**ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ**
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**DOKTORA TEZİ**

**Sedat TORAMAN**

# KÜTAHYA-SİMAV JEOTERMAL SAHASI KUYU ETKİLEŞİMLERİ VE ÜRETİM/ENJEKSİYON OPTİMİZASYONU

**MADEN MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**ADANA, 2016**

**ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ**
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

# KÜTAHYA-SİMAV JEOTERMAL SAHASI KUYU ETKİLEŞİMLERİ VE ÜRETİM/ENJEKSİYON OPTİMİZASYONU

**Sedat TORAMAN**

**DOKTORA TEZİ**

**MADEN MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

Bu Tez …./…/2016 Tarihinde Aşağıdaki Jüri Üyeleri Tarafından Oybirliği/Oyçokluğu ile Kabul Edilmiştir.

| | | |
|---|---|---|
| …… | …….. | …… |
| Prof. Dr. Mesut ANIL | Prof. Dr. Halime Ö. PAKSOY | Prof. Dr. Özen KILIÇ |
| ÜYE | ÜYE | DANIŞMAN |

| | |
|---|---|
| …….. | ……. |
| Doç. Dr. Ümit ATICI | Yrd. Doç. Dr. Yasin ERDOĞAN |
| ÜYE | ÜYE |

Bu Tez Enstitümüz Maden Mühendisliği Anabilim Dalı'nda hazırlanmıştır.
Kod No:

**Prof. Dr. Mustafa GÖK**
**Enstitü Müdürü**

Bu Tez Çukurova Üniversitesi Araştırma Fonu Tarafından Desteklenmiştir.
**Proje No: MMF2009D12**

**Not:** Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaktan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak gösterilmeden kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunu'ndaki hükümlere tabidir.

# ÖZ

## DOKTORA TEZİ

## KÜTAHYA-SİMAV JEOTERMAL SAHASI KUYU ETKİLEŞİMLERİ VE ÜRETİM/ENJEKSİYON OPTİMİZASYONU

**Sedat TORAMAN**

**ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ**
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**
**MADEN MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

Danışman: Prof. Dr. Özen KILIÇ
Yıl: 2016, Sayfa: 129
Jüri: Prof. Dr. Mesut ANIL
Prof. Dr. Halime Ö. PAKSOY
Prof. Dr. Özen KILIÇ
Doç. Dr. Ümit ATICI
Yrd. Doç. Dr. Yasin ERDOĞAN

Jeotermal sahaların doğru işletilmesi sahaların doğru modellenmesi ile mümkündür. Jeotermal sahaların modellemesinde, tank modellemesi veri sayısının az olduğu üretimin ilk aşamalarında sıkça kullanılan bir yöntemdir. Ayrıca, tank modellerinin diğer bir avantajı da tarihsel çakıştırmada daha kısa sürede sonuca ulaşılmasıdır. Bu nedenlerle, tank modeller rezervuar özelliklerinde heterojenliği, karmaşık akışkan özelliklerini ve karmaşık kuyu geometrileri gibi zor durumların olmadığı rezervuarların modellemesinde kullanılır. Tank modellerinde rezervuar homojen tanklar olarak tanımlanır. Her bir tank için kütle ve enerji korunum denklemleri yazılarak bu denklemlerin çözülmesiyle ileriye yönelik sıcaklık ve basınç tahminleri yapılabilir. Rezervuarın işletilmesinde ileriye dönük çalışmalara yön verecek rezervuar performanslarının belirlenmesi oldukça önemlidir. Daha da önemlisi, ileriye dönük basınç tahminlerini yapmanın yanında bu tahminler üstündeki belirsizlikler de tanımlanmalıdır. Bu çalışmada, izotermal olmayan tek tank modellemesi kullanılarak Kütahya-Simav jeotermal sahasının modellemesi yapılmıştır. Sahanın model parametreleri interference testi verileri kullanılarak tespit edilmiştir. Model parametre değerleri kalibrasyonu JMP istatistiki programı ile gerçekleştirilmiştir. Modelleme ile bilgisayar ortamında bir ara yüz oluşturulmuş ve bu ara yüz üzerinden saha modeli oluşturulmuştur. Model parametre kalibrasyonu ve belirsizlikler tanımlanarak model revize edilmiştir. Modelleme sonrasında sahanın kış aylarında şehir ısıtmacılığı için daha fazla akışkana ihtiyaç duyulduğu göz önünde bulundurularak üretim planlaması yapılıp farklı re-enjeksiyon senaryoları altında saha basınç ve sıcaklık profillerindeki değişimler ortaya konmuştur.

**Anahtar Kelimeler:** Jeotermal rezervuar, Tank modelleme, Kütahya-Simav, Re-enjeksiyon

## ABSTRACT

## PhD THESIS

**KÜTAHYA SİMAV GEOTHERMAL FIELD WELLS INTERACTION AND PRODUCTION/INJECTION OPTIMIZATION**

**Sedat TORAMAN**

**DEPARTMENT OF MINING ENGINEERING**
**INSTITUTE OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES**
**UNIVERSITY OF CUKUROVA**

Supervisor: Prof. Dr. Özen KILIÇ
Year: 2016, Page: 129
Jury: Prof. Dr. Mesut ANIL
Prof. Halime Ö. PAKSOY
Prof. Dr. Özen KILIÇ
Assoc. Prof. Dr. Ümit ATICI
Asst. Prof. Dr. Yasin ERDOĞAN

In geothermal reservoir modeling, tank modeling is mainly used at the early life of the field when relatively little data is available. Also, the other advantage of tank modeling is that the result is obtained in shorter time during history matching. Because of that reason, tank modeling is used in reservoir which does not have heterogeneous, the fluid in reservoir is not complex and the well doesn't consist of different geometry structure. With tank modeling, the reservoir and the aquifer are modeled using homogeneous tanks. Mass and energy balance equations are solved on the tanks for making future performance predictions of pressure and temperature. These pressure and temperatures represent the average pressure and temperature of the reservoir. If production data is available, model parameters that best describe the system could be obtained through history matching. In this study, advantages of tank modeling was considered and we have also pointed out a methodology for determining the best model that represents the system. For this purpose we perform history matching with various models and select the one that matches best the production data and the model that gives the lowest confidence intervals for the model parameters. Effect of temperature is neglected at low temperature geothermal reservoir. Although it is important to make accurate predictions of pressure and temperature, it is more important to make predictions of the uncertainty regarding the pressures and the temperatures. In this study we have used the non-isothermal single tank modelling for performing Kütahya-Simav geothermal field modeling. The scope of the model parameters are determined by using interference test datas. Calibration of model parameter values are realized with JMP statistics program. An interface has been created on computer and field model has been developed using this interface. Model has been revised by defining calibration of the model parameters and uncertainties. After modelling, having been planned the production, changes in pressure and temperature profiles under different type of reinjection scenarios are revealed by taking into consideration that field needs more fluid for city heating in the winter.

**Key Words**: Geothermal reservoir, Tank modelling, Kütahya-Simav, Reinjection

**TEŞEKKÜR**

Çukurova Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü Anabilim Dalı'nda yapmış olduğum Doktora çalışmamda bilgi ve tecrübeleriyle beni yönlendiren, karşılaştığım sorunlara çözüm üreterek, çalışmalarımın olabildiğince sağlıklı sürmesini sağlayan değerli danışman hocam Sayın Prof. Dr. Özen KILIÇ'a teşekkürü bir borç bilirim.

Her zaman bana en büyük manevi desteği vererek yanımda olan eşim Fulya TORAMAN ile kızlarım Gizem ve Nehir TORAMAN'a teşekkürlerimi sunarım.

**İÇİNDEKİLER** **SAYFA NO**

ÖZ ..... I
ABSTRACT ..... II
TEŞEKKÜR ..... III
İÇİNDEKİLER ..... IV
ÇİZELGELER DİZİNİ ..... VI
ŞEKİLLER DİZİNİ ..... VIII
1. GİRİŞ ..... .1
2. JEOTERMAL REZERVUAR MODELLEME ..... 5
2.1. Tank Modelleri ..... 6
2.1.1. İzotermal Tank Modelleri ..... 7
2.1.1.1. Tek Tank Açık Model ..... 8
2.1.1.2. İki Tank Açık Model ..... 12
2.1.1.3. İki Tank Kapalı Model ..... 13
2.1.1.4. İzotermal Modellerin Sayısal Çözümleri ..... 14
2.1.2. İzotermal Olmayan Tank Modelleri ..... 16
2.1.3. Genelleştirilmiş İzotermal Olmayan Tank Modeli ..... 18
2.1.4. Çözümleme Yöntemi: Newton Raphson Metodu ..... 19
2.1.5. Model Denklemleri ve Sayılar Çözümleri ..... 21
2.2. Tank Modellerde İleriye Yönelik Performans Değerlendirmeleri ..... 24
2.2.1. Tarihsel Çakıştırma ..... 24
2.2.2. Root Mean Sguare Error (Rmse) ..... 26
2.2.3. Tahmin Edilen Model Parametrelerine ait %95 Güvenilirlik Aralıkları ..... 27
2.2.4. Performans Tahmin Problemi ..... 28
2.3. Rezervuar Model Paramatre Tahmininde Kuyu Basınç Testleri ..... 31
2.3.1. Kuyu Basınç Testlerini Diğer Ölçüm Kaynaklarından Ayıran Özellikleri ve Ölçeği ..... 33
2.3.2. Kuyu Basınç Testlerinden Elde Edilen Bilgiler ..... 34
2.3.3. Kuyu Basınç Test Tipleri ..... 34
2.3.3.1. Verimlilik (Çok Debili Basınç) Testleri ..... 34

2.3.3.2. Kararsız Kuyu Basınç Test Tipleri .....41
3. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....47
3.1. Çalışma Alanının Jeolojik, Jeofizik ve Jeokimyasal Çalışmalar.....47
3.2. Tank Modelleme Çalışmaları .....49
4. MATERYAL VE METOD.....51
4.1. Materyal.....51
4.1.1. Kütahya-Simav Alanının Bölgesel Jeolojisi.....51
4.1.2. Simav Bölgesinin Tektonik Evrimi .....55
4.1.3. Simav Jeotermal Sahası .....60
4.1.4. İnceleme Alanın Jeolojisi .....61
4.1.5. İnceleme Alanın Jeotermal Özellikleri .....65
4.1.6. İnceleme Alanının Jeofizik Verileri.....70
4.1.7. Sahanın Yeraltı Suyu Hidrojeolojisi.....70
4.1.8. Simav Jeotermal Sahası Jeokimyası .....71
4.2. Metod.....76
4.2.1. Model Parametre Başlangıç Değerleri Tespiti.....76
4.2.2. Model Denklem Çözümü.....86
4.2.3. Model Çözümlemesi.....90
4.2.4. Model Parametre Değerlerinin Kalibrasyonu.....93
5. ARAŞTIRMA BULGULARI.....103
5.1. Sahanın Üretim/Re-enjeksiyon Optimizasyonu .....103
5.1.1. Yıllık Üretim Değerlendirmesi.....105
5.1.2. Yıllık Üretim Planlaması ve Re-Enjeksiyon Senaryoları Değerlendirmesi .....106
6. SONUÇLAR .....117
KAYNAKLAR .....121
ÖZGEÇMİŞ .....128

**ÇİZELGELER DİZİNİ** **SAYFA NO**

Çizelge 4.1. Simav Sahası'ndaki Jeotermal Kuyularla İlgili Veriler .....68
Çizelge 4.2. Simav Jeotermal Sularının Kimyasal Analiz Değerleri .....73
Çizelge 4.3. Simav Bölgesi'ndeki Termal Suların Kimyasal İçeriği ile Litoloji Arasındaki İlişki .....74
Çizelge 4.4. Modellemede Kullanılan Parametreler ve Birimleri .....78
Çizelge 4.5. Akışkan Özellikleri (Steam table) .....78
Çizelge 4.6. E-6 Kuyusu Üretim Programı .....82
Çizelge 4.7. E-10 Kuyusu Üretim .....82
Çizelge 4.8. Çakışma Noktası Değerleri .....85
Çizelge 4.9. Model Parametre Başlangıç Değerleri .....87
Çizelge 4.10. Model Parametre Değerleri .....93
Çizelge 4.11. Kalibre Edilmiş Model Parametre Değerleri ..... 100
Çizelge 4.12. Kalibre Edilmiş Modelden Parametre Tahmini ..... 102
Çizelge 5.1. Model Özet Bilgileri (Senaryo-0) ..... 106
Çizelge 5.2. Re-enjeksiyon Senaryoları ile Basınç-Sıcaklık Değişimleri ..... 110
Çizelge 5.3. Yıllık Üretim Senaryoları ve Saha Profilleri Özet Bilgisi ..... 114

**ŞEKİLLER DİZİNİ** **SAYFA NO**

Şekil 2.1. Tek Tank Açık Model .....8
Şekil 2.2. 2 Tank Açık Model .....12
Şekil 2.3. 2 Tank Kapalı Model .....13
Şekil 2.4. $N_i$ Tank İçeren Sistemin Şematik Gösterimi.....14
Şekil 2.5. İdealleştirilmiş İzotermal Tank Modeli .....16
Şekil 2.6. i Tankı ve Bağlantıları .....18
Şekil 2.7. Çok Debili Akış Sonrası Akış Kuyu Basınç Testine ait Şematik Gösterim.....35
Şekil 2.8. Çok Debili Değiştirilmiş İzokronal (Modified Isochronal) Kuyu Basınç Testine ait Şematik Gösterim.....36
Şekil 2.9. 3 Farklı Kuyu için Kuyu dibi Akış Basıncı Yüzey Debisi (IPR) Eğrileri.....36
Şekil 2.10. Basınç Azalım (drawdown) Testi .....42
Şekil 2.11. Basınç Yükselim (buildup) .....42
Şekil 2.12. Enjeksiyon/Basınç Düşüm (injection/falloff) Testi .....43
Şekil 2.13. 2 Kuyulu Girişim Testi .....44
Şekil 2.14. $\Delta p$, $\Delta t$ .....46
Şekil 2.15. $P_D$, $t_D/r_D^2$.....46
Şekil 2.16. $\Delta p$, $\Delta t$ ve $P_D$, $t_D/r_D^2$ Grafiği Çakıştırma .....46
Şekil 4.1. Simav ve Çevresinin Basitleştirilmiş Jeolojik Haritası.....54
Şekil 4.2. Simav Bölgesinin Jeoloji Haritası.....56
Şekil 4.3. Kütahya-Simav Jeotermal Sahası .....60
Şekil 4.4. Simav Jeotermal Alanı Kesiti .....62
Şekil 4.5. Simav Jeotermal Alanının Genelleştirilmiş Stratigrafi Kesiti .....64
Şekil 4.6. Simav Jeotermal Sahası'nın Jeoloji ve Özdirenç Kesiti .....69
Şekil 4.7. Simav Termal Sularının CI-$SO_4$-$HCO_3$ Üçgen Diyagramı.....74
Şekil 4.8. Simav Termal Sularının Na+K-Mg-Ca Üçgen Diyagramı .....75
Şekil 4.9. Simav Termal Sularının $SiO_2$-$SO_4$-$HCO_3$ Üçgen Diyagramı .....75
Şekil 4.10. Simav Termal Sularının CI- $HCO_3$-B Üçgen Diyaframı .....76

Şekil 4.11. Simav Jeotermal Sahası Sondaj Kuyuları Statik Sıcaklık Profilleri .....79
Şekil 4.12. Simav Jeotermal Sahası Sondaj Kuyuları Statik Basınç Profilleri .....80
Şekil 4.13. Simav Jeotermal Sahası Sondaj Kuyuları Statik Dinamik Sıcaklık Profilleri .....80
Şekil 4.14. Simav Jeotermal Sahası Sondaj Kuyuları Statik Dinamik Basınç Profilleri .....81
Şekil 4.15. E-6 ve E-10 Kuyuları Üretim Programı.....83
Şekil 4.16. E-6 ve E-10 Kuyuları Üretim Programı ve E-8 Kuyusu Basınç Değişimleri.....83
Şekil 4.17. dt-dp ile Pd-td/rd$^2$ log-log Çakışması .....84
Şekil 4.18. İzotermal Olmayan Tek Tank Model Parametre Giriş Ekranı.....90
Şekil 4.19. Saha Verileri Giriş Ekranı.....91
Şekil 4.20. Gözlemlenmiş ve Model Basınç Değişimi .....92
Şekil 4.21. Modelden Elde Edilen Sıcaklık Değişimi.....92
Şekil 4.22. En Küçük Kareler Yöntemi Uygun Model Analizi .....94
Şekil 4.23. Ağırlıklı En Küçük Kareler Yöntemi ile Uygun Model Analizi.....95
Şekil 4.24. Model Fonksiyon ve Parametrelerin Programa İşlenmesi .....97
Şekil 4.25. Nonliner Fit Modül .....98
Şekil 4.26. Nonliner Regresyon Modülü.....99
Şekil 4.27. Nonliner Regresyon Sonucu ve Parametreler Arası Korelasyon.....99
Şekil 4.28. İzotermal Olmayan Model Çakıştırma Grafiği..... 100
Şekil 4.29. İzotermal Olmayan Model Sıcaklık Değişim Profili ..... 101
Şekil 4.30. Model Parametre Değerlerinin Kalibresi Sonrası Fit Model ..... 102
Şekil 5.1. Program Arayüzü..... 104
Şekil 5.2. Re-enjeksiyon İlavesiz Model-ölçüm Basınçları..... 104
Şekil 5.3. Yıllık Üretim Programı (Senaryo-0)..... 105
Şekil 5.4. Yıllık Üretime Karşılık Basınç Değişimi..... 105
Şekil 5.5. Yıllık Üretime Karşılık Sıcaklık Değişimi ..... 106
Şekil 5.6. Yıllık Üretim Planlaması (Senaryo-1) ..... 106
Şekil 5.7. Re-enjeksiyonun Sıfır Olması Durumundaki Saha Basınç ve

Sıcaklık Grafiği ..... 107
Şekil 5.8. Re-enjeksiyonun Üretim Miktarının %10 Olması Durumu ..... 108
Şekil 5.9. Re-enjeksiyonun Üretim Miktarının %25 Olması Durumu ..... 108
Şekil 5.10. Re-enjeksiyonun Üretim Miktarının %35 Olması Durumu ..... 109
Şekil 5.11. Re-enjeksiyonun Üretim Miktarının %45 Olması Durumu ..... 109
Şekil 5.12. Re-enjeksiyonun Üretim Miktarının %48 Olması Durumu ..... 110
Şekil 5.13. Re-enjeksiyonun Senaryoları Basınç Grafiği ..... 111
Şekil 5.14. Re-enjeksiyonun Senaryoları Sıcaklık Grafiği ..... 111
Şekil 5.15. Ortalama 500 t/h Üretim Planlaması ..... 112
Şekil 5.16. Re-enjeksiyonun Üretim Miktarının %0 Olması Durumu ..... 113
Şekil 5.17. Re-enjeksiyonun Üretim Miktarının %46 Olması Durumu ..... 113
Şekil 5.18. Üretim Senaryoları ile Yıllık Basınç Değişim (re-enjeksiyon= 0) ..... 114
Şekil 5.19. Üretim Senaryoları ile Saha Yıllık Sıcaklık Değişim ..... 115
Şekil 5.20. Farklı Re-enjekte Edilen Akışkan Entalpisinin Saha Sıcaklığına Etkisi ..... 116

# 1. GİRİŞ

Jeotermal (“jeo”, yer; “termal”, ısı anlamına gelir.) yerkabuğunun çeşitli derinliklerinde birikmiş ısının oluşturduğu, kimyasallar içeren sıcak su, buhar ve gazlardır. Jeotermal enerji ise, bu jeotermal kaynaklardan ve bunların oluşturduğu enerjiden, doğrudan veya dolaylı yollardan faydalanmayı kapsamaktadır.

Jeotermal rezervuarlar, yerkabuğunun tektonik hareketlerine göre oluşmaktadır ve bu tektonik hareketler rezervuarın özelliklerini belirlemektedir. Jeotermal rezervuarlar, sıcaklık değerlerine ve faz yapılarına göre sınıflandırılırlar.

Jeotermal sistemler faz yapılarına göre, başlıca üç ana başlık altında sınıflandırılabilir. Bunlar hidrotermal sistemler, jeobasınçlı sistemler ve sıcak kuru kaya sistemlerdir.

Hidrotermal sistemler, bünyesinde akışkan bulunduran jeotermal sistemlerdir. Bu sistemlerde kendi içerisinde, buhar ağırlıklı ve sıvı ağırlıklı sistemler olmak üzere ikiye ayrılır. Buhar ağırlıklı sistemlerde, sıvı ile buhar birlikte bulunmalarına rağmen, rezervuar boyunca süreklilik gösteren ve basıncı kontrol eden faz, buhar fazıdır. Sıvı ağırlıklı sistemlerde ise, rezervuarda süreklilik gösteren ve basıncı kontrol eden faz, sıvı fazıdır.

Jeobasınçlı sistemler, hidrostatik basıncın çok üzerinde, akışkan içeren kayaçlardan oluşan sistemlerdir. Bu sistemler genellikle geçirimsizliği yüksek olan bir örtü kaya ile kaplı olan zonlardan oluşmaktadırlar. Geçirimsiz örtü kaya etkisiyle sistemde sıkışan akışkan, basınç gradyanının etkisi ile yükselerek yüzeye ulaşmaktadır.

Sıcak kuru kaya sistemleri ise, ısı taşıyıcı ortam olan suyu içermeyen sistemlerdir.

Jeotermal sahaların bilinçsizce işletilmesi, sahanın belirli bir süre sonunda işletilemez hale gelmesine neden olur. Bu sahaların işletilmesinde en önemli nokta, işletilen sahanın yenilenebilir halde tutulmasıdır. Yani sahalar öyle bir üretim/enjeksiyon optimizasyonunda işletmelidir ki, sahanın devamlılığı sağlansın. Bu kapsamda, işletilen jeotermal sahanın doğru işletilmesi sahanın doğru modellenmesi ile mümkündür.

Jeotermal rezervuar modelleme, literatürde genel olarak, sayısal ya da tank modelleri olmak üzere iki şekilde yapılmaktadır. Sayısal modellerin çalışma prensibi, herhangi bir rezervuarı hücrelere bölerek, her bir hücre üstünde kütle ve enerji dengesi denklemlerinin çözülmesine dayanır. Tank modellerinde ise, jeotermal sistemin içindeki rezervuar ve akifer tanklar tarafından temsil edilmektedir. Kütle ve enerji dengesi denklemlerinin tanklar üstünde çözümlenmesiyle, rezervuar ve akiferlerin ortalama basınç ve sıcaklık davranışları modellenebilir. Sayısal modellerin karmaşıklığı ve detaylı saha verilerine ihtiyaç duymaları nedeniyle, tank modelleme daha fazla tercih edilmektedir. Özellikle ülkemizdeki birçok sahanın yeni işletmeye alınmaları nedeniyle, sayısal modeller için ihtiyaç duyulan detaylı veriler yeterli düzeyde olmadığından, sahaların tank modelleriyle modellenmesi tercih sebebi olmaktadır.

Jeotermal rezervuar modelleme çalışmaları, kütle ve enerji korunum denklemlerinin birlikte çözümlenmesi ile gerçekleştirilmekte olup, bu denklem çözümlerinde ihtiyaç duyulan ve rezervuar karakteristik özelliklerini içeren parametrelerin doğru tespiti, yapılacak modellemenin doğru sonuçlar vermesi için önemlidir.

Özellikle tank modelleme ve bu modellemede kullanılan kütle-enerji korunum denklemlerinin çözümünde ihtiyaç duyulan rezervuar (permeabilite, porozite, kayaç sıkıştırılabilirliği vb.) parametreleri, interference (üretim/basınç takip) testlerinin değerlendirilmesiyle tespit edilmiştir.

Rezervuar üretim programını belirlemek ve üretim performansını artırmak için yapılan rezervuar modellemesinde, tank modellemesi, parametrelerin ve verilerin az olması durumlarında, sayısal modellere alternatif bir yöntemdir. Tank modellerinde, rezervuar ve akifer, homojen tanklar olarak tanımlanır. Tank modelleri üç ana bölümden oluşmaktadır: (1) Rezervuar, (2) Akifer ve (3) Besleme kaynağı. Bunlardan ilk ikisi (rezervuar ve akifer), ortalama aynı özelliklere sahip homojen tanklar tarafından temsil edilmektedir. Besleme kaynağı ise bu tanklardan herhangi birine (akifer ya da rezervuarın kendisine) ya da tüm tanklara bağlanabilmekte ve sistemin sabit basınçlı dış sınırını temsil etmektedir. Eğer tank modeli besleme

kaynağına bağlı ise, bu sistem “açık sistem”; bağlı değil ise, “kapalı sistem” olarak adlandırılır.

Tank modellerinde basınç ve sıcaklık hesaplamalarının temelini, kütle ve enerjinin korunumu denklemlerinin her bir tank için ayrı ayrı çözümlenmesi oluşturur. Tank modelleri “İzotermal Modeller” ve “İzotermal Olmayan Modeller” olmak üzere iki gruba ayrılır. Tanklar için, sadece kütlenin korunumu denklemleri çözümleniyorsa, bunlara “İzotermal Modeller”; kütlenin korunumu ve enerjinin korunumu denklemleri çözümleniyorsa, “İzotermal Olmayan Modeller” denir.

Jeotermal rezervuarların geliştirilmesinde yapılacak ekonomik yatırımlar büyük ölçüde rezervuarın ileriye yönelik sıcaklık ve basınç davranışlarına bağlıdır. Fakat ileriye yönelik tahminlerde her zaman için belirsizlikler söz konusudur.

Simav Jeotermal Sahası, Simav ilçe merkezinin yaklaşık 4-5 km kuzeyinde yer almaktadır. Çok fazla sayıda sıcak su kaynağına sahip olan bölgenin kaynakları, başlıca 2 alanda toplanmıştır. Bu alanlardan Eynal Bölgesi, Simav ilçe merkezinin yaklaşık 4 km kuzeyinde yer alırken, Çitgöl-Naşa Bölgesi’nde bulunan Çitgöl kaynakları Eynal’ın yaklaşık 3 km batısında, Naşa kaynakları ise Eynal’ın yaklaşık 3 km kuzeybatısında bulunmaktadır.

İnceleme alanı, Simav Grabeni olarak adlandırılan, bölgesel bir jeolojik yapının içinde yer almaktadır. Menderes Masifi’nin kuzey kenarının yakınında ve KB-GD doğrultusunda uzanan bu graben yapısı, yerkabuğunun metamorfik temel ve onu örten daha genç birimlerden kurulu üst düzeylerinin büyük atımlı bir çekim fayı ile yarılması, fayın iki yanındaki istifin kuzey blokta önemli ölçüde alçalması, genç ve kalın çökeller ve volkanitlerle örtülmeye başlamasına neden olmuştur. Yerkabuğundaki bu olaya bağlı olarak, Simav Ovası olarak adlandırılan kapalı bir havza ve içinde kurutulan yaklaşık 0,06 $km^2$’lik Simav Gölü oluşmuştur.

Simav Jeotermal Alanı, Simav Ovası’nın KD kenarında yer almaktadır. 70 $km^2$ kadar bir alan kaplamakta olan ovanın yükseltisi, 780 m dolayındadır. Buna karşılık, ovanın güneyindeki Simav Dağı’nın yükseltisi, 1.780 m’ye ulaşmaktadır. Simav Jeotermal Alanı, bu dağdan sarp ve yüksek bir yamaçla ayrılan ovanın doğu kenarında yer almaktadır.

Simav sahasındaki kuyuların derinlikleri 65,8 m (E-1) ile 958 m (EJ-2) arasında, ölçülen kuyu dibi sıcaklıkları ise 105,1°C (Ç-1) ile 162,47°C (EJ-1) arasında değişmektedir. E-1 ve Ç-1 kuyuları dışındaki kuyularda, rezervuar kayacı olarak karşılaşılan kaya birimi, Simav Metamorfitleri'dir.

Sahada gerçekleştirilen kapsamlı kuyu test çalışması ise 2006 yılında, MTA Genel Müdürlüğü tarafından yapılmıştır. Bu test çalışmalarında, kuyularda statik-dinamik sıcaklık ve basınç, basınç azalım, basınç yükselim, enjeksiyon, üretim ve interference testleri gerçekleştirilmiştir. Bu kuyu test sonuçları değerlendirilerek, modellemede ihtiyaç duyulan parametre değerlerinin tespiti yapılmış ve sahanın modellenmesi sağlanmıştır.

Bu çalışmada; Kütahya-Simav jeotermal sahası *izotermal olmayan tek tank modeli* ile modellenmiş olup, model oluşturulduktan sonra, 3 farklı üretim senaryosuna (227 ton/saat, 312,84 ton/saat ve 500 ton/saat) göre, sahadaki basınç ve sıcaklık değişimleri incelenmiş ve sahanın bu üretim senaryoları karşılığında, yenilenebilir ve sürdürülebilir halde kalması için üretilen akışkanın % kaçlık bölümünün re-enjekte edilmesi gerekliliği test edilmiştir. Bu amaçla her üretim senaryosu için üretilen akışkanın %10, %20, %30 %40 vb. oranlarında re-enjeksiyon durumlarındaki saha basınç değişimleri izlenerek her üretim senaryosu için optimum re-enjeksiyon oranı tespit edilmiştir. Re-enjeksiyon ile saha sıcaklık profilindeki değişimlerde, her üretim ve re-enjeksiyon senaryosuna göre tespit edilmiştir.

# 2. JEOTERMAL REZERVUAR MODELLEME

Jeotermal rezervuar modellemesi, literatüre bakıldığında genel olarak iki şekilde yapılır; sayısal modeller kullanılarak ya da tank modeller kullanılarak. Sayısal modellerin çalışma prensibi, herhangi bir rezervuarı hücrelere bölerek her bir hücre üstünde kütle dengesi ve enerji dengesi denklemlerinin çözülmesine dayanır. Bu şekilde rezervuarın ve kuyuların ileriye yönelik basınç ve sıcaklık performanslarını modellemek mümkündür. Sayısal modeller, rezervuar özelliklerinde heterojenliği, karmaşık akışkan özelliklerini ve karmaşık kuyu geometrileri gibi zor durumları modelleyebilmektedir. Bu nedenle jeotermal rezervuarlar için oldukça çekici bir yöntemdir. Buna karşın sayısal modellerin en büyük dezavantajları ise çalışabilmeleri için çok fazla veriye ihtiyaç duymaları (en basit modellerde dahi, her bir hücre için en azından geçirgenlik ve gözeneklilik verilerine ihtiyaç duyulmakta) ve model karmaşıklaştıkça çalışma sürelerinde artışlar olmasıdır. Çalışma süreleri, özellikle tarihsel çakıştırma problemlerinde öne çıkmaktadır. Çünkü tarihsel çakıştırma sırasında, sayısal modeller defalarca çalıştırılmaktadır.

Tank modellerinde ise jeotermal sistemin içindeki rezervuar ve akiferler, tanklar tarafından temsil edilmektedir. Kütle ve enerji denge denklemlerinin tanklar üstünde çözülmesiyle, rezervuar ve akiferlerin ortalama basınç ve sıcaklık davranışları modellenebilir. Tank modelleri sayısal modeller ile karşılaştırıldığında avantajlı olduğu iki durum söz konusudur: Öncelikle, tank modellerin çalışabilmesi için gerekecek parametre sayısı, sayısal modellere göre çok daha azdır, çünkü çok daha basit bir sistem ile modellenmektedir. Tank modellerinin diğer avantajı ise, çalışma sürelerinin sayısal modellere göre çok daha kısa olmasıdır. Bu özellikle tarihsel çakıştırma açısından büyük avantaj sağlamaktadır.

Rezervuar mühendisleri 1960'lı yılların başlarında jeotermal rezervuarlarla ilgilenmeye başlamışlardır. Farklı yöntemler uygulanarak rezervuar özellikleri tayin edilmeye çalışılmıştır. Whiting ve Ramey (1969), tümsel (lumped) parametre modeli kullanarak rezervuar özelliklerini belirlemeye çalışmışlardır. Brigham ve Morrow (1974), tümsel parametre modelini buhar baskın bir sistemde uygulamışlardır. Bodvarsson (1984) ve Pruess (1984), Krafla jeotermal alanında rezervuarın gelecekteki performansının tahmini için detaylı bir modelleme çalışması

yapmışlar ve bu çalışmaya ait sonuçları 4 ayrı makalede toplamışlardır. İlk makalede kuyularda yapılan test verilerinin analizi, ikincisinde rezervuarın doğal halinin kavramsal olarak modellenmesi, üçüncüsünde ise rezervuar kapasitesinin belirlenmesine ilişkin çalışmalara ait sonuçlar verilmiş; dördüncü makalede ise yapılan tüm çalışmaların ışığında, kuyuların ve rezervuarın gelecekteki performansının tahmini için geliştirilen dağınık parametreli modele ilişkin bilgiler yer almıştır. Bodvarsson ve arkadaşları (1986) modelleme alanında süregelen gelişmeleri de göz önüne alarak, jeotermal rezervuarların modellemesine yönelik teorik bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışma kapsamında farklı modelleme yaklaşımlarını tanımlamış, bunların avantajını ve limitlerini tartışmışlardır. Kütle ve ısı taşınım eşitliklerinin oluşturulması ve bunların çözüm teknikleri ile jeotermal rezervuarların modellemesinde karşılaşılan problemleri ortaya koymuşlardır. Alkan ve Satman (1990), boyutsuz parametre modelini, karbondioksit içeren jeotermal rezervuarlar için geliştirmişlerdir. Sarak (2004), düşük sıcaklıklı jeotermal rezervuarlara ait çeşitli konfigürasyonlardaki tank modeller için analitik denklemler geliştirmiştir. Onur (2008), izotermal olmayan boyutsuz parametre modelini, sıvı ağırlıklı, düşük sıcaklıklı jeotermal rezervuarlar için geliştirmiştir. Bu çalışmanın bir adım ilerisi olarak Türeyen ve arkadaşları (2009), izotermal olmayan sıvı ağırlıklı jeotermal rezervuarlar için, boyutsuz parametre modelini geliştirmişlerdir. Bu çalışmada, birbirine bağlı farklı şekillerdeki tank modellerinin kütle ve enerji denklikleri genelleştirilerek, model parametrelerinin belirlenmesinde, sıcaklık ve basıncın etkisi incelenmiştir. Sıcaklık verilerinin basınç verileri ile birlikte kullanılması ile daha doğru tahminler yapılabileceğini göstermişlerdir.

Jeotermal rezervuarların geliştirilmesinde yapılacak ekonomik yatırımlar, büyük ölçüde rezervuarın ileriye yönelik sıcaklık ve basınç davranışlarına bağlıdır. Fakat ileriye yönelik tahminlerde her zaman için belirsizlikler söz konusudur.

### 2.1. Tank Modelleme

Rezervuar üretim programını belirlemek ve üretim performansını artırmak için yapılan rezervuar modellemesinde, tank modellemesi parametrelerin ve verilerin az olması durumlarında, sayısal modellere alternatif bir yöntemdir. Tank

modellerinde rezervuar ve akifer homojen tanklar olarak tanımlanır. Tank modelleri üç ana bölümden oluşmaktadır: (1) Rezervuar, (2) Akifer ve (3) Besleme kaynağı. Bunlardan ilk ikisi (rezervuar ve akifer), ortalama aynı özelliklere sahip homojen tanklar tarafından temsil edilmektedir. Besleme kaynağı ise, bu tanklardan herhangi birine (akifer ya da rezervuarın kendisine) ya da tüm tanklara bağlanabilmekte ve sistemin sabit basınçlı dış sınırını temsil etmektedir. Eğer tank modeli besleme kaynağına bağlı ise, bu sistem "açık sistem"; bağlı değil ise bu sistem, "kapalı sistem" olarak adlandırılır.

Tankları jeotermal sistemin durumuna göre, farklı konfigürasyonlarda kullanmak mümkündür. Burada kritik noktalardan birisi, sistemin temsili için kaç tankın ve hangi düzende kullanılması gerektiğidir. Bu sorunun yanıtı için, jeotermal sistem içinde eldeki tüm veriler (jeolojik, jeofizik ve üretim verileri) değerlendirilmeli ve en uygun model seçilmelidir.

Tank modellerinde basınç ve sıcaklık hesaplamalarının temelini, kütle ve enerjinin korunumu denklemlerinin her tank için ayrı ayrı çözümlenmesi oluşturur. Tank modelleri "İzotermal Modeller" ve "İzotermal Olmayan Modeller" olmak üzere iki gruba ayrılır. Tanklar için, sadece kütlenin korunumu denklemleri çözümleniyorsa, bunlara "İzotermal Modeller"; kütlenin korunumu ve enerjinin korunumu denklemleri çözümleniyorsa, "İzotermal Olmayan Modeller" denir.

### 2.1.1. İzotermal Tank Modelleri

Jeotermal sistemi temsil eden tanklar üstünde, sadece kütlenin korunumu denklemleri çözülürse, bu modellere "İzotermal Modeller" denir. Beslenmeye açık olan sisteme "Açık Model"; beslenmeye kapalı modeller ise "Kapalı Model" olarak adlandırılır. İzotermal tank modelleme çalışmasında sahanın sıcaklık profili değişimi ile ilgili herhangi bir saptama yapılamaz.

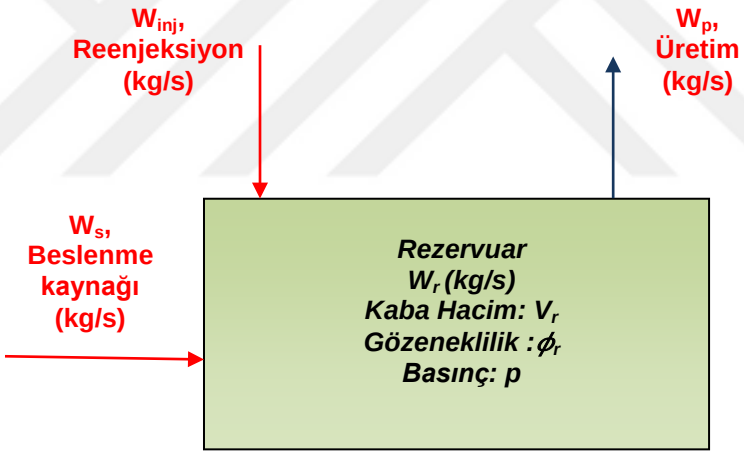
#### 2.1.1.1. Tek Tank Açık Model

Tek tank modeli Şekil 2.1'de şematik olarak gösterilmiştir. Burada, $V_r$ ($m^3$) rezervuar hacmini, $\phi$ poroziteyi ifade etmektedir. $W_p$ (kg/s) toplam üretim debisini,

$W_{inj}$ (kg/s) enjekte edilen toplam kütle debisini ve $W_s$ (kg/s) üretim nedeniyle meydana gelen basınç farkından dolayı akiferden rezervuara geçen toplam kütlenin akış debisini ifade eder. Rezervuarda biriken kütle $W_r$ (kg/s) için, kütle dengesi denklemi yazıldığında aşağıdaki denklik elde edilir.

$$W_r = W_s + W_{inj} - W_p \tag{2.1}$$

Rezervuardaki kütlenin birikim debisi olarak tanımlanan $W_r$, rezervuarda sıkışmış halde bulunan akışkanın, yani suyun kütlesi olarak da yazılabilir. Rezervuardaki kütle zamana göre değişim göstereceğinden, aşağıda belirtilen Eşitlik 2.2'de olduğu gibi rezervuarda biriken kütle, rezervuar hacmi ve $\rho_w$ (kg/m$^3$) sıvı yoğunluğunun zamana göre değişimi olarak ifade edilebilir.




Şekil 2.1. Tek Tank Açık Model

$$W_r = \frac{\partial V_r \phi \rho_w}{\partial t} \tag{2.2}$$

Eşitlik 2.2'den elde edilen yeni denklem ile Eşitlik 2.1'de yazılan kütle denkliği denklemi tekrar yazılır ise Eşitlik 2.3 elde edilir.

$$W_r = \frac{\partial V_r \phi \rho_w}{\partial t} = W_s + W_{inj} - W_p \tag{2.3}$$

Rezervuarda biriken kütle denkleminde, rezervuar hacminin sabit olduğu varsayılırsa; kütle debisinin zamana göre türevinde sabit terim, Eşitlik 2.4'de gösterildiği gibi dışarı alınır.

$$\frac{\partial V_r \phi \rho_w}{\partial t} = V_r \frac{\partial(\phi \rho_w)}{\partial t} \tag{2.4}$$

Rezervuarın porozitesi ve sıvının yoğunluğu rezervuar basıncına bağlı olarak değişir. Bu değişime $C_t$ (bar-1) "toplam sıkıştırılabilirlik" denir ve "sıvının $C_f$ (bar-1) ve kayanın $C_r$(bar-1) sıkıştırılabilirliğinin toplamı" olarak ifade edilir:

$$C_t = C_f + C_r \tag{2.5}$$

$$C_f = \frac{1}{\rho w} \frac{\partial \rho w}{\partial p} \tag{2.6}$$

$$C_r = \frac{1}{\phi} \frac{\partial \phi}{\partial p} \tag{2.7}$$

Eşitlik 2.4'de, porozite ve su yoğunluğunun zamana göre türevinde zincir kuralı uygulanarak denklem genişletilirse Eşitlik 2.8 elde edilir:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\emptyset \rho_w) = \emptyset \frac{\partial \rho_w}{\partial p} \frac{\partial p}{\partial t} + \rho_s \frac{\partial \emptyset}{\partial p} \frac{\partial p}{\partial t} \tag{2.8}$$

Elde edilen denklem $\emptyset \rho_w$ parantezine alınarak düzenlenir ise Eşitlik 2.9 elde edilir.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\emptyset \rho_w) = \emptyset \rho_w \left[ \frac{1}{\rho_s} \frac{\partial \rho_w}{\partial p} \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{1}{\emptyset} \frac{\partial \emptyset}{\partial p} \frac{\partial p}{\partial t} \right] \tag{2.9}$$

Eşitlik 2.9'un sağ tarafındaki terimlere bakıldığında, $C_t$ toplam sıkıştırılabilirliği ifade ettiği görülür. Eşitlikte $C_f$ (bar-1) ve $C_r$ (bar-1) yerine yazıldığında, rezervuarda biriken kütle debisini, basıncın zamana göre değişimine bağlı olarak Eşitlik 2.10'da gösterildiği gibi elde edilir:

$$\frac{\partial Vr\phi\rho_w}{\partial t} = V_r\phi\rho_w c_t \frac{\partial p}{\partial t} \tag{2.10}$$

Bu noktaya kadar elde edilen denklemler, ana denklem olan Eşitlik 2.3'de yerine konulduğunda aşağıda verilen Eşitlik 2.11 elde edilir.

$$V_r\phi\rho_w c_t \frac{\partial p}{\partial t} = W_s - W_p + W_{inj} \tag{2.11}$$

Ana eşitliğin ikinci terimi $W_s$, akiferden rezervuara üretim nedeniyle hareket eden kütle debisini ifade etmektedir. Akiferi besleyen kaynağın büyük olduğu varsayılırsa bu sistemin dış sınırındaki basınç sabittir. Bu durumda su girişi debisi Schilthuis modeli kullanılarak Eşitlik 2.12 elde edilir (Schilthuis, 1936)

$$Ws = \alpha[p_i - p(t)] \tag{2.12}$$

A (kg/bar-s), rezervuar besleme sabiti, pi rezervuarın ilk basıncını p(t) ise birim zamandaki rezervuar basıncını ifade eder. Elde edilen değerler ana eşitlikte yerine konulduğunda Eşitlik 2.13 elde edilir:

$$V_r\phi\rho_w c_t \frac{\partial p}{\partial t} - \alpha[p_i - p(t)] + [Wp + Winj] = 0 \tag{2.13}$$

İlk terim rezervuarda biriken madde miktarını, ikinci terim akiferden rezervuara geçen madde miktarını ve son terimde net üretim değişimini ifade eder. İlk terimdeki sabit olan değerler tek bir ifade altında depolama kapasitesi. κ (kg/bar) olarak adlandırılabilir (Eşitlik 2.14).

$$\kappa = V_r\phi\rho_w c_t \tag{2.14}$$

Üretilen madde miktarından, sisteme enjekte edilen madde miktarı çıkarıldığında net üretim elde edilir (Eşitlik 2.15).

$$Wp,net = Wp - Winj \tag{2.15}$$

Bu iki yeni ifade Eşitlik 2.13'de yerine konulursa Eşitlik 2.16 elde edilir:

$$Wp,net = \alpha[p_i - p(t)] - \kappa\frac{dp}{dt} \tag{2.16}$$

Rezervuar beslemesinin sabit basınçlı olduğunu varsayarsak, birim zamandaki fark basıncını aşağıdaki gibi ifade edebiliriz:

$$\Delta p(t) = p_i - p(t) \tag{2.17}$$

Elde edilen bu eşitlikleri birleştirdiğimizde Eşitlik 2.18 elde edilir:

$$\frac{d\Delta p}{dt} + \frac{\alpha}{\kappa}\Delta p = \frac{Wp,net}{\kappa} \tag{2.18}$$

Birinci derece diferansiyel eşitlik haline dönüştürdüğümüz Eşitlik 2.18 çözüldüğünde, genel çözüm Eşitlik 2.19'da belirtildiği gibi elde edilir.

$$\Delta p(t) = c\ exp\left(-\frac{\alpha t}{\kappa}\right) + \frac{Wp,net}{\alpha} \tag{2.19}$$

Eşitlik 2.19'un çözümü için uygun başlangıç koşulları tanımlanmalıdır. t=0 anında sistemde basınç farkı olmadığı varsayılırsa, Δp=(t=0)= 0 olacaktır. Denklemde değerler yerine konduğunda c sabitinin değeri; net üretimin, rezervuar beslemesine oranı olarak bulunur.

$$c = -\frac{Wp,net}{\alpha} \tag{2.20}$$

Eşitlik 2.19'da c sabiti yerine yazıldığında Eşitlik 2.21 elde edilir.

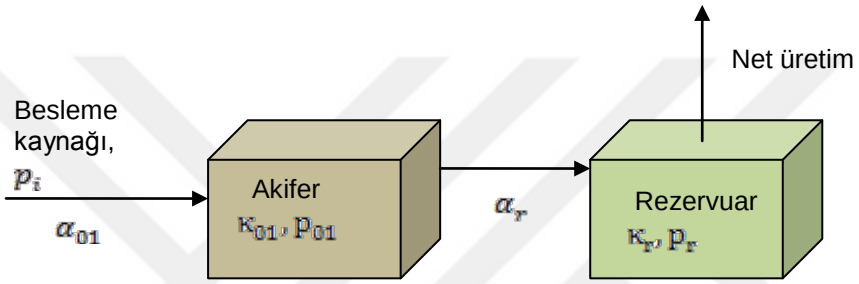
$$\Delta p(t) = \frac{Wp,net}{\alpha}\left[1 - exp\left(-\frac{\alpha t}{\kappa}\right)\right] \tag{2.21}$$

Δp ifadesi açık olarak yazıldığında Eşitlik 2.22 elde edilir (Sarak ve ark., 2005).

$$p(t) = p_i - \frac{Wp,net}{\alpha}\left[1 - exp\left(-\frac{\alpha t}{\kappa}\right)\right] \quad (2.22)$$

### 2.1.1.2. İki Tank Açık Model

2 Tank Model, Şekil 2.2'de görüldüğü gibi 1 tane rezervuar, 1 tane rezervuarı besleyen akiferden oluşan, 2 tankın bulunduğu sistemdir. Akifer, sabit basınçlı sürekli bir besleme kaynağı tarafından beslenir.




Şekil 2.2. 2 Tank Açık Model

Bu sistemde hem akifere, hem de rezervuara akış olduğundan Schilthuis modeli her ikisi içinde kullanılır.

$$Ws = \alpha_{01}[p_i - p_{01}(t)] \quad (2.23)$$

$$Wr = \alpha_r[p_i - p_r(t)] \quad (2.24)$$

$\alpha_{01}$ (kg/bar-s), akifer besleme sabiti olarak adlandırılabilir. Besleme kaynağından akifere doğru geçen kütle için kullanılır. $\alpha_r$ (kg/bar-s) rezervuar besleme sabiti akiferden rezervuara geçen kütle için kullanılır. $p_{01}$ (bar) ve $\kappa_{01}$ (kg/bar) akifer için herhangi bir t anındaki basınç ve depolama kapasitesidir. $p_r(t)$ rezervuar için herhangi bir t anındaki basınç ve depolama kapasitesini ifade eder. 2 tank açık sistem için elde edilen denklemler aşağıdaki gibidir (Sarak, 2005):

$$\Delta p_r(t) = \frac{Wp,net}{\kappa_r}\left[\frac{d}{\mu_1\mu_2} + \frac{\mu_1 - d}{\mu_1(\mu_2 - \mu_1)}\exp(-\mu_1 t) + \frac{\mu_2 - d}{\mu_2(\mu_1 - \mu_2)}exp(-\mu_2 t)\right] \quad (2.25)$$

Denklemde $\mu_1, \mu_2$ ve d olarak belirtilen kat sayılar, aşağıda verilen denkliği ifade eder:

$$\mu_1 = \frac{\left[d + \frac{\alpha_r}{\kappa_r}\right] + \sqrt{\left[d + \frac{\alpha_r}{\kappa_r}\right]^2 - 4\frac{\alpha_{01}\alpha_r}{\kappa_{01}\kappa_r}}}{2}$$

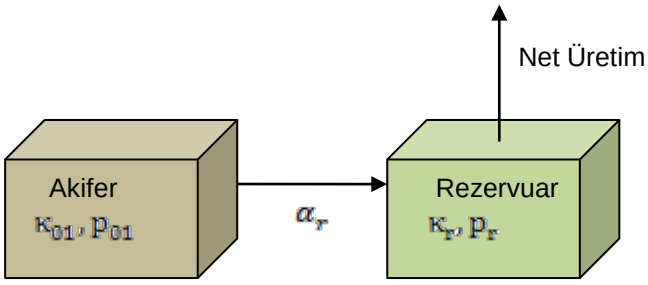
$$\mu_2 = \frac{\left[d + \frac{\alpha_r}{\kappa_r}\right] - \sqrt{\left[d + \frac{\alpha_r}{\kappa_r}\right]^2 - 4\frac{\alpha_{01}\alpha_r}{\kappa_{01}\kappa_r}}}{2} \quad (2.26)$$

$$d = \frac{[\alpha_{01} + \alpha_r]}{\kappa_{01}} \quad (2.27)$$

### 2.1.1.3. İki Tank Kapalı Model

2 Tank Kapalı Model, aşağıdaki Şekil 2.3'de gösterildiği gibi, akifere beslemenin olmadığı, başka bir deyişle akifer kütle debisinin $w_a = 0$ ve akifer besleme sabitinin $1o\alpha = 0$ olduğu sistemlerdir. Kapalı model için kütle denkliği denklemi yazılıp çözüldüğünde Eşitlik 2.28 elde edilir.

$$\Delta p_r(t) = \frac{Wp,net}{(\kappa_{01} + \kappa_r)}t + \frac{W\ddot{u},net}{\alpha_r}\left(\frac{\kappa_{01}}{(\kappa_{01} + \kappa_r)}\right)^2\left[1 - exp\left(-\alpha_r\frac{\kappa_{01} + \kappa_r}{\kappa_{01}\kappa_r}t\right)\right] \quad (2.28)$$

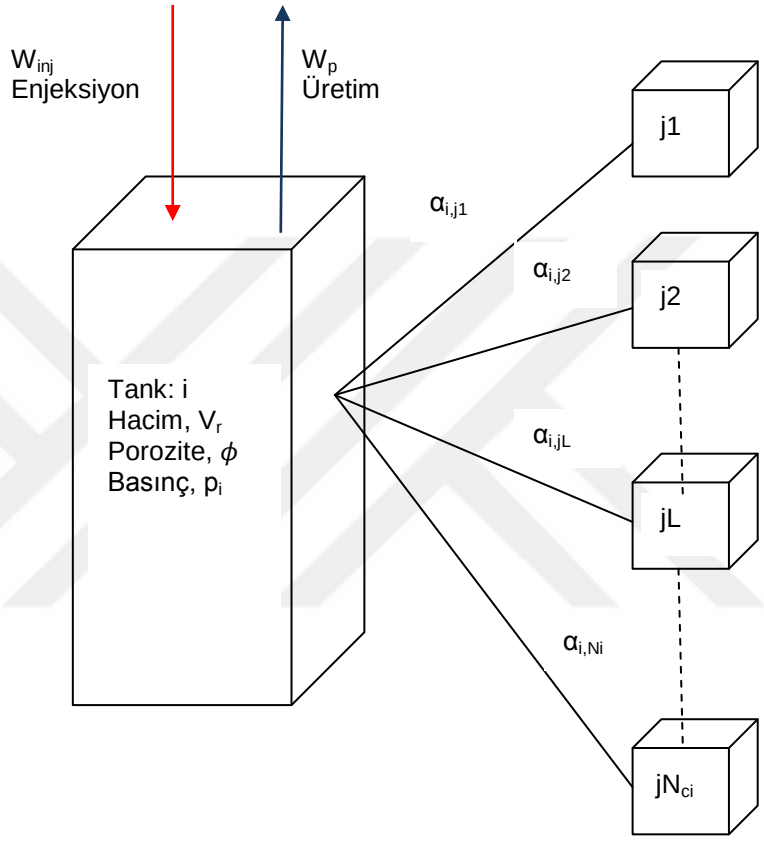



Şekil 2.3. 2 Tank Kapalı Model

### 2.1.1.4. İzotermal Modellerin Sayısal Çözümleri

Daha önceki bölümlerde izotermal modeller için analitik çözümler verilmiştir. Analitik çözümler, anlaşıldığı gibi tankların konfigürasyonuna bağlı olarak

değişmektedir. Bu bölümde, tanklar için kütlenin korunumu denklemleri sayısal olarak çözülecektir. Geliştirilen sayısal çözümler tank konfigürasyonundan bağımsız olacak şekilde, genel olarak verilecektir (Konuksal, 2007). Şekil 2.4'de herhangi bir i tankı gösterilmektedir.




Şekil 2.4. $N_i$ Tane Tank İçeren Sistemin Şematik Gösterimi

Şekil 2.4'deki i tankının $V_{ri}$ ($m^3$) hacmi, $\varphi_i$ gözenekliliği ve $p_i$ (bar) basıncı olduğunda bu tanktan $W_p$, net üretim debisi bulunmaktadır. Bu tankın aynı zamanda $N_{ci}$ adet başka tank ile bağlantısı bulunmaktadır. Burada $N_{ci}$, herhangi bir i tankının yaptığı toplam bağlantı sayısını gösterir. Eğer i tankı üstünde kütlenin korunumu prensibini yazacak olursak Eşitlik 2.29 ve 2.30 elde edilir. Tanklar arasındaki kütle debisi Schilthuis yaklaşımından yazılır (Eşitlik 2.31).

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Net Üretilen Kütle debisi | - | Diğer tanklardan gelen kütle debisi | = | i tankında biriken kütle debisi | (2.29) |

Net üretim debisi = $W_{p,net}$

Diğer tanklardan gelen kütle debisi = $W_{i,j1} + W_{i,j2} + \cdots \ldots W_{i,jL}$ (2.30)

$$W_{i,jL} = \alpha_{i,jL}(P_{jL} - P_i) \quad (2.31)$$

$\alpha_{i,jL}$, I tankı ile$jL$tankı arasındaki değişim indeksidir. Bu denklem 2.31'de yerine yazılır ise Eşitlik 2.32 bulunur.

$$K_i\frac{\partial p_i}{\partial t}=[\alpha_{i,j1}(p_i-p_1)+\alpha_{i,j2}(p_i-p_2)+\cdots+\alpha_{i,Nci}(p_i-p_{Nci})]-w_{p,net} \quad (2.32)$$

Eşitlik 2.32'de basıncın zamana göre türevi için sonlu farklar yaklaşımı kullanılırsa Eşitlik 2.33; Eşitlik 2.33 düzenlenir ise Eşitlik 2.34 elde edilir:

$$\kappa_i\frac{p_i^{n+1}-p_i^n}{\Delta t}+W_{i,net}^n=\left[\alpha_{i,j1}\left(p_i^{n+1}-p_1^n\right)+\alpha_{i,j2}\left(p_i^{n+1}-p_2^{n+1}\right)+..+\alpha_{i,Nci}\left(p_i^{n+1}-p_{Nci}^{n+1}\right)\right] \quad (2.33)$$

$$\sum_{L=1}^{Ni}\alpha_{i,jL}\left(p_i^{n+1}-p_{jL}^{n+1}\right)=\kappa_i\frac{p_i^{n+1}-p_i^n}{\Delta t}+W_{p,net}^n \quad (2.34)$$

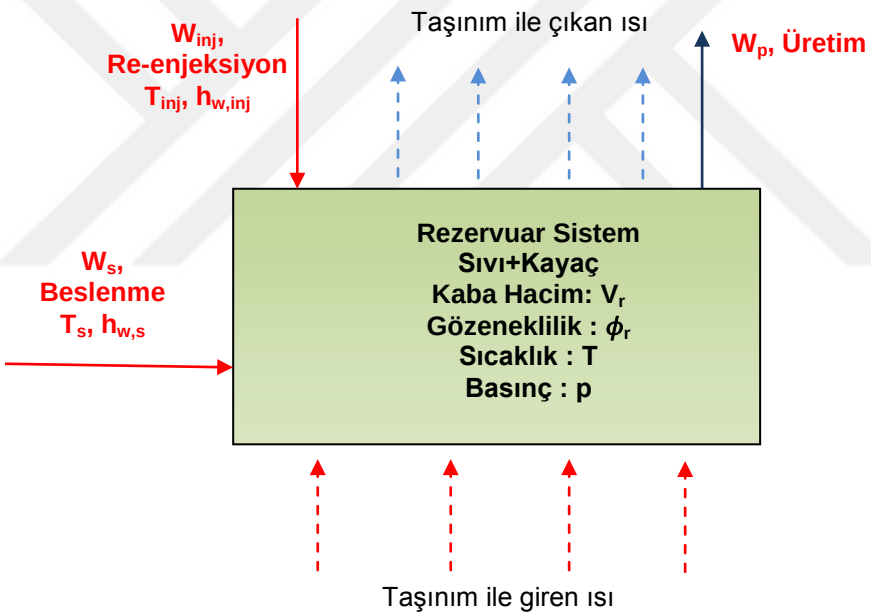
Elde edilen Eşitlik 2.34'de bilinenleri ve bilinmeyenleri toparladığımızda, *i* tankı için kütle denkliği, Eşitlik 2.35 elde edilir.

$$\sum_{L=1}^{Ni}\alpha_{i,jL}p_{jl}^{n+1}+\left[\sum_{i=1}^{Ni}\alpha_{i,jl}-\frac{\kappa_i}{\Delta t}\right]p_i^{n+1}=-\frac{\kappa_i p_i^n}{\Delta t}+W_{p,net}^n \quad (2.35)$$

### 2.1.2. İzotermal Olmayan Tank Modelleri

Jeotermal rezervuarlarda sıcaklığın modellenmesi büyük önem taşımaktadır. Jeotermal sistemlerde sıcaklık değişimleri, geri basma işlemlerinden ve besleme

kaynaklarından soğuk su girişinden kaynaklanabilmektedir. Bunların neticesinde oluşabilecek sıcaklık değişimlerinin modellenmesi özellikle jeotermal rezervuarın ömrü ve yapılacak yatırımların belirlenmesi için zorunludur. Bir önceki bölümde verilen izotermal modeller, jeotermal rezervuarların ortalama basınçlarını modelleyebilme yeteneğine sahip olsa da sıcaklık davranışlarını modelleyemezler. Tank sisteminde, kütle dengesi denklemiyle birlikte enerji dengesi denklemlerinin çözülmesiyle izotermal olmayan modeller elde edilir. Bu modeller sayesinde jeotermal sistemdeki akiferlerin ve rezervuarın basınç davranışlarıyla birlikte sıcaklık davranışları da modellenebilmektedir. Bu bölümde izotermal olmayan modeller için çözüm denklemlerinin çıkartılması ve çözüm yöntemleri gösterilecektir.




Şekil 2.5. İdealleştirilmiş İzotermal Tank Modeli

Şekil 2.5'de sunulan idealleştirilmiş tank modelinde, tek-faz sıvı içeren jeotermal rezervuar bir tank olarak düşünülerek, sisteme ait ortalama özellikler kullanılmaktadır. Modelde, $W_p$ (kg/s) üretim kuyuları aracılığıyla tanktan yapılan toplam kütlesel üretimdekisini ve $W_{inj}$ (kg/s) re-enjeksiyon kuyuları aracılığıyla tanka geri dönen toplam kütlesel enjeksiyon debisini temsil etmektedir. Tanktan yapılan kütlesel net üretim debisi, $W_{ü,net}$ (kg/s),ise $W_p$-$W_{inj}$ şeklinde ifade edilmektedir. Tanktan yapılan üretim nedeniyle, tankta oluşan basınç düşümü,

beslenme kaynağından tanka doğru akışkan akışına (beslenmeye) neden olmaktadır. Modellemede $W_s$ (kg/s) ile temsil edilen kütlesel beslenme debisi, basitliği ve yaygın kullanım alanının olması nedeniyle, diğer tank modellemesi çalışmalarında olduğu gibi (Axelsson, 1989; Sarak ve ark., 2005; Onur ve ark., 2005; Axelsson ve ark., 2005), Schilthuis kararlı akış modeli (Schilthuis, 1936) ile $W_s = \alpha_s[p_i - p(t)]$ şeklinde modellenmektedir (Eşitlik 2.36).

$$V_r \frac{d(\rho_w \phi_r)}{dt} - \alpha_s[p_i - p(t)] + [W_p(t) - W_{inj}(t)] = 0 \quad (2.36)$$

Jeotermal rezervuarlardaki ısı akışında genelde etkin olan konveksiyondur (taşınım); yani üretim, re-enjeksiyon ve beslenme aktivitesi nedeniyle, ısının akışkan hareketi ile taşınmasıdır. İletimden (conduction) dolayı olan ısı kayıpları ile pınar veya kaynaklardan dışarı akan akışkandan olan ısı kayıpları ihmal edilirse, Şekil 2.1'de belirtilen tek-tank modeli için enerji korunumu ilkesi uygulanarak, ısı akışını tanımlayan diferansiyel denklem aşağıdaki gibi (Eşitlik 2.37) türetilebilmektedir (Onur, 2008):

$$\frac{d}{dt}[(1-\phi_r)V_r\rho_m C_m T + V_r\phi_r\rho_w U_w] - W_{inj}(t)h_{w,inj}(t) - \alpha_s[p_i - p(t)]h_{w,s}(t) + W_p(t)h_{w,p}(t) = 0 \quad (2.37)$$

Burada;

$V_r$: Rezervuar kaba hacmi ($m^3$)

$\rho_m$:Kayaç katı kısmı yoğunluğu, $kg/m^3$

$C_m$: Kayaç katı kısmı özgül ısı kapasitesi, J/(kg°C)

T(t): Herhangi bir zaman t'deki rezervuar ortalama sıcaklığı, °C

$\phi_r$: Herhangi bir zaman değeri t'deki rezervuar gözeneklilik değeri

$\rho_w$: Jeotermal suyun yoğunluğu, $kg/m^3$

$U_w$: Herhangi bir zaman değeri t'de suyun özgül içsel enerjisi, KJ/kg

$h_{w,s}$: Doğal beslenme ile giren suyun özgül entalpisi, KJ/kg

$h_{w,inj}$: Enjeksiyon suyun özgül entalpisi, KJ/kg

$h_{w,p}$: Üretilen suyun özgül entalpisi, KJ/kg

İzotermal olmayan tank modeli, yukarıdaki diferansiyel denklemlerin (Eşitlik 2.37) çözümü ile gerçekleştirilmektedir. $\phi$ porozitenin basınç ve sıcaklıkla değişimi (Onur ve ark., 2008);

$$\phi(p,T) = \phi_i[1 + c_r(p(t) - p_0) - \beta_r(T(t) - T_0] \quad (2.38)$$

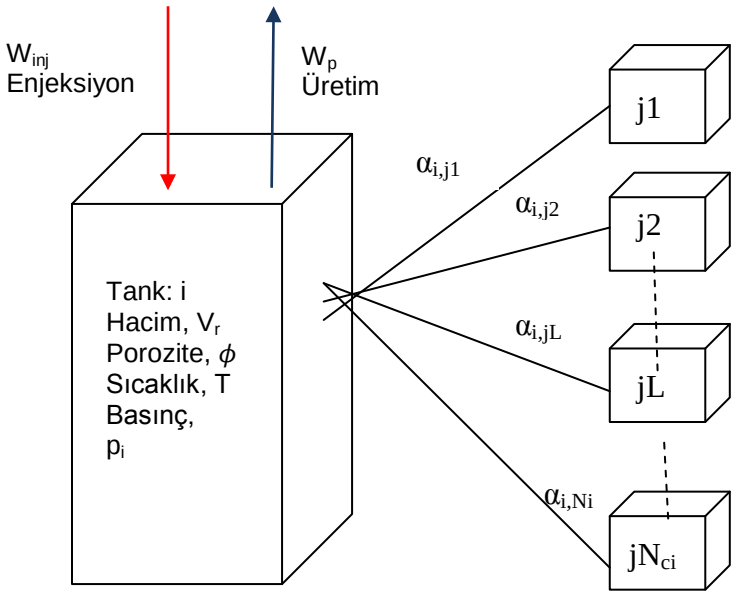
Burada;

$c_r$: Sabit sıcaklık altında, gözeneklilik (veya etken kayaç) sıkıştırılabilirliği, 1/bar.

$\beta_r$: Sabit basınç altında, gözeneklilik, termal genleşme/büzüşme katsayısı, 1/$^o$C

### 2.1.3. Genelleştirilmiş İzotermal Olmayan Tank Modeli

Şekil 2.6'da verilen izotermal olmayan tank modeli şematik olarak gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi, bütün tanklar birbirine bağlıdır. $N_{ci}$, $i$ tankının diğer tanklarla yaptığı bağlı tank sayısını, $W_{p,i}$ (kg/s) toplam üretim debisini, $W_{inj,i}$ (kg/s) toplam enjekte edilen kütle debisini ve $W_{s,i}$ (kg/s) üretim nedeniyle meydana gelen basınç farkından dolayı diğer tanklardan $i$ tankına geçen toplam kütlenin akış debisini ifade eder. Kütle denklemi Eşitlik 2.39'da verilmiştir.




Şekil 2.6. $i$ Tankı ve Bağlantıları

$$V_r \frac{\partial(\rho_w \phi_r}{\partial t} + [W p_i(t) - W_{inj,i}(t)] + \sum_{t=1}^{Nci} \alpha_{i,jL}[p_{jL} - p_i(t)] = 0 \quad (2.39)$$

Denklemdeki ilk terim rezervuarda biriken kütle debisini, ikinci terim net üretim debisini ve son terimde bağlı olan tankların net akış debisini ifade eder. Rezervuarlarda ısı konveksiyonel olarak yayılır. Başka bir deyişle rezervuardaki sıcaklık, genellikle üretim nedeniyle çekilen veya enjeksiyon nedeniyle rezervuara basılan akışkanın hareketi yada besleme kaynaklarından gelen akışkanın hareketi nedeniyle değişir. Rezervuarlarda kondüksiyonel ısı transferi çok düşük olduğundan ihmal edilebilir. Yapılan varsayımlar doğrultusunda *i* tankı için enerji denkliği yazıldığında Eşitlik 2.40 elde edilir.

$$\frac{d}{dt}[(1-\phi_r)V_r\rho_m C_m T + V_r\phi_r\rho_w U_w] - W_{inj}(t)h_{w,inj}(T_{inj,i}, t) + W_p(t)h_{w,p}((T_i, t) + \sum \alpha_{i,jL}[p_{ji}(t) - p_i(t)]h_y(t) = 0 \quad (2.40)$$

Eşitlik 2.40'da ilk terim akışkanda ve kaya içinde biriken enerjiyi, ikinci terim enjekte edilen akışkandan sisteme giren enerjiyi ve üçüncü terim üretim nedeniyle sistemden çekilen enerjiyi, son olarak dördüncü terimde bağlı olan tanklardan sisteme giren enerjiyi ifade eder.

### 2.1.4. Çözümleme Yöntemi: Newton-Raphson Metodu

Kütle ve enerji denklemleri doğrusal olmayan diferansiyel denklemler olduğundan, tümüyle kapalı Newton-Raphson yineleme yöntemiyle (Burden ve Faires, 1989) birlikte çözümlemek gerekmektedir. Çözümlemede birincil değişkenler olarak basınç (p) ve sıcaklık (T) göz önünde bulundurulmaktadır. Denklemler bu değişkenler için zamanın fonksiyonu olarak aşağıdaki algoritma ile çözümlenmektedir.

Kütle denklemi ve enerji denklemi herhangi bir $t^{n+1}$ zamanında (n=0,1,2,…), $R_i(p^{n+1}, T^{n+1}) = 0$ i=1 (kütle denklemi), i=2 (enerji denklemi) ile tümüyle kapalı olarak ifade edilmektedir. Newton-Raphson yönteminin k. yineleme adımındaki basınç ve sıcaklığı ihtiva eden vektör, $w^{n+1,k}$ Eşitlik 2.41'deki gibi tanımlanmaktadır.

$$W^{n+1,k} = \begin{bmatrix} W_1^{n+1,k} \\ W_2^{n+1,k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p^{n+1,k} \\ T^{n+1,k} \end{bmatrix} \tag{2.41}$$

Verilen bir ilk tahmin $w^{n+1,0}$, k = 0, 1, 2,… olacak şekilde aşağıdaki denklem (Eşitlik 2.42) ile verilen matris vektör denklemi Newton-Raphson yöntemiyle çözümlenmektedir:

$$J^{n+1,k}\delta w^{n+1,k+1} = -R^{n+1,k} \tag{2.42}$$

Burada J bir önceki yineleme adımındaki çözüm vektörü $w^{n+1,k}$ değerinde hesaplanmış "Jacobian" matrisini temsil etmekte ve aşağıdaki şekilde (Eşitlik 2.43) gösterilmektedir:

$$J^{n+1,k} = \begin{bmatrix} \frac{\partial R_1}{\partial p^{n+1}} & \frac{\partial R_1}{\partial T^{n+1}} \\ \frac{\partial R_2}{\partial p^{n+1}} & \frac{\partial R_2}{\partial T^{n+1}} \end{bmatrix} \qquad R^{n+1,k} = \begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \end{bmatrix} \tag{2.43}$$

Çözümün yakınsayıp yakınsamadığı ise;

$$\frac{\|w^{n+1,k+1} - w^{n+1,k}\|^2}{\|w^{n+1,k}\| + 10^{-14}} \leq 10^{-p}$$ p bir tamsayıdır, örneğin p=5 (2.44)

Newton-Raphson Tablosu

| İterasyon No | Pn | Tn | $R_1$ | $\frac{\partial R_1}{\partial p^{n+1}}$ | $\frac{\partial R_1}{\partial T^{n+1}}$ | $R_2$ | $\frac{\partial R_2}{\partial p^{n+1}}$ | $\frac{\partial R_2}{\partial T^{n+1}}$ | Pn+1 | Tn+1 | Yakınsama |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | | | | | | | | | | | |
| 2 | | | | | | | | | | | |
| 3 | | | | | | | | | | | |
| 4 | | | | | | | | | | | |

Yeni adımda kullanılacak $p^{n+1}$ ve $T^{n+1}$'nin çözümü Eşitlik 2.45'de verilen matrisin gauss eliminasyon yöntemiyle çözülmesi ile yapılmaktadır.

$$\begin{vmatrix} \frac{\partial R_1}{\partial p^{n+1}} & \frac{\partial R_1}{\partial T^{n+1}} \\ \frac{\partial R_2}{\partial p^{n+1}} & \frac{\partial R_2}{\partial T^{n+1}} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \Delta P^{n+1} \\ \Delta T^{n+1} \end{vmatrix} = - \begin{vmatrix} R_1 \\ R_2 \end{vmatrix} \quad (2.45)$$

### 2.1.5. Model Denklemleri ve Sayısal Çözümleri

Kütle denklemi Eşitlik 2.46 ile enerji denklemi ise Eşitlik 2.47 ile elde edilmektedir.

$$V_r \frac{d(\rho_w \phi_r)}{dt} - \alpha_s [p_i - p(t)] + [W_p(t) - W_{inj}(t)] = 0 \quad (2.46)$$

$$\frac{d}{dt}[(1-\phi_r)V_r \rho_m C_m T + V_r \phi_r \rho_w U_w] - W_{inj}(t) h_{w,inj}(t) - \alpha_s [p_i - p(t)] h_{w,s}(t) + W_p(t) h_{w,p}(t) = 0 \quad (2.47)$$

Eşitlik 2.46'in implisit sonlu fark yaklaşımı;

$$V_r \frac{[(\rho_w \phi_r)^{n+1} - (\rho_w \phi_r)^n]}{\Delta t_{n+1}} - \alpha_s [p_i - p(t)] + [W_p{}^{n+1} - W_{inj}^{n+1}] = 0 \quad (2.48)$$

Eşitlik 2.48'in her iki tarafını $\Delta t_{n+1}/Vr$ ile çarparak aşağıdaki denklem elde edilir:

$$R_1(p^{n+1}, T^{n+1}) = (\rho_w \phi_r)^{n+1} - (\rho_w \phi_r)^n - \frac{\alpha_s \Delta t_{n+1}}{V_r}[p_i - p(t)] + \frac{\Delta t_{n+1}}{V_r}(W_p{}^{n+1} - W_{inj}^{n+1}) = 0 \quad (2.49)$$

Denklemi basitleştirmek için aşağıdaki tanım yapıldığında;

$$\varphi^{n+1} = (\rho_w \phi_r)^{n+1} \quad (2.50)$$

Kütle denklemi;

$$R_1(p^{n+1}, T^{n+1}) = \varphi^{n+1} - \varphi^n - \frac{\alpha_s \Delta t_{n+1}}{V_r}[p_i - p(t)] + \frac{\Delta t_{n+1}}{V_r} W_p{}^{n+1} - W_{inj}^{n+1}) \quad (2.51)$$

Eşitlik 2.51'de verildiği şekliyle olur. Eşitlik 2.51 kütle denkleminin Newton-Raphson yineleme yönteminde kullanılacak Jacobian matrisi için gerekli olan türevleri ise;

$$\frac{\partial R_1^{n+1}}{\partial p^{n+1}}(p^{n+1},T^{n+1}) = \left(\frac{\partial \varphi^{n+1}}{\partial p^{n+1}}\right)_{T^{n+1,k}} + \frac{\alpha_s \Delta t_{n+1}}{V_r} \quad (2.52)$$

$$\frac{\partial R_1^{n+1}}{\partial T^{n+1}}(p^{n+1},T^{n+1}) = \left(\frac{\partial \varphi^{n+1}}{\partial T^{n+1}}\right)_{p^{n+1,k}} \quad (2.53)$$

Eşitlik 2.52 ve 2.53'ün sağ tarafındaki türev ifadelerinin çözüm denklemleri ise;

$$\left(\frac{\partial \varphi^{n+1}}{\partial p^{n+1}}\right)_{T^{n+1,k}} = \phi_r^{n+1,k}\left(\frac{\partial \rho_w}{\partial p^{n+1}}\right)^{n+1,k} + \rho_w^{n+1,k}\left(\frac{\partial \phi_r}{\partial p^{n+1}}\right) \quad (2.54)$$

$$\left(\frac{\partial \varphi^{n+1}}{\partial T^{n+1}}\right)_{p^{n+1,k}} = \phi_r^{n+1,k}\left(\frac{\partial \rho_w}{\partial T^{n+1}}\right)^{n+1,k} + \rho_w^{n+1,k}\left(\frac{\partial \phi_r}{\partial T^{n+1}}\right) \quad (2.55)$$

Eşitlik 2.54 ve 2.55'deki akışkan yoğunluğu $\rho_w$'nin basınç $p^{n+1}$ ve sıcaklık $T^{n+1}$'e göre olan türevleri, buhar tablolarındaki değerlerinden sayısal türevleme işlemi ile hesaplanır:

$$\frac{\partial \rho_w^{n+1}}{\partial p^{n+1,k}} = \frac{\rho_w(p^{n+1,k}+e_p,T^{n+1}) - \rho_w(p^{n+1,k}-e_p,T^{n+1})}{2e_p} \quad (2.56)$$

$$\frac{\partial \rho_w^{n+1}}{\partial T^{n+1,k}} = \frac{\rho_w(T^{n+1,k}+e_T,p^{n+1}) - \rho_w(T^{n+1,k}-e_T,p^{n+1})}{2e_T} \quad (2.57)$$

Eşitlik 2.56 ve 2.57'de $e_p$ ve $e_T$ türev hesaplarken kullanılacak basınç ve sıcaklık miktarlarını göstermektedir. $e_p = 10^{-2}$ bar ve $e_T = 10^{-1}$°C Porozite (p,T) denklemi;

$$\phi(p,T) = \phi_i[1 + c_r(p(t)-p_0) - \beta_r(T(t)-T_0] \quad (2.58)$$

Eşitlik 2.54 ve 2.55'deki porozitenin basınç ve sıcaklığa göre türevleri ise;

$$\left(\frac{\partial \phi(p^{n+1},T^{n+1}}{\partial p^{n+1}}\right) = \phi_i c_r \quad (2.59)$$

$$\left(\frac{\partial\phi(p^{n+1},T^{n+1}}{\partial T^{n+1}}\right)=-\phi_i\beta_r \tag{2.60}$$

Eşitlik 2.47'nin implisit sonlu fark yaklaşımı denklemini türetmeden önce denklemin aşağıdaki şekilde yazılabileceğini belirtmek gerekir.

$$V_r(1-\phi_i)\rho_m C_m\frac{dT}{dt}+V_r\frac{d}{dt}(\phi_r\rho_w U_w)-W_{inj}h_{w,inj}-\alpha_s[p_i-p(t)]h_{w,s}+W_p h_{w,p}=0 \tag{2.61}$$

Eşitlik 2.61'in implisit sonlu fark yaklaşımı ile yazımı;

$$\frac{V_r}{\Delta t_{n+1}}(1-\phi_i)\rho_m C_m(T^{n+1}-T^n)+\frac{V_r}{\Delta t_{n+1}}[\phi_r^{n+1}\rho_w^{n+1}U_w^{n+1}-\phi_r^{n+1}\rho_w U_w]=W_{inj}^{n+1}h_{w,inj}+\alpha_s[p_i-p^{n+1}]h_{w,s}-W_p^{n+1}h_{w,p}^{n+1} \tag{2.62}$$

Her iki tarafı $\Delta t_{n+1}/V_r$ ile çarpılırsa;

$$(1-\phi_i)\rho_m C_m(T^{n+1}-T^n)+[\phi_r^{n+1}\rho_w^{n+1}U_w^{n+1}-\phi_r^{n+1}\rho_w U_w]=\frac{\Delta t_{n+1}}{V_r}W_{inj}^{n+1}h_{w,inj}-\alpha_s\frac{\Delta t_{n+1}}{V_r}[p_i-p^{n+1}]h_{w,s}+\frac{\Delta t_{n+1}}{V_r}W_p^{n+1}h_{w,p}^{n+1} \tag{2.63}$$

Denklemi basitleştirmek amacıyla;

$$\chi_i=(1-\phi_i)\rho_m C_m \tag{2.64}$$

$$\varphi^{n+1}=\rho_w^{n+1}\phi_r^{n+1} \tag{2.65}$$

Eşitlik 2.63 yeniden düzenlenirse;

$$R_2^{n+1}=\chi_i(T^{n+1}-T^n)+[\varphi^{n+1}U_w^{n+1}-\varphi^n U_w^n]-\frac{\Delta t_{n+1}}{V_r}W_{inj}^{n+1}h_{w,inj}-\frac{\alpha_s\Delta t_{n+1}}{V_r}[p_i-p^{n+1}]h_{w,s}+\frac{\Delta t_{n+1}}{V_r}W_p^{n+1}h_{w,p}^{n+1} \tag{2.66}$$

$R_2$ denkleminin $p^{n+1}$'e göre türevi;

$$\frac{\partial R_2^{n+1}}{\partial p^{n+1}}(p^{n+1},T^{n+1})=\left[U_w^{n+1}\left(\frac{\partial\varphi^{n+1}}{\partial p^{n+1}}\right)+\varphi^{n+1}\frac{\partial U_w^{n+1}}{\partial p^{n+1}}\right]+\frac{\alpha_s\Delta t_{n+1}}{V_r}h_{w,s}+\frac{\Delta t_{n+1}}{V_r}W_p^{n+1}\frac{\partial h_w^{n+1}}{\partial p^{n+1}} \tag{2.67}$$

$R_2$ denkleminin $T^{n+1}$'e göre türevi;

$$\frac{\partial R_2^{n+1}}{\partial T p^{n+1}}\left(p^{n+1},T^{n+1}\right)=\left[\chi_i+U_w^{n+1}\left(\frac{\partial \varphi^{n+1}}{\partial T^{n+1}}\right)+\varphi^{n+1}\frac{\partial U_w^{n+1}}{\partial T^{n+1}}\right]+\frac{\Delta t_{n+1}}{V_r}W_p^{n+1}\frac{\partial h_w^{n+1}}{\partial p^{n+1}} \quad (2.68)$$

Eşitlik 2.67 ve 2.68'in sağ tarafındaki entalpiye (hw) ve içsel enerji Uw'nin $p^{n+1}$ ve $T^{n+1}$'e göre türevleri, buhar tablolarındaki değerlerinden Eşitlik 2.56 ve Eşitlik 2.57'ye benzer şekilde sayısal türevleme işlemi ile hesaplanır (Onur ve ark., 2008).

## 2.2. Tank Modellerde İleriye Yönelik Performans Tahmini

### 2.2.1. Tarihsel Çakıştırma

Model parametrelerinin belirlenmesinde, rezervuarların üretim/re-enjeksiyon esnasında elde edilen veriler kullanılır. Belirli bir süre üretim yapmış rezervuardan gelen veriler, tank modellerinden alınan veriler ile çakıştırma yapılarak rezervuar parametreleri tayin edilir. Başka bir deyişle, ilk olarak rezervuar parametreleri tahmin edilir ve tank modellerinden elde edilen basınç veya su seviyesi değerleri sahadan gelen verilerle uyum sağlayıncaya kadar değiştirilir. Model parametreleri belirlenen rezervuarların geleceğe yönelik davranışlarının tahmininde de aynı yöntem uygulanır. Tahmin edilen parametreler kullanılarak tank modelleri ile geleceğe yönelik basınç tahminleri yapılır.

Bilgisayar destekli doğrusal olmayan eğri çakıştırma yöntemleri ile çok kısa süreler içerisinde ve etkin bir şekilde tarihsel çakıştırma, "history matching" yapılabilmektedir. Tarihsel çakıştırmanın temel nedeni, model ve ölçüm verilerindeki hataların (belirsizliklerin) hesaba katılması ve model ile ölçüm çakışmasından elde edilen parametrelerin istatistiksel olarak nicelik bakımından değerlendirilmesinin mümkün olmasıdır. Bu avantajları nedeniyle bilgisayar destekli doğrusal olmayan eğri çakıştırma yöntemleri, dinamik verilere çakıştırma işlemi ile model parametrelerin belirlenmesinde temel bir araç haline gelmiştir. Doğrusal olmayan parametre tahmin yöntemlerinde, geçmiş dinamik verilere çakıştırma işlemi, doğrusal olmayan optimizasyon problemi olarak formüle edilir ve genelde çakıştırma ağırlıklı en küçük kareler "weight least square method" yöntemi ile yapılır. Ağırlıklı

en küçük kareler yönteminde bilinmeyen model parametre vektörü J($\vec{\chi}$)'e göre minimize edilecek hedef fonksiyon, aşağıdaki şekilde tanımlanabilir:

$$J(\vec{\chi}) = \sum_{j=1}^{M} \sum_{i=1}^{nj} W_{j,i} \left[ f_j(t_i, \vec{\chi}) - y_j(t_i) \right]^2 \quad (2.69)$$

Eşitlik 2.69'da M, toplam model fonksiyonu (f) sayısını, ($t_i$, $y_j(t_i)$ i=1….$n_j$ model fonksiyonu $f_j$ (j=1…,M) için yapılmış nj gözlemden oluşan veri setini temsil etmektedir. $\vec{\chi}$, göz önünde bulundurulan modeldeki bilinmeyen model parametrelerini içeren, bilinmeyen model parametre vektörüdür. Eşitlik 2.69'da $w_{j,i}$ her ölçüm verisi için pozitif ağırlıkları temsil eder. Bu ağırlıklar, herhangi bir zaman değeri $t_i$'de ölçülen $y_j$ için, ölçüm hatalarının varyansının (saçılım değerinin) tersini temsil eder. Eğer verilen bir ölçüm için ağırlık sıfıra yakın (veya başka deyişle ölçüm noktası için varyans, belirsizlik, büyük) ise, o ölçüm verisi güvenilir değildir ve çakıştırmada o veri noktasına daha az ağırlık atanması mümkün olur. Bildiride verilecek uygulamalarda, $y_j$'ler rezervuar basıncı ölçümlerini temsil eder. Ancak, Eşitlik 2.69 ile tanımlanan hedef fonksiyon, birden fazla ve farklı veri setini (örneğin izotermal olmayan ve boyutlu modellerde, farklı kuyularda ölçülmüş sıcaklık, basınç, izleyici madde konsantrasyonlarını aynı anda çakıştırmak için kullanılacak kadar da geneldir.

Eşitlik 2.69'un minimizasyonu, farklı yöntemlerle yapılabilmektedir. Yaygın olarak kullanılanı gradyant temelli Levenberg-Marquardt yöntemidir. Bu yöntemde yineleme işlemi ve yakınsama kıstasları kullanılarak, ölçüm verilerine en iyi çakışma sağlanarak, "en iyi" (optimum) model parametre vektörü $\bar{\chi}$ tahmin edilmektedir.

Parametre tahmininde Eşitlik 2.69'un sağladığı en önemli avantajlardan biri, parametre tahmin problemini istatistiksel bir çerçeve içinde göz önünde bulundurmamıza olanak sağlamasıdır. Örneğin, ölçüm verileri üzerindeki ölçüm hatalarından dolayı olan belirsizlik, ölçüm hataları rastgele değişkenler, genelde ortalaması sıfır ve belirli bir saçılıma sahip normal (gauss), olarak modellenir. Bu sayede elde edilen çakışmanın istatistiksel değerlendirilmesi ve elde edilen parametrelerin güvenirliliği ve ölçülmüş verilere duyarlılığı belirlenebilmektedir.

### 2.2.2. Root Mean Square Error (RMS)

Optimizasyon sonucunda, model fonksiyon verisi $f_j$ ile gözlem (ölçüm) verisi $y_j$ arasında elde edilen çakışmanın derecesi, niceliksel değerlendirilmesi RMS (rootmeansquare error) değeri hesaplanarak yapılır. RMS değeri, gözlemlenen ile modelden elde edilen verilerin farklarının karelerinin toplamının, veri noktasına bölümünün karekökü̈dür:

$$RMS_j = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{nj}\left[f_j(t_i,\vec{\chi}) - y_j(t_i)\right]^2}{n_j}} \tag{2.70}$$

Eşitlik 2.70'den de anlaşılacağı gibi, RMS 'in birimi ölçüm verisi $y_j$'nin birimine sahiptir. Örneğin çakıştırmada, $y_j$ rezervuar basıncı ölçümlerini temsil ediyorsa, RMS'in birimi basınç birimidir (psi, bar, vs.). Eğer çakıştırmada $y_j$, rezervuar kuyu sıcaklık ölçümlerini temsil ediyorsa, RMS'in birimi sıcaklık birimi (ºC, ºF, vs)'dir. RMS değeri, optimizasyon sonucunda elde edilen "en iyi" model parametre vektörü $\vec{\chi}$'de hesaplanır.

Eğer çakıştırmada kullanılan model, gerçek bilinmeyen sistem için doğru model ise, RMS değeri, ölçüm veri seti $y_j$'nin (j=1,…,M) ölçüm hatasının standart sapmasına iyi bir yaklaşımı temsil eder. Genelde RMS değeri küçüldükçe, model ile saha verisi daha iyi çakışma gösterirken, RMS değeri büyüdükçe daha kötü bir çakışma göstermektedir. Bu nedenle RMS değeri, saha verilerini temsil edecek uygun modellerin belirlenmesinde de bir kıstas olarak da kullanılabilmektedir. Örneğin, Eşitlik 2.69'u aynı saha ölçüm verilerini farklı modelleri kullanarak çakıştırıp, her model çakışması için hesaplanan RMS değerlerini kıyaslayıp, en küçük RMS değerini veren modeli, göz önünde bulundurulan bilinmeyen sistem için en uygun model olarak seçmek mümkündür. Ancak sadece RMS değerine bakarak sistem için en uygun modeli belirlemek yeterli değildir. RMS değerinin yanında, çakıştırma sonucunda model parametreleri için elde edilen %95 güvenilirlik aralıklarını (95% confidence intervals) da incelemek gerekmektedir.

### 2.2.3. Tahmin Edilen Model Parametrelerine ait %95 Güvenilirlik Aralıkları

Çakıştırma sonucunda bilinmeyen model parametrelerine ait %95 güvenilirlik aralıkları aşağıdaki denklem yardımıyla hesaplanır (Doğru ve ark., 1977).

$$\chi_i^* - 2s\sqrt{\left[(G_{\chi^*}^T W G_{\chi^*})^{-1}\right]_{ii}} \leq \hat{\chi} \leq \chi_i^* + 2s\sqrt{\left[(G_{\chi^*}^T W G_{\chi^*})^{-1}\right]_{ii}} \quad (2.71)$$

$$s = \sqrt{\frac{J(\vec{\chi}^*)}{N-1}} \quad (2.72)$$

Eşitlik 2.71'de G, en iyi model parametre vektöründe hesaplanmış duyarlılık katsayısı matrisini (sensitivity matrix) temsil eder ve bu matrisin boyutu Nxl'dir ve elemanları model fonksiyonu f 'nin her bir model parametresine göre türevini içerir. Gradyant bazlı optimizasyon yöntemlerinin (Levenberg-Marquardt gibi) yineleme algoritmalarında, G matrisi doğal olarak gereklidir ve algoritmanın bir parçası olarak oluşturulur. Dolayısıyla, Eşitlik 2.69'un minimizasyonunda gradyant bazlı optimizasyon algoritmaları kullanıldığında, en sonuncu yineleme adımında tahmin edilen "en iyi" model parametre değerinde hesaplanmış G matrisi, Eşitlik 2.71'de kullanılarak güvenilirlik aralığı doğrudan hesaplanır. W, her elemanı Eşitlik 2.69'da verilen ağırlıkları ($w_{ij}$'leri) içeren NxN boyutlu ağırlık matrisini (veya ölçüm hatalarının varyansını ihtiva eden hata "kovaryans" matrisinin tersini) temsil eder. N, çakıştırmada kullanılan toplam ölçüm verisi sayısını temsil eder. Eşitlik 2.71'de $\hat{\chi}$ i.nci model parametresinin bilinmeyen doğru değerini, $\vec{\chi}^*$ölçüm verilerine çakıştırma sonucunda optimizasyondan i.nci model parametresi için elde edilen en iyi değeri temsil etmektedir.

Eşitlik 2.71'den hesaplanan %95 güvenilirlik aralıkları, doğru değeri bilinmeyen model parametresi $\chi_i$'nin %95 olasılıkla hangi aralık arasında olacağını göstermektedir. Güvenilirlik aralıkları, çakıştırmada kullanılan ölçülmüş veriler üzerindeki ölçüm hatalarının, ölçüm verilerinin model parametresi $\chi_i$'e gösterdiği duyarlılığın ve model parametreleri arasındaki korelasyonun karmaşık bir fonksiyonudur. Örneğin ölçülmüş veriler üzerinde ölçüm hataları büyükse (yani ölçüm hatalarının varyansı büyük ise) ki bu bir anlamda RMS değeri (Eşitlik 2.70 ve

Eşitlik 2.72) ile de doğrudan ilişkilidir, model parametresi $\chi_i$ için geniş güvenilirlik aralıkları elde edilmesine neden olur. Geniş güvenilirlik aralıkları, ölçüm verilerinin model parametresi $\chi_i$'e duyarlılığının az olduğu veya hiç olmadığı durumda da elde edilir. Geniş güvenilirlik aralıkları, söz konusu model parametresinin değerinde belirsizliğin "fazla" olduğu veya bir başka deyişle, bu model parametresinin güvenilir olarak tahmin edilmediği anlamına gelir. Bu noktada akla gelecek soru, çakıştırma işlemi sonucunda tahmin edilen parametrenin güvenilir olarak tahmin edilip edilmediğine sayısal olarak nasıl karar verileceğidir. Tank modelleriyle yapılan uygulamalar sonucunda ulaşılan sonuç şudur: Eğer hesaplanan ± güvenilirlik aralığı değeri, söz konusu model parametresi $\chi_i$ için en iyi değer olarak tahmin edilen $\vec{\chi}^*$ değerinin %95'inden küçük ise, "model parametresi güvenilir olarak tahmin edilmiştir" denilebilir.

Çakıştırmada birden fazla model denendiğinde ve ölçüm verilerine çakıştırma ile gerçek bilinmeyen sistem için en uygun model seçiminde, hem RMS değerine hem de parametreler için hesaplanmış %95 güvenilirlik aralıkları değerlerine bakılmalıdır. Yukarıda değinildiği gibi, sadece RMS ya da güvenilirlik aralığı değerlerini inceleyerek uygun modelin seçilmesi yanıltıcı olabilmektedir. Model ile ölçüm verisi arasındaki sapmayı ölçtüğü için, belki doğal olarak, RMS değeri en küçük olan modelin, sistemi en iyi temsil eden model olduğunu iddia edebiliriz. Ancak, gerçek sistemi doğru temsil etmediği halde, parametre sayısını artırarak (yani fazla parametresi olan modeller kullanarak) RMS değerini küçültebileceğimizden, uygun modelin seçiminde RMS değerinin yanında, modeldeki parametreler için hesaplanmış %95 güvenilirlik aralıklarını da incelemek gerekir. Dolayısıyla, tüm model parametreleri için hesaplanmış, kabul edilebilir en küçük güvenilirlik aralıklarına ve en küçük RMS değerine sahip model, sistem için en uygun model olarak seçilmelidir.

### 2.2.4. Performans Tahmin (Prediction) Problemi

Geleceğe yönelik performans tahmin problemi, geçmiş verilere çakıştırma problemine doğrudan bağlıdır ve ölçüm verilerinde ve tahmin için kullanılacak

modelde belirsizliğin söz konusu olduğu durumlarda çözümü zor bir problem olarak karşımıza çıkmaktadır. Ancak, stokastik veya olasılık metotları kullanılarak, tahmin problemine gerçekçi çözümler elde edilebilmektedir. Stokastik yöntemler performans tahmin problemine entegre edildiğinde, verilen bir üretim/reenjeksiyon senaryosu altında, jeotermal sistemin gelecek performansındaki belirsizliği tanımlamak ve değerlendirmek mümkün olabilmektedir. Tahmin problemini stokastik metotlarla çözümlerken, rezervuar modeli, rezervuar model parametreleri, ölçüm veri ve hataları, olasılık-yoğunluk fonksiyonları cinsinden ifade edilir. Bu sayede, tüm dinamik ölçüm verilerine çakıştırılmış, ölçüm verilerindeki ve modeldeki belirsizliği de hesaba katan ortak olasılık-yoğunluk (joint probability density function) fonksiyonun örneklenmesiyle performanstaki belirsizlik tespit edilebilir (Doğru ve ark., 1977).

Doğrusal en küçük kareler teorisinde bilindiği gibi, Eşitlik 2.69 kullanılarak $t_{nj}$ zamanına kadar ölçülmüş verilere çakıştırılmış bir model değişkeni $y_j$'nin (bizim durumumuzda, basınç, sıcaklık, izleyici konsantrasyonu, vb), gelecekte verilen bir zaman değeri $t_k$'da (burada $t_k > t_{nj}$ olacak şekilde bir zaman değeridir) tahmin edilecek değerinin standart sapması (veya belirsizliği) Eşitlik 2.73'te verilen denklem yardımıyla hesaplanabilmektedir.

$$\sigma_{yj,k} = \left[\vec{g}_{j,k}^{T}(G^{T}WG)^{-1}\vec{g}_{j,k} + 1\right]^{1/2}\sigma_j \tag{2.73}$$

Burada $\vec{g}_{j,\bar{i}}$, tahmin edilen değişken $y_j$'nin ti zamanında geçmiş verilere çakıştırma işlemi sonucunda belirlenmiş en iyi model parametre vektörü $\vec{\chi^*}$ değerinde hesaplanmış duyarlılık vektörüdür. σ ise, ti zamanı için $\vec{\chi^*}$ değerinde hesaplanmış duyarlılık katsayısı matrisidir. T, matris transpoze, -1 ise matris tersi işlemlerini temsil etmektedir. Eşitlik 2.73'de, $\sigma_j$ ise, geçmiş verilere çakıştırma işlemi sonunda ölçüm verileri ile model verisi arasındaki standart sapmayı temsil eder ve Eşitlik 2.74'den hesaplanır.

$$\sigma_j = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{nj}\left[f_j(t_i,\vec{\chi}) - y_j(t_i)\right]^2}{n_j - 1}} \tag{2.74}$$

Eşitlik 2.73'den tahmin problemine ait bazı önemli özellikler çıkarılabilmektedir. Bunlar;

(i) Gerçekçi bir duruma karşılık gelmese de burada belirtmekte fayda vardır. Eğer ölçüm ile model verileri arasında mükemmel bir çakışma söz konusu ise (yani $\sigma = 0$), bu durumda tahmin edilecek değişkenin standart sapması sıfır olacaktır. Bu durumda, tahminde belirsizlik olmayacaktır. Bu doğal bir sonuçtur. Çünkü $\sigma = 0$ durumu, sistemden ölçümlerin mutlak doğrulukla yapıldığını kabul eder.

(ii) Daha gerçekçi bir durum olan $\sigma \neq 0$ ise, tahmin edilecek değişkenin $t_k$ zaman değerindeki standart sapmasının $\left[\vec{g}_{j,k}^{T}(G^{T}WG)^{-1}\vec{g}_{j,k}+1\right]^{1/2}$ terimi ile çakışmanın standart sapması $\sigma$'nın bir fonksiyonu olacağıdır. Denklem 2.73'de $\sigma$, geçmiş verilere çakıştırma döneminden hesaplanacağı için (Eşitlik 2.74) tahmin döneminde değeri değişmeyecektir. $\left[\vec{g}_{j,k}^{T}(G^{T}WG)^{-1}\vec{g}_{j,k}+1\right]^{1/2}$ teriminin değeri ise daha çok model parametrelerinin güvenilirlik aralıkları (veya belirsizliği) ve duyarlılığı ile değişecektir. Genelde, model parametre sayısı arttıkça, $\left[\vec{g}_{j,k}^{T}(G^{T}WG)^{-1}\vec{g}_{j,k}+1\right]^{1/2}$ terimi değerinin artması, buna karşın s değerinin azalması beklenir. Ancak, tahmin standart sapmasının davranışı tahmin edilecek zaman değerine, model parametre sayısına, parametreler arası ilişkiye, ölçüm hatalarının standart sapmasına bağlı olarak değişir.

Yukarıda verilen bilgilerden, aşağıda belirtilen sonuçlar çıkarabilir:

(i) Tahminlerdeki belirsizliğin doğru olarak tahmin edilmesi için jeotermal sistemi temsil edecek en uygun modelin seçilmesi önemli olmaktadır.

(ii) Ayrıca, tahmin için seçilen model doğru olsa bile, yapılacak tahminlerde daima belirli oranda belirsizlik olacağı aşikârdır. Model doğru olsa bile, göz önünde bulundurulan bir üretim senaryosu için tahminlerdeki belirsizliğin belirlenebilmesi ancak birden fazla gerçekleme yaparak ve yapılan gerçeklemelerin verilen $t_k$ değerinde istatistiksel analizi (tahmin edilen değişkeninin histogram analizi, standart sapma, ortalama değerlerinin hesaplanması) ile mümkün olabilmektedir.

Geçmiş verilere çakıştırma ve tahmin probleminin doğrusal olduğu durumda, sorunun çözümü kolay olmaktadır. Bu durumda, Eşitlik 2.74'den tahmin edilen değişkenin standart sapmasından tahminin güvenilirlik aralığı kolayca oluşturabilir.

Ancak, jeotermal sistemler için kullanılan tank veya boyutlu modellerde olduğu gibi, model parametreleri ile model çıktısı (örneğin rezervuar basıncı) arasındaki ilişkilerin doğrusal olmadığı durumlarda, tahminlerdeki belirsizliği değerlendirmek için daha farklı yöntemlere başvurmak gereklidir. Bu yöntemlerden yaygın olarak kullanılanlardan biri rastgele maksimum olasılık (randomized maximum likelihood) yöntemidir (Oliver ve ark., 1998). Bu yöntemde, önce ölçülmüş (farz edelim basınç olsun) verilerin standart sapması bilinen ve ortalaması sıfır olan bir normal dağılımdan geldiği kabul edilerek, ölçülmüş verilerin belirli sayıda (genelde en az 50 adet) gerçeklemesi türetilir. Türetilen her bir ölçüm verisi gerçeklemesi için Eşitlik 2.69 ile çakıştırma yapılarak, söz konusu ölçüm verisi gerçeklemesini sağlayan en iyi model parametre vektörü $\vec{\chi^s}$ hesaplanır. Sonuçta, bu işlem, toplam ölçüm verisi gerçekleme sayısı kadar tekrarlanır ve toplam ölçüm verisi gerçekleme sayısı kadar "en iyi" model parametre vektörü belirlenir. Daha sonra, çakıştırma ile belirlenmiş her bir en iyi model parametre vektörü modelde kullanılarak, göz önünde bulundurulan gelecek üretim/reenjeksiyon debi senaryosu için model çıktısı (rezervuar basıncı), belirli bir zaman dönemi için tahmin edilir. Bu tahmin bir gerçekleme olarak da isimlendirilir. Bu tahmin işlemi çakışmadan belirlenmiş tüm en iyi model parametre vektörleri için tekrarlanarak, belirli sayıda tahmin gerçeklemesi yapılır. Elde edilen tahmin gerçeklemeleri istatistiksel analiz ile değerlendirilerek tahminlerdeki belirsizlik tespit edilir.

## 2.3. Rezervuar Parametre Tahmininde Kuyu Basınç Testleri

Kuyu basınç testleri, jeotermal sistemlerin üretim ve rezervuar mühendisliği çalışmalarında gerekli olan temel araçlardan biridir. Bu testler ile hem kuyuların (üretim veya reenjeksiyon) verimlilik ve performansları hem de rezervuar sisteminin sınırları ve akış özellikleri hakkında bilgiler edinilir (Earlougher, 1977; Onur, 2005; Bourdet, 2002). Kuyu testlerinden elde edilen bilgiler ve bu bilgilerin kütle/ısı akış modellerinde kullanılmasıyla aşağıda belirtilen sorulara yanıt verilebilir;

1- Rezervuarda yerinde akışkan ve ısı miktarı nedir?
2- Hangi yüzey debisi ile bu mevcut akışkan üretilebilir?

3- Kuyuların verimlilikleri nedir ve nasıl sürdürülebilir ve artırılabilir?
4- Kuyular arası hidrolik iletişim var mıdır?
5- Rezervuar performans tahmini (sürdürülebilirlik, yenilenebilirlik bakımından)

Ancak unutulmamalıdır ki, bu sorulara yanıtlar genelde zamanın fonksiyonudur, kuyuların ve sahanın yaşamı boyunca değişebilir. Sahanın ve kuyuların üretim davranışı uygulanacak üretim senaryosuna göre değişir ve sürekli bir şekilde tahmin (üretim debileri, statik basınç değerleri, sıcaklık, entalpi, farklı üretim senaryoları altında akışkan kurtarımı vb.) edebilecek bir kuyu/rezervuar modelinin oluşturulması ve bu modelin verilerle güncellenmesi gereklidir.

Performans tahminlerinde kullanılacak modeller, tank modelleri olabileceği gibi 3D sayısal modeller de olabilmektedir (Bodvarsson, 1986; Sarak, 2006). Bütün modellerde kullanılan ortak öğeler, temel kütle ve enerji korunumu yasalarından türetilmiş denklemlerdir. Bu modeller eldeki statik ve dinamik veriler kullanılarak kalibre edildikten sonra, gelecekte saha işletilirken göz önünde bulundurulması tasarlanan üretim/enjeksiyon debi senaryolarına bağlı olarak, sistem içerisindeki yerel basınç/sıcaklık dağılımları ile sistemin ortalama basınç/sıcaklıklarının tahmin edilmesinde kullanılır. Genelde "karar" değişkenleri olarak isimlendirilen model basınç ve sıcaklık dağılımlarına bakılarak sistemin gelecekte ne ölçüde sürdürülebileceği hakkında bilgilere ulaşılması mümkün olmaktadır.

Burada vurgulanması gereken önemli bir nokta da, tüm bu söz konusu modellerin oluşturulması ve işletilmesi için gerekli olacak verilerdir. Genelde bu modellerin oluşturulmasında başvurulan üç farklı veri kaynağı vardır. Bunlar jeolojik, jeofizik ve kuyu testi verileridir. Jeolojik veriler, sistem için kavramsal bir jeoloji modelinin oluşturulması, jeokimya analizleri, fasiyes ve tabaka yapılarının belirlenmesi, sistem içerisindeki fayların yer, doğrultu ve eğimlerinin belirlenmesi ve beslenme bölgelerinin ve sınır koşullarının tespit edilmesi için gereklidir. Jeofizik veriler ise, sistemin ısı akısının, rezistif sınırlarının ve sıcaklık anomalilerinin alan ve derinlik boyutunda belirlenmesi için gereklidir. Sismik kullanıldığında, sistem içerisindeki yapısal jeolojik özelliklerin, fayların belirlenmesi mümkün olabilmektedir. Genelde, jeolojik ve jeofizik veriler sistemin statik (durağan)

durumunu tanımlayan parametrelerin belirlenmesinde kullanılır. Buna karşın kuyu testleri (basınç ve izleyici testleri), sistemin dinamik ve yerinde koşullarında kuyu ve rezervuar performansını etkileyen mühendislik parametrelerinin (geçirgenlik, zar faktörü, gözeneklilik, akış karakteristikleri vb.) değerlerinin belirlemesine olanak tanır.

Kuyu basınç testlerinden elde edilen bilgiler, durağan (statik) kabul edilen jeolojik ve jeofizik bilgiler ile birleştirildiğinde, rezervuarın gerçekçi bir şekilde tanımlanmasını ve üretim/rezervuar performansının değerlendirilmesini sağlar. Öte yandan, tek başına ne jeolojik ve jeofizik bilgiler, ne de kuyu basınç testi verileri sistemin statik ve dinamik özelliklerinin belirlenmesinde yeterli değildir. Jeolojik ve jeofizik bilgilerden tahmin edilmiş statik özelliklerin hem teyit edilmesi (doğrulanması veya güncellenmesi, çünkü bu bilgilerde belirsizlikler olabilmektedir), hem de akışı kontrol eden özelliklerinin kuyu testlerinden belirlenmesi gereklidir. Örneğin, jeolojik ve jeofizik veriler, jeotermal sistem içerisinde fayların olduğuna işaret edebilir. Ancak bu fayların sistem içerisinde akışa kapalı mı, yoksa beslenme (sızdırmalı) sınırları mı oluşturduğuna; sistem içerisindeki akışkan ve ısı akışını ve kuyu performansını önemli ölçüde kontrol eden geçirgenlik/gözeneklilik değerleri ve dağılımlarının ve kuyu civarı zar faktörü değerinin ne olduğuna yanıt veremez. Bu bilgilere yanıtlar ancak kuyu testleri ile verilebilir (Onur, 2008).

### 2.3.1. Kuyu Basınç Testlerini Diğer Ölçüm Kaynaklarından Ayıran Özellikleri ve Ölçeği

Jeotermal sistemlerin potansiyel ve performanslarının belirlenmesi ve işletilmesine yönelik kararların alınması, kütle ve enerji korunumu yasalarından türetilmiş modellerle yapılabilmektedir. Bu modellerdeki gerekli parametreler, direkt ve endirekt olarak tanımlanabilen iki farklı tip ölçmelerden elde edilir. Direkt ölçümler arasında karotlar, kesintiler, akışkan örnekleri, statik basınç ve sıcaklıklar yer alırken; endirekt ölçümler, sismik, rezistivite, kuyu logları, kuyu testleri, PVT analizi, vb. ölçümleri kapsar. Sismik, karot ve kuyu logları verileri rezervuarın statik (durağan) tanımlamasına yönelik verileri sağlar. Karot ve kuyu logları verileri

genelde "küçük ölçekte" ve kuyu civarını yansıtan veri türleridir. Örneğin, karotlarda yapılan deneylerden belirlenen geçirgenlik ve gözeneklilik değerleri yaklaşık olarak birkaç $cm^3$ hacim üzerinde geçerlidir. Buna karşın, kuyu testlerinden elde edilen geçirgenlik ve gözeneklilik değerleri ise, yerinde ve dinamik koşullar altında ve yukarıdaki veri türlerine göre daha büyük ölçekte kuyu ve rezervuar davranışını yansıtan değerleri sağlar (Onur, 2008).

### 2.3.2. Kuyu Basınç Testlerinden Elde Edilen Bilgiler

Kuyu testlerinden, hem kuyu, hem de rezervuar davranışını kontrol eden parametreler elde edilebilir.

*Kuyu davranışını belirleyen parametreler:*

- Üretim/enjeksiyon potansiyeli (üretilebilirlik/enjektivite indeksi, zar faktörü)
- Kuyu geometrisi, kuyu hacmi, kuyu içi akışkan yoğunluğu

*Rezervuar davranışını belirleyen parametreler:*

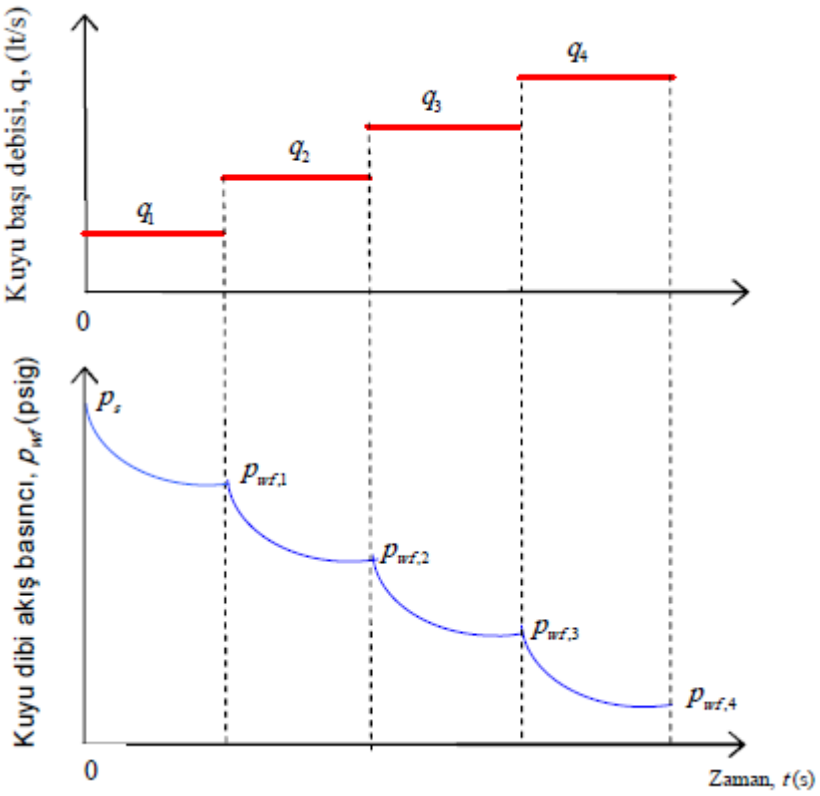
- Geçirgenlik (yatay, $k_h$ ve düşey, $k_v$ )
- Gözeneklilik, toplam sistem sıkıştırılabilirlik veya gözeneklilik sıkıştırılabilirlik çarpımı ($\phi C_t$)
- Sınırlar (uzaklık, geometrisi, akışa kapalı, sızdırmalı, sabit basınçlı)
- Basınç ve sıcaklık (kuyu dibi, ilk ve ortalama basınç ve sıcaklıklar)
- Rezervuar heterojenliği (doğal çatlaklı, tabakalanma, özelliklerde konumla değişkenlik, vb.) olarak sayılabilmektedir.

### 2.3.3. Kuyu Basınç Test Tipleri

#### 2.3.3.1. Verimlilik (Çok Debili Basınç) Testleri

Kuyu basınç testlerinin temel amaçlarından biri, kuyunun üretilebilirlik indeksini, kuyu dibi akış performans eğrisini ve statik (veya ortalama) rezervuar basıncını belirlemektir. Bu bilgiler, kuyudan elde edilecek maksimum debinin, kuyu dibinden (rezervuardan), kuyu başına ve kuyu başından separatöre kadar akış koşullarının göz önünde bulundurularak belirlenmesi; kısaca "nodal analiz" ve yapay

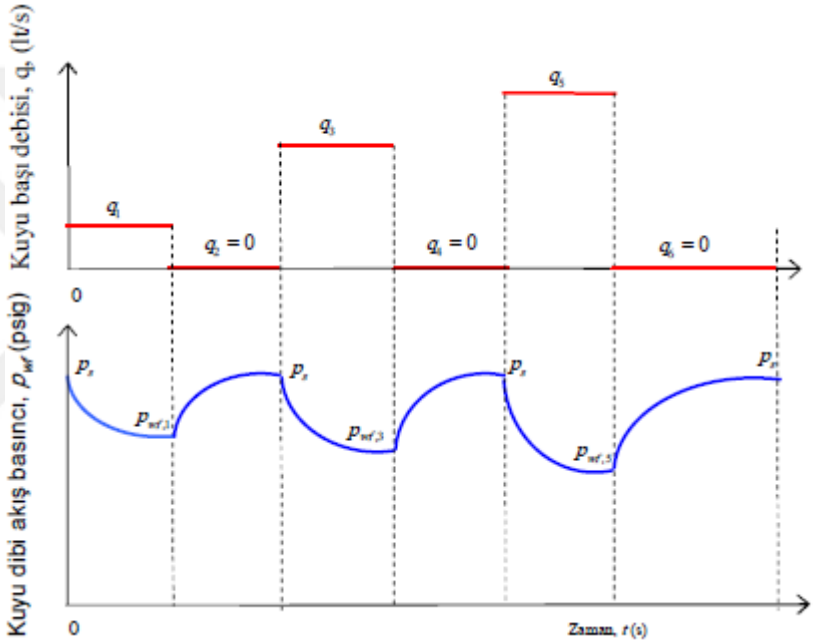
kaldırma (pompalı, gaz basımlı, kompresörlü, vb.) sistemlerinin tasarımı için gereklidir. Kuyu dibi akış performans eğrisini oluşturmak için kısaca verimlilik testleri (productivity testing) olarak isimlendirilen testler kullanılmaktadır (Şekil 2.7). Kuyu dibi akış performans eğrisini oluşturmak için kullanılan çok debili akış sonrası akış (flow after flow) kuyu testine ait şematik gösterimi temsil etmektedir. Akış dönemleri arasında kapama dönemlerinin göz önünde bulundurulduğu verimlilik testleri (Modified Isochronal), kuyu dibi akış performansının ve kuyu verimliliğinin belirlenmesinde kullanılabilmektedir (Şekil 2.8). Şekil 2.7 ve 2.8'de gösterilen verimlilik testlerinde, kuyu her akış döneminde farklı sabit yüzey debisinde üretilir ve her akış debisinde "stabilize" (veya dengelenmiş) olan kuyu dibinde ölçülmüş basınç değerleri, debiye karşı çizilir (Şekil 2.9).



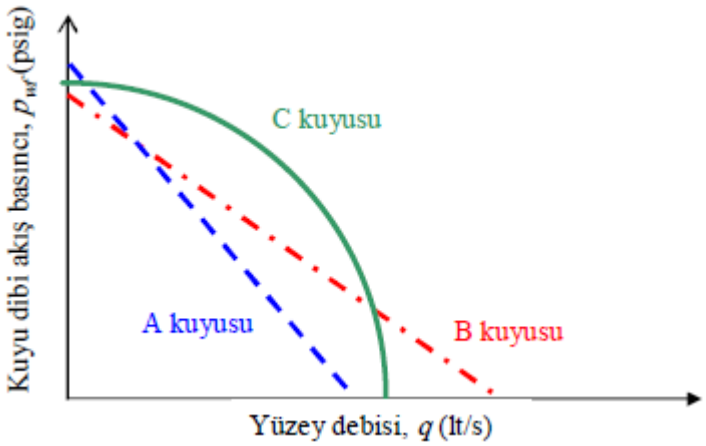

Şekil 2.7. Çok Debili Akış Sonrası Akış Kuyu Basınç Testine ait Şematik Gösterim

Basıncın kuyu dibinde ölçülemediği durumlarda, kuyu başında basınç ölçümleri yapılabilir. Ancak, kuyu dibi akış performans veya rezervuar verimlilik

eğrisinin oluşturulması için ölçülen kuyu başı basınçlarından kuyu dibi akış basınçlarının; kuyu başından kuyu dibine kadar olan kuyu içi akışı modelleyen bir kuyu içi akış modeli kullanılarak, hesaplanması gereklidir. Genelde tercih edilen basınç ve sıcaklığın üretim zonu ortasında veya hemen üstünde kuyu dibinde ölçülmesidir. Pompalı kuyularda, yüzeydeki bir basınç algılayıcısına kılcal boru bağlanarak ve kılcal boruya gaz enjekte edilerek pompa derinliğinin altında basınç-zaman verileri kaydedilebilmektedir (Onur, 2008).




Şekil 2.8. Çok Debili Değiştirilmiş İzokronal (Modified Isochronal) Kuyu Basınç Testine ait Şematik Gösterim




Şekil 2.9. Üç Farklı Kuyu için Kuyu Dibi Akış Basıncı Yüzey Debisi (IPR) Eğrileri

Şekil 2.9, farklı üç kuyu (A, B ve C) örneği için çizilmiş kuyu dibi akış yüzey debisi (IPR) eğrilerini göstermektedir. Bu şekilde görüldüğü gibi, A ve B kuyuları için IPR eğrisi, doğrusal bir davranışta (kuyu dibi akış basıncına karşı yüzey debisi bir doğru denklemi ile tanımlanır) gözlemlenirken, C kuyusu için dış bükey eğrisel bir davranışta gözlenmektedir. Rezervuarda tek faz sıvı akışının ve Darcy akışının geçerli olduğu durumlarda, kuyu IPR eğrisinin Şekil 2.9'da A ve B kuyuları için gösterilen doğrusal davranışı yansıtması gerekir. Öte yandan, rezervuar içerisinde veya kuyu civarında iki fazlı (jeotermal sistemler için gaz, buhar ve sıvı akışı) ve/veya türbülanslı (NonDarcy) akış söz konusu olduğunda ise Şekil 2.9'da gösterilen C kuyusu örneğinde olduğu gibi, IPR dış bükey eğrisel bir davranış gösterir.

Verilen bir yüzey debisi değerinde, IPR eğrisinin eğiminin (türevinin) tersinin mutlak değeri verimlilik veya üretilebilirlik indeksi olarak tanımlanır ve genellikle PI veya J sembolü ile gösterilir (Onur, 2008).

$$PI = \left|\frac{dq}{dp_{wf}}\right| \text{ (lt/s/psi)} \qquad (2.75)$$

Verimlilik indeksi PI, rezervuara uygulanan bir basınç düşümünde, kuyunun akışkan üretme kapasitesinin bir ölçüsüdür ve birim debi/basınçtır. Enjeksiyon kuyuları için de benzeri bir tanım geçerlidir. IPR eğrisi doğrusal olan kuyularda, PI değeri sabittir, bir başka deyişle debi ile değişim göstermez. Böyle kuyular için, denklemi Eşitlik 2.76'da verilen şekliyle yazmak mümkündür.

$$PI = \frac{q}{p_{ort} - p_{wf}} \quad \text{(lt/s/psi)} \qquad (2.76)$$

Eşitliklerde, q (lt/s) yüzey debisini, $p_{wf}$ ise q yüzey debisinde dengelenmiş kuyu dibi akış basıncını, $p_{ort}$ ise ortalama rezervuar basıncını temsil eder. Beslenmeli sistemlerdeki jeotermal sistemlerin çoğu beslenmelidir, bu durumda ortalama rezervuar basıncı, kuyu dibi basıncının ölçüldüğü derinlikteki statik basınç $p_s$'yi temsil eder. Eşitlik 2.76 düzenlenerek doğrusal IPR ilişkisini tanımlayan denklem Eşitlik 2.77'de verilen şekliyle yazılabilir.

$$p_{ort} - p_{wf} = \frac{q}{PI} \text{ (lt/s/psi)} \quad (2.77)$$

Verimlilik indeksi PI sabit değildir ve uygulanan debi ile değişim gösterir. Bu durumda, IPR eğrisi aşağıdaki denklem ile tanımlanır:

$$p_{ort} - p_{wf} = Aq + Bq^2 \text{ (psi)} \quad (2.78)$$

Eşitlik 2.78'de A (psi/(lt/s)) ve B (psi/(lt/s)$^2$) sabitlerdir ve rezervuar kayaç-akışkan özelliklerine bağlıdır. Eşitlik 2.78'de B sabitinin sıfır olması durumunda, Eşitlik 2.78 tek fazlı sıvı ve Darcy akış koşulları için geçerli olan Eşitlik 2.77'ye indirgenir ve bu durumda, A = 1/PI olur. Dolayısıyla, Eşitlik 2.78 hem tek fazlı sıvı Darcy, hem de tek faz sıvı türbülanslı (NonDarcy) akış koşulları için geçerli olan genel IPR denklemidir. Türbülanslı olmayan (Darcy) akışa göre, türbülanslı akışın verimliliğe etkisi, verilen bir basınç düşümünde ($p_{ort}$-$p_{wf}$) kuyu dibi basıncında daha düşük üretim debisi elde edilmesidir.

Çok debili testlerde (Şekil 2.6 ve 2.7) amaç, Eşitlik 2.78 ile tanımlanan IPR denklemindeki A ve B sabitlerinin değerlerini belirleyerek, kuyu için kuyu dibi akış basıncı yüzey debisi ilişkisini belirlemektir. Bu ilişki belirlendikten sonra, verilen bir kuyu dibi basıncında, kuyudan üretilebilecek yüzey debisi tahmin edilebilir.

Kuyu IPR eğrisinden hesaplanabilecek bir diğer parametre de kuyunun mutlak açık akış potansiyelidir ve AOFP ile gösterilir. Bu teorik debi değeri, kuyuları üretilebilirliklerine göre nicel olarak kıyaslamak için kullanılmaktadır. Mutlak açık akış potansiyeli, kuyu dibinde (üretime açık aralıkta) akış basıncının atmosfer basıncına eşit olması durumunda, kuyunun teorik akış debisi olarak tanımlanır. AOFP değeri Eşitlik 2.79'da verilen denklem yardımıyla hesaplanır:

$$AOFP = \frac{-A\sqrt{A^2+4B(p_{ort}-14.7}}{2B} \text{ (lt/sn)} \quad (2.79)$$

Türbülanslı akışın olmadığı durumlarda (B=0 ise), AOFP değeri Eşitlik 2.80'den hesaplanmaktadır.

$$AOFP = \frac{(p_{ort}-14.7)}{A} \text{ (lt/sn)} \quad (2.80)$$

Burada önemle vurgulanması gereken, Eşitlik 2.79 veya 2.80'den hesaplanacak kuyu AOFP değerinin, kuyudan elde edilecek maksimum üretim debisi anlamına gelmediğidir. Kuyudan elde edilecek maksimum debi, kuyu dibinden, kuyu başına ve hatta kuyu başından separatöre kadar olan koşullar göz önünde bulundurularak belirlenmektedir. Kuyu dibi akış basıncının atmosfer basıncına düşmesinin mümkün olmaması ve kuyu içinde iki faz durumlarının oluşması, teorik AOFP değerine ulaşılamamasının temel nedenleri arasındadır. Ayrıca, vurgulanması gereken diğer önemli bir nokta da, burada rezervuar ortalama basıncının zamanla ve/veya zar faktörü değişimi söz konusu olduğunda ki, bu genelde sahada üretim aktivitesi durumunda her zaman geçerlidir, AOFP değerleri zamanla değişkenlik (azalım) gösterebilir.

Hem türbülanslı hem de türbülansız tek fazlı sıvı akış durumlarında, yüzey debisi ile kuyu dibi akış basıncı ilişkisi verimlilik indeksi PI cinsinden de ifade edilebilir ve bu durumda Eşitlik 2.77 geçerlidir. Ancak türbülanslı akış koşullarında, yukarıda değinildiği gibi PI, yüzey debisine bağlıdır; debi arttıkça PI azalır. Türbülanslı akış koşullarında, rezervuar kalınlığı boyunca üretime açık bir düşey kuyu için PI, kayaç ve akışkan özellikleri bakımından Eşitlik 2.81'de belirtilen denklem ile tanımlanır:

$$PI = \frac{kh}{\mu\left[In\left(\frac{4A}{1.78C_A r_w^2}\right)^{1/2} + S + Dq_{sc}\right]} \text{ (lt/s/psi)} \qquad (2.81)$$

Eşitlik 2.81'de *k* formasyonun geçirgenliğini, h formasyonun kalınlığını, A kuyu drenaj alanını, $C_A$ kuyu/rezervuar geometrisine bağlı şekil faktörünü, s mekanik zar faktörünü, D türbülans (NonDarcy) akış katsayısını, μ akışkanın akmazlığını ve $r_w$ ise üretim zonundaki kuyu yarıçapını temsil etmektedir. Türbülanslı akışın olmadığı durumlarda, Eşitlik 2.81'de D = 0'dır ve bu durumda verimlilik indeksi PI debiden bağımsız olur.

$$PI = \frac{kh}{\mu\left[In\left(\frac{4A}{1.78C_A r_w^2}\right)^{1/2} + S\right]} \text{ (lt/s/psi)} \qquad (2.82)$$

Eşitlik 2.81, Eşitlik 2.77'de yerine konularsa ve sonuçta elde edilen denklem Eşitlik 2.78 ile kıyaslanırsa; Eşitlik 2.78'deki A ve B sabitleri, homojen bir rezervuar kalınlığı boyunca üretime açık bir düşey kuyu için, kayaç ve akışkan özellikleri cinsinden aşağıdaki eşitlikler (Eşitlik 2.83 ve Eşitlik 2.84) ile ifade edilebilir.

$$A = \frac{\mu}{kh}\left[In\left(\frac{4A}{1.78C_A r_w^2}\right)^{1/2} + S\right] \text{ (lt/s/psi)} \quad (2.83)$$

$$B = \frac{\mu}{kh} D \text{ (lt/s/psi)} \quad (2.84)$$

Eşitlik 2.83 ve 2.84'den açıkça görüleceği gibi, kuyunun IPR performans eğrisi kayaç/akışkan özellikleri, kuyu tamamlama ve geometrisi ile ilgili parametrelere, türbülans akış katsayısı D'ye ve belki de bunlardan en önemlisi mekanik zar faktörü s'ye oldukça bağımlıdır. Homojen olmayan rezervuarlar (doğal çatlaklı, tabakalı, vb.) ve kısmi tamamlanmış kuyular için, A ve B parametreleri için akışkan/kayaç/kuyu geometrisi özellikleri cinsinden verilen denklemler, Eşitlik 2.83 ve Eşitlik 2.84'de verilenlerden farklıdır (Onur ve Reynolds, 1989).

Mekanik zar faktörü s, ilk olarak kuyu civarına yakın formasyon içinde çeşitli nedenlerle oluşabilen ve kuyu verimliliğini olumsuz yönde etkileyen formasyon hasarını, niceliksel olarak tanımlamak için ortaya atılmış bir kavramdır. Sondaj çamur sıvısı ve katı maddelerinin formasyonu kirletmesi, kuyu civarında çeşitli katı madde çökelmesi ($CaCO_3$ gibi), üretimle birlikte küçük taneli (fines) malzemenin kuyu civarı formasyonda birikmesi (migration), kuyu civarı hasarın oluşmasına ve kuyu verimliliğinin düşmesine neden olur. Bu kavram daha sonra, kuyu civarında geçirgenliği formasyonun geçirgenliğinden daha yüksek olan zonların (asitleme, hidrolik çatlatma veya kuyunun çatlak veya çatlaklarla kesildiği durumlar gibi) kuyu performansı üzerindeki etkisini modellemek için genişletilmiştir. Mekanik zar faktörü s'nin sıfıra eşit olması durumu (s = 0), ideal durumu, kuyu civarında hasarın olmadığı duruma karşılık gelir. s > 0 (yani zar faktörü pozitif) ise, hasarlı duruma; s < 0 (yani zar faktörü negatif) ise, kuyu civarında canlandırma veya geçirgenliği yüksek zonların olduğuna işaret eder. Mekanik zar faktörü değerinin bilinmesi, kuyu civarı durum hakkında bilgi edinilmesine ve hasar olması durumunda, kuyunun

üretimini artırmak için yapılacak canlandırma işleminin belirlenmesine yardımcı olur. Bazı durumlarda, kuyu civarında hasar beklenmediği halde, mekanik zar faktörü, kuyu basınç testlerinden pozitif büyük bir sayı olarak hesaplanabilir. Bu, büyük olasılıkla, (düşey bir kuyu için) kuyunun rezervuar kalınlığı boyunca kısmi tamamlanmasından dolayı, kısmi üretim yaptığına işaret ediyor olabilir. Rezervuar kalınlığı boyunca kısmen üretime açık kuyularda, kısmi tamamlamadan dolayı, ek geometrik zar faktörü oluşmaktadır ve geometrik zar faktörü, rezervuar geçirgenliğindeki anizotropi oranı ve kısmi üretime açık aralığın rezervuar kalınlığına oranına bağlı olarak değişmektedir (Onur ve Reynolds, 1989).

Şekil 2.7 ve 2.8'de gösterilen verimlik testleri, kuyunun performansı hakkında genel bir fikir vermekle ve IPR eğrisinin oluşturulmasında faydalı olmakla birlikte, verimlik parametreleri A ve B (bk. Eşitlik 2.78, 2.83 ve 2.84) üzerinde etkili olan akışkan/kayaç parametrelerinin, örneğin geçirgenlik ve zar faktörü s'nin bireysel değerini belirlenmesine pek olanak tanımaz. Bunun da nedeni, IPR eğrisi, sadece "dengelenmiş" kuyu dibi basınç değerlerinin kullanılmasıyla oluşturulur ve bu oluşturulan IPR eğrisinden sadece A ve B parametrelerinin değerlerinin belirlenmesi, verimlilik testlerinde esas amaçtır. Bu nedenle, verimliliği etkileyen parametrelerin bireysel değerlerini belirleyeceğimiz kararsız akış testlerine ihtiyacımız vardır. Aslında, basınçların her akış ve kapama dönemlerinde zamanla sürekli kaydedildiği durumlarda, Şekil 2.7 ve 2.8'de gösterilen testler, kararsız çok debili testlere örnek teşkil eder. Her akış ve kapama dönemine ait basınç-zaman verilerinin uygun şekilde analizi ile A ve B parametrelerine ek olarak, bu parametreleri kontrol eden akışkan/kayaç/zar faktörü parametrelerine ait bireysel parametre değerleri belirlenebilir. Bu kayaç/akışkan/zar faktörü parametrelerinin bireysel değerleri, rezervuar modelleme ve performans tahmini çalışmalarında kullanılacak modellerde, giriş verileri olarak gerekli olmaktadır.

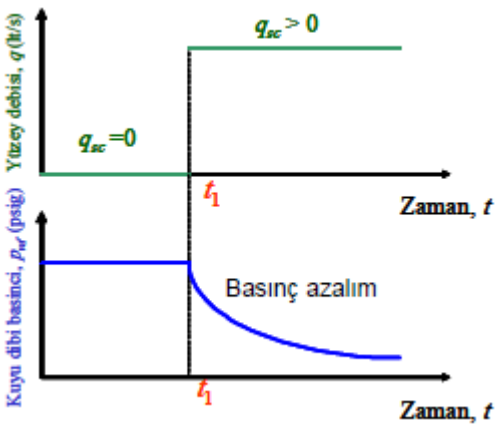
#### 2.3.3.2. Karasız Kuyu Basınç Test Tipleri

En temel kararsız kuyu basınç testi, basınç azalım testidir (drawdown). Şekil 2.10'da gösterildiği gibi, bu testlerde kuyuda üretime geçmeden önce, belirli

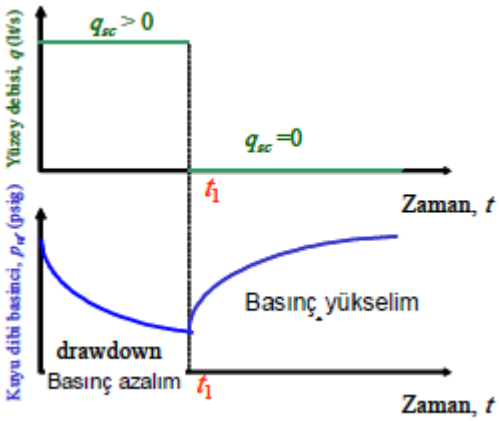
bir süre beklenerek basınç algılayıcısının indirildiği kuyu dibi derinliğinde, kuyu dibi statik basıncının dengeye ulaşması beklenir. Denge durumuna ulaşıldıktan sonra, kuyuda kontrollü olarak belirli bir süre kuyu ideal halde sabit bir yüzey debisinde üretilir ve bu üretim sırasında kuyu dibinde basınç sürekli olarak kaydedilerek, analiz için basınç-zaman sinyali elde edilir.

Şekil 2.11'de ise, basınç yükselim (buildup) testine ait tipik debi/basınçzaman eğrilerinin şematik gösterimi sunulmaktadır. Kuyu testleri analizinde akış rejimleri ve parametre belirlemeleri, üretim dönemi (azalım) aktivitelerinden daha az etkilendiği için genellikle basınç yükselim dönemine ait basınç ve basınç türev sinyalleri üzerinde yapılır. Bu nedenle, jeotermal sahalarda tasarlanacak kuyu basınç testlerinde, sadece basınç azalım testleri ile yetinmeyip üretim dönemini müteakip, en az üretim dönemi süresi kadar uzun süreli bir basınç yükselim testinin de uygulanması düşünülmelidir.

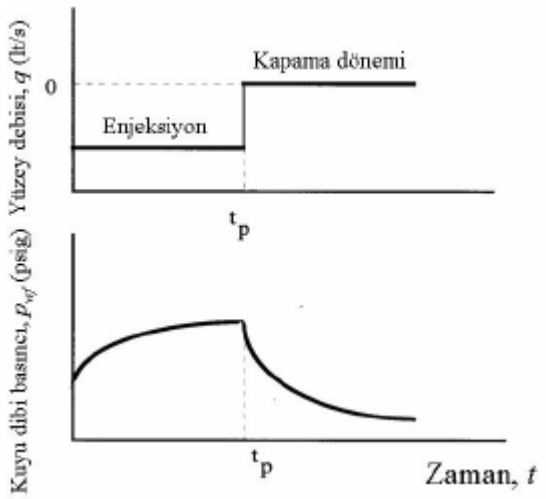
Şekil 2.12'de, enjeksiyon/basınç düşüm (injection/falloff) testine ait tipik debi/basınçzaman eğrilerinin şematik gösterimi sunulmaktadır. Bu testler genellikle enjeksiyon kuyularının verimliğini ve enjekte edilen daha ılık suyun rezervuar içerisindeki yayılımını (cephesini) belirlemek için yapılmaktadır. Bu testlerin analizi, Şekil 2.10 ve 2.11'de gösterilen basınç azalım/yükselim testlerine göre biraz daha karmaşıktır. Çünkü enjekte edilen "ılık" re-enjeksiyon suyunun iletkenliği (k/μ) ile rezervuardaki sıcak suyun iletkenliği farklıdır ve analizde, bu iletkenlik farkının kuyu dibi akış basıncı üzerinde meydana getirdiği etkilerin analizde dikkate alınması gerekir.




Şekil 2.10. Basınç Azalım Testi



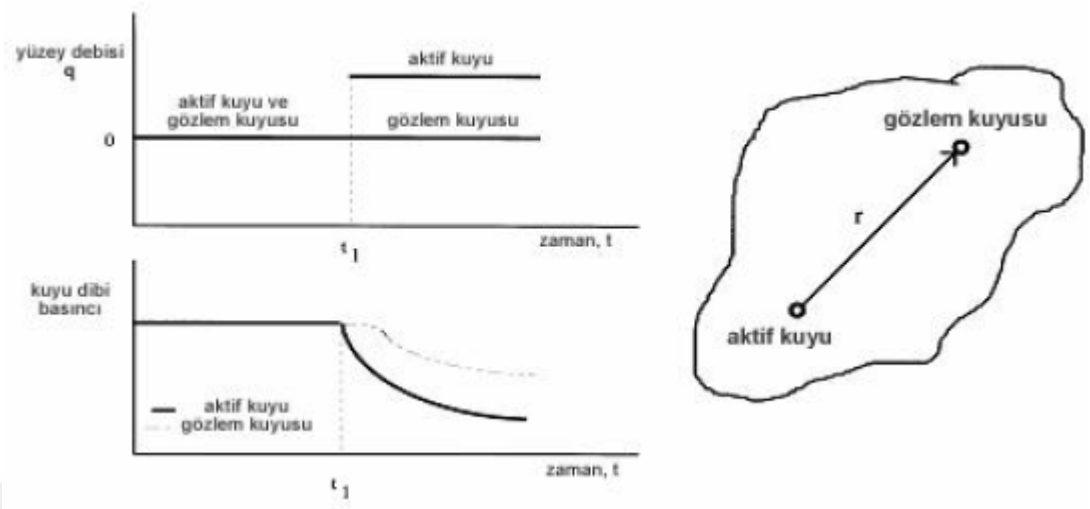

Şekil 2.11. Basınç Yükselim Testi




Şekil 2.12. Enjeksiyon/Basınç Düşüm (injection/falloff) Testi

Şekil 2.12'de gösterilen testler, tek kuyu kullanımı ile yapılan testlerdir. Test sırasında birden fazla kuyunun kullanıldığı girişim testlerinde amaç ise, kuyular arası hidrolik iletişimin olup olmadığı ve kuyular arası geçirgenlik/gözeneklilik sıkıştırılabilirlik değerlerinin belirlenmesidir. Tek kuyulu testlerde, gözeneklilik-sıkıştırılabilirlik ($\phi c_t$) değeri zar faktöründen bağımsız olarak belirlenemediği için, girişim testleri bu önemli parametrenin bireysel değerinin belirlenmesine olanak sağladığı için jeotermal sahalarda düşünülmesi gereken bir test tipidir. Şekil 2.13'de iki kuyulu girişim testine ait tipik debi/kuyu dibi basınç zaman sinyali gösterilmektedir. Girişim testlerinde, üretim aktivitesinin olduğu kuyu aktif kuyu (active well), test sırasında üretim aktivitesinin olmadığı ve kuyu dibinde basıncın zamanın fonksiyonu olarak kaydedildiği kuyu ise gözlem kuyusu (observation well) olarak isimlendirilir (Onur, 2008).

*Type-Curve Çakıştırma tekniği ile interference Test Değerlendirme:* Temel olarak basınç testlerinden permeabilite-kalınlık ve gözeneklilik-sıkıştırılabilirlik değerleri hesaplanabilmektedir. Basınç testlerinin değerlendirilmesinde birçok yöntem mevcuttur. Çalışmamızda "type-curve matching techniques" kullanılarak interference testleri değerlendirilerek, model çalışmasında ihtiyaç duyulan parametrelerin hesaplanması üzerinde durulacaktır. Girişim testinden bu parametrelerin hesaplanması için gerekli olan eşitlikler Eşitlik 2.85-2.90'da belirtilmiştir (Lee, 1982).




Şekil 2.13. İki Kuyulu Girişim Testi

$$kh = 141{,}2qB_w\mu_w \frac{(P_D)_M}{(\Delta p)_M} \tag{2.85}$$

$$\phi C_t = \left(\frac{0{,}000264k}{\mu r^2}\right)\left[\frac{t_M}{(t_D/r_D^2)_M}\right] \tag{2.86}$$

$$P_D = \frac{kh[p_i - p(r,t)]}{141.2qB_w\mu_w} \tag{2.87}$$

$$t_D = \frac{0{,}000264kt}{\phi C_t \mu r_w^2} \tag{2.88}$$

$$r_D = \frac{r}{r_w} \tag{2.89}$$

Toplam sıkıştırılabilirlik, $C_t = C_r + C_w$ (2.90)

Burada;

k : permeabilite, md

h : formasyon kalınlığı, ft

$\mu_w$ : viskozite, cp

$\phi$ : porozite, (%)

q : üretim debisi, STB/D

Ct : toplam sıkıştırılabilirlik (kayaç+sıvı)

$B_w$ : formasyon hacim faktörü RB/STB

r : gözlem kuyusu ile üretim kuyusu arası mesafe, ft

t : zaman, saat

$r_w$ : kuyu yarıçapı, ft

$C_r$ : kayaç sıkıştırılabilirliği

$C_w$: akışkan sıkıştırılabilirliği

kh ve $\phi C_t$ formüllerinde M çakışma noktası değerlerini ifade etmektedir. Permeabilite-kalınlık ve porozite-sıkıştırılabilirlik hesaplamalarında $B_w$, $C_w$ ve $\mu_w$ ise aşağıdaki formüllerden hesaplanabilmektedir (Cholet, 2008):

$$B_w = -1{,}485x10^{-6}P_R + 0{,}952 + 10^{AT} \quad (2.91)$$

$$\mu_w = 4{,}83 - 0{,}07T_R + 4{,}73x10^{-4}T_R^2 - 1{,}415x10^{-6}T_R^3 + 1{,}56x10^{-9}T_R^4 \quad (2.92)$$

$$C_w = \left(X + YT_R + ZT_R{}^2\right)x10^{-6} \quad (2.93)$$

$B_w$, $C_w$ ve $\mu_w$ formüllerinde belirtilen $P_R$ kuyu dibi basıncı (psi), $T_R$ ise kuyu dibi sıcaklıkları ($^o$F) ifade eder. AT, X, Y ve Z ise aşağıdaki eşitliklerden hesaplanır.

$$AT = 0{,}001996(T_R - 100) - 1{,}2676 \quad (2.94)$$

$$X = 3{,}8456 - 1{,}34x10^{-4}P_R \quad (2.95)$$

$$Y = -1{,}052x10^{-2} + 4{,}77x10^{-7}P_R \quad (2.96)$$

$$Z = 3{,}9267x10^{-5} - 8{,}8x10^{-10}P_R \quad (2.97)$$

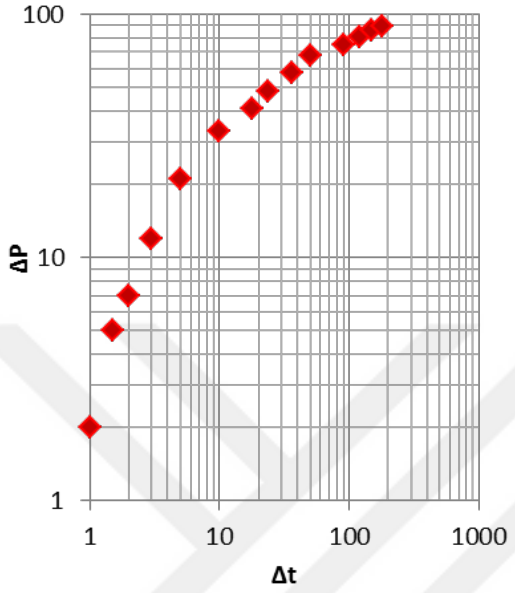
Eğri çakıştırma tekniği uygulama adımları;

1- Δp, Δt log-log grafiği çizilir (örnek Şekil 2.14).

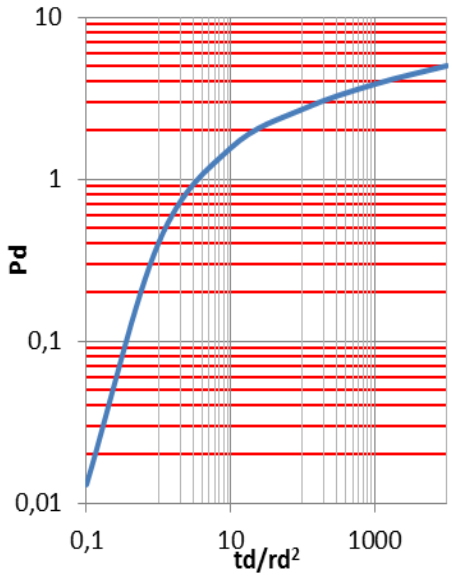
2- Pd, $t_D/r_D^2$ log-log grafiği çizilir (örnek Şekil 2.15).

3- Δp, Δt grafiği $t_D/r_D^2$ örnek grafiği çakıştırılır.

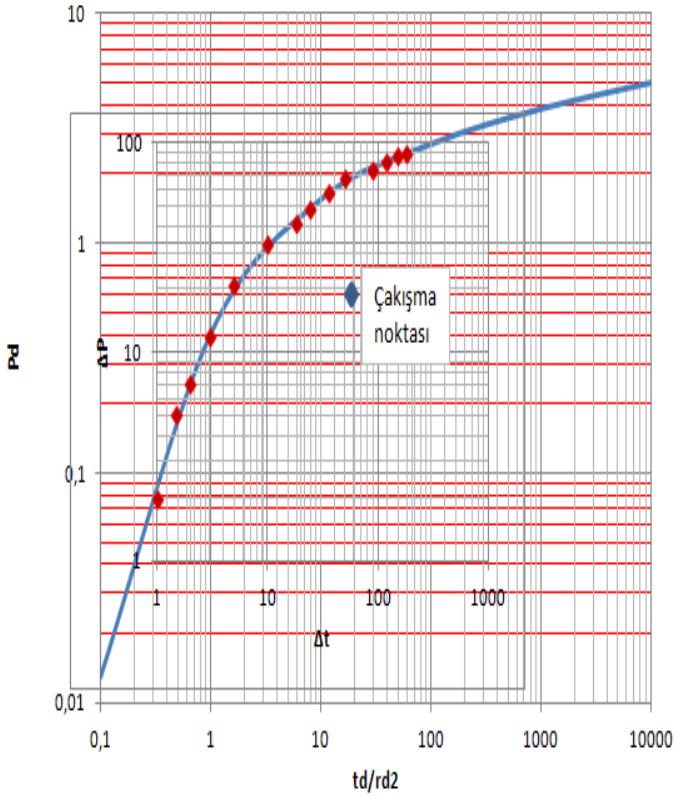
4- Çakışma noktasındaki Δp, Δt grafiği ve $t_D/r_D^2$ grafiğindeki değerler not edilir (Şekil 2.16).




Şekil 2.14. Δp, Δt




Şekil 2.15. Pd, $t_D/r_D^2$




Şekil 2.16. Δp, Δt ve $P_D$, $t_D/r_D^2$ Grafiği Çakıştırma

# 3. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

## 3.1. Çalışma Alanı Jeolojik, Jeofizik ve Jeokimyasal Çalışmalar

Zeschke (1954), Simav Graben içinde bulunan karakteristik litolojilere ilişkin olarak ilk araştırmayı yapmıştır.

Akdeniz ve Konak (1979), çalışmalarında, Simav fayının erken Miyosenden bu yana faaliyette olduğunu ileri sürmüş ve Simav fayını Simav doğusunda bulunan metamorfik zonun ötelenmesini baz alarak 6 km olan Geç Miyosen sonrası yer değiştirmeyi dikkate alarak sağ yönlü doğrultu atımlı fay olarak belirlemiştir.

Eyidoğan and Jackson (1985), Simav grabenin kuzey ve güneyinin iki fayla sınırlı olduğunu ve kuzey kısımda bulunan fayın baskın olduğunu ileri sürmüşlerdir.

Eser (1997), Simav jeotermal sahasının hidrojeolojisi açısından incelemiş ve Eynal sıcak su alanı jeotermal potansiyelin en yüksek olduğu alandır. Eynal-Çitgöl-Naşa sıcak sularının yüzeydeki sıcaklıkları ve sondaj verilerinden elde edilen sıcaklıklar gözönüne alındığında, hazne kaya sıcaklıklarının 160-185°C arasında olduğu söylenebilir. Soğuk su karışım oranları Eynal'da %9-10, Çitgöl'de %59-62 ve Naşa'da %64'dür. Schoeller sınıflamasına göre Eynal-Çitgöl-Naşa sıcak suları orta-kötü kaliteli sular, Simav Ovası yeraltısuları ise çok iyi-iyi kaliteli sular sınıfında olduğunu ifade etmektedir.

Seyitoğlu (1997), Simav grabenini KD-GB yönlü Demirci, Selendi ve Akdere havzalarını kesen Pliyosen-Kuvaterner yaşlı tektonik yapı olarak adlandırmıştır.

Bayram (1999), çalışmasında; İzotop analiz sonuçları suların meteorik kökenli ve jeotermal suların dolaşım yaşının 50 yıldan daha fazla olduğunu göstermektedir. Jeotermometre uygulamalarıyla hazne kaya sıcaklıklarının 148-180°C arasında olduğu, Bölgedeki rezervuarlarda toplam jeotermal akışkanın 195 x $10^6$ $m^3$ ve toplam beslenme miktannın 78,2 x $10^6$ $m^3$/ yıl olduğu hesaplamıştır.

Öygür ve Erler (2000), Simav grabenin (İç-Batı Anadolu, Türkiye) metalojenezi adlı çalışmalarında, Simav grabeni boyunca meydana gelen bazı mineralizasyonların bulunduğunu ve bunların Batı Anadolu Bölgesinin jeotektonik

gelişimine ve hakim iki ana tektono-magmatik olaylar ile ilgili olduğunu belirtmişlerdir.

Ülker (2002), Simav jeotermal alanının enerji potansiyeli ve suların kimyasal özelliklerinin tespitine yönelik çalışma yürütmüştür. Çalışmasında Eynal Bölgesinde 6 kuyu, Çitgöl Bölgesinde 6 kuyu ve Naşa Bölgesinde 4 kuyuyu incelenmiştir. Bu kuyulardan alınan su örneklerinin kimyasal analiz raporları değerlendirilmiş ve bu raporlara gore Alkali metaller, toprak alkali metallere göre daha fazladır ve doğudan batıya doğru gidildikçe değerlerde azalmalar olduğunu ifade etmektedir.

Gemici ve Tarcan (2002), ülkemizde Batı Anadolu'da bulunan Simav jeotermal alanının hidrojeokimyasal incelenmesi olarak incelenmesi adlı çalışmalarında, Simav jeotermal sularının Menderes Masifi metamorfik kayaçları içinde bulunduğunu ve jeotermal suların faz kırıklarına bağlı olduğunu belirtmişlerdir.

Bayram ve Şimşek (2005), Kütahya İli simav ilçesinde bulunan jeotermal alanı hidrojeokimyasal ve izotop jeokimyasal olarak incelemişlerdir. Araştırmacılar, rezervuar kayaçlarda jeotermal suların birbirleri ile ilişkili olduğunu ve bu ilişkilerin faylarla gerçekleştirildiğini belirtmektedir.

Palabıyık (2006), Simav jeotermal sularının Nadarçam soğuk suları tarafından beslendiğini ve suların yaşının yaklaşık 50 yıldan fazla olduğunu gösterirken, sahanın deniz seviyesine göre ortalama beslenme yükseklikleri 969 ile 1174 m arasındadır. Sahanın alterasyon mineralojisi, sularda 160°C ile 250°C arasında rezervuar sıcaklıkları gösterdiğini, Termal suların kayaç-akışkan etkileşimini yansıtan aktivite diyagramları, suların 150-200°C sıcaklık aralığında K-feldspat, muskovit, albit, Mg-klorit ve vairakit mineralleriyle dengede olduğunu ve sahanın alterasyon mineralojisi ve Na-K jeotermometreleriyle uyumlu olarak halen üretim yapılan rezervuardan daha derinde ve daha sıcak, yani elektrik üretimine imkan verecek potansiyel bir kaynağa işaret ettiğini ifade etmektedir.

Tamyerli (2007), Kütahya-Simav jeotermal sahasında literatürde var olan sıcaklık ve debi degerlerini kullanarak Binary güç santrali dizaynları yapmıştır.

Arslan (2008), Sahanın işletilmesinde entegre sistem tasarımı üzerinde çalışmıştır. Sistemin entegre işletilme tasarımı ortaya koymuştur.

Akay (2008), Simav magmatik kompleksisinin jeolojisi ve petrolojisini incelemiş ve bunu KB-Anadolu'da bulunan Oligo-Miyosen granitoyidleri ile karşılaştırmıştır.

Bello (2013), Sahanın jeokimyasal değerlendirmesi çalışması yapmış ve rezervuar yüksek sıcaklığından dolayı sistemde su-kayaç etkileşimin ve/veya kaynamanın varlığına işaret ettiğini iddia etmektedir.

Gündoğdu (2013), Simav fayı ve yakın civarının jeodinamik evrim modelini ortaya koymak amacıyla çalışma yapmıştır.

Ateş (2014), Kütahya ve simav fayları arasında kalan jeotermal alanların jeokimyası ve aktif tektonik ilişkisini incelemiştir.

### 3.2. Tank Modelleme Çalışmaları

Whiting ve Ramey (1969), lumped parametre modeli kullanarak rezervuar özelliklerini belirlemeye çalışmışlardır.

Brigham ve Morrow (1974), lumped parametre modelini buhar baskın bir sistemde uygulamışlardır.

Bodvarsson (1984) ve Pruess (1984), Krafla jeotermal alanında rezervuarın gelecekteki performasının tahmini için dağınık parametreli model çalışması yapmıştır.

Bodvarsson ve arkadaşları (1986), Jeotermal rezervuarların modellemesine yönelik teorik bir çalışma gerçekleştirmiştir. Kütle ve ısı taşınım eşitliklerinin oluşturulması ve bunların çözüm teknikleri ile jeotermal rezervuarlann modellemesinde karşılaşılan problemleri ortaya koymuşlardır.

Alkan ve Satman (1990), boyutsuz parametre modelini karbondioksit içeren jeotermal rezervuarlar için geliştirmişlerdir.

Sarak (2004), düşük sıcaklıklı jeotermal rezervuarlar için çeşitli konfigurasyonlardaki izotermal tank modeller için analitik denklemler geliştirmiştir.

Onur ve arkadaşları (2008), izotermal olmayan boyutsuz parametre modelini sıvı ağırlıklı düşük sıcaklıklı jeotermal rezervuarlar için geliştirmiştir.

Türeyen ve arkadaşları (2009), izotermal olmayan sıvı ağırlıklı jeotermal rezervuarlar için boyutsuz parametre modelini geliştirmişlerdir.

# 4. MATERYAL VE METOD

## 4.1. Materyal

Çalışma alanının jeolojik, tektonik, hidrojeolojik, hidrojeokimyasal özellikleri için ayrıntılı araştırma yapılmıştır. Ayrıca sahada gerçekleştirilen test çalışmaları incelenmiştir. Sahanın modellenmesi için literatürdeki model çalışmaları ve uygulamaları hususunda, ayrıntılı inceleme ve nasıl uygulandığı hususlarında detaylı araştırma yapılmıştır. Modelleme çalışmasında ihtiyaç duyulan model parametre değerlerinin tahmini için, öncelikle sahada yapılan kuyu testlerinin sonuçları kullanılarak, daha sonrada istatistiki bilgisayar programı yardımıyla, non-lineer optimizasyon yöntemiyle parametrelerin değerleri tespit edilmeye çalışılmıştır.

### 4.1.1. Kütahya-Simav Alanının Bölgesel Jeolojisi

Türkiye, Alp-Himalaya Dağ Kuşağı içinde yer almaktadır. Batı Anadolu'da litosferik gerilimin Alp-Himalaya zonu kıtasal çarpışması ile ilişkin olduğu bölgede, lokalize edilmiş gerilme tektoniği hüküm sürmektedir. Batı Anadolu Bölgesi, D-B gidişli sıradağları ve derin sedimalar ile dolu vadileri ile karakterize edilir. Bölge, Geç Miyosen başına kadar, kuzey-güney yönünde basınca maruz kalmıştır. Tortoniyen başında, bölgede bir gerilme tektoniği oluşmuş ve kısmi ergimeye uğrayan kabuk, gerilmeye bağlı olarak ince ve kırılgan kabuk oluşturmuştur (Yılmaz, 1989; Alptekin ve ark., 1990; Gemici ve Tarcan, 2002). Bu şekilde ülkemizde Batı Anadolu Bölgesinde DB uzanımlı grabenler bulunmaktadır. Türkiye'nin önemli jeotermal alanlarının çoğu saha bu grabenlerin kenarlarında yer almaktadır. Simav grabeni bunlardan biri olup, BKB-DGD doğrultulu ve kuzey dalımlı faylar tarafından oluşmuştur. Simav grabeni, Pliyosen-Kuvaterner tektonik özellikte ve ülkemizin batısında, K-G gerilme tektoniğinin en son ürünlerinden birini temsil etmektedir (Seyitoğlu, 1997; Gemici ve Tarcan, 2002). Graben KD-GB doğrultulu Demirci ve Selendi havzalarının kuzeyinde bulunur ve Söğütcük ve Simav ilçesi arasında KKB-DGD bir oluşum göstermektedir. Yöre, yaklaşık 1100 m

yüksekliğinde graben havzasından dağ yamaçları ile topografik olarak grabenden ayrılmaktadır (Seyitoğlu, 1997). Batı Anadolu'da Simav bölgesi, kuzeyde İzmir-Ankara Neothetyan sütür zonu (Şengör ve Yılmaz, 1981, Çoban ve ark., 2011) ve güneyde Toroslar (Likya napları) (Collins ve Robertson, 1999) arasında yer alır. Güneyde bulunan Anatolid-Torid Bloku ve kuzeyde yer alan Sakarya Kıtası ve diğer Neotetis okyanusunun kuzey branşının kapanmasıyla meydana gelen kayaç oluşumları, KB Anadolu Bölgesinde geniş yayılım gösterirler (Şengör ve Yılmaz, 1981). Örtünme, dalma ve çarpışma fazları esnasında, Anatolid-Torid Bloku taban kayacı şeklinde davranış göstermiş, daha sonra kuvvetli deformasyona ve Barrow-Mavişist metamorfizmasına uğramıştır. Paleosende kıtasal çarpışma başından itibaren, Anatolid-Torid Bloku içten parçalanmış ve güney-güneydoğu yönlü tektonik yapılar oluşturmuştur (Okay, 2004). Bölgede temel kayalar, Menderes Masifi ve Afyon Zonunda bulunan çeşitli kayaç grupları tarafından temsil edilir (Akdeniz ve Konak, 1979). Menderes Masifi, Ege Denizi'nde Kiklad masifinin doğuya doğru devamı olarak yorumlanan KD-GB doğrultulu, büyük ölçekli dom şeklinde metamorfik bir komplekstir (Oberhänsli ve ark., 1997). Menderes masifinin bölgesel metamorfizması yüksek dereceli gnays, granitik gnays, metapelit ve büyük kalınlıktaki karbonat kayaçlardan oluşur ve bunlar stratigrafik olarak tabanı oluştururlar. Güneyden kuzeye olan bindirme zonu içinde iki farklı tektonik kuşak ile ayırt edilmektedir:

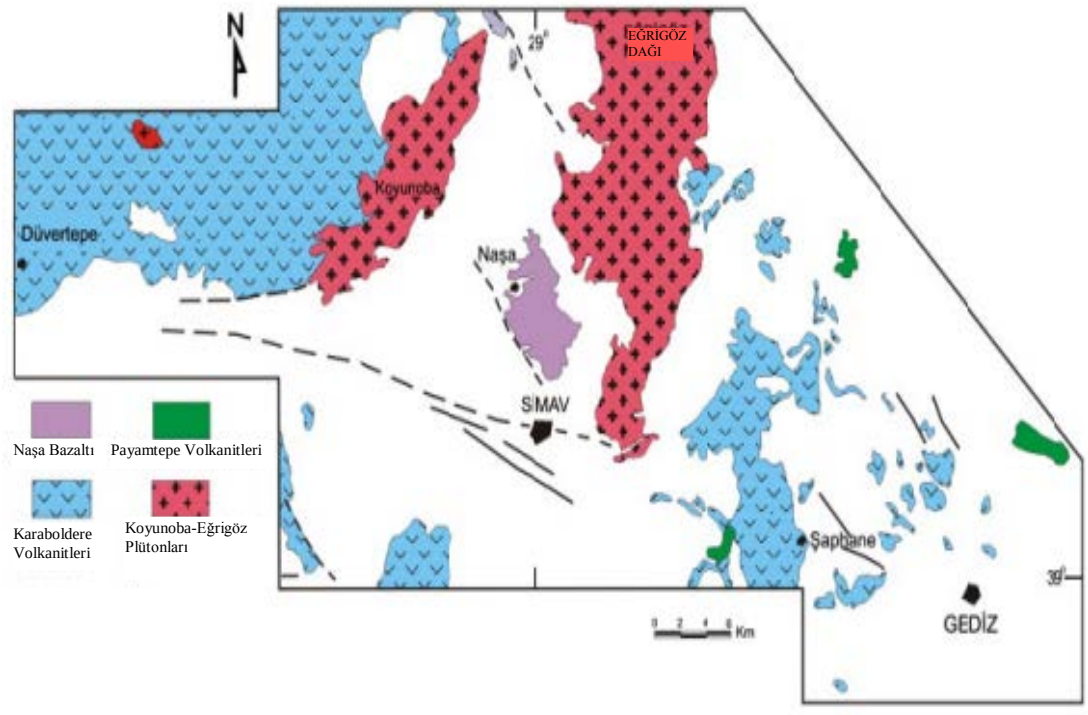
(1) Menderes Masifini kuzey sınırı boyunca tektonik olarak örten, göreceli olarak küçük bilinen, HP-LT kuşağı; Afyon Zonu.

(2) Metaklastitler, ofiyolitler ve ofiyolit melanjlarından oluşan Keratase yaşlı Mavişist kuşağı; Tavşanlı Zonu (Okay, ve ark., 1996), Bornova Fliş Zonu Menderes Masifini KB kenarı boyunca tektonik olarak örtmektedir (Okay, 2004; 2007; Okay ve ark., 1996; 1998; 2005).

Menderes bloğu, 50 milyon yıl önce Sakarya bloğu ile çarpışmış ve daha sonra yüksek sıcaklık metamorfizması ve granit intrüzyonleri meydana gelmiştir (van Hinsbergen ve ark., 2010). Menderes masifinin ortaya çıkması, Neojen döneminde birbiri ardına meydana gelen faylar boyunca olmuştur. Güncel çalışmalar, Menderes masifinin iki veya daha fazla oluşum süreci yaşadığını

göstermektedir (Seyitoğlu ve ark., 2004, Dudaklar ve ark.,. 2001). Menderes masifinin ortaya çıkışının ilk aşaması, Geç Oligosen (25 milyon yıl) ile Orta Miyosen (16 milyon yıl) (Seyitoğlu ve ark., 2004) veya En Genç Oligosen (Purvis ve Robertson, 2005) veya En Son Oligosen-Erken Miyosen (Cavazza ve ark., 2009) arasında olmaktadır, ya da Geç Oligosen (25 Ma) ve Orta Miyosen (16 Ma) veya son Oligosen (Seyitoğlu ve ark., 2004) arasında meydana gelen Erken Miyosen zamanıdır. Agostini ve arkadaşları (2010), Menderes Masifi metamorfik kayaçlarının yükselmesini ve böylece ortaya çıkışını, graben gerilme tektoniği ve trans-gerilmeli fay sistemlerinin bir sonucu olarak yorumlamaktadır. Bu yüzden, Bozkurt ve arkadaşları (2011) kuzey Menderes Masifinin gerilme tektoniğine bağlı ortaya çıkışı için Geç Oligosen (30 milyon yıl) önermektedir. Cavazza ve arkadaşları (2011) Ege bölgesini etkileyen gerilme tektoniğinin Menderes Masifinin ortaya çıkmasında bölgesel anlamda önemli rol oynadığını belirtmektedir. Bazı çalışmalar da (i) Erken-Orta Miyosen gerilme tektoniği ve Ege hendeğinin geriye dönüşü ve (ii) Geç Miyosen-Pliyo-Kuvaterner gerilim tektoniği ve Batı Anadolu'da dalan Ege levhasının başlangıcı olmak üzere iki belirli bağlantının olduğunu ileri sürmektedirler. Ege Bölgesi graben sistemi gerilme tektoniğinin zamanlaması, Bozkurt ve Sözbilir (2004), Ersoy ve arkadaşları (2010) ve Van Hinsbergen ve arkadaşları (2010b) tarafından detaylı olarak tartışılmıştır. D-B doğrultulu olan üç graben, Simav, Gediz ve Büyük Menderes, Menderes masifini bölmektedir. Batı Anadolu'da graben tipi basenlerin tektonik evrimi, epizodik (Örneğin; Bozkurt, 2000; Ersoy ve ark., 2010) veya darbeli gerilme kuvvetleri (Bozcu, 2010; Purvis ve Robertson, 2004) Geç Senozoyik zamanında kontrol edilir. Bu havzalarda levha içinde oluşan magma sokulumları bulunmaktadır. Simav grabeni, Pliyo-Kuvaterner yaşlı bir oluşum, 150 km'lik bir uzunlukta ve belirli bir topografik alçaklıktadır (Şekil 3.3). Graben KD-GB doğrultulu Demirci, Selendi ve Akdere havzalarını keser ve Geç Oligosen-Erken Miyosen zamanında gelişmeye başlayan Ege graben sistemine karşın (Seyitoğlu ve ark., 1997) K-G doğrultulu gerilme tektoniğine bağlı olarak oluşan magmatik ürünlerle ilişkilidir. Simav yarı grabeninin güney kesimi Neojen havzalarını ve aynı zamanda Simav sıyrılma fayını kesmektedir. Bozkurt ve ark., (2011), epizodik Simav sıyrılma fayı aktivitesinin

30 ile 80 milyon yıl arasında meydana geldiğini ileri sürmektedir. Granitoidlerin yaşı ve Eğrigöz granitoidlerinin milonitik deformasyonları baz alınarak bazı araştırmacılar (Işık ve ark., 2004; Halka ve Collins 2005; Işık ve Tekeli 2001; Thomson ve Halka, 2006), Batı Anadolu'da gerilme tektoniğinin erken Miyosen öncesi başladığını ve burada Tersiyerin erken fazlarını temsil ettiklerini belirtmektedir. Cavazza ve arkadaşları (2009), Kuzey Ege Bölgesi'nde Neojen genleşme tektoniğinin Erken-Orta Miyosen ve Pliyo-Kuvaterner zamanında vurmalı kuvvetlerle epizodik olduğunu ileri sürmüştür. Burada havzalar içinde sedimantasyon akarsu konglomeraları ile başlar ve yaklaşık 200 m kalınlık oluşturan akarsu çökelleri ve istif içinde yukarıya doğru volkanik tüflerle ardalanmalı olan kireçtaşları ile devam ederler (Akdeniz ve Konak, 1979; Ercan ve ark., 1982; Ersoy ve ark., 2010). Radyometrik yaş tayinleri baz alınırsa, çökellerin yaşı 24,2 ile 14,9 milyon yıl olarak ortaya çıkmakta ve bunun için Erken Miyosen yaşı olarak kabul edilebilir. Burada volkanik kayaçlara radyometrik yaşlar verilmiştir (Ercan ve ark., 1996; Ersoy ve ark., 2011; Purvis ve Robertson, 2004; Seyitoğlu ve ark., 1997).



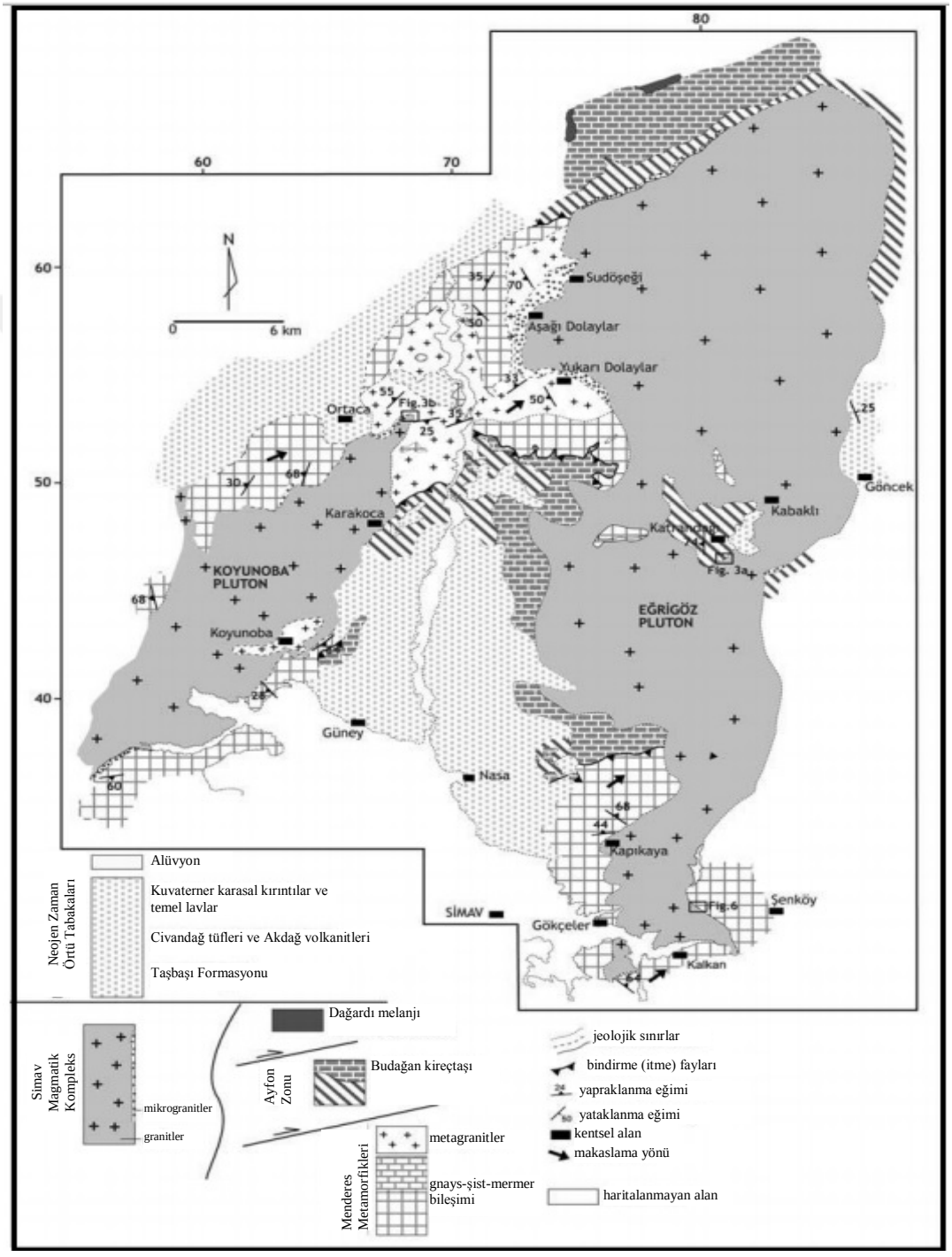

Şekil 4.1. Simav ve Çevresinin Basitleştirilmiş Jeolojik Haritası (Seyitoğlu, 1977

Yukarı doğru volkanik ürünlere alternatif olan (Ersoy ve ark., 2011) çökellerin yaşı, volkanik (Ercan ve ark., 1996) radyometrik yaş verileri olarak 24,2 Ma ve 14,9 Ma arasında değişen, temelinde erken Miyosen olarak kabul edilir (Purvis ve Robertson, 2004, Seyitoğlu ve ark., 1997). Ersoy ve ve ark., (2010), kabuksal gerilme tektoniğinin, volkano-sedimanter havzalarla senkronize bir şekilde, Menderes Masifini ortaya çıkardığı sonucuna varmışlardır. Özet olarak, graben tipi yapılarda, çökeller ile ardalanmalı olarak bulunan volkanik kayaçların varlığı ve bölgenin gerilme tektoniğine bağlı yükselimi, bölgede Erken-Orta Miyosen zamanında, ada yayı gerisinde (back-arc) gerilme tektoniği rejimi koşulları altında magmatik aktivitenin oluştuğunu göstermektedir. Doğudan batıya, Oligo-Miyosen yaşlı Ezine, Evciler, Kozak, Eybek, Alaçam, Koyunoba, Eğrigöz ve Baklan granitoidleri, KB-GD doğrultulu bir magmatik kuşak oluşturmaktadır. Bu magmatic ürünler, kuzeyde Sakarya kıtası, güneyde Menderes Masifi ve/veya bu iki kıtasal bloktan ayrılarak farklı dilimler oluşturan yapılar içinde sokulum yapmaktadır (Şekil 4.2). Simav çalışma alanı, tanımlanan bu magmatik kuşağın doğusunda bulunur. Burada Menderes Masifi, tabanda Afyon ve Tavşanlı zonlarına ait tüm kayaç serilerini tektonik olarak örter. Burada bulunan Oligosen-Miyosen yaşlı granitoidler tüm kayaçları kesmektedir. Alanda beş ana kayaç grubu bulunmaktadır: (1) Menderes masifi, gnays-şist-mermer serileri ve metagranitler, (2) metapelitler ve Afyon Zonu karbonat kayaları, (3) serpantinitler, çörtler ve Tavşanlı Zonu denizaltı bazaltik lavları, (4) Simav magmatik kompleksi plütonik, volkanik-subvolkanik kayaçları ve (5) Neojen tortul ve volkanik istifleri kapsamaktadır. Simav magmatik kompleksi plütonik ve subvolkanik kayaçları doğrudan Menderes Masifi metamorfikleri ve HP/LT Afyon Zonu metapelitlerini kesmiştir. Çalışma alanında tüm birimler uyumsuzluk ile Orta Miyosen volkano-sedimanter kayaçları tarafından örtülmektedir.

### 4.1.2. Simav Bölgesi'nin Tektonik Evrimi

Simav yöresinin tektonik evrimi, ağırlıklı olarak kuzey kenarı yakınında yer aldığı Menderes Masifi'nin oluşum ve gelişim süreci ile bağlantılı olmuştur. Bu

nedenle, Menderes Masifi'nin evrimine ilişkin bilgiler, bu sahanın daha iyi anlaşılabilmesi için önem taşımaktadır.




Şekil 4.2. Simav Bölgesinin Jeoloji Haritası (Akay, 2008).

Son yıllarda dünyanın değişik metamorfik masiflerinde sürdürülen ayrıntılı yapısal jeoloji çalışmaları, bu masiflerin yükselmeleri sırasında kaya kesitinin üstteki kalınca bir diliminin duraylılığını yitirip, altındaki kütleden sıyrılarak yer değiştirmiş olduğunu ortaya çıkarmış ve bu yolla oluşan makaslama gerilmesi, kaynaklı yapısal sistemler, sıyrılma kuşağı (detachment zone) olarak adlandırılmaya başlanmıştır. Aşırı derecede kırıklanmış kalın parçalanma zonlarının oluşmasına neden olabildiği için, jeotermal sistemlerin incelenmesinde böylesi çok kırıklı zonların da iyi tanınmasının yararı açıktır.

Menderes Masifi'ndeki tektonik evrim, Yılmaz (2000) ve Yılmaz (2002)'da sistemli olarak tartışılmaktadır. Batı Anadolu'da uzunlukları 100-150 km ve genişlikleri 5-15 km arasında değişen 10 kadar D-B uzanımlı graben bulunmaktadır. Alaşehir ve Simav Grabenleri de bunların arasındadır. Bunların incelenmesi, Alt-Orta Miyosen'de, D-B çekme gerilmesi altında oluşan K-G uzanımlı faylarla sınırlanmış karasal havzaların içinde, kalın volkano-tortul kayaların biriktiğini ortaya koymaktadır. Bu dönemde, bütün Batı Anadolu birbiriyle bağlantılı göllerle kaplanmıştır. Bu ilk aşamada yerleşen magmatik ve volkanik kayalar, yüksek potasyumlu, kalk-alkalin ve melez bileşimlidir. Üst Miyosen sırasında K-G açılma başlamıştır. Bu sırada merkezdeki Bozdağ'da dağılma fayları oluşmaya başlamış ve Bozdağ yükselmiştir.

Bozdağ'ın çevrelerinde, kızıl renkli kaba klastikler ve daha ötelerde de açık renkli gölsel kireçtaşları çökelmiştir. Üst Miyosen-Alt Pliyosen sırasında, sıçramalı gelişen alkali bazalt boşalımları olmuştur. Alt Pliyosen'in sonlarında, kısa bir süre K-G açılma yavaşlamış ve bölgesel bir aşınma yüzeyi gelişmiştir. K-G açılma yeniden başladığında şimdiki graben sistemi oluşmaya başlamıştır. Grabenleri sınırlayan D-B uzanımlı faylar, daha önceden oluşmuş K-G uzanımlı grabenlerin sürekliliğini keserek onları askıda bırakmıştır. Bu süreç ve başlangıcı ile neden kaynaklanabileceği, Okay (2002) tarafından tartışılmıştır. Okay (2002)'a göre, KB Anadolu'daki Kazdağ masifinin ortasında, metamorfik çekirdek yüzeylenmektedir. Tabankaya, 5±1 kbar basınç ve 640±50ºC sıcaklıkta başkalaşmış mermer ve gnayslardan oluşur. Ortalama muskovit ve biyotit Rb/Sr yaşları, 19 My ve 22 My'dır ve Üst Oligosen'de yüksek sıcaklık altında olmuş başkalaşımı gösterir. Tavankaya, üst Kretase yaşlı okyanusta birikmiş melanjdan oluşmaktadır (Öngür 2004).

Tavan ve tabankaya, iki kilometre kalınlıklı gnays protolitlerinden kurulu milonitlerden oluşan gevrek bir yayılma makaslama zonu ile ayrılır. İleri derecede başkalaşmış kayalar, kuzeye yönelik ve bu yönde dalımlı mineral çizilenmeleri göstermektedir. Bu makaslama zonu, birikim melanjı ve ileri derecede başkalaşmış taban kayaları, gnays yan kayanınki ile aynı, 21 My biyotit Rb/Sr yaşı verilen ve biçim bozulmasına uğramamış bir granitoyit ile kesilmiştir. Başkalaşım ve granit yerleşimi için hesaplanan basınç, metamorfik kayaların 24 My önce makaslama zonu boyunca hızla, 14 km'den 7 km'ye yükselip tüketildiğini göstermektedir. Kazdağ'daki metamorfik kayalar, Üst Oligosen-Alt Miyosen yaşlı, kuzeye dalan Helen dalma-batma zonunun üzerinde oluşmuş olan olağanüstü hacimdeki kalk-alkalin volkanik ve plütonik kayalarla çevrilmiştir. Bütün bunlar, Üst Oligosen bölgesel yayılmasının, yerçekimsel göçme ile değil; doğrudan doğruya, dalma-batma zonunun üzerindeki geri yuvarlanmayla (roll-back) bağlantılı olduğunu göstermektedir.

Simav makaslama kuşağı da aynı anlayış çerçevesinde, Işık (2002) tarafından tartışmaya açılmıştır. Işık (2002), Menderes Masifi' nin kuzeyinde iyi gelişmiş iki makaslama kuşağı bulunduğunu ve bunların Alaşehir ve Simav makaslamaları olduğunu belirtmektedir. Simav makaslama zonunda, üst düzeyler Simav sıyrılma yüzeyine ulaşan bir kataklastik zon oluşturmaktadır. Bu zon, tavan bloğundaki düşük dereceli başkalaşmış ya da başkalaşmamış kaya birimlerini, taban bloğundaki ileri derecede başkalaşmış kayalar ya da sintektonik granitoyitlerden ayırmaktadır. Bu ara yüzeyin, Akdeniz ve Konak (1979)'da bir diskordan yüzeyi olarak tanımlandığı ve başkalaşımdaki süreksizliğin de iki değişik zamanda başkalaşma ile açıklanmaya çalışıldığı anımsanabilir. Işık (2002)'a göre, sünek biçim değiştirme sırasında, metamorfik kayalar ve granitoyitte yeşil şist-amfibolit fasiyesinde milonitik bir biçim değiştirme gelişmiştir. Milonitler, uzamış kuvars ve feldspat kırıntılarıyla mika, kiyanit ve amfibolitlerde seçilmiş yönlenmeler gösteren dane biçimleriyle belli olan, KD'ya yönelik mineral çizilenmeleri içermektedir. Tavan bloğundaki milonitik kayalar, yapısal olarak metrelerce kalınlıkta kataklastik zonlara, parçalanmış katmanlara geçmektedir. Her iki alandaki makaslama belirtileri de Senozoyik'deki bölgesel yayılma yönü ile uyumlu olarak KKD yönünü göstermektedir. Her iki

sıyrılma fayının da tavan bloğundaki granitoyitlere ilişkin radyometrik yaşlar, Batı Anadolu'daki yayılmanın, Oligosen-Alt Miyosen'de başladığını ve Simav kuşağında Alaşehir'dekinden biraz daha yaşlı olduğunu göstermektedir.

Akdeniz ve Konak (1979), bölgedeki egemen kıvrımların KD-GB uzanımlı olduğunu belirtmektedir. Demirci-Akdağ ve Simav-Katran-Eğrigöz eksenleri, bunların en tipik örneklerini oluşturmaktadır. Bunlar, Hersinyen tektoniğine bağlanmaktadır ve belli ki granitik sokulumların yerleşmesi ile de ilgilidir.

Akdeniz ve Konak (1979)'a göre, Alpin tektonik aşamasında da eş yönlü kıvrım eksenleri gelişmiştir. İnceleme alanının kuzeyinde, Dağardı çevresinde yaygın olan Kretase birimlerinin güneye itilmiş ve birbiri üzerine bindirmiş oldukları görülmektedir (Akdeniz ve Konak, 1979). Böylesi bir gerilmenin daha güneyde, metamorfik temeli oluşturan kayaların içinde de ikincil etkileri kalmış olabilir.

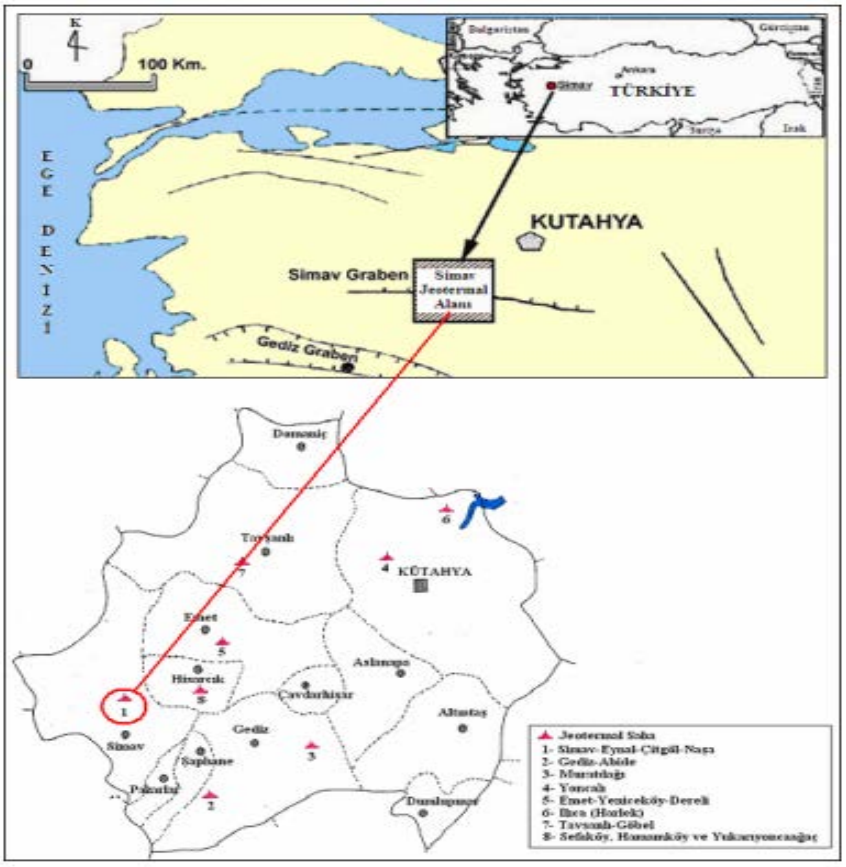
Daha sonra, Orta-Üst Miyosen çökelleri, çekme gerilmesi koşullarında oluşan ve genellikle KKD-GGB uzanımlı çekim faylarıyla sınırlanan grabenlerin içinde gelişmiş olan havzalarda birikmiştir.

Yörenin bugününü biçimlendiren en önemli tektonik gerilme süreci ise, Miyosen sonrasında başlayan ve bugün bile sürdüğü anlaşılan K-G yönlü açılma ile nitelenmektedir. Bu süreç, başlıca Simav Grabeni yarılımlarını üretmiştir. Simav Grabeni bakışımsız, asimetrik bir yapıdır. Güney sınırı, kabaca D-B uzanan Simav Fayı ile sınırlıdır. Güneyindeki Simav Dağı'nı, kuzeyindeki Simav Ovası'ndan ayırmaktadır. Çok dik ve yüksek bir yamaçla dikkat çekmektedir. Ana fayın gerisinde bir dizi koşut fayın bulunduğu ve basamaklı bir yapının olduğu görülmektedir. Doğu kesiminde, Miyosen Civanadağ Tüfü tabanının duruşuna göre, en az 500 m kadar düşey atımı olmalıdır. Simav çevresinde bu atımın 1000 m dolayında olduğundan kuşku duyulmaktadır. Demircidağ kuzeyinde Simav Çayı Vadisi boyunca, doğuya doğru Simav Dağı'nı kuzeyden sınırlayarak ilerleyen fay, Simav doğusunda, Şaphane dolayında hafifçe güneye dönüp, Abide Kaplıcaları üzerinden Gediz Fayı ile birleşir ve Muratdağı kuzeyinde sürer. Batıda, Düvertepe dolayında, kırığın sağ yanal atımlı olduğu bildirilmektedir (Akdeniz ve Konak, 1979). Grabenin kuzeyindeki blok, güneydeki kadar yükselmemiştir. Grabenin biçimi de dikkat çekicidir. Oldukça dar bir kuşakta uzanan

Simav Fayı, Simav Ovası çevresinde genişleyerek tipik bir graben yapısı kazanmakta ve burada üçgen biçimini almaktadır. Fayın bütününün sağ yanal atımlı olarak gelişmeye başladığı ve Simav çevresinde çek-ayır türü bir çöküntü havzasının oluştuğu düşünülebilir. Bu havzanın kuzey sınırı, birkaç çekim fayı ile oluşmuştur. Bunların arasında Yücel ve arkadaşları (1983) tarafından Naşa ve Eynal Fayları olarak adlandırılan faylar da vardır (Öngür, 2004).

### 4.1.3. Simav Jeotermal Sahası

Simav Jeotermal Sahası, Simav şehir merkezinin yaklaşık 4-5 km kuzeyinde yer almaktadır. Çok fazla sayıda bulunan sahadaki sıcak su kaynakları, başlıca 2 alanda toplanmıştır. Bu alanlardan Eynal Bölgesi, Simav şehir merkezinin yaklaşık 4 km kuzeyinde yer alırken, Çitgöl-Naşa Bölgesi'nde bulunan Çitgöl kaynakları Eynal'ın yaklaşık 3 km batısında, Naşa kaynakları ise 3 km kuzeybatısında bulunmaktadır (Şekil 4.3).



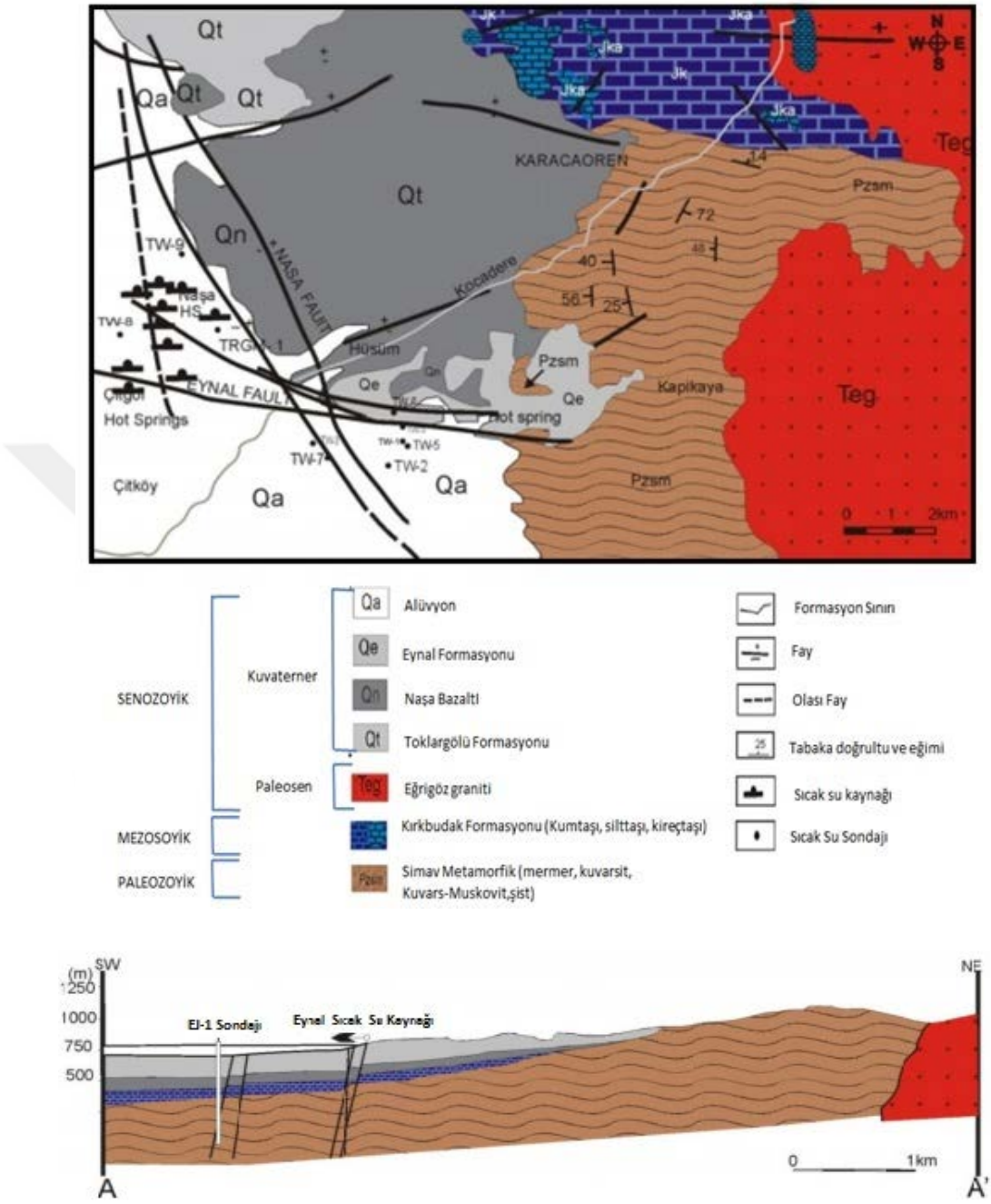

Şekil 4.3. Kütahya-Simav Jeotermal Sahası

### 4.1.4. İnceleme Alanının Jeolojisi

Simav jeotermal alanı, Simav grabeninin doğu kesiminde, Simav ilçesinin yaklaşık 4 km kuzeyinde, yüksek ve dik eğimli dağlar ile ayrılan Simav Ovası'nın KD kenarında bulunur. Simav Ovası, yaklaşık 70 $km^2$ olan bir alanı kapsar ve deniz seviyesinden 780 m yükseklikte yer alır. Buna karşılık, ovanın güneyinde yer alan Simav Dağı bir horst yapısındadır ve 1780 m yüksekliğe kadar ulaşır. Paleozoyik yaşlı metamorfik kayaçlar, bölgede kayaç istifinin tabanında yer almaktadır. Bu kayaçlar, grabeni her iki tarafından sınırlayan dağları oluşturur ve bu dağlarda oldukça sık mostra verirler. Ayrıca, graben içinde bu kayaç birimlerinin genç tortul kayaçlar tarafından yüzeylendiği bilinmektedir.

Metamorfik kayaçlar Alt Mesozoyik yaşlı seviyeler ve Jura yaşlı metamorfizmaya uğramamış kayaçlar tarafından örtülmektedir. Bu kayaçlar aynı zamanda hem grabenin güneyinde Simav horstunu, hem de grabenin kuzeyinde az yüksek olan Akdağ horstunu oluşturan metamorfik kayaçları örtmektedir. Bu kayaçlar; volkanik kayaçlar ve graben içinde KKD-GGB ekseni boyunca depolanmış veya graben ilişkisine bağlı olarak oluşmuş Miyosen yaşlı tortullar tarafından örtülür. Bu kayaç formasyonları hem grabenin güneyinde Simav horstunda, hem de grabenin kuzey kısmında bulunan koldaki az yükseltisi olan sırtta ortaya çıkmaktadır. Bu kayaçları daha sonra Simav grabeni ile aynı yaşta veya ondan daha sonra oluşmuş tortullar takip etmektedir (Akdeniz ve Konak, 1979). Bu kayaçlar graben içinde Simav grabeninin her iki tarafında bulunan horstlarla karşılaştırıldığında, oldukça önemli derecede aşağı düşmüş alanlarda oluşmuşlardır.

İri taneli karasal tortullar, bazaltik lav akıntıları ve kalın alüvyon çökelleri graben içinde yüzlerce metre kalınlığa ulaşan bir katman oluşturur (Öngür, 2004). Çalışma alanında bulunan sondaj kuyuları baz alındığında, tersiyer yaşlı volkano-sedimanter katman örtü kayaçlarını oluştururken sıcak su üreten çatlaklı ve kırıklı rezervuar kayaçları, Naşa bazaltları, Simav metamorfik kayaçları ve Mesozoyik kireçtaşlarıdır. Batı Türkiye ve Southern Basin and Range-ABD, kıtasal gerilim tektoniğine verilebilecek dikkat çekici benzerlikleri ve kendilerine özgün farklılıkları olan kıyaslamalı iki örnektir.

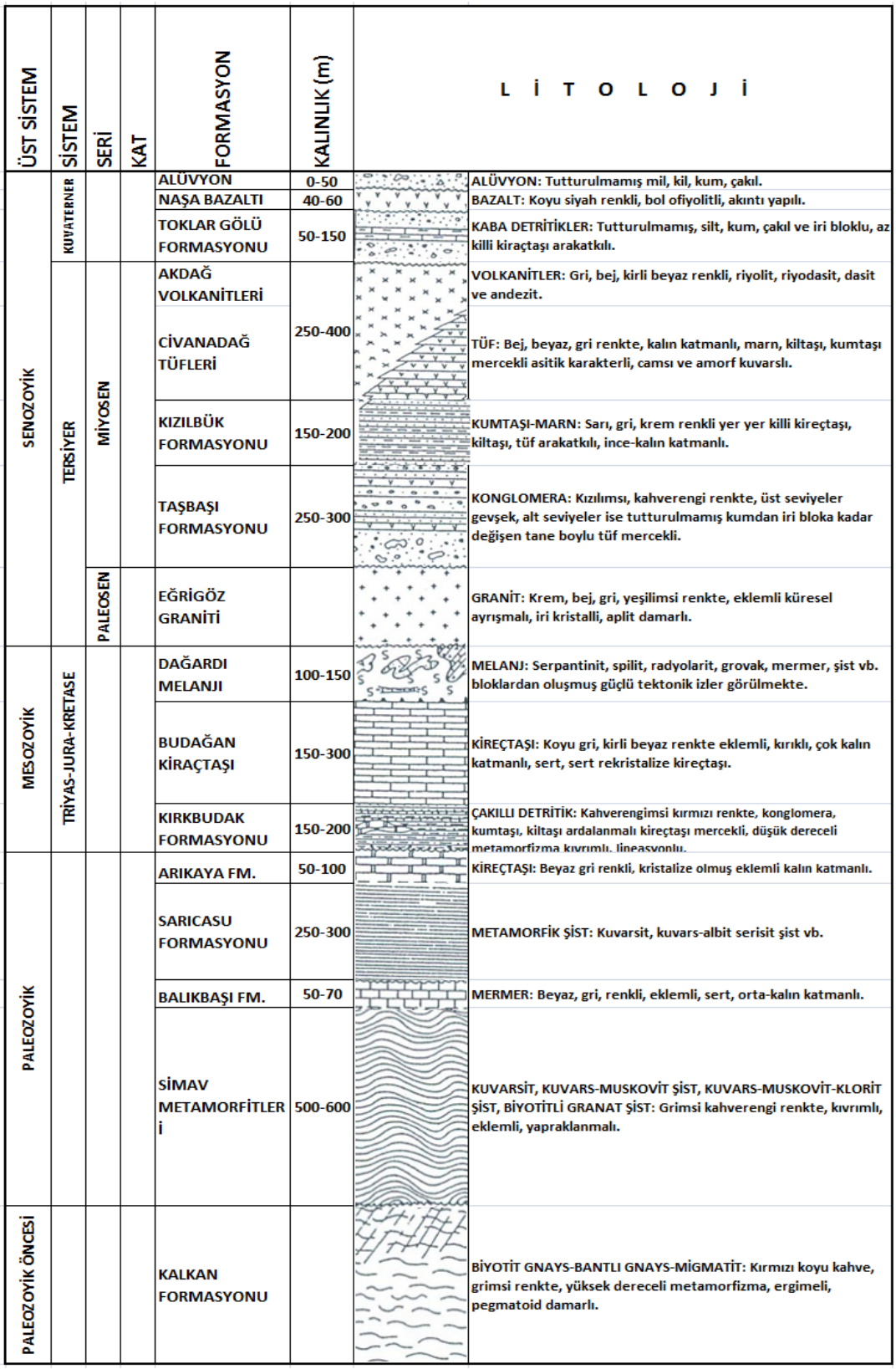



Şekil 4.4. Simav Jeotermal Alanı Kesiti (Bello, 2013)

Her iki bölge, gerilme tektoniğinin kaynağının farklı olmasına rağmen, metamorfik çekirdek kompleksi, gerilme tektoniği kıvrımları, şist zonları, ayrılma yüzeyleri gibi özgün gerilme tektoniği yapıları göstermektedir (Çemen ve ark., 2002). Southern Basin ve Range ABD, Batı Anadolu Bölgesi, Türkiye gibi gerilim

tektoniği hüküm süren alanlarda, bu tektonik oluşuma bağlı ayrılma fayları, jeotermal sistemler için uygun yapılar olmaktadır. Ring ve arakadaşları (2003) tarafından Menderes Masifinde merkez çekirdek, yapı ve soğumasında farklılık gösteren kuzey ve güney submasifleri olmak üzere üç kabuk segmenti tespit edilmiştir. Daha sonra oluşan Simav ayırım fayı, Kiklad-Menderes bindirmesini tepkili etmiş ve bunun hareketi ile Eğrigöz granitlerinin oluşumu gerçekleşmiştir (Ring ve ark., 2003).

Miyosen sonrası, Batı Anadolu'da genleşme tektoniği rejimi hakim olmuş ve bu da yörenin şimdiki durumuna neden olmuştur. Bu proses, asimetrik bir yapıya sahip olan Simav grabenini meydana getirmiştir. Simav grabeninin güneyi, Simav D-B yönünde yaklaşık 80 km uzanan ve graben ovasını Simav Dağından ayıran Simav fayı tarafından sınırlanır. Simav jeotermal sistemine ek olarak, Simav fayının (Düvertepe ve Şaphane) her iki ucunda jeotermal sular vardır. Uzanan bir koridor gibi dar yapı gösteren Simav fayı, Simav ovası içinde bulunur; pull-apart basen şekline sahip tipik graben benzeri bir yapının özelliklerini gösterir. Ayrıca, bu graben birkaç gerilme tektoniği fayları ile sınırlandırılmıştır (Eynal ve Naşa gibi). Simav fayı, Simav grabeninin güney kanadında yaklaşık 1000 m olan kayma ile bugünkü yerini almıştır. Graben, muhtemelen Pliyosen zamanında, Menderes Masifinin diğer ana grabenleri ile birlikte oluşmuştur. Eynal, Çitgöl ve Naşa termal suları, Simav grabeninin güney kanadına, Eynal ve Naşa fayları boyunca, boşalım gösterirler ve bunun yanında jeofizik çalışmalar ile ortaya çıkarılan derin konduktif anomaliler de Simav fayına yakın olarak grabenin güney kanadında bulunurlar. Bu derin konduktif anomaliler, Eynal ve Naşa lokasyonlarında bulunan sığ konduktif anomaliler ile ilgilidir. Bu yüzden, derinde kayan Simav fayının moderat jeotermal sistemlere göre kökensel rol oynadığı belirtilmektedir ve bu termal suların hepsinin en önemli kırık sistemleri ile ilişkide olduğu ileri sürülmektedir (Serpen ve Mıhçakan, 1999). Olası ısı ve kütle trasferini açıklayabilmek için konseptual hidrojeolojik model geliştirilebilir. Simav fayı, metamorfik kabuk içinde, meteorik suları doğal olarak sirkule eden derin sıcaklık hücreleri ile ilişkide bulunarak çok derine nüfuz etmektedir.




Şekil 4.5. Simav Jeotermal Alanının Genelleştirilmiş Stratigrafi Kesiti (Akdeniz ve Konak, 1979)

### 4.1.5. İnceleme Alanının Jeotermal Özellikleri

Simav Jeotermal Sistemi ve çevresi, geçmişte değişik amaçlarla, çeşitli araştırma teknikleri kullanılarak ve çoğunlukla MTA Genel Müdürlüğü tarafından incelemelere konu olmuştur. İlk araştırma Beseme (1966)'nin çalışmasıdır. Bu çalışmadan ve daha sonra yörede yapılan bir gravite taramasından, bu metinde yararlanılamamıştır.

Yapılan çalışmalardan önemli biri, Akdeniz ve Konak (1979) tarafından yapılan ve Simav çevresini de kapsayan bölgesel bir jeoloji incelemesidir. Temel jeoloji incelemesi olarak geniş bir alanın; son derece ayrıntılı bir haritalanmasını ve var olan bütün birimlerin kapsamlı tanımlanmalarını sunan bu çalışmanın, izleyen çalışmalarda da hemen hiç eleştirilmeden ve değiştirilmeden esas alındığı görülmektedir. Aşağıda değinilen diğer MTA çalışmalarında da, hep bu raporun harita ve adlandırmalarının kullanılmakta olduğu dikkat çekmektedir. Bu nedenle, bu çalışma (Akdeniz ve Konak, 1979) yörenin jeoloji durumunu anlamak açısından asıl kaynak olarak ele alınmalıdır.

MTA tarafından gerçekleştirilmiş iki farklı çalışma da, jeotermal olanakların belirlenmesi ve balneolojik değerlendirme konularında olmuştur. Bunlardan ilkinde, bu yörenin jeolojisi yeniden ele alınmakta ve sahanın jeotermal enerji olanakları tartışılmaktadır. Yücel ve arkadaşları (1983), çalışmasında jeoloji birimler ve yapılar, yine Akdeniz ve Konak (1979)'ın çalışması izlenerek yeniden anlatılmış ve özellikle de sıcak su kaynaklarının çevresinde bazı yeni yerel faylar yorumlanmıştır. Bunun yanında, kaynak sularından ayrıntılı kimyasal analizler yapılmış olduğu görülmektedir. Raporun sonunda sahadaki jeotermal sistemlerle ilgili kaba ve şematik bir modelleme yapılmıştır (Öngür, 2004).

İkincisinde ise, Eynal ve Çitgöl-Naşa kaplıcalarının hidrojeolojisi incelenmiştir. Simav Jeotermal Sistemi'nde MTA tarafından, çoğu değinilen inceleme sonuçlarına dayanılarak, bir dizi arama ve işletme sondaj kuyusu açılmıştır. Bunlardan ısıtma projelerine akışkan sağlamak amacı ile tasarlanan ikisinin bitirme raporu da, bir yandan bu sondajlarla elde edilen bulguları sergilerken, bir yandan da o güne kadar yapılan araştırmalarla derlenen bilgileri yeniden sunmaktadır. Daha

önce kaplıca tesislerine ek su sağlama amacı ile yapılmış olan E2, E-3, Ç-1, EJ-1 ve N-1 kuyu bitirme raporlarından, Erişen ve arkadaşlarının (1989) raporu aracılığıyla yararlanılmıştır.

Simav Ovası, önemli bir yeraltı suyu akiferi içermektedir ve DSİ Genel Müdürlüğü de bu ovanın hidrojeolojik özelliklerini inceleyip yayınlamıştır (Ural, 1976).

Sahada yapılan bir başka çalışma ise, Bayram ve Şimşek (2005)'e ait olan Simav Jeotermal Sahası'nın hidrojeokimyasal özelliklerinin incelendiği ve izotopik araştırmalarının yapıldığı çalışmadır.

Bölgedeki sondaj çalışmaları, 1985 yılında MTA tarafından başlatılmıştır. MTA, bölgede çeşitli amaçlarla araştırma ve üretim sondajları yapmıştır. Bölgede şu an aktif olarak Eynal kaplıcalarında 3 (E-1, E-2 ve E-3) ve Çitgöl-Naşa kaplıcalarında 3 tane (Ç-1, Ç-2 ve N-1) olmak üzere toplam 6 hidrotermal arama ve üretim kuyusu bulunmaktadır. Bu kuyulara ek olarak, Simav Kent Isıtma Projesi kapsamında, Eynal'ın güneyine 2 tane derin arama ve üretim sondajı (EJ-1 ve EJ-2) daha gerçekleştirilmiştir. Bölgedeki bazı kuyulara ilişkin derinlik, üretim seviyesi, sıcaklık, üretim debisi, rezervuar kayaç tipi ve sondaj tarihini içeren bilgiler Çizelge 4.1'de gösterilmektedir.

Simav sahasındaki kuyuların derinlikleri 65,8 m (E-1) ile 958 m (EJ-2) arasında, ölçülen kuyu dibi sıcaklıkları ise 105,1°C (Ç-1) ile 162,47°C (EJ-1) arasında değişmektedir. E-1 ve Ç-1 kuyuları dışındaki kuyularda rezervuar kayacı olarak karşılaşılan kaya birimi Simav Metamorfitleri'dir. E-1 ve Ç-1 kuyularında rezervuar kayacı olarak karşılaşılan kaya birimi ise Naşa Bazaltı'dır (Çizelge 4.1). Sahadaki üretim debisi en düşük kuyular E-4, N-1 ve açılan en derin kuyu ise EJ-2 (958 m)'dir. Bunun nedeni, bu kuyularda rezervuar kayacı olarak görülen Simav Metamorfitleri'nin yeterince kırık yoğunluğu olmayan, hemen hemen geçirimsiz zonlarının bulunmasıdır.

Bölgede yapılan sondajlardan önce var olan ve bir kısmı hala mevcut çok sayıda sıcak su kaynağı bulunmaktadır. Bunlardan, Yıldırım (1983)'a göre, Eynal kaynakları alüvyon ve yamaç molozları içinden başlıca 4 büyük kaynak halinde yüzeylerken, Çitgöl-Naşa kaynakları ise alüvyon üzerinde başlıca 10 büyük kaynak

olarak yüzeylemektedir. Öktü (1984), bölgede Eynal'da 34, Çitgöl-Naşa'da ise 55 tane olmak üzere toplam 89 sıcak su kaynağı bulunduğunu belirlemiştir. Sayı ve sıcaklık açısından Çitgöl-Naşa bölgesine oranla daha yoğun olan Eynal'daki kaynaklar, genellikle yaklaşık D-B doğrultulu kırıklar boyunca çizgisel olarak yüzeylerken, 0,02 lt/s ile 0,2 lt/s arasında değişen toplam 2,1 lt/s'lik debileri; 23°C ile 93,5°C arasında değişen sıcaklıkları bulunur. Çitgöl-Naşa kaynaklarının debileri ise 0,15 lt/s ile 0,86 lt/s arasında, sıcaklıkları ise 34°C ile 86,5°C arasında değişmektedir. Yıldırım (1983) ise, Eynal'daki kaynakların sıcaklığının 60°C ile 96°C, Çitgöl-Naşa'daki kaynakların sıcaklığının 43°C ile 83°C arasında olduğunu belirtmiştir.

Bölgede delinen mevcut kuyulardan yola çıkarak, sahada sıcak akışkan üretiminin sağlandığı çatlaklı rezervuar kayaçları olarak Naşa Bazaltı, Simav Metamorfitleri ve Arıkaya Formasyonu'nun kireçtaşları ön plana çıkmaktadır.

Simav Metamorfitlerinin mikaşist ve muskovit-klorit şistlerden oluşan bazı seviyeleri, Sarıcasu formasyonunun albit-serizit şist zonları, Kızılbük formasyonuna ilişkin kiltaşı, silttaşı ve marnlar, Civanadağ tüfleri, Eynal formasyonu ve alüvyal örtünün killi, siltli seviyeleri örtü kaya niteliğindedir. Simav grabeni içinde yapılan sondajlı çalışmalarda, yukarıda belirtilen örtü kayaların bir bölümüne rastlanmamış, Simav Metamorfitlerinin mikaşist ve muskovit-klorit şistleri, Kızılbük formasyonu ile Eynal formasyonunun silttaşı, kiltaşı zonları ve alüvyal örtünün killi, siltli seviyelerinin örtü kayalar olarak istifi oluşturduğu ortaya çıkmıştır.

Alanda sıcaksu kaynaklarının ve genç volkanik etkinliklerinin varoluşu ısı kaynağını belirlemektedir. Paleosen yaşlı Eğrigöz graniti, Miyosen riyolit, andezit, dasit nitelikli asidik volkanizması (Akdağ) ve kuvaterner yaşlı Naşa Bazaltını oluşturan genç volkanik faaliyet bölgenin jeotermal aktivitesinde etkili olmuştur.

Erişen ve arkadaşları (1989), EJ-1'in üretken zonlarının Simav Metamorfitleri'nin mermer, şistsel mermer, şistsel kuvarsit ve kuvarslı şist düzeylerinde ve bunları kesen kırık zonlarında bulunduğu görüşündedir. Ancak, aynı yazarlara göre EJ-2'de kapatılan üst kesimlerde büyük çamur kaçakları bulunmakla birlikte, Simav Metamorfitleri'nin tavanındaki çok zayıf bir üretken zonun dışında, gerek bu birimde ve gerekse alttaki migmatitik gnayslarda üretken bir zon

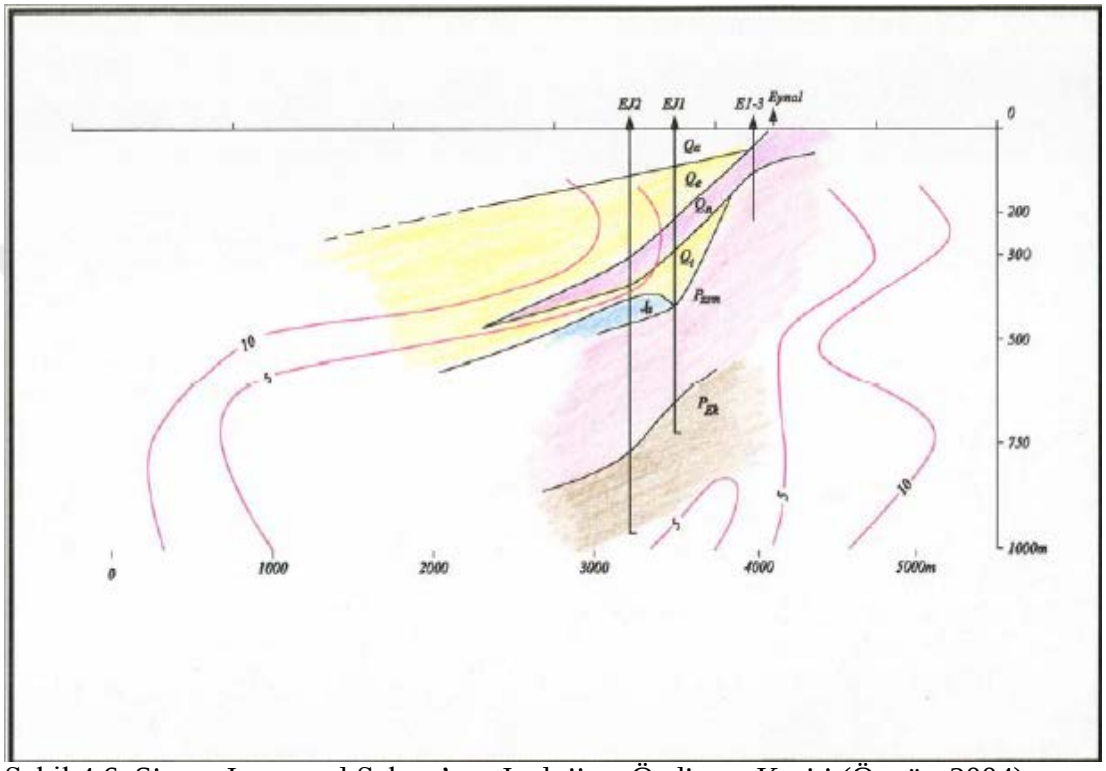
bulunmamaktadır. Ancak, bu birimlerde sıcaklığın derinlikle düzenli olarak artışı da dikkat çekmektedir.

Çizelge 4.1. Simav Sahası'ndaki Jeotermal Kuyularla İlgili Veriler (Erişen ve ark., 1989; MTA, 2001)

| Kuyu | Derinlik, m | Üretim Seviyesi m | Rezervuar Kayacı | Kuyu Başı Sıcaklığı °C | Kuyu Dibi Sıcaklığı °C | Debi, lt/s | Yıl |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| E-1 | 65.8 | - | Bazalt | 97 | 142,5 | 14 | 1985 |
| E-2 | 149,5 | 120 | Metamorfitler | 97 | 158 | 55 | 1985 |
| E-3 | 150 | 120 | Metamorfitler | 97 | 149 | 50 | 1985 |
| E-4 | 220 | - | Metamorfitler | 98 | - | 1 | 1994 |
| E-5 | 300 | - | Metamorfitler | 97 | - | 6 | 1995 |
| EJ-1 | 725,2 | 550 | Metamorfitler | - | 162.47 | 72 | 1990 |
| EJ-2 | 958 | 462 | Metamorfitler | - | 157.47 | 1 | 1990 |
| Ç-1 | 101 | 46 | Bazalt | 97 | 105.1 | 32 | 1985 |
| N-1 | 200 | - | Metamorfitler | 42 | - | 2 | 1986 |

Öngür (2004), düşük özdirençlerle nitelenen rezervuar hacminin bütününün, Simav Metamorfitleri ve Kalkan Formasyonu migmatitik gnayslarından oluştuğunu ve bu alanı çevreleyen yerlerde de aynı derinliklerde, aynı birimlerin yayıldığını ve anomali gösteren alandaki kaya kütlesinin özdirencini, çevresine göre bunca düşüren bir neden olması gerektiğini belirtmiştir. Öngür (2004)'e göre, bu kalınlıkta ve bu yaygınlıkta bir kaya kesitinin özdirencinin, çevreleyen kaya kesitinden böylesine keskin bir farkla bu denli düşük olması ve bu ortamın sıcaklığının bunca yüksek ve görünüşe göre bir örnek olması, bu kaya kütlesinin içinde sıcak akışkanların dolaşmasından başka bir nedene bağlanamaz. Bu özdirenç ve sıcaklık anomalisi yanal yönde sıklığı değişken de olsa, içinde sıcak akışkan dolaşan kırık sisteminden kaynaklanıyor olmalıdır. Özdirenç anomalisinin dağılımı; hele, 1000 m derinlik için çıkarılan 5 Ohmm'den düşük özdirençli alanların dağılımı, dirençli taban haritası yorumlanarak varsayılan fayların denetleyici olduğunu açık bir biçimde göstermektedir. Bu durumda, sözü edilen fay zonlarının çok daha sık aralı kırık ve çatlak zonları kapsamakta ve akışkan dolaşımına daha elverişli olduğu gerçekçi bir kabul olmalıdır. Bu sebeple, EJ-2'nin 460 m'den derindeki kesiti, sahanın bütünü

konusunda bağlayıcı bir karar vermeye elverişli güvenilir bir dayanak değil; tersine, bir istisnadır. Bu anlayışla yaklaşıldığında Simav Jeotermal Alanı'nın rezervuar hacmi, ortalama 150ºC sıcaklıklı ve 10 $km^3$'den az değildir. Bu nedenle, sahanın güneyindeki Semerköy çevresinde oldukça genişleyebileceği olasıdır.




Şekil 4.6. Simav Jeotermal Sahası'nın Jeoloji ve Özdirenç Kesiti (Öngür, 2004)

Ayrıca, Öngür (2004)'ün saha için bir başka olasılığın da, sıyrılma (detachment) zonu kavramından ortaya çıkabileceğini ve bütün Menderes masifi için olduğu gibi, Simav metamorfitleri için de önerilen bu yapısal olgunun oldukça kalın bir metamorfik kaya kesitinin ileri derecede kırıklanması ve kataklastik bir yapı edinmesini doğurarak, böylesi katmanların Simav Dağı'nda var olduğunun belirtildiğini, bunun yanında Simav grabeninin tabanındaki metamorfik temelin yaklaşık 1000 m kadar alçalmış olduğu göz önüne alındığında, jeotermal alanda bugüne kadar sondajlarla inilen derinliklerin biraz daha altında, bu kataklastik metamorfit katmanlarının var olabileceğinin sınanması gereken önemli bir olasılık olduğunu söylemesi; böylesi bir katmanın varlığının bugüne kadar belirlenenin altında ve daha yüksek sıcaklıklı bir haznenin bulunması anlamı da taşıyabilecektir.

### 4.1.6. İnceleme Alanının Jeofizik Verileri

Erişen ve arkadaşlarından (1979) yapılan alıntılardan anlaşıldığına göre sahada 55 $km^2$'lik bir alanda jeofizik elektriksel özdirenç ölçümleri yapılmıştır.

İncelenen alanda, geniş ve oldukça düşük özdirençli hacimlerin varlığı ortaya çıkarılmıştır. Buna göre, ilk 300 m derinlik içinde 3 Ohmm'ye kadar düşen özdirençli alanlar Eynal, Çitgöl ve Naşa sıcak su kaynaklarını içerecek şekilde yayılmaktadır. Bu derinliklerde 10 Ohmm'den küçük özdirençli kesimlerin alanının 8,5 $km^2$ kadar olduğu görülmektedir. 500 m derinlikte bu düşük özdirençli alan, güneye doğru yayılarak, Çitgöl ve Semer köylerini de içine almış ve güneydoğuda Muradınlar Köyü'ne yaklaşarak 25,5 $km^2$'ye ulaşmaktadır. Bu alan küçük farklarla 750 ve 1000 m derinliklerde de aynı kalmaktadır. Bu derinliklerdeki 5 Ohmm'den küçük özdirençli alanlar da, daha dar da olsa, benzer bir doku sergilemektedir. Ancak, 1000 m derinlik için belirlenen 5 Ohmm'den küçük eş özdirenç dağılımı daralmakta ve ilginç bir biçimde, Semerköy çevresinde 5 $km^2$ kadar bir alanda yayılmaktadır. Düşük özdirençli alanların ilk 300 m derinlikteki kenarları, Eynal ve Naşa çevresinde haritalanan faylarla, D-B ve KKB-GGD uzanımlı iken; daha derindeki düşük özdirençli alanın kenarlarının KB-GD uzanımlı oluşu da dikkat çekmektedir.

### 4.1.7. Sahanın Yeraltı Suyu Hidrojeolojisi

Ovada yeraltı suyu hedeflenerek çok sayıda kuyu açıldığı bilinmektedir. 1976 yılında 120 sığ kuyu ve 29'u halk, 2'si içme ve 19'u da araştırma amaçlı açılan 30 sondaj işletme kuyusunun varlığı bildirilmiştir (Ural, 1976). Bu kuyuların artezyen debilerinin 0,01-18 lt/s ve pompa debilerinin de 0,2-60 lt/s arasında değiştiği belirtilmektedir. Özgül debiler 0,3-55,6 lt/s/m arasında belirlenmiştir. Ovadaki eş su düzeyi eğrileri, Simav Gölü ve çevresindeki bataklık alana doğrudur. Göl alanı 0,06 $km^2$ olmakla birlikte sürekli bataklık alanın 1976'da 1.062 $km^2$ ve mevsimlik bataklığın da 7,57 $km^2$ olduğu bildirilmektedir. Gölün doğal koşullarda yeraltı suyu tarafından beslenmekte olduğu açıktır (Öngür, 2004).

Simav Alüvyonu'nun bazı düzeylerinin çok yüksek iletkenlikli ve çok verimli olduğu görülmektedir. Ancak, su kalitesinin değişkenliği nedeni ile Simav Ovası'nın yalnızca güney ve kuzey kenarları yakınındaki 970 ve 330 hektarlık alanlar yeraltı suyu işletmesine açılabilmiştir. Kapalı bir drenaj havzası niteliğinde oluşunun yanında alüvyon akiferine boşalan sıcak su sisteminin varlığından ötürü de, ovanın büyük bölümünde kaliteli yeraltı suyu üretim olanağı bulunmamaktadır (Öngür, 2004).

### 4.1.8. Simav Jeotermal Sahası Jeokimyası

Simav Jeotermal Sahası sularının kimyasal analiz sonuçları Çizelge 4.2'de verilmektedir. Simav Bölgesi'ndeki termal suların kimyasal içeriği ile litoloji arasındaki ilişki ise, Çizelge 4.3'de sunulmaktadır.

Bölgedeki suların çoğunun pH değeri yaklaşık 7 ile 9 arasında olup, nötre yakın biraz bazik bir karakter sergiler. pH'ın bazik tarafa doğru daha çok kaymasının nedeni, sulardaki hakim anyonun bikarbonat ($HCO_3^-$) olmasındandır (Çizelge 4.2). pH 6-10 arasındaysa, $HCO_3^-$ hakim iyon, daha düşük pH değerlerinde karbonik asit ($H_2CO_3$) hakim olup, daha alkalin pH değerlerinde karbonat ($CO_3^{-2}$) hakim iyondur (Nicholson, 1993). Suların toplam çözünmüş katı derişimleri (total dissolved solids-TDS), yaklaşık 1400 ile 2000 mg/l (ortalama 1700 mg/l civarında) arasındadır.

Simav Sahası'ndaki termal su kaynaklarının sıcaklıkları 34°C ile 96°C arasında değişmektedir. Kuyular arasında ise, Eynal'ın güneyindeki 2 derin kuyudan biri olan EJ-1, 162,47°C'lik ölçülen kuyu dibi sıcaklığıyla sahanın en sıcak kuyusudur.

Simav Sahası'nın Çizelge 4.2'de listelenen bütün su örnekleri $Cl\text{-}SO_4\text{-}HCO_3$ üçgen diyagramına yerleştirilmiştir (Şekil 4.7). Diyagramda, bütün sular için Türkiye'deki jeotermal sularla paralel biçimde hakim anyon olarak bikarbonat görünmektedir ve suların klor içeriği azdır (<10%). Termal kaynak suları ve kuyu suları için düşük klor ve yüksek $HCO_3^-$ içeriği, jeotermal akışkanın meteorik kökenli olduğunu belirtir. Yüzeye yakın yoğuşmuş buhar içeren sulardan etkilenen birkaç

sıcak kaynak örneği dışında örneklerin çoğu bikarbonat bölgesine yakın düşmektedir. Diyagramdan açıkça görülmektedir ki, Simav jeotermal suları, sülfat-bikarbonat köşeleri arasında tek bir hat boyunca dizilerek çeşitli seviyelerde sülfürlü yüzey suları ile karbonat içeriği yüksek sığ yeraltı suları tarafından seyrelmeye (dilution) tabi tutulmuştur. Buradan, jeotermal suların benzer sular olduğu, uzun mola süreli olmadıkları ve tek bir kaynaktan geldikleri söylenebilir. Jeotermal sulardaki sülfat derişiminin de yüksek oluşu, düşük pH değerleri üretilmesi ve sıcaklık artışına neden olan bir buhar ısıtma işlemiyle (steam heating process) açıklanabilir. Bu olay, aşağıdaki tepkimeyle gösterilebilir:

$$H_2S + 4H_2O \Rightarrow SO_4^{-2} + 10H^{+} + 8e^{-} \quad (4.1)$$

Fakat, suların pH değerlerinin bu görüşü doğrulamadığı görülmektedir. Yüksek sülfat içeriği için başka bir olasılık ise, piritin ($FeS_2$) oksidasyonu sonucu meydana gelir.

$$FeS_2 + 7/2O_2 + H_2O \Rightarrow Fe^{+2} + 2SO_4^{-2} + 2H^{+} \quad (4.2)$$

Şekil 4.8'e bakıldığında, bütün sıcak kaynak suyu ve jeotermal kuyu verilerinin Na+K köşesine yakın olduğu görülmektedir. Na>Ca olduğundan, bu sular yüksek sıcaklıklı jeotermal sular grubuna dahil edilebilir. Örneklerin tam Na+K köşesinde birleşmemesi, sahadaki jeotermal sulara yeraltı sularının etkisini belirtir. Sulardaki $Ca^{+2}$ içeriğinin $Mg^{+2}$'dan daha fazla olduğu diyagramdan açıkça görülmektedir. Buradan, jeotermal suların kırık zonları boyunca yüzeye çıkışları süresince, olasılıkla $CaCO_3$'ca zengin içerikli formasyonlarla etkileşime uğradıkları düşünülebilir (Palabıyık, 2006).

Şekil 4.9'da Simav jeotermal sularının $SiO_2$–$SO_4$–$HCO_3$ diyagramındaki dağılımı gösterilmektedir. Bu diyagramda da su örneklerinin yine önceki diyagramlarda olduğu gibi, $SiO_2$ ile $SO_4$ arasında çizgisel bir hat oluşturması, onların aynı kökenli benzer sular olduğunu ve sülfatlı yüzey sularından etkilendiklerini doğrulamaktadır.

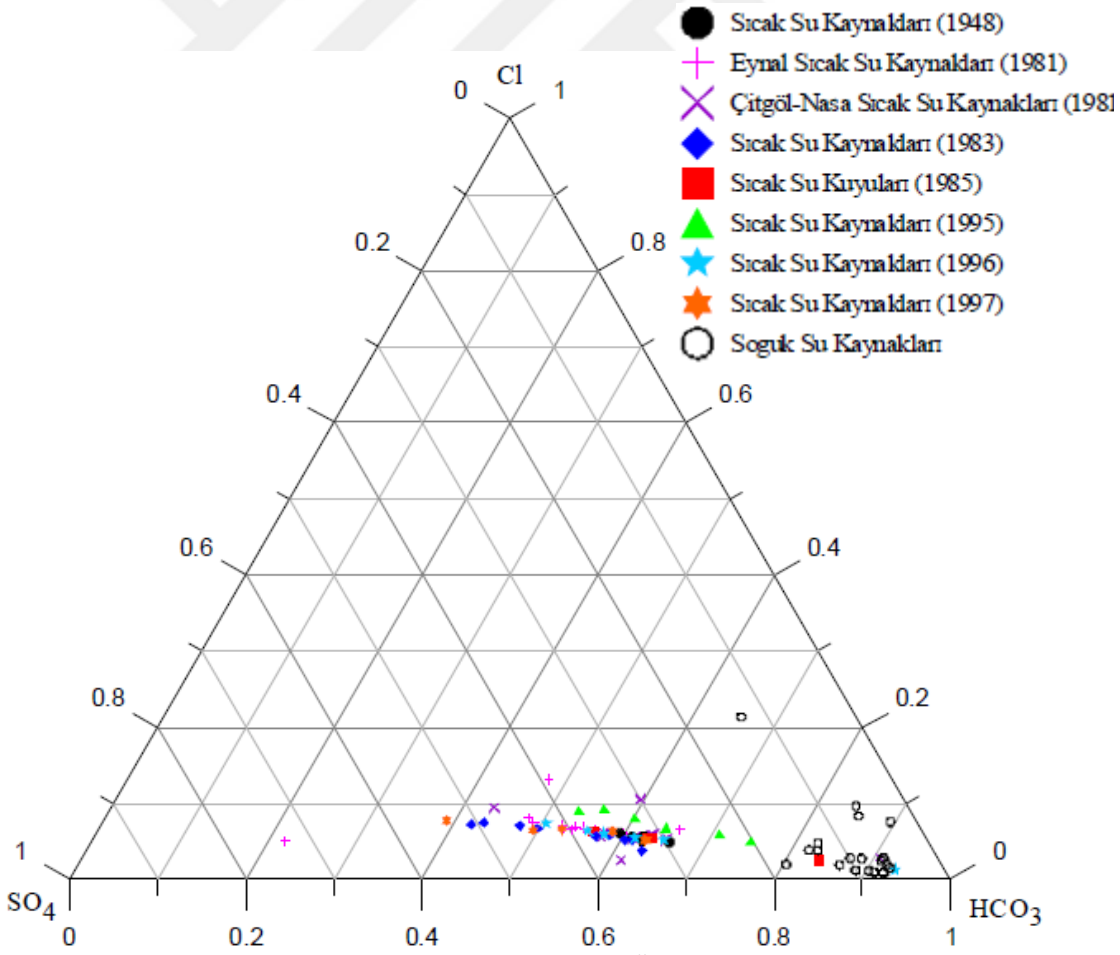
Simav jeotermal sularının göreli Cl, $HCO_3$ve B içeriklerini gösteren üçgen diyagram, Şekil 4.10'da görülmektedir. Bu diyagramda, su örneklerinin diğer üçgen diyagramlarla uyumlu olarak, Cl ile $HCO_3$ arasında aynı hat üzerinde bulunması, onların özgün ve benzer sular olduğunu, tek ve aynı kaynaktan geldiklerini ve kırık zonları boyunca yukarı doğru çıkışları sırasında yeraltındaki diğer sularla karışıma uğradıklarını açıkça göstermektedir (Palabıyık, 2006).

Çizelge 4.2. Simav Jeotermal Sularının Kimyasal Analiz Değerleri (ppm; +: jeotermal kuyu örneği) (a: Yıldırım, 1983; b: Yıldırım, 1985; Öktü, 1984)

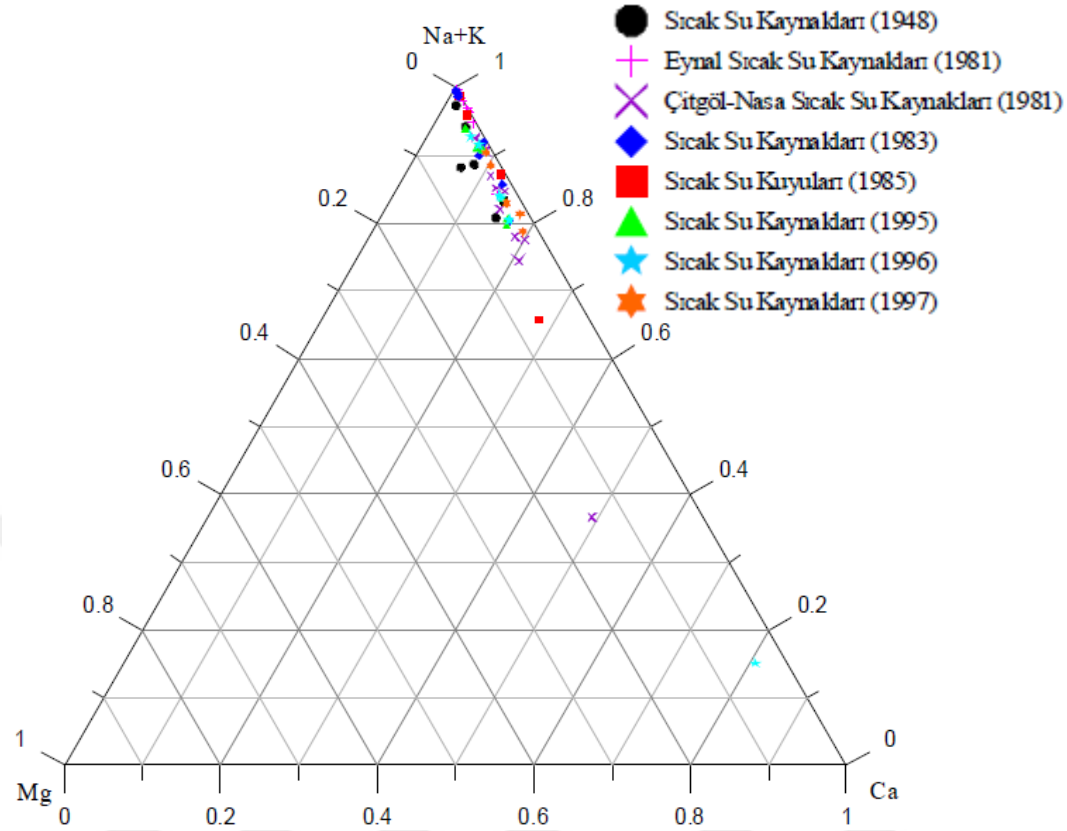
| Bölge | Örnek | T, C | pH | K | Na | Ca | Mg | $B_l$ | Li | $SiO_2$ | $HCO_3$ | $SO_4$ | Cl | F | $Fe_l$ | $As_l$ | $NH_4$ | $CO_2$ | Kaynak |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Eynal | Ey | 60 | 8,2 | 54 | 490 | 5,5 | 1,3 | 5,2 | 0,8 | 165 | 518 | 454 | 70 | 18 | - | 0,2 | 0,1 | 5,2 | a |
| | Ey-2 | 74 | 8,92 | 65 | 530 | 4,3 | 1 | - | - | 190 | 458 | 436 | 69 | 14 | 0,1 | 0,24 | 0,1 | - | |
| | Ey-3 | 63 | 9,25 | 59 | 480 | 2,9 | 1 | 4,5 | 0,8 | 165 | 408 | 494 | 71 | 18 | 0,1 | 0,9 | 0,1 | 0,8 | |
| | Ey-4 | 96 | 9,51 | 61 | 600 | 2 | 1 | 5,4 | 1 | 218 | 425 | 483 | 73 | 18 | < 0,1 | 1,02 | 0,1 | 0 | |
| | Ey-6 | 60 | 8,15 | 54 | 490 | 5,5 | 1,3 | 5,2 | 0,8 | 165 | 518 | 454 | 70 | 18 | < 0,1 | 0,2 | 0,1 | 5,2 | |
| | E-2+ | 97 | 8,7 | 51 | 470 | 6 | 0 | 4,3 | 0,4 | 50 | 628 | 416 | 72 | 12 | < 0,1 | 0,32 | 0,66 | - | b |
| | E-3+ | 97 | 7,55 | 48 | 500 | 20 | 3,4 | 5,9 | 0,4 | 46 | 860 | 433 | 76 | 13 | < 0,1 | 0,2 | 1,24 | - | |
| Çitgöl-Naşa | ÇT-1 | 77 | 7,16 | 37 | 245 | 43 | 3,7 | 2,5 | 0 | 165 | 494 | 259 | 30 | 4,2 | < 0,1 | 0,2 | 0,1 | 49 | a |
| | ÇT-2 | 79 | 7,87 | 44 | 355 | 33 | 1,8 | 3,4 | 0 | 177 | 555 | 340 | 55 | 7,7 | < 0,1 | 0,02 | 0,1 | 11 | |
| | ÇT-3 | 83 | 7 | 44 | 340 | 34 | 5,3 | 4,2 | 0 | 181 | 573 | 376 | 57 | 7 | < 0,1 | 0,09 | 0,1 | 92 | |
| | ÇT-5 | 35 | 8,16 | 44 | 350 | 82 | 14 | 3,5 | 0,8 | 44 | 580 | 317 | 50 | 2,9 | < 0,1 | 0,1 | 0,1 | 58 | |
| | Nş-1 | 63,5 | 6,57 | 42 | 395 | 39 | 9,6 | 3,4 | 0,8 | 162 | 604 | 344 | 52 | 5,9 | < 0,1 | 0,24 | 0,1 | 241 | |
| | Ç-1+ | 97 | 7,2 | 35 | 315 | 49 | 2,7 | 3,9 | 0,2 | 56 | 610 | 300 | 52 | 8 | < 0,1 | 0,28 | 0,9 | - | b |
| | N-1+ | 42 | 7,6 | 7 | 126 | 56 | 13 | 2 | 0 | 28 | 500 | 82 | 15 | 1,1 | < 0,1 | 0,06 | 1,8 | - | |
| Eynal | SE-1 | 86 | 7,8 | 38 | 440 | 15 | 0,2 | 3,8 | - | 183 | 671 | 382 | 67 | 13,8 | 0 | 0,42 | 0,72 | - | c |
| | SE-4 | 53 | 8,9 | 47 | 550 | 9,1 | 0 | 4,3 | - | - | 500 | 445 | 76 | 15,3 | 0 | 0,5 | 0 | - | |
| | SE-7 | 51 | 7,8 | 30 | 290 | 50 | 10 | 2,7 | - | 128 | 574 | 238 | 58 | 6,5 | 0 | 0,26 | 0 | - | |
| | SE-14 | 77,2 | 8,8 | 50 | 530 | 1,8 | 0 | 4,8 | - | 123 | 616 | 453 | 76 | 15,3 | 0 | 0,51 | 0,36 | - | |
| | SE-16 | 68 | 8,2 | 50 | 550 | 3,8 | 0,3 | 5 | - | 123 | 629 | 486 | 85 | 18 | 0 | 0,46 | 0,93 | - | |
| | SE-21 | 50,8 | 6,6 | 13 | 180 | 9,6 | 0,8 | 1,1 | - | 183 | 79 | 264 | 18 | 13 | 0,64 | 0,34 | 5,66 | - | |
| | SE-27 | 84,8 | 8,5 | 29 | 480 | 3,3 | 0 | 4,5 | - | 115 | 641 | 445 | 79 | 15,8 | 0 | 0,52 | 0 | - | |
| | SE-29 | 73,2 | 8,8 | 49 | 540 | 2,9 | 0 | 4,6 | - | 123 | 574 | 467 | 158 | 17 | 0 | 0,49 | 0,46 | - | |
| | SE-36 | 63,5 | 8,1 | 43 | 400 | 17 | 0,4 | 3,8 | - | 175 | 685 | 364 | 61 | 12,8 | 0 | 0,24 | 0 | - | |
| | SE-41 | 82 | 9,6 | 35 | 410 | 4 | 0 | 4,6 | - | 190 | 470 | 427 | 79 | 18 | 0 | 0,51 | 0,36 | - | |
| | SE-43 | 52 | 7,1 | 41 | 410 | 8,7 | 0,1 | 4,4 | - | 175 | 549 | 422 | 70 | 15,5 | 0,2 | 0,52 | 0 | - | |
| | SE-47 | 70 | 7,8 | 42 | 450 | 17 | 0,3 | 4,7 | - | 150 | 647 | 426 | 76 | 14,5 | 0 | 0,55 | 0 | - | |
| | SE-48 | 62 | 9,8 | 44 | 430 | 5,4 | 0,2 | 3,9 | - | 195 | 641 | 366 | 67 | 13 | 0 | 0,45 | 0,15 | - | |
| | SE-52 | 62 | 7,4 | 25 | 460 | 2,8 | 0 | 4,5 | - | 143 | 582 | 423 | 75 | 15,8 | 0,24 | 0,54 | 0,36 | - | |
| Çitgöl-Naşa | SÇN-1 | 34 | 7,9 | 7 | 45 | 69 | 20 | 0,3 | - | 68 | 372 | 27 | 12 | 0,46 | 0 | 0,09 | 0 | - | |
| | SÇN-2 | 67 | 8,2 | 30 | 300 | 59 | 13 | 3,1 | - | 183 | 622 | 306 | 58 | 5 | 0 | 0,49 | 1,7 | - | |
| | SÇN-4 | 38 | 8,3 | 37 | 360 | 50 | 9 | 3,1 | - | 148 | 616 | 309 | 109 | 6,8 | 0 | 0,36 | 0 | - | |
| | SÇN-11 | 61 | 7,4 | 38 | 320 | 53 | 9 | 3,2 | - | 148 | 641 | 294 | 52 | 6,8 | 0 | 0,32 | 0 | - | |

Çizelge 4.3. Simav Bölgesi'ndeki Termal Suların Kimyasal İçeriği ile Litoloji Arasındaki İlişki

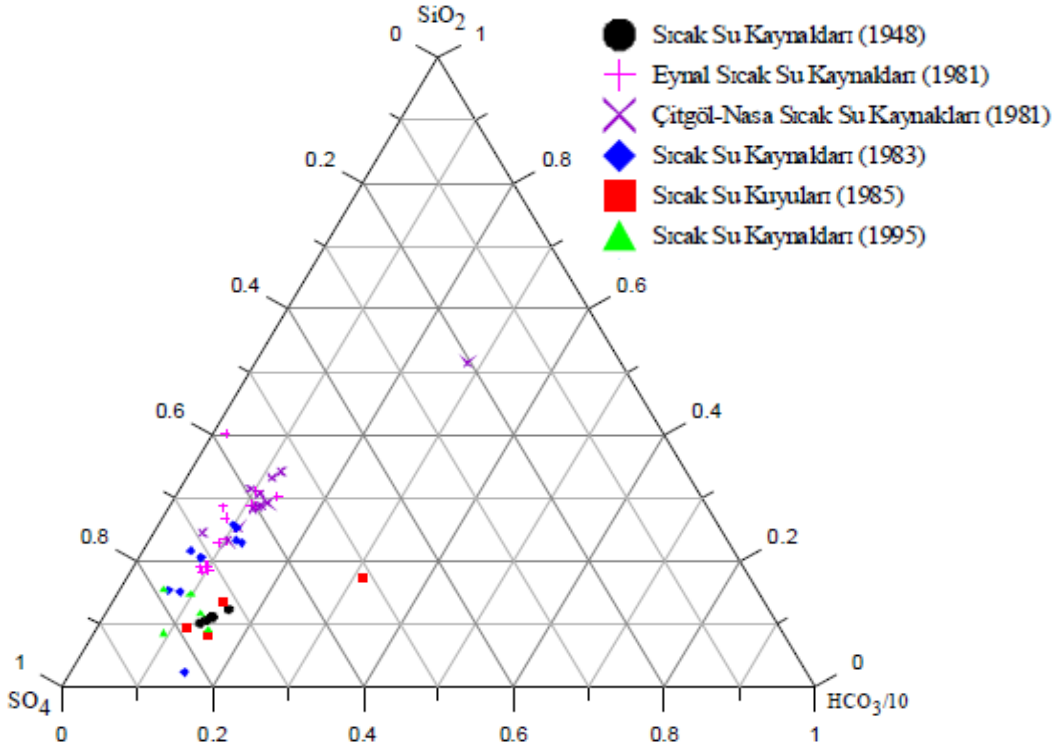
| Yaş | Litoloji | Mineraloji | Su Kimyası |
|---|---|---|---|
| Kuvaterner | Bazalt | Olivin, kuvars | Mg, Fe, $SiO_2$ |
| | Konglomera | Kuvars, feldispat, klorit | F, K, Fe, Mg |
| Neojen | Tüf | Kuvars, feldispat, kil | Na, K, $SiO_2$, Al, B |
| Paleojen | Alkali granit | Ortoklas, mikroklin, albit, oligoklas, biyotit, kuvars, feldispat | $SiO_2$ |
| | Çört | Kuvars, kalsedon | Ca, Mg, $HCO_3$ |
| Mesozoyik | Kireçtaşı | Dolomit, kalsit | Ca, Mg, $HCO_3$ |
| Paleozoyik | Mermer | Kalsit | Ca, $HCO_3$ |
| | Şist | Kalsit, kuvars, feldispat, muskovit, serisit | Ca, $SiO_2$, $HCO_3$, K, Al, F, Fe |
| | Gnays | Kuvars, ortoklas, albit, biyotit, epidot, sfen, diyopsit, mikroklin, muskovit | $SiO_2$, Na, K, Ca, Mg, Al, Li, Fe, Ti |



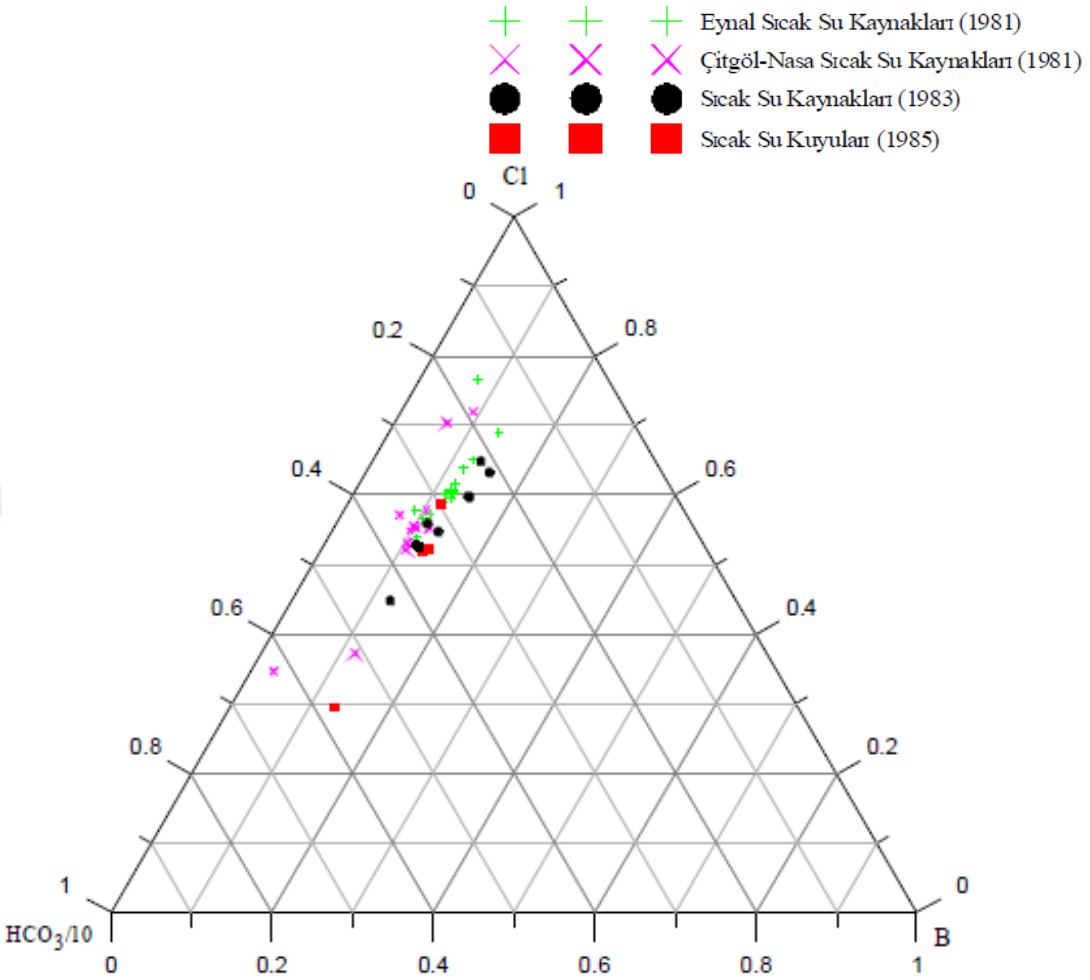

Şekil 4.7. Simav Termal Sularının Cl-$SO_4$-$HCO_3$ Üçgen Diyagramı




Şekil 4.8. Simav Termal Sularının Na+K-Mg-Ca Üçgen Diyagramı




Şekil 4.9. Simav Termal Sularının $SiO_2$-$SO_4$-$HCO_3$ Üçgen Diyagramı




Şekil 4.10. Simav Termal Sularının Cl-$HCO_3$-B Üçgen Diyagramı

## 4.2. Metod

2006 yılında sahada gerçekleştirilen kapsamlı test çalışma sonuçları değerlendirilerek sahanın tank modellemesi için gerekli parametelerin tespiti yapılmış olup tarihsel çakıştırma ile model ve gerçek basınç verileri uyumu sağlanmıştır.

### 4.2.1. Model Parametre Başlangıç Değerleri Tespiti

Saha modellemede asıl olan, sahanın karakteristik özelliklerini yansıtan parametrelerin doğru tespitidir. Sahada yapılan jeolojik, jeofizik, sondaj ve kuyu

testlerinin birlikte değerlendirilmesi ile doğru parametre değerleri saptanabilir. Doğru saptanamayan parametreler, modelleme çalışmasında tekrar tekrar başa dönülmesine sebep olmaktadır. Bu nedenle, modelleme çalışmasına başlamadan önce saha verileri özenle tetkik edilmelidir.

İzotermal olmayan modelleme çalışmasında ısı korunum ve kütle korunum denklemleri birlikte çözümlendiğinden, her iki denklemde yer alan parametrelerin değerleri saptanmalıdır. Özellikle sahada gerçekleştirilen sondaj çalışmaları ve sondaj çalışmaları neticesinde açılan kuyularda yapılan test çalışmalarından daha doğru parametre değerleri tahmin edilebilmektedir.

İzotermal olmayan model denklemleri ve porozitenin basınç-sıcaklıkla değişim denklemi incelenir ise model denklem parametrelerini 3 grupta toplayabiliriz. Bunlar, (i) rezervuar kayaç özellikleri, (ii) akışkan karakteristik özellikleri ve (iii) saha üretim/beslenme ve enjeksiyon bilgilerini içermektedir (Çizelge 4.4).

1- *Kütle korunum,*

$$V_r \frac{d(\rho_w \phi_r)}{dt} - \alpha_s[p_i - p(t)] + \left[W_p(t) - W_{inj}(t)\right] = 0$$

2- *Isı taşınım denklemi,*

$$\frac{d}{dt}[(1-\phi_r)V_r\rho_m C_m T + V_r\phi_r\rho_w U_w] - W_{inj}(t)h_{w,inj}(t) - \alpha_s[p_i - p(t)]h_{w,s}(t) + W_p(t)h_{w,p}(t) = 0$$

3- *Porozitenin basınç ve sıcaklıkla değişimi,*

$$\phi(p,T) = \phi_i[1 + c_r(p(t) - p_0) - \beta_r(T(t) - T_0]$$

Akışkan özellikleri olan akışkan suyun yoğunluğu (ρw), özgül içsel enerjisi (Uw), üretilen suyun özgül entalpisi (hw,p), enjeksiyon edilen suyun özgül entalpisi (hw,inj) ve beslenme ile giren suyun özgül entalpisi (hw,s) değerleri, buhar tablosundan akışkan özelliklerine göre bulunmaktadır (Çizelge 4.5).

Çizelge 4.4. Modellemede Kullanılan Parametreler ve Birimleri

| ***Model Parametreler*** | |
|---|---|
| $V_r$: Rezervuar kaba hacmi | ($m^3$) |
| $\rho_m$:Kayaç katı kısmı yoğunluğu | $kg/m^3$ |
| Cm: Kayaç katı kısmı özgül ısı kapasitesi | J/(kg $^oC$) |
| T(i): Akışkan sıcaklığı | $^oC$ |
| P(i): ilk basınç | bar |
| $\phi$: gözeneklilik değeri | % |
| $\rho_w$: akışkan suyun yoğunluğu | $kg/m^3$ |
| $U_w$: Akışkanın özgül içsel enerjisi | kJ/kg |
| $h_{w,s}$: Beslenme ile giren suyun özgül entalpisi | kJ/kg |
| $h_{w,inj}$: Enjeksiyon edilen suyun özgül entalpisi | kJ/kg |
| hw,p: Üretilen suyun özgül entalpisi | kJ/kg |
| $C_r$: Sabit sıcaklık altında, gözeneklilik (veya etken kayaç) sıkıştırılabilirliği (Cr=Ct-Cw) | 1/bar |
| $\beta_r$ : sabit basınç altında, gözeneklilik, termal genleşme/büzüşme katsayısı | $1/^oC$ |
| αs: Beslenme indeksi | $m^3/s$ |

Çizelge 4.5. Akışkan Özellikleri (Steam Table)

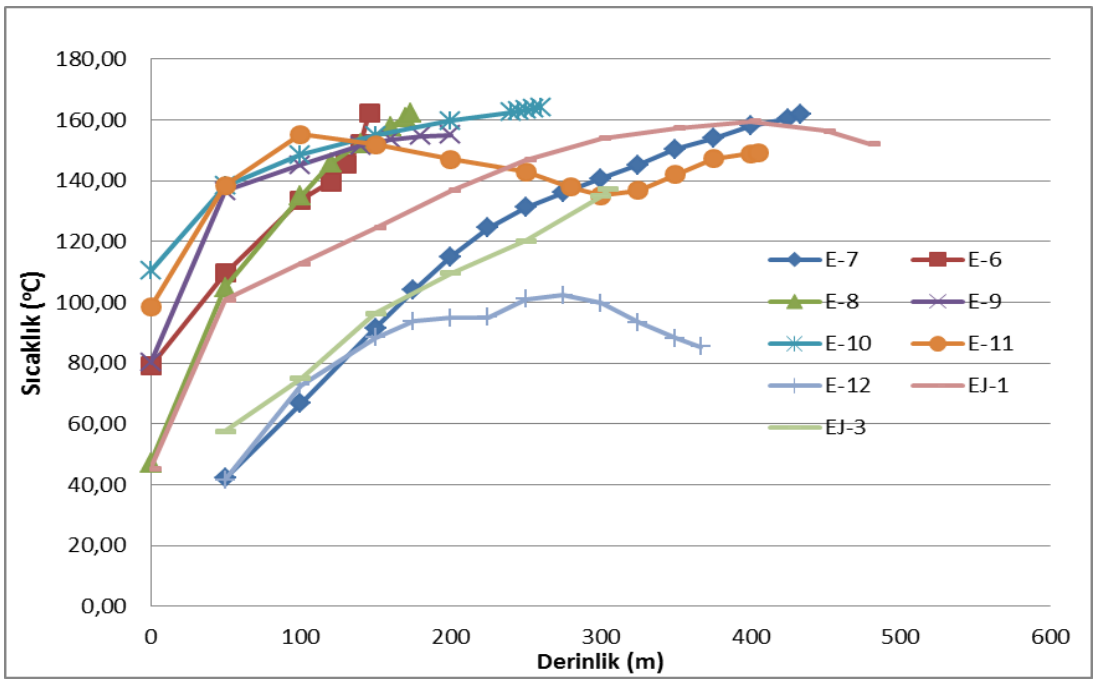
| ***Parametre*** | **Model Değeri** |
|---|---|
| $\rho_w$ : akışkan suyun yoğunluğu, $kg/m^3$ | **905,31** |
| $U_w$: Akışkanın özgül içsel enerjisi, KJ/kg | **687,18** |
| $h_{w,s}$: Besleme ile giren suyun özgül entalpisi, KJ/kg | **632,27** |
| $h_{w,inj}$: Enjeksiyon edilen suyun özgül entalpisi, KJ/kg | **251,56** |
| $h_{w,p}$: Üretilen suyun özgül entalpisi, KJ/kg | **689,39** |
| Akışkan sıcaklığı: 163°C, Ortalama rezervuar basıncı: 20 bar, Besleme suyu sıcaklığı: 150°C, Enjekte edilen suyun sıcaklığı: 60°C alınmıştır. | |

Kayaç katı kısım yoğunluğu ($\rho_m$) ve özgül ısı kapasitesi ($C_m$) ise sahada yapılan jeolojik, jeofizik veya sondaj çalışmaları ile rezervuar zonu olarak belirlenen birimlerin ortalama değerlerini kapsamakta olup, eğer bu zonda alınmış bir karot örneği var ise, karot örneğinden veya kuyularda alınan jeofizik loglar incelenerek ortalama değerleri saptanır. Kütahya-Simav sahası rezervuar birimi Simav metamorfitleri olup, gri kahve renkli kuvarsit, kuvars-muskovit şist, mikaşist, muskovit-klorit şist, kalkşist ve biyotitli şistlerden oluşmaktadır. Kuyulardan alınan jeofizik loglar incelendiğinde Kütahya Simav sahası rezervuar kayaç katı kısım yoğunluğunun 2.400-2.800 $kg/m^3$ ve özgül ısı kapasitesinin 700-1000 (J/kg $^oC$) aralığında olabileceği tespit edilmiş ve modellemede başlangıç değeri olarak

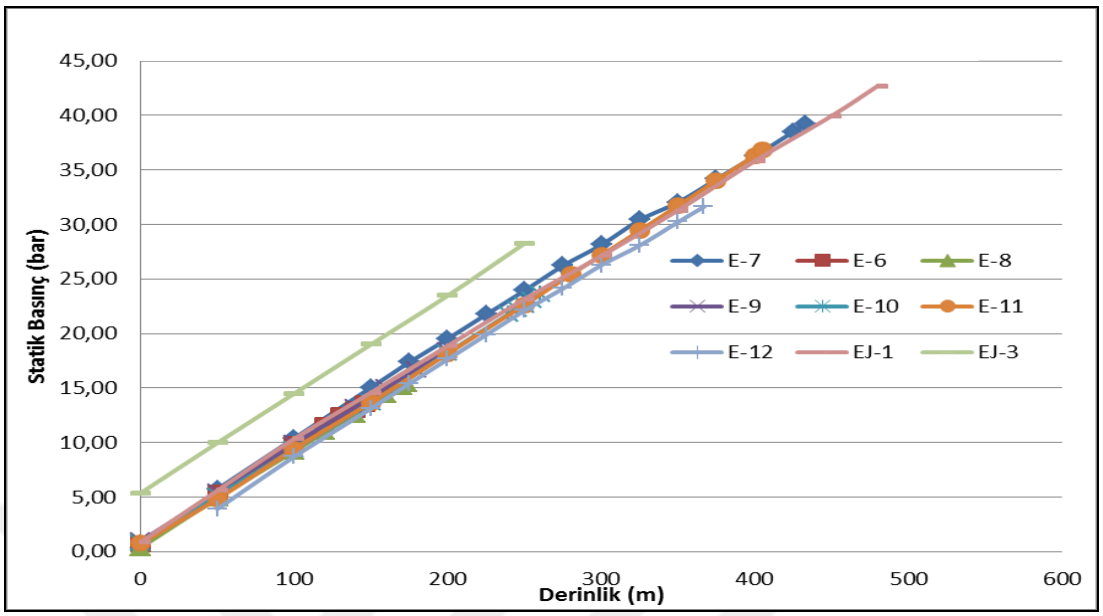
yoğunluk 2.500 kg/m$^3$, özgül içsel enerji değeri ise 800 (J/kg $^oC$) olarak kabul edilmiştir.

Akışkan sıcaklığı, basınç, rezervuar kaba hacmi, beslenme indeksi, enjeksiyon indeksi, toplam sıkıştırılabilirlik ve porozite değerleri sahada 2006 yılında MTA Genel Müdürlüğü tarafından gerçekleştirilen ve saha karakteristik özelliklerinin belirlenmesine yönelik yapılan kuyu test çalışmalarının irdelenmesi ile hesaplanmıştır.

Sahada açılan sondaj kuyularında, statik durum tespiti amacıyla öncelikle statik haldeki kuyularda sıcaklık ve basınç ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Statik ölçümler, kuyuların üretime kapalı durumlarında alınan ölçümler olup sahanın durağan haldeki performans bilgilerinin edinilmesi açısından önemlidir. Kuyuların statik sıcaklık özellikleri incelendiğinde rezervuar sıcaklığının maksimum 160°C'de olduğu, ortalama rezervuar sıcaklığının ise 150°C civarında olduğu görülmektedir (Şekil 4.11). Kuyuların statik basınç profilleri incelendiğinde ise en yüksek kuyu dibi basıncına sahip kuyunun 42,72 bar ile EJ-1 kuyusu olduğu, ortalama kuyu dibi basıncının 25-30 bar arasında değiştiği gözlemlenmiştir. Sahadaki sondaj kuyularında yapılan statik sıcaklık ve basınç profilleri Şekil 4.11 ve 4.12'de verilmiştir.

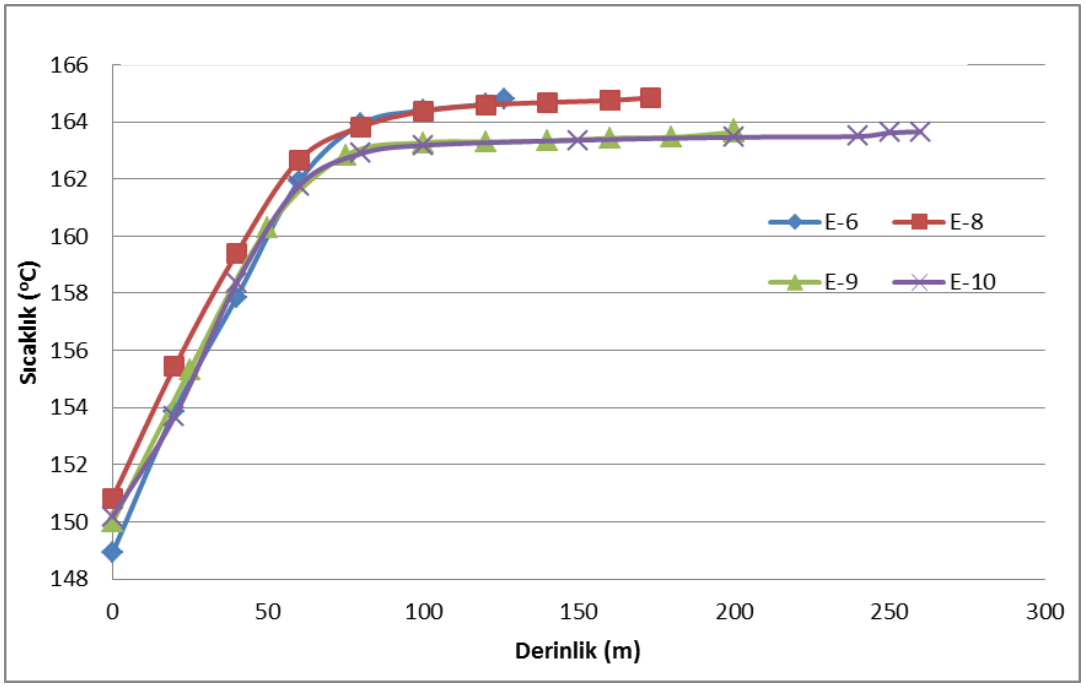



Şekil 4.11. Simav Jeotermal Sahası Sondaj Kuyuları Statik Sıcaklık Profilleri




Şekil 4.12. Simav Jeotermal Sahası Sondaj Kuyuları Statik Basınç Profilleri

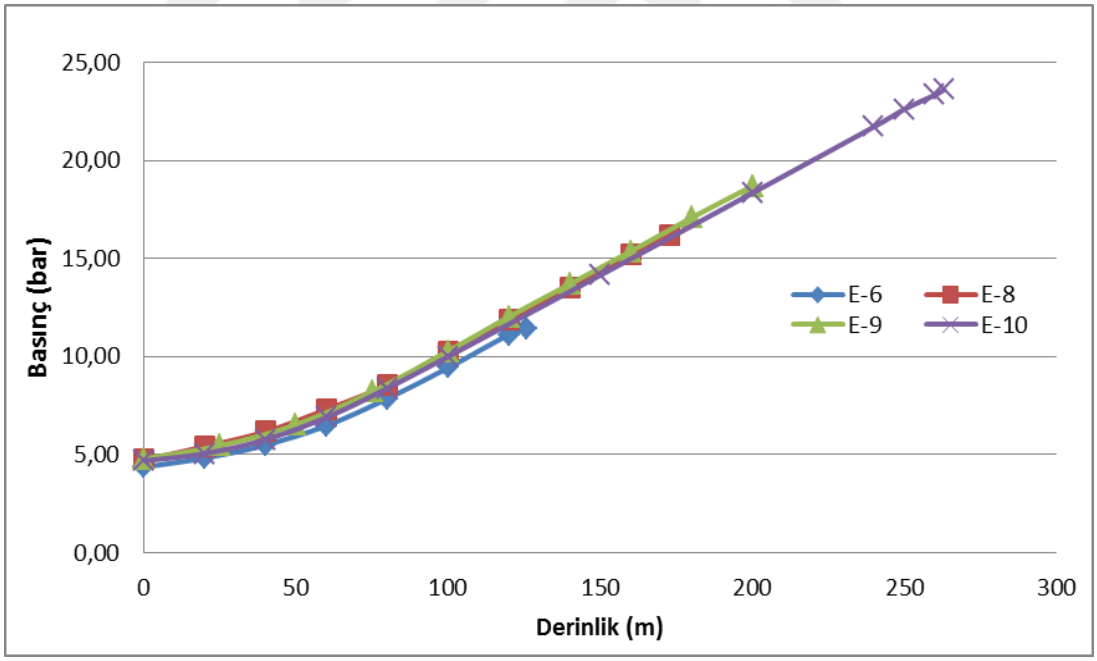
Sahada dinamik basınç ve sıcaklık testleri ise, sahanın dinamik koşullarının saptanması amacıyla yapılan testlerdir. Kuyularda üretim ile birlikte yapılan testlerdir. En yüksek sıcaklığa sahip kuyunun 164,78°C ile E-6 kuyusu olduğu ve ortalama kuyu dibi sıcaklığının 163°C civarında olduğu Şekil 4.13'de görülmektedir.




Şekil 4.13. Simav Jeotermal Sahası Sondaj Kuyuları Dinamik Sıcaklık Profilleri

Dinamik basınç verileri incelendiğinde, sahada üretim yapılabilen kuyular arasında en yüksek kuyu dibi basınca sahip kuyunun 263 metre derinlikte, 23,61 bar ile E-10 kuyusu olduğu görülmektedir.

Yapılan statik ve dinamik sıcaklık-basınç testleri ile sahanın sıcaklık ile basınç profili hakkında genel bilgi edinilir. Bu testler ile sahada daha önce yapılan test çalışmaları birlikte değerlendirilerek, sahada soğumanın olup olmadığı, su seviyesi değişiminin ne ölçüde olduğu ve yeterli beslenmenin olup olmadığı gibi bir çok soruya genel olarak cevap bulunur. Üretim ve basınç değişimleri birlikte değerlendirilerek yeterli beslenmenin varlığı incelenir ve eğer yeterli beslenmeye sahip değil ise, sahayı yenilenebilir halde tutmak için enjeksiyon planlamaları yapılır. Bu nedenlerle, sahada sıcaklık ve basınç testlerinin belirli bir periyodda yapılması, sahanın işletilmesinde doğru yönlendirme yapılması açısından oldukça önemlidir.




Şekil 4.14. Simav Jeotermal Sahası Sondaj Kuyuları Dinamik Basınç Profilleri

Sahanın genel karakteristik özellikleri olan permeabilite, gözeneklilik, beslenme indeksi, sahanın kaba hacim değerlerinin tespiti ve kuyuların etkileşim durumlarının tespiti amacıyla, sahada interference testleri gerçekleştirilmiştir. İnterference testi E-6 ve E-10 kuyularının üretim kuyusu, E-8 kuyusunun ise gözlem

kuyusu olarak seçildiği testtir. Planlama ile öncelikle E-6 kuyusu, 17.07.2006 tarihinde 135,9 t/h olarak üretime açılmış ve daha sonra sırasıyla 118,9, 110,7, 45 t/h üretim debilerinde kademeli olarak azaltılarak üretim tamamlanmıştır. E-6 üretime açıldıktan bir gün sonra ise E-10 kuyusu 149,1 t/h debide üretime açılmış ve bu kuyuda E-6 gibi üretim debisi kademeli olarak azaltılarak kapatılmıştır. E-6 ve E-10 kuyuları 15 günlük üretim ve kuyu başı basınç değişimi Çizelge 4.6-4.7 ve Şekil 4.15'de verilmiştir. E-6 ve E-10 kuyularından üretim yapılır iken gözlem kuyusu olan E-8 kuyusunda ise aynı anda basınç değişim kayıtları yapılmıştır. Böylelikle yapılan üretim çalışmasıyla, sahada ne kadarlık bir basınç kaybı yaşandığı ve sahanın beslenmeye açık olup olmadığı bilgilerine ulaşmak mümkün olmaktadır. Bu test çalışması neticesinde sahanın kaba hacmi, beslenme indeksi gibi model çalışmalarındaki en önemli parametrelerin yaklaşık tahminleri de gerçekleştirilmektedir. Ayrıca zar faktöründen bağımsız olarak gözeneklilik sıkıştırılabilirlik çarpımı ve permeabilite değerleri de hesaplanabilmektedir.

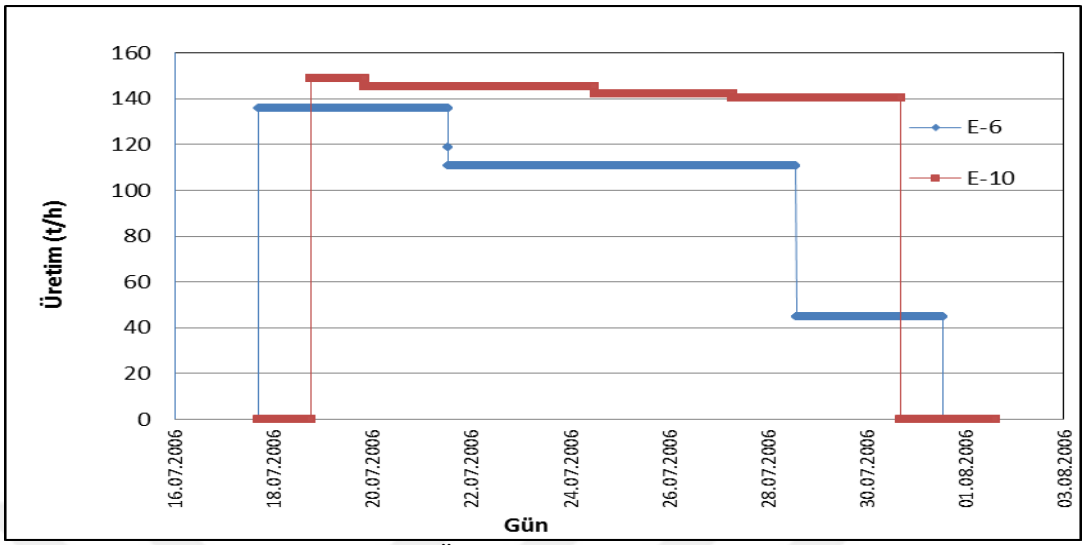
Çizelge 4.6. E-6 Kuyusu Üretim

| Tarih/saat | WHP (Bar) | Q (t/h) |
|---|---|---|
| 7.17.06 16:42 | 3,7 | 135,9 |
| 7.21.06 11:52 | 3,6 | 118,9 |
| 7.21.06 12:07 | 3,75 | 110,7 |
| 7.28.06 13:55 | 3,8 | 45,0 |
| 7.31.06 13:12 | | 0,0 |

Çizelge 4.7. E-10 Kuyusu Üretim

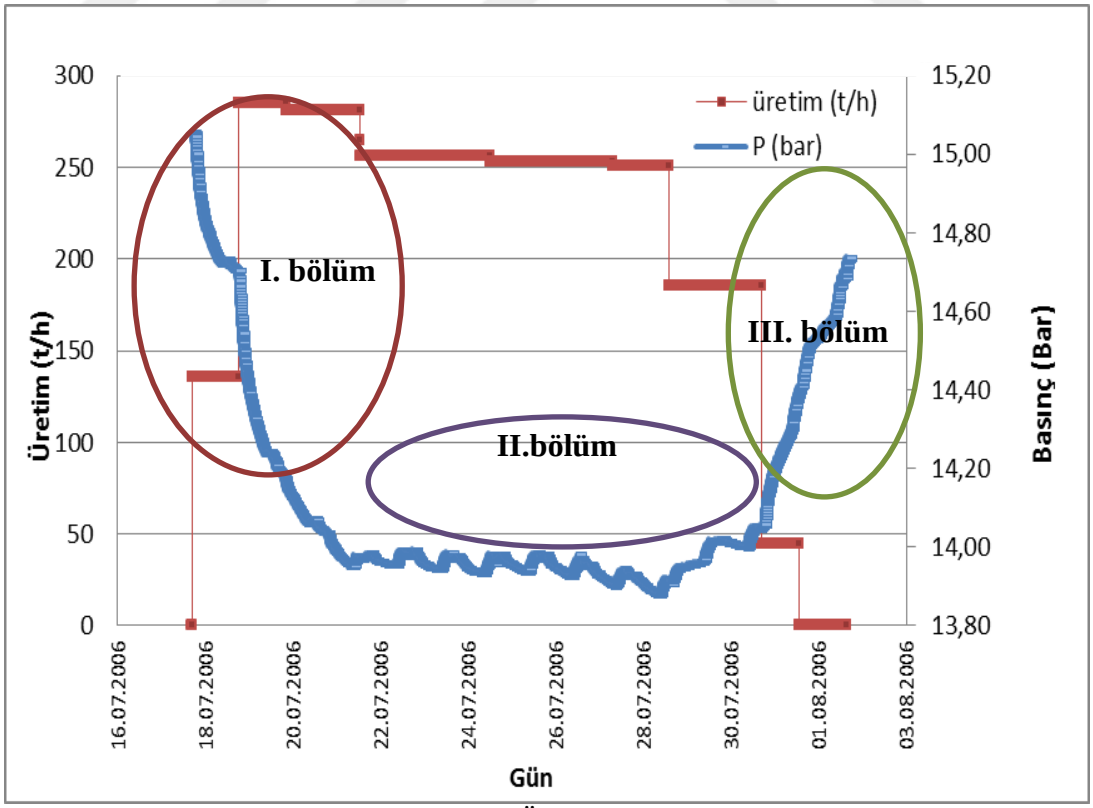
| Tarih/saat | WHP (Psi) | Q (t/h) |
|---|---|---|
| 7.18.06 18:00 | 53 | 149,1 |
| 7.20.06 8:00 | 53 | 145,5 |
| 7.24.06 18:00 | 53 | 142,0 |
| 7.30.06 16:48 | 52 | 140,2 |
| 7.30.06 16:48 | | 0,0 |

E-8 kuyu dibi sıcaklığı 162,20°C, kuyu dibi statik basıncı 223,52 psi (15,41 bar) ve kuyu rezervuar kalınlığı yaklaşık 50 metre'dir. E-8 kuyusu ile E-6 kuyusu arası mesafe yaklaşık 50 metre, E-8 ile E-10 kuyusu arası mesafe ise yaklaşık 450 metre'dir.




Şekil 4.15. E-6 ve E-10 Kuyuları Üretim Programı

E-6 ve E-10 kuyularından üretim yapılırken aynı anda gözlem kuyusu E-8'de kayıt edilen basınç değişimi ise Şekil 4.16'da gösterilmiştir. Seçilen kuyular type curve matching yöntemi ile değerlendirildiğinde Şekil 4.17 elde edilmektedir.

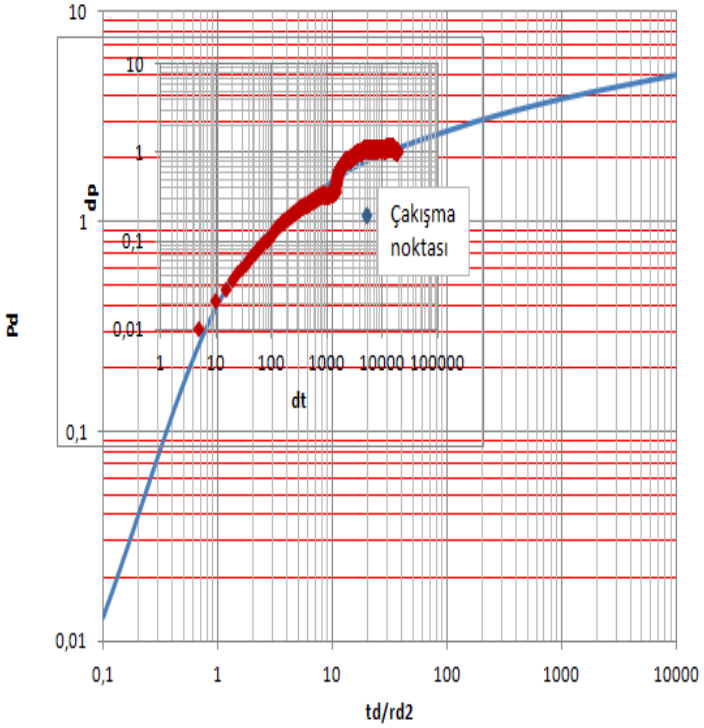



Şekil 4.16. E-6 ve E-10 Kuyuları Üretim Programı ve E-8 Kuyusu Basınç Değişimleri

Grafik incelendiğinde kuyularda üretimin başlamasıyla birlikte, doğal olarak basınç kaybının başladığı ancak belirli bir süre sonra, üretim devam etmesine rağmen basınç değişiminin minimuma indiği ve üretimin durdurulması ile birlikte basınç artışının yaşandığı tespitlerini yapabiliriz. Burada grafiği 3 bölüme ayırarak incelersek;

I. bölüm E-6 ve E-10 kuyularının üretime açılmasıyla basınç kaybının yaşandığı bölüm,
II. bölüm üretim devam etmesine rağmen basınç değişiminin azaldığı bölüm,
III. bölüm ise üretimde olan her iki kuyunun üretime kapatılmasıyla basınç artışının yaşandığı bölüm olduğu anlaşılmaktadır.

Öncelikle II. ve III. bölüm tetkik edilirse, bu sahanın beslenmeye açık bir saha olduğu söylenebilir. Buradan hareketle modelleme çalışması gerçekleştirilirken model, açık model olarak tasarlanacaktır. Sahanın beslenme indeksi hesapları, özellikle kuyuların üretime kapatıldığı III. bölüm dikkate alınarak yapılmıştır. I. bölüm ise, yeterli basınç kaybı yaşanıp akiferden rezervuar zona akışkan akışının dengeye gelmediği bölümdür. Rezervuar kaba hacim hesabı gerçekleştirilirken I. bölüm dikkate alınmıştır.




Şekil 4.17. dt-dp ile Pd-td/r$^2$d log-log Çakışması

E-8 gözlem kuyusunda kayıt edilen basınç değişimi log-log zaman/basınç grafiği Pd-td/$r^2$d log-log grafiği ile çakıştırılır ise çakışma neticesinde elde edilen "match point" değerleri Çizelge 4.8'de verilmiştir.

Çizelge 4.8. Çakışma Noktası Değerleri

| Çakışma Noktası Değerleri | Diğer Değerler |
|---|---|
| $P_D$ = 1<br>$t_D/r_D^2$ =20<br>Δp = 0,2 bar<br>Δt= 6000/60 = 100 h | q: 1192,3 STB/D<br>r: 500 metre<br>$B_w$: 1,102<br>$\mu_w$: 0,867 |

Bu değerlerle (k) permeabilite ve ($\phi C_t$) gözeneklilik-sıkıştırılabilirlik değerleri aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$k = \frac{141{,}2 * 1192{,}3 * 1{,}102 * 0{,}867}{1640} * \frac{1}{2{,}90} = 338{,}20\ md$$

$$\phi C_t = \frac{0{,}000264 * 338{,}20 * 100}{1640^2 * 0{,}867 * 20} = 1{,}91\text{x}10^{-7} psi^{-1}$$

Toplam sıkıştırılabilirlik; kayaç ve akışkan sıkıştırılabilirliği toplamıdır. Yani $C_t$=$C_r$+$C_w$ 'dir. Akışkan sıkıştırılabilirliği $C_w$, 163 $^oC$ sıcaklık ve E-8 kuyusu kuyu dibi basıncı 15,051 bar değerlerinde hesaplanır ise;

$C_w = (3{,}82 + 0{,}0106 * 325{,}4 + 0{,}00003907 * 325{,}4^2)\text{x}10^{-6}$=0,0000114 *1/bar* bulunur. Modellemede porozite ve kayaç sıkıştırılabilirlik değerleri birbirine bağımlı değişkenler olarak hesaplara dahil edilmiştir. Bu durumda porozite değeri;

$$\phi = \frac{1{,}91\text{x}10^{-7}}{Cr + 1{,}14\text{x}10^{-5}}$$

Rezervuar kaba hacmi (Lee 1982);

$$Vr = \frac{\sum N_p(t) * B}{(P_1 - P_2) * \phi C_t} \qquad (4.3)$$

*Np* üretim miktarını ($m^3$), $P_1$ Üretime başlamadan önceki kuyu dibi basıncı ve $P_2$ belirli bir üretim sonrası kuyu dibi basıncını (psi) ifade etmektedir. Buna göre I.bölge değerlendirmesi ile rezervuar kaba hacmi yaklaşık;

$Vr = \frac{33.316,78*1,102}{(218,30-202,64)*1,91*10^{-7}} = 1,22 * 10^{10} m^3$ bulunur.

Ancak, üretim ile birlikte saha beslenmeye açık olması nedeniyle, beslenmeden dolayı basınç değişim miktarı hesaba dahil edilemeyeceğinden, bulunan bu değer maksimum rezervuar kaba hacmi olarak değerlendirilerek, modelleme çalışmasında rezervuar kaba hacmine $1,0 * 10^9 - 1,22 * 10^{10}$ aralığında değerler atanmıştır. Beslenme indeksi ise yaklaşık olarak, yine Şekil 4.16'da belirtilen III. bölge değerlendirilerek;

$$\alpha_s = \frac{Vr * (P_2 - P_1) * \phi * C_t}{B * (t)} \tag{4.4}$$

$\alpha_s = \frac{1,38 * 10^{10} * (213,78 - 208,99) * 1,91 * 10^{-7}}{1,102 * (24 * 60 * 60) * 2,08} = 0,063 m^3/s$ bulunur.

Yapılan kuyu testleri, kuyu sıcaklık ve basınç bilgileri, literatür taraması ve buhar tablosundan elde edilen bilgiler doğrultusunda modellemede kullanılacak parametre başlangıç değerleri Çizelge 4.9'da verilmiştir.

### 4.2.2. Model Denklem Çözümü

Model parametre başlangıç değerleri tespit edildikten sonra, model denklemlerin çözümü gerçeleştirilmiştir. Model denklem çözümleri için öncelikle akışkan yoğunluğu, akışkanın özgül içsel enerjisi ve üretilen suyun entalpi değerinin basınç ve sıcaklıkla değişim denklemlerinin çıkarılması gerekmektedir.

Bölüm 2.1.5'de verilen 2.56 ve 2.57 denklemlerinin çözümlenmesi ile akışkan yoğunluğunun basınç ve sıcaklıkla değişimleri bulunur. Benzer şekilde

akışkan özgül içsel enerjisi ve üretilen suyun entalpi değerlerinin de sıcaklık ve basınçla değişim denklemleri çıkartılır.

Çizelge 4.9. Model Parametre Başlangıç Değerleri

| ***Model Parametre Başlangıç Değerleri*** | ***Birimi*** | ***Değeri*** |
|---|---|---|
| $V_r$: Rezervuar kaba hacmi | ($m^3$) | $1{,}0 * 10^9 - 1{,}22 * 10^{10}$ |
| $\rho_m$:Kayaç katı kısmı yoğunluğu | $kg/m^3$ | 2.500 |
| $C_m$: Kayaç katı kısmı özgül ısı kapasitesi | J/(kg $^oC$) | 800 |
| T(i): Akışkan sıcaklığı | $^oC$ | 162,20 |
| P(i): ilk basınç | bar | 15,051 |
| $\phi$: gözeneklilik değeri | % | $\frac{1{,}91x10^{-7}}{Cr + 1{,}14x10^{-5}}$ |
| $\rho_w$ : akışkan suyun yoğunluğu | $kg/m^3$ | 905,31 |
| $U_w$: Akışkanın özgül içsel enerjisi | kJ/kg | 687,19 |
| $h_{w,s}$: Beslenme ile giren suyun özgül entalpisi | kJ/kg | 632,27 |
| $h_{w,inj}$: Enjeksiyon edilen suyun özgül entalpisi | kJ/kg | 251,56 |
| $h_{w,p}$: Üretilen suyun özgül entalpisi | kJ/kg | 689,39 |
| $C_r$: Sabit sıcaklık altında kayaç sıkıştırılabilirliği | 1/bar | $\phi$ bağlı |
| $\beta_r$:Sabit basınç altında, gözeneklilik, termal genleşme/büzüşme katsayısı | $1/^oC$ | 0 |
| $\alpha_s$: Beslenme indeksi | $m^3/s$ | 0,063 |

*Akışkan yoğunluğu;*

$$\rho_w^{n+1} = \rho_w + 0{,}053 * (Pn - Pi) - 0{,}88 * (Tn - Ti) \quad (4.5)$$

*Özgül içsel enerji;*

$$Uw^{n+1} = Uw - 0{,}042 * (Pn - Pi) + 4{,}260 * (Tn - Ti) \quad (4.6)$$

*Akışkan entalpi değişimi;*

$$hw^{n+1} = hw + 0{,}065 * (Pn - Pi) + 4{,}265 * (Tn - Ti) \quad (4.7)$$

İzotermal olmayan tek tank model ana denklemleri nümerik çözümlemeleri, Matlap R2013a (demo) programı yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Model denklem çözümlemesinde kullanılacak olan kütle korunum ile ısı taşınım denklemleri ve bu denklemlerin basınç-sıcaklığa göre türev eşitlikleri çıkarılmıştır. Bunlar:

$$R1(p,T) = 0{,}053 * Pn * \phi i - 0{,}053 * Pi * \phi i + 0{,}88 * \phi i * Ti - 0{,}88 * \phi i * Tn + 0{,}88 * \beta r * Ti^2 + 0{,}88 * \beta r * Tn^2 - 0{,}053 * \beta r * Pi * Ti + 0{,}053 * \beta r * Pi * Tn + 0{,}053 * \beta r * Pn * Ti - 0{,}053 * \beta r * Pn * Tn + \beta r * Pw * Ti - \beta r * Pw * Tn - 1{,}76 * \beta r * Ti * Tn + 0{,}053 * Cr * Pi^2 * \phi i + 0{,}053 * Cr * Pn^2 * \phi i - (Winj * dt)/Vr + (Wp * dt)/Vr + (Pi * as * dt)/Vr - (Pn * as * dt)/Vr - 0{,}106 * Cr * Pi * Pn * \phi i - Cr * Pi * Pw * \phi i + Cr * Pn * Pw * \phi i - 0{,}88 * Cr * Pi * \phi i * Ti + 0{,}88 * Cr * Pi * \phi i * Tn + 0{,}88 * Cr * Pn * \phi i * Ti - 0{,}88 * Cr * Pn * \phi i * Tn \quad (4.8)$$

$$\frac{\partial R_1^{n+1}}{\partial p^{n+1}}(p^{n+1}, T^{n+1}) = 0{,}053 * \phi i + 0{,}053 * \beta r * Ti - 0{,}053 * \beta r * Tn - 0{,}106 * Cr * Pi * \phi i + 0{,}106 * Cr * Pn * \phi i + Cr * Pw * \phi i + 0{,}88 * Cr * \phi i * Ti - 0{,}88 * Cr * \phi i * Tn - (as * dt)/Vr \quad (4.9)$$

$$\frac{\partial R_1^{n+1}}{\partial T^{n+1}}(p^{n+1}, T^{n+1}) = 0{,}053 * \beta r * Pi - 0{,}88 * \phi i - 0{,}053 * \beta r * Pn - \beta r * Pw - 1{,}76 * \beta r * Ti + 1{,}76 * Br * Tn + 0{,}88 * Cr * Pi * \phi i - 0{,}88 * Cr * Pn * \phi i \quad (4.10)$$

$$R2(p,T) = 3{,}7488 * \beta r * Tn^3 - 3{,}7488 * \beta r * Ti^3 - 0{,}002226 * Pi^2 * \phi i - 0{,}002226 * Pn^2 * \phi i - 3{,}7488 * \phi i * Ti^2 - 3{,}7488 * \phi i * Tn^2 - Cm * Pm * Ti + Cm * Pm * Tn + 0{,}004452 * Pi * Pn * \phi i + 0{,}042 * Pi * Pw * \phi i - 0{,}042 * Pn * Pw * \phi i + 0{,}26274 * Pi * \phi i * Ti - 0{,}26274 * Pi * \phi i * Tn - 0{,}26274 * Pn * \phi i * Ti + 0{,}26274 * Pn * \phi i * Tn - 4{,}26 * Pw * \phi i * Ti + 4{,}26 * Pw * \phi i * Tn - 0{,}053 * Pi * \phi i * Uw + 0{,}053 * Pn * \phi i * Uw + 7{,}4976 * \phi i * Ti * Tn + 0{,}88 * \phi i * Ti * Uw - 0{,}88 * \phi i * Tn * Uw + 0{,}002226 * Cr * Pi^3 * \phi i - 0{,}002226 * Cr * Pn^3 * \phi i + 0{,}26274 * \beta r * Pi * Ti^2 - 0{,}002226 * \beta r * Pi^2 * Ti + 0{,}26274 * \beta r * Pi * Tn^2 - 0{,}26274 * \beta r * Pn * Ti^2 + 0{,}002226 * \beta r * Pi^2 * Tn - 0{,}002226 * \beta r * Pn^2 * Ti - 0{,}26274 * \beta r * Pn * Tn^2 + 0{,}002226 * \beta r * Pn^2 * Tn - 4{,}26 * \beta r * Pw * Ti^2 - 4{,}26 * \beta r * Pw * Tn^2 - 11{,}2464 * \beta r * Ti * Tn^2 + 11{,}2464 * \beta r * Ti^2 * Tn + 0{,}88 * \beta r * Ti^2 * Uw + 0{,}88 * \beta r * Tn^2 * Uw - (0{,}065 * Pi * Wp * dt)/Vr + (0{,}065 * Pn * Wp * dt)/Vr - (4{,}265 * Ti * Wp * dt)/Vr + (4{,}265 * Tn * Wp * dt)/Vr - (Winj * dt * hwinj)/Vr + (Wp * dt * hw)/Vr + 0{,}004452 * \beta r * Pi * Pn * Ti - 0{,}004452 * \beta r * Pi * Pn * Tn + 0{,}042 * \beta r * Pi * Pw * Ti - 0{,}042 * \beta r * Pi * Pw * Tn - 0{,}042 * \beta r * Pn * Pw * Ti + 0{,}042 * \beta r * Pn * Pw * Tn + Cm * Pm * \phi i * Ti - Cm * Pm * \phi i * Tn - 0{,}52548 * \beta r * Pi * Ti * Tn + 0{,}52548 * \beta r * Pn * Ti * Tn + 8{,}52 * \beta r * Pw * Ti * Tn - 0{,}053 * \beta r * Pi * Ti * Uw + 0{,}053 * \beta r * Pi * Tn * Uw + 0{,}053 * \beta r * Pn * Ti * Uw - 0{,}053 * \beta r * Pn * Tn * Uw + \beta r * Pw * Ti * Uw - \beta r * Pw * Tn * Uw - 1{,}76 * \beta r * Ti * Tn * Uw + 0{,}006678 * Cr * Pi * Pn^2 * \phi i - 0{,}006678 * Cr * Pi^2 * Pn * \phi i - 0{,}042 * Cr * Pi^2 * Pw * \phi i - 0{,}042 * Cr * Pn^2 * Pw * \phi i + 3{,}7488 * Cr * Pi * \phi i * Ti^2 - 0{,}26274 * Cr * Pi^2 * \phi i * Ti + 3{,}7488 * Cr * Pi * \phi i * Tn^2 - 3{,}7488 * Cr * Pn * \phi i * Ti^2 + 0{,}26274 * Cr * Pi^2 * \phi i * Tn - 0{,}26274 * Cr * Pn^2 * \phi i * Ti - 3{,}7488 * Cr * Pn * \phi i * Tn^2 + 0{,}26274 * Cr * Pn^2 * \phi i * Tn + 0{,}053 * Cr * Pi^2 * \phi i * Uw + 0{,}053 * Cr * Pn^2 * \phi i * Uw - (Pi * as * dt * hws)/Vr + (Pn * as * dt * hws)/Vr + 0{,}084 * Cr * Pi * Pn * Pw * \phi i + 0{,}52548 * Cr * Pi * Pn * \phi i * Ti - 0{,}52548 * Cr * Pi * Pn * \phi i * Tn + 4{,}26 * Cr * Pi * Pw * \phi i * Ti - 4{,}26 * Cr * Pi * Pw * \phi i * Tn - 4{,}26 * Cr * Pn * Pw * \phi i * Ti + 4{,}26 * Cr * Pn * Pw * \phi i * Tn - 0{,}106 * Cr * Pi * Pn * \phi i * Uw - Cr * Pi * Pw * \phi i * Uw + Cr * Pn * Pw * \phi i * Uw - 7{,}4976 * Cr * Pi * \phi i * Ti * Tn + 7{,}4976 * Cr * Pn * \phi i * Ti * Tn - 0{,}88 * Cr * Pi * \phi i * Ti * Uw + 0{,}88 * Cr * Pi * \phi i * Tn * Uw + 0{,}88 * Cr * Pn * \phi i * Ti * Uw - 0{,}88 * Cr * Pn * \phi i * Tn * Uw \quad (4.11)$$

$$\frac{\partial R_2^{n+1}}{\partial T^{n+1}}(p^{n+1},T^{n+1}) = 0{,}26274*Pn*\phi i - 0{,}26274*Pi*\phi i + 4{,}26*Pw*\phi i + 7{,}4976*\phi i*Ti - 7{,}4976*\phi i*Tn - 0{,}88*\phi i*Uw + 0{,}002226*Br*Pi\text{^}2 + 0{,}002226*\beta r*Pn\text{^}2 + 11{,}2464*\beta r*Ti\text{^}2 + 11{,}2464*\beta r*Tn\text{^}2 + Cm*Pm - 0{,}004452*\beta r*Pi*Pn - 0{,}042*\beta r*Pi*Pw + 0{,}042*\beta r*Pn*Pw - Cm*Pm*\phi i - 0{,}52548*\beta r*Pi*Ti + 0{,}52548*\beta r*Pi*Tn + 0{,}52548*\beta r*Pn*Ti - 0{,}52548*Br*Pn*Tn + 8{,}52*\beta r*Pw*Ti - 8{,}52*\beta r*Pw*Tn + 0{,}053*\beta r*Pi*Uw - 0{,}053*\beta r*Pn*Uw - \beta r*Pw*Uw - 22{,}4928*\beta r*Ti*Tn - 1{,}76*\beta r*Ti*Uw + 1{,}76*\beta r*Tn*Uw + 0{,}26274*Cr*Pi\text{^}2*\phi i + 0{,}26274*Cr*Pn\text{^}2*\phi i + (4{,}265*Wp*dt)/Vr - 0{,}52548*Cr*Pi*Pn*\phi i - 4{,}26*Cr*Pi*Pw*\phi i + 4{,}26*Cr*Pn*Pw*\phi i - 7{,}4976*Cr*Pi*\phi i*Ti + 7{,}4976*Cr*Pi*\phi i*Tn + 7{,}4976*Cr*Pn*\phi i*Ti - 7{,}4976*Cr*Pn*\phi i*Tn + 0{,}88*Cr*Pi*\phi i*Uw - 0{,}88*Cr*Pn*\phi i*Uw \quad (4.12)$$

$$\frac{\partial R_2^{n+1}}{\partial p^{n+1}}(p^{n+1},T^{n+1}) = 0{,}004452*Pi*\phi i - 0{,}004452*Pn*\phi i - 0{,}042*Pw*\phi i - 0{,}26274*\phi i*Ti + 0{,}26274*\phi i*Tn + 0{,}053*\phi i*Uw - 0{,}26274*\beta r*Ti\text{^}2 - 0{,}26274*\beta r*Tn\text{^}2 + 0{,}004452*\beta r*Pi*Ti - 0{,}004452*\beta r*Pi*Tn - 0{,}004452*\beta r*Pn*Ti + 0{,}004452*\beta r*Pn*Tn - 0{,}042*\beta r*Pw*Ti + 0{,}042*\beta r*Pw*Tn + 0{,}52548*\beta r*Ti*Tn + 0{,}053*\beta r*Ti*Uw - 0{,}053*\beta r*Tn*Uw - 0{,}006678*Cr*Pi\text{^}2*\phi i - 0{,}006678*Cr*Pn\text{^}2*\phi i - 3{,}7488*Cr*\phi i*Ti\text{^}2 - 3{,}7488*Cr*\phi i*Tn\text{^}2 + (0{,}065*Wp*dt)/Vr + (as*dt*hws)/Vr + 0{,}013356*Cr*Pi*Pn*\phi i + 0{,}084*Cr*Pi*Pw*\phi i - 0{,}084*Cr*Pn*Pw*\phi i + 0{,}52548*Cr*Pi*\phi i*Ti - 0{,}52548*Cr*Pi*\phi i*Tn - 0{,}52548*Cr*Pn*\phi i*Ti + 0{,}52548*Cr*Pn*Qi*Tn - 4{,}26*Cr*Pw*\phi i*Ti + 4{,}26*Cr*Pw*\phi i*Tn - 0{,}106*Cr*Pi*\phi i*Uw + 0{,}106*Cr*Pn*\phi i*Uw + Cr*Pw*\phi i*Uw + 7{,}4976*Cr*\phi i*Ti*Tn + 0{,}88*Cr*\phi i*Ti*Uw - 0{,}88*Cr*\phi i*Tn*Uw \quad (4.13)$$

Model denklem çözümleri gerçekleştirilirken tamamen kapalı Newton Raphson yöntemi uygulanır. Çözümlemede basınç değişimi (Δp) ve sıcaklık değişimi (ΔT) çözüm vektörü kümesi aşağıdaki denklemler yardımıyla bulunur.

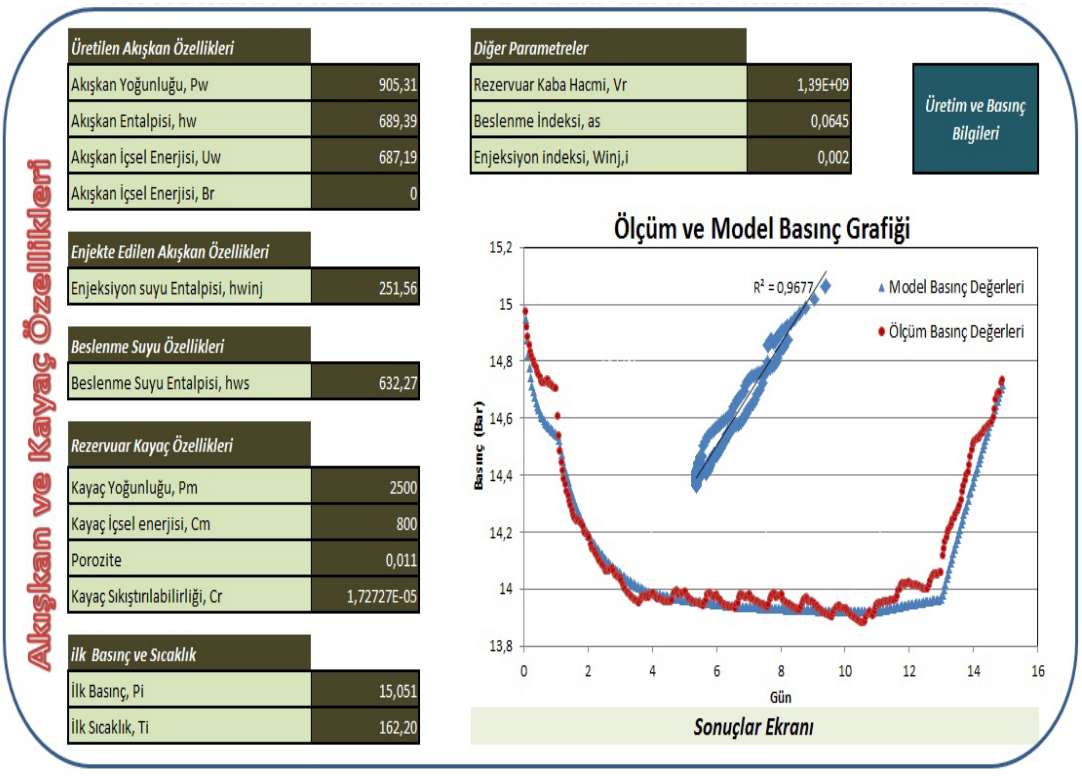
$$\begin{vmatrix} \frac{\partial R_1}{\partial p^{n+1}} & \frac{\partial R_1}{\partial T^{n+1}} \\ \frac{\partial R_2}{\partial p^{n+1}} & \frac{\partial R_2}{\partial T^{n+1}} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \Delta P^{n+1} \\ \Delta T^{n+1} \end{vmatrix} = - \begin{vmatrix} R_1 \\ R_2 \end{vmatrix} \quad (4.14)$$

$P^{n+1}$ve $T^{n+1}$ değerlerinin hesaplanmasında kullanılan basınç ve sıcaklık değişimleri denklemleri ise aşağıdaki gibidir:

$$\Delta P = \frac{-R_2 * \frac{\partial R_1}{\partial T^{n+1}} - R_1 * \frac{\partial R_2}{\partial T^{n+1}}}{\frac{\partial R_1}{\partial T^{n+1}} * \frac{\partial R_2}{\partial p^{n+1}} + \frac{\partial R_1}{\partial p^{n+1}} * \frac{\partial R_2}{\partial T^{n+1}}} \quad (4.15) \qquad \Delta T = \frac{\frac{\partial R_1}{\partial p^{n+1}} * \Delta P - R_1}{\frac{\partial R_1}{\partial T^{n+1}}} \quad (4.16)$$

### 4.2.3. Model Çözümlemesi

Model parametre başlangıç değerleri tespit edildikten ve model denklemler çözüldükten sonra model çözümüne geçilmiştir. Newton-Raphson regresyon kapalı çözümleme sistemi için bir ara yüz ile veri giriş ekranı oluşturulmuştur (Şekil 4.18). Program arayüzünden saha ile ilgili üretim-basınç verileri giriş ekranından bilgiler sisteme işlenebilmektedir (Şekil 4.19). Aynı zamanda akışkan özellikleri (akışkan yoğunluğu, akışkan entalpisi, içsel enerjisi vb.) de otomotik olarak programa işlenebilmektedir.



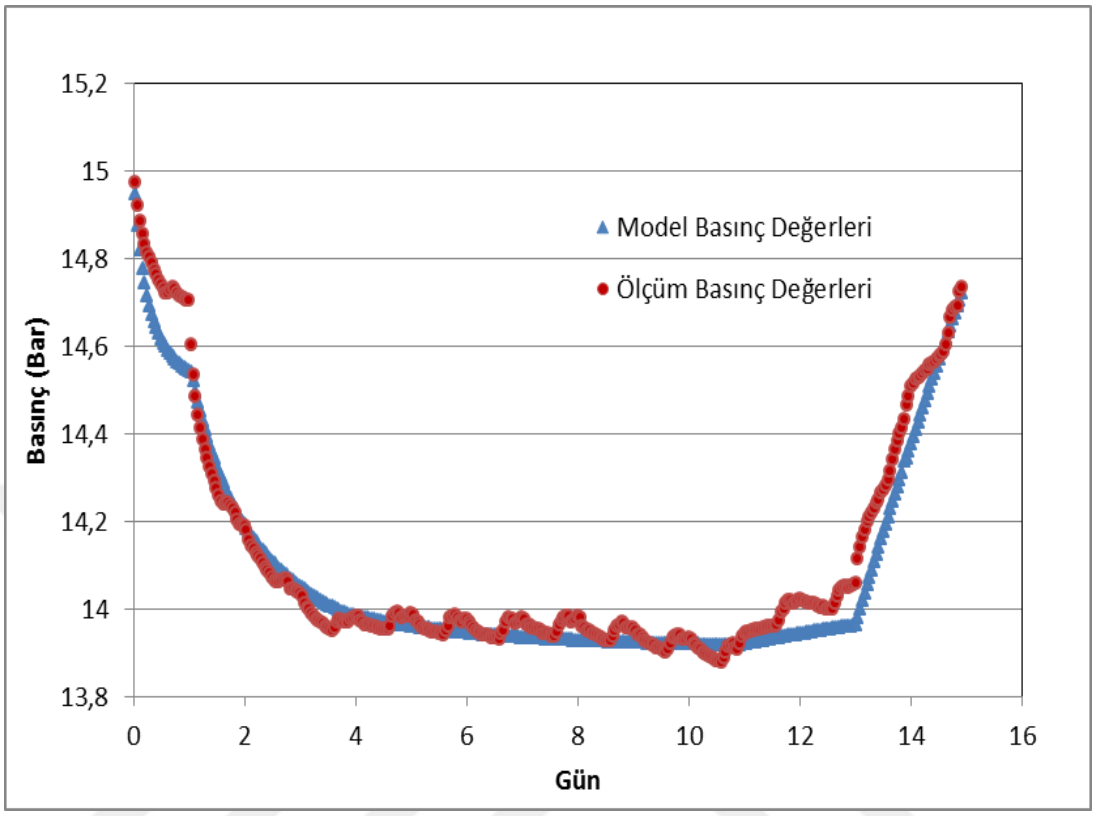

Şekil 4.18. İzotermal Olmayan Tek Tank Model Parametre Giriş Ekranı

| Saha Basınç-Üretim Verileri | | |
|---|---|---|
| Zaman, dt | Ölçüm Basınç, P | Üretim, Wp |
| dk | bar | kg |
| 0 | 15,051 | 0 |
| 5 | 15,046 | 11325 |
| 60 | 14,97 | 135900 |
| 120 | 14,92 | 271800 |
| 180 | 14,89 | 407700 |
| 240 | 14,86 | 543600 |
| 300 | 14,83 | 679500 |
| 360 | 14,81 | 815400 |
| 420 | 14,80 | 951300 |
| 480 | 14,79 | 1087200 |
| 540 | 14,78 | 1223100 |
| 600 | 14,76 | 1359000 |
| 660 | 14,75 | 1494900 |
| 720 | 14,74 | 1630800 |
| 780 | 14,73 | 1766700 |
| 840 | 14,72 | 1902600 |
| 900 | 14,72 | 2038500 |
| 960 | 14,73 | 2174400 |
| 1.020 | 14,73 | 2310300 |
| 1.080 | 14,73 | 2446200 |
| 1.140 | 14,72 | 2582100 |
| 1.200 | 14,72 | 2718000 |
| 1.260 | 14,71 | 2853900 |

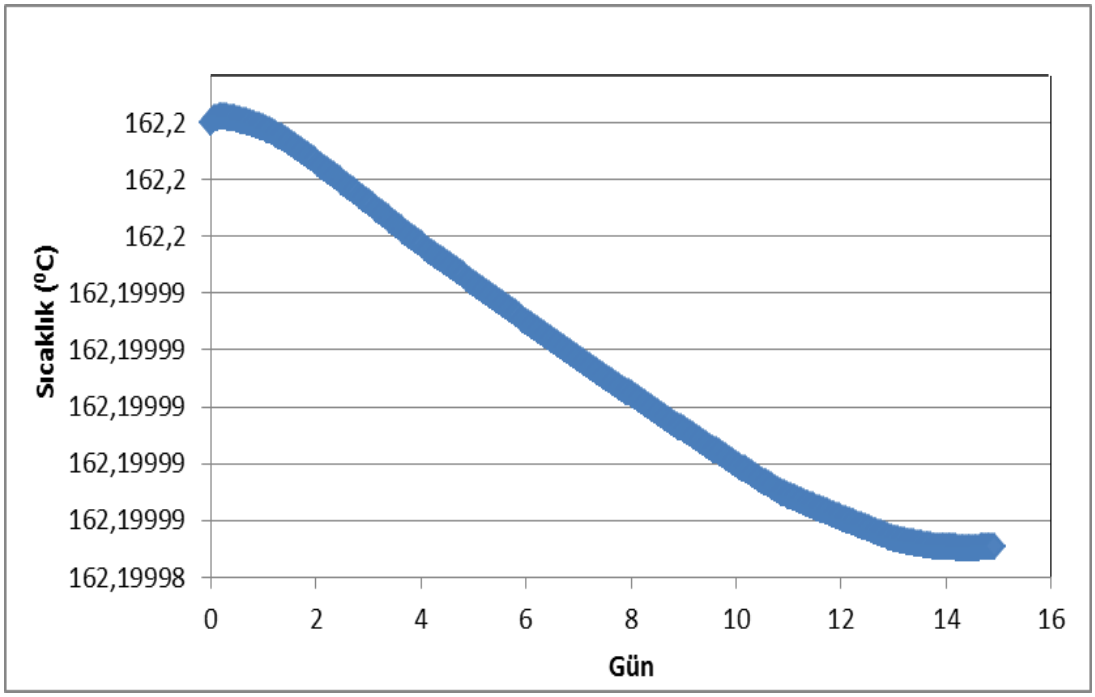
Şekil 4.19. Saha Verileri Giriş Ekranı

Kapalı Newton-Raphson yöntemiyle çözümlemeler gerçekleştirilerek, model ölçüm verileri grafiği ara yüzde anında görülebilmektedir. Model ile ölçüm datalarının birbirine en yakın noktaya geldiğinde ($R^2$ değerinin %95'in üzerinde olduğu durumda) iterasyon durdurulur ve son parametre değerleri sahayı temsil eden parametre değerleri olarak kabul edilir. Parametre değerleri nonlinear optimizasyon yöntemiyle kalibre edilecektir.

Model parametre değerleri değiştirilerek en uygun model oluşturulmuştur. Model dataları ile gerçekleştirilen çalışma neticesinde, ölçüm değerleri ile modelden çıkan basınç değerleri grafiği Şekil 4.20-4.21'de ve model parametre değerleri Çizelge 4.10'da verilmiştir.




Şekil 4.20. Gözlemlenmiş-Model Basınç Değişimi




Şekil 4.21. Modelden Elde Edilen Sıcaklık Değişimi

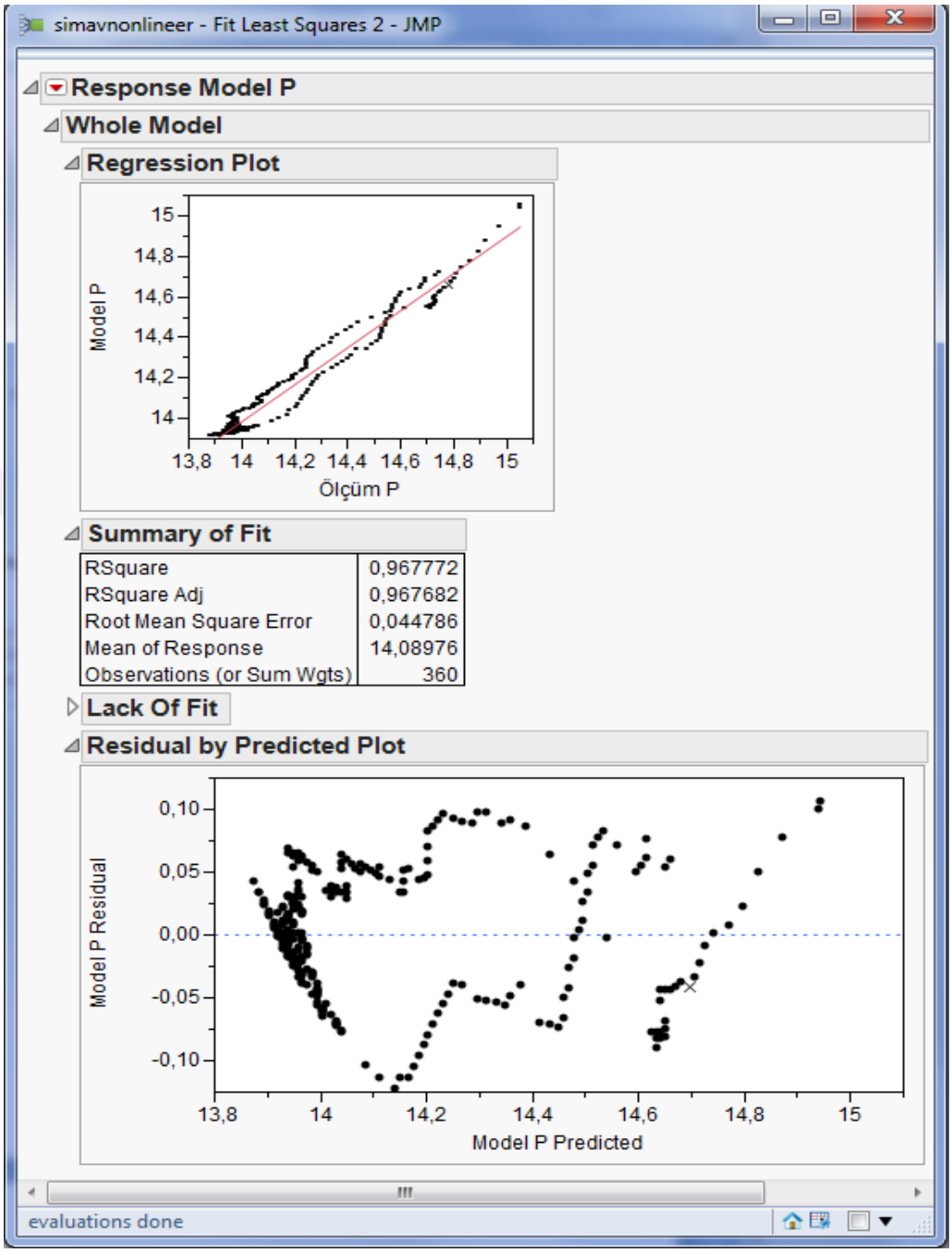
Çizelge 4.10. Model Parametre Değerleri

| ***Model Parametre Değerleri*** | ***Birimi*** | ***Değeri*** |
|---|---|---|
| $V_r$: Rezervuar kaba hacmi | ($m^3$) | $1{,}39 * 10^9$ |
| $\rho_m$:Kayaç katı kısmı yoğunluğu | $kg/m^3$ | 2.500 |
| $C_m$: Kayaç katı kısmı özgül ısı kapasitesi | J/(kg $^oC$) | 800 |
| T(i): Akışkan sıcaklığı | $^oC$ | 162,2 |
| P(i): ilk basınç | bar | 15,051 |
| $\phi$: gözeneklilik değeri | % | 1,1 |
| $\rho_w$ : akışkan suyun yoğunluğu | $kg/m^3$ | 906,1 |
| $U_w$: Akışkanın özgül içsel enerjisi | kJ/kg | 683,95 |
| $h_{w,s}$: Beslenme ile giren suyun özgül entalpisi | kJ/kg | 630,00 |
| $h_{w,inj}$: Enjeksiyon edilen suyun özgül entalpisi | kJ/kg | 251,55 |
| $h_{w,p}$: Üretilen suyun özgül entalpisi | kJ/kg | 685,65 |
| $C_r$: Sabit sıcaklık altında kayaç sıkıştırılabilirliği | 1/bar | $1{,}7272 * 10^{-5}$ |
| $\beta_T$ : sabit basınç altında, gözeneklilik, termal genleşme/büzüşme katsayısı | 1/$^oC$ | 0 |
| $\alpha_s$: Beslenme indeksi | $m^3/s$ | 0,0645 |

### 4.2.4. Model Parametre Değerlerinin Kalibrasyonu

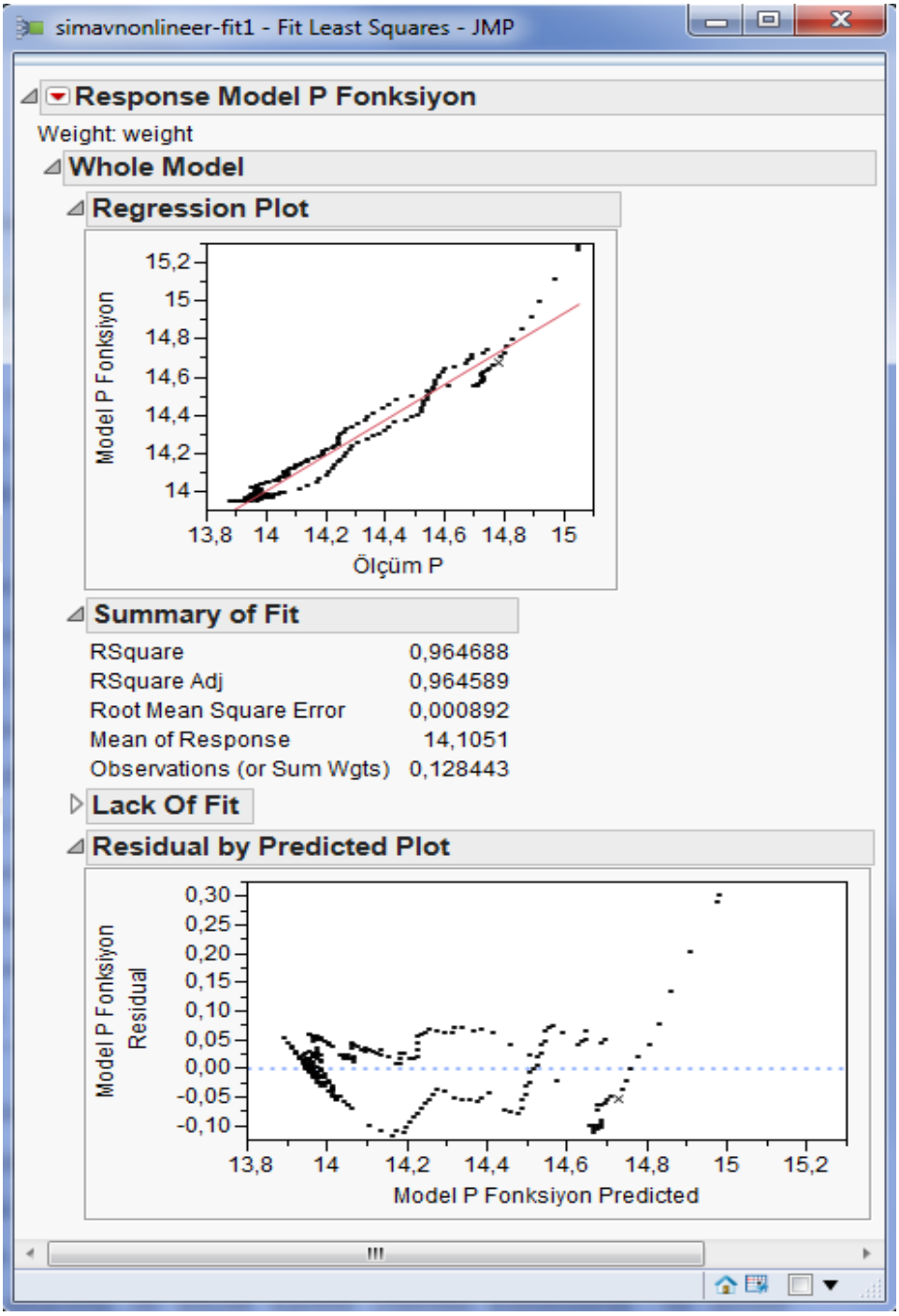
Modelden elde edilen basınç değerleri ile sahadan ölçülen basınç değerlerine tarihsel çakıştırma işlemi, SAS Institute Inc. JMP 10.0.0 (demo) istatistiki paket programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada modelden elde edilen basınç değerleri ile sahada ölçülmüş basınç değerlerinin birbiriyle uyumu ve residual değerlerinin tespiti amacıyla, en küçük kareler yöntemi kullanılarak "fit model" modülü çalıştırılmıştır. Öncelikle ağırlık eklenmeden yapılan bu regresyon analizi neticesinde RSquare değeri 0,96 ve RMSE (Root Mean Square Error) değeri 0,044 çıkmıştır. Rsquare ve RMSE değerlerine bakıldığında, modelin ölçüm değerleri ile %96 oranında örtüştüğü ve kök ortalama değerinden sapmaların ise kabul edilebilir seviyede olduğu söylenebilir.

Şekil 4.22'de model basınç değerleri ve ölçüm basınç değerleri arasındaki ilişki ile istatistiki değerler özet bilgisi ve model basınç değerlerinin sapma grafiği görülmektedir.




Şekil 4.22. En Küçük Kareler Yöntemi ile Uygun Model Analizi

Ölçüm basınç değerlerinin ağırlıkları ters varyans ile oluşturularak, bu kez "fit model" ağırlıklar eklenerek çalıştırılmıştır. Yapılan bu regresyon analizi ile RSquare değeri 0,96 ve RMSE değeri 0,00084 olarak bulunmuştur. Yine Şekil 4.23'de ağırlıklı en küçük kareler yöntemi ile yapılan en uygun model regresyon sonucu ve residual (artık) grafiği görülmektedir.




Şekil 4.23. Ağırlıklı En Küçük Kareler Yöntemi ile Uygun Model Analizi

Bu aşamadan sonra, model parametre değerlerini kalibre etme amacıyla, nonlinear regresyon ile parametre tahmini çalışması gerçekleştirilmiştir. Nonlinear parametre tahmini de yine JMP 10.0.0 (demo) paket programı yardımıyla gerçekleştirilmiştir.

Non-linear parametre tahmini algoritması Eşitlik 4.17-4.20'de verilmiştir. Denklemin matris ve vektörlerle ifadesi ise Eşitlik 4.21'de verilmiştir.

Ölçüm P = Model $P_{(\Theta 1, \Theta 2, \Theta 3 \ldots\ldots \Theta n)}$ + Є (4.17)

$$y_i = f(x_i) + \epsilon$$

$$f(x_i)_{j+1} = f(x_i)_j + \frac{\partial f(x_i)_j}{\partial \Theta_1}\Delta\Theta_1 + \frac{\partial f(x_i)_j}{\partial \Theta_2}\Delta\Theta_2 + \frac{\partial f(x_i)_j}{\partial \Theta_3}\Delta\Theta_3 + \cdots + \frac{\partial f(x_i)_j}{\partial \Theta_n}\Delta\Theta_n \quad (4.18)$$

$$y_i = f(x_i)_j + \frac{\partial f(x_i)_j}{\partial \Theta_1}\Delta\Theta_1 + \frac{\partial f(x_i)_j}{\partial \Theta_2}\Delta\Theta_2 + \frac{\partial f(x_i)_j}{\partial \Theta_3}\Delta\Theta_3 + \cdots + \frac{\partial f(x_i)_j}{\partial \Theta_n}\Delta\Theta_n + \epsilon \quad (4.19)$$

$$y_i - f(x_i)_j = \frac{\partial f(x_i)_j}{\partial \Theta_1}\Delta\Theta_1 + \frac{\partial f(x_i)_j}{\partial \Theta_2}\Delta\Theta_2 + \frac{\partial f(x_i)_j}{\partial \Theta_3}\Delta\Theta_3 + \cdots + \frac{\partial f(x_i)_j}{\partial \Theta_n}\Delta\Theta_n + \epsilon \quad (4.20)$$

$$\{D\} = [Z_j]\{\Delta\Theta\} + [\epsilon] \quad (4.21)$$

Burada;

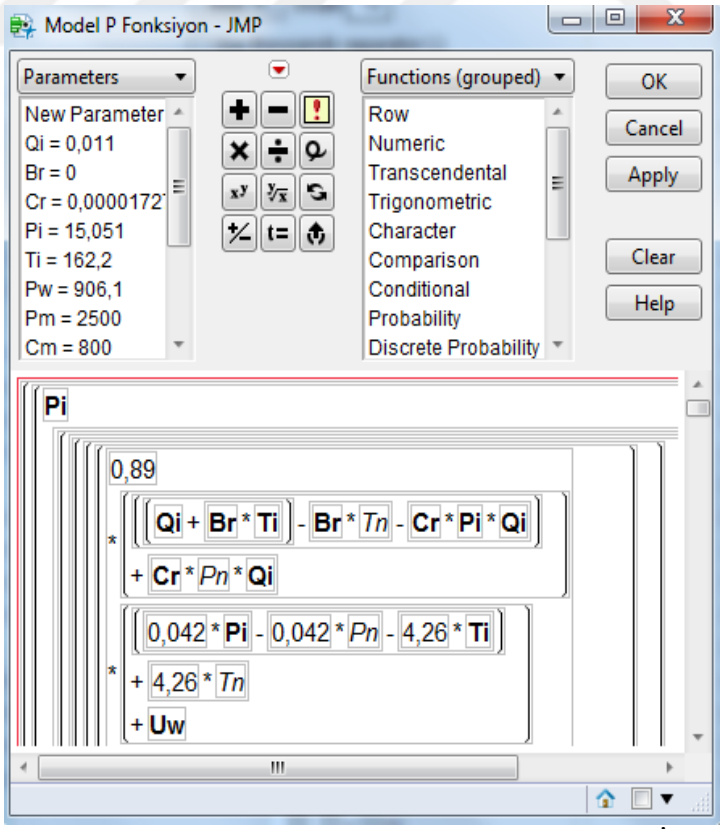
$$\{D\} = \begin{bmatrix} y_i - f(x_1) \\ y_i - f(x_2) \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ y_i - f(x_2) \end{bmatrix} \Longrightarrow \text{Kuvvet vektörü (forcing vector)}$$

$$[Z_j] = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial \Theta_1} & \frac{\partial f_1}{\partial \Theta_2} & \frac{\partial f_1}{\partial \Theta_3} & \cdot & \cdot & \frac{\partial f_1}{\partial \Theta_n} \\ \frac{\partial f_2}{\partial \Theta_1} & \frac{\partial f_2}{\partial \Theta_2} & \frac{\partial f_2}{\partial \Theta_3} & \cdot & \cdot & \frac{\partial f_2}{\partial \Theta_n} \end{bmatrix} \Longrightarrow \text{Jacobian matrisi}$$

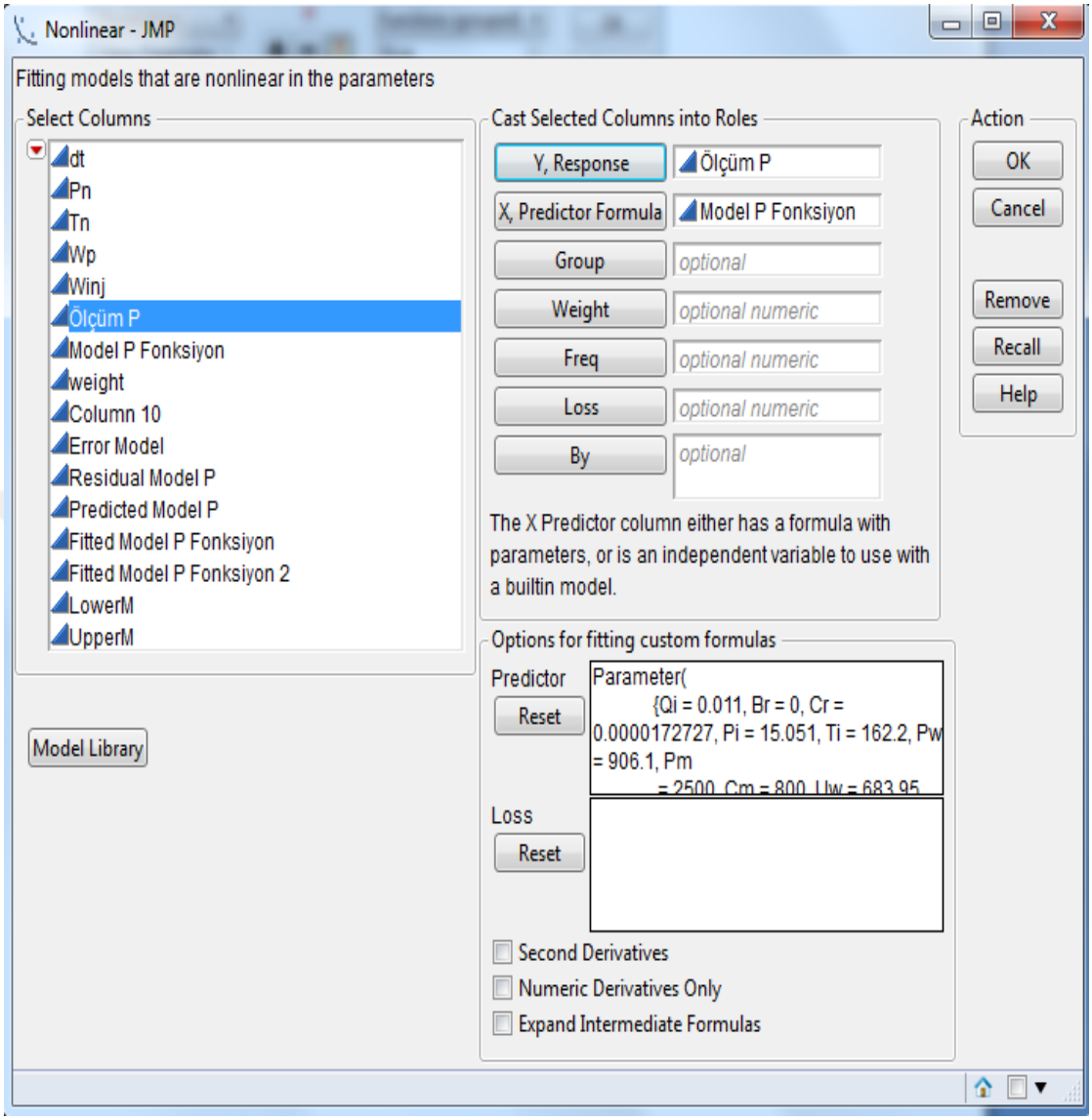
$$\{\Delta\Theta\} = \begin{bmatrix} \Delta\theta_1 \\ \Delta\theta_2 \\ \Delta\theta_3 \\ \cdot \\ \cdot \\ \Delta\theta_n \end{bmatrix} \Longrightarrow \text{Çözüm vektörü}$$

İzotermal olmayan akış modeli ile ölçüm verileri çakıştırması, hem basınç hem de sıcaklık verilerine birlikte veya yalnızca basınç ve yalnızca sıcaklık verilerine yapılabilmektedir. Ancak Kütahya-Simav sahasında yapılan interference test çalışmalarında sadece kuyu dibi basınç verileri kaydedildiğinden, çalışmamızda sadece basınç verilerine çakıştırma gerçekleştirilmiş ve çakıştırma neticesinde tahmin edilen parametre değerleri kullanılarak, sahadaki sıcaklık profil değişimi hesaplanmıştır. Sahada gerçekleştirilen basınç değişim takibi eğer mekanik elementler ile gerçekleştirilmiş ise gözlemlenmiş basınç değerlerine gürültü eklenmelidir. Ancak Kütahya-Simav sahasında gerçekleştirilen basınç değişim takibi dijital element yardımıyla yapıldığından ölçüm (gözlemlenmiş) basınç değerlerine gürültü eklenmemiştir.

Nonlineer regresyona başlamadan önce model basınç fonksiyonu programa eklenir. Ayrıca tahmin edilecek parametrelerin tanımlamaları ve değerleri sisteme işlenir (Şekil 4.24, Şekil 4.25).



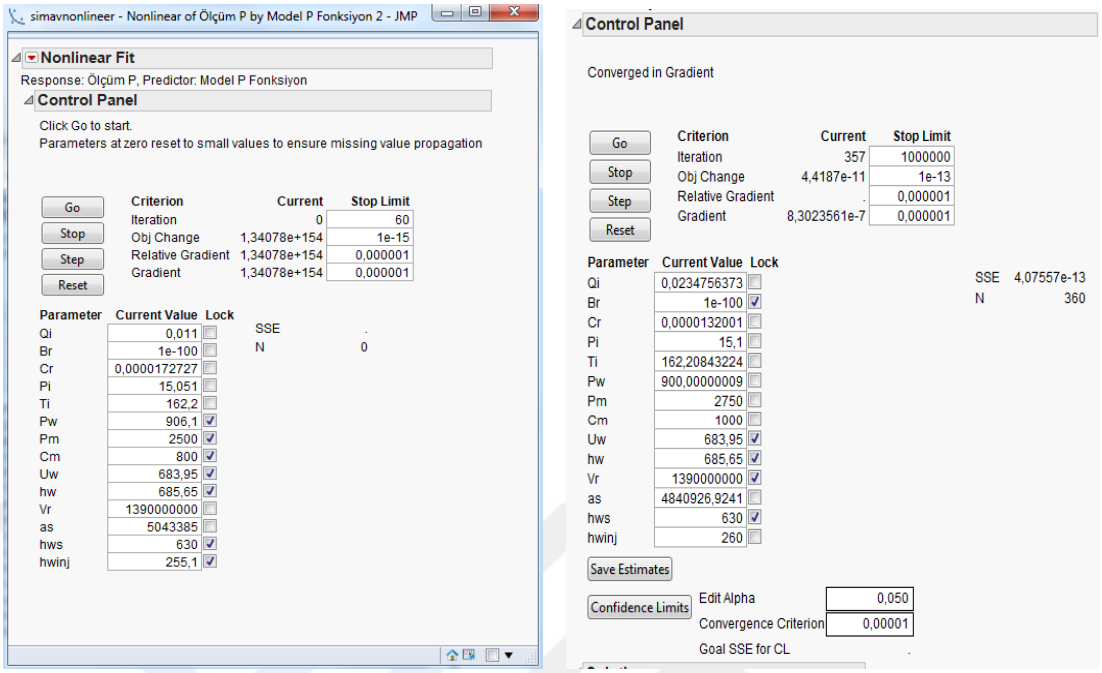
Şekil 4.24. Model Fonksiyon ve Parametrelerin Programa İşlenmesi



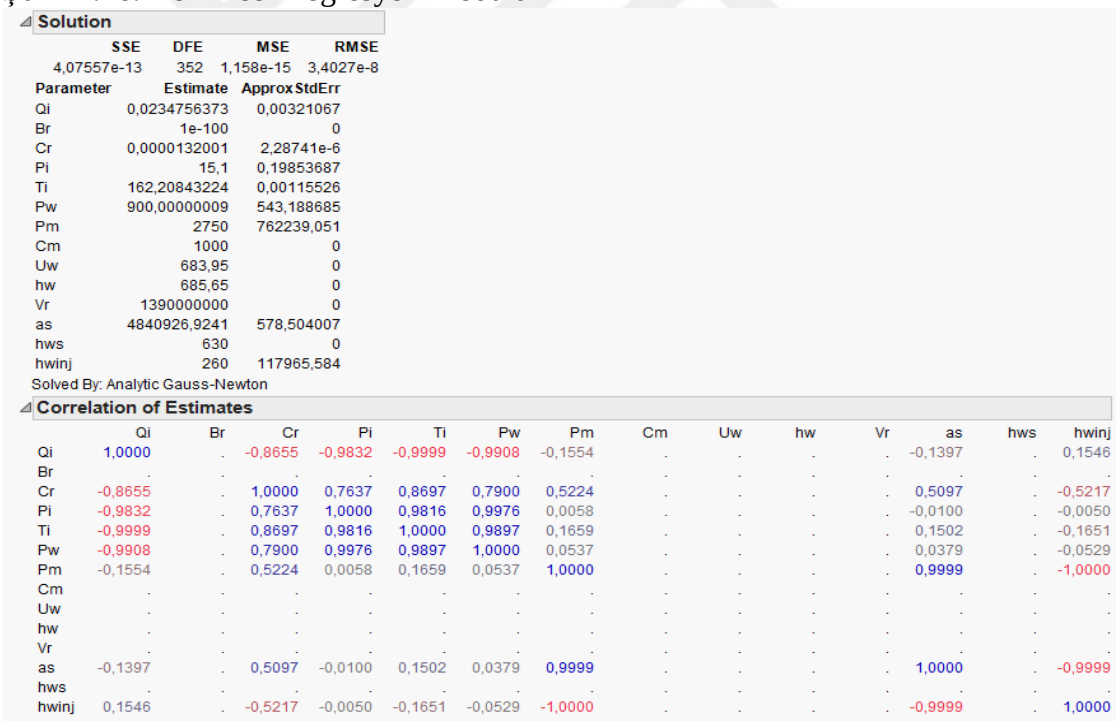
Şekil 4.25. Nonlineer Fit Modül

Şekil 4.26'den de görüldüğü gibi regresyon kriterleri istenilen ölçülerde değiştirilebilir durumdadır. Ayrıca regresyonda tahmin edilecek parametreler dışındaki parametreler analiz setinden çıkarılmak isteniyorsa, "lock" sütununda o parametre kutucuğu işaretlenir. İşaretlenen parametreler regresyonda bilinen parametre olarak kabul edilir. Regresyon sonucu çözüm değerleri ve parametreler arası korelasyon Şekil 4.27'deki gibi çıkmıştır.

Model parametre değerlerinin kalibrasyonu neticesinde, parametre değerleri nihai olarak Çizelge 4.11'de karşılaştırmalı olarak verilmiştir.




Şekil 4.26. Nonlineer Regresyon Modülü

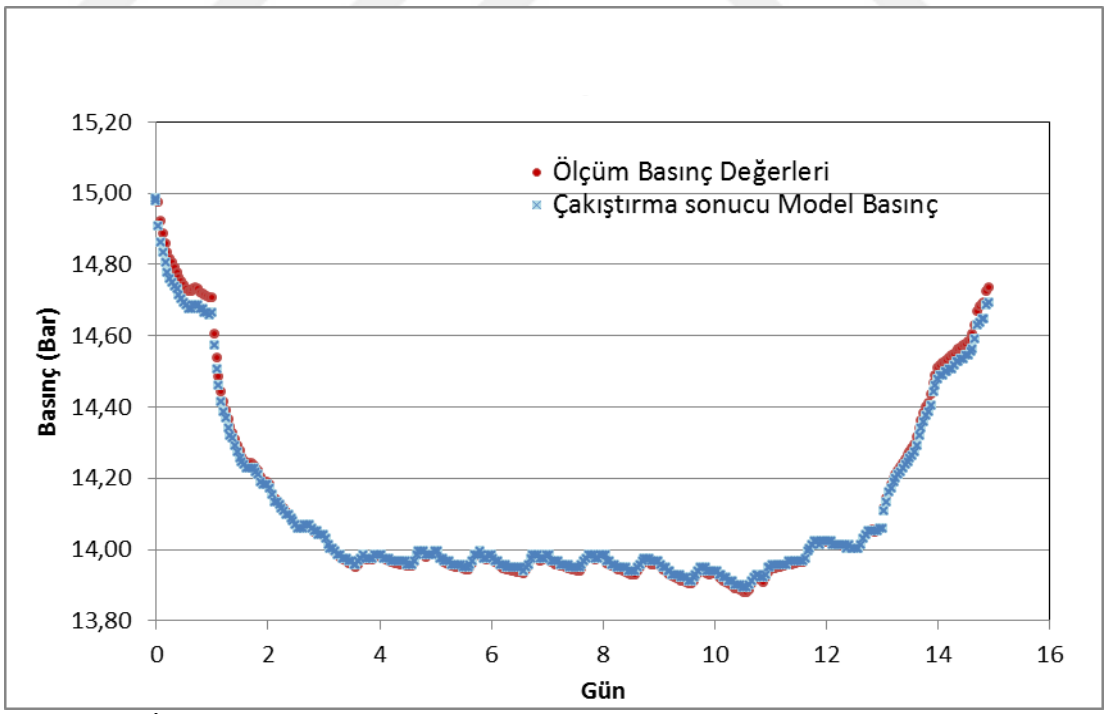



Şekil 4.27. Nonlineer Regresyon Sonucu ve Parametreler Arası Korelasyon

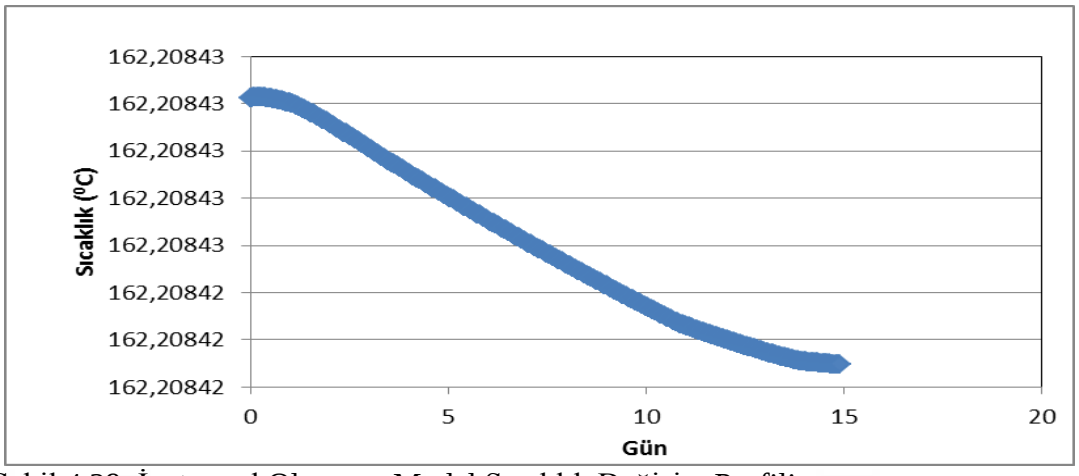
Gözlemlenmiş basınç verileri ile model basınç verilerinin çakıştırılması sonucu model basınç-ölçüm basınç grafiği Şekil 4.28'deki gibi oluşmuştur. Saha sıcaklık profilindeki değişim kalibre edilmiş model parametre değerleri ile model tekrar çalıştırıldığında sıcaklık profili Şekil 4.29'daki gibi elde edilmiştir.

Çizelge 4.11. Kalibre Edilmiş Model Parametre Değerleri

| ***Model Parametre Değerleri*** | | ***Model İlk Değerleri*** | ***Gözlem Basınç Değerleri ile Kalibre Edilmiş Değerler*** |
|---|---|---|---|
| $V_r$: | ($m^3$) | $1{,}39 * 10^9$ | $1{,}39 * 10^9$ |
| $\rho_m$: | $kg/m^3$ | 2.400 | 2.750 |
| Cm: | J/(kg °C) | 800 | 1.000 |
| T(i): | °C | 162,2 | 162,208432237576 |
| P(i): | bar | 15,051 | 15,10 |
| $\phi$: | % | 1,1 | 2,34756372992541 |
| $P_w$: | $kg/m^3$ | 906,1 | 900,000000090808 |
| $U_w$: | kJ/kg | 683,95 | 683,95 |
| $h_{w,s}$: | kJ/kg | 630 | 630,00 |
| $h_{w,inj}$: | kJ/kg | 255,1 | 260,00 |
| $h_{w,p}$: | kJ/kg | 685,65 | 685,65 |
| $C_r$: | 1/bar | $1{,}7272 * 10^{-5}$ | $1{,}32001 * 10^{-5}$ |
| βr: | 1/°C | 0 | 0 |
| $\alpha_s$: | $m^3/s$ | 0,0645 | 0,619 |




Şekil 4.28. İzotermal Olmayan Model Çakıştırma Grafiği




Şekil 4.29. İzotermal Olmayan Model Sıcaklık Değişim Profili

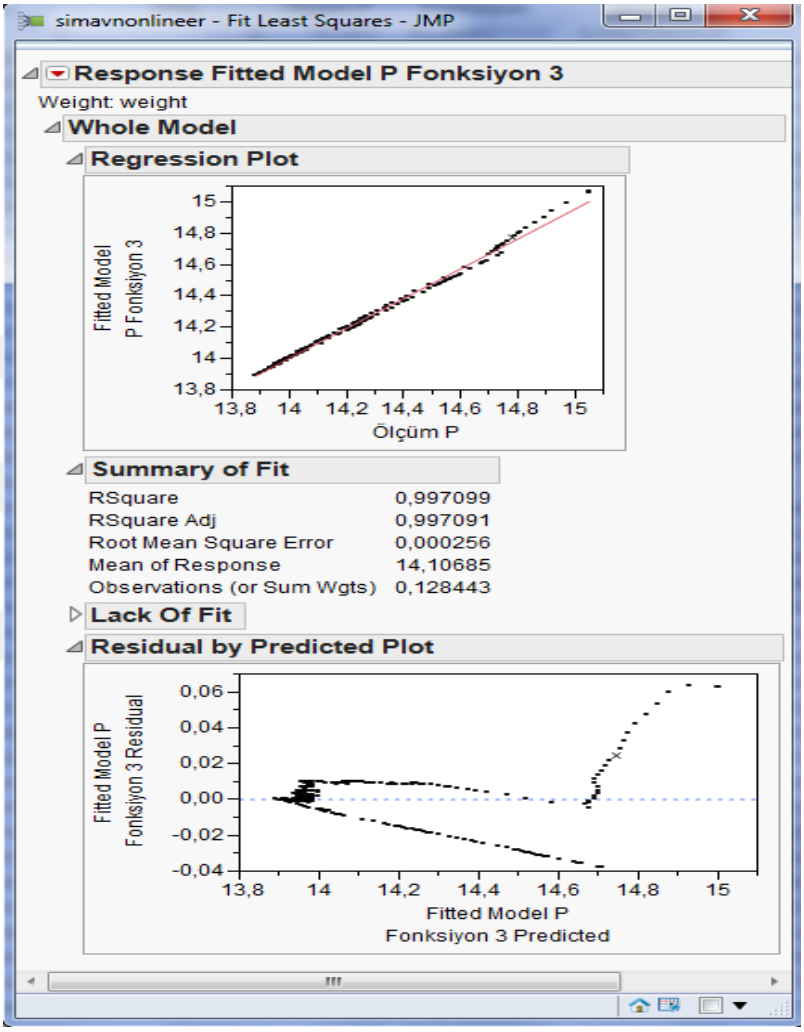
Kalibre edilmiş parametre değerleri sonucunda model basınç değerleri ile gözlem basınç değerleri arasındaki ilişki incelenmiş olup, datalar arası ilişki %99 seviyesine çıkmış, RMSE değeri ise 0,00084'den 0,00025 seviyesine düşmüştür (Şekil 4.30).

Model parametre değerleri kalibre edildikten sonra, özellikle basınç değişimini etkileyen $\phi_i$, Pi, αs parametreleri, bilinmeyen olarak seçilmiş ve regresyon tekrar çalıştırılmıştır. Diğer parametreler bilinen olarak kabul edilmiştir. Bilinmeyen parametrelerin modelde kullanılan değerleri yerine farklı başlangıç değerleri verilerek çalıştırılmıştır.

Parametrelerin doğru değerlerine yakın başlangıç değerleri ile regresyon başlatılmadığında veya parametrelerin korelasyonlarının düşük olanları seçildiğinde, regresyon doğru sonuca ulaşamamaktadır. Bu nedenle regresyon setine seçilecek parametreler özenle seçilmeli ve başlangıç değerleri model değerlerine yakın değerler atanmalıdır (Çizelge 4.12).

Model parametre değerleri kalibre edilmesi ve belirsizliklerin tespiti neticesinde, sahanın işletilmesinde saha basınç ve sıcaklık profilindeki değişimler tespit edilebilir ve irdelenebilir hale gelmiştir. Bu tespitler neticesinde, saha ile ilgili üretim-enjeksiyon optimizasyonuda gerçekleştirilebilir olmuştur. İşletmenin ihtiyaç duyduğu yıllık akışkan miktarı göz önünde bulundurularak, farklı senaryolar

doğrultusunda saha model üzerinde işletilebilir ve bu üretim sonucunda sahada basınç kaybını minimize edecek reenjeksiyon miktarı tespiti yapılabilecektir.




Şekil 4.30. Model Parametre Değerlerinin Kalibresi Sonrası Fit Model

Çizelge 4.12. Kalibre Edilmiş Modelden Parametre Tahmini

| *Model Parametreleri* | *Parametre Değerleri* | *Regresyon Başlangıç Değerleri* | *Çakıştırmadan Elde Edilen Değerler* |
|---|---|---|---|
| **İlk Basınç $P_i$ (bar)** | 15,1 | 14,00 | 15,11±5017,86 |
| **Porozite, $\phi_i$ (%)** | 0,0234 | 0,003 | 0,018±0,00067 |
| **Beslenme indeksi, $\alpha_s$ (kg/s)** | 0,0619 | 0,057 | 0,0627±9332,75 |
| **RMSE=0,016427** | | | |

# 5. ARAŞTIRMA BULGULARI

## 5.1. Sahanın Üretim/Re-Enjeksiyon Optimizasyonu

Jeotermal sistemlerinin performans tahmini temel olarak dört aşamalı bir işlemi gerektirmektedir.

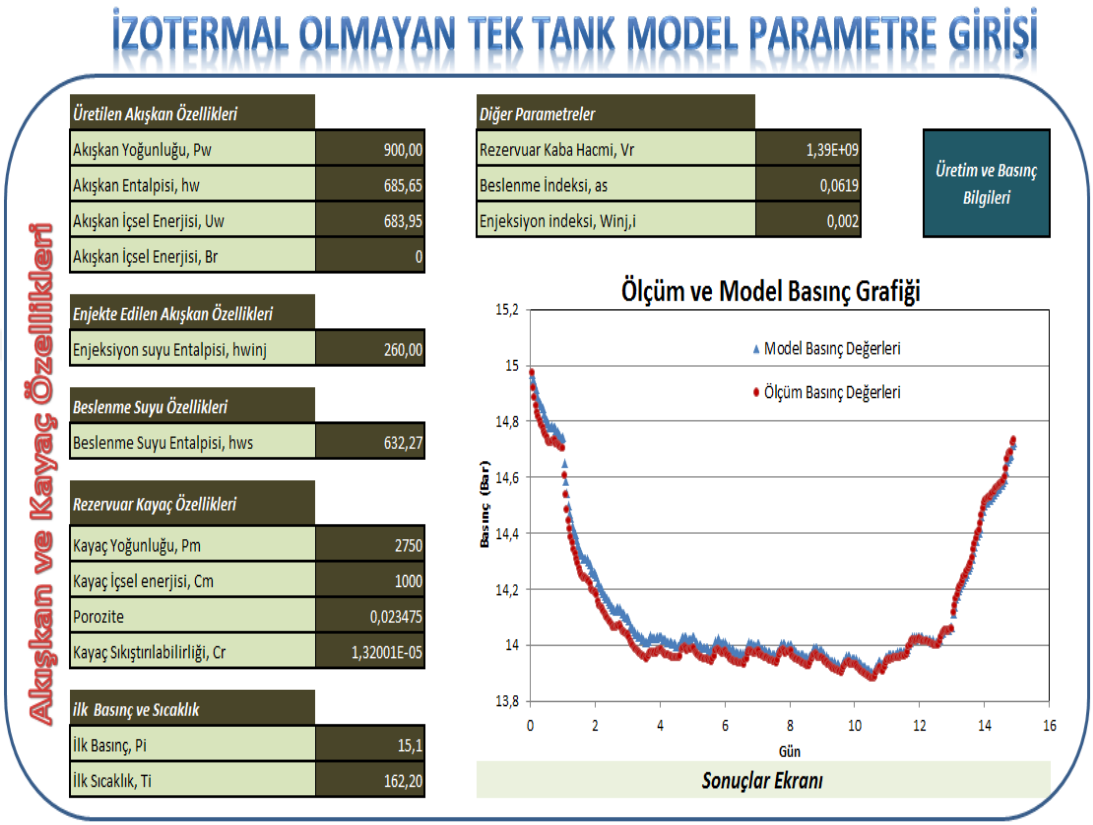
- ✓ Modellerin oluşturulmasında saha verilerinin yeterli sayıda ve güvenilirlikle toplanması,
- ✓ Bu verilerle modelin oluşturulması ve bu modelin kalibre edilmesi,
- ✓ Model kalibrasyonu ile birlikte ölçüm ve model arasındaki artıkların (residual) modele dahil edilmesi,
- ✓ Kalibre edilmiş model ile çeşitli üretim/re-enjeksiyon senaryoları altında sistemin performansının tahmini.

Ölçüm ve modelleme sonucunda belirli ölçüde belirsizlikler söz konusu olacağından son aşamada bu belirsizlikler model üzerine yansıtılmalıdır. Bu belirsizliklerin hangi yöntem ile yansıtılacağına önceden karar verilmelidir. Zamana karşı üretim debileri ile birlikte kaydedilmiş basınç veya su seviyesi verilerine tarihsel çakışma yapılması en bilinen metodojidir. Tarihsel çakıştırma neticesinde, ölçüm hatalarındaki ve model parametrelerinde belirsizlik de hesaba katılarak yapılan gerçeklemeler ve sahada uygulaması düşünülen işletme stratejileri ile performans tahminleri yapılır.

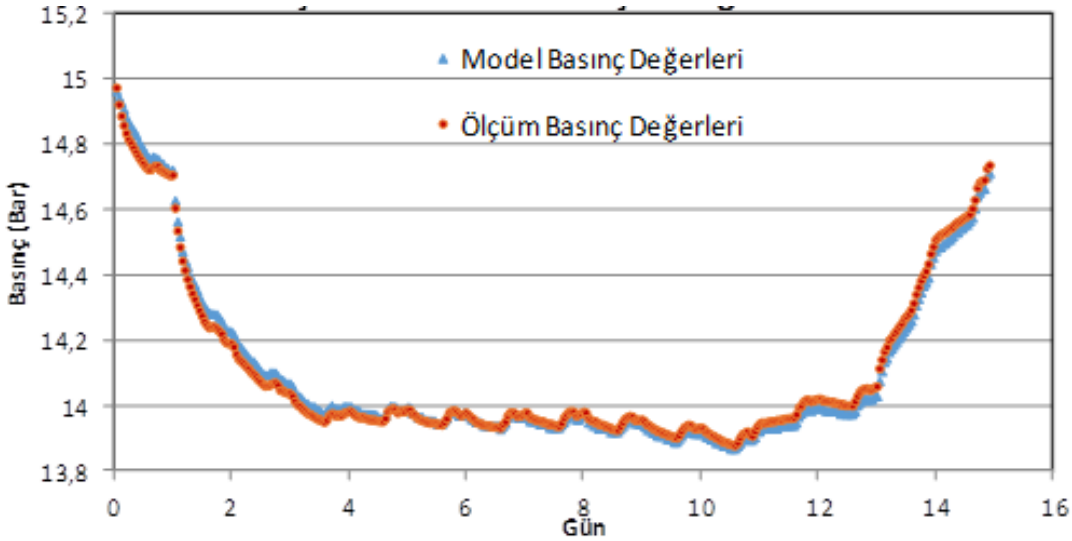
Kütahya-Simav sahasında gerçekleştirilen interference test verileri ile model verileri, tarihsel çakıştırma yapılarak model verileri kalibrasyonu ve belirsizlikler tanımlanmıştır. Kalibrasyon neticesinde parametre değerleri program arayüzünde değiştirilmiştir. Aynı zamanda, tarihsel çakıştırma neticesinde tespit edilen belirsizlikler programa dahil edilmiştir. Sistem çalışmasında re-enjeksiyon senaryolarının dahil edilebilmesi amacıyla 0,002 $m^3/s$ gibi düşük bir re-enjeksiyon indeksi programa girilmiştir (Şekil 5.1).

Saha modellenirken re-enjeksiyon senaryolarının dahil edilebilmesi amacıyla, sahaya çok az miktarda 0,002 $m^3/s$ re-enjeksiyon ilavesi yapılmıştır. Sahanın

re-enjeksiyon yapılmaması durumunda oluşan basınç değişim profili Şekil 5.2'de verildiği şekliyle oluşmaktadır.



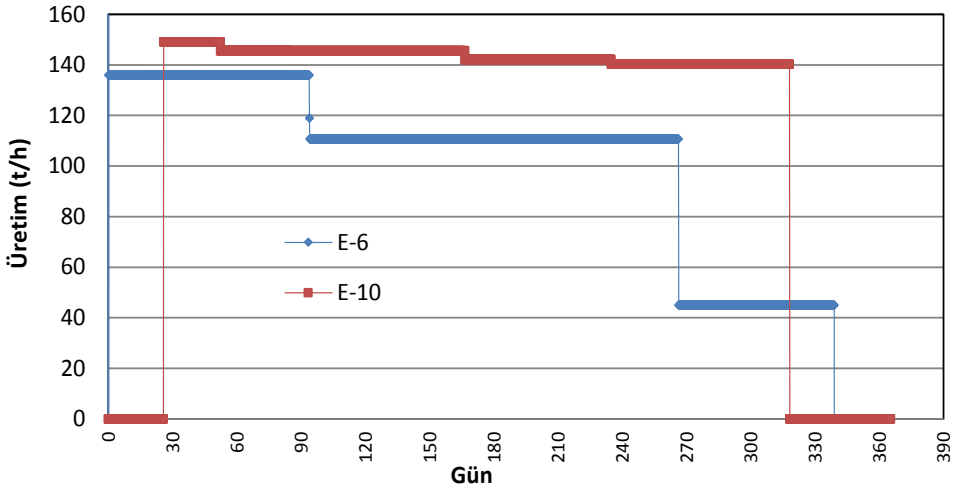

Şekil 5.1. Program Arayüzü



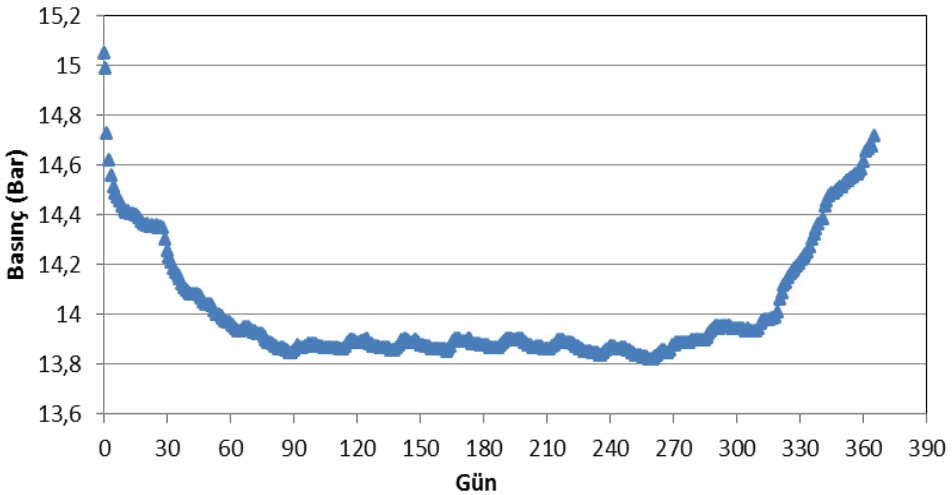

Şekil 5.2. Re-enjeksiyon İlavesiz Model-Ölçüm Basınçları

### 5.1.1. Yıllık Üretim Değerlendirmesi

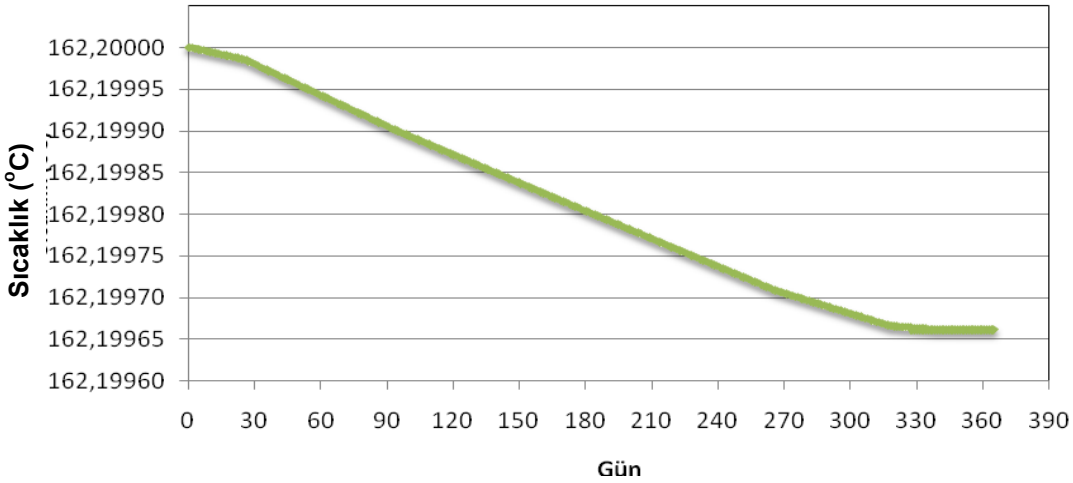
Sahanın yıllık basınç ve sıcaklık değişimlerinin tespiti amacıyla, Şekil 5.3'deki üretim programı dahilinde, model yıllık şekle dönüştürülmüştür. Yıllık üretim programına karşılık, sahanın basınç ve sıcaklık profillerindeki değişim tespit edilmiştir (Şekil 5.4-5.5). Saha, 338 gün ortalama 227,94 t/h (5.470,56 ton/gün) üretimle ve 27 gün'de üretime kapalı halde işletilmiştir. Toplam 1,8E+06 ton akışkan üretimine karşılık, sahada *-0,334 bar* basınç düşümü ve *-0,00034ºC* sıcaklık değişimi gözlemlenmiştir (Çizelge 5.1).




Şekil 5.3. Yıllık Üretim Programı (Senaryo-0)




Şekil 5.4. Yıllık Üretime Karşılık Basınç Değişimi



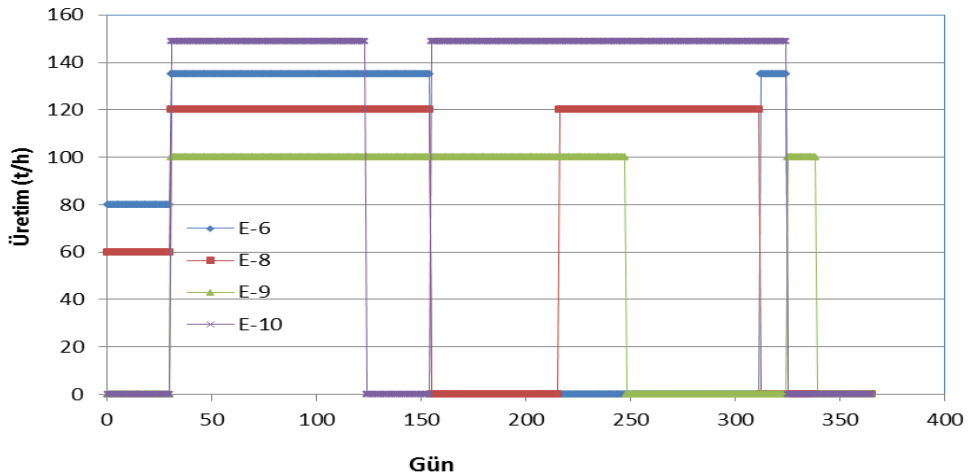

Şekil 5.5. Yıllık Üretime Karşılık Sıcaklık Değişimi

Çizelge 5.1. Model Özet Bilgileri (Senaryo-0)

| ***Saha Değerlendirmesi*** | |
|---|---|
| Re-enjeksiyon Oranı (%WP) | **0** |
| Basınç Farkı (bar) ($P_{ilk}$-$P_{son}$) | **-0,334** |
| Sıcaklık farkı (°C) ($T_{ilk}$-$T_{son}$) | **-0,00034** |
| Üretim (t/yıl) | **1,85E+06** |

### 5.1.2. Yıllık Üretim Planlaması ve Re-enjeksiyon Senaryoları Değerlendirmesi

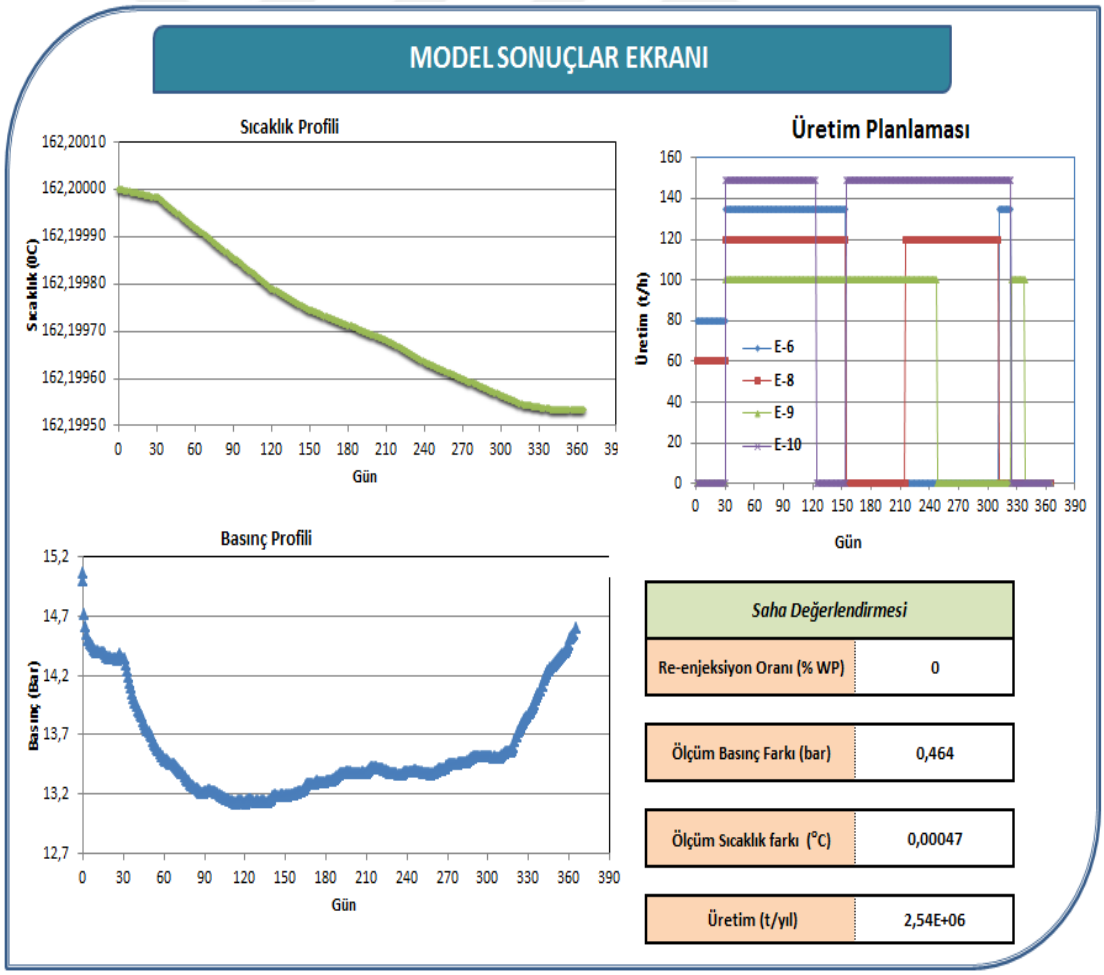
Üretim planlamasının daha esnek tasarlanabilmesi için, programa t/h cinsinden aylık ihtiyaca göre üretim planlamasının yapılabilmesi amacıyla, üretim planlama modülü eklenmiştir. Kış aylarında şehir ısıtması dikkate alınarak, yıllık saha üretim planlaması ***(Senaryo-1)*** yapılmıştır (Şekil 5.6).



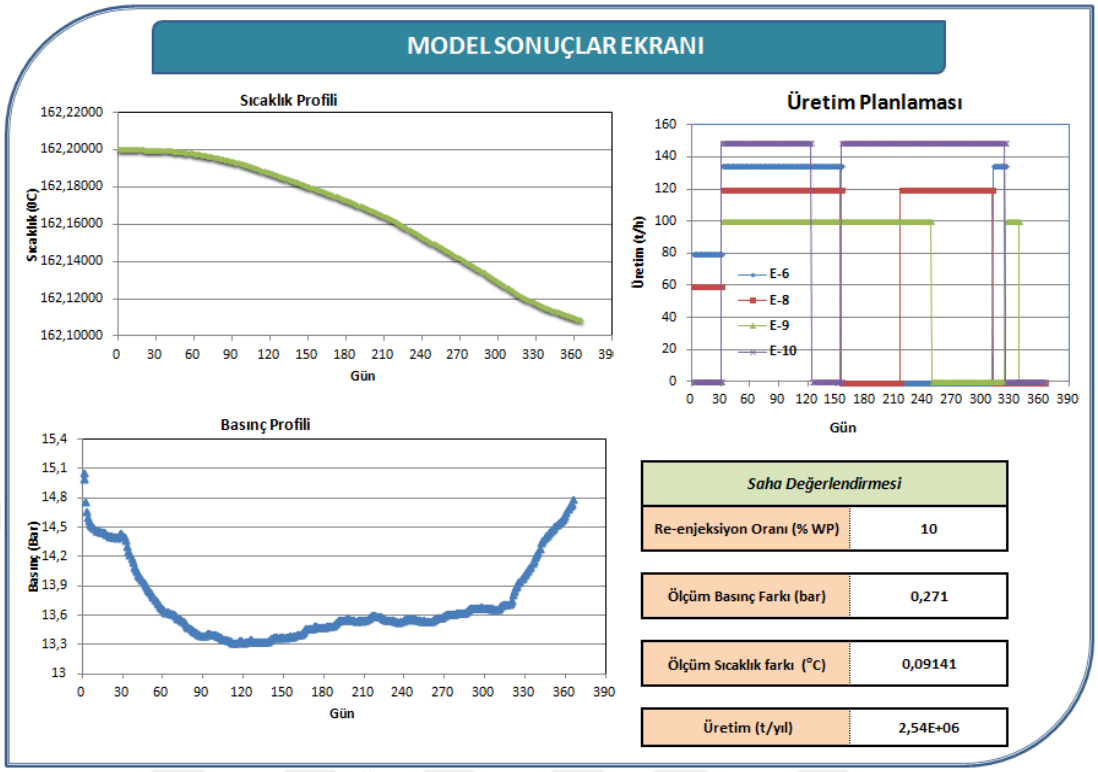

Şekil 5.6. Yıllık Üretim Planlaması (Senaryo-1)

Şekil 5.6'daki üretim planlaması dahilinde *(senaryo-1)* sahanın 338 gün üretim ve 27 gün dinlendirilmesi ve re-enjeksiyonun olmadığı durumda saha basınç ve sıcaklık profillerindeki değişimleri incelenmiştir (Şekil 5.7). Ortalama 312,84 t/h (7.508 ton/gün) üretim dahilinde, toplam 2,54E+06 ton akışkan üretimi gerçekleştirilmiştir. Sahadaki basınç farkının ***-0,464 bar*** ve sıcaklık değişiminin ***-0,00047ºC*** olduğu görülmektedir.

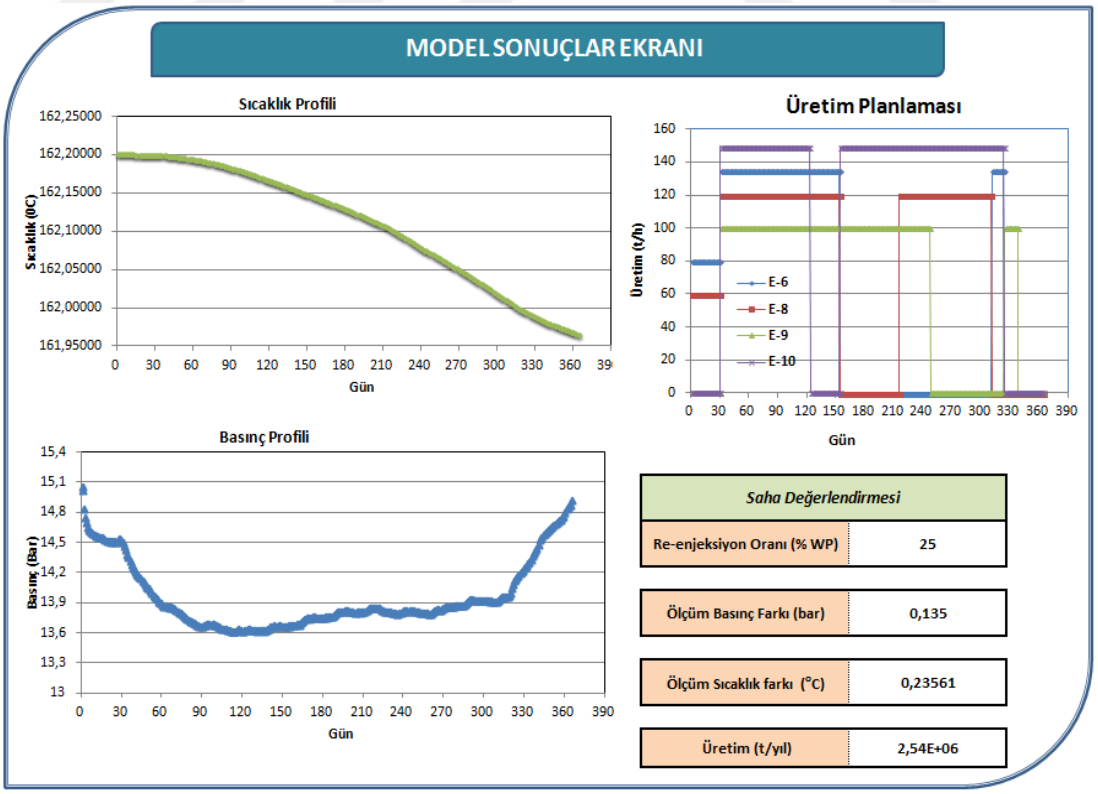
Re-enjeksiyon ilavesi ile sahanın davranışını incelemek amacıyla, %10, %25, %35, %45 ve %48 üretilen akışkan miktarının re-enjekte edilmesi durumunda, sahadaki değişimleri ve sahanın yenilenebilir halde kalıp kalamayacağı incelenmiştir. %48 reenjeksiyon senaryosunda 41,71 kg/s akışkan geri basılması gerektiği tespit edilmiştir.



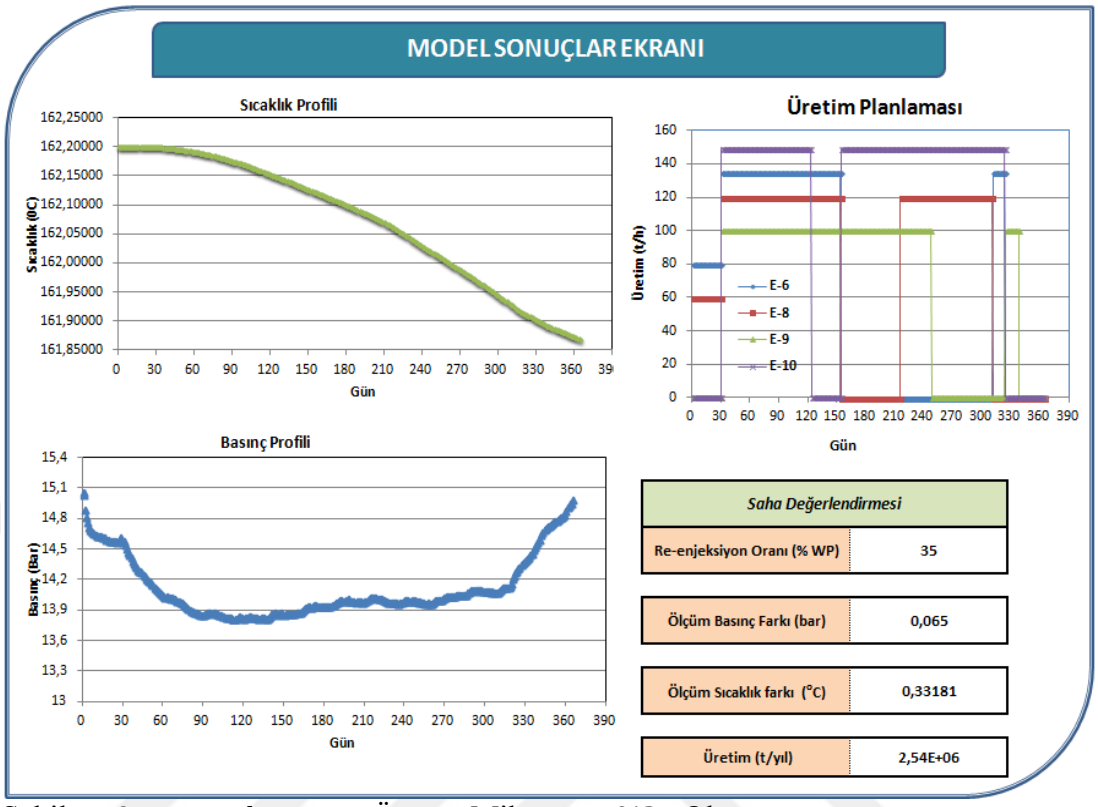

Şekil 5.7. Re-enjeksiyonun Sıfır Olması Durumundaki Saha Basınç ve Sıcaklık Grafiği



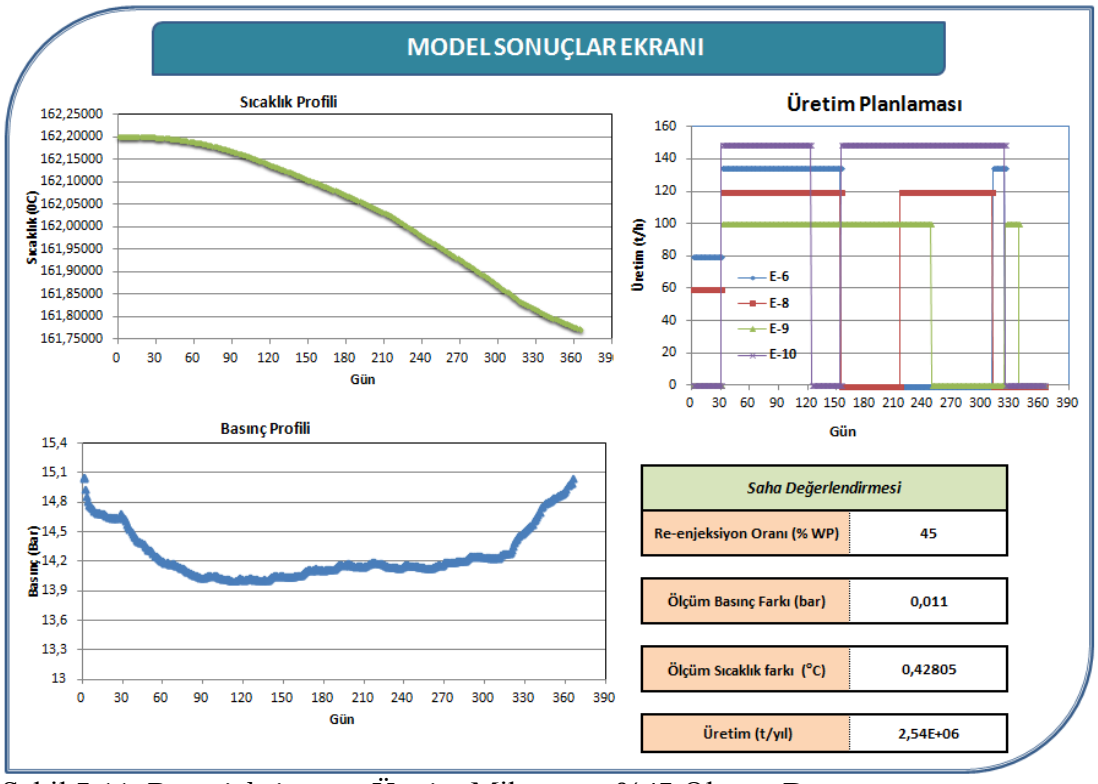

Şekil 5.8. Re-enjeksiyonun Üretim Miktarının %10 Olması Durumu



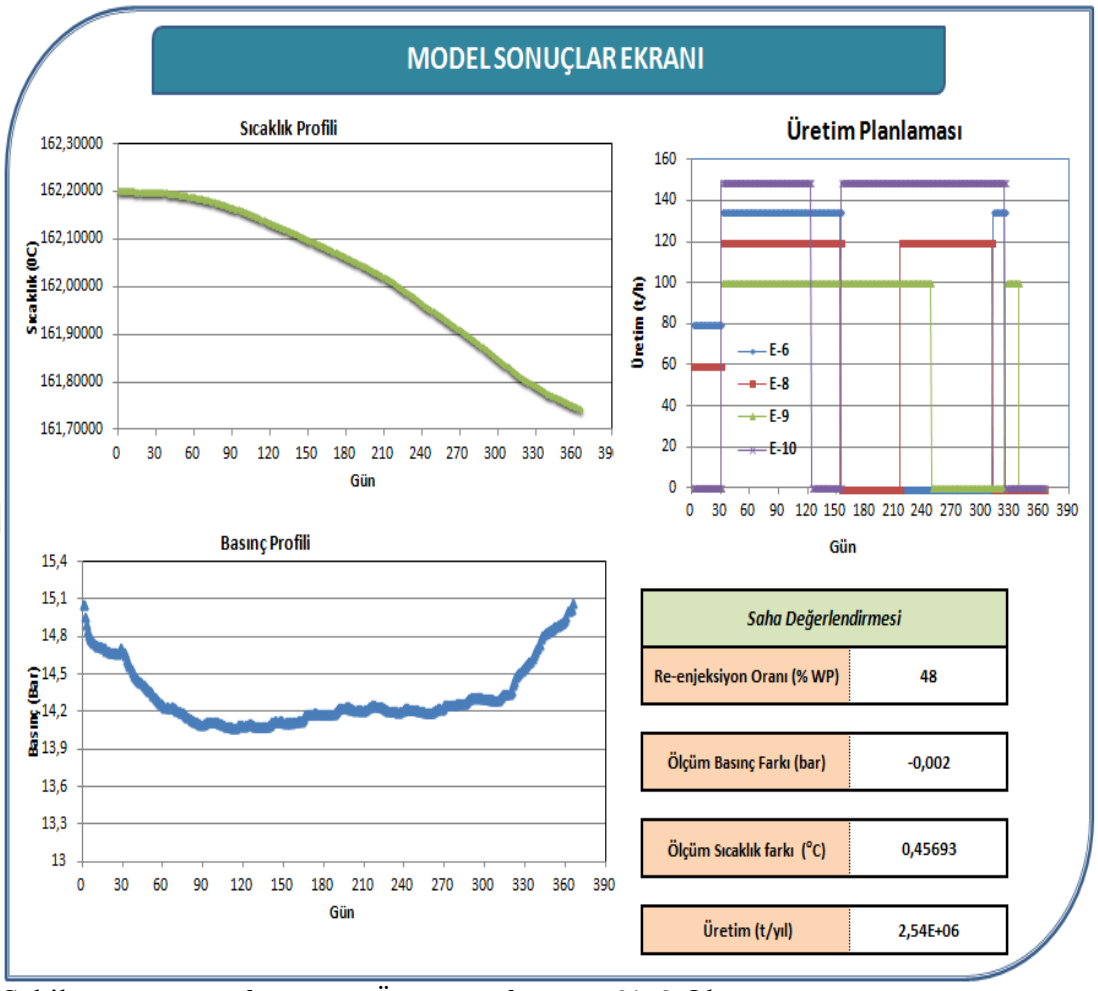

Şekil 5.9. Re-enjeksiyonun Üretim Miktarının %25 Olması Durumu




Şekil 5.10. Re-enjeksiyonun Üretim Miktarının %35 Olması Durumu



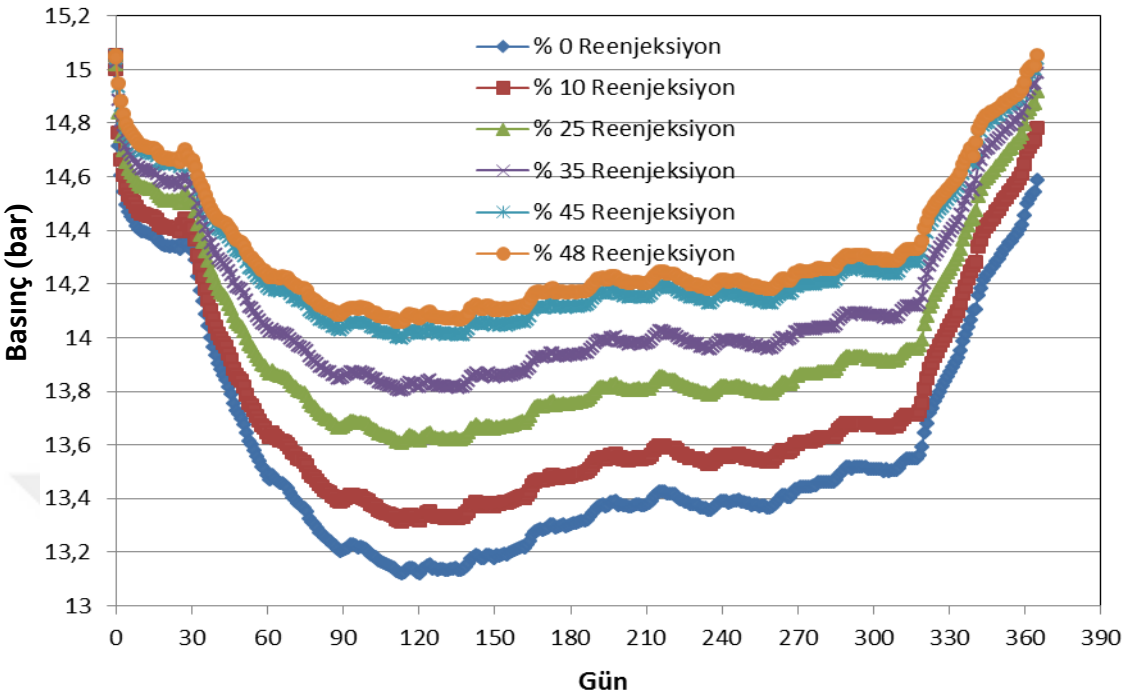

Şekil 5.11. Re-enjeksiyonun Üretim Miktarının %45 Olması Durumu



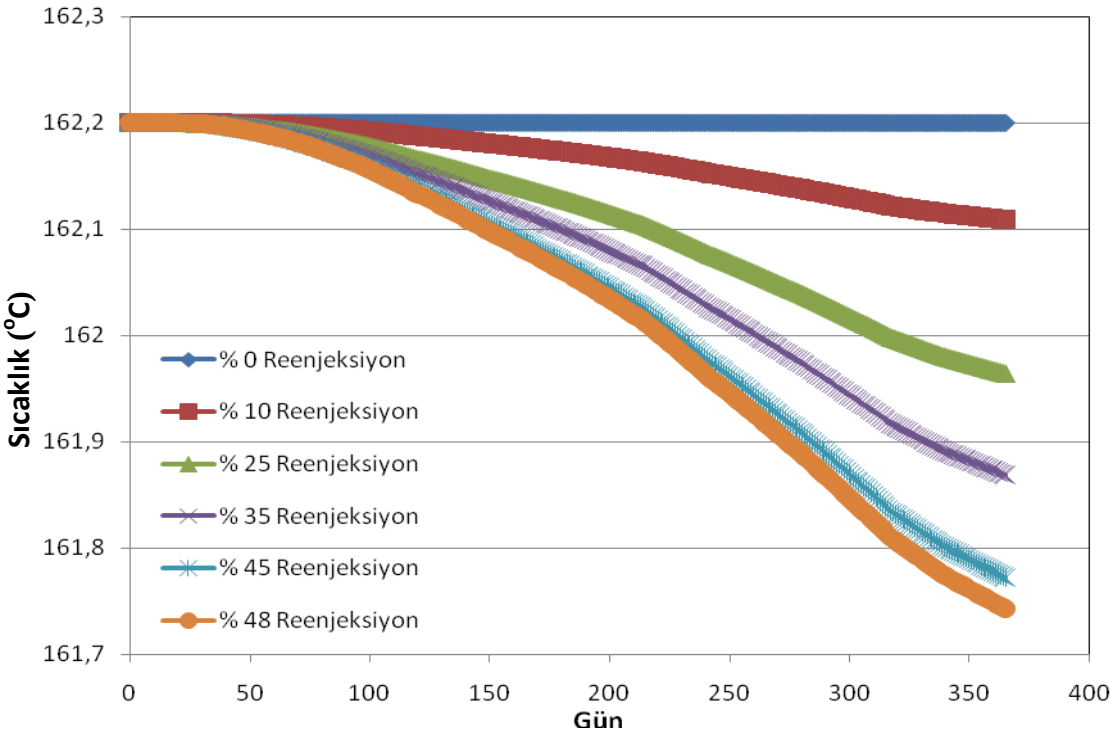

Şekil 5.12. Re-enjeksiyonun Üretim Miktarının %48 Olması Durumu

Çizelge 5.2. Re-enjeksiyon Senaryoları ile Basınç-Sıcaklık Değişimleri

| | ***Re-enjeksiyon Miktarı (kg/s)*** | ***Basınç Farkı (Bar)*** | ***Sıcaklık Farkı (°C)*** |
|---|---|---|---|
| ***%0 Reenjeksiyon*** | 0 | 0,464 | 0,00047 |
| ***%10 Reenjeksiyon*** | 8,69 | 0,271 | 0,0914 |
| ***%25 Reenjeksiyon*** | 21,72 | 0,135 | 0,2356 |
| ***%35 Reenjeksiyon*** | 30,41 | 0,065 | 0,33181 |
| ***%45 Reenjeksiyon*** | 39,1 | 0,011 | 0,42805 |
| ***%48 Reenjeksiyon*** | 41,71 | -0,002 | 0,45693 |



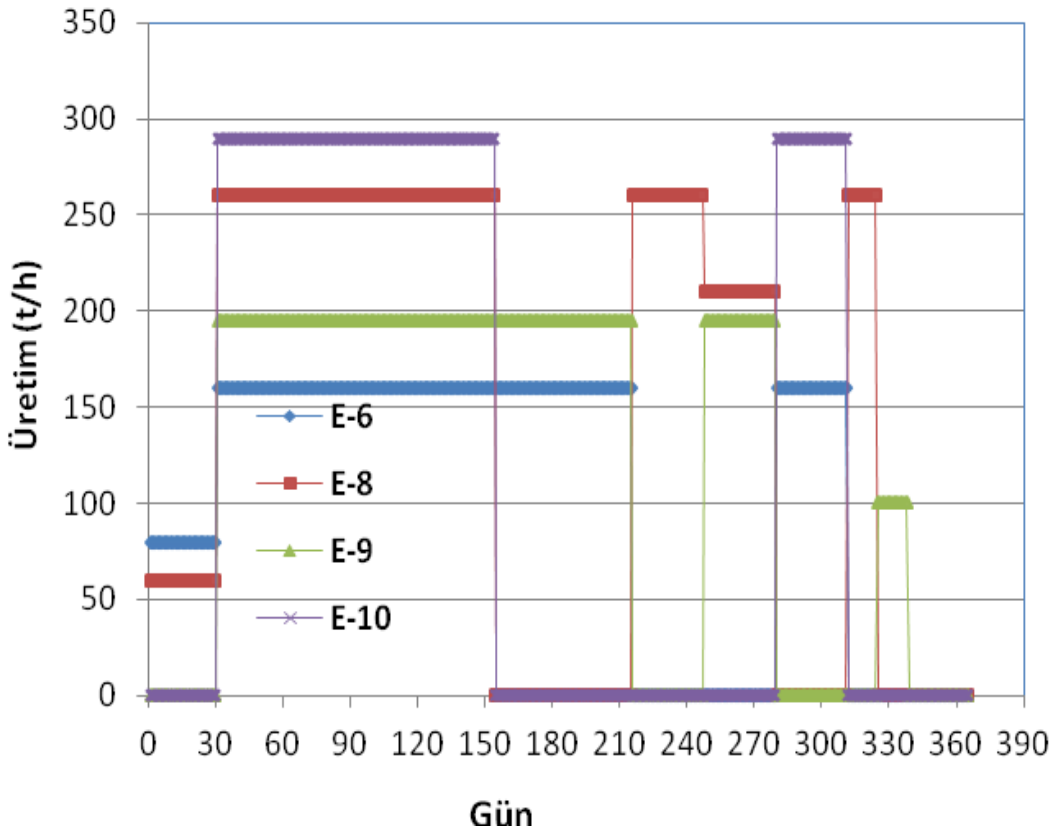

Şekil 5.13. Re-enjeksiyonun Senaryoları Basınç Grafiği



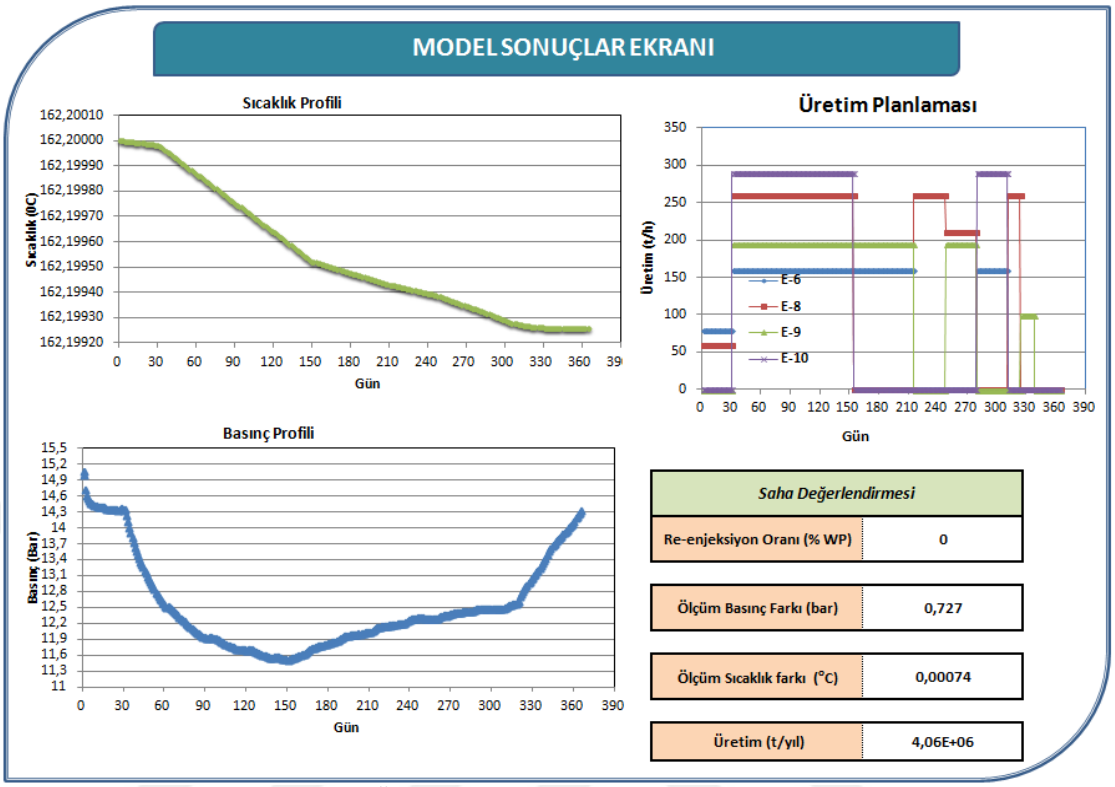

Şekil 5.14. Re-enjeksiyonun Senaryoları Sıcaklık Grafiği

***Senaryo-2*** olarak ise 338 gün ortalama 500 ton/h akışkan üretimi ve 28 gün saha dinlendirilmesi durumunda saha basınç, sıcaklık ve re-enjeksiyon oranı tespit çalışması yapılmıştır (Şekil 5.15). Senaryo-2 şartlarında yıllık 4,06E+06 ton akışkan üretiminde re-enjeksiyon yapılmaması halinde, sahadaki basınç kaybı -0,727 bar, sıcaklık değişimi -0,00074ºC olmuştur. Saha %46 oranında üretilen akışkanın re-enjekte edilmesi durumunda yenilenebilir halde olacağı tespit edilmiştir (Şekil 5.16, Şekil 5.17). %46 oranında re-enjeksiyon (63,94 kg/s re-enjeksiyon ilavesi) halinde basınç farkı 0,002 bar, sıcaklık farkı -0,326ºC olacağı görülmektedir. Tüm senaryolar için saha profilleri bilgileri Çizelge 5.3'deki gibidir.

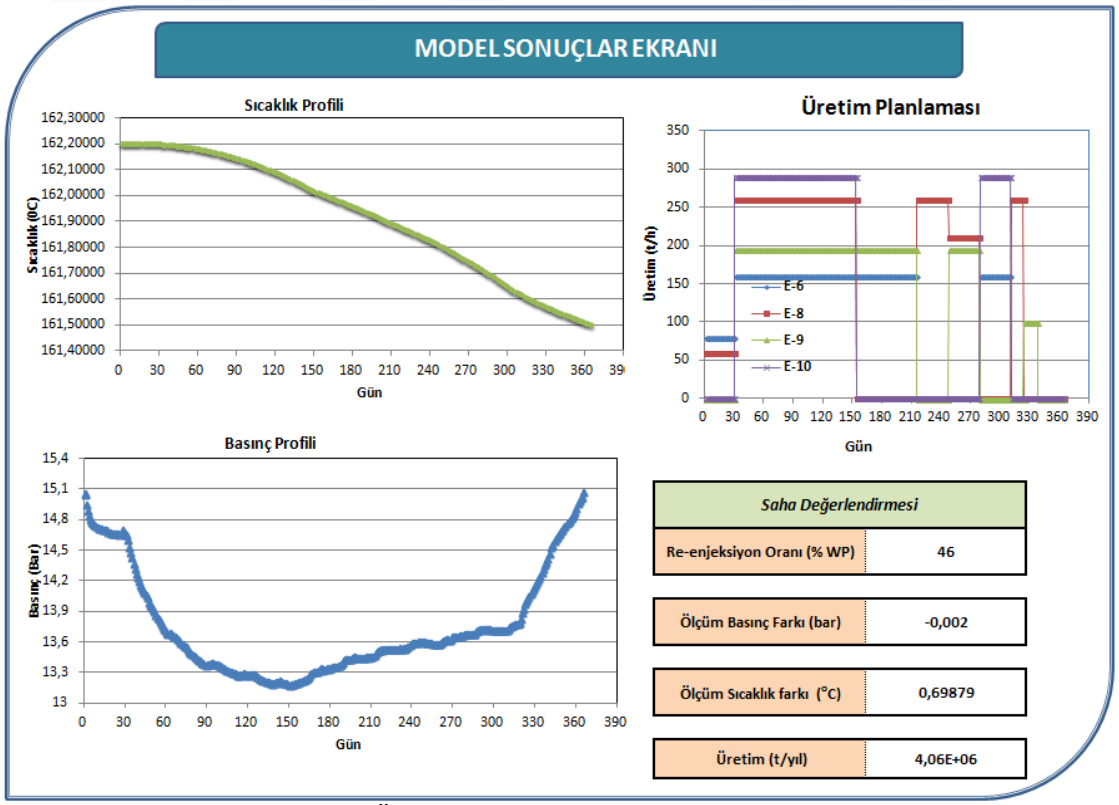
Modelleme arayüzünde her türlü üretim senaryosu işlenebilir ve sahanın yıllık sıcaklık, basınç profilleri değişimleri ve re-enjeksiyon senaryoları takip edilebilir esnekliktedir.




Şekil 5.15. Ortalama 500 t/h Üretim Planlaması




Şekil 5.16. Re-enjeksiyonun Üretim Miktarının %0 Olması Durumu

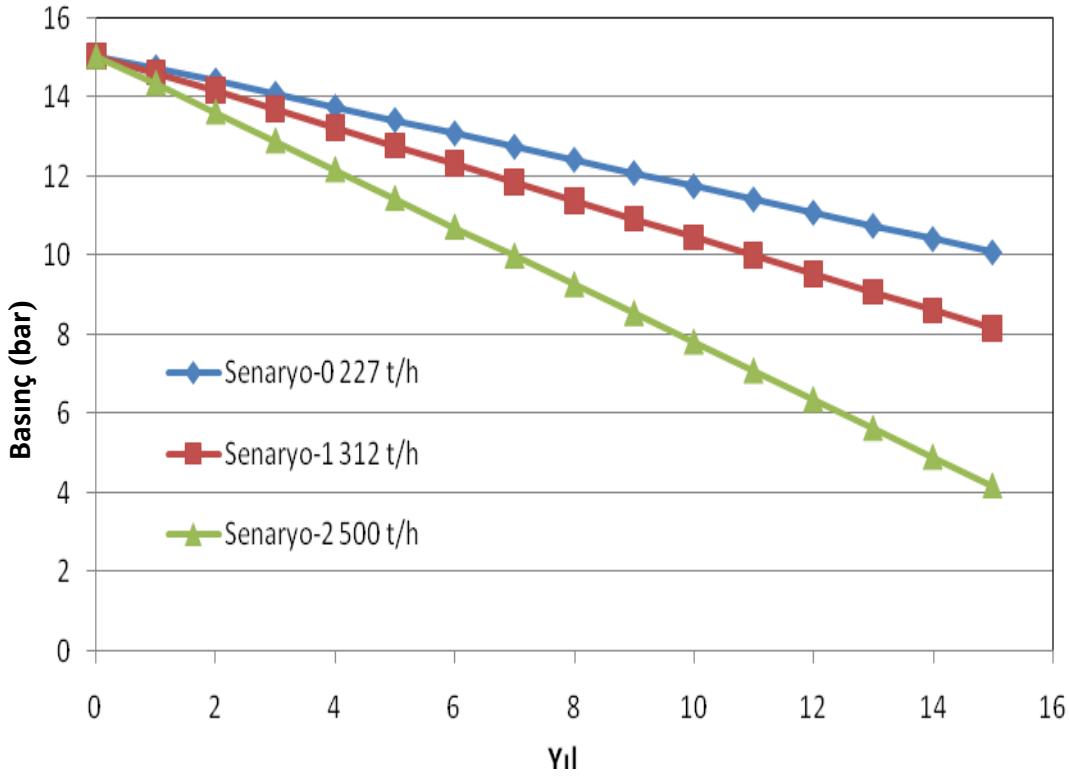



Şekil 5.17. Re-enjeksiyonun Üretim Miktarının %46 Olması Durumu

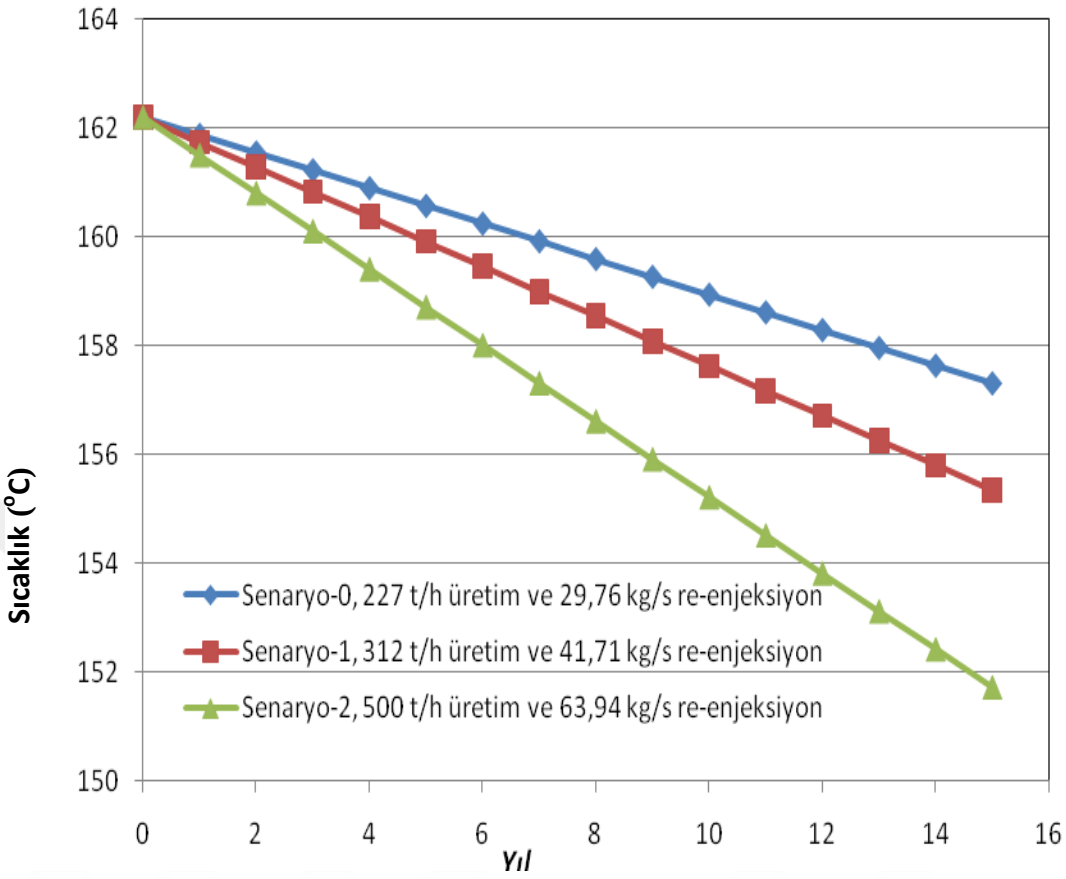
Çizelge 5.3. Yıllık Üretim Senaryoları ve Saha Profilleri Özet Bilgisi

| *Senaryolar* | *Üretim (t/h)* | *Re-enjeksiyon (kg/s)* | *Sıcaklık farkı °C* | *Basınç farkı (Bar)* |
|---|---|---|---|---|
| ***Senaryo-0*** | *227 ton/h* | 0 | -0,00034 | -0,334 |
| | *227 ton/h* | 29,76 kg/s | -0,326 | 0,001 |
| **Senaryo-1** | 312,84 t/h | 0 | -0,00047 | -0,464 |
| | 312,84 t/h | 41,71 kg/s | -0,456 | 0,002 |
| **Senaryo-2** | 500 t/h | 0 | -0,00074 | -0,727 |
| | 500 t/h | 63,94 kg/s | -0,698 | 0,002 |

Üretim senaryoları ile sahanın 15 yıllık geleceği; re-enjeksiyon olmaması durumundaki basınç değişimi Şekil 5.18, re-enjeksiyon ile saha sıcaklık değişimi Şekil 5.19'daki halde olacaktır.




Şekil 5.18. Üretim Senaryoları ile Yıllık Basınç Değişim (Re-enjeksiyon= 0)

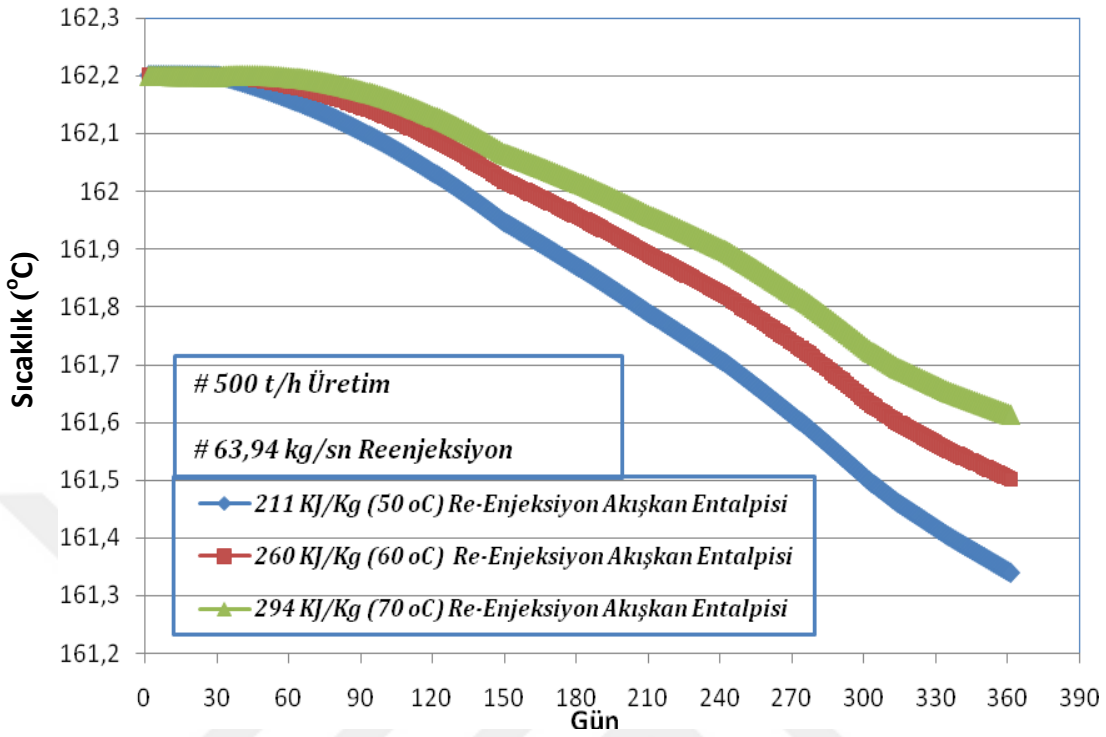



Şekil 5.19. Üretim Senaryoları ile Saha Yıllık Sıcaklık Değişim

Re-enjeksiyon akışkan entalpisi 260 kJ/kg (yaklaşık 60ºC sıcaklık) olarak programa dahil edildiğinden, re-enjeksiyon miktarı arttıkça saha sıcaklık değerinde düşme miktarı artmaktadır.

Re-enjekte edilen akışkan sıcaklığının saha sıcaklık profili üzerindeki etkisini incelemek amacıyla, sisteme re-enjekte edilen akışkan (üretim süresince 63,94 kg/s re-enjeksiyon) sıcaklıkları 50, 60 ve 70°C olarak işlenmiştir. 50°C olması (Entalpi: 211 KJ/Kg) durumunda yıllık sıcaklık değişimi *-0,85*, 60°C'de (Entalpi: 260 KJ/Kg) *-0,69* ve 70°C'de (Entalpi: 294 KJ/Kg) *-0,58* olacaktır (Şekil 5.20).

Re-enjeksiyon sahada ciddi soğumaya neden olabilecektir. Bu nedenle optimum re-enjeksiyon noktası tespiti yapılarak, re-enjekte edilen akışkanın yeterli süre ısıtıcı kaya ile teması ve yeterli kimyasal tepkimeye fırsat verecek nokta olmalıdır.




Şekil 5.20. Farklı Re-enjekte Edilen Akışkan Entalpisinin Saha Sıcaklığına Etkisi

# 6. SONUÇLAR

- ✓ Jeotermal rezervuar modellemesi yapılmadan once, sahanın jeolojik ve jeofizik verilerinin detaylı bir şekilde incelenerek sahanın genel bilgileri oluşturulmalıdır.
- ✓ Sahada kuyu test çalışmaları (basınç, sıcaklık vb) belirli periyodlarla ve bir planlama dahilinde gerçekleştirilmelidir.
- ✓ Akışkan üretilen kuyu özellikleri yerine, saha özelliklerini ortaya koyacak testler gerçekleştirilmelidir. Üretim yapılan kuyudaki basınç değişimi gözlemi yerine, saha özelliklerini ortaya koyabilecek etkileşim testleri veya titreşim testleri tercih edilmelidir.
- ✓ Önceki çalışmalar özellikle üretim kuyusu basınç değişimlerine göre yapılmıştır. Çalışmamızda farklılık olarak, etkileşim test değerleri kullanılarak modelleme gerçekleştirilmiştir. Üretim kuyusu basınç değişimleri kuyu özellikleri hakkında bilgi edinilmesine olanak sağlarken, etkileşim (interference) testi ile sahanın geneli ile ilgili bilgilerin tespiti mümkün olup, jeotermal sahanın modellenmesi ve ileriye yönelik üretim/re-enjeksiyon optimizasyonunda daha doğru sonuçlar ortaya konulabilmektedir.
- ✓ Saha özelliklerinin ortaya çıkarılması için gerçekleştirilecek olan etkileşim testlerinin farklı gözlem kuyuları ve farklı üretim kuyuları seçilerek gerçekleştirilmesi, saha özelliklerinin tespiti için önemlidir. Modelleme çalışmasında en önemli parametreler; rezervuar kaba hacmi, toplam sıkıştırılabilirlik ve beslenme indeksi değerleri, bu testlerle tespit edilebilmektedir. Özellikle beslenme indeksinin tespiti amacıyla test planlaması yapılırken, yeterli sürede sahanın dinlendirilmesi planlanmalıdır. İzotermal olmayan rezervuar modellemede, saha sıcaklık profilindeki değişimlerde modellenebilmekte olup, bu kapsamda basınç değişimi ile birlikte sıcaklık değişimlerinin ölçülmesi oldukça önemlidir. Etkileşim testinin uzun süreli olması sebebi ile tercih edilmemekte, bunun yerine üretim yapan kuyuda basınç değişimlerinin takip edildiği kuyu basınç testleri tercih edilmektedir. Saha parametrelerinin doğruya en yakın tespiti etkileşim

testleri ile mümkün olup, tercih edilmemesi durumunda yerine titreşim testinin planlamaya dahil edilmesi daha doğrudur.

- ✓ Tank modelleme; izotermal ve izotermal olmayan akış varsayımlı modeller içermekte olup; izotermal modellerde rezervuarın sadece basınç veya su seviyesi davranışını tanımlamaktadır. Oysa izotermal olmayan modellerde, sahanın hem basınç, hem de sıcaklık davranışı tanımlanabilmektedir. Bu nedenle çalışmamızda sahanın hem basınç hem de sıcaklık profilindeki dağılımların ortaya konulabilmesi için izotermal olmayan model seçilmiştir.
- ✓ İzotermal olmayan akış modeli, kütle korunum denklemi ile ısı taşınım denkleminin birlikte çözülmesiyle elde edilir. Kütle ve enerji denklemleri doğrusal olmayan diferansiyel denklemler olduğunda, tümüyle kapalı Newton-Raphson yineleme yöntemi ile birlikte çözümlenmesi gerekmektedir. Bu çözümlemeden sonar, saha parametrelerinin kalibrasyonu için sahadan gelen veriler, modelden elde edilen veriler ile çakıştırma yapılarak rezervuar parametreleri kalibre edilir. Çalışmamızda parametrelerin kalibrasyonu için SAS INSTITUTE INC.JMP 10.0.0 (demo) istatistiki paket programı kullanılmıştır. Model parametre değerlerini kalibre etme amacıyla, program non-lineer regrasyon modülü kullanılarak gerçekleştirilmiştir. İzotermal olmayan akış modeli ile ölçüm verileri çalıştırılması hem basınç, hem de sıcaklık verilerini birlikte veya yalnızca basınç ve yalnızca sıcaklık verileri ile yapılabilmektedir. Ancak, Kütahya-Simav sahasında yapılan etkileşim test çalışmalarında, sadece kuyu dibi basınç verileri kaydedildiğinden çalışmamızda sadece basınç verilerine çakıştırma gerçekleştirilmiş ve çakıştırma neticesinde, tahmin edilen parametre değerleri kullanılarak sıcaklık profil değişimleri hesaplanmıştır.
- ✓ Parametrelerin kalibresi ile modülden model belirsizlikleri de tespit edilir.Kalibre edilmiş model parametreleri ve belirsizlikler sisteme dahil edilerek modelleme sonlandırılır.
- ✓ Jeotermal sistemlerin ileriye yönelik performans tahminleri dört aşamalı bir işlemi içermektedir. Bunlar:

a) Modellerin oluşturulmasında saha verilerinin yeterli sayıda ve güvenilirlikte toplanması,

b) Bu veriler ile modelin oluşturulması ve bu modelin kalibre edilmesi,

c) Model kalibrasyonu ile birlikte ölçüm ve model arasındaki belirsizliklerin modele dahil edilmesi,

d) Kalibre edilmiş model ile çeşitli üretim/re-enjeksiyon senaryoları altında sistemin çalıştırılmasıdır.

Bu kapsamda, Kütahya-Simav jeotermal sahasında gerçekleştirilen etkileşim test verileri dikkate alınarak model oluşturulmuş, model parametreleri kalibre edilmiş ve belirsizlikler tanımlanmıştır. Sistemin çalıştırılmasındare-enjeksiyon senaryolarının dahil edilebilmesi için, 0,002 $m^3$/s re-enjeksiyon ilavesi ile model oluşturulmuştur.

- ✓ Sahanın yıllık üretime karşılık nasıl basınç davranışı sergileyeceği amacıyla model yıllık hale getirilmiştir. Daha sonra, sahadan kış aylarında şehir ısıtmacılığı nedeniyle daha fazla akışkana ihtiyaç duyulması dikkate alınarak, yıllık üretim planlaması yapılmış ve bu üretime karşılık sahadaki basınç ve sıcaklık değişimleri irdelenmiştir. Ortalama 312,84 t/h üretim planlamasında, toplam 2.537.798 ton akışkan üretimi gerçekleştirilmiştir. Buna karşılık sahadaki basınç farkı 0,464 bar ve sıcaklık farkı 0,00047°C olmuştur. Bu aşamada herhangi bir re-enjeksiyon ilavesi yapılmamıştır.
- ✓ Re-enjeksiyon ilavesi ile sahanın davranışını incelemek amacıyla %10, %25, %35, %45 ve %48 üretilen akışkan miktarının re-enjekte edilmesi durumunda sahadaki değişimleri ve sahanın yenilenebilir halde kalıp kalmayacağı incelenmiştir. %48 renjeksiyon durumunda basınç farkının 0,002, sıcaklık farkının *-0,45693*°C olduğu gözlemlenmiştir. Yani yıllık 2,5E+06 ton akışkan üretimi ve 1,2E+06 ton akışkanın re-enjekte edilmesi durumunda saha yenilenebilir halde kalmaktadır.
- ✓ 2. Senaryo olarak, 338 gün ortalama 500 ton/h üretime karşı saha davranışı incelenmiş olup, yıllık 4,06E+06 ton akışkan üretiminde re-enjeksiyon yapılmaması halinde sahadaki basınç kaybı -0,727 bar, sıcaklık değişimi

-0,00074ºC olmuştur. Saha %46 oranında üretilen akışkanın re-enjekte edilmesi durumunda, yenilenebilir halde olacağı tespit edilmiştir. %46 oranında re-enjeksiyon yapılması durumunda sıcaklık farkı -0,69879ºC olmuştur.

- ✓ Re-enjeksiyon akışkan entalpisi 260 kJ/kg (60°C) olarak programa dahil edildiğinde, re-enjeksiyon miktarı arttıkça sahada soğumanın arttığı görülmektedir. Bu nedenle re-enjeksiyon noktasının doğru tespiti yapılmalı ve re-enjekte edilen akışkanın yeterli süre ısıtıcı kaya ile teması ve yeterli kimyasal tepkimeye fırsat verecek nokta olmalıdır.
- ✓ Re-enjekte edilen akışkan sıcaklığının saha sıcaklık profili üzerindeki etkisini incelemek amacıyla sisteme re-enjekte edilen akışkan (üretim süresince 63,94 kg/s re-enjeksiyon) sıcaklıklıkları 50, 60 ve 70$^{o}$C olarak işlenmiştir. 50$^{o}$C olması (Entalpi: 211 kJ/kg) durumunda yıllık sıcaklık değişimi *-0,85*; 60$^{o}$C'de (Entalpi: 260 kJ/kg) *-0,69* ve 70$^{o}$C'de *-0,58* olacaktır.

**KAYNAKLAR**


ALKAN, H., SATMAN, A., 1990. A New Lumped Parameter Model for Geothermal Reservoirs in Presence of Carbon Dioxide, Geothermics, 19/5, 469-479.

AKAY E., 2008. Geology and Petrology of the Simav Magmatic Complex (NW A natolia) and its Comparison with the Oligo-Miocene Granitoids in NW Anatolia: Implications on Tertiary Tectonic Evolution of the Region. Int. J. Earth Sci. (Geol Rundsch) (2009) 98:1655-1675.

AKDENİZ, N. ve KONAK, N., 1979. Simav-Emet-Tavşanlı-Dursunbey-Demirci Yörelerinin Jeolojisi, MTA Raporu, 6547, Ankara.

ALPTEKİN, Ö., EZEN, U., UÇER, S.B., 1990. Heat flow, seismicity and the crustal structure of Western Anatolia. International Earth Sciences Congression Aegean Regions, Proceedings Vol-II, İzmir.

AXELSSON, G.; 1989. Simulation of Pressure Response Data from Geothermal Reservoirs by Lumped Parameter Models," 14th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, 257-263, USA.

AXELSSON, G., BJÖRNSSON, G., 1993. Detailed three-dimensional Modeling of the Botn Hydrothermal System in N-Iceland, 18th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, January 26-28, USA.

AXELSSON, G., BJÖRNSSON, G., QUIJANO, J.E., 2005. Reliability of Lumped Parameter Modeling of Pressure Changes in Geothermal Reservoirs, proceedings, World Geothermal Congress, Turkey 24-29 April, Antalya.

BAYRAM, A., F., ŞİMŞEK, Ş., 2005. Hydrogeochemical and Isotopic Survey of Kütahya-Simav Geothermal Field, Proceedings of World Geothermal Congress 2005, Antalya.

BESEME, P., 1966. Simav (Kütahya) Bölgesinin Stratigrafik, Tektonik Ve Hidrojeolojik Etüdü, MTA Raporu, 5, Ankara.

BRINGHAM, W.E., MORROW, W.B., 1974. P/Z Behavior for Geothermal Steam Reservoirs. Paper SPE 4899 presented at the 44th Annual California

Regional Meeting of the Society of Petroleum Engineers, AME, San. Francisco, California.

BODVARSSON, G.S., PRUESS,, K.,, STEFANSSON, V., ELIASSON, E.T., 1984-b. The Krafla Geothermal Field, Iceland: 2. The Generating Capacity of the Field., Water Resources Research, 20 (11), 1531-1544.

BODVARSSON, G.S., PRUESS,, K.,, STEFANSSON, V., ELIASSON, E.T., 1984-c. The Krafla Geothermal Field, Iceland: 3. The Generating Capacity of the Field., Water Resources Research, 20 (11), 1545-1559.

BODVARSSON, G. S., PRUESS, K., LIPPMAN, M. J., 1986. Modeling of Geothermal Systems, Journal of Petroleum Technology, September 1007-1021.

BOURDET, D., 2002. Well Test Analysis: The Use of Advanced Interpretation Models, Elsevier Science B.V., Amsterdam.

BURDEN, R.L., FAIRES, J.D., 1989. Numerical Analysis, 4th Edition, PWS-KENT Publishing Co., Boston.

BOZKURT E., SÖZBİLİR, H., 2004. Tectonic Evolution of the Gediz Graben: Field Evidence for an Episodic, Two Stage Extension in Western Turkey. Geological Magazine 141, 63-79.

BOZKURT E., SATIR, M., BUĞDAYCIOĞLU, Ç., 2011. Surprisingly Young Rb/Sr Ages from The Simav Extensional Detachment Fault Zone, Northern Menderes Massif, Turkey. Journal of Geodynamics 52, 406-431.

CAVAZZA, W., OKAY, A.I., ZATIN, M., 2005. Rapid Early Middle Miocene Exhumation of the Kazdağ Metamorphic Core Complex (Western Anatolia). Int. J. Earth Science 98, 1935-1947

COLLINS A.S., ROBERTSON A.H.F., 1999. Evolution of the Lycian Allochton, Western Turkey, as a North Facing Late Paleozoic to Mesozoic Rift and Passive Continental Margin, Geological Journal 34, 107-138.

ÇEMEN, I., SEYİTOĞLU, G., IŞIK, V., 2002. Extensional Tectonics in Southern Basins and Ranges, United States and in Western Turkey: A Review of

Similarities, Differences and Problems. Geological Society of America, Annual Meeting, Denver, Colorado, USA, Paper 79-1.

ÇOBAN H, KARACIK Z, ÖMER I. E. 2011. Source Contamination and Tectonomagmatic Signals of Overlapping Early to Middle Miocene Orogenic Magmas Associated with Shallow Continental Subduction and Asthenospheric Mantle Flows in Western Anatolia: A Record from Simav (Kütahya) Region Lithos 140-141.

DOGRU, A.H., DIXON, T.N., EDGAR, T.F., 1977. Confidence Limits on the Parameters and Predictions of Slightly Compressible, Single Phase Reservoirs, SPE Journal, February.

ERİŞEN, B., CAN, A. R., YILDIRIM, N., 1989. Simav-Eynal (Kütahya) Jeotermal Alanı EJI ve EJ-II Jeotermal Sondajları Kuyu Bitirme ve Ön Değerlendirme Raporu, MTA Raporu, Ankara.

EARLOUGHER, R.C., 1977.Advances in Well Test Analysis, Society of PetroleumEngineers, Dallas.

ERCAN, T., GÜNAY, E., SAVAŞÇİN, M.Y., 1982. Simav ve Çevresindeki Senozoyik Yaşlı Volkanizmanın Bölgesel Yorumlanması. Bulletin of the Mineral Research and Exploration Institute of Turkey (MTA) 97 (98), 86-101.

ERCAN, T., SATIR, M., SEVİN, D., TÜRKECAN, A., 1996. Evalution of the Recently Conducted Radiometric Age Measurements of the Tertiary and Quartenary-Aged Volcanic Rocks Located in Western Anatolia. Bulletin of the Mineral Research and Exploration Institute of Turkey (MTA) 119, 103-112.

ERSOY, Y., HELVACI, C., SÖZBİLİR, H., 2010. Tectono-stratigraphic Evolution of the NE-SW- Trending Superimposed Selendi Basin: Implication for Late Cenozoic Crustal Extension in Western Anatolia. Tectonophysics 488, 210-232.

EYİDOĞAN, H., JACKSON, J., 1985. A Seismological Study of Normal Faulting in the Demirci, Alaşehir and Gediz Earthquakes of 1967-70 in Western Turkey. Implications for the Nature and Geometry of Deformation in the

Continental Crust. Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society, London, 81. 569-607.

GEMİCİ, Ü., TARCAN G., 2002. Hydrogeochemistry of the Simav Geothermal Field, Western Anatolia, Turkey. Elsevier Journal of Volcanology and Geothermal Research, 116, 215-233.

KONUKSAL, R., 2007. Boyutsuz Rezervuar Modellerinin Numeric Olarak Çözümlenmesi, BSc. Thesis, İTÜ, Türkiye.

LEE, J., 1982 Well Testing, Society of petroleum Engineers of AIME, New York

OBERHANSLI, R., CANDAN, O., DORA, O. Ö., DURR, S., 1997. Eclogites within the Menderes Massif, Western Turkey. Lithos 41, 135-150.

OKAY, A.I., SATIR M., MALUSKI H. (1996). Paleo and Neo-Tethyan Events in Northwestern Turkey: Geologic and Geochronologic Constraints. In: Yin A, Harrison M (eds) The Tectonic Evolution of Asia, Cambridge University Press, Cambridge pp 420-441.

OKAY, A.I, HARIS, N.B.W., KELLEY, S.P., 1998. Exhumation of a Blue-Schist Along a Tethyan Suture in Northwest Turkey. Tectonophysics 285: 275-299.

OKAY, A.I., 2004. Tectonics and High Pressure Metamorphism in Northwest Turkey 32nd Geological Congress. Field Trip Guide Book, İstanbul.

OKAY, A.I, TANSEL, I., TÜYSÜZ, O., 2005. Obduction, Subduction and Collision as Reflected in the Upper Cretaceous-lower Tertiary Sedimentary Record of Western Turkey. Geol Mag 138: 117-142.

OKAY A.I., 2007. The Tavşanlı Zone-the Subducted Northern Margin of the Taurides Colloquimon Menderes Massif, Extended Abstract 34-38.

BELLO, O.A. 2013. Simav ve Yakın Çevresi Jeotermal Suların Hidrojeolojik, Hidrojeokimyasal ve İzotop Jeokimyasal Özellikleri, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, s61, Isparta.

OLIVER, D.S., HE, N., REYNOLDS, A.C., 1998, Conditioning Permeability Fields to Pressure Data, 5 th European Conference on the Mathematics of Oil Recovery, Leoben, Austria.

ONUR. M., SARAK, H., TÜREYEN, Ö.İ., ÇINAR, M., SATMAN, A., KORKMAZ, E.D., 2008 Düşük Sıcaklıklı Jeotermal Rezervuarların Akışkan ve Isı Üretim Davranışlarının Tank Modelleriyle Modellenmesi, Tubitak Projesi.

ONUR, M., SARAK, H., TÜREYEN, Ö. İ., ÇINAR, M., SATMAN, A., 2008: A New Non-İsothermal Lumped-Parameter Model for Low Temperature Liquid Dominated Geothermal Reservoirs And its Applications, 33rd Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, Stanford, California, January 28-30.

ONUR, M., 2008 Jeotermal Rezervuarlarında Kuyu Basınç Testleri ve Analizi, Jeotermal Enerji Semineri.

ONUR, M., AKSOY, N., SERPEN, U., SATMAN, A.,2005 "Analysis of Well Tests in Balcova-NarlıdereGeothermal System, Turkey", paper 1131 presented at the 2005 World Geothermal Congress, 24-29 April, Antalya, Turkey.

ONUR, M., REYNOLDS, A.C., 1989. New Approach to Constructiong Derivative Type Curves, SPE Formation Evaluation, March

ÖNGÜR, T., 2004. Simav Jeotermal Alanının Kapasitesi: Jeoloji Değerlendirmesi, Ege Enerji A.Ş.

ÖZEN, N., 1988. Kütahya Simav Çitgöl-Naşa-Hüsüm-Eynal-Semerköy Alanları Jeotermal Enerji Aramaları Rezistivite Etüdü, MTA Raporu, 8524.

ÖZTÜRK, A., 2010. Sıvı Jeotermal Sahalar için Tank Modelleri Kullanılarak İleriye Yönelik Basınç Performanslarındaki belirsizliklerin Değerlendirilmesi BSc. Thesis, İ.T.Ü, İstanbul.

PALABIYIK, Y., 2006. Kütahya-Simav Jeotermal Sahasının Jeokimyasal Değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ, İstanbul.

PURVIS M, ROBERTSON AHF., 2004. A pulsed extension model for the Neogene-Recent E-W trending Alaşehir Graben and the NE-SW trending Selendi and Gördes Basins, Western Turkey, Tectonophysics 391:371-201.

RING, U., COLLINS, A.S., 2005. U-Pb sims dating of synkinematic granites: timing of corecomplex formation in the northern Anatolide belt of Western Turkey. Journal of the Geological Society, 162, 289-298, London.

SARAK, H., 2004. Düşük sıcaklıklı jeotermal rezervuarlar için boyutsuz rezervuar modelleri, PhD Thesis, İTÜ, İstanbul.

SARAK, H, ONUR, M., SATMAN, A., 2005. Lumped- Parameter Models for Low-Temperature Geothermal Reservoirs and Their application, Geothermics, 34, 728-755.

SEYİTOĞLU, G., 1997. The Simav Graben: An example of young E-W trending structures in the late Cenozoic extensional system of western Turkey. Tr J. of Earth Sciences 6 (1997) 135-141 (TÜBİTAK).

SEYİTOĞLU G., IŞIK V., ÇEMEN İ., 2004. Complete Tertiary exhumation history of the Menderes Massif, Western Turkey: an alternative working hypothesis. Terra Nova 16/6: 358-364.

SCHILTHUIS, R.J., 1936 Active Oil and Reservoir Energy, Trans., AIME 118, 37.

STEAM TABLES, 1967. Thermodynamic Properties of Water and Steam Viscosity of Water and Steam Thermal Conductivity of Water and Steam, ST Martin's Press, New York.

ŞENGÖR AMC, YILMAZ Y. 1981. Tethyan Evolution of Turkey; a Plate Tectonic Approach. Tectonophysics 75: 181-241.

TÜREYEN, Ö. İ., ONUR, M. and SARAK, H., 2009: A Generalized Nonisothermal Lumped-Parameter Model for Liquid Deominated Geothermal Reservoirs, 34$^{th}$ Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, February 9-11, Stanford, California.

URAL, R., 1976. Simav ve Kıravadi Ovaları Hidrojeolojik Etüd Raporu, DSİ Genel Müdürlüğü, Ankara.

YILMAZ, Y., 1989. An approach to the Origin of Young Volcanic Rocks of Western Turkey. In: Tectonic Evaluation of Tethyan Regions 159-189. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.

YILMAZ, Y., 2000. When did the Western Anatolia Grabens Begin to Develop? In: Tectonics and Magmatism in Turkey and the Surrounding Area. Geological Society London Special Publications, 173, 333-384.

YÜCEL, B., COŞKUN, B., DEMİRCİ, S., YILDIRIM, N., 1983. Simav (Kütahya) Yöresinin Jeolojisi ve Jeotermal Enerji Olanakları, MTA Raporu, 8219, Ankara.

ZESCHKE, G., 1954. Der Simav Graben und Seine Gestine-Bulletin of the Geological Society of Turkey. 5. 179-189.

WHITING, R.L., RAMEY, H.J., 1969: Application of Material and Energybalance to Geothermal Steam Production, Journal of Petroleum Technology, July, 893-900.

## ÖZGEÇMİŞ

1969 yılında Erzurum-Tortum'da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Tortum'da tamamladı. 1991 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü'nü bitirdi. 1995 yılında Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Maden Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans öğrenimini tamamladı. 1993-1997 Yılları arasında Çukurova Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümünde Araştırma Görevlisi olarak görev yaptı. 1997 yılından beri MTA Genel Müdürlüğünde Mühendis olarak görev yapmaktadır. Evli ve 2 çocuk babasıdır.