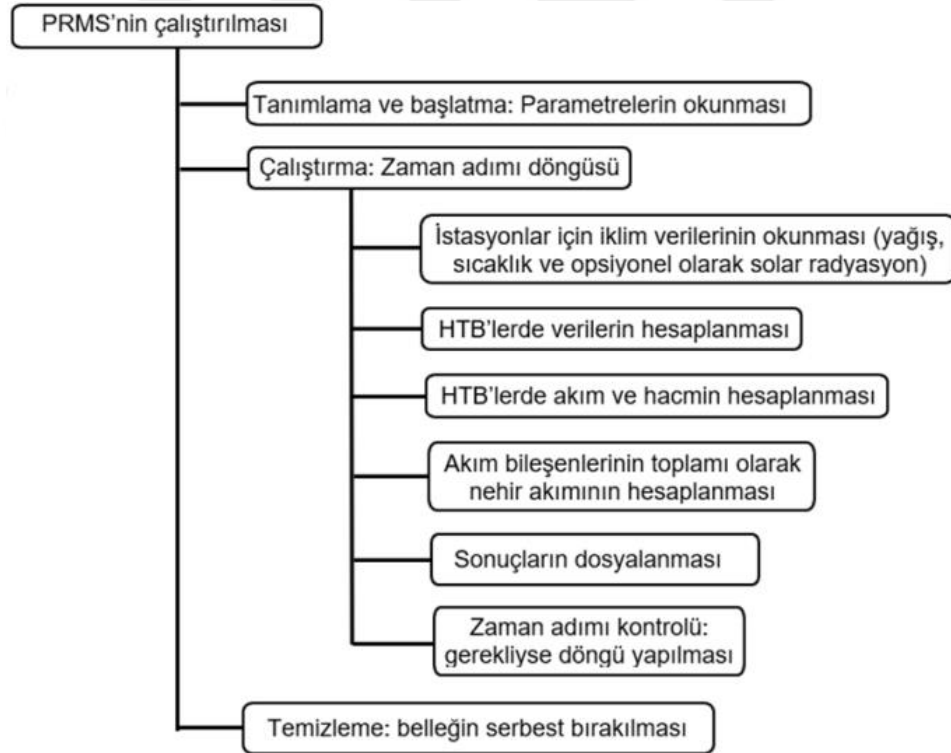
**Şekil 3.10.** A) HTB ve akarsular arasındaki yüzey akışının kademeli akışı, B) Topografyanın yükseklik bantları ve dikdörtgen bir hücre ile kesişimi (http-6).

HTB, nehir ve göl arasındaki yüzey suyu akışını yönlendirmek için kademeli akım prosedürü kullanır ve bu prosedür dönüşümsüz bir akım ağıyla gerçekleştirilir. Akış, en yüksek kotta bulunan HTB'den başlar ve nehir kolu veya göle ulaşana kadar daha düşük kottaki HTB'ye doğru ilerler. PRMS girdi parametreleri, HTB'lerin

oluşturulmasında kullanılan SYM akım toplama ve yönlendirme analizi ile elde edilir. HTB'nin sonlu fark hücre ağı metoduyla oluşturulması durumunda, sonlu fark hücreleri arasındaki akım yolları, hücrelerin kendi yüzey kotlarına göre belirlenebilir (Ford ve Fulkerson, 1956).

#### 3.3.4.4. Yüzey suyu modeli (PRMS) hesaplama adımları

PRMS modeli, veri, kontrol ve parametre dosyalarının model tarafından okunmasıyla başlar. Hidrolojik süreçler ve seçenekler, girdi veri setlerinin okunmasıyla belirlenir ve ardından modele gerekli parametreler ve değişkenler tanımlanır. Zaman adımı döngüsü başlatılır ve her istasyonun veri setinden yağış, sıcaklık ve ısteğe bağlı olarak solar radyasyon verileri HTB'ler arasında dağıtılır. Modelleme sonucunda elde edilen çıktılar bir dosyaya kaydedilir ve bir önceki zaman adımının bitiminde yeni bir zaman adımı başlatılır; son zaman adımı tamamlanana kadar her akış ve hacim için hesaplamalar devam eder. Tüm zaman adımları modellendikten sonra çıktı dosyası kapatılır ve simülasyon için ayrılan bellek serbest bırakılır (Kavşut, 2019).



Şekil 3.11. PRMS hesaplama adımları (Kavşut, 2019).

#### 3.3.5. Yeraltı suyu-yüzey suyu etkileşimi

Doğru ve etkili su yönetimi ve planlaması için yeraltı suyu ile yüzey suyu arasındaki hidrolik etkileşimin detaylı bir şekilde anlaşılması gerekmektedir. Yeraltı

suyu ve yüzey suyu sürekli bir etkileşim içindedir. Yüzey suları genellikle yeraltından gelen sular ve çözünmüş maddelerle beslenirken, yüzey suları da sızma yoluyla yeraltı sularına önemli bir kaynaktır. Bu etkileşim suyun kalitesinde belirgin değişikliklere yol açabilir. Bu nedenle, su kaynaklarının yönetimi için hem yeraltı suyu hem de yüzey suyu arasındaki bu etkileşimin detaylı olarak incelenmesi ve anlaşılması önemlidir.

Bu hidrolik bağlantı oldukça karmaşık bir yapıya sahiptir ve etkileşiminin modellenmesi zorlu bir süreçtir. Bu nedenle araştırmacılar genellikle bu hidrolik süreçler üzerinde ayrı ayrı çalışmayı tercih ederler ve çoğu zaman ya yeraltı suyu ya da yüzey suyu kaynaklarına odaklanarak çalışmalarını yürütürler.

Dünya nüfusunun hızla artmasıyla birlikte kaynakların azaldığı ve artan ihtiyaçların karşılanması zorunluluğunun ortaya çıktığı gözlemlenmiştir. Artan nüfusla birlikte canlı yaşamının su tüketimi de artmaktadır, bu da su kaynaklarının hem yüzey hem de yeraltı sularından etkin bir şekilde yararlanılmasının önemini artırmaktadır. Su yönetimi ve planlaması için yeraltı suyu ile yüzey suyu etkileşimlerini belirlemek ve detaylandırmak amacıyla eş zamanlı modelleme yapabilen modeller geliştirilmiştir. Bu amaçla, USGS tarafından geliştirilen PRMS ve MODFLOW modellerinin birleşimi olan GSFLOW modeli örnek olarak gösterilebilir.

GSFLOW modeli, yeraltı suyu-yüzey suyu etkileşimlerinin oluşturulması ve sürecin detaylı bir şekilde modellenmesinde kullanılmaktadır.

#### **3.3.5.1. Yeraltı suyu-yüzey suyu etkileşim modeli (GSFLOW)**

GSFLOW, PRMS ve MODFLOW modellerinin entegrasyonu ile oluşturulan birleşik bir yeraltı-yüzey suyu akış modelidir. Arazi yüzeyi boyunca, yeraltında bulunan doymuş ve doymamış malzemelerde, akarsu ve göllerdeki akışı simüle etmek ve bir veya daha fazla havzadaki birleşik yeraltı suyu-yüzey suyu akışını modellemek için USGS tarafından geliştirilmiştir. Ölçülen veya tahmin edilen yağış, hava sıcaklığı ve solar radyasyonun yanı sıra kuyular aracılığıyla yeraltı suyunun çekilmesiyle oluşturulan stres periyodunda ve sınır koşullarındaki iklim verileri, simülasyonda etkin unsurlardır.

GSFLOW günlük zaman adımında çalışmaktadır. Stres periyodunda veya sınır koşullarındaki değişiklikleri belirtmek için kullanılan MODFLOW, değişken stres periyoduna ek olarak GSFLOW'un su tablasına beslenme değeri eklemesini ve

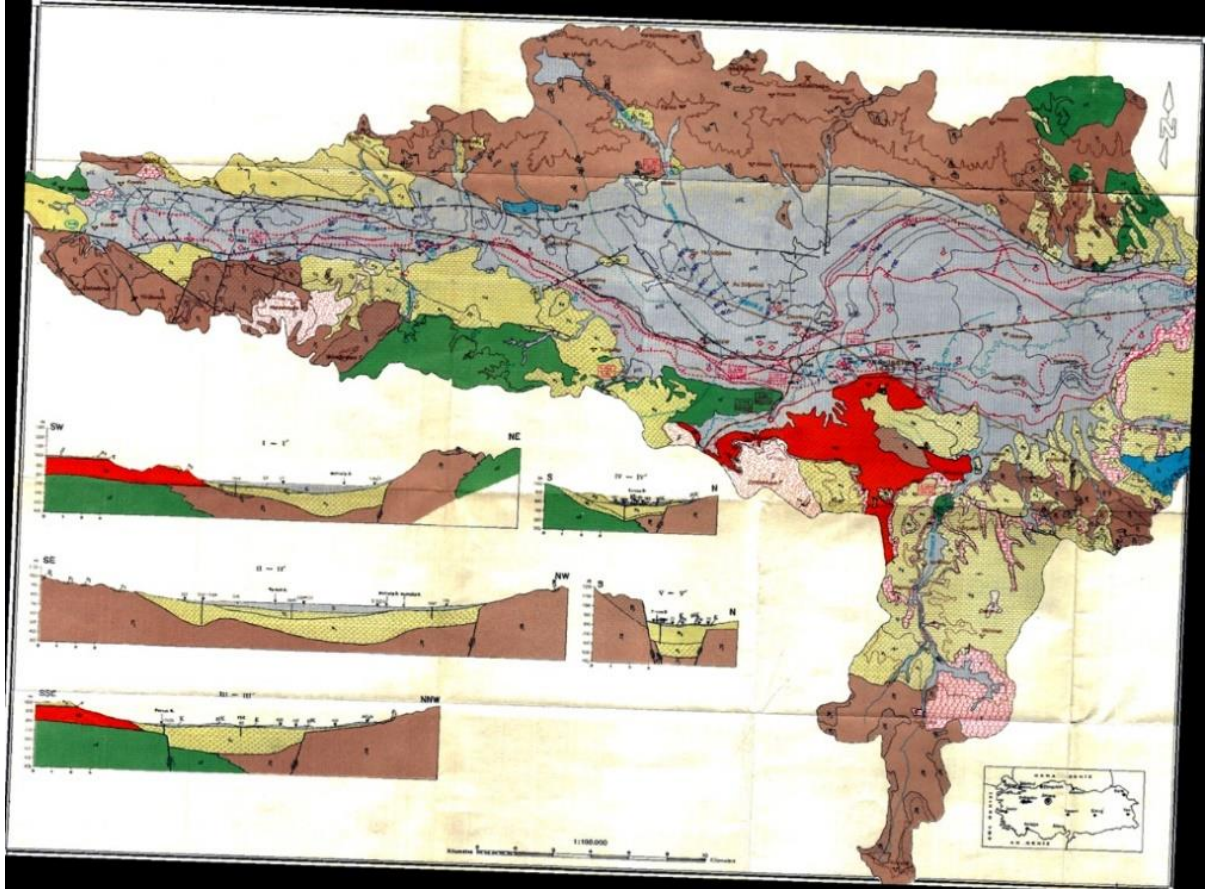
akarsular ile göllere ulaşan akışları hesaplamasını sağlayan dahili günlük stres periyotlarını kullanmaktadır. Sınırlar üzerinden belirlenen akış girişi, dahili akış yönlendirme hızları ve yeraltı suyu pompalama akış hızları, bu gerilimlerin her zaman adımı sırasında değişmesine izin veren zaman serisi girdi dosyaları kullanılarak belirlenebilmektedir ([http-7](#)).



#### 4. YERALTI SUYU-YÜZEY SUYU ETKİLEŞİM MODELLERİ: UYGULAMA

Bu bölümde, ilk olarak GMS yazılımı kullanılarak MODFLOW modeli ile yeraltı suyu akışının simülasyonu ve model sonuçları incelendi. Ardından, PRMS modeli kullanılarak yüzey suyu akışının simülasyonu yapıldı ve elde edilen model sonuçları değerlendirildi. Son olarak, bu iki simülasyon çalışmasının etkileşim modeli olan GSFLOW modeli ile entegrasyonu gerçekleştirildi.

Simülasyon çalışmalarına başlamadan önce, Porsuk Havzası'nda bulunan ve havzanın Orta Porsuk Bölgesi'nde yer alan çalışma alanının karakteristik özellikleri (yükseklik, eğim, bakı, jeoloji, arazi kullanımı vb.) CBS platformunda elde edildi. Çalışmada kullanılan hidrolik ve hidrojeolojik veriler, çalışma alanına ait altlık haritası, Devlet Su İşleri (DSİ) tarafından hazırlanan hidrojeolojik etüt raporu ve Şekil 4.1'de gösterilen rapor eki olan haritadan alındı. İklim verileri Meteoroloji Genel Müdürlüğü (MGM) kurumundan, akış verileri ise DSİ akım gözlem yıllıklarından (1970-1973) temin edildi.



Şekil 4.1. Çalışma alanının hidrojeolojik haritası (DSİ, 1975).

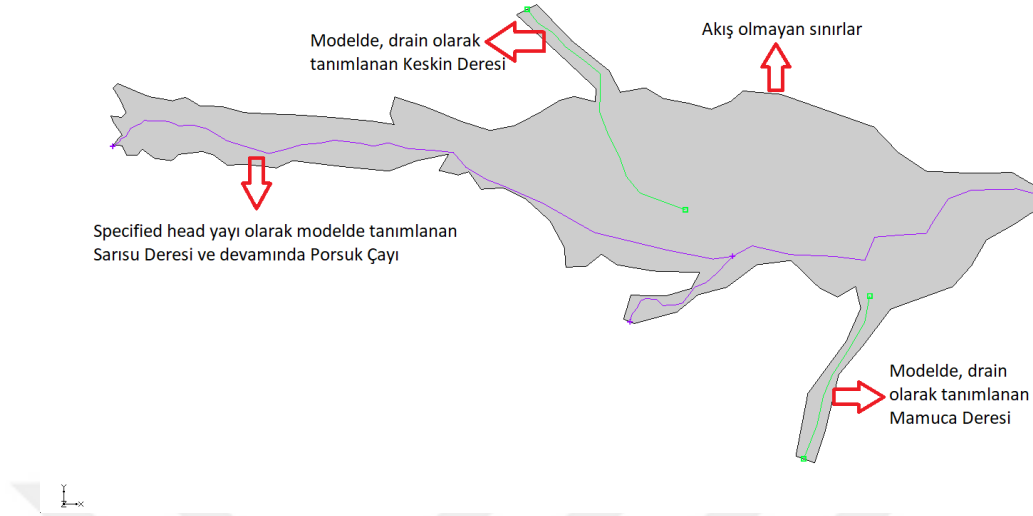
#### **4.1. Porsuk Havzası'nda Yeraltı Suyu Akışının GMS Yazılımı İle Modellenmesi (MODFLOW-2005)**

Şekil 4.1'de gösterilen hidrojeolojik harita, GMS yazılımında altlık olarak kullanılmak üzere aktarıldı ve UTM ZONE 36N, ED 1950 koordinat sistemiyle koordinatlandırılarak modelleme çalışmalarına başlandı. Çalışma, kavramsal modelleme yöntemiyle gerçekleştirildi. Modelleme çalışmaları ilk olarak kararlı hal (steady state) olarak simüle edildi, manuel ve otomatik kalibrasyon yöntemleri kullanılarak hidrolik iletkenlik ve beslenme parametreleri belirlendi. Daha sonra, yeraltı suyu akışını modellemek için akışın başlama hali (transient) olarak modellendi. Akışın detaylı olarak incelenmesi ve akarsu ile etkileşiminin modellenmesi için SFR2 paketi kullanılarak çalışma gerçekleştirildi.

##### **4.1.1. Kararlı hal (steady state)**

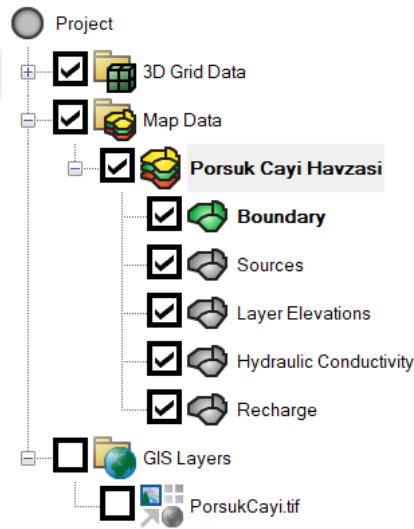
Simülasyonda akış olmayan sınırları temsil eden yaylar, akış olmayan sınırlar olarak tanımlandı. İnönü Ovası'nda yer alan Sarısu Çayı ve devamında birleştiği Porsuk Çayı, sabit seviye (specified head) olarak belirlendi. Yayların başlangıç, birleşim ve bitiş noktaları su kotu verisi olarak tanımlandı.

Modelin sınır koşulları ve hücre ağı oluşturulurken, akifer tabakasının nehirle hidrolik ilişkisi içinde olduğu sınırlar sabit seviye (specified head) yayı ile belirlendi. Sabit seviye yükseklik değerleri olarak Sarısu ve Porsuk Çaylarının su kotları modele girildi. Çalışma alanının çevresinde (alüvyon tabakayı çevreleyen bölge) akış olmadığı için bu bölgelerde çizilen yaylar, akış olmayan sınır olarak kabul edildi. Sulama kanallarını besleyen ve akışı çok düşük olan Keskin ve Mamuca Dereleri ise 'drain' olarak tanımlandı.



**Şekil 4.2.** Model yapısının GMS yazılımı içinde oluşturulması

Kararlı hal modelinin bileşenleri Şekil 4.3'te sunulmuştur.



**Şekil 4.3.** GMS yazılımında gerçekleştirilen kararlı hal modellemesinin bileşenleri

#### Çalışmanın, kararlı hal modellemesinde;

‘Boundary (sınırlar)’ bileşeni içinde; model sınırları çizildi ve çalışma alanının ortalama yüksekliği girildi. Çalışma alanının yükseklik değerleri CBS araçlarıyla belirlendi. Çalışma bölgesinde, ortalama yükseklik değeri 819 m, minimum yükseklik değeri 772 m, maksimum yükseklik değeri ise 1054 m olarak tespit edilmiştir.

‘Sources (kaynaklar)’ bileşeni içinde; modele ilgili kaynaklar girildi. Modele tanımlanan kaynaklar şu şekilde sıralanmaktadır:

- Wells (kuyular)
- Specified head (CHD) (Sabit seviye)
- Drain (Akış olmayan kuru dere yatakları, sulama kanalları)

Modele altlık olarak aktarılan hidrojeolojik haritada yer alan 26 adet kuyu, koordinatlarına ve kot değerlerine uygun olarak modele tanımlandı. Model, kuyulara ait kot yüksekliği (Z) ve debi değerlerini istemektedir. Kuyulardan su çekildiği için debi değerleri negatif (-) olarak girildi. Modelde yer alan kuyulara ait bilgiler Tablo 4.1’de verilmiştir.

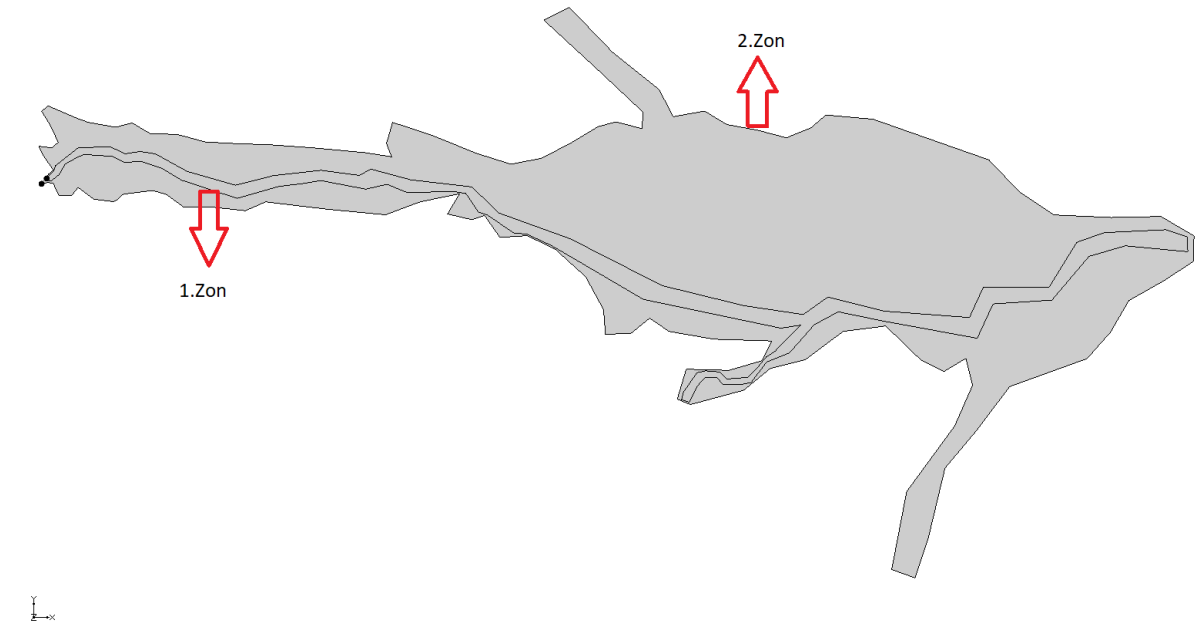
**Tablo 4.1.** Modelde yer alan kuyulara ait bilgiler

| Sıra | Kuyu No | Kuyu Adı       | X         | Y          | Zemin Kotu (m) | Debi (m <sup>3</sup> /d) |
|------|---------|----------------|-----------|------------|----------------|--------------------------|
| 1    | 2964-A  | Mv. İkmal      | 290371.37 | 4406239.95 | 786.3          | -3888                    |
| 2    | 3184    | Karaca höyük   | 297076.32 | 4402891.63 | 779.4          | -3888                    |
| 3    | 5007    | Sağır D. Okulu | 282301.17 | 4406453.94 | 808.6          | -691.2                   |
| 4    | 5586    | Turgutlar      | 274597.36 | 4407055.57 | 811.7          | -172.8                   |
| 5    | 5587-C  | Satılmış       | 272954.19 | 4409524.35 | 806            | -1036.8                  |
| 6    | 5590/A  | Kandilli       | 247732.94 | 4413220.17 | 854.6          | -216                     |
| 7    | 8049    | Kanal yanı     | 286285.56 | 4407395.30 | 792            | -604.8                   |
| 8    | 8071    | 61 Evler       | 286720.64 | 4404570.17 | 790            | -432                     |
| 9    | 81      | EİE Karagözler | 279082.70 | 4406505.13 | 802            | -864                     |
| 10   | 1       | Alpu           | 289020.50 | 4410102.34 | 785            | -172.8                   |
| 11   | 2       | Alpu           | 292080.74 | 4411291.60 | 783            | -216                     |
| 12   | 3       | Alpu           | 297014.71 | 4410445.47 | 781            | -475.2                   |
| 13   | 4       | Alpu           | 296416.26 | 4407668.60 | 780            | -864                     |
| 14   | 5       | Alpu           | 296383.03 | 4404295.27 | 786            | -1123.2                  |
| 15   | 6       | Alpu           | 300862.62 | 4407808.03 | 778            | -4320                    |
| 16   | 7       | Alpu           | 305502.49 | 4408891.69 | 775            | -1296                    |
| 17   | 23      | Alpu           | 292922.70 | 4405431.24 | 787            | -2592                    |
| 18   | 2       | İnönü          | 251862.01 | 4412043.06 | 837            | -2419.2                  |
| 19   | 4       | İnönü          | 257477.73 | 4412126.63 | 824            | -1728                    |
| 20   | 5       | İnönü          | 260986.62 | 4413258.90 | 820            | -172.8                   |
| 21   | 6       | İnönü          | 262726.16 | 4411182.08 | 818            | -432                     |
| 22   | 7       | İnönü          | 267019.22 | 4412170.75 | 816            | -1036.8                  |
| 23   | 9       | İnönü          | 271450.23 | 4409535.47 | 806            | -1728                    |
| 24   | 10      | İnönü          | 274642.03 | 4408453.86 | 803            | -864                     |
| 25   | 11      | İnönü          | 275861.10 | 4406121.43 | 813            | -1728                    |
| 26   | 12      | İnönü          | 279567.77 | 4405121.74 | 797            | -1296                    |

Model, akifer tabakasını kapsayarak yer altı suyu hareketini simüle etmek amacıyla geliştirildiği için ‘layer elevations (katman yükseklikleri)’ bileşeni tek tabakalı olarak tanımlandı ve bu tabakanın alt ve üst yükseklik değerleri girildi.

‘Hydraulic conductivity (hidrolik iletkenlik)’ bileşeni içinde, hidrojeolojik etüt çalışmalarında elde edilen hidrolik iletkenlik değerlerinden yararlanılarak hidrolik iletkenlik değerleri girildi. Model, hidrolik iletkenlik bakımından iki bölgeye ayrıldı. Birinci bölge, nehir akışı etrafını temsil ederken, geriye kalan bölge ise diğer alanları temsil etmektedir (Şekil 4.4).

Modele girilen hidrolik iletkenlik değerleri, hidrojeolojik etüt çalışmasındaki değer aralığına uygun olarak yaklaşık değerler şeklinde girildi. Daha sonra bu değerler, ‘recharge rate (depolama oranı)’ bileşenine girilecek değerlerle kalibre edilerek gerçeğe en yakın sonuca ulaşıldı ve sisteme yeniden aktarıldı.



Şekil 4.4. Hidrolik iletkenlik zonları

Modelin bir diğer bileşeni olan ‘recharge (beslenme)’ bileşeni içinde; modelleme alanı beş adet bölgeye ayrıldı. Eskişehir ve İnönü Ovaları Hidrojeolojik Etüt Raporu’na (DSİ, 1975) göre, İnönü Ovası’nda yeraltı suyunun beslenme alanı eski alüvyonlar için 32 km<sup>2</sup> ve alüvyonlar için 70 km<sup>2</sup> olmak üzere toplamda 102 km<sup>2</sup>’dir. Eskişehir Ovası’nda ise yeraltı suyunun beslenme alanları eski alüvyonlar için 88 km<sup>2</sup> ve yeni alüvyonlar için 220 km<sup>2</sup> olarak tespit edilmiştir.

**Tablo 4.2.** İnönü Ovası'nın beslenme – boşalım değerleri (DSİ, 1975).

| Beslenme                 | x 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> /yıl | Boşalım          | x 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> /yıl |
|--------------------------|---------------------------------------|------------------|---------------------------------------|
| Yağıştan süzülme         | 2                                     | Sarısu Deresi'ne | 3.5                                   |
| Yüzeysel akıştan süzülme | 1                                     |                  |                                       |
| Yanal beslenme           | 0.5                                   |                  |                                       |
| <b>Toplam</b>            | <b>3.5</b>                            |                  | <b>3.5</b>                            |

Hesaplama yapıldığında İnönü Ovası'nı kapsayan bölge için ortalama yeniden beslenme oranı değeri 0.000095 m/d olarak alınabilir.

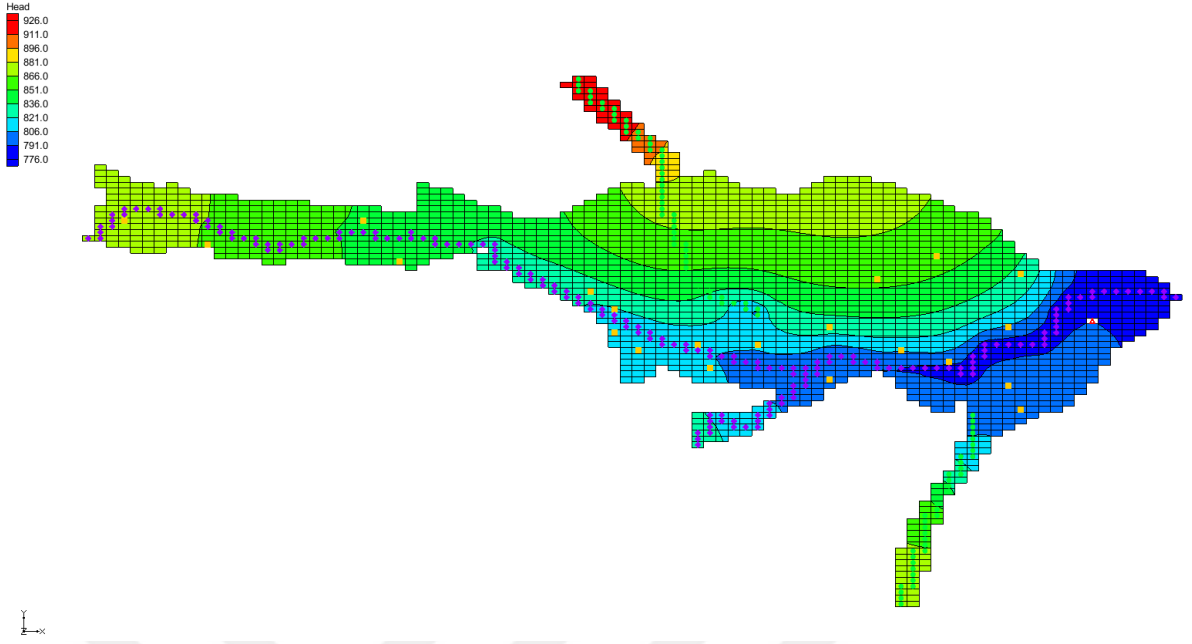
**Tablo 4.3.** Eskişehir Ovası'nın beslenme – boşalım değerleri (DSİ, 1975).

| Beslenme                                | x 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> /yıl | Boşalım        | x 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> /yıl |
|-----------------------------------------|---------------------------------------|----------------|---------------------------------------|
| Yağıştan süzülme                        | 17.5                                  | Porsuk Çayı'na | 116                                   |
| Yüzeysel akıştan süzülme                | 10                                    | Suni boşalım   | 16.5                                  |
| Porsuk ve sulama kanallarından beslenme | 81                                    |                |                                       |
| Yanal beslenme                          | 24                                    |                |                                       |
| <b>Toplam</b>                           | <b>132.5</b>                          |                | <b>132.5</b>                          |

Model, ilk olarak kurulmuş ve kararlı durumda MODFLOW-2005 tipinde çalıştırılmıştır.

#### **4.1.1.1. Kararlı hal (steady state) kalibrasyon öncesi model sonuçları**

Modelin çalıştırılması sonucunda su tablası elde edilmiştir (Şekil 4.5). Elde edilen sonuçların doğruluğundan emin olmak için modelin kalibre edilmesi gerekmektedir. Kararlı hal modellemesinde, kalibrasyon hem manuel yöntemle hem de PEST yöntemiyle otomatik olarak yapılabilmektedir. Çalışmada, kalibrasyon her iki yöntemle de gerçekleştirilmiştir. Her iki kalibrasyon işleminde de gözlenen akış ve gözlem kuyularındaki su tablası yükseklikleri kullanılmıştır. Bu veriler, hidrojeolojik etüt raporu ve ek harita üzerinden temin edilerek modele aktarılmıştır. Kalibrasyon çalışmaları modelin 'hidrolik iletkenlik' ve 'beslenme değerleri' üzerine odaklanmıştır.



Şekil 4.5. Kararlı hal (kalibrasyon öncesi) modelleme sonuçları

#### 4.1.1.2. Kararlı hal (steady state) kalibrasyonu

Herhangi bir yeraltı suyu modelleme çalışmasının önemli bir parçası, model kalibrasyon sürecidir. Bir yeraltı suyu modelinin herhangi bir öngörü rolünde kullanılabilmesi için, modelin gözlenen akifer davranışını başarıyla simüle edebildiğinin gösterilmesi gerekir. Kalibrasyon, modelin belirli parametrelerinin sistematik bir şekilde değiştirildiği ve hesaplanan çözümün sahada gözlemlenen değerlerle kabul edilebilir bir doğruluk düzeyinde eşleşene kadar modelin tekrar tekrar çalıştırıldığı bir süreçtir.

##### *Manuel kalibrasyon*

Gözlem kuyularındaki su tablası yükseklikleri ve nehirdeki gözlenen akışlar, kalibrasyon sürecinde kullanılan iki tür gözlem verisidir. Kalibrasyon çalışmasını gerçekleştirmek için modele ‘observations (gözlemler)’ bileşeni oluşturuldu. Gözlemler bileşeninde, veri olarak ‘head (yükseklik)’ seçildi ve su tablası yükseklikleri modele aktarıldı (Şekil 4.6).

**Coverage Setup**

Coverage name:  Horizon ID:

Coverage type:

**Sources/Sinks/BCs**

| Source/Sink/BC Type                              |
|--------------------------------------------------|
| <input type="checkbox"/> All                     |
| <input type="checkbox"/> Layer range             |
| <input type="checkbox"/> Wells                   |
| <input type="checkbox"/> Wells (CLN)             |
| <input type="checkbox"/> Wells (MNW)             |
| <input type="checkbox"/> Wells (MNW2)            |
| <input type="checkbox"/> Refinement              |
| <input type="checkbox"/> Specified Head (CHD)    |
| <input type="checkbox"/> Specified Head (IBOUND) |

**Areal Properties**

| Property                                  |
|-------------------------------------------|
| <input type="checkbox"/> All              |
| <input type="checkbox"/> Color            |
| <input type="checkbox"/> Layer range      |
| <input type="checkbox"/> Recharge rate    |
| <input type="checkbox"/> Horizontal K     |
| <input type="checkbox"/> Vertical K       |
| <input type="checkbox"/> Horizontal anis. |
| <input type="checkbox"/> Vertical anis.   |

**Observation Points**

| Obs. Data                                |
|------------------------------------------|
| <input type="checkbox"/> All             |
| <input type="checkbox"/> Color           |
| <input type="checkbox"/> Cluster Name    |
| <input checked="" type="checkbox"/> Head |
| <input type="checkbox"/> Trans. Head     |

Default layer range:  to  Default elevation:

☐ Use to define model boundary (active area)

3D grid layer option for obs. pts.:

MODAEM models:

Şekil 4.6. Observations (gözlemler) bileşeni diyalogu

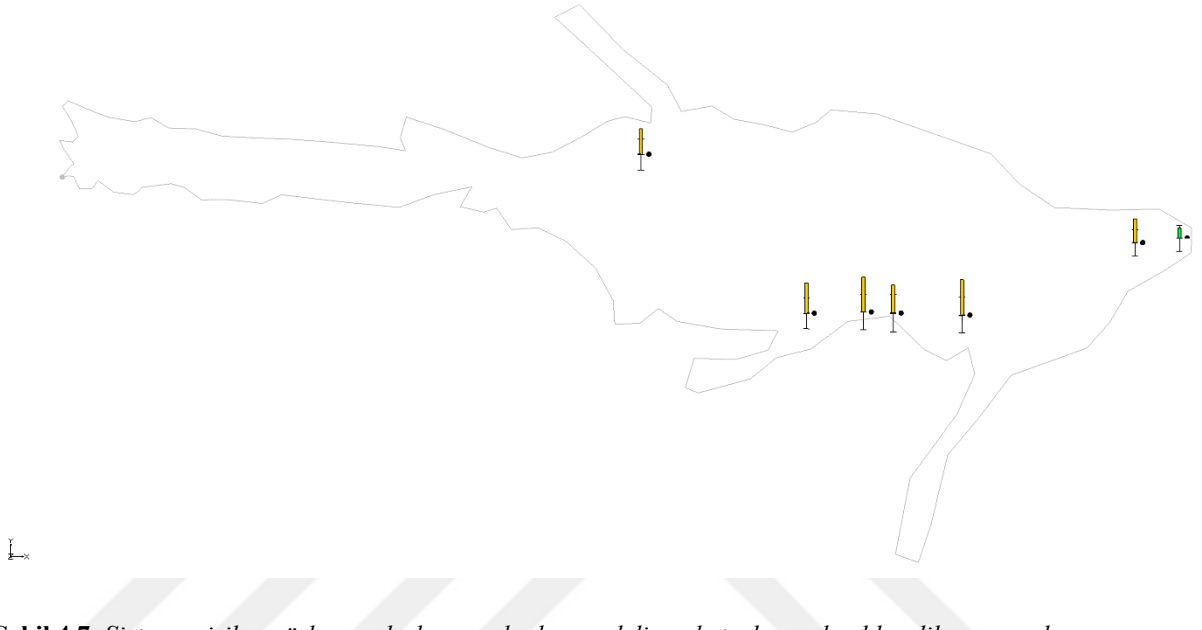
İnönü Ovası'ndan gelen Sarısu Deresi, güneyden havzaya katılan Porsuk Çayı'nın kolu olarak Eskişehir Ovası'na doğru akar ve burada birleşerek Porsuk Çayı'nı oluşturur. Eskişehir Ovası'nda ise iki ayrı kol, birleşerek tek bir akışı oluşturur ve Porsuk Çayı'nı meydana getirir.

Modelde çizilen bu çizgiler seçilerek 'yay grubu oluşturma (create arc group)' sekmesi ile tek bir akış hattı oluşturuldu. Tek bir akış hattı oluşturulduktan sonra modele gözlenen akış değerinin girilmesi gerekmektedir. Etüt raporuna göre, modelde kullanılan verilere ve zaman serisine uygun olarak akış verisi girildi.

Modelin doğu kısmında bulunan ve çıkış noktası bölgesi içerisinde kalan Çavlum köyünde gerçekleştirilen ölçümde toplam akış değeri  $9.4 \text{ m}^3/\text{s}$  olarak belirlenmiştir. Bu değer, ' $\text{m}^3/\text{s}$ ' biriminden ' $\text{m}^3/\text{d}$ ' birimine çevrilerek gözlenen akış değeri olarak modele girilmiştir. Gözlenen akış değerinin hata payı aralığı %5 olarak kabul edilmiştir. Her bir modelin parametrelerine ve diğer koşullarına göre hata payı

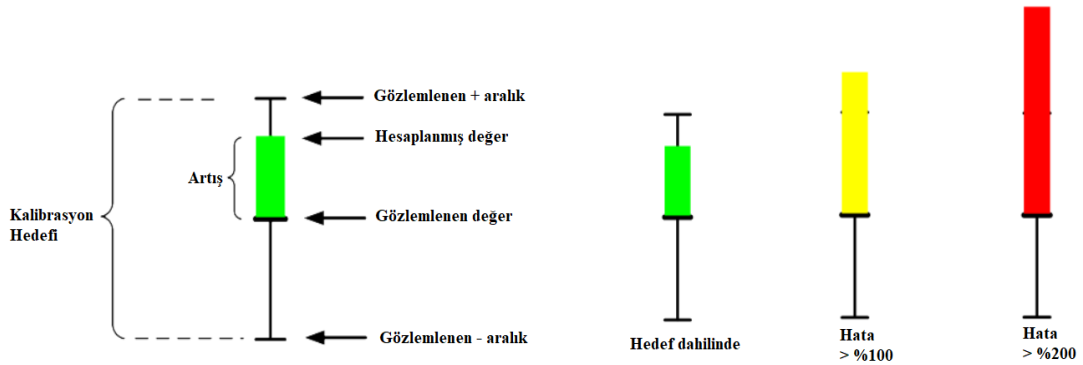
değişiklik gösterebilir, ancak GMS kaynaklarına göre hata payının %5 olarak alınması tavsiye edilmektedir.

### ***Manuel Kalibrasyon Sonuçları***

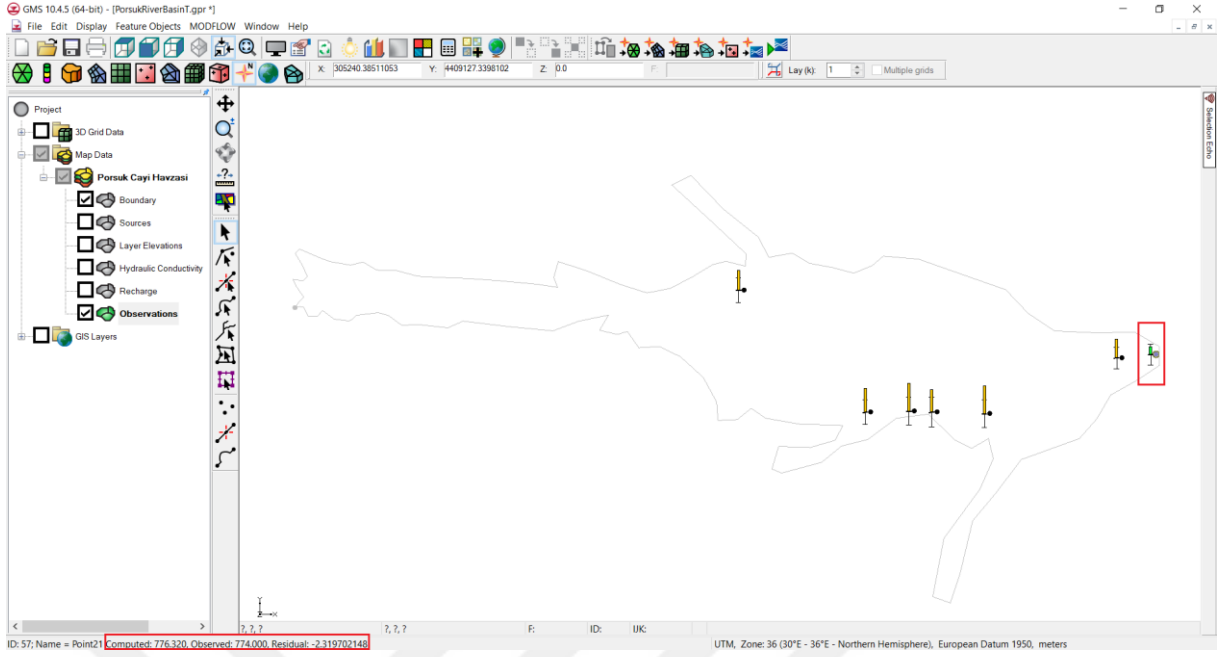


**Şekil 4.7.** Sisteme girilen gözlenen akışların ardından modelin çalıştırılmasıyla elde edilen uyum durumu

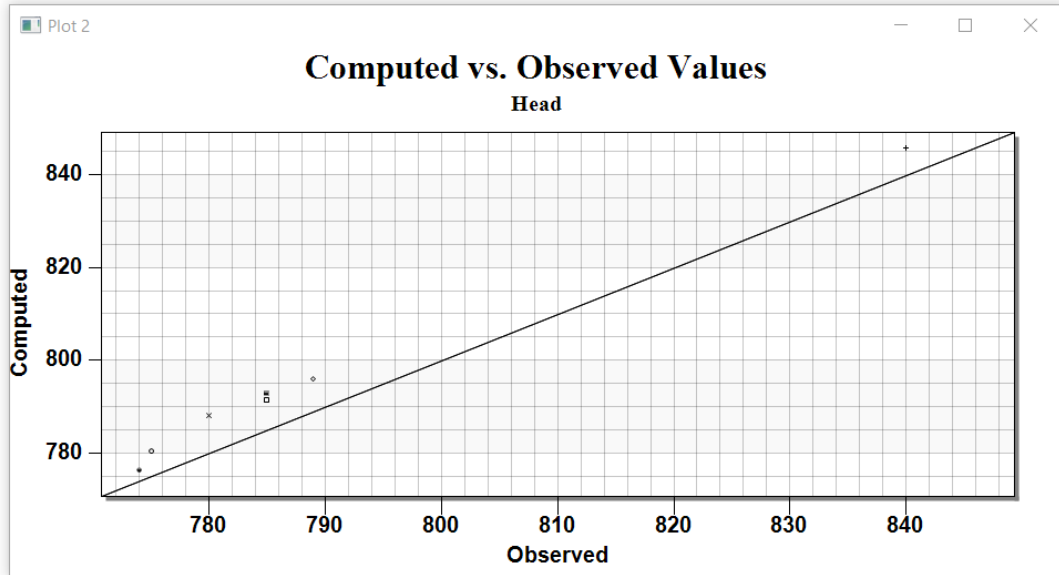
Kalibrasyon hedefinin bileşenleri Şekil 4.8’de gösterilmektedir. Hedefin merkezi gözlenen değere karşılık gelir. Hedefin üstü, gözlemlenen değerin artı aralığına karşılık gelir ve altı, gözlemlenen değerin eksi aralığına karşılık gelir. Renkli çubuklar hata miktarını temsil eder. Eğer çubuk tamamen hedefin içinde ise, renk yeşil olur. Eğer çubuk hedefin dışında ancak hata %200’den azsa, renk sarı olur. Hata %200’den büyükse, çubuk kırmızı ile gösterilir (http-8). Bu durumda, çubuk yeşil olmalıdır. Nokta seçilerek, noktadaki hataya ilişkin daha ayrıntılı istatistikler görüntülenebilir (Şekil 4.9).



**Şekil 4.8.** Kalibrasyon hedefi (http-8)



Şekil 4.9. Çıkış noktasındaki gözlem kuyusunda hesaplanan (computed) ve gözlenen (observed) değerler



Şekil 4.10. Hesaplanan (computed) ve gözlenen (observed) yükseklik değerleri

Gözlem noktalarının tanımlanmasının ardından gözlemlenen akış değeri girilebilmektedir. Gözlemlenen akış, kavramsal modeldeki ‘sources (kaynaklar)’ bileşenindeki yaylara ve çokgenlere doğrudan atanmaktadır. MODFLOW, akiferden hesaplanan akışı belirlemektedir. Bu akış değeri, gözlemlenen akışla karşılaştırılır.

GMS, gözlemlenen akışı atamak için iki yöntem sunmaktadır: tek tek yaylara veya bir yay grubuna atama. Sahada ölçülen nehir akışı, modelin üst kısmındaki nehir

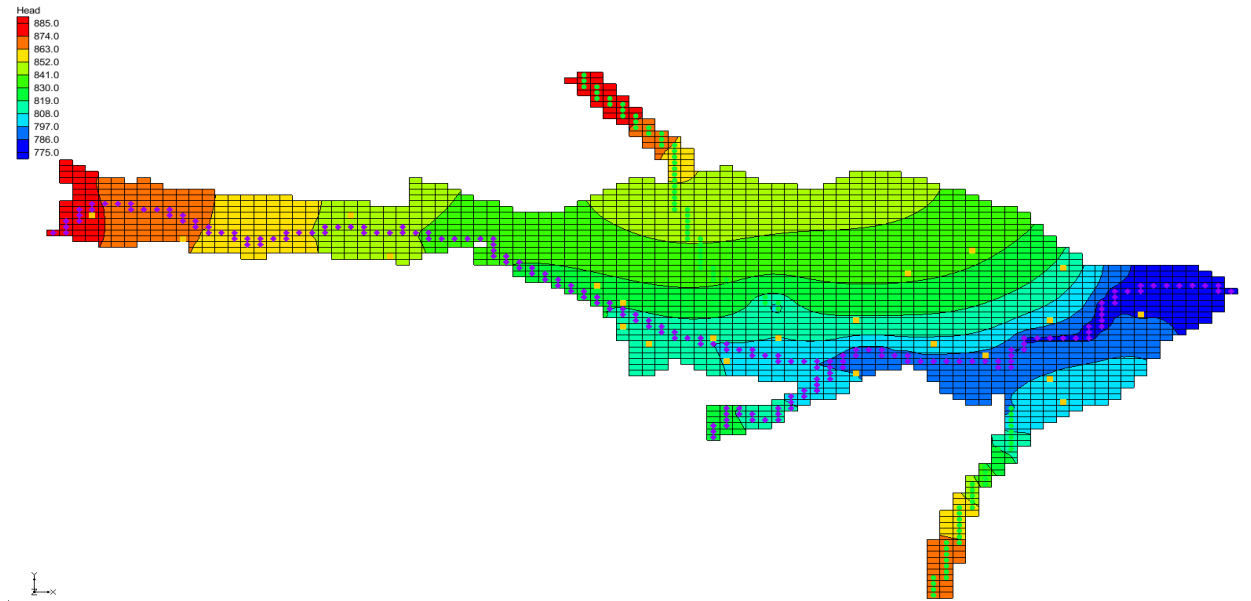
çıkışındaki toplam akifer akışını temsil etmektedir. Bu akış, tüm akış ağı boyunca akiferden nehre olan akışı temsil eder.



Şekil 4.11. Akışın hesaplanan (computed) ve gözlenen (observed) değerleri

Manuel kalibrasyon yöntemiyle hata seviyesi mümkün olduğunca minimize edildi. Bu kalibrasyon işleminden sonra hassasiyet ve doğruluğu artırmak amacıyla otomatik kalibrasyon metodu olan PEST uygulandı.

#### ***Kararlı hal (steady state) manuel kalibrasyon sonrası model sonuçları***



Şekil 4.12. Manuel kalibrasyon sonrası kararlı durum modelleme sonucu

### ***PEST metodu ile kalibrasyon***

Gözlem kuyularından gelen su seviyeleri ve gözlemlenen akışların GMS yazılımına nasıl girilebileceği ve bu verilerin hesaplanan modelle karşılaştırılmasına yönelik manuel kalibrasyon gerçekleştirilmiştir.

Birçok durumda, PEST yöntemi ile kalibrasyon çok daha hızlı bir şekilde gerçekleştirilebilmektedir. PEST, parametre tahmin sürecini otomatikleştiren bir GMS yardımcı modülüdür. Kalibrasyonda, hesaplanan ve gözlemlenen değerler arasındaki fark minimum değere indirilene kadar, kullanıcı tanımlı bir dizi girdi parametresini sistematik olarak ayarlamaktadır.

Model, akış için gözlenen akış verilerini ve bir dizi dağınık gözlemde gözlenen yükleri içerir. Saha için kavramsal model, bir dizi beslenme ve hidrolik iletkenlik bölgesinden oluşmaktadır. Bu bölgeler parametre olarak işaretlenecek ve kalibrasyon hatasını en aza indiren bir dizi beslenme ve hidrolik iletkenlik değeri bulmak için bir ters model kullanılacaktır.

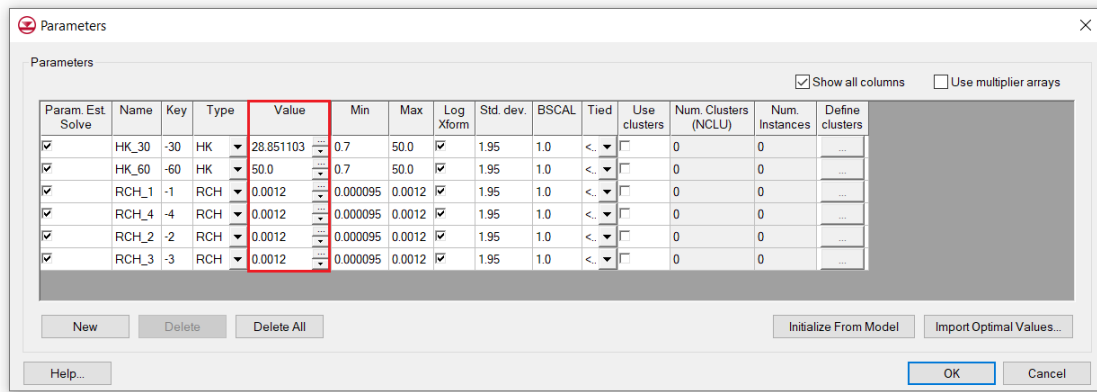
PEST, hidrolik iletkenlik ve beslenme bölgelerinin tanımlanmasını, bu bölgelerin parametre olarak işaretlenmesini ve her bölge için bir başlangıç değeri atanmasını içerir. Ardından, hesaplanan ve gözlemlenen yük ve akışlar arasındaki hatayı en aza indirmeye çalışırken, bölgelere atanan hidrolik iletkenlik ve beslenme değerlerini ayarlayacaktır.

Çalışmada kullanılan kavramsal model yaklaşımı, bu yöntem için idealdir çünkü kavramsal model, çokgenlerle tanımlanan beslenme ve hidrolik iletkenlik bölgelerinden oluşmaktadır. Her bir çokgene bir ‘anahtar değeri’ atayarak, çokgenler parametre bölgeleri olarak işaretlenir. Anahtar değeri, MODFLOW giriş dosyasında başka bir yerde oluşması beklenmeyen bir değeri olmalıdır. Negatif bir değeri genellikle iyi sonuç vermektedir.

Modelde, iki hidrolik iletkenlik bölgesi ve dört beslenme bölgesinden oluşan altı parametre bölgesi kullanıldı. Gözlem sayısı, yedi adet gözlem kuyusu ve bir adet nehir akış değeri olmak üzere toplamda sekizdir. Parametre bölgeleri kullanılırken tahmin edilen parametre sayısının her zaman gözlem sayısından az olması gerektiği unutulmamalıdır.

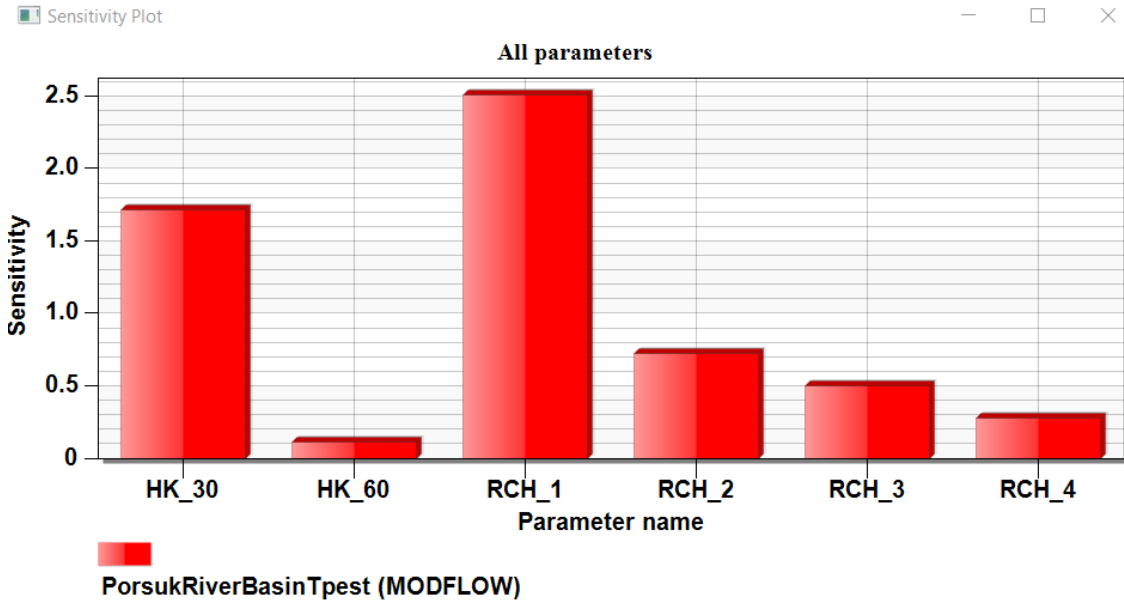
Hidrolik iletkenlik bölgelerine ‘-30’ ve ‘-60’, beslenme bölgelerine ise ‘-1’, ‘-2’, ‘-3’ ve ‘-4’ değerleri girildi. Negatif değerler girildiği için kalibrasyon aşamasında bu bölgeler otomatik olarak karşımıza çıkacaktır.

PEST kalibrasyonu sonucunda en uygun değerler model tarafından belirlendi. Değerlere bakıldığında; beslenme bölgeleri için ‘0.0012’, nehir bölgesi hidrolik iletkenlik değeri ‘50’, diğer bölgeler için ise hidrolik iletkenlik değeri ‘28.85’ olarak PEST tarafından belirlenmiştir (şekil 4.13).



| Param. Est. Solve                   | Name  | Key | Type | Value     | Min      | Max    | Log Xform                           | Std. dev. | BSCAL | Tied | Use clusters             | Num. Clusters (NCLU) | Num. Instances | Define clusters |
|-------------------------------------|-------|-----|------|-----------|----------|--------|-------------------------------------|-----------|-------|------|--------------------------|----------------------|----------------|-----------------|
| <input checked="" type="checkbox"/> | HK_30 | -30 | HK   | 28.851103 | 0.7      | 50.0   | <input checked="" type="checkbox"/> | 1.95      | 1.0   | <.   | <input type="checkbox"/> | 0                    | 0              | ...             |
| <input checked="" type="checkbox"/> | HK_60 | -60 | HK   | 50.0      | 0.7      | 50.0   | <input checked="" type="checkbox"/> | 1.95      | 1.0   | <.   | <input type="checkbox"/> | 0                    | 0              | ...             |
| <input checked="" type="checkbox"/> | RCH_1 | -1  | RCH  | 0.0012    | 0.000095 | 0.0012 | <input checked="" type="checkbox"/> | 1.95      | 1.0   | <.   | <input type="checkbox"/> | 0                    | 0              | ...             |
| <input checked="" type="checkbox"/> | RCH_4 | -4  | RCH  | 0.0012    | 0.000095 | 0.0012 | <input checked="" type="checkbox"/> | 1.95      | 1.0   | <.   | <input type="checkbox"/> | 0                    | 0              | ...             |
| <input checked="" type="checkbox"/> | RCH_2 | -2  | RCH  | 0.0012    | 0.000095 | 0.0012 | <input checked="" type="checkbox"/> | 1.95      | 1.0   | <.   | <input type="checkbox"/> | 0                    | 0              | ...             |
| <input checked="" type="checkbox"/> | RCH_3 | -3  | RCH  | 0.0012    | 0.000095 | 0.0012 | <input checked="" type="checkbox"/> | 1.95      | 1.0   | <.   | <input type="checkbox"/> | 0                    | 0              | ...             |

şekil 4.13. PEST kalibrasyonu ile elde edilen optimize hidrolik iletkenlik ve beslenme değerleri

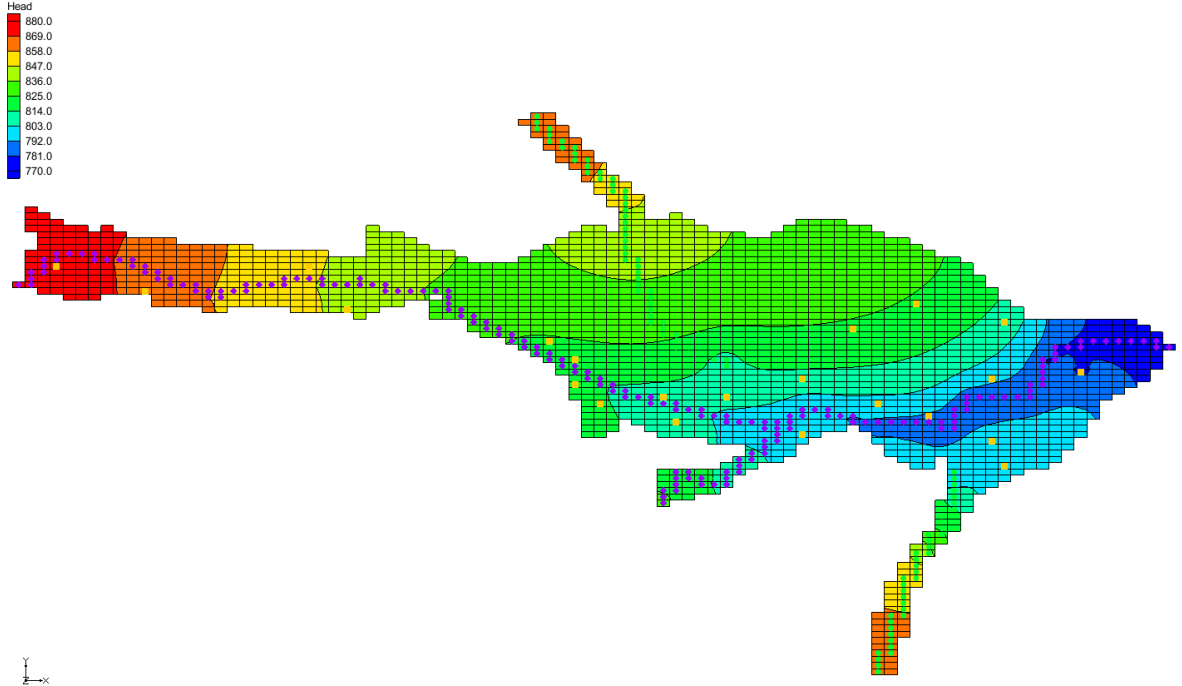


şekil 4.14. PEST parametre hassasiyeti plot diyagramı

Optimum parametre değerlerinin hesaplanmasına ek olarak, PEST her bir parametrenin hassasiyetini de hesaplamaktadır. Bu bilgi, her parametre tahmini

yinelemesinde ‘.sen’ dosyasına yazdırılır. Bu bilgilerin grafiği GMS yazılımında yer alan çizim sihirbazı kullanılarak oluşturulabilir (Şekil 4.14).

#### ***Kararlı hal (steady state) PEST yöntemi ile kalibrasyon sonrası model sonucu***



Şekil 4.15. Kararlı durum PEST kalibrasyonu sonrası modelleme sonucu

#### **4.1.2. Kararlı halden (steady state) yeraltı suyu akış modeline geçiş (transient) ve modelleme çalışması**

Yeraltı suyu akışını simüle etmek, tipik olarak, pompa kuyusu verileri, beslenme-boşalım verileri, nehir ve gözlem kuyularındaki su seviyeleri dahil olmak üzere çeşitli kaynaklardan gelen büyük miktarda zaman serisi verilerinin yönetimini gerektirir. Bu tür verileri toplamak ve biçimlendirmek zor ve zaman alıcı olabilir. GMS, zaman serisi verilerini içe aktarmak ve bu verileri MODFLOW modelleri için girdilere dönüştürmek için araçlar sağlamaktadır.

Geçici verilerle ilişkili zaman değerlerini girerken MODFLOW, zamanın simülasyonun başlangıcındaki sıfır zaman değerine göre skaler zaman değerleri olarak girilmesini gerektirir. Ayrıca süreler, model için seçilen zaman birimi ile uyumlu olmalıdır. Geçici verilerin bir tarih/saat biçiminden göreceli bir saat biçimine dönüştürülmesi gerektiği için, bu yaklaşım zaman alıcı olabilir.

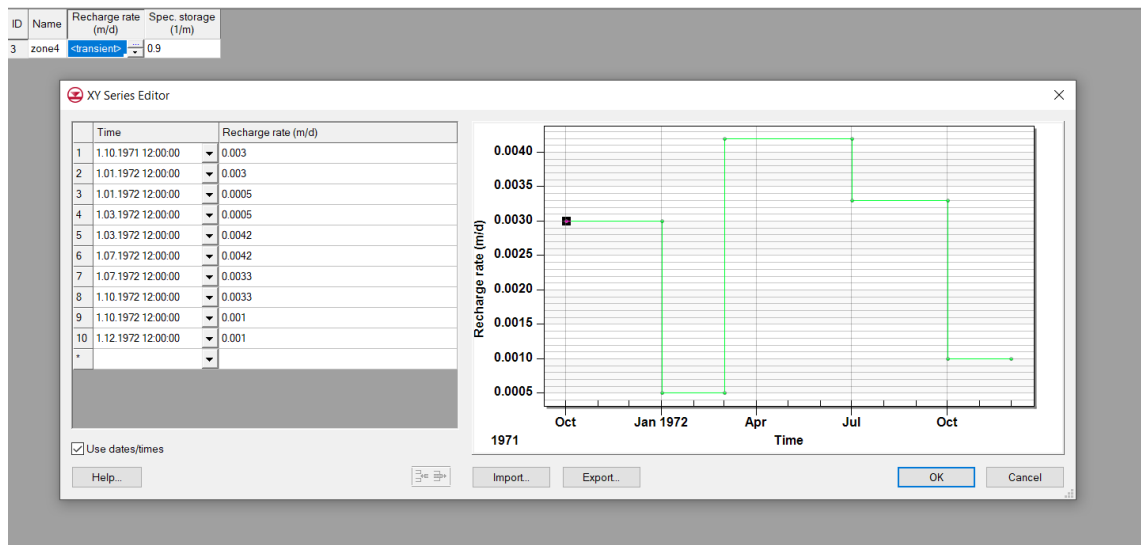
Geçici verileri yönetmek için GMS yazılımında kullanılan strateji, basit bir tarih/saat formatı kullanarak tüm zaman değerlerinin girilmesini mümkün kılar. Geçici veriler, tarih/saat değerleri kullanılarak kavramsal modele girilir. İlk MODFLOW stres periyodunun başlangıcındaki zaman, referans zamandır. Bu, simülasyonda 'time=0.0'a karşılık gelen tarihi/saati temsil eder.

Kavramsal model hücre modeline dönüştürüldüğünde, kavramsal modeldeki zaman değerleri otomatik olarak MODFLOW stres dönemlerine karşılık gelen uygun zaman değerlerine eşlenir. MODFLOW modeli kaydedildiğinde, tarih/saat değerleri uygun göreceli zaman değerlerine dönüştürülür.

Kullanım kolaylığına ek olarak, GMS'de kullanılan geçici veri stratejisinin bir diğer avantajı, kavramsal modelin hem uzamsal hem de zamansal bileşenlerinin hücre aralığı ve stres periyodu boyutundaki ayrıklaştırmadan bağımsız olarak tanımlanabilmesidir. Stres periyodu aralığı değiştirilebilir ve model, saniyeler içinde kavramsal modelden yeniden oluşturulabilir.

#### 4.1.2.1. Model uygulaması

Öncelikle, beslenme bölgeleri için geçici oranlar atanmalıdır. Beslenme bölgeleri için geçici oranlar, kararlı halde kalibre edildi ve PEST uygulanmış değerler üzerinden yaklaşık olarak zamana bağlı olarak belirlendi. Ardından gözlem kuyuları ve akış ile kalibre edildi. Beş poligonla tanımlanan beş bölge bulunmaktadır. Bölge 1 için oran sıfır olarak belirlendi ve diğer dört bölgeye geçici bir oran atandı.



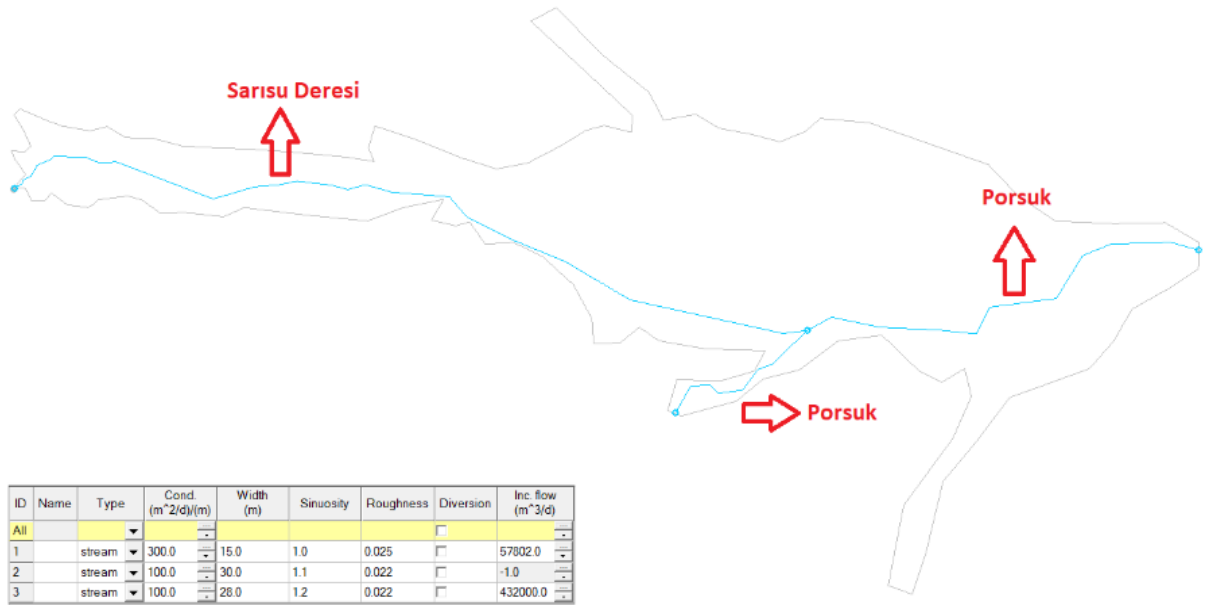
Şekil 4.16. 4.Zon bölgesinde akış halindeki beslenme oranı

Geçici verilere ek olarak, simülasyon ayrıca modeldeki altı adet kuyu için geçici bir pompaj programı içermektedir. Zaman kazanmak için kuyu verileri bir metin dosyasından içe aktarıldı. Kuyu konumları önceden tanımlı olduğundan, yalnızca pompalama programının içe aktarılması yeterlidir. Pompaj kuyularının bilgileri Tablo 4.4'te gösterilmektedir.

**Tablo 4.4.** Modele aktarılan pompaj kuyusu verileri

| Kuyu Adı   | Tarih      | Saat     | Debi (Q) (m <sup>3</sup> /d) |
|------------|------------|----------|------------------------------|
| INONU      | 1.10.1971  | 07:00:00 | 0                            |
| INONU      | 1.08.1972  | 12:00:00 | -259.2                       |
| INONU      | 1.09.1972  | 15:00:00 | -2073.6                      |
| INONU      | 1.10.1972  | 12:00:00 | 0                            |
| OKLUBALI   | 1.10.1971  | 12:00:00 | 0                            |
| OKLUBALI   | 1.08.1972  | 08:00:00 | -86.4                        |
| OKLUBALI   | 15.08.1972 | 10:00:00 | -86.4                        |
| OKLUBALI   | 1.09.1972  | 11:00:00 | 0                            |
| SATILMIS   | 1.10.1971  | 08:00:00 | 0                            |
| SATILMIS   | 1.08.1972  | 09:00:00 | -34.56                       |
| SATILMIS   | 15.08.1972 | 12:00:00 | -1036.8                      |
| SATILMIS   | 1.10.1972  | 12:00:00 | 0                            |
| ESKISEHIR1 | 1.10.1971  | 14:00:00 | 0                            |
| ESKISEHIR1 | 1.01.1972  | 14:00:00 | -1399.68                     |
| ESKISEHIR1 | 1.08.1972  | 07:00:00 | -1555.2                      |
| ESKISEHIR1 | 1.11.1972  | 12:00:00 | -1123.2                      |
| ESKISEHIR1 | 1.02.1972  | 09:00:00 | -1123.2                      |
| ESKISEHIR1 | 1.04.1972  | 12:00:00 | 0                            |
| ESKISEHIR2 | 1.10.1971  | 12:00:00 | 0                            |
| ESKISEHIR2 | 1.08.1972  | 14:00:00 | -1036.8                      |
| ESKISEHIR2 | 1.04.1972  | 14:00:00 | -1741.824                    |
| ESKISEHIR2 | 1.07.1972  | 07:00:00 | -1468.8                      |
| ESKISEHIR3 | 1.10.1971  | 07:00:00 | 0                            |
| ESKISEHIR3 | 1.01.1972  | 12:00:00 | -950.4                       |
| ESKISEHIR3 | 1.11.1972  | 12:00:00 | -432                         |
| ESKISEHIR3 | 1.12.1972  | 14:00:00 | 0                            |

Akifer depolama katsayısının atanması gereklidir. Çalışma tek katmanlı olarak gerçekleştirildiğinden, serbest akifere belirli bir verim atanmalıdır. Kararlı halden farklı olarak, nehir akışı farklı şekilde tanımlanmalıdır. Sabit seviye (specified head) olarak belirlenen akış için gerekli değerler atandı. İki nehir kolu birleşerek Porsuk Çayı'nı oluşturmaktadır. Sistem bu birleşmeyi otomatik olarak algıladığından, sadece iki nehir kolu için akış hızı (flow rate) değerlerinin girilmesi gerekmektedir. Model, otomatik olarak akışı toplam akışa diğer unsurlarla birlikte dönüştürmektedir. Nehir akışı, 'Drain' veya 'River' paketleri kullanılarak tanımlanmamıştır; bu, yeraltı suyu akışının modellenmesi ve etkileşiminin oluşturulması amacıyla. 'Drain' ve 'River' paketleri, elde edilen sonucun başka bir yüzey akış modeli ile etkileşimini sağlamamaktadır. Bundan dolayı modelleme çalışması, 'Stream-Flow Routing (SFR2)' paketi ile devam ettirilmiştir.

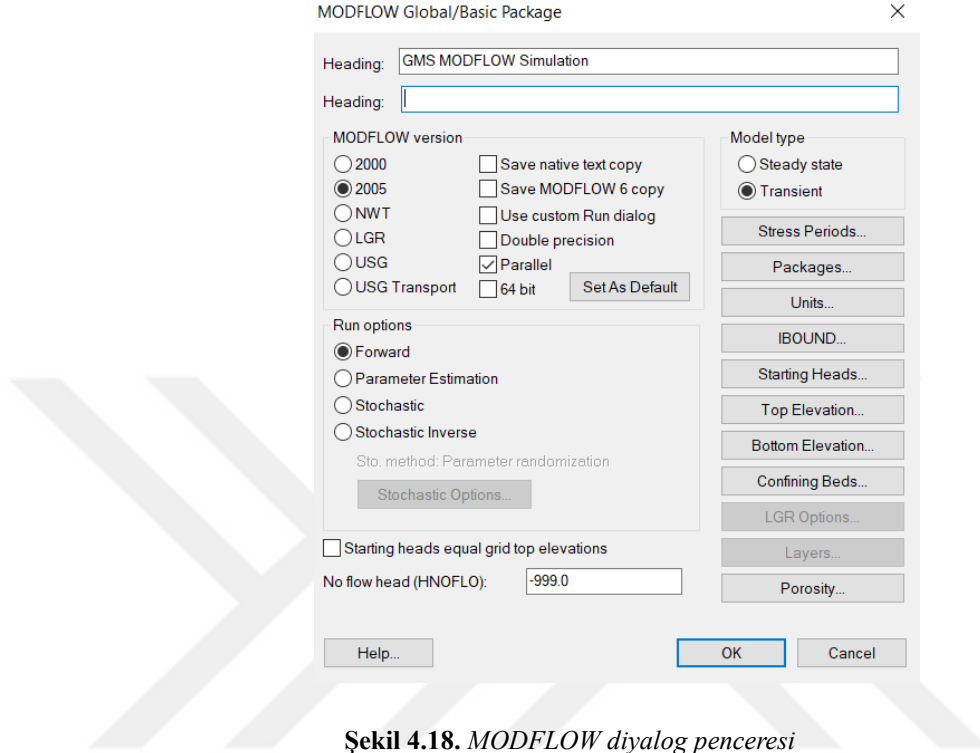


Şekil 4.17. Modele tanımlanan akış verileri

#### 4.1.2.2. Stres periyodu

MODFLOW, zamanı stres dönemleri ve zaman adımları kullanarak ayrıştırır. Her gerilim dönemi için bir zaman uzunluğu belirlenir ve sınır koşulları (veya gerilmeler), bir gerilim döneminin başlangıcında değişebilir. Stres dönemleri zaman adımlarına bölünür. Kavramsal modeli dönüştürmeden önce stres dönemlerinin belirlenmesi gereklidir.

Stres dönemlerinin, harita modülündeki giriş verilerinin değiştiği sürelerle uyumlu olması gereklidir. Şekil 4.18’de görüldüğü gibi, MODFLOW diyalog penceresi açılmış ve model tipi ‘transient (akışa geçme hali)’ olarak seçilmiştir.



Şekil 4.18. MODFLOW diyalog penceresi

Halihazırda bir sabit durum (kararlı hal) modeli ve çözümü mevcut olduğundan, çözüm akış modeli (transient model) için başlangıç noktası olarak kullanıldı. Stres periyodu için 1.01.1971 tarihi başlangıç tarihi olarak görünmektedir, ancak bu durum kararlı hal (steady state) durumundadır. Bu tarih, yer altı suyu akışı için başlangıç zamanını ifade etmektedir.

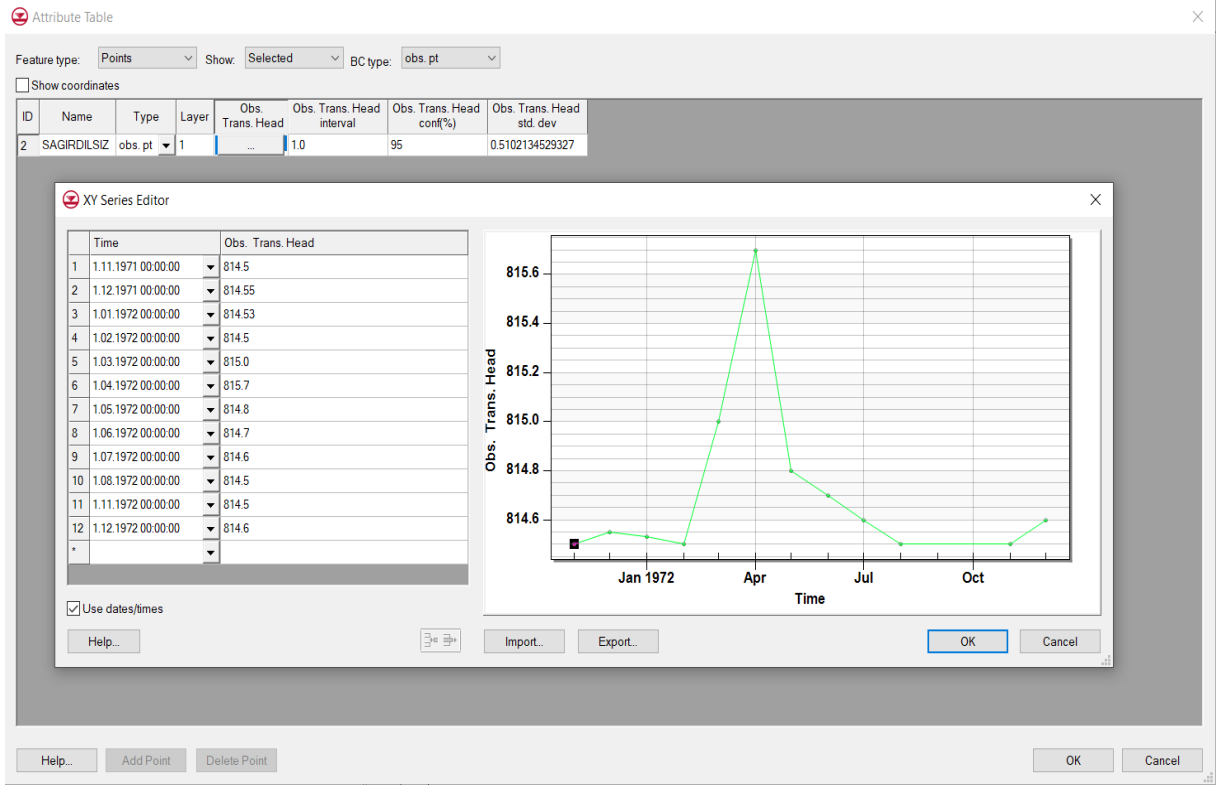
Yeraltı suyu akışının modelleme çalışması, 1 Ekim 1971 ile 30 Eylül 1972 tarihleri arasında gerçekleştirildi ve bu zaman aralığı her biri iki bölüme ayrılmış tarih dilimlerinden oluşmaktadır. Başlangıç ve bitiş tarihleri, stres periyotları sayısı ve zaman dilimi bölünme değerleri, modele girilen verilerin tarihleri ve türüyle uyumlu olmalıdır.

#### Model:

1. Periyotta, yeraltı suyu akışı devam ederken kuyulardan su çekilerek su tablasının aşağıya çekilmesi simüle edilmiştir.
2. Periyotta ise, kuyulardan su çekiminin durması ve su tablasının yukarıya doğru yükselmesi durumları yeraltı suyu akışında simüle edilmektedir.

#### 4.1.2.3. Modelin kalibrasyonu

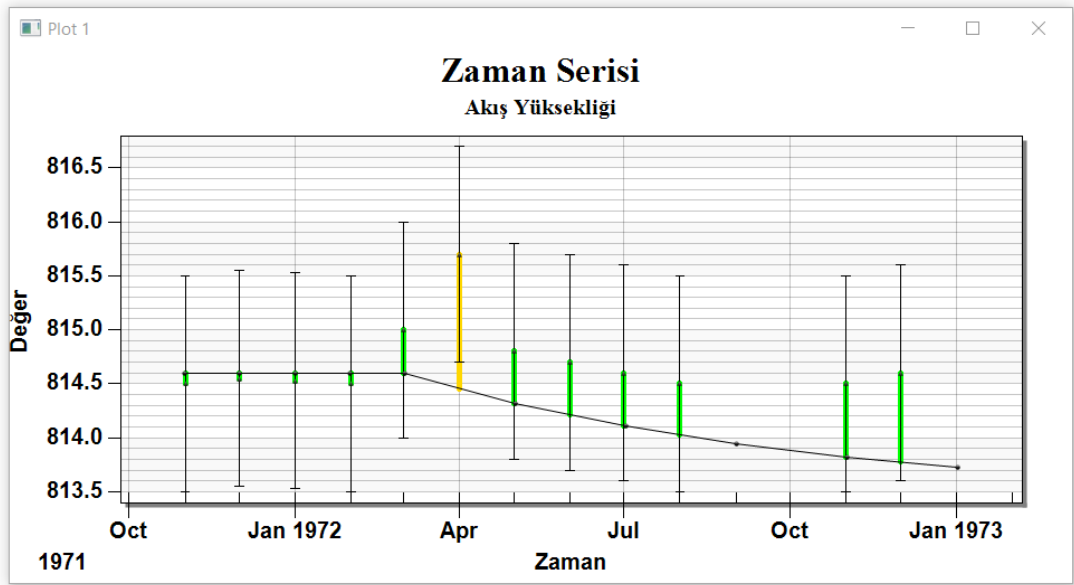
Modele, ‘observation (gözlem)’ adında yeni bir bileşen tanımlandı. Model altlığına uygun bir nokta oluşturularak zaman serisine bağlı olarak gözlemlenen su tablası yükseklikleri ilgili noktaya ‘observation data (gözlem verisi)’ olarak girildi. Sisteme girilen gözlem yükseklik verileri Şekil 4.19’da gösterilmektedir. Modelin stres periyoduyla uyumlu olarak, bir zaman serisinde gözlemlenen noktadaki su tablası yükseklik değişimleri sisteme dahil edilmiştir.



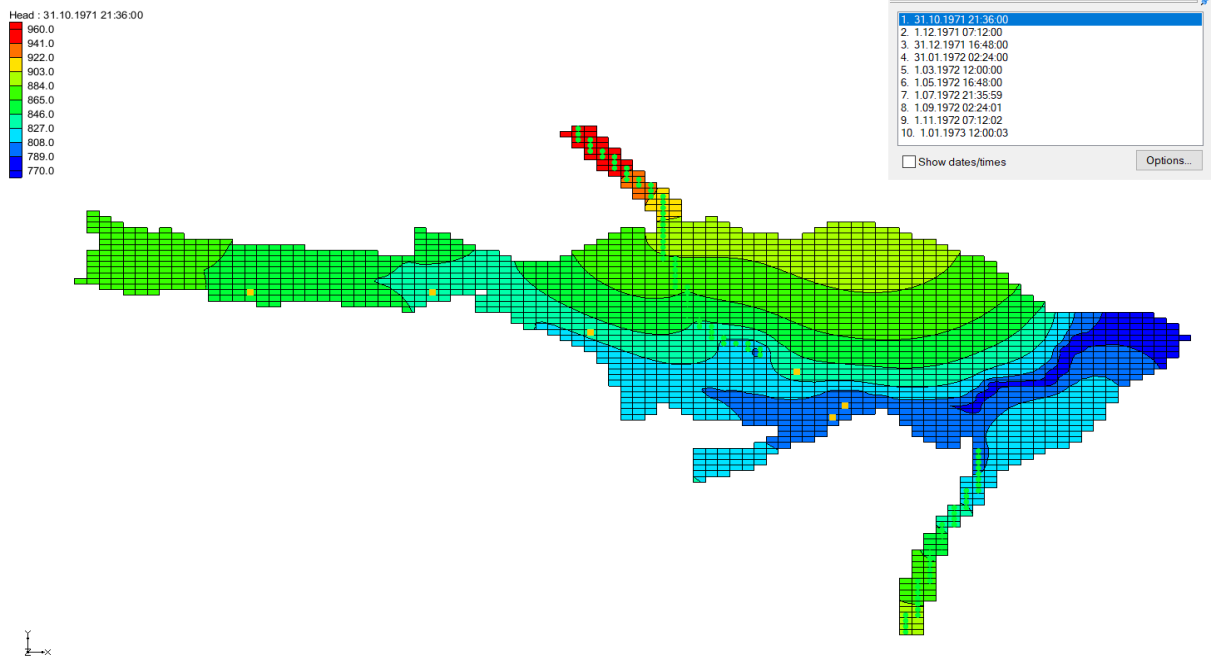
Şekil 4.19. Akış modelinde kalibrasyon için modele girilen gözlem verileri

#### 4.1.2.4. Kararlı halden (steady state) yeraltı suyu akış modeline (transient) geçiş ve modelleme sonuçları

Modelin çalıştırılmasıyla birlikte, stres periyoduna uygun olarak simüle edilen yeraltı suyu akışının zaman içindeki değişimini ve modele girilen gözlem verileri ile uyumunu gösteren bir diyagram oluşturuldu (Şekil 4.20)



Şekil 4.20. Yeraltı suyu yükseklik değişimi-zaman diyagramı



Şekil 4.21. Yeraltı suyu akış modeli sonuçları

#### **4.1.3. Akarsuyun yeraltı suyu ile etkileşimi**

Sarısu Deresi ve devamındaki Porsuk Çayı, çalışma alanındaki akarsuları temsil etmektedir. GMS yazılımında bulunan MODFLOW SFR2 paketi, akış yönlendirmesini ve akışların altındaki doymamış akışı modellemek için kullanılır. SFR2 paketi, MODFLOW'un akış paketi olan STR1'den türetilmiş bir üst versiyondur. SFR1 paketine çok benzemesine rağmen, aralarındaki temel fark, akışların altında doymamış akışın da modellenmesidir.

##### **4.1.3.1. Etkileşimin modellenmesi ve elde edilen sonuçlar**

Nehir akışını yeraltı suyu akışı ile etkileştirmek için MODFLOW'un SFR2 paketi ile modellenmesi gereklidir. Yeraltı suyu ve yüzey suyu etkileşimi, yalnızca SFR paketleri kullanılarak yapılan simülasyonlarla gerçekleştirilebilir.

MODFLOW'un akış paketleri (STR1, SFR1 ve SFR2), akarsu ve akifer arasındaki ilişkiyi incelemenin yanı sıra, suyun akışını bir akarsu ağı üzerinden yönlendirir.

Yönlendirme işlemi, en üst akış erişimi için belirlenen girişlerin belirlenmesi, akiferdeki sızmanın eklenmesi veya çıkarılması ve geri kalan akışların bir sonraki aşağı yönde akış erişimine giriş akışı olarak aktarılması yoluyla gerçekleştirilir. Bu işlem bir sonraki aşağı yönde erişim için tekrarlanır ve bu şekilde devam eder.

Bu durum, nehir ile akifer arasındaki akışı izleyen 'river (nehir)' paketinden farklıdır. Nehir paketiyle su, nehre girdiğinde modelde kaybolur. Akarsu paketleriyle su, aşağı yönde ilerleyebilir ve muhtemelen başka bir noktadan akifere yeniden girebilir. Nehir paketinden farklı olarak, su derinliği akışa göre hesaplanır ve manuel olarak girilmez. Su derinliğini hesaplamak için 'Manning denklemi' veya derinlik-akış tablosu gibi birkaç farklı seçenek bulunmaktadır.

#### **Modelleme**

Parametreleri modele girilen ve kalibrasyonları gerçekleştirilen yeraltı suyu akış modeli üzerine MODFLOW'un SFR2 paketi ile bir modelleme çalışması gerçekleştirildi. SFR2 paketi ile yapılan modelleme çalışmasında oluşturulan akış segmentleri ve erişimler Şekil 4.22'de gösterilmiştir.

**MODFLOW Stream (SFR2) Package**

Stress period:  Start Time: 1.10.1971 00:00:00  
 End Time: 2.10.1971 00:00:00

☐ Use previous

Closure tolerance for stream depth calc. (DLEAK):

☐ Save ISTCB1 info to list file  
☐ Save ISTCB2 info to \*.istcb2 text file

Segments:

| NSEG | ICALC             | OUTSEG | IUPSEG | IPRIOR            | FLOW (m <sup>3</sup> /d) | RUNOFF (m <sup>3</sup> /d) | ETSW (m/d) | PPTSW (m/d) | ROUGHCH | ROU   |
|------|-------------------|--------|--------|-------------------|--------------------------|----------------------------|------------|-------------|---------|-------|
| 1    | wide channel (1)  | 3      | 0      | All available (0) | 57802.0                  | 0.0                        | 0.0        | 0.0         | 0.03    | 0.0   |
| 2    | cross section (2) | 3      | 0      | All available (0) | 50000.0                  | 0.0                        | 0.0        | 0.0         | 0.025   | 0.045 |
| 3    | cross section (2) | 0      | 0      | All available (0) | -1.0                     | 0.0                        | 0.0        | 0.0         | 0.025   | 0.045 |

Reaches:

| cell ID | ISEG | IREACH | RCHLEN (m)      |
|---------|------|--------|-----------------|
| 1       | 3222 | 1      | 105.20720127081 |
| 2       | 3125 | 1      | 341.01102914601 |
| 3       | 3540 | 1      | 9.2672099228659 |
| 4       | 4247 | 1      | 120.18129147505 |
| 5       | 4348 | 1      | 244.5434948649  |
| 6       | 4449 | 1      | 129.68347304944 |
| 7       | 4550 | 1      | 12.395311188355 |
| 8       | 4954 | 1      | 58.788789617766 |
| 9       | 5056 | 1      | 186.33582253895 |
| 10      | 5158 | 1      | 313.88285546013 |

☒ Display cell IDs  
☐ Display cell ijk

**Şekil 4.22.** MODFLOW stream (SFR2) paketi diyalogu

Akım segmentleri üst tabloda, erişimler ise alt tabloda listelenmiştir. GMS, Harita → MODFLOW işlemi sırasında erişim uzunluklarını (RCHLEN) hesaplamıştır (Şekil 4.22). İletişim kutusunda segment numaraları (NSEG), erişim hücresi kimlikleri ve ISEG veya IREACH numaraları düzenlenemez. Segmentler ve erişimler eklenemez. Bu nedenle SFR2 paketi, önceden oluşturulan ve bütün kalibrasyon aşamaları (manuel ve PEST kalibrasyonları) gerçekleştirilmiş kavramsal modele dayanmaktadır. Akım verileri, yalnızca kavramsal bir modelden MODFLOW'a eşlenerek oluşturulabilir.

### **Modelleme sonuçları**

#### **Akış bütçesi**

Sınırlı bir alandaki yüzey suyu-yeraltı suyu etkileşim sisteminde, belirli bir zaman serisi içinde sisteme giren ve sistemden çıkan su miktarı ile depolamada oluşan değişimi ifade eden denkleme akış bütçesi denir.

Akış bütçesini oluşturabilmek için modellemede gerçekleştirilen hesaplamaların tamamı, GMS içinde MODFLOW tarafından oluşturulan CCF (hücreden hücreye akış) dosyası kullanılarak yapılmaktadır (Şekil 4.23).

|                          | Flow In                 | Flow Out                | Budget Term                   | Flow (m <sup>3</sup> /d) |
|--------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------------|--------------------------|
| <b>Sources/Sinks</b>     |                         |                         | <b>Flow Budget for Zone 1</b> |                          |
| CONSTANT HEAD            | 77,388.752399445        | -580,488.7658234        | <b>IN:</b>                    |                          |
| WELLS                    | 0.0                     | -28,468.79997253        | CONSTANT HEAD                 | 77388.752399445          |
| DRAINS                   | 0.0                     | -52,145.04681396        | WELLS                         | 0.0                      |
| RECHARGE                 | 457,027.65603638        | 0.0                     | DRAINS                        | 0.0                      |
| STREAM LEAKAGE           | 127,670.84008789        | -961.6852416992         | RECHARGE                      | 457027.65603638          |
| <b>Total Source/Sink</b> | <b>662,087.24852371</b> | <b>-662,064.2978516</b> | STREAM LEAKAGE                | 127670.84008789          |
| <b>Zone Flow</b>         |                         |                         | Total IN                      | 662087.24852371          |
| FLOW RIGHT FACE          | 0.0                     | 0.0                     | <b>OUT:</b>                   |                          |
| FLOW FRONT FACE          | 0.0                     | 0.0                     | CONSTANT HEAD                 | 580488.76582336          |
| FLOW LEFT FACE           | 0.0                     | 0.0                     | WELLS                         | 28468.799972534          |
| FLOW BACK FACE           | 0.0                     | 0.0                     | DRAINS                        | 52145.046813965          |
| <b>Total Zone Flow</b>   | <b>0.0</b>              | <b>0.0</b>              | RECHARGE                      | 0.0                      |
| <b>TOTAL FLOW</b>        | <b>662,087.24852371</b> | <b>-662,064.2978516</b> | STREAM LEAKAGE                | 961.68524169922          |
| <b>Summary</b>           | <b>In - Out</b>         | <b>% difference</b>     | Total OUT                     | 662064.29785156          |
| Sources/Sinks            | 22.950672149658         | 0.0034664721289         | <b>SUMMARY:</b>               |                          |
| Cell To Cell             | 0.0                     | 0.0                     | IN - OUT                      | 22.950672149658          |
| <b>Total</b>             | <b>22.950672149658</b>  | <b>0.0034664721289</b>  | Percent Discrepancy           | 0.0034664721289          |

Şekil 4.23. SFR2 paketi ile yapılan modelleme sonucunda hesaplanan akış bütçesi

#### 4.2. Çalışma Alanında Yüzey Suyu Akışının Modellenmesi (PRMS) Ve Yeraltı Suyu Akışı İle Etkileştirilmesi (GSFLOW)

PRMS, çeşitli iklim ve arazi kullanımı kombinasyonlarının, nehir akışı ve havzanın genel hidrolojisi üzerindeki tepkisini değerlendirmek için geliştirilmiş deterministik, dağıtılmış parametrelili, fiziksel süreç tabanlı bir modelleme sistemidir.

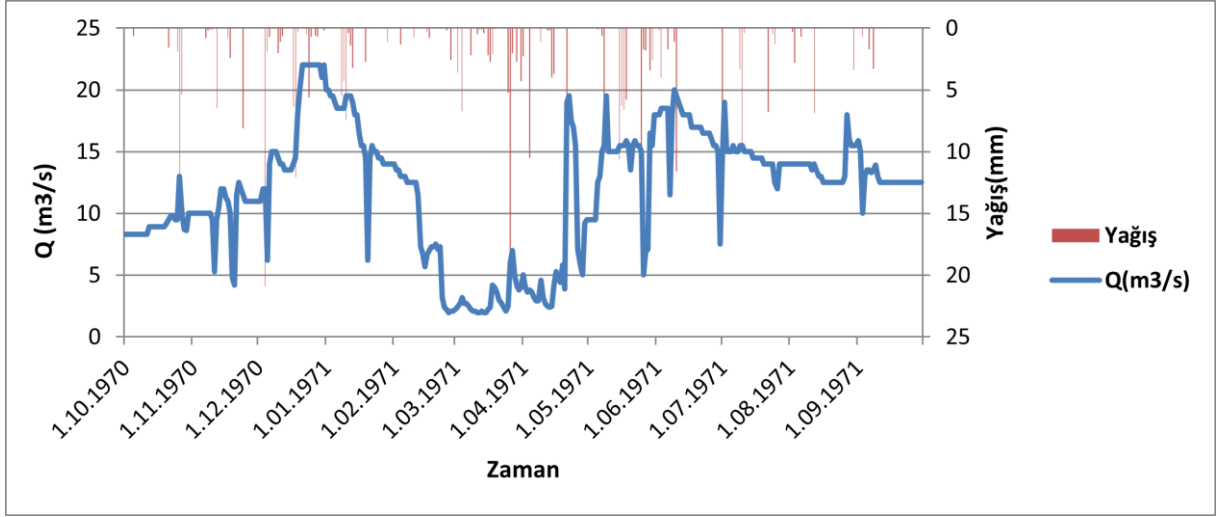
Akışı modellemek için kullanılan her bir hidrolojik bileşen, PRMS içinde fiziksel bir kanuna veya ölçülen ve tahmin edilen karakteristiklerle ampirik bir ilişkiye dayanan bir işlem algoritması ile temsil edilir. Hidrolojik sistemin PRMS içinde nasıl kavramsallaştırılıp ayrıştırıldığı, belirli bir hidrolojik sistemin temsil edilebilmesi için nasıl bir model geliştirilebileceği konusunda temel bir anlayış oluşturmayı kapsamaktadır. Çalışmada, PRMS modelinin GSFLOW ile birleştirilmiş şekli ele alınmıştır.

#### 4.2.1. Modelleme çalışmalarında kullanılan veriler

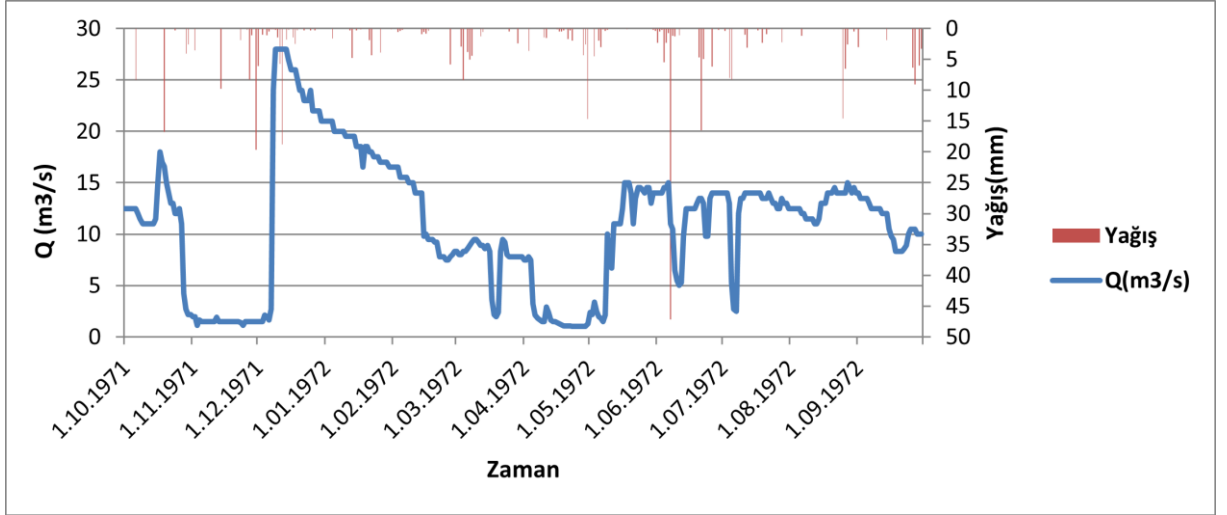
PRMS modeli hem bağımsız olarak hem de GSFLOW modelinin bir parçası olarak çalışabilen bir modeldir. Bu nedenle modelleme çalışmalarında kullanılan veriler, hidrolojik sistemin temsil edildiği simülasyon çalışmalarında her iki model için de geçerlidir. Çalışmada simülasyonun gerçekleştirilebilmesi için, çalışma alanına ait çeşitli meteorolojik, hidrolik ve hidrojeolojik veriler girdi olarak toplanmıştır.

- 1970-1973 yıllarını kapsayan günlük toplam yağış, günlük maksimum ve minimum sıcaklıklar, günlük ortalama sıcaklık gibi iklim verileri MGM kurumundan, günlük ortalama akımlar ise DSİ akım gözlem yıllıklarından elde edildi.
- Mekânsal veriler; çalışma alanını içeren Sayısal Yükseklik Modeli (SYM), arazi kullanımı ve toprak litolojisi haritaları CBS platformunda kullanılmak üzere açık kaynaklardan ve çeşitli kuruluşlardan temin edildi.
- Modellemede kullanılan iklim verileri; havza içinde bulunan, MGM tarafından kurulmuş olan ‘Eskişehir Bölge’ ve ‘Eskişehir Topsu’ adlı meteoroloji gözlem istasyonlarında ölçülen günlük ortalama yağış verileriyle birlikte, günlük ortalama akım verileri DSİ tarafından Odunpazarı ilçesi yakınlarındaki ‘Eşenkara Akım Gözlem İstasyonu’nda kaydedilmiş verilerdir.

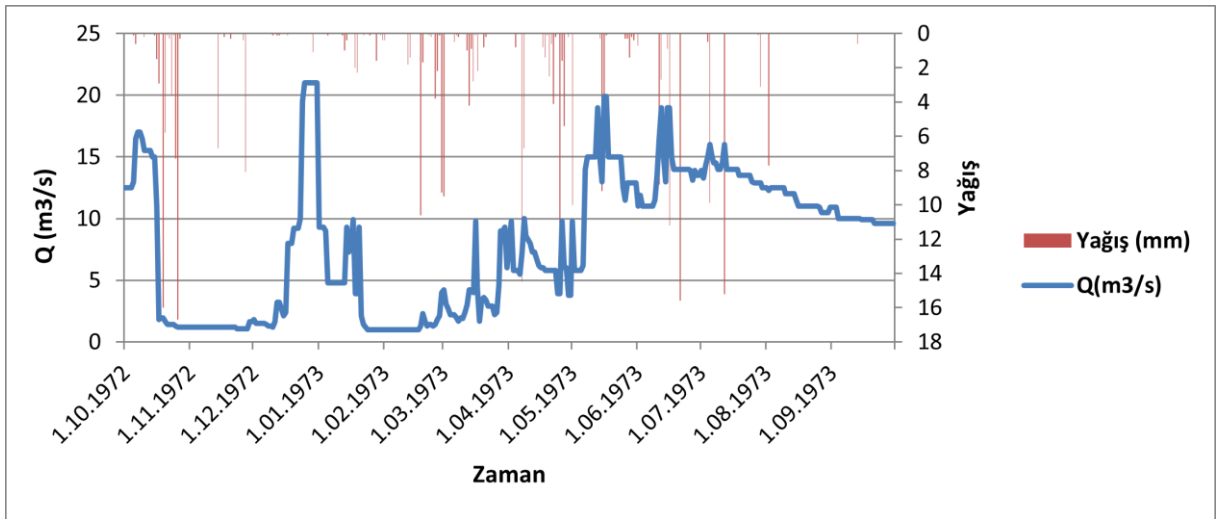
Her iki modelde de ortak olarak kullanılan veriler, 01/10/1970 ile 30/09/1973 tarihleri arasındaki zaman dilimi için oluşturuldu. Veri seti, Eskişehir il merkezinde bulunan 9027 numaralı ‘Eskişehir Topsu’ ve 17126 numaralı ‘Eskişehir Bölge’ meteoroloji istasyonlarından elde edilen günlük toplam yağışlar, günlük maksimum ve minimum sıcaklıklar ile DSİ tarafından ‘Eşenkara Akım Gözlem İstasyonu’nda ölçülen günlük akımları içermektedir. İstasyonlara ait yağış-akış grafikleri, Şekil 4.24, 4.25, 4.26, 4.27, 4.28 ve 4.29’da sunulmuştur.



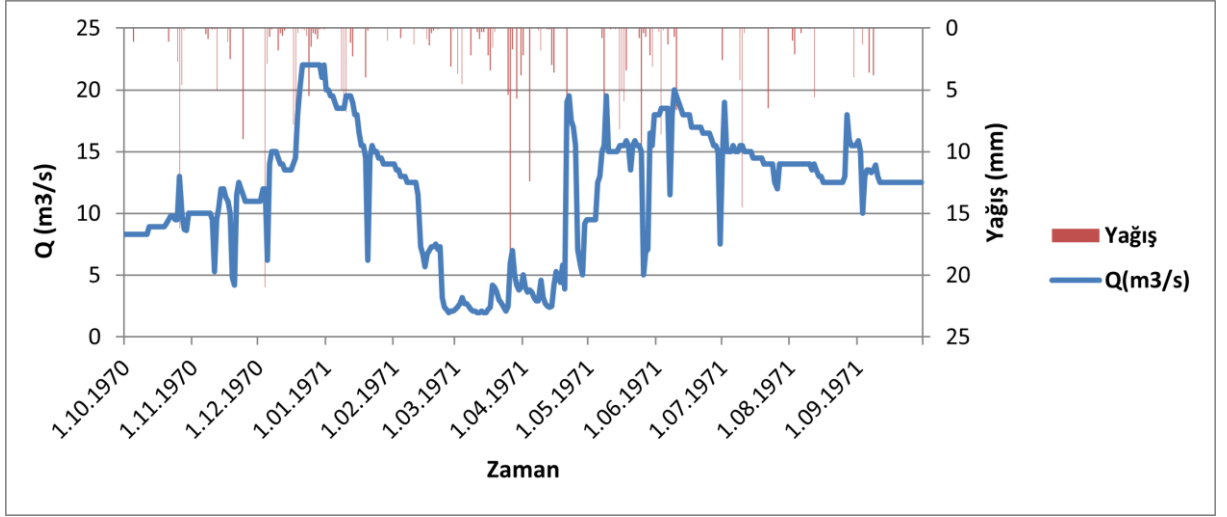
Şekil 4.24. Eskişehir Topsu istasyonu yağış ve Eşenkara akış debisi değerleri (1970 su yılı)



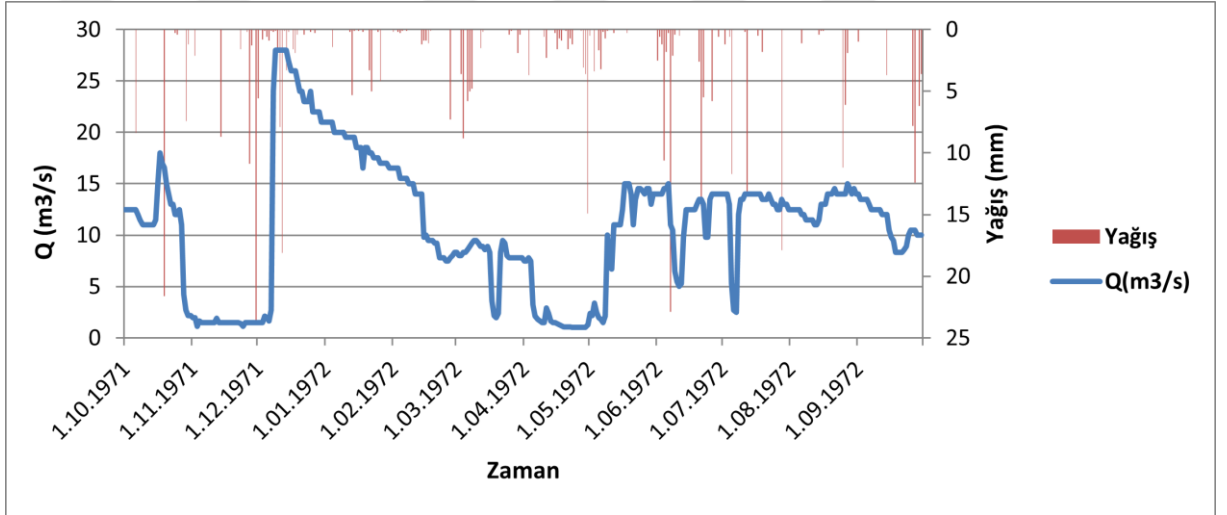
Şekil 4.25. Eskişehir Topsu istasyonu yağış ve Eşenkara akış debisi değerleri (1971 su yılı)



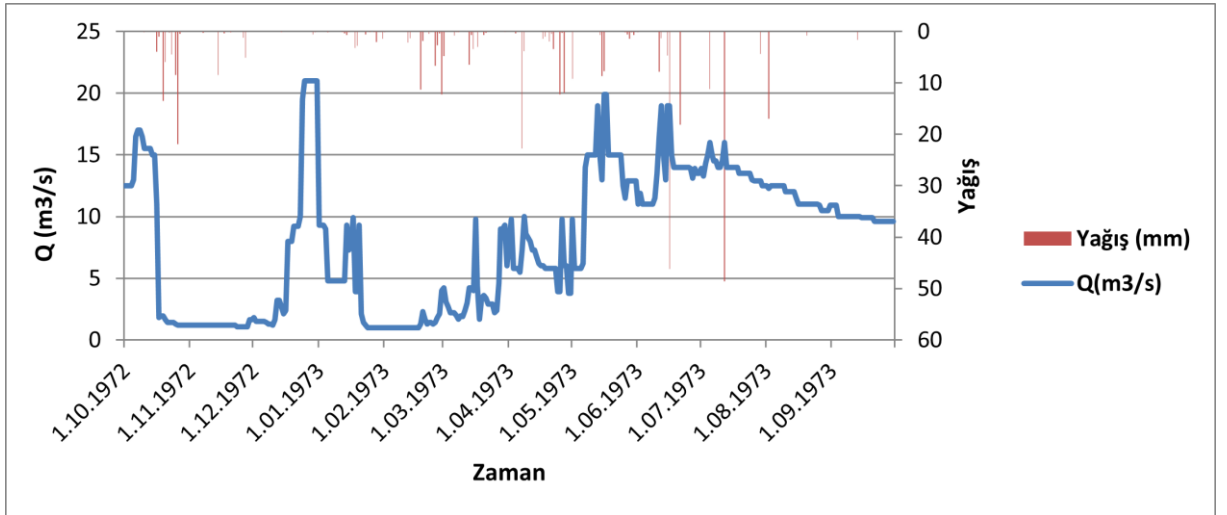
Şekil 4.26. Eskişehir Topsu istasyonu yağış ve Eşenkara akış debisi değerleri (1972 su yılı)



Şekil 4.27. Eskişehir Bölge istasyonu yağış ve Eşenkara akış debisi değerleri (1970 su yılı)



Şekil 4.28. Eskişehir Bölge istasyonu yağış ve Eşenkara akış debisi değerleri (1971 su yılı)



Şekil 4.29. Eskişehir Bölge istasyonu yağış ve Eşenkara akış debisi değerleri (1972 su yılı)

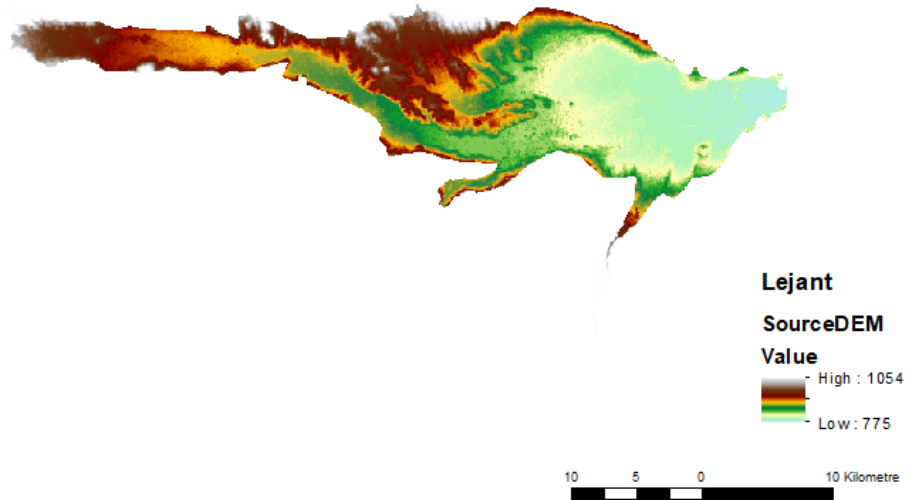
#### 4.2.1.1. CBS platformunda hidrolojik tepki birimlerinin (HTB) oluşturulması

Modelleme çalışmalarında, alansal dağıtılmış parametrelerin belirlenmesi için CBS platformunda üretilen veriler, nehirler, drenaj kanalları, göller ve meteorolojik verileri içeren tüm parametreler HTB bölgelerine ayrıldı ve çalışma alanındaki her bir HTB için gerekli düzenlemeler yapıldı.

Çalışmada, ArcGIS yazılımının ArcSWAT modülü kullanılarak çalışma alanı, yükseklik, jeolojik yapı, eğim ve arazi kullanımı durumları temel alınarak SWAT modellemesi yapılmış ve çalışma alanı HTB alanlarına bölünmüştür. Her bir HTB, bölgenin karakteristik özelliklerinin etkileriyle birlikte otomatik olarak oluşturulmuştur (Şekil 4.34). HTB'lerin karakteristik özellikleri modelden elde edilmiş ve programlama dilinde kodlanarak PRMS ve GSFLOW modellerinin veri, parametre ve kontrol dosyalarında yer almıştır.

Modelleme çalışmalarının gerçekleştirilmesi için yükseklik, eğim, bakı ve jeolojik yapı haritaları CBS platformunda oluşturularak modelleme çalışmalarında kullanıldı. Etüt alanını temsil eden yükseklik haritası Şekil 4.30'da, jeolojik harita ise Şekil 4.31'de sunulmuştur. Yükseklik haritasına göre, çalışma alanında minimum yükseklik 775 m, maksimum yükseklik ise 1054 m olarak belirlenmiştir.

### Modelleme Alanı - Yükseklik Haritası



Şekil 4.30. Modelleme alanının yükseklik haritası

Jeolojik haritaya (Şekil 4.31) göre, çalışma alanının kuzeyinde Be122-2b-3016 kodlu, güneybatısında Bk45-2bc-3026 kodlu, güneydoğusunda ise Xk59-2-3a-3311 kodlu zemin türlerinin hakim olduğu görülmektedir. Be122-2b-3016 kodlu zemin sınıfı kambisol grubu içerisinde yer almaktadır. Kambisol türü topraklar genellikle dağlık bölgelerde görülmektedir ve alt katında ana kayanın etkisinin görüldüğü toprak tipidir. Bk45-2bc-3026 kodlu zemin sınıfı kalsik kambisoller, Xk59-2-3a-3311 kodlu zemin sınıfı ise kalsik xerosols olarak adlandırılan toprak türüdür.

## Modelleme Alanı - Jeolojik Yapı



### Lejant

#### Zemin Sınıfları

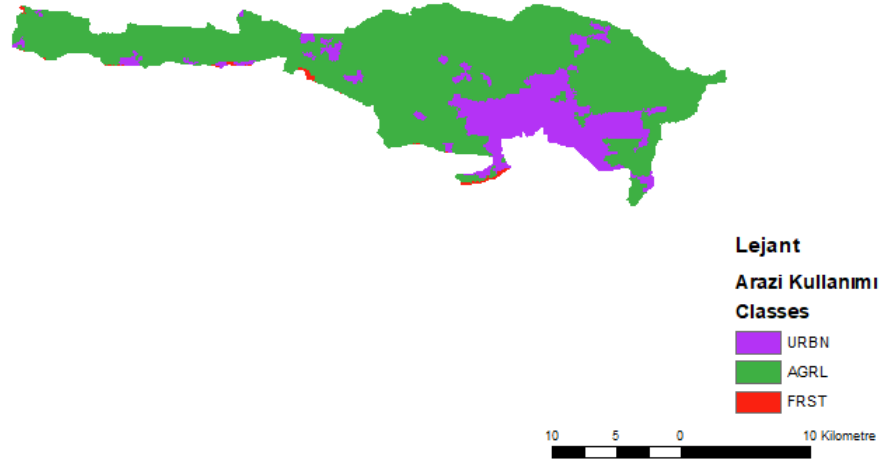
#### Classes

- Be122-2bc-3016
- Bk45-2bc-3026
- Xk59-2-3a-3311

10 5 0 10 Kilometre

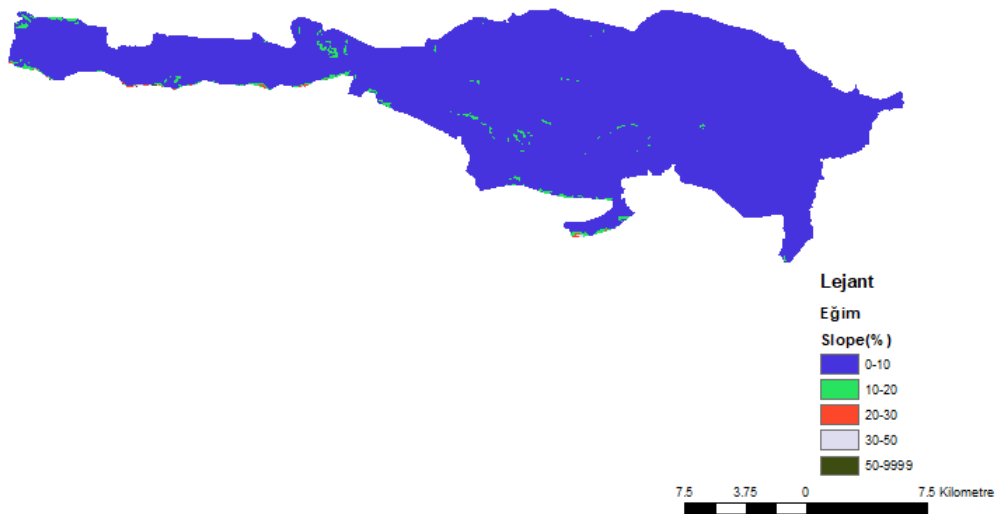
Şekil 4.31. Modelleme alanının jeolojik yapı haritası

## Modelleme Alanı - Arazi Kullanımı



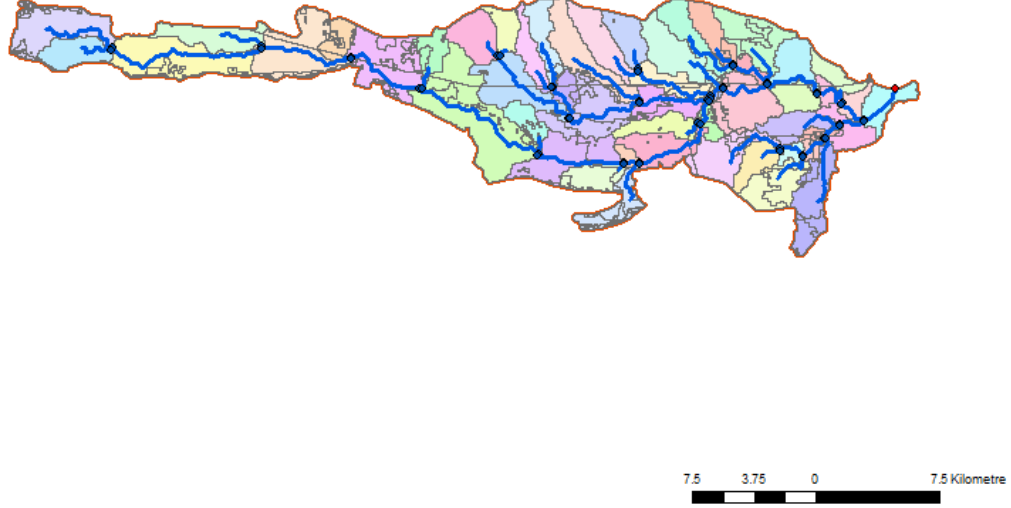
Şekil 4.32. Modelleme alanının arazi kullanımı haritası

## Modelleme Alanı - Eğim Haritası



Şekil 4.33. Modelleme alanının eğim haritası

## Modelleme Alanı - HTB Haritası



Şekil 4.34. Modelleme alanının HTB haritası

### 4.2.2. PRMS model uygulaması

Porsuk Havzası'nın Orta Porsuk bölgesinde yer alan çalışma alanı için hazırlanan veri dosyasında bulunan 'tmax 2' ve 'tmin 2' değişken değerleri; 'Eskişehir Topsu' ve 'Eskişehir Bölge' istasyonlarında ölçülen günlük maksimum ve minimum sıcaklıkları temsil eder. Burada 2 sayısı, kullanılan istasyon sayısını ifade etmektedir. 'Precip 1' değişkeni günlük toplam yağış miktarını, 2 sayısı ise aynı şekilde kullanılan istasyon sayısını belirtir. Günlük ortalama akış değerleri ise 'Eşenkara Akım Gözlem İstasyonu'ndan elde edildiği için veri dosyasında 'runoff 1' olarak ifade edilmiştir.

Şekil 4.35'te sunulan PRMS veri dosyasında zaman serisi verileriyle başlanır. Simülasyonlarda, her bir zaman serisinin 24 saat olarak belirtilmesi gerekmektedir. Satırlar sırasıyla; yıl, ay, gün, saat, dakika ve saniye olmak üzere ilk altı satır zaman serisine aittir. Devamında gelen satırlar ise iki meteorolojik istasyon verisinin modelleme çalışmalarında kullanıldığını belirtir: iki adet günlük maksimum sıcaklık verisi, iki adet günlük minimum sıcaklık verisi, iki adet yağış verisi ve bir adet günlük ortalama akış verisi.

```

Porsuk Data Dosyası: Eskisehir Topsis ve Eskisehir Bolge
Meteorolojik İstasyonları ve Esenkara Akim Gözlem İstasyonu

// tmax stations are:
//   ESKISEHIR TOPSU
//   ESKISEHIR BOLGE
tmax 2

// tmin stations are:
//   ESKISEHIR TOPSU
//   ESKISEHIR BOLGE
tmin 2

// precip stations are:
//   ESKISEHIR TOPSU
//   ESKISEHIR BOLGE
precip 2

// runoff value is:
//   ESENKARA AGI
runoff 1

#####
#####
1970 10 1 0 0 0 61.3 61 27.5 30.4 0 0 8.3
1970 10 2 0 0 0 74.7 73.2 35.4 36.7 0 0 8.3
1970 10 3 0 0 0 69.8 68.7 47.8 52 0 0 8.3
1970 10 4 0 0 0 75 73.6 50 52.5 0 0 8.3
1970 10 5 0 0 0 66.4 65.3 42.6 44.6 0.6 1.1 8.3
1970 10 6 0 0 0 55.9 53.4 30.2 33.1 0 0 8.3
1970 10 7 0 0 0 64.4 63.9 45.5 47.1 0 0 8.3
1970 10 8 0 0 0 68.2 67.3 33.8 38.5 0 0 8.3
1970 10 9 0 0 0 65.7 63 38.1 45.3 0 0 8.3
1970 10 10 0 0 0 59.5 58.5 36.9 42.3 0 0 8.3
1970 10 11 0 0 0 64.4 63.5 32 38.1 0 0 8.3
1970 10 12 0 0 0 59.7 59.7 41.5 45.1 0 0 8.9
1970 10 13 0 0 0 59.5 58.3 44.8 46 0 0 8.9
1970 10 14 0 0 0 59.5 58.5 44.4 45 0 0 8.9
1970 10 15 0 0 0 65.3 64.2 28.2 32.2 0 0 8.9

```

Şekil 4.35. PRMS veri dosyası

Tablo 4.5. PRMS zaman serisi verileri (Kavşut, 2019).

| Değişken  | Birim             | Aralık     | Boyut değişkeni | Açıklama                                                                |
|-----------|-------------------|------------|-----------------|-------------------------------------------------------------------------|
| Tmax      | F                 | -50 ve 150 | Ntemp           | Günlük maksimum sıcaklık değeri                                         |
| Tmin      | F                 | -50 ve 150 | Ntemp           | Günlük minimum sıcaklık değeri                                          |
| Precip    | mm                | 0 <        | Nrain           | İstasyonların her birinde ölçülen yağış değeri                          |
| Runoff    | m <sup>3</sup> /s | 0 <        | Nobs            | Akım gözlem istasyonunda ölçülen akış                                   |
| form_data | Birimsiz          | 0,1,2      | Nform           | Meydana gelen yağışın şekli (0:kararsız, 1:kar yağışı, 2:yağmur yağışı) |

Parametre dosyası, PRMS ve GSFLOW için gerekli parametreleri ve boyut ifadelerini içerir. Dosya üç bölümden oluşur: başlık, boyutlar ve parametreler. Parametre dosyasında bulunan değişkenlerden ‘ntemp’, sıcaklık verilerinin elde edildiği istasyon sayısını; ‘nrain’, yağış ölçümlerinin elde edildiği istasyon sayısını; ‘nobs’, akım gözlem istasyonu sayısını ve ‘nform’, yağışın şeklini ifade etmektedir.

Kontrol dosyası, modelin yönetim amaçlı görevlerinin ayarlandığı dosyadır. Kontrol dosyasının ikinci satırında bulunan ‘model\_mode’ kontrol parametresi, modelin türünü belirtir. Modelleme çalışmalarında GSFLOW kullanıldığı için ‘4’ değeri girilmiştir (Şekil 4.36).

```

porsuk.control - Not Defteri
Dosya Düzen Biçim Görünüm Yardım
Porsuk Cayi Havzasi Kontrol Dosyasi (PRMS 5.1.0)
####
model_mode
1
4
PRMS5
####
executable_desc
1
4
PRMS version 5.1.0
####
executable_model
1
4
../../bin/prms
####
start_time
6
1
1970
10
1
0
St 1, Stn 1    100%    Windows (CRLF)    UTF-8

```

Şekil 4.36. PRMS kontrol dosyası

#### 4.2.2.1. PRMS modelin kalibrasyonu ve validasyonu

Hidrolojik modellerin tahmin becerisini ve uyumluluğunu değerlendirmek için çoğunlukla (NSE) verimlilik katsayısı kullanılmaktadır. NSE bağıntısı, denklem 3.6’da gösterilmiştir.

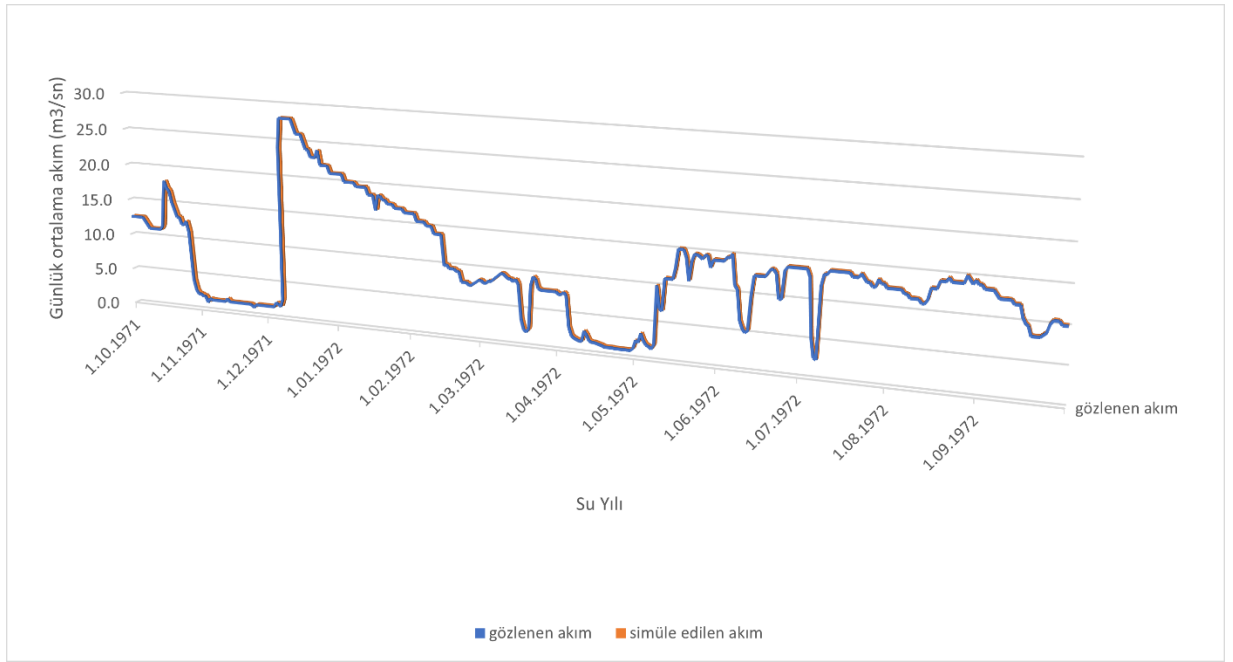
$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (Q_{obs}(t) - Q_{sim}(t))^2}{\sum_{t=1}^T (Q_{obs}(t) - \bar{Q}_{obs})^2} \quad (3.6)$$

Denklemden;

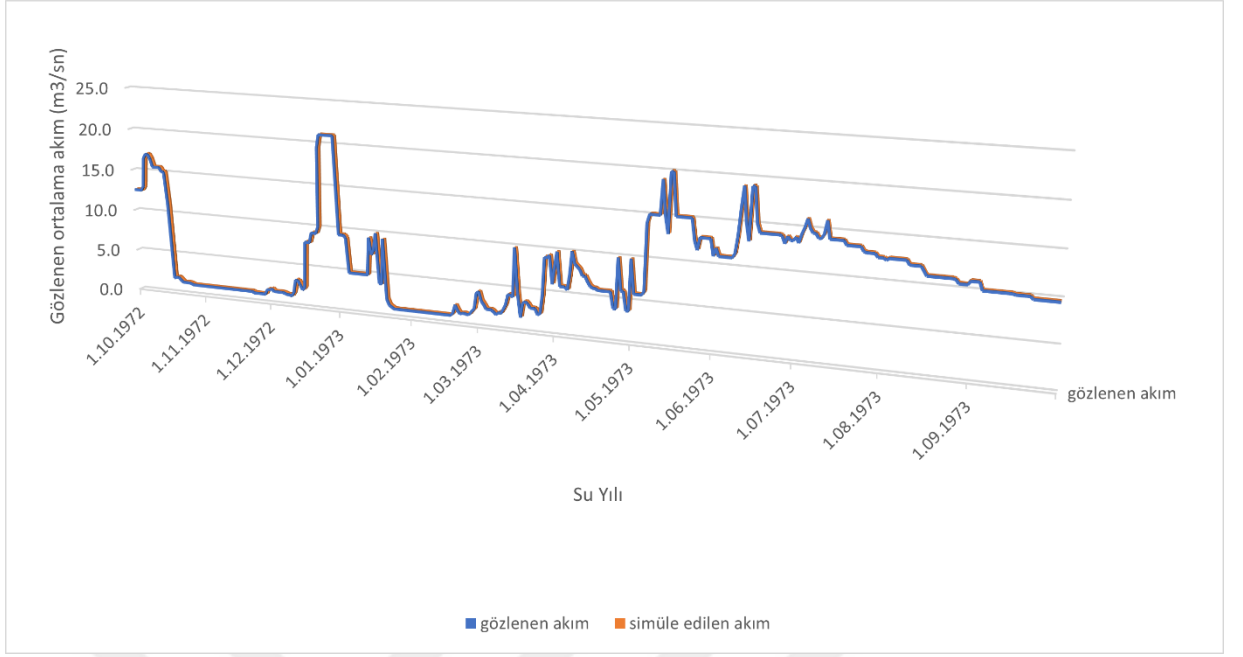
- $Q_{obs}(t)$  = gözlemlenen akış değeri,
- $Q_{sim}(t)$  = model tarafından simüle edilen akış değeri,
- $\bar{Q}_{obs}$  = gözlemlenen akışların zaman serisi ortalaması,
- T = zaman periyodunu ifade eder.

NSE verimliliği, modelin zaman serisi hata karelerinin gözlemlenen zaman serisi hata karelerinin varyansına oranıyla hesaplanmaktadır. NSE değerinin 1’e eşit olması,

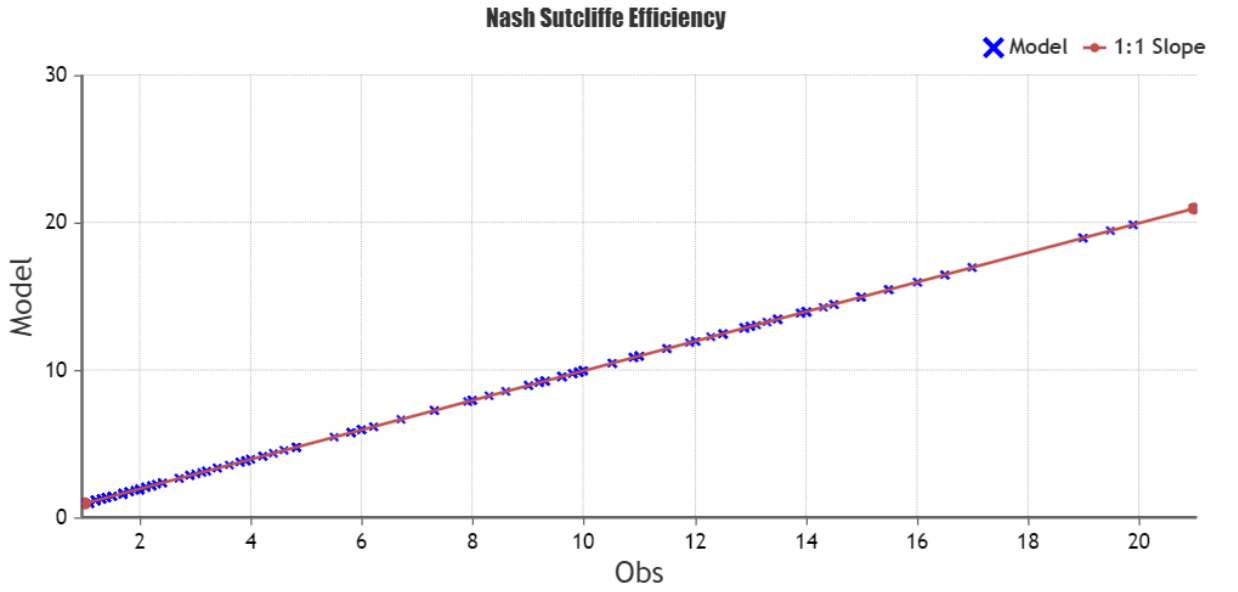
modelin gözlemlenen verilere mükemmel uyum sağladığını ve tahmin edilen hata varyansının sıfıra eşit olduğunu ifade eder. Değerin 0 ile 1 arasında olması genellikle model performansının kabul edilebilir olduğunu gösterir. 0'dan küçük olması durumunda ise gözlenen değerlerin, hesaplanan değerlerden daha iyi olduğu ve modelin yetersiz olduğu anlamına gelir. NSE verimliliğinin performans ölçümünde önemli olmasının nedeni, gözlenen ve modellenen veriler arasındaki uyumu en iyi şekilde temsil eden bir ölçüt olmasıdır (http-9).



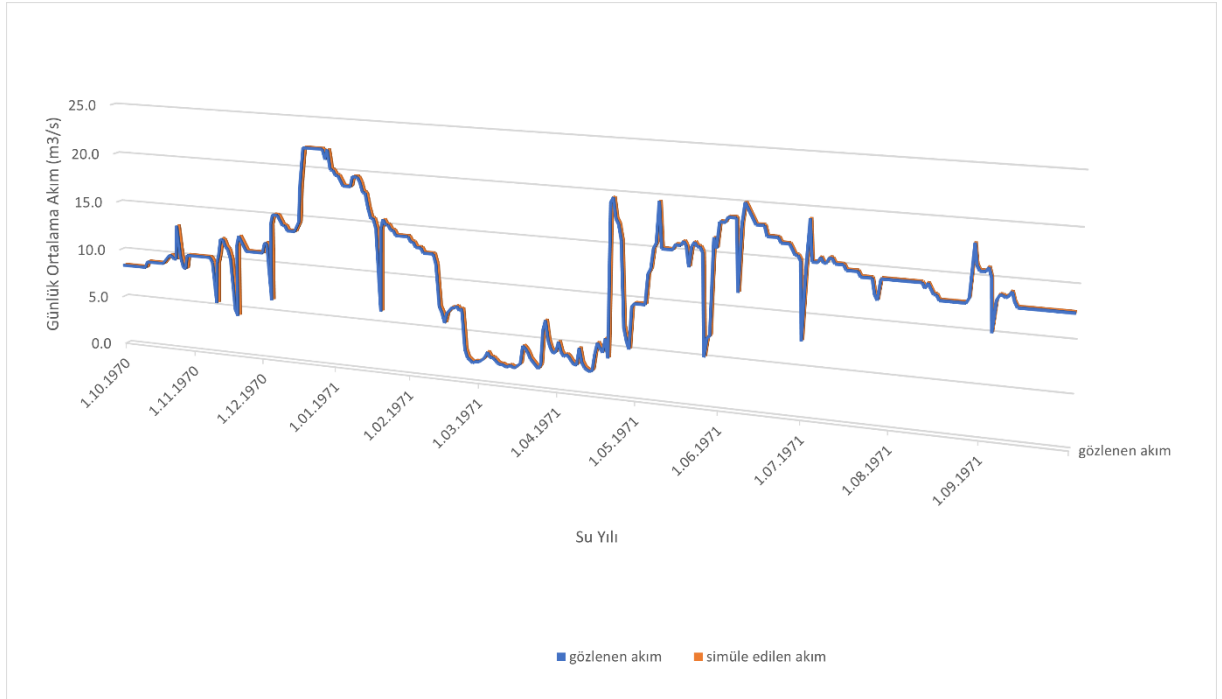
**Şekil 4.37.** PRMS modeli ile yapılan simülasyon sonucunda hesaplanan ve gözlenen akış değerleri (1971 su yılı)



**Şekil 4.38.** PRMS ile modellenen ve Eşenkara akım gözlem istasyonunda ölçülen günlük ortalama akış değerleri (1972 su yılı kalibrasyon periyodu)



**Şekil 4.39.** PRMS modeli kalibrasyonu için NSE (1972 su yılı)



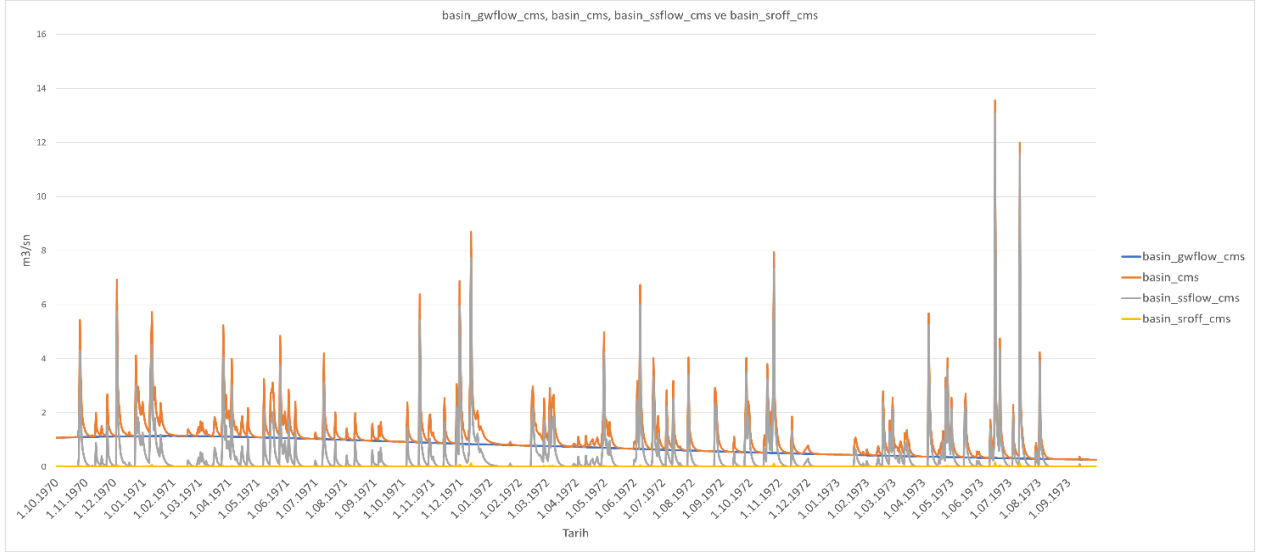
çalışmaları sonucunda, her üç su yılının Aralık ve Nisan ayları arasında simüle edilen akışların, gözlenen akışlardan yer yer çok az miktarda düşük olduğu gözlenmiştir.

**Tablo 4.6.** *Modelleme çalışmasında kullanılan PRMS modülleri*

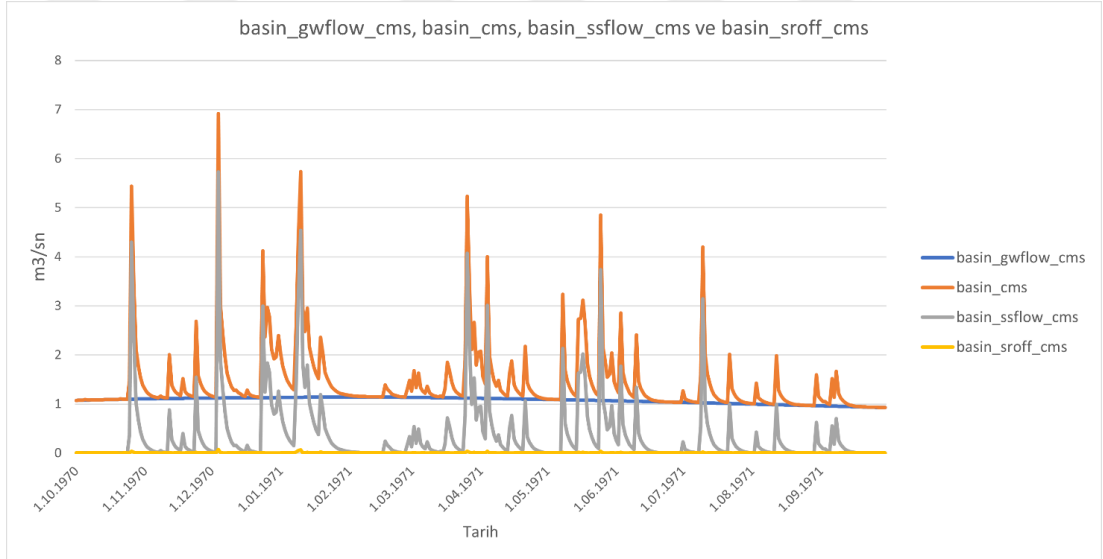
| Modül            | Açıklama                                                                                                 | Birim              |
|------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|
| basin_gwflow_cms | Akarsu ağına havza alanı ağırlıklı ortalama yeraltı suyu akış                                            | m <sup>3</sup> /sn |
| basin_sroff_cms  | Akarsu ağına havza alanı ağırlıklı ortalama yüzey akışı                                                  | m <sup>3</sup> /sn |
| basin_ssflow_cms | Yerçekimi ve tercihli akışlı rezervuarlardan akarsu ağına havza alanı ağırlıklı ortalama karşılıklı akış | m <sup>3</sup> /sn |
| basin_cms        | Havzayı akarsu ağı üzerinden terk eden akarsu akışı                                                      | m <sup>3</sup> /sn |
| Runoff           | Akış                                                                                                     | m <sup>3</sup> /sn |
| basin_pweqv      | Havza alanı ağırlıklı ortalama kar kütlesi su eşdeğeri (buzul hariç)                                     | mm                 |
| basin_snowmelt   | Havza alanı ağırlıklı ortalama kar erimesi (buzuldaki kar hariç)                                         | mm                 |
| basin_rain       | Havza alanı ağırlıklı ortalama yağış                                                                     | mm                 |
| basin_snow       | Havza alanı ağırlıklı ortalama kar yağışı                                                                | mm                 |

#### 4.2.2.2. PRMS ile modelleme sonuçları

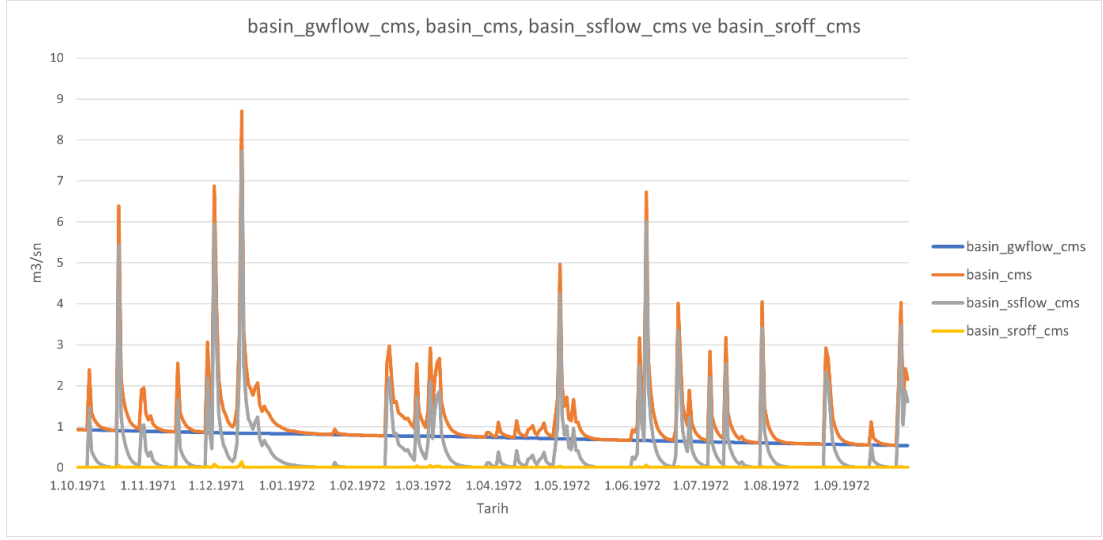
PRMS modelleme çalışmaları ile simüle edilen akış (runoff) değerleri ile gözlenen değerler arasında kalibrasyon ve validasyon gerçekleştirilmiştir. Modelleme çalışmaları sonucunda; akarsu ağına havza alanı ağırlıklı ortalama yer altı suyu akışı (basin\_gwflow\_cms), havzayı akarsu ağı üzerinden terk eden akarsu akışı (basin\_cms), yerçekimi ve tercihli akışlı rezervuarlardan akarsu ağına havza alanı ağırlıklı ortalama karşılıklı akış (basin\_ssflow\_cms) ve akarsu ağına havza alanı ağırlıklı ortalama yüzey akışı (basin\_sroff\_cms) değerleri elde edilmiştir. 1970-1973 yıllarına ait verilerle gerçekleştirilen modelleme çalışmasının tamamı Şekil 4.42’de, 1970, 1971 ve 1972 su yıllarına dair modelleme çalışmaları ise ayrı şekilde Şekil 4.43, Şekil 4.44 ve Şekil 4.45’te sunulmuştur.



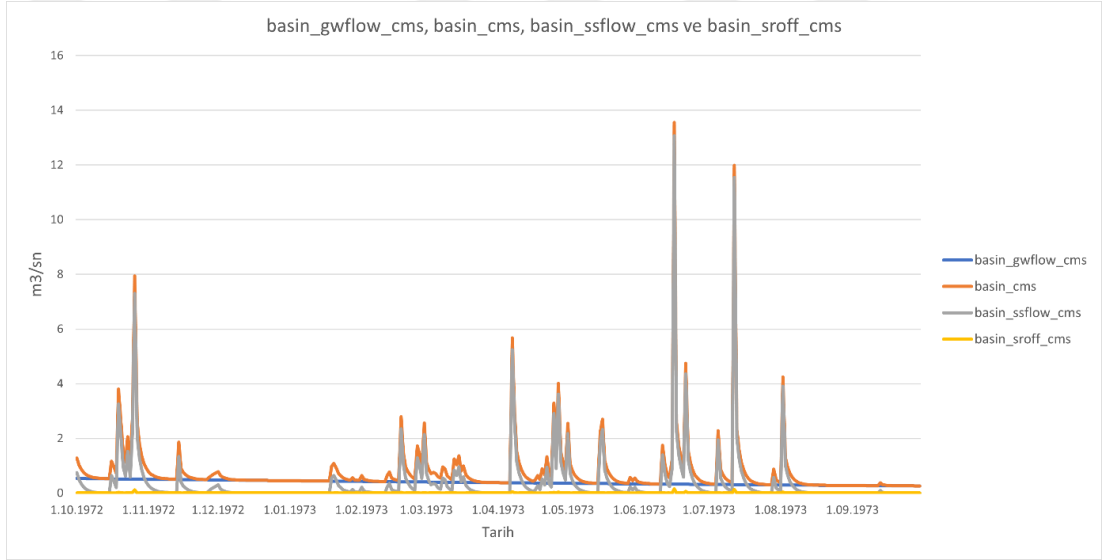
Şekil 4.42. PRMS modelleme sonuçları (1970 – 1973)



Şekil 4.43. PRMS modelleme sonuçları (1970 su yılı)



**Şekil 4.44.** PRMS modelleme sonuçları (1971 su yılı)



**Şekil 4.45.** PRMS modelleme sonuçları (1972 su yılı)

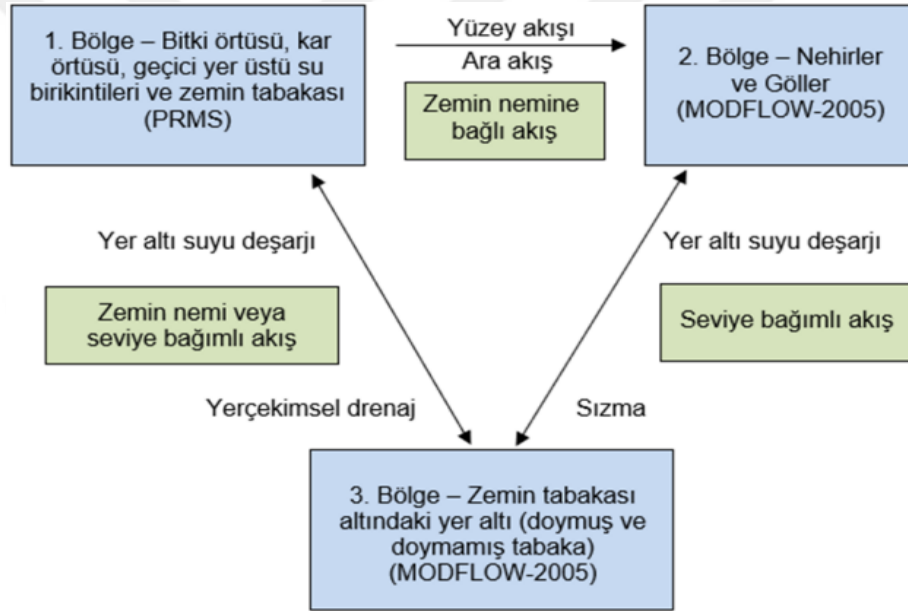
Modelleme çalışması ile akışlar; yeraltı suyu akışı, akarsu akışı, karşılıklı akış ve yüzey akışı olmak üzere bileşenlerine ayrılmıştır. PRMS modeli bu akışların belirli bir zaman serisindeki değerlerini ortaya koyarak incelemeyi mümkün kılmaktadır.

GMS yazılımında kullanılan MODFLOW'dan farklı olarak, PRMS modelindeki yeraltı suyu akış debisi günlük periyotta hesaplanmaktadır. MODFLOW'da ise, sistem içine giren ve sistemden çıkan suyun zaman serisi boyunca hesaplanmasıyla akış bütçesinin oluşturulması ve hücreler arası akışların belirlenmesi esas alınmaktadır.

GSFLOW ise, MODFLOW ve PRMS simülasyonlarının aynı zaman aralığında etkileşimli olarak gerçekleştirilmesi ve performanslarının değerlendirilmesi amacıyla kullanılmaktadır.

#### 4.2.3. GSFLOW etkileşim modeli uygulaması

Akış, simülasyonu gerçekleştirilen hidrolojik sistemde, akış ve hacim hesaplamalarında birbirleriyle ilişkili denklemlere dayanarak, GSFLOW etkileşim modelinde üç bölge arasında değişmektedir. Birinci bölge; bitki örtüsü ve zemin tabakasını, ikinci bölge; nehir ve gölleri, üçüncü bölge ise doymuş ve doymamış tabakaları kapsamaktadır. Birinci bölge PRMS ile simüle edilirken, ikinci ve üçüncü bölgelerin simülasyonu MODFLOW ile gerçekleştirilmektedir (Kavşut, 2019).



Şekil 4.46. GSFLOW'da akışın bölgeler arasındaki hareketi (Kavşut, 2019).

Yağış ve sıcaklık verileri, akış ve hacim hesaplamalarını gerçekleştirmek için birinci bölgede her bir HTB'ye dağıtılmaktadır. Bu bölgede yer alan suyun bir kısmı yer altına sızmakta, bir kısmı buharlaşma veya terleme yoluyla atmosfere geri dönmekte, bir kısmı da ikinci bölgede yer alan nehir veya göllere doğru hareket etmekte veya üçüncü bölgedeki doymuş ve doymamış tabakalara doğru akmaktadır (Kavşut, 2019).

Suyun nehir ve/veya göllere doğru akma miktarı, yüzeye yağmur olayı ile ulaşan suyun zemine sızma miktarına ve zemindeki su miktarına bağlıdır. Zeminden doymuş ve doymamış (üçüncü bölge) bölgelere doğru suyun hareketine yerçekimsel drenaj

denir. Yerçekimsel drenaj, zemin içerisindeki depolanan su miktarına ve doymamış tabakanın düşey hidrolik iletkenlik değerine bağlıdır. Su tablasının seviyesi zemin tabakasına doğru ilerledikçe, yerçekimsel drenaj azalır (Kavşut, 2019).

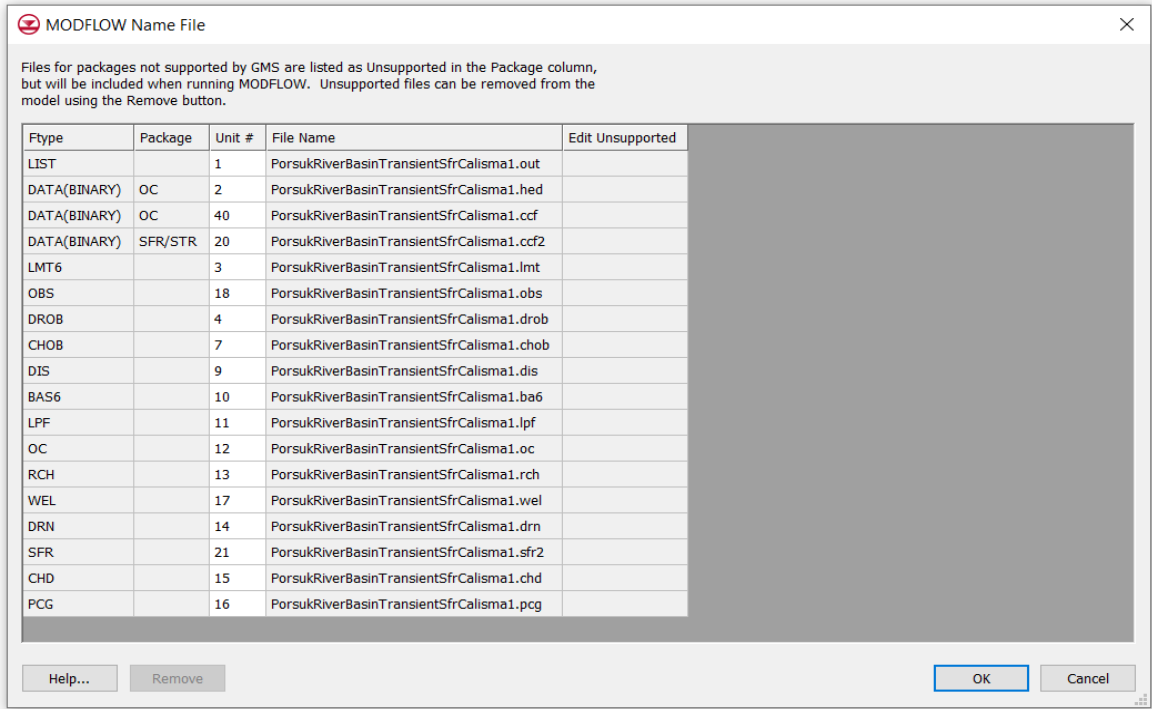
**Tablo 4.7.** *GSFLOW modelleme çalışmasında yer alan unsurlar*

| Unsurlar             | Açıklama                                                                                      |
|----------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|
| MODFLOW-2005         | Yer altı suyu akışını simüle etmektedir.                                                      |
| SFR2                 | Nehir akifer etkileşimini gerçekleştirmektedir.                                               |
| UZF                  | Zemin tabakası altında doymamış düşey akışı hesaplamaktadır.                                  |
| PRMS                 | Yüzeyde gerçekleşen yağışı, sıcaklığı ve solar radyasyonu mekânsal olarak dağıtmaktadır.      |
| PRMS- zemin tabakası | Yağışı, yüzeysel akış, ara akış, sızma ve buharlaşma ile terleme gibi kısımlara ayırmaktadır. |

GSFLOW etkileşim modeli, MODFLOW-2005 modellemesi sonucunda elde edilen çıktı dosyaları ile PRMS modelinde kullanılan girdi ve çıktı dosyalarının iterasyonlarla etkileştirilmesi ve etkileşim performansının değerlendirilmesi üzerine kuruludur.

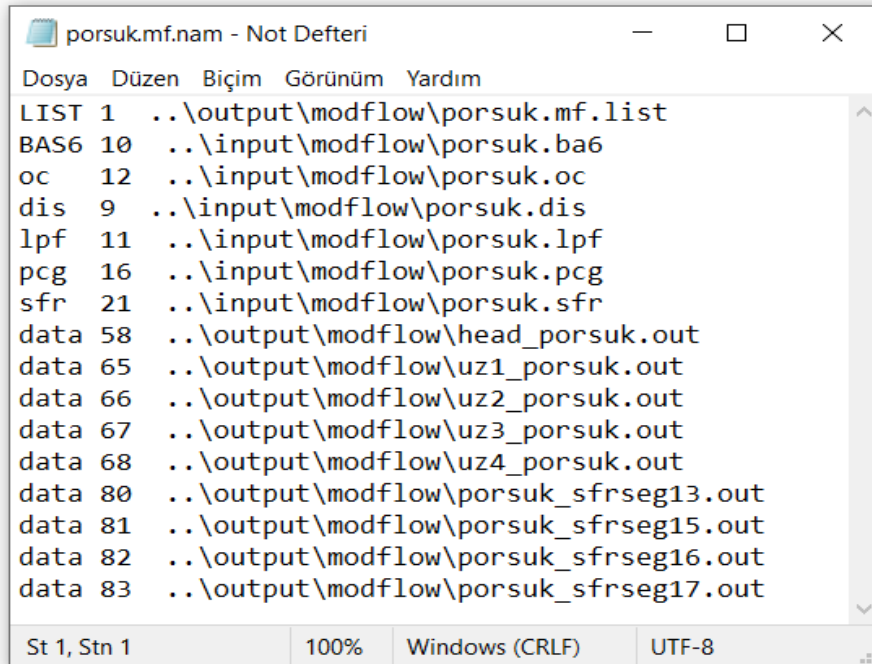
Bu etkileşim, iterasyonlarla kapalı bir sistem içerisinde gerçekleştirilmektedir. Parametreleri tanımlanmış ve kalibrasyonu yapılmış bir modele, MODFLOW SFR2 paketi uygulanarak elde edilen sistem dosyaları, oluşturulan ‘.nam’ dosyasına yazdırılır. Nam (name file), modelin dosya içeriğini ve parametrelerini içeren bir dosyadır.

MODFLOW SFR2 paketi kullanılarak gerçekleştirilen ve Bölüm 4.2.3’te detaylı olarak sunulmuş olan modelleme çalışmasına ait ‘.nam’ dosyası oluşturuldu (Şekil 4.47).



Şekil 4.47. 'MODFLOW name file' diyalogu

GMS yazılımında gerçekleştirilen MODFLOW modellemesinin SFR2 paketine dair dosyalar elde edilerek, GSFLOW modellemesinin yapısının oluşturulmasında kullanılmak üzere aktarıldı (Şekil 4.48). Dosyaların uzantılarına göre içerikleri Tablo 4.8'de verilmiştir.

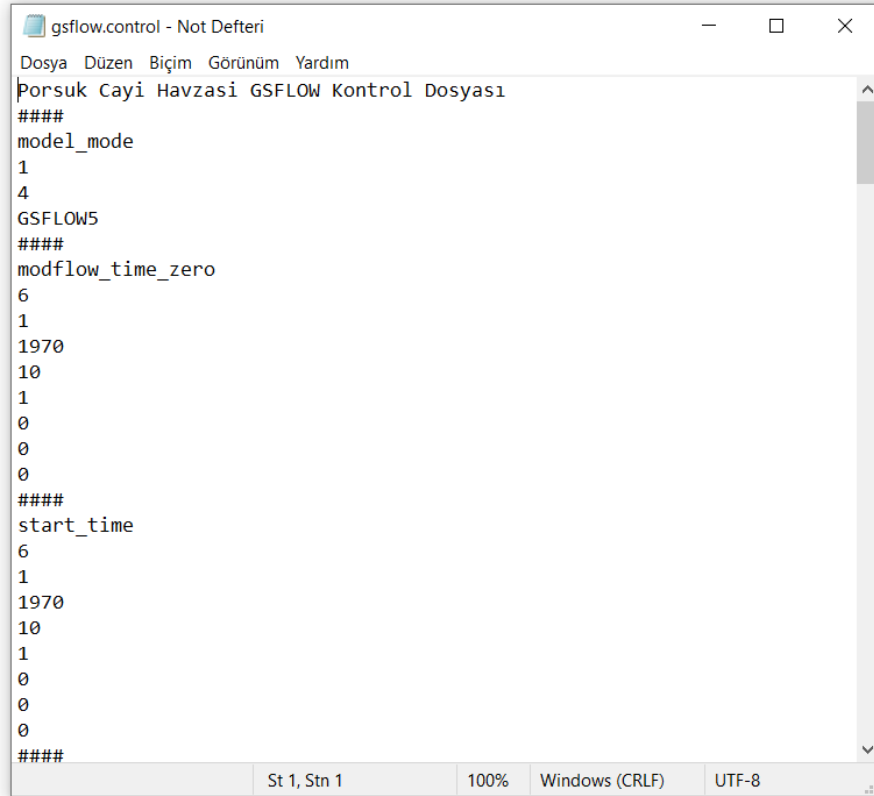


Şekil 4.48. GSFLOW yapı dosyası

**Tablo 4.8.** *GSFLOW modeline aktarılan dosyaların özellikleri*

| Dosya Adı | Uzantısı | Açıklama                                                                                                                        |
|-----------|----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| LIST      | .mf.list |                                                                                                                                 |
| BAS6      | .ba6     | MODFLOW dizi dosyasını içerir.                                                                                                  |
| Oc        | .oc      | Çıktı kontrolünü içerir.                                                                                                        |
| Dis       | .dis     | Simülasyon için ayrıklaştırma bilgilerini içerir.                                                                               |
| Lpf       | .lpd     | Katman özelliklerini içerir                                                                                                     |
| Pcg       | .pcg     | Önceden Koşullandırılmış Eşlenik Gradyan Yöntemi (PCG) paketi, GMS tarafından desteklenen MODFLOW çözücü paketlerinden biridir. |
| Sfr       | .sfr     | SFR paketi akarsular ile yeraltı suyu arasındaki etkileşimi simüle etmek için kullanılır.                                       |

Modele entegre edilen MODFLOW yapı dosyaları ve PRMS veri dosyaları ile GSFLOW modelinin kontrol dosyası oluşturuldu (Şekil 4.49).



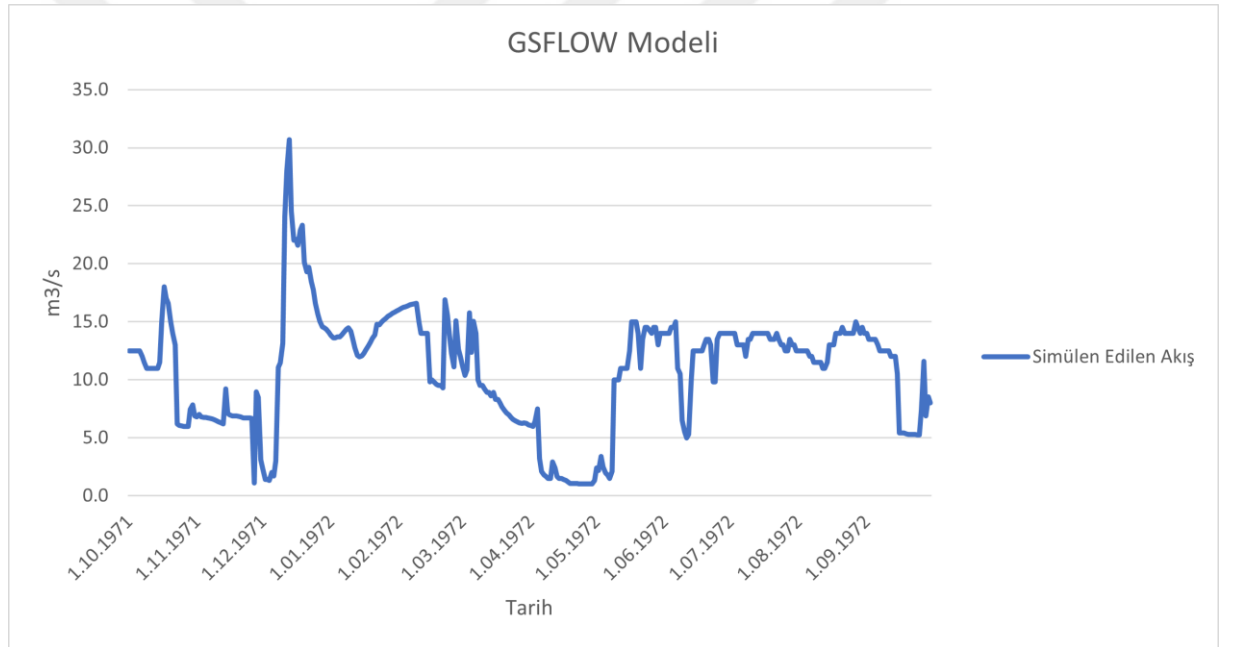
```
gsflow.control - Not Defteri
Dosya Düzen Biçim Görünüm Yardım
Porsuk Cayi Havzasi GSFLOW Kontrol Dosyası
####
model_mode
1
4
GSFLOW5
####
modflow_time_zero
6
1
1970
10
1
0
0
0
####
start_time
6
1
1970
10
1
0
0
0
####
St 1, Stn 1    100%    Windows (CRLF)    UTF-8
```

**Şekil 4.49.** *GSFLOW kontrol dosyası*

#### 4.2.3.1. GSFLOW etkileşim modeli sonuçları

Modelleme çalışması sonucunda, 1971 su yılına ait bölgeyi terk eden akışın hacimsel akış hızı hesaplanmıştır (Şekil 4.50). Akışın hacimsel akış hızı,  $L^3/T$  birimi ile ifade edilmekte olup modelde 'basinstrmflow' veya 'StreamOut\_Q' olarak belirtilmektedir.  $L^3/T$ , MODFLOW modelinin zaman adımı başına kübik uzunluk birimini ifade etmektedir.

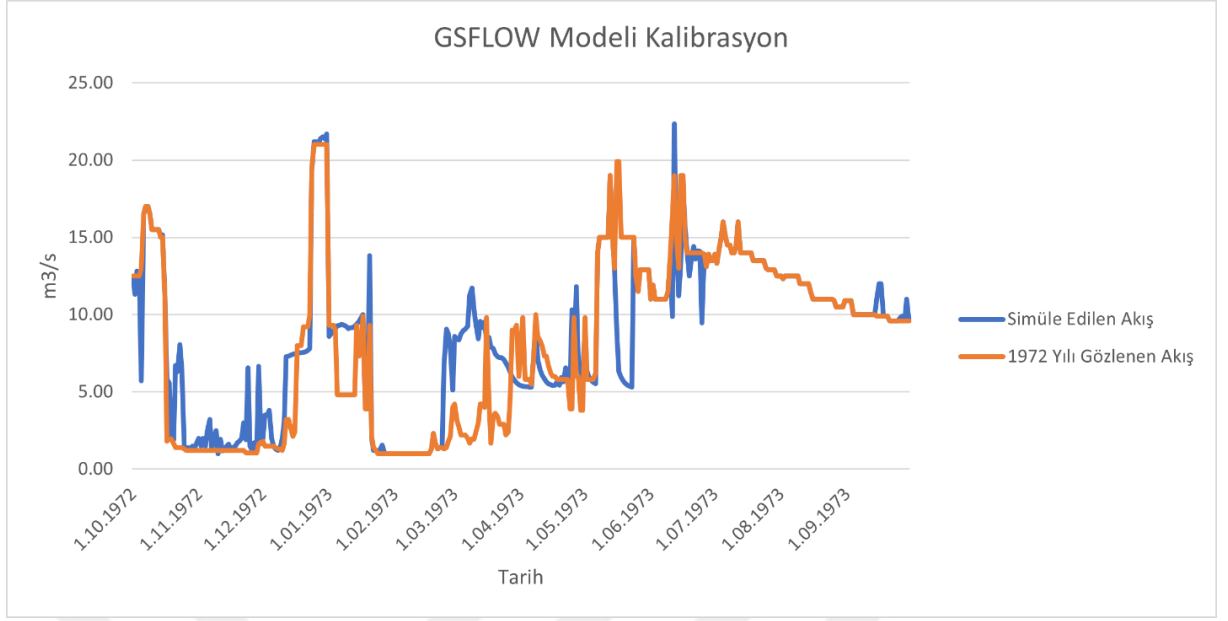
GSFLOW modelinin kalibrasyon periyodu için NSE değeri 0.75 olarak elde edildi ve gözlenen ile simüle edilen akışlar Şekil 4.51'de gösterilmiştir. Modelin doğrulama işlemi için NSE değeri ise 0.74 olarak elde edildi ve gözlenen ile simüle edilen akışlar Şekil 4.53'te gösterilmiştir.



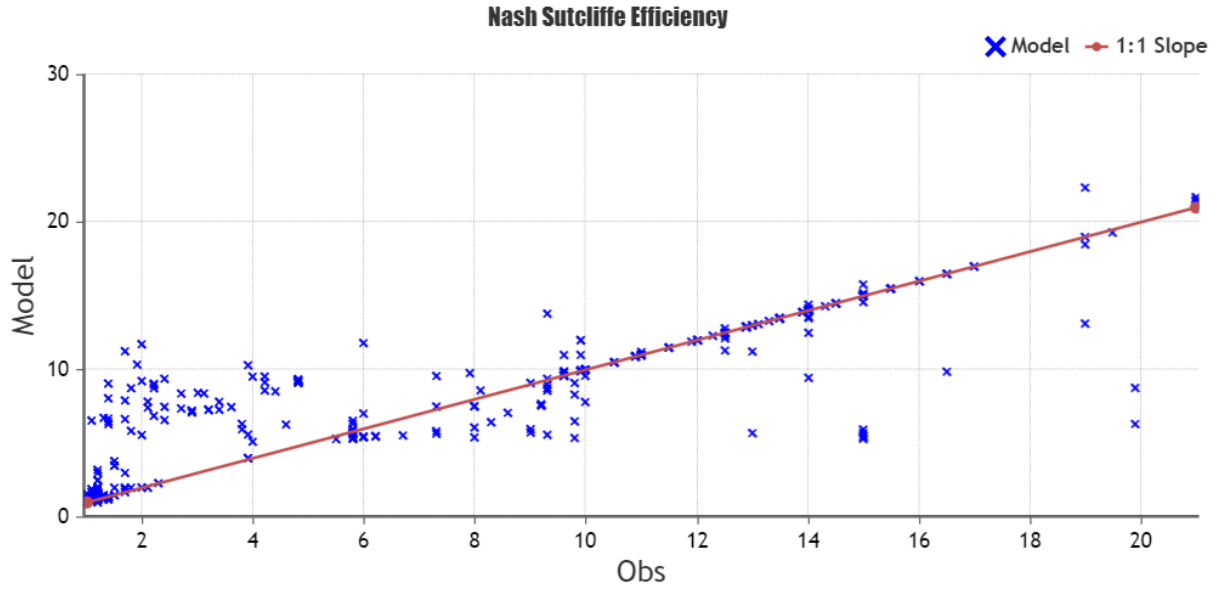
Şekil 4.50. GSFLOW modelleme sonuçları (1971 su yılı)

#### 4.2.3.2. GSFLOW etkileşim modelinin kalibrasyonu ve validasyonu

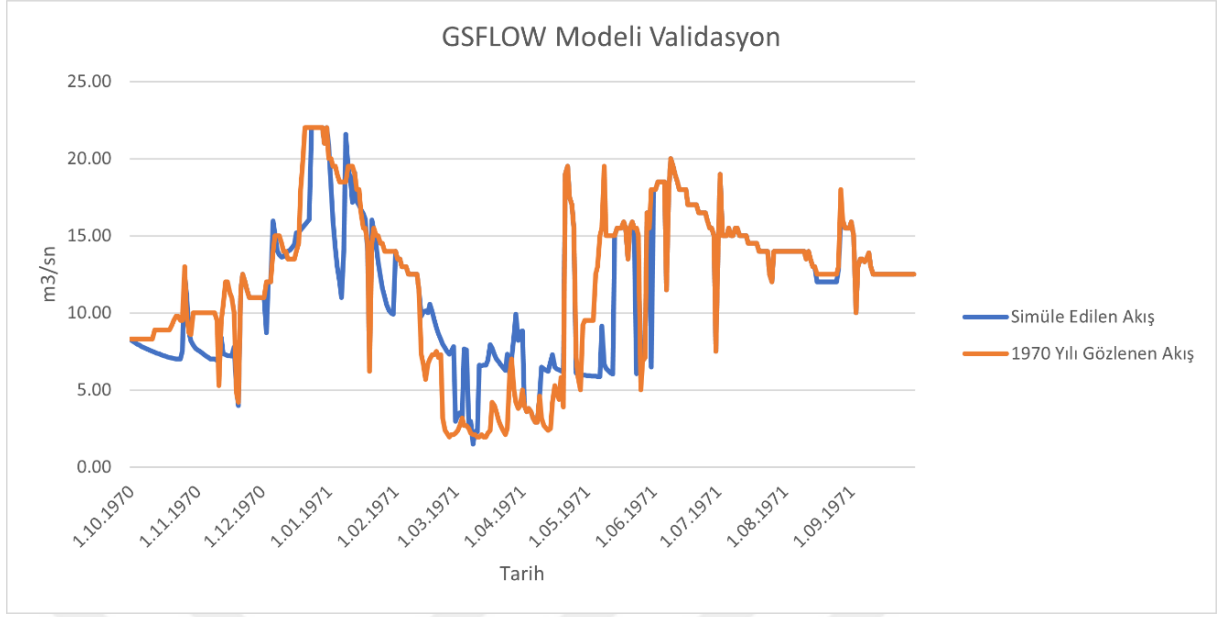
Genel olarak, NSE değeri 0.50'den büyükse, akış simülasyon çalışmalarında modelin tatmin edici olarak değerlendirildiği belirtilmektedir (Moriasi vd., 2007).



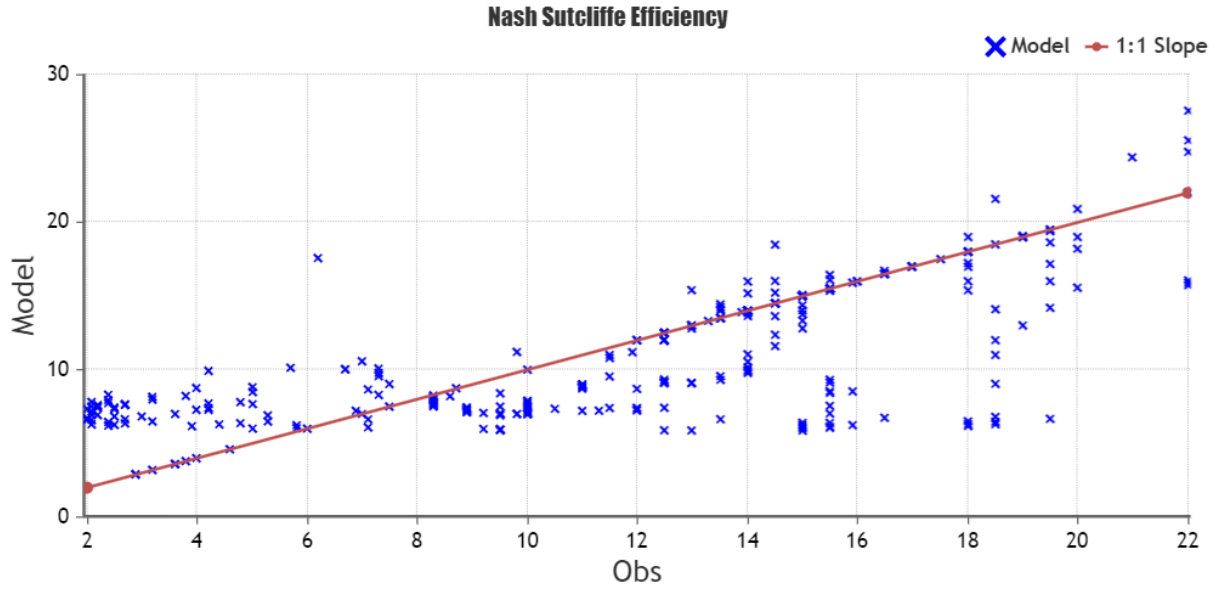
Şekil 4.51. GSFLOW modeli kalibrasyonu (1972 su yılı)



Şekil 4.52. GSFLOW modeli kalibrasyonu için NSE (1972 su yılı)



Şekil 4.53. GSFLOW modeli validasyonu (1970 su yılı)



Şekil 4.54. GSFLOW modeli validasyonu için NSE (1970 su yılı)

## 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Sakarya Havzası'nın alt havzası olan Porsuk Havzası'nın Orta Porsuk bölgesinde bulunan ve Eskişehir şehir merkezini de kapsayan alanda gerçekleştirilen çalışmalarda yeraltı suyu ve yüzey suyu etkileşimi modellenerek incelenmiştir.

Çalışmanın ilk aşamasında bölgenin yeraltı suyu modellemesi gerçekleştirilmiştir. MODFLOW-2005 metodu kullanılarak, yeraltı suyu modellemesi kararlı durum (steady state) ve akış haline geçiş (transient) durumları olmak üzere iki şekilde gerçekleştirilmiştir.

Kararlı hal modelinde, model genel hatlarıyla oluşturulmuş, sınırları belirlenmiş ve hidrolik-hidrolojik değerlerin yeterli hassasiyetle olması açısından kalibrasyon çalışmaları (manuel ve PEST) gerçekleştirilmiştir. Gözlenen değerler ile modelleme sonucu hesaplanan değerler arasındaki uyumu belirten 'Mean Residual', 'Mean Absolute Residual' ve 'Root Mean Squared Residual (RMSR)' değerleri hesaplanmıştır. Modelin uygun hata aralığında olduğu görülmüştür.

**Tablo 5.1.** Elde edilen istatistiksel değerlendirme sonuçları

| Özellik                           | Değer |
|-----------------------------------|-------|
| Mean Residual (Head)              | 1.45  |
| Mean Absolute Residual (Head)     | 1.45  |
| Root Mean Squared Residual (Head) | 1.49  |

Kararlı hal modelinde yapılan kalibrasyon çalışmaları sonrasında oluşturulan model, başlangıç modeli olarak kabul edilerek akışa geçme hali modellenmiştir. Modelleme çalışmasına uygun şekilde belirlenen stres periyoduna bağlı olarak 1971 su yılındaki akış bütçesi ve yer altı suyu seviyesinin değişimi belirlenmiştir. Su yılı içinde yeraltı suyu seviyesinin yaklaşık olarak 1 m/yıl değiştiği belirlenmiştir.

Çalışmanın devamında, nehir ile yüzey suyunun etkileşimini gerçekleştirmek amacıyla GMS yazılımında yer alan SFR2 akış paketi kullanılmıştır. Bu paket, akışın segment ve erişimlerini otomatik olarak hesaplayarak PRMS-GSFLOW modeli ile etkileşimi sağlamaktadır.

PRMS modeli hem bağımsız olarak hem de GSFLOW modülü ile çalışabilen bir yağış-akış modelidir. Çalışma alanını kapsayan bölgenin karakteristik özellikleri

(hidrolojik tepki birimleri, eğim, bakı, jeolojik yapı vb.), CBS platformunda oluşturulmuş ve öznetelikleri PRMS-GSFLOW modelinde kullanılmak üzere aktarılmıştır. Model, 01/10/1970 ile 30/09/1973 tarihleri arasındaki zaman dilimi için oluşturulmuştur. Yeraltı suyu modellemesi ile etkileşim göz önüne alınarak, modellemede 1971 su yılı verileri kullanılmış, model 1972 su yılı verileri ile kalibre edilmiş ve 1970 su yılı verileri ile de validasyonu gerçekleştirilmiştir. Modelin kalibrasyon NSE (Nash-Sutcliffe verimlilik katsayısı) değeri 0.98, validasyon NSE değeri ise 0.97 olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlara göre, modelin mükemmel yakın bir performans gösterdiği söylenebilir.

GSFLOW etkileşim modelinde; MODFLOW modellemesinin SFR2 paketine ait çıktılar ile PRMS modelinin girdi verileri kullanılarak bir etkileşim modeli kurulmuş ve model performansı ölçülmüştür. Çalışmada gerçekleştirilen modellerin performansı, modellenen akışların gözlenen akışlarla uyumunu gösteren kalibrasyon ve validasyon değerleri dikkate alınarak değerlendirilmiştir. GSFLOW modelinin kalibrasyon periyodu için NSE değeri 0.75 olarak elde edilmiştir. Modelin doğrulama işlemi için NSE değeri ise 0.74 olarak bulunmuştur. NSE değerinin 0.50'den büyük olması, akış simülasyon çalışmalarında model simülasyonunun tatmin edici olarak değerlendirilmesini sağlamaktadır.

Çalışmanın sonucunda; MODFLOW ve PRMS modelleri ile gerçekleştirilen çalışmaların birbirleriyle uyumlu ve tatmin edici seviyede olduğu kanaatine varılmıştır. Bu durum, GSFLOW etkileşim modelinin kurulması ve elde edilen sonuçların değerlendirilmesiyle de desteklenmiştir. MODFLOW, bir yeraltı suyu akış modeli olarak çalışma alanının zaman serisi içinde su bütçesini ve hücreden hücreye akışları hesaplamaktadır. PRMS modeli ise aynı çalışma alanında yer altı suyu akışını ve GSFLOW modeli ile su bütçesini hesaplamaktadır. Ancak, MODFLOW modellemesi için çok sayıda parametre gerektiği ve mahallinde kuyuların açılarak hidrolik iletkenlik vb. değerlerin hesaplanması gerektiği için yüksek maliyetlidir. PRMS modeli ise benzer tatmin edici ve doğrulukta sonuçlara; yağış-akış verileri ve CBS teknikleri (eğim, yükseklik, arazi kullanımı, jeolojik yapı) kullanılarak hızlı ve düşük maliyetlerle ulaşılabilesine olanak tanır.

## **Öneriler**

Çalışmada, yeraltı suyu akışı (MODFLOW) ve yüzey suyu akışı (PRMS) modelleri ile bu iki modelin etkileşimi ile oluşturulan model (GSFLOW), hem kendi içinde hem de etkileşimde başarılı performans ölçümü sağlamıştır. Aşağıdaki önerilerin gerçekleştirilmesiyle daha da duyarlı modeller elde edilebileceği öngörülmektedir:

- Doğruluk ve Hassasiyet Artırılmalı: Model parametrelerinin ve girdi verilerinin doğruluğu ve hassasiyeti artırılmalıdır. Resmî kurumlar veya özel şirketler tarafından gerçekleştirilen ölçümlere ait verilerin doğruluğu gözden geçirilmeli ve modellere en yakın gerçekliğe uygun şekilde güncellenmelidir.
- Model Güncelleme ve Kalibrasyon: Modeller periyodik olarak gözden geçirilmeli ve güncellenmelidir. Özellikle model kalibrasyonu sürekli olarak yapılarak, gerçek gözlemlerle uyum sağlaması sağlanmalıdır.
- Yenilikçi Veri Entegrasyonu: Yeni veri toplama teknolojileri ve yöntemleri kullanılarak modellere daha fazla ve daha güvenilir veri entegre edilmelidir. Örneğin, uzaktan algılama teknikleri veya sensör ağlarının kullanımı artırılabilir. Bu çalışmada, yüzey suyu akışının PRMS ile modellenmesinde, modelin klasik yapısından farklı olarak çalışma alanının Hidrolojik Tepki Birimlerine (HTB) ayrılmasında manuel yöntem yerine CBS (Coğrafi Bilgi Sistemleri) tekniklerinden faydalanılmıştır. Bu teknikler sayesinde model daha yüksek performans göstermiştir.
- Model Belirsizliklerinin Değerlendirilmesi: Modelin belirsizlik analizleri düzenli olarak yapılmalı ve sonuçların güvenilirliği değerlendirilmelidir. Hassaslık analizleri ve duyarlılık analizleri, modelin parametrelerine ve girdi değişkenlerine duyarlılığı göstermek için önemlidir.
- İklim Değişikliği Senaryoları: Gelecekteki iklim değişikliği senaryoları üzerinde modellerin nasıl tepki vereceği analiz edilmelidir. Bu, su kaynaklarının yönetiminde uzun vadeli stratejiler geliştirmek için önemlidir.

Bu önerilerin uygulanması, MODFLOW, PRMS ve GSFLOW hidrolojik modellerinin daha güvenilir ve duyarlı hale gelmesine yardımcı olabileceği öngörülmektedir.

Çalışmada kullanılan yeraltı suyu-yüzey suyu etkileşim modeli olan GSFLOW modelinin yapısı gereği kar yağışı doğrudan modele entegre edilememektedir. Modelde, günlük sıcaklık verileri ve aylık eşik değerler kullanılarak kar yağışının olup olmadığı belirlenmekte, bu durum bazı durumlarda modelin kararsız kalmasına veya maksimum doğruluğu sağlayamamasına neden olabilmektedir. Ayrıca, modelin kalibrasyon sürecinin manuel olarak yapılması da modelleme sürecini zorlaştırmaktadır. GSFLOW modelinin otomatik kalibrasyon ile güçlendirilmesi ve kar verisinin modele entegre edilebilir hale getirilmesi veya en azından eşik değerlerin günlük verilere göre ayarlanabilmesi, modelin performansını ve başarı oranını artırabilir.



## KAYNAKÇA

- Aytek, A., & Toprak, Z. F. (2001). Freshwater saltwater distribution and freshwater potential of Turkey. In *Proceedings of the International Symposium on Water Resources and Environmental Impact Assessment* (s. 233-238). İstanbul.
- Winter, T. (1998). *Ground water and surface water: A single resource*. U.S. Geological Survey Circular.
- Bayırtepe, M. B., Elçi, A., Mohammad A. H., Shatanawı, K., & Almımı, Q. (2023). MODFLOW Yeraltı Suyu Akım Modellemesi: Ezrak Sulak Alanı (Ürdün) İçin Ekosistemin Korunmasına Yönelik Bir Çalışma. In H. İ. D. R. O. (Ed.), *HİDRO'2023: Ulusal Hidrojeoloji ve Su Kaynakları Sempozyumu* (s. 250). Trabzon: Karadeniz Teknik Üniversitesi.
- Kavşut, M. E., & Yurtal, R. (2022). Silifke-Göksu deltasında yüzey suyu-yer altı suyu ilişkisinin modellenmesi. *Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 5(3), 1567-1578.
- Bingöl, B. (2019). *Antalya, Olympos Antik Kenti Yeraltı Suyu Akımı Modellemesi*. Yüksek Lisans Tezi. Eskişehir Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü.
- Aghlmand, R., & Abbasi, A. (2019). Application of MODFLOW with boundary conditions analyses based on limited available observations: A case study of Birjand Plain in East Iran. *Water*, 11, 1904. <https://doi.org/10.3390/w11091904>.
- Mohammadi, H. (2022). *Büyükçekmece Havzası için entegre edilmiş yüzey suyu ve yeraltı suyu hidrodinamik modeli*. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü.
- Boughariou, E., Allouche, N., Jmal, I., Mokadem, N., Ayed, B., Hajji, S., Khanfir, H., & Bouri, S. (2018). Modeling aquifer behaviour under climate change and high consumption: Case study of the Sfax region, southeast Tunisia. *Journal of African Earth Sciences*, 141, 118-129.
- Boughariou, E., Allouche, N., Jmal, I., Mokadem, N., Ayed, B., Hajji, S., Khanfir, H., & Bouri, S. (2018). Modeling aquifer behaviour under climate change and high consumption: Case study of the Sfax region, southeast Tunisia. *Journal of African Earth Sciences*, 141, 118-129.
- Roland, V. L. II. (2023). *Application of the Precipitation-Runoff Modeling System (PRMS) to simulate the streamflows and water balance of the Red River Basin, 1980–2016* (U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2022–5105, 37 p.).
- Van Beusekom, A. E., & Viger, R. J. (2016). A glacier runoff extension to the Precipitation Runoff Modeling System. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 121, 2001–2021.
- Won, J., & Deg-Hyo, B. (2005). A study on PRMS applicability for Korean river basin. *Journal of Korea Water Resources Association*, 38(9), 713-725.
- Toth, J. (1962). A theory of groundwater motion in small drainage basins in Central Alberta, Canada. *Journal of Geophysical Research*, 67, 4375-4388.

- Toth, J. (1963). A theoretical analysis of groundwater flow in small drainage basins. *Journal of Geophysical Research*, 68, 4795-4812.
- Rorabaugh, M. I. (1964). Estimating changes in bank storage and groundwater contributions to streamflow. *International Association of Scientific Hydrology*, 63, 432-441.
- Prudic, D. E. (1989). *Documentation of a computer program to simulate stream-aquifer relations using a modular, finite-difference, ground-water flow model* (U.S. Geological Survey, Open-File Report No. 88-729, 113s).
- Gorelick, S. M. (1986). *Conjunctive water use: Understanding and managing surfacewater-groundwater interactions*. Wallingford: IAHS Press.
- Abbott, M. B., Bathurst, J. C., Cunge, J. A., O'Connell, P. E., & Rasmussen, J. (1986). An introduction to the European Hydrological System - Systeme Hydrologique Europeen, She.1. History and philosophy of a physically-based, distributed modeling system. *Journal of Hydrology*, 87, 45-59.
- Abbott, M. B., Bathurst, J. C., Cunge, J. A., O'Connell, P. E., & Rasmussen, J. (1986). An introduction to the European Hydrological System - Systeme Hydrologique Europeen, She.2. Structure of a physically-based, distributed modeling system. *Journal of Hydrology*, 87, 61-77.
- Swain, E. D., & Wexler, E. J. (1993). *A coupled surface-water and ground-water flow model for simulation of stream-aquifer interaction*. U.S. Geological Survey, Tallahassee, FL, Open-file Report 92-138.
- Jobson, H. E., & Harbaugh, A. W. (1999). *Modifications to the Diffusion Analogy Surface-water Flow Model (DAFLOW) for coupling to the Modular Finite-difference Ground-water Flow Model (MODFLOW)*. U.S. Geological Survey, Open-File Report 99-217.
- Vander Kwaak, J. E., & Loague, K. (2001). Hydrologic-response simulations for the R-5 catchment with a comprehensive physics-based model. *Water Resources Research*, 37, 999-1013.
- Panday, S., & Huyakorn, P. S. (2004). A fully coupled physically-based spatially distributed model for evaluating surface/subsurface flow. *Advances in Water Resources*, 27(4), 361-382.
- Kollet, S. J., & Maxwell, R. M. (2006). Integrated surface-groundwater flow modeling: A free-surface overland flow boundary condition in a parallel groundwater flow model. *Advances in Water Resources*, 29(7), 945-958.
- Jones, K. L., Poole, G. C., O'Daniel, S. J., Mertes, L. A. K., & Stanford, J. A. (2008). Surface hydrology of low-relief landscapes: Assessing surface water flow impedance using LIDAR-derived digital elevation models. *Remote Sensing of Environment*, 112(11), 4148-4158.
- Kavşut, M. E. (2019). *Yeraltı suyu-yerüstü suyu etkileşim modeli: Silifke-Göksu deltası örneği*. Doktora tezi. Adana: Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Misgana, G. B., Betrie, G. D., & Srinivasan, R. (2016). Assessment of groundwater-surface water interaction using the GSFLOW model in the Ethiopian Rift

- Valley. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 6, 9-24. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2016.04.001>
- Kumar, M., Duffy, C., & Stieglitz, M. (2014). Evaluating water resource management strategies in the Krishna river basin, India using GSFLOW. *Journal of Hydrology*, 512, 254-265. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.03.008>
- Boyraz, U., & Alhan, C. M. K. (2011). Hidrolojik modellemede yüzey suyu-yeraltı suyu etkileşimlerinin önemi. 5. *Ulusal Su Mühendisliği Sempozyumu*, 12-16 Eylül 2011, İstanbul.
- Bayazıt, Y., Bakış, R., & Güney, G. (2016). Porsuk Havzasında Heyelan Risk Haritalarının Coğrafi Bilgi Sistemleri ile Oluşturulması. 6. *UZAKTAN ALGILAMA-CBS SEMPOZYUMU (UZAL-CBS 2016)*, 5-7 Ekim 2016, Adana.
- Büyükerşen, Y., & Efelerli, S. S. (2008). Porsuk Havzası Su Yönetimi ve Eskişehir Örneği. *TMMOB 2.Su Politikaları Kongresi*, 20-22 Mart 2007, Ankara.
- Ketin, İ. (2016). *Genel Jeoloji Yerbilimlerine Giriş*. İstanbul: İTÜ Vakfı Yayınları.
- Erguvanlı, K., & Yüzer, E. (1973). *Yeraltı Suları Jeolojisi*. İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi Kütüphanesi.
- Esen, E., Yakal, M., Gökçen, M., Mumcu, N., Türkman, M., Dirik, M., & Atalay, E. (1975). *Eskişehir ve İnönü Ovaları Hidrojeolojik Etüt Raporu*. Ankara: Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü Jeoteknik Hizmetler ve Yeraltı Suları Dairesi Başkanlığı.
- Esendal, H. (2007). *Eğirdir Gölü Su Seviyesi Mevsimsel Değişiminin Bulanık Mantık Metoduyla Modellenmesi*. Yüksek Lisans tezi. Isparta: Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Hökelekli, E. (2010). *Bilgisayar Desteğinde Yeraltı Suyu Modellemesi*. Yüksek Lisans tezi. Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Harbaugh, A. W., Banta, E. R., Hill, M. C., & McDonald, M. G. (2000). *MODFLOW-2000, the U.S. Geological Survey modular ground-water model-modularization concepts and the ground-water flow process* (U.S. Geological Survey Open-File Report No. 00-92, 121s).
- Harbaugh, A. W. (2005). *MODFLOW-2005, The U.S. Geological Survey Modular Ground-water Model-the Ground-Water Flow Process* (U.S. Geological Survey Techniques and Methods No. 6-A16).
- Harbaugh, A. W., Langevin, C. D., Hughes, J. D., Niswonger, R. N., & Konikow, L. F. (2017). *MODFLOW-2005 version 1.12.00, the U.S. Geological Survey Modular Groundwater Model* (U.S. Geological Survey Software Release, 03 February 2017).
- Harbaugh, A. W., & McDonald, M. G. (1996). *User's Documentation for MODFLOW-96, an Update to the U.S. Geological Survey Modular Finite-difference Ground-water Flow Model* (U.S. Geological Survey Open-File Report No. 96-485, 56s).
- Bayazıt, M. (1995). *Hidroloji*. İstanbul: İTÜ İnşaat Fakültesi Matbaası.

- Regan, R. S., Markstrom, S. L., & LaFontaine, J. H. (2022). *PRMS version 5.2.1: Precipitation-Runoff Modeling System (PRMS)* (U.S. Geological Survey Software Release, 02/10/2022).
- Leavesley, G. H., Lichty, L. W., Troutman, B. M., & Saindon, L. G. (1983). *Precipitation-Runoff Modeling System—User's manual* (U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report No. 83-4238, 207s).
- Viger, R. J., & Leavesley, G. H. (2007). *The GIS Weasel Users Manual* (U.S. Geological Survey Techniques and Methods No. 6-B4, 201s).
- Ford, L. R., & Fulkerson, D. R. (1956). Maximal flow through a network. *Canadian Journal of Mathematics*, 8, 399-404.
- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE (American Society of Agricultural and Biological Engineers)*, 50(3), 885-900.
- http-1:** <https://earthexplorer.usgs.gov> (Erişim tarihi: 15.12.2022)
- http-2:** <https://www.mgm.gov.tr/genel/hidrometeoroloji.aspx> (Erişim tarihi: 16.02.2023)
- http-3:** [https://tr.wikipedia.org/wiki/Yer\\_alt%C4%B1\\_suyu](https://tr.wikipedia.org/wiki/Yer_alt%C4%B1_suyu) (Erişim tarihi: 20.02.2023)
- http-4:** <https://www.aquaveo.com/software/gms-groundwater-modeling-system-introduction> (Erişim tarihi: 15.03.2023)
- http-5:**  
[https://www.xmswiki.com/wiki/GMS:MODFLOW\\_Conceptual\\_Model\\_Approach](https://www.xmswiki.com/wiki/GMS:MODFLOW_Conceptual_Model_Approach)  
(Erişim tarihi: 1.04.2023)
- http-6:** <https://ca.water.usgs.gov/modeling-software/cascade-routing-tool.html> (Erişim tarihi: 05.05.2023)
- http-7:** <https://www.usgs.gov/software/gsflo-coupled-groundwater-and-surface-water-flow-model> (Erişim tarihi: 18.05.2023)
- http-8:** [https://www.xmswiki.com/wiki/GMS:Calibration\\_Targets](https://www.xmswiki.com/wiki/GMS:Calibration_Targets) (Erişim tarihi: 01.08.2023)
- http-9:**  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Nash%E2%80%93Sutcliffe\\_model\\_efficiency\\_coefficient](https://en.wikipedia.org/wiki/Nash%E2%80%93Sutcliffe_model_efficiency_coefficient)  
(Erişim tarihi: 25.09.2023)

## ÖZGEÇMİŞ

**ORCID NO:** 0000-0002-0611-774X

**Ad Soyad** : Savaş Uğur TEMELLİ

**Yabancı Dil** : İngilizce, Almanca

### Eğitim ve Mesleki Geçmişi:

- 2013, Mustafa Kemal Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği
- 2018, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Hidrolik Bilim Dalı (Tezli Yüksek Lisans)
- 2013-2015, Gayrimenkul Değerleme Uzmanı, SPK Lisanslı Değerleme Şirketleri
- 2015-2017, Öğretim Görevlisi, İstanbul Gelişim Üniversitesi, Gelişim MeslekYüksekokulu, İnşaat Teknolojisi Programı
- 2017- ..., Öğretim Görevlisi, İstanbul Nişantaşı Üniversitesi, Nişantaşı MeslekYüksekokulu, İnşaat Teknolojisi Programı

### Mesleki Birlik/Dernek/Kuruluş Üyelikleri:

- 2013, İnşaat Mühendisleri Odası, İstanbul