



**İSKENDERUN TEKNİK**  
ÜNİVERSİTESİ

**YÜKSEK  
LİSANS  
TEZİ**

**JEOTERMAL KUYULARDA  
SİRKÜLASYONLA EŞZAMANLI  
SICAKLIK DAĞILIM  
MODELLENMESİ**

**Seyfullah Sinan ATEŞ**

**PETROL VE DOĞALGAZ MÜHENDİSLİĞİ  
ANABİLİM DALI**

**MAYIS 2018**



**JEOTERMAL KUYULARDA SİRKÜLASYONLA EŞZAMANLI SICAKLIK  
DAĞILIM MODELLENMESİ**

**Seyfullah Sinan ATEŞ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
PETROL VE DOĞALGAZ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MAYIS 2018**

Seyfullah Sinan ATEŞ tarafından hazırlanan "JEOTERMAL KUYULARDA SİRKÜLASYONLA EŞZAMANLI SICAKLIK DAĞILIM MODELLENMESİ" adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile İskenderun Teknik Üniversitesi Petrol Ve Doğalgaz Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

**Danışman:** Dr. Öğr. Üyesi Bayram Ali MERT

Petrol Ve Doğalgaz Mühendisliği Anabilim Dalı, İskenderun Teknik Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.



**Başkan:** Prof. Dr. Ergül YAŞAR

Petrol Ve Doğalgaz Mühendisliği Anabilim Dalı, İskenderun Teknik Üniversitesi

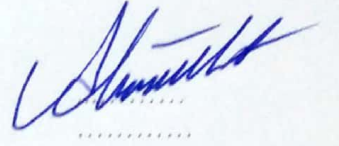
Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....  
.....

**Üye:** Dr. Öğr. Üyesi Bayram Ali MERT

Petrol Ve Doğalgaz Mühendisliği Anabilim Dalı, İskenderun Teknik Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.



**Üye:** Dr. Öğr. Üyesi Ahmet Ali SERTKAYA

Makine Mühendisliği Enerji Anabilim Dalı, Selçuk Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.



Tez Savunma Tarihi: 22/05/2018

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....  
Doç. Dr. Tolga DEPCİ

Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü V.



## ETİK BEYAN

İskenderun Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez üzerinde Yükseköğretim Kurulu tarafından hiçbir değişiklik yapılamayacağı için tezin bilgisayar ekranında görüntülendiğinde asıl nüsha ile aynı olması sorumluluğunun tarafıma ait olduğunu,
- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.



Seyfullah Sinan ATEŞ

22/05/2018

JEOTERMAL KUYULARDA SİRKÜLASYONLA EŞZAMANLI SICAKLIK DAĞILIM  
MODELENMESİ  
(Yüksek Lisans Tezi)

Seyfullah Sinan ATEŞ

İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Mayıs 2018

ÖZET

Jeotermal kuyularda sıcaklık dağılımının bilinmesi, sondaj operasyonunun tasarımı ve yönetilmesi açısından önem arz etmektedir. Yüksek sıcaklık sondaj sıvısının performansını azaltmakta bu durum ise birçok sondaj problemini beraberinde getirmektedir. Ayrıca, sondaj sıvısındaki ısıl genleşmelerden dolayı yüksek pompa güçlerine ihtiyaç duyulmakta, böylelikle diğer tüm ekipmanlarda istenmeyen arızalar ortaya çıkmaktadır. Bu durum jeotermal kaynak içeren kuyuda kaçınılmaz olmaktadır. Dolayısıyla, oluşabilecek risklere karşı önlem almak ve kuyunun enerji fizibilitesini doğru bir tahminle çıkarabilmek için kuyu derinliği boyunca sıcaklık dağılımının bilinmesi önemlidir. Bu çalışmada, delme anında çamur giriş-çıkış sıcaklıklarından faydalanılarak kuyu dibi sıcaklığını doğru tahmin etmek için ısı transferi prensiplerine dayanan MATLAB programlama dilinde bir yazılım geliştirilmiştir. Kuyu içi sıcaklık dağılımının bulunması için Delphi programlama dilinde bir yazılım geliştirilmiş ve iki yazılım birbirlerini destekleyecek şekilde koordine edilmiştir. Formülasyon ve yazılımların akışı açıklanmıştır. Gerçek bir kuyudan alınan çamur sıcaklık verileri kullanılarak delme işlemi simüle edilmiş ilerlenen derinliklerde ki kuyu dibi sıcaklıkları tahmin edilmiştir. Tahminler ve gerçek değerlerin karşılaştırması ile bir takım ısı transferi yaklaşımlarında bulunulmuştur. Elde edilen sonuçlara göre kuyu içerisinde radyal yönde düzgün bir sıcaklık dağılımı olduğu gözlenmiştir. Kuyu girişinde belli bir derinlikten sonra sıcaklık artışının kararlı bir hal aldığı gözlenmiştir. Ayrıca Peclet (Pe) sayısının ısı transferinde önemli bir rol oynadığı tespit edilmiştir. Akış karmaşıklıklarından dolayı sıcaklık dağılımında bir değişiklik olup olmadığının belirlenebilmesi için ANSYS programı kullanılarak bir akış durumu tasarlanmış ve incelenmiştir. Kuyu uzunluk ölçeğine göre akış karmaşası oluşturan geometrilerin uzunluk ölçeklerinin çok küçük olmasından dolayı akış kaynaklı sıcaklık dağılımının çok fazla değişmediği ve dolayısıyla ısı transferi hesabına dayanan sıcaklık dağılımı hesabı yaklaşımının kabul edilebilir olduğu sonucuna varılmıştır. Çalışma içerisinde ilgili literatürden çok sayıda çalışma incelenmiş ve özetlenmiştir. İlgili tekniğin teorisine değinilmiş ve gelecek çalışmalara yönelik öneri ve düşüncelere yer verilmiştir. Gelecekte çok fazlı Newtonian olmayan akışlar ve farklı toprak sıcaklık değişim senaryoları için daha detaylı sayısal analizler gerçekleştirilebilir.

Anahtar Kelimeler : e-NTU, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği, Peclet Sayısı, Jeotermal Kuyularda Sıcaklık Dağılımı, Sonlu Farklar Yöntemi

Sayfa Adedi : 116

Danışman : Dr. Öğr. Üyesi Bayram Ali MERT

TEMPERATURE DISTRIBUTION MODELING IN GEOTHERMAL WELLBORE  
DURING CIRCULATION  
(M. Sc. Thesis)

Seyfullah Sinan ATEŞ

ISKENDERUN TECHNICAL UNIVERSITY  
ENGINEERING AND SCIENCE INSTITUTE

May 2018

ABSTRACT

Knowing temperature distribution in geothermal wells is important for design and management of the drilling operation. High temperatures reduce performance of drilling mud and it brings about many drilling problems. Also, high pumping power values are required due to the thermal expansion of the drilling fluid which leads to undesirable failures on all other equipment. This case is inevitable in geothermal wells. Therefore, it is important to know the temperature distribution along well depth in order to take precautions against possible risks and to estimate the energy feasibility accurately. In this study, a software was developed in MATLAB coding language based on heat transfer principles to accurately estimate the bottomhole temperature of well using the inlet-outlet mud temperatures while drilling. For the determination of the temperature distribution in the well, a software in Delphi coding language was developed and the two software were put in coordination in order to support each other. By using mud temperature data from an actual well, drilling was simulated and drilling temperatures were estimated along the well depth. A number of heat transfer approaches have been found with the comparison of estimates and actual values. It is observed that a uniform temperature distribution exists in radial direction according to the obtained results. It is also observed that temperature increase becomes steady after a certain depth around the top of well. Also it is detected that the Peclet ( $Pe$ ) number plays an important role in heat transfer. A flow case was designed and investigated by using ANSYS software in order to determine whether a change occurs in the temperature difference according to the flow disturbances. It is concluded that temperature distribution does not change significantly due to the flow disturbances because of the small length scales of the geometries that disturb the flow comparing to the length scale of the well and it is concluded that temperature distribution calculation approach based on the heat transfer principles is acceptable. A number of references from the related literature are examined and summarized in the study. The theory of the related technique is mentioned and ideas and propositions for future studies are provided. More elaborate computational numerical analyses can be conducted for multi-phases non-Newtonian flows and different soil temperature gradient scenarios in the future.

Key Words : e-NTU, Computational Fluid Dynamics, Peclet Number, Temperature Difference in Geothermal Wells, Finite Difference Method  
Page Number : 116  
Supervisor : Assist. Prof. Dr. Bayram Ali MERT

## TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın hazırlanmasında yardım, destek ve tecrübelerini esirgemeyen danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Bayram Ali MERT 'e, hayatımın her safhasında bana destek olan ve bilim yolunda yolumu aydınlatan kıymetli babam Dr. Öğr. Üyesi Ali ATEŞ'e bu çalışmanın her safhasında ve özellikle sayısal çözüm metotları ve bilgisayar programlama konusunda yapmış olduğu yardım ve katkılarından dolayı ve Arő. Gör. Eyüp CANLI 'ya sağladığı değerli katkılardan dolayı teőekkürü bir borç bilirim.

Bu çalışmanın tamamlanmasında manevi destek veren ve sabır gösteren anneciğime ayrıca teşekkür ederim.



**İÇİNDEKİLER**

	<b>Sayfa</b>
ÖZET .....	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER .....	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	x
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xv
1. GİRİŞ.....	1
2. JEOTERMAL SONDAJ TEKNİĞİ.....	4
3. TEMEL ISI TRANSFERİ .....	15
3.1. İletim (Kondüksiyon).....	16
3.2. Taşınım (Konveksiyon).....	19
3.2.1. Taşınım Sınır Tabakası.....	23
3.2.2. Laminer ve Türbülanslı Akış.....	25
3.3. Bazı Boyutsuz Sayılar .....	27
3.4. Paralel ve Zıt Akışlı Isı Değiştiricileri .....	29
4. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR .....	31
5. MATERYAL VE METOD .....	36
5.1. Materyal .....	36
5.2. Metod .....	37
5.2.1. Fiziksel Model.....	38
5.2.2. Problemin Tanımı .....	42



	<b>Sayfa</b>
5.2.3. Formülasyon.....	43
5.2.4. Sayısal Çözüm.....	46
5.2.5. Problemin FLUENT Paket Programı Uygulaması .....	61
6. ARAŞTIRMA BULGULARI .....	74
7. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	111
KAYNAKLAR .....	112
ÖZGEÇMİŞ .....	115
DİZİN .....	116

## ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 5.1. $k$ - $\varepsilon$ model sabitleri .....	73
Çizelge 6.1. Değişik kuyu derinlikleri ve değişik giriş-çıkış sıcaklıkları için hesaplanan rezervuar sıcaklıkları .....	74
Çizelge 6.2. 1000 m derinliğindeki kuyu için hesaplanan rezervuar sıcaklıkları .....	74



## ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Bir jeotermal kuyu sondaj kesiti .....	11
Şekil 2.2. Jeotermal kuyu sondaj çamuru sirkülasyonu .....	12
Şekil 3.1. Silindirik formda iletimle ısı transferi .....	16
Şekil 3.2. Düzlem duvarda iletimle ısı transferi .....	18
Şekil 3.3 Laminer akış .....	20
Şekil 3.4. Türbülanslı Akış .....	20
Şekil 3.5. Taşınım ile ısı transferi sınır tabakası .....	21
Şekil 3.6. Kayma gerilmesi .....	22
Şekil 3.7. Düz levha üzerinde hız sınır tabakası .....	24
Şekil 3.8. Sabit sıcaklıkta düz levha üzerinde ısı sınır tabaka .....	25
Şekil 3.9. Akış rejimleri ve sınır tabaka .....	26
Şekil 3.10 Akışkan katman boyunca ısı transferi .....	27
Şekil 3.11. Paralel zıt yönlü akışlı ısı değiştiricisi .....	29
Şekil 5.1. Sondaj sıvısının kuyudaki dolaşımını gösteren kuyu modeli .....	37
Şekil 5.2. Tek geçişli paralel ve zıt akışlı ısı değiştirici prensip şeması .....	39
Şekil 5.3. İç içe geçmiş ortak eksenli borular; paralel ve ters akışlı, tek geçişli ısı değiştiricisi örneği .....	41
Şekil 5.4. Jeotermal kuyu için oluşturulan matematik modelin şematik diyagramı .....	42
Şekil 5.5. Düğüm noktası sistemi .....	46
Şekil 5.6. Kuyu katı modelinde girişlere yukarıdan bakış (orijin tarafı z eksenine doğrudur) .....	63
Şekil 5.7. 100 m derinlikte yer alan daralma basamağının yandan görünüşü .....	63
Şekil 5.8. Kuyu dibine yerleştirilen nozzle parçası ve önceki iki kısmın saydam görüntüleri .....	64

Şekil 5.9. Kuyu giriş ve çıkışının bulunduğu yüzeydeki ağ yapılandırması .....	66
Şekil 5.10. Eksenel doğrultuda ağ yapısının üç bölümü .....	67
Şekil 5.11. Kuyu dibi hacim içi ağ dağılımını gösterir eksenel kesit .....	68
Şekil 6.1. 500 m derinliğindeki kuyuda sıcaklık dağılımı grafiği ( $T_g=35^{\circ}\text{C}$ , $T_{\phi}=40^{\circ}\text{C}$ , $T_{rez.}=47.55^{\circ}\text{C}$ ) .....	75
Şekil 6.2. 500 m derinlikteki kuyunun ilk 50 metresinde sıcaklık dağılımı grafiği ( $T_g=35^{\circ}\text{C}$ , $T_{\phi}=40^{\circ}\text{C}$ , $T_{rez.}=47.55^{\circ}\text{C}$ ) .....	76
Şekil 6.3. 500 m derinlikteki kuyunun son 50 metresinde sıcaklık dağılımı grafiği ( $T_g=35^{\circ}\text{C}$ , $T_{\phi}=40^{\circ}\text{C}$ , $T_{rez.}=47.55^{\circ}\text{C}$ ) .....	77
Şekil 6.4. 750 m derinliğindeki kuyuda sıcaklık dağılımı grafiği ( $T_g=45^{\circ}\text{C}$ , $T_{\phi}=48^{\circ}\text{C}$ , $T_{rez.}=52.50^{\circ}\text{C}$ ) .....	78
Şekil 6.5. 750 m derinlikteki kuyunun ilk 50 metresinde sıcaklık dağılımı grafiği ( $T_g=45^{\circ}\text{C}$ , $T_{\phi}=48^{\circ}\text{C}$ , $T_{rez.}=52.50^{\circ}\text{C}$ ) .....	78
Şekil 6.6. 750 m derinlikteki kuyunun son 50 metresinde sıcaklık dağılımı grafiği ( $T_g=45^{\circ}\text{C}$ , $T_{\phi}=48^{\circ}\text{C}$ , $T_{rez.}=52.50^{\circ}\text{C}$ ) .....	79
Şekil 6.7. 1000 m derinliğindeki kuyuda sıcaklık dağılımı grafiği ( $T_g=52^{\circ}\text{C}$ , $T_{\phi}=55^{\circ}\text{C}$ , $T_{rez.}=59.52^{\circ}\text{C}$ ) .....	79
Şekil 6.8. 1000 m derinlikteki kuyunun ilk 50 metresinde sıcaklık dağılımı grafiği ( $T_g=52^{\circ}\text{C}$ , $T_{\phi}=55^{\circ}\text{C}$ , $T_{rez.}=59.52^{\circ}\text{C}$ ) .....	80
Şekil 6.9. 1000 m derinlikteki kuyunun son 50 metresinde sıcaklık dağılımı grafiği ( $T_g=52^{\circ}\text{C}$ , $T_{\phi}=55^{\circ}\text{C}$ , $T_{rez.}=59.52^{\circ}\text{C}$ ) .....	80
Şekil 6.10. 1250 m derinliğindeki kuyuda sıcaklık dağılımı grafiği ( $T_g=48^{\circ}\text{C}$ , $T_{\phi}=60^{\circ}\text{C}$ , $T_{rez.}=78.14^{\circ}\text{C}$ ) .....	81
Şekil 6.11. 1250 m derinlikteki kuyunun ilk 50 metresinde sıcaklık dağılımı grafiği ( $T_g=48^{\circ}\text{C}$ , $T_{\phi}=60^{\circ}\text{C}$ , $T_{rez.}=78.14^{\circ}\text{C}$ ) .....	81
Şekil 6.12. 1250 m derinlikteki kuyunun son 50 metresinde sıcaklık dağılımı grafiği ( $T_g=48^{\circ}\text{C}$ , $T_{\phi}=60^{\circ}\text{C}$ , $T_{rez.}=78.14^{\circ}\text{C}$ ) .....	82
Şekil 6.13. 1500 m derinliğindeki kuyuda sıcaklık dağılımı grafiği ( $T_g=50^{\circ}\text{C}$ , $T_{\phi}=67^{\circ}\text{C}$ , $T_{rez.}=92.72^{\circ}\text{C}$ ) .....	82
Şekil 6.14. 1500 m derinlikteki kuyunun ilk 50 metresinde sıcaklık dağılımı grafiği ( $T_g=50^{\circ}\text{C}$ , $T_{\phi}=67^{\circ}\text{C}$ , $T_{rez.}=92.72^{\circ}\text{C}$ ) .....	83

Şekil 6.15. 1500 m derinlikteki kuyunun son 50 metresinde sıcaklık dağılımı grafiği ( $T_g=50$ °C, $T_ç=67$ °C, $T_{rez.}=92.72$ °C) .....	83
Şekil 6.16. 1000 m derinliğindeki kuyuda sıcaklık dağılımı grafiği ( $T_g=40$ °C, $T_ç=43$ °C, $T_{rez.}=47.52$ °C) .....	84
Şekil 6.17. 1000 m derinlikteki kuyunun ilk 50 metresinde sıcaklık dağılımı grafiği ( $T_g=40$ °C, $T_ç=43$ °C, $T_{rez.}=47.52$ °C) .....	84
Şekil 6.18. 1000 m derinlikteki kuyunun son 50 metresinde sıcaklık dağılımı grafiği ( $T_g=40$ °C, $T_ç=43$ °C, $T_{rez.}=47.52$ °C) .....	85
Şekil 6.19. 1000 m derinlikteki kuyunun ilk 50 metresinde sıcaklık dağılımı grafiği ( $T_g=40$ °C, $T_ç=45$ °C, $T_{rez.}=52.55$ °C) .....	85
Şekil 6.20. 1000 m derinlikteki kuyunun son 50 metresinde sıcaklık dağılımı grafiği ( $T_g=40$ °C, $T_ç=45$ °C, $T_{rez.}=52.55$ °C) .....	86
Şekil 6.21. 1000 m derinlikteki kuyunun ilk 50 metresinde sıcaklık dağılımı grafiği ( $T_g=40$ °C, $T_ç=50$ °C, $T_{rez.}=65.12$ °C) .....	86
Şekil 6.22. 1000 m derinlikteki kuyunun son 50 metresinde sıcaklık dağılımı grafiği ( $T_g=40$ °C, $T_ç=50$ °C, $T_{rez.}=65.12$ °C) .....	87
Şekil 6.23. 1000 m derinliğindeki kuyuda sıcaklık dağılımı grafiği ( $T_g=40$ °C, $T_ç=55$ °C, $T_{rez.}=77.69$ °C) .....	87
Şekil 6.24. 1000 m derinlikteki kuyunun ilk 50 metresinde sıcaklık dağılımı grafiği ( $T_g=40$ °C, $T_ç=55$ °C, $T_{rez.}=77.69$ °C) .....	88
Şekil 6.25. 1000 m derinlikteki kuyunun son 50 metresinde sıcaklık dağılımı grafiği ( $T_g=40$ °C, $T_ç=55$ °C, $T_{rez.}=77.69$ °C) .....	88
Şekil 6.26. 1000 m derinliğindeki kuyuda sıcaklık dağılımı grafiği ( $T_g=50$ °C, $T_ç=53$ °C, $T_{rez.}=57.52$ °C) .....	89
Şekil 6.27. 1000 m derinlikteki kuyunun ilk 50 metresinde sıcaklık dağılımı grafiği ( $T_g=50$ °C, $T_ç=53$ °C, $T_{rez.}=57.52$ °C) .....	89
Şekil 6.28. 1000 m derinlikteki kuyunun son 50 metresinde sıcaklık dağılımı grafiği ( $T_g=50$ °C, $T_ç=53$ °C, $T_{rez.}=57.52$ °C) .....	90
Şekil 6.29. 1000 m derinlikteki kuyunun ilk 50 metresinde sıcaklık dağılımı grafiği ( $T_g=50$ °C, $T_ç=55$ °C, $T_{rez.}=62.55$ °C) .....	90
Şekil 6.30. 1000 m derinlikteki kuyunun son 50 metresinde sıcaklık dağılımı grafiği ( $T_g=50$ °C, $T_ç=55$ °C, $T_{rez.}=62.55$ °C) .....	91
Şekil 6.31. 1000 m derinlikteki kuyunun ilk 50 metresinde sıcaklık dağılımı grafiği ( $T_g=50$ °C, $T_ç=60$ °C, $T_{rez.}=75.12$ °C) .....	91

Şekil 6.32. 1000 m derinlikteki kuyunun son 50 metresinde sıcaklık dağılımı grafiği ( $T_g=50$ °C, $T_ç=60$ °C, $T_{rez.}=75.12$ °C) .....	92
Şekil 6.33. 1000 m derinliğindeki kuyuda sıcaklık dağılımı grafiği ( $T_g=50$ °C, $T_ç=65$ °C, $T_{rez.}=87.69$ °C) .....	92
Şekil 6.34. 1000 m derinlikteki kuyunun ilk 50 metresinde sıcaklık dağılımı grafiği ( $T_g=50$ °C, $T_ç=65$ °C, $T_{rez.}=87.69$ °C) .....	93
Şekil 6.35. 1000 m derinlikteki kuyunun son 50 metresinde sıcaklık dağılımı grafiği ( $T_g=40$ °C, $T_ç=43$ °C, $T_{rez.}=47.52$ °C) .....	93
Şekil 6.36. Pe sayısının tüm kuyu derinliği boyunca sıcaklık dağılımına etkisi, ( $Pe=2$ , Derinlik=500 m, $T_g=50$ °C, $T_ç=65$ °C, $T_{rez.}=87.69$ °C) .....	94
Şekil 6.37. Pe sayısının ilk 50 m kuyu derinliğinde sıcaklık dağılımına etkisi, ( $Pe=2$ , Derinlik=500 m, $T_g=50$ °C, $T_ç=65$ °C, $T_{rez.}=87.69$ °C) .....	95
Şekil 6.38. Pe sayısının son 50 m kuyu derinliğinde sıcaklık dağılımına etkisi, ( $Pe=2$ , Derinlik=500 m, $T_g=50$ °C, $T_ç=65$ °C, $T_{rez.}=87.69$ °C) .....	95
Şekil 6.39. Pe sayısının tüm kuyu derinliği boyunca sıcaklık dağılımına etkisi, ( $Pe=10$ , Derinlik=500 m, $T_g=50$ °C, $T_ç=65$ °C, $T_{rez.}=87.69$ °C) .....	96
Şekil 6.40. Pe sayısının ilk 50 m kuyu derinliğinde sıcaklık dağılımına etkisi, ( $Pe=10$ , Derinlik=500 m, $T_g=50$ °C, $T_ç=65$ °C, $T_{rez.}=87.69$ °C) .....	96
Şekil 6.41. Pe sayısının son 50 m kuyu derinliğinde sıcaklık dağılımına etkisi, ( $Pe=10$ , Derinlik=500 m, $T_g=50$ °C, $T_ç=65$ °C, $T_{rez.}=87.69$ °C).....	97
Şekil 6.42. Pe sayısının tüm kuyu derinliği boyunca sıcaklık dağılımına etkisi, ( $Pe=300$ , Derinlik=500 m, $T_g=50$ °C, $T_ç=65$ °C, $T_{rez.}=87.69$ °C) .....	98
Şekil 6.43. Pe sayısının ilk 50 m kuyu derinliğinde sıcaklık dağılımına etkisi, ( $Pe=300$ , Derinlik=500 m, $T_g=50$ °C, $T_ç=65$ °C, $T_{rez.}=87.69$ °C) .....	98
Şekil 6.44. Pe sayısının son 50 m kuyu derinliğinde sıcaklık dağılımına etkisi, ( $Pe=300$ , Derinlik=500 m, $T_g=50$ °C, $T_ç=65$ °C, $T_{rez.}=87.69$ °C) .....	99
Şekil 6.45. Pe sayısının tüm kuyu derinliği boyunca sıcaklık dağılımına etkisi, ( $Pe=600$ , Derinlik=500 m, $T_g=50$ °C, $T_ç=65$ °C, $T_{rez.}=87.69$ °C) .....	99
Şekil 6.46. Pe sayısının ilk 50 m kuyu derinliğinde sıcaklık dağılımına etkisi, ( $Pe=600$ , Derinlik=500 m, $T_g=50$ °C, $T_ç=65$ °C, $T_{rez.}=87.69$ °C) .....	100
Şekil 6.47. Pe sayısının son 50 m kuyu derinliğinde sıcaklık dağılımına etkisi, ( $Pe=600$ , Derinlik=500 m, $T_g=50$ °C, $T_ç=65$ °C, $T_{rez.}=87.69$ °C) .....	101
Şekil 6.48. Eksenel doğrultuda akışkan hız değişimi .....	102

Şekil 6.49. Eksenel doğrultuda akışkan sıcaklık değişimi .....	103
Şekil 6.50. Eksenel doğrultuda akışkanın türbülans kinetik enerjisi değişimi .....	104
Şekil 6.51. 4 farklı eksenel mesafedeki radyal sıcaklık dağılımı .....	105
Şekil 6.52. 8 farklı eksenel mesafedeki radyal doğrultuda hız dağılımı .....	106
Şekil 6.53. 8 farklı eksenel mesafedeki radyal doğrultuda türbülans kinetik enerjisi dağılımı .....	107
Şekil 6.54. Kuyu giriş bölgesi eşdeğer alanları .....	108
Şekil 6.55. Kuyu basamak seviyesi eşdeğer alanları .....	109
Şekil 6.56. Nozzle bölgesi eşdeğer alanları .....	110

## SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

### Simgeler

### Açıklamalar

<b>a</b>	Ayrıklaştırılmış eşitlik katsayıları
<b>A</b>	Yüzey alanı [ $m^2$ ]
<b>Bi</b>	Biot sayısı
<b>C<sub>p</sub></b>	Sabit basınç özgül ısısı [ $J/kg K$ ]
<b>F</b>	Kuvvet [ $N$ ]
<b>f</b>	Sürtünme faktörü
<b>Fo</b>	Fourier sayısı
<b>g</b>	Yerçekimi ivmesi [ $m/s^2$ ]
<b>Gr</b>	Grashof sayısı
<b>Gz</b>	Graetz sayısı
<b>h</b>	Isıl taşınım katsayısı [ $W/m^2K$ ]
<b>H</b>	Toplam kuyu derinliği [ $m$ ]
<b>k</b>	Isı iletkenlik katsayısı [ $W/mK$ ]
<b>L</b>	Referans uzunluk [ $m$ ]
<b><i>m</i></b>	Kütleli debi [ $kg/s$ ]
<b>Nu</b>	Nusselt sayısı
<b>Pe</b>	Peclet sayısı
<b>Pr</b>	Prantl sayısı
<b>q</b>	Birim alandan ısı akısı (ısı transferi) [ $W/m^2$ ]
<b>r</b>	Radyal koordinat [ $m$ ]
<b>Ra</b>	Rayleigh sayısı
<b>Re</b>	Reynolds sayısı
<b>T</b>	Sıcaklık [ $K, °C$ ]
<b>t</b>	Zaman [ $s$ ]
<b>T<sub>∞</sub></b>	Ortam sıcaklığı [ $K, °C$ ]
<b>u</b>	Eksenel hız bileşeni [ $m/s$ ]



<b>U</b>	Toplam ısı transferi katsayısı [ $W/m^2K$ ]
<b><math>u_{\infty}</math></b>	Serbest akış hızı [ $m/s$ ]
<b>v</b>	Momentum yayılımı [ $m^2/s$ ]
<b>x</b>	Geometrinin karakteristik uzunluğu [ $m$ ]
<b>z</b>	Eksenel koordinat (kuyu derinliği yönü) [ $m$ ]

### Latince Semboller

### Açıklamalar

<b><math>\rho</math></b>	Yoğunluk [ $kg/m^3$ ]
<b><math>\Delta r</math></b>	Radyal adım [ $m$ ]
<b><math>\Delta T</math></b>	Sıcaklık farkı [ $K, ^\circ C$ ]
<b><math>\Delta t</math></b>	Zaman adımı [ $s$ ]
<b><math>\Delta z</math></b>	Derinlik adımı [ $m$ ]
<b><math>\mu</math></b>	Kinematik viskozite [ $kg/m s$ ]
<b><math>\alpha</math></b>	Isıl yayılım katsayısı [ $m^2/s$ ]
<b><math>\beta</math></b>	Isıl genleşme katsayısı
<b><math>\delta</math></b>	Sınır tabaka kalınlığı [ $m$ ]
<b><math>\delta r</math></b>	Radyal konum farkı [ $m$ ]
<b><math>\Delta x</math></b>	Uzunluk farkı [ $m$ ]
<b><math>\delta x</math></b>	Derinlik konum farkı [ $m$ ]
<b><math>\varepsilon</math></b>	Isı değiştiricilerinde ısıl etkenlik sayısı
<b><math>\eta</math></b>	Viskozite katsayısı [ $g \cdot s/cm$ ]
<b>v</b>	Dinamik viskozite [ $m^2/s$ ]
<b><math>\tau</math></b>	Kayma gerilmesi [ $N/m^2$ ]
<b><math>\Phi</math></b>	Disipasyon faktörü

### Alt İndisler

### Açıklamalar

<b>b</b>	Bulk (yığın)
<b>c</b>	Soğuk akışkan
<b>f</b>	Akışkan (fluid)
<b>h</b>	Sıcak akışkan
<b>i</b>	İç taraf

<b>i, j</b>	Düğüm noktaları indisleri
<b>M</b>	Logaritmik ortalama
<b>m</b>	Ortalama
<b>o</b>	Dış taraf
<b>r</b>	Oran
<b>s</b>	Katı yüzey
<b>w</b>	Duvar
$\infty$	Ortalama (akışkan için)

### **Kısaltmalar**

**$\epsilon$ -NTU**

**HAD**

**IDDP**

**MTA**

**PDC**

**SCW**

### **Açıklamalar**

Efficiency Number of Transfer Unit

Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği

Iceland Deep Drilling Project

Maden Tetkik ve Arama

Polycrystalline Diamond Compact

Standing Column Well

## 1. GİRİŞ

Gelişen dünya paralelinde enerjiye olan ihtiyaç gün geçtikçe katlanarak artmaktadır. Bunun yanı sıra insan sağlığına ve çevreye zarar vermeyen enerji türleri de son yüzyılda büyük bir önem kazanmıştır. Jeotermal enerji çevreye etkisi minimum olan yenilenebilir bir enerji türü olmakla tüm dünya ülkelerinde ve özellikle ülkemizde son yıllarda büyük bir önem kazanmıştır.

Konvansiyonel enerji kaynakları dünya enerji ihtiyacını karşılamakta artık yetersiz kalmaktadır. Karbon kökenli yakıtların çevreye verdiği bilinen zararların son yüzyılda hissedilir derecede artması, küresel ısınmaya tetikleme ve bazı ülkelerin ekonomisine getirdiği ciddi külfetler, yenilenebilir enerjinin önemini kat kat arttırmıştır.

Başlıca yenilenebilir enerji kaynakları; güneş enerjisi, rüzgâr enerjisi, dalga (gel-git) enerjisi, jeotermal enerji, hidrolik enerji, bio kütle enerjisi, hidrojen enerjisi olarak sayılabilir. Bu enerji kaynakları arasında jeotermal enerji, hem yenilenebilir hem de sürdürülebilir olmasıyla ön plana çıkmaktadır. Jeotermal enerji ucuz, çevre dostu, yerli ve yeşil bir enerji kaynağıdır.

Türkiye petrol yönünden dışa bağımlı bir ülkedir. Ülkemizde çıkarılan petrol ihtiyacın çok altındadır. Bu da ülke açısından alternatif enerji kaynaklarına yönelmeyi bir zorunluluk haline getirmiştir. Günümüz Türkiye'sinde güneş enerjisi tarlaları ve rüzgar türbinlerine ciddi bir yöneliş vardır. Bununla birlikte jeotermal enerji kaynakları hiçbir zaman önemini yitirmemiş ve yenilenebilir alternatif enerji kaynakları arasında hep ön sıralarda yer almıştır. Çünkü ülkemiz petrole göre jeotermal kaynaklar açısından daha zengindir.

Jeotermal enerji başta elektrik üretimi olmak üzere, sera ve konut ısıtmasında, yol ve kaldırım ısıtmasında, endüstride proses ısısı olarak, balık yetiştirmede, kimyasal madde eldesinde kullanılmaktadır.

Yüksek entalpili jeotermal kaynaklara erişmek için kullanılan yöntem sondajdır. Sondaj operasyonlarında rezervuara yaklaştıkça meydana gelen sıcaklık artışı operasyon ve ekipmanı olumsuz etkilemektedir. Yüksek sıcaklıkta malzemelerin kullanım ömrü azalmakta, bazı malzemeler kullanılamaz hale gelmektedir. Sıcaklığın etkisiyle sondaj çamurunda jelleşmeler meydana gelebilmekte, çamurda su kaybı oluşmaktadır. Yüksek

sıcaklık casing operasyonlarında çimentonun bağ yapısının bozulmasına neden olmakta ve çimentonun dayanıklılığında azalmalar meydana gelmektedir.

Sıcaklık; viskozite, yoğunluk, ısı iletkenlik, ısı gerilmeler gibi maddenin pek çok fiziksel, kimyasal ve dayanım özelliklerini etkileyen önemli bir parametredir. Yukarıda yüksek sıcaklığın neden olabileceği bazı olumsuz etkilere değinilmiştir. Ancak bütün olumsuz etkilerine karşılık yüksek sıcaklık yüksek enerji kaynağı demektir. Yüksek sıcaklığın neden olabileceği problemlerin pek çoğu ileri teknoloji kullanılarak çözülebilir.

Bir jeotermal kuyu sondajında sondaj tamamlandıktan sonra kuyu dibi, rezervuar sıcaklığını tespit etmek oldukça basit ve zahmetsiz bir yöntemdir. Fakat daha sondaj devam ederken kuyu dibi sıcaklığının operasyonel olarak sürekli ölçülebilmesi, saha şartlarında ve eldeki kısıtlı imkânlarla oldukça zordur. Bununla birlikte kuyu dip sıcaklığını önceden bilmek; kullanılacak ekipmanın önceden tespit edilmesine ve sahada hazır tutulmasına, çamur ve ekipmanlarda meydana gelebilecek problemleri öngörmemize ve tedbir almamıza yardımcı olacaktır.

Bunun yanı sıra kuyu profili boyunca yukarıdan aşağıya doğru kuyu içi sıcaklık dağılımını bilmek, kuyunun hangi metresinde ne gibi problemlerle karşılaşabileceğimizi ve çimentolamanın hangi sıcaklık aralığında, kademeli veya kademesiz olarak yapılacağı hakkında öngörüye sahip olmamızı sağlar. Bu sayede belirli sıcaklık aralıkları için hususi çimento hazırlayıp kademeli şekilde çimentolamayı gerçekleştirip mukavemeti yüksek bir çimentolama yapmamıza imkan doğar.

Bu çalışmada öncelikle kuyu dip (rezervuar) sıcaklığını doğru bir şekilde tahmin etmek için bir matematik model oluşturulmuştur. Bu matematik modele uygun olarak geliştirilen bir bilgisayar yazılımı sayesinde, sadece çamur giriş ve çıkış sıcaklıklarının bilindiği durum için dip sıcaklık yüksek bir hassasiyetle tahmin ettirilmiştir. Kuyu dip sıcaklığının yüksek bir doğruluk oranıyla tahmin ettirilmesi ya da hesaplanması yukarıda anlatılan sebeplerle gerekli olduğu gibi kuyu içi sıcaklık dağılımının hesaplanacağı ikinci aşama sayısal çözüm için de önemli sınır şartlarından biridir. Bu nedenle bu ilk yazılım, ikinci aşamadaki sayısal çözüm yazılımına bir basamak teşkil etmektedir.

Kuyu içi sıcaklık dağılımı için ise radyal ve kuyu eksenini doğrultusunda ısı transferinin de dikkate alındığı bir bilgisayar yazılımı geliştirilmiştir. Bunun için geliştirilen sayısal çözüm modelinde “sonlu farklar” metodu kullanılmıştır. Oluşturulan matematik modelde kuyu; sondaj borusu, sondaj borusu metali ve anulus olarak üç bölgeye ayrılmış ve bu üç bölge için oluşturulan enerji denklemleri sayısal olarak çözülmüştür.

özüm sonucu elde edilen veriler bilimsel gerçekler ışığında değerlendirilerek yorumlanmıştır. Elde edilen bulgular daha önce yapılmış olan benzer çalışmalarla karşılaştırıldığında literatüre uygunluk açısından son derece tatmin edici sonuçlara ulaşıldığı saptanmıştır.



## 2. JEOTERMAL SONDAJ TEKNİĞİ

Jeotermal kelimesi anlam olarak, jeo=yer ve termal=ısı kelimelerinin birlikte kullanılmasından oluşturulmuş, yer ısısı anlamına gelen bir sözcüktür (İnternet, 2016). Yer kürenin merkezinde 6000°C ve üzeri bir sıcaklık olduğu göz önüne alındığında, yeryüzünden arzın merkezindeki sıcak kaynağa doğru gidildikçe sıcaklık belirli seviyelerle sürekli artmaktadır (Danışman, 2011). Derinliklere gidildikçe meydana gelen sıcaklık artışına ısı gradyeni denilmektedir. Derinlere gidildikçe meydana gelen bu sıcaklık artışı yaklaşık olarak, her 33 metrede 1 °C olarak gerçekleşmektedir (Danışman, 2011).

İlk çağlardan itibaren insanoğlu sıcak su kaynaklarını temizlenme ve banyo ihtiyaçları için kullanmıştır. Roma imparatorluğunda, imparator ve ülkenin ileri gelenleri volkanik bölgelerdeki, sıcak su kaynaklarının olduğu yerlere hamamlar ve dinlenme yerleri yaptırarak bu sıcak su kaynaklarını insanların kullanımına sunmuşlardır. Önceden bireysel çapta banyo, ısınma ve pişirme amaçlı kullanılan jeotermal enerji; sanayi devriminden sonra gelişim göstermiş ve sanayi, kaplıca, konut ısıtma, tarım ve elektrik üretiminde kullanılmaya başlanmıştır (Sür, 1970).

İlk zamanlarda yer kabuğundaki çatlaklardan sızarak kendi haline yeryüzüne çıkan sıcak sular kullanılmış; XIX. yüzyılda ise jeotermal rezervuarların keşfedilmesi için çalışmalar gerçekleştirilmiş ve ilk jeotermal sondajlar yapılmıştır. Başlangıçta kullanılan sondaj teknikleri ve kullanılan teçhizat petrol sondajında kullanılanlarla aynı olsa da XX. yüzyılın üçüncü çeyreğinden itibaren jeotermal kuyu sondajı teknikleri oluşmaya ve gelişmeye başlamıştır.

Jeotermal enerjiden teknik olarak ilk yararlanmaya başlayan ülke İtalya'dır. Floransa'nın güneyinde Larderello bölgesinde buhardan elektrik enerjisi elde edilmiştir. 1952 yılında Larderello'da üretilen elektrik enerjisi, ülkedeki toplam elektrik gücünün %6'sını oluşturmuştur (Sür, 1970).

İtalya'da buharın yoğunlaştığı doğal buhar kuyularına Toskana bölgesinde yıllardır rastlanmaktadır. Ancak, yüzyıllar önce, bölge insanı buhar kuyularını zararlı olarak gördüklerinden uzun yıllar bu kuyulardan istifade edilememiştir. 1777 yılında Toskana dükününün bir eczacısı bu kuyulardaki sudan borik asidi ayırmayı başardı. O zamanlar için

uzak diyarlardan getirilen ve çok pahalıya mal olan boraks denilen madde borik asidin reaksiyonları sonucu elde edilmekteydi. Sonraki yıllarda bu bölgede borik asit eldesi için girişimlerde bulunulduysa da 1827'ye kadar herhangi bir başarıya ulaşılammıştır. Bu tarihte, bir Fransız kontu olan Francisco Larderel borik asit eldesi için buharın gerekliliğini gündeme getirmiş ve bu konu hakkında çalışmalar başlatarak yeni bir endüstrinin doğuşunu sağlamıştır (Sür, 1970).

Uzun yıllar kimya endüstrisinin çeşitli dallarında kullanılan doğal buhar XIX. yüzyılın sonlarında güç eldesi için de kullanılmaya başlamıştır. 1897 yılında makine kazanlarında hareket elde etmek için doğal buhar kullanılmıştır. 1904 yılında bir makinenin pistonunu hareket ettirmek için doğal buhar kullanılmıştır. Daha sonra 1913 yılında buhardan elektrik üretmek için bir türbin kurulmuş ve doğal buhardan elektrik üretimi sağlanmıştır. Bu yıldan sonra buhardan elektrik üretimi için Larderello'da çeşitli çalışmalar ve yatırımlar yapıldıysa da II. Dünya Savaşında bunların hepsi yerle bir olmuştur. 1945'ten sonra bu tesisler onarılmış ve yeni teknikler kullanılarak yeniden aktif hale getirilmiştir. 1952 yılında 1840 milyon kilowatt, 1960 yılında 1914 milyon kilowattı bulan ve sürekli artan değerlerde elektrik üretimi yapılmıştır. Halen volkanik faaliyetlerin görüldüğü İtalya'da yeni sıcak su kaynaklarına rastlanmaktadır. Günümüzde bölgede, 100'den fazla jeotermal kuyudan yıllık yaklaşık 26 milyon ton buhar üretilmektedir (Sür, 1970).

Gayzerleriyle ünlü olan İzlanda'da da jeotermal enerji yaygın şekilde kullanılmaktadır. 1930 yılında yeraltındaki bu sıcak kaynağın, zaten soğuk bir ülke olan İzlanda'da, seracılık, evlerin ısıtılması, güç eldesi ve borik asit gibi kimyasal maddelerin elde edilmesinde kullanılması teklif edildiyse de o an için bu teklif uygun bulunmamıştır. Ancak, ilerleyen yıllarda Rotorua şehri yakınlarında açılan kuyulardan elde edilen sıcak sularla belediye binası, tiyatro, bazı oteller ve okulların ısınmasında kullanılmıştır. Sonraki yıllarda ise hidroelektrik enerjiden beklenen verimin alınamaması ve artan elektrik ihtiyacıyla birlikte termal enerjiye yönelik hız göstermiştir (Sür, 1970).

İzlanda'nın başkenti Reykjavik'de de jeotermal enerji 1928 yılında beri kullanılmaktadır. Reykjavik civarından elde edilen sıcak sular başlangıçta şehir hastanesi ve okulları ısıtmak için kullanılsa da sonraki yıllarda tüm şehrin ısınması için sistem geliştirilmiştir (Gunnlaugsson, 2003). Bu kapsamda şehrin çevresindeki kuyu sayısı arttırılmış ve hal hazırdaki kuyuların derinlikleri arttırılarak üretimin artırılması amaçlanmıştır. Ülkenin

sahip olduğu iklim itibariyle konut ısıtmasındaki en büyük sorun sıcak suyun nakledilmesi olmuştur. Kuyulardan çıkan sıcak suyun en az ısı kaybıyla evlere ulaştırılabilmesi için borulardan biriktirme tanklarına, binalardaki boru hatlarına kadar tüm taşıma sisteminin yalıtılması gerekmiştir. Bundan dolayı tüm sistemde kullanılan parçalar yalıtımlı malzemeler kullanılarak üretilmiş ve tüm sistem yalıtım malzemeleriyle kaplanmıştır.

Amerika'da ise Kaliforniya eyaletinin the Geysers bölgesi sıcak su kaynaklarıyla meşhurdur. 1846'da ilk kez varlığının farkına varılan sıcak su, 1852 yılında bir kaplıca inşa edilmesiyle kullanılmaya başlanmıştır. Bugün ise şehir ve çevresinde birçok dinlenme tesisi mevcuttur. 1925 yılına kadar bölgede 100 ila 200 metre arası derinliklerde sekiz adet jeotermal kuyusu açılmıştır. Bu kuyuların dip sıcaklıkları yaklaşık olarak 163 – 172 °C arası olarak ölçülmüştür (Sür, 1970).

Türkiye, jeotermal enerji potansiyeli bakımından dünya sıralamasında İtalya'dan sonra birinci sırada yer almaktadır. Jeolojik konumu itibariyle ülkemiz, jeotermal kaynakların üzerinde kurulmuştur. Ülkemiz jeolojik yapısı göz önüne alınarak bakıldığında, jeotermal kaynakların belli bölgelerde yer aldığı, jeotermal sistemlerin genç tektonik ve volkanik faaliyetler sonucu oluştuğu gözlemlenmektedir (Akkuş ve Alan, 2016). Jeotermal kaynaklar özellikle, Batı Anadolu'da, doğudan batıya doğru yerleşen grabenlerin içerisinde yerleşmiştir. Batı Anadolu'daki yüksek jeotermal potansiyele sahip bu bölgelerin oluşumu jeolojik süreç ve unsurların neticesidir.

Batı Anadolu'da gelişen grabenler yüksek sıcaklığa mâlik jeotermal rezervuarlar içerirken, Orta ve Doğu Anadolu orta ve düşük sıcaklıklı jeotermal sahalar içermektedir. Ülkedeki jeotermal sahaların, kuyu ve kaynak sıcaklıkları dikkate alındığında, %88'ini düşük ve orta sıcaklıklı, %12'sini ise sıcaklıkları 287°C'ye ulaşan yüksek sıcaklıklı sahalar oluşturmaktadır (Akkuş ve Alan, 2016). Bu sahalardan elde edilen jeotermal enerji, %12 oranında elektrik üretiminde, %43 oranında konut ve tesis ısıtması gibi ısı eşanjörleriyle ısı üretilen yerlerde, %45'i tarım faaliyetleri ve diğer alanlarda kullanılmaktadır.

Türkiye'de jeotermal çalışmaları, 1960'lı yıllarda MTA'nın envanter belirlemek amacıyla başlattığı çalışmalarla başlamış, zaman içerisinde gerçekleştirilen arama faaliyetlerinde keşfedilen yüksek sıcaklıklı jeotermal sahalar ve elde edilen akışkanlarla birlikte yeni bir boyut kazanmıştır. 1990'lı yıllara kadar jeotermal işleriyle sadece MTA ilgilenmiştir. Bu



yıldan sonra sayısı artan yüksek sıcaklıklı jeotermal sahalar özel teşebbüsler ve belediyelerin de ilgisini çekmiş ve jeotermal enerji üzerine gerçekleştirilen faaliyetlerde artış gerçekleşmiştir. Jeotermale olan ilginin artmasıyla MTA potansiyel belirleme çalışmalarını hızlandırmış ve kaynakları verimli kullanmaya yönelik altyapı çalışmalarıyla veri desteği sağlamıştır. (Özdemir, Yaşar ve Çevik, 2017)

Türkiye, Alp-Himalaya kuşağı üzerinde yer aldığından dolayı, jeotermal enerji bakımından oldukça yüksek bir potansiyele sahiptir. Ülkemiz jeotermal kaynaklarının en yoğun olduğu bölge Batı Anadolu'dur. Bu yoğunlaşmanın nedeni ise jeolojik unsurlar ve süreçlerdir. Orta ve Doğu Anadolu'da ise orta ve düşük sıcaklıklı rezervler yer almaktadır. Türkiye'nin bölgelerine göre bir sıralama yapacak olursak birinci sıraya Ege Bölgesi gelmekte, onu sırasıyla İç Anadolu, Marmara, Doğu Anadolu, Güney Doğu Anadolu, Karadeniz ve Akdeniz bölgeleri izlemektedir.

Türkiye'nin yenilenebilir, temiz, güvenli, çok amaçlı kullanılabilir önemli bir jeotermal enerji potansiyeli vardır. Jeotermal potansiyeli bakımından ülkemiz Dünya ülkeleri arasında ilk sıralarda yer almaktadır.

Ülkemizdeki doğal çıkışların 600 MWt olduğu kabul edilmektedir. Türkiye Cumhuriyeti Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı verilerine göre ülkemiz jeotermal potansiyeli teorik olarak 31.500 MWt'dır. Bu potansiyeli oluşturan sahaların %79'u Batı Anadolu Bölgesinde, %8,5'i Orta Anadolu, %7,5'i Marmara, %4,5'i Doğu Anadolu Bölgesi ve %0,5'i de diğer bölgelerde bulunmaktadır. Ülkemiz jeotermal kaynaklarının %94'ü doğrudan uygulamalarda kullanılan düşük ve orta sıcaklıkta olup, %6'sı dolaylı uygulamalar için uygundur (İnternet, 2017).

2016 yılı itibariyle ülkemizde; elektrik üretimine elverişli saha sayısı 25 adede, elektrik üretimi 820 MWt'a, jeotermal ile ısıtılan seraların alanı 3.931 dönüme, ısıtılan konut sayısı 114.567 adede, görünür ısı kapasitesi 14.000 MWt'a ulaşmıştır (İnternet, 2017).

2017 yılı itibariyle ülkemizde kullanımda olan 1064 MW kurulu güce sahip 40 adet jeotermal enerji santralinden üretilen enerji, birincil enerji kaynakları arasında, toplam kurulu gücün %1,2'sine karşılık gelmektedir. Ayrıca bu yılda, jeotermal enerjiden 5970

GWh elektrik üretilmiş olup elektrik üretimimizin %2,02'si jeotermal kaynaklardan elde edilmiştir (İnternet, 2018).

Jeotermal eskiden sadece sıcak su kaynağı olarak kullanıldığı halde günümüzün gelişen teknolojisiyle birlikte başta elektrik üretimi olmak üzere, konutların ve seraların ısıtılmasında, üretimde proses ısısı olarak, termal banyolarda ısıtma ve şifa kaynağı olarak, kültür balığı çiftliklerinde, kanalizasyon sularından enerji eldesi ve geri dönüşümünde, kaldırımlarda karların eritilmesine kadar çok geniş alanlarda kullanılmaktadır. Jeotermal enerji bu alanlarda tek tek kullanılabilirdiği gibi enerjiyi verimli kullanmak adına birbirine entegre edilmiş sistemler halinde kullanımı da mümkündür ve en yaygın kullanımı da entegre sistemler oluşturur.

Jeotermal enerjinin yeryüzüne ulaşması ve kullanım alanlarına taşınması akışkanlar vasıtasıyla gerçekleşmektedir. Kullanılan akışkanları genellikle ya mineralce zengin yeraltı suları ya da akarsu gibi kaynaklardan alınarak rezervuara enjekte edilen yerüstü suları oluşturmaktadır.

Jeotermal enerjinin nerede kullanılacağı rezervuarın enerjisine, miktarına, basıncına, jeotermal akışkanın sıcaklığına ve hangi fazda olduğu gibi özelliklere bağlıdır. Gaz fazında olmayan veya gaz-sıvı karışımı olan akışkanlardan elektrik eldesi için akışkan türbinlere girmeden önce seperatörlere gelir ve sıvı ve buhar birbirinden ayrılır ya da biraz daha ısıtılarak sıvı fazda olan hacmin de gaz fazına geçmesi sağlanır. Elektrik santralinde türbinleri çeviren ve belirli bir dereceye kadar soğuyan akışkan, sera veya ortam ısıtması gibi entegre bir sistemi ısıtmada kullanılır ve en son rezervuarı beslemek ve enerji kazanması için tekrar rezervuara basılır.

Jeotermalin kaplıca suyu olarak kullanılabilmesi için ise öncelikle içeriğindeki kimyasal bileşiklerin, minerallerin ve radyoaktivitesinin insan vücuduna uygun olması ardından suyun sıcaklığının insan vücuduna uygun seviyelere getirilmesi gerekmektedir.

Yüksek sıcaklığa sahip jeotermal sahaların en önemli ve yaygın kullanım yerleri ise elektrik üretim santralleridir. 180°C ve üzeri sıcaklığa sahip jeotermal sahalar elektrik üretimi için elverişli sayılmaktadır. Günümüzün gelişen teknolojisi ve yeni uygulamalarla birlikte 180°C 'den daha az sıcaklığı olan jeotermal sahalardan da elektrik üretimi

gerçekleştirilebilmektedir. Ayrıca, buharlaşma noktaları düşük olan gazlar kullanılarak 100°C 'nin altındaki sıcaklıklarda elektrik üretimi için çalışmalar yapılmaktadır.

Dünyadaki ilk jeotermal elektrik santrali 1913 yılında kurulan 250 kW güç üretebilen İtalya Larderello'daki santraldir. Ülkemizde ise ilk 1984 yılında Denizli-Sarayköy'e kurulan santralle jeotermalden elektrik üretilmeye başlanmıştır. 17,5 MW kurulu güce sahip bu santralden hala elektrik enerjisi üretimi yapılmaktadır. Ülkemizde, Aydın-Germencik, Aydın-Yılmazköy, Aydın-Salavatlı, Çanakkale-Tuzla, Denizli-Kızıldere, İzmir-Dikili, İzmir-Seferihisar, Manisa-Caferbey ve Kütahya-Simav gibi bilinen jeotermal sahaların toplam potansiyelinin 633 MW olduğu tahmin edilmektedir.

Üretim yapılan jeotermal rezervuarlardan sürekli olarak akışkan kaybolmakta ve rezervuar gittikçe kurumaktadır. Bu durumun önüne geçebilmek için rezervuarın bir kaynak tarafından beslenmesi lazımdır. Jeotermal akışkanların büyük bir bölümünün kaynağını meteorik sular oluşturur. Bu nedenle rezervuarın beslenmesi yağışların miktarına ve şekline bağlıdır. Rezervuarları beslemede bir diğer önemli etkende rezervuardan alınan akışkanların kullanıldıktan sonra reenjeksiyon adı verilen bir yöntemle tekrar rezervuara gönderilmesidir. Bu şekilde enerjisi azalmış akışkanların rezervuarda tekrar ısıtılarak sıcaklığının artması ve enerji yüklü bir şekilde tekrar kullanılabilir hale gelmesi sağlanabilmektedir. Reenjeksiyon rezervuar hayatı için önemli olduğu kadar ekoloji ve canlı hayatı içinde oldukça önemlidir. Reenjeksiyon teknolojisi gelişmeden önce daha tam olarak soğumamış, içinde canlılara zararlı kimyasallar ve mineraller barındıran atık jeotermal sular yakındaki nehirlere veya su havzalarına boşaltılmaktaydı. Bu durum ise bölgedeki canlılara zarar vermekte, birçoğunun ölümüne sebep olmakta, sulama amacıyla kullanılan akarsularda sulanan tarla ve bahçelerdeki bitkilere zarar vermekte idi. Reenjeksiyon aynı zamanda genellikle tektonik bölgelerde bulunan jeotermal rezervuarların kurummasından kaynaklı tektonik hareketliliğin tetiklenmesinin önüne geçmede de büyük rol oynamaktadır.

Reenjeksiyonun kontrollü ve planlı bir şekilde yapılmaması rezervuardaki akışkanların soğumasına ve verimin düşmesine neden olabilmektedir. Onun için reenjeksiyon kuyuları açılırken üretim yapılacak kuyulara uzaklıklar, kuyu derinlikleri, geri basılan akışkanın rezervuarın ısı kaynağıyla ve rezervuardaki diğer akışkanlarla yapacağı ısı alış-verişi göz önünde bulundurulmalıdır.

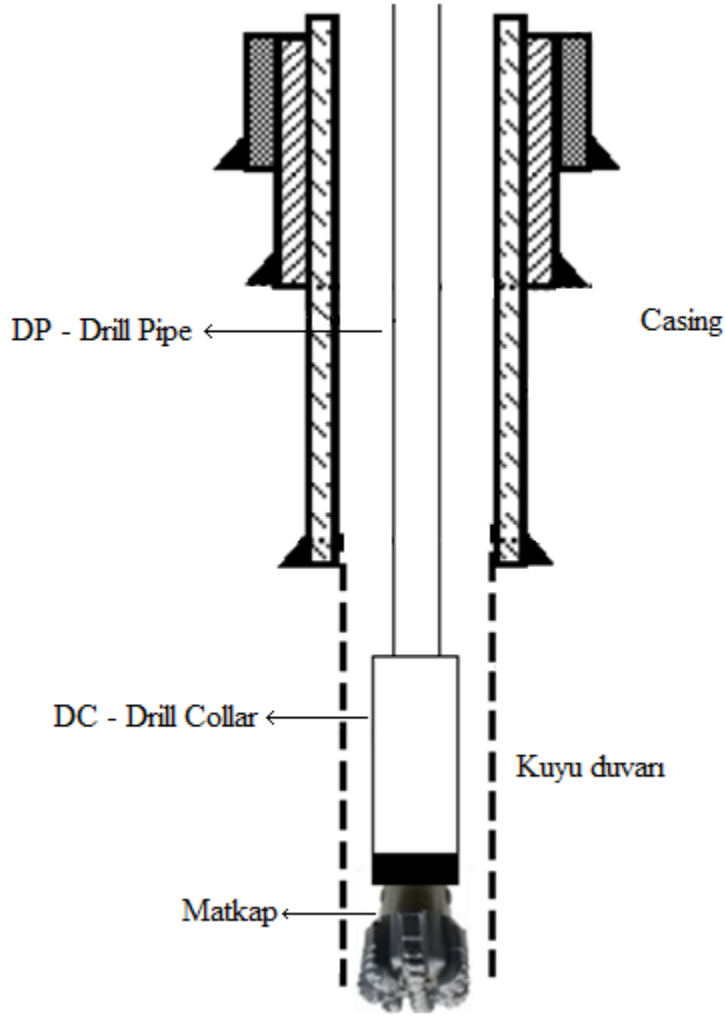
Yüksek sıcaklıklara sahip bu bölgelerin jeotermal rezervuar olarak adlandırılabilmesi için; rezervuarın bir ısı kaynağına, ısıyı iletecek bir akışkana, gözenekli ve geçirgen bir rezervuara (hazne kaya) ve geçirgen olmayan örtü kayaya sahip olması gereklidir.

Sert kayaları delip rezervuara ulaşmamızı sağlayan yöntem sondaj tekniğidir. Sondaj operasyonunda kayaları delmemizi sağlayan yer altındaki başlıca teçhizatlar matkap, sondaj boruları (drill pipe ve drill collar) ve muhafaza borusudur (casing). Bu teçhizatlar ve dizilimleri Şekil 2.1'de gösterilmektedir.

Sondaj en basit haliyle, yeryüzünden sağlanan mekanik dönme hareketiyle sondaj borularını kendi eksenleri etrafında dönmekte ve matkap da bu dönme hareketinin etkisiyle formasyonu delmektedir. Burada formasyonun delen esas alet sürekli dönen matkaptır. Matkabin dönmesi farklı usullerle gerçekleştirilebilir. Bunlar; rotary ve mud motordur. Rotary, dönme hareketini yatay transmisyon milinden dikey sondaj dizisine aktaran bir regülatördür. Rotary sondajında hareket rotary masasından kelly'ye oradan da sondaj borularına iletilmektedir. Modern teknolojiye rotary yerine top drive sistemi de kullanılabilmektedir. Top drive, rotary gibi sabit bir sistem olmayıp yukarı aşağı hareket kabiliyeti olan bir motor sistemidir. Mud motor ise, matkabin üzerine yerleştirilen, sondaj sıvısının akışından elde ettiği enerjiyi mekanik enerjiye dönüştüren veya direk olarak elektrik motoruyla çalışan, matkabin dönmesini sağlayan bir sistemdir. (Vadetsky, 1967: 4,5)

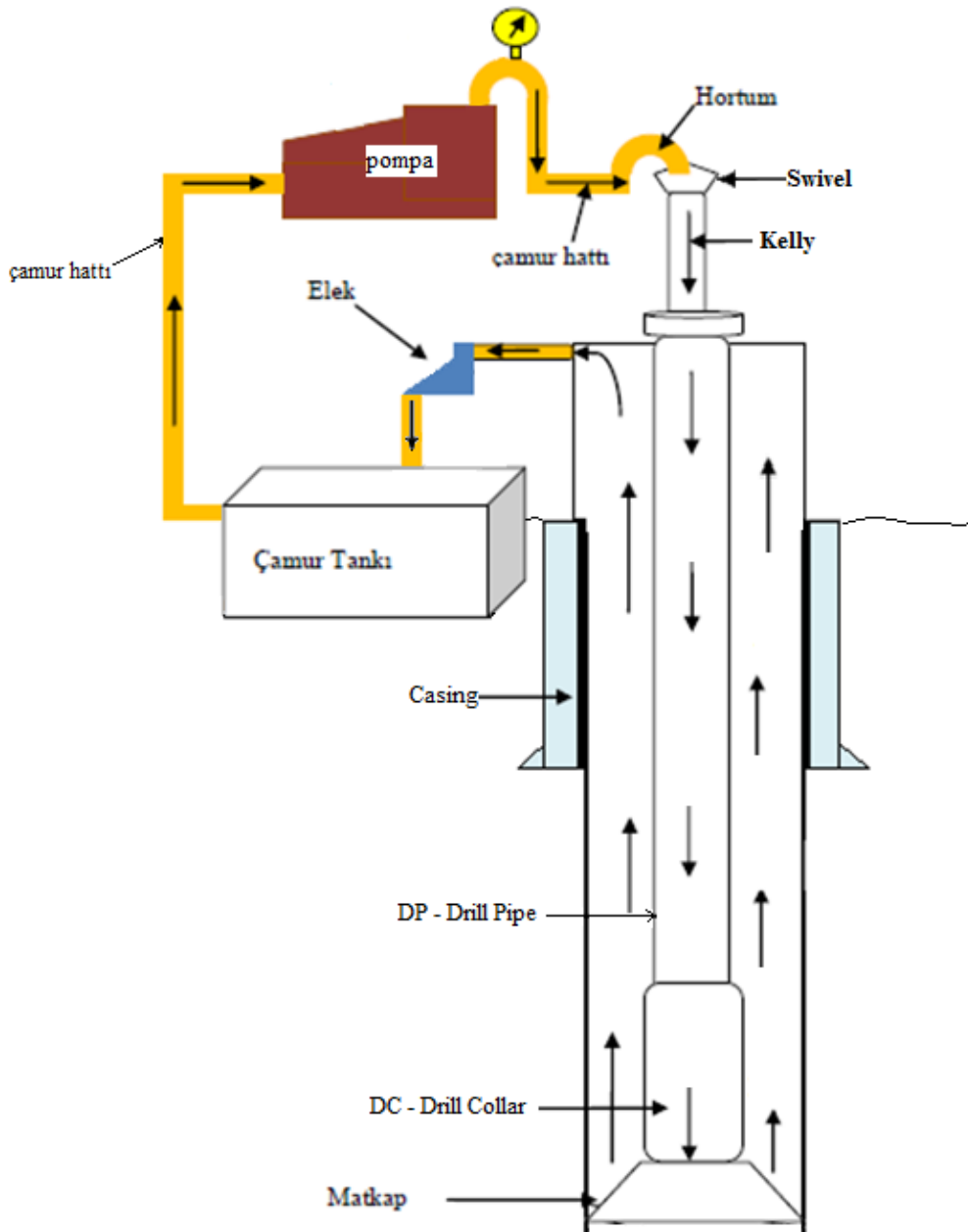
Kelly, dörtgen formlu, rotary'nin hareketini sondaj dizisine ileten ve içerisinde sondaj akışkanı geçen yüksek dayanıklılığa sahip borudur. Kelly üst tarafta swivel'e aşağıda sondaj dizisine bağlıdır.

Swivel, kule vinç sistemi ile kelly'yi birbirine bağlayan, sondaj dizisinin askıdaki ağırlığıyla dönmesini ve sondaj çamurunun geçişini sağlayan sistemdir.



Şekil 2.1. Bir jeotermal kuyu sondaj kesiti

Jeotermal sondajların ayrılmaz bir parçası da sondaj çamurudur. Sondaj çamuru Şekil 2.2’de görüldüğü gibi pompa vasıtasıyla kuyu içerisine basılır. Çamur tankından beslenen pompa, çamuru önce yüzey hatlarına basar. Yüzey hattından gelen çamur sırasıyla swivel, kelly ve sondaj dizisinin içinden geçerek matkaba ulaşır. Matkaptan çıkan çamur anulusten tekrar yüzeye çıkar ve eleklerde elendikten sonra çamur tankına akar. Çamur tankından pompaya çekilen çamur tekrar kuyuya basılır ve döngü bu şekilde devam eder.



Şekil 2.2. Jeotermal kuyu sondaj çamuru sirkülasyonu

Sondaj çamuru kuyu içerisinde aynı anda birkaç vazifeyi aynı anda yerine getirmektedir. Bunlardan bazıları şöyledir: matkabın kestiği parçaları yeryüzüne taşıyıp kuyu dibini sürekli temiz tutmak ve taşınan bu parçaların incelenmesiyle formasyon hakkında bilgi vermek; matkabı soğutmak; kuyu duvarında ince bir kek tabakası oluşturup kuyunun çökmesine engel olmak; yapılan basınç ölçümleriyle formasyon basıncını tespit etmek; mud motorun türbinlerini döndürmek; formasyondan kuyuya akan akışkanları tespit etmek.

Jeotermal sondajlar petrol ve gaz sondajlarıyla aynı gibi görünse de sondaj yapılan ortamın özellikleri jeotermal sondajları diğer sondajlardan ayırmaktadır. Jeotermal sahalar genellikle çok sert kayalar içeren düşük basınçlı ve yüksek sıcaklıklı volkanizma ve tektonizmanın yoğun olduğu yerlerdir. Jeotermal sahaların bu gibi özellikleri matkap, sondaj dizisi, sondaj çamuru, ara bağlantı ve sızdırmazlık elemanları, casing ve çimentolama gibi birçok operasyon, ekipman ve malzemeyi etkilemektedir.

Jeotermal sondajlarda formasyonun genellikle çok sert, sıcak ve kırıklı çatlaklı olması sonucu matkaplar çok çabuk aşınmakta ve çap azalmaları görülmektedir. Bunun önüne geçebilmek için matkapların delici kısımlarında insert kullanılmaktadır.

Matkapların diş ve rulmanları da sert formasyon ve ağır yük sonucu kırılma ve sıkışmalar oluşmaktadır. Bu sorunlara çözüm olarak, tungsten carbide dişli matkaplar kullanılmakta ve rulmanlarda journal bearing tip yataklar kullanılmaktadır.

Son zamanlarda, jeotermal sondajlarda yüksek sıcaklıklarda koni matkabın yatakları ve sızdırmazlık elemanlarının zarar görmesi sonucu ısıl stabilitesi artırılmış PDC (Polycrystalline Diamond Compact) matkaplar da kullanılmaktadır.

Bentonit çamurlarında kullanılan Na-bentonit 175°C ve üzeri sıcaklıklarda yapısında değişiklikler oluştuğu ve buharlaştığı için sondaj çamurunu jelleştirir. Jelleşme sonucu kuyuya log ekipmanı indirmek zorlaşır.

Çamurdaki aşırı ısınmaları engellemek için sirkülasyon sırasında çamuru soğutma kulelerinde soğutarak sıcaklığını düşürmek gerekir. Sirkülasyon sırasında bu problem çözümlenmesine rağmen bazı beklenmeyen veya zorunlu duraklamalar olduğunda ısınan çamur jelleşmeye başlamaktadır. Yüksek sıcaklıklarda jelleşmeyi kontrol eden bir diğer etken katı madde miktarıdır. Yüksek sıcaklıklı sahalarda sondaj çamurundaki jelleşmenin önüne Na-bentonit yerine sepiolit etken maddesi kullanılarak da geçilebilmektedir. 260°C ye kadar sıcaklıklarda sepiolit problemsiz çalışmaktadır. Ayrıca, formasyona kaçan çamur katılaşmadığı için formasyon zararları da engellenmektedir.

Düşük basınçlı jeotermal sahalarda çamur kaçakları büyük sorun oluşturmakta, kaçaklar sonucu çamur kayıpları meydana gelmekte ve formasyon kirletilmektedir. Bu sorunun

önüne geçebilmek için düşük yoğunluklu sondaj sıvısı kullanılmak istenmekte ve bunun için havalandırılmış akışkanlar veya kuru buhar sahalarında direk havayla sirkülasyonlar yapılmaktadır.

Jeotermal kuyu çimentolamalarındaki başlıca sorun, diğer operasyonlarda olduğu gibi, yüksek sıcaklık ve düşük basınçtır. Yüksek sıcaklık çimentonun bağlarını bozmakta ve mukavemetinin azalmasına neden olmaktadır. Bunu önlemek için çimentoya silika unu karıştırılmakta ve yüksek sıcaklıklarda mukavemetin artması sağlanmaktadır. Silika unu yüksek sıcaklıklarda çimento içinde bulunan Ksenolit, Tobermolit ve Truskotit gibi maddelerle tepkimeye girerek ısıya dayanıklı yeni minerallerin oluşmasını sağlar.

Düşük formasyon basınçları çimentonun formasyona kaçmasına, muhafaza borusu ve formasyon arasında gerekli mukavemetin oluşmamasına sebep olmaktadır. Çimentonun formasyona kaçmasını engellemek için çimentonun yoğunluğunu düşürme yoluna gidilmekte ve çimentoya perlit katkısı karıştırılarak yoğunluk düşürülmeye çalışılmaktadır. Fakat perlit kullanımı çimentonun mukavemetinde azalmalara neden olmaktadır.

Kademeli çimentolama operasyonları da çimento kaçaklarını azaltmada yardımcı olmaktadır. Düşük basınçlı sahalarda çimentonun formasyona kaçması kaçınılmazdır. Kaçağı azaltmak için çimentoda yapılabilecek geliştirmeler haricinde operasyonel olarak yapılacak kademeli çimentolama işlemi kaçakları azaltmaya yardımcı olacaktır. İki veya üç kademedeki yapılacak bir çimentolama operasyonunda hem gerekli sıkıştırma mukavemeti yakalanacak hem de çimento ağırlığından kaynaklı sütun basıncı azaltılarak çimento kaçakları azaltılacaktır.



### 3. TEMEL ISI TRANSFERİ

Isı bir enerji türüdür ve başka enerji türlerine dönüşebilir, formu değiştirilebilir, transfer edilebilir. Isı transferi, iki sistem arasında sıcaklık farkından kaynaklanan bir enerji aktarımıdır. Örneğin kaynamış su oda sıcaklığında bir ortama bırakıldığında zamanla soğur. Aynı şekilde buzdolabından çıkarılıp odaya bırakılan soğuk bir yiyecek ya da içecek zamanla ısınarak oda sıcaklığı ile termik denge haline geçer. Buradan tecrübe ile elde edilen sonuç şudur ki; sıcaklığı yüksek olan ortamdan sıcaklığı düşük olan bir ortama ısı geçişi olur ve bu durum sıcaklıklar eşitleninceye kadar devam eder.

Bir ısı transferi olayında sistemler arasında gerçekleşen ısı alış-verişinin miktarı kadar hızı da önemlidir. Belli bir sürede geçen ısı miktarı ısı yükü ya da ısı debisi olarak adlandırılabilir. Isı debisinin düşük ya da yüksek oluşu sistemler arasındaki sıcaklık farkı ile çok yakından ilişkilidir. Sıcaklık farkı az ise ısı transferi hızı da o oranda yavaşlar. Ancak tek etken sistemler arası sıcaklık farkı değildir. İki sistemi birbirinden ayıran ara ortamın ısı iletimi özelliği, yani iletken ya da yalıtkan olması da ısı aktarımında önemli bir parametredir. Diğer bir önemli parametre ise ısı transferi yüzey alanıdır. Belli bir ısı transferi miktarından söz edildiğinde bu miktarın alan büyüdükçe büyüyeceği ve alan küçüldükçe küçüleceği doğal bir sonuçtur. Çünkü ısı sistem sınırından geçerek transfer edilir.

Isı yüksek sıcaklıktaki bir ortamdan düşük sıcaklıklı ortama doğru akarken, bu iki ortamın arasında kalan başka ortamlardan da geçer. Aradaki bu ortamlar katı, sıvı, gaz ortamlar olabileceği gibi, bunların beraber sıralanmasıyla oluşmuş kombine ortamlar da olabilir.

Isı transferi, bilinen üç yöntemle gerçekleşir. Bu yöntemler iletim, taşınım ve ışıyım olarak adlandırılır. Taşınım ile ısı transferi, belli bir yüzey ile yüzeyi çevreleyen bir akışkan ortam arasında gerçekleşir. Üzerinde yaşadığımız dünyada su ve hava en çok bilinen iki akışkan olarak oldukça yaygındırlar ve çoğu zaman katı cisimlerle ortak ara yüzey oluştururlar. Bu nedenle taşınım ile ısı transferi olayına günlük hayatta oldukça sık rastlanır.

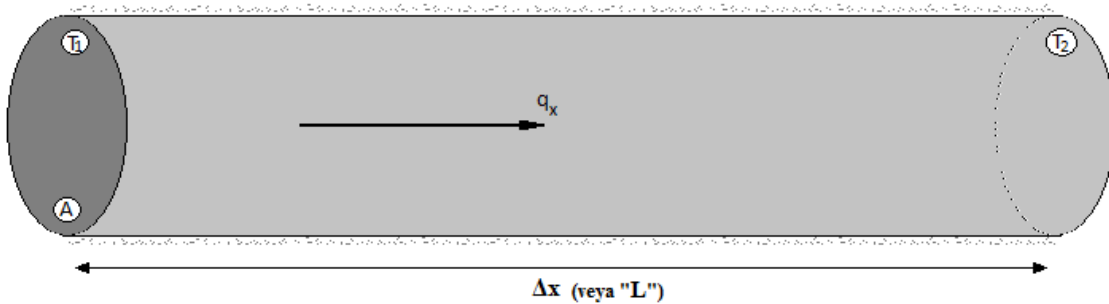
İletim ile ısı transferinde olduğu gibi taşınım ile ısı transferinde de olayı etkileyen üçüncü önemli bir parametre vardır. Bu da taşınım katsayısıdır. İletim ile ısı transferindeki iletim katsayısının aksine taşınım katsayısının tespit edilmesi oldukça zordur. Çünkü taşınım

katsayısı birçok parametreye bağılı olarak değişir. Bu parametrelerden bir tanesi de yüzeyi çevreleyen ortamdır. Yüzeyi çevreleyen akışkan ortama bağılı olarak bazen doğal taşınım ile bazen de zorlanmış taşınım ile ısı transferi gerçekleşir.

### 3.1. İletim (Kondüksiyon)

Genellikle iletimle ısı transferi, katı cisimler içerisinde gerçekleşen bir ısı transferi türüdür. Ancak moleküllerin serbest hareket etmedikleri varsayılan ince film tabakası şeklindeki sıvı ve gaz ortamlarda da iletimle ısı transferinden söz edilebilir. İletim, bir maddenin yüksek enerji seviyesindeki atom veya moleküllerinin daha düşük enerji seviyesindeki moleküllere enerjilerini iletmeleriyle gerçekleşir (Incropera ve DeWitt, 1996: 3).

Fourier Yasası; her ne kadar kondüksiyon maddenin moleküler boyuttaki hareketiyle ilgili olsa da, kondüksiyonun fiziksel mekanizmasını mikroskobik boyutta incelemek oldukça karmaşıktır. Bazı mühendislik problemlerinde, mikroskobik boyuttaki bu karmaşık durumlardan kaçınmak için fenomenolojik yasalar kullanılarak olay makroskobik boyutta incelenebilmektedir. Kondüksiyonla ısı iletimine etki eden fenomenolojik kanun 1822 yılında Fransız matematiksel fizikçi J. B. Fourier tarafından ortaya atılmıştır (Mills, 1999: 8, 9).



Şekil 3.1. Silindirik formda iletimle ısı transferi

İletimle ısı transferinin temeli Fourier Yasasıdır. Fourier yasası tabiatta olan olayların gözlemlenmesiyle geliştirilmiş ve deneysel kanıtlara dayanan bir kanundur. Örneğin Şekil 3.1'de gösterilen sürekli rejim kondüksiyon deneyindeki, dış yüzeyi yalıtılmış ve bir ucu  $T_1$ , diğer ucu  $T_2$  sıcaklığında olan silindirik çubuk göz önüne alınsın. Uç kısımların sıcaklıkları arasında  $T_1 > T_2$  ilişkisi varsa, termodinamiğin II. kanununa göre ısı transferi  $T_1$

ucundan  $T_2$  ucuna doğru gerçekleşecektir. Yani konduksiyon ısı transferi  $x$  pozitif yönünde gerçekleşecektir. Buradan ısı transfer hızı  $q_x$  ve  $q_x$  'e bağlı sıcaklık farkı  $\Delta T$ , silindirik çubuğun uzunluğu  $\Delta x$  ve silindirin kesit alanı  $A$  bulunabilir. (Incropera ve DeWitt, 1996: 44) Burada;  $\Delta T$  ve  $\Delta x$  sabit kabul edilirse  $A$ ,  $q_x$  ile doğru orantılıdır. Farklı şekilde;  $\Delta T$  ve  $A$  sabit kabul edilip  $q_x$  incelenirse,  $\Delta x$  ile  $q_x$  ters orantılı olacaktır. Son olarak;  $A$  ve  $\Delta x$  sabit tutulursa,  $q_x$  ve  $\Delta T$  sabit orantılı olacaktır. Buradan orantı şöyle olacaktır:

$$q_x = A \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (3.1)$$

Kullanılan malzemenin değişmesi (örneğin, metal malzemedan plastik malzemeye) ısı iletimini de etkileyecektir. Isı transferi plastik malzemede metal malzemeye göre daha düşük olacaktır. Her bir malzemenin iletkenliğine uygun olarak çıkartılmış iletkenlik katsayısı yukarıdaki orantıya yerleştirilecek olursa şu şekilde bir eşitlik ortaya çıkacaktır:

$$q_x = kA \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (3.2)$$

Burada  $k$  termal(ısı) iletkenlik katsayısıdır. Birimi  $W/m \cdot K$  'dır.

Bu eşitliğin  $\Delta x \rightarrow 0$  limitinde hesaplanması ile birim zamanda transfer iletilen ısı için,

$$q_x = -k \frac{dT}{dx} \quad (3.3)$$

ısı akısı için

$$q_x'' = \frac{q_x}{A} = -k \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (3.4)$$

elde edilir.

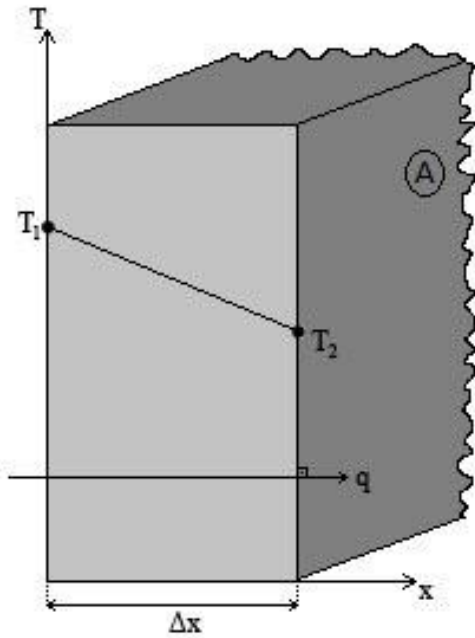
Isı her zaman yüksek sıcaklıktan düşük sıcaklığa doğru gittiği için negatif işareti bu eşitlikte bir gerekliliktir.

Isı akısı yöne bağlı bir niceliktir ve Şekil 3.2'de görüldüğü gibi daima  $A$  kesit alanına diktir. Fourier yasası ısı akısının yöne bağlı bir büyüklüğü olarak şöyle yazılabilir.

$$\mathbf{q}'' = -k\nabla T = -k \left( \mathbf{i} \frac{\partial T}{\partial x} + \mathbf{j} \frac{\partial T}{\partial y} + \mathbf{k} \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (3.5)$$

Burada, del ( $\nabla$ ) operatörü vektörel bir niceliktir.  $T(x,y,z)$  ise sıcaklığın  $x$ ,  $y$ ,  $z$  boyutlarındaki skaler dağılımıdır.

Isı akısı vektörü bileşenlerine ayrılırsa Eş. 3.5 her bir boyut için ayrı ayrı şöyle yazılabilir.



Şekil 3.2. Düzlem duvarda iletimle ısı transferi

$$q_x'' = -k \frac{\partial T}{\partial x}, \quad q_y'' = -k \frac{\partial T}{\partial y}, \quad q_z'' = -k \frac{\partial T}{\partial z} \quad (3.6)$$

**Isıl İletkenlik:** ısııl iletkenlik maddenin ısıyı iletebilme kabiliyetinin bir ölçüsüdür. Isı iletim katsayısı maddenin fiziksel bir özelliğidir ve  $k$  ile gösterilir. Birimi metrik sistemde  $kCal/h \cdot m \cdot C^\circ$ , İngiliz sisteminde  $Btu/h \cdot ft \cdot F^\circ$ , SI sisteminde ise  $W/m \cdot K$  'dir. Isıl iletkenlik maddeden maddeye farklılık gösterdiği gibi maddenin faz değişikliğine göre de farklılık gösterir.

Bir ortamdaki tüm noktalar için ısı iletkenlik katsayısı değişmiyorsa ortam homojen, aksi durumda ise heterojen olarak adlandırılır. Aynı şekilde, bir ortamın ısı iletkenlik katsayısı tüm doğrultular için aynı ise o ortam izotropik olarak nitelendirilir.

Fourier yasasına göre ısı iletim katsayısı;

$$k \equiv - \frac{q_x}{\frac{\partial T}{\partial x}} \quad (3.7)$$

eşitliğiyle tanımlanmaktadır. Denklikte görüldüğü üzere ısı akısıyla iletkenlik katsayısı doğru orantılıdır. İletim katsayısının artmasıyla ısı akısı artmaktadır.

Katılar; sıvı ve gazlara nazaran daha büyük bir ısı iletkenlik katsayısına maliktirler. Bu durum maddenin katı ve akışkan halindeki moleküller arası uzaklıklarla alakalıdır. Katı maddelerin serbest elektron ve atomları kafes olarak isimlendirilen sınırlar içerisinde yer almaktadırlar. Maddeyi oluşturan serbest atomların yer değiştirmesi ve kafes titreşimleri sonucu iletim ısı transferi gerçekleşir ve bu hareketler sonucu ısı iletim katsayısı,  $k$  ortaya çıkar.

Akışkanların katı hale göre moleküller arası mesafesi daha büyük olduğu ve molekül hareketleri rastgele olduğu için ısı iletim katsayıları genellikle katı maddelere göre daha küçüktür.

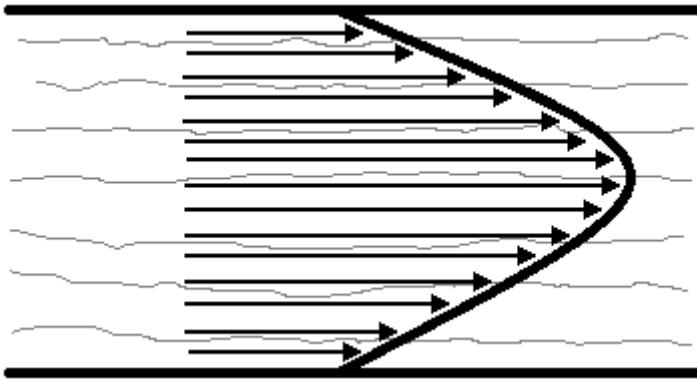
### 3.2. Taşınım (Konveksiyon)

Sıvı veya gaz halindeki bir akışkanın akış halinde iken temas ettiği yüzey ve akışkan arasındaki moleküllerin makroskobik hareketlilikleri sonucu gerçekleşen ısı geçişine taşınım ile ısı transferi denir (Dağsöz, 1995: 94). İletim ve taşınım aslında birbirlerine benzerdirler. İkisinin de gerçekleşmesi için bir maddeye ihtiyaç vardır. İletimle ısı transferi katılarda, kapalı ortamdaki sıvı ve gazlarda gerçekleşmektedir. Taşınım da ise sıvı veya gaz gibi bir akışkanın hareketi sonucu gerçekleşen ısı transferi söz konusudur.

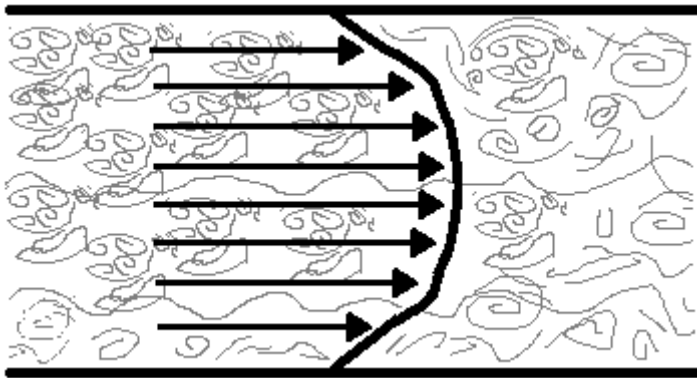
Taşınım ile ısı transferinde akışkan hareketi vantilatör veya pompa gibi dışarıdan bir enerji kullanılarak sağlanıyorsa böyle taşınım zorlanmış (cebri) ısı taşınımı denir. Taşınım, bir

ısı kaynağının etrafındaki havanın yükselmesi gibi, sıcaklık farkı neticesi özgül ağırlığın değişmesiyle meydana geliyorsa bu tür taşınım doğal (serbest) ısı taşınımı veya tabii konveksiyon denir (Dağsöz, 1995: 94).

Akışkan bir düzlemsel kanal ya da boru içerisinde akabilir. Bu akış sırasında oluşan akış çizgileri düzgün ve belirli bir nizam içinde iseler akış laminar, çizgiler arasında belirli bir nizam olmayıp, bir karmaşıklık varsa akış türbülanslı demektir.

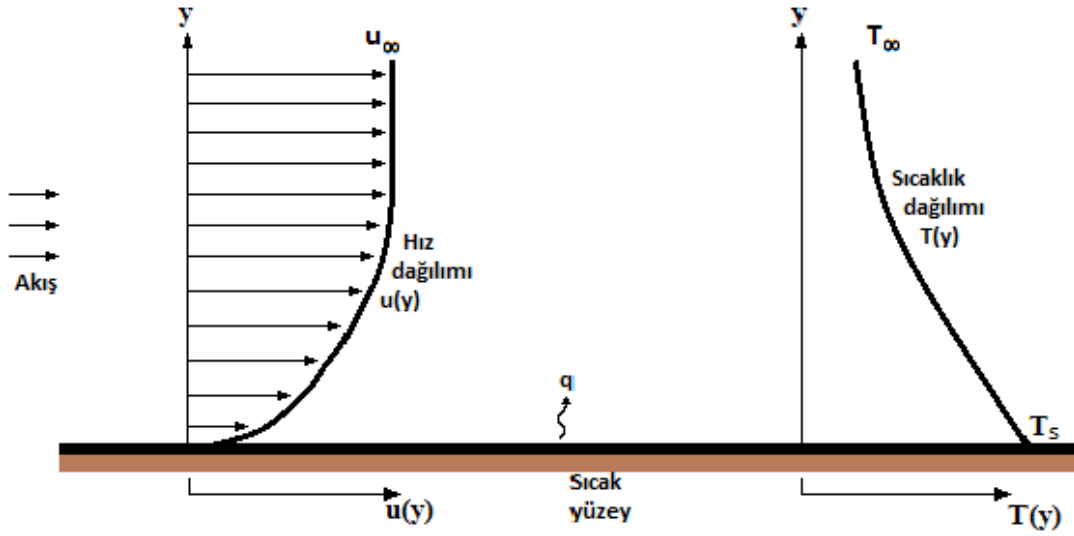


Şekil 3.3. Laminer akış



Şekil 3.4. Türbülanslı Akış

Akışkanın temas halinde bulunduğu yüzey ve molekülleri arasında sürtünme (kayma gerilmesi/kuvveti) yok, sadece basınç kuvveti var ise ideal akışkan; yüzey ve moleküller arasında sürtünme ve sürtünme neticesinde viskoz kuvvetler var ise gerçek akışkan olarak isimlendirilir.



Şekil 3.5. Taşınım ile ısı transferi sınır tabakası (Incropera ve Dewitt, 1996: 6)

Newton Soğuma Yasası: yapılan çalışmalar göstermektedir ki konveksiyon ısı transferi  $\mu$  dinamik viskozite,  $k$  termal iletkenlik,  $\rho$  yoğunluk,  $C_p$  özgül ısı ve  $u$  akışkan hızı gibi akışkan özelliklerine yakından bağlıdır. Konveksiyonla ısı transferi aynı zamanda, katı yüzeyin geometrisine, pürüzsüzlüğüne, akışın laminar veya türbülanslı olmasına da bağlıdır. Görüleceği üzere konveksiyonla ısı transferi birçok değişkene bağlı olan oldukça karmaşık bir sistemdir (Çengel, 1997, 350).

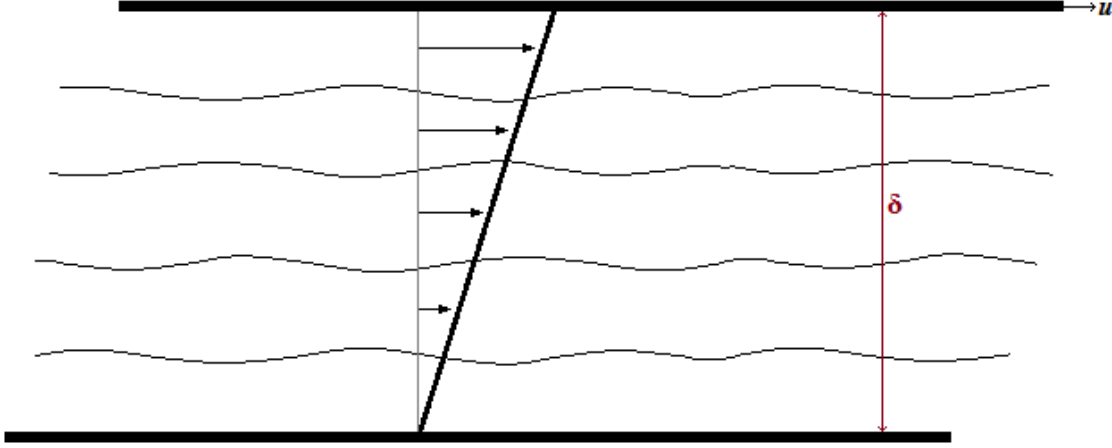
Konveksiyonla ısı transferinde kullanılan genel eşitlik, Newton'un soğuma yasası şöyledir:

$$\dot{q}'' = h(T_s - T_\infty) \quad (3.8)$$

$h$  konveksiyon ısı transfer katsayısı akışkanın termodinamik özelliklerine, türüne, yüzey geometrisine ve ortama bağlı olarak değişmektedir. Taşınım problemlerinin incelenmesinde en önemli etken  $h$  konveksiyon ısı transfer katsayısıdır. Yüzeyin her bir noktası için  $h$  farklılık gösterebilmektedir.

Viskozite: yapılan deneyler sonucu, boru içi laminar ve türbülanslı akışlarda akışkanın Şekil 3.6 (hareketli üst levha şekli)'daki gibi hız dağılımlarına sahip olduğu belirlenmiştir. Akışkanın hız dağılımının Şekil 3.6'daki gibi olmasının sebebi, hareket halindeki akışkan tabakaların birbiri üzerinden kayması neticesi oluşan iç sürtünmedir. Tabakaların

kaymaları akım yönüne paralel her bir düzlem üzerinde teğetsel bir gerilimin oluşmasına neden olur.



Şekil 3.6. Kayma gerilmesi

Kayma gerilmesi Şekil 3.6’da gösterilen deney yapılarak belirlenmektedir. Bu deneyde alttaki sabit plaka üzerinde  $\delta$  kalınlığında oldukça küçük bir yağ tabakası ve yağ tabakası üzerine de bir plaka yerleştirilmekte ve sabit  $u$  hızıyla  $F$  kuvveti tarafından hareket ettirilmektedir. Hareketli plakanın alt yüzey alanı  $s$  ise;

$$F = \mu \frac{s \cdot u}{\delta} \quad (3.9)$$

bağıntısı yazılabilir.  $\mu$  kullanılan akışkana ait sürtünmeyle ilgili bir katsayıdır ve dinamik (mutlak) viskozite olarak adlandırılmaktadır. Birimi  $\text{kg/ms}$  ‘dir. Dinamik viskozite ile kinematik viskozite arasında;

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (3.10)$$

eşitliği vardır. Burada  $\nu$  kinematik viskozitedir. Kinematik viskozitenin boyutu  $\text{m}^2/\text{s}$ ‘dir (Altınışık, 2004: 245, 246).

Laminer akışta akış yönüne paralel düzlem üzerinde meydana gelen kayma gerilmesi,  $\tau$  Newton – Maxwell’e göre hız gradyeni,  $du/dt$  ile orantılıdır.



$$F = s \cdot \tau = \mu \frac{du}{dt} \quad (3.11)$$

Bu eşitlikten hareketle;

$$\tau = \mu \frac{du}{dt} \quad (3.12)$$

Newton'un viskozite yasası olarak da bilinen bu eşitlik elde edilir.

Akışlar genellikle türbülanslı olarak gerçekleşmektedir. Laminer akış nadir hallerde görülmektedir. Türbülanslı akışlarda akış yönüne paralel düzlem üzerinde meydana gelen kayma gerilmesi,  $\tau$  Prandtl'a göre şöyledir:

$$\tau = \rho L^2 \left( \frac{du}{dt} \right)^2 \quad (3.13)$$

Viskozite katsayısı ise,

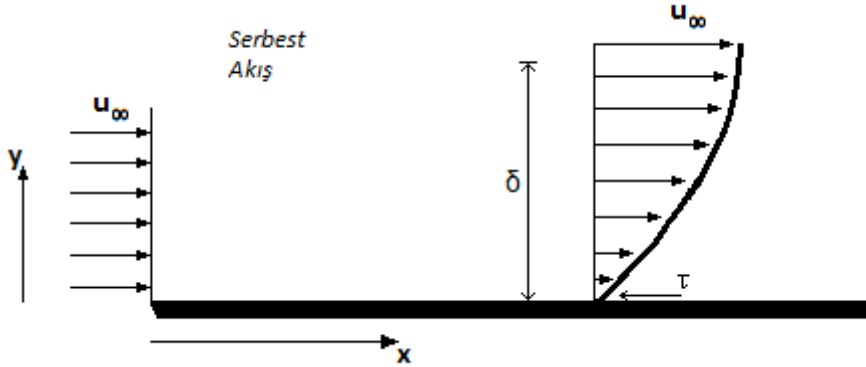
$$\eta = \frac{F \cdot \Delta t}{s \cdot u} \quad (3.14)$$

şeklindedir. Poiseulle nin adına atfen Poise olarak adlandırılır. 1 Poise sabit bir plakadan 1 cm uzaklıkta bulunan 1 cm<sup>2</sup> 'lik bir alanı, 1 cm/sn hızla çekmek için gerekli kuvvete eşittir (Topkaya, 1974: 11).

### 3.2.1. Taşınım Sınır Tabakası

Hız Sınır Tabakası: Şekil 3.7'de düz bir levha üzerindeki bir akışta, akışkanın üzerinde aktığı yüzeye temas ettiği noktada akışkan hızı sıfır olarak kabul edilir. Buna kaymama şartı (no slip) denilmektedir. Akışkan parçacıklarının yüzeye yaptıkları kontak neticesinde meydana gelen bu etki, silsile halinde, akışın orta noktasına doğru azalan bir etki ile devam eder. Bu etki  $y=\delta$  noktasından itibaren göz ardı edilebilecek seviyeye gelir. Yüzeye doğru gidildikçe hızda meydana gelen bu azalma, akışkan hızına paralel düzlemlerde meydana gelen  $\tau$  kayma gerilmesiyle ilişkilidir. Yüzeyden  $y$  doğrultusuna doğru gidildikçe  $u$  hız vektörü serbest akış hızı  $u_\infty$  'a ulaşınca kadar sürekli artar.

Şekil 3.7’de  $\delta$  sınır tabaka kalınlığı görülmektedir. Serbest akışta akışkan aktıkça  $\delta$  sınır tabaka (hız sınır tabaka) kalınlığı artmaktadır. Yani,  $x$  arttıkça  $\delta$  artmaktadır. Bir yüzeyde akış oldukça hız sınır tabaka gelişir. Hız sınır tabaka taşınımıyla ısı transferi problemlerinde oldukça önemlidir.

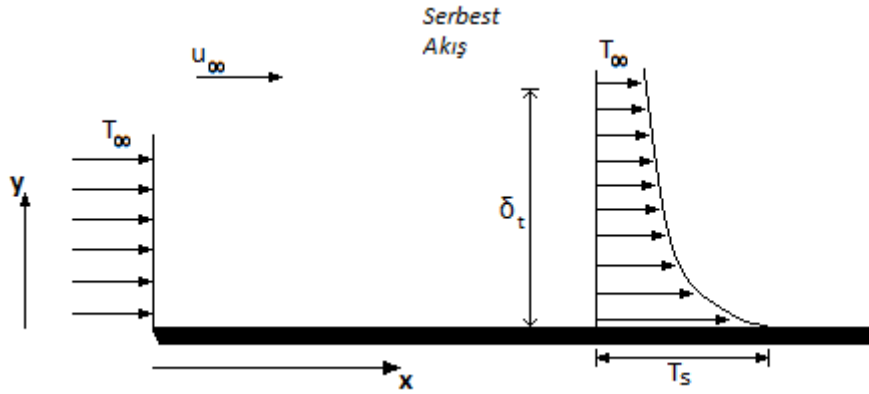


Şekil 3.7. Düz levha üzerinde hız sınır tabakası

Hız sınır tabakasının oluşumunda önemli rol oynayan  $\tau$ , yüzey kayma gerilmesi (yüzey sürtünmesi) şöyle belirlenebilir:

$$\tau = \mu \left. \frac{\partial u}{\partial y} \right|_{y=0} \quad (3.15)$$

Isıl Sınır Tabaka; yüzey üzerinde akışkan akışı olduğunda hız sınır tabaka geliştiği gibi, akışkan ve yüzeyin sıcaklığı farklı olduğunda da ısıl sınır tabaka oluşur. Şekil 3.8’de gösterilen sabit sıcaklıkta düz bir levha üzerindeki akışı incelersek; levhanın girişinde akışkan sıcaklık dağılımının düzgün olduğu, levha üzerinde akışta ise akışkanın levhaya komşu tabakası ile levhanın enerji değiştirdikleri görülmektedir. Akışkan parçacıkların komşu tabakalar ile enerji değişimleri akışkan içinde sıcaklık gradyanlarına yol açar. Akışkan sıcaklık gradyanlarının olduğu bu bölgeye ısıl sınır tabaka denir. Şekil 3.8’de ısıl sınır tabaka  $\delta_t$  ile gösterilmiştir. Akışkan düzlem üzerinde aktıkça ısı geçişi serbest akışkanı daha fazla etkilemekte ve ısıl sınır tabaka gittikçe büyümektedir.



Şekil 3.8. Sabit sıcaklıkta düz levha üzerinde ısıl sınır tabaka

Akışkanın giriş ucundan  $x$  kadar uzaklıktaki lokal ısı akısı,  $y=0$  'da akışkana Fourier yasası uygulanarak bulunabilir.

$$q'' = -k \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{y=0} \quad (3.16)$$

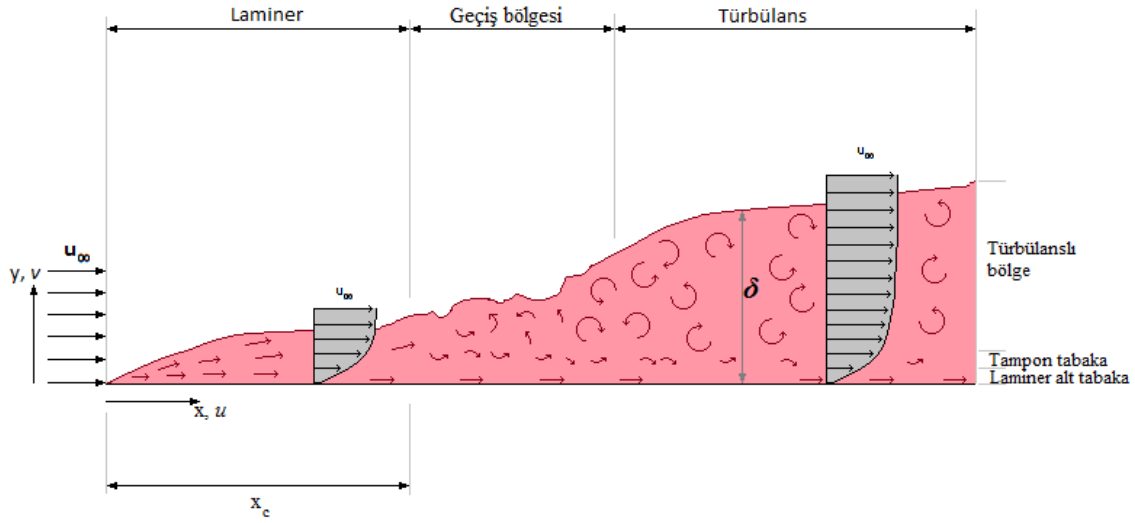
Yüzeyde akışkan hareketi olmadığından dolayı bu bölgede ısı geçişi, konduksiyon ile gerçekleşir. Eş. 3.16 ve Newton soğuma yasası birleştirilirse;

$$h = \frac{-k \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{y=0}}{T_s - T_\infty} \quad (3.17)$$

eşitliği elde edilir. Isıl sınır tabaka içindeki durumlar, yüzey sıcaklık gradyanını  $(\partial T / \partial y|_{y=0})$  etkiler ve sınır tabaka boyunca ısı transfer hızını belirler (Incropera ve DeWitt, 1996: 290, 291).

### 3.2.2. Laminer ve Türbülanslı Akış

Bir akışkan içerisinde, akışkan parçacıkları akış çizgileri boyunca hareket ediyorsa bu akış şekli laminer akış olarak adlandırılır. Eğer akışkan parçacıkları düzenli bir akış sergilemiyorlarsa bu tür akışlara da türbülanslı akış denir.



Şekil 3.9. Akış rejimleri ve sınır tabaka (Çengel, 1997: 353; Incropera ve DeWitt, 1996: 294)

Şekil 3.9’da düz bir levha üzerinde oluşan laminer, türbülanslı akış ve sınır tabaka gelişimi gösterilmiştir. Akışkan hareketi akış çizgisi boyunca  $x$  ve  $y$  yönlerindeki hız bileşenleriyle tanımlanır.  $v$  hız bileşeni levhaya dik yönde,  $y$  doğrultusundadır.  $u$  ise levhaya paralel ve  $x$  doğrultusundaki hız bileşenidir. Giriş ucundan başlayarak düzenli bir şekilde levha üzerine akmaya başlayan akışkan başlangıçta laminer akışa da bir süre sonra düzensizlikler başlar ve akış devam ettikçe düzensizlikler artarak akışkan türbülanslı akışa geçer. Türbülanslı sınır tabaka içerisinde, levha yüzeyinden sınır tabaka üst sınırına doğru sırasıyla laminer alt tabaka, tampon tabaka ve türbülanslı bölge oluşur. Türbülanslı bölge içerisinde akışkan parçacıkları üç boyutta gelişmiş hareket etmektedir. Türbülanslı akışa geçildiğinde  $\delta$  sınır tabaka kalınlığı,  $\tau$  yüzey kayma gerilmesi ve  $h$  taşınım katsayısı artmaktadır.

Sınır tabaka hesaplarında laminer akıştan türbülanslı akışa geçişin  $x_c$  noktasında başladığı kabul edilir. Bu nokta Reynolds sayısı olarak bilinen boyutsuz bir değişkenin değeriyle belirlenir.

$$Re = \frac{\text{Atalet kuvvetleri}}{\text{Viskoz kuvvetler}} = \frac{u_{\infty} x}{\nu} = \frac{\rho u_{\infty} x}{\mu} \quad (3.18)$$

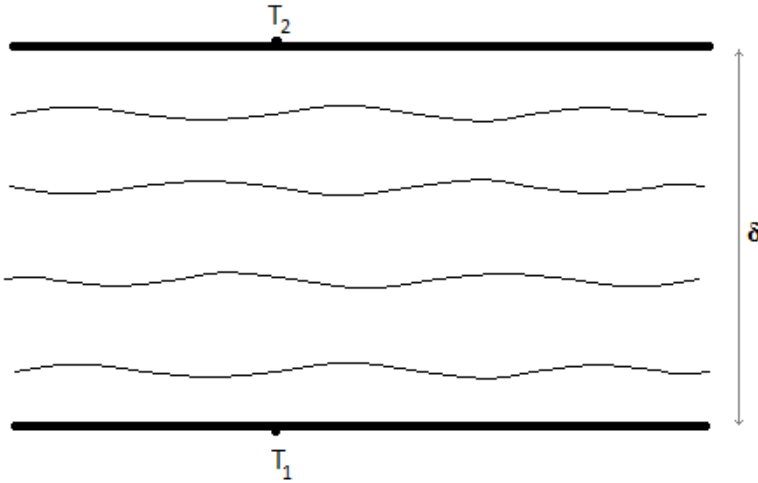
Düz bir levha üzerindeki akışta Reynolds sayısı,  $Re \leq 5 \cdot 10^5$  ise, akış laminerdir.  $Re \geq 5 \cdot 10^5$  ise akış türbülanslıdır (Altınışık, 2004: 250). Buradan yola çıkarak,  $Re_{kritik} = 5 \cdot 10^5$

değeri, düz levha için kritik Reynolds sayısı olarak adlandırılır. Borularda ise kritik Reynolds sayısı 2300 'dür.  $Re < 2300$  ise akış laminerdir.

### 3.3. Bazı Boyutsuz Sayılar

Nusselt sayısı; ısı transferi formüllerinde (enerji eşitlikleri) Nusselt sayısı önemlidir. Nusselt sayısı yüzeydeki boyutsuz sıcaklık gradyanına eşittir ve yüzeyde gerçekleşen iletim ısı transferinin bir ölçüsünü verir (Incropera ve DeWitt, 1996: 314).

Şekil 3.10'daki gibi kalınlığı  $\delta$ , sıcaklık farkı  $\Delta T = T_2 - T_1$  olan bir akışkan kütlesi ele alınsın. Akışkan tabakaları arasında transfer edilen ısı, eğer akışkan durgunsa iletimle, akışkan hareketli ise taşınım ile transfer edilir (Altınışık, 2004: 249).



Şekil 3.10. Akışkan katman boyunca ısı transferi

$$\dot{q}_{\text{taşınım}} = h\Delta T \quad (3.19)$$

$$\dot{q}_{\text{iletim}} = k \frac{\Delta T}{\delta} \quad (3.20)$$

Bu akışkanın taşınım ve iletim durumlarındaki ısı geçişleri orantılanırsa;

$$\frac{\dot{q}_{\text{taşınım}}}{\dot{q}_{\text{iletim}}} = \frac{h\Delta T}{k \frac{\Delta T}{\delta}} \quad (3.21)$$

eşitliği elde edilir. Buradan Nusselt sayısı;

$$Nu = \frac{h\delta}{k} \quad (3.22)$$

olarak bulunur.

Hız sınır tabakada sürtünme katsayısının taşıdığı önemi ısı sınır tabakada Nusselt sayısı taşımaktadır.

Nusselt sayısı büyükse taşınımın etkisi fazla, küçükse taşınımın etkisi daha düşüktür.  $Nu=1$  ise, ısı transferi iletimle gerçekleşmektedir (Altınışık, 2004: 250).

Biot sayısı: Nusselt sayısına benzeyen bir diğer sayıdır. Nusselt sayısı ve Biot sayısı birbirine karıştırılmamalıdır. Biot sayısı taşınım direncinin iletim direncine oranıdır ve genellikle herhangi bir akışkandan katı bir yüzeye ısı transferi gerçekleştiğinde önem arz eder.

$$Bi = \frac{h\delta}{k} \quad (3.23)$$

Prandtl sayısı: Prandtl sayısı  $\nu$  momentum yayılımının,  $\alpha$  ısı iletimine oranıdır. Hız ve ısı sınır tabakalar içerisinde yayılımla momentum ve enerji aktarımının oranını gösterir.

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} \quad (3.24)$$

Peclet sayısı: Reynolds ve Prandtl sayılarının bir fonksiyonudur.

$$Pe = Re * Pr = \frac{v\delta}{\alpha} \quad (3.25)$$

Rayleigh sayısı: doğal taşınım sınır tabaka geçiş bölgesindeki kaldırma ve sürtünme kuvvetlerinin nispi büyüklüklerine bağlıdır. Akışın laminar veya türbülanslı olup olmadığı ve ısı geçiş mekanizmasının iletimle veya taşınım ile olup olmadığı Rayleigh sayısına göre belirlenir. Rayleigh sayısı Prandtl ve Grashof sayılarının çarpımına eşittir.

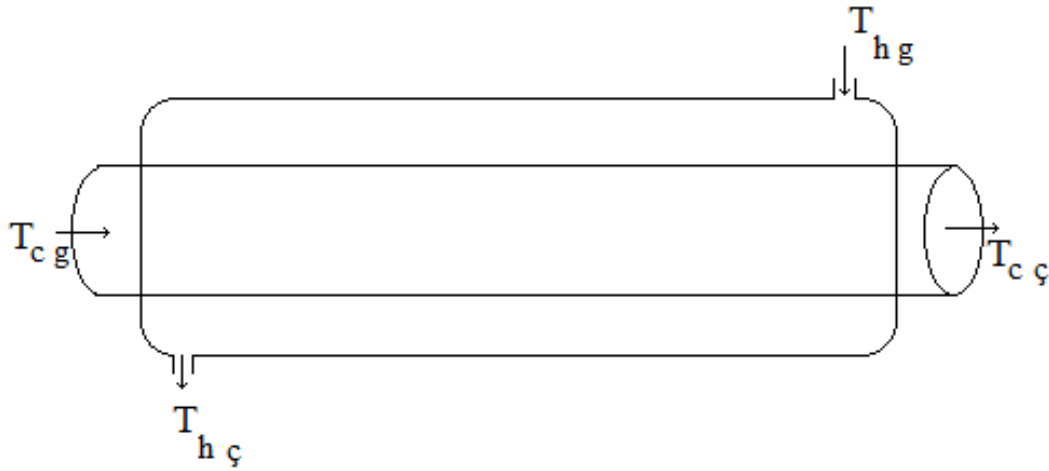
$$Ra = \frac{v g\beta(T_s - T_\infty)L^3}{\nu^2} = Pr * Gr \quad (3.26)$$

Grashof sayısı: Grashof sayısı akışkan üzerine etkiyen ters viskoz kuvvetler ve kaldırma kuvvetinin göreceli büyüklüğünün bir ölçüsüdür (Çengel, 1997: 415).

$$Gr = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L^3}{\nu^2} \quad (3.27)$$

### 3.4. Paralel ve Zıt Akışlı Isı Değiştiricileri

Paralel akışlı ısı değiştiricilerde sıcak ve soğuk akışkanlar ısı değiştirici içerisinde birbirlerine paralel doğrultuda akarlar. Bu tip ısı değiştiricilerde genelde iç kısımda bir boru veya boru demeti bulunur. Dış kısımda ise bu boru veya boru demetini tamamen kuşatan ve manto boru olarak bilinen daha büyük çaplı bir boru vardır. Basit tip paralel akışlı ısı değiştiriciler eş eksenli iç içe geçmiş iki borudan ibarettir. Sıcak ve soğuk akışkanlar bu boruların içinde bazan aynı yönde bazan da zıt yönde akarlar. Şekil 3.11’de verilen paralel ve zıt akışlı ısı değiştiricisini göz önüne alırsak, borunun içi için ısı transfer yüzeyi  $2\pi r_1 L$ , dış yüzey için ise  $2\pi r_2 L$  olur.



Şekil 3.11. Paralel zıt yönlü akışlı ısı değiştiricisi

Buradan iç ve dış yüzey için toplam ısı transferi katsayısı,

$$U_1 = \frac{1}{\frac{1}{h_1} + \frac{A_1}{2\pi kL} \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) + \frac{A_1}{A_2} \frac{1}{h_2}} \quad (3.28)$$

$$U_2 = \frac{1}{\frac{A_2}{A_1} \frac{1}{h_1} + \frac{A_2}{2\pi kL} \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) + \frac{A_1}{A_2} \frac{1}{h_2}} \quad (3.29)$$

şeklinde olur.





#### 4. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Renaud, Stebel, Verdin ve Falcone (2018), Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) tekniğini kullanarak magma odası yakınındaki jeotermal kuyudan ısı üretimi ve rezervuarın temel kararlı durum çalışmasını gerçekleştirmiştir. Basitleştirilmiş jeolojik hipotezleri kullanarak, İzlanda'da gerçekleştirilen bir derin sondaj projesi kuyusu olan IDDP-1 kuyusu baz alarak iki boyutlu eksenel simetrik tek akışlı bir model geliştirmişler ve çıkan sonuçları üç boyutlu Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği modeliyle karşılaştırmışlardır. Simüle edilmiş çıkış gücü 350°C 'de 25 MW 'a ve kuyu başı basıncı 140 bara ulaşmıştır. Sonuçlar ve geliştirdikleri metodolojide gözlemlemişlerdir ki; HAD tekniği, jeotermal kuyuların enerji verimliliklerini hesaplamada başarılı bir şekilde kullanılabilir ve kuyu içi ve rezervuarda kızgın buhar akış yapısının detaylarını verebilir.

Hein, Kolditz, Görke, Bucher ve Shao (2016), derin olmayan (sığ) jeotermal uygulamalarda, ısı pompası verimi dinamikleri ile birlikte, akış ve ısı transferi proseslerini içeren kapsamlı bir sayısal model oluşturmuşlardır. Toprak ısı kapasitesi ve termal kondüktivitenin sistemin sürdürülebilirliğinde çok az bir etkisi olduğunu kabul etmişlerdir. Kuyu ısı değiştirici çıktılarının gelişimini gözlemek için farklı senaryoları simüle etmişlerdir. İlk yılda sığ jeotermal enerjinin geri kazanımı yaklaşık %89 'a tekabül etmiştir.

Ho ve Dickson (2017), ısı ekstraksiyonu ile ilişkili karmaşık ısı transferi mekanizmalarını basitleştirmek amacıyla, bir ısı toplama sisteminde ısı toplama borularının sayısal analizini yapmak için COMSOL sonlu elemanlar metodunu kullanmışlardır. Çalışmada ısı üretimi modellemesi ve sabit yüzey altı sıcaklık bölgesinde ısı toplama borularının simülasyonu yapmışlardır. Chapman ve Katunich eşitliklerini kullanarak ortalama iklimsel verilere dayalı, Kuzey Dakota'nın doğusunda kar eritme sistemi için gerekli ısının elde edilmesi hesaplamaları yapmışlardır. Kuzey Dakota'nın doğusu için bu sistemin oldukça elverişli olduğu kanısına varmışlardır.

Han ve Yu (2017), jeotermal kuyulara yerleştirilen üç farklı kazık tipi ısı değiştiricilerinin ABD'nin bazı şehirlerinde kaldırım karlarının eritilmesi için kaldırım altına yerleştirilen eritme sistemine entegre çalışması fizibilitesi ve simülasyon temelli analizi üzerine çalışmışlardır. Farklı bölgeler için bu kar eritme sisteminin uygulanabilirliği ve

performansını analiz etmişlerdir. Farklı çalışma koşullar altında enerji elde etme oranını tahmin edebilmek için üç boyutlu bütünleşik simülasyon modeli geliştirmişlerdir. Kararlı sistemlerin fizibilitesinin ve performansının bölgenin jeolojik yapısına ve kar durumuna bağlı olduğu sonucuna ulaşmışlardır.

Wu, Aubry, Antaki, McKoy ve Massoudi (2017), sondaj ve jeotermal uygulamalarda karşılaşılan akışkan akışı, parçacık göçü ve lineer olmayan akışkanda ısı transferine çeşitli koşulların etkilerini incelemişlerdir. Çalışmalarında sondaj sıvısını, lineer olmayan karmaşık akışkan gibi davranan ve çeşitli maddelerden oluşan bir süspansiyon olarak düşünmüşlerdir. Parçacıkların hareketini bir konsantrasyon akı eşitliği kullanılarak açıklamışlardır. İncelemelerini düz dikey boru içinde akış için ve içteki borunu döndüğü eksantrik içi içe iki boru arasından akan akış için gerçekleştirmişlerdir.

Wu ve Massoudi (2016), bu çalışmalarında Couette akışındaki yayılım etkisi ve sondaj akışkanı içerisindeki ısı transferini incelemişlerdir. Ayrıca, termal konduktivite değişken konsantrasyon, kesme hızı ve sıcaklığa bağlı viskozitenin etkilerini araştırmışlardır. Korunum eşitliklerinin bir boyutlu formlarını sayısal olarak çözümlenmiş ve sonuçları çeşitli boyutsuz sayılar için parametrik bir çalışma şeklinde sunmuşlardır.

Han ve Yu (2016), dikey jeotermal ısı pompası sistemlerinin dizayn ve operasyon stratejilerini formüle etmek amacıyla, bu sistemlerin performansına etki eden faktörlerin duyarlılık analizlerini yapmışlardır. Jeotermal ısı değiştiricilerinin geçici ve sürekli rejim davranışlarını simüle etmede kullanılan üç boyutlu bütünleşik sonlu farklar metodu modeli uygulanması geliştirmişlerdir. Modeli öncelikle, kullanımda olan jeotermal ısı değiştiricilerinden alınan deneysel saha verilerini simülasyon modeli sonuçlarıyla karşılaştırarak doğrulamışlardır. Bu modelde; başlangıç yer sıcaklığı, jeotermal ısı değiştirici kurulum boru uzunluğu, operasyonel parametreler (sirkülasyon akışkanı akış hızı), giriş sıcaklığı, yeraltı suyu akış hızı gibi jeotermal ısı değiştiricilerinin performansını etkileyen bir dizi değişkenler için duyarlılık analizleri gerçekleştirmişlerdir. Bu duyarlılık analizi çalışması jeotermal ısı değiştiricilerin performansının tasarım ve operasyonellik açısından geliştirilmesi için potansiyel yollara ışık tutmuştur. Geliştirdikleri sayısal modeller, jeotermal ısı değiştiricilerin performansının değerlendirilmesi için kullanışlı bir araç sunmuşlardır.

Huang, Zhu ve Li (2015), Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) simülatörü Fluent kullanarak kuyu boyunca ısı transferiyle birlikte dikey enjeksiyon ve üretim kuyularında kararsız akışkan akışını modellemişlerdir. Zamanla gelişen sonuçlar, neredeyse tüm borunun hidro-tam gelişmiş durumda olduğunu, ancak başlangıç fazında termal olarak tam gelişmiş olmadığını göstermiştir.

Noorollahi, Yousefi ve Pourarshad (2015), üç boyutlu simülasyon tekniği kullanılarak, terkedilmiş bir petrol kuyusundan buhar üretiminin fizibilitesini incelemişlerdir. Kuyuya gönderilen akışkanla sıcak kaya arasındaki ısı transferini sümüle etmişlerdir. Simülasyondan elde ettikleri sonuçları, giriş ve çıkış debileri ve sıcaklıklar gibi parametreler için optimize etmişlerdir. Simülasyon sonuçları, buhar basıncı 8 bar ve kütleli debi 42 t/h iken, yeraltından çıkartılan ısı enerjisi bir gaz ocağı ile birleştirildiğinde sistemin enerji sağladığı Ahvaz şehri yakınlarındaki şeker fabrikasına gereken buharı sağladığını gözlemlemişlerdir.

Yang, Li, Deng, Meng ve Li (2015), kuyu ve formasyonun, aksel ve radyal doğrultudaki geçici rejim ısı transferini incelemişlerdir. Canlanmış kuyu için yaptıkları incelemelerini, kuyuda sirkülasyon varken ve kuyu kapatılmışken olmak üzere iki farklı durum için değerlendirmişlerdir. Termodinamiğin birinci kanunu doğrultusunda, kuyu ve formasyonun doğru sıcaklık profili tahmini için bir takım geçici ısı transferi modelleri geliştirmişlerdir. Modelleri kümeleme yöntemiyle birlikte fully implicit sonlu farklar yöntemi kullanarak çözümlenmişlerdir. Elde ettikleri sonuçlar göstermiştir ki; kuyunun canlandığı derinlik ve casing programı, formasyon ve kuyunun ısı değişim verimliliğini değiştirebilir ve bu da formasyon ve kuyunun sıcaklık dağılımını etkilemektedir. Kuyu ve formasyonun her bir bölgesindeki başlangıç ve sınır şartlarının ısı transferini etkileyebildiğini gözlemlemişlerdir. Geliştirdikleri bu modelin gerçek saha verilerine, başka modellere kıyasla daha uygun olduğunu belirtmişlerdir.

Casasso ve Sethi (2014), farklı parametrelerin toprak kaynaklı ısı pompalarının işleyişi üzerine etkisini değerlendirmek için bir takım akış ve ısı transferi simülasyonları gerçekleştirmişlerdir. Simülasyon sonuçları ispat etmiştir ki; ısı değiştirici uzunluğu toprak kaynaklı ısı pompasının en önemli parametresidir. Kuyu derinliğinin artmasının toprakaltı termal bozuklukların azalmasına sebep olduğunu ve ısı pompasının daha yüksek bir verimliliğe ulaştığını belirtmişlerdir. Bu durumun kurulum maliyetini arttıracaklarını ifade

etmişlerdir. Maliyeti azaltmak için sistem ömrüne uygun optimum bir derinlik saptamak gerektiğini açıklamışlardır.

Lenhard ve Malcho (2013), düşük potansiyel enerjinin dikey yer ısı değiştiricileri ve yerçekimi U-borusu ile elde edilmesini incelemişlerdir. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği'nde (HAD) simülasyon geliştirmişler ve buradan çıkan sonuçları gerçek simülatör verileriyle karşılaştırıp doğrulamışlardır.

Bobok (2012), Sondaj borusu ve anuluste akan sondaj sıvısının sıcaklık dağılımını hesaplamak için bir matematiksel analitik model geliştirmişlerdir.

Tekin ve Akin (2011), sondaj sırasında elde edilen kuyu giriş ve çıkış sıcaklıklarını kullanarak, Germencik-Omerbeyli sahasındaki beş farklı kuyunun formasyon sıcaklıklarını tahmin etmişlerdir. Bu beş kuyunun formasyon ve matkap sıcaklıklarını tahmin etmek için GTEMP kuyu termal simülasyon modelini kullanmışlardır. Tahminler yapılırken çamur sıcaklığına etkileyen soğutma kulesi etkisinin göz ardı edildiği ve soğutma kulesi etkisinin hesaba katıldığı iki farklı durum için derinlik-sıcaklık grafiklerini elde etmişlerdir.

Park, Kwak, Kim, Park ve Na (2010), Standing Column Well (SCW) olarak adlandırılan bir jeotermal kuyu ısı değiştiricisinin matematiksel modellenmesi üzerine çalışmışlardır. FLUENT programı kullanarak kondüksiyon, konveksiyon ve kuyuyu besleyen akışkanın ısı transferi modellemesini yapmışlardır. Gerçekleştirilen bu sayısal çalışmanın verilerini, modelin hassasiyetini göstermek için gerçek verilerle karşılaştırmışlar ve verilerin birbiriyle hemen hemen tam örtüştüğünü belirtmişlerdir.

Santoyo, Garcia, Espinosa, Santoyo-Gutierrez ve Gonzalez-Partida (2003), jeotermal kuyu tamamlamalarda kullanılan newtonyen olmayan sondaj akışkanının taşınım ile ısı transferi katsayısını tahmin edebilmek için kapsamlı kolerasyonlar geliştirmişlerdir. Tam gelişmiş laminer ve türbülanslı akış durumunda, taşınım ile ısı transferi katsayısını hesaplamak için beş farklı deneysel korelasyonlardan istifade etmişlerdir. Newtonyen olan ve newtonyen olmayan sondaj sıvılarının taşıma özellikleri reoloji laboratuvarında karşılaştırmışlar ve sonra bu özellikleri jeotermal sondajlara en uygun sıcaklık aralığı için taşınım ile ısı transferi katsayısını hesaplamada kullanmışlardır. Viskoziteyi taşınm ile ısı transferi katsayısını güçlü bir şekilde etkileyen ana özelliklerden biri olarak almışlardır.

Espinosa-Paredes, Garcia, Santoyo ve Hernandez (2001), TEMPOLI/V.2 isimli, jeotermal kuyularda sondaj için kullanılan sıvıların sıcaklık dağılımını yerinde tahmin etmede kullanılan bir bilgisayar programından faydalanarak jeotermal kuyuların sıcaklık dağılımını belirlemek için bir matematiksel model geliştirmişlerdir. Modeli geliştirirken kuyuda sondaj yapılırken ve kuyu kapalı durumdayken, kuyu içerisinde ve kuyu çevresindeki iki boyutlu ısı transferini göz önüne almışlardır. Sonuçları tam geçici model TEMPOLI/V.2 ve sözde geçici model TEMPOLI/V.1 arasında karşılaştırmışlar ve tam geçici simülatör TEMPOLI/V.2 daha iyi sonuçlar vermiştir. Ayrıca, TEMPOLI/V.2 sonuçlarını EAZ-2 jeotermal kuyusunun verileriyle de uygulamalı olarak doğrulamışlardır.

Santoyo, Garcia, Morales, Contreras ve Espinosa-Paredes (2001), jeotermal kuyu tamamlamada kullanılan altı farklı Meksika çimentolama sisteminin efektif termal kondüktivitelerini 28-200°C aralığı için klasik doğrusal kaynak metodu kullanarak deneysel olarak tespit etmişlerdir. Deney sistemini standart erimiş kuvars numunelerinin termal kondüktivitelerini ölçerek kalibre etmişlerdir. Elde ettikleri sonuçlar göstermiştir ki; termal iletkenlik belirli çimento sistemine bağlıdır ve çoğu çimento sistemi için sıcaklık ile artma eğilimindedir. Bu deneysel çalışmayla birlikte termal kondüktivite korelasyonları için yeni ampirik eşitlikler elde etmişlerdir.

Garcia, Santoyo, Espinosa, Hernandez ve Gutierrez (1998), kuyu içerisinde sirkülasyon esnasında ve sikülasyon kayıpları varken kapatma koşullarında, bir jeotermal kuyu içinde ve çevresinde sıcaklığın tahmini üzerine çalışmışlardır. Tahmin ettikleri sıcaklıkları kuyulardan alınan sıcaklık loglarıyla karşılaştırmışlardır. Tahminleri, kuyuyu çevreleyen formasyonda sirkülasyon kaybı varken geçici rejim taşınımıyla ısı transferini hesaba katılarak, özel geliştirilmiş bir bilgisayar programı kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Kapama sıcaklığı üzerindeki kayıp sirkülasyon etkisi tatmin edici şekilde modellenebilir sonucuna ulaşmışlardır.

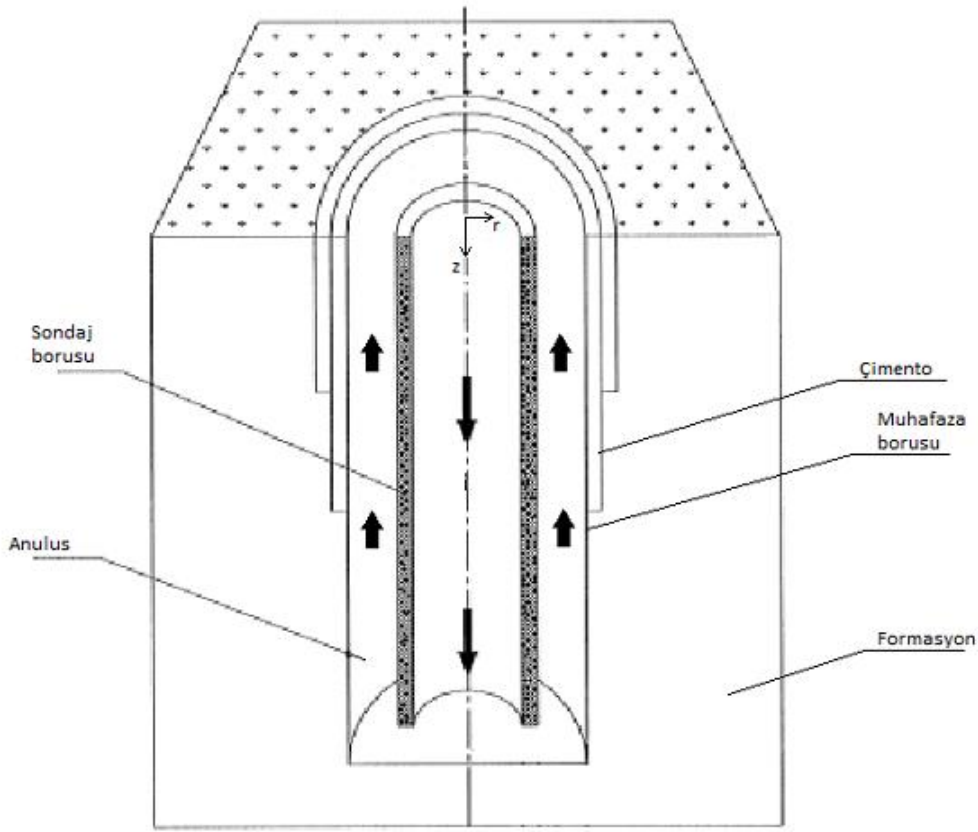
## 5. MATERİYAL VE METOD

Bir jeotermal kuyusunda değişik lokasyonlardaki sıcaklıkların bilinmesi gerekir. Sıcaklıkları belirlemek için kuyu içerisinde ölçüm yapılabilir. Ancak bu her zaman mümkün olmayan zahmetli ve masraflı bir yöntemdir. Bunun yerine kuyunun gerçek bir modelinin oluşturulduğu, laboratuvar şartlarında deneysel bir çalışma yapılabilir. Ya da daha önceki çalışmaların kaynak bilgi olarak ele alındığı sayısal bir çalışma yapılabilir.

Bu çalışmada bir jeotermal kuyudaki sıcaklık dağılımının sayısal olarak belirlenmesi amacıyla iki bilgisayar yazılımı geliştirilmiştir. İlk aşamada Matlab programlama dilinde geliştirilen bir yazılımla belli bir derinlikteki kuyunun dip (rezervuar) sıcaklığı  $\epsilon$ -NTU yöntemiyle sayısal olarak bulunmuştur. İkinci aşamada Delphi programlama dilinde geliştirilen bir yazılımda kuyu içi sıcaklık dağılımı sayısal olarak bulunmuştur.

### 5.1. Materyal

Problemin çözümü için öncelikle bir kuyu modeli seçilmiştir. Seçilen kuyu modelinin şematik gösterimi Şekil 5.1'de görülmektedir. Bu kuyu modelinden hareketle sisteme ait Navier-Stokes ve Enerji eşitliklerinin diferansiyel formları yazılmıştır. Bu eşitliklerin çözümü için iki sayısal yöntem belirlenerek iki ayrı programlama dilinde geliştirilmiş olan iki ayrı yazılım kullanılmıştır. MATLAB programlama dilinde geliştirilen yazılımla öncelikle kuyu dibi (rezervuar) sıcaklığı belirlenmiştir. Delphi programlama dilinde geliştirilen bir yazılımla da kuyu içindeki sıcaklık dağılımı sayısal olarak belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar grafiğe dönüştürülerek değerlendirilmiş ve tartışılmış, diğer benzer çalışmalarla sonuçlar kıyaslanmıştır.



Şekil 5.1. Sondaj sıvısının kuyudaki dolaşımını gösteren kuyu modeli (Espinosa-Paredes ve diğerleri, 2001; Yang ve diğerleri., 2015)

## 5.2. Metod

Mühendislik problemleri ile ilgili sayısal çözümlerde “Sonlu Elemanlar Yöntemi” ve “Sonlu Farklar Yöntemi” en çok başvurulan yöntemler arasındadır. Isı Transferi ve Akışkanlar Mekaniği problemlerinin sayısal çözümlerinde ise en çok başvurulan yöntem sonlu farklar yöntemidir. Bu yöntem ile sonuca ulaşmak daha kolaydır ve aynı zamanda elde edilen sonuçlar da oldukça tatmin edici olmaktadır. Bu çalışmada da sonlu farklar sayısal çözüm yöntemi kullanılmıştır.

Diğer taraftan derinliği belli olan kuyunun dip yani rezervuar sıcaklığını tahmin eden ya da sayısal olarak hesaplayan ve  $\varepsilon$ -NTU yöntemini kullanan bir yazılım geliştirilmiştir.

Sıcaklık dağılımı, ayrıklaştırılmış eşitlikler kullanılarak Gauss-Seidel iterasyon yöntemiyle belirlenmiştir. Yapılan denemeler sonucu hesaplama bölgesine radyal yönde, 8’i iç boruda, 8’i anulus kısmında ve ikisi de boru cidarında olmak üzere 18 düğüm yerleştirilmiştir.

Eksenel yönde ise, kuyu derinliğine bağlı olarak ya her 1 m'ye bir düğüm ya da her 0.5m'ye bir düğüm olacak şekilde ayarlama yapılmıştır. Akış yönünde seçilecek olan toplam düğüm sayısında Peclet sayısı önemli bir parametredir. Ancak bu çalışmada kuyu derinliği kuyu çapından çok büyük olduğu için Pe sayısının düğüm sayısına etkisi yok farz edilebilir.

Çözümlerde hassasiyet limiti  $10^{-13}$  gibi oldukça düşük bir sayı seçilmiştir. Kuyunun derinlik/çap oranı oldukça büyük olduğundan bu hassasiyet gerekli görülmüştür. Her bir iterasyon döngü sonucu bu hassasiyet limitinin altında kalınıp kalınmadığı kontrol edilmiş ve ancak tüm kalıntılar bu limitin altında kaldığında çözüm döngüsünden çıkılmıştır.

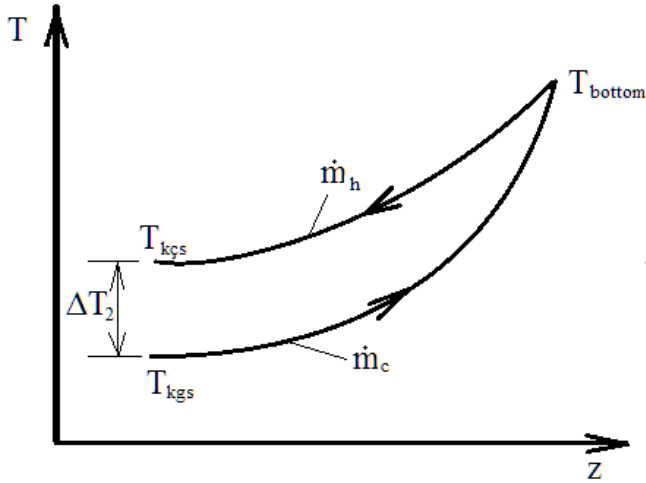
Sayısal çözüm için bir iş istasyonu (Workstation) kullanılmıştır. Bu nedenle çözümler esnasında yakınsamanın bir hayli hızlı olduğu gözlenmiştir. MATLAB programlama diliyle yapılan çözümde yakınsama yaklaşık 85-90 saniye arasında sürmüştür. Delphi programlama dilindeki sıcaklık dağılımı probleminin çözümü ise yaklaşık olarak 60-70 saniye arasında sürmektedir.

### 5.2.1. Fiziksel Model

Seçilmiş olan kuyu modeline uygun olarak bir matematik model geliştirilmiş ve bu matematik modelin diferansiyel eşitliği yazılmıştır. Çözüm domaini ve sistemin sınırları belirlendikten sonra problemin başlangıç ve sınır şartları belirlenmiştir. Seçilen domaine uygun bir grid sistemi oluşturulmuştur. Yazılan diferansiyel eşitliklerin bu grid sisteminin her bir düğüm noktasında sağlanması gerekir. Yani her bir düğüm noktası için yazılan diferansiyel eşitlik takımı sisteminin ortak sayısal çözümü gerekir. Bunun için, elde edilen diferansiyel eşitlik önce ayrıklaştırılır. Bu aşamadan sonra da belirli bir algoritma kullanılarak problemin bilgisayar çözümü gerçekleştirilir. Yöntemin detayları aşağıda açıklanmıştır.

Şekil 5.1'de şeması görülen jeotermal bir kuyu basitçe eş eksenli iç içe geçmiş iki borudan oluşan bir ısı değişicisi gibi düşünülebilir. Bu ısı değişicisinin ısı kaynağı kuyu rezervuarı ya da kuyunun en derin kısmı olan dip kısmı olarak düşünülebilir. Bu durumda kuyu fiziksel olarak paralel ve zıt akışlı, tek geçişli bir ısı değişicisine benzetilebilir. Böyle bir ısı değişicisine ait prensip diyagram şeması Şekil 5.2'de görülmektedir.





Şekil 5.2. Tek geçişli paralel ve zıt akışlı ısı değiştirici prensip şeması

Isı değiştiricilerinde sıcak ve soğuk akışkanlar arasındaki ısı değişimi şu ifadelerle verilebilir:

Sıcak akışkan için;

$$q = \dot{m}_h C_{ph} (T_{hg} - T_{hc}) \quad (5.1)$$

Soğuk akışkan için;

$$q = \dot{m}_c C_{pc} (T_{ch} - T_{cg}) \quad (5.2)$$

Sıcak ve soğuk akışkanlar arasında meydana gelen ısı transferi için ise şu ifade yazılabilir;

$$q = UA\Delta T_M \quad (5.3)$$

Bu eşitlikte;  $U$  toplam ısı transferi katsayısı olup,

$$UA = \frac{1}{\frac{1}{h_i A_i} + \frac{\ln\left(\frac{d_d}{d_i}\right)}{2\pi k L} + \frac{1}{h_d A_d}} = \frac{\pi L}{\frac{1}{h_i d_i} + \frac{\ln\left(\frac{d_d}{d_i}\right)}{2k} + \frac{1}{h_{an} d_{an}}} \quad (5.4)$$

bağıntısı ile hesaplanabilir.

$\Delta T_M$  ise ortalama logaritmik sıcaklık farkıdır ve

$$\Delta T_M = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)} \quad (5.5)$$

bağıntısından elde edilir. Paralel ve ters akışlı, tek geçişli bir ısı değişicisinde;

$$\begin{aligned} \Delta T_1 &= T_{hg} - T_{cç} \\ \Delta T_2 &= T_{hç} - T_{cg} \end{aligned} \quad (5.6)$$

olarak alınabilirler. Şekil 5.2'ye bakıldığında  $\Delta T_2$ 'nin kuyu ağzında suyun dış borudan çıkış sıcaklığı ile iç boruya giriş sıcaklığı arasındaki farka eşit olduğu görülecektir.  $\Delta T_1$  ise kuyunun dip tarafında akışkanın iç borudan çıkıp dış boruya girdiği yerdeki sıcaklık farkıdır. Oysaki bu bölgede sıcaklıklar eşittir. Ancak herhangi matematiksel bir hataya neden olmamak için  $\Delta T_1$  sıcaklık farkının küçük bir değer alınması (örneğin  $\Delta T_1 = 0.1$  gibi) pratikte ciddi bir problem oluşturmaz. Eşitliklerdeki taşınım katsayılarının bulunması için Nu sayısının uygun bir şekilde hesaplanması gerekir. Gnielinsky (1976)  $Re > 2300$  için şu bağıntıyı tavsiye etmiştir;

$$Nu = \frac{(f/8)(Re-1000)Pr}{1 + 12.7\sqrt{f/8} (Pr^{2/3} - 1)} \quad (5.7)$$

Bu eşitlikte  $f$  sürtünme katsayısı olup;

$$f = [1.82 \log(Re) - 1.64]^2 \quad (5.8)$$

olarak verilebilir. Nu sayısı bulunduktan sonra;

$$h = k \frac{D_h}{Nu} \quad (5.9)$$

bağıntısından taşınım katsayısı hesaplanır.

Bu çalışmada rezervuar sıcaklığının doğru olarak tahmin edilebilmesi için MATLAB programlama dilinde bir yazılım geliştirilmiştir. Rezervuar sıcaklığının bulunması için etkenlik-NTU yöntemi kullanılmıştır (Incropera ve DeWitt, 1996: 599, 604). Etkenlik;

$$\varepsilon = \frac{Q}{Q_{\max}} = \frac{\dot{m}C_{p,h}(T_{rez} - T_c)}{\dot{m}C_{\min}(T_{rez} - T_g)} \quad (5.10)$$

şeklinde tanımlanır. NTU (Number of Transfer Unit) ise;

$$NTU = \frac{UA}{C_{\min}} \quad (5.11)$$

olarak tanımlanır. Paralel ve ters akışlı iç içe geçmiş iki boru için etkenlik;

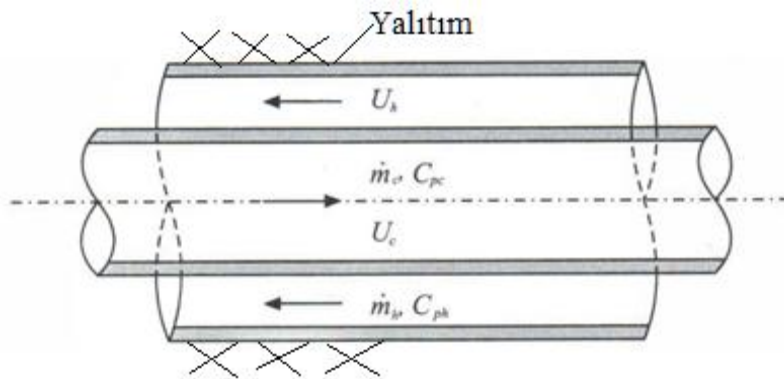
$$\varepsilon = \frac{1 - \exp[-NTU(1 - C_r)]}{1 - C_r \exp[-NTU(1 - C_r)]} \quad (5.12)$$

bağıntısından hesaplanabilir. Burada

$$C_r = \frac{C_{\min}}{C_{\max}} \quad (5.13)$$

olarak tanımlanmıştır.

Şekil 5.3'te ortak eksenli iki borudan oluşan ısı değişicisinin şematik temsili bir resmi görülmektedir.

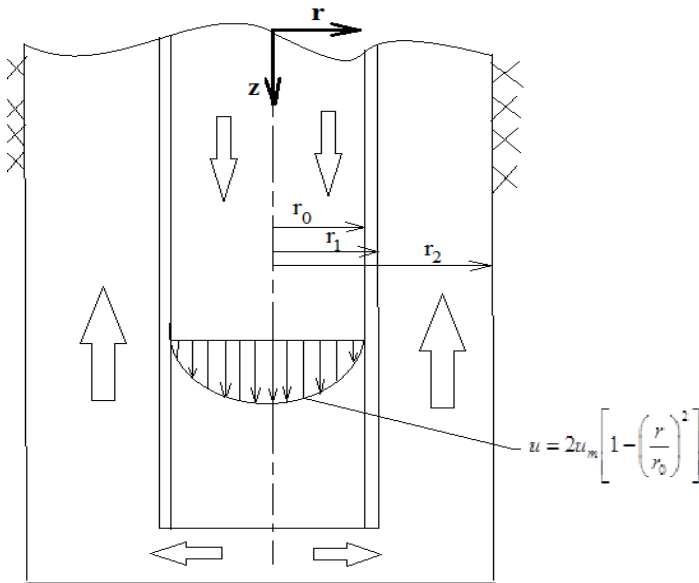


Şekil 5.3. İç içe geçmiş ortak eksenli borular; paralel ve ters akışlı, tek geçişli ısı değişicisi örneği

### 5.2.2. Problemin Tanımı

Bu çalışmada jeotermal bir kuyunun sıcaklık dağılımının bulunması için matematik bir model geliştirilmiştir. Geliştirilen modelde kuyu ve içerisindeki boru şebekesi, iç içe geçmiş eş eksenli iki boru olarak düşünülmüştür. Problemin şematik çizimi ve koordinat sistemi Şekil 5.4'te görülmektedir. Problemi basitleştirmek için sıcaklıkla madde özelliklerinin değişmediği kabul edilecektir. İç taraftaki boruda, boru iç yüzey sıcaklığı ile boru dış yüzey sıcaklığı birbirine çok yakın değerlerde ise boru ince cidarlı kabul edilebilir. Bu çalışmada iç taraftaki boru kalın cidarlı kabul edilmiştir. Dış tarafta kalan boru ise (casing) dış taraftan yalıtılmış ince cidarlı bir boru olarak düşünülmüştür. Çünkü, sürekli rejim göz önüne alındığında toprak iyi bir yalıtıcı gibi düşünülebilir ve ciddi bir hata oluşturmaz.

Sistem bu haliyle iç içe geçmiş iki borudan oluşan bir ısı değişicisi gibi düşünülebilir. Sistemde minimum sıcaklık iç borunun giriş kısmında, maksimum sıcaklık ise iç borunun çıkış kısmında olacaktır. Maksimum sıcaklık olarak rezervuar sıcaklığını kabul etmek iyi bir yaklaşımdır. Şekilden de anlaşılacağı üzere iç borunun çıkışı, dış borunun girişi olarak alınabilir. Böylece iç borunun çıkış sıcaklığı ile dış borunun giriş sıcaklığı birbirine eşit alınabilir. Dış borunun çıkış sıcaklığı ise öncelikli olarak minimum ve maksimum sıcaklıklar ile iç ve dış borulardaki taşınım katsayısına (film katsayısına) bağlı olarak değişecektir.



Şekil 5.4. Jeotermal kuyu için oluşturulan matematik modelin şematik diyagramı

Taşınım ile ısı transferi olaylarında taşınım katsayısı (film katsayısı) en önemli parametredir. Ancak taşınım katsayısının belirlenmesi oldukça zordur. Çünkü pek çok parametreye bağlı olarak değişmektedir. Örneğin akışın laminar veya türbülanslı oluşu, akışkanın faz değiştirmesi, viskozite ve yoğunluk taşınım katsayısı değerini oldukça değişken yapan parametrelerdir. Bu çalışmada problemi basitleştirmek için akışkan özelliklerinin sabit olduğu, yani zaman, sıcaklık v.s. etkisi ile değişmediği kabul edilmiştir. Faz değişimi de söz konusu değildir. Örneğin sıvı olan akışkan gaz haline geçmemektedir. Bu durumda sürekli ve tam gelişmiş bir akış için taşınım katsayısı sabit kabul edilebilir.

Sistemin sürekli rejime ulaşması için olayın başlangıcından itibaren belli bir sürenin geçmesi gerekir. Bir jeotermal kuyunun işleme alındıktan sonra uzun süre çalıştırılacağı göz önünde bulundurulursa sürekli rejim varsayımı yanlış değildir.

### 5.2.3. Formülasyon

Sıkıştırılmayan ve özellikleri değişmeyen bir akışkan için enerji eşitliğinin diferansiyel formu silindirik koordinatlar için en genel haliyle şöyledir (Kakaç ve Yener, 1995: 33, 39);

$$\rho C_p \left[ \frac{\partial T}{\partial t} + v_r \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r} v_\theta \frac{\partial T}{\partial \theta} + v_z \frac{\partial T}{\partial z} \right] = k \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] + \Phi \quad (5.14)$$

Bu eşitlikte  $\Phi$  disipasyon faktörü, ya da diğer adıyla viskoz sönüm faktörü olup silindirik koordinatlarda şöyle ifade edilebilir.

$$\Phi = 2\mu \left[ \left( \frac{\partial v_r}{\partial r} \right)^2 + \left( \frac{1}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + \frac{v_r}{r} \right)^2 + \left( \frac{\partial v_z}{\partial z} \right)^2 \right] + \mu \left[ \left( \frac{1}{r} \frac{\partial v_z}{\partial \theta} + \frac{\partial v_\theta}{\partial z} \right)^2 + \left( \frac{\partial v_r}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial r} \right)^2 + \left( \frac{1}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} - \frac{v_\theta}{r} + \frac{\partial v_\theta}{\partial r} \right)^2 \right] \quad (5.15)$$

Sıkıştırılmayan, sürekli, laminar, hidrodinamik olarak tam gelişmiş ve simetrik akış şartlarındaki bir akışta ayrıca viskoz sönüm de ihmal edildiğinde enerji eşitliği şöyle sadeleşir.

$$\rho C_p v_z \frac{\partial T}{\partial z} = k \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] \quad (5.16)$$

Bu eşitlikte tek hız ifadesi olan  $v_z$  boru eksenî yönündeki hızdır ve  $u$  sembolü ile ifade edilebilir. Sürekli, hidrodinamik olarak tam gelişmiş, laminer, aksel simetrik ve kütleles kuvvetlerin olmadığı bir akışta aksel yöndeki hız bileşeni için;

$$u = 2u_m \left[ 1 - \left( \frac{r}{r_0} \right)^2 \right] \quad (5.17)$$

ifadesi yazılabilir. Bu ifade borularda gelişmiş laminer akış için Hagen-Poiseuille hız profili olarak isimlendirilir (Kays, 1966).

Bu eşitliklerin doğru olarak uygulanabilmesi için jeotermal kuyusunu üç bölgeye ayırmak gerekir. Sondaj borusunun iç kısmı (inlet drilling pipe), sondaj borusu (drill pipe wall) ve sondaj borusunun dış kısmı (annulus). Bu üç bölgenin her biri için enerji eşitliğinin yeniden düzenlenmesi gerekir.

Sondaj borusu iç kısmı için matematik formülasyon:

Eş. 5.17 ve 5.16 yerine yazılıp eşitlik yeniden düzenlendiğinde;

$$2u_m \rho_i C_{p,i} \left[ 1 - \left( \frac{r}{r_1} \right)^2 \right] \frac{\partial T_1}{\partial z} = k_{fi} \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T_1}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 T_1}{\partial z^2} \right] \quad (5.18)$$

elde edilir.

Bu eşitlik için sınır şartları:

$$z=0 \text{ da (girişte) } r \leq r_1 \text{ için } T_1 = T_{in} \quad (5.19-a)$$

$$z=H \text{ da (rezervuarda) } r \leq r_1 \text{ için } T_1 = T_{rez.} \text{ ve } u_m=0 \quad (5.19-b)$$

$z>0$  ve  $z<H$  da

$$a) \ r=0 \text{ için } \frac{\partial T_1}{\partial r} = 0 \quad (5.19-c)$$

$$b) \ r=r_1 \text{ için } k_w \frac{\partial T}{\partial r} = h_i (T_{wi} - T_1) \text{ ve } u_m=0 \quad (5.19-d)$$

Sondaj borusu için matematik formülasyon:

Sondaj borusu için Eş. 5.15;

$$0 = k_w \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T_2}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 T_2}{\partial z^2} \right] \quad (5.20)$$

halini alır.

Sınır şartları;

$z=0$  da (girişte)

$$a) \ r=r_1 \text{ için } T_2 = T_{in} \quad (5.21-a)$$

$$b) \ r=r_2 \text{ için } T_2 = T_{out} \quad (5.21-b)$$

$$z=H \text{ da (rezervuarda) } r=r_1 \text{ ve } r=r_2 \text{ için } T_2 = T_{in} = T_{out} = T_{rez}. \quad (5.21-c)$$

$z>0$  ve  $z<H$  da

$$a) \ r=r_1 \text{ için } T_2 = T_{wi}, \quad k_w \frac{\partial T}{\partial r} = h_i (T_{wi} - T_1) \quad (5.21-d)$$

$$b) \ r=r_2 \text{ için } T_2 = T_{wo}, \quad k_w \frac{\partial T}{\partial r} = h_o (T_3 - T_{wo}) \quad (5.21-e)$$

Anulus bölgesi için matematik formülasyon:

Bu bölge için eşitlik şu şekilde değişir;

$$2u_m \rho_o C_{p,o} \left[ 1 - \left( \frac{r}{r_1} \right)^2 \right] \frac{\partial T_3}{\partial z} = k_{fo} \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T_3}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 T_3}{\partial z^2} \right] \quad (5.22)$$

Bu eşitlik için sınır şartları:

$$z=0 \text{ da (girişte) } r \geq r_2 \text{ için } T_3 = T_{out} \quad (5.23-a)$$

$$z=H \text{ da (rezervuarda) } r \geq r_2 \text{ için } T_3 = T_{rez} \text{ ve } u_m=0 \quad (5.23-b)$$

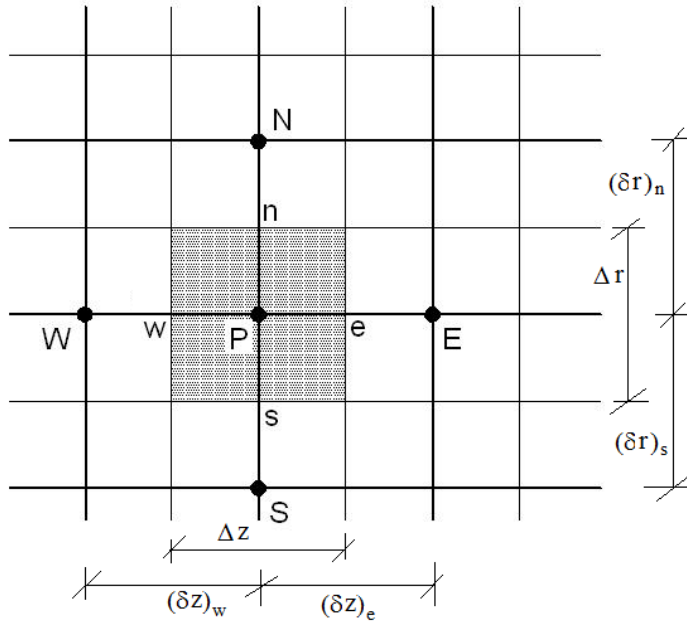
$z>0$  ve  $z<H$  da

$$a) r=r_2 \text{ için } T_3 = T_{wo}, \quad k_w \frac{\partial T}{\partial r} = h_o (T_3 - T_{wo}) \text{ ve } u_m=0 \quad (5.23-c)$$

$$b) r=r_3 \text{ için } \frac{\partial T_3}{\partial r} = 0 \text{ ve } u_m=0 \quad (5.23-d)$$

#### 5.2.4. Sayısal Çözüm

Ayrıklaştırma (Discretization): problemin sonlu farklar yöntemiyle çözülebilmesi için diferansiyel eşitliklerin ve sınır şartlarının ayrıklaştırılması (diskritize edilmesi) gerekir. Ayrıklaştırma aslında diferansiyel eşitlik sisteminin sayısal çözümü olup bu çözümün cebirsel eşitlik halinde yazılması işlemidir. Bu çalışmada diferansiyel eşitlikler merkezi fark yöntemi ile ayrıklaştırılmıştır. Merkezi fark en etkili ayrıklaştırma yöntemi değil, ama en çok bilinen ve en çok kullanılan bir ayrıklaştırma yöntemidir. Ayrıklaştırma Patankar'ın kontrol hacim yaklaşımı (Patankar, 1980) ile ve Şekil 5.5'te görülen iki boyutlu bir düğüm sistemindeki P noktası çevresinde gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.5'teki notasyon, belirtilen referanstaki orijinal haline uygun olarak verilmiştir.



Şekil 5.5. Düğüm noktası sistemi



Diferansiyel eşitliklerin ayrıklaştırılması

Eş. 5.18, 5.20 ve 5.22'nin tüm elemanlarını  $r$  ile çarpıp yeniden düzenlemek ayrıklaştırma işleminde kolaylık sağlayacaktır.

Buna göre Eş. 5.18;

$$\frac{2u_m r_1 \rho_i C_{p,i}}{k_{fi}} \left[ \frac{r}{r_1} - \left( \frac{r}{r_1} \right)^3 \right] \frac{\partial T_1}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T_1}{\partial r} \right) + r \frac{\partial^2 T_1}{\partial z^2} \quad (5.24)$$

halini alır. Bu eşitliğin sol tarafındaki sabit terim  $Pe$  sayısıdır.

$$Pe = \frac{2u_m r_{wi} \rho_f C_{p,f}}{k_f} \quad (5.25)$$

Eş. 5.24 şu şekilde düzenlenebilir;

$$\frac{\partial}{\partial z} \left\{ Pe \left[ \frac{r}{r_1} - \left( \frac{r}{r_1} \right)^3 \right] T_1 - r \frac{\partial T_1}{\partial z} \right\} = \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T_1}{\partial r} \right) \quad (5.26)$$

Bu eşitlik de;

$$\frac{\partial J_z}{\partial z} = \frac{\partial J_r}{\partial r} \quad (5.27)$$

şeklinde yazılabilir. Burada;

$$J_z = Pe \left[ \frac{r}{r_1} - \left( \frac{r}{r_1} \right)^3 \right] T_1 - r \frac{\partial T_1}{\partial z} \quad (5.28)$$

olarak aksel yöndeki ısı akısını ve

$$J_r = r \frac{\partial T_1}{\partial r} \quad (5.29)$$

olarak radyal yöndeki ısı akısını temsil etmektedirler.

Eş 5.27'nin sol tarafındaki terimin ayrıklaştırılması için;

$$\frac{\partial J_z}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left\{ Pe \left[ \frac{r}{r_1} - \left( \frac{r}{r_1} \right)^3 \right] T_1 - r \frac{\partial T_1}{\partial z} \right\} = 0 \quad (5.30)$$

yazılarak işleme devam edilebilir.

$$M = \frac{Pe}{r_1} \left[ 1 - \left( \frac{r}{r_1} \right)^2 \right] \text{ alınarak bu eşitlik,}$$

$$\frac{\partial^2 T_1}{\partial z^2} - M \frac{\partial T_1}{\partial z} = 0 \quad (5.31)$$

şeklinde düzenlenebilir. Eş. 5.30 ikinci mertebeden, tek bilinmeyenli, sabit katsayılı, sağ tarafsız, homojen bir diferansiyel eşitliktir. Bu eşitliğin çözümü için aşağıda detayları anlatılan yol takip edilir.

Bu diferansiyel eşitliğin karakteristik eşitliği;  $r^2 - M \cdot r = 0$  şeklinde yazılabilir. Bu eşitlik;  $r(r - M) = 0$  yazıldığında köklerinin,  $r_1 = 0$  ve  $r_2 = M$  olduğu kolayca anlaşılır.

Dolayısıyla eşitliğin genel çözümü,  $T = C_1 + C_2 \cdot e^{M \cdot z}$  formatında olacaktır.  $C_1$  ve  $C_2$  katsayılarının belirlenmesi için sınır şartları yazılmalıdır.  $0 \leq z \leq H$  çözüm aralığında şu sınır şartları yazılabilir:

$$z=0 \text{ da } T_1 = T_{in}$$

$$z=H \text{ da } T_1 = T_{rez.}$$

Buradan

$$C_1 = T_{in} - \left( \frac{T_{rez.} - T_{in}}{e^{M \cdot H} - 1} \right) \text{ ve } C_2 = \frac{T_{rez.} - T_{in}}{e^{M \cdot H} - 1} \text{ elde edilir. } M = \frac{Pe}{r_1} \left[ 1 - \left( \frac{r}{r_1} \right)^2 \right], C_1 \text{ ve } C_2$$

yerlerine yazıldığında;

$$\frac{T_1 - T_{in}}{T_{rez.} - T_{in}} = \frac{\exp\left\{\frac{Pe}{r_1} \left[1 - \left(\frac{r}{r_1}\right)^2\right] z\right\} - 1}{\exp\left\{\frac{Pe}{r_1} \left[1 - \left(\frac{r}{r_1}\right)^2\right] H\right\} - 1} \quad (5.32)$$

elde edilir.

Şekil 5.5'teki grid sisteminde  $e$  noktası ve civarı için bu eşitlik şu şekilde yazılabilir.

$T_1 = T_e$  ,  $T_{in} = T_P$  ,  $T_{rez.} = T_E$  ,  $H = (\delta z)_e$  alınarak,

$$\frac{T_e - T_P}{T_E - T_P} = \frac{\exp\left\{\frac{Pe}{r_0} \left[1 - \left(\frac{r_e}{r_0}\right)^2\right] z_e\right\} - 1}{\exp\left\{\frac{Pe}{r_0} \left[1 - \left(\frac{r_e}{r_0}\right)^2\right] (\delta z)_e\right\} - 1} \quad (5.33)$$

veya

$$T_e = T_P + (T_E - T_P) \left\{ \frac{\exp\left\{\frac{Pe}{r_0} \left[1 - \left(\frac{r_e}{r_0}\right)^2\right] z_e\right\} - 1}{\exp\left\{\frac{Pe}{r_0} \left[1 - \left(\frac{r_e}{r_0}\right)^2\right] (\delta z)_e\right\} - 1} \right\} \quad (5.34)$$

yazılabilir.

Bu son eşitlik  $e$  noktası civarında türevlendiğinde;

$$\left(\frac{dT}{dz}\right)_e = (T_E - T_P) \left\{ \frac{\frac{Pe}{r_1} \left[1 - \left(\frac{r_e}{r_1}\right)^2\right] \exp\left[\frac{Pe}{r_1} \left[1 - \left(\frac{r_e}{r_1}\right)^2\right] z_e\right]}{\exp\left[\frac{Pe}{r_1} \left[1 - \left(\frac{r_e}{r_1}\right)^2\right] (\delta z)_e\right] - 1} \right\} \quad (5.35)$$

elde edilir. Ayrıca Eş. 5.28  $e$  noktası için yazılırsa;

$$J_e = Pe \left\{ \left[ \frac{r_e}{r_1} - \left( \frac{r_e}{r_1} \right)^3 \right] T \right\} - r_e \left( \frac{\partial T}{\partial z} \right)_e \quad (5.36)$$

elde edilir. Eş. 5.34 ve 5.35, Eş. 5.36'ya taşındığında ise;

$$J_e = Pe \left\{ \left[ \frac{r_e}{r_1} - \left( \frac{r_e}{r_1} \right)^3 \right] \left\{ T_P + (T_E - T_P) \frac{\exp \left\{ \frac{Pe}{r_1} \left[ 1 - \left( \frac{r_e}{r_1} \right)^2 \right] z_e \right\} - 1}{\exp \left\{ \frac{Pe}{r_1} \left[ 1 - \left( \frac{r_e}{r_1} \right)^2 \right] (\delta z)_e \right\} - 1} \right\} \right\} - r_e (T_E - T_P) \left\{ \frac{\frac{Pe}{r_1} \left[ 1 - \left( \frac{r_e}{r_1} \right)^2 \right] \exp \left[ \frac{Pe}{r_1} \left[ 1 - \left( \frac{r_e}{r_1} \right)^2 \right] z_e \right]}{\exp \left[ \frac{Pe}{r_1} \left[ 1 - \left( \frac{r_e}{r_1} \right)^2 \right] (\delta z)_e \right] - 1} \right\} \quad (5.37)$$

eşitliği elde edilir. Bu eşitlik sadeleştirilerek;

$$J_e = Pe \frac{r_e}{r_1} \left[ 1 - \left( \frac{r_e}{r_1} \right)^2 \right] \left\{ T_P + \frac{T_P - T_E}{\exp \left[ \frac{Pe}{r_1} \left( 1 - \left( \frac{r_e}{r_1} \right)^2 \right) (\delta z)_e \right] - 1} \right\} \quad (5.38)$$

elde edilir.

Aynı işlemler grid sistemindeki  $w$  noktası için tekrarlandığında;

$$J_w = Pe \frac{r_w}{r_1} \left[ 1 - \left( \frac{r_w}{r_1} \right)^2 \right] \left\{ T_W + \frac{T_W - T_P}{\exp \left[ \frac{Pe}{r_1} \left( 1 - \left( \frac{r_w}{r_1} \right)^2 \right) (\delta z)_w \right] - 1} \right\} \quad (5.39)$$

elde edilir.  $J_e - J_w$  yazıldığında da ve ayrıca  $r_e = r_w = r_p$  olduğu göz önüne alınarak;

$$J_e - J_w = Pe \frac{r_p}{r_1} \left[ 1 - \left( \frac{r_p}{r_1} \right)^2 \right] \left\{ \begin{array}{l} \left[ T_p + \frac{T_p - T_E}{\exp \left[ \frac{Pe}{r_1} \left( 1 - \left( \frac{r_e}{r_1} \right)^2 \right) (\delta z)_e \right] - 1} \right] \\ - \left[ T_w + \frac{T_w - T_p}{\exp \left[ \frac{Pe}{r_1} \left( 1 - \left( \frac{r_w}{r_1} \right)^2 \right) (\delta z)_w \right] - 1} \right] \end{array} \right\} \cdot \Delta r \quad (5.40)$$

olarak Eş. 5.26'nın sol tarafı ayrılaştırılmış olur. Eş. 5.26'nın sağ tarafı ise şu şekilde ayrılaştırılır:

$$\int_w^e \int_s^n \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) dr \cdot dz = \int_w^e \left[ \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right)_n - \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right)_s \right] dz = \left[ \frac{r_n (T_N - T_p)}{(\delta r)_n} - \frac{r_s (T_p - T_s)}{(\delta r)_s} \right] \cdot \Delta z \quad (5.41)$$

Eş. 5.40 ve 5.41 birleştirildiğinde;

$$Pe \frac{r_p}{r_1} \left[ 1 - \left( \frac{r_p}{r_1} \right)^2 \right] \left\{ \begin{array}{l} \left[ T_p + \frac{T_p - T_E}{\exp \left[ \frac{Pe}{r_1} \left( 1 - \left( \frac{r_e}{r_1} \right)^2 \right) (\delta z)_e \right] - 1} \right] \\ - \left[ T_w + \frac{T_w - T_p}{\exp \left[ \frac{Pe}{r_1} \left( 1 - \left( \frac{r_w}{r_1} \right)^2 \right) (\delta z)_w \right] - 1} \right] \end{array} \right\} \cdot \Delta r = \left[ \frac{r_n (T_N - T_p)}{(\delta r)_n} - \frac{r_s (T_p - T_s)}{(\delta r)_s} \right] \cdot \Delta z \quad (5.42)$$

olarak Eş. 5.26'nın ayrılaştırılmış hali elde edilmiş olur.

Sayısal çözüm için bu eşitliğin bilgisayar notasyonuna uygun bir formatta yazılması faydalı olur. Bunun için eşitlik aşağıdaki kompakt formatta yazılabilir.

$$a_p T_p = a_E T_E + a_w T_w + a_N T_N + a_S T_S + b \quad (5.43)$$

Bu format Eş. 5.42'ye uygulandığında katsayılar şu şekilde olacaktır.

$r_n = r_p + 0.5(\delta r)_n$  ve  $r_s = r_p - 0.5(\delta r)_s$  olduğu da ayrıca dikkate alınarak;

$$a_E = \frac{Pe \frac{r_p}{r_1} \left[ 1 - \left( \frac{r_p}{r_1} \right)^2 \right]}{\exp \left[ \frac{Pe}{r_1} \left( 1 - \left( \frac{r_p}{r_1} \right)^2 \right) (\delta z)_e \right] - 1} \cdot \Delta r \quad (5.44-a)$$

$$a_W = Pe \frac{r_p}{r_1} \left[ 1 - \left( \frac{r_p}{r_1} \right)^2 \right] \left\{ \frac{\exp \left[ \frac{Pe}{r_1} \left( 1 - \left( \frac{r_p}{r_1} \right)^2 \right) (\delta z)_w \right]}{\exp \left[ \frac{Pe}{r_1} \left( 1 - \left( \frac{r_w}{r_1} \right)^2 \right) (\delta z)_w \right] - 1} \right\} \cdot \Delta r \quad (5.44-b)$$

$$a_N = \frac{r_n \cdot \Delta z}{(\delta r)_n} = \left[ \frac{r_p}{(\delta r)_n} + 0.5 \right] \cdot \Delta z \quad (5.44-c)$$

$$a_S = \frac{r_s \cdot \Delta z}{(\delta r)_s} = \left[ \frac{r_p}{(\delta r)_s} - 0.5 \right] \cdot \Delta z \quad (5.44-d)$$

$$b=0 \quad (5.44-e)$$

$$a_P = a_E + a_W + a_N + a_S \quad (5.44-f)$$

Sınır şartlarının ayrıklaştırılması:

$$\text{Boru ekseninde, yani } r=0 \text{ için } \frac{\partial T_1}{\partial r} = 0 \quad (5.19-c \text{ sınır şartı})$$

$$\left. \frac{\partial T}{\partial r} \right)_{r=0} = \frac{T_N - T_S}{(\delta r)_n + (\delta r)_s} = 0 \rightarrow T_N = T_S, \quad (\delta r)_n = (\delta r)_s, \quad r_n = r_p + 0.5(\delta r)_n \text{ ve}$$

$$r_s = r_p - 0.5(\delta r)_s \text{ alınarak Eş. 5.42'nin sağ tarafı;}$$

$$\left[ \frac{r_n(T_N - T_P)}{(\delta r)_n} - \frac{r_s(T_P - T_S)}{(\delta r)_s} \right] \Delta z = 2r_P \left[ \frac{T_N - T_P}{(\delta r)_n} \right] \Delta z \quad \text{halini alır. Böylece kompakt Eş. 5.43'ün}$$

katsayıları şu hali alır;

$$a_E = \frac{Pe \frac{r_P}{r_1} \left[ 1 - \left( \frac{r_P}{r_1} \right)^2 \right]}{\exp \left[ \frac{Pe}{r_1} \left( 1 - \left( \frac{r_e}{r_1} \right)^2 \right) (\delta z)_e \right] - 1} \cdot \Delta r \quad (5.45-a)$$

$$a_W = Pe \frac{r_P}{r_1} \left[ 1 - \left( \frac{r_P}{r_1} \right)^2 \right] \left\{ \frac{\exp \left[ \frac{Pe}{r_1} \left( 1 - \left( \frac{r_e}{r_1} \right)^2 \right) (\delta z)_e \right]}{\exp \left[ \frac{Pe}{r_1} \left( 1 - \left( \frac{r_w}{r_1} \right)^2 \right) (\delta z)_w \right] - 1} \right\} \cdot \Delta r \quad (5.45-b)$$

$$a_N = \frac{2 \cdot r_P}{(\delta r)_n} \cdot \Delta z \quad (5.45-c)$$

$$a_S = 0 \quad (5.45-d)$$

$$b=0 \quad (5.45-e)$$

$$a_P = a_E + a_W + a_N + a_S \quad (5.45-f)$$

Boru iç cidarında, yani  $r=r_1$  de  $k_w \frac{\partial T}{\partial r} = h_i (T_{wi} - T_1)$  ve  $u_m=0$  (Eş. 5.19-d sınır

şartı). Bu sınır şartında  $u_m=0$  olduğundan Eş. 5.18'in sol tarafı 0 (sıfır) olur. Eşitliğin sağ tarafında kalan ifadeler ise şu şekilde ayrıklaştırılabilir; ilk ifade için:

$$\left. \frac{\partial T}{\partial r} \right)_{r=r_1} = \frac{T_N - T_S}{(\delta r)_n + (\delta r)_s} = \frac{h_i}{k_w} (T_{wi} - T_1) \quad T_{wi}=T_P \text{ ve } T_1=T_S \text{ olarak alınabilir. Buna göre}$$

$$T_N = \frac{h_i}{k_{wi}} [(\delta r)_n + (\delta r)_s] (T_P - T_S) + T_S \text{ yazılabilir. Buradan hareketle;}$$

$$\begin{aligned}
\int_w^e \int_s^n \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) dr \cdot dz &= \left[ \frac{r_n (T_N - T_P)}{(\delta r)_n} - \frac{r_s (T_P - T_S)}{(\delta r)_s} \right] \cdot \Delta z \\
&= \left\{ \frac{\left[ r_p + 0.5(\delta r)_n \right] \left[ \left( 1 - \frac{h_i}{k_w} [(\delta r)_n + (\delta r)_s] \right) T_S - \left( 1 - \frac{h_i}{k_w} [(\delta r)_n + (\delta r)_s] \right) T_P \right]}{(\delta r)_n} \right. \\
&\quad \left. - \left[ r_p - 0.5(\delta r)_s \right] \left[ \frac{T_P - T_S}{(\delta r)_s} \right] \right\} \Delta z \\
&= \left\{ \frac{\left[ r_p + 0.5(\delta r)_n \right] [(Bi-1)(T_P - T_S)]}{(\delta r)_n} - \frac{\left[ r_p - 0.5(\delta r)_s \right] (T_P - T_S)}{(\delta r)_s} \right\} \Delta z
\end{aligned}$$

olarak ayrıştırılır. Bu eşitlikte  $Bi = \frac{h_i [(\delta r)_n + (\delta r)_s]}{k_w}$  olarak Biot sayısıdır.

Diğer ifade ise;

$$k_w \int_s^e \int_w^n r \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\partial T}{\partial z} \right) \cdot dz \cdot dr = k_w r_p \left[ \frac{(T_E - T_P)}{(\delta z)_e} - \frac{(T_P - T_W)}{(\delta z)_w} \right] \cdot \Delta r \text{ olarak ayrıştırılır. Bu iki}$$

ifade birleştirildiğinde ayrıştırılmış eşitlik;

$$\begin{aligned}
&\left\{ \frac{\left[ r_p + 0.5(\delta r)_n \right] [(Bi-1)(T_P - T_S)]}{(\delta r)_n} + \frac{\left[ r_p - 0.5(\delta r)_s \right] (T_S - T_P)}{(\delta r)_s} \right\} \Delta z \\
&+ k_w r_p \left[ \frac{(T_E - T_P)}{(\delta z)_e} - \frac{(T_P - T_W)}{(\delta z)_w} \right] \cdot \Delta r = 0
\end{aligned} \tag{5.46}$$

halini alır. Eğer  $(\delta r)_n = (\delta r)_s$  alınırsa bu eşitlik;

$$\left\{ \frac{\left[ 2r_p - Bi(r_p + 0.5(\delta r)_s) \right]}{(\delta r)_s} (T_S - T_P) \right\} \Delta z + k_w r_p \left[ \frac{(T_E - T_P)}{(\delta z)_e} - \frac{(T_P - T_W)}{(\delta z)_w} \right] \cdot \Delta r = 0 \tag{5.47}$$

durumuna indirgenir. Buna göre kompakt Eş. 5.43'ün katsayıları şöyle olacaktır;



$$a_E = \frac{k_w r_p}{(\delta z)_e} \cdot \Delta r \quad (5.48-a)$$

$$a_W = \frac{k_w r_p}{(\delta z)_w} \cdot \Delta r \quad (5.48-b)$$

$$a_N = 0 \quad (5.48-c)$$

$$a_S = \left\{ \frac{[r_p + 0.5(\delta r)_n](Bi-1)}{(\delta r)_n} + \frac{[r_p - 0.5(\delta r)_s]}{(\delta r)_s} \right\} \Delta z \quad \text{veya} \quad (5.48-d)$$

$$a_S = \left\{ \frac{2r_p - Bi[r_p + 0.5(\delta r)_s]}{(\delta r)_s} \right\} \Delta z$$

$$b=0 \quad (5.48-e)$$

$$a_p = a_E + a_W + a_N + a_S \quad (5.48-f)$$

Eş. 5.20'nin ayrıklaştırılması:

Eş. 5.20;  $0 = \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T_2}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( r \frac{\partial T_2}{\partial z} \right)$  şeklinde yazılabilir. Sağ taraftaki ilk terimin

ayrıklaştırılması şöyle olacaktır:

$$\begin{aligned} \int_w^e \int_s^n \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) dr \cdot dz &= \left[ \frac{r_n(T_N - T_P)}{(\delta r)_n} - \frac{r_s(T_P - T_S)}{(\delta r)_s} \right] \cdot \Delta z \\ &= \left\{ [rp + 0.5(\delta r)_n] \left[ \frac{T_N - T_P}{(\delta r)_n} \right] - [rp - 0.5(\delta r)_s] \left[ \frac{T_P - T_S}{(\delta r)_s} \right] \right\} \Delta z \end{aligned}$$

İkinci terim ise;

$$\int_s^e \int_w^n r \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\partial T}{\partial z} \right) \cdot dz \cdot dr = r_p \left[ \frac{(T_E - T_P)}{(\delta z)_e} - \frac{(T_P - T_W)}{(\delta z)_w} \right] \cdot \Delta r \quad \text{şeklinde ayrıklaşır. Bu iki terim}$$

birleştiğinde ayrıklaştırılmış eşitlik;

$$\left\{ \left[ rp + 0.5(\delta r)_n \right] \left[ \frac{T_N - T_P}{(\delta r)_n} \right] - \left[ rp - 0.5(\delta r)_s \right] \left[ \frac{T_P - T_S}{(\delta r)_s} \right] \right\} \Delta z + r_p \left[ \frac{T_E - T_P}{(\delta z)_e} - \frac{T_P - T_W}{(\delta z)_w} \right] \cdot \Delta r = 0 \quad (5.49)$$

halini alır. Bu kompakt Eş. 5.43'e uyarlandığında katsayılar şöyle olacaktır;

$$a_E = \frac{r_p}{(\delta z)_e} \Delta r \quad (5.50-a)$$

$$a_W = \frac{r_p}{(\delta z)_w} \Delta r \quad (5.50-b)$$

$$a_N = \frac{r_n \cdot \Delta z}{(\delta r)_n} = \left[ \frac{r_p}{(\delta r)_n} + 0.5 \right] \cdot \Delta z \quad (5.50-c)$$

$$a_S = \frac{r_s \cdot \Delta z}{(\delta r)_s} = \left[ \frac{r_p}{(\delta r)_s} - 0.5 \right] \cdot \Delta z \quad (5.50-d)$$

$$b=0 \quad (5.50-e)$$

$$a_p = a_E + a_W + a_N + a_S \quad (5.50-f)$$

Eş. 5.22'nin ayrıştırılması:

Eş. 5.18'de olduğu gibi bu eşitlik de;

$$\frac{2u_m r_3 \rho_o C_{p,o}}{k_{fo}} \left[ \frac{r}{r_3} - \left( \frac{r}{r_3} \right)^3 \right] \frac{\partial T_3}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T_3}{\partial r} \right) + r \frac{\partial^2 T_3}{\partial z^2} \quad \text{şeklinde yazılıp buradan da}$$

$$\frac{\partial}{\partial z} \left\{ Pe \left[ \frac{r}{r_3} - \left( \frac{r}{r_3} \right)^3 \right] T_3 - r \frac{\partial T_3}{\partial z} \right\} = \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T_3}{\partial r} \right) \quad \text{şeklinde düzenlenebilir. Benzer şekilde bu}$$

eşitlik de;  $\frac{\partial J_z}{\partial z} = \frac{\partial J_r}{\partial r}$  şeklinde yazılabilir. Burada;

$J_z = Pe \left[ \frac{r}{r_1} - \left( \frac{r}{r_1} \right)^3 \right] T_1 - r \frac{\partial T_1}{\partial z}$  ve  $J_r = r \frac{\partial T_1}{\partial r}$  dir. Benzer yöntemler takip edilerek sonuç

itibariyle Eş. 5.22;

$$Pe \frac{r_p}{r_3} \left[ 1 - \left( \frac{r_p}{r_3} \right)^2 \right] \left\{ \begin{array}{l} \left[ T_p + \frac{T_p - T_E}{\exp \left[ \frac{Pe}{r_3} \left( 1 - \left( \frac{r_p}{r_3} \right)^2 \right) (\delta z)_e \right] - 1} \right] \\ - \left[ T_w + \frac{T_w - T_p}{\exp \left[ \frac{Pe}{r_3} \left( 1 - \left( \frac{r_p}{r_3} \right)^2 \right) (\delta z)_w \right] - 1} \right] \end{array} \right\} \cdot \Delta r = \left[ \frac{r_n (T_N - T_p)}{(\delta r)_n} - \frac{r_s (T_p - T_s)}{(\delta r)_s} \right] \cdot \Delta z \quad (5.51)$$

olarak ayrıklaştırılmış olur. Bu durumda kompakt eşitliğin katsayıları;

$$a_E = \frac{Pe \frac{r_p}{r_3} \left[ 1 - \left( \frac{r_p}{r_3} \right)^2 \right]}{\exp \left[ \frac{Pe}{r_3} \left( 1 - \left( \frac{r_p}{r_3} \right)^2 \right) (\delta z)_e \right] - 1} \cdot \Delta r \quad (5.52-a)$$

$$a_W = Pe \frac{r_p}{r_3} \left[ 1 - \left( \frac{r_p}{r_3} \right)^2 \right] \left\{ \frac{\exp \left[ \frac{Pe}{r_3} \left( 1 - \left( \frac{r_p}{r_3} \right)^2 \right) (\delta z)_w \right]}{\exp \left[ \frac{Pe}{r_3} \left( 1 - \left( \frac{r_p}{r_3} \right)^2 \right) (\delta z)_w \right] - 1} \right\} \cdot \Delta r \quad (5.52-b)$$

$$a_N = \frac{r_n \cdot \Delta z}{(\delta r)_n} = \left[ \frac{r_p}{(\delta r)_n} + 0.5 \right] \cdot \Delta z \quad (5.52-c)$$

$$a_S = \frac{r_s \cdot \Delta z}{(\delta r)_s} = \left[ \frac{r_p}{(\delta r)_s} - 0.5 \right] \cdot \Delta z \quad (5.52-d)$$

$$b=0 \quad (5.52-e)$$

$$a_p = a_E + a_W + a_N + a_S \quad (5.52-f)$$

Anulus bölgesi için sınır şartlarının ayrıklaştırılması:

$r=r_2$  yani sondaj borusu dış yüzeyi ile anulus akışkanı arayüzeyi (Eş. 5.23-c sınır şartı):

Bu sınır şartında da  $u_m=0$  olduğundan daha önceki Eş. 5.19-d sınır şartına benzer bir durum söz konusudur. Dolayısıyla Eş 5.22'nin sol tarafı 0 (sıfır) olur. Bu durumda Eş.

$$5.22; \quad 0 = \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T_3}{\partial r} \right) + r \frac{\partial^2 T_3}{\partial z^2} \quad \text{halini alır. Bu eşitliğin sağ tarafındaki ilk ifade şu}$$

şekilde ayrıklaştırılır;

$$\left. \frac{\partial T}{\partial r} \right)_{r=r_2} = \frac{T_N - T_S}{(\delta r)_n + (\delta r)_s} = \frac{h_o}{k_w} (T_3 - T_{wo}) \quad T_{wo}=T_P \text{ ve } T_3=T_N \text{ olarak alınabilir. Buna göre}$$

$$T_S = T_N - \frac{h_o}{k_w} [(\delta r)_n + (\delta r)_s] (T_N - T_P) \text{ yazılabilir. Buradan hareketle;}$$

$$\begin{aligned} \int_w^e \int_s^n \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) dr \cdot dz &= \left[ \frac{r_n (T_N - T_P)}{(\delta r)_n} - \frac{r_s (T_P - T_S)}{(\delta r)_s} \right] \cdot \Delta z \\ &= \left\{ \left[ r_p + 0.5(\delta r)_n \right] \left[ \frac{T_N - T_P}{(\delta r)_n} \right] - \left[ r_p - 0.5(\delta r)_s \right] \left[ \frac{T_P - \left( T_N - \frac{h_o}{k_w} [(\delta r)_n + (\delta r)_s] (T_N - T_P) \right)}{(\delta r)_s} \right] \right\} \Delta z \\ &= \left\{ \frac{\left[ r_p + 0.5(\delta r)_n \right] [T_N - T_P]}{(\delta r)_n} - \frac{\left[ r_p - 0.5(\delta r)_s \right] (Bi - 1) [T_N - T_P]}{(\delta r)_s} \right\} \Delta z \end{aligned}$$

olarak ayrıklaşır. Diğer ifade ise;

$$k_w \int_s^n \int_w^e r \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\partial T}{\partial z} \right) \cdot dz \cdot dr = k_w r_p \left[ \frac{(T_E - T_P)}{(\delta z)_e} - \frac{(T_P - T_W)}{(\delta z)_w} \right] \cdot \Delta r \text{ olarak ayrıklaştırılır. Bu iki}$$

ifade birleştirildiğinde ayrıklaştırılmış eşitlik;

$$\left\{ \frac{[r_p + 0.5(\delta r)_n][T_N - T_P]}{(\delta r)_n} - \frac{[r_p - 0.5(\delta r)_s](Bi-1)[T_N - T_P]}{(\delta r)_s} \right\} \Delta Z$$

$$+ k_w r_p \left[ \frac{(T_E - T_P)}{(\delta z)_e} - \frac{(T_P - T_W)}{(\delta z)_w} \right] \cdot \Delta r = 0 \quad (5.53)$$

halini alır. Eğer  $(\delta r)_n = (\delta r)_s$  alınırsa bu eşitlik;

$$\left\{ \frac{2r_p - Bi[r_p - 0.5(\delta r)_n]}{(\delta r)_n} (T_N - T_P) \right\} \Delta Z + k_w r_p \left[ \frac{(T_E - T_P)}{(\delta z)_e} - \frac{(T_P - T_W)}{(\delta z)_w} \right] \cdot \Delta r = 0 \quad (5.54)$$

şeklinde sadeleşir. Kompakt eşitliğin katsayıları ise;

$$a_E = \frac{k_w r_p}{(\delta z)_e} \cdot \Delta r \quad (5.55-a)$$

$$a_W = \frac{k_w r_p}{(\delta z)_w} \cdot \Delta r \quad (5.55-b)$$

$$a_N = \left\{ \frac{[r_p + 0.5(\delta r)_n]}{(\delta r)_n} + \frac{[r_p - 0.5(\delta r)_s](Bi-1)}{(\delta r)_s} \right\} \Delta z \quad \text{veya} \quad (5.55-c)$$

$$a_N = \left\{ \frac{2r_p - Bi[r_p - 0.5(\delta r)_n]}{(\delta r)_n} \right\} \Delta z$$

$$a_S = 0 \quad (5.55-d)$$

$$b=0 \quad (5.55-e)$$

$$a_p = a_E + a_W + a_N + a_S \quad (5.55-f)$$

$r=r_3$  yani annulus dış borusu ara yüzeyi için (Eş. 5.23-d sınır şartı);

Bu sınır şartında da  $u_m=0$  olduğu için Eş. 5.22'nin sol tarafı 0 (sıfır) olur ve eşitlik şu hali

$$\text{alır; } 0 = \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T_3}{\partial r} \right) + r \frac{\partial^2 T_3}{\partial z^2} \quad \text{Bu eşitlikte } \frac{\partial T_3}{\partial r} = 0 \text{ sınır şartından dolayı;}$$

$$\left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=r_3} = \frac{T_N - T_S}{(\delta r)_n + (\delta r)_s} = 0 \rightarrow T_N = T_S, \quad (\delta r)_n = (\delta r)_s, \quad r_n = r_p + 0.5(\delta r)_n \text{ ve}$$

$$r_s = r_p - 0.5(\delta r)_s \quad \text{ alınarak eşitliğin sağ tarafındaki ilk terim;}$$

$$\left[ \frac{r_n(T_N - T_P)}{(\delta r)_n} - \frac{r_s(T_P - T_S)}{(\delta r)_s} \right] \Delta z = 2r_p \left[ \frac{T_S - T_P}{(\delta r)_s} \right] \Delta z \quad \text{şeklinde ayrıklaştırılmış olur. Diğer}$$

terim ise daha önce de anlatıldığı şekilde;

$$\int_s^n \int_w^e r \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\partial T}{\partial z} \right) \cdot dz \cdot dr = r_p \left[ \frac{(T_E - T_P)}{(\delta z)_e} - \frac{(T_P - T_W)}{(\delta z)_w} \right] \cdot \Delta r \text{ biçiminde ayrıklaşır. İki terim}$$

birleştirildiğinde

$$\left\{ 2r_p \left[ \frac{T_S - T_P}{(\delta r)_s} \right] \right\} \Delta z + r_p \left[ \frac{T_E - T_P}{(\delta z)_e} - \frac{T_P - T_W}{(\delta z)_w} \right] \cdot \Delta r = 0 \quad \text{olarak ayrıklaştırılmış eşitlik elde}$$

edilir. Bu durumda kompakt eşitliğin katsayıları şöyle olur;

$$a_E = \frac{r_p}{(\delta z)_e} \Delta r \quad (5.56-a)$$

$$a_W = \frac{r_p}{(\delta z)_w} \Delta r \quad (5.56-b)$$

$$a_N = 0 \quad (5.56-c)$$

$$a_S = \frac{2r_p}{(\delta r)_s} \Delta z \quad (5.56-d)$$

$$b=0 \quad (5.56-e)$$

$$a_P = a_E + a_W + a_N + a_S \quad (5.56-f)$$

Uygulama esnasında kuyu çamurunun dinamik viskozitesine ihtiyaç duyulacaktır. Kuyu çamurunun dinamik viskozitesinin hesaplanmasında Zyvoloski ve O'Sullivan (1980) şu eşitliği önermişlerdir.

$$\mu_{mud} = 2.414 \cdot 10^{-5} \cdot 10^{247.8 / (T_m + 133.15)} \quad (5.57)$$

Yine eşitliklerde kullanılan kuyu çamurunun ısı iletkenlik katsayısı için Santoyoa ve ark. (2003) çalışmalarında şu eşitliği kullanmışlardır.

$$k_{mud} = 0.766 - 9.049 \cdot 10^{-4} T_m + 8.799 \cdot 10^{-6} T_m^2 - 1.721 \cdot 10^{-8} T_m^3 \quad (5.58)$$

### 5.2.5. Problemin FLUENT Paket Programı Uygulaması

Yukarıda tanımlanan formülasyon ve işlem akışı ile elde edilen sonuçlar tamamen ısı transferi ve gelişmiş akış kabulü temelinde olup akış kaynaklı ısı transferi değişiklikleri dikkate alınmamaktadır. Akış kaynaklı düzensizliklerin ve türbülansın olası etkilerini araştırmak maksadı ile ticari bir hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) yazılımı kullanılarak bir inceleme gerçekleştirilmiştir.

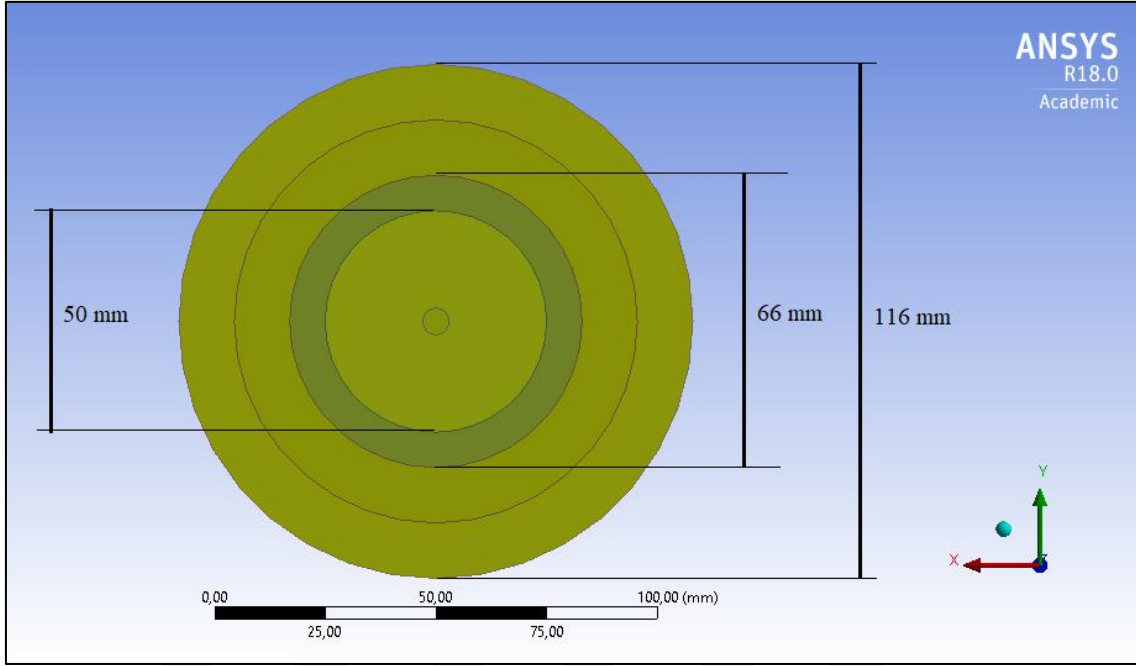
Günümüzde kullanılmakta olan mühendislik yaklaşımlarından olan sayısal hesaplamalı analiz çok farklı yöntemleri ve yolları barındırmaktadır. Sınır şartları ve davranışı belirli olan bir mühendislik tasarımının içerisinde hangi fiziksel ve matematiksel olayların olduğu bahsedilen yöntemler kullanılarak incelenebilmektedir. Bununla beraber her özel vakada sayısal yöntemlerin tekrar tekrar kurgulanmaları ve günümüz teknolojisinden faydalanmak için yazılıma dökülmeleri gerekmektedir. Böyle bir iş yükü aynı zamanda ticari bir potansiyel barındırmaktadır. Gerçekten de zaman içerisinde firmalar genel ve kapsayıcı yazılımlar yazıp pazarlayarak sayısal hesaplamalı yöntemleri zaman ve emek açısından kolaylaştırmışlardır. Tabii ki bu hizmetin bir de maddi karşılığı bulunmaktadır.

Günümüzde yaygın olarak çokça sayısal analiz programı bulunmaktadır. Akademi açısından bu programların birçoğu akademik çalışmalara özel lisanslamalar hazırlamakta ve çok büyük indirimler yapmaktadır. Kullanılan yazılım da akademik lisansa sahip ANSYS 18 platformudur.

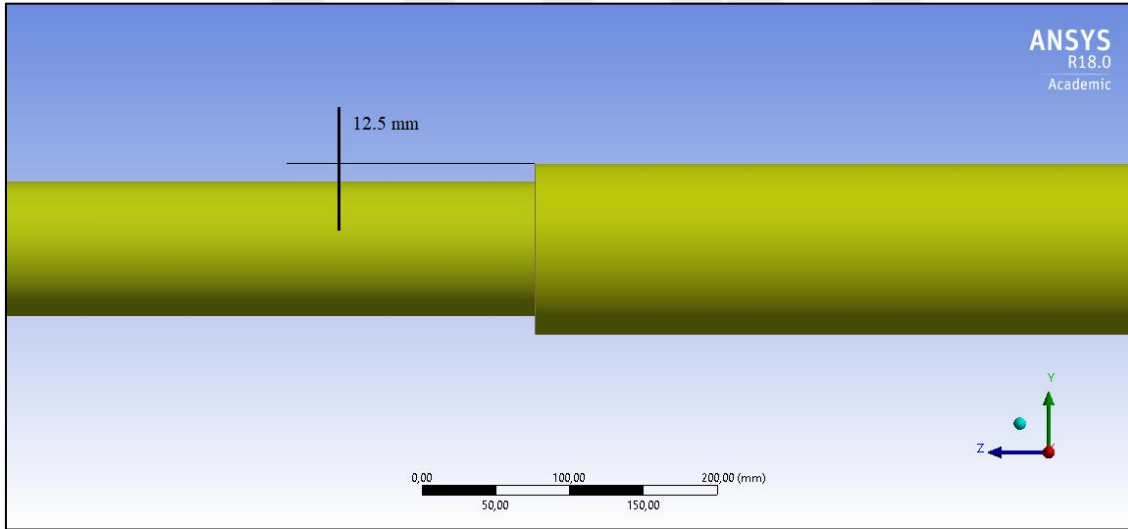
Akış kaynaklı bazı düzensizlikleri oluşturabilmek için yukarıda şematik çizimi verilen geometri üzerinde bazı değişiklikler yapılmıştır. Öncelikle 100 m'lik ilk kuyu derinliğinden sonra dönüş borusu (anulus) üzerinde bir basamak daralması (liner) tasarlanmış ve dönüş borusu yaklaşık olarak yarı yarıya daraltılarak kuyu dibine kadar indirilmiştir. Daha sonra sondaj borusu (gidiş borusu) ile anulus (dönüş borusu) bağlantılarının bulunduğu dip noktaya bir nozzle yerleştirilmiş ve dönümlü bir akış yapısı elde edilmesi planlanmıştır. Şekil 5.6'da sistemin katı modelinin kuyu girişine yukarıdan bakıldığı görünümü ve ölçüleri sunulmuştur. Şekilde koyu renge sahip kısım sondaj borusu cidarı olup cidar et kalınlığı 8 mm'dir. Akışkan kısımlar daha açık renk ile görülmektedir. Dış kısım anulus akışını ve iç kısım sondaj borusu akışını veya basma (gidiş) akışını gösterir. Sondaj borusu ve anulus (dönüş) akışlarının hacimlere bölünmesinin sebebi hesaplamaların yapılacağı ağ yapısı yazılım tarafından oluşturulurken kontrol ve yönetim kolaylığı sağlamaktır. Akış hacimleri Kartezyen koordinatlarda daha kolay bölünebilecek şekilde hazırlandığında ağ tasarımı kolaylaşmaktadır. Dikkat edilirse boru merkezinde küçük çapa sahip bir çekirdek bölge görülebilmektedir. Bu bölgede yazılım, belirlenen tasarım asgari boyutuna göre üçgen ağ elemanları ile ağ oluşturmakta, çok düzenli bir ağ yapısı oluşturamamaktadır. Dolayısıyla geometri ek alanlara ayrılarak bu düzensizliğin bütün geometriye sirayet etmesinin önüne geçilmesi hedeflenmiştir.

Yukarıda bahsedildiği üzere akışta karmaşıklığa yol açan iki geometrik yapı bulunmaktadır. Bunlardan ilki 100 m derinlikte çizilen daralma basamağıdır. Bu basamak çizilirken dış akışın dış duvar ile içerde kalan borunun dış duvarı arasındaki 25 mm'lik mesafe ikiye bölünmüştür. Dolayısıyla kalan 299 m derinlikteki hacmin en büyük yarıçapı 45,5 mm'dir. İlgili görsel Şekil 5.7'de sunulmuştur.



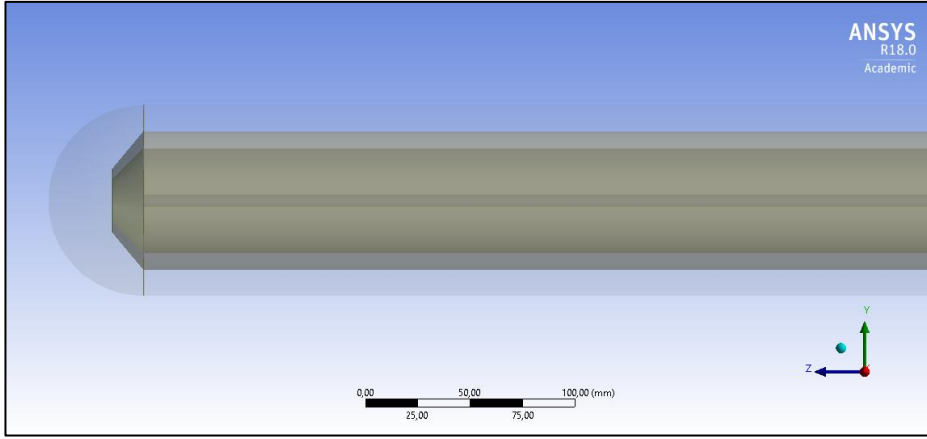


Şekil 5.6. Kuyu katı modelinde girişlere yukarıdan bakış (orijin tarafı z eksenine doğrudur)

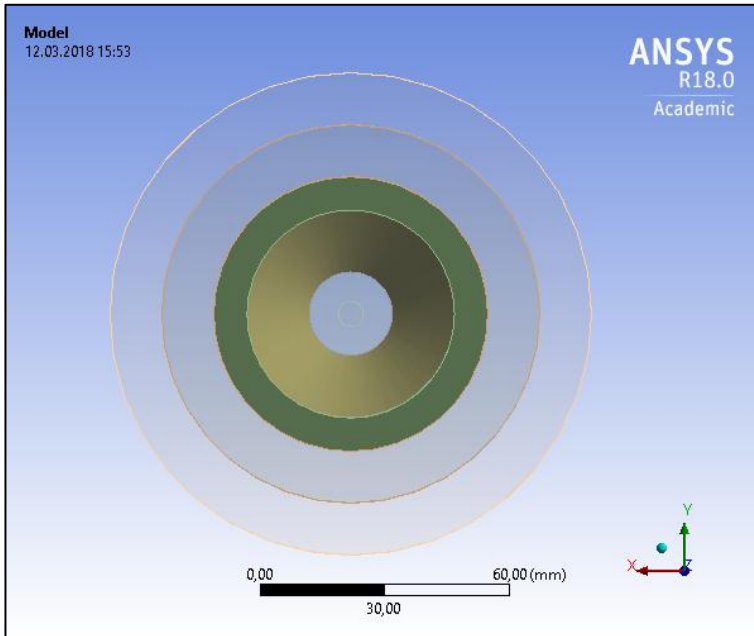


Şekil 5.7. 100 m derinlikte yer alan daralma basamağının yandan görünüşü

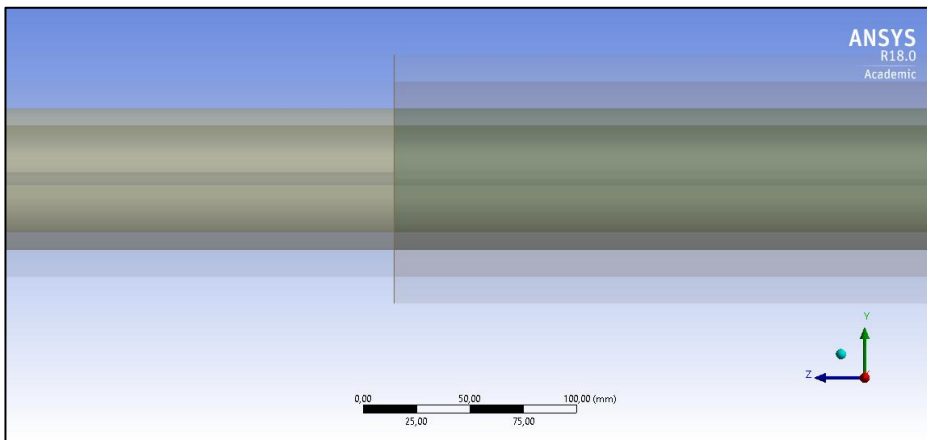
Son olarak Şekil 5.8’de kuyu dibine yerleştirilen nozzle modeli ve önceki iki kısmın saydam görüntüleri sunulmuştur.



a- Kuyu dibindeki nozzle'ın yandan görünüşü



b- Kuyu giriş ve çıkış hacimleri



c- Dönüş borusu daralma basamağı

Şekil 5.8. Kuyu dibine yerleştirilen nozzle parçası ve önceki iki kısmın saydam görüntüleri

Geometri hazırlığından sonraki adım sayısal hesaplamaların yapılacağı hacmi daha küçük hacimlere bölerek bir sonuç dağılımı elde etmek için ağ oluşturulmasıdır. Kullanılan yazılımın içerisinde ağ oluşturmak için bir yazılım bulunmaktadır. Yazılım içerisinde hazırlanacak ağa dair bazı ön ayarlar yapıp daha sonra ağ oluşturulmaktadır. Yine sayısal hesaplamaların yapılacağı çözücüye geçilmeden önce sınırların ve hacimlerin belirlenmesi de bu ağ yazılımında gerçekleştirilmektedir.

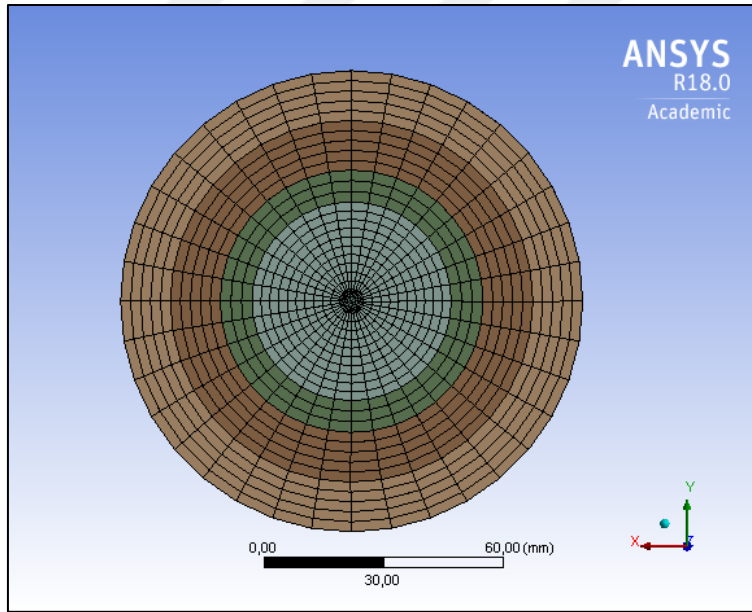
Daha önceden geometri kısmında hazırlanan katı modeller için tek tek ağ ayarlamaları yapıldığı gibi bir de genel ağ ayarları yapılmaktadır. Böylece kullanıcı tarafından tanımlanmayan noktalarda bu genel ayarlar devreye girmekte ve ağ genel ayarlar ile oluşturulmaya devam edilmektedir.

Ağ oluşturucu yazılımda metrik birimler kullanılmıştır. Uzunluk için mm tercih edilmiştir. Yazılımın içerisine alınan geometrinin tam tanımlı olduğu kontrol edilmiştir. Geometriyi çevreleyen Kartezyen koordinatlardaki kutunun x yönündeki uzunluğu 116 mm, y yönündeki uzunluğu 116 mm ve z yönündeki uzunluğu 399550 mm dir. Geometri hacmi  $3004900000 \text{ mm}^3$  veya  $3 \text{ m}^3$  tür. Analiz edilen geometri 12 farklı parçaya bölünmüştür. Ağ oluşturulduğunda 3843526 eleman oluşmuş ve toplamda 3921266 düğüm noktası yer almıştır. Fiziksel tercih olarak HAD tercih edilmiştir (ağ yapısı için mekanik, elektronik gibi ek fizik tercihleri bulunmaktadır). Çözücü ayarı olarak FLUENT belirtilmiştir. Boyutlandırma için boyutlandırma fonksiyonunu eğri yüzeylere uygun olan seçenek seçilmiştir. Boyutlandırma birimleri için öncelikle kaba ayarlar açılmış ve daha sonra bu kaba ayarlar el ile değiştirilmiştir. Geçiş için yavaş seçeneği seçilmiştir. Eğrilik normal açısı  $18^\circ$  olarak alınmıştır. Dolayısıyla bu açıdan daha küçük eğrilik açılarına izin verilmemiştir. Asgari ölçü olarak 0.1 mm verilmiştir. En büyük yüzey alanı ölçeği için 4000 mm ve en büyük üçgen eleman büyüklük ölçeği için ise 6000 mm ölçeği tercih edilmiştir. Herhangi bir özel cidar ağ fonksiyonu tanımlanmamıştır. Ağ oluşturulması için 8 paralel işlemci kullanılması için gerekli ayarlamalar önceden yapılmıştır.

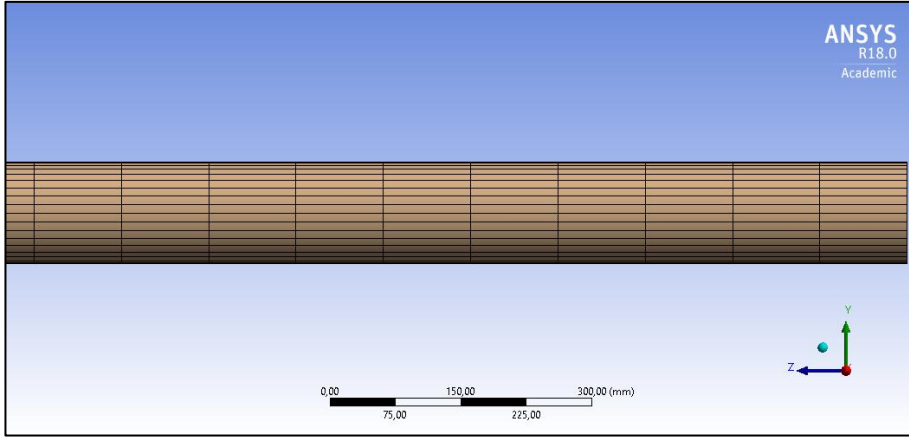
Oluşturulan ağın yapısını kontrol edebilmek ve istenildiği gibi şekillendirmek için ek boyutlandırmalar kullanılmıştır. Kuyunun giriş ve çıkışın bulunduğu yüzey teğetsel doğrultuda (açısal olarak) 36 eşit parçaya bölünmüştür. Cidar radyal doğrultuda 3 parçaya ayrılmış ve iç akış hacmi çekirdek dışında radyal doğrultuda 10'a bölünmüştür. Dışarda

kalan akış hacmi oluşturan iki katı model de radyal doğrultuda 5'er parçaya bölünmüştür. Bahsedilen yüzeyin yapılandırılmış ağ dağılımı Şekil 5.9'da verilmiştir.

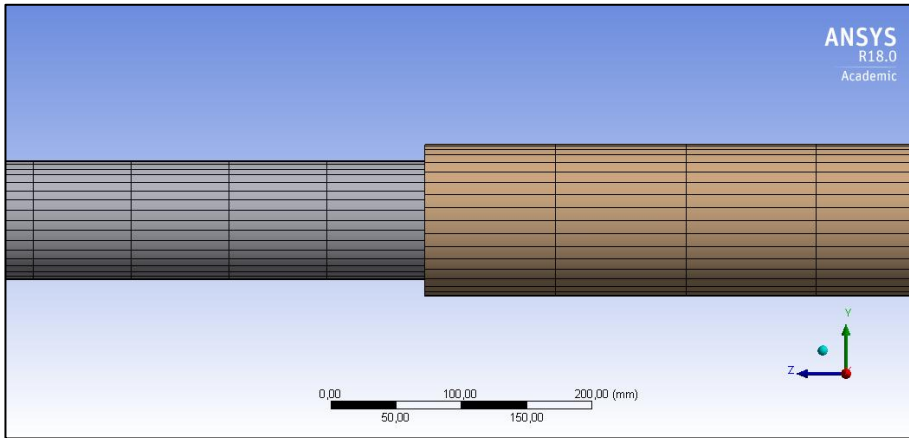
Eksenel doğrultuda ise ağın akışın gelişme bölgelerinde daha yoğun başlaması ve akış doğrultusunda genişlemesi planlanmıştır. Akış doğrultusunda akışı bozan bölgelere gelindiğinde ağın tekrardan yoğunlaşması hedeflenmiştir. Ağ oluşturulmasını kolaylaştırmak amacıyla katı model çeşitli kısımlara ayrıldığı için ve ağ oluşturma sırasında bu alanların birbirine karşılık gelerek veri aktarımını kolaylaştırmak için özel olarak çaba gösterilmiştir. Fakat uzama ve kısalma katsayıları ile radyal doğrultuda daralan hacimden dolayı ağ oluşturan algoritma eksenel doğrultuda farklı ağ uzunlukları oluşmasına neden olmuştur. Bu nedenle akış doğrultusunda eşit uzunluk tercih edilmiş ve 10 cm aralıklar ile ağ oluşturulmuştur. Bu durumun tek istisnası kuyu dibinde yer alan nozzle ve akış dönüş dirseğidir. Bu bölgedeki karmaşık akış yapısından dolayı üçgen ve piramit şeklindeki ağ elemanları kullanılmıştır ve ağ yapılandırılmadan genel program ayarlarına göre otomatik oluşturulmuştur. Şekil 5.10'da eksenel ağın 3 bölümü birlikte verilmiştir.



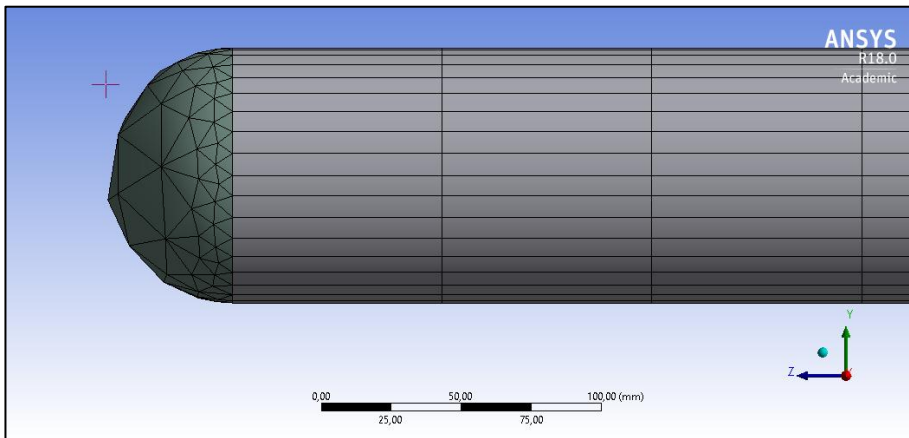
Şekil 5.9. Kuyu giriş ve çıkışının bulunduğu yüzeydeki ağ yapılandırması



a- Giriş bölümü aksenal ağ yapısı



b- Liner bölümüne geçiş aksenal ağ yapısı

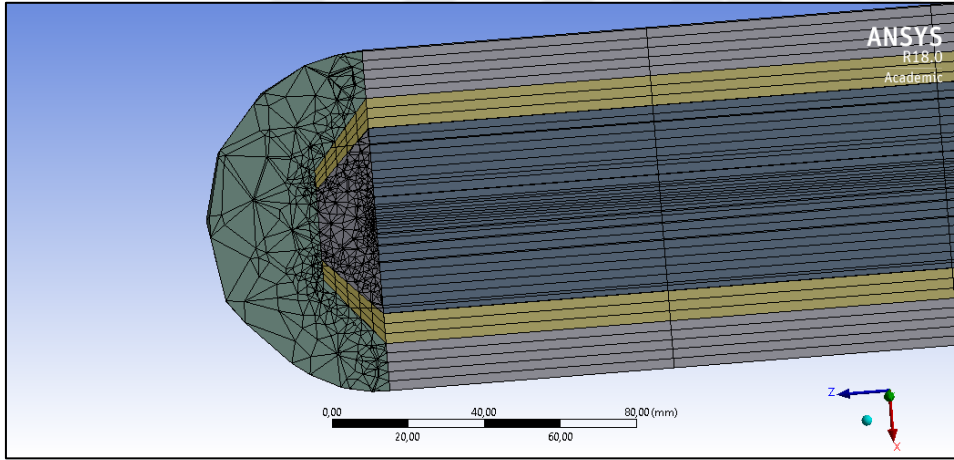


c- Kuyu dibi aksenal ağ yapısı

Şekil 5.10. Aksenal doğrultuda ağ yapısının üç bölümü

Ağın hacim içi dağılımı için kuyu dibinden bir kesit Şekil 5.11’de sunulmuştur. Bu görselden de anlaşılacağı üzere kuyu dibindeki nozzle ve dönüş kısmına kadar aksenal doğrultuda eşit dağılım net biçimde görülmektedir. Aynı şekilde radyal doğrultuda hemen hemen eşit mesafede ağ elemanları dağılmıştır. Yine de ağ elemanlarının en boy oranının

nispeten düşük olduğu ifade edilmelidir. Fakat bilgisayar olanakların dikkate alınarak en uygun ağ yapısının bu olacağı kararlaştırılmıştır. Nozzle bölgesindeki ağ, cidardaki ağ elemanlarının büyüklüklerinden dolayı daha yoğun olup dönüş kısmında seyrekleşmektedir. Nozzle çıkışındaki karmaşık akış yapısının yakalanması amacıyla bu ağ yapısının uygun olduğu düşünülmektedir. Kuyunun radyal yönde merkezinde bir ağ elemanı yoğunluğu göze çarpmaktadır. Kartezyen koordinatları kullanan program çember merkezinde sonsuz küçüklüğe yaklaşan bölgeyi eşit parçalara bölemediği ve o kısma bir daire ağ elemanı atamadığı için katı modelde merkezi programın genel ayarlara göre radyal yönde üçgen elemanlarla ağ oluşturması için bir küçük çaplı silindir oluşturulmuştur. Ağ elemanlarının radyal yönde merkezde yoğunlaşmasının sebebi budur. Bu bölgede aksel doğrultuda eşit dağılım devam ederken radyal doğrultuda programın genel ayarlarına göre üçgen elemanlarla bir dağılım gerçekleşmiştir. Bu durum Şekil 5.9'daki koyu merkezden de anlaşılabilir. Bütün bu ağ işlemlerinde bilgisayardaki bütün işlemcilerin ve RAM kaynaklarının kullanılmasına özen gösterilerek işlem süresi kısaltılmaya çalışılmıştır.



Şekil 5.11. Kuyu dibi hacim içi ağ dağılımını gösterir aksel kesit

Çözüm ağı yapılandırılan hesaplama hacmi FLUENT çözücüsüne aktarılmıştır. Hesaplamalı sayısal çözüm yapan bu modül, kendisine aktarılan katı model ve ağ bilgisi üzerinde değişiklikler de yapabilmektedir. Örneğin hesaplama sonrası bazı ağ bölgelerini belirli akış özelliklerine göre sıklaştırabilmekte, ağ elemanı sayısını birkaç kat arttırabilmekte, çeşitli istatistikler ile çözüm öncesi ve çözüm sonrası kullanıcıyı bilgilendirmektedir. İlk aşamada çözücünün kullanılmasına yönelik arayüz, birim, grafik ayarları yapılması ve çözüm öncesi istatistiklerin incelenmesinde yarar bulunmaktadır.

Çözüm, basınç temelli olarak seçilmiştir çünkü yoğunluk temelli çözücü sıkıştırılabilir akış şartları için kullanılmaktadır. Mevcut analizde akış sıkıştırılmaz olarak kabul edilmiştir. Kuyu derinliği “z” koordinatı doğrultusunda verildiği için de yerçekimi ivmesi “z” koordinatı yönünde verilmiştir. Yerçekiminin olduğu ve olmadığı durumlar karşılaştırılmış ve yerçekiminin akış koşullarını değiştirmede, sadece sıvı sütunu cinsinde statik basıncı derinliğe bağlı olarak arttırdığı tespit edilmiştir. Yerçekiminin kullanılması aynı zamanda kuyu çıkışında bazı hücrelerde ters akış olarak adlandırılan sayısal bir soruna neden olmakta ve süreklilik şartını bir miktar etkilemektedir.

Viskoz akış modeli olarak standart  $k-\varepsilon$  türbülans modeli ve standart duvar fonksiyonu kullanılmıştır. Bu modelin seçilmesinin sebebi literatürde en çok kullanılan ve en çok doğrulanan modellerin başında gelmesidir. Ayrıca ısı transferi ve sıcaklık dağılımı sonuçlarını elde edebilmek için enerji eşitliği de aktif hale getirilmiştir. Aşağıda bahsedilen eşitlikler sunulmuştur. Eşitliklerle ilgili teorik bilgiler ANSYS programının kütüphanesinden alınmıştır. Dolayısıyla aşağıdaki ilgili eşitlikler için verilen her referansla beraber bu kütüphanenin de referans verildiği anlaşılmalıdır.

Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD, CFD) korunum eşitlikleri üzerine oturmaktadır. Bu eşitlikler süreklilik veya kütle korunumu eşitliği, hareket veya momentum eşitlikleri ve enerjinin korunumu eşitlikleridir. Burada süreklilik eşitliğinin ayrı bir yeri vardır. Süreklilik eşitliği makro fiziğin en temel prensibidir. Bir akış kontrol hacmine giren kütleler, çıkan kütleler ve hacim içerisinde biriken kütlelerin yeni kütle oluşturmayacak şekilde veya kütlelerin enerjiye dönüşmeksizin yok olmayacağı şekilde dengede olması gerekir. Diğer taraftan sıkıştırılmaz kabul edilen akışlarda giren kütlelerin çıkan kütleye eşit olması gerekir ve HAD için kütle korunumu basınç doğrulamasında kullanılmaktadır. Eş. 5.59’da süreklilik eşitliği sunulmuştur.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = S_m \quad (5.59)$$

Burada ve buradan sonraki kısımlarda  $\rho$  akışkanın yoğunluğunu,  $t$  zamanı,  $\vec{v}$  vektörel hız bileşenini ve  $S_m$  ise kütle kaynak terimini göstermektedir.  $S$  genel olarak kaynak terim simgesidir ve İngilizce “Source” kelimesinin baş harfi kullanılarak ifade edilmektedir. Yukarıdaki süreklilik eşitliği genel hali ile yazılmış bir eşitliktir ve hem sıkıştırılmaz hem de sıkıştırılabilir akışlar için geçerlidir. Buradaki kaynak terim buharlaşma veya yoğunlaşma

gibi ikinci bir fazdan dolayı ilk faza olan katkıyı veya herhangi bir kullanıcı tanımlı kaynak fonksiyonunu göstermektedir. Eşitlikteki ilk terim zamana bağlı yoğunluk değişimini göstermektedir. İkinci terim koordinat sistemine göre her yöndeki akışa bağlı kütle değişimini ifade eder.

Süreklilik eşitliğini biraz daha açarak anlaşılmasını kolaylaştırmak amacıyla 2 boyutlu aksenal simetrik bir geometride süreklilik eşitliği aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho v_x) + \frac{\partial}{\partial r}(\rho v_r) + \frac{\rho v_r}{r} = S_m \quad (5.60)$$

İvmelenmeyen bir referans için momentumun korunumu Batchelor (1967) tarafından aşağıdaki gibi sunulmuştur:

$$\frac{\partial(\rho \vec{v})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\tau}) + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (5.61)$$

Burada  $p$  statik basınç,  $\bar{\tau}$  gerilim tensörü,  $\rho \vec{g}$  yerçekimi kaynaklı gövde kuvvetini,  $\vec{F}$  çeşitli göve kuvvetlerini göstermektedir.  $\vec{F}$  bir çeşit kaynak terim olarak da düşünülebilir ve vakaya özgü kuvvetlerin modele eklenmesi için kullanılabilir. Gerilme tensörü ise aşağıda sunulmuştur.

$$\bar{\tau} = \mu \left[ (\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{v} I \right] \quad (5.61)$$

Burada  $\mu$  moleküler viskoziteyi,  $I$  birim tensörü göstermektedir. Eşitliğin sağ kısmındaki ikinci terim hacimsel genişlemeyi temsil eder. Yukarıdaki eşitliği daha iyi anlamak için yine basit bir geometri tanımlamak gerekirse aksenal simetrik 2B bir akış geometrisi için  $x$  ve  $r$  yönündeki momentum eşitlikleri Eş. 5.63 ve 5.64'teki gibi verilebilir.

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho v_x)}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x}(r \rho v_x v_x) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho v_r v_x) &= -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x} \left[ r \mu \left( 2 \frac{\partial v_x}{\partial x} - \right. \right. \\ \left. \left. \frac{2}{3} \left( \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_r}{r} \right) \right) \right] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r \mu \left( \frac{\partial v_x}{\partial r} + \frac{\partial v_r}{\partial x} \right) \right] + F_x \end{aligned} \quad (5.63)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho v_r)}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x}(r \rho v_x v_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho v_r v_r) &= -\frac{\partial p}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x} \left[ r \mu \left( \frac{\partial v_r}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial r} \right) \right] + \\ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r \mu \left( 2 \frac{\partial v_r}{\partial r} - \frac{2}{3} \left( \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_r}{r} \right) \right) \right] - 2\mu \frac{v_r}{r^2} + \frac{2}{3} \frac{\mu}{r} \left( \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_r}{r} \right) + \end{aligned} \quad (5.64)$$



$$\rho \frac{v_z^2}{r} + F_r$$

Burada ortaya çıkan üçüncü hız ifadesi teğetsel hız değil girdap (swirl) hızıdır. Formüllerde eşitliğin sol kısmında zamana ve konuma bağlı momentum değişimi verilmektedir. Eşitliğin sağ kısmında ise bu değişimlere neden olan etkenler sıralanmıştır. Bu etkenler statik basınç, gövde kuvvetleri ve sürtünme kaynaklı yüzey gerilmeleridir. Aslında, bu makroskopik yaklaşım ve kabuller mühendislik çözümleri açısından kabul edilebilir doğruluk sağlamalarına rağmen, çok küçük ölçekte veya moleküler seviyede gerçekleşen fiziksel olayları tam olarak temsil etmemektedir. Yine de mühendislik problemlerinin çok büyük bir bölümünde anlatılan

Son olarak enerji eşitliği aşağıda sunulmuştur.

$$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{v}(\rho E + p)) = \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T - \sum_j h_j \vec{J}_j + (\bar{v}_{eff} \cdot \vec{v})) + S_h \quad (5.65)$$

Burada  $k_{eff}$  etkin ısı iletim katsayısını göstermektedir. Etkin ifadesinin nedeni türbülans kaynaklı ek iletim özellikleridir. Dolayısıyla  $k_{eff} = k + k_t$  olarak ifade edilebilir. Tabii ki burada  $k_t$  türbülans kaynaklı iletim katsayısıdır ve seçilen türbülans modeline göre belirlenmektedir.  $\vec{J}$  terimi  $j$  cinsinden difüzyon akısını gösterir.  $T$  sıcaklık ve  $E$  enerjidir. Bu terimlerden  $E$  aşağıda daha da açılacaktır.  $h$  entalpiyi göstermektedir.  $S_h$  terimi hacimsel ısı kaynaklarını ve kullanıcı tanımlı kaynakları içermektedir. Bununla birlikte aşağıda da ifade edileceği üzere entalpi tanımı içerisinde oluşum entalpisi de yer alacağı için sonlu yüzey ve hacim reaksiyonları bu terime dahil değildir. Aşağıda  $h$  ve  $E$  açıklanmıştır.

$$E = h - \frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2} \quad (5.66)$$

İdeal gazlar için entalpi Eş. 5.67'de, sıkıştırılmaz akış için ise Eş. 5.68'de verilmiştir. Bu eşitliklerde  $Y$  sembolü herhangi bir bileşenin toplam kütle içerisindeki miktarını ifade etmektedir.  $h_j$  ise Eş. 5.69'da verilmiştir.

$$h = \sum_j Y_j h_j \quad (5.67)$$

$$h = \sum_j Y_j h_j + \frac{p}{\rho} \quad (5.68)$$

$$h_j = \int_{T_{ref}}^T c_{p,j} dT \quad (5.69)$$

$T_{ref}$  değeri kullanılan akış modeli ve çözücüye bağlıdır yani kullanıcı tarafından belirlenmektedir. Örneğin basınç temelli çözücüde  $T_{ref}$  değeri 298.15 K olarak alınmaktadır ama bu değer kullanıcı tarafından değiştirilebilir. Kısmi diferansiyeller ile oluşturulan akış modellerinde ise bu değer kullanıcı tarafından girilmesi istenmektedir. Yoğunluk temelli çözücüde ise bu değer 0 K dir fakat bileşenlerin aktarımının reaksiyonlar ile modellendiği durumlarda bu değer kullanıcıdan sorulmaktadır.

Buraya kadar verilen ana eşitlikler yönetici eşitlikler olarak da isimlendirilmektedir. Bu eşitlikler akışın fiziği ile alakalı olup türbülans gibi karmaşık olayların cebirsel çözümleri çoğu zaman bu eşitlikler ile imkansız olmaktadır. Dolayısıyla bu eşitliklerin ışığında türbülans istatistiklerini çeşitli akış büyüklüklerini kullanarak elde eden veya yaklaşan modeller geliştirilmiştir. Bu modellerden en bilinenlerinden biri Launder ve Spalding (1972) tarafından önerilen  $k$ - $\varepsilon$  türbülans modelidir. Uzun bir süre boyunca bilim insanları tarafından sıkça kullanılan ve doğrulanmış bu model aynı zamanda sanayide de kullanılmakta ve rağbet görmektedir. Bu nedenle yapılan analizde de bu model tercih edilmiştir. Bu model yarı deneysel bir modeldir. Model oluşturulurken fiziksel olgular dikkate alındığı gibi deneysel deneyimler de kullanılmıştır. Modelin ismi, iki türbülans göstergesinin aktarım eşitlikleri ile modellenmesinden gelmektedir. Bu göstergeler  $k$  yani türbülans kinetik enerjisi ve  $\varepsilon$  yani bu kinetik enerjinin sönüm hızı veya oranıdır. Modeldeki  $k$ 'nın aktarım eşitliği tam çözüm eşitliğinden türetilmiştir. Bununla birlikte  $\varepsilon$ 'un aktarım eşitliği fiziksel çıkarım ile düzenlenmiştir ve tam çözüm eşitliğiyle çok az benzeşmektedir. Model geliştirilirken tamamen türbülanslı akışlar düşünüldüğü ve moleküler viskozitenin etkileri ihmal edildiği için cidara yakın bölgelerde model bir duvar fonksiyonuna ihtiyaç duymaktadır.  $k$ 'nın aktarım eşitliği Eş. 5.70'de ve  $\varepsilon$ 'un aktarım eşitliği Eş. 5.71'de sunulmuştur.

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (5.70)$$

$$\frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (5.71)$$

Yukarıda verilen iki aktarım eşitliğinde yer alan  $G_k$  terimi ortalama hız gradyanlarına göre  $k$  üretimini ifade etmektedir.  $G_b$  de benzer şekilde kaldırma kuvvetinden dolayı  $k$  üretimini ifade etmektedir.  $Y_M$  terimi, sıkıştırılabilir türbülanstaki çalkantılı genişlemenin genel sönüm oranına katkısını gösterir.  $C_{1\varepsilon}$ ,  $C_{2\varepsilon}$  ve  $C_{3\varepsilon}$  değerleri model sabitleridir ve aşağıda verilmiştir.  $\sigma_k$  ve  $\sigma_\varepsilon$  terimleri  $k$  ve  $\varepsilon$  için türbülanslı Prandtl sayılarıdır. Yine bu değerler de aşağıda verilmiştir. Kaynak terimler diğer eşitliklerde olduğu gibi kullanıcı tarafından tanımlanabilmektedir. Burada geçen sabitler ve türbülans Prandtl sayıları deneysel olarak bulunmuş olup bir çok akış için iyi sonuç vermektedir. Yine de özel durumlarda kullanıcı bu katsayılarda değişiklikler yapabilmektedir.

Son olarak Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes (RANS) eşitliklerinde ortaya çıkan çalkantılı hız bileşenlerini  $k$  ve  $\varepsilon$  ile ilişkilendirmek için Eş. 5.72'de verilen türbülans viskozitesi tanımlanmıştır.

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (5.72)$$

Çizelge 5.1.  $k$ - $\varepsilon$  model sabitleri

$C_{1\varepsilon}$	$C_{2\varepsilon}$	$C_{3\varepsilon}$	$C_\mu$	$\sigma_k$	$\sigma_\varepsilon$
1,44	1,92	-	0,09	1	1,3

İterasyonlar sırasında artıkların kontrolü yapılmış ve sayısal yöntemin gevşetme katsayıları başlangıçta yüksek alınıp daha sonra küçültülmüştür. Yakınsama kriteri olarak enerji dışında bütün artıklara  $10^{-7}$  yakınsama kriteri uygulanmıştır. Enerji artığı için bu değer  $10^{-9}$  alınmıştır. Çözüm sırasında yapılan denemeler de etkili olduğu için program yaklaşık 20000 iterasyon koşmuştur. Sonuçlar çözüm sonrası tekrardan işlenmiştir.

## 6. ARAŞTIRMA BULGULARI

Bu çalışmada öncelikle sondaj çalışması yapılmakta olan bir kuyu ile ilgili ölçüm sonuçları alınıyormuş gibi bir senaryo hazırlanmıştır. Bu senaryoya göre kuyunun 500 m, 750 m, 1000 m, 1250 m ve 1500 m derinlikleri için kuyunun giriş ve çıkış sıcaklıkları tespit edilerek rezervuar sıcaklıkları hesaplanmıştır. Hesap sonuçları Çizelge 6.1’de görülmektedir.

Çizelge 6.1. Değişik kuyu derinlikleri ve değişik giriş-çıkış sıcaklıkları için hesaplanan rezervuar sıcaklıkları

Kuyu Derinliği [m]	Sondaj Borusu Giriş Sıcaklığı [°C]	Anulus Çıkış Sıcaklığı [°C]	Hesaplanan Rezervuar Sıcaklığı [°C]
500	35	40	47.55
750	45	48	52.50
1000	52	55	59.52
1250	48	60	78.14
1500	50	67	92.72

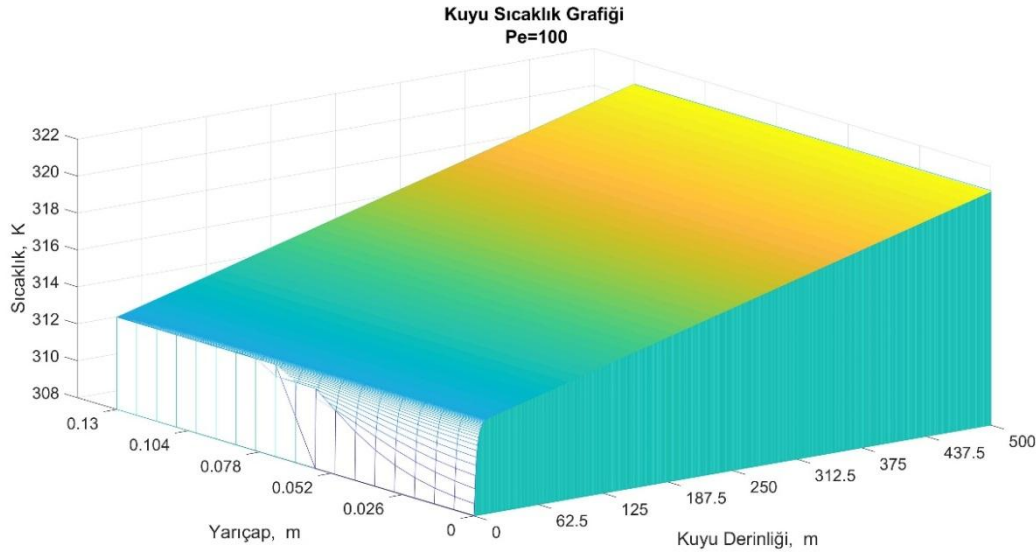
Daha sonra 1000 m derinliğindeki bir kuyu için 40 °C ve 50 °C giriş sıcaklıklarına karşılık 3, 5, 10, 15 °C artışlar kabul edilerek her biri için rezervuar sıcaklıkları hesaplanarak sonuçlar Çizelge 6.2’de gösterilmiştir.

Çizelge 6.2. 1000 m derinliğindeki kuyu için hesaplanan rezervuar sıcaklıkları

Sondaj Borusu Giriş Sıcaklığı [°C]	Anulus Çıkış Sıcaklığı [°C]	Hesaplanan Rezervuar Sıcaklığı [°C]
40	43	47.52
	45	52.55
	50	65.12
	55	77.60
50	53	57.52
	55	57.54
	60	75.12
	65	87.69

Hesaplama sonucu elde edilen rezervuar sıcaklıkları, literatür taramasında benzer çalışmalardan elde edilen sonuçlarla karşılaştırıldığında son derece bir uyum içerisinde olduğu gözlemlenmiştir.

Elde edilen bu sonuçlar Delphi programlama dilinde hazırlanan yazılımda kullanılarak kuyu içi sıcaklık dağılımları elde edilmiştir. Bu sıcaklık dağılımının hem kuyu derinliği yönünde hem de yarıçap yönünde rahatça gözlemlenebilmesi için elde edilen veriler üç boyutlu grafiklere dönüştürülmüştür. Yukarıdaki her iki tablodan elde edilen sonuçlara göre sıcaklık dağılımı grafikleri çıkartılmıştır. Ancak kuyu derinliği kuyu çapına göre çok büyük olduğundan tüm detaylar tüm şekil üzerinde bütün ayrıntısıyla görülmeyebilir. Bu nedenle her bir veri grubunda kuyunun ilk 50 metre derinlikteki sıcaklık grafiği ile son 50 metre derinlikteki sıcaklık grafikleri verilmiştir. Çünkü ara derinliklerde ciddi bir değişiklik olmayıp bir süreklilik vardır. Aşağıda Şekil 6.1 – 6.15 arasında Çizelge 6.1’de verilen kuyu derinlikleri için grafikler verilmiştir. Her bir derinlik için yukarıda anlatıldığı şekilde üç ayrı grafik verilmiştir. Şekiller incelendiğinde de anlaşılacağı gibi her bir derinlik grubu için verilen benzer şekiller arasında çok az farklılıklar vardır. Bu nedenle her bir şekil için ayrı ayrı yorum yapma gereği duyulmamıştır. Bu açıklamalar ışığında elde edilen grafiklerle ilgili yorum ve öneriler aşağıdadır.

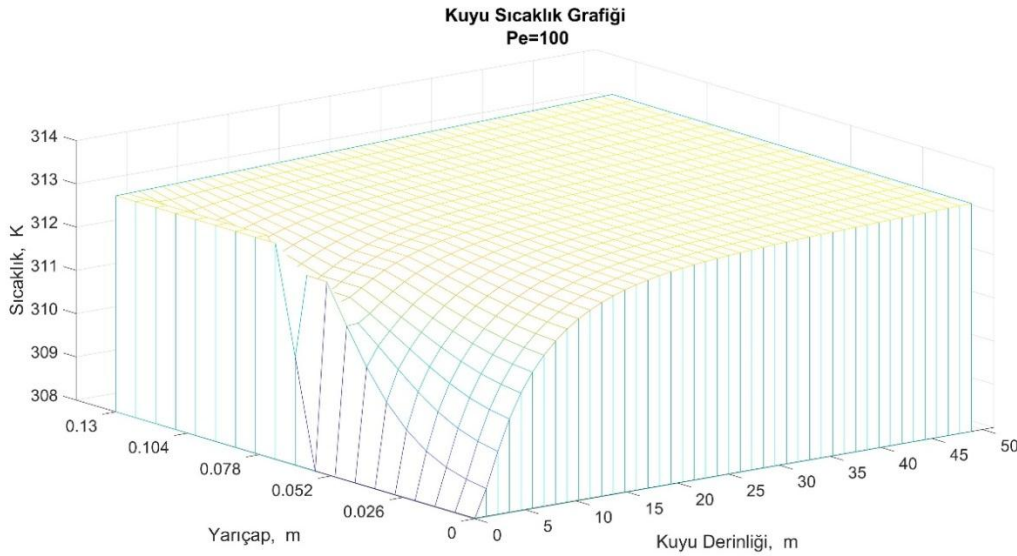


Şekil 6.1. 500 m derinliğindeki kuyuda sıcaklık dağılımı grafiği ( $T_g=35\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_c=40\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_{rez}=47.55\text{ }^\circ\text{C}$ )

Şekil 6.1’de, Çizelge 6.1’deki ilk satırda yer alan kuyu için sıcaklık grafiği görülmektedir. Şekilden de açıkça görüldüğü üzere başlangıçta giriş sıcaklığı hızla çıkış sıcaklığına kadar yükselmektedir. Bu yükselmeye yüksek taşınım katsayısının etkisi açıkça görülmektedir. Yaklaşık olarak ilk 30 m derinlikte giriş-çıkış sıcaklıkları eşitlenmekte ve ondan sonra tüm kuyu boyunca rezervuar sıcaklığına kadar doğrusal orantılı bir artış gözlemlenmektedir. Bu

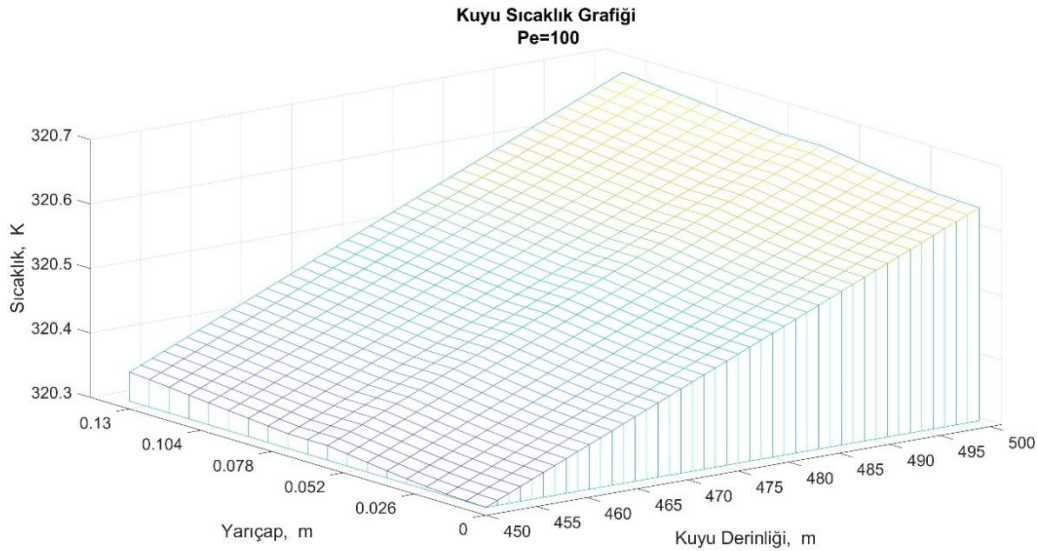
doğrusal yükseliş, belli bir yerden sonra kuyu boyunca sabit bir ısı transferinin gerçekleştiğini göstermektedir.

Şekil 6.2’de ise bu kuyunun ilk 50 m’indeki sıcaklık dağılımı verilmiştir. Kuyunun derinlik/çap oranı çok büyük olduğu için önceki şekilde görülmeyen detaylar buradan daha rahat izlenebilir. Şekil 6.2’ye dikkatle bakıldığında, daha kuyunun ağız kısmında dış boru yani anulusdan boru eksenine doğru az da olsa bir sıcaklık düşüşü kendini göstermektedir. Sondaj borusu cidarında ise bu sıcaklık düşüşü daha belirgindir. Sondaj borusunun iç kısmında merkezden çepere doğru parabolik sıcaklık artışı taşınım ile ısı transferi etkisini çok net bir şekilde gözler önüne sermektedir. Taşınımın etkisi, borudan aşağı doğru akmakta olan sondaj sıvısındaki parabolik sıcaklık artışı da açıkça görülmektedir. Yaklaşık 30 m derinlikten sonra sıcaklık artışı doğrusal bir hal almaktadır. Burada tam olarak anlaşılmasa bile cidardan boru merkezine doğru radyal yönde hafif bir sıcaklık düşüşü vardır. Yani anulusdan yukarı doğru akmakta olan akışkan tarafından, iç borudan aşağı doğru akmakta olan sondaj sıvısına bir ısı transferi gerçekleşmektedir. Şeklin orta üst köşesinden sol tarafa doğru ve sağ tarafa doğru sıcaklık skalası takip edildiğinde sıcaklığın kuyu ağzında daha düşük olduğu ve derinlikle arttığı, yine sıcaklığın cidarda daha fazla olduğu ve merkeze doğru azaldığı fark edilecektir.



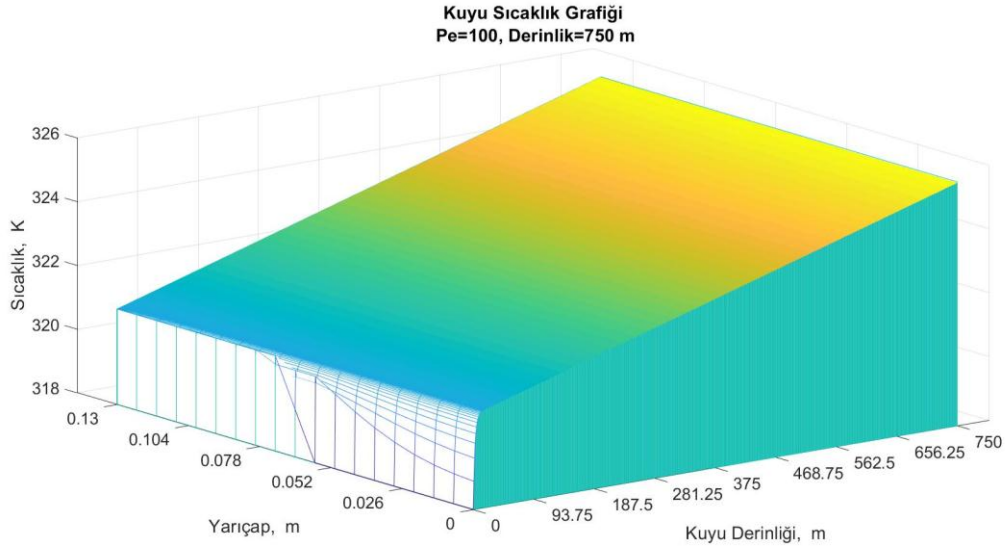
Şekil 6.2. 500 m derinlikteki kuyunun ilk 50 metresinde sıcaklık dağılımı grafiği ( $T_g=35$  °C,  $T_ç=40$  °C,  $T_{rez.}=47.55$  °C)

Şekil 6.3'te kuyunun son 50 m'sindeki sıcaklık dağılımı verilmiştir. Bu şekilde derinlik yönünde eğimin fazla görünmesi göz aldanmasından başka bir şey değildir. Şekildeki sıcaklık eksenine dikkat edildiğinde başlangıçtaki sıcaklığın 320.3 K, bitişteki sıcaklığın ise 320.7 K olduğu, yani farkın sadece 0.4 °C olduğu anlaşılır. Bu şeklin radyal yöndeki giriş kısmına dikkat edildiğinde sıcaklığın boru eksenine doğru düştüğü görülecektir. Bu da cidardan eksene doğru bir ısı transferi gerçekleştiğinin göstergesidir. Grafiğin sonunda yani 50. metrede cidar ile eksen arasında bir sıcaklık farkı olduğu açıkça görülmektedir. Halbuki burada rezervuar sıcaklığının her noktada eşit olması gerekirdi. Oysaki iç borudan çıkan akışkan, dış borudan (anulus) geriye dönüş noktasına gelene kadarki zaman içerisinde az da olsa ısınmaktadır. Bu şekle dikkatle bakıldığında radyal yönün ortalarında (0.075 m ile 0.082 m arası) sıcaklık düşüşünün doğrusal olduğu fark edilebilir. Bu kısım sondaj borusunun bulunduğu yerdir ve bu durum, buradan iletimle bir ısı transferi gerçekleştiğinin net bir göstergesidir.

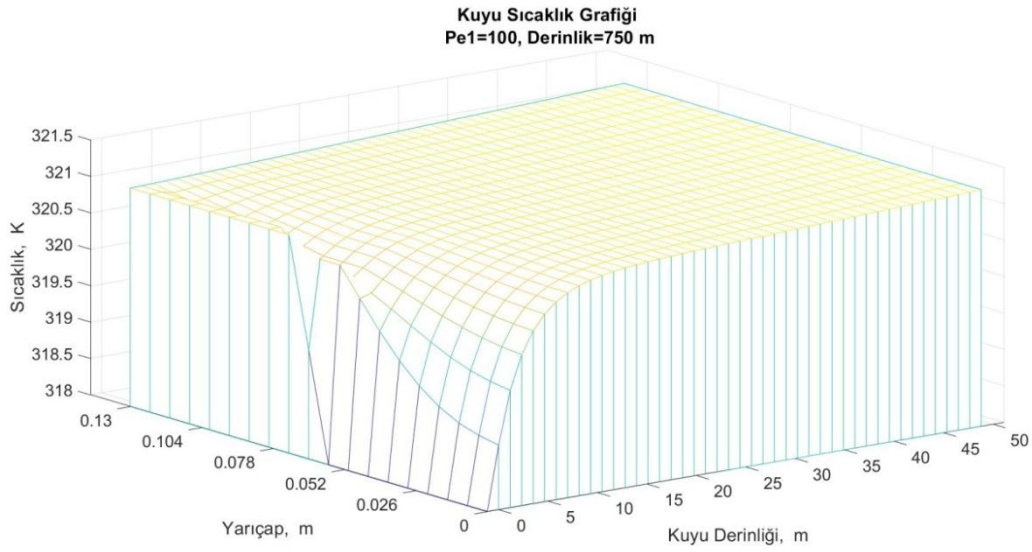


Şekil 6.3. 500 m derinlikteki kuyunun son 50 metresinde sıcaklık dağılımı grafiği ( $T_g=35$  °C,  $T_ç=40$  °C,  $T_{rez.}=47.55$  °C)

Şekil 6.4. – 6.15. arası, 750 m, 1000 m, 1250 m ve 1500 m kuyu derinliği için elde edilen verilerin grafikleridir. Açıkça görüleceği gibi bu grafikler de derinlik ve sıcaklık skalaları dışında üstteki grafiklerden çok farklı değildir. Dolayısıyla yukarıdaki grafikler için anlatılanlar burada da tekrarlanabilir.

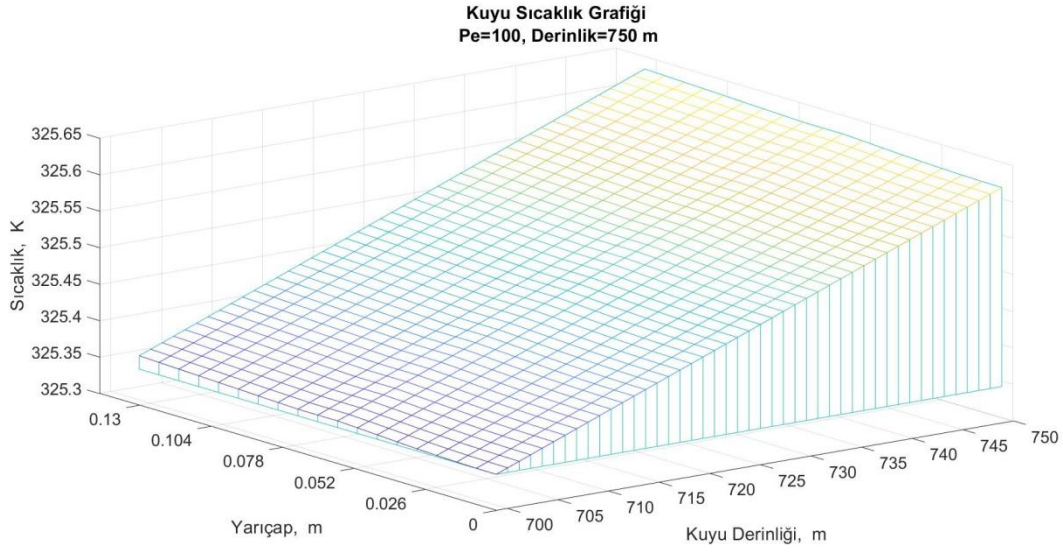


Şekil 6.4. 750 m derinliğindeki kuyuda sıcaklık dağılımı grafiği ( $T_g=45$  °C,  $T_ç=48$  °C,  $T_{rez.}=52.50$  °C)

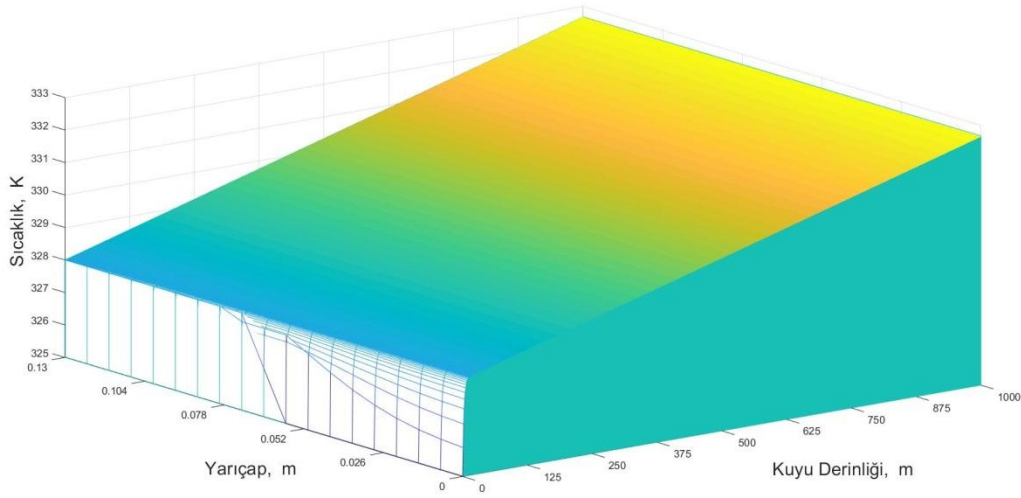


Şekil 6.5. 750 m derinlikteki kuyunun ilk 50 metresinde sıcaklık dağılımı grafiği ( $T_g=45$  °C,  $T_ç=48$  °C,  $T_{rez.}=52.50$  °C)

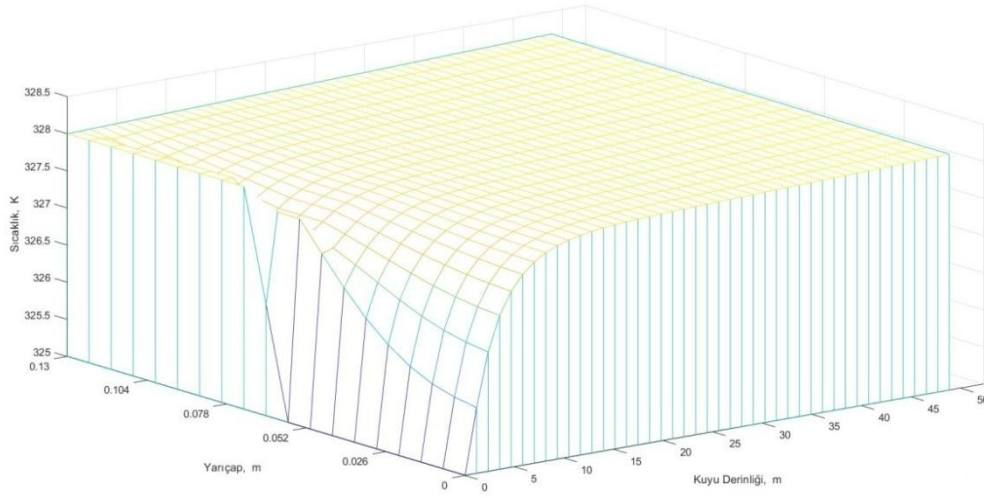




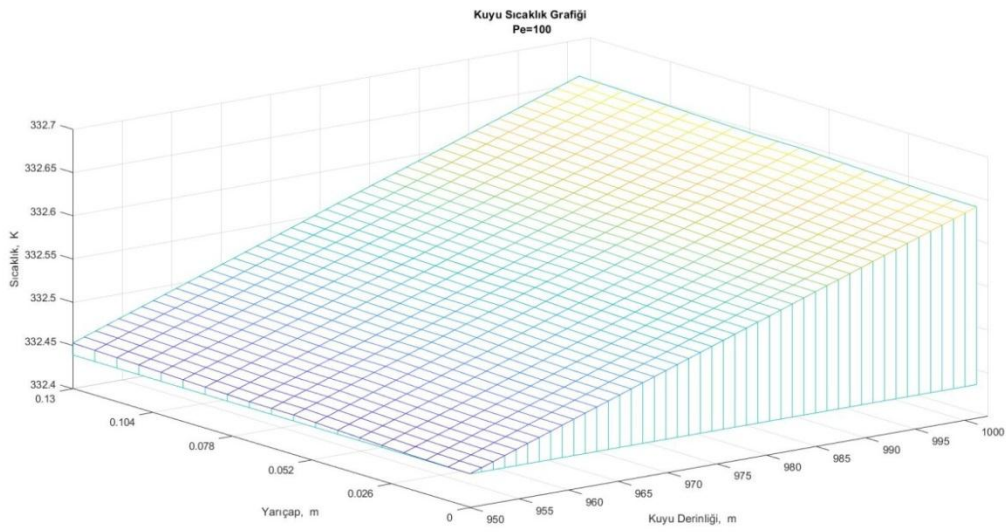
Şekil 6.6. 750 m derinlikteki kuyunun son 50 metresinde sıcaklık dağılımı grafiği ( $T_g=45$  °C,  $T_ç=48$  °C,  $T_{rez.}=52.50$  °C)



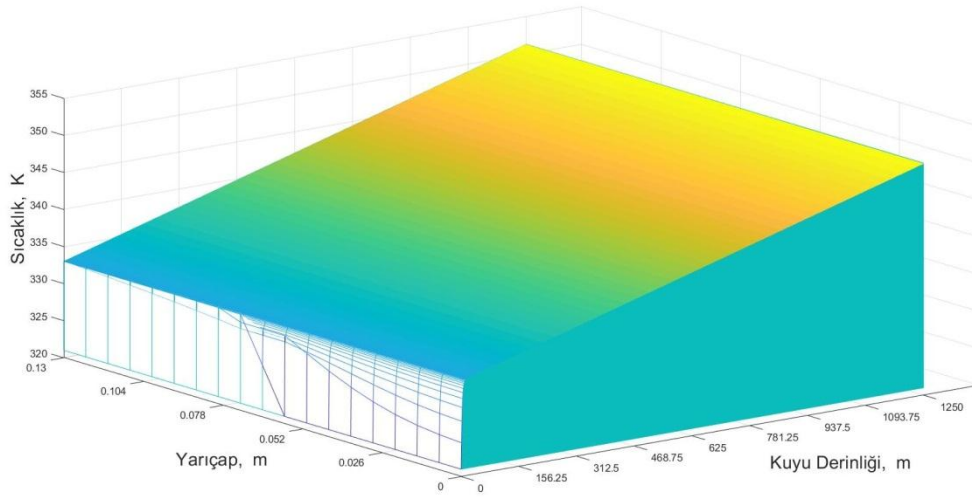
Şekil 6.7. 1000 m derinliğindeki kuyuda sıcaklık dağılımı grafiği ( $T_g=52$  °C,  $T_ç=55$  °C,  $T_{rez.}=59.52$  °C)



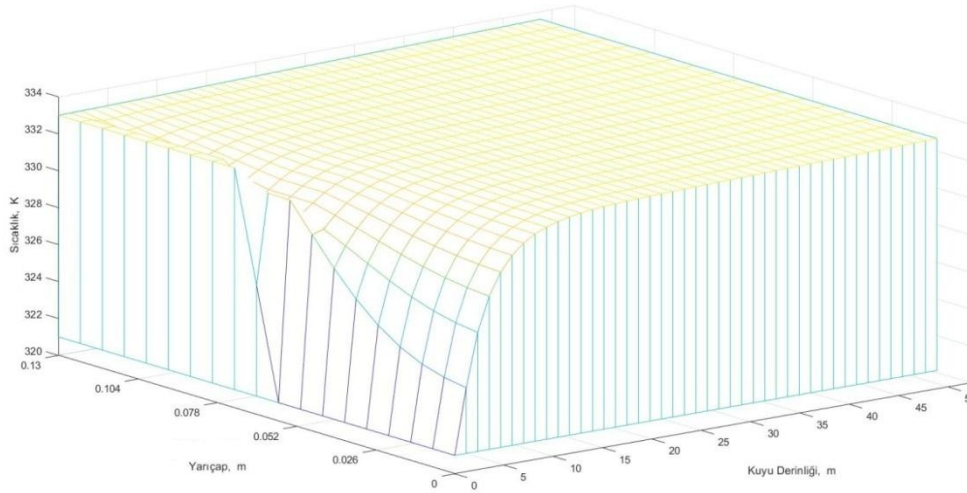
Şekil 6.8. 1000 m derinlikteki kuyunun ilk 50 metresinde sıcaklık dağılımı grafiği ( $T_g=52$  °C,  $T_{\dot{\zeta}}=55$  °C,  $T_{rez.}=59.52$  °C)



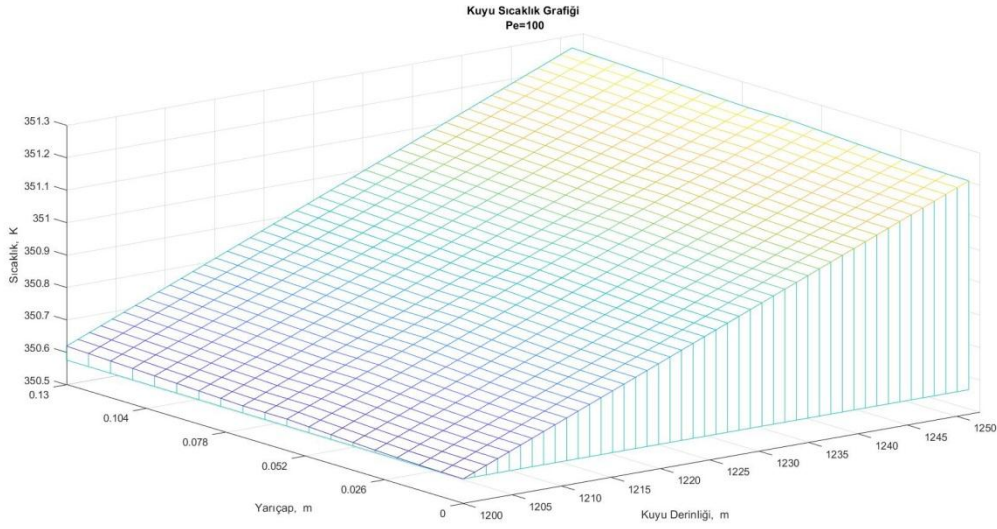
Şekil 6.9. 1000 m derinlikteki kuyunun son 50 metresinde sıcaklık dağılımı grafiği ( $T_g=52$  °C,  $T_{\dot{\zeta}}=55$  °C,  $T_{rez.}=59.52$  °C)



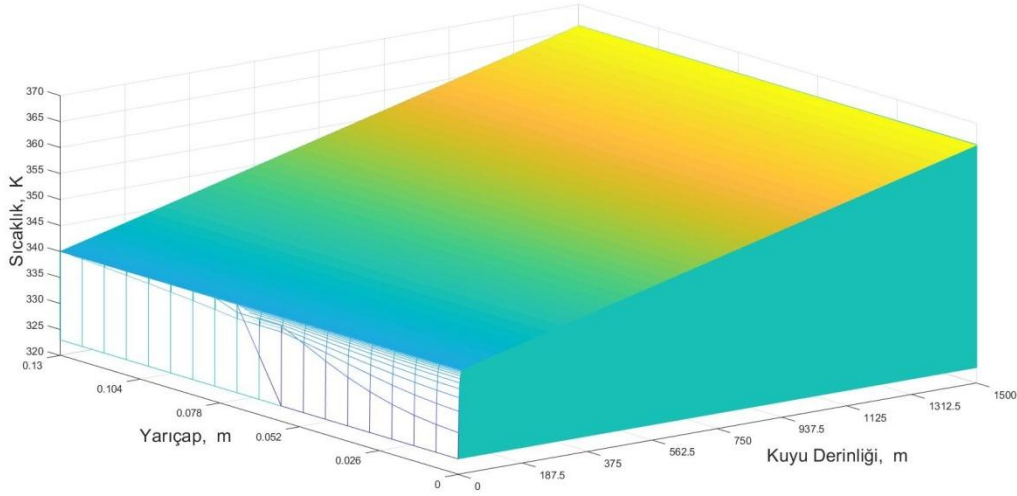
Şekil 6.10. 1250 m derinliğindeki kuyuda sıcaklık dağılımı grafiği ( $T_g=48$  °C,  $T_ç=60$  °C,  $T_{rez.}=78.14$  °C)



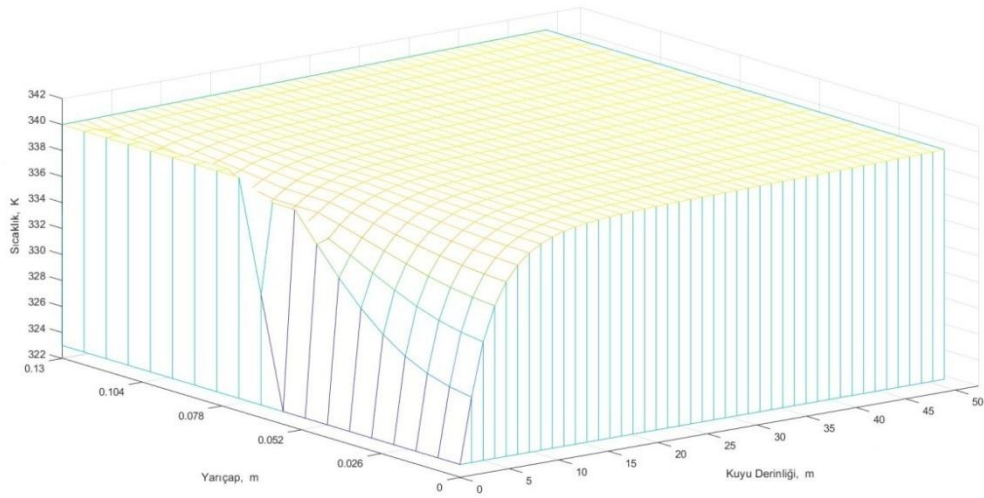
Şekil 6.11. 1250 m derinlikteki kuyunun ilk 50 metresinde sıcaklık dağılımı grafiği ( $T_g=48$  °C,  $T_ç=60$  °C,  $T_{rez.}=78.14$  °C)



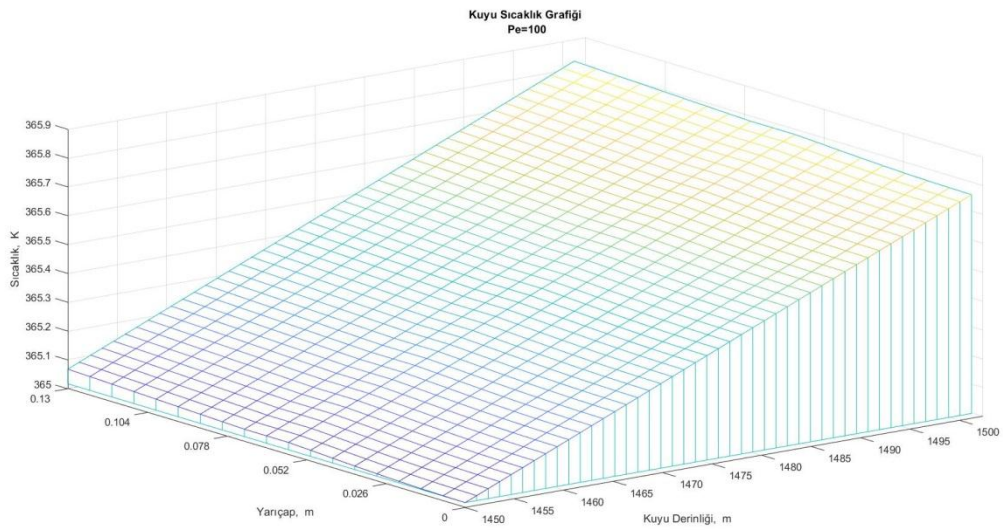
Şekil 6.12. 1250 m derinlikteki kuyunun son 50 metresinde sıcaklık dağılımı grafiği ( $T_g=48\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_\zeta=60\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_{rez.}=78.14\text{ }^\circ\text{C}$ )



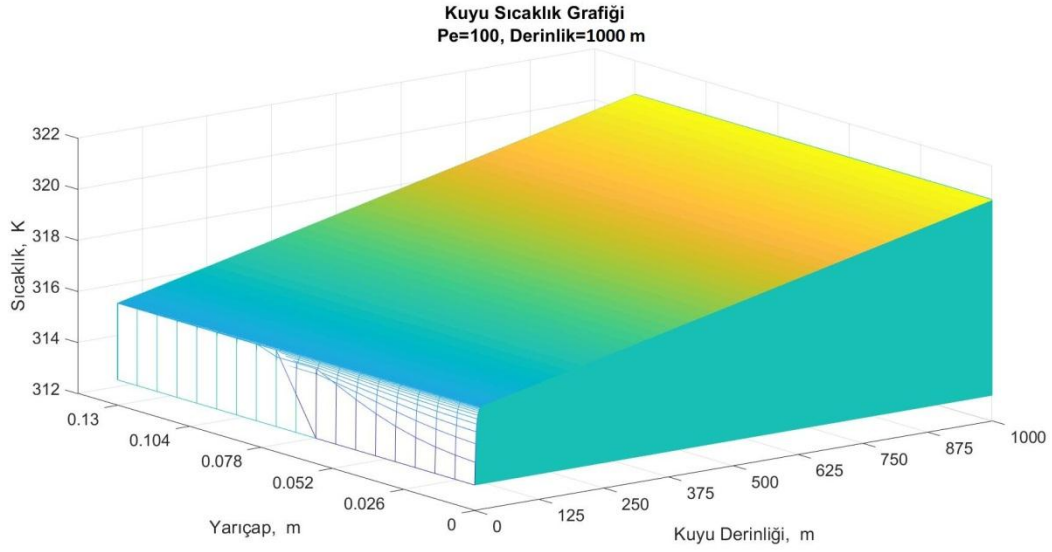
Şekil 6.13. 1500 m derinliğindeki kuyuda sıcaklık dağılımı grafiği ( $T_g=50\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_\zeta=67\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_{rez.}=92.72\text{ }^\circ\text{C}$ )



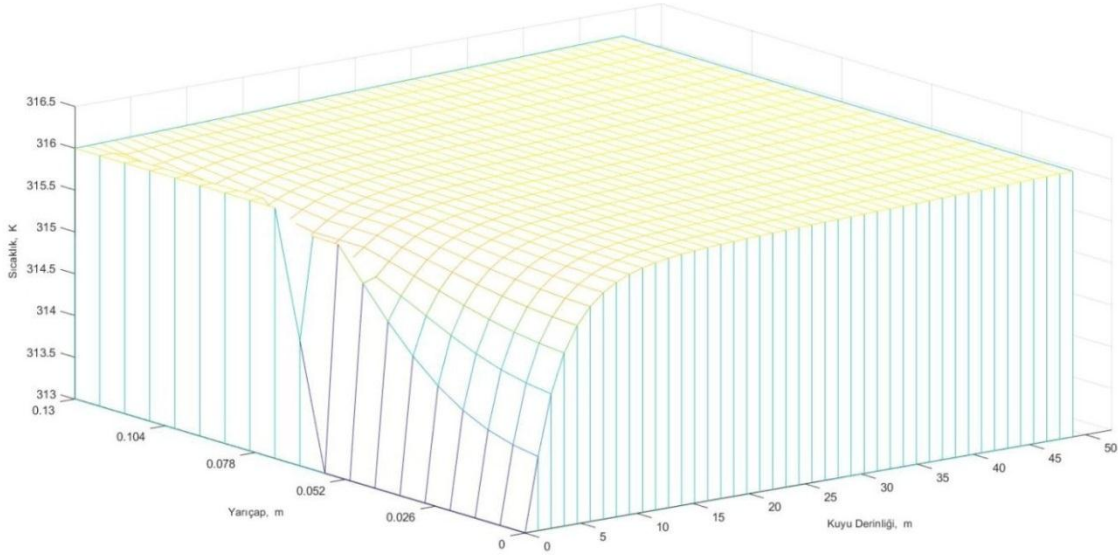
Şekil 6.14. 1500 m derinlikteki kuyunun ilk 50 metresinde sıcaklık dağılımı grafiği ( $T_g=50$  °C,  $T_{\dot{\zeta}}=67$  °C,  $T_{rez.}=92.72$  °C)



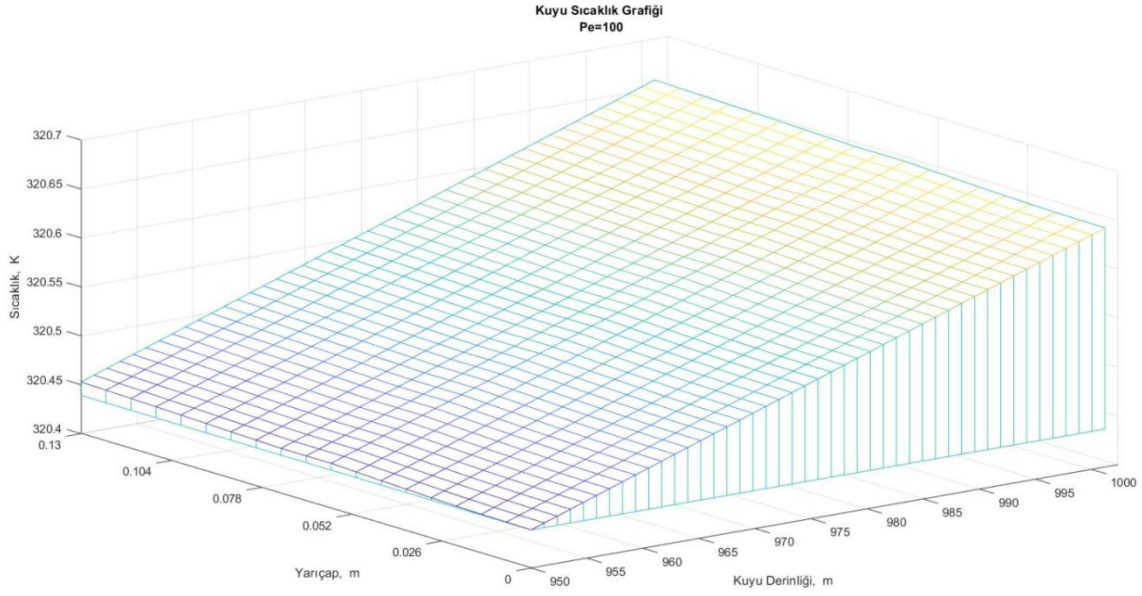
Şekil 6.15. 1500 m derinlikteki kuyunun son 50 metresinde sıcaklık dağılımı grafiği ( $T_g=50$  °C,  $T_{\dot{\zeta}}=67$  °C,  $T_{rez.}=92.72$  °C)



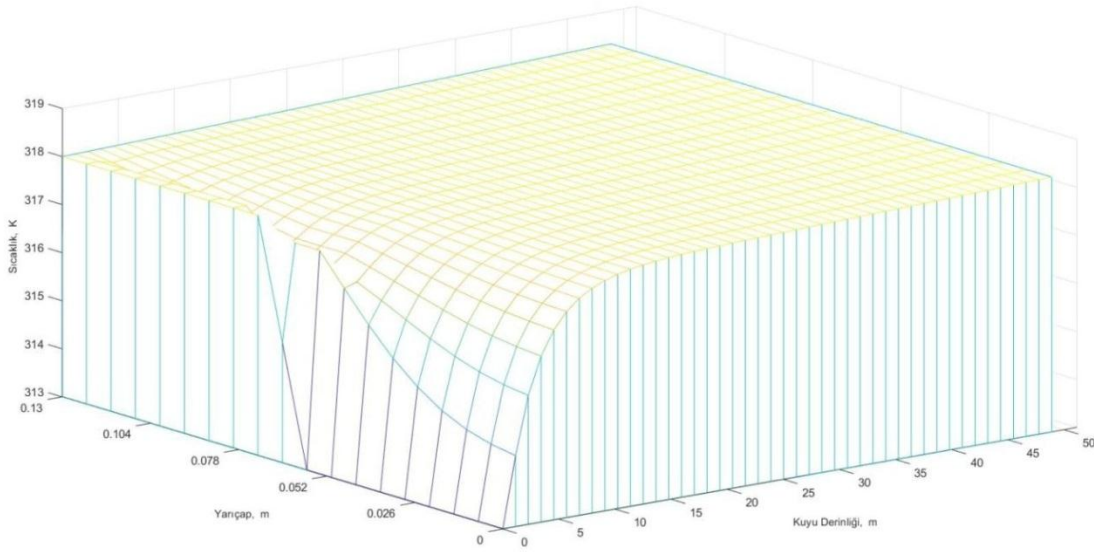
Şekil 6.16. 1000 m derinliğindeki kuyuda sıcaklık dağılımı grafiği ( $T_g=40$  °C,  $T_ç=43$  °C,  $T_{rez.}=47.52$  °C)



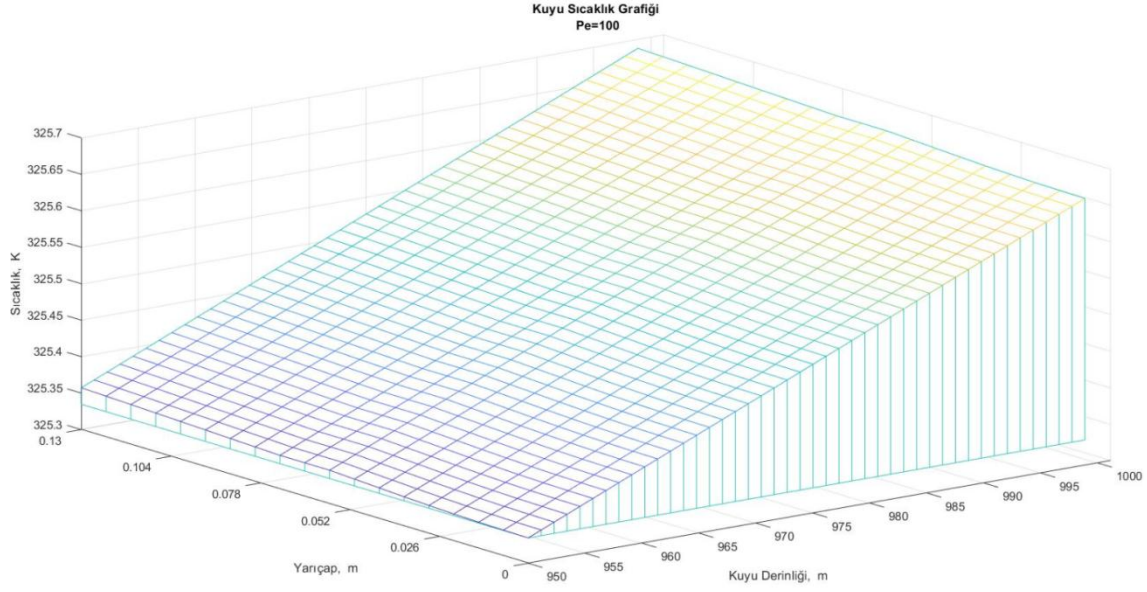
Şekil 6.17. 1000 m derinlikteki kuyunun ilk 50 metresinde sıcaklık dağılımı grafiği ( $T_g=40$  °C,  $T_ç=43$  °C,  $T_{rez.}=47.52$  °C)



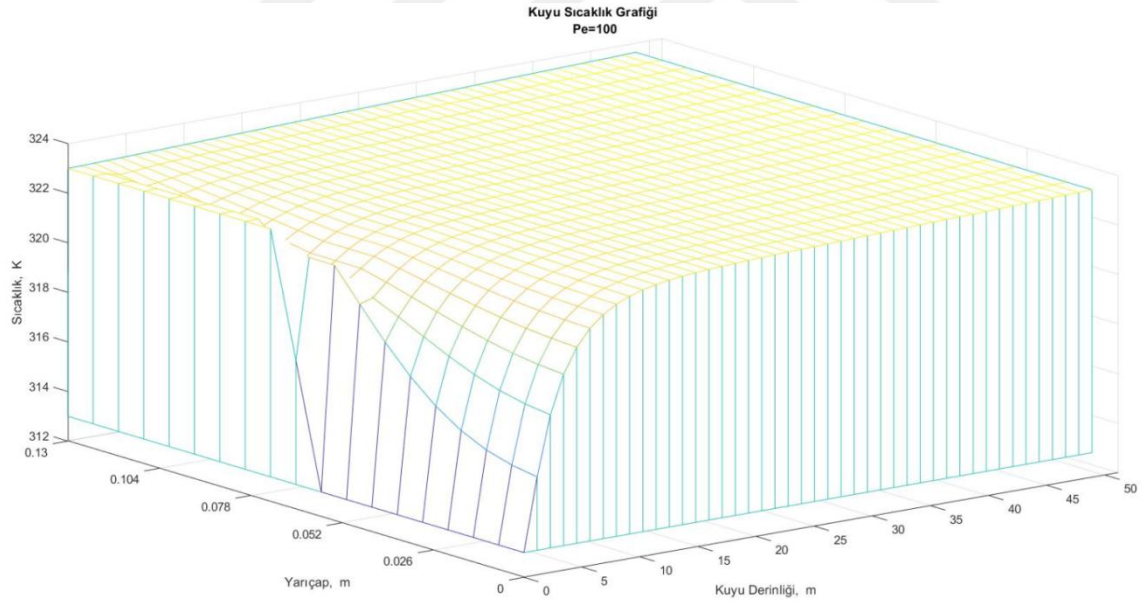
Şekil 6.18. 1000 m derinlikteki kuyunun son 50 metresinde sıcaklık dağılımı grafiği  
( $T_g=40$  °C,  $T_ç=43$  °C,  $T_{rez.}=47.52$  °C)



Şekil 6.19. 1000 m derinlikteki kuyunun ilk 50 metresinde sıcaklık dağılımı grafiği ( $T_g=40$  °C,  $T_ç=45$  °C,  $T_{rez.}=52.55$  °C)

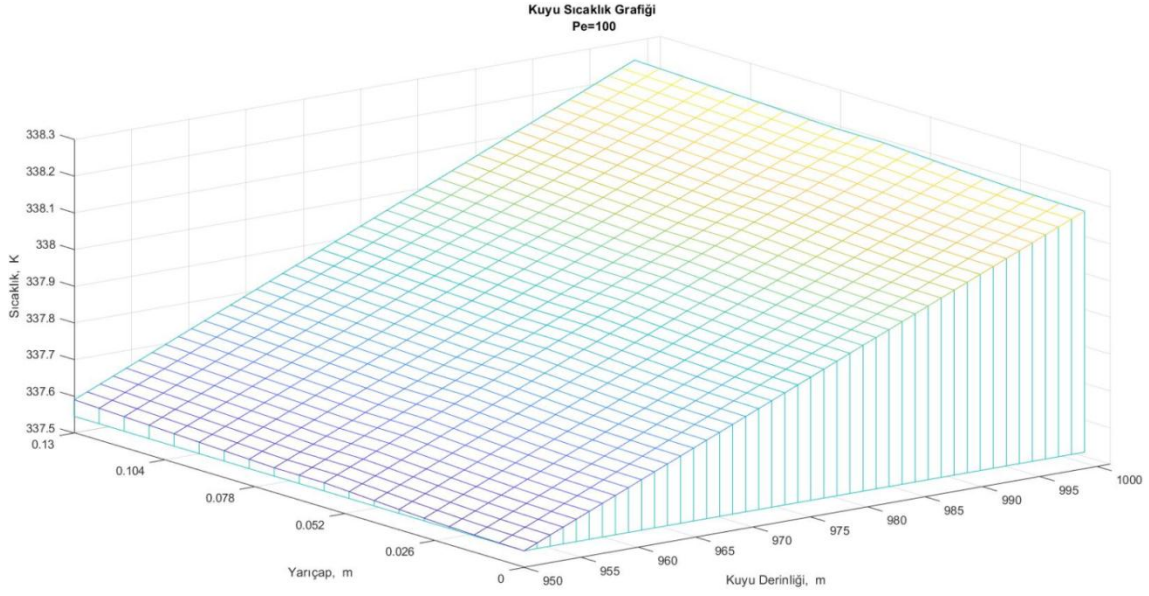


Şekil 6.20. 1000 m derinlikteki kuyunun son 50 metresinde sıcaklık dağılımı grafiği  
( $T_g=40$  °C,  $T_ç=45$  °C,  $T_{rez.}=52.55$  °C)

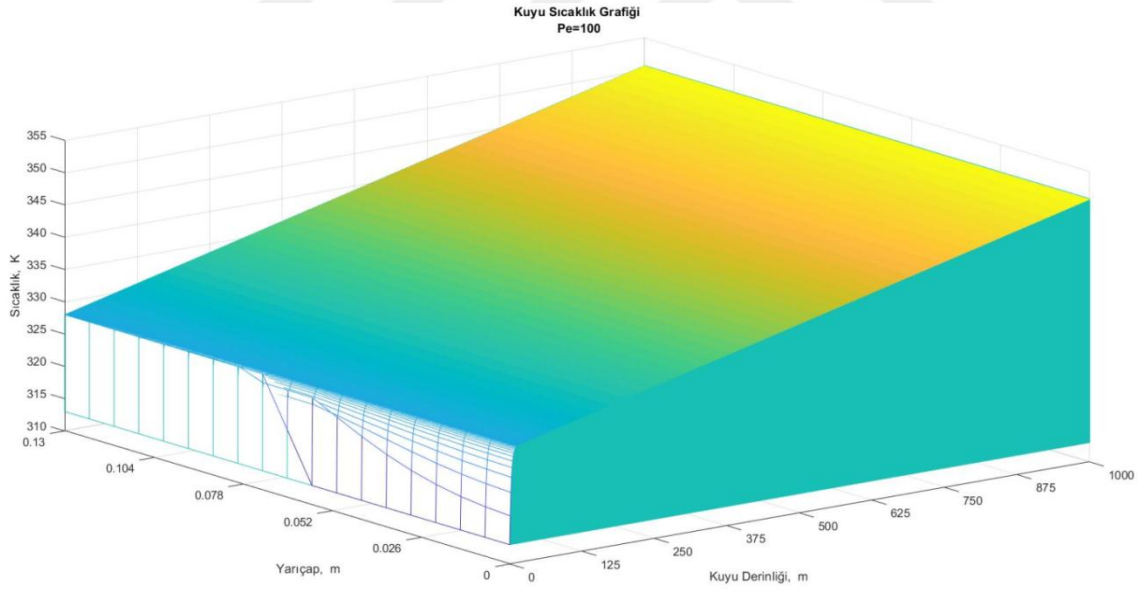


Şekil 6.21. 1000 m derinlikteki kuyunun ilk 50 metresinde sıcaklık dağılımı grafiği ( $T_g=40$  °C,  $T_ç=50$  °C,  $T_{rez.}=65.12$  °C)

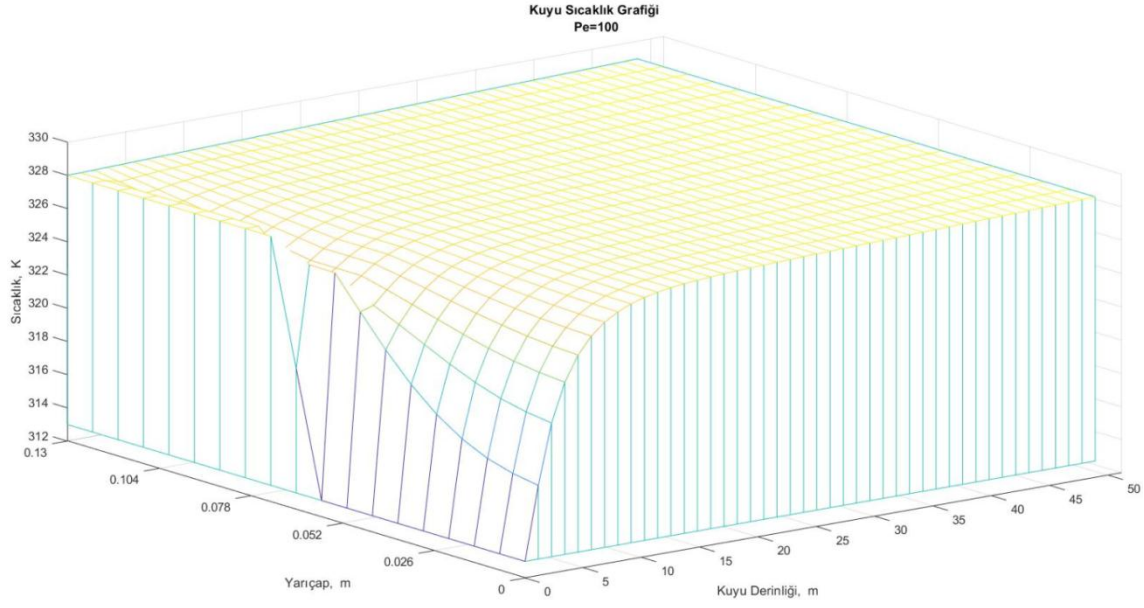




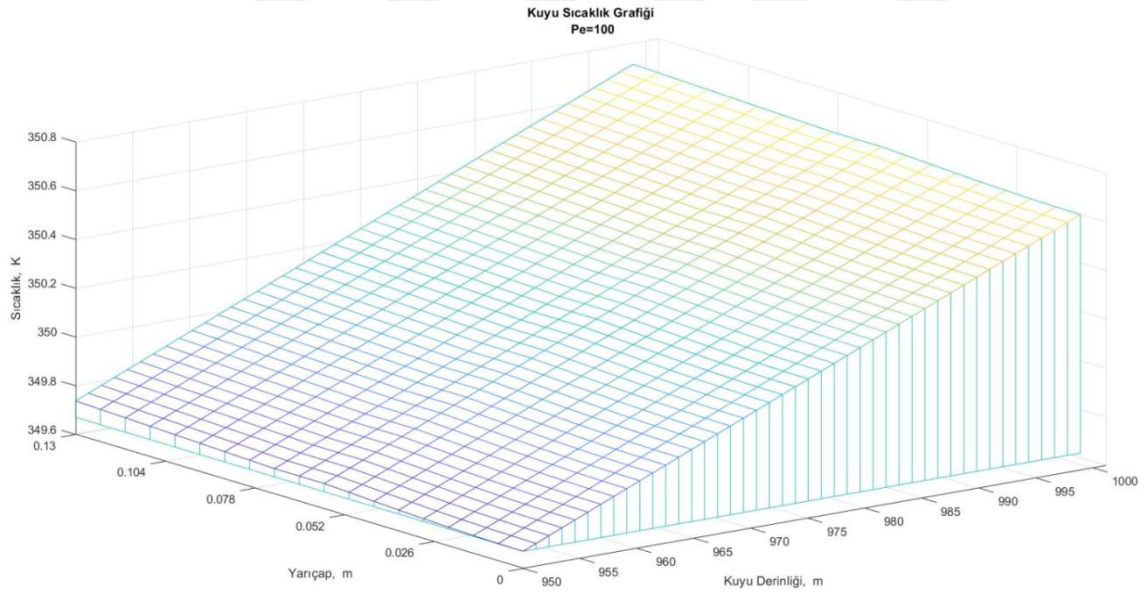
Şekil 6.22. 1000 m derinlikteki kuyunun son 50 metresinde sıcaklık dağılımı grafiği  
( $T_g=40\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_\zeta=50\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_{rez.}=65.12\text{ }^\circ\text{C}$ )



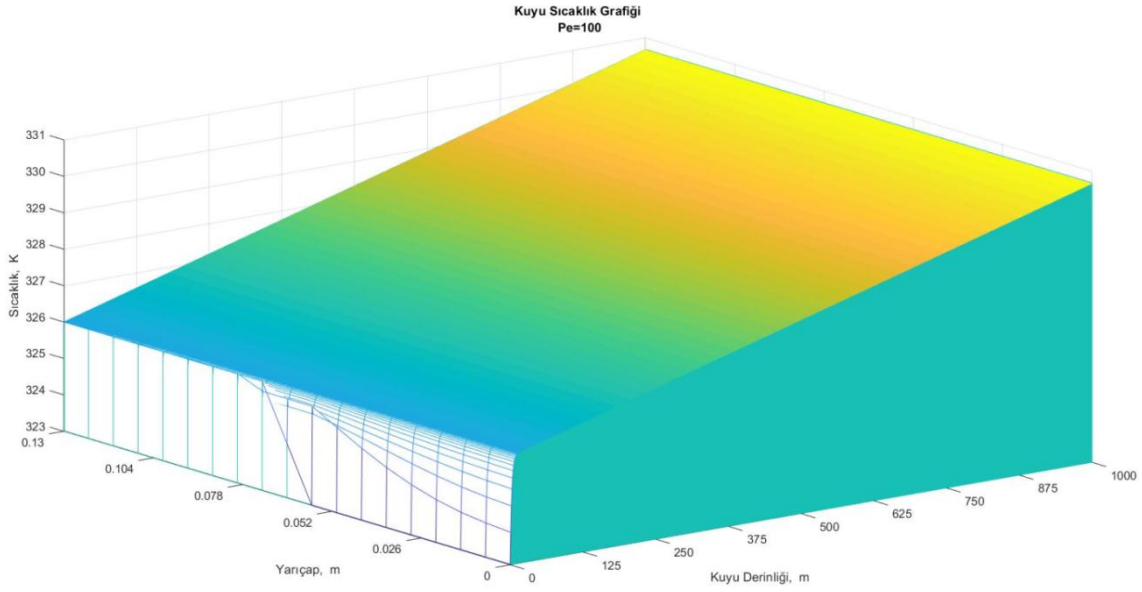
Şekil 6.23. 1000 m derinliğindeki kuyuda sıcaklık dağılımı grafiği ( $T_g=40\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_\zeta=55\text{ }^\circ\text{C}$ ,  
 $T_{rez.}=77.69\text{ }^\circ\text{C}$ )



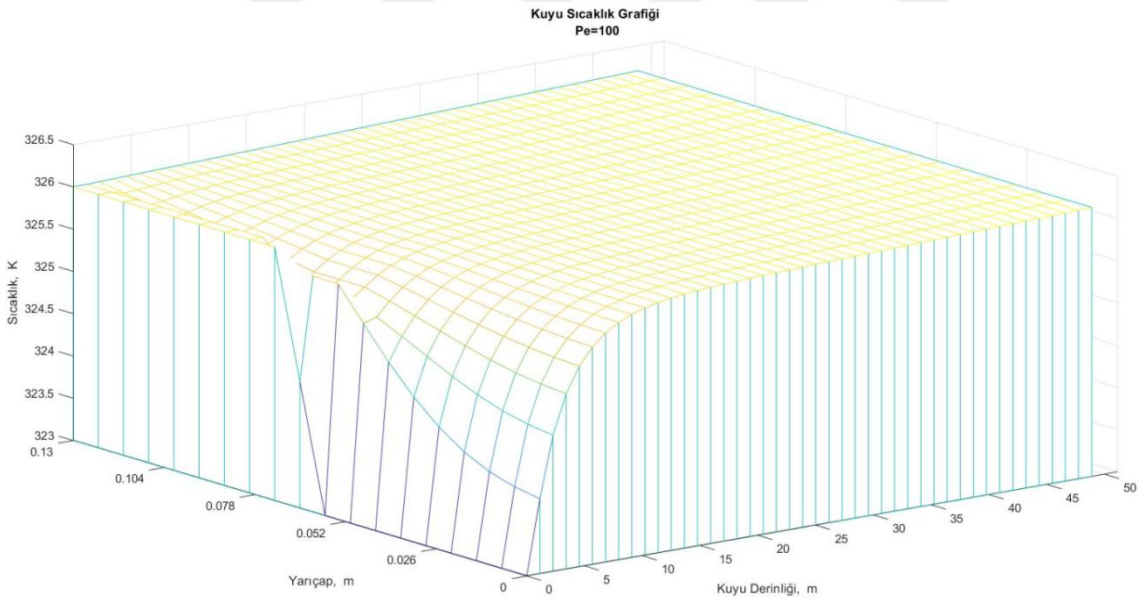
Şekil 6.24. 1000 m derinlikteki kuyunun ilk 50 metresinde sıcaklık dağılımı grafiği ( $T_g=40$  °C,  $T_{\dot{c}}=55$  °C,  $T_{rez.}=77.69$  °C)



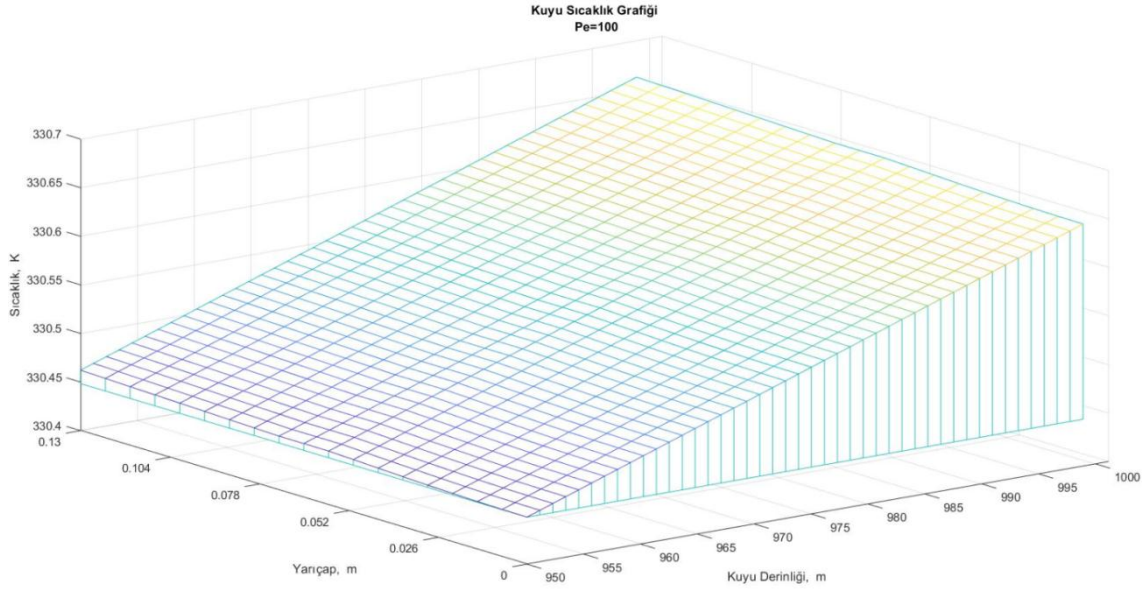
Şekil 6.25. 1000 m derinlikteki kuyunun son 50 metresinde sıcaklık dağılımı grafiği ( $T_g=40$  °C,  $T_{\dot{c}}=55$  °C,  $T_{rez.}=77.69$  °C)



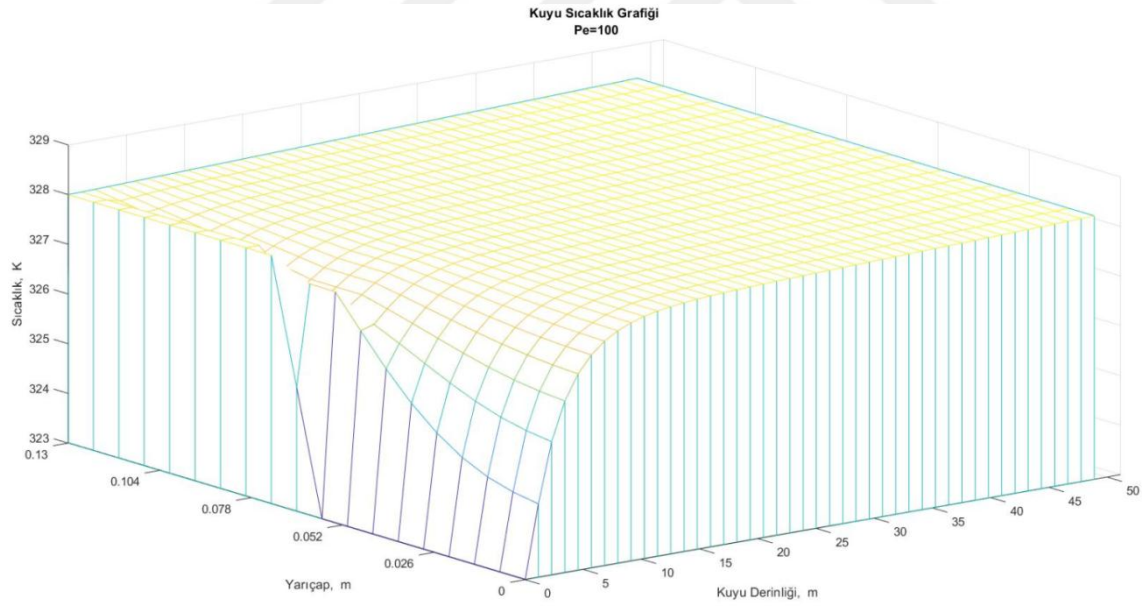
Şekil 6.26. 1000 m derinliğindeki kuyuda sıcaklık dağılımı grafiği ( $T_g=50$  °C,  $T_ç=53$  °C,  $T_{rez.}=57.52$  °C)



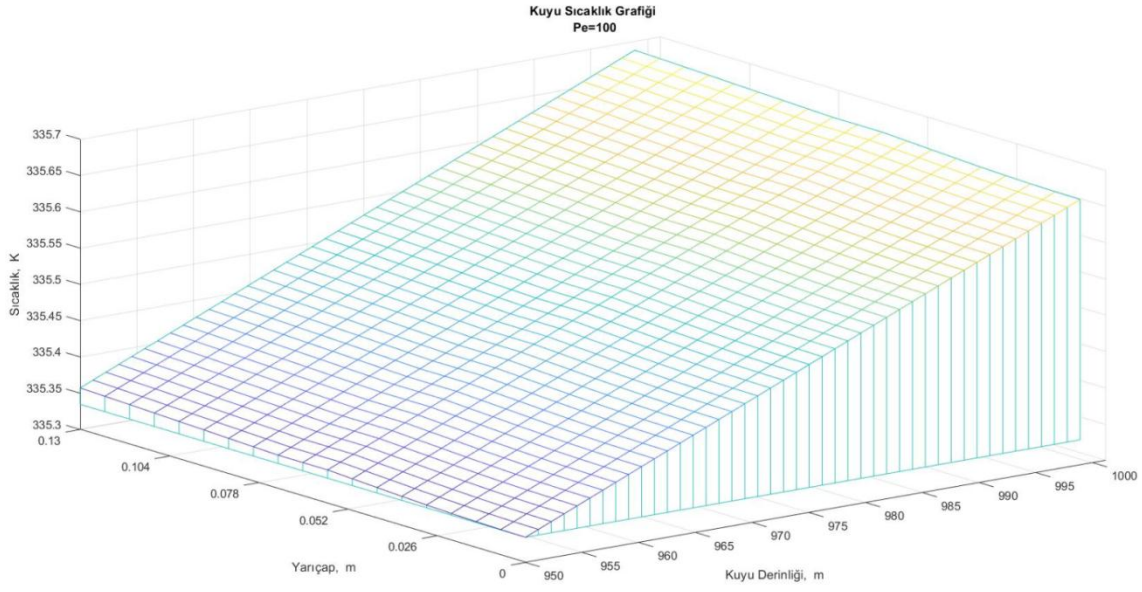
Şekil 6.27. 1000 m derinlikteki kuyunun ilk 50 metresinde sıcaklık dağılımı grafiği ( $T_g=50$  °C,  $T_ç=53$  °C,  $T_{rez.}=57.52$  °C)



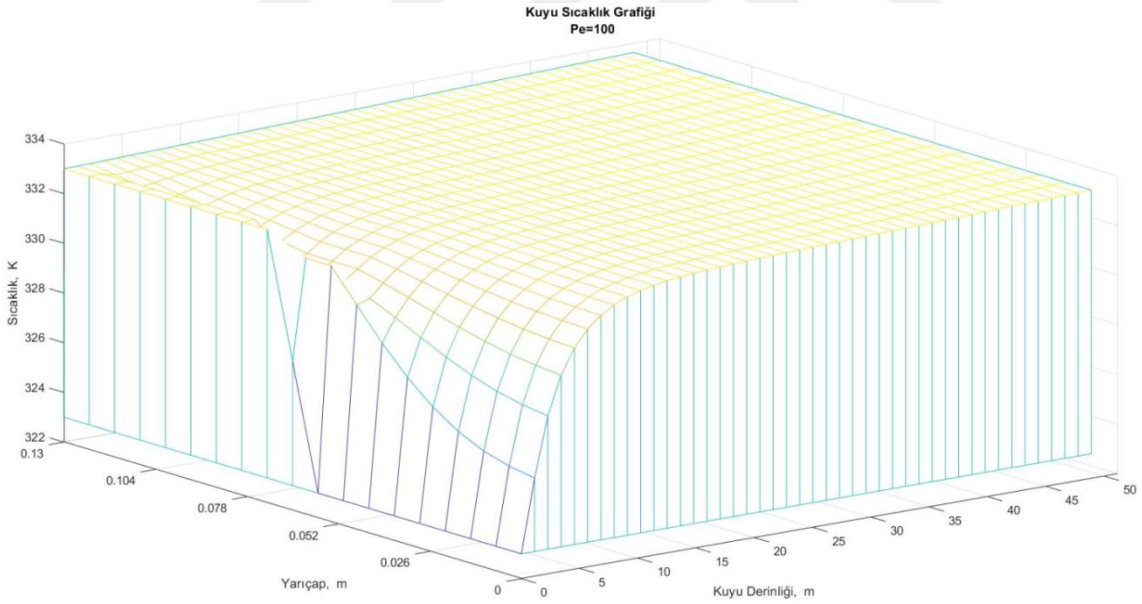
Şekil 6.28. 1000 m derinlikteki kuyunun son 50 metresinde sıcaklık dağılımı grafiği  
( $T_g=50$  °C,  $T_{\check{c}}=53$  °C,  $T_{rez.}=57.52$  °C)



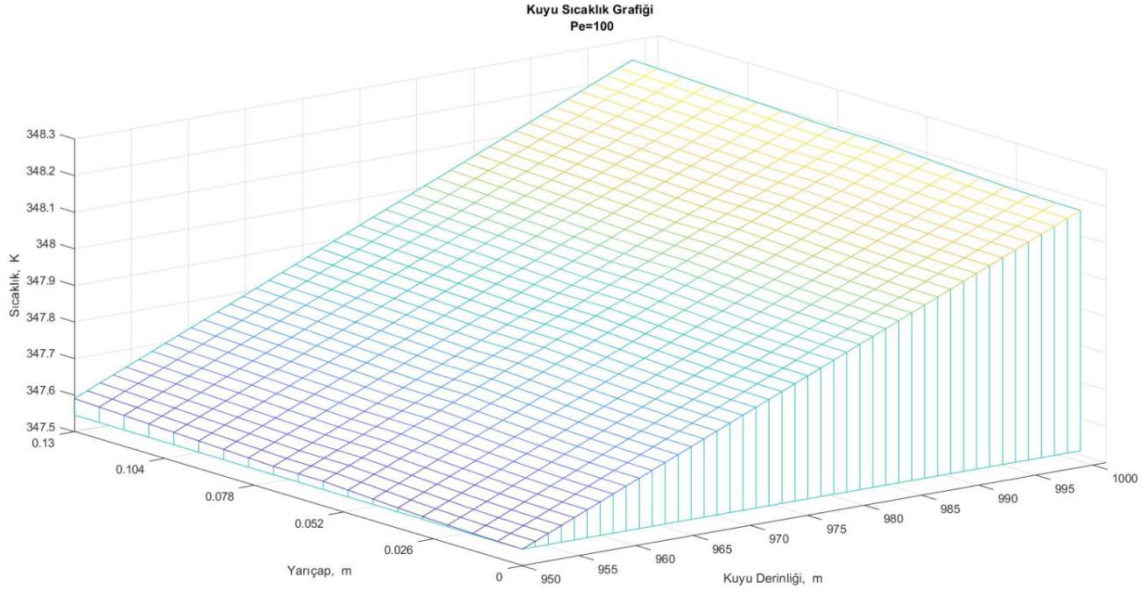
Şekil 6.29. 1000 m derinlikteki kuyunun ilk 50 metresinde sıcaklık dağılımı grafiği ( $T_g=50$  °C,  $T_{\check{c}}=55$  °C,  $T_{rez.}=57.54$  °C)



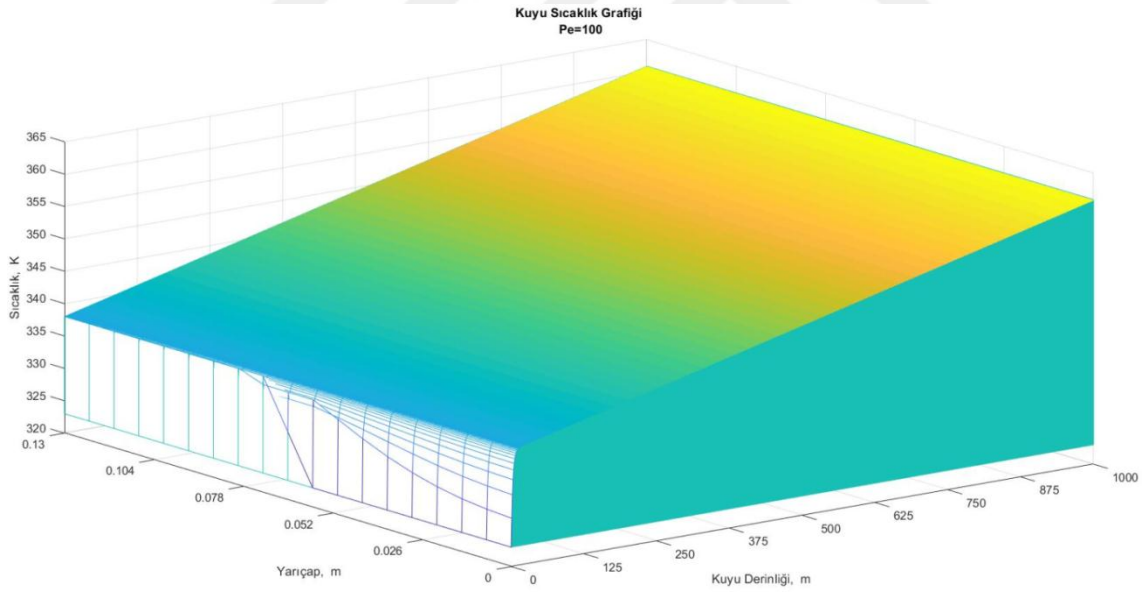
Şekil 6.30. 1000 m derinlikteki kuyunun son 50 metresinde sıcaklık dağılımı grafiği  
( $T_g=50$  °C,  $T_ç=55$  °C,  $T_{rez.}=57.54$  °C)



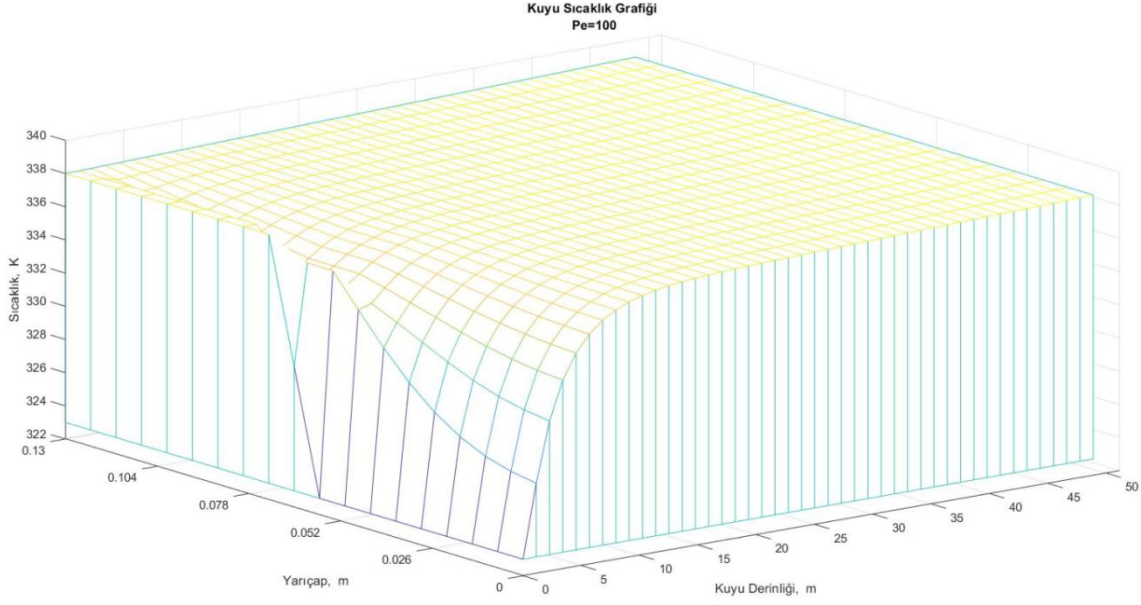
Şekil 6.31. 1000 m derinlikteki kuyunun ilk 50 metresinde sıcaklık dağılımı grafiği ( $T_g=50$  °C,  $T_ç=60$  °C,  $T_{rez.}=75.12$  °C)



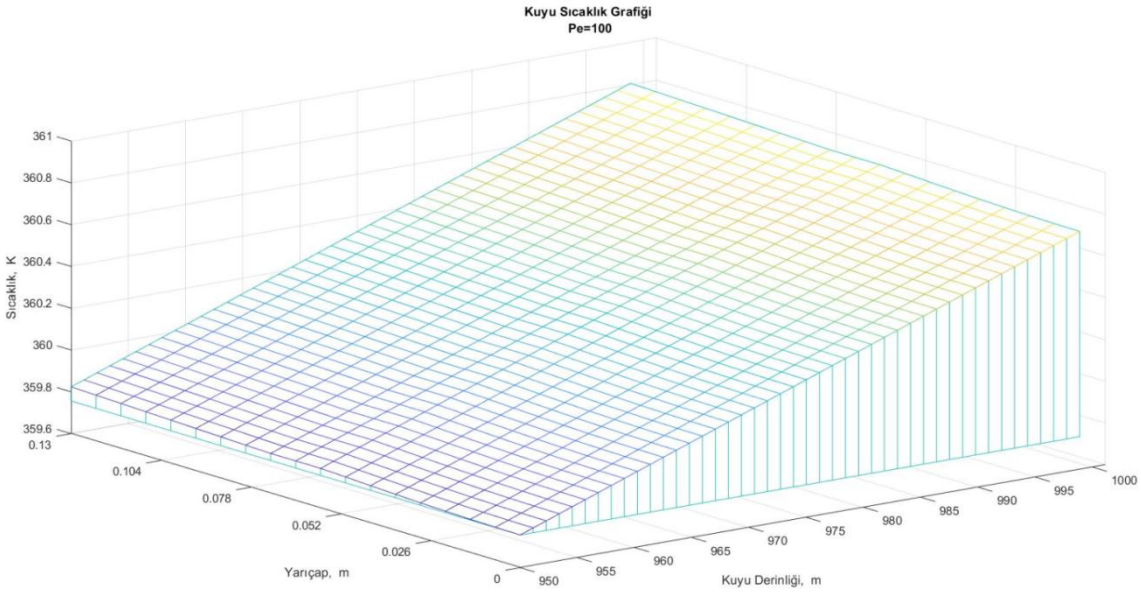
Şekil 6.32. 1000 m derinlikteki kuyunun son 50 metresinde sıcaklık dağılımı grafiği  
( $T_g=50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{\phi}=60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{rez.}=75.12\text{ }^{\circ}\text{C}$ )



Şekil 6.33. 1000 m derinliğindeki kuyuda sıcaklık dağılımı grafiği ( $T_g=50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{\phi}=65\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  
 $T_{rez.}=87.69\text{ }^{\circ}\text{C}$ )



Şekil 6.34. 1000 m derinlikteki kuyunun ilk 50 metresinde sıcaklık dağılımı grafiği ( $T_g=50$  °C,  $T_{\dot{c}}=65$  °C,  $T_{rez.}=87.69$  °C)

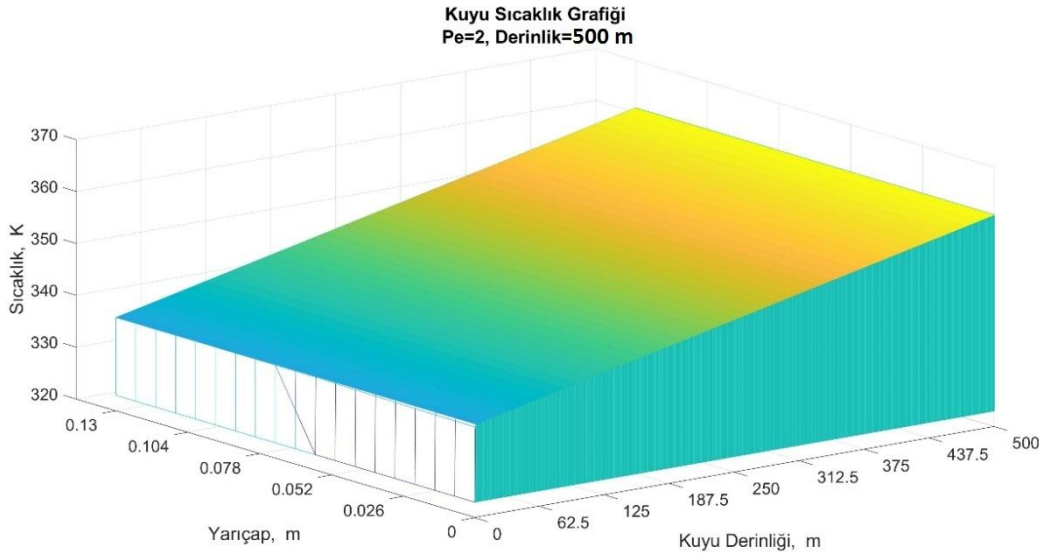


Şekil 6.35. 1000 m derinlikteki kuyunun son 50 metresinde sıcaklık dağılımı grafiği ( $T_g=50$  °C,  $T_{\dot{c}}=65$  °C,  $T_{rez.}=87.69$  °C)

Görüldüğü gibi gerek Çizelge 6.1'e göre verilmiş olan Şekil 6.1 – 6.15 arası şekiller, gerekse Çizelge 6.2'de 1000 m'ye göre verilen Şekil 6.16 – 6.35 arası şekiller sıcaklık skalaları dışında oldukça benzerdirler. Bunun başlıca sebeplerinden biri de kuyu çapına

göre kuyu derinliğinin çok fazla olması sebebiyle birim uzunluğa bağlı olarak sıcaklık farklarının çok düşük olmasıdır.

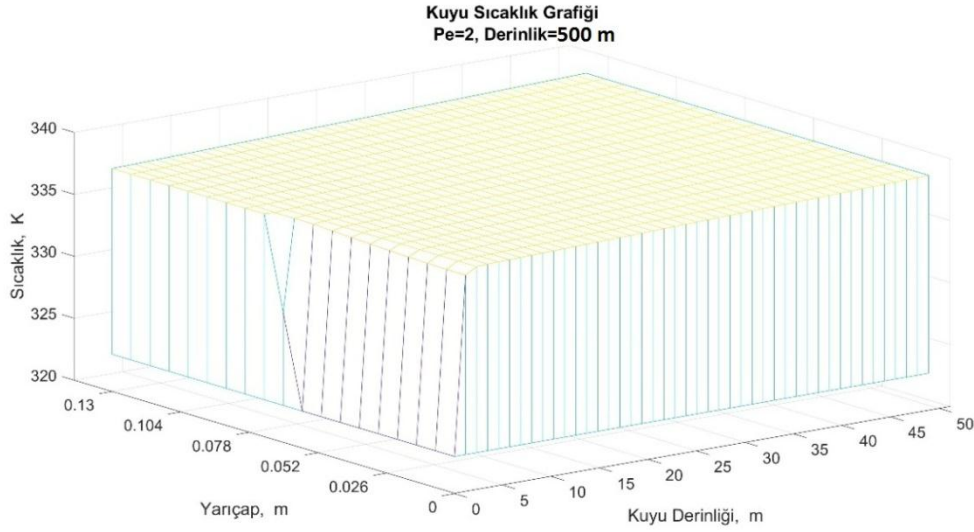
Bu şekillerin tamamında  $Pe$  sayısı 100 alınmıştır. Hâlbuki  $Pe$  sayısına bağlı olarak sıcaklık dağılımı farklılıklar gösterir. Bu çalışmada akışkanın tüm fiziksel ve ısıl özellikleri sabit kabul edilmiştir. Buna göre 3.25 no.lu eşitlike bakıldığında değişebilecek tek şeyin akışkanın hızı olduğu anlaşılmaktadır. Yani akışkanın hızı yüksekse  $Pe$  sayısı büyük, akışkanın hızı düşükse  $Pe$  sayısı küçük çıkacaktır. Buradan hareketle düşük  $Pe$  sayılarında taşınım ile ısı transferinin etkilerinin daha az, yüksek  $Pe$  sayılarında taşınım ile ısı transferinin etkilerinin daha fazla olduğu söylenebilir. Taşınımın etkisinin fazla olması demek daha yüksek bir ısı transferi hızı ile sıcaklık düşüşlerinin daha hızlı değişmesi anlamına gelir. Bu durum Şekil 6.36 – 6.47 arasındaki şekillerde net bir şekilde görülebilmektedir.



Şekil 6.36.  $Pe$  sayısının tüm kuyu derinliği boyunca sıcaklık dağılımına etkisi, ( $Pe=2$ , Derinlik=500 m,  $T_g=50$  °C,  $T_ç=65$  °C,  $T_{rez.}=87.69$  °C)

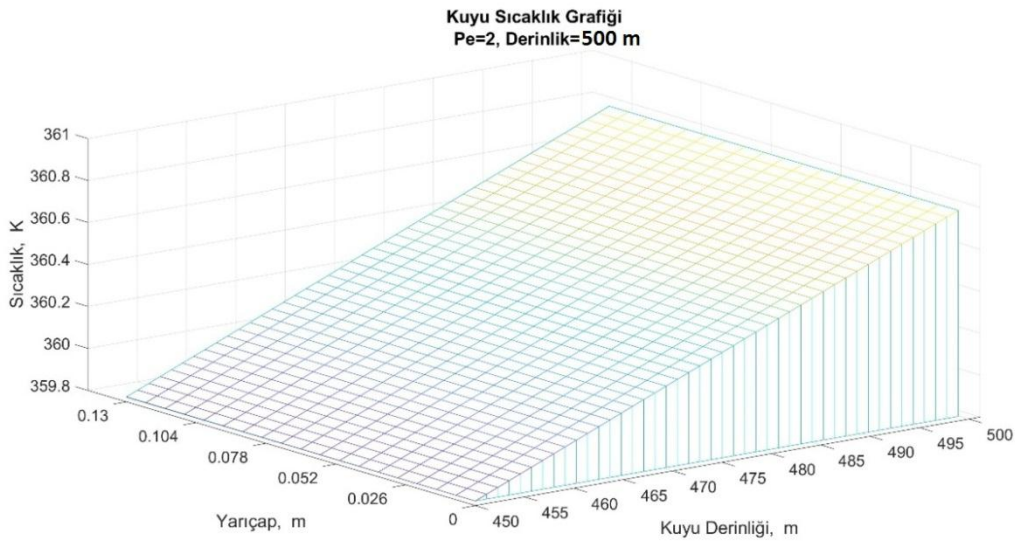
Şekil 6.36'da şeklin sol tarafındaki kuyu girişi kısmında sıcaklığın çok kısa mesafede hızla yükseldiği açıkça görülebilir. Şeklin genelinde ise sıcaklık dağılımının çok düzgün olduğu görülmektedir. Bunun sebebi akışkanın kuyu içerisinde çok yavaş akıyor olmasıdır. Çünkü akışkan hızına göre ısı dağılımı daha hızlı olmaktadır.





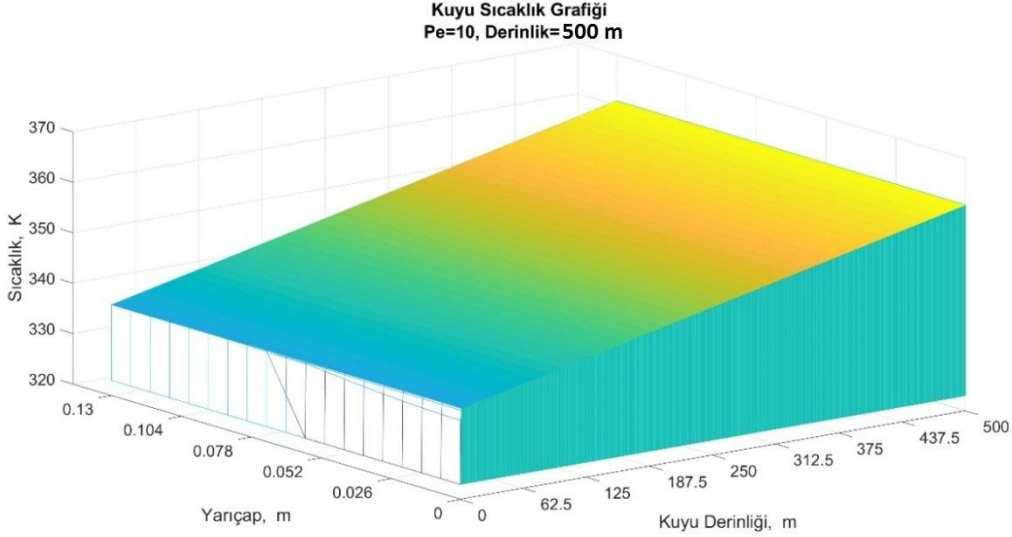
Şekil 6.37. Pe sayısının ilk 50 m kuyu derinliğinde sıcaklık dağılımına etkisi, ( $Pe=2$ , Derinlik=500 m,  $T_g=50$  °C,  $T_ç=65$  °C,  $T_{rez.}=87.69$  °C)

$Pe=2$  değeri için kuyu derinliğinin ilk 50 m'sindeki sıcaklık dağılımı Şekil 6.37'de verilmiştir. Sondaj sıvısı sıcaklığının kuyunun giriş ağzında daha ilk 10-15 m'den itibaren daha kararlı bir seviyeye ulaştığı gözlenmektedir. Şeklin geneline bakıldığında, yüzeyden derinliğe doğru ve kuyu ekseninden kuyu cidarına doğru sıcaklık artışının hissedilmeyecek kadar az olduğu gözlemlenebilir.



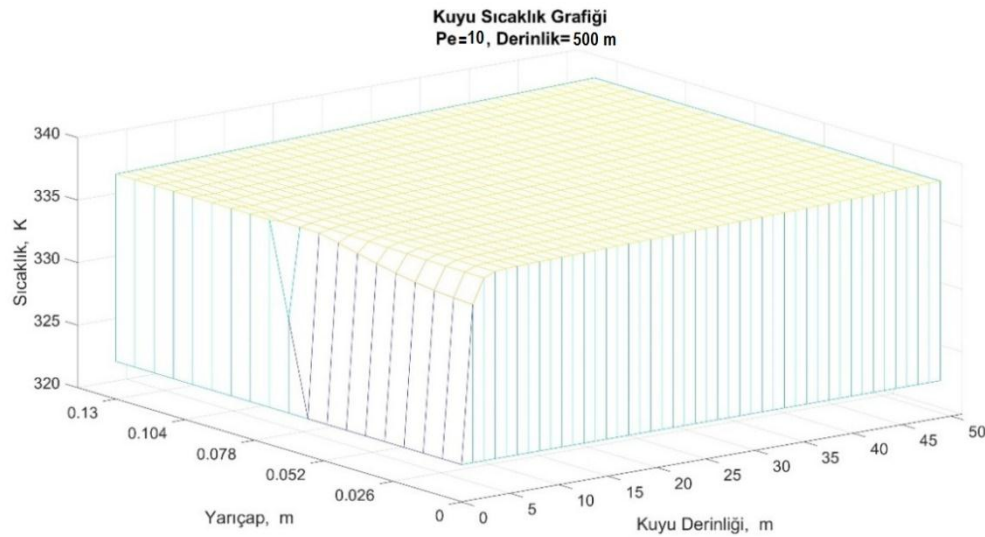
Şekil 6.38. Pe sayısının son 50 m kuyu derinliğinde sıcaklık dağılımına etkisi, ( $Pe=2$ , Derinlik=500 m,  $T_g=50$  °C,  $T_ç=65$  °C,  $T_{rez.}=87.69$  °C)

Son 50 m'deki sıcaklık dağılımını gösteren Şekil 6.38'de başlangıç kısmında, cidardan merkeze doğru sıcaklık düşüsünün hissedilemeyecek kadar belirsiz olduğu görülmektedir. Aynı durum kuyu dibini temsil eden arka kısım için de geçerlidir.

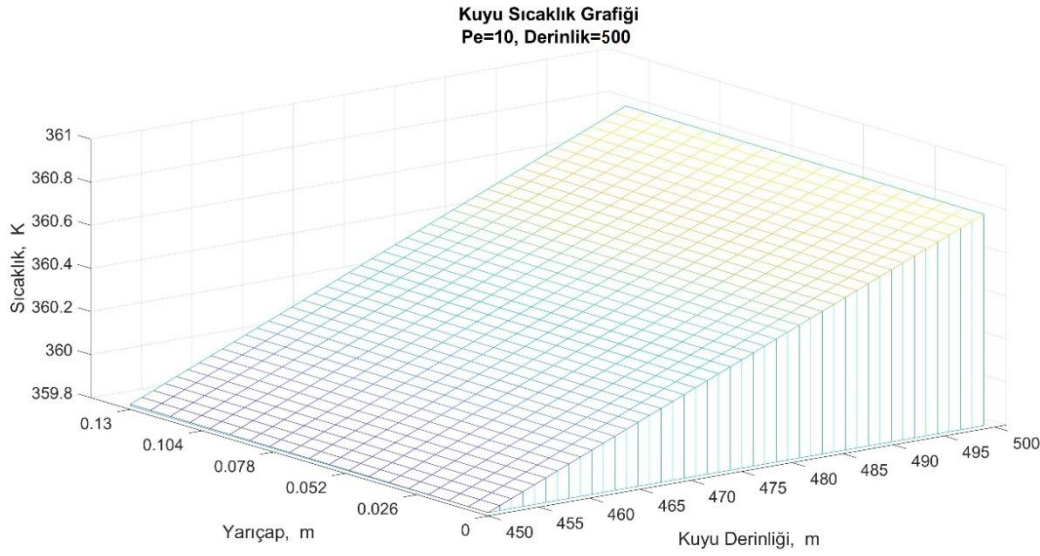


Şekil 6.39. Pe sayısının tüm kuyu derinliği boyunca sıcaklık dağılımına etkisi, ( $Pe=10$ , Derinlik=500 m,  $T_g=50$  °C,  $T_ç=65$  °C,  $T_{rez.}=87.69$  °C)

$Pe=10$  için hazırlanmış olan Şekil 6.39 – 6.41 arası grafiklerde sıcaklık dağılımının biraz daha farklılaştığı görülebilir. Örneğin kuyu girişinden itibaren ilk 50 m derinliği ifade eden Şekil 6.40'da sondaj borusunun başlangıç kısmında sıcaklıktaki yükseliş,  $Pe=2$  için elde edilen grafiğe kıyasla daha derinde, örneğin 18-20 m civarında gerçekleşmektedir. Yani sıcaklıktaki değişim bu derinlikten sonra stabl hale geçmektedir.



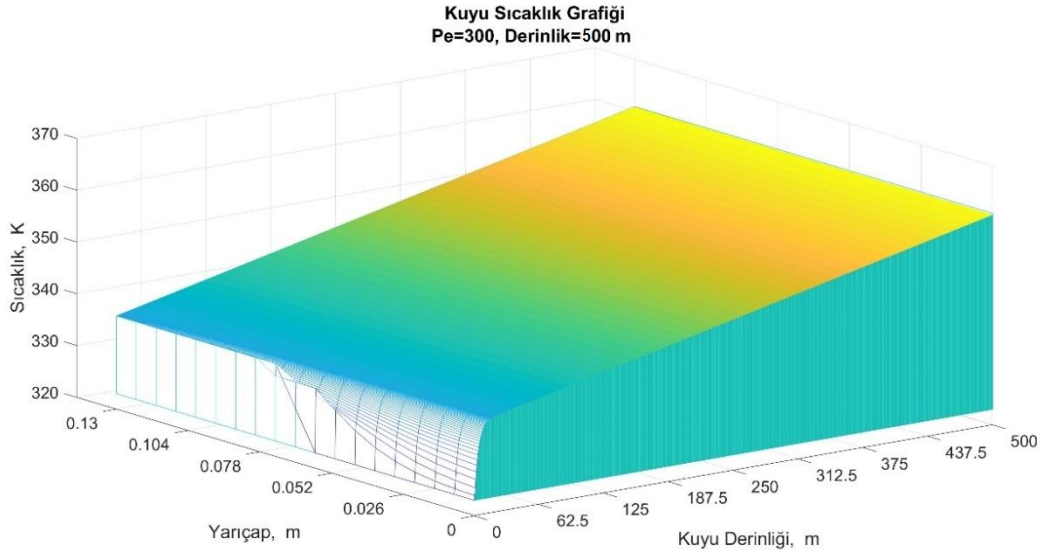
Şekil 6.40. Pe sayısının ilk 50 m kuyu derinliğinde sıcaklık dağılımına etkisi, ( $Pe=10$ , Derinlik=500 m,  $T_g=50$  °C,  $T_ç=65$  °C,  $T_{rez.}=87.69$  °C)



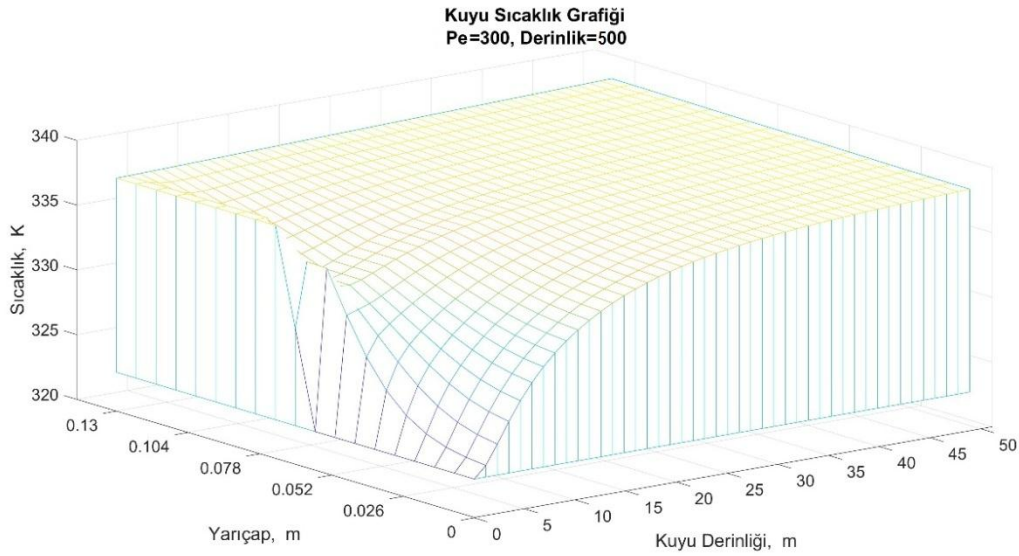
Şekil 6.41. Pe sayısının son 50 m kuyu derinliğinde sıcaklık dağılımına etkisi, ( $Pe=10$ , Derinlik=500 m,  $T_g=50$  °C,  $T_ç=65$  °C,  $T_{rez.}=87.69$  °C)

Bu çalışmada Peclet sayısı standart değer olarak 100 alınmış ve hesaplamalar ona göre yapılmıştır. Bu nedenle  $Pe=100$  için daha önce oldukça fazla grafik üretildiği için o şekillerin burada tekrar verilmesine gerek yoktur. Ancak bir mukayese yapılmak istenirse Şekil 4.39 – 4.41 ile Şekil 4.33 – 4.35 arasındaki şekiller birebir birbirleriyle karşılaştırıldıklarında aradaki fark açıkça görülecektir.

Benzer karşılaştırmalar  $Pe=300$  için verilen Şekil 6.42 – 6.44 ile  $Pe=600$  için verilen Şekil 6.45 – 6.47 arasındaki grafikler için de yapılabilir. Her iki grafik grubunda, bir önceki grafiklerdeki farklılıkların yanı sıra kendi aralarındaki farklılıklar da dikkat çekmektedir. Örneğin  $Pe=300$  için verilmiş olan Şekil 6.42'deki grafikte sondaj kuyusu girişindeki sıcaklık eğrilerinin sıklığı sıcaklığın daha geniş alanda yayıldığına göstergesidir. Bu durum Şekil 6.43'te çok daha iyi anlaşılmaktadır. Şekle göre sıcaklık önce yavaş sonra daha hızlı yükselen bir seyir izlemiştir. Ayrıca gerek taşınım gerekse iletimin etkisi, boru cidarından dış tarafa yani anulusa doğru çok daha iyi görülmektedir. Kuyu derinliği yönünde sıcaklık artışının stabl duruma geçmesi yaklaşık 40. metreden sonradır.



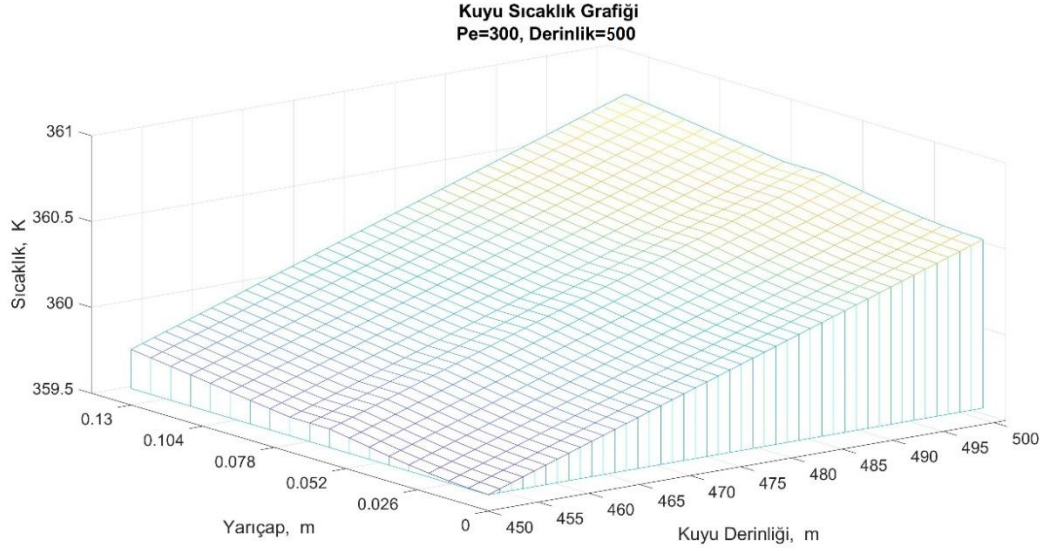
Şekil 6.42. Pe sayısının tüm kuyu derinliği boyunca sıcaklık dağılımına etkisi, ( $Pe=300$ , Derinlik=500 m,  $T_g=50$  °C,  $T_ç=65$  °C,  $T_{rez.}=87.69$  °C)



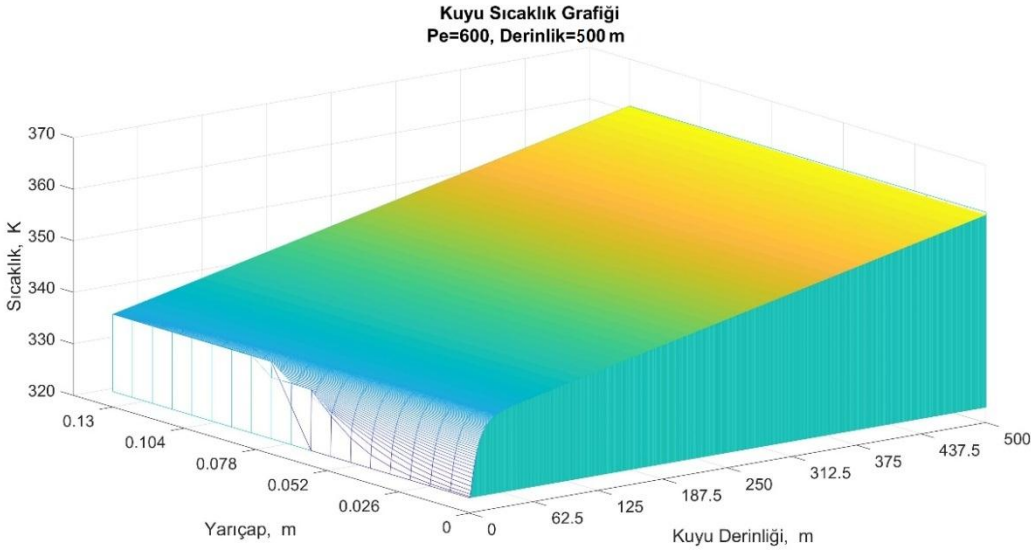
Şekil 6.43. Pe sayısının ilk 50 m kuyu derinliğinde sıcaklık dağılımına etkisi, ( $Pe=300$ , Derinlik=500 m,  $T_g=50$  °C,  $T_ç=65$  °C,  $T_{rez.}=87.69$  °C)

Şekil 6.44'teki farklılık da hemen dikkat çekebilir. Örneğin  $Pe=2$  için verilmiş olan Şekil 6.38'deki grafik ile  $Pe=10$  için verilmiş olan Şekil 6.41'deki grafik incelendiğinde başlangıçtaki farklılık hemen dikkat çekecektir. Şekil 6.38 ve Şekil 6.41'de anulus dış cidarından boru merkezine doğru radyal yöndeki sıcaklık düşüşü çok belirsizken Şekil 6.44'te bu düşüş çok belirgindir. Bu sıcaklık düşüşü, kuyunun dip tarafını temsil eden

şeklin arka tarafında da açıkça görülebilir. Ayrıca sondaj borusu cidarının bulunduğu orta kısımlarda derinlik boyunca sıcaklık düşsünün daha yavaş gerçekleştiği görülmektedir. Bu da ısı transferinde taşınımın etkisinin iletim etkisine göre daha fazla olduğunu gösterir.



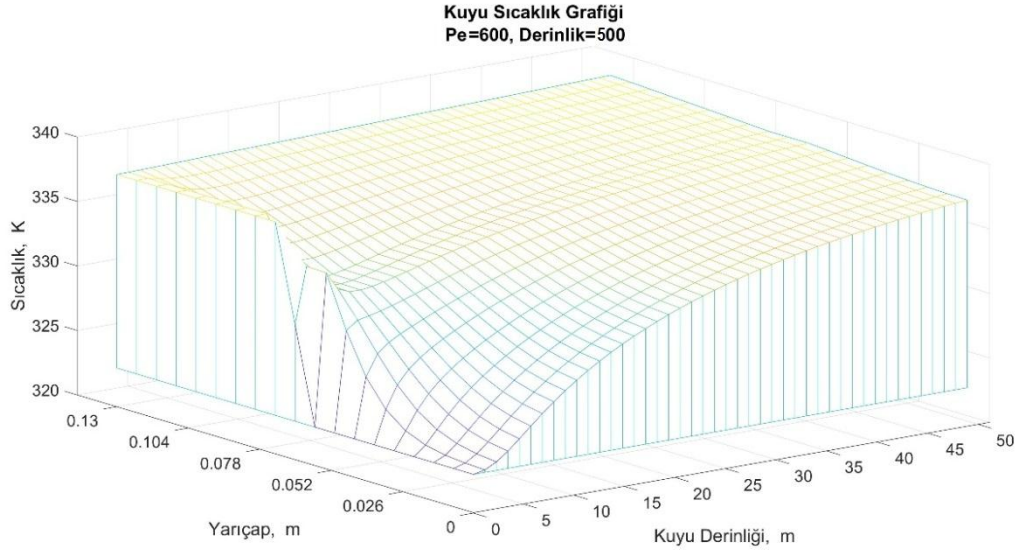
Şekil 6.44. Pe sayısının son 50 m kuyu derinliğinde sıcaklık dağılımına etkisi, ( $Pe=300$ , Derinlik=500 m,  $T_g=50$  °C,  $T_ç=65$  °C,  $T_{rez.}=87.69$  °C)



Şekil 6.45. Pe sayısının tüm kuyu derinliği boyunca sıcaklık dağılımına etkisi, ( $Pe=600$ , Derinlik=500 m,  $T_g=50$  °C,  $T_ç=65$  °C,  $T_{rez.}=87.69$  °C)

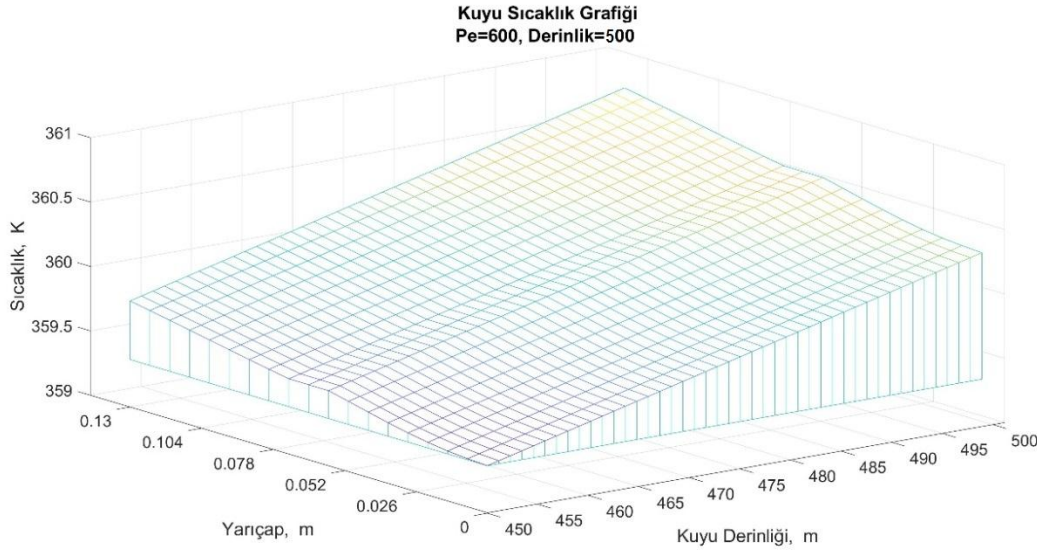
Şekil 6.45'te başlangıçtaki sıcaklık dağılımı, Şekil 6.42'ye göre daha belirgindir. Burada hem radyal yönde hem de kuyu derinliği yönünde parabolik sıcaklık değişim eğrileri çok

daha net bir görüntü vermektedir. Sondaj borusunun (iç boru) bulunduğu orta kısımdaki doğrusal sıcaklık düşüşü de bu şekilde daha açık bir biçimde gözlemlenmektedir.



Şekil 6.46. Pe sayısının ilk 50 m kuyu derinliğinde sıcaklık dağılımına etkisi, ( $Pe=600$ , Derinlik=500 m,  $T_g=50$  °C,  $T_ç=65$  °C,  $T_{rez.}=87.69$  °C)

Şekil 6.46'daki grafik sıcaklığın eğrilerinin gerek radyal yönde gerekse aksel yönde çok daha yatay bir seyir izledikleri görülmektedir. Bunun sebebi yüksek hız nedeniyle ısı transferinin zaman içerisinde tam olarak gerçekleşememesidir. Şekil 6.37 ile Şekil 6.46 birbiriyle karşılaştırıldığında fark çok daha iyi anlaşılacaktır. Örneğin Şekil 6.37'de aksel yönde sıcaklık düşüşü yaklaşık 10 veya 15 m sonra stabl duruma geçerken Şekil 6.46'da sıcaklık düşüşü 45 veya 50 m den sonra stabl duruma geçmektedir.



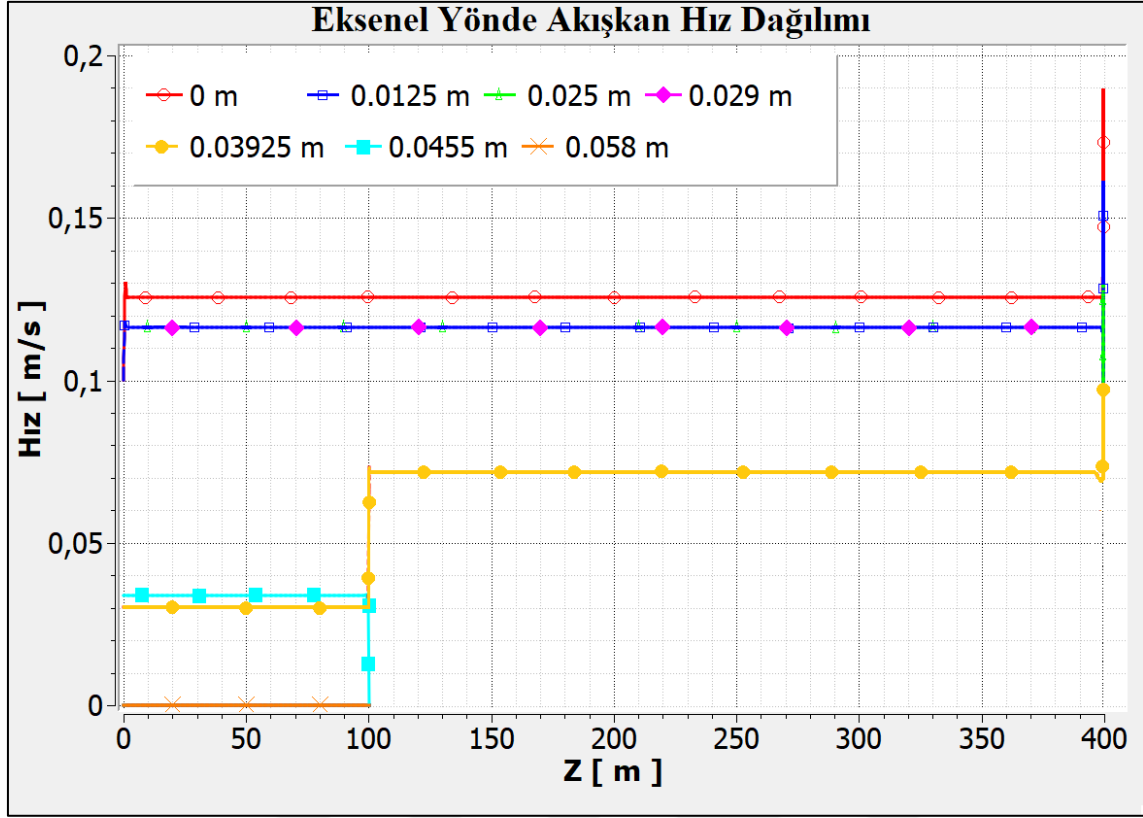
Şekil 6.47. Pe sayısının son 50 m kuyu derinliğinde sıcaklık dağılımına etkisi, ( $Pe=600$ , Derinlik=500 m,  $T_g=50$  °C,  $T_ç=65$  °C,  $T_{rez.}=87.69$  °C)

Şekil 6.47’de başlangıçta yani 450 m kuyu derinliğinde merkez ile cidar arasında ciddi bir sıcaklık farkının olduğu açıkça görülmektedir. Bu fark kuyu dibinde yani 500. metrede de net bir şekilde kendini göstermektedir.

FLUENT paket programında gerçekleştiren akış analizi için ise özetle şunlar söylenebilir:

Bu bölümde iki tip grafik kullanılarak elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir. Bunlardan ilki iki eksenli grafikler olup bu grafiklerde x eksenini kuyu derinliğini gösterirken y eksenini incelenen değeri göstermektedir ve grafik alanında değişken bir çizgi ile temsil edilmektedir. Diğer grafik türü 3 boyutlu analiz hacmine yerleştirilen 2 boyutlu düzlemler üzerindeki eş değer alanlarıdır. Bu alanlar ile nicel değerlerden çok nitel değerlendirme yapılması planlanmıştır. Kuyu uzunluğu çok fazla olduğu için eş değer alanlarının olduğu görseller kuyu girişi, basamak derinliği ve dönüş akışı için 3 er kere çizdirilmiştir. Öncelikle aksenal 2 boyutlu grafikler sunulmuş ve ardından eş değer alanlı grafikler verilmiştir.

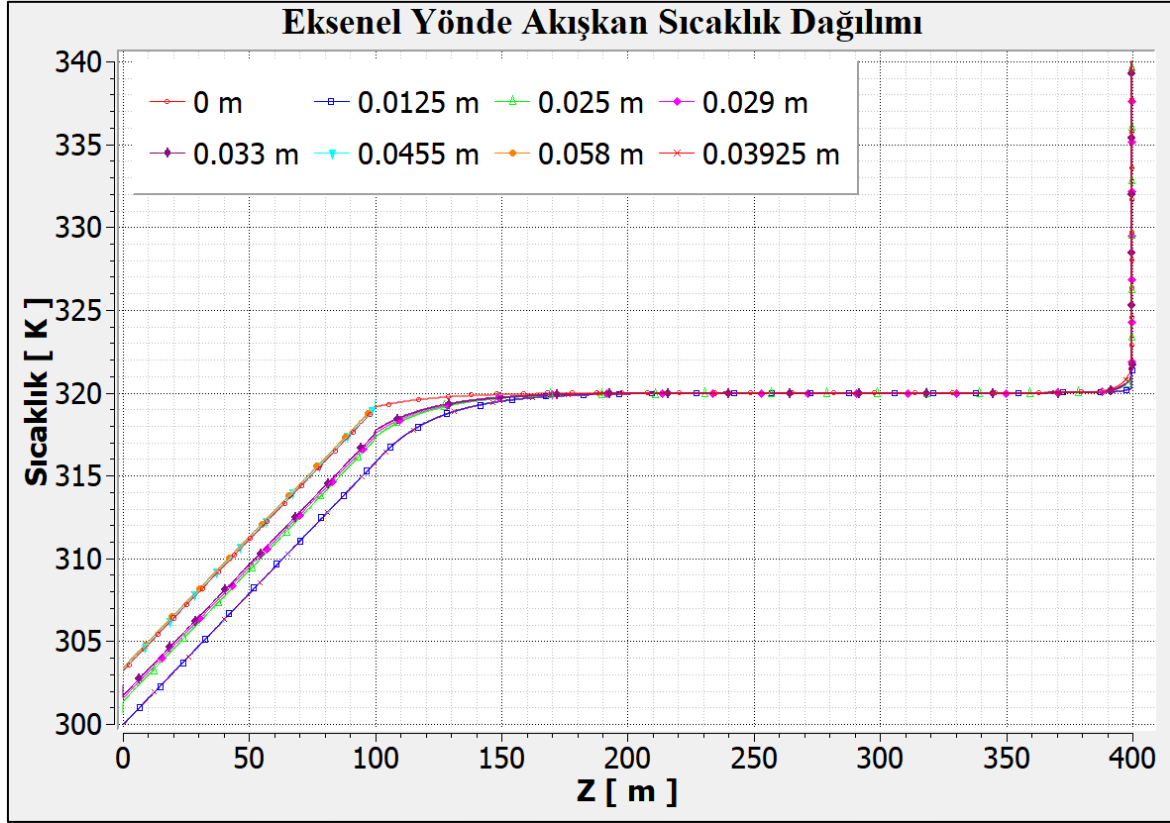
Kuyunun derinliği doğrultusunda aksenal hız değişimi Şekil 6.48’de verilmiştir.



Şekil 6.48. Eksenel doğrultuda akışkan hız değişimi

Şekil 6.48'den de görüleceği üzere kuyu derinliğinin kuyu çapına göre çok uzun olmasından dolayı akış gelişimi neredeyse fark edilmeyecek düzeydedir. Çizgiler 0 m değerinde kuyu eksenini ve 0.058 m değerinde kuyu cidarını göstermektedir. Kuyu girişinde ve basamak seviyesinde hız değişimleri çok kısa da olsa fark edilmektedir. Kuyu dibinde ise nozzle varlığından dolayı ekstrem hızlar oluşmakta fakat bu hız değerleri yine çok kısa mesafede normale dönmektedir. Beklendiği gibi bu kadar uzun kapalı akışlarda akış gelişimi hidrolik çapın yaklaşık 10 katı mesafede kendini tamamlamaktadır. Aslında bu grafik tek başına akış düzensizliklerinin ana akış profiline ne kadar az etkisinin olduğunu göstermektedir. Yine de eksenel doğrultudaki sıcaklık değişimi Şekil 6.49'da sunulmuştur.

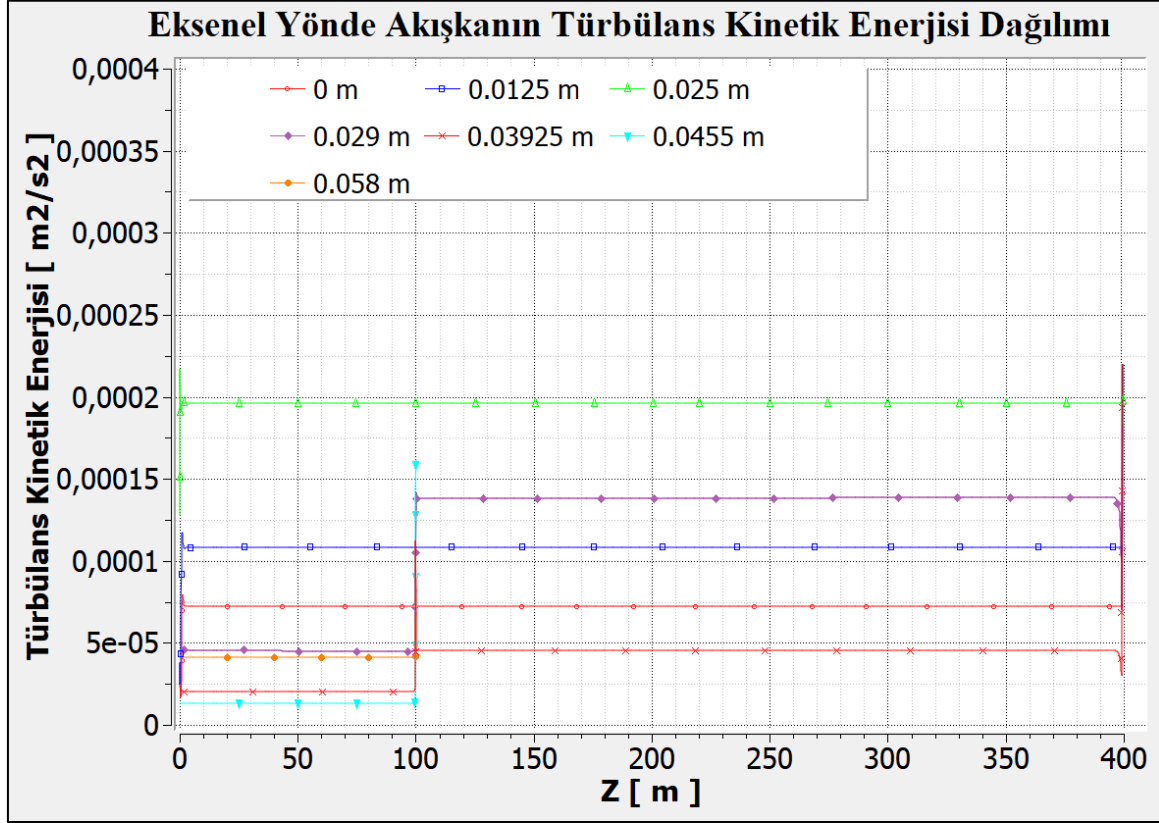




Şekil 6.49. Eksenel doğrultuda akışkan sıcaklık değişimi

Şekil 6.49’da sunulan eksenel sıcaklık değişiminden görüldüğü üzere akışkan sıcaklığı kuyu cidarlarının sıcaklık profili ile neredeyse aynı seyretmektedir. Bunun sebebi kuyu çapının derinliğe oranının çok küçük olması ve akış kaynaklı ısı taşınımının etkin olmasıdır. Akış karmaşasının olduğu basamak seviyesinde ve nozzle kısmında çok kısa mesafelerde küçük sıcaklık sıçramaları olmakta fakat bu sıçrayan değerler ana profil üzerinde ciddi bir değişiklik oluşturmamakta ve sıcaklık profilleri ana eğilime devam etmektedir. Kuyu cidarında sıcaklık sınır şartı uygulanmayan bölümde doğrusal sıcaklık değişimi gözlenmektedir. Bu sonuç akış çözümü yapılmadan ısı transferi temelli yapılan çözümle paralellik göstermekte ve o çözümü doğrular niteliktedir. Doğrusal sıcaklık değişimine istisnayı oluşturan kısım 100 ile 150 metre derinlikler arasında kalan kısım ile 390 ile 399 metre arasındaki kısımlardır. Bu kısımların ortak yanı cidar sıcaklık sınır şartlarında ani değişim olmasıdır. Dolayısıyla sabit cidar sıcaklık sınır şartında incelenen geometrinin doğrusal sıcaklık değişimi oluşumuna neden olduğu, bununla beraber sıcaklık sınır şartındaki ani değişim noktasına yaklaşırlarken sıcaklık profillerinin exponansiyel veya ikinci dereceden bir eğri gibi hareket ettiği sonucuna ulaşılmaktadır. Yine de akış kaynaklı karmaşanın ana sıcaklık profili üzerinde önemli bir etkisinin olmadığı, belirgin bir etki için

akış karmaşası oluşturacak yapıların geometri uzunluk ölçeğine göre orantılı bir mesafede olması gerektiği sonucu çıkarılmıştır. Yine de türbülans özelliklerinin aksel doğrultuda incelemek bu mekaniği daha fazla anlamaya yardımcı olacağı için yerel türbülans büyüklüğü hakkında bilgi verecek türbülans kinetik enerjisi Şekil 6.50’de sunulmuştur.



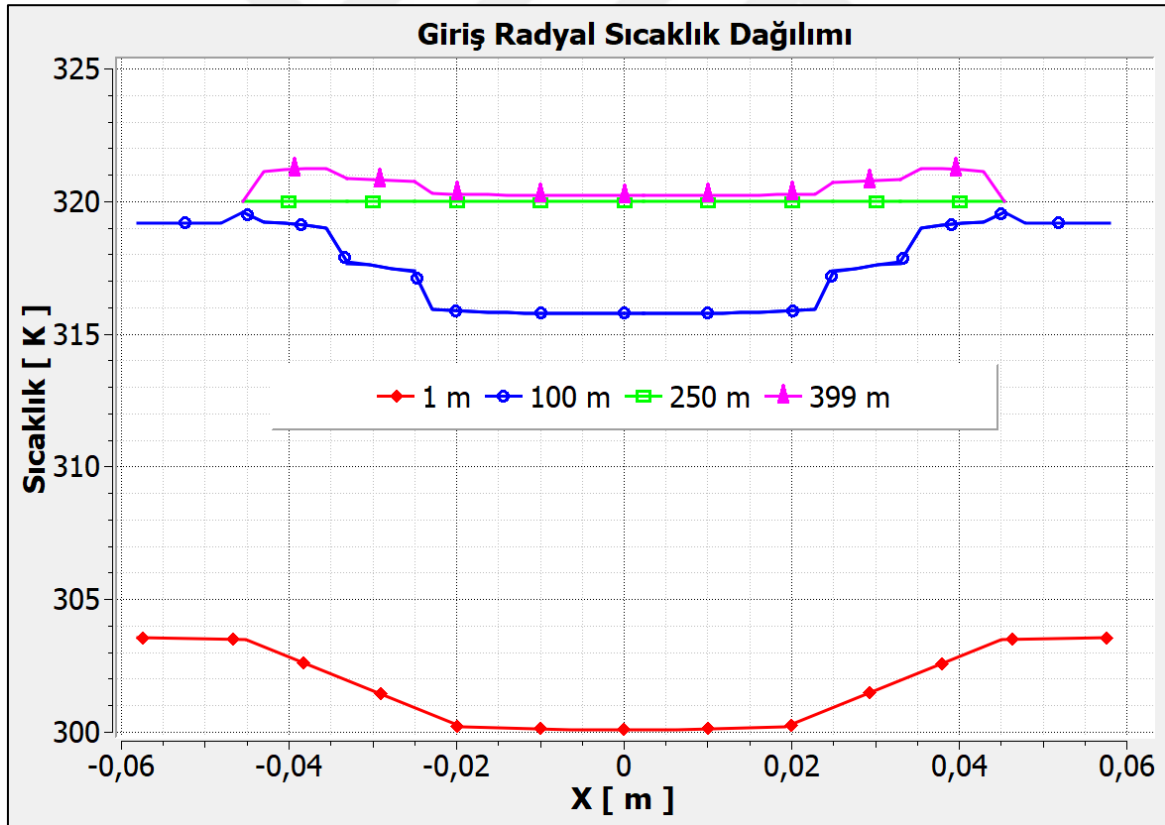
Şekil 6.50. Eksenel doğrultuda akışkanın türbülans kinetik enerjisi değişimi

Türbülans kinetik enerjisinin aksel doğrultudaki yerel dağılımı incelendiğinde öncelikle sayısal değerlerin çok düşük olduğu ve dolayısıyla kuyunun çok büyük bölümünde türbülansın etkisinin çok az olduğu görülmektedir. Kuyu basamak seviyesinde ve nozzle kısmında önemli türbülans zıplamaları görülmekte ve yine çok kısa mesafede bu türbülans zıplamalarının sabit değerler aldığı anlaşılmaktadır. Dolayısıyla akış karmaşası oluşturan kısa mesafeli geometrilerin akış doğrultusunda önemli değişimlere neden olmadığı çıkarımını doğrulamaktadır. Bu durumun istisnası ile kuyu basamak adımında alt kısmın kuyu cidarına yakın bölgede yaklaşık 3 kat artan türbülans değerinin bu kısımda kuyu dibine kadar bu seviyede kaldığı ve dolayısıyla ısı taşınımına arttırıcı bir şekilde etki ettiği düşünülmektedir. Bununla beraber akışkan sıcaklığı uzun mesafe nedeniyle cidar

sıcaklığına çok fazla yaklaştığı için sıcaklık dağılımında bir değişim gözlemlenmemektedir.

Eksenel doğrultuda ayrıntılı olarak gözlemlenemeyen bazı detayların gösterilmesi ve radyal doğrultuda değişimlerin verilmesi için aşağıda radyal doğrultuda hız, sıcaklık ve türbülans kinetik enerjisi profilleri sunulmuştur.

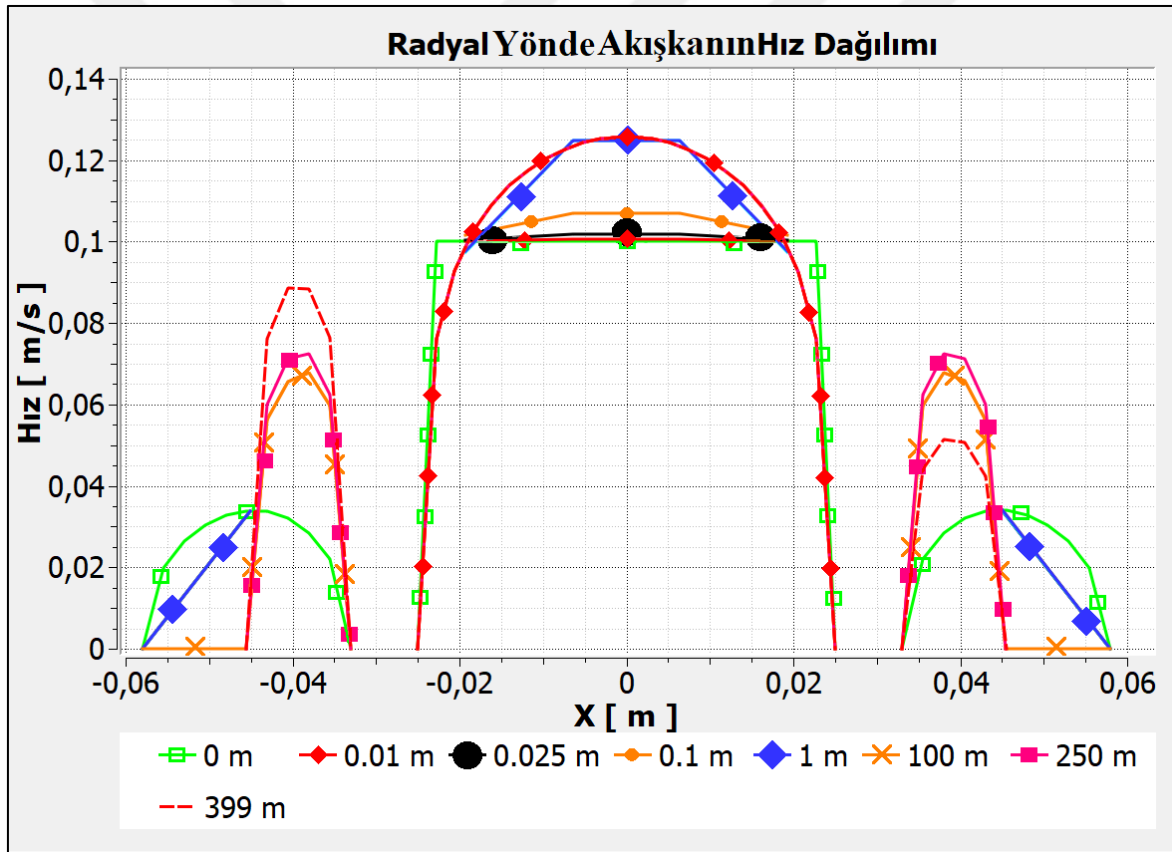
Kuyu boyunca çok sayıda radyal profil çıkarılabilir fakat sayıca çok olacak bu profiller okumayı zorlaştıracığı gibi çoğunlukla aynı değere sahip olacağı ve eksenel grafikleri tekrarlayacağı için sadece önemli değişikliklerin olduğu profiller verilmiştir. Şekil 6.51'de 4 farklı eksenel mesafedeki radyal sıcaklık dağılımı, Şekil 6.52'de 8 farklı eksenel mesafedeki radyal hız dağılımı ve Şekil 6.53'te yine 8 farklı eksenel mesafedeki radyal türbülans kinetik enerjisi dağılımı sunulmuştur.



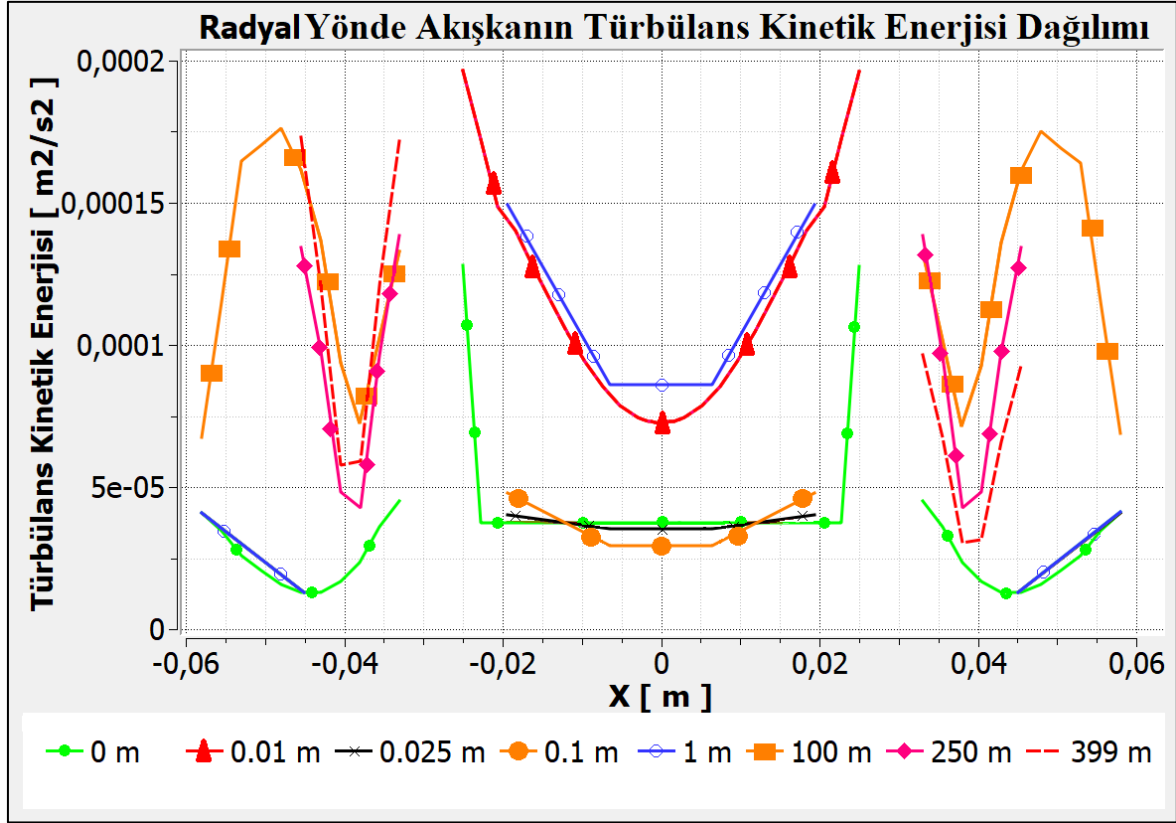
Şekil 6.51. 4 farklı eksenel mesafedeki radyal sıcaklık dağılımı

Şekil 6.51 – 6.53 arasındaki görseller içerisinde ilk dikkati çeken şey eksenel simetridir. Eksenel simetri, kararlı incelemelerde yani zamana bağlı olmayan çözümlerde 2 boyutlu

eksenel simetrik çözümlerin doğru sonuçlar vereceğini işaret etmektedir. Böylece işlem yükünde önemli tasarruf sağlanarak parametrik inceleme geliştirilebilir. Şekil 6.51 eksenel doğrultudaki ısı transferi konusunda daha açıklayıcı olmaktadır. İç kısımda bağıl olarak hızlı akış nedeniyle sıcaklık değişimi düşüktür. Dış kısımda ise dairenin doğası gereği artan alanla beraber artan kütle neticesinde sıcaklık değişimi daha az olmaktadır. Kuyu derinliği doğrultusunda ilerlendiğinde iç duvarın ısı iletimi daha belirgin olmakta ve cidardaki sıcaklık dağılımı, akışkana göre daha yatay gerçekleşmektedir. 250 m derinlikte çizdirilen sıcaklık profili, eksenel sıcaklık dağılımını doğrularak sabit bir değer olarak karşımıza çıkmaktadır. Nozzle kısmında ise artan taşınım ve sıcaklık sınır şartı ile yine bir sıcaklık profili elde edilmiştir.



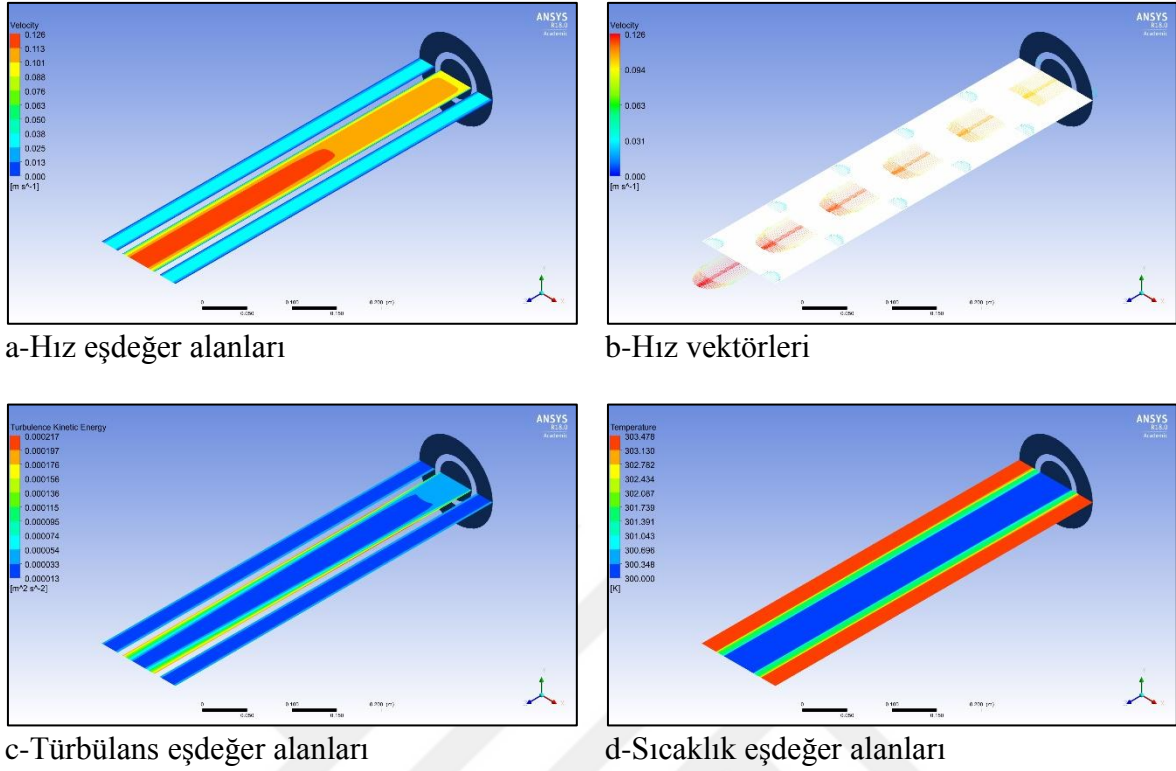
Şekil 6.52. 8 farklı eksenel mesafedeki radyal doğrultuda hız dağılımı



Şekil 6.53. 8 farklı aksel mesafedeki radyal doğrultuda türbülans kinetik enerjisi dağılımı

Radyal yönde gelişmiş hız profilleri ve azami hız değerleri görülebilmektedir. Türbülans kinetik enerjisi profillerine bakarak kuyu ve boru cidarlarına doğru kayma tabakalarından dolayı türbülans değerlerinin arttığı anlaşılmaktadır. Yine bu profillerden içeride yer alan boru cidarının bulunduğu bölgeler anlaşılabilir. Hız ve türbülans profillerinde farklı akış yönlerinin aynı yönde çizdirilmesinin sebebi akış hızlarının mutlak değer olarak kullanılması ve yön için eksi işaret kullanılmamasıdır.

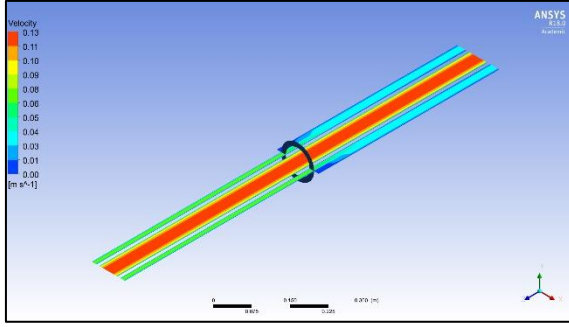
Eşdeğer alanlarının çizdirildiği görseller kuyu girişi, basamak seviyesi ve nozzle kısmı için dörder görsel olmak üzere Şekil 6.54 – 6.56 arasında sunulmuştur. Her şeklin içerisinde görsellerin altında açıklamaları yer almaktadır.



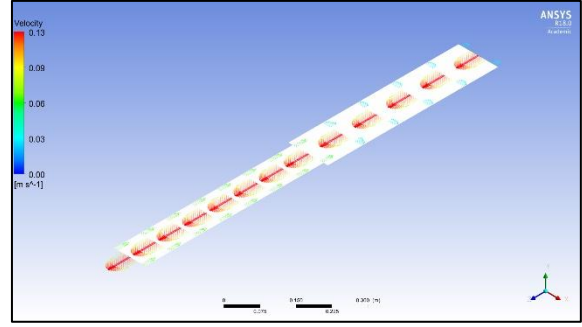
Şekil 6.54. Kuyu giriş bölgesi eşdeğer alanları

İki boyutlu aksenal ve radyal profiller ile büyük ölçüde anlaşılan akış ve sıcaklık dağılımı olayları bütün veya büyük yüzeyler üzerinde çizdirilen eşdeğer alanları ile daha da pekiştirilebilir. Çizgi profiller yerine alanlar kullanıldığı için çizgi profiller arasında kalan alanlar konusunda da, nicel olmasa da nitel değerlendirmelere imkan sağlanmaktadır. Şekil 6.54'te akışkanlar mekaniğine uygun olarak cidara yakın bölgelerde hız değerlerinin azaldığı ve bu bölgelerdeki kayma tabakalarından dolayı türbülans ve çalkantılar oluşmaya başladığı, hız profillerinin kısa bir aksenal mesafede geliştiği ve sıcaklık dağılımının iç borunun varlığında üç bölgede toplanabildiği anlaşılmaktadır.

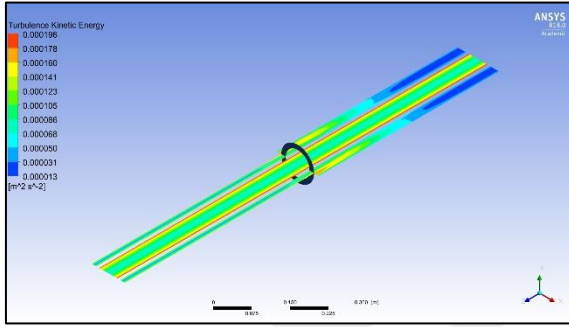
Şekil 6.55'te basamaktan dolayı önemli miktarda türbülans oluştuğu fakat dışta kalan kuyu hacmine göre aşağı akım yönünde bu türbülansın sönümlendiği görülmektedir. Yukarı akımda ise daha fazla türbülansın, nispeten daha dar akış hacminin oluşturduğu kayma tabakaları nedeniyle daha büyük nicel değerler aldığı anlaşılmaktadır. Dönüm bölgelerinde sıcaklık dağılımının daha geniş bir aralıkta gerçekleşmiş ve akışın geri tutunma noktasından sonra ise daha eşit bir sıcaklık dağılımı oluşmuştur.



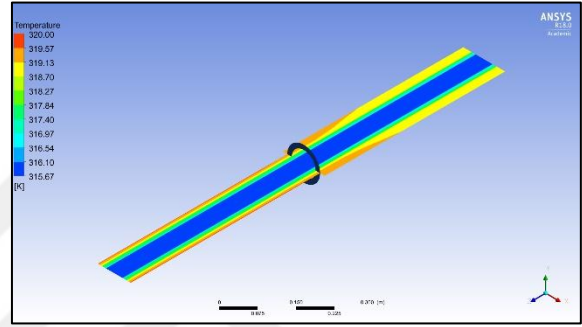
a-Hız eşdeğer alanları



b-Hız vektörleri



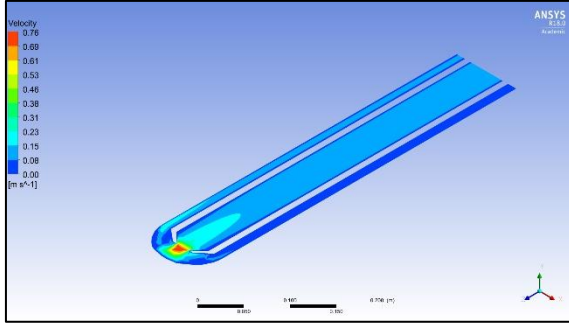
c-Türbülans eşdeğer alanları



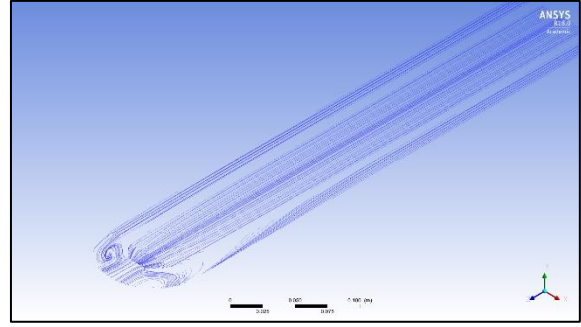
d-Sıcaklık eşdeğer alanları

Şekil 6.55. Kuyu basamak seviyesi eşdeğer alanları

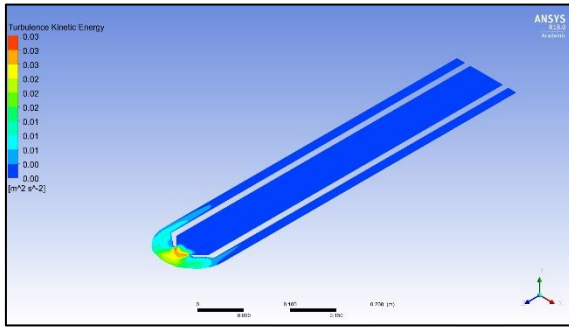
Şekil 6.56'da vektör çizdirilememesinin sebebi nozzle nedeniyle oluşan ekstrem nicel değerlerin, alanın kalan kısmına göre bazen 10 kattan fazla büyük değerlere sahip olmasıdır. Aynı ölçek kullanıldığında nozzle ağzında çok büyük vektörler oluşmakta veya diğer kalan kısımdaki vektörler görülemeyecek kadar küçük çıkmaktadır. Bu nedenle ağış doğrultusunu gösteren ve dönüm bölgelerini işaret eden akım çizgileri çizdirilmiştir. Benzer durum hız, türbülans ve sıcaklık eşdeğer alanları için de geçerlidir. Yine de nozzle etkisinin görüntülenip yorumlanması açısından görseller kullanılmıştır.



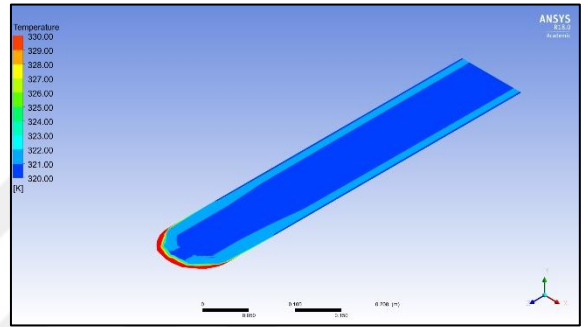
a-Hız eşdeğer alanları



b-Akım çizgileri



c-Türbülans eşdeğer alanları



d-Sıcaklık eşdeğer alanları

Şekil 6.56. Nozzle bölgesi eşdeğer alanları



## 7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada jeotermal kuyulardaki değişik derinliklerdeki çamur giriş ve çıkış sıcaklıkları ele alınarak kuyu dibinde ve ilerleyen derinliklerde olabilecek sıcaklıklar sayısal olarak hesaplanmıştır. Bulunan sıcaklık değerlerine göre kuyu içi sıcaklık dağılımları hesaplanmış elde edilen verilerden kuyu içi sıcaklık dağılımı grafikleri oluşturulmuştur. Elde edilen sonuçlar şu şekilde özetlenebilir.

- a) Geliştirilen MATLAB yazılımı sayesinde kuyu giriş ve çıkış sıcaklıkları verildiğinde kuyu dibi ya da rezervuar sıcaklığı tatmin edici bir doğrulukla tahmin edilebilmektedir.
- b) Hesaplanan rezervuar sıcaklığının ölçülen giriş ve çıkış sıcaklıkları ile yakından ilişkili olduğu gözlenmiştir. Giriş çıkış sıcaklıkları arasındaki fark arttıkça rezervuar sıcaklığı da artmaktadır.
- c) Benzer şekilde rezervuar sıcaklığının kuyunun derinliğine bağlı olarak da değiştiği gözlenmiştir. Örneğin giriş-çıkış sıcaklık farkının aynı olduğu durumlarda daha derin olan kuyunun dip yani rezervuar sıcaklığı daha yüksek çıkmaktadır.
- d) Isı transferi problemlerinde önemli bir parametre olan Peclet sayısının sıcaklık dağılımında son derece etkili olduğu anlaşılmıştır.
- e) Kuyu civarındaki formasyonun durumuna göre sınır şartları değişebilir. Bu çalışmada kuyunun en dış çeperinde, kuyu ağzından kuyu dibine doğru düzgün bir şekilde artan sıcaklık dağılımı kabulü yapılmıştır.
- f) Yapılan hesaplamalı sayısal akışkanlar dinamiği incelemesi neticesinde akış kaynaklı ısı transferi hesabında belirgin bir değişiklik olmadığı ve dolayısıyla gelişmiş akış kabulü yapılarak ısı transferi hesaplamaları temelinde sıcaklık dağılımı ve kaynak sıcaklığı tahmini yapılabileceği sonucuna varılmıştır.
- g) Gelecekte akışkan özellikleri değiştirilerek, çok fazlı akışkanlar kullanılarak ve sistem sınırlarından kütle giriş çıkışlarına izin verilerek farklı sıcaklık sınır şartı profilleri için sıcaklık dağılımının ve deneme yanılma yapılarak rezervuar sıcaklığı tahminlerinin HAD ile belirlenmesi düşünülmektedir.

## KAYNAKLAR

- Altınışık, K. (2004). Uygulamalarla Isı Transferi. Konya: *Nobel Yayın Dağıtım*, 245-250.
- ANSYS Help, ANSYS Documentation, Release 18.0 - © SAS IP, Inc., Son Erişim Tarih Aralığı: 01.01.2018-15.03.2018.
- Akkuş, İ. ve Alan, H. (2016). Türkiye'nin jeotermal kaynakları, projeksiyonlar, sorunlar ve öneriler raporu. *TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası*, Yayın No:123, Ankara, 27-29.
- Batchelor, G. K. (1967). *An Introduction to Fluid Dynamics*. Cambridge, England: *Cambridge University Press*.
- Bobok, Z. S. (2012). Determination of the temperature distribution in the circulating drilling fluid. *Geosciences and Engineering*, 1(1): 37-47.
- Casasso, A. and Sethi, R. (2014). Efficiency of closed loop geothermal heat pumps: A sensitivity analysis. *Renewable Energy*, 62: 737-746.
- Çengel, Y. A. (1997). *Heat Transfer: A Practical Approach*. Reno, Nevada: *McGraw-Hill*, 350-415.
- Dağsöz, A. K. (1995). *Isı Geçişi Isı Transferi* (5. Baskı). İstanbul, *Beta Basım*, 94.
- Danışman, M. A. (2011). Jeotermal nedir ne değıldir. *Jeotermal Bülteni*, 68 (22), 4-9.
- Dickson, M. H. and Fanelli, M. (2003). *Geothermal energy: utilization and technology*, France: Unesco Publishing, 4-6.
- Espinosa-Paredes, G., Garcia, A., Santoyo, E. and Hernandez, I. (2001). TEMLOPI/V.2: a computer program for estimation of fully transient temperatures in geothermal wells during circulation and shut-in. *Computers & Geosciences*, 27: 327-344.
- Garcia, A., Santoyo, E., Espinosa, G., Hernandez, I. and Gutierrez, H. (1998). Estimation of temperatures in geothermal wells during circulation and shut-in in the presence of lost circulation. *Transport in Porous Media*, 33: 103-127.
- Gnielinsky, V. (1979). New equations for heat and mass transfer in turbulent pipe and channel flow. *International Chemical Engineering*, 16: 359-367.
- Gunnlaugsson, E. (2003). Reykjavik energy – District heating in Reykjavik and electrical production using geothermal energy. *The United Nations University, Geothermal Training Programme, Orkustofnun, Grensásvegur 9, IS-108 Reykjavik, Iceland, IGC2003: 67-78*.
- Han, C. and Yu, X.(B.) (2016). Sensitivity analysis of a vertical geothermal heat pump system. *Applied Energy*, 170: 148-160.

- Han, C. and Yu, X.(B.) (2017). Feasibility of geothermal heat exchanger pile-based bridge deck snow melting system: A simulation based analysis. *Renewable Energy*, 101: 214-224.
- Hein, P., Kolditz, O., Görke, U., Bucher, A. and Shao, H. (2016). A numerical study on the sustainability and efficiency of borehole heat exchanger coupled ground source heat pump systems. *Applied Thermal Engineering*, 100: 421-433.
- Ho, I. and Dickson, M. (2017). Numerical modeling of heat production using geothermal energy for a snow-melting system. *Geomechanics for Energy and the Environment*, 10: 42-51.
- Huang, X., Zhu, J. and Li, J. (2015). Analysis of wellbore heat transfer in enhanced geothermal system using CFD modeling. *Proceedings World Geothermal Congress 2015, Melbourne, Australia*.
- Incropera, F. P., and DeWitt, D. P. (1996). Fundamentals of Heat and Mass Transfer (Fourth Edition). West Lafayette: *John Wiley & Sons*, 3-604.
- İnternet: Jeotermal enerji nedir? jeotermal ne demek?, URL: <http://www.enerjibes.com/jeotermal-enerji-nedir-jeotermal-ne-demek/> Son Erişim Tarihi: 15.06.2016.
- İnternet: T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. <http://www.enerji.gov.tr/tr-TR/Sayfalar/Jeotermal#>. Son Erişim Tarihi: 10.06.2017.
- İnternet: T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. <http://www.enerji.gov.tr/tr-TR/Sayfalar/Jeotermal>. Son Erişim Tarihi: 07.05.2018.
- Kakaç, S., Yener Y. (1979). Convective Heat Transfer (Second Edition). United State of America: *CRC Press*, 33-39.
- Kays, W. M. (1966). Convective Heat and Mass Transfer. New York: *McGraw-Hill*.
- Launder, B. E. and Spalding D. B. (1972). Lectures in Mathematical Models of Turbulence. London, England: *Academic Press*.
- Lenhard, R. and Malcho, M. (2013). Numerical simulation device for the transport of geothermal heat with forced circulation of media. *Mathematical and Computer Modelling*, 57: 111-125.
- Mills, A. F. (1999). Heat Transfer (Second Edition). Los Angeles: *Prentice Hall*, 8-9.
- Noorollahi, Y., Yousefi, H. and Pourarshad, M. (2015). Three dimensional modeling of heat extraction from abandoned oil well for application in sugarcane industry in Ahvaz-Southern Iran. *Proceedings World Geothermal Congress 2015, Melbourne, Australia*.

- Ozdemir, A., Yasar, E. and Cevik, G. (2017). An importance of the geological investigations in Kavaklıdere geothermal field (Turkey). *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*, 3: 29-49.
- Park, D., Kwak, D., Kim, K., Park, S. and Na, S. (2010). Numerical simulation of standing column well. *Proceedings World Geothermal Congress 2010, Bali, Indonesia*, 1-10.
- Patankar, S. V. (1980). Numerical Heat Transfer and Fluid Flow. United States of America: *Hemisphere Publishing Corporation*.
- Renaud, T., Stebel, M., Verdin, P. and Falcone, G. (2018). CFD modeling of a high enthalpy geothermal context. *Proceedings, 43rd Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, Stanford, California*, SGP-TR-213: 1-8.
- Santoyo, E., Garcia, A., Espinosa, G., Santoyo-Gutierrez, S. and Gonzalez-Partida, E. (2003). Convection heat-transfer coefficient of non-Newtonian geothermal drilling fluids. *Journal of Geochemical Exploration*, 78(79): 249-255.
- Santoyo, E., Garcia, A., Morales, J. M., Contreras, E. and Espinosa-Paredes, G. (2001). Effective thermal conductivity of Mexican geothermal cementing systems in the temperature range from 28°C to 200°C. *Applied Thermal Engineering*, 21: 1799-1812.
- Sür, Ö. (1970). Jeotermal enerji. *Ankara Üniversitesi Dil ve Tarih-Coğrafya Fakültesi Dergisi*, Cilt XXVIII, 3-4: 1-38.
- Tekin, S. and Akin, S. (2011). Estimation of the formation temperature from the inlet and outlet mud temperatures while drilling geothermal formations. *Proceedings, Thirty-Sixth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, Stanford, California*, SGP-TR-191.
- Topkaya, H. (1974). Teknik Hidrolik. Ankara: *Güven Kitabevi*, 11.
- Vadetsky, Y. V. (2014). Drilling of Oil and Gas Wells (Бурение Нефтяных и Газовых Скважин). Moscow: *Nedra (Недра)*, 4-79.
- Wu, W. and Massoudi, M. (2016). Heat transfer and dissipation effects in the flow of a drilling fluid. *Fluids*, 1(4): 1-23.
- Wu, W., Aubry, N., Antaki, J. F., McKoy, M. L. and Massoudi, M. (2017). Heat transfer in a drilling fluid with geothermal application. *Energies*, 10(1349): 1-18.
- Yang, M., Li, X., Deng, J., Meng, Y. and Li, G. (2015). Prediction of wellbore and formation temperatures during circulation and shut-in stages under kick conditions. *Energy*, 91: 1018-1029.
- Zyvoloski, G. A. and O'Sullivan, M. J. (1980). Simulation of gas dominated, two phase geothermal reservoir. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 20: 52– 58.

## ÖZGEÇMİŞ

### Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : ATEŞ, Seyfullah Sinan  
 Uyuğu : T.C.  
 Doğum tarihi ve yeri : 05.12.1988, Selçuklu  
 Medeni hali : Bekar  
 Telefon : 0 (505) 785 20 98  
 e-mail : seyfullahsinan@gmail.com



### Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Yüksek lisans	İskenderun Teknik Üniversitesi / Petrol ve Doğalgaz Mühendisliği	Devam ediyor
Lisans	Azerbaycan Devlet Neft Akademisi / Petrol ve Doğalgaz Mühendisliği	2013
Lise	Açık Öğretim Lisesi	2005

### İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2017-2018	İttifak Alüminyum Ltd. Şti.	Dış Ticaret Müdürü
2016-2017	Mustafa Ceylan Endüstri A.Ş.	Dış Ticaret Satış Danışmanı
2015-2016	Eriell Drilling LLC	API Danışmanı

### Yabancı Dil

Azerice, İngilizce ve Rusça

### Hobiler

Tenis

## DİZİN

---

### **A**

ANSYS · 92, 100  
Ayrıklaştırma · 77

---

### **B**

Boyutsuz sayılar · 58  
Biot sayısı · 59

---

### **C**

CFD · 100

---

### **D**

Delphi · 67, 69

---

### **D**

Discretization · 77  
Disipasyon faktörü · 74

---

### **E**

e-NTU · 68, 72

---

### **G**

Grashof sayısı · 60

---

### **H**

HAD · 100

---

### **I**

İsı transferi · 46

---

### **J**

Jeotermal Sondaj · 35

---

### **K**

$k - \epsilon$  türbülans modeli · 100, 103  
Kondüksiyon · 47  
Konveksiyon · 50

---

### **L**

Laminer akış · 51, 56

---

### **M**

MATLAB · 67, 69

---

### **N**

Nusselt sayısı · 58, 59

---

### **P**

Paralel ve zıt ısı değıştiriciler · 60  
Peclet sayısı · 59, 125  
Prandtl sayısı · 59, 104

---

### **R**

Rayleigh sayısı · 59  
Reynolds sayısı · 57

---

### **S**

Sıcaklık dağılımı · 0  
Sonlu farklar metodu · 68

---

### **T**

Taşınım · 50  
Taşınım sınır tabaka · 52, 54  
Türbülanslı akış · 51, 56



**TEKNOVERSİTE**



teknoversite **AYRICALIĞINDASINIZ**

**İSTE**

