

**BUZ DEPOLAMALI SİSTEMLERDE
ISI TRANSFER YAPILARININ
İNCELENMESİ**

**Nesrin SÖNMEZ
YÜKSEK LİSANS TEZİ**

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

2007

**BUZ DEPOLAMALI SİSTEMLERDE ISI TRANSFER
YAPILARININ İNCELENMESİ**

Nesrin SÖNMEZ
YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
2007

Danışman: Doç. Dr. Ertan BUYRUK

Bu tez Cumhuriyet Üniversitesi Senatosunun 05.01.1984 tarihli toplantısında kabul edilen ve daha sonra 30.12.1993 tarihinde C.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğünce hazırlanan ve yayınlanan “Yüksek Lisans ve Doktora tez yazım Kılavuzu” adlı yönergeye göre hazırlanmıştır.

	Sayfa No:
İÇİNDEKİLER	i
ÖZET	iv
SUMMARY	v
TEŞEKKÜR	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	vii
TABLOLAR DİZİNİ	xiv
SİMGELER DİZİNİ	xv
I. BÖLÜM GİRİŞ	1
1.1. Giriş	1
1.2. Literatür Taraması	3
II. BÖLÜM: SOĞU DEPOLAMA	6
2.1. Giriş	6
2.2. Soğu Depolamalı Soğutma Sistemleri	6
2.3. İşletme Yöntemlerine Göre Soğu Depolama Sistemleri	10
2.3.1. Tam depolama	10
2.3.2. Kısmi depolama	11
2.3.3. Uygulamaya göre değişebilen stratejiler	12
2.4. Soğu Depolama Sistemlerine Ait Temel Prensipler	14
2.4.1. Soğu depolayıcılar	14
2.4.1.1. Su depolamalı sistemler	14
2.4.1.2. Buz depolamalı sistemler	19
2.4.1.3. Faz değiştiren ötektik tuzlar	21
2.4.2. Soğu depolama tankları	22
2.5. Soğu Depolamalı Sistemlerin Tasarımı	23
2.5.1. Soğutma yükü	23
2.5.2. Soğutucu kapasitesi	24
2.5.3. Depo yükü	25
III. BÖLÜM: KULLANILAN SAYISAL YÖNTEM VE TEMEL DENKLEMLER	26
3.1. Kullanılan Sayısal Yöntem	26
3.1.1. Sonlu hacimler yöntemi	26
3.1.2. Sonlu hacimler formülasyonları	27
3.1.2.1. Kütlenin korunumu	28

3.1.2.2. Momentumun korunumu	28
3.1.2.3. Enerjinin korunumu	29
3.2. Temel Denklemler	30
3.2.1. Depolanan toplam enerjinin tanımı	30
3.2.1.1. Gizli enerji	30
3.2.1.2. Duyulur enerji	30
3.2.1.3. Kazanılan enerji	32
3.2.2. Korunum denklemleri	32
3.2.2.1. Isı transferi akışkanı için denklemler	32
3.2.2.2. Boru cidarı için denklemler	34
3.2.2.3. Faz değişim malzemesi (FDM) için denklemler	36
IV. BÖLÜM: SONUÇLAR	42
4.1. Tek Silindirli Düzenleme İçin Buz Oluşumunun İncelenmesi	42
4.1.1. Tek silindirli düzenleme için $T_y = 263$ K olması durumunda buz oluşumunun incelenmesi	45
4.1.2. Tek silindirli düzenleme için $T_y = 268$ K olması durumunda buz oluşumunun incelenmesi	48
4.1.3. Tek silindirli düzenleme için $T_y = 258$ K olması durumunda buz oluşumunun incelenmesi	50
4.2. İki Silindirli Düzenleme İçin Buz Oluşumunun İncelenmesi	53
4.3. Dört Silindirli Üçgen ve Kare Dizilişli Düzenlemeler İçin Buz Oluşumunun İncelenmesi	57
4.3.1. Silindirler arası mesafenin $2d$ olması durumunda su sıcaklığının buz oluşumuna etkisi	68
4.4. Silindir Sayısının Etkisi	75
4.5. Silindir Konumunun Etkisi	79
4.5.1. Silindirin depolama tankının üst bölgesinde olması durumu	80
4.5.1.1. Su sıcaklığının 273 K olması durumu	80
4.5.1.2. Su sıcaklığının 277 K olması durumu	83
4.5.1.3. Su sıcaklığının 281 K olması durumu	85
4.5.2. Silindirin depolama tankının ortasında olması durumu	89
4.5.2.1. Su sıcaklığının 273 K olması durumu	89
4.5.2.2. Su sıcaklığının 277 K olması durumu	92
4.5.2.3. Su sıcaklığının 281 K olması durumu	95
4.5.3. Silindirin depolama tankının alt Bölgesinde olması durumu	99
4.5.3.1. Su sıcaklığının 273 K olması durumu	99
4.5.3.2. Su sıcaklığının 277 K olması durumu	102
4.5.3.3. Su sıcaklığının 281 K olması durumu	105

V.BÖLÜM: TARTIŞMA VE SONUÇ	111
VI. BÖLÜM: KAYNAKLAR	112
VII. BÖLÜM ÖZGEÇMİŞ	115
VIII.BÖLÜM: EKLER	116
8.1. Korunum Denklemlerinin Boyutsuz Şekli	116
8.1.1. Isı transfer akışkanı (ITA) denkleminin boyutsuz şekli	117
8.1.2. Boru cidarı denkleminin boyutsuz şekli	118
8.1.3. Faz değişim malzemesi (FDM) denkleminin boyutsuz şekli	118

ÖZET**Yüksek Lisans Tezi****BUZ DEPOLAMALI SİSTEMLERDE ISI TRANSFER
YAPILARININ İNCELENMESİ**

Nesrin SÖNMEZ

Cumhuriyet Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Ertan BUYRUK

Bu çalışmada, içerisinde su bulunan dikdörtgensel bir soğu depolama tankına yerleştirilen değişik silindir düzenlemelerinin, buz oluşumuna etkilerinin karşılaştırılması amaçlanmıştır. Bu amaçla FLUENT paket programı yardımıyla akış alanının sayısal çözümü zamana bağlı olarak elde edilerek sıcaklık değişimi ve buz oluşumu görselleştirilmiştir. Tank içerisindeki su sıcaklığı 4 °C ve silindir yüzey sıcaklığı -10 °C kabul edilerek, öncelikle tek silindirli düzenleme için zamana bağlı olarak A_b/A_s oranı (Buz alanı / silindir kesit alanı) elde edilmiştir. Daha sonra aynı sınır koşullarında tek ve iki silindirli düzenlemeler karşılaştırılmıştır. Çalışmanın devamında dört silindirli üçgen ve kare dizilişli düzenlemelerin sıcaklık dağılımları, sıvı oranları ve alan oranları elde edilmiştir. Silindir sayısının etkisini görebilmek için üç model oluşturularak sonuçlar elde edilmiştir. Son olarak silindir konumunun katılaşmayı ne şekilde etkilediğini görebilmek tek silindir tankın alt bölgesine, ortasına ve üst bölgesine yerleştirilerek iç düzenleme oluşturulmuştur. Aynı sınır koşullarında bu düzenlemeler için sıcaklık dağılımları, sıvı oranları ve alan oranları elde edilmiş ve karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Enerji Depolama, Faz Değişimi, Katılaşma

SUMMARY**MsC Thesis****THE ANALYSIS OF HEAT TRANSFER STRUCTURES
IN ICE STORAGE SYSTEMS**

Nesrin SÖNMEZ

Cumhuriyet University
Graduate School of Natural
and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Assoc. Prof.. Dr. Ertan BUYRUK

In the present study, it is aimed to compare the effect of ice formation on different cylinder geometries placed in a rectangular ice storage tank filled with water. For this aim Fluent package program was used to solve the flow domain numerically and temperature distribution and ice formation depending on time were illustrated. Water temperature in the tank and cylinder surface temperature were assumed as 4 °C and -10 °C respectively and firstly ratio of A_b/A_s (Formed ice area/ Cross sectional area of Cylinder). Later, one-cylinder and two-cylinder geometries were compared at the same boundary conditions. Then, temprature distributions, liquid ratios and area ratios of four-cylinder triangle and arragement in square sequence geometries were obtained. To see the effect of number of the cylinder , three models were formed and results were obtained.Finally, To realize how placement of cylinder effect solidification, iner arragement was formed by locating one cylinder to the bottom, medium and the top area of the tank. At the same temprature conditions, temprature distributions, liquid ratios and area ratios were obtained and compared for these arragements .

Keywords: Energy Storage, Phase Change, Solidification

TEŞEKKÜR

Çalışmalarımnda her zaman bana yol gösteren, yardımcı olan, inanan, güvenen ve hiçbir zaman desteğini esirgemeyen değerli hocam Doç. Dr. Ertan BUYRUK'a, katkılarından dolayı Arş. Gör. Ahmet FERTELLİ'ye, çalışmam sırasında her zaman desteğini hissettiğim çalışma arkadaşım Arş. Gör. Ümit Nazlı TEMEL'e ,benden yardımını esirgemeyen Yrd. Doç. Dr. Aytunç Erek , Arş. Gör. Mehmet Akif EZAN'a ve bana güvenen, inanan ve her zaman yanımda olan canım aileme teşekkür ederim.

Çalışmamı benim için her şeyden değerli olan babama ve anneme atfediyorum.

Nesrin SÖNMEZ

ŞEKİLLER DİZİNİ	Sayfa No:
Şekil 2.1. Tam depolama.	10
Şekil 2.2. Yük Seviyelemeli Kısmi Depolama.	11
Şekil 2.3. Talep Belirlemeli Kısmi Depolama.	11
Şekil 2.4. Ana soğutuculu bir soğu depolama sistemi.	12
Şekil 2.5. Su Depolamalı Sistem.	14
Şekil 2.6. Depoda katmanlaştırma.	17
Şekil 2.7. Engelli depo sistemi	18
Şekil 2.8. Buz toplama sistemi.	20
Şekil 2.9. Dıştan eritmeli buz depolamasının şarj vedeşarjı	20
Şekil 2.10. İçten eritmeli buz depolamada şarj vedeşarj.	20
Şekil 2.11. Kapsülle buz depolamada şarj vedeşarj.	21
Şekil 2.12. Soğutucu kapasitesinin belirlenmesi.	24
Şekil 2.13. Depo yükünün belirlenmesi.	25
Şekil 3.1. Boru etrafındaki katılaşma	31
Şekil 3.2. Isı transferi akışkanının enerji dengesi	33
Şekil 3.3. Boru cidarı için enerji dengesi	35
Şekil 3.4 Entalpi – sıcaklık arasındaki ilişki	37
Şekil 3.5. Isıl kapasite ve kaynak terimle sıcaklık arasındaki ilişki.	40
Şekil 4.1. Tek Silindir için Oluşturulan Model	42
Şekil 4.2. Oluşturulan model için ağ yapısı	42
Şekil 4.3. (a) Referans çalışmada belirli sürelerde meydana gelen buz kalınlıkları, (b)Referans çalışmada 1920 sn sonundaki hız dağılımı, (c) Yapılan çalışmada 1800 sn sonunda silindir üzerindeki buz oluşumu, (d) Yapılan çalışmada 1800 sn sonundaki hız dağılımı, (e) Tek silindir etrafındaki buz oluşumunun karşılaştırılması.	43
Şekil 4.4. Tek Silindirli düzenleme için , 900 sn sonundaki sıcaklık dağılımı ve sıvı oranları ($T_y = 263 \text{ K}$)	45
Şekil 4.5. Tek Silindirli düzenleme için 1800 sn sonundaki sıcaklık dağılımı ve sıvı oranları ($T_y = 263 \text{ K}$)	45
Şekil 4.6. Tek Silindirli düzenleme için 3600 sn sonundaki sıcaklık dağılımı ve sıvı oranları ($T_y = 263 \text{ K}$)	46
Şekil 4.7. Tek Silindirli düzenleme için 7200 sn sonundaki sıcaklık dağılımı ve sıvı oranları ($T_y = 263 \text{ K}$)	46
Şekil 4.8. Tek silindirli düzenleme için 1800 sn sonundaki hız dağılımı vektörleri	47

Şekil 4.9. Tek Silindirli düzenleme için 900 sn sonundaki sıcaklık dağılımı ve sıvı oranları ($T_y = 268 \text{ K}$)	48
Şekil 4.10. Tek Silindirli düzenleme için 1800 sn sonundaki sıcaklık dağılımı ve sıvı oranları ($T_y = 268 \text{ K}$)	48
Şekil 4.11. Tek Silindirli düzenleme için 3600 sn sonundaki sıcaklık dağılımı ve sıvı oranları ($T_y = 268 \text{ K}$)	49
Şekil 4.12. Tek Silindirli düzenleme için 7200 sn sonundaki sıcaklık dağılımı ve sıvı oranları ($T_y = 268 \text{ K}$)	49
Şekil 4.13. Tek Silindirli düzenleme için 900 sn sonundaki sıcaklık dağılımı ve sıvı oranları ($T_y = 258 \text{ K}$)	50
Şekil 4.14. Tek Silindirli düzenleme için 1800 sn sonundaki sıcaklık dağılımı ve sıvı oranları ($T_y = 258 \text{ K}$)	50
Şekil 4.15. Tek Silindirli düzenleme için 3600 sn sonundaki sıcaklık dağılımı ve sıvı oranları ($T_y = 258 \text{ K}$)	51
Şekil 4.16. Tek Silindirli düzenleme için 7200 sn sonundaki sıcaklık dağılımı ve sıvı oranları ($T_y = 258 \text{ K}$)	51
Şekil 4.17. Tek silindirli düzenleme için farklı yüzey sıcaklıklarında buz alanının (A_b) silindir kesit alanına oranı (A_s) nın zamana bağlı değişimi	52
Şekil 4.18. İki Silindir İçin Oluşturulan Model	53
Şekil 4.19. İki Silindirli düzenleme için 900 sn sonundaki sıcaklık dağılımı ve sıvı oranları ($T_y = 263 \text{ K}$)	54
Şekil 4.20. İki Silindirli düzenleme için 1800 sn sonundaki sıcaklık dağılımı ve sıvı oranları ($T_y = 263 \text{ K}$)	54
Şekil 4.21. İki Silindirli düzenleme için 3600 sn sonundaki sıcaklık dağılımı ve sıvı oranları ($T_y = 263 \text{ K}$)	55
Şekil 4.22. İki Silindirli düzenleme için 7200 sn sonundaki sıcaklık dağılımı ve sıvı oranları ($T_y = 263 \text{ K}$)	55
Şekil 4.23. Tek ve iki silindirli düzenleme için buz alanının (A_b) silindir kesit alanına oranı (A_s) nın zamana bağlı değişimi.	56
Şekil 4.24. Silindirler arası yatay ve dikey mesafe 2d olmak üzere (a) kare, (b) üçgen dizilişli düzenleme.	57
Şekil 4.25. Silindirler arası yatay ve dikey mesafe 3d olmak üzere (a) kare, (b) üçgen dizilişli düzenleme.	57
Şekil 4.26. 2d-2d Dört Silindirli üçgen dizilişli düzenleme için 900 sn sonundaki sıcaklık dağılımı ve sıvı oranları ($T_i = 277 \text{ K}$).	58

Şekil 4.27. 2d-2d Dört silindirli üçgen dizilişli düzenleme için 1800 sn sonundaki sıcaklık dağılımı ve sıvı oranları ($T_i = 277$ K).	59
Şekil 4.28. 2d-2d Dört silindirli üçgen dizilişli düzenleme için 3600 sn sonundaki sıcaklık dağılımı ve sıvı oranları ($T_i = 277$ K).	59
Şekil 4.29. 2d-2d Dört silindirli üçgen dizilişli düzenleme için 900 sn sonundaki sıcaklık dağılımı ve sıvı oranları ($T_i = 277$ K).	60
Şekil 4.30. 3d-3d Dört silindirli üçgen dizilişli düzenleme için 900 sn sonundaki sıcaklık dağılımı ve sıvı oranları (277 K)	61
Şekil 4.31. 3d-3d Dört silindirli üçgen dizilişli düzenleme için 1800 sn sonundaki sıcaklık dağılımı ve sıvı oranları ($T_i = 277$ K)	61
Şekil 4.32. 3d-3d Dört silindirli üçgen dizilişli düzenleme için 3600 sn sonundaki sıcaklık dağılımı ve sıvı oranları ($T_i = 277$ K)	62
Şekil 4.33. 3d-3d Dört silindirli üçgen dizilişli düzenleme için 7200 sn sonundaki sıcaklık dağılımı ve sıvı oranları ($T_i = 277$ K)	62
Şekil 4.34. 2d-2d Dört silindirli kare dizilişli düzenleme için 900 sn sonundaki sıcaklık dağılımı ve sıvı oranları ($T_i = 277$ K)	63
Şekil 4.35. 2d-2d Dört silindirli kare dizilişli düzenleme için 1800 sn sonundaki sıcaklık dağılımı ve sıvı oranları ($T_i = 277$ K)	64
Şekil 4.36. 2d-2d Dört silindirli kare dizilişli düzenleme için 3600 sn sonundaki sıcaklık dağılımı ve sıvı oranları ($T_i = 277$ K)	64
Şekil 4.37. 2d-2d Dört silindirli kare dizilişli düzenleme için 7200 sn sonundaki sıcaklık dağılımı ve sıvı oranları ($T_i = 277$ K).	65
Şekil 4.38. 3d-3d Dört silindirli kare dizilişli düzenleme için 900 sn sonundaki sıcaklık dağılımı ve sıvı oranları ($T_i = 277$ K)	66
Şekil 4.39. 3d-3d Dört silindirli kare dizilişli düzenleme için 1800 sn sonundaki sıcaklık dağılımı ve sıvı oranları ($T_i = 277$ K).	66
Şekil 4.40. 3d-3d Dört silindirli kare dizilişli düzenleme için 3600 sn sonundaki sıcaklık dağılımı ve sıvı oranları ($T_i = 277$ K).	67
Şekil 4.41. 3d-3d Dört silindirli kare dizilişli düzenleme için 7200 sn sonundaki sıcaklık dağılımı ve sıvı oranları ($T_i = 277$ K)	67
Şekil 4.42. Silindirler arası yatay ve dikey mesafe 2d olması durumunda üçgen ve kare dizilişli silindirler için katılma oranlarının karşılaştırılması.	68
Şekil 4.43. Silindirler arası yatay ve dikey mesafe 3d olması durumunda üçgen ve kare dizilişli silindirler için katılma oranlarının karşılaştırılması	68

Şekil 4.44. Dört silindirli üçgen dizilişli düzenleme için (a) 900 sn sonundaki, (b) 1800 sn sonundaki sıcaklık dağılımı ve sıvı oranları ($T_i = 263$ K).	69
Şekil 4.45. Dört silindirli üçgen dizilişli düzenleme için (a) 3600 sn sonundaki, (b) 7200 sn sonundaki sıcaklık dağılımı ve sıvı oranları ($T_i = 0$ °C).	70
Şekil 4.46. Dört silindirli üçgen dizilişli düzenleme için (a) 900 sn sonundaki, (b) 1800 sn sonundaki sıcaklık dağılımı ve sıvı oranları ($T_i = 281$ K).	70
Şekil 4.47. Dört silindirli üçgen dizilişli düzenleme için a) 3600 sn sonundaki, b) 7200 sn sonundaki sıcaklık dağılımı ve sıvı oranları ($T_i = 281$ K).	71
Şekil 4.48. 2d-2d üçgen dizilişli düzenleme için farklı su sıcaklıklarının etkisi	71
Şekil 4.49. Dört silindirli kare dizilişli düzenleme için (a) 900 sn sonundaki, (b) 1800 sn sonundaki sıcaklık dağılımı ve sıvı oranları ($T_i = 273$ K).	72
Şekil 4.50. Dört silindirli kare dizilişli düzenleme için (a) 3600 sn sonundaki, (b) 7200 sn sonundaki sıcaklık dağılımı ve sıvı oranları ($T_i = 273$ K).	73
Şekil 4.51. Dört silindirli kare dizilişli düzenleme için (a) 900 sn sonundaki, (b) 1800 sn sonundaki sıcaklık dağılımı ve sıvı oranları ($T_i = 281$ K).	73
Şekil 4.52. Dört silindirli kare dizilişli düzenleme için (a) 3600 sn sonundaki, (b) 7200 sn sonundaki sıcaklık dağılımı ve sıvı oranları ($T_i = 281$ K).	74
Şekil 4.53. 2d-2d kare dizilişli düzenleme için farklı su sıcaklıklarının etkisi	74
Şekil 4.54. Silindirler arası yatay ve dikey mesafenin 2d ve depo yüksekliğinin 10d olması durumunda oluşturulan 6 ve 8 silindirli oluşturulan model.	75
Şekil 4.55. Altı Silindirli kare dizilişli düzenleme için (a) 900 sn sonundaki, (b) 1800 sn sonundaki sıcaklık dağılımı ve sıvı oranları ($T_i = 277$ K)	76
Şekil 4.56. Altı Silindirli kare dizilişli düzenleme için (a) 3600 sn sonundaki, (b) 7200 sn sonundaki sıcaklık dağılımı ve sıvı oranları ($T_i = 277$ K).	76
Şekil 4.57. Sekiz silindirli kare dizilişli düzenleme için (a) 900 sn sonundaki, (b) 1800 sn sonundaki sıcaklık dağılımı ve sıvı oranları ($T_i = 277$ K).	77
Şekil 4.58. Sekiz Silindirli kare dizilişli düzenleme için (a) 3600 sn sonundaki, (b) 7200 sn sonundaki sıcaklık dağılımı ve sıvı oranları ($T_i = 277$ K).	77
Şekil 4.59. Silindirler arası yatay ve dikey mesafenin 2d ve depo yüksekliğinin 10d olması durumunda oluşturulan 4, 6 ve 8 silindirli oluşturulan model için alan oranının zamanla değişimi.	78
Şekil 4.60. Silindir tank içerisinde a) üstte, b) ortada ve c) altta olması durumunda oluşturulan modeller	79
Şekil 4.61. Tank içerisinde silindirin üstte olması durumunda 900 sn sonundaki sıcaklık dağılımı ve sıvı oranı ($T_i = 273$ K).	80

Şekil 4.62. Tank içerisinde silindirin üstte olması durumunda 1800 sn sonundaki sıcaklık dağılımı ve sıvı oranı ($T_i = 273$ K).	81
Şekil 4.63. Tank içerisinde silindirin üstte olması durumunda 3600 sn sonundaki sıcaklık dağılımı ve sıvı oranı ($T_i = 273$ K).	81
Şekil 4.64. Tank içerisinde silindirin üstte olması durumunda 7200 sn sonundaki sıcaklık dağılımı ve sıvı oranı ($T_i = 273$ K)	82
Şekil 4.65. Tank içerisinde silindirin üstte olması durumunda 900 sn sonundaki sıcaklık dağılımı ve sıvı oranı ($T_i = 277$ K).	83
Şekil 4.66. Tank içerisinde silindirin üstte olması durumunda 1800 sn sonundaki sıcaklık dağılımı ve sıvı oranı ($T_i = 277$ K).	83
Şekil 4.67. Tank içerisinde silindirin üstte olması durumunda 3600 sn sonundaki sıcaklık dağılımı ve sıvı oranı ($T_i = 277$ K).	84
Şekil 4.68. Tank içerisinde silindirin üstte olması durumunda 7200 sn sonundaki sıcaklık dağılımı ve sıvı oranı ($T_i = 277$ K).	84
Şekil 4.69. Tank içerisinde silindirin üstte olması durumunda 900 sn sonundaki sıcaklık dağılımı ve sıvı oranı ($T_i = 281$ K).	85
Şekil 4.70. Tank içerisinde silindirin üstte olması durumunda 1800 sn sonundaki sıcaklık dağılımı ve sıvı oranı ($T_i = 281$ K).	86
Şekil 4.71. Tank içerisinde silindirin üstte olması durumunda 3600 sn sonundaki sıcaklık dağılımı ve sıvı oranı ($T_i = 281$ K).	86
Şekil 4.72. Tank içerisinde silindirin üstte olması durumunda 7200 sn sonundaki sıcaklık dağılımı ve sıvı oranı ($T_i = 281$ K).	87
Şekil 4.73. Silindirin tankın üst bölgesinde olması durumunda farklı su sıcaklıklarının buz oluşumuna etkisi.	88
Şekil 4.74. Tank içerisinde silindirin ortada olması durumunda 900 sn sonundaki sıcaklık dağılımı ve sıvı oranı ($T_i = 273$ K).	89
Şekil 4.75. Tank içerisinde silindirin ortada olması durumunda 1800 sn sonundaki sıcaklık dağılımı ve sıvı oranı ($T_i = 273$ K).	90
Şekil 4.76. Tank içerisinde silindirin ortada olması durumunda 3600 sn sonundaki sıcaklık dağılımı ve sıvı oranı ($T_i = 273$ K).	90
Şekil 4.77. Tank içerisinde silindirin ortada olması durumunda 7200 sn sonundaki sıcaklık dağılımı ve sıvı oranı ($T_i = 277$ K).	91
Şekil 4.78. Tank içerisinde silindirin ortada olması durumunda 900 sn sonundaki sıcaklık dağılımı ve sıvı oranı ($T_i = 277$ K).	92
Şekil 4.79. Tank içerisinde silindirin ortada olması durumunda 1800 sn sonundaki sıcaklık dağılımı ve sıvı oranı ($T_i = 277$ K).	93

Şekil 4.80. Tank içerisinde silindirin ortada olması durumunda 3600 sn sonundaki sıcaklık dağılımı ve sıvı oranı ($T_i = 277$ K).	93
Şekil 4.81. Tank içerisinde silindirin ortada olması durumunda 7200 sn sonundaki sıcaklık dağılımı ve sıvı oranı ($T_i = 277$ K).	94
Şekil 4.82. Tank içerisinde silindirin ortada olması durumunda 900 sn sonundaki sıcaklık dağılımı ve sıvı oranı ($T_i = 281$ K).	95
Şekil 4.83. Tank içerisinde silindirin ortada olması durumunda 1800 sn sonundaki sıcaklık dağılımı ve sıvı oranı ($T_i = 281$ K).	96
Şekil 4.84. Tank içerisinde silindirin ortada olması durumunda 3600 sn sonundaki sıcaklık dağılımı ve sıvı oranı ($T_i = 281$ K).	96
Şekil 4.85. Tank içerisinde silindirin ortada olması durumunda 7200 sn sonundaki sıcaklık dağılımı ve sıvı oranı ($T_i = 281$ K).	97
Şekil 4.86. Silindirin tankın ortasında olması durumunda farklı su sıcaklıklarının buz oluşumuna etkisi	98
Şekil 4.87. Tank içerisinde silindirin altta olması durumunda 900 sn sonundaki sıcaklık dağılımı ve sıvı oranı ($T_i = 273$ K).	99
Şekil 4.88. Tank içerisinde silindirin altta olması durumunda 1800 sn sonundaki sıcaklık dağılımı ve sıvı oranı ($T_i = 273$ K).	100
Şekil 4.89. Tank içerisinde silindirin altta olması durumunda 3600 sn sonundaki sıcaklık dağılımı ve sıvı oranı ($T_i = 273$ K).	100
Şekil 4.90. Tank içerisinde silindirin altta olması durumunda 7200 sn sonundaki sıcaklık dağılımı ve sıvı oranı ($T_i = 273$ K).	101
Şekil 4.91. Tank içerisinde silindirin altta olması durumunda 900 sn sonundaki sıcaklık dağılımı ve sıvı oranı ($T_i = 277$ K).	102
Şekil 4.92. Tank içerisinde silindirin altta olması durumunda 1800 sn sonundaki sıcaklık dağılımı ve sıvı oranı ($T_i = 277$ K).	103
Şekil 4.93. Tank içerisinde silindirin altta olması durumunda 3600 sn sonundaki sıcaklık dağılımı ve sıvı oranı ($T_i = 277$ K).	103
Şekil 4.94. Tank içerisinde silindirin altta olması durumunda 7200 sn sonundaki sıcaklık dağılımı ve sıvı oranı ($T_i = 277$ K).	104
Şekil 4.95. Tank içerisinde silindirin altta olması durumunda 900 sn sonundaki sıcaklık dağılımı ve sıvı oranı ($T_i = 277$ K).	105
Şekil 4.96. Tank içerisinde silindirin altta olması durumunda 1800 sn sonundaki sıcaklık dağılımı ve sıvı oranı ($T_i = 277$ K).	106
Şekil 4.97. Tank içerisinde silindirin altta olması durumunda 3600 sn sonundaki sıcaklık dağılımı ve sıvı oranı ($T_i = 281$ K).	106

Şekil 4.98. Tank içerisinde silindirin altta olması durumunda 7200 sn sonundaki sıcaklık dağılımı ve sıvı oranı ($T_i = 281$ K).	107
Şekil 4.99. Silindirin tankın alt bölgesinde olması durumunda farklı su sıcaklıklarının buz oluşumuna etkisi	107
Şekil 4.100. Su sıcaklığının 273 K olması durumunda silindir konumunun buz oluşumuna etkisi	108
Şekil 4.101. Su sıcaklığının 277 K olması durumunda silindir konumunun buz oluşumuna etkisi.	109
Şekil 4.102. Su sıcaklığının 281 K olması durumunda silindir konumunun buz oluşumuna etkisi	109

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 3.1. Suyun termo-fiziksel özellikleri	41
Tablo 8.1. Boyutsuz Değişkenler	116
Tablo 8.2. Dairesel tüp için sonsuz çözüm fonksiyonları serisi	118

SİMGELER DİZİNİ

A	: Alan (m^2)
c	: Özgül ısı ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$)
C^0	: Isıl kapasite ($\text{J m}^{-3} \text{K}^{-1}$), $c\rho$
C	: Boyutsuz ısıl kapasite, $C^0/(c_l\rho_l)$
C_{ks}	: C_k/C_s
D	: çap(m)
$\dot{E}$	: birim zamandaki toplam enerji (W)
f	: sıvı oranı
h	: duyulur entalpi (J m^{-3})konveksiyon (taşınım) katsayısı ($\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$)
H	: entalpi (J kg^{-1})
k	: ısıl iletkenlik ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$)
K	: boyutsuz ısıl iletkenlik, k/k_l
K_{ks}	: k_k/k_s
L	: boru boyu (m)
$\dot{m}$	: kütleli debi (kg s^{-1})
m	: kütle (kg)
N	: radyal koordinatlardaki grid sayısı
Nu	: Nusselt sayısı, hD_i/k_a
M	: eksenel koordinatlardaki grid sayısı
Pe	: Peclet sayısı, $RePr$
Pr	: Prandtl sayısı, ν_a/α_a
q	: birim zamandaki ısı transferi (W)
Q	: toplam enerji (J)
r	: radyal yön boyunca koordinat (m)
R	: boyutsuz radyal yön boyunca koordinat, r/D_i
R''	: ısıl direnç ($\text{m}^2 \text{K W}^{-1}$)
Re	: Reynolds sayısı, $4\dot{m}/\pi D_i\mu_a$

S^0	: kaynak terimi
S	: boyutsuz kaynak terim, $S^0 / \rho_s c_s (T_{ort}^0 - T_{in}^0)$
Ste	: Stefan sayısı
t	: zaman (s)
$\bar{T}$	: yığın sıcaklığı (K)
T	: sıcaklık (K)
T^*	: sıcaklık farkı, $T - T_{ort}$
$\dot{V}$	: hacimsel debi ($l \text{ min}^{-1}$)
V	: hacim (m^3)
x	: eksenel yön boyunca koordinat (m)
X	: boyutsuz eksenel yön boyunca koordinat, x/D_i
Q_d	: depolama kapasitesi (kWh)
FOM	: yararlılık ölçüsü
Q_T	: toplam soğutma yükü (kWh)
t_s	: şarj süresi (saat)
t_0	: zirveye başlama süresi (saat)
t_f	: zirvede kalma süresi (saat)
Q_0	: zirveye başladığı andaki depo yükü (kWh)
Q_f	: zirvedeki depo yükü (kWh)
Q_d	: depo yükü (kWh)

Yunan sembolleri

α	: ısı yayılım ($m^2 \text{ s}^{-1}$)
$2\delta T_{ort}$	: faz değişim sıcaklık aralığı (K)
$2\delta\theta$	: boyutsuz faz değişim sıcaklık aralığı $\delta T / (T_{ort} - T_{in})$
ΔH	: füzyon enerjisi (kJ kg^{-1})
ϕ	: yayılım özelliği

Γ	: yayılım katsayısı
θ	: boyutsuz sıcaklık , $(T - T_{ort})/(T_{ort} - T_{in})$
ν	: kinematik viskozite ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$)
μ	: dinamik viskozite (N s m^{-2})
ρ	: yoğunluk (kg m^{-3})
τ	: boyutsuz zaman , $\alpha_a t / D_i^2$

Kısaltmalar

a	: transfer akışkanı
i	: boru yüzeyindeki giriş koşulu
in	: giriş
$dış$	: ısı depolama tankının dış yüzeyi
s	: sıvı FDM
y	: yanal
m	: mushy faz veya erime noktası
o	: boru dış yüzeyi
k	: katı FDM
c	: depolama tankı cidar (yüzey)
w	: kontrol hacminin batı ara kesiti

BÖLÜM I

GİRİŞ

1.1. Giriş

Enerji modern yaşamın en önemli bölümünü oluşturmaktadır. Toplumsal yaşamın başlangıcından itibaren insanlık için, toplumun gelişmesi, sanayi üretimi vb. gibi birçok konuda vazgeçilmez olmuştur. Gelişen teknoloji ve artan enerji ihtiyacı ile birlikte geleneksel enerji ihtiyacını karşılamada yetersiz kalmakta ve yine bu enerji kaynakları doğal yaşam ve çevreye onarılamaz zararlar vermektedir. Fosil yakıt rezervleri enerji elde etmek için kullanılan başlıca kaynaklardan biridir, ancak ekonomi ve çevreye etkileri bakımından oldukça pahalıdır ve çevre kirliliğine neden olmaktadır. Aynı zamanda bu kaynaklar sınırlıdır ve yenilenemez bir enerji kaynağı oldukları için zamanla tükenecektir. Bu nedenle, alternatif enerji kaynaklarının araştırılmasının yanı sıra enerji korunum metotları yani enerjinin daha verimli kullanılması önemli bir hale gelmiştir.

Son zamanlarda binalarda ısı yükünün artmasının yanı sıra artan yaşam standartları ve iklimlerdeki değişikliklerin sonucu olarak ısıtma ve özellikle de soğutmaya olan talep oldukça hızlı bir şekilde artmaktadır ve bununla birlikte mekanların ısıtılması kadar soğutulması da insanların aradıkları özellikler arasına girmiştir. Soğutmaya olan talebin artmasının sonucu olarak sıcak yaz günlerinde harcanan elektrik maksimum seviyeye çıkmaktadır. Bu nedenle enerji depolama sistemleri büyük önem kazanmıştır.

Enerji depolama sistemlerinin temeli, enerjiyi fazla olduğu bir zamanda depolayarak gereksinim duyulan bir zamanda sunabilmektedir. Isı enerjisi depolamanın temeli ise, ısıtma-soğutma, erime-katılaşma ve buharlaşma-yoğuşmaya ilişkin fiziksel düzenleri kullanmaktadır (İlken, 1990).

Katı-sıvı faz değişimini içeren ısı enerjisi depolama sistemleri ikiye ayrılmaktadır. Bunlar duyulur ve gizli ısı enerji depolama sistemleridir. Duyulur ısı enerjisi depolama sistemi; depolama ortamındaki büyük sıcaklık değişimlerine bağlıdır. Bu sistemlerde ısı depolama ortamı yüksek ısı kapasiteye, uzun çevrim periyotları altında ısıl stabilizeye sahip olmalıdır. Aynı zamanda çevre dostudur, düşük maliyete sahiptir ve kullanılabilir. Bu sistemlerde depo ortamı sıvı veya katı olabilir. Yaygın olarak kullanılan sıvı depolama ortamları su, tuzlu su, petrol esaslı yağlar vb. ortamlar sıralanabilir. Yine de en çok kullanılan sıvı depolama ortamı sudur. Çünkü suyun ısı depolama kapasitesi yüksektir, maliyeti düşüktür ve kullanılabilirlik açısından en iyisidir. Yüksek buhar basıncına sahip olmasından dolayı genellikle düşük sıcaklık uygulamalarında kullanılmaktadır (Donma ve kaynama sıcaklıkları arasındaki sıcaklıklarda). Soğu depolama sistemlerinde en çok kullanılan katı depolama ortamları ise kayalar, metaller ve tuğlalardır. Katı malzemeler yüksek ve düşük sıcaklık uygulamalarında kullanılabilirler. Çünkü bu malzemelerde donma ve kaynama gibi durumlar söz konusu olmadığı için herhangi bir problem oluşturmaz. Sıvı depolama ortamları ile

kıyaslandıklarında ise daha düşük ısı depolama kapasitesine sahiptir, daha pahalıdır. Sadece genel uygulamalarda massive kayalar tercih edilebilir. Gizli ısı enerji depolama sistemlerinde ise, depolama ortamının faz değişimine bağlı olarak ısı depolanmaktadır. Bu sistem enerji talebini azaltma konusunda verimli sonuçlar vermektedir. Son zamanlar genel uygulamalarda sıklıkla kullanılmaktadır. Diğer enerji depolama metotları ile kıyaslandığında ise bu sistemlerin birçok avantajı vardır. Bunlar yüksek enerji/hacim oranına sahip olmaları ve küçük sıcaklık aralıklarında az faz değişim malzemesi ile bile büyük miktarda enerji depolayabilmeleridir. Faz değişimi problemi, katılaşma veya erime olayını içeren zamana bağlı ısı transferi problemidir. Uygulama alanları için buz üretimi, toprak ve yiyeceklerin donması-erimesi-çözülmesi, metalurjik işlemler, deniz ve göllerin kışın donması ve yazın erimesi olayı, gibi örnekler verilebilir. Faz değişim malzemesi (FDM) olarak katı-sıvı veya sıvı-buhar olarak kullanılabilir. Sıvı-buhar faz değişimi oldukça büyük enerji üretebilmesine karşın, faz değişim malzemesinde sabit hacimde yüksek hacim değişimi veya sabit hacimde yüksek basınç değişimi meydana geldiğinden yaygın olarak kullanılmamaktadır. Katı-sıvı faz değişim metodu diğer faz değişim metotlarından yaygın olarak kullanılmaktadır. Bunun sebebi ise düşük sıcaklık aralıklarında düşük hacimde bile yüksek ısı depolama kapasitesine sahip olmasıdır.

Çalışmanın, buz depolamalı sistemlerde ısı transfer yapılarının incelenmesi olarak seçilmesinin en büyük nedeni bu konuda az sayıda çalışma olmasının yanı sıra son yıllarda dünyanın en önemli sorunlarından biri haline gelen küresel ısınma ve bunu önlemenin tek yolu ise enerjinin tasarruflu bir şekilde kullanılmasıdır. Enerji tasarrufu, üretimde, konforumuzda ve iş gücümüzde herhangi bir azalma olmadan enerjiyi verimli kullanmak, israf etmemektir. Aynı işi daha az enerji kullanarak yapmaktır. Bu durumda aklımıza şu soru gelmektedir. Niçin enerjiyi verimli kullanmalıyız? Doğal kaynaklar hızla tükeniyor, çevre kirleniyor ve enerji için yüksek miktarda para ödüyoruz. Bunun sonucu olarak ekonomik üretim ana unsuru olan ve hayat kalitemizi iyileştiren enerjinin kullanımından vazgeçemeyeceğimize göre enerjiyi verimli kullanmalıyız.

Sonlu hacimler yöntemi ile yapılan bu çalışma şu şekilde özetlenebilir. Öncelikle tek silindir için uygun sınır koşullarında silindir üzerinde oluşan katılaşmanın zamana bağlı değişiminin literatürdeki çalışmalar ile karşılaştırması yapılmıştır. Bu model için literatürdeki sonuçlara yakınlık sağlayabilmek için uygun ağ yapısı belirlenmeye çalışılmıştır. Aynı zamanda depolama tankı içerisine tek silindir yerleştirilmesi durumu için sıcaklığın etkisi incelenmiştir. Daha sonra depolama tankı içerisine tek ve iki silindir yerleştirilmesi durumunda silindirler üzerinde oluşan katılaşmanın zamana bağlı değişimi incelenmiştir ve sonuçların zamana bağlı değişimi kıyaslanmıştır. Sınır koşulları olarak depolama tankı içerisindeki su sıcaklığı 4 °C ve silindirlerin yüzey sıcaklığı -10 °C olarak seçilmiştir. Depolama tankı yüzeylerinin dış ortama karşı yalıtılmış olduğu kabul edilmiştir.

Çalışmanın devamında depolama tankı içerisine yerleştirilen tek silindirin konumunun (alt bölgede, üst bölgede ve ortada) katılaşmaya etkileri incelenmiştir. Daha sonra depolama tankı içerisine yerleştirilen silindirlerin üçgen ve kare dizilişli yerleştirilmeleri durumunda oluşan

katılmanın zamana bağılı değişimi incelenmiştir ve son olarak silindirler arası yatay ve dikey mesafelerin değiştirilmesinin katılaşmaya etkileri incelenmiştir. Yapılan tüm çalışmalarda akışın laminar akış sınır şartında gerçekleştiği kabul edilmektedir.

1.2. Literatür Taraması

Bir önceki bölümden de anlaşılabilirliği gibi konunun öneminden dolayı buz depolamalı sistemlerde katılma ile günümüze kadar birçok araştırma yapılmıştır. Ancak aşağıda verilen araştırmalardan da görülebileceği gibi soğu depolama sistemleri üzerine sonlu hacimler yöntemi ile yapılan araştırmaların sayısı çok fazla değildir.

Sasaguchi K., Kusano K. Ve Viskanta R., (1996), dikdörtgensel bir soğu depolama tankı içerisine dikey olarak yerleştirilen tek ve iki silindir düzenlemesi için katı-sıvı faz değişimini deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Faz değişim malzemesi olarak su kullanılmıştır. Depolama tankı içerisindeki su sıcaklığı değiştirilerek ve silindir yüzey sıcaklığı ise sabit tutularak uygun sınır koşullarında silindirler üzerinde oluşan katılma zamana bağılı olarak incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar tek ve iki silindirli düzenlemeler için karşılaştırılmıştır.

Shih Y: C. ve Chou H., (2005), dikdörtgensel bir soğu depolama tankı içerisine dikey ve üçgen dizilişli olarak sırasıyla 4, 6 ve 8 silindirli düzenlemeler oluşturularak silindirler arası mesafelerin azaltılmasının katılaşmaya etkileri ortaya konulmuştur. Aynı zamanda depo içerisindeki su sıcaklığı değiştirilerek ve silindir yüzey sıcaklığı sabit tutularak silindirler üzerinde oluşan katılmanın zamana bağılı değişimini incelenmiştir.

Sasaguchi K., Kuwabara K., Kusano K. Ve Kitagawa H., (1998), dikdörtgensel bir soğu depolama tankı içerisine dikey olarak yerleştirilen silindirin depo içerisinde konumunun ve depo içerisindeki su sıcaklığının değiştirilmesinin katılaşmaya etkisini zamana bağılı olarak incelemişlerdir.

Scanlon T. J. ve Stickland M. T., (2004), çift faz değişimli (erime-katılma) ısı transferini sayısal ve deneysel olarak incelemişlerdir. Sayısal modelde katı-sıvı ara yüzeyini sabit ağ yapısı çözümünü kullanarak elde etmeye çalışmış ve bu durum literatürdeki iki saf madde için uygulanmıştır. Bunlar saf Laurik asitin % 95'inin erimesi ve saf suyun katılaşmasıdır. Korunum denklemleri sıcaklığın donma sıcaklığının altına düşüp düşmemesi durumunda çözülmüş ve aynı zamanda akışkanların özellikleri faz durumuna göre belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlardan kullanılan sayısal yöntemin erime ve donma için uygulanabilir olduğu ve deneysel verilerle makul bir uyum içerisinde olduğu görülmüştür.

Tanchev R. T., Mackenzie J. A., Scanlon T. J. ve Stickland M. T., (2005), doğal konveksiyonlu ve faz değişimli ısı transferi problemlerinin çözümü için hareketli ağ yapısı ele almışlardır. Hareketli ağ yapısı kullanılarak eleman sayısı sabit tutulmuş ve düğümle faz değişim yüzeyine doğru sıklaşmıştır. Enerji korunum denklemi, faz değişim gizli ısısını hesaba katan bir

yöntem kullanır. Elde edilen sonuçlar literatürdeki sonuçlarla iyi derecede uyum sağlamıştır. Bu tekniğin temel avantajı ise kesin sonuçlar elde etmek için daha az elemanın kullanılabilmesidir.

Bonacina C., Comini G., Fasano A. ve Primicerio M., (1973), çalışmalarında kullandıkları yöntem; küçük bir sıcaklık aralığı boyunca yüksek ısı kapasitesi ile gizli ısının etkisine bağlı olan analitik yaklaşım temeline dayanan kararlı faz değişim problemlerinin çözümünü içine alır. Elde edilen sonuçların mevcut analitik çözümlerle karşılaştırıldığında tatmin edici olduğu görülmüştür.

Lacroix M., (1993), Çalışmasında; faz değişim malzemesini kovanın içine yerleştirilerek ısı transfer akışkanının boruların içinden geçtiği boru-kovan tipi ısı değiştirgeci kullanılmıştır. Çalışma iki yatay silindirik ısı kaynağı çevresindeki faz değişim malzemesinin erime ve yeniden katılaşmasına neden olan doğal konveksiyonun çözümü için kullanılan bir sayısal yöntemi içermektedir. Sonuçlar yukarıdaki silindirden sıvının erimesi ve yeniden katılaşması süresince, faz yüzeyinin aşağıdaki silindirin yüzey sıcaklığı tarafından kuvvetli bir şekilde etkilendiğini göstermiştir.

Kamal İ., (2002), doğal konveksiyon sonucunda yatay bir silindir etrafındaki faz değişim malzemesinin erimesini sayısal olarak incelemiştir. Sayısal çözümde, enerji ve momentum denklemleri için kesin bir şema ve enerji dengesi için açık bir şema kullanılmıştır. Sayısal tahminler modelin ve sayısal yaklaşımın geçerliliğini sağlamak için mevcut sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

Casano G. ve Piva S., (2002), çalışmalarında ısı iletiminin ağır bastığı periyodik bir faz değişim sürecini içeren sayısal ve deneysel bir araştırma sunmuşlardır. Sayısal modelde önemsenmeyen ama deneyde kaçınılmaz olan, doğal konveksiyon ve ısı transferinin çevreye büyük etkileri olmasına rağmen sayısal tahminlerin deneysel değerlerde oldukça uyumlu olduğu görülmüştür.

Erek A. ve Acar M. A., (2003), iç yüzeyi sabit sıcaklıkta tutulan radyal kanatlı bir boru çevresinde faz değişimi ile enerji depolanmasını sayısal olarak incelemişlerdir. Sistemin çözümü, ısı transfer akışkanı, boru , kanat ve faz değişim malzemesi için elde edilen eşitliklerin bir bütün olarak çözülmesini içerir. Bunun için kontrol hacmi sonlu farklar yaklaşımı ve yarı kapalı çözücü (SIS algoritması) kullanılmıştır. Kanat parametreleri (kanat aralığı, kalınlığı, çapı) değiştirilerek ve farklı yüzey sıcaklıkları için sayısal çözümler elde edilmiştir. Her bir değişkenin depolanan enerjiye, katılma miktarına etkileri grafik olarak gösterilerek bunlarla ilgili bağıntılar elde edilmiştir.

Depolanan enerjiyi artırmak için kullanılan metotlardan biri kanatlı yüzeyler kullanılarak ısı transfer yüzey alanını arttırmaktır. Kanatlı yüzeye sahip ısı depolama sisteminin ısı transfer analizine ilişkin ilk temel çalışma Humhries ve Griggs tarafından gerçekleştirilmiştir. (Humhries ve Griggs., 1977). Abhat, ısı depolama sisteminde ısı transfer elemanı olarak kanatlı bir yüzeye sahip ısı borusunun kullanılmasını incelemiştir. (Abhat, 1978; Abhat, 1980). Dikdörtgen kesitteki kanatların erime ve katılma üzerine etkileri birçok sayısal ve deneysel çalışmada incelenmiştir. Bathelt ve Viskanta, yatay duran kanatlı bir boru etrafındaki katılma problemini deneysel olarak incelemişlerdir. (Bathelt ve Viskanta, 1981; Sparrow vd., 1981). Yapılan tüm çalışmalarda, faz

değişimi aynı çalışma şartlarında düz kanatsız boru kullanılmasıyla elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Eksenel kanatlara sahip eş merkezli iki silindir arasındaki katılma problemi teorik olarak incelenmiş ve katılma miktarı için kanat kalınlığı, kanat yüksekliği, kanat sayısı, Stefan ve Fourier sayısı cinsinden bir ifade bulunmuştur (Padmanabhan ve Khrishna., 1989). Diğer taraftan Sasaguchi ve Sakamoto aynı geometri için doğal taşınım etkisindeki erime problemini teorik olarak incelemişlerdir (Sasaguchi vd., 1988). Faz değişim malzemesinin kovan içinde ve ısı transfer akışkanının kanatlı boru içinden aktığı boru-kovan tipi ısı depolama sisteminin ısı analizi Lacroix tarafından gerçekleştirilmiştir (Lacroix, 1993). Zhang ve Faghri ise kanatların boru içinde olduğu gizli ısı depolama sistemindeki ısı transferini incelemişlerdir (Zhang ve Faghri., 1996).

BÖLÜM II

SOĞU DEPOLAMA

2.1. Giriş

Soğu depolama yöntemi son elli yıldır bilinen ve uygulanan bir yöntemdir. Bu yöntem iklimlendirme sisteminin ilk yatırım masraflarını azalttığı gibi, elektrik ihtiyacını da dengelemektedir. Son zamanlarda artık ısıtma kadar soğutma da insanların aradığı özelliklerden biri olmuştur. Soğutma sistemlerinin insanlara sağlamış olduğu konforun yanında, enerji tüketimlerinin yüksek olması, bu sistemlerin dezavantajıdır. Özellikle ülkemizde elektrik birim fiyatlarına kısa zaman aralıklarıyla yapılan zamlar işletmelerin soğutma sistemi tasarım ve seçimi konularında daha hassas yaklaşımlarını gerektirmektedir.

Binaların iklimlendirilmesi amacıyla soğu depolama uygulamalarını depolama ortamı, birincil enerji kaynağı ve depolama teknolojisine göre tanımlamak mümkündür. En yaygın olarak kullanılan depolama ortamları su, buz, ötektik tuzlar ve benzeri faz değiştiren maddelerdir. Bu ortamların kullanımında birim hacim başına depolanan enerji miktarı ve soğunun depolandığı sıcaklık önemli rol oynar. Soğu eldesi için kullanılan birincil enerji kaynağı genellikle elektrik olmak üzere, doğal gaz, buhar veya atık ısı olabilir. Depolama teknolojilerini ise soğutulmuş su depoları, buz toplama, boru üzerinde buz, serpantin üzerinde buz ve kapsüllenmiş depolama olarak gruplandırmak mümkündür.

Dünyada ve ülkemizde elektrik tüketim fiyatları günün saatlerine göre değişiklikler göstermektedir. Elektrik, soğutma yükünün maksimum olduğu gündüz saatlerinde pahalı, soğutma ekipmanlarının az, hatta hiç kullanılmadığı zaman diliminde ise ucuzdur. Bu durum soğutma için gerekli olan enerjinin, elektriğin ucuz olduğu saatlerde depolanarak, pahalı olduğu saatlerde kullanılmasını gündeme getirmiştir. Bu şekilde çalışan bir sistemde, soğutma yükü, maksimum soğutma yüküne göre değil daha düşük bir yüke göre seçileceğinden, soğutma elemanlarının boyutları ve ilk yatırım maliyetleri daha az olacaktır. (İlken, 1998)

2.2. Soğu Depolamalı Soğutma Sistemleri

Endüstriyel veya ticari işletmelerde soğutma sistemlerinin yükü soğutma gereksiniminin maksimum olduğu, işletmelerin dolu, dolayısıyla cihazların çalıştığı, aydınlatmaların kullanıldığı ve dış hava sıcaklığının maksimum olduğu gündüz periyodu dikkate alınarak bulunur. Soğutmada kullanılacak soğutma sistemi ekipmanları bu maksimum yükü karşılayacak şekilde seçilir. Bu kriterlere göre seçilmiş cihazlar, yükün az olduğu saatlerde kısmi yükte çalışır. İşletmenin kapalı olduğu saatlerde ise hiç çalışmaz, atıl olarak kalır.

Soğu depolamalı sistemlerde, soğunun gece depolanıp gündüz kullanılması işletme giderlerinin önemli ölçüde azalması demektir. Soğu depolama sistemleri su soğutucusu ile deponun birlikte optimum kullanımlarıyla soğutma yükünde esneklik sağlayarak, soğutma sistemlerinin maksimum verimde çalışmasını sağlarlar.

Mevcut bir sistemin soğutma kapasitesi, soğu deposu ile deposuz bir sistemin ilavesine göre çok daha ucuza artırılabilir. Soğu su depolama tankı, mevcut sistemin soğutma kapasitesini yeni soğutuculara ve dolayısıyla ek bir maliyete gerek duyulmadan artırır. Böyle bir sistemde mevcut su soğutucular, atıl kaldıkları saatlerde ek soğutma yükünü karşılayarak depolayacak şekilde çalışır.

Birçok Avrupa ülkesinde ve Amerika’da elektrik kullanım ücretleri günün saatlerine göre değişiklik göstermektedir. Elektriğin pahalı olduğu saatler, binalar için gerekli soğutma yüklerinin maksimum olduğu gündüz saatleri, ucuz olduğu saatler ise, konvansiyonel bir sistem için soğutma ekipmanlarının az kullanıldığı hatta hiç kullanılmadığı diğer saatlerdir. Bu durum, soğu enerjisinin, elektriğin ucuz olduğu saatlerde depolanarak, gündüz saatlerinde kullanılması fikrini ortaya çıkarmıştır. Bu şekilde çalışan bir sistem, maksimum yüke göre değil, ortalama yüke göre seçileceğinden sistem bileşenleri de küçük olacak ve ilk yatırım safhasında dahi maliyet azalması oluşabilecektir. (Soğu deposunun getireceği ilave yatırım masrafı, bazen bu durumun gerçekleşmesini engelleyebilir).

Soğu depolu ve deposuz sistemler arasındaki temel fark, depolu sistemlerde soğu enerjisinin üretilmesi kullanılması zamanlarının birbirinden ayrılmasıdır. Bu ayırım, yukarıda değinildiği gibi elektrik tüketim ücretlerinde azalma sağlar. Bunun yanı sıra, soğu depolamalı bir sistemde, daha düşük bir yoğunlaşma sıcaklığında ve daha sabit bir yükü karşılamak için çalışacak olmalarından dolayı, su soğutucuların performans katsayısı artar.

Yukarıda çerçevesi çizilen prensipler ışığında, *Bir soğu deposu kullanıcıya ne sağlar?* Aşağıda detaylandırılan yanıtları vermek mümkündür.

Çoğu kez ilk yatırım maliyetini düşürür.

Birçok uygulamada, soğu depolamalı sistemler, deposuz konvansiyonel sistemlerden daha ucuza kurulabilir. Çünkü soğu depolamalı bir sitemde daha küçük su soğutucuları ve yardımcı ekipmanlar yeterlidir. Su soğutucular, soğutma kuleleri, pompalar, fanlar ve boru/kanal ebatlarındaki küçülmelerden sağlanan kazanç, gereksinim duyulan depolama tankının maliyetini fazlasıyla geçebilir. Bazı durumlarda depolama tankı, yangın söndürme sisteminin suyunu temin eden bir depo görevini de üstlenerek, bunun için ayrı bir sistem kurulması maliyetini de ortadan kaldırabilir.

Henüz çizim aşamasında olan binalarda, soğu deposu kullanımına karar verilmesi, daha geniş alanların yaratılmasına olanak sağlayabilir. Hatta hava dağıtım sistemindeki fan ve kanalların boyutundaki küçülmelerin daha küçük ana dağıtım bölgelerini yeterli kılacağı döşemeden döşemeye olan uzaklıkların azalabileceği, bunun inşa maliyetlerini düşüreceği ve bazı yüksek binalarda, bina yüksekliğini değiştirmeden ilave kat kazanılabileceği vurgulanmıştır.

İşletme giderlerini azaltır.

Bir soğu deposunun esas yararı, işletme giderlerini önemli ölçüde azaltmasıdır. Elektrik ücretlerinin, soğutma talebinin en fazla olduğu gündüz saatlerinde fazla, gece saatlerinde ise ucuz olduğu yerlerde, soğunun depolanıp gündüz kullanılması bu tasarrufu sağlar.

Elektrik donanımının boyutlarını küçültür.

Daha küçük soğutma ekipmanlarının kullanımı, soğutma gücünü sağlayan transformatörlerin ve elektrik dağıtım sisteminin boyutlarının küçülmesi sonucunu doğurur. Bu, hem yeni kurulan bir sistem için, hem de tam kapasitesine yakın çalışan mevcut bir sistem için önemli ölçüde ekonomi demektir.

İşletme esnekliğini artırır.

Soğu depolama sistemleri, herhangi bir zamanda su soğutucu ve deponun birlikte optimum kullanımlarıyla soğutma yükünü karşılamada esneklik sağlar. Bu esneklik, soğutma sistemlerinin mevsim ne olursa olsun maksimum verimde çalışmasını mümkün kılar.

Mevcut bir sistemin kapasitesini büyütür.

Mevcut bir sistemin soğutma kapasitesi, soğu deposu integrasyonu ile konvansiyonel deposuz bir sistemin ilavesine göre çok daha ucuza artırılabilir. Soğuk su depolama tankı, mevcut sistemin soğutma kapasitesini yeni soğutuculara ve dolayısı ile ek maliyete gerek duyulmadan artırır. Böyle bir sistemde mevcut su soğutucuları, atıl kaldıkları saatlerde ek soğutma yükünü karşılayacak şekilde depo için çalışırlar.

Bir yapıda mevcut kanal ve boru sisteminin soğutma kapasitesini de, soğu depolama kullanarak arttırmak mümkündür. Soğuk su ve havanın mevcut dağıtım sisteminde daha düşük sıcaklıkta dolaştırılması, daha büyük yüklerin karşılanabileceği anlamına gelir.

Yukarıda açıklanan getiriler, birçok binada soğu depolamayı çok cazip kılmaktadır. Her soğu depolama projesinde, bu açıklamaların tamamı kazanç hanesine yazılmasa bile, yapı sahibi ve mühendisler bilmelidir ki, tecrübelerle sabit tavsiyelere uyulduğunda, bir soğu depolama sistemini kazandıracağı çok şey vardır.

Bu çerçevede; bina sahipleri ve tasarımcılar aşağıda sorulan sorulardan bir ya da birkaçına Evet yanıtını verebiliyorlar ise, bir soğu depolama sistemi seçimini dikkate almaları ve önemsemeleri gerektiği rahatlıkla söylenebilir.

Yapının maksimum soğutma yükü, ortalama yükten önemli ölçüde yüksek mi?

Özellikle ofis binalarının soğutma yükleri, 24 saatlik ortalama yükten iki-üç kat yüksek bir değerde maksimum olur. Bazı endüstriyel işlemlere ait yük profillerinde de benzer durumlarla

karşılaşılabılır. Örneğin; süt teknolojisinde, belirli miktar sütü soğutmak için sistem tam kapasite ile bir süre çalıştırılır, daha sonra ise çoğu kez kapatılır. Bir soğu depolama sistemi ise; düşük yük periyodu boyunca soğu üretir ve daha sonra tepe yükleri bununla karşılar. Maksimum yükün ortalama yüke oranı arttıkça, su soğutucu kapasitesinde yapılabilecek indirimde o ölçüde artar.

Elektrik kullanım ücretlerinde, tepe yüklerin oluştuğu saatlerle diğer saatler arasında önemli ölçüde farklılık var mı?

Bir soğu depolama sisteminde soğutucuların esas çalışma süresi, tepe yüklerin oluştuğu saatler dışında kalan zaman dilimini kapsadığından tüketim ücretlerinde önemli bir azalma meydana gelecektir. Tepe yüklerinin yer aldığı zaman diliminde tüketilen elektrik enerjisi ise konvansiyonel bir sisteme göre daha az olacaktır.

Mevcut bir soğutma sisteminin büyütülmesi mi düşünülüyor?

Bir yapıya eklemeler yapılması gündemde ise veya yapı sistemlerinin yeniden modellenmesi söz konusu ise, ilave soğu yükleri nedeni ile mevcut soğutma sisteminin büyütülmesi gerekeceği aşikârdır. Bu durumda, sisteme bir soğu deposu entegre edilerek, mevcut soğutucuların, yükün az olduğu zamanlarda bu depoya çalışması sağlanabilir. Özellikle büyük sistemlerde veya çok binalı, kampus gibi yerleşimlerde, bir soğu deposu eklenme maliyeti, oluşan ek yükleri karşılamak için yeni su soğutucular edinme maliyetinden çok daha düşük olabilir.

Soğu depolama amacı ile kullanılacak elde mevcut bir tank var mı?

Özellikle endüstriyel uygulamaları içeren bazı durumlarda önceden başka amaçlarla yapılmış tanklar, soğu depolama tankı olarak kullanılabilir. Özellikle yangına karşı su depolama amacı ile üretilmiş tanklar küçük birkaç değişiklik ile soğu depolama işlevini de yerine getirecek şekilde çift amaçlı bir hale sokulabilir. Bu durumda; ilk yatırım esnasında , tank imalatından dolayı olacak maliyet artışı da ortadan kalkmış olur.

Soğutma ekipmanlarının büyük bir kısmı ithalat yoluyla mı sağlanıyor?

Su soğutma cihazları ithal ediliyorsa, fiyatlarının da yüksek olacağı aşikârdır. Bu durumda soğu deposu entegresi ile su soğutucu kapasitesinde oluşacak düşmenin ilk yatırım maliyetinde meydana getireceği azalma, çoğunlukla ek depo maliyetinden daha fazla olacaktır.

Düşük sıcaklıklı bir hava dağıtım sisteminin kullanılması düşünülüyor mu?

Özellikle buzun kullanıldığı soğu depolama teknolojilerinde, su ve hava sıcaklıkları konvansiyonel sistemlere göre daha düşük olmaktadır. Bu da; pompaların ve dağıtım sistemindeki

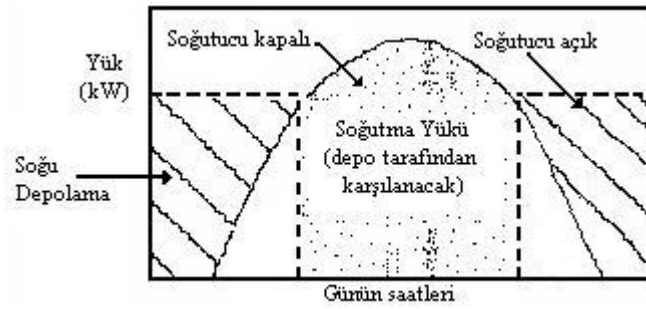
boru ve kanalların boyutlarında önemli küçülmeler yaratır. $6^{\circ}\text{C} - 9^{\circ}\text{C}$ arasında çalışan soğuk hava dağıtım sistemlerinin kullanıcıya sağladığı büyük yararlar vardır; bu şekilde, hava dağıtım sisteminin maliyeti azalır, ısı konfor koşulları ve iç hava kalitesi sağlanmış olur. Soğutma yüklerinin, mevcut dağıtım sisteminin kapasitesini geçtiği yapılarda, artan yükler daha soğuk hava dağıtımı ile karşılanabilir. Bunun için de; çoğunlukla buz enerji depolama maddesi olarak kullanan depolama sistemleri tercih edilir. Bu şekilde, düşük sıcaklıklı deposuz su soğutucuların temini ve kullanımına gerek kalmaz.

2.3. İşletme Şekillerine Göre Soğu Depolama Sistemleri

Çıkarılan soğutma yükü profiline göre, depolamalı sistemin nasıl işletileceğine karar verilebilir. Soğu depolamalı bir sistem genel olarak "tam depolama" veya "kısmi depolama" olmak üzere iki değişik şekilde tasarlanabilir. Bunun yanı sıra uygulamaya göre değişebilen stratejiler de mevcuttur. Her iki işletme yönteminde de soğutma yükü profiline bakılarak soğutma yükünün tamamının veya belirli bir bölümünün depodan sağlanacağı periyoda ("on-peak") karar verilir.

2.3.1. Tam Depolama

Tam depolamada, "on-peak" süresince soğutma yükünün tamamı depodan karşılanır. Bu sürede su soğutma ünitesi kapalıdır. Bu sürenin dışında ise su soğutma ünitesi depolanan suyu soğutmak ve/veya doğrudan soğutma yükünü karşılamak üzere çalışır. Böyle bir çalışma durumu Şekil 2.1.'de gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Tam depolama.

Bu işleme göre su soğutucular, çalıştıkları dönemlerde daima tam kapasite çalışırlar. Kesikli bir çalışma söz konusu olduğunda, görece olarak yüksek soğutucu ve depo kapasiteleri gereklidir. Maksimum yükü içeren zaman diliminde elektrik ücretlerinin yüksek olduğu veya bu zaman diliminin kısa olduğu durumlarda bu işletim yöntemi tercih edilir. İdeal çalışan bir sistem için Şekil 2.1.'deki gibi ters taralı alanlar birbirine eşit olmalıdır. Tam depolama durumunda sistemin kontrolü daha basittir.

2.3.2. Kısmi Depolama

Kısmi depolamalı bir sistemde, maksimum yükün olduğu dönemde soğutma yükünün bir kısmı depodan, bir kısmı ise soğutma grubundan karşılanır. Bu işletim iki farklı şekilde gerçekleşebilir.

— Yük seviyelemeli kısmi depolama

Bu işletim sistemine göre, soğutma grubu-tasarım günü için bütün gün tam kapasiteyle çalışır. Yük soğutucu kapasitesinin altına düştüğünde, soğutucu depolama amacıyla kullanılır. Yük kapasiteyi geçtiğinde ise gerekli soğu fazlası depodan karşılanır (Şekil 2.2.).

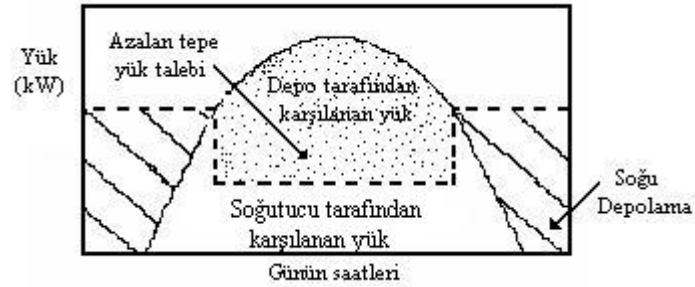


Şekil 2.2. Yük Seviyelemeli Kısmi Depolama.

Bu işletim yönteminin kullanımı, soğutma kapasitesi ve depo büyüklüğünü minimize eder. Tercih edildiği durum ise, tepe soğutma yükünün ortalama yükten çok fazla olduğu uygulamalardır.

— Talep belirlemeli kısmi depolama

Bu yöntemde soğutma ekipmanları, maksimum yükü içeren periyotta, talebin belirlediği düşük bir kapasiteyle çalışırlar. Bazı durumlarda, bu ekipmanların kontrolü, elektrik sayacına göre ve belli bir seviyenin altında kalınması prensibine göre gerçekleştirilir. Böyle durumlarda bina kontrol sistemine ek cihazlara gerek vardır. Bu yöntemin tercih edildiği durumlarda, maksimum yük dışı periyotta sistemin tamamı soğunun depolanması için çalışır (Şekil 2.3.).

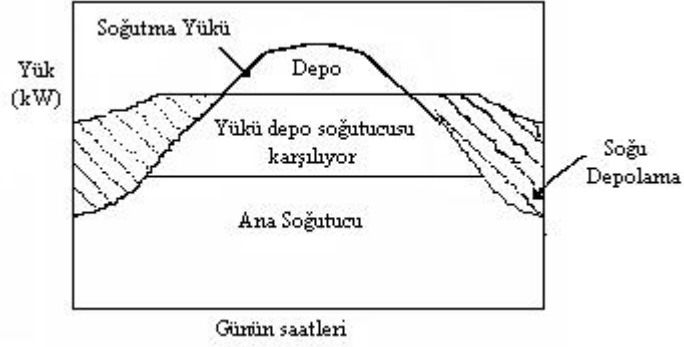


Şekil 2.3. Talep Belirlemeli Kısmi Depolama.

2.3.3. Uygulamaya göre değişebilen farklı stratejiler

Yukarıda tanımlanan sistemler; soğutma gereksiniminin belli bir periyot boyunca gerektiği, ancak bu süre dışında herhangi bir yükün olmadığı (veya az olduğu) durumlar için uygundur. Ancak bazı uygulamalarda bütün gün boyunca belli bir soğutma talebinin olması söz konusudur. Çoğunlukla daha az eğimli yük profillerinin olduğu bu gibi uygulamalarda birden fazla soğutucuyu bir enerji deposuyla birlikte ve belirli bir düzen içerisinde kullanarak tasarruf sağlamak mümkündür. Bu işlemler, gerek tam depolama, gerekse kısmi depolama yöntemlerinin kapsadığı prensiplere uygun olarak gerçekleştirilebilir (İlken, 1998).

Şekil 2.4.'de yer alan uygulamada bir ana soğutucu, devamlı ve belirli bir soğu yükünü karşılamak üzere tam kapasite ile çalışmaktadır. Daha küçük boyutlu bir soğutucu ise kimi zaman fazla yükü karşılamak, kimi zaman ise soğuyu depolamak amacıyla kullanılmaktadır.



Şekil 2.4. Ana soğutuculu bir soğu depolama sistemi

Birden fazla su soğutucuyu belirli bir düzene göre çalıştırmak ta çoğu kez işletimde avantaj sağlar. Bazı kısmi depolamalı sistemlerde; soğuyu depolamak için ayrı, yükü direkt olarak karşılamak için ise ayrı bir su soğutucu kullanılır. Bazı durumlarda da, gece yarısı yükleri ayrı bir su soğutucu tarafından karşılanırken, bir diğeri gündüz periyodu için soğu depolama amacıyla kullanılabilir.

Soğu depolama sistemleri çoğunlukla günlük periyotlara göre tasarlanır. Bir başka deyişle 24 saatlik bir dönem boyunca depolanan enerji aynı 24 saat içerisinde tüketilir ve bir sonraki gün aynı çevrim yeniden başlar. Ancak bazı uygulamalarda sistemi farklı periyotlarla çalıştırmak gerekebilir. Eğer tepe yükler, haftanın belirli veya birkaç gününde oluşuyorsa bu dağılımı dikkate alan haftalık periyotlu bir depolama-geri kazanım çevrimi uygun düşebilir. Örneğin bir kilisede tepe yükler sadece Pazar günü oluşur, diğer günlerde ise soğutma yükü oldukça azalır. Bir spor salonu veya eğlence merkezi içinde benzer şeyler söylenebilir. Yüklerin bu tesisler için hafta sonlarında daha fazla olacağı, hafta için günlerde ise azalacağı aşikârdır. Hatta ofis binaları için bile benzer bir çalışma çevriminin daha uygun olabileceği söylenebilir.

Haftalık periyotlu sistemlerde sürenin çoğu depolama boyunca harcanacağından, bu tür bir periyot seçimi, çoğu kez depolama maliyetinin direkt soğutma maliyetinden daha ekonomik olduğu durumlarda tercih edilir.

Yüklerin tasarım değerlerinin altına düştüğü dönemlerde, soğu depolama sistemlerinin işletimlerini optimize etmek amacıyla bazı stratejiler uygulanabilir. Örneğin bazı kısmi depolama sistemleri, yılın daha soğuk aylarında tam depolama stratejisine göre çalıştırılabilir. Veya bazı tam depolama sistemlerinde, depolama miktarı bir gün sonranın tahmin edilen yük değerine göre ayarlanabilir.

Depolanan enerjinin maliyetinin direkt soğutma maliyetinden yüksek olduğu bazı durumlarda; su soğutucuyu mümkün olduğunca yükü karşılamak için kullanan, depoyu ise yük soğutucunun kapasitesini aştığında devreye alan soğutucu öncelikli bir strateji izlenebilir. Bunun aksine, depolanan enerji maliyeti direkt soğutma maliyetinden düşük ise; yükü mümkün olduğunca depodan karşılayan, soğutucuyu ise kapasite aşıldığında devreye alan depo öncelikli bir strateji izlemek mümkündür.

Soğutucu öncelikli bir sistemin kontrolü genellikle basittir. Yük, soğutucunun kapasitesini geçtiğinde çıkış sıcaklığı yükselecektir. Depo öncesine konulan bir sıcaklık sensörü bu durum karşısında uygun vanaları açarak veya akışın bir kısmının üzerinden olmasını sağlayacak pompaları çalıştırarak, depodan soğunun geri kazanımını ve sistem çıkışında istenilen sıcaklık değerinin yakalanmasını temin edebilir.

Depo öncelikle bir sistemin kontrolü ise daha karmaşıktır. Burada amaç, depolanan soğuyu maksimize etmek olduğundan, yüksek yükleri karşılamada soğutucuya destek olacak yeterli soğunun var olup olmadığını kontrol etmek gerekir.

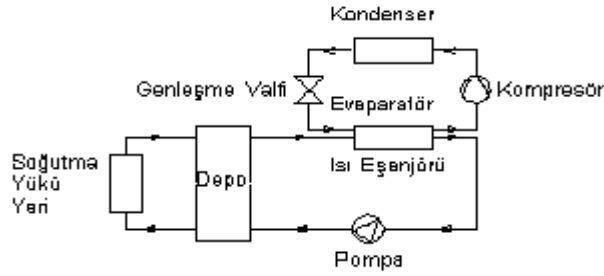
2.4. Soğu Depolama Sistemlerine Ait Temel Prensipler

2.4.1. Soğu depolayıcılar

En yaygın kullanılan depolama ortamları su, buz ve faz değıştiren ötektik tuzlardır. Bu ortamların kullanımında birim hacim başına depolanan enerji miktarı ve soğunun depolandığı sıcaklık önemli rol oynar. Bu çalışmada özellikle su ve buz depolama yöntemleri ele alınmıştır.

2.4.1.1. Su depolamalı sistemler

Şekil 2.5.'de su depolamalı sistem şematik olarak gösterilmiştir. Böyle bir sistemde şarj süresince depodan alınan su, bir su soğutma ünitesinden geçirilerek istenilen sıcaklığa kadar soğutulur. Kullanımda ise soğutulmuş su depodan alınarak iklimlendirilecek ortama götürülür ve daha sonra tekrar depoya döner.



Şekil 2.5. Su Depolamalı Sistem

1980'lerden önce kurulan soğu depolama sistemlerin büyük bir bölümünü su depolamalı sistemler oluşturmuştur. Su kullanılmasının en çekici yönü, bu sistemlerin alışlagelmiş su soğutucu sistemleri ve dağıtım şebekeleri (boru ve kanal) ile uyum içerisinde olmaları, yeni soğutma sistemlerine ve dağıtım şebekesine ihtiyaç duyulmamasıdır. Bu nokta tesisin kurulması açısından olduğu kadar soğu depolama için özel yetiştirilmiş operatörlere gereksinim duyulmaması açısından da önemlidir. Su depolama sistemlerinin avantajları şu şekilde özetlenebilir.

- Standart su soğutucularını yüksek bir etkinlikle kullanırlar. Özel ekipmana ihtiyaçları yoktur.
- Mevcut alışlagelmiş sistemin kapasitesini artırmak için idealdir.
- Depo hacminin artmasıyla daha ekonomik hale gelirler. İlk yatırım maliyeti 7000 kWh (veya 760 m³) kapasitede alışlagelmiş sistemlerle yarışabilir hale gelir.
- Depo aynı zamanda yangın için su deposu görevini görebilir.
- Denenmiş olup güvenilir bir sistemdir.
- Hem sıcak hem de soğuk suyu depolayacak şekilde düzenlenebilir.

Bu avantajlarının yanında su depolama ve depo hacminin büyük olması, yer bulma ve estetik açıdan bazen problemlere de yol açabilir.

Depolama ortamı olarak suyun kullanılmasında, suyun duyulur ısısından (4.184 kJ/kg K) faydalanılır. Depoda depolanan soğu enerjisi, depolanan suyun sıcaklığı ile iklimlendirilecek ortamdan dönen suyun sıcaklıkları arasındaki farka (T_s) bağlıdır. İyi tasarlanmış bir sistemde, sıcaklık farkı artırılarak depolanan soğu enerjisi artırılabilir.

Soğutulmuş su genellikle 4 ile 7 °C arasında değişen sıcaklıklarda depolanır. Bu sıcaklıklar pratikte kullanılan birçok su soğutucu sistemler ve dağıtma şebekeleri ile uyum içerisinde.

Depo Hacmi

İstenilen miktarda soğuyu depolayabilmek için gerekli depo hacmi, depodan iklimlendirilecek ortama gönderilen ve ortamdan dönen suyun sıcaklıkları arasındaki farka (T_s) ve deponun etkinliğine bağlıdır. Buradaki depo etkinliği, deponun kullanılabilir bir sıcaklıkta depolanan soğuyu deşarj etmedeki performansdır ve yararlılık ölçüsü (figure of merit =FOM) olarak ifade edilir.

Bir soğuk su deposunun performansı için iki ayrı parametre tanımlamak mümkündür. Bunlardan birisi *depolama etkinliği* olup, "deşarjda depodan çekilen enerjinin şarjda depoya verilen enerjiye oranı olarak" tanımlanır. Ancak depolama etkinliği karışma veya ısıl iletimden dolayı kullanılabilir enerjide meydana gelen azalmayı dikkate almadığından deponun performansını belirlemek için yeterli bir parametre değildir.

Yararlılık ölçüsü (FOM) ise deşarjda depodan çekilen soğunun şarj işlemi sonunda depoda mevcut teorik soğuya oranıdır. Teorik soğu, şarjda suyun giriş sıcaklığı ve deşarjda ılık suyun depoya dönüş sıcaklığı esas alınarak hesaplanır. FOM, karışma veya ısıl iletimden dolayı kullanılabilir enerjide meydana gelen azalmayı da dikkate alır.

Sıcaklık farkı ve FOM'un belirlenmesinden sonra gerekli depo hacmi,

$$V(m^3)=0,862 \frac{Q_d[kWh]}{\Delta T_s.FOM} \quad (1.1)$$

eşitliğiyle hesaplanabilir.

Bu bağıntıdan da görülebileceği gibi belirli bir kapasitede, sıcaklık farkı (T_s) ve FOM artırılarak depo hacmi minimum tutulabilir. Sıcaklık farkı ise iklimlendirilen ortamdan geri dönen ılık suyun sıcaklığı artırılarak ve depolanan suyun sıcaklığı düşük tutularak artırılabilir. Ender olarak 17 °C yi bulmakla birlikte, pratikte sıcaklık farkı (T_s) genellikle 11 °C olacak şekilde sistem tasarlanır.

Soğuk su ile ılık suyun karışmasını önlemek için uygulanan yöntemler aşağıda ele alınmıştır. Bu ayırıştırma yöntemlerinden katmanlaştırmının uygulanması ile %85 ile % 90 mertebesinde FOM elde etmek mümkündür.

(1.1) nolu eşitliğe göre, 11°C'lik sıcaklık farkında % 90 FOM ile, birim kWh ılık depolama kapasitesi için gerekli depo hacmi 0.087 m³'tür. Eğer sistem, sıcaklık farkı 17 °C olacak şekilde tasarlanırsa bu değer 0.056 m³ çıkar.

Belirtilen bu depo hacmi, buz depolamalı sistemlere göre 3 ile 7 kat ve faz değiştiren ötektik tuzlara göre 2 ile 3 kat daha büyüktür. Bu büyük hacim gereksinimi yer ve estetik açıdan bazı problemlere yol açabilmektedir. Ancak su depolamalı sistemlerde depo, diğerlerine göre daha yüksek imal edilebileceğinden depo için gerekli alan diğer sistemlerle hemen hemen aynıdır. Eğer yer mevcut ise su depolamalı sistemler büyük miktarlarda soğu depolanması için ekonomik bir yöntem olabilir.

Soğutma yükünün 7000 kWh'ten daha büyük veya depo hacminin 760 m³ ten daha büyük olması gereken uygulamalarda en ekonomik soğu depolama sistemi su depolama sistemidir. Tank hacminin artmasıyla depo yüzey alanının depo hacmine oranı azaldığından depolanan birim soğu için maliyet de azalmaktadır. Pratikte uygulanan bazı sistemlerde depo hacmi 3800 m³ hatta 19000 m³ mertebesindedir.

Birden fazla tanka veya aynı tank içerisinde bölmelere sahip su depolamalı sistemlerde aynı anda sıcak ve soğuk su depolanabilir. Örneğin tanklardan birisi kış aylarında binanın ısıtılması için geri kazanılmış ısı ile ısıtılmış sıcak suyu depolarken, aynı anda diğer tank binanın iç (merkez) kısımlarının soğutulması için gerekli soğuk suyu depolayabilir.

Ayrıştırma Yöntemleri

Su soğutmalı sistem, depo içerisinde şarj edilmiş soğutulmuş su ile ılık geri dönüş suyu arasında bir ısıl ayrışma sağlama prensibine dayanır. Bu ayrışma değişik şekillerde gerçekleştirilebilir:

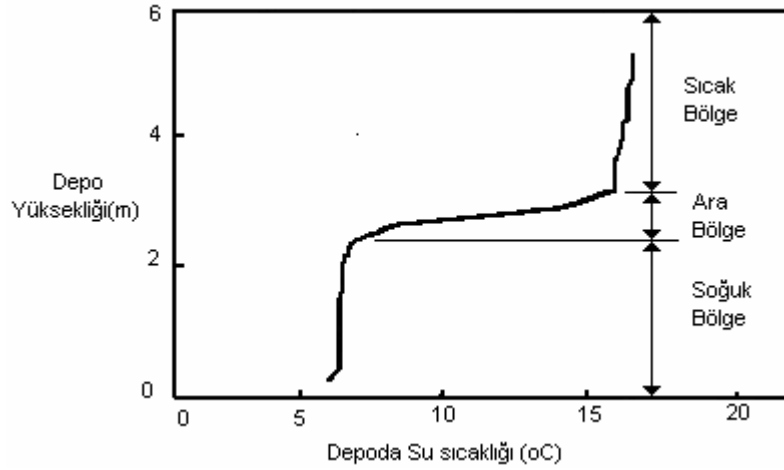
- Katmanlaştırma
- Çoklu Depo
- Membran ve Diyafram
- Labirent ve Engel

Katmanlaştırma: Soğutulmuş su depolama için katmanlaştırma en basit, en etkili ve maliyet açısından en avantajlı sistemdir. Bazı uygulamalarda diğer sistemlerde kullanılmış olmalarına rağmen, pratikte en yaygın olarak kullanılan sistem katmanlaştırılmış depolardır. Katmanlaştırma suyun yoğunluğunun sıcaklıkla değişmesi prensibine dayanır. Bilindiği gibi sıcaklık düştükçe suyun yoğunluğu artar. 4 °C de bir maksimuma ulaştıktan sonra donuncaya kadar azalır. Bu sebepten dolayı 4 ile 6 °C civarındaki soğuk su deponun tabanında, geri dönen ılık (10 – 18 °C) su ise tavanında toplanır. İyi tasarlanmış katmanlaştırmalı bir depoda, depolanan soğunun % 85-90'ından soğutma amacıyla faydalanılabilir. Bu oran diğer ayrıştırma yöntemleriyle aynı mertebede hatta bazılarında daha iyidir.

İyi tasarlanmış katmanlaştırmalı bir depoda, soğuk su ile sıcak su ara bölge adı verilen bir bölge oluşturularak birbirlerinden ayrılırlar

Kararlı ve keskin bir ara bölge, deponun alt bölgesindeki soğuk su ile üst bölgesindeki ılık suyun birbirine karışmasını önler.

Şarj süresince, su soğutma cihazında soğutulan su, difüzörler aracılığıyla depoya alttan girer ve ılık su üstten depoyu terk eder. Difüzörlerin tasarımı hakkında Wildin gerekli bilgileri vermiştir. Depo içerisinde soğuk su hacminin artmasıyla ara bölge yukarıya doğru hareket eder. Belirli bir süre sonra depo içerisindeki suyun sıcaklığı her noktada eşitlenir. Deşarj süresince ise soğuk su depodan alttan çekilir ve iklimlendirilen ortamdan dönen ılık su üstten depoya döner. Sıcaklığın yükseklikle değişimi Şekil 2.6.'da verilmiştir. Ara bölge 0.5-1 m civarındadır.



Şekil 2.6. Depoda katmanlaştırma.

Diğer sistemlerde olduğu gibi katmanlaştırmalı soğuk su depolarında da, T_s 'nin artmasıyla soğu depolama kapasitesi artar. Ayrıca T_s 'nin büyük tutulmasıyla soğuk ve ılık su arasındaki yoğunluk farkı artacağından katmanlaştırma iyileşir. T_s 'nin büyük olmasının bir diğer avantajı ise, depoya giren ve depodan çıkan su debilerinin az olması dolayısıyla katmanlaştırma yine olumlu yönde etkilenir.

Katmanlaştırmalı depo içerisinde ayrışmanın sağlanabilmesi için serbest konveksiyon, karışma ve ısı iletimi kontrol edilmelidir. Depo içerisinde karışmanın olmaması için, giriş ve çıkışlarda su depoya difüzörler yardımıyla verilir. Uygun difüzörler yardımıyla türbülans önlenir ve ara bölge artırılmaz.

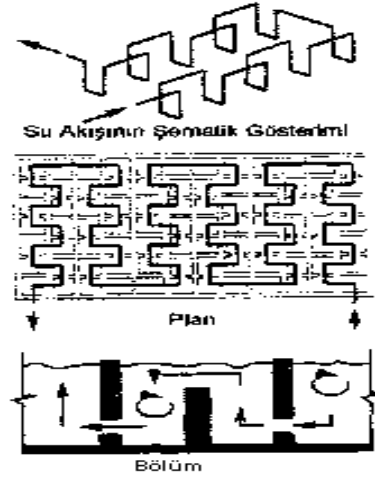
Çoklu depo: Bu sistemde birden fazla depo kullanılır ve soğuk su ile iklimlendirilen ortamdan dönen ılık su ayrı depolarda saklanır. Böylelikle hemen tam bir ayrışma sağlanır ve soğutulacak ortama daima aynı sıcaklıkta su gitmesi temin edilmiş olur. Bu sistemin bir diğer avantajı ise sistem çalışırken depolardan bazılarının bakım için devre dışı bırakılabilmesidir.

Bu sistemde şarjın başlangıcında depolardan birisi boştur. Şarj süresince dolu depodan alınan su, soğutucuda soğutulduktan sonra boş depoya gönderilir. Kullanımda ise soğuk su

deposundan alınan su iklimlendirmeden sonra boşalmış depoya pompalanır. Boş bir depoya ihtiyaç duyulduğundan depo hacmi iklimlendirme için gerekli su hacminin yaklaşık iki katıdır. Bu da ilk yatırım maliyetini olumsuz yönde etkiler. Çoklu depo sisteminde kullanılan boru şebekesi ve kontrol devresi karmaşıktır.

Membran veya diyafram: Bu sistemde soğuk su ile ılık su birbirlerinden esnek bir membran veya hareket edebilen katı bir diyafram kullanılarak ayrılırlar. Bu sebeple difüzörlere ihtiyaç yoktur. Ancak gerek membranın ilk yatırım maliyeti gerekse membranda meydana gelebilecek yırtılmaların tamiri için gerekli maliyet difüzöre ihtiyaç duyulmamasından doğan maliyet avantajını ortadan kaldırmaktadır. Yapılan çalışmalar membranlı sistem ile katmanlaştırmalı sistemin hemen aynı ısıl ayrışmayı sağladığını göstermiştir.

Labirent ve engel: Bu sistemde depo içerisine yerleştirilen duvarlar veya engeller yardımıyla suyun depo içerisinde akış yolu karmaşık hale getirilir. Soğuk ve ılık akışkanlar arasında meydana gelen küçük hacimdeki bir miktar akışkan hareket ederek ayrışmayı sağlar. Ancak bu tür sistemlerde türbülans, serbest ve zorlanmış konveksiyon ve ısıl iletkenlik sebebiyle ayrışma istenilen düzeyde değildir. Bu sisteme bir örnek Şekil 2.7.'de verilmiştir.



Şekil 2.7. Engelli depo sistemi

2.4.1.2. Buz depolamalı sistemler

Buz depolamalı sistemler ilk olarak süt işleme tesislerinde, kiliselerde ve tiyatrolarda boru serpantinleri üzerinde buz oluşturularak kullanılmıştır. Soğutmaya duyulan ihtiyacın kısa zaman aralıklarında olduğu bu tür uygulamalarda soğutma için kurulan tesisin büyüklüğü depolamalı sistem kullanılması durumunda büyük oranda küçülmektedir. Buz depolamalı sistemlerin ilk uygulamalarında birincil amaç, enerji maliyetinden daha çok ilk yatırım maliyetlerindeki azalma olmuştur. Bu ilk kuşak sistemler karmaşık olmayan, özel soğutma ünitelerine ihtiyaç duyan ve enerji açısından fazla etkin olmayan sistemlerdir.

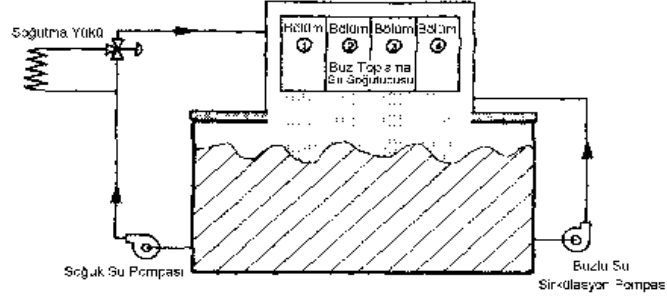
1970'lerde yaşanan enerji krizinden sonra soğu depolama daha çok ilgi çekmiş ve bu dönemde kurulan tesislerin büyük çoğunluğunda depolama ortamı olarak su kullanılmıştır. Ancak uzun yıllar süren araştırmalar sonucu buzlu sistemlerde bazı iyileştirmeler yapılmış ve bu sistemler sulu sistemlerle yarışır hale gelmiştir. Günümüzde buzlu sistemlerin sayısı sulu sistemlerden daha fazla olmakla birlikte toplam kapasite dikkate alındığında sulu sistemlerin bir üstünlüğü söz konusudur.

Buzlu sistemler, suyun erime gizli ısısından (335 kJ/kg) faydalanırlar. Depolama hacmi, tam şarj olmuş bir depoda buz miktarının su miktarına oranına bağlıdır. Kullanılan buz depolama tekniğine bağlı olmakla birlikte, depo hacmi 0.02 ile 0.03 m³/kWh arasında değişir.

Buzlu sistemlerde su donma noktasında (0 °C) depolanır. Buz elde etmek için soğutma sistemi -3 ile -9 °C arasında değişen sıcaklıklarda bir akışkanı soğutmak zorundadır. Bu sıcaklıklar, iklimlendirmede kullanılan soğutma makinelerinin çalışma sıcaklıklarının altında olduğundan özel buz yapma makinelerine ihtiyaç vardır.

Buz depolamalı sistemler statik ve dinamik sistemler olmak üzere genelde iki gruba ayrılırlar. Statik sistemlerde su dolu bir tank içerisine daldırılmış serpantinlerin üzerinde ve etrafında buz oluşur. Dinamik sistemlerde ise değişik şekillerde oluşturulan buz parçacıkları bir depoya gönderilerek, orada saklanır.

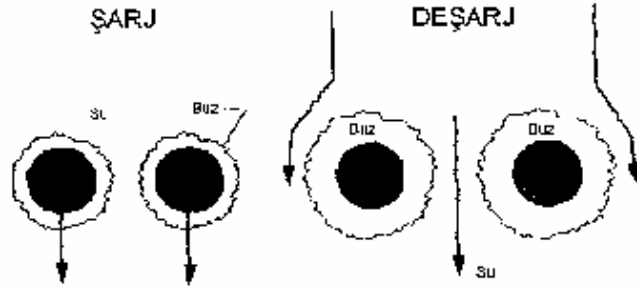
Buz toplama: Bu sistemde soğutucu akışkan düz, düşey buharlaştırıcı levhalar içerisinden geçer ve bu sırada levhaların üzerinden geçen su buz haline dönüşür (Şekil 2.8.). Levhalar üzerinde belirli bir kalınlıkta buz oluştuktan sonra, evoparatörden geçirilen sıcak soğutucu akışkan yardımıyla buz evoparatörün altına yerleştirilen su deposunun içerisine düşer. Bu tankın altından alınan soğuk su iklimlendirilecek ortama gönderilir. Bu işlem periyodik olarak devam eder.



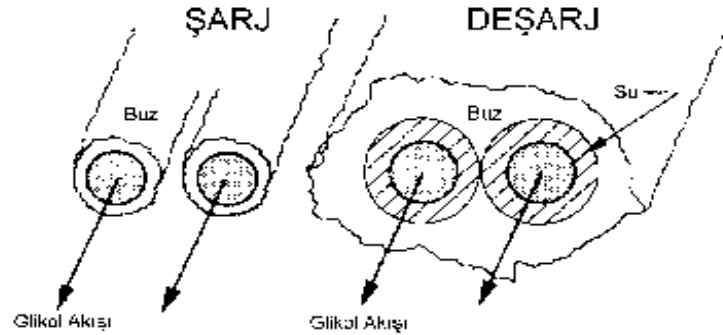
Şekil 2.8. Buz toplama sistemi.

Serpantinler üzerinde buz: Bu sistemin iki değişik türü mevcuttur. Birinci türde (Şekil 2.9.) su ile doldurulmuş bir deponun içerisine serpantin yerleştirilir. Bu serpantin içerisinden soğutucu akışkan geçirilerek, serpantin üzerinde buz oluşması sağlanır. İklimlendirilecek ortamdan dönen ılık su oluşan buz tabakasının üzerine gönderilerek, buzdu eritir ve suyu da soğutur.

İkinci türde (Şekil 2.10.) ise boru içerisinden bir soğutma ünitesinin buharlaştırıcısında soğutulmuş glikol-su karışımı dolaştırılır. Buz oluştuğundan sonra iklimlendirilecek ortamdan dönen glikol-su karışımı boru içerisinden geçirilerek buzun erimesi ve karışımın soğuması gerçekleştirilir.

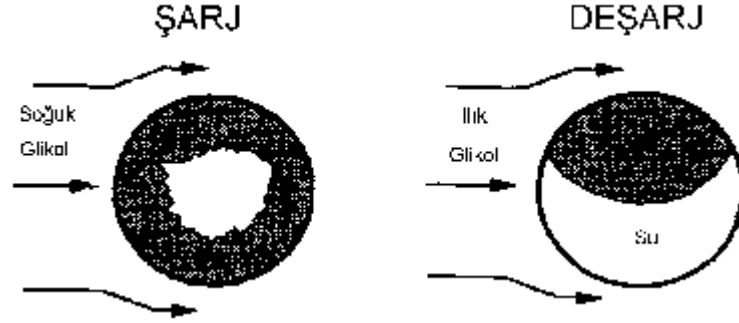


Şekil 2.9. Dıştan eritmeli buz depolamasının şarj ve deşarjı



Şekil 2.10. İçten eritmeli buz depolamada şarj ve deşarj.

Kapsüllenmiş Buz: Bu sistemlerde iyonize edilmiş su ve buz çekirdeklendirici içeren plastik kapsüller kullanılır (Şekil 2.11.).



Şekil 2.11. Kapsülle buz depolamada şarj ve deşarj.

Ticari olarak satılan kapsüller ya silindirik ya da dikdörtgenler prizması şeklindedir. Şarj süresince bir soğutucu üniteye soğutulan glikol-su karışımı bir depo içerisine yerleştirilmiş plastik kapsüllerin üzerinden geçirilerek kapsüllerin içerisinde buz oluşumu gerçekleşir. Deşarjda ise iklimlendirilecek ortamdan dönen glikol-su karışımı kapsüllerin üzerine gönderilerek buzun erimesi ve karışımın soğuması sağlanır. Kapsüllü depolamada şarj ve deşarj esnasında ısı transferi önemli bir rol oynamaktadır.

2.4.1.3. Faz değiştiren ötektik tuzlar

Ötektik tuzlar da gizli ısı yoluyla enerji depolayan faz değişim malzemeleridir. Belirli ve saptanmış sıcaklıklarda katılaşp eriyebilmeleri için değişik formülasyonlarda üretilirler. Soğu depolama uygulamaları için kullanılan en genel formülasyon; inorganik tuzları, suyu ve yapısal kararlılığı sağlayan bir ara maddeyi içeren karışımlar şeklindedir. Bu karışım 8 ° C civarında faz değiştirebilir. Genellikle bu karışım, belirli bir geometriye sahip plastik kapların içine doldurulur ve bu kaplar belirli bir düzen içerisinde içinden suyun geçirileceği depolama tankına yerleştirilir. Bu tür bir depolama tankı için gerekli hacmin yaklaşık 0,048 m³/kwh olduğu belirlenmiştir.

Bu malzemelerin faz değişim sıcaklıkları, enerjiyi depolayabilmek için standart soğutma ekipmanlarının kullanımının olanaklı kılmaktadır, ancak depo çıkış sıcaklığı birçok soğutma sistemi için giriş sıcaklığının üstünde olabileceğinden, işletme stratejilerine belirli sınırlamalar gelebilir. Ancak son zamanlarda 5 °C civarında faz değiştiren ötektik tuz karışımları elde edilmiştir. Bu şekilde 5-6 °C'lık bir depo çıkış sıcaklığı sağlanmakta ve konvansiyonel hava dağıtım sistemleriyle daha uyumlu bir işletim elde edilmektedir.

2.4.2. Soğu depolama tankları

Bir soğu depolama tankı içerisinde bulunan su, su-buz karışımı veya diğer malzemenin ağırlığından kaynaklanan kuvvete dayanacak yapısal mukavemete sahip olmalıdır. Su geçirmez olmalıdır ve zamanla sızıntı yaratmamalıdır. Korozyona karşı dirençli olmalıdır. Yer üstüne yerleştirilen tanklar, hava koşullarına karşı dirençli olmalı, dış yalıtımları buhar difüzyonuna engel olacak yapıya sahip olmalıdır. Güneş ışığı etkisi altında kalan tanklarda ısınım ile ısı kazancı önemli hale gelebilir. Bunu minimize etmek için açık renkli veya yansıtıcı bir dış yüzey tavsiye edilir. Toprak altına gömülen tanklar üstlerindeki toprak ağırlığını ve buna ilaveten bulundukları yere bağlı olarak (Otopark, Tenis kortu, Helikopter pisti v.b.) üstlerinde oluşabilecek ağırlıkları taşımalıdır. Kısmi veya tam olarak toprağa gömülmüş tanklar boşaltıldıkları takdirde doğabilecek yeraltı sularının hidrostatik basıncına da dayanıklı olmalıdır.

Depolama tanklarının şekilleri genellikle prizmatik veya silindiriktir. Soğuk su depoları veya dökümlü buzlu depolarda tank geometrisi depodan geri kazanılarak kullanılabilir soğu miktarını önemli ölçüde etkiler. Soğu depolama tankları genellikle çelik, beton, fiberglas veya plastiktir.

• Çelik tanklar

Çok farklı boyutlarda ve değişik geometrilere çelik tanklar üretilebilir. Uygulamada küçük tankların (9 – 90 m²) kaynaklı galvaniz çelik sacdan üretildiği, daha büyük (200 m³'e kadar) tanklarda ise silindirik geometrinin kullanıldığı görülmektedir.

Zeminde yükselen büyük çelik tanklarda; genellikle iç ve dış korozyon koruması, dış yalıtım ve sundurma yer alır. Zeminde yer alan silindirik tanklar ise çoğunlukla beton bir kaide üzerine konur.

Korozyona karşı içten korumada genellikle epoxy kaplama kullanılır. Toprak altına gömülü tanklarda ise çoğunlukla “cathodic” koruma tercih edilmektedir.

• Beton tanklar

Beton tanklar önceden imal edilmiş olabileceği gibi yerinde de imal edilebilir. Ülkemizde ticari anlamda bu amaca yönelik bir imalat söz konusu olmadığından, betonun yerinde dökülmesi ile tankın imali tercih edilecek yöntem olarak gözükmektedir. Bu durumda da en önemli sorun, “sızıntı” olarak kendisini gösterecektir. Beton tankın iç yalıtımında bu konuya çok dikkat edilmelidir. Mümkünse tank birkaç bölmeden oluşmalı bakım esnasında veya herhangi bir sızıntı söz konusu olduğunda tankın tamamını boşaltmaya gerek kalmamalıdır.

• Plastik tanklar

Uygulamada kullanılabilecek bir diğer tank çeşidi de plastik olanlardır. Yurt dışında modüler birimler şeklinde üretilmiş her türlü kapasiteye uygun tank bulunmaktadır. Bina dışında yerleştirilen plastik tanklarda güneş ışığına karşı Ultraviyole koruma veya opak kaplama gereklidir.

Tanklar, plastik yerine fiberglas'tan imal edilebilir. Aranılan ortak özellik ise, diğer tanklarda olduğu gibi; mukavemet, korozyon direnci ve iklim koşullarına dayanıklıdır.

2.5. Soğu Depolamalı Sistemlerin Tasarımı

Soğu depolamalı sistemlerin tasarımında aşağıdaki işlemlerin yapılması gereklidir:

- Ön ekonomik analizin yapılması
- Soğutma yükünün günün saatlerine göre belirlenmesi
- Soğu depolama sisteminin belirlenmesi
- Çalışma sistemlerinin belirlenmesi
- Soğutma ünitelerinin belirlenmesi
- Soğu deposunun belirlenmesi
- Kesin ekonomik analizin yapılması
- Kesin tasarımın yapılması

Burada yukarıdaki kısımlara kısaca değinilecektir.

2.5.1. Soğutma yükü

Soğu depolamalı sistemlerin tasarımında soğutma yükü profilinin 24 saat boyunca veya daha uzun sürede değişimi maksimum saatlik yük kadar önemlidir. Depolamanın yapılmadığı alışlagelmiş bir sistemde 24 saatlik toplam yük maksimum saatlik yükün 24 ile çarpılmasıyla elde edilir. Böylelikle tasarım yükünün kısa bir süre için aşılması durumunda sistem bunu tolere edebilir. Bununla birlikte depolamalı bir sistem maksimum saatlik yükü olduğu kadar toplam yükü de karşılayabilecek şekilde tasarlanmalıdır. Bu sebeple, bir şarj-deşarj çevrimi boyunca toplam yükü doğru bir şekilde hesaplamak önemlidir. Bir çevrim genellikle 24 saat olmakla birlikte, bazı özel uygulamalarda bu bir haftaya kadar çıkabilmektedir.

Depolamalı bir sistemin tasarımında saatlik soğutma yükü alışlagelmiş sistemlerde olduğu gibi hesaplanır. Soğutma yükünün hesabı ayrıntılı olarak bilinmektedir. Soğu depolamalı bir sistem tasarımı için soğutma yükü hesabında "pull-down" yükü adı verilen yüke dikkat edilmelidir. "Pull-down" yük, binanın boş olduğu periyotlarda (mesai saatleri dışı ve hafta sonu) kazanılan ısıdır ve soğutmanın ilk bir kaç saatinde karşılanması gerekir. "Pull-down" yükleri alışlagelmiş sistemlerin tasarımında sistemin büyüklüğünü etkilemez, ancak soğu depolamalı sistemlerde hesaba katılmalıdır. "Pull-down" yükleri binanın kullanım şekline göre ve günlere göre değişir. Örneğin bir ofis binası için eğer hafta sonu normal iklimlendirme sistemi çalışmıyorsa, pazartesi en büyük "pull-down" yükü ortaya çıkar. Bu tür pazartesi sabahı "pull-down" yükleri depolamalı sistemi normalden bir kaç saat önce şarj etmeye başlayarak karşılanabilir.

Depolamalı sistem için soğutma yükü hesabında, alışlagelmiş soğutma yükü hesabında dikkate alınan parametrelere ilave olarak deponun ısı kazancı ve gerek şarj gerekse deşarjda kullanılan pompalardan kaynaklanan ısı kazancı da dikkate alınmalıdır.

Soğutma yükünün dağılımı ve büyüklüğü ile belirtilen diğer durumlara göre soğu depolamanın su ile mi yoksa buz ile mi yapılacağı ve sistemin tam depolamalı mı yoksa kısmi depolamalı mı olması gerektiğine karar verilir. Ayrıca buzlu ve sulu depolama sisteminde depolama sistemi hakkında da bir karara varılır. Bundan sonra soğutucu kapasitesi ve soğu deposu kapasitesi belirlenir.

2.5.2. Soğutucu kapasitesi

Soğutucu kapasitesi ve depolama kapasitesi toplam soğutma yükünün yanında depolamalı sistemin nasıl işletileceğine de doğrudan bağlıdır.

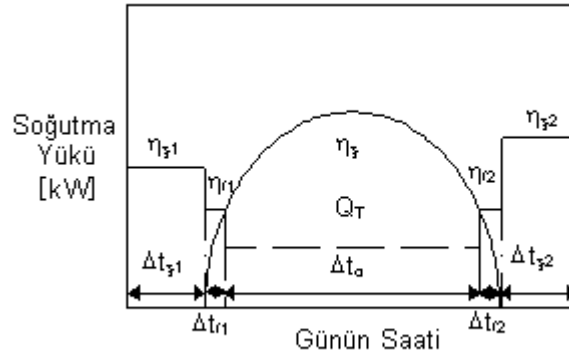
Şekil 2.12.'deki soğutma sistemi için soğutucu kapasitesi;

$$\dot{Q} = \frac{Q_T}{\Delta t_s \cdot \eta_s + \Delta t_0 \cdot \eta_0 + \Delta t_f \cdot \eta_f} \quad (2.1)$$

bağıntısından belirlenir. Burada Q_T ; kWh olarak toplam soğutma yükünü, t_s , t_0 ve t_f ; şarj, on-peak (zirveye başlama) ve off-peak (zirve) durumlarının saat olarak sürelerini ve η_s , η_0 ve η_f de şarj, on-peak (zirveye başlama) ve off-peak(zirve) durumlarında soğutucu kapasitesinin oranını göstermektedir. Şekilden de görüleceği gibi.

$$t_s = t_{s1} + t_{s2} \text{ ve } t_f = t_{f1} + t_{f2}$$

şeklinde toplam şarj ve off-peak(zirve) saatleri hesaplanmalıdır.



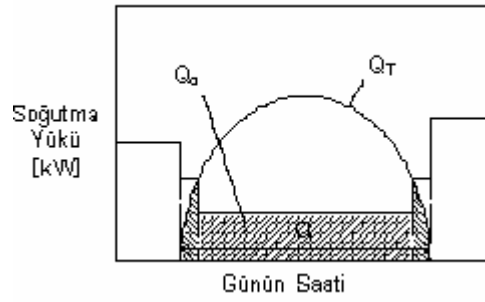
Şekil 2.12. Soğutucu kapasitesinin belirlenmesi.

2.5.3. Depo yükü

Depo yükü Q_d 'nin hesaplanma durumu Şekil 2.13.'de verilmiştir. Depo yükü Şekil 2.13.'e göre

$$Q_d = Q_T - Q_0 - Q_f \quad (2.2)$$

bağıntısından belirlenir. Burada Q_0 on-peak(zirveye başlama) ve Q_f de off-peak(zirve) durumundaki yüklerdir. Depo hacmi de bu Q_d yükü ile eşitlik (1.1)'den bulunmuştur.



Şekil 2.13. Depo yükünün belirlenmesi.

Deneysel çalışmalar genelde %50 ekonominin sağlandığını göstermektedir. Soğu depolu sistemin tercih edilmesi için ekonomik bir çözüm olması gereklidir. Bunun için konvensiyonel sistem ile bu sistem arasında ülkemizin koşullarında ilk yatırım açısından bir avantaj olması istenir. Çünkü ülkemizde gece saatlerinde elektrik enerjisinin daha ucuz kullanılması söz konusu değildir.

Soğu depolamalı iklimlendirme sistemleri dünyada uzun yıllardan beri başarıyla kullanılmaktadır. Bu teknoloji denenmiş olup, küçük sistemlerde genelde buzlu, büyük sistemlerde de sulu sistemler tercih edilmektedir. İlk yatırım maliyetlerinde önemli azalmalar meydana gelmesi sebebiyle, günün veya haftanın belirli kesimlerinde kullanılan cami, düğün salonu, ders salonları, lokanta, spor salonu, konferans salonu gibi mahallerde başarılı bir şekilde kullanılabilir. Bu yapıldığında ülkemiz ekonomisine büyük bir katkı sağlanabilecektir.

BÖLÜM III

KULLANILAN SAYISAL YÖNTEM VE TEMEL DENKLEMLER

3.1. Kullanılan Sayısal Yöntem

Son yıllarda teknolojinin hızla gelişimi ile birlikte artık problemlerin çözümü, tasarımların oluşturulması ve geliştirilmesi gibi birçok mühendislik uygulamasında sayısal analiz yöntemlerinin kullanımı yaygınlaşmıştır. Deneysel yöntemlerin ekonomik olmaması ve zorlukları mühendislerin sayısal analiz yöntemlerine yönelmelerine neden olmuştur. Aynı zamanda sayısal analiz yöntemlerinin deneysel yöntemlere göre; kısa zamanda ve ekonomik sonuç alınabilmesi, geniş çapta veri elde etme olanağı ve deneysel çalışmalarda karşılaşılabilecek zor ve tehlikeli durumlarda kullanılabilmesi gibi birçok avantajı bulunmaktadır. Ancak bütün bu avantajlarına rağmen, mühendisler deneysel çalışmadan kesinlikle vazgeçmemelidirler. İdeal bir çalışmanın sayısal çözümlerle desteklenmiş deneysel çalışmalar olduğu rahatlıkla söylenebilir.

Son yıllarda akışkanlar mekaniği ve ısı transferi problemleri çözümü için geliştirilmiş birçok sayısal yöntem bulunmaktadır. Bu çalışmada analizler, sonlu hacimler esasına dayalı çözümleme yapan FLUENT programı yardımıyla gerçekleştirilmiştir.

3.1.1. Sonlu hacimler yöntemi

Sonlu hacimler yöntemi, çözülecek geometriyi parçalara bölerek bu parçaların her biri için çözüm yapma ve daha sonra bu çözümleri birleştirerek problemin genel çözümünü bulma esasına dayanır. Sonlu hacimler yöntemi, korunum denklemlerini sayısal olarak çözümlenebilen cebirsel denklem sistemlerine dönüştürmek için kontrol hacim esaslı bir teknik kullanır. Bu teknik her bir kontrol hacmi için korunum denklemlerinin integrasyonunun alınması sonucunda, değişkenler için kontrol hacmini sağlayan ayrık eşitliklerin elde edilmesini içerir. Ayrık eşitliklerin doğrusallaştırılması ile elde edilen, doğrusal denklem sistemlerinin iterasyona bağlı çözümü ile hız, basınç ve sıcaklık gibi değişkenler verilen yakınsaklık ölçüsünü sağlayıncaya kadar güncellenir.

Sonlu hacimler yöntemi ile problem çözme işleminde genellikle şu adımlar kullanılır.

- Çalışılacak bölgenin ağ programları sayesinde oluşturulacak sayısal analize uygun ağ ile kontrol hacimlere bölünmesi.
- Sırasıyla momentum denkleminin, süreklilik denklemlerinin ve daha sonra enerji veya türbülans gibi diğer aranan denklemlerin çözümü.
- Sonuçlandırılan denklem takımlarının iteratif çözücü sayesinde daha doğrudan doğruya yükseltilmesi.
- Yakınsaklığın kontrolü.
- Çözümün elde edilmesi.

Kontrol hacminin integrasyonunu içeren ilk adım, sonlu hacimler yöntemini diğer tüm sayısal yöntemlerden ayırmaktadır. Sayısal algoritma ile fiziksel korunum ilkesi arasındaki bu açık ve anlaşılır ilişki, sonlu hacimler yönteminin dikkat çekici en temel özelliğini oluşturur ve kullanıcılar için daha anlaşılır kılar. Sonlu kontrol hacmindeki hız bileşeni veya entalpi gibi genel bir akış değişkeninin (Φ) korunumu bu değişkenin değerini artıran veya azaltan farklı işlemlerin dengesi olarak ifade edilebilir.

$$\left[\begin{array}{c} \text{Kontrol hacmindeki} \\ \phi' \text{ nin zamana bağlı} \\ \text{değişimi} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c} \phi' \text{ nin konveksiyonla} \\ \text{kontrol hacmine net} \\ \text{akışı} \end{array} \right] + \left[\begin{array}{c} \phi' \text{ nin difüzyonla} \\ \text{kontrol hacmine net} \\ \text{akışı} \end{array} \right] + \left[\begin{array}{c} \text{Kontrol hacmindeki} \\ \phi' \text{ nin net artış} \\ \text{oranı} \end{array} \right]$$

Yukarıdaki korunum denklemi kolay anlaşılabilir olmakla beraber lineer olmayan ve karmaşık bir yapıya sahiptir. Bu nedenle bu denklemin çözümü iteratif bir çözüm yaklaşımı gerektirmektedir. Basınç ve hız arasında ilişki kurmak amacıyla yaygın olarak kullanılan TDMA, SIMPLE, SIMPLEC gibi çözüm yöntemleri bu yaklaşımlara örnek olarak verilebilir.

Sonlu hacimler yöntemini kullanan FLUENT programı ile problem çözümü yapmak için ise aşağıdaki adımlar takip edilmelidir.

- Problemin geometrisi GAMBIT paket programı ile oluşturulmalıdır.
- Geometri GAMBIT paket programında elemanlara ayrılmalıdır.
- Duvar, simetri, hız gibi sınır koşulları GAMBIT paket programında tanımlanmalı ve oluşturulan dosya FLUENT için export edilmelidir.
- Dosya FLUENT paket programında açılarak ağ yapısı kontrol edilmelidir.
- Hangi denklemlerin çözüleceği ve çözüm yöntemi seçilmelidir.
- Başlangıç ve sınır koşulları tanımlanmalıdır.
- İteratif çözüm yöntemi koşturulmalıdır.

3.1.2. Sonlu hacimler formülasyonları

Bilindiği gibi laminar ve sürekli akan bir akışkanın akışını tanımlamak için üç temel denklem mevcuttur.

- Kütlenin korunumu
- Momentumun korunumu
- Enerjinin korunumu

Sonlu hacimler esasına dayalı bir teknik kullanan FLUENT, çözümlemeye başlangıç hız ve basınç değerlerini kullanarak başlar. Her bir iterasyon için bir önceki iterasyonda elde edilen hız ve basınç değerleri kullanılarak momentum denklemleri çözülür. x ve y yönündeki momentum denklemlerinin çözümü, sadece hızların güncellenmesini sağlar, basınç güncellenmez. Dolayısıyla

basıncın güncellenmesi için ek bir eşitliğe ihtiyaç vardır. Bunun için süreklilik ve momentum denklemlerinden elde edilen basınç düzeltme eşitliği çözülerek, basınç düzeltme faktörü elde edilir. Bu faktör, süreklilik denklemini sağlayacak şekilde basınç ve hız alanlarının güncellenmesi için kullanılır. Elde edilen veriler dahilinde enerji denklemleri çözülür ve sıcaklık alanları elde edilir. Bir önceki iterasyonda elde edilen değerlerle karşılaştırma yapılarak belirlenen yakınsaklık ölçüsünü sağlayıncaya kadar iterasyona devam edilir.

Bu bölümde FLUENT paket programının çözücüsü tarafından hazırlanan denklemlere yer verilecektir.

3.1.2.1. Kütlenin korunumu

FLUENT paket programı tarafından kullanılan kütlenin korunumu yani diğer adıyla süreklilik denklemi aşağıda verilmiştir.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u_i) = S_m \quad (3.1)$$

Burada; u_i hız vektörlerini, ρ yoğunluğu, t zamanı ve S_m dağılık faz tarafından sürekli faza eklenen kütleyi göstermektedir.

3.1.2.2. Momentumun korunumu

FLUENT paket programı tarafından kullanılan momentumun korunumu denklemi ise şu şekildedir;

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i + F_i \quad (3.2)$$

Burada ise; p statik basıncı, τ_{ij} gerilme tensörü, g_i yerçekimi ivmesi ve F_i cisim kuvvetlerini sembolize etmektedir. τ_{ij} ifadesinin açılımı ise şu şekilde olmaktadır.

$$\tau_{ij} = \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \delta_{ij} \quad (3.3)$$

Burada μ moleküler viskoziteyi göstermektedir.

3.1.2.3. Enerjinin korunumu

FLUENT paket programı tarafından kullanılan enerjinin korunumu denklemi ise şu şekildedir.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \frac{\partial}{\partial x_i}(u_i(\rho E + p)) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(k_{ef} \frac{\partial T}{\partial x_i} - \sum_{j=1}^n h_{j'} J_{j'} + u_j (\tau_{ij})_{ef} \right) + S_h \quad (3.4)$$

Burada; k_{ef} efektif kondüktivite, J difüzyon akısı, T sıcaklık, τ_{ij} viskoz gerilme tensörü şeklinde açıklanabilir. S_h kimyasal reaksiyon ısını ve tanımlanan diğer hacimsel ısı kaynaklarını içermektedir. Bu denklemlerde kullanılan diğer parametreler ise aşağıdaki şekilde gösterilebilir;

$$E = h - \frac{p}{\rho} + u_i^2 \quad (3.5)$$

$$h_i = \int_{T_{ref}}^T c_{p,i} dT \quad (3.6)$$

Bu denklemlerde; h entalpiyi, p basıncı, u hızı, T_{ref} referans alınan sıcaklık değerini ve son olarak $c_{p,i}$ sabit basınç altındaki özgül ısıyı göstermektedir.

3.2. Temel Denklemler

3.2.1. Depolanan toplam enerjinin tanımı

Etilen- Glikol tankından transfer edilen enerji, enerjinin üç bölümünü içerir. Bunlar; suyun katılaşması sonucu ortaya çıkan gizli enerji, su ve buzda meydana gelen sıcaklık düşüşü sonucu oluşan duyulur enerji ve depolama tankının çevresinden elde ettiği kazanılmış enerjidir. Toplam enerji ve ikincil soğutucudan aktarılan enerji aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$Q_{\text{depolanan}} = Q_{\text{gizli}} + Q_{\text{duyulur, buz}} + Q_{\text{duyulur, su}} \quad (3.7)$$

$$Q_{\text{toplam}} = Q_{\text{depolanan}} + Q_{\text{kazanılan}} \quad (3.8)$$

3.2.1.1. Gizli enerji

Termal enerji depolama sisteminde depolanan gizli termal enerjiyi hesaplayabilmek için tanktaki buzun miktarının bulunması ilk adımdır. Gizli enerji aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$Q_{\text{gizli}} = m_{\text{buz}} \Delta H \quad (3.9)$$

m_{buz} boruların etrafında katılaşan buz miktarını ifade eder ve buz kalınlığından hesaplanır.

Buz depolama sistemindeki buz kalınlığını ölçmek için genel olarak kullanılan yöntemler; (Shi, 2005);(a) Hacim genişlemesine dayanan su seviye ölçümü, (b) Mekanik buz tabakası kalınlığı ölçümü, (c) su ve buz arasındaki iletkenlik farkını kullanarak ölçmek, (d) su ve soğutucu ya da su ve borudaki glikol arasındaki sıcaklık farkına göre donma sıcaklığının ölçülmesi, (e) diğer yöntemler. (b) yöntemi kapalı bir sistemde en uygun yöntem olduğundan her periyotta oluşan buz miktarının hacmi tüm boruların etrafındaki buzun ortalama çapının ölçülmesi yoluyla elde edilir.

Her periyotta boruların etrafında oluşan buzun toplam hacmi aşağıdaki formül kullanılarak hesaplanabilir.

$$V_{\text{buz}}(t) = \sum_{i=1}^8 \frac{\pi}{4} (D_{\text{buz}}^2(t) - D_o^2) L \quad (3.10)$$

Enerji depolama sisteminde depolanan gizli enerji her bir periyottaki boru etrafında oluşan buz miktarı yardımıyla hesaplanır. Bu nedenle aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplandı.

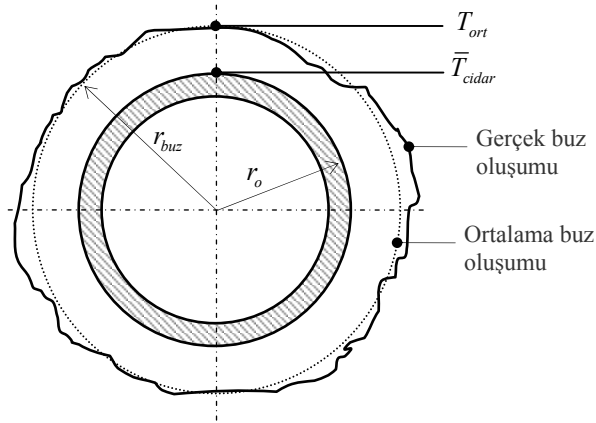
$$Q_{\text{gizli}}(t) = \rho_{\text{buz}} V_{\text{buz}} \Delta H \quad (3.11)$$

3.2.1.2. Duyulur enerji

Enerji depolama sistemindeki suyun ve buzun hacimlerinde depolanan her periyottaki duyulur enerji miktarı aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$Q_{duyulur}(t) = \{m_{su,i} c_{su} \bar{T}_{su,i}\} - \{m_{buz} c_{buz} \bar{T}_{buz}(t) + [m_{su,i} - m_{buz}(t)] c_{su} \bar{T}_{su}(t)\} \quad (3.12)$$

Burada $\bar{T}_{buz}(t)$ buzun ortalama sıcaklığıdır ve buz içindeki sıcaklık dağılımının logaritmik olarak değiştiği varsayımıyla hesaplanır. $\bar{T}_{buz}(t)$ değeri hesaplanırken borunun yüzey sıcaklıklarının ortalama değeri ölçülür ve Şekil 3.1.' te gösterildiği gibi boru yüzeyinin sıcaklığı olarak alınır



Şekil 3.1. Boru etrafındaki katılaşma.

Radyal koordinat sistemleri için r-ekseni boyunca sıcaklık dağılımı çoğunlukla ısı iletimi denkleminde türetilir.

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(kr \frac{\partial T}{\partial r} \right) = 0 \quad (3.13)$$

Diferansiyel denklemin genel çözümü sınır koşullarıyla aşağıdaki şekilde yazılır.

$$T(r) = C_1 \ln r + C_2$$

Sınır şartları:

$$r = r_{cidar} \rightarrow T = \bar{T}_{cidar}$$

$$r = r_{buz} \rightarrow T = T_{ort}$$

Böylece bu şekildeki bir silindirik sistemin sıcaklık dağılımı

$$T(r) = \frac{T_{cidar} - T_{ort}}{\ln(r_{cidar}/r_{buz})} \ln(r/r_{buz}) + T_{ort} \quad (3.14)$$

$\bar{T}_{buz}(t)$ denklem(3.14)'ün integralinin katılma yüzeyi boyunca alınmasıyla aşağıdaki şekilde elde edilir.

$$\bar{T}_{buz}(t) = \frac{2}{(r_{buz}^2 - r_{cidar}^2)} \bar{T}_{cidar} \int_{r_{cidar}}^{r_{buz}} \left[\frac{1}{\ln(r_{cidar}/r_{buz})} \ln(r/r_{buz}) + T_{ort} \right] r dr \quad (3.15)$$

Burada $\bar{T}_{su}(t)$ ve $\bar{T}_{su,i}$ sıcaklıkları tank içindeki suyun sıcaklığının termokupl ile iki farklı bölgede sırasıyla $t>0$ ve $t=0$ için ölçülen sıcaklıklarının ortalama değeri olarak alınır.

3.2.1.3. Kazanılan enerji

Tankın çevresinden kazanılan ısı aşağıdaki şekilde Fourier Yasası kullanılarak hesaplanır.

$$q_{kazanilan} = -A_{tank} \frac{dT}{R''_{toplam}} \quad (3.16)$$

3.2.2. Korunum denklemleri

Çözüm bölgesi için korunum denklemleri her bir alt sistem için kontrol hacimlerinin enerji dengesi yoluyla elde edilir. Termodinamiğin birinci yasası enerji dengesini aşağıdaki gibi tanımlar.

$$\dot{E}_{giris} + \dot{E}_{uretilen} = \dot{E}_{cikis} + \dot{E}_{depolanan} \quad (3.17)$$

3.2.2.1. Isı transferi akışkanı için denklemler

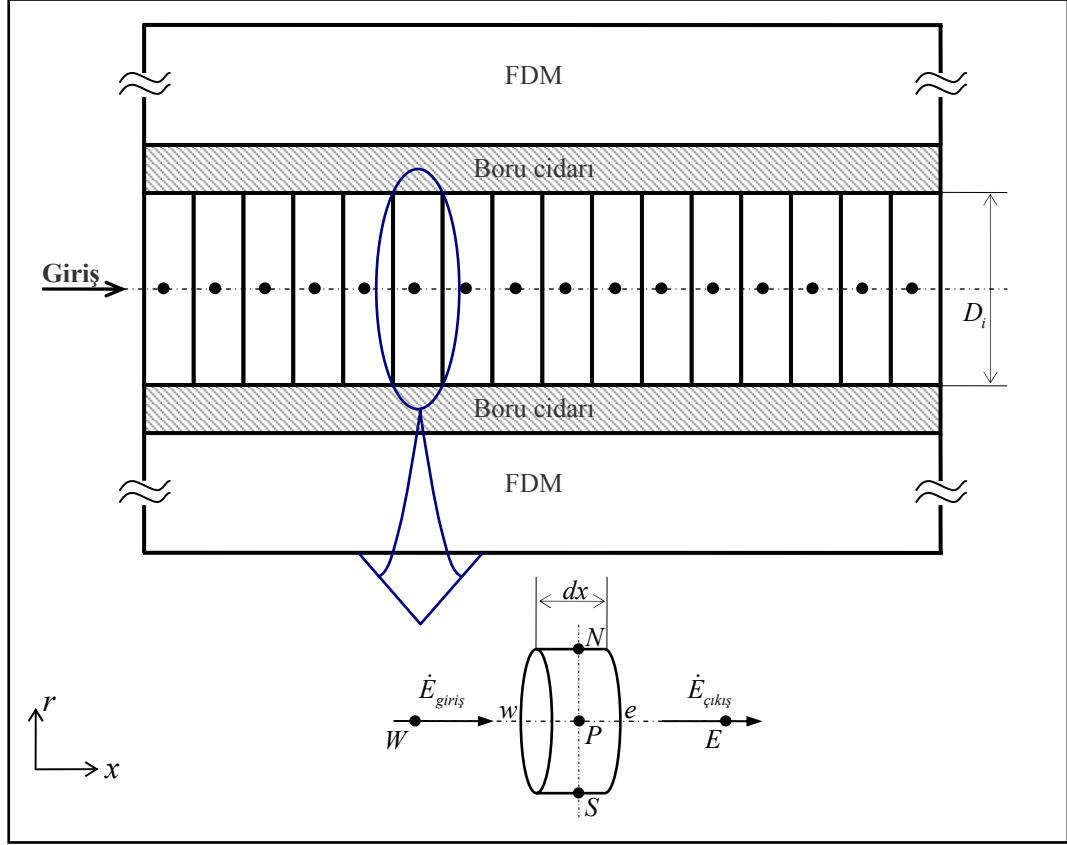
Hidro dinamik olarak tamamen gelişmiş bir iç akış için diferansiyel kontrol hacmi dengesi enerji dengesi Şekil 3.2'de görüldüğü gibidir ve bileşenlerle Denklem 3.7'deki gibi yazılabilir.

$$\dot{E}_{uretilen} = 0 \quad (3.18)$$

$$\dot{E}_{giris} = q_{konv} + q_{kond} \text{ veya } \dot{E}_{giris} = \dot{m}c_a T^0 + q_x \quad (3.19)$$

$$\dot{E}_{cikis} = q_{konv} + q_{kond} \text{ veya } \dot{E}_{cikis} = \dot{m}c_a T_{x+dx}^0 + hA_y (T^0 - T_{x+dx}^0) + q_{x+dx} \quad (3.20)$$

$$\dot{E}_{\text{depolanan}} = \rho c_a A dx \frac{\partial T}{\partial t} \text{ veya } \dot{E}_{\text{depolanan}} = (\rho c)_a A dx \frac{\partial T^0}{\partial t} \quad (3.21)$$



Şekil 3.2. Isı transferi akışkanının enerji dengesi.

burada,

$$q_x = -k_c A \frac{\partial T^0}{\partial x} \text{ ve } q_{x+dx} = q_x + \frac{\partial q_x}{\partial x} dx \quad (3.22)$$

burada, $A (= \pi r_i^2)$ kesit alanı ve $A_y (= 2\pi r_i dx)$ ise kontrol hacminin yanal alanıdır. Denklem (3.18) ve (3.22) Denklem (3.17)'de yerine konulabilir.

$$\dot{m} c_a T^0 + q_x = \dot{m} c_a T_{x+dx}^0 + h A_y (T^0 - T_{x+dx}^0) + q_{x+dx} + (\rho c)_a A dx \frac{\partial T^0}{\partial t} \quad (3.23)$$

Boru girişinde tamamen gelişmiş şartların olduğu varsayılır, bu nedenle akışkanın kütleli debisi $\dot{m} = \rho_a A u_{ort}$ olarak yazılır.

Denklem (3.23) aşağıdaki gibi yeniden düzenlenebilir.

$$-\rho_a(\pi r_i^2)u_{ort}c_a(T_{x+dx}^0 - T_x^0) - h(2\pi r_i dx)(T^0 - T_d^0) = (\rho c)_a(\pi r_i^2)dx \frac{\partial T^0}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x} \left(k_c \pi r_i^2 \frac{\partial T^0}{\partial x} \right) dx \quad (3.24)$$

Sıcaklığın radyal yön boyunca sabit olduğunu ve aksel iletimin önemsiz olduğu varsayılırsa denklem aşağıdaki gibi sadeleştirilebilir.

$$-(\rho c)_a u_{ort} \frac{\partial T^0}{\partial x} + \frac{4h}{D_i}(T_c^0 - T^0) = (\rho c)_a \frac{\partial T^0}{\partial t} \quad (3.25)$$

Sonuç olarak, ısı transfer akışkanı enerji denklemi aşağıdaki gibi açıklanabilir.

$$(\rho c)_a \frac{\partial T^0}{\partial t} = \frac{4h}{D_i}(T_c^0 - T^0) - (\rho c)_a u_{ort} \frac{\partial T^0}{\partial x} \quad (3.26)$$

3.2.2.2. Boru cidarı için denklemler

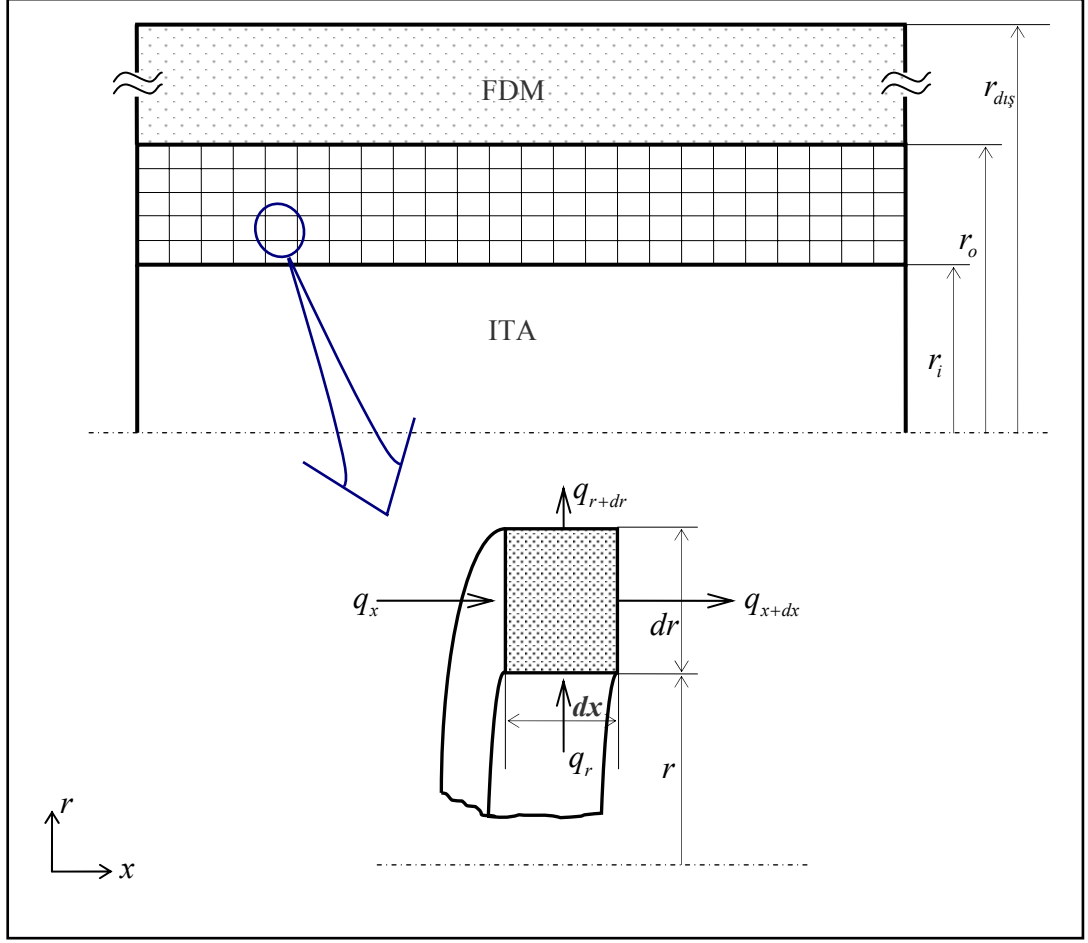
Boru çeperi için iki boyutlu ısı iletim denklemi Şekil 3.3'te görüldüğü gibi diferansiyel elemanın ısı dengesinden elde edilir. Denklem 3.17'in bileşenleri aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\dot{E}_{\text{üretilen}} = 0 \quad (3.27)$$

$$\dot{E}_{\text{giriş}} = q_x + q_r \quad (3.28)$$

$$\dot{E}_{\text{çıkış}} = q_{x+dx} + q_{r+dr} \quad (3.29)$$

$$\dot{E}_{\text{depolanan}} = (\rho c)_c A dx \frac{\partial T^0}{\partial t} \quad (3.30)$$



Şekil 3.3. Boru cidarı için enerji dengesi.

Burada;

$$q_x = -k_c A \frac{\partial T^0}{\partial x} \text{ ve } q_{x+dx} = q_x + \frac{\partial q_x}{\partial x} dx \quad (3.31)$$

$$q_r = -k_c A_y \frac{\partial T^0}{\partial r} \text{ ve } q_{r+dr} = q_r + \frac{\partial q_r}{\partial r} dr \quad (3.32)$$

Denklem 3.17'deki enerji dengesi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$(q_x + q_r) - (q_{x+dx} + q_{r+dr}) = (\rho c)_c (2\pi r dr dx) \frac{\partial T^0}{\partial t} \quad (3.33)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_c 2\pi r dr \frac{\partial T^0}{\partial x} \right) dx + \frac{\partial}{\partial r} \left(k_c 2\pi r dx \frac{\partial T^0}{\partial r} \right) dr = (\rho c)_c (2\pi r dr dx) \frac{\partial T^0}{\partial t} \quad (3.34)$$

Boru cidarı için enerji denklemi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$(\rho c)_c \frac{\partial T^0}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_c \frac{\partial T^0}{\partial x} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(k_c r \frac{\partial T^0}{\partial r} \right) \quad (3.35)$$

3.2.2.3. Faz değişim malzemesi (FDM) için denklemler

Sistemin ilk sıcaklığının aynı veya faz değişim sıcaklığına yakın olduğu düşünülerek, boru çevresindeki doğal konveksiyonun etkisi ihmal edilebilir. FDM'deki ısı iletimi sabit ağ sayısal modelini (Cao and Faghri, 1990) kullanan sıcaklık dönüştürücü yöntem tarafından tanımlanabilir. Bu model katılaşma işleminin $T_{\text{ort}} - \delta T_{\text{ort}}$ 'den to $T_{\text{ort}} + \delta T_{\text{ort}}$ 'ya kadar olan aralıkta ortaya çıktığını varsayar ama başarılı bir şekilde tek bir sıcaklıkta meydana gelen katılaşma işleminin simülasyonunu faz değişim sıcaklıklarının küçük bir aralığını ($2 \delta T_{\text{ort}}$) olarak kullanılabilir. FDM (su) için korunum denklemleri aşağıdaki gibi elde edilebilir.

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(k r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) \right] \quad (3.36)$$

Matematiksel model aşağıdaki varsayımlar altında oluşturulur.

- 1 FDM'in termo-fiziksel özelliklerinin hepsi sıcaklığa nazaran sabittir ama özellikler katı ve sıvı fazları için farklı olabilir.
- 2 FDM homojen ve izotropiktir.
- 3 Sıvı FDM'deki doğal iletimin etkisi önemsenmez.

Maddenin özgül entalpisi, duyulur entalpi (h) ile gizli ısının (ΔH) toplamı olarak hesaplanabilir.

$$H = h + \rho \Delta H f \quad (3.37)$$

burada , f sıvı kısımdır ve h;

$$\frac{dh}{dT} = c_p \quad (3.38)$$

olarak tanımlanabilir.

bu nedenle duyulur entalpi

$$h = h_{ref} + \int_{T_{ref}}^T \rho c_p dT \quad (3.39)$$

olarak türetilir.

Şekil 3.4'te kullanılan FDM (su) için H-T eğrisi çizilmiştir. Bu eğri birim hacim başına entalpi olan özgül entalpinin H, sıcaklık alanıyla ilgili olduğunu gösterir ve faz değişim süresince bu ilişkinin doğrusal olduğu kabul edilir. FDM'in katı haldeki özgül entalpisi $T_{ort} - \delta T_{ort}$ sıcaklığında sıfırdır $H_k = 0$

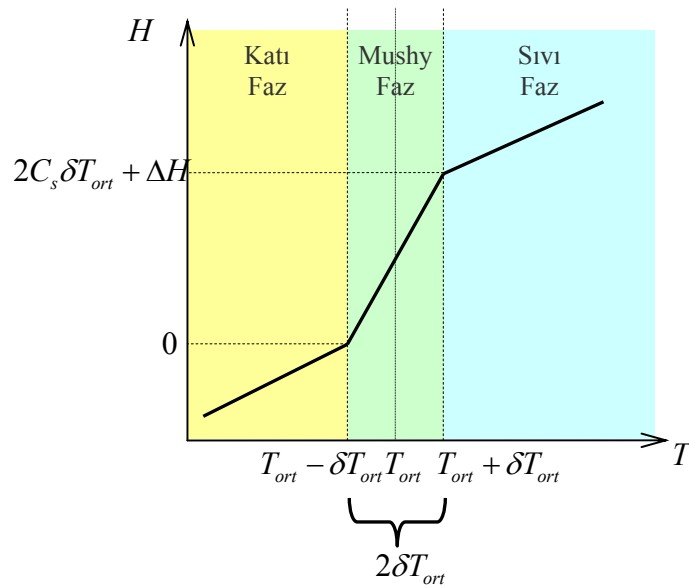
Her faz için sıcaklık ve entalpi arasındaki ilişki Denklem (3.37) ve Denklem (3.39)'ten türetilir.

Katı faz, ($T < T_{ort} - \delta T_{ort}$)

$$H(T) = (\rho c_p)_k (T - T_{ort} + \delta T_{ort}) \quad (3.40)$$

Mushy faz, ($T_{ort} - \delta T_{ort} < T < T_{ort} + \delta T_{ort}$)

$$H(T) = (\rho c_p)_m (T - T_{ort}) + \rho \frac{\Delta H}{2\delta T_{ort}} (T - T_{ort}) + (\rho c_p)_m \delta T_{ort} + \rho \frac{\Delta H}{2} \quad (3.41)$$



Şekil 3.4 Entalpi – sıcaklık arasındaki ilişki.

Sıvı faz, ($T > T_{ort} + \delta T_{ort}$)

$$H(T) = (\rho c_p)_s (T - T_{ort} + \delta T_{ort}) + \rho \Delta H \quad (3.42)$$

Denklemleri basitleştirerek sıcaklığı $T^* = T - T_{ort}$ olarak yazılabilir ve $H - T$ ilişkileri üç bölge için;

$$H(T) = \begin{cases} C_k T^* + C_k \delta T_{ort} & T^* < -\delta T_{ort} \\ \left(C_m + \rho \frac{\Delta H}{2 \delta T_{ort}} \right) T^* + C_m \delta T_{ort} + \rho \frac{\Delta H}{2} & -\delta T_{ort} \leq T^* \leq \delta T_{ort} \\ C_s T^* + C_s \delta T_{ort} + \rho \Delta H & T^* > \delta T_{ort} \end{cases} \quad (3.43)$$

Burada C_k , C_m ve C_s sırasıyla katı, mushy ve sıvı fazlar için ısı kapasite değerlerini gösterir ve ısı kapasite aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$C = c_p \rho \quad (3.44)$$

ve mushy alan için, $C_{ort} = C_m$ iki ana fazın ortalamasıdır.

$$C_m = \frac{C_s + C_k}{2} \quad (3.45)$$

Entalpi denklem (3.38)'nin integralinden doğrusal olarak açıklanabilir

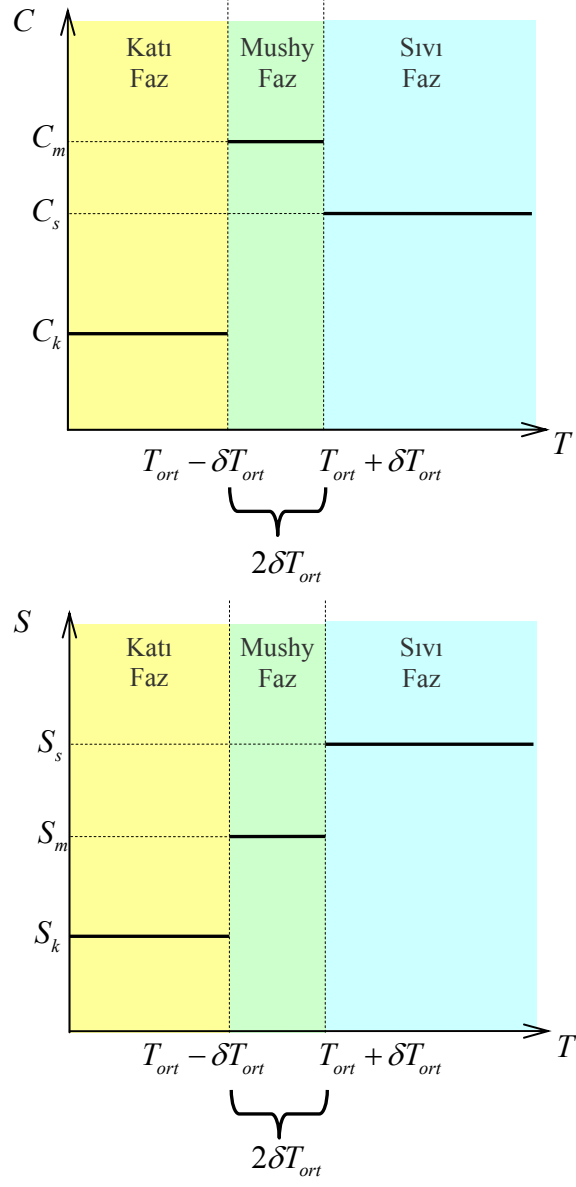
$$H = CT + S \quad (3.46)$$

S kaynak terim olarak bilinir. Isıl kapasitesi ve kaynak terimler. Denklem (3.43)' den aşağıdaki şekilde belirlenir.

$$C(T) = \begin{cases} C_k & T^* < -\delta T_{ort} & \text{Katı Faz} \\ C_m + \rho \frac{\Delta H}{2\delta T_{ort}} & -\delta T_{ort} \leq T^* \leq \delta T_{ort} & \text{Mushy Faz} \\ C_s & T^* > \delta T_{ort} & \text{Sıvı Faz} \end{cases} \quad (3.47)$$

$$S(T) = \begin{cases} C_k \delta T_{ort} & T^* < -\delta T_{ort} & \text{Katı Faz} \\ C_m \delta T_{ort} + \rho \frac{\Delta H}{2} & -\delta T_{ort} \leq T^* \leq \delta T_{ort} & \text{Mushy Faz} \\ C_s \delta T_{ort} + \rho \Delta H & T^* > \delta T_{ort} & \text{Sıvı Faz} \end{cases} \quad (3.48)$$

FDM, C ve S terimlerinin termo-fiziksel özellikleri her katı, sıvı ve mushy faz için farklıdır ama Şekil 3.5'te gösterildiği gibi gelişigüzel faz için sabittirler.



Şekil 3.5. Isıl kapasite ve kaynak terimle sıcaklık arasındaki ilişki.

Korunum denklemleri;

Süreklilik denklemi,

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u) = 0 \quad (3.49)$$

Momentum denklemi,

$$\frac{\partial \rho u}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u u) = -\nabla p + \nabla \cdot (\mu \nabla u) + \rho g \quad (3.50)$$

Enerji Denklemi,

$$\frac{\partial \rho c_p T}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u c_{pT}) = \nabla \cdot (k \nabla T) \quad (3.51)$$

Su için sıcaklık ile yoğunluk arasındaki ilişki,

$$\rho = \rho_m \left(1 - w |T - T_m|^q \right) \quad (3.52)$$

Burada; ρ_m maksimum yoğunluk (999.972 kg/m³) ve $w = 9.2793 \times 10^{-6} \text{ (}^\circ\text{C)}^{-q}$, $T_m = 4.0293 \text{ }^\circ\text{C}$ ve $q = 1.894816$ olarak Gebhart ve Mollendorf tarafından önerilmektedir.

Su için diğer özelliklerde yazılırsa,

Tablo 3.1. Suyun termo-fiziksel özellikleri

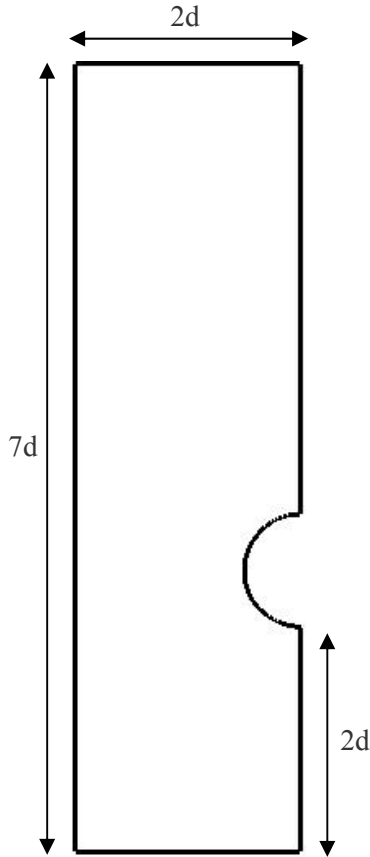
Özellik ve birimler	Faz	Özellğin değeri
$\rho [kg / m^3]$	Katı	917
	Sıvı	Eşitlik (3.52)
$c_p [J / kgK]$	Katı	2217
	Sıvı	4180
$k [W / mK]$	Katı	1,918
	Sıvı	0,578
$\mu [kg / ms]$	Sıvı	$0,5712 - 5,705e-3T$ $+1,91e-5T^2 - 2,141e-8T^3$

BÖLÜM IV

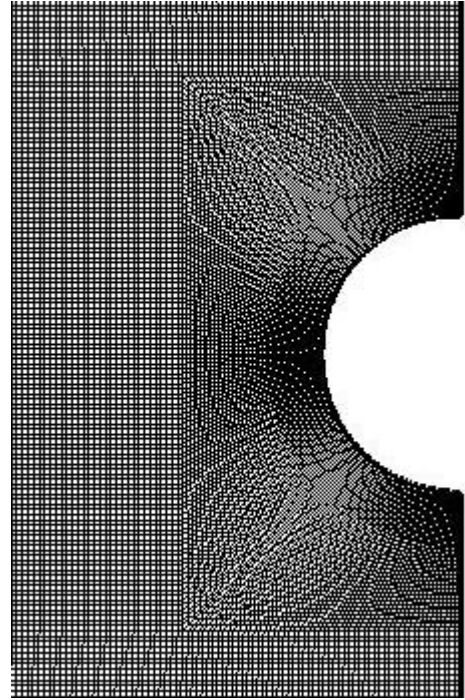
SONUÇLAR

4.1. Tek Silindirli Düzenleme İçin Buz Oluşumunun İncelenmesi

Bu çalışmada, faz değişim malzemesi olarak su kullanılan dikdörtgen şeklindeki bir tank içerisine farklı şekillerde yerleştirilen silindirlerin buz oluşumuna olan etkileri incelenmiştir. Sabit hacim içerisinde farklı düzenlemelerde yerleştirilmiş silindirler etrafındaki katılaşmayı çözmek için FLUENT programı kullanılmıştır. Öncelikle, tek silindir için Şekil 4.1’de gösterilen boyutlarda oluşturulan modele uygun ağ yapısı belirlenmiştir. Ağ yapısı oluşturulurken değişimin hızlı olması beklenen ve asıl inceleme alanı olan silindir yakınındaki bölgelerde daha sık bir ağ yapısı oluşturularak çözümün hassasiyeti artırılmıştır.



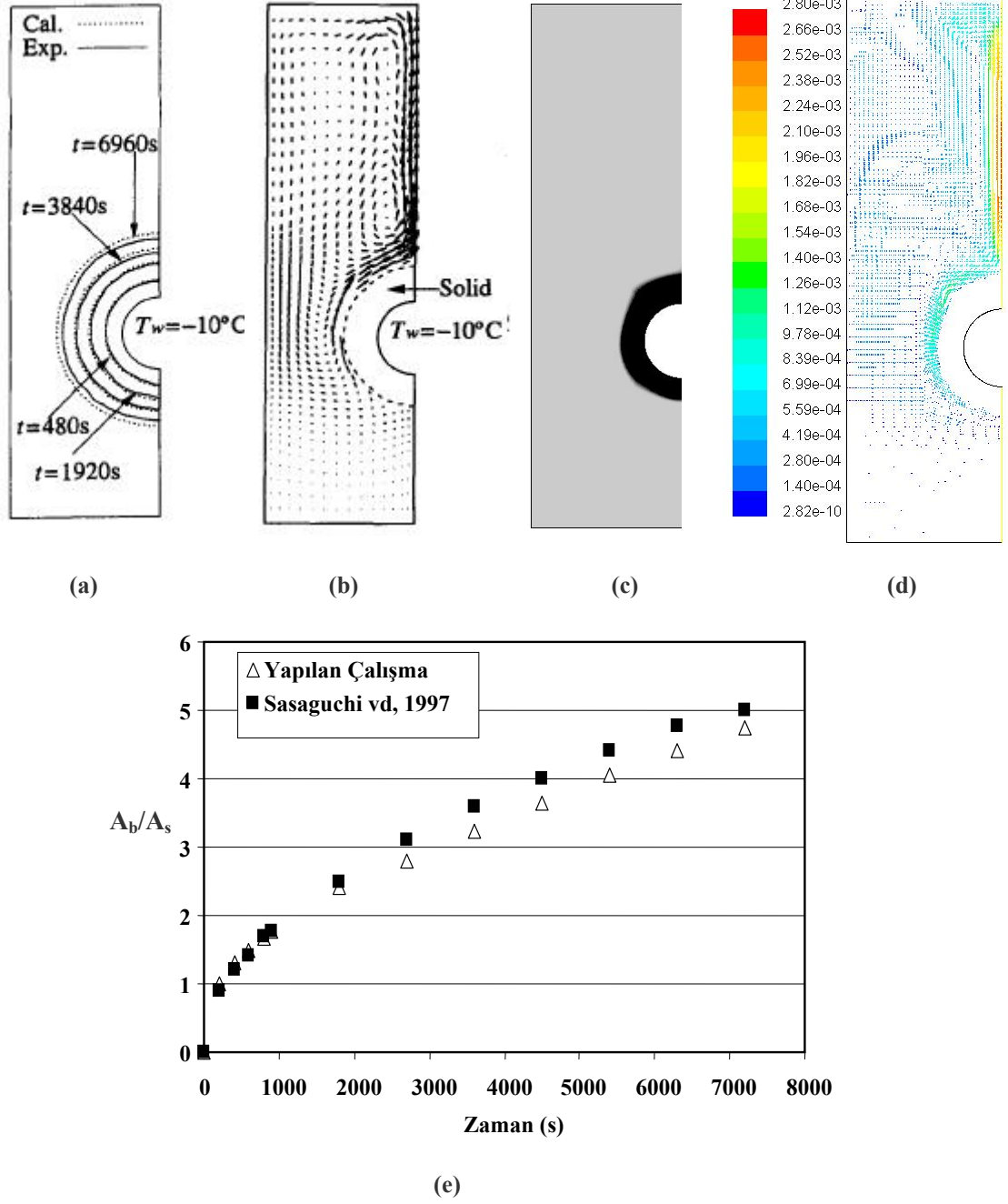
Şekil 4.1. Tek Silindir için Oluşturulan Model



Şekil 4.2. Oluşturulan model için ağ yapısı

Tek silindirli düzenleme için zamana bağlı yapılan sayısal çözümlemeler sonucunda, buz alanının (A_b) silindir kesit alanına (A_s) oranı A_b/A_s elde edilerek, referans çalışmadaki sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Şekil 4.3.’de görüldüğü gibi, deneysel sonuçlarla sayısal çözümler

karşılaştırıldığında, buz oluşumunun ilk zamanlarında katılaşma oranlarının tamamen aynı, ilerleyen katılaşma zamanları için ise oldukça yakın ve paralel olduğu görülmüştür. Böylece, kullanılan sayısal yöntemin doğru olduğu sonucuna varılabileceği düşünülmektedir.



Şekil 4.3. (a) Referans çalışmada belirli sürelerde meydana gelen buz kalınlıkları, (b) Referans çalışmada 1920 sn sonundaki hız dağılımı, (c) Yapılan çalışmada 1800 sn sonunda silindir üzerindeki buz oluşumu, (d) Yapılan çalışmada 1800 sn sonundaki hız dağılımı, (e) Tek silindir etrafındaki buz oluşumunun karşılaştırılması

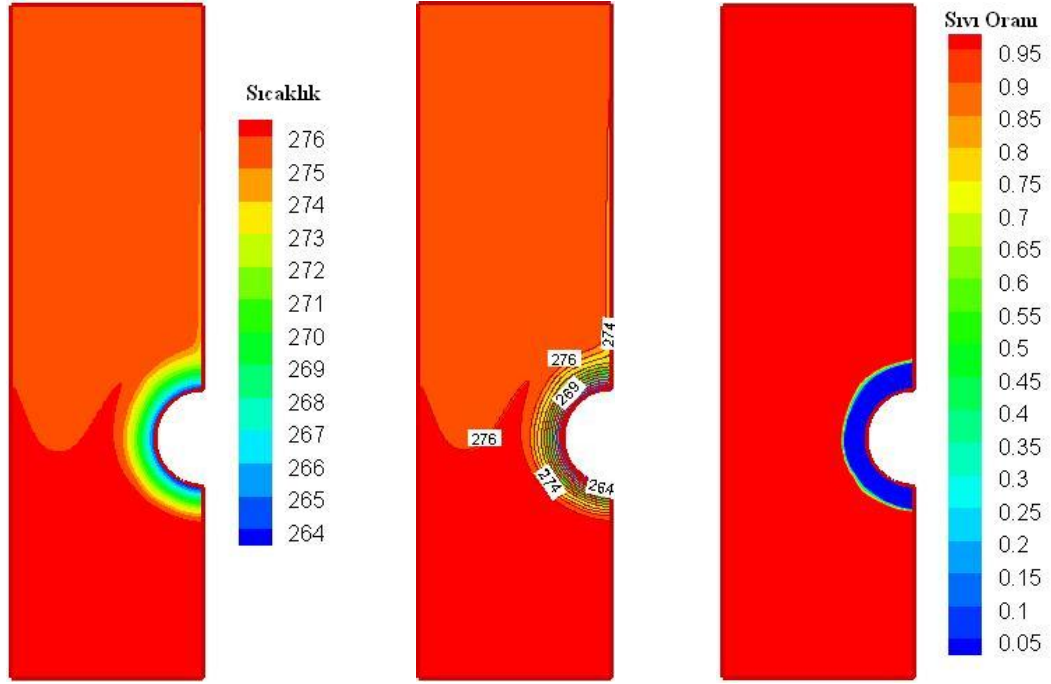
Referans çalışmanın sonuçlarıyla yapılan çalışmanın sonuçları karşılaştırıldığında analiz başlangıcından itibaren yaklaşık 1500 sn'ye kadar alan oranlarının aynı analizin devamında ise değerler arasında bir fark olduğu görülmektedir. Bunun sebebinin ise ağ yapısından kaynaklandığı düşünülmektedir. Oluşturulan ağ yapısına bakıldığında silindir etrafında belirli bir kalınlığa kadar küçük elemanlar seçilmiş ve faz değişim bölgesinden uzaklaştıkça elemanlar büyüyerek devam etmiştir. Elemanların küçük olduğu bölgede daha hassas sonuçlar elde edilmiştir. Ağ elemanlarının büyüdüğü bölgeye kadar bulunan sonuçlar referans çalışmayla büyük benzerlik göstermektedir. Ancak elemanların büyüdüğü bölgede ise alan oranları arasında bir fark olduğu görülmektedir.

Burada silindir çapı 0,0254 m, depo içerisindeki başlangıç su sıcaklığı 4 °C ve silindir yüzey sıcaklığı -10 °C olarak alınmıştır. Analizlerde belirlenen modele uygunluğu, kolay oluşturulabilmesi ve çözülebilmesi gibi avantajlarından dolayı ağ elemanı olarak dörtgensel eleman kullanılmıştır. Kullanılan ağ yapısı oluşturulan model için Şekil 4.2'de gösterilmiştir. Bu çalışmada, çözümlemelerin kolaylaştırılması amacıyla aşağıdaki kabuller yapılmıştır:

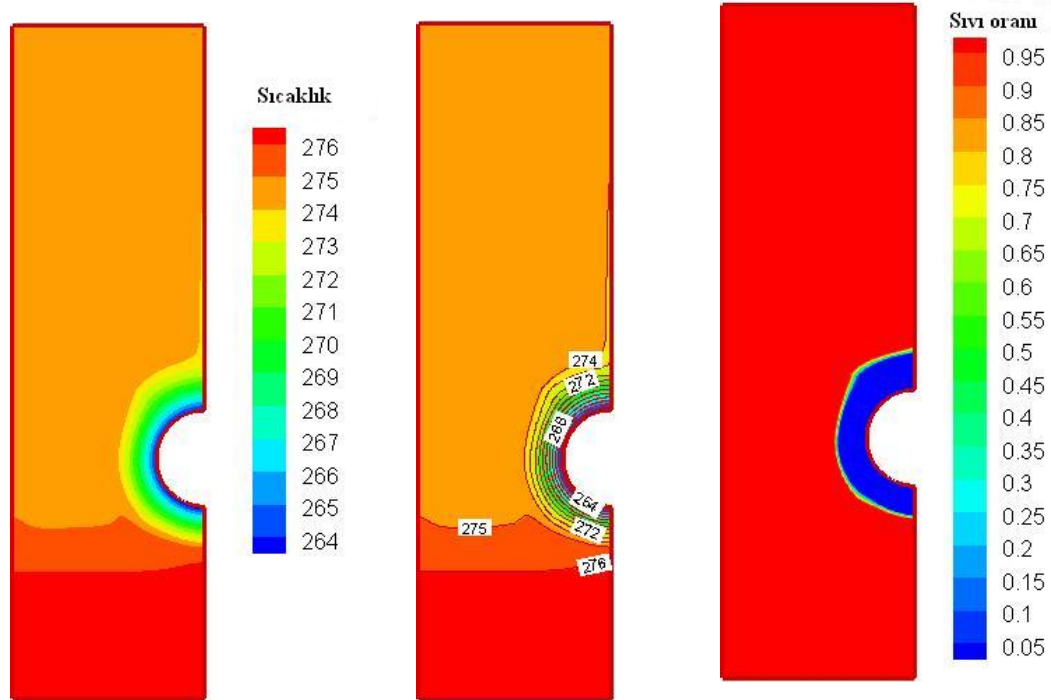
- i) Akış iki boyutlu ve laminardır.
- ii) Tank içerisinde faz değişim malzemesi (FDM) olarak kullanılan su, Newtonian bir akışkandır.
- iii) Isı iletim katsayısı k ve özgül ısı c , katı ve sıvılar için ayrı ayrı sabit değerler olarak alınmıştır ($k_s \neq k_k$, $c_s \neq c_k$)
- iv) Tank cidarları yalıtılmıştır.
- v) $t=0$ anında su (FDM) durağandır.
- vi) $t=0$ anında katılma sözkonusu olmadığından dolayı $h=h_i=c_s T_i$ geçerlidir
- vii) Silindir yüzeylerinde kaymama ($u=0$, $v=0$) prensibine dayalı duvar sınır koşulu ve buna ek olarak, $h=h_d=c_k T_d$ geçerlidir.

Elde edilen sonuçlarda, tüm modellemeler için 900, 1800, 3600 ve 7200 sn için sıcaklık ve sıvı oranlarının dağılımları gösterilmektedir. Ayrıca farklı silindir düzenlemelerinin katılma oranlarının (A_b/A_s) zamanla değişimi de grafiksel olarak gösterilmiştir. Sıvı oranı; depo içerisinde bulunan sıvı miktarının başlangıçtaki toplam sıvı miktarına oranıdır. Yani, sıvı oranının 0 olması suyun tamamen buza dönüştüğü bölgeyi, 1 olması ise katılmanın olmadığı ve tamamen su olduğunu göstermektedir.

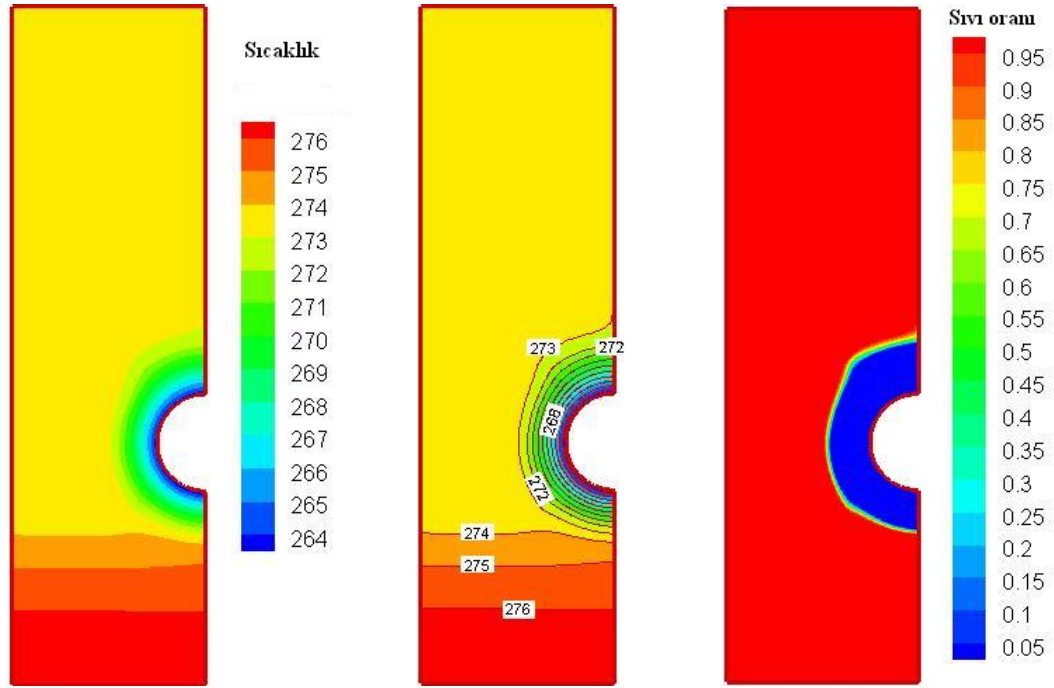
4.1.1. Tek silindirli düzenleme için $T_c = 263$ K olması durumunda buz oluşumunun incelenmesi



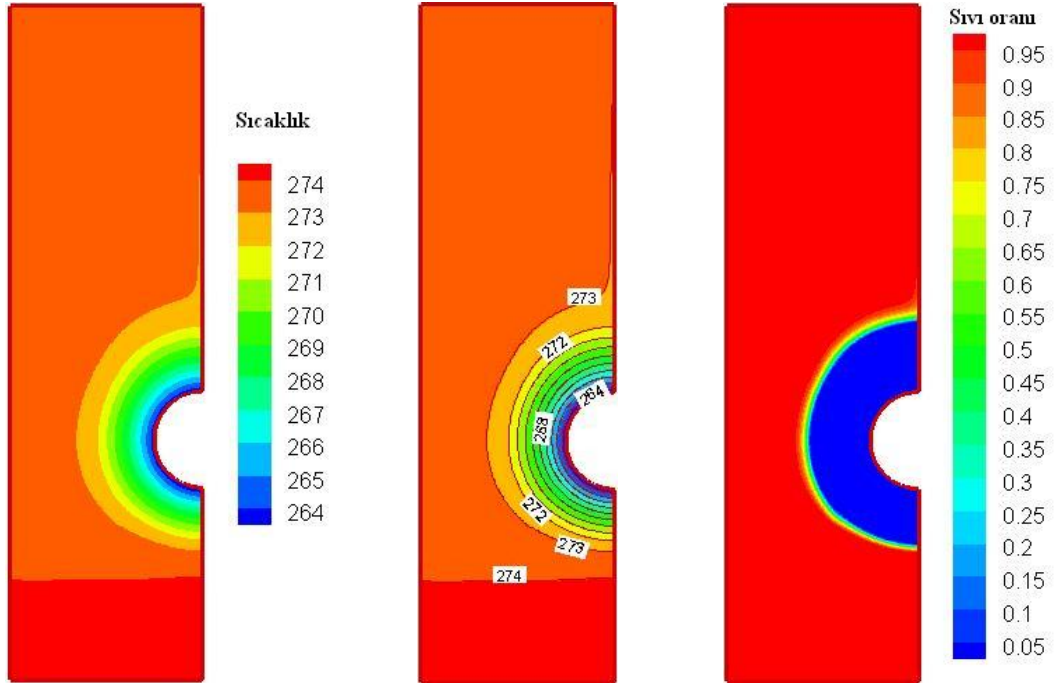
Şekil 4.4. Tek Silindirli düzenleme için , 900 sn sonundaki sıcaklık dağılımı ve sıvı oranları ($T_c = 263$ K).



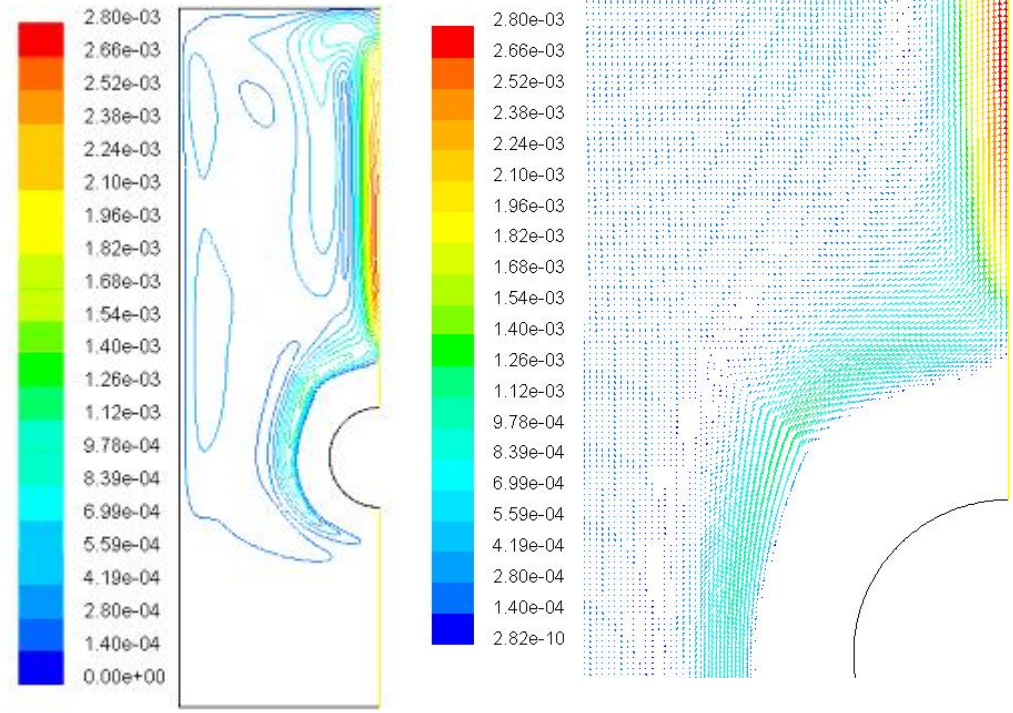
Şekil 4.5. Tek Silindirli düzenleme için 1800 sn sonundaki sıcaklık dağılımı ve sıvı oranları ($T_c = 263$ K).



Şekil 4.6. Tek Silindirli düzenleme için 3600 sn sonundaki sıcaklık dağılımı ve sıvı oranları ($T_c = 263$ K).



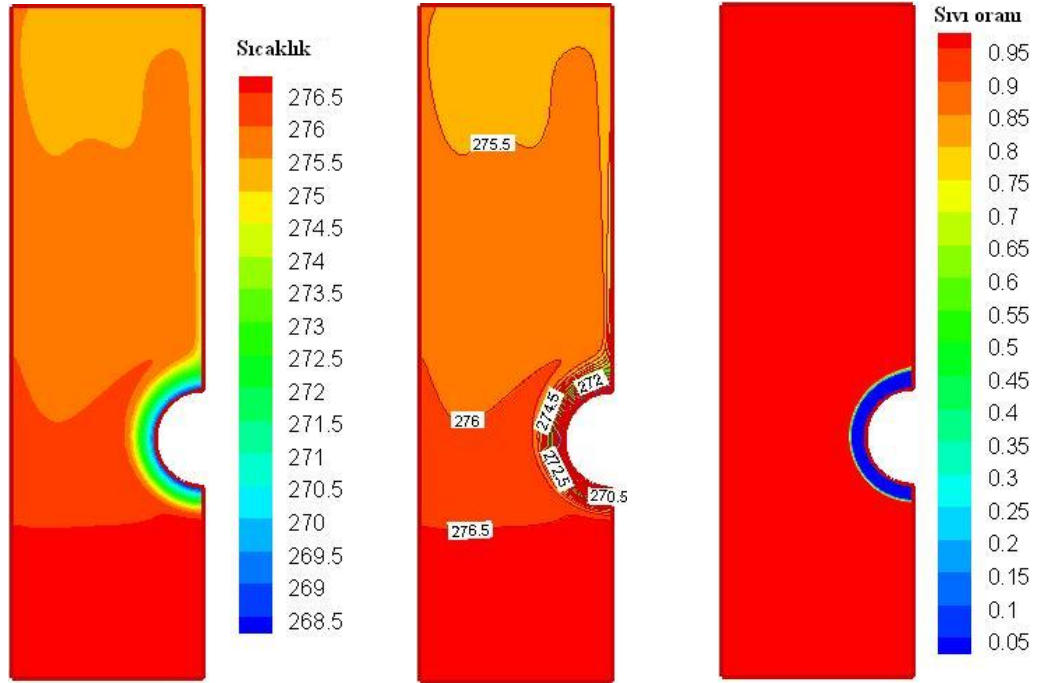
Şekil 4.7. Tek Silindirli düzenleme için 7200 sn sonundaki sıcaklık dağılımı ve sıvı oranları ($T_c = 263$ K).



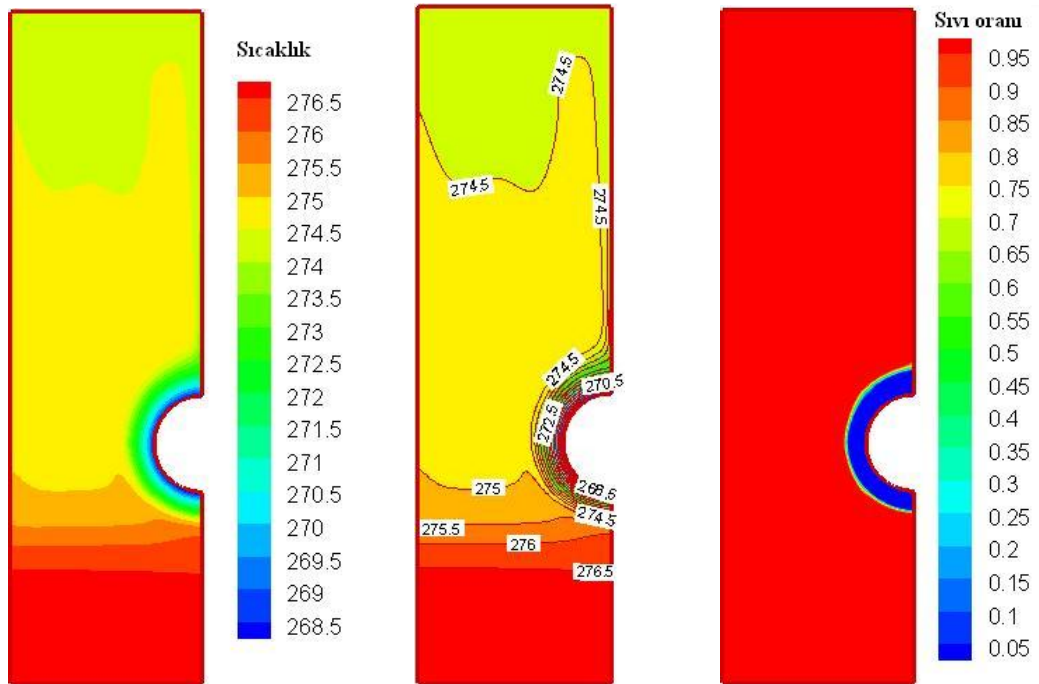
Şekil 4.8. Tek silindirli düzenleme için 1800 sn sonundaki hız dağılımı vektörleri

Tek silindirli düzenleme için, tank içerisindeki su sıcaklığının $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve silindir yüzey sıcaklığının $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ olması durumu için sıcaklık dağılımlarına bakıldığında analiz başlangıcında depo içerisinde her noktada suyun $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklığa sahip olduğu görülmektedir. Ancak zamanla silindir yüzeyine yakın yerlerde soğuyan su doğal konveksiyonun etkisiyle yukarı yönlü olarak hareket etmektedir. Şekil 4.8.'de hız dağılımlarına bakılırsa vektörlerin yönünden suyun yukarı yönlü hareket ettiği görülmektedir. 1800 sn sonunda (Şekil 4.5.) sıcaklık dağılımlarına bakıldığında ise tankın üst bölgesinde suyun yaklaşık $1-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklığa ve tankın alt bölgesindeki suyun ise yaklaşık $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklığa sahip olduğu görülmektedir. 7200 sn sonunda (Şekil 4.7.) sıcaklık dağılımlarına bakıldığında ise tankın üst bölgesinde suyun sıcaklığının artık 0°C 'ye yakın değerlere ulaştığı ve alt bölgede kalan suyun ise sıcaklığının $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'ye düştüğü görülmektedir. Sıvı oranlarına bakıldığında ise; silindir yüzeylerine yakın bölgelerde soğuyan suyun etkisiyle buz oluşumu önce başlamaktadır ve ilerleyen zamanla birlikte buz kalınlığının arttığı görülmektedir. Buz kalınlığının silindirin üst kısmında daha kalın olduğu görülmektedir. Bunun sebebi ise; soğuyan suyun yoğunluk etkisiyle yukarı doğru hareket etmesinden dolayı soğuk su üst kısımda daha fazla depolanmaktadır ve buna bağlı olarak buz oluşumu daha fazla olmaktadır.

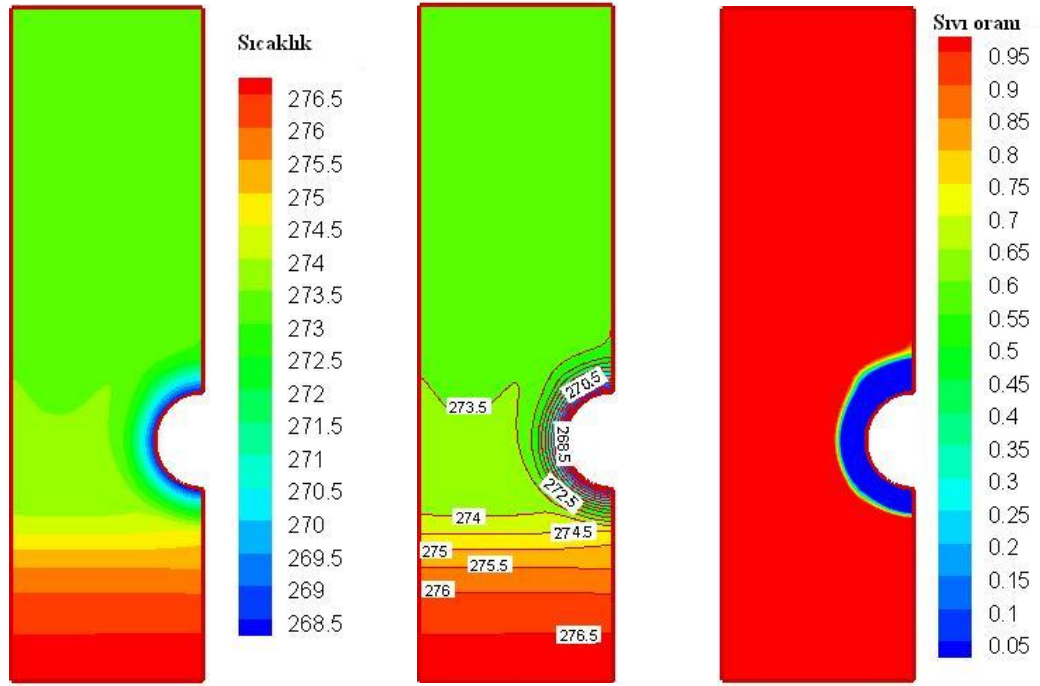
4.1.2. Tek silindirli düzenleme için $T_c = 268$ K olması durumunda buz oluşumunun incelenmesi



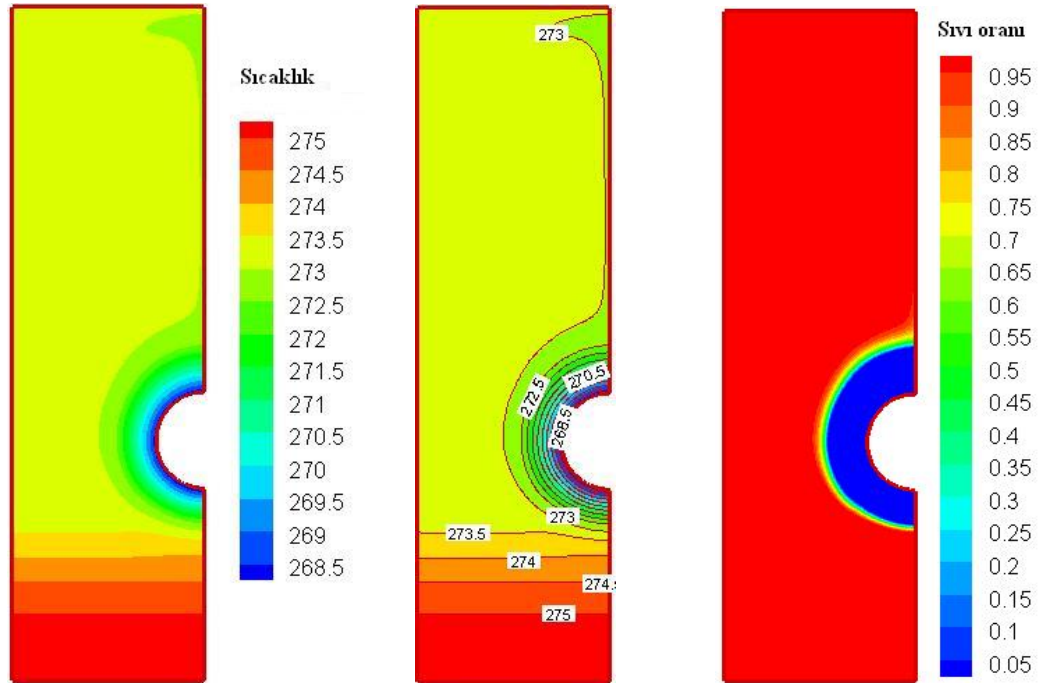
Şekil 4.9. Tek Silindirli düzenleme için 900 sn sonundaki sıcaklık dağılımı ve sıvı oranları ($T_c = 268$ K).



Şekil 4.10. Tek Silindirli düzenleme için 1800 sn sonundaki sıcaklık dağılımı ve sıvı oranları ($T_c = 268$ K).

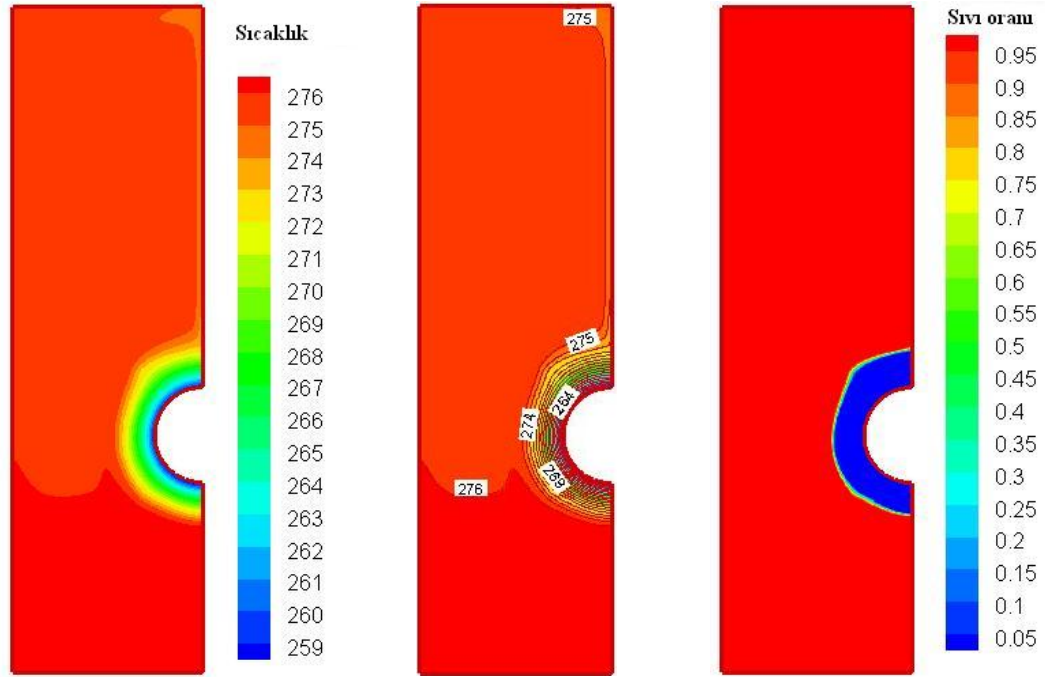


Şekil 4.11. Tek Silindirli düzenleme için 3600 sn sonundaki sıcaklık dağılımı ve sıvı oranları ($T_c = 268$ K).

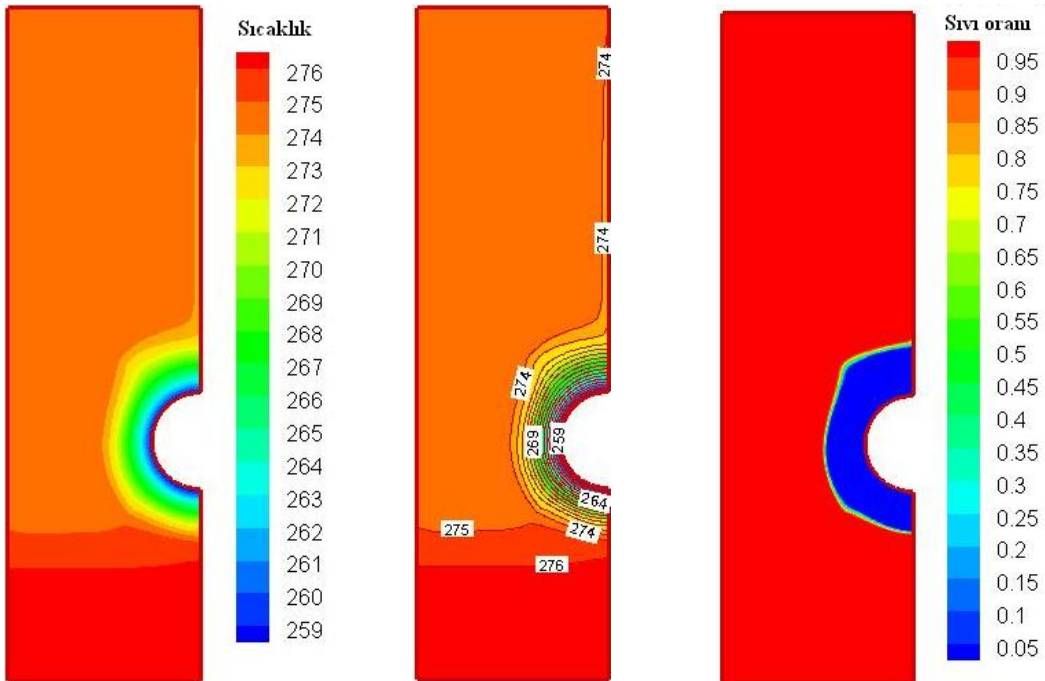


Şekil 4.12. Tek Silindirli düzenleme için 7200 sn sonundaki sıcaklık dağılımı ve sıvı oranları ($T_c = 268$ K).

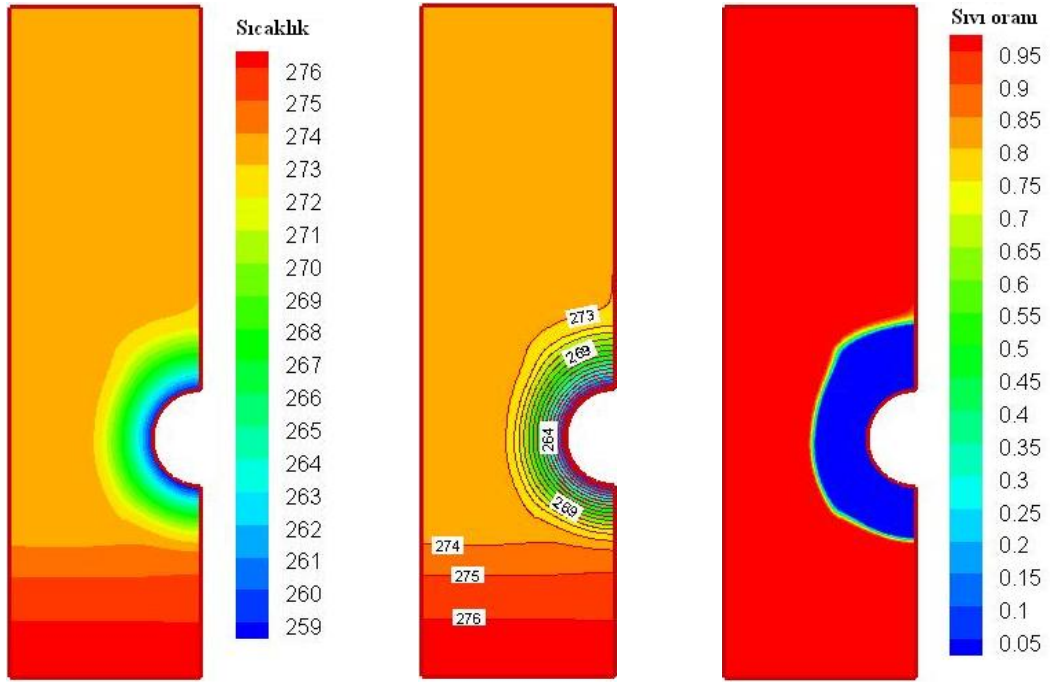
4.1.3. Tek silindirli düzenleme için $T_c = 258$ K olması durumunda buz oluşumunun incelenmesi



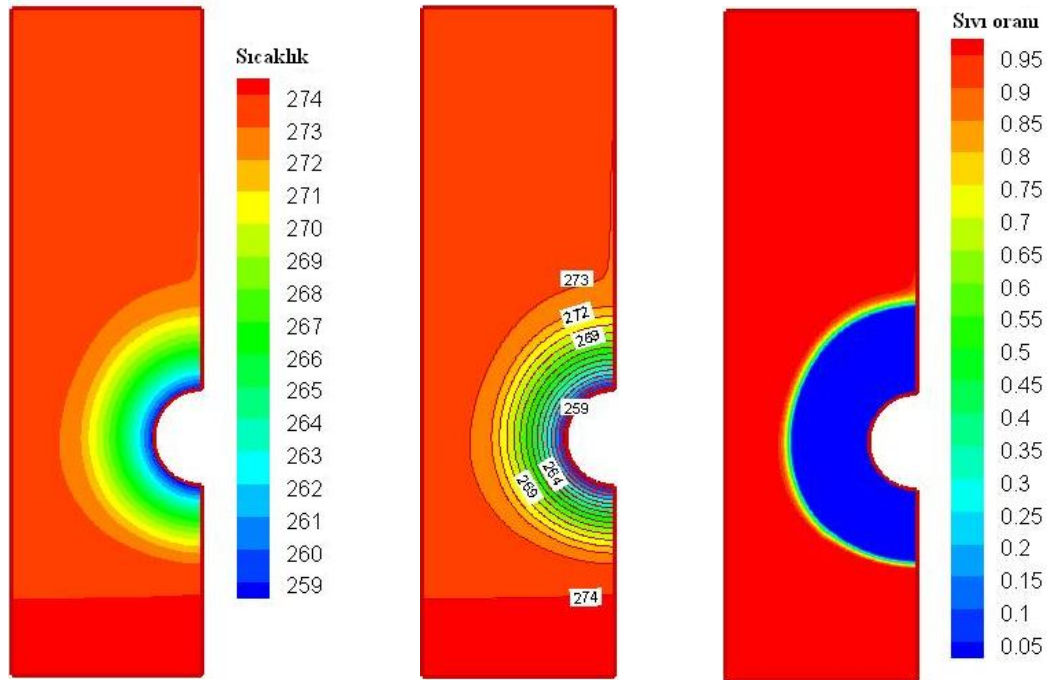
Şekil 4.13. Tek Silindirli düzenleme için 900 sn sonundaki sıcaklık dağılımı ve sıvı oranları ($T_c = 258$ K).



Şekil 4.14. Tek Silindirli düzenleme için 1800 sn sonundaki sıcaklık dağılımı ve sıvı oranları ($T_c = 258$ K).



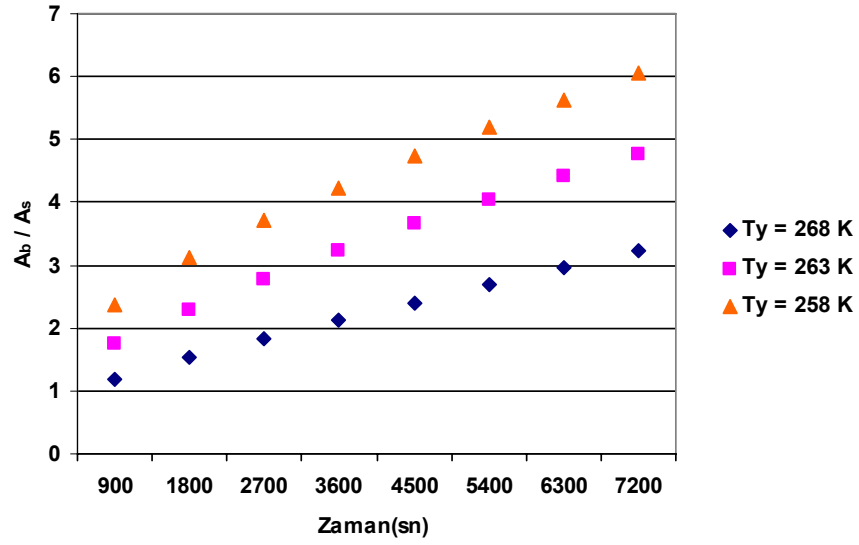
Şekil 4.15. Tek Silindirli düzenleme için 3600 sn sonundaki sıcaklık dağılımı ve sıvı oranları ($T_y = 258$ K)



Şekil 4.16. Tek Silindirli düzenleme için 7200 sn sonundaki sıcaklık dağılımı ve sıvı oranları ($T_c = 258$ K).

Tek silindirli düzenleme için yüzey sıcaklığı -5 °C, -10 °C ve -15 °C olarak değiştirilerek sonuçlar karşılaştırılmıştır (Şekil 4.17.). Tek silindirli düzenleme sıcaklık ister -5 °C ister -15 °C seçilsin sıcaklık dağılımlarına bakıldığında (Şekil 4.9-10-11-12-13-14-15-16.) depo içerisinde

bulunan suyun analiz başlangıcında deponun her noktasında 4 °C sıcaklığa sahip olduğu ancak ilerleyen zamanlarda doğal konveksiyonun etkisiyle soğuyan suyun tankın üst bölgesine doğru hareket ettiği görülmektedir. Soğuyan su tankın üst bölgesinde toplanırken sıcaklığı yüksek olan suyun ise tankın alt bölgesinde konumlandığı görülmektedir. Buz oluşumuna bakıldığında ise silindir üzerinde buz kalınlığının zamanla arttığı görülmektedir. Silindirin üst tarafındaki buz kalınlığının daha fazla olduğu görülmektedir. Bunun sebebi ise, soğuyan su tankın üst bölgesinde doğru hareket ederek üst taraftaki buz oluşumunun daha kısa zamanda gerçekleşmesinden kaynaklanmaktadır.

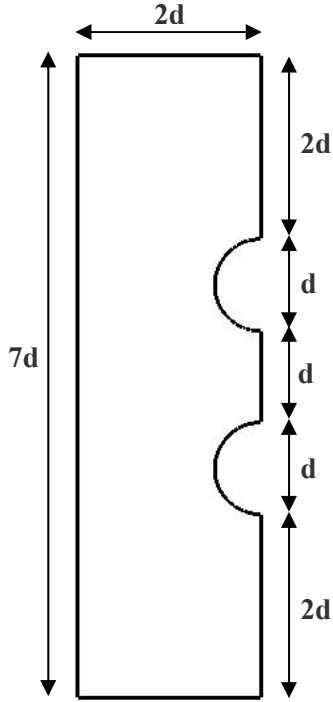


Şekil 4.17. Tek silindirli düzenleme için farklı yüzey sıcaklıklarında buz alanının (A_b) silindir kesit alanına oranı (A_s) nın zamana bağlı değişimi.

Yüzey sıcaklığı -15 °C (258 K) olduğu zaman silindir yüzeylerine yakın bölgelerde bulunan su daha çabuk soğuyup yukarı doğru hareket etmekte ve daha kısa zamanda daha fazla buz oluşumu başlamaktadır. Bu sıcaklıkta; yüzey ile su arasındaki sıcaklık farkı fazla olduğundan buna bağlı olarak ısı transferi fazla olmakta ve daha kalın bir buz tabakası oluşmaktadır. Şekil 4.17.'te görüldüğü gibi alan oranı en fazla yüzey sıcaklığının -15 °C olması durumunda olmaktadır. Yüzey sıcaklığının -5 °C olması durumunda alan oranlarına bakacak olursak yüzey ile su arasındaki sıcaklık farkı azaldığı için buz oluşumu diğer sıcaklıklara göre daha uzun zamanda başlamakta ve buz kalınlığı daha az olmaktadır. Üç sıcaklık değeri için grafiğe bakarsak sıcaklık farkına bağlı olarak en fazla buz oluşumu yüzey sıcaklığının -15 °C olması durumunda ve en az buz oluşumu ise yüzey sıcaklığının -5 °C olması durumunda meydana gelmektedir.

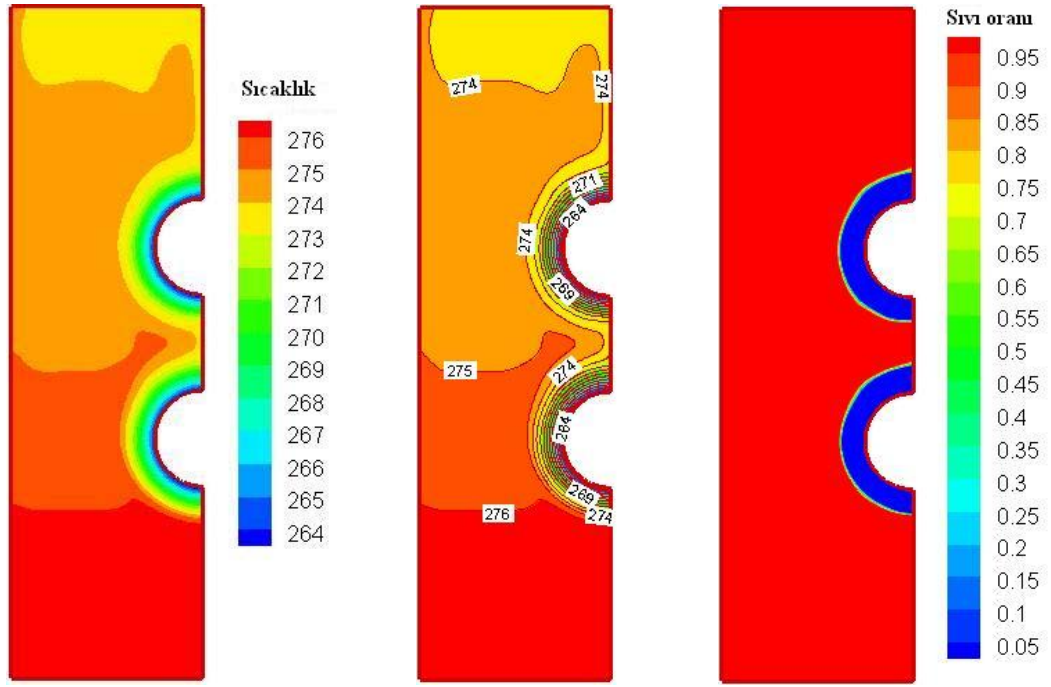
4.2. İki Silindirli Düzenleme İçin Buz Oluşumunun İncelenmesi

İki silindirli düzenleme oluşturulurken tek silindir $2d$ yüksekliğe yerleştirilmiş ve aralarında silindir çapı (d) kadar boşluk bırakılarak ikinci silindir yerleştirilmiştir (Şekil 4.18.). Silindir yüzey sıcaklığı -10°C ve depo içerisindeki su sıcaklığı 4°C olarak alınmıştır. düzenleme için 900, 1800, 3600 ve 7200 sn için sıcaklık dağılımları ve sıvı oranları aşağıdaki şekillerde gösterilmiştir. 900 sn sonunda sıcaklık dağılımına baktığımızda (Şekil 4.19.) yoğunluk etkisiyle yukarı doğru bir hareket oluşmakta ve silindir yüzeyine yakın yerlerde soğuyan su tankın üst bölgesine doğru hareket etmektedir. Tankın üst bölgesinde su sıcaklığı yaklaşık 1°C iken tankın alt bölgesinde ise suyun yaklaşık 3°C sıcaklığa sahip olduğu görülmektedir. İlerleyen zamanla birlikte analiz sonlarına doğru tankın üst bölgesinde bulunan soğuk su daha da soğumaya başlamıştır ve

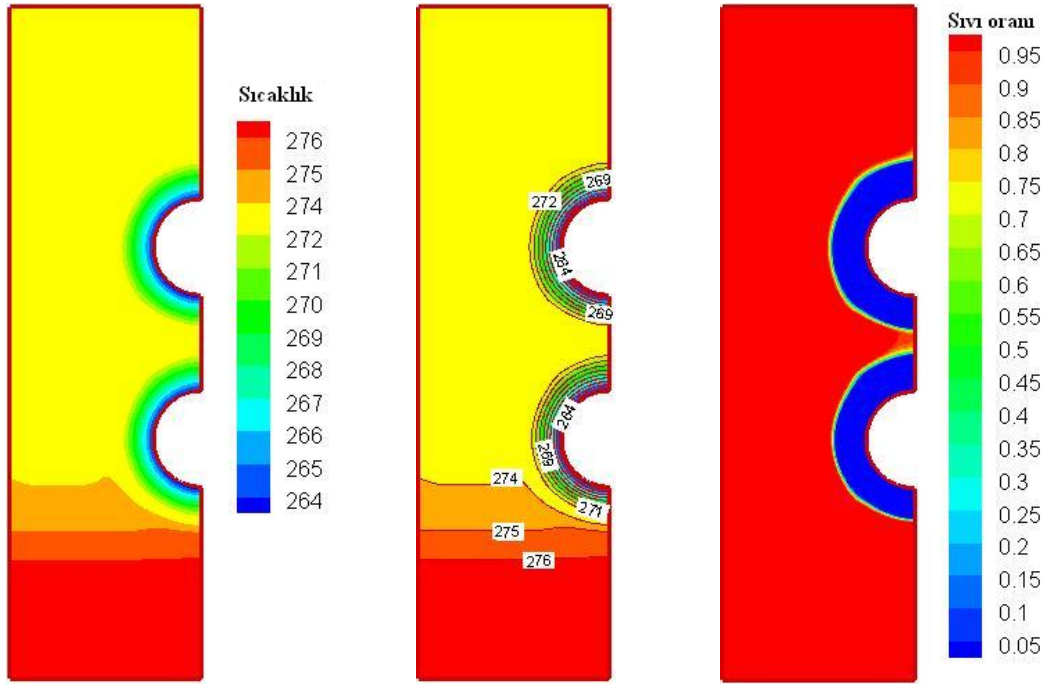


tankın alt bölgesindeki su ise yavaş yavaş soğumaya devam etmekte kendi içerisinde ısı katmanları oluşmuştur. Sıvı oranlarına bakıldığında ise analiz başlangıcında ince bir buz tabakası oluşmuştur (Şekil 4.19.). 1800 sn sonunda silindirler üzerindeki buz tabakalarında henüz bir birleşme meydana gelmemiştir (Şekil 4.20.). 3600 sn sonunda karşılıklı buz tabakaları birleşmeye başlamıştır (Şekil 4.21.) ve analiz sonunda tam bir birleşme meydana gelmiştir (Şekil 4.22.). Silindirler üzerindeki buz kalınlıklarına bakıldığında ise yine silindirlerin üst kısımlarında daha kalın olduğu açık bir şekilde görülmektedir. Alt ve üst silindirler üzerindeki buz kalınlıklarına bakıldığında ise; alt silindirin üzerindeki buz kalınlığının üst silindirin üzerindeki buz kalınlığından daha az olduğu görülmektedir. Bunun sebebi ise alt silindir yüzeyine temas ederek soğuyan su daha sonra üst silindire temas ettiğinde daha fazla soğumaktadır ve böylelikle sıcaklık farkı arttığı için burada daha kalın bir buz tabakası oluşmaktadır.

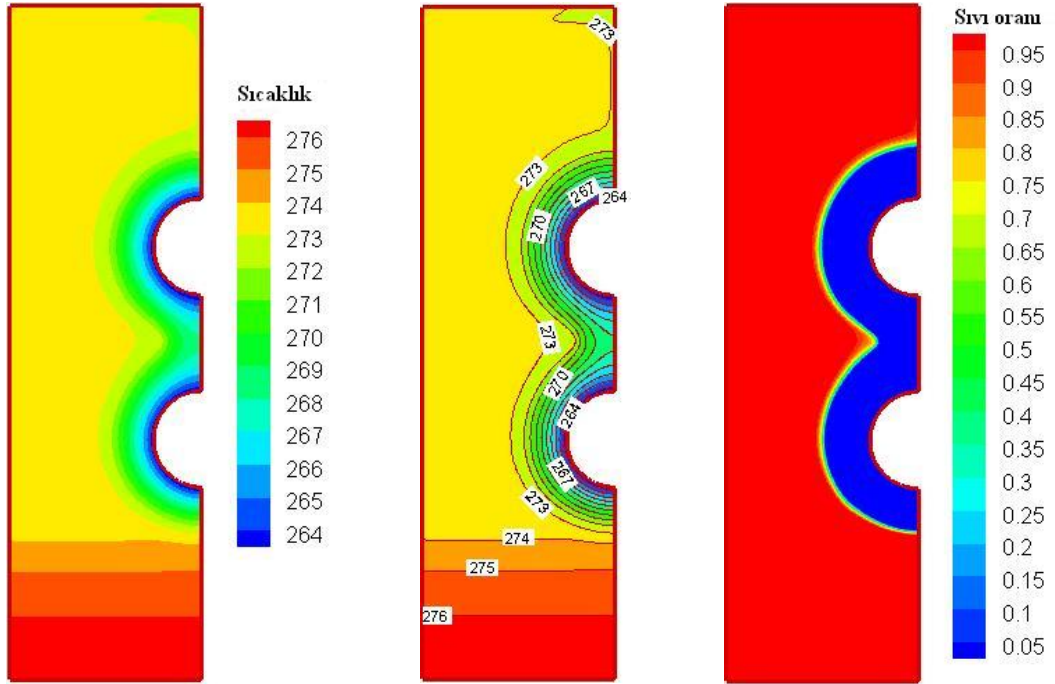
Şekil 4.18. İki Silindir İçin Oluşturulan Model.



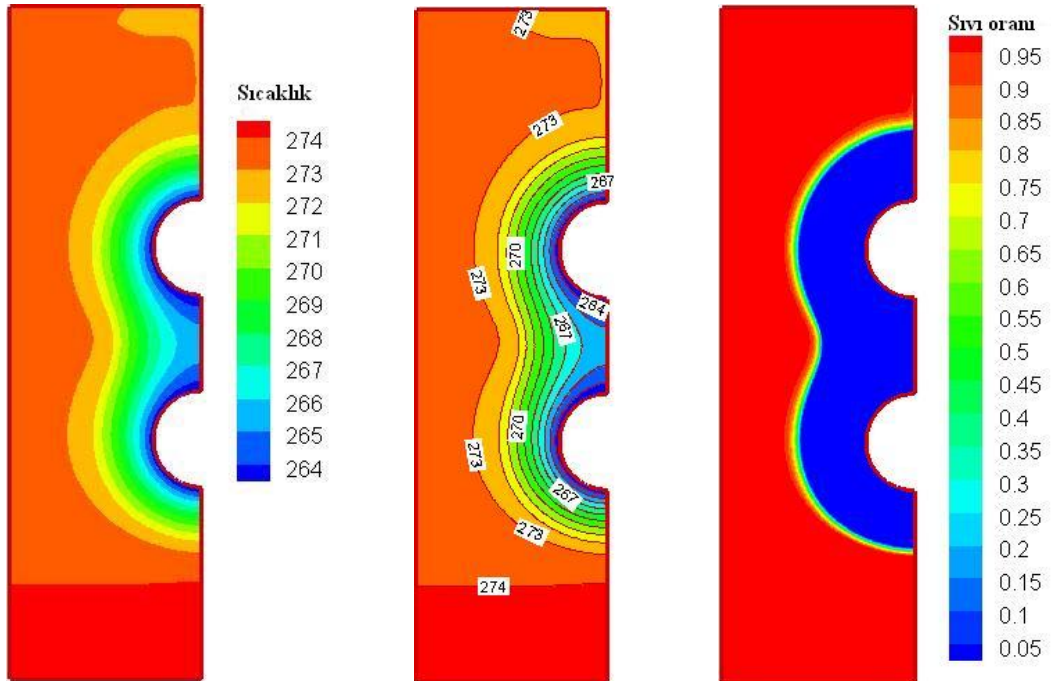
Şekil 4.19. İki Silindirli düzenleme için 900 sn sonundaki sıcaklık dağılımı ve sıvı oranları ($T_c = 263$ K).



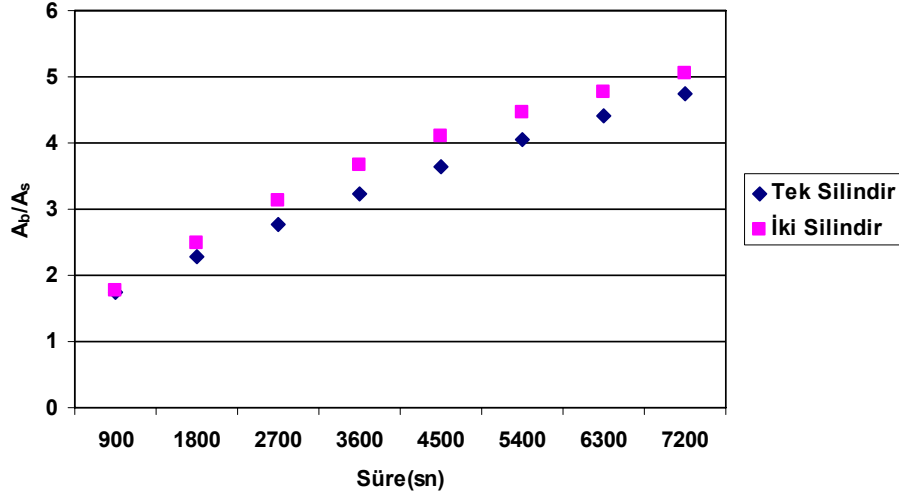
Şekil 4.20. İki Silindirli düzenleme için 1800 sn sonundaki sıcaklık dağılımı ve sıvı oranları ($T_c = 263$ K).



Şekil 4.21. İki Silindirli düzenleme için 3600 sn sonundaki sıcaklık dağılımı ve sıvı oranları ($T_c = 263$ K).



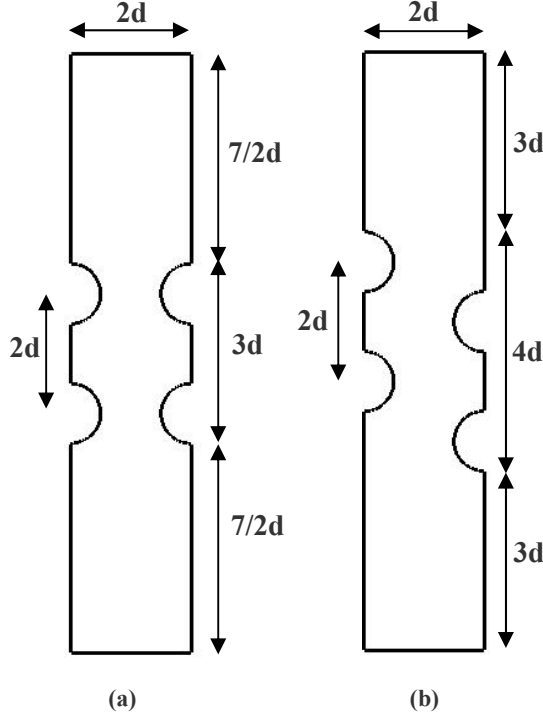
Şekil.4.22. İki Silindirli düzenleme için 7200 sn sonundaki sıcaklık dağılımı ve sıvı oranları ($T_c = 263$ K).



Şekil 4.23. Tek ve iki silindirli düzenleme için buz alanının (A_b) silindir kesit alanına oranı (A_s) nın zamana bağlı değişimi.

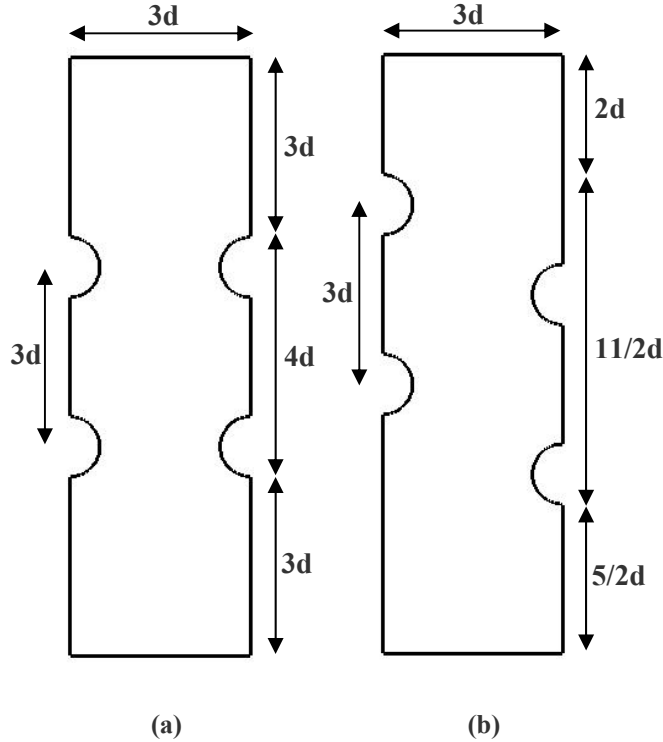
Tek ve iki silindirli düzenlemeler için Şekil 4.23.'e baktığımızda 900 sn de yaklaşık olarak buz alanının silindirin kesit alanına oranının yaklaşık aynı değerde olduğu görülmektedir. Analizin devamında ise alan oranlarında her iki düzenleme için fark oluşmaya başlamaktadır. Bunun sebebi ise; iki silindirli düzenlemede alttaki silindirin yüzeyine temas ederek soğuyan su daha sonra ikinci silindirin yüzeyine temas ettiğinde daha da soğumaktadır ve daha kalın bir buz tabakası oluşturmaktadır. Yani iki silindirli düzenlemede alt ve üst silindirler üzerinde oluşan buz tabakaları aynı olmadığından, üst silindirde oluşan buz tabakası daha kalın olduğundan alan oranı zamanla artmaktadır.

4.3. Dört Silindirli Üçgen ve Kare Dizilişli Düzenlemeler İçin Buz Oluşumunun İncelenmesi



Silindirlerin depolama tankı içerisine üçgen ve kare dizilmesinin etkisini görebilmek için yandaki düzenlemeler oluşturulmuştur. Öncelikle silindirler arası yatay ve dikey mesafe silindir çapının 2 katı kadar ($2d$) seçilerek üçgen ve kare dizilişli düzenlemeler oluşturulmuştur. Böylelikle dört silindir eşit aralıklı olarak tank içerisine yerleştirilmiştir. Şekil 4.24.'de bu düzenlemeler gösterilmiştir.

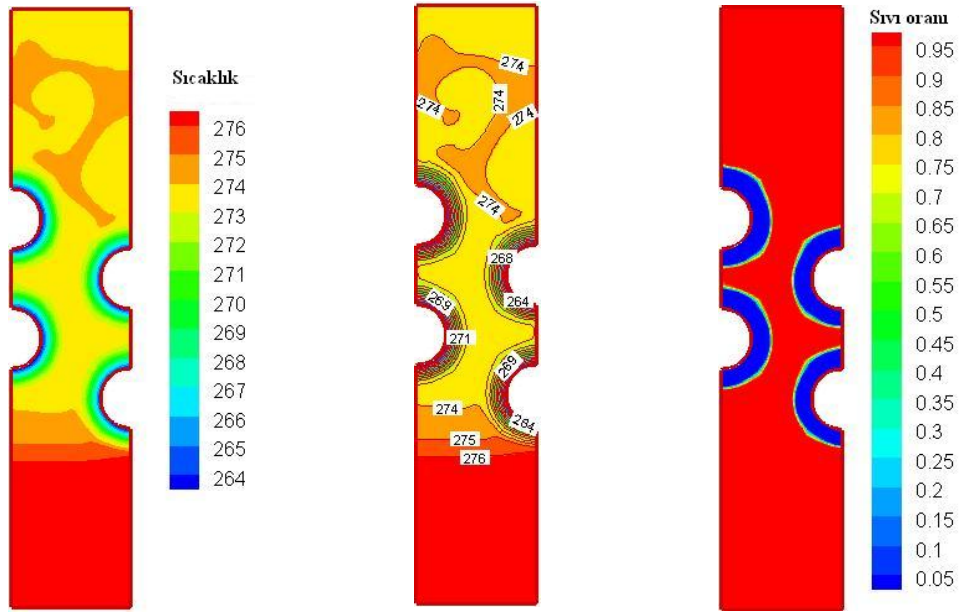
Şekil 4.24. Silindirler arası yatay ve dikey mesafe $2d$ olmak üzere (a) kare, (b) üçgen dizilişli düzenleme.



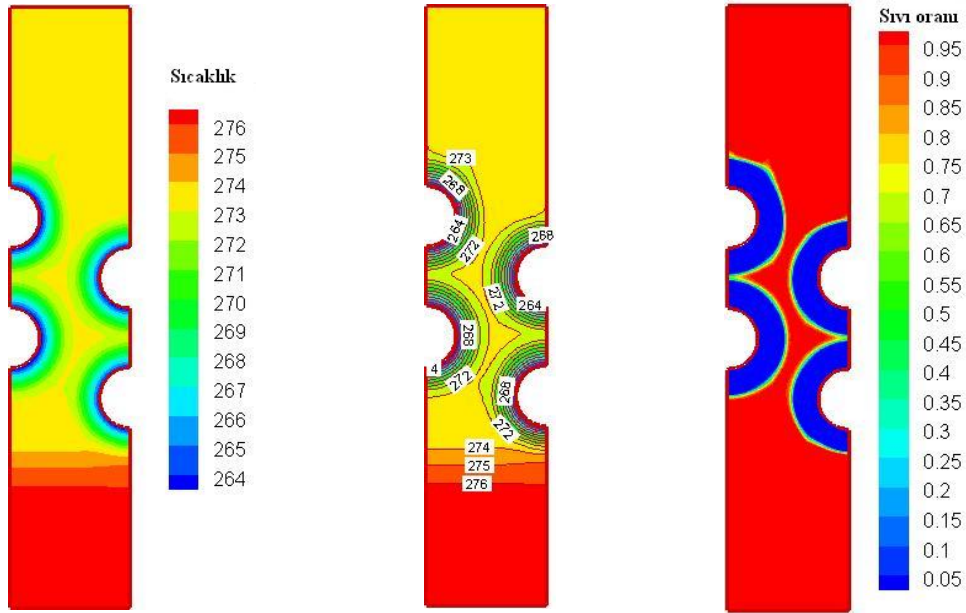
Silindirler arası yatay ve dikey mesafe silindir çapının 3 katı kadar ($3d$) seçilerek oluşturulan model Şekil 4.25.'te gösterilmiştir. Oluşturulan dört model için 900, 1800, 3600 ve 7200 sn sonucunda oluşan sıcaklık dağılımları ve sıvı oranları gösterilmektedir. Bu modeller için yapılan analizlerde depo içerisindeki su sıcaklığı $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve silindir yüzey sıcaklığı $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ kabul edilmiştir.

Şekil 4.25. Silindirler arası yatay ve dikey mesafe $3d$ olmak üzere (a) kare, (b) üçgen dizilişli düzenleme.

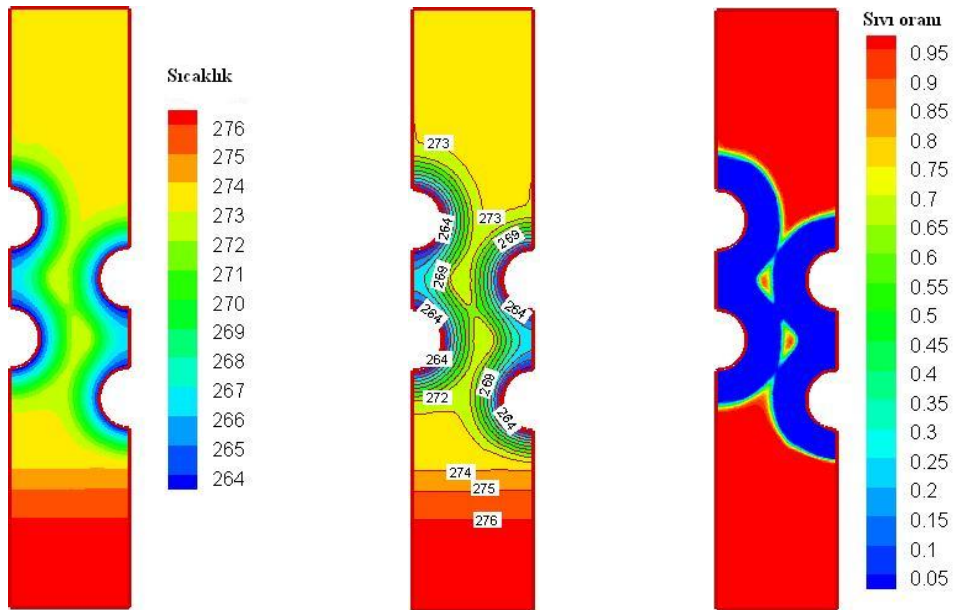
Silindirler arasındaki yatar ve dikey mesafenin 2d, aynı zamanda silindirlerin depo içerisine saptırmalı şekilde yerleştirilmeleri durumunda , sıcak suyun yoğunluk etkisinden dolayı tankın alt bölgesinde, sıcaklığı 1 °C olan soğuk suyun ise tankın üst bölgesinde konumlandığı görülmektedir. Yüzey sıcaklığı -10 °C olan silindir üzerinde oluşan katılaşmanın artması ile birlikte, hem üst bölgedeki hem de alt bölgede bulunan su daha da soğumaya başlamıştır. Gerek alt tarafa doğru oluşan renk değişimleri gerekse üst tarafta oluşan sıcaklık konturlarındaki değişimler bunu açıkça göstermektedir. 1900 sn'de tüm silindirlerin birbiri ile teması gerçekleşmiş ve 2700 sn de artık buz katmanları tamamen birbiri ile birleşmiştir. Sıcaklık dağılımlarındaki bu değişimlerin sıvı oranlarındaki dağılımlarla son derece güzel bir uyum içerisinde olduğu görülebilmektedir. 900 sn'de silindir üzerinde belirli bir kalınlığa ulaşan buz katmanı, 1800 sn sonunda alt ve üst silindirler üzerinde birbirine çok yaklaşmış ama henüz bir birleşme oluşmamıştır. Zamanın artması ile tüm silindirler üzerindeki buz katmanları birbirleri ile tamamen birleşmiştir (Şekil 4.26-27-28-29.).



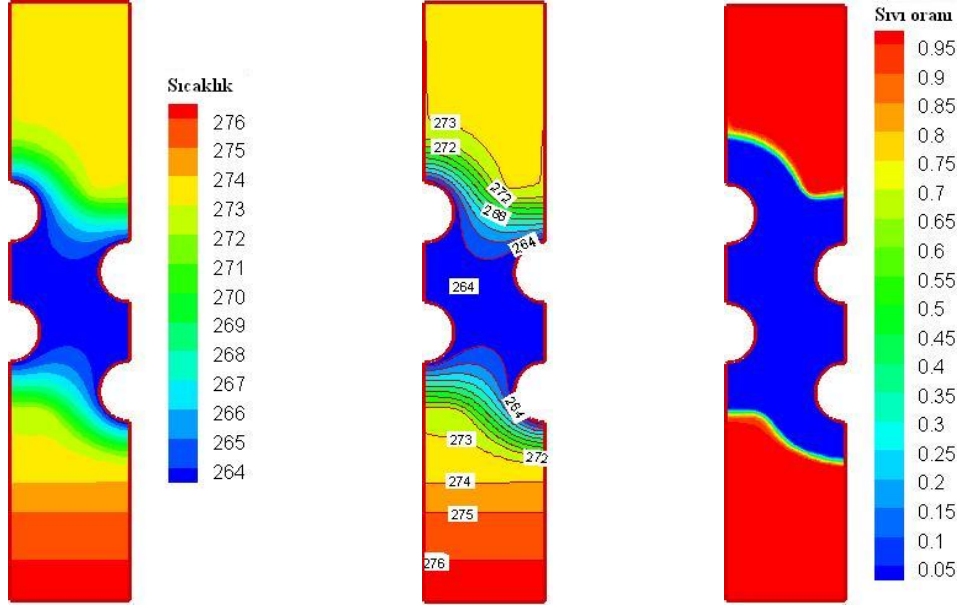
Şekil 4.26. 2d-2d Dört Silindirli üçgen dizilişli düzenleme için 900 sn sonundaki sıcaklık dağılımı ve sıvı oranları ($T_i = 277$ K).



Şekil 4.27. 2d-2d Dört Silindirli üçgen dizilişli düzenleme için 1800 sn sonundaki sıcaklık dağılımı ve sıvı oranları ($T_i=277$ K).

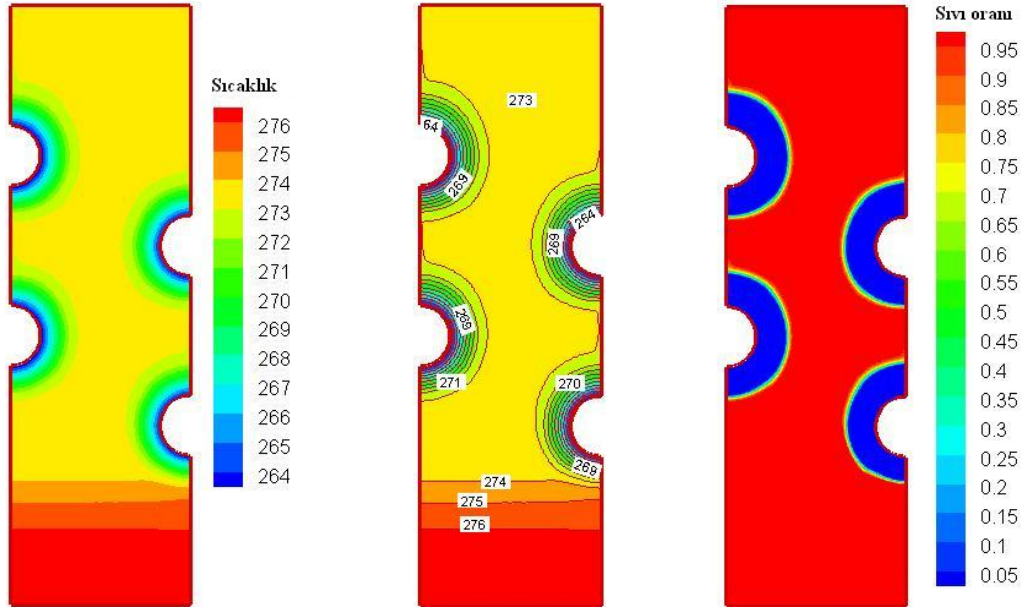


Şekil 4.28. 2d-2d Dört Silindirli üçgen dizilişli düzenleme için 3600 sn sonundaki sıcaklık dağılımı ve sıvı oranları ($T_i=277$ K).

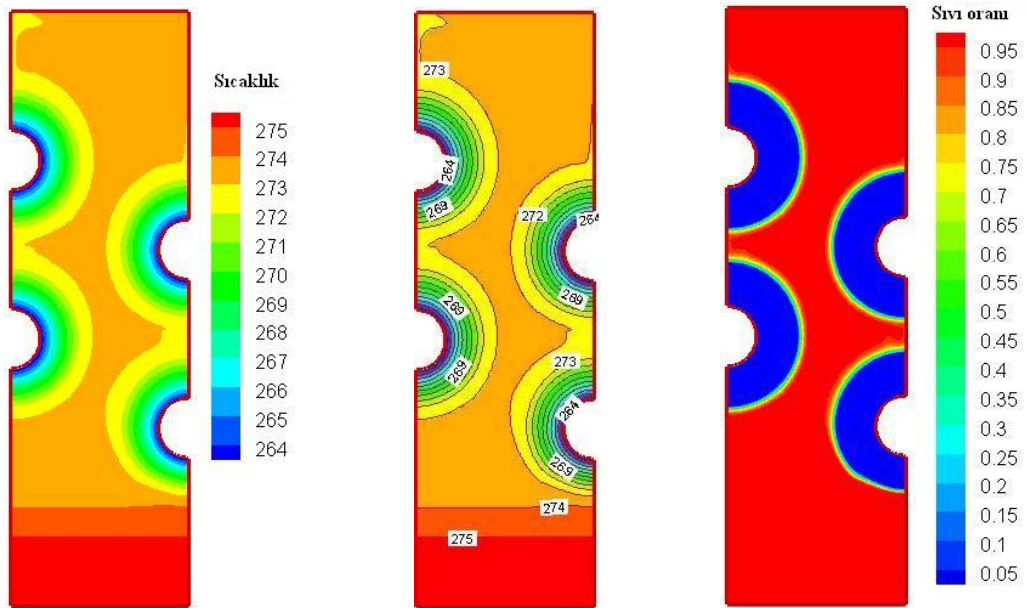


Şekil 4.29. 2d-2d Dört Silindirli üçgen dizilişli düzenleme için 900 sn sonundaki sıcaklık dağılımı ve sıvı oranları ($T_f=277$ K).

Silindirler arasındaki yatay ve dikey mesafenin 3d, silindirlerin saptırmalı şekilde kanal içerisine yerleştirilmesi durumunda ise oluşan sıcaklık dağılımlarının ve ısı katmanlaşmanın aynı geometri için saptırmasız düzenlemeyle hemen hemen aynı olduğu görülmektedir. Silindirler arası mesafenin 2d olması durumunda 900 sn için elde edilen sıcaklık dağılımları ile karşılaştırıldığında, silindirler arasındaki su sıcaklığının daha yüksek olduğu görülmektedir. Ayrıca silindirler arası mesafenin 2d ve 3d olması durumu için katılaşma oranları karşılaştırıldığında, oluşan buz tabakalarının mesafenin 3d olduğu model için daha ince olduğu anlaşılmaktadır. Bunun sebebi ise; silindirler arası mesafe 3d olduğu zaman suyun soğuması mesafenin 2d olması durumuna göre daha uzun zaman almaktadır. Silindirler arası mesafe 3d olduğu zaman arada kalan suyun hacmi daha fazladır. Buna bağlı olarak buz oluşumu zaman almaktadır ve silindirler üzerindeki buz kalınlığı daha incedir (Şekil 4.30-31-32-33.).

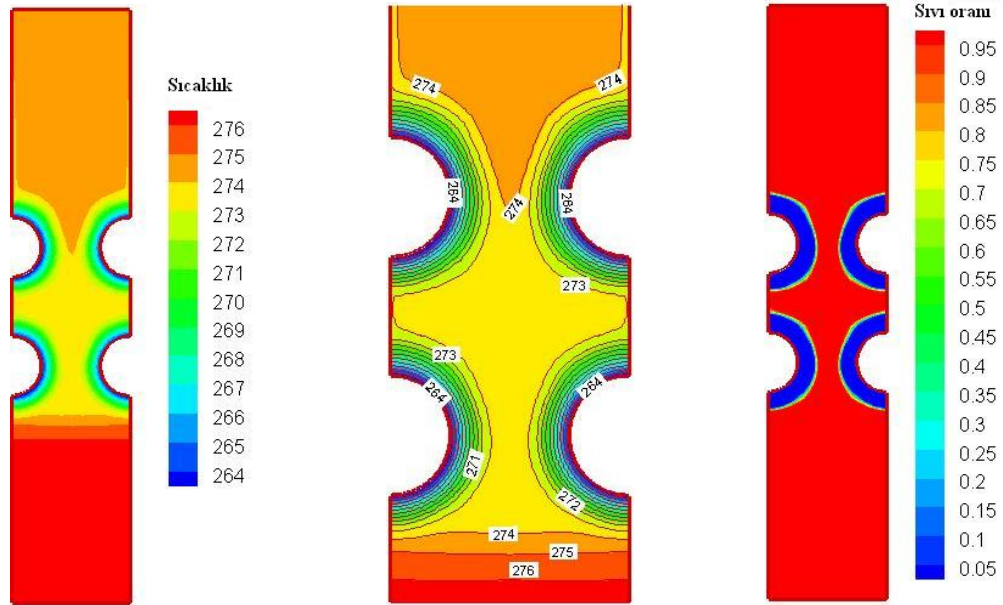


Şekil 4.32.3d-3d Dört silindirli üçgen dizilişli düzenleme için 3600 sn sonundaki sıcaklık dağılımı ve sıvı oranları($T_i = 277$ K).

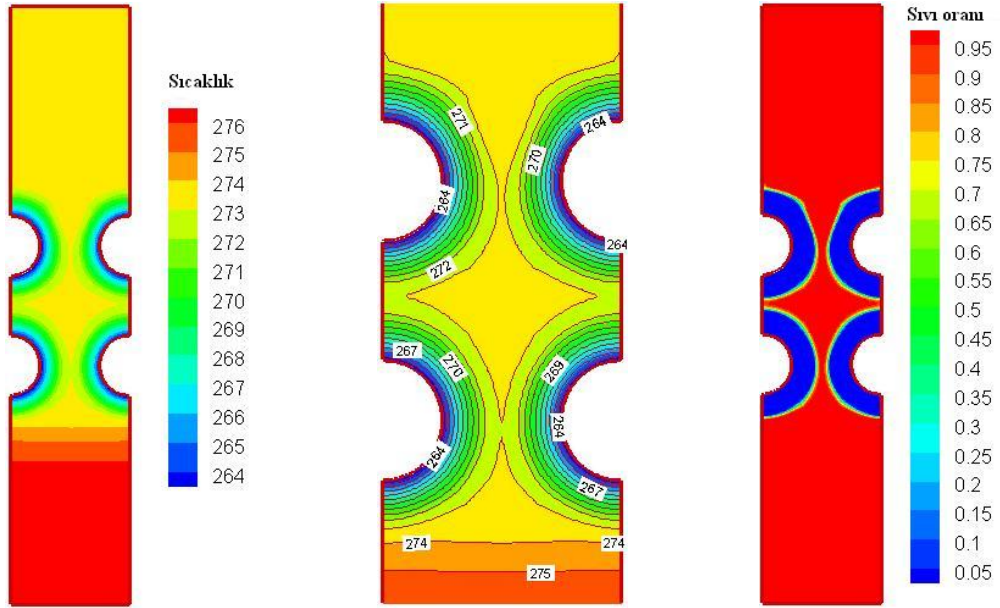


Şekil 4.33.3d-3d Dört silindirli üçgen dizilişli düzenleme için 7200 sn sonundaki sıcaklık dağılımı ve sıvı oranları($T_i = 277$ K).

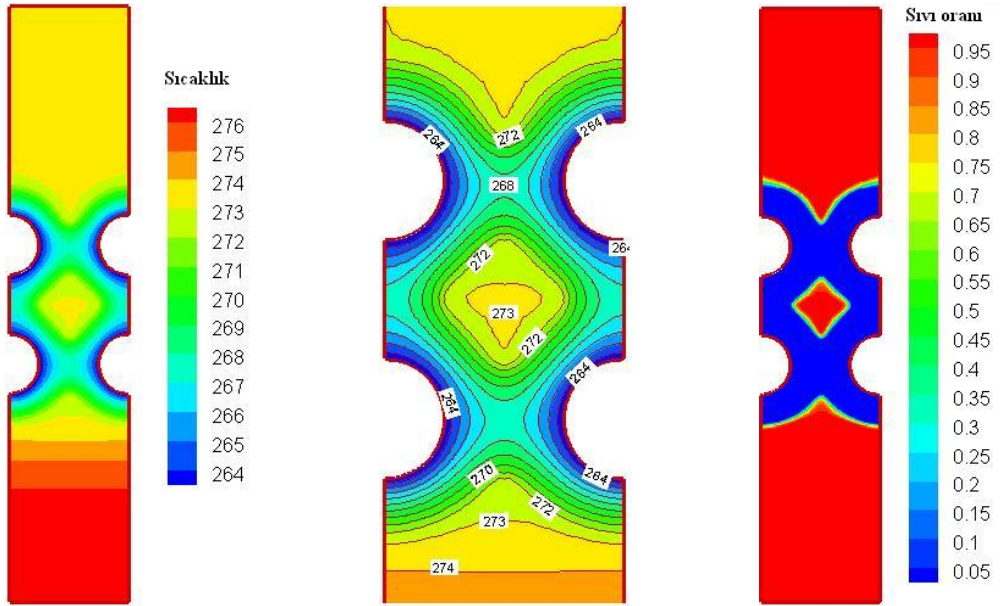
Silindirler arası yatay ve dikey mesafenin $2d$, aynı zamanda silindirlerin saptırmasız şekilde kanal içerisine yerleştirilmesi durumunda elde edilen sıcaklık dağılımları incelendiğinde, analiz başlangıcında kanal içerisinde her bölgede 4°C olan su sıcaklığının ısı katmanlaşma ile kanalın alt ve üst noktalarında farklı değerlere ulaştığı gözlenmektedir (Şekil 4.34-35-36-37). Başlangıçta 4°C sıcaklıkta ve maksimum yoğunlukta olan su, zaman içerisinde sıcaklığın azalmasıyla yoğunluk etkisinden dolayı kanal içerisinde hareketlenecektir. Silindir yüzeylerine yakın bölgelerde diğer alanlara göre daha soğuk olan suyun kanalın yukarı bölgesine hareketi sonucu olarak, kanalın alt bölgesinden yukarı bölgesine doğru suyun ısı katmanlaşması net olarak sıcaklık dağılımından görülebilmektedir. 1800 sn ve daha sonraki zamanlardaki sıcaklık dağılımları incelendiğinde, tüm silindirler üzerinde oluşan buz kalınlıkları zamanla artmaktadır. Artan buz kalınlıklarının etkisiyle üst taraftaki soğuk olan suyun daha da soğuduğu, alt tarafta birikmiş olan su katmanının sıcaklığının ise ilerleyen zamanlarda daha da azaldığını ve kendi içerisinde ayrı bir katmanlaşma oluşturduğu görülebilmektedir. Aynı model için sıvı oranlarının dağılımlarına bakıldığında, 900 sn sonunda silindir etrafındaki buzların birbirleriyle herhangi bir teması olmadığı ve tüm silindirler üzerinde oluşan buz kalınlıklarının yaklaşık olarak eşit olduğu görülmektedir. Süre 1900 sn sonuna geldiğinde, alt ve üst silindirler üzerinde oluşan buz tabakalarının birbirleri ile teması başlamış fakat karşılıklı olarak herhangi bir birleşme olmamıştır. İlerleyen zaman içerisinde oluşan buz tabakalarının hem yatay hem de dikey yönde tankın alt ve üst bölgesini ikiye bölecek şekilde birleştiği görülmektedir.



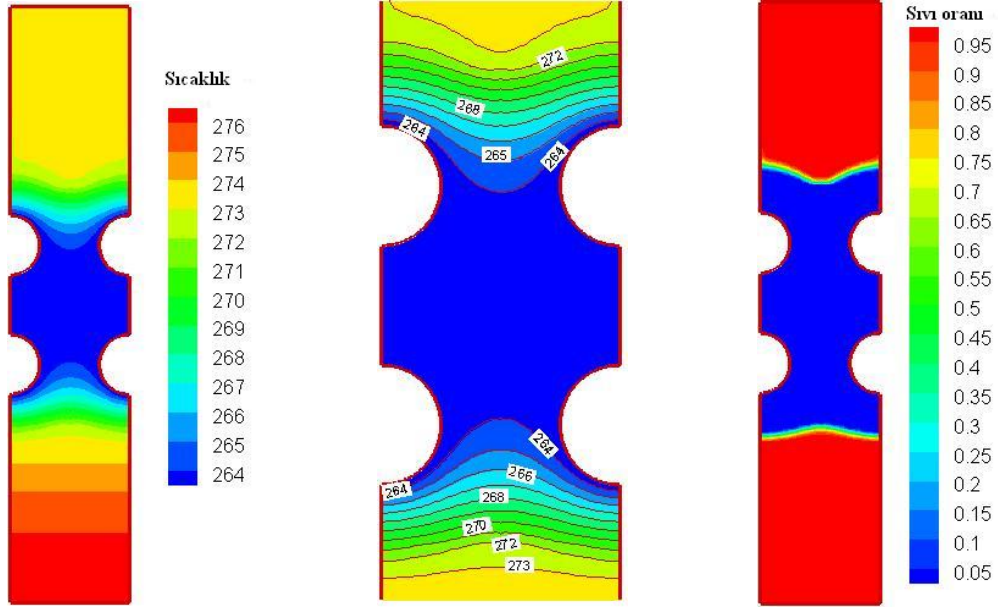
Şekil 4.34. 2d-2d Dört silindirli kare dizilişli düzenleme için 900 sn sonundaki sıcaklık dağılımı ve sıvı oranları ($T_i = 277\text{ K}$).



Şekil 4.35. 2d-2d Dört silindirli kare dizilişli düzenleme için 1800 sn sonundaki sıcaklık dağılımı ve sıvı oranları ($T_i = 277$ K).

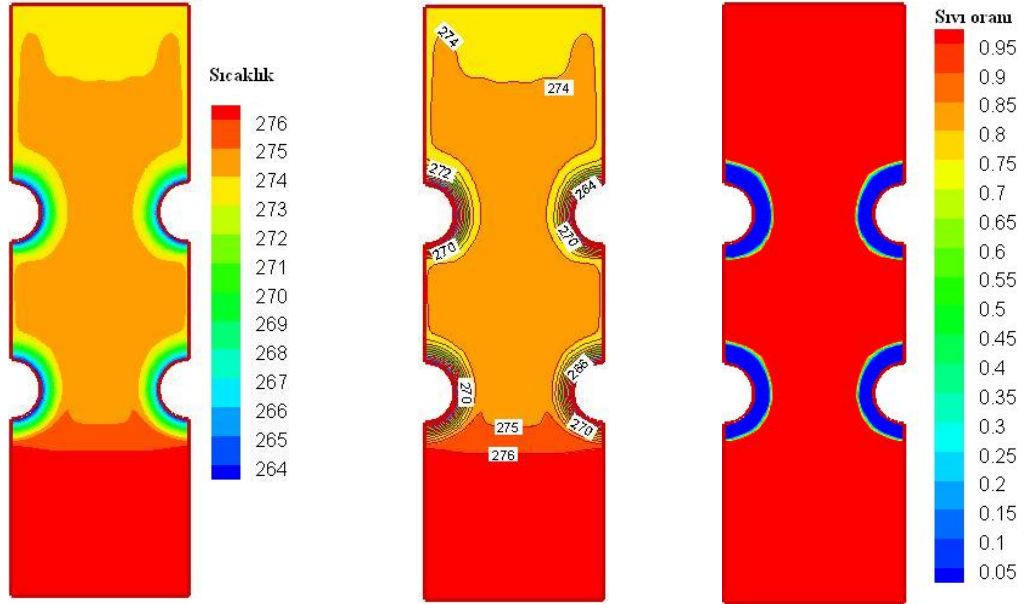


Şekil 4.36. 2d-2d Dört silindirli kare dizilişli düzenleme için 3600 sn sonundaki sıcaklık dağılımı ve sıvı oranları ($T_i = 277$ K).

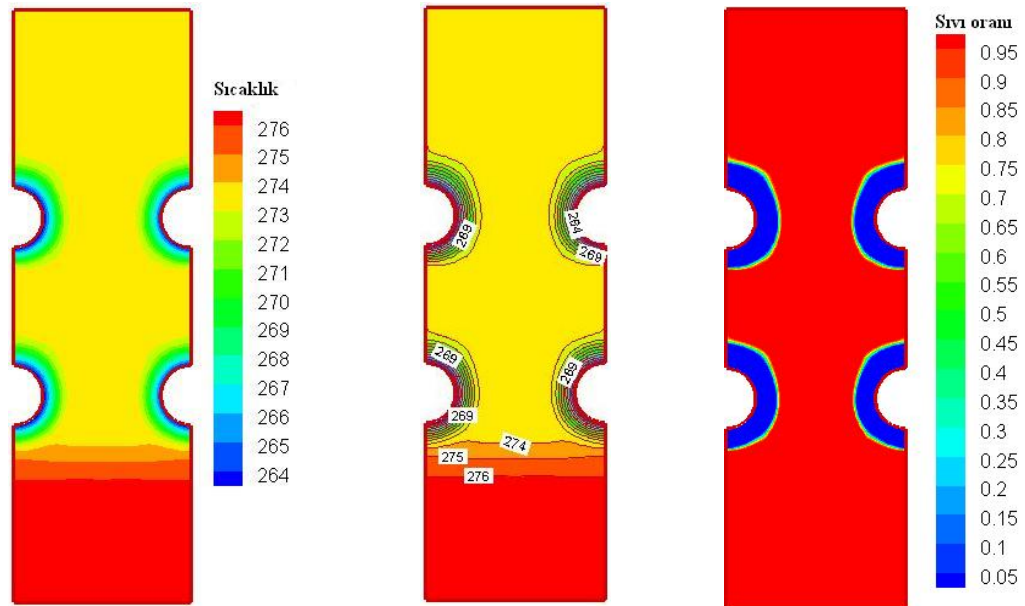


Şekil 4.37. 2d-2d Dört silindirli kare dizilişli düzenleme için 7200 sn sonundaki sıcaklık dağılımı ve sıvı oranları ($T_i = 277$ K).

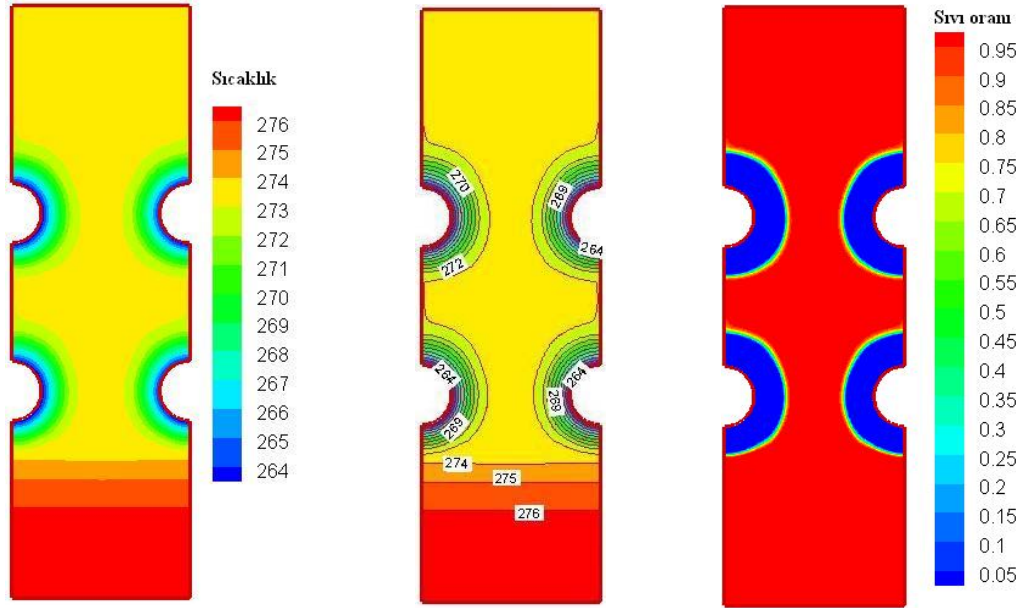
Silindirler arasındaki yatay ve dikeyi mesafenin 3d ve silindirlerin saptırmaz şekilde kanal içerisine yerleştirilmesi durumu için elde edilen sıcaklık dağılımları ve sıvı oranları Şekil 4.38-39-40-41’de gösterilmiştir. Silindir yüzeylerinde oluşan buz alanının yakınında bulunan su katmanları 0 °C sıcaklıkta iken tankın üst bölgesinde 1 °C ve alt bölgesinde 4 °C sıcaklıkta su katmanları bulunmaktadır. 2d saptırmalı silindir düzenlemesi sıcaklık dağılımlarındaki sonuçlarla paralel olarak, yoğunluk etkisinden dolayı oluşan doğal konveksiyon hareketi tank içerisindeki ısı katmanlaşma ile kendini göstermektedir. 1800, 3600 ve 7200 sn sonundaki sıcaklık dağılımları incelendiğinde, silindirler üzerinde oluşan buz tabakasının artması ile tankın alt bölgesi hariç tamamında su sıcaklığının 0 °C’ye kadar azaldığı görülebilmektedir. Sıvı oranları dağılımlarına bakıldığında ise silindirler üzerinde oluşan buz tabakalarının hiçbir zaman dilimi içerisinde birbiri ile birleşmediği görülmektedir.



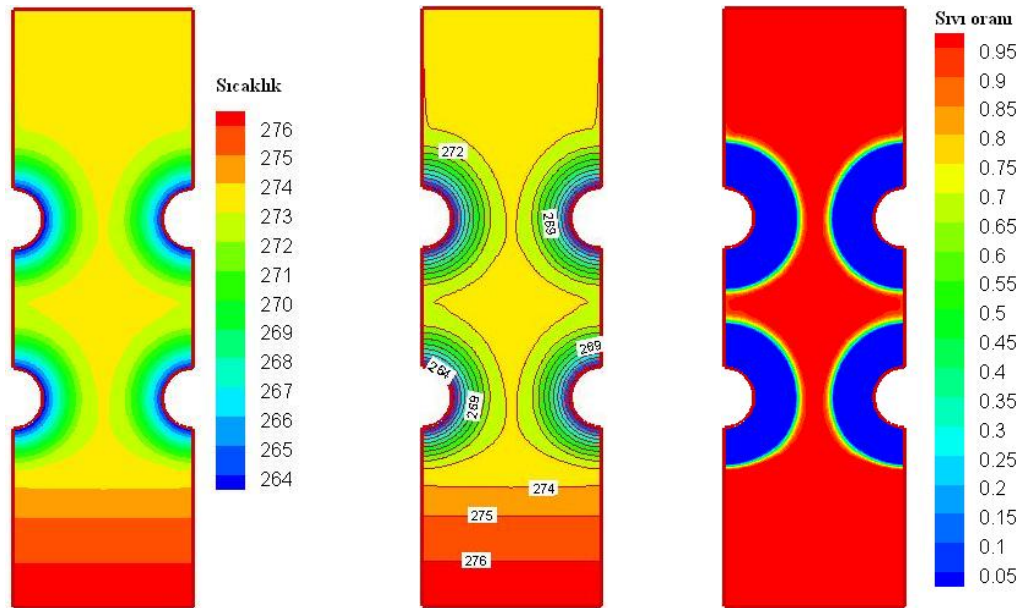
Şekil 4.38. 3d-3d Dört silindirli kare dizilişli düzenleme için 900 sn sonundaki sıcaklık dağılımı ve sıvı oranları ($T_i = 277$ K).



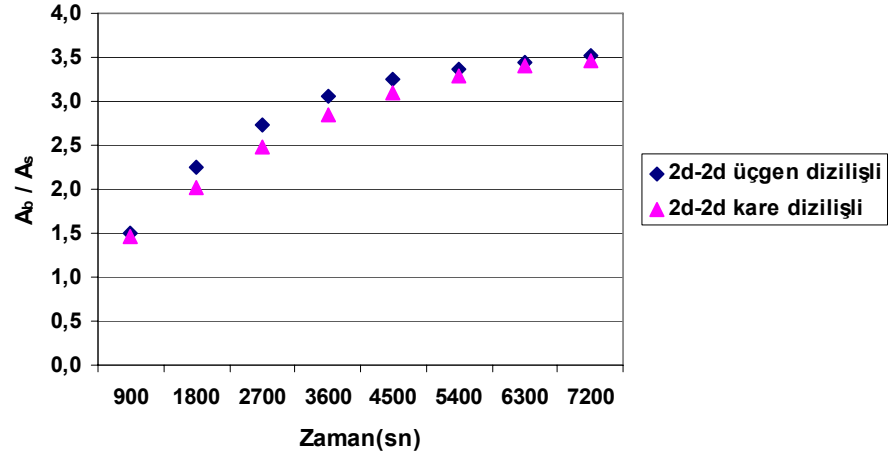
Şekil 4.39. 3d-3d Dört silindirli kare dizilişli düzenleme için 1800 sn sonundaki sıcaklık dağılımı ve sıvı oranları ($T_i = 277$ K).



Şekil 4.40. 3d-3d Dört silindirli kare dizilişli düzenleme için 3600 sn sonundaki sıcaklık dağılımı ve sıvı oranları ($T_i = 277$ K).

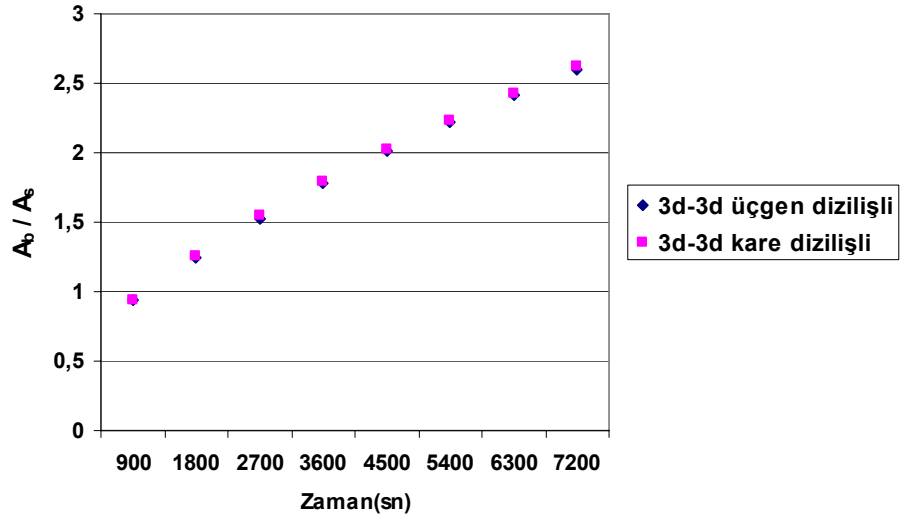


Şekil 4.41. 3d-3d Dört silindirli kare dizilişli düzenleme için 7200 sn sonundaki sıcaklık dağılımı ve sıvı oranları ($T_i = 277$ K).



Şekil 4.42. Silindirler arası yatay ve dikey mesafe 2d olması durumunda üçgen ve kare dizilişli silindirler için katılma oranlarının karşılaştırılması.

Silindirler arası mesafenin 2d ve silindirlerin tank içerisine saptırmalı ve saptırmazsız yerleştirilmesi durumları için katılma oranlarının zamanla değişimi Şekil 4.42’de gösterilmiştir. Her iki düzenleme içi yaklaşık 1000 sn süresince katılma oranları aynı iken, bu zamandan sonra silindirlerin saptırmalı yerleştirilmeleri durumu için katılma oranının zamanla arttığı görülmektedir. Yoğunluk etkisinden kaynaklı yukarı yönlü su hareketinin, saptırmalı silindir düzenlemesinde daha hızlı oluşmasından dolayı oluşan katılma tabakası daha fazladır. Her iki silindir düzenlemesi için ilerleyen zamanlarda, silindirler üzerinde oluşan buz tabakaları birleşerek tank hacmini küçültüp iki bölgeye ayırmaktadır. Bu yüzden katılma oranları 6000 sn’den sonra tekrar birbirine yakın olarak devam etmektedir.

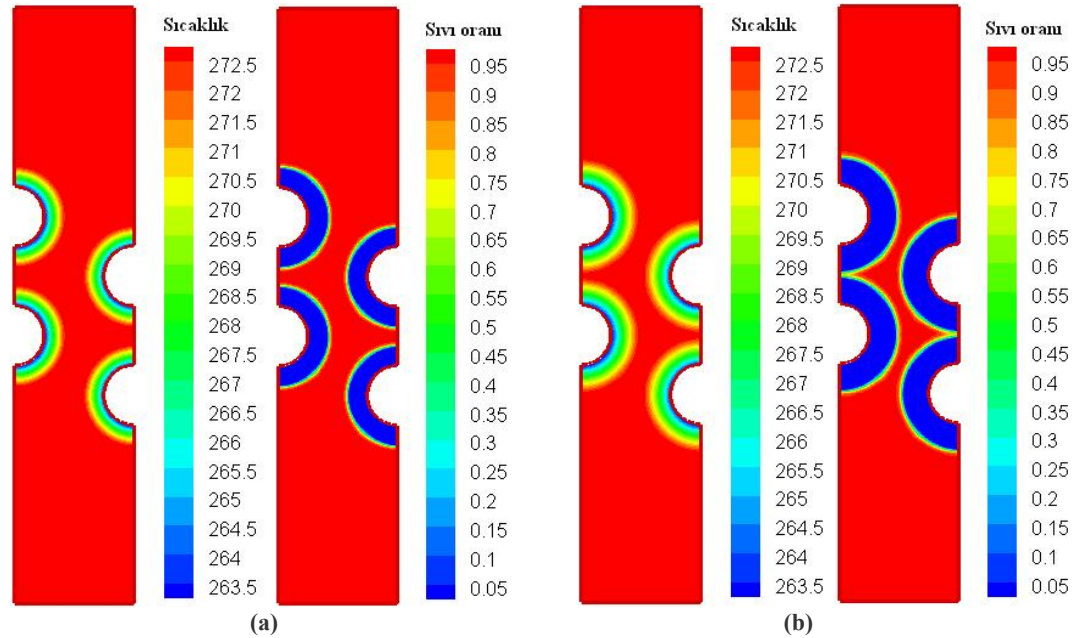


Şekil 4.43. Silindirler arası yatay ve dikey mesafe 3d olması durumunda saptırmalı ve saptırmazsız silindirler için katılma oranlarının karşılaştırılması

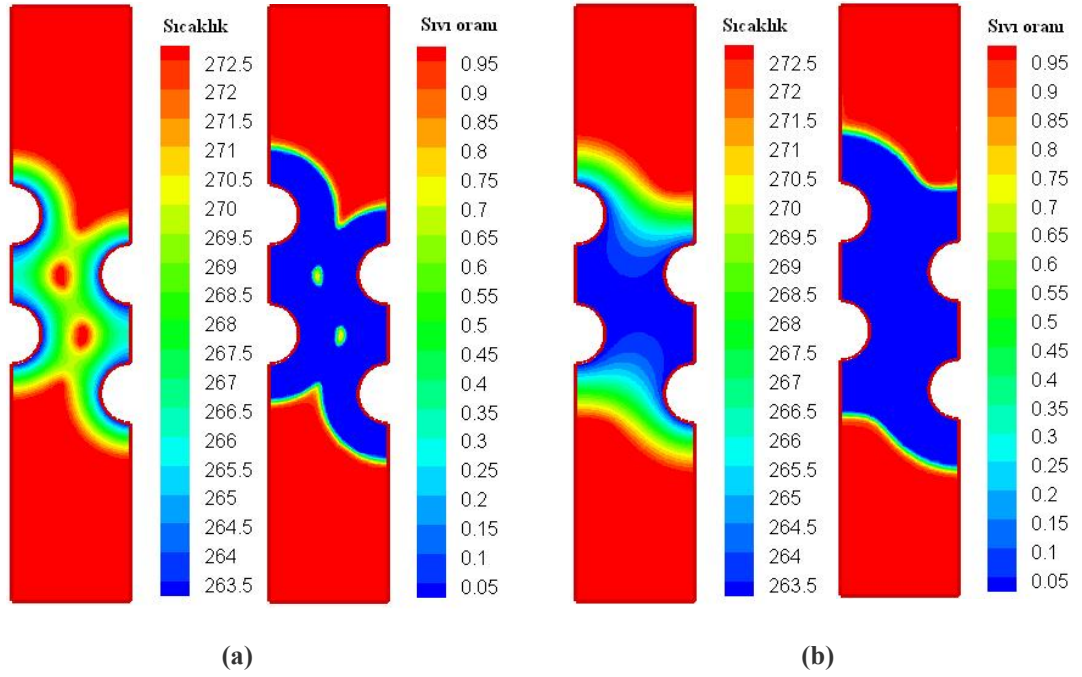
Tankın genişliği 3d olması durumunda ise hem saptırmalı hem de saptırmaz silindir düzenlemeleri için katılma oranlarının birbiri ile çok yakın olduğu görülmektedir (Şekil 4.43.). Sıcaklık ve katılma oranlarının dağılımlarından da görüldüğü gibi silindirler üzerinde oluşan buz tabakalarının birbirleri ile herhangi bir teması olmaması düzenlemeler arasında herhangi bir fark yaratmamıştır. Bunun sebebi ise silindirler arasındaki mesafenin fazla olması suyun hareketini hızlandırmamıştır. Buna bağlı olarak silindirlerin üçgen veya kare dizilişli yerleştirmeleri bu düzenleme için buz oluşumunu etkilememiştir.

4.3.1. Silindirler arası mesafenin 2d olması durumunda su sıcaklığının buz oluşumuna etkisi

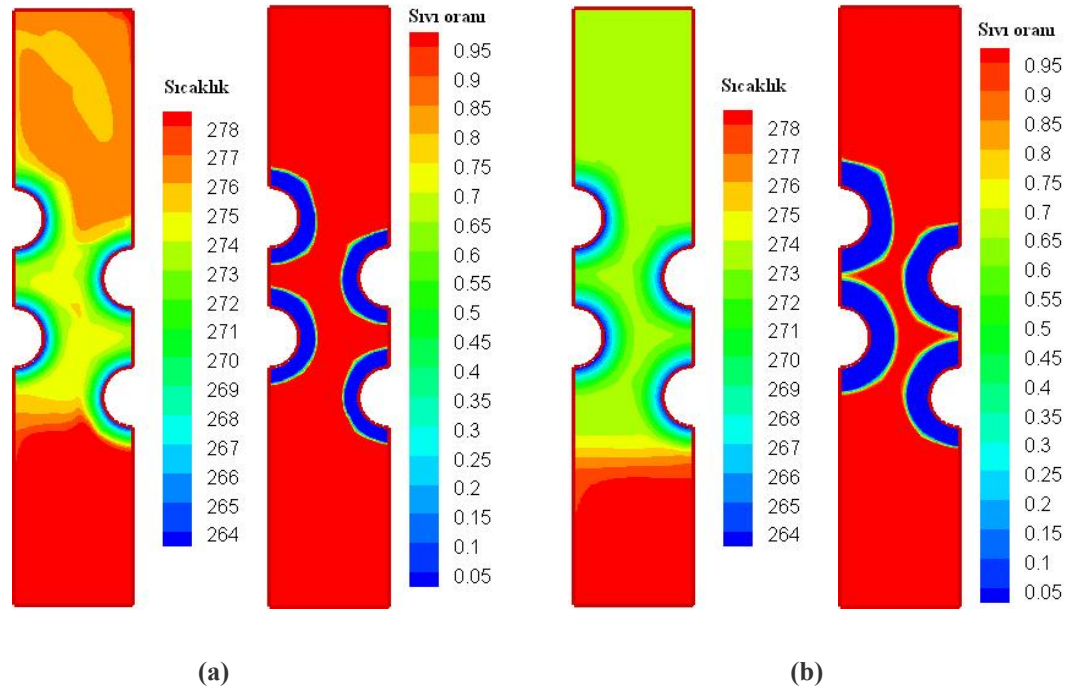
Silindirler arası yatay ve dikey mesafe 2d seçilerek oluşturulan model için silindirlerin yüzey sıcaklığı -10°C tutularak, depolama tankı içerisindeki su sıcaklığı 0, 4 ve 8°C olarak değiştirilmiş ve buz oluşumuna etkileri incelenmiştir. Depo içerisindeki su sıcaklığının 0°C olması durumunda silindir yüzeyine yakın bölgelerde yüzeye temas ederek soğuyan su deponun üst bölgelerine doğru hareket etmektedir. Buz oluşumuna bakıldığında ise 900 sn sonunda (Şekil 4.44.) buz tabakaları arasında herhangi bir birleşme olmamıştır. Ancak 1800 sn sonunda (Şekil 4.45.) dikey silindirler arasında buz tabakaları birleşmeye başlamıştır. 3600 sn sonunda (Şekil 4.46.) silindirler hem yatay hem de dikey olarak birleşmişlerdir. Analiz sonunda (Şekil 4.47.) buz oluşumun bakıldığında depoyu ikiye bölecek şekilde tam bir birleşme meydana gelmiştir.



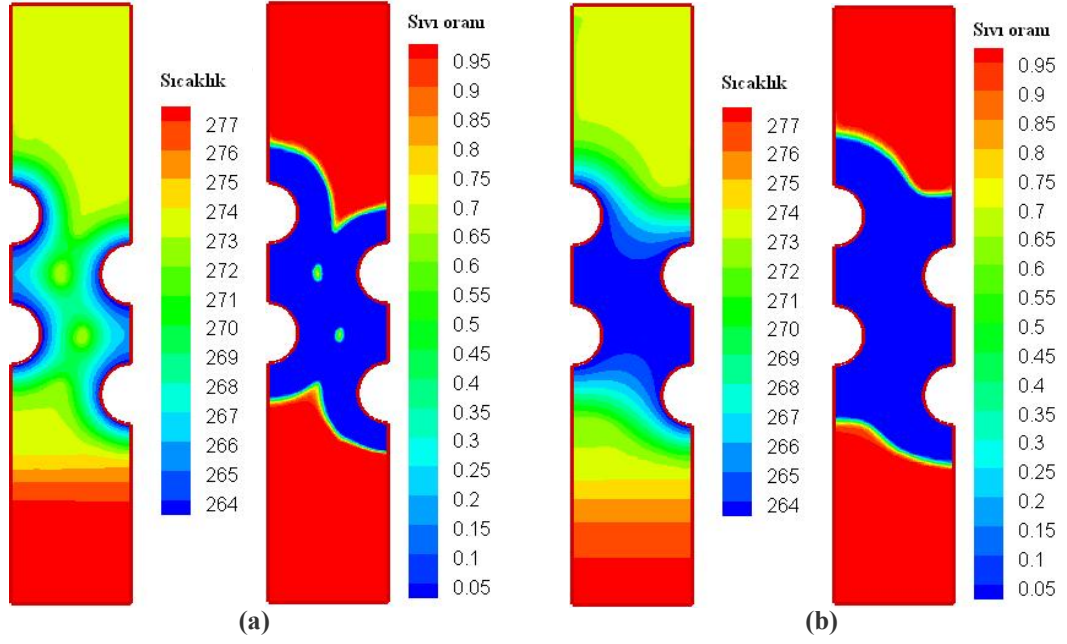
Şekil 4.44. Dört Silindirli üçgen dizilişli düzenleme için (a) 900 sn sonundaki, (b) 1800 sn sonundaki sıcaklık dağılımı ve sıvı oranları ($T_i = 263\text{ K}$).



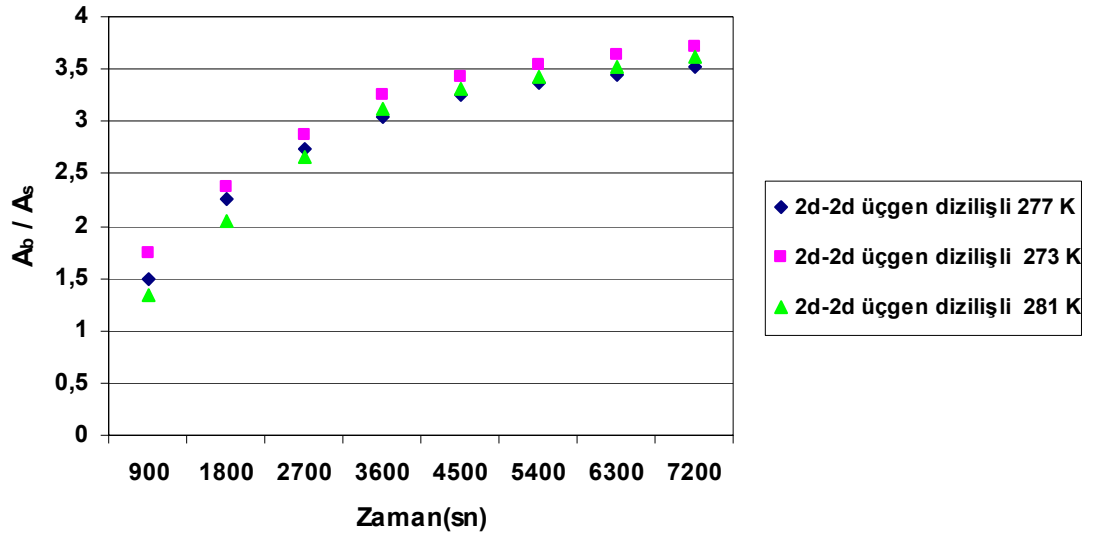
Şekil 4.45. Dört Silindirli üçgen dizilişli düzenleme için (a) 3600 sn sonundaki, (b) 7200 sn sonundaki sıcaklık dağılımı ve sıvı oranları ($T_i = 263$ K).



Şekil 4.46. Dört Silindirli üçgen dizilişli düzenleme için (a) 900 sn sonundaki, (b) 1800 sn sonundaki sıcaklık dağılımı ve sıvı oranları ($T_i = 281$ K).



Şekil 4.47. Dört silindirli üçgen dizilişli düzenleme için a) 3600 sn sonundaki, b) 7200 sn sonundaki sıcaklık dağılımı ve sıvı oranları ($T_i = 281$ K).

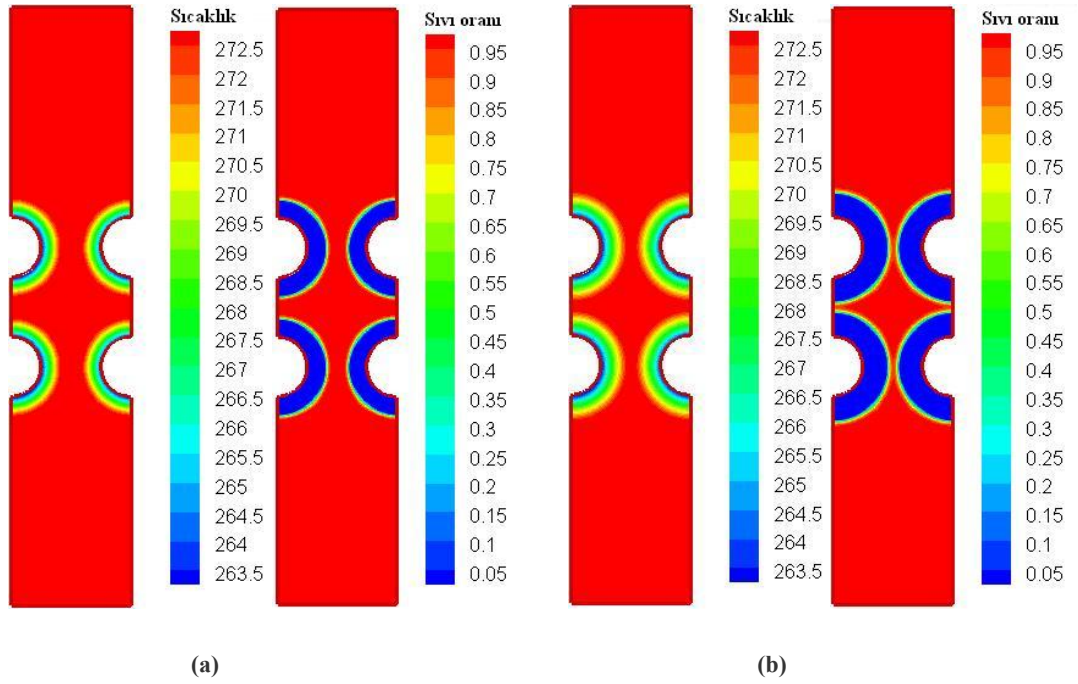


Şekil 4.48. 2d-2d üçgen dizilişli düzenleme için farklı su sıcaklıklarının etkisi

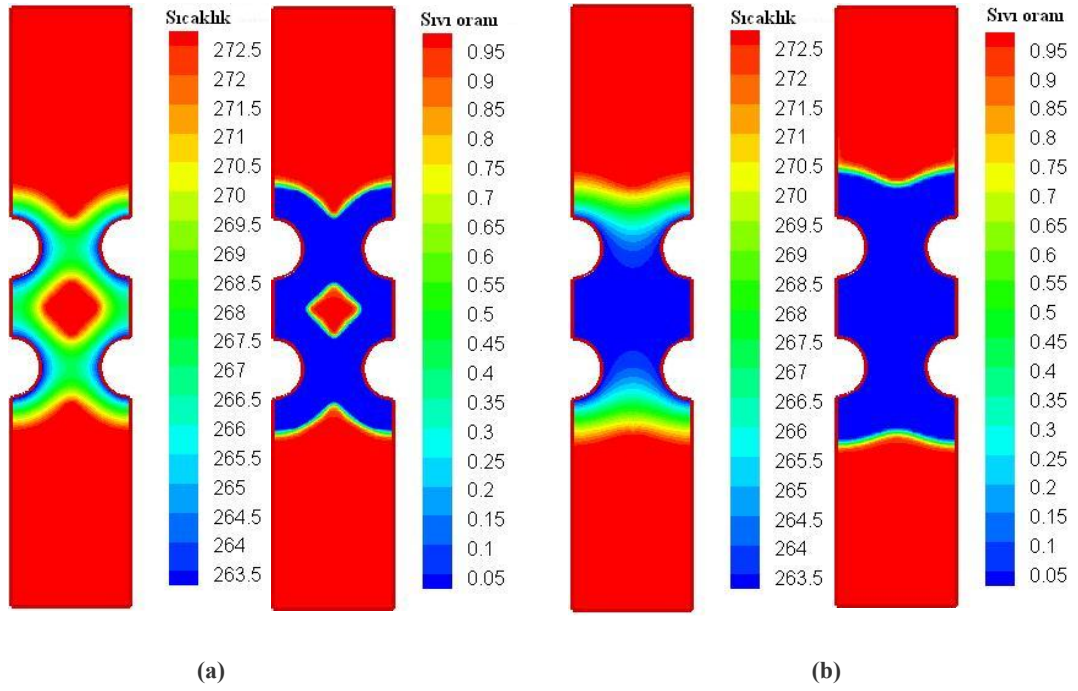
Silindirler arası yatay ve dikey mesafenin $2d$, silindirlerin üçgen dizilişli yerleştirilmeleri durumunda su sıcaklığının 8 °C olması durumunda suyun soğuması ve katılaşması zaman alacağından analiz başlangıcında en düşük buz alanına sahip olduğu görülmektedir. Buna karşılık olarak suyun sıcaklığının 0 °C olması durumunda su katılaşmaya yakın bir sıcaklığa sahip olduğu için buz oluşumu kısa sürede olacaktır. Şekil 4.48.'e baktığımızda analiz sonuna kadar en fazla buz oluşumunun suyun 0 °C sıcaklıkta olduğu zaman olduğu açıkça görülmektedir. 0 ve 8 °C içinse

başlangıçta 0 °C için buz oluşumu fazla olmasına rağmen analiz sonlarına doğru yaklaşık olarak aynı değerlere ulaştıkları görülmektedir.

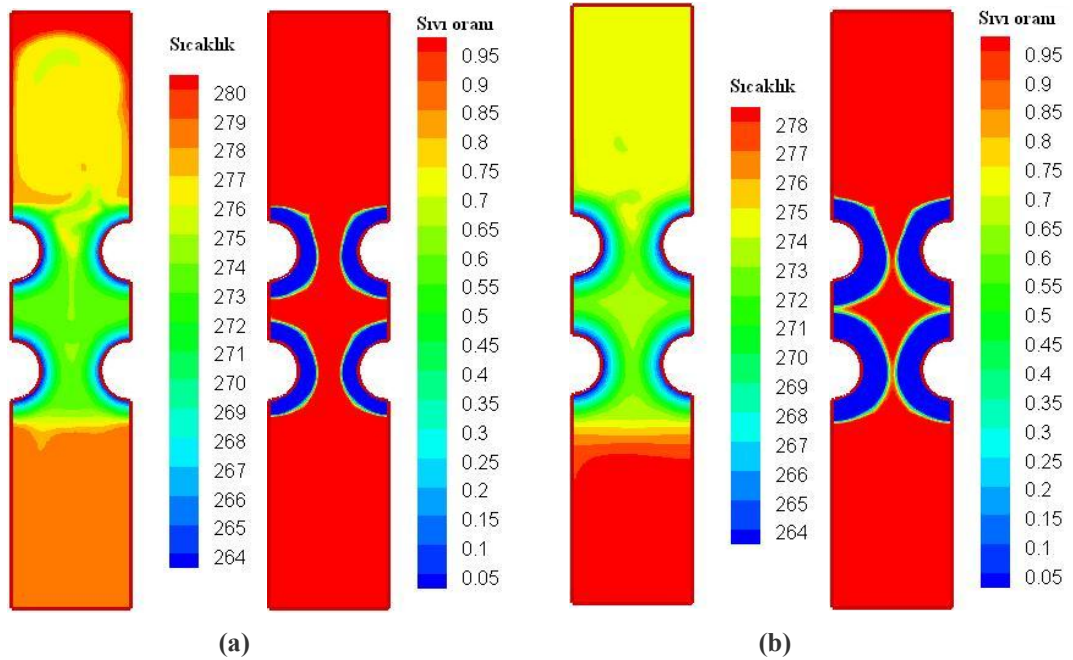
Dört silindirli kare dizilişli düzenlemelerde su sıcaklığının 0 °C (Şekil 4.49–50) ve 8 °C (Şekil 4.51–52) olması durumunda sıcaklık dağılımına bakıldığında soğuyan suyun yoğunluğun etkisiyle yukarı yönde hareket ettiği ve depolama tankının üst bölgesinde depolandığı görülmektedir. Sıcaklığı yüksek olan suyun ise tankın alt bölgesinde depolandığı ve ayrı bir ısıl katmanlaşma oluşturduğu görülmektedir. Sıvı oranlarına bakıldığında ise silindirler üzerinde zamanla daha kalın buz tabakası oluşmaktadır. Doğal konveksiyonun etkisiyle soğuyan suyun yukarı yönde hareket etmesiyle birlikte silindirlerin üst tarafında oluşan buzun kalınlığının daha fazla olduğu görülmektedir. Analizin sonunda ise silindirler üzerindeki katılaşma tankı ikiye bölecek şekilde meydana gelmiştir.



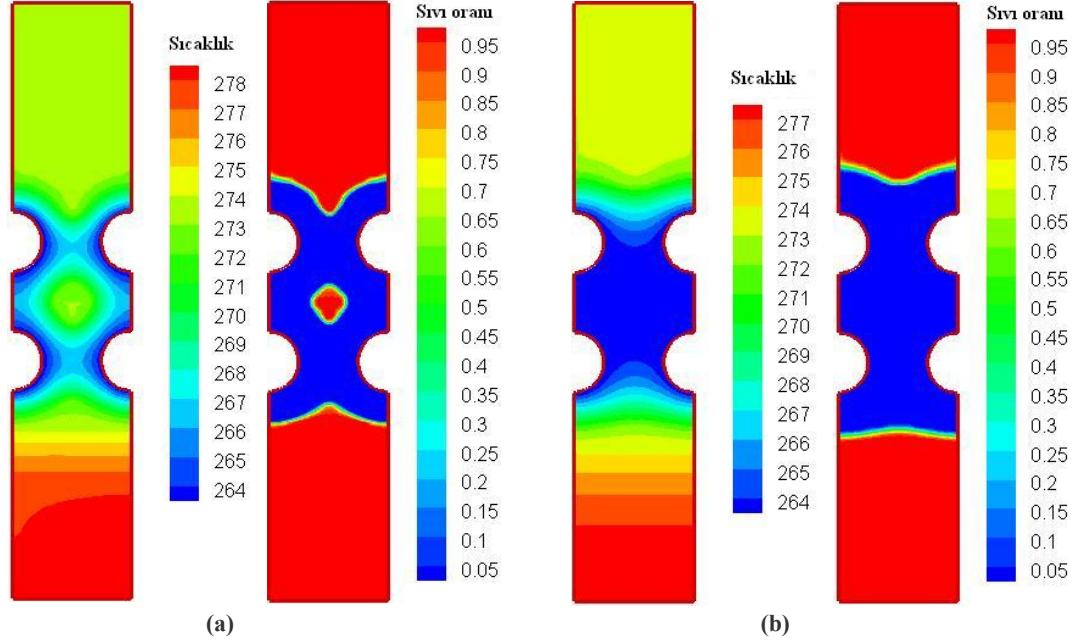
Şekil 4.49. Dört Silindirli kare dizilişli düzenleme için (a) 900 sn sonundaki, (b) 1800 sn sonundaki sıcaklık dağılımı ve sıvı oranları ($T_i = 273$ K).



Şekil 4.50. Dört Silindirli kare dizilişli düzenleme için (a) 3600 sn sonundaki, (b) 7200 sn sonundaki sıcaklık dağılımı ve sıvı oranları ($T_i = 273$ K).

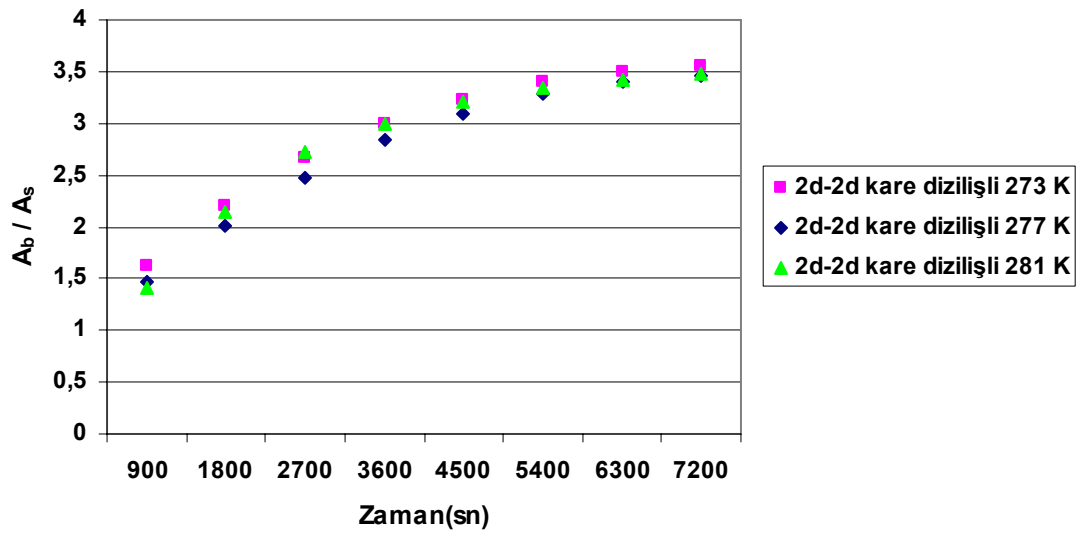


Şekil 4.51. Dört Silindirli kare dizilişli düzenleme için (a) 900 sn sonundaki, (b) 1800 sn sonundaki sıcaklık dağılımı ve sıvı oranları ($T_i = 281$ K).



Şekil 4.52. Dört Silindirli kare dizilişli düzenleme için (a) 3600 sn sonundaki, (b) 7200 sn sonundaki sıcaklık dağılımı ve sıvı oranları ($T_i = 281$ K).

Silindirler arası mesafenin $2d$ ve silindirlerin saptırmasız yerleştirilmeleri durumunda farklı su sıcaklıklarının etkisi Şekil 4.53.'te gösterilmiştir. Grafiği inceleyecek olursak yüksek sıcaklığı nedeniyle suyun soğuması ve buz oluşumu zaman alacağından dolayı analiz başlangıcında en az buz oluşumu su sıcaklığının 8°C olması durumundadır. Buna karşılık; suyun sıcaklığının 0°C olması

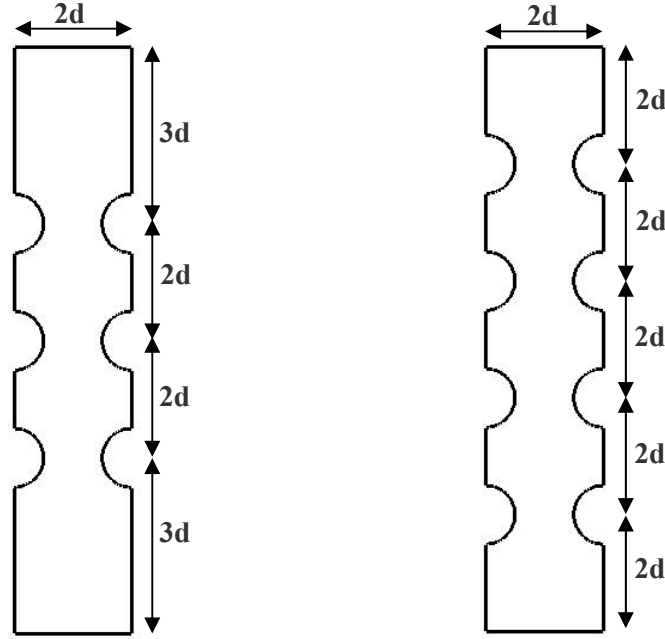


Şekil 4.53. 2d-2d kare dizilişli düzenleme için farklı su sıcaklıklarının etkisi

durumunda katılaşmaya yakın bir sıcaklık olduğu için kısa zamanda en fazla buz oluşumu bu sıcaklıktadır. Analiz süresince genellikle en fazla alan oranı $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de, en az alan oranı $8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de olmasına karşılık bazı noktalarda değiştiği görülmüştür.

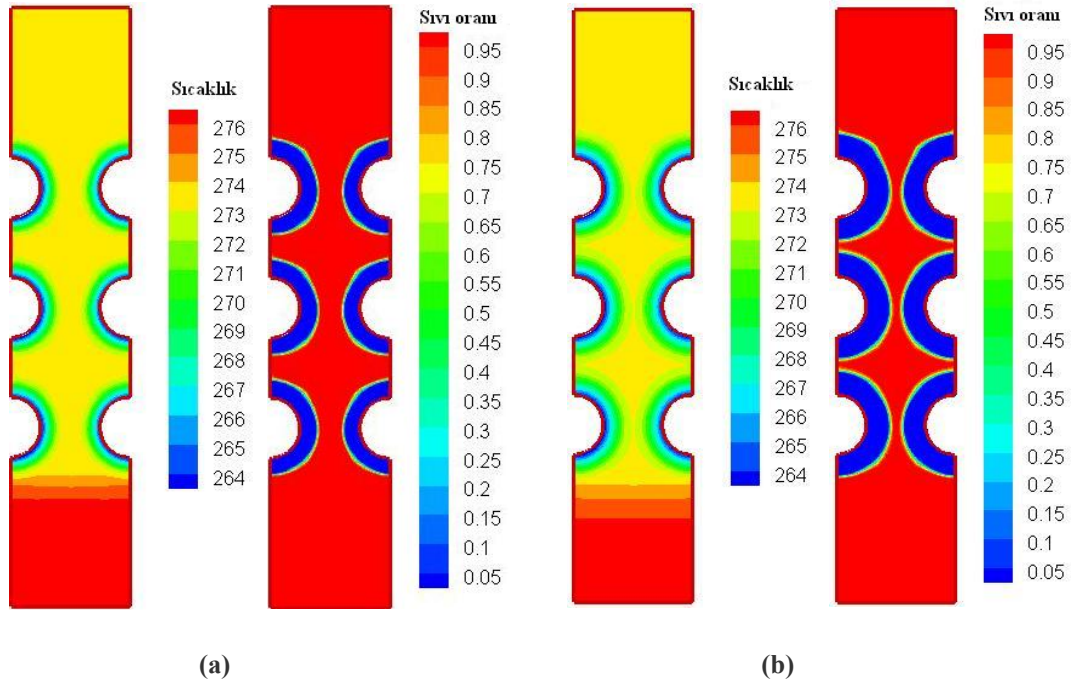
4.4. Silindir Sayısının Etkisi

Silindir sayısının buz oluşumuna etkilerinin incelenebilmesi için silindirler arası yatay mesafe $2d$ alınarak 6 ve 8 silindirli kare dizilişli 2 model oluşturulmuştur. Bu modellerde uygun sınır şartlarında alınan sonuçlar daha önce oluşturulan 4 silindirli modelle kıyaslanmıştır.

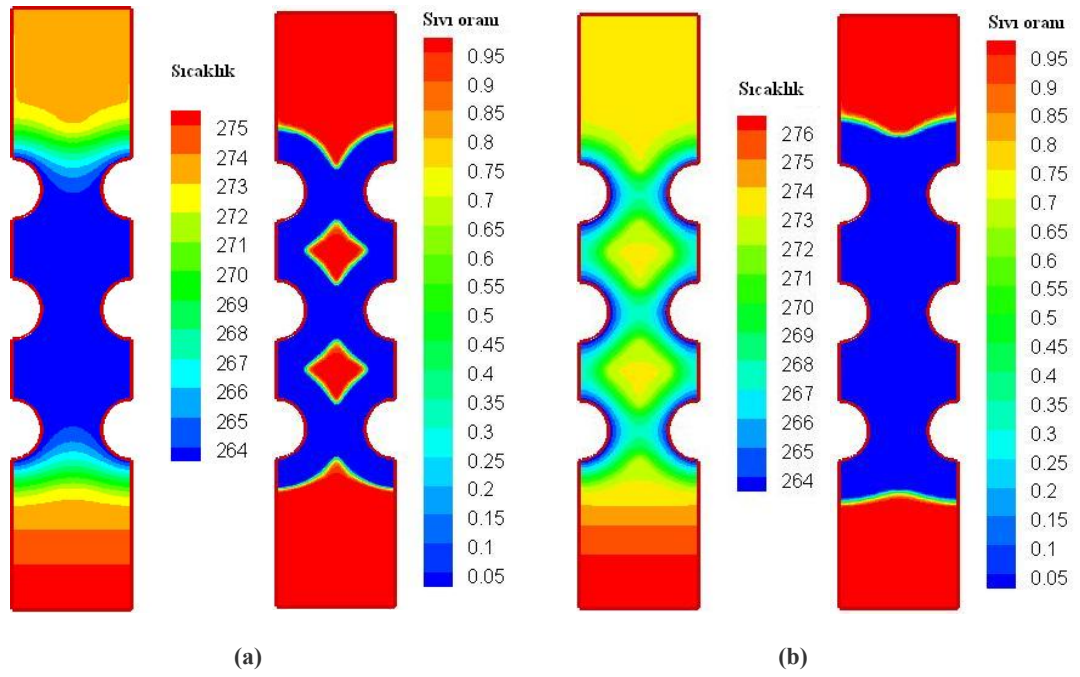


Şekil 4.54. Silindirler arası yatay ve dikey mesafenin $2d$ ve depo yüksekliğinin $10d$ olması durumunda oluşturulan 6 ve 8 silindirli oluşturulan model.

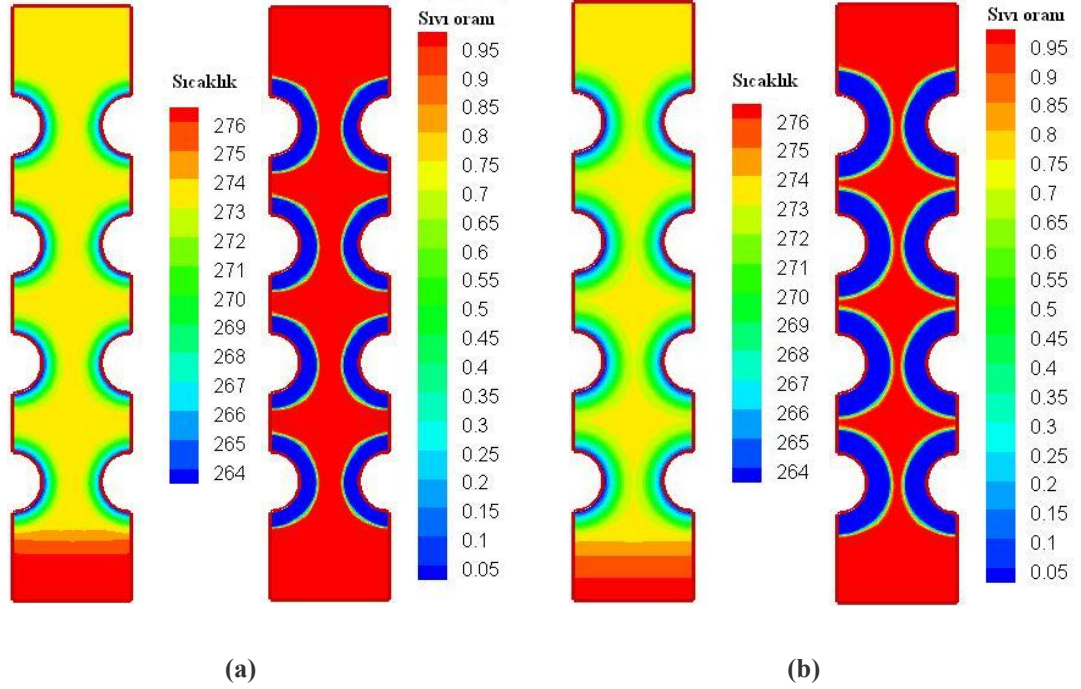
Altı ve sekiz silindirli düzenlemelerin sıcaklık dağılımına bakıldığında (Şekil 4.55–56–57–58.) silindir yüzeylerine temas eden suyun sıcaklığı zamanla düşmektedir. Soğuyan su da yoğunluğunun etkisiyle tankın üst bölgelerine doğru hareket etmektedir. Alt ve üstteki silindirler üzerindeki buz kalınlıklarına bakıldığında ise üst silindirler üzerinde oluşan buz kalınlığının daha fazla olduğu görülmektedir. Bunun sebebi ise; soğuyan su yukarı hareket ettiğinde soğuk yüzeyle temas etmekte ve daha da soğumaktadır. Böylelikle daha çabuk buz oluşmakta ve üst silindirlerde buz kalınlığı daha fazla olmaktadır. Her iki düzenleme için de sıcaklık dağılımına bakıldığında analiz sonunda tankın alt bölgesine kırmızı renkle gösterilen yaklaşık $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklığındaki su bulunmakta ve kendi içerisinde ayrı bir ısı katmanlaşma oluşturmaktadır. Tankın üst bölgesinde ise daha düşük sıcaklıkta su bulunmaktadır.



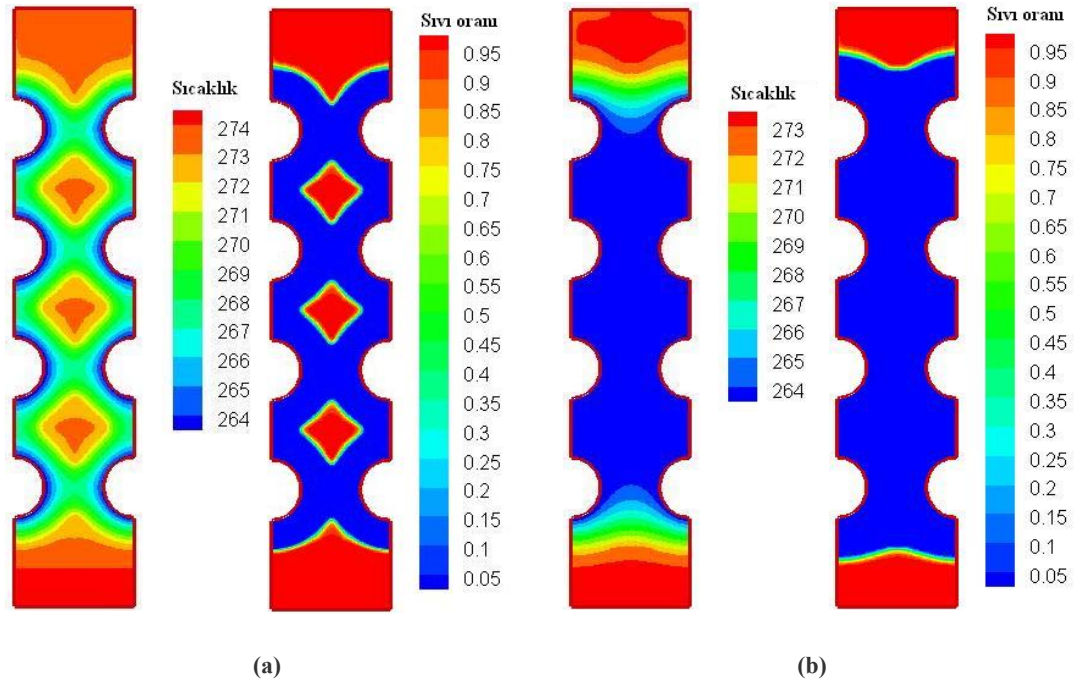
Şekil 4.55. Altı Silindirli kare dizilişli düzenleme için (a) 900 sn sonundaki, (b) 1800 sn sonundaki sıcaklık dağılımı ve sıvı oranları ($T_i = 277$ K).



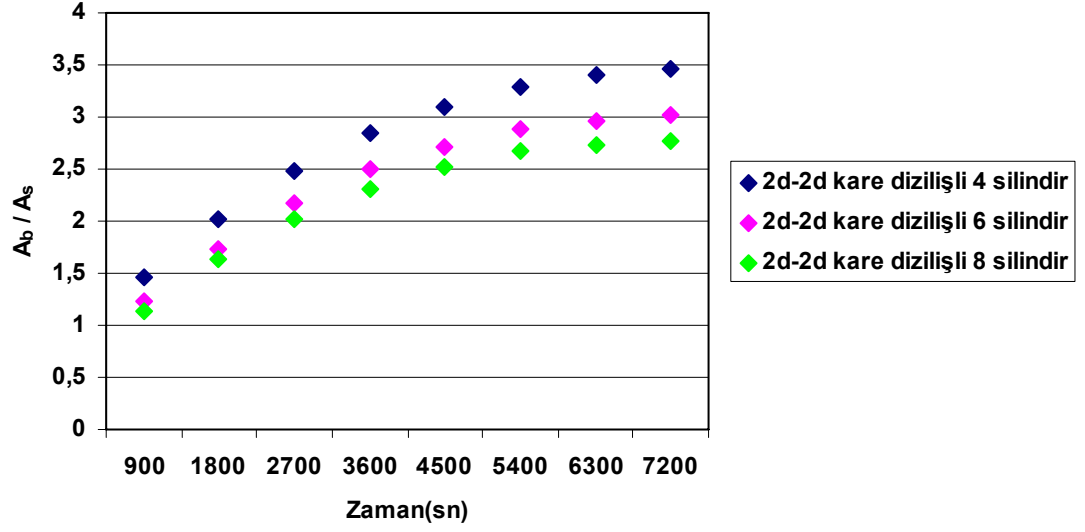
Şekil 4.56. Altı Silindirli kare dizilişli düzenleme için (a) 3600 sn sonundaki, (b) 7200 sn sonundaki sıcaklık dağılımı ve sıvı oranları ($T_i = 277$ K).



Şekil 4.57. Sekiz silindirli kare dizilişli düzenleme için (a) 900 sn sonundaki, (b) 1800 sn sonundaki sıcaklık dağılımı ve sıvı oranları ($T_i = 277$ K).



Şekil 4.58. Sekiz Silindirli kare dizilişli düzenleme için (a) 3600 sn sonundaki, (b) 7200 sn sonundaki sıcaklık dağılımı ve sıvı oranları ($T_i = 277$ K).

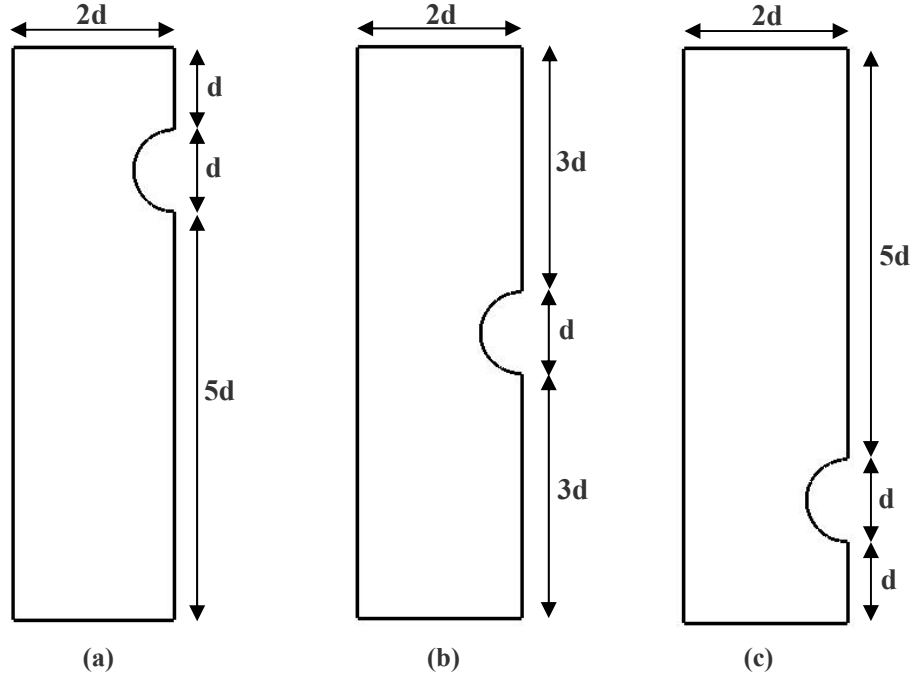


Şekil 4.59. Silindirler arası yatay ve dikey mesafenin 2d ve depo yüksekliğinin 10d olması durumunda oluşturulan 4, 6 ve 8 silindirli oluşturulan model için alan oranının zamanla değişimi.

Oluşturulan üç model için silindirler arası yatay ve dikey mesafe 2d ve depolama tankı yüksekliği 10d olarak alınmıştır. Aynı zamanda depolama tankı içerisindeki su sıcaklığı 4 °C ve silindir yüzey sıcaklıkları da -10 °C kabul edilmiştir. Şekil 4.59’da gösterilen buz alanının (A_b) silindir kesit alanına oranı (A_s) nın zamana bağlı değişimine bakıldığında analiz başlangıcında alan oranının 4 silindirli modelde en fazla ve 8 silindirli modelde ise en az olduğu görülmektedir. Analizin devam eden sürelerin de aynı şekilde benzer bir uyumda devam ettikleri görülmektedir. Analiz sonunda buz oluşumu yine aynı şekilde 4 silindirli model için 3,5 değerine, 6 silindirli model için 3 ve 8 silindirli model için ise 2,8 değerine ulaştığı görülmüştür. Buz oluşumunun 4 silindirli modelde diğer modellere göre daha fazla olmasının sebebi; depo içerisindeki silindir sayısının artması ile birlikte silindirlerin alanları artmış ve bununla birlikte depo içerisindeki su miktarı da azalmıştır. Buna bağlı olarak buz oluşumu da azalmaktadır. Alan oranlarına bakıldığında silindir sayısının artmasıyla birlikte silindirlerin kesit alanı artmaktadır ve silindir yüzeyi arttığı için silindirler etrafında buz oluşumu da artmaktadır. Ancak bu artış oranları aynı olmamaktadır. Örneğin; 900 sn sonunda 4 silindirli model için silindirlerin kesit alanı $0,1595874 \text{ m}^2$ ve silindirler üzerinde oluşan buzun alanı $0,234537 \text{ m}^2$ olmaktadır. Aynı süre sonunda bu değerler 6 silindirli model için silindirlerin toplam kesit alanı ($0,239381 \text{ m}^2$) ve silindirler üzerinde oluşan toplam buzun alanı ($0,2923519 \text{ m}^2$) olmaktadır. Artış oranlarına baktığımızda silindir sayısının artması ile birlikte silindir kesit alanı 1,5 kat artmasına rağmen silindirler etrafında oluşan buzun alanı ise 1,246 kat artmaktadır. Buz alanı az arttığı için buna bağlı olarak buz alanının silindir kesit alanına oranı Şekil 4.59.’da görüldüğü gibi silindir sayısının artması ile birlikte alan oranı da azalmaktadır.

4.5. Silindir Konumunun Etkisi

Silindir konumunun buz oluşumuna etkisini görebilmek için yüksekliği $7d$ ve genişliği $4d$ olan depolama tankı içerisinde, tankın üst bölgesine, tankın ortasına ve tankın alt bölgesine yerleştirilerek 3 model oluşturulmuştur (Şekil 4.60.). Burada depolama tankı içerisindeki su sıcaklığı $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve silindir yüzey sıcaklığı $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ kabul edilmiştir. Aynı zamanda depolama tankının duvarlarının yalıtılmış olduğu kabul edilmiştir.



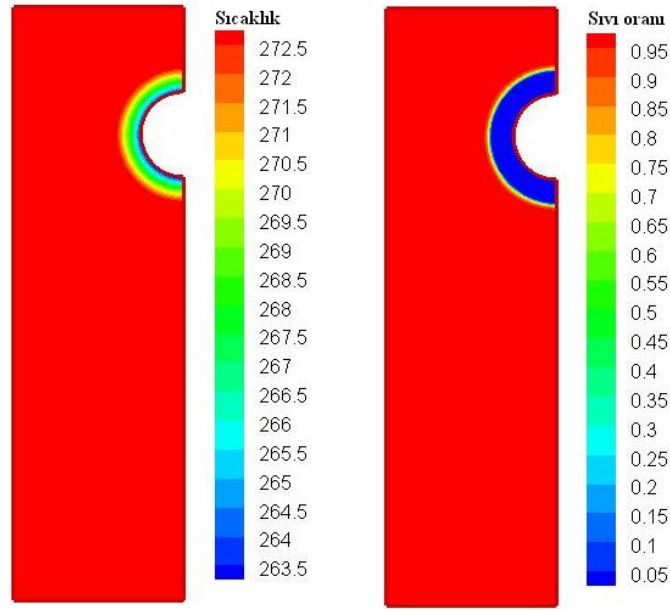
Şekil 4.60. Silindirin tank içerisinde a) üstte, b) ortada ve c) altta olması durumunda oluşturulan modeller.

Depolama tankı içerisindeki su sıcaklığı 0 , 4 ve $8\text{ }^{\circ}\text{C}$ olarak değiştirilerek hem sıcaklığın hem de silindirin depo içerisinde bulunduğu konumun etkileri ortaya konulmuştur. Aşağıda görüldüğü gibi öncelikle silindirin tankın üst bölgesinde olması durumunda sıcaklığın değiştirilmesinin etkilerini gösterebilmek için 900 , 1800 , 3600 ve 7200 sn sonundaki sıcaklık dağılımları ve sıvı oranları gösterilmiştir.

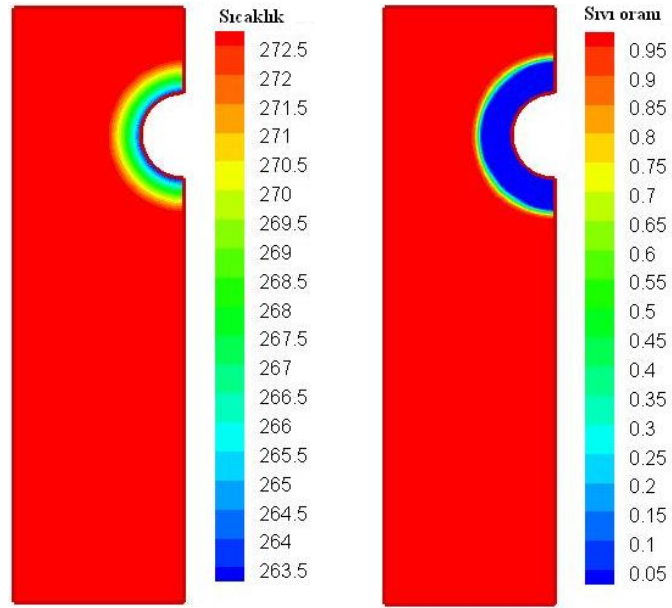
4.5.1. Silindirin depolama tankının üst bölgesinde olması durumu

4.5.1.1. Su sıcaklığının 273 K olması durumu

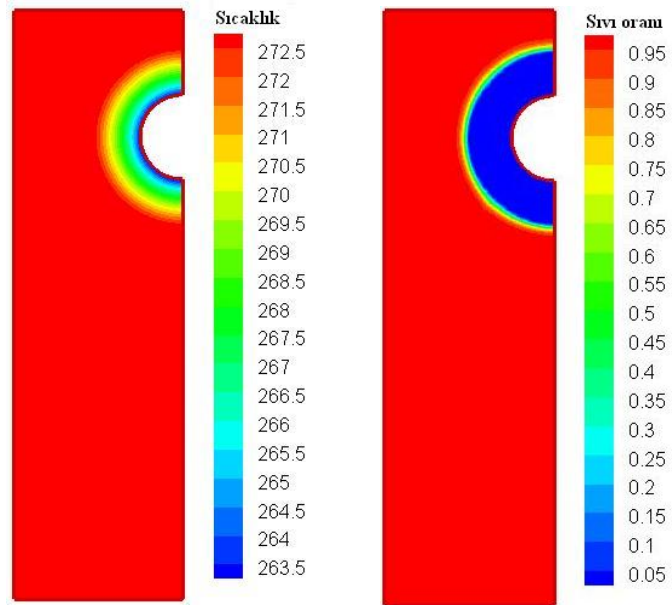
Silindirin depolama tankı içerisinde üstte ve su sıcaklığının 0 °C olması durumunda sıcaklık dağılımı ve sıvı oranlarına bakıldığında (Şekil 4.61–62-63–64.) silindir yüzeyine temas ederek soğuyan su silindirin üst bölgesinde konumlanmaktadır. Soğuyan su hareket edebileceği bir hacim olmadığından burada depolanmaktadır. Diğer düzenlemelerle kıyaslandığında ise en fazla buz oluşumu bu düzenlemede gerçekleşmiştir. Silindir yüzey sıcaklığı ile su sıcaklığı arasındaki sıcaklık farkı az olduğundan ve suyun sıcaklığı buz oluşum sıcaklığına oldukça yakın olduğundan en fazla buz oluşumu en kısa zamanda bu sıcaklıkta gerçekleşmektedir.



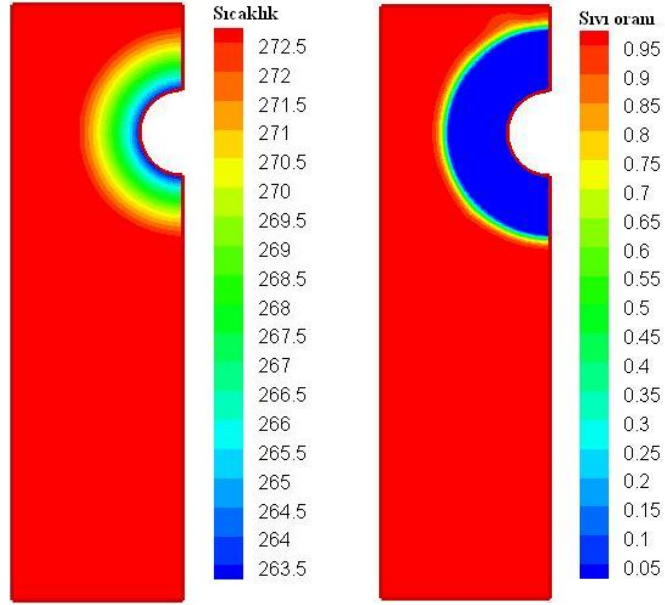
Şekil 4.61. Tank içerisinde silindirin üstte olması durumunda 900 sn sonundaki sıcaklık dağılımı ve sıvı oranı ($T_i = 273$ K).



Şekil 4.62. Tank içerisinde silindirin üstte olması durumunda 1800 sn sonundaki sıcaklık dağılımı ve sıvı oranı ($T_i = 273$ K).



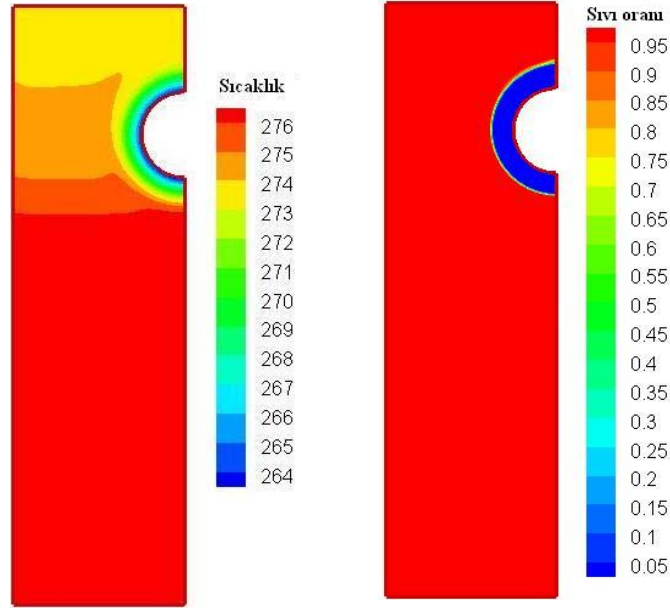
Şekil 4.63. Tank içerisinde silindirin üstte olması durumunda 3600 sn sonundaki sıcaklık dağılımı ve sıvı oranı ($T_i = 273$ K).



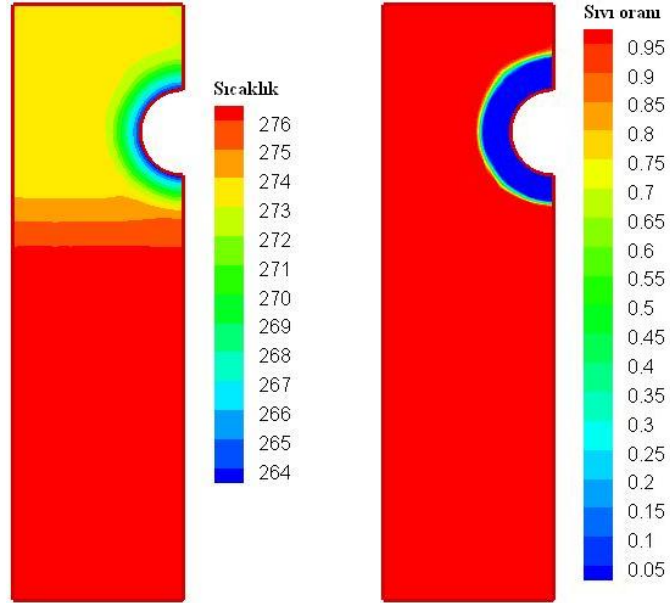
Şekil 4.64. Tank içerisinde silindirin üstte olması durumunda 7200 sn sonundaki sıcaklık dağılımı ve sıvı oranı ($T_i = 273$ K).

4.5.1.2. Su sıcaklığının 277 K olması durumu

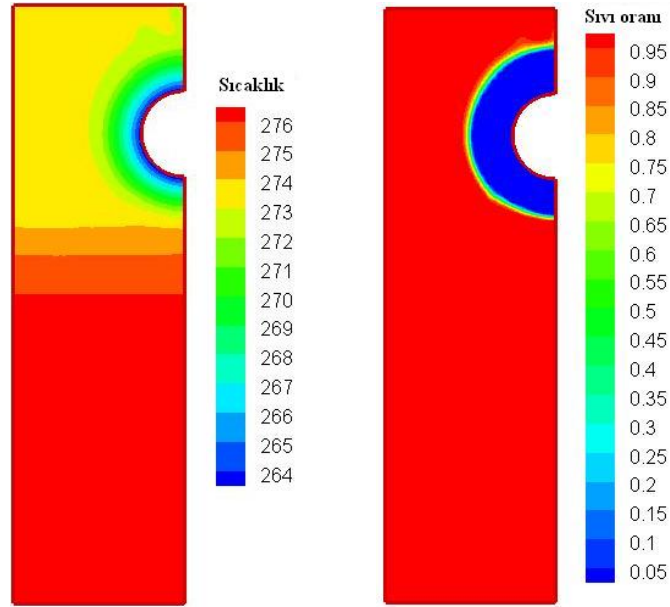
Silindirin depolama tankı içerisinde üstte ve su sıcaklığının 4 °C olması durumunda sıcaklık dağılımı ve sıvı oranlarına bakıldığında (Şekil 4.65–66–67–68.) buz oluşumunun 0 °C olması durumuna göre buz kalınlığı daha ince olmaktadır. Bunun sebebi ise; silindir yüzey sıcaklığı ile su sıcaklığı arasındaki sıcaklık farkının daha fazla olmasıdır. Su sıcaklığı buz oluşum sıcaklığına daha uzak olduğundan buz oluşumu daha fazla zaman almaktadır.



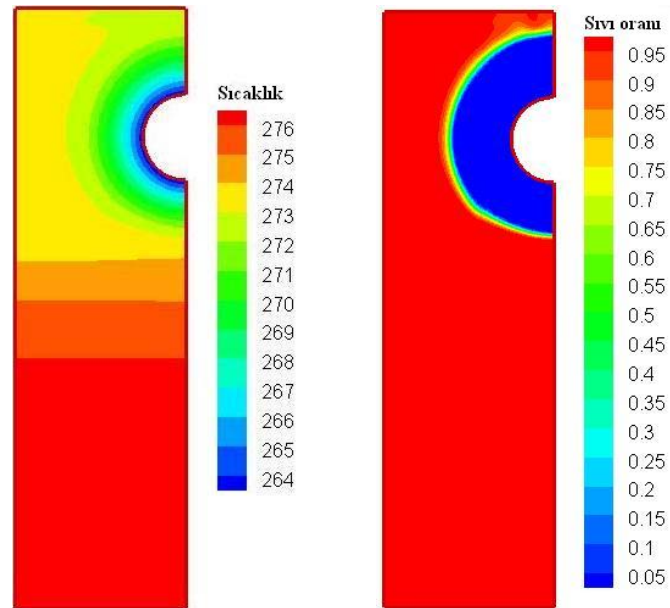
Şekil 4.65. Tank içerisinde silindirin üstte olması durumunda 900 sn sonundaki sıcaklık dağılımı ve sıvı oranı ($T_i = 277$ K).



Şekil 4.66. Tank içerisinde silindirin üstte olması durumunda 1800 sn sonundaki sıcaklık dağılımı ve sıvı oranı ($T_i = 277$ K).



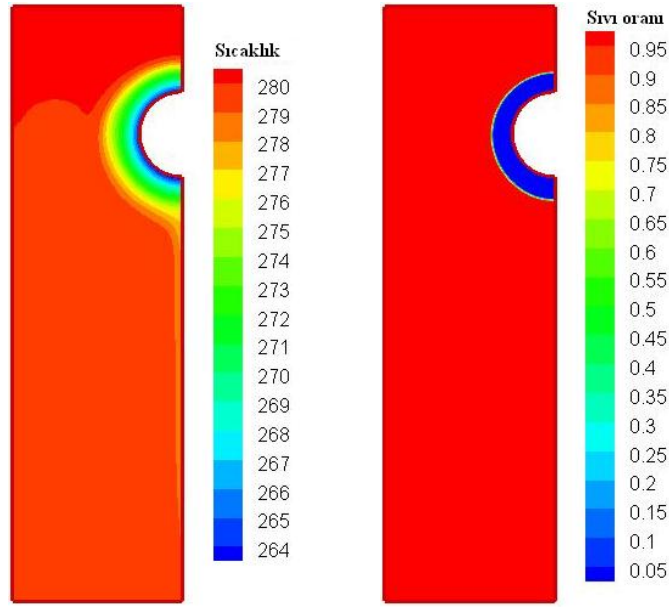
Şekil 4.67. Tank içerisinde silindirin üstte olması durumunda 3600 sn sonundaki sıcaklık dağılımı ve sıvı oranı ($T_i = 277$ K).



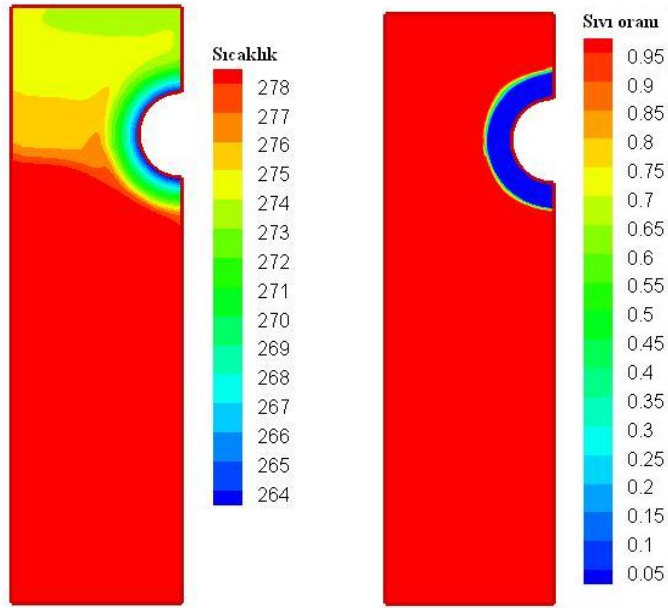
Şekil 4.68. Tank içerisinde silindirin üstte olması durumunda 7200 sn sonundaki sıcaklık dağılımı ve sıvı oranı ($T_i = 277$ K).

4.5.1.3. Su sıcaklığının 281 K olması durumu

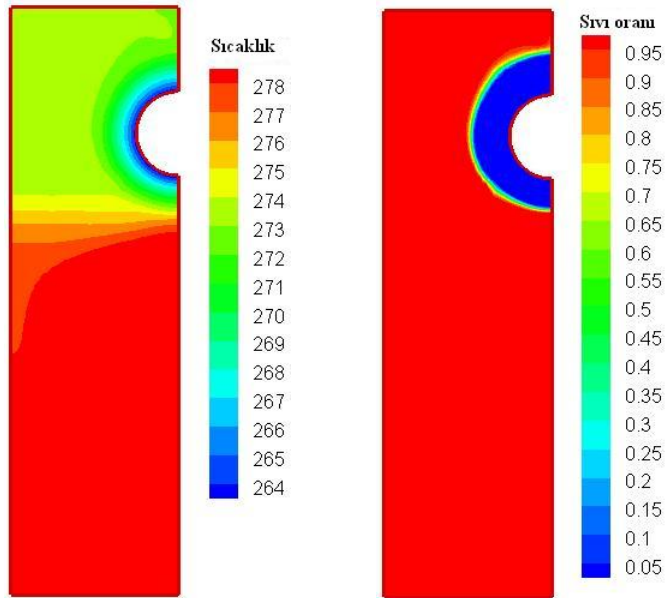
Silindirin depolama tankı içerisinde üstte ve su sıcaklığının 8 °C olması durumunda sıcaklık dağılımı ve sıvı oranlarına bakıldığında (Şekil 4.69–70–71–72.) buz oluşumunun diğer sıcaklıklara göre çok daha az olduğu görülmektedir. Suyun sahip olduğu sıcaklıkla buz oluşumu sıcaklığı arasındaki farkın büyüktür. Suyun silindir yüzeyine teması sonucu soğuması yani suyun buz oluşumu sıcaklığına kadar düşmesi zaman alacağından aynı süre içerisinde silindirler üzerinde oluşan buz alanı da daha küçüktür.



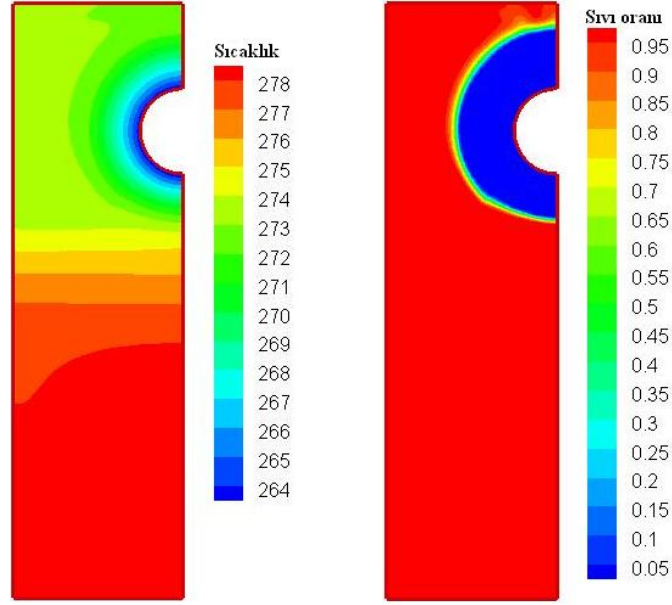
Şekil 4.69. Tank içerisinde silindirin üstte olması durumunda 900 sn sonundaki sıcaklık dağılımı ve sıvı oranı ($T_i = 281$ K).



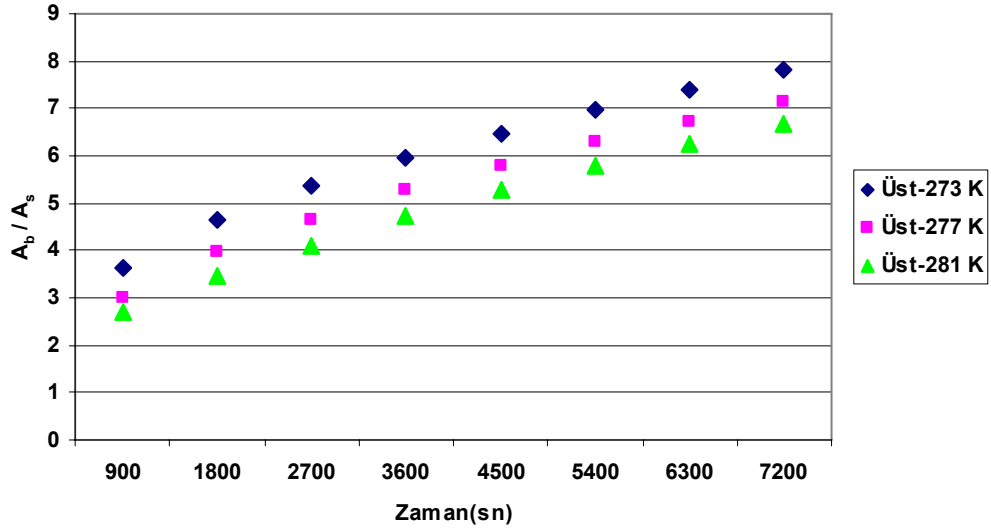
Şekil 4.70. Tank içerisinde silindirin üstte olması durumunda 1800 sn sonundaki sıcaklık dağılımı ve sıvı oranı ($T_i = 281$ K).



Şekil 4.71. Tank içerisinde silindirin üstte olması durumunda 3600 sn sonundaki sıcaklık dağılımı ve sıvı oranı ($T_i = 281$ K).



Şekil 4.72. Tank içerisinde silindirin üstte olması durumunda 7200 sn sonundaki sıcaklık dağılımı ve sıvı oranı ($T_i = 281$ K).



Şekil 4.73. Silindirin tankın üst bölgesinde olması durumunda farklı su sıcaklıklarının buz oluşumuna etkisi.

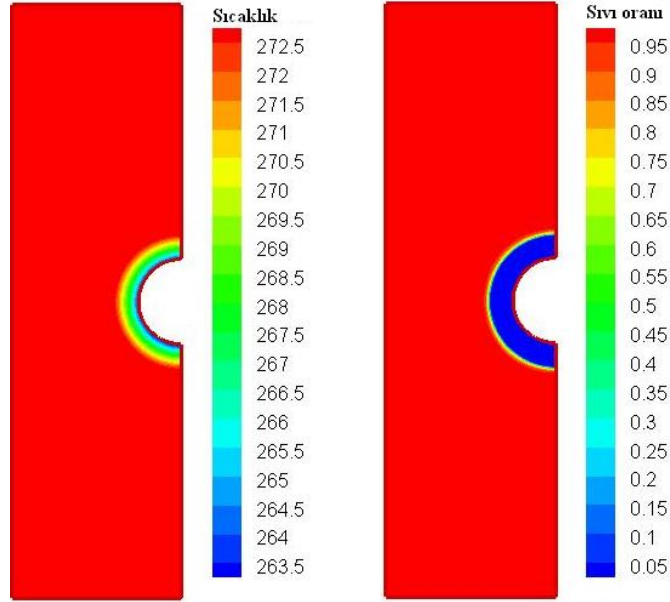
Şekil 4.73.'de gösterildiği gibi alan oranlarının zamanla değişimine bakacak olursak en fazla alan oranına sahip olan yada başka bir deyişle buz oluşumunun en fazla olduğu su sıcaklığı grafikte de görüldüğü gibi suyun 0°C sıcaklığa sahip olduğu durumdadır. Bunun sebebi de zaten suyun düşük sıcaklıkta yani buz oluşumuna yakın bir sıcaklıkta olmasıdır ve buna bağlı olarak buz oluşumu uzun zaman almadan daha kısa zamanda gerçekleşecektir. Buna bağlı olarak silindir

üzerinde diğer sıcaklıklara kıyasla buz kalınlığı daha fazla olacaktır. Bu sıcaklığının 8°C olması durumunda ise alan oranlarına bakacak olursak en düşük orana sahip olduğu görülmektedir. Su sıcaklığının artmasıyla birlikte alan oranının azalmasının sebebi ise; yüzey sıcaklığı ile su sıcaklığı arasındaki sıcaklık farkının yüksek olmasıdır. Bu nedenle suyun soğuması ve buz oluşum sıcaklığına düşmesi zaman alacaktır. Bu nedenle 0°C ile kıyaslandığında 0°C 'de buz oluşumunun daha fazla olduğu açık bir şekilde görülmektedir. Aynı şekilde 4°C ve 8°C kıyaslandığında da yine sıcaklık farkı 4°C 'de daha az olduğu için ve bu sıcaklıktaki suyun sıcaklığı buz oluşum sıcaklığına daha yakın olduğu için buz oluşumu bu sıcaklıkta daha fazla olacaktır. Şekil 4.73. 'teki grafikten bu açıkça görülmektedir.

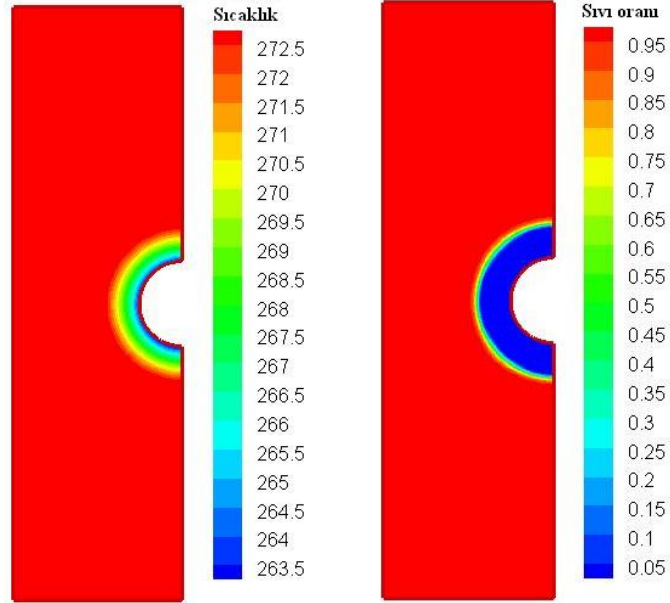
4.5.2. Silindirin depolama tankının ortasında olması durumu

4.5.2.1. Su sıcaklığının 273 K olması durumu

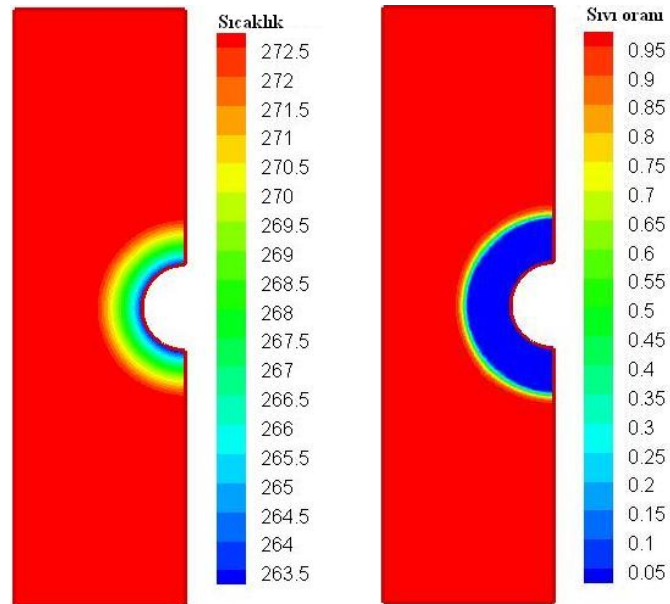
Silindirin depolama tankı içerisinde ortada ve su sıcaklığının 0 °C olması durumunda sıcaklık dağılımı ve sıvı oranlarına bakıldığında (Şekil 4.74–75-76–77.) silindir yüzeyine temas ederek soğuyan su silindirin üst bölgesinde depolanmaktadır. Diğer düzenlemelerle kıyaslandığında ise en fazla buz oluşumu bu düzenlemede gerçekleşmiştir. Silindir yüzey sıcaklığı ile su sıcaklığı arasındaki sıcaklık farkı az olduğundan ve suyun sıcaklığı buz oluşum sıcaklığına oldukça yakın olduğundan en fazla buz oluşumu en kısa zamanda bu sıcaklıkta gerçekleşmektedir.



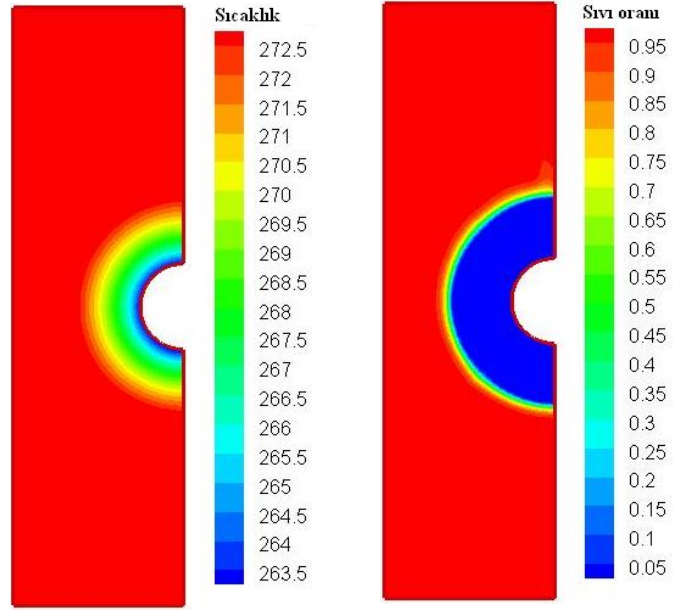
Şekil 4.74. Tank içerisinde silindirin ortada olması durumunda 900 sn sonundaki sıcaklık dağılımı ve sıvı oranı ($T_i = 273$ K).



Şekil 4.75. Tank içerisinde silindirin ortada olması durumunda 1800 sn sonundaki sıcaklık dağılımı ve sıvı oranı ($T_i = 273$ K).



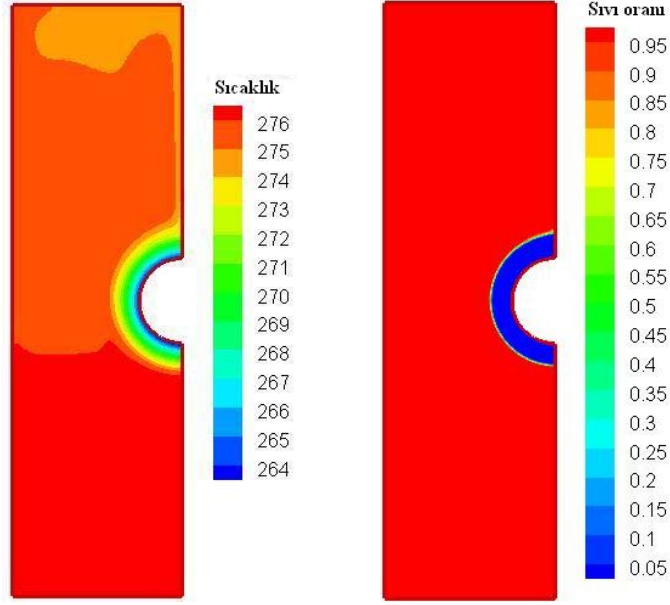
Şekil 4.76. Tank içerisinde silindirin ortada olması durumunda 3600 sn sonundaki sıcaklık dağılımı ve sıvı oranı ($T_i = 273$ K).



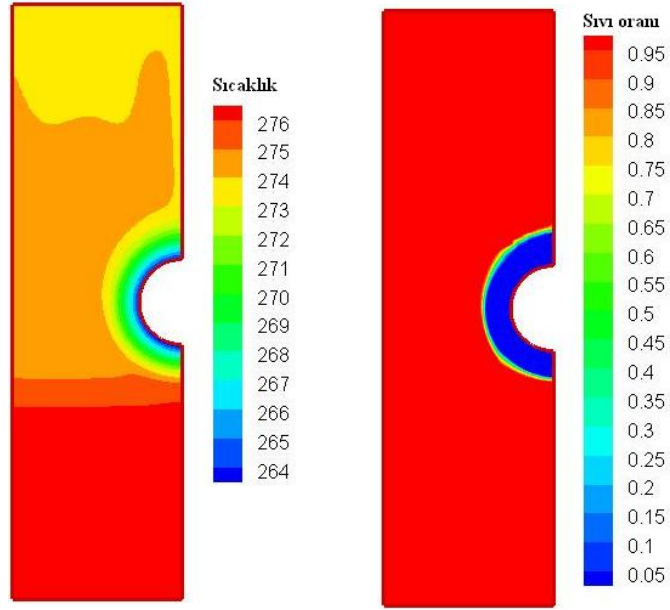
Şekil 4.77. Tank içerisinde silindirin ortada olması durumunda 7200 sn sonundaki sıcaklık dağılımı ve sıvı oranı ($T_i = 277$ K).

4.5.2.2. Su sıcaklığının 277 K olması durumu

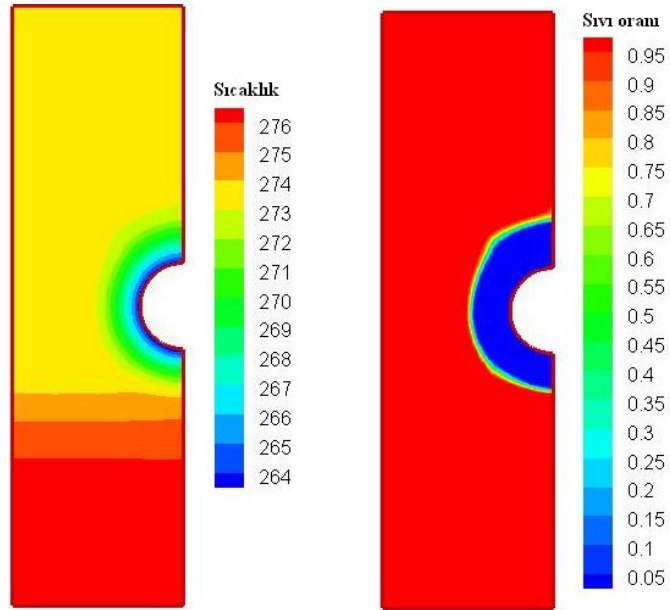
Silindirin depolama tankı içerisinde ortada ve su sıcaklığının 4 °C olması durumunda sıcaklık dağılımı ve sıvı oranlarına bakıldığında (Şekil 4.78–79–80–81.) buz oluşumunun 0 °C olması durumuna göre buz kalınlığı daha ince olmaktadır. Bunun sebebi ise; silindir yüzey sıcaklığı ile su sıcaklığı arasındaki sıcaklık farkının daha fazla olmasıdır. Su sıcaklığı buz oluşum sıcaklığına daha uzak olduğundan buz oluşumu daha fazla zaman almaktadır.



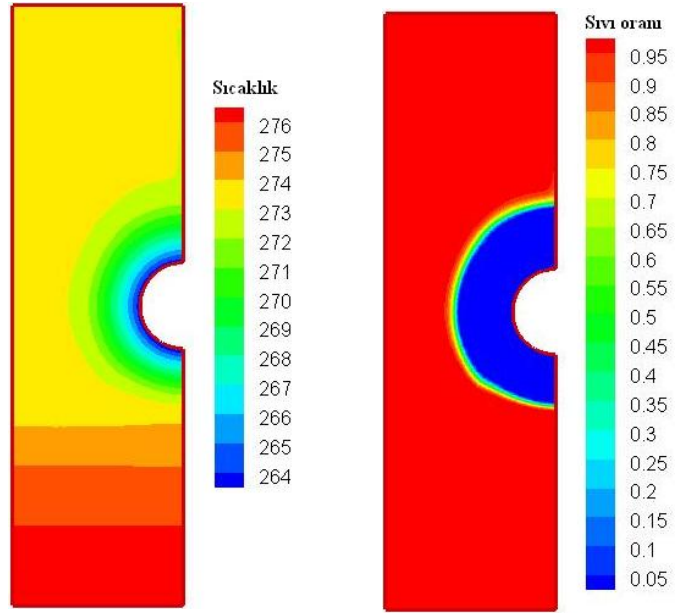
Şekil 4.78. Tank içerisinde silindirin ortada olması durumunda 900 sn sonundaki sıcaklık dağılımı ve sıvı oranı ($T_i = 277$ K).



Şekil 4.79. Tank içerisinde silindirin ortada olması durumunda 1800 sn sonundaki sıcaklık dağılımı ve sıvı oranı ($T_i = 277$ K).



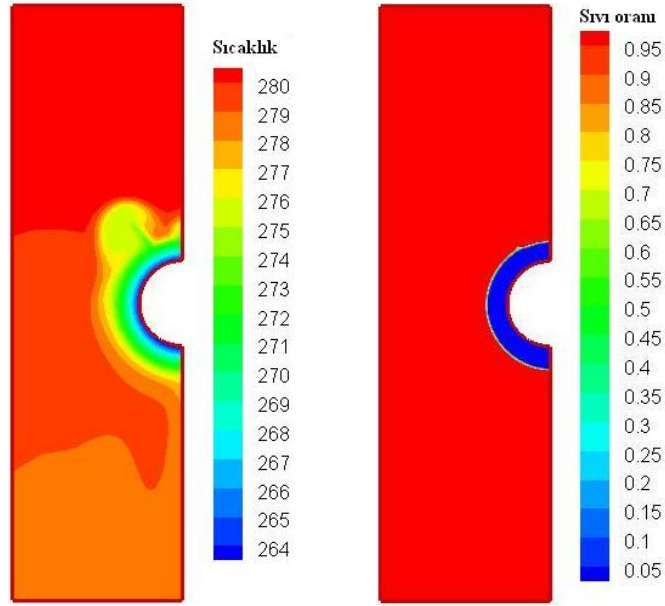
Şekil 4.80. Tank içerisinde silindirin ortada olması durumunda 3600 sn sonundaki sıcaklık dağılımı ve sıvı oranı ($T_i = 277$ K).



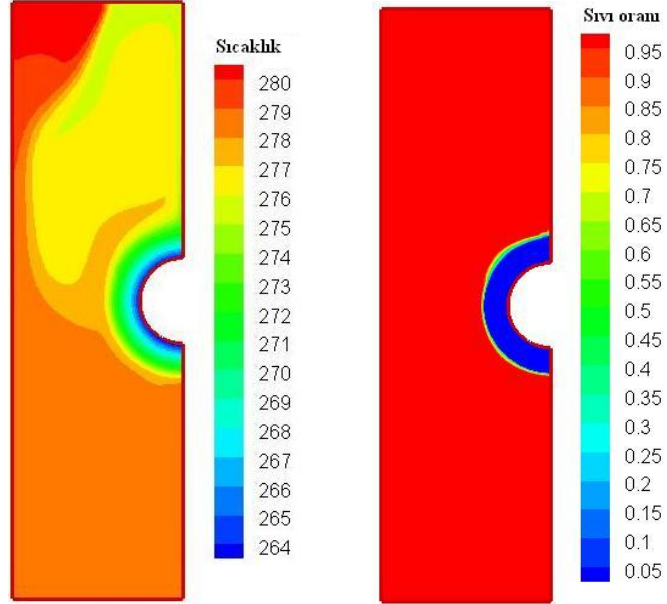
Şekil 4.81. Tank içerisinde silindirin ortada olması durumunda 7200 sn sonundaki sıcaklık dağılımı ve sıvı oranı ($T_i = 277$ K).

4.5.2.3. Su sıcaklığının 281 K olması durumu

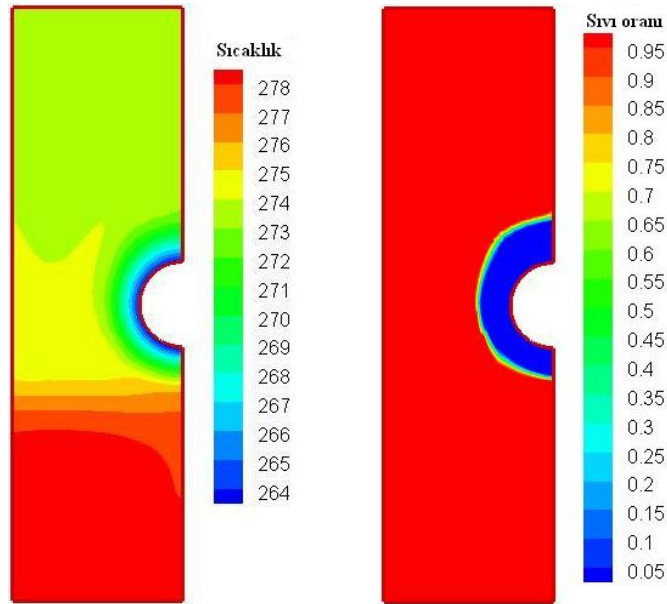
Silindirin depolama tankı içerisinde ortada ve su sıcaklığının 8 °C olması durumunda sıcaklık dağılımı ve sıvı oranlarına bakıldığında (Şekil 4.82–83–84–85.) buz oluşumunun 4 °C olması durumuna göre buz kalınlığı daha ince olmaktadır. Bunun sebebi ise; silindir yüzey sıcaklığı ile su sıcaklığı arasındaki sıcaklık farkının daha da fazla olmasıdır. Su sıcaklığı buz oluşum sıcaklığına daha uzak olduğundan buz oluşumu daha fazla zaman almaktadır.



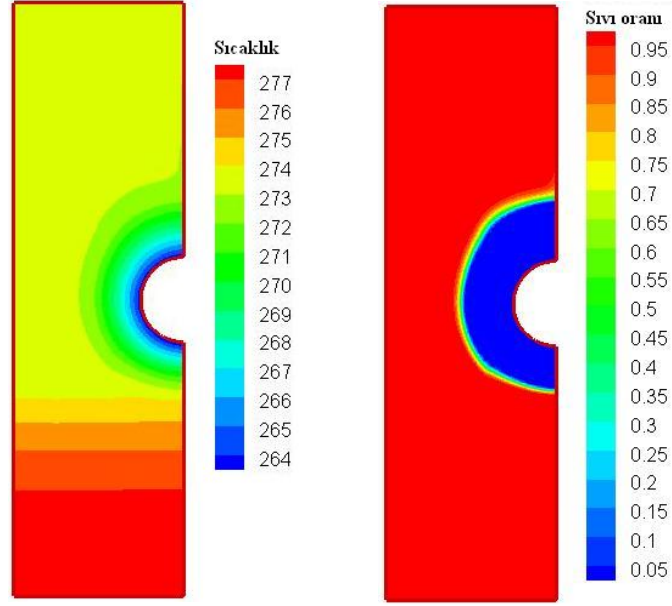
Şekil 4.82. Tank içerisinde silindirin ortada olması durumunda 900 sn sonundaki sıcaklık dağılımı ve sıvı oranı ($T_i = 281$ K).



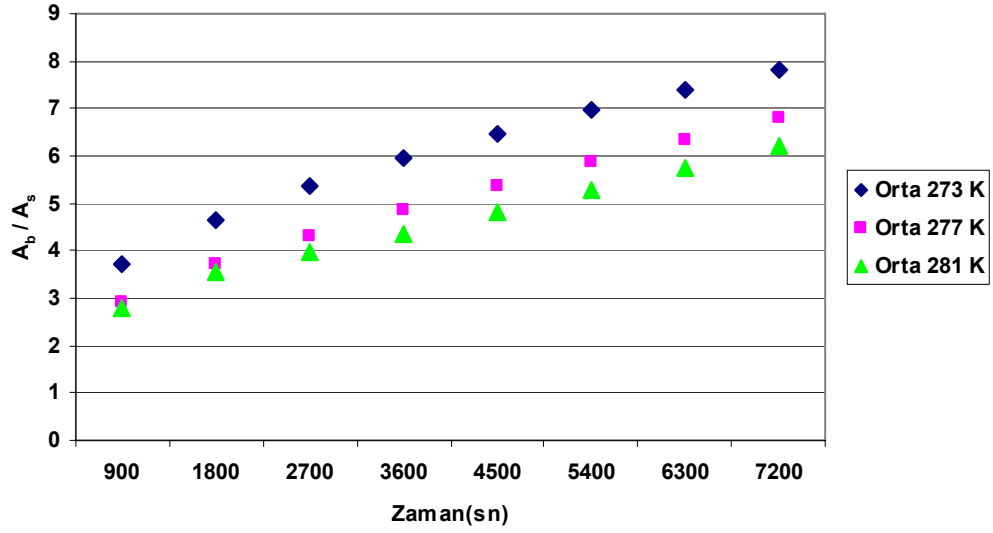
Şekil 4.83. Tank içerisinde silindirin ortada olması durumunda 1800 sn sonundaki sıcaklık dağılımı ve sıvı oranı ($T_i = 281$ K).



Şekil 4.84. Tank içerisinde silindirin ortada olması durumunda 3600 sn sonundaki sıcaklık dağılımı ve sıvı oranı ($T_i = 281$ K).



Şekil 4.85. Tank içerisinde silindirin ortada olması durumunda 7200 sn sonundaki sıcaklık dağılımı ve sıvı oranı ($T_i = 281$ K).



Şekil 4.86. Silindirin tankın ortasında olması durumunda farklı su sıcaklıklarının buz oluşumuna etkisi

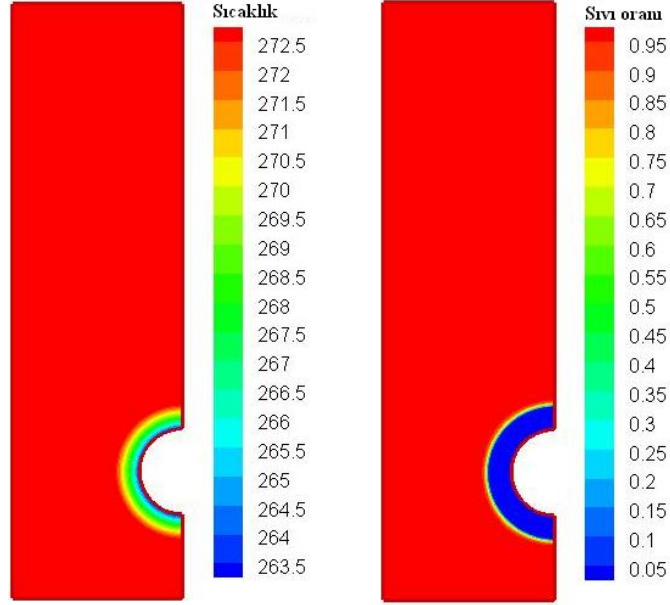
Silindirin depo içerisinde ortada bulunması durumunda üst bölgede olması durumunda olduğu gibi benzer bir grafik görülmektedir (Şekil 4.86.). Aynı şekilde analizin tamamında buz oluşumunun en fazla olduğu su sıcaklığı 0°C olduğu zamandır. Bunun sebebi ise; suyun sahip olduğu sıcaklığın buz oluşum sıcaklığına yakın bir değer olmasından kaynaklanmaktadır. Diğer sıcaklıklara baktığımızda ise suyun 4°C sıcaklığa sahip olması durumunda 0°C sıcaklığa sahip

olması durumuna kıyasla daha ince bir buz kalınlığı oluşmaktadır. Çünkü su sıcaklığının buz oluşum sıcaklığına kadar düşmesi daha uzun zaman alacaktır. Sonuçlar aynı süreler içinde karşılaştırıldığından buz oluşumunun zaman alması sonucunda daha ince bir buz tabakası oluşacaktır. Aynı şekilde suyun 8 °C sıcaklığa sahip olması durumunda sıcaklık farkından dolayı buz oluşumu 4 °C sıcaklığa göre daha fazla zaman alacaktır. Bunun sonucu olarak ta en ince buz kalınlığı buz sıcaklıkta oluşmuştur.

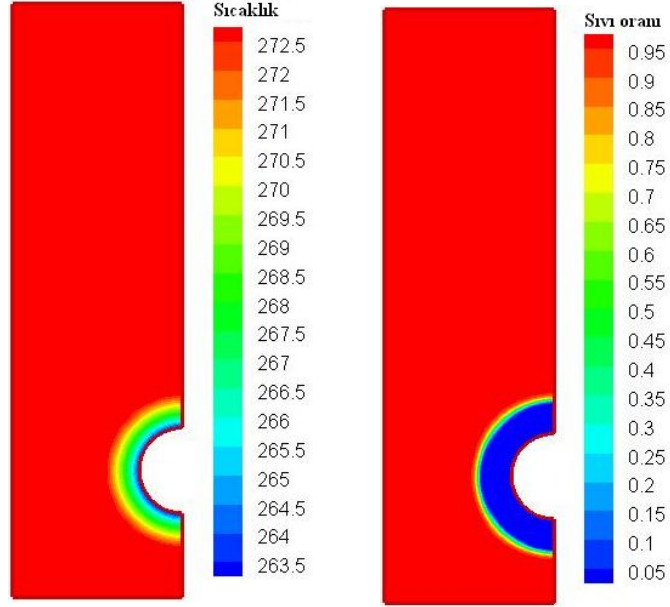
4.5.3. Silindirin depolama tankının alt bölgesinde olması durumu

4.5.3.1. Su sıcaklığının 273 K olması durumu

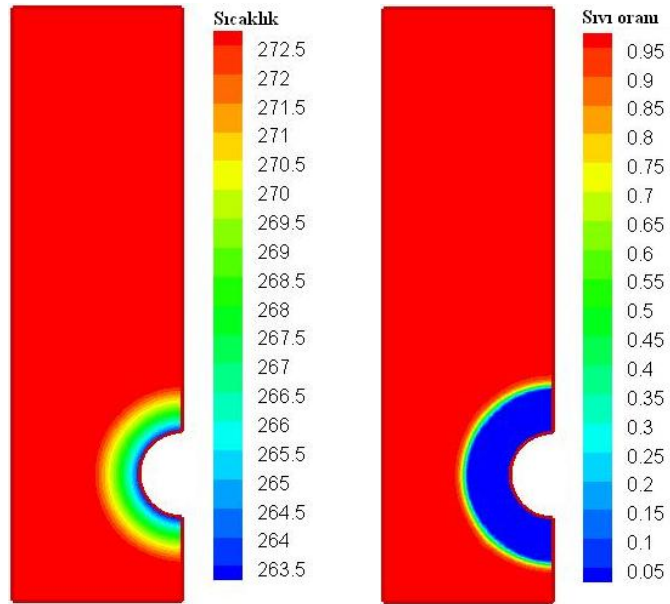
Silindirin depolama tankı içerisinde altta ve su sıcaklığının 0 °C olması durumunda sıcaklık Dağılımı ve sıvı oranları Şekil 4.87-88-89-90.'da gösterilmiştir. Sıcaklığın 0 °C olması durumu suyun buz oluşum sıcaklığına çok yakın bir sıcaklıkta olduğunu göstermektedir. Suyun buz oluşum sıcaklığına düşmesi kısa zamanda gerçekleşeceğinden buz oluşumu uzun zaman almayacaktır. Diğer modellere göre buz oluşumu daha fazla olacaktır.



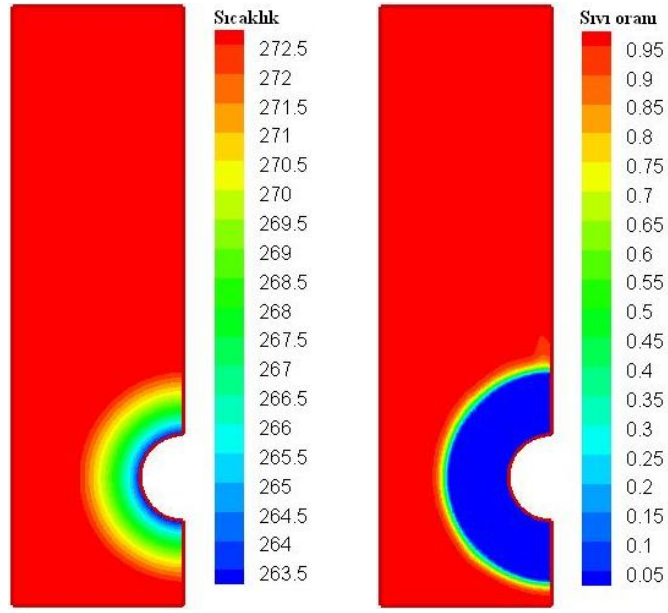
Şekil 4.87. Tank içerisinde silindirin altta olması durumunda 900 sn sonundaki sıcaklık dağılımı ve sıvı oranı ($T_i = 273$ K).



Şekil 4.88. Tank içerisinde silindirin altta olması durumunda 1800 sn sonundaki sıcaklık dağılımı ve sıvı oranı ($T_i = 273$ K).



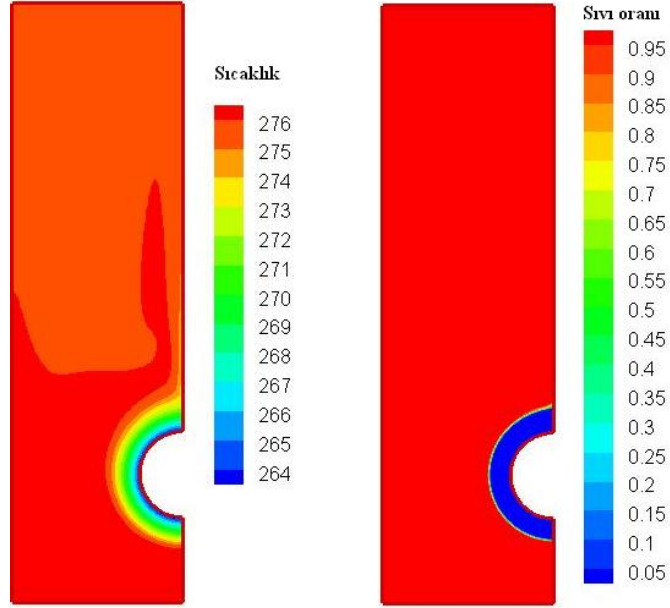
Şekil 4.89. Tank içerisinde silindirin altta olması durumunda 3600 sn sonundaki sıcaklık dağılımı ve sıvı oranı ($T_i = 273$ K).



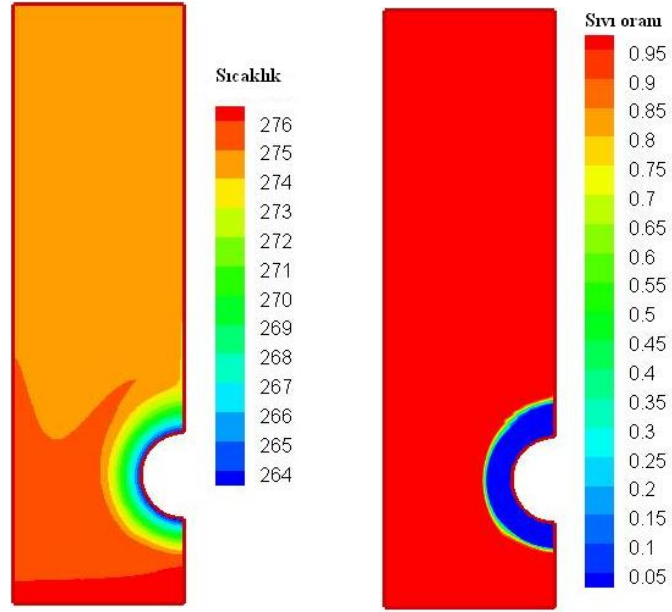
Şekil 4.90. Tank içerisinde silindirin altta olması durumunda 7200 sn sonundaki sıcaklık dağılımı ve sıvı oranı ($T_i = 273$ K).

4.5.3.2. Su sıcaklığının 277 K olması durumu

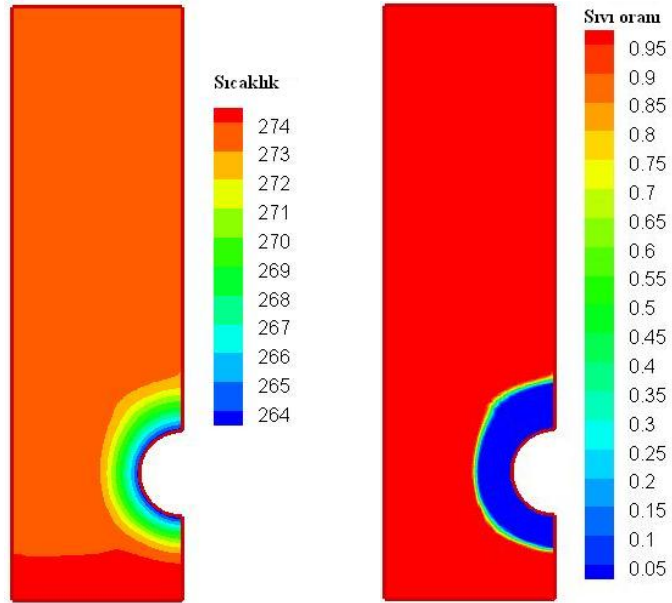
Silindirin depolama tankı içerisinde altta ve su sıcaklığının 4 °C olması durumunda sıcaklık dağılımı ve sıvı oranları Şekil 4.91-92-93-94.'de gösterilmiştir. Sıcaklığın 0 °C olması durumu ile kıyaslandığında suyun buz oluşum sıcaklığına düşmesi daha uzun zamanda gerçekleşecektir. Bu nedenle buz oluşumu daha fazla zaman alacaktır.



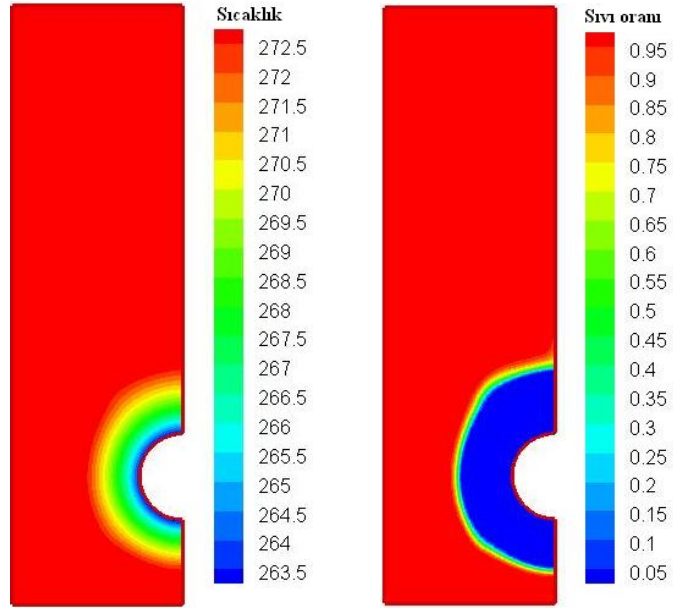
Şekil 4.91. Tank içerisinde silindirin altta olması durumunda 900 sn sonundaki sıcaklık dağılımı ve sıvı oranı ($T_i = 277$ K).



Şekil 4.92. Tank içerisinde silindirin altta olması durumunda 1800 sn sonundaki sıcaklık dağılımı ve sıvı oranı ($T_i = 277$ K).



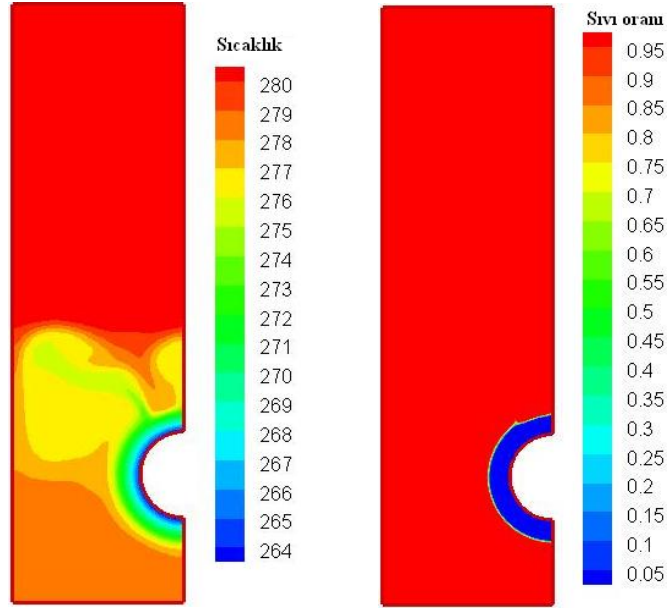
Şekil 4.93. Tank içerisinde silindirin altta olması durumunda 3600 sn sonundaki sıcaklık dağılımı ve sıvı oranı ($T_i = 277$ K).



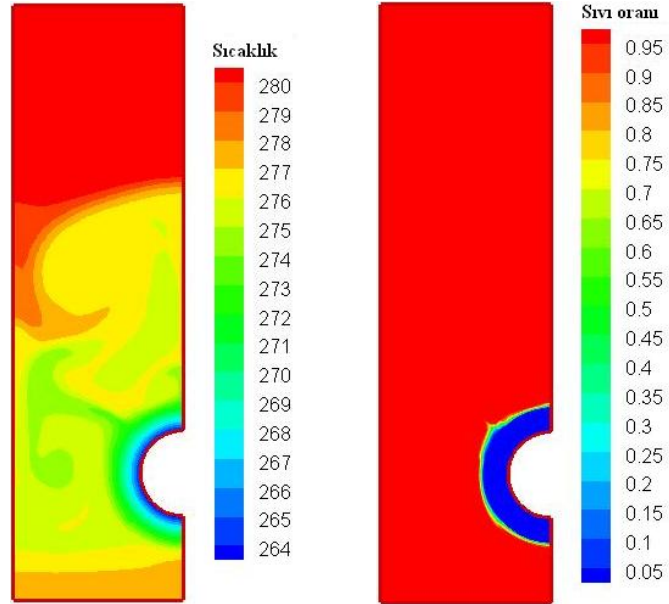
Şekil 4.94. Tank içerisinde silindirin altta olması durumunda 7200 sn sonundaki sıcaklık dağılımı ve sıvı oranı ($T_i = 277$ K).

4.5.3.3. Su sıcaklığının 281 K olması durumu

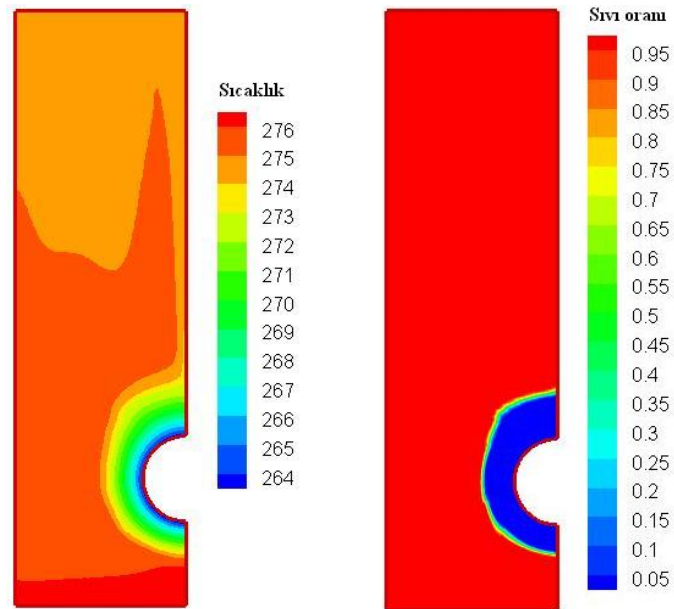
Silindirin depolama tankı içerisinde altta ve su sıcaklığının 8 °C olması durumunda sıcaklık dağılımı ve sıvı oranları Şekil 4.95-96-97-98.'de gösterilmiştir. Sıcaklığın 8 °C olması durumu suyun buz oluşum sıcaklığından çok daha fazla bir sıcaklığa sahip olduğunu gösterir. Bu nedenle, ister 0°C ister 8°C ile kıyaslansın suyun buz oluşum sıcaklığına düşmesi çok daha uzun zamanda gerçekleşecektir. Bu nedenle buz oluşumu diğer modellere göre çok daha fazla zaman alacaktır.



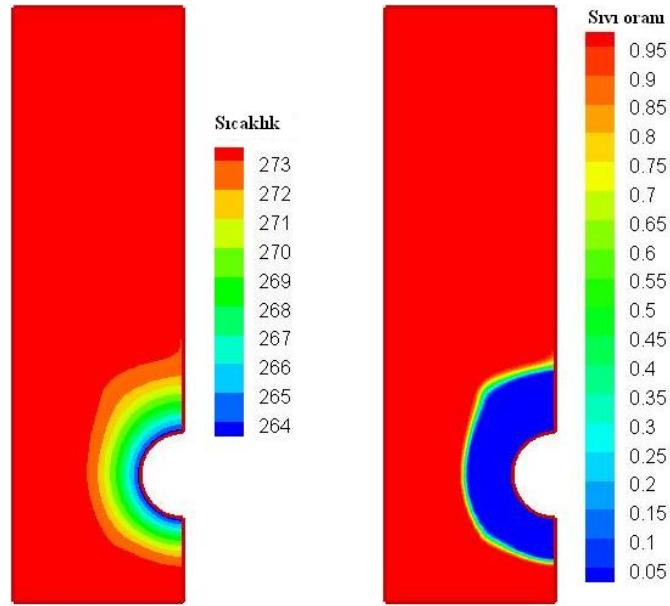
Şekil 4.95. Tank içerisinde silindirin altta olması durumunda 900 sn sonundaki sıcaklık dağılımı ve sıvı oranı ($T_i = 277$ K).



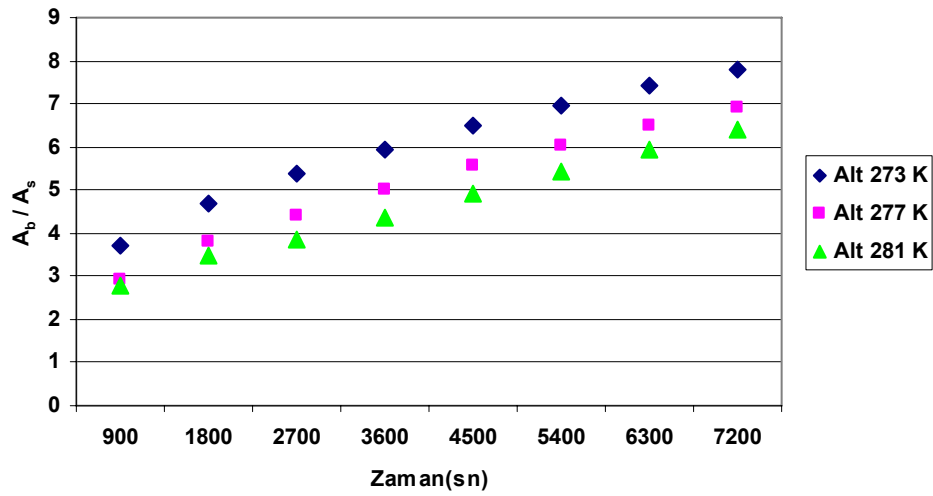
Şekil 4.96. Tank içerisinde silindirin altta olması durumunda 1800 sn sonundaki sıcaklık dağılımı ve sıvı oranı ($T_i = 277$ K).



Şekil 4.97. Tank içerisinde silindirin altta olması durumunda 3600 sn sonundaki sıcaklık dağılımı ve sıvı oranı ($T_i = 281$ K).



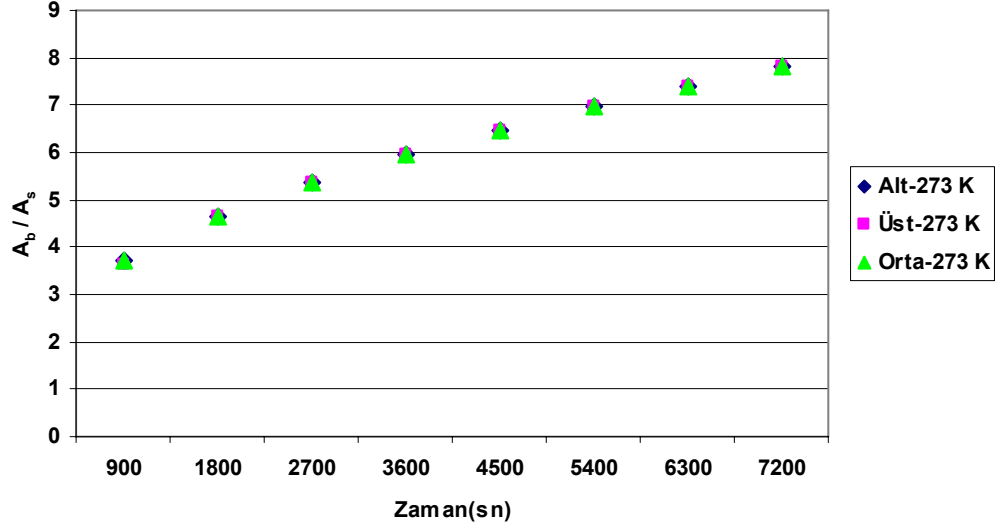
Şekil 4.98. Tank içerisinde silindirin altta olması durumunda 7200 sn sonundaki sıcaklık dağılımı ve sıvı oranı ($T_i = 281$ K).



Şekil 4.99. Silindirin tankın alt bölgesinde olması durumunda farklı su sıcaklıklarının buz oluşumuna etkisi.

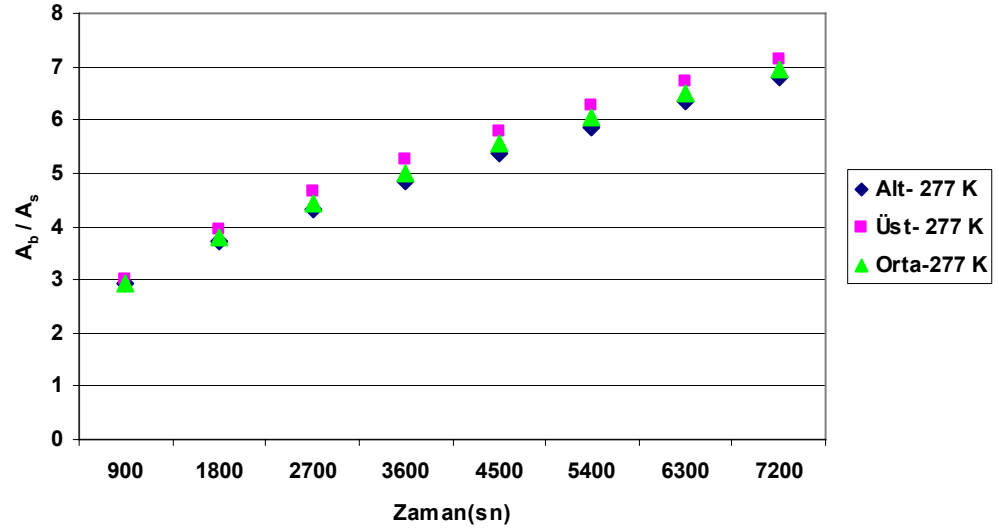
Silindirin depo içerisinde üst bölgede olması durumunda olduğu gibi silindirin ortada olması durumunda da Şekil 4.98.'de görüldüğü gibi benzer bir grafik görülmektedir. Aynı şekilde analizin tamamında buz oluşumunun en fazla olduğu su sıcaklığı 0°C olduğu zamandır. Bunun sebebi ise daha önce bahsedildiği gibi su sıcaklığının buz oluşum sıcaklığına yakın bir sıcaklığa sahip olmasıdır. Diğer sıcaklıklara baktığımızda ise fark açıldıkça yani buz oluşumu sıcaklığına

kıyasla sıcaklık artırıldıkça buz oluşumu da azalacaktır. Suyun başlangıç sıcaklığının artmasıyla birlikte analizin devam etmesiyle suyun buz oluşum sıcaklığına düşmesi zaman alacağından başlangıç sıcaklığının artmasıyla birlikte silindir üzerinde oluşan buz kalınlığı azalmaktadır. Yani; depo içerisinde bulunan faz değişim malzemesi olan suyu daha az zamanda buza dönüştürmesi için buz oluşum sıcaklığına yakın bir sıcaklıkta tutulması gerekir.

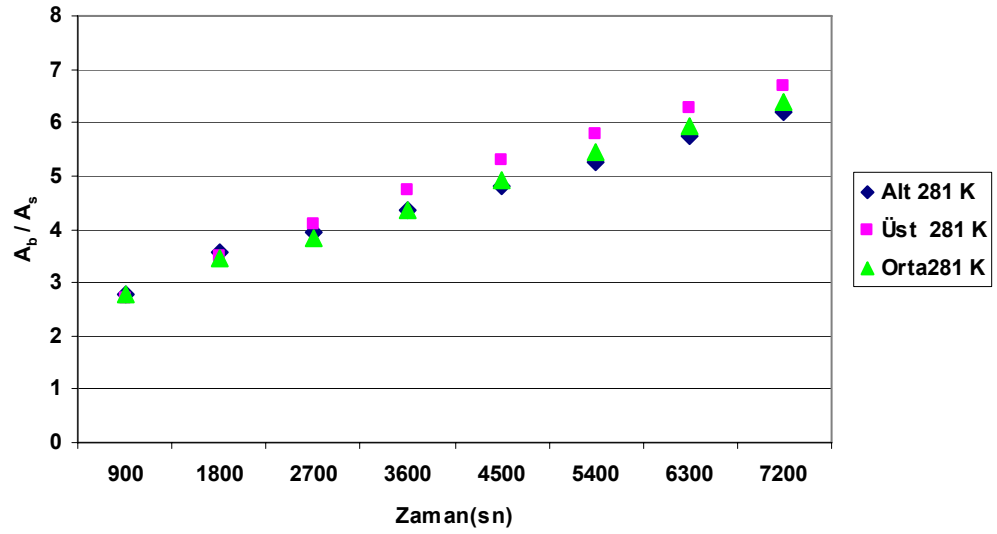


Şekil 4.100. Su sıcaklığının 273 K olması durumunda silindir konumunun buz oluşumuna etkisi.

Depo içerisindeki su sıcaklığının 0 °C seçilmesi durumunda Şekil 4.100.'da gösterildiği alan oranının zamanla değişim grafiğine bakacak olursak silindir konumunun pek etkisi olmadığı görülmektedir yani üç konum için alan oranları birbirine yakındır. Bunun sebebinin ise; seçilen su sıcaklığının buz oluşum sıcaklığına yakın olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Yani, üç konum içinde suyun silindir yüzeyine temas ettiği anda faz değişiminin gerçekleşmeye başladığı düşünülmektedir. Bu sebeple, silindirin tank içerisinde altta, ortada veya üstte olması durumunda su sıcaklığının 0 °C olması buz oluşumunda yani silindirler üzerindeki buz kalınlığında herhangi bir değişime neden olmamıştır.



Şekil 4.101. Su sıcaklığının 277 K olması durumunda silindir konumunun buz oluşumuna etkisi.



Şekil 4.102. Su sıcaklığının 281 K olması durumunda silindir konumunun buz oluşumuna etkisi

Depo içerisindeki su sıcaklığının 4 °C seçilmesi durumunda Şekil 4.101.'da gösterildiği alan oranının zamanla değişimine bakarsak silindir üzerinde buz oluşumunun en fazla olduğu durum silindirin depolama tankının üst bölgesinde olduğu durumdur. Silindirin tankın üst bölgesinde olması durumunda su doğal konveksiyonun etkisiyle yukarı yönlü hareket edecektir ve silindirin üst kısmında suyun hareket edebileceği bir alan olmadığı için soğuk su küçük bir alanda depolanacaktır ve kısa zamanda daha fazla buz oluşacaktır. Aynı şekilde silindirin deponun alt bölgesinde olması durumu için alan oranlarına bakıldığında ise su yukarı yönlü hareket edeceğinden soğuk su deponun üst bölgesinde toplanacaktır. Sıcaklığı yüksek olan su ise deponun alt bölgesinde kalacaktır. Bunun sonucu olarak silindir üzerinde buz oluşumu aynı zaman içerisinde diğer sıcaklıklara göre daha az

olmaktadır. Analiz başlangıcından sonuna kadar bakıldığında Şekil 4.101.'da gösterildiği gibi su sıcaklığı ister 4 °C veya Şekil 4.102.'de olduğu gibi su sıcaklığı 8 °C seçilmiş olsun buz oluşumunun en fazla olduğu konum silindirin tankın üst bölgesinde olduğu konumdur.. Daha sonra en fazla buz oluşumu tankın ortasında olması durumunda ve en az buz oluşumu da silindirin tankın alt bölgesinde olması durumunda olduğu görülmektedir.

V. BÖLÜM

TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu çalışmada; bir soğu depolama tankı içerisine yerleştirilen farklı silindir düzenlemelerinin, silindir sayısının arttırılmasının, faz değişim malzemesi olan suyun ve silindir yüzey sıcaklığının değiştirilmesinin ve depolama tankının içerisine yerleştirilen silindirin konumunun değiştirilmesinin katılaşmaya etkileri zamana bağlı olarak incelenmiştir. Sonuçlar için sonlu hacimler esasına dayalı FLUENT paket programı kullanılmıştır.

Sunulan çalışmada; öncelikle yüksekliği 7d ve genişliği 4d olan bir soğu depolama tankı içerisine yerleştirilen tek silindirin yüzey sıcaklığı $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve depo içerisindeki su sıcaklığı $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ seçilerek referans çalışma ile aynı sınır koşullarında elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır (Şekil 4.3.(e)). Sonuçların daha önce yapılan deneysel ve sayısal çalışmayla uyum içerisinde olduğu görülmüştür. Daha sonra oluşturulan model için yüzey sıcaklığı $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ seçilmiştir. Analiz sonunda en fazla buz oluşumunun yüzey sıcaklığı $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ olduğu durumda, en az buz oluşumunun ise yüzey sıcaklığının $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ olduğu durumda gerçekleştiği görülmüştür. Devamında depolama tankı içerisine 4d yüksekliğinde ikinci bir silindir yerleştirilerek sınır koşulları değiştirilmeden analiz yapılmıştır. Bunun sonucunda ikinci silindirin yerleştirilmesinin buz oluşumuna etkileri görselleştirilmiştir. Tek ve iki silindirli düzenleme için alan oranlarının karşılaştırılması Şekil 4.22.'de gösterilmiştir. Şekil 4.22.'de buz oluşumunun iki silindirli düzenlemede daha fazla olduğu görülmektedir.

Çalışmanın devamında; yüksekliği 10 d olan bir soğu depolama tankı içerisine silindirler arası mesafe 2d ve 3d olarak değiştirilerek dört silindirli üçgen ve kare dizilişli dört model oluşturulmuştur (Şekil 4.23. ve Şekil 4.24.). Deponun yüzeylerinin yalıtılmış olduğu kabul edilmiş ve depo içerisindeki su sıcaklığı $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve silindirlerin yüzey sıcaklığı $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ olarak seçilmiştir. Yapılan analiz sonunda silindirler arası mesafenin 2d olması ve silindirlerin üçgen dizilişli yerleştirilmeleri durumunda silindirler üzerindeki buz oluşumun kare dizilişli düzenlemeye göre daha fazla olduğu görülmüştür (Şekil 4.41.). Bunun sebebi ise, üçgen dizilişli düzenlemede suyun silindir yüzeyine teması daha fazla ve daha uzun olduğu için su daha çabuk soğumaktadır ve buna bağlı olarak suyun hızı bu düzenlemede daha fazla olmaktadır. Isı transferinin daha hızlı gerçekleşmesinin sonucu buz oluşumu da üçgen dizilişli düzenlemede daha fazladır. Silindirler arası mesafenin 3d olması durumunda ise silindir düzenlemelerinin üçgen veya kare dizilişli seçilmesinin katılaşmaya etkisi olmadığı görülmüştür. Silindirlerin depo içerisine üçgen veya kare dizilişli yerleştirilmeleri durumunda ise katılaşmanın silindirler arası mesafenin 2d olması durumunda daha fazla olduğu görülmektedir.

Silindir sayısının arttırılmasının katılaşmaya etkisini görebilmek için oluşturulan modeller ise Şekil 4.53.'te görülmektedir. Yüksekliği 10d olan depolama tankı içerisine silindirler arası mesafe 2d alınarak 4, 6 ve 8 silindirli üç model oluşturulmuştur. Depolama tankının yüzeylerinin

yalıtılmış olduğu kabul edilmiştir, depolama tankı içerisinde bulunan ve faz değişim malzemesi olarak kullanılan suyun sıcaklığı 4 °C ve silindirlerin yüzey sıcaklığı -10 °C olarak seçilmiştir. Analiz bitiminde elde edilen sonuçlara bakıldığında katılaşmanın en fazla olduğu modelin 4 silindirli oluşturulan model olduğu görülmüştür. Bunun sebebi ise; silindir sayısının artmasıyla artan kesit alanlarının artış oranının, silindirler etrafında oluşan buz alanının artış oranıyla aynı olmamasından kaynaklanmaktadır. Bunun yanı sıra silindirler üzerinde oluşan buz tabakası belli bir kalınlıktan sonra ek bir direnç oluşturduğundan gerçekleşen ısı transferini de azaltmaktadır. Yani silindir sayısının istenildiği kadar artırılması buz oluşumunun da artması anlamına gelmez. Soğutma depolamada en önemli parametrelerden biri de silindirler arası mesafedir. Eğer silindirler arası mesafe uygun seçilmezse, daha sonra oluşan buz üzerine gönderilen su, buzun tüm yüzeyiyle temas edemeyeceğinden soğutma zor gerçekleşecektir. Bu da istenmeyen bir durumdur.

Son olarak depolama tankı içerisinde bulunan tek silindirin pozisyonunun katılaşmaya etkisini görebilmek için Şekil 4.59.'da gösterildiği gibi üç model oluşturulmuştur . Bunlar silindirin tankın üst bölgesinde, ortasında ve alt bölgesinde olması durumudur. Diğer analizlerde olduğu gibi depo cidarlarının yalıtılmış olduğu kabul edilmiştir. Oluşturulan üç model için silindir yüzey sıcaklığı -10 °C, depo içerisindeki su sıcaklığı ise sırasıyla 0 °C, 4 °C ve 8 °C olarak kabul edilmiştir. Sıcaklığın 0 °C seçilmesi durumunda analiz boyunca üç model için de buz oluşumunun hemen hemen aynı olduğu görülmektedir. Bunun sebebinin ise; 0 °C buz oluşum sıcaklığına çok yakın bir sıcaklık olduğundan suyun silindir yüzeyine temas etmesiyle birlikte hemen buz oluşumu başlamaktadır. 4 °C ve 8°C için alan oranının zamanla değişimine bakacak olursak her ikisinde de buz oluşumunun silindirin üstte olması durumunda en fazla, altta olması durumunda ise en az olduğu görülmektedir. Bunun sebebi ise; silindirin üstte olması durumunda soğuyan suyun hareket edebileceği herhangi bir hacim olmadığından kısa zamanda katılaşma gerçekleşmektedir. Ancak altta olması durumunda ise soğuyan su yukarı doğru hareket edeceği için silindirin üst kısmında bulunan suyun buza dönüşmesi gerekecektir. Bu nedenle buz oluşumu daha azdır. Sıcaklığın 0 °C, 4 °C ve 8 °C olması durumunda tüm modeller için buz oluşumunun en az olduğu sıcaklık 8 °C'dir. Çünkü bu sıcaklıkta suyun buz oluşum sıcaklığına düşmesi zaman alacaktır.

Sonuçların deneylerle desteklenmesinin yararlı olacağı düşünülmektedir.

VI. BÖLÜM

KAYNAKLAR

Abhat A., 1978, Performance Studies of a Finned Heat Pipe Latent Thermal Energy Storage system, International Solar Energy Congress, New Delhi, India.

Abhat A., 1980, Application of heat pipes thermal energy storage systems, AIAA 15th Thermophysics Conference, July 14-16, Colorado, USA.

Bathelt A.G. ve Viskanta R., 1981 Heat transfer and interface motion during melting and solidification around a finned horizontal sink/source, J. Heat Transfer, 103, 720-726.

Bonacina C., Comini G., Fasano A. ve Primicerio M., 1973, Numerical solution of phase change problems, International Journal of Heat Mass Transfer, Vol. 16, pp 1825-1832.

Cao Y. Ve Faghri A., 1990, A numerical analysis of phase change problem including natural convection, ASME Journal of Heat Transfer, 112 (3), 812-816.

Casano G. ve Piva S., 2002, Experimental and numerical investigation of the study periodic solid-liquid phase-change heat transfer, International Journal of Heat Mass Transfer, Vol. 45, pp 4181-4190.

Dorgan C. Ve Elleson J., 1994, Design guide for cool thermal storage, American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers 1791 tullie circle, Atlanta, Georgia.

Erek A. ve Acar M.A., 2003, Radyal kanatlı boru çevresinde faz değişimi ile enerji depolanması, DEU Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi, Cilt 5, Sayı 2, s. 61-71.

Ezan M.A., 2006, Design And Optimization Of Ice-On-Coil Latent Thermal Storage System, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İZMİR:

Gebhart B. Ve Mollendorf J., 1978, Buoyancy-induced flows in water under conditions in which density extrema may arise, Journal of Fluid Mechanics, 24,274-302.

Humphries W.R. ve Griggs E. I., 1977, A design handbook of phase change thermal control and energy storage devices, Tecnical Paper 1074, NASA, Washington, DC.

Incropera, F. P., De Witt, D. P., Isı ve kütle geçişinin temelleri, Literatür Yayıncılık, 2001.

İlken Z., 1998, Soğu Depolama, TTMD, III. Uluslararası Yapıda Tesisat Bilimi ve Teknolojisi Sempozyumu Bildiriler Kitabı, ISBN 975-6907-01.

Kamal İ. ve Silva M., 2002, Numerical solution of the phase change problem around a horizontal cylinder in the presence of natural convection in the melt region, International Journal of Heat Mass Transfer, Vol. 46, pp 1791-1799.

Lacroix M., 1993, Numerical simulation of melting and resolidification of a phase change material around two cylindrical heat exchangers, Numerical Heat Transfer, Part A, Vol. 24, pp 143-160.

Padmanabhan P.V. ve Khrisna M.V., 1989, Outward phase change in a cylindrical annulus with axial fins on the inner tube, International Journal of Heat Mass Transfer, Vol. 29, pp 1855-1868.

Sasaguchi K., Yoshida H. Ve Nakashima S., 1988, Heat transfer characteristics of a latent heat thermal energy storage unit with a finned tube (effects of fin configuration), Trans.JSME, 54(504), 2136-2143.

Sasaguchi K., Kusano K. And Viskanta R., 1996, A numerical analysis of solid-liquid phase change heat transfer around a single and two horizontal, vertically spaced cylinders in a rectangular cavity, International Journal of Heat Mass Transfer, Vol. 41, pp.3149-3156.

Sasaguchi K., Kuwabara K., Kusano K. and Kitagawa H., 1998, Transient cooling of water around a cylinder in a rectangular cavity a numerical analysis of the effect of the position of the cylinder, International Journal of Heat Mass Transfer, Vol. 40, No. 6, pp. 1343-1354.

Scanlon T.J. ve Stickland M. T., 2003, A numerical analysis of buoyancy-driven melting and freezing, International Journal of Heat Mass Transfer, Vol. 47, 429-436.

Serin H., 2002, Designing of an air-conditioning system with ice-storage, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, ADANA.

Shih Y.C. ve Chou H., 2005, Numerical study of solidification around staggered cylinders in a fixed space, Numerical Heat Transfer, Part A, 48: 239-260.

Shi W., Wang B. Ve Li X., 2005, A measurement method of ice layer thickness based on resistance-capacitance circuit for closed loop external melt ice storage tank, *Applied Thermal Engineering*, 25(11-12), 1697-1707.

Sparrow E.M., Larson E.D. ve Ramsey J.M., 1981, Freezing on an finned tube for either conduction-controlled or natural convection-controlled heat transfer, *International Journal of Heat Mass Transfer*, Vol. 24, pp 273-284.

Tenchev R. T., Mackenzie J. A., Scanlon T. J. Ve Stickland M.T., 2005, Finite element moving mesh analysis of phase change problems with natural convection, *International Journal of Heat Mass Transfer*, Vol. 26, 597-612.

Yılmaz T., 1997, “Su ve Buz Depolama Yöntemleriyle İklimlendirme”, III. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi Bildiriler Kitabı, Cilt 1., s. 137-149.

Zhang Y. Ve Faghri A., 1996 a, Analytical Solution of thermal energy storage system with conjugate laminar forced convection, *International Journal of Heat Mass Transfer*, Vol. 39, pp 717-724.

Zhang Y. Ve Faghri A., 1996 b, Heat transfer enhancement in latent heat thermal energy storage systems by using the internally finned tube, *International Journal of Heat Mass Transfer*, Vol. 39, pp 3165-3173.

VII. BÖLÜM**ÖZGEÇMİŞ**

Adı Soyadı : Nesrin SÖNMEZ

Baba Adı : İzzet

Doğum Yeri : İmranlı

Doğum Tarihi : 11/07/1982

1982 yılında Sivas'ta doğdu. İlk öğrenimini Dutluk İlkokulu'nda 1993 yılında tamamladı. Orta öğrenimini Mamak Ortaokulu'nda 1996 yılında ve lise öğrenimini de Mamak Lisesi'nde 1999 yılında tamamladı. Daha sonra Cumhuriyet Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümünden 2003 yılında fakülte birincisi derecesiyle mezun olarak Makine Mühendisi derecesini aldı. Aynı üniversitede 2005 yılında Araştırma Görevlisi olarak göreve başladı. Halen Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde Yüksek Lisans yapmaktadır.

Adres: Cumhuriyet Üniversitesi

Mühendislik Fakültesi

Makine Mühendisliği Bölümü

58140 SİVAS

VIII. BÖLÜM

EKLER

8.1. Korunum Denklemlerinin Boyutsuz Şekli

Korunum denklemleri parametre sayısını azaltmak için boyutsuz şekilde yazılabilir. Böylece çözüm algoritması boyutlu şekilden daha basit hale gelir. Tüm denklemler boyutsuz şekle dönüştürülür. Boyutsuz değişkenler ve gruplar Tablo 8.1’de sunulmuştur.

Tablo 8.1. Boyutsuz Değişkenler

	Boyutlu Şekil	Boyutsuz şekil
<i>Radyal doğrultu boyunca koordinat</i>	r	$R = \frac{r}{D_i}$
<i>Eksenel doğrultu boyunca koordinat</i>	x	$X = \frac{r}{D_i}$
<i>Zaman</i>	t	$\tau = \frac{\alpha_a t}{D_i^2}$
<i>Sıcaklık</i>	T	$\theta = \frac{T - T_{ort}}{T_{ort} - T_{in}}$
<i>Faz Değişim sıcaklığı</i>	δT_{ort}	$\delta \theta_{ort} = \frac{\delta T_{ort}}{(T_{ort} - T_{in})}$
<i>Isıl iletkenlik</i>	k	$K = \frac{k}{k_s}$
<i>Isıl yayılım</i>	α	$\alpha = \frac{k}{\rho c}$
<i>Isıl kapasite</i>	$C^0 (= \rho c)$	$C = \frac{C^0}{\rho_s c_s}$
<i>Kaynak terim</i>	S^0	$S = \frac{S^0}{\rho_s c_s (T_{ort} - T_{in})}$
<i>Reynolds sayısı</i>	-	$Re_a = \frac{4\dot{m}}{\pi D \mu_a}$
<i>Prandtl sayısı</i>	-	$Pr_a = \frac{\nu_a}{\alpha_a}$
<i>Stefan sayısı</i>	-	$Ste = \frac{c_s (T_{ort} - T_{in})}{\Delta H}$
<i>Peclet sayısı</i>	-	$Pe_a = Re_a Pr_a$

8.1.1. Isı transfer akışkanı (ITA) denkleminin boyutsuz şekli

Isı transfer akışkanı için korunum denklemi Denklem (3.26)' da olduğu gibi elde edilir ve bu denklem için boyutsuz şekil Tablo 8.1'de listelenen parametreleri kullanarak aşağıdaki şekilde elde edilir.

$$\rho_a \frac{c_a \alpha_a}{D_i^2} \frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \frac{4h}{D_i} (\theta_c - \theta_a) - \rho_a \frac{c_a u_{ort}}{D_i} \frac{\partial \theta}{\partial X} \quad (8.1)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = 4Nu(\theta_c - \theta_a) - \frac{\mu_a c_a}{k_a} \rho_a \frac{u_{ort} D_i}{\mu_a} \frac{\partial \theta}{\partial X} \quad (8.2)$$

Isı transfer akışkanı için enerji denklemi boyutsuz olarak şu şekilde açıklanabilir,

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = 4Nu(\theta_c - \theta_a) - \text{PrRe} \frac{\partial \theta}{\partial X} \quad (8.3)$$

Burada laminar ve hidro-dinamik olarak tamamen gelişmiş akış için Nusselt sayısı, Kays-Crawford (1980) ve Zhang-Fagri (1996) tarafından geliştirilen analitik yöntemle elde edilir.

$$(Nu)_j = \frac{\sum_{k=1}^j \Delta \theta_k \sum_{n=0}^{\infty} G_n \exp \left[-\frac{2\lambda_n^2}{Pe_a} (X - (k-1)\Delta X) \right]}{2 \sum_{k=1}^j \Delta \theta_k \sum_{n=0}^{\infty} \frac{G_n}{\lambda_n^2} \exp \left[-\frac{2\lambda_n^2}{Pe_a} (X - (k-1)\Delta X) \right]} \quad (8.4)$$

burada,

$$\Delta \theta_k = (\theta_{Ri})_k - (\theta_{Ri})_{k-1} \text{ ve } j = \text{int} \left(\frac{X}{\Delta X} \right) + 1 \quad (8.5)$$

Denklem (8.4.)'deki Eigen değeri λ_n ve sabit G_n Tablo 1.2'de verilmiştir. Türbülanslı akış şartı için ısı transfer akışkanının yerel Nusselt sayısı Gnielsinski (1976) tarafından tanımlanan denklemden elde edilir.

Tablo 8.2. Dairesel tüp için sonsuz çözüm fonksiyonları serisi

n	λ_n^2	G_n
0	7.312	0.749
1	44.62	0.544
2	113.8	0.463
3	215.2	0.414
4	348.5	0.382

8.1.2. Boru cidarı denkleminin boyutsuz şekli

Denklem (3.35)'un boyutsuz şekli Tablo 8.1'deki değişkenler kullanılarak türetilir.

$$(\rho c)_c \frac{\partial T^0}{\partial t} = \frac{k_s}{D_i^2} \left[\frac{\partial}{\partial X} \left(K_c \frac{\partial T^0}{\partial X} \right) + \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} \left(K_c R \frac{\partial T^0}{\partial R} \right) \right] \quad (8.6)$$

$$\frac{\partial T^0}{\partial \tau} = \frac{D_i^2}{\alpha_a (\rho c)_c} \frac{k_s}{D_i^2} \left[\frac{\partial}{\partial X} \left(K_c \frac{\partial T^0}{\partial X} \right) + \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} \left(K_c R \frac{\partial T^0}{\partial R} \right) \right] \quad (8.7)$$

$$\frac{\partial T^0}{\partial \tau} = \frac{k_s (\rho c)_s}{\alpha_a (\rho c)_s (\rho c)_c} \frac{1}{(\rho c)_c} \left[\frac{\partial}{\partial X} \left(K_c \frac{\partial T^0}{\partial X} \right) + \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} \left(K_c R \frac{\partial T^0}{\partial R} \right) \right] \quad (8.8)$$

Boyutsuz ısı transferi denklemini boru çeperi için aşağıdaki gibi gösterilebilir.

$$C_c \frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \frac{\alpha_s}{\alpha_a} \left[\frac{\partial}{\partial X} \left(K_c \frac{\partial \theta}{\partial X} \right) + \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} \left(K_c R \frac{\partial \theta}{\partial R} \right) \right] \quad (8.9)$$

1.1.3. Faz değişim malzemesi (FDM) denkleminin boyutsuz şekli

Denklem (3.36)'nin boyutsuz şekli Tablo 8.1'de verilen değişkenler kullanılarak aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \frac{k_s (\rho c)_s}{\alpha_a (\rho c)_s (\rho c)_k} \frac{1}{(\rho c)_k} \left[\frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} \left(K R \frac{\partial \theta}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial X} \left(K \frac{\partial \theta}{\partial X} \right) \right] - \frac{dS(\rho c)_s}{d\tau (\rho c)_k} \quad (8.10)$$

$$\frac{\partial(C\theta)}{\partial\tau} = \frac{\alpha_s}{\alpha_a} \left[\frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} \left(KR \frac{\partial\theta}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial X} \left(K \frac{\partial\theta}{\partial X} \right) \right] - \frac{dS}{d\tau} \quad (8.11)$$

burada, $K(\theta)$, $C(\theta)$, $S(\theta)$ terimlerinin boyutsuz hali aşağıdaki gibi gösterilebilir.

$$C = C(\theta) = \begin{cases} C_{ks} & \theta < -\delta\theta_{ort} & \text{Katı} \\ \left(\frac{1}{2}(1 + C_{ks}) + \frac{1}{2Ste\delta\theta_{ort}} \right) & -\delta\theta_{ort} \leq \theta \leq \delta\theta_{ort} & \text{Mushy} \\ 1 & \theta > \delta\theta_{ort} & \text{Sıvı} \end{cases} \quad (8.12)$$

$$S = S(\theta) = \begin{cases} C_{ks}\delta\theta_{ort} & \theta < -\delta\theta_{ort} & \text{Katı} \\ \left(\frac{1}{2}\delta\theta_{ort}(1 + C_{ks}) + \frac{1}{2Ste} \right) & -\delta\theta_{ort} \leq \theta \leq \delta\theta_{ort} & \text{Mushy} \\ C_{ks}\delta\theta_{ort} + \frac{1}{Ste} & \theta > \delta\theta_{ort} & \text{Sıvı} \end{cases} \quad (8.13)$$

$$K = K(\theta) = \begin{cases} K_{ks} & \theta < -\delta\theta_{ort} & \text{Katı} \\ K_{ks} + \frac{(1 - K_{ks})(\theta + \delta\theta_{ort})}{2\delta\theta_{ort}} & -\delta\theta_{ort} \leq \theta \leq \delta\theta_{ort} & \text{Mushy} \\ 1 & \theta > \delta\theta_{ort} & \text{Sıvı} \end{cases} \quad (8.14)$$