KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DALGALI DUVARA SAHİP KAPALI KAVİTE İÇERİSİNDE BULUNAN NANOAKIŞKANIN KONVEKSİYONLA ISI TRANSFERİNİN İNCELENMESİ

METİN AKYOL

KOCAELİ 2015

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DALGALI DUVARA SAHİP KAPALI KAVİTE İÇERİSİNDE BULUNAN NANOAKIŞKANIN KONVEKSİYONLA ISI TRANSFERİNİN İNCELENMESİ

METİN AKYOL

Doç.Dr. Elif ÖĞÜT
Danışman, Kocaeli Üniv. .....

Yrd.Doç.Dr. Müslüm ARICI
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv. .....

Yrd.Doç.Dr. Zekeriya PARLAK
Jüri Üyesi, Sakarya Üniv. .....

Tezin Savunulduğu Tarih: 07.09.2015

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Nano akışkanlar kavramı ile ısı transferi biliminde ciddi ilerlemeler meydana gelmiş ve temel akışkanların aksine ciddi performans artışları elde edilmiştir. Bu edinimler ile beraber teknolojinin birçok alanında düşük ısı transferinin meydana getirdiği kısıtlamalar aşılarak daha kompakt ve yüksek performanslı sistemlerin önü açılmıştır.

Nano akışkanların kapalı kavite içerisindeki konveksiyonla ısı transferinin incelenmesi konusunda bana çalışma fırsatı veren ve katkılarıyla bana yol gösteren değerli hocam Doç.Dr.Elif ÖĞÜT'e, eleştiri ve tavsiyeleriyle bilgilerini benden esirgemeyen Yrd.Doç.Dr.Müslüm ARICI'ya ve çalışmalarım süresince ihmal ettiğim halde bana sabır gösteren ve desteğini eksik etmeyen eşim İlknur'a çok teşekkür ederim.

Eylül - 2015 Metin AKYOL

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR i
İÇİNDEKİLER ii
ŞEKİLLER DİZİNİ iv
TABLOLAR DİZİNİ vii
SİMGELER DİZİNİ VE KISALTMALAR viii
ÖZET x
ABSTRACT xi
GİRİŞ 1
1. ISIL İLETKENLİK KORELASYONLARI 7
1.1. Maxwell Modeli 7
1.2. Hamilton & Crosser Modeli 7
1.3. Bruggeman Modeli 8
1.4. Yu ve Choi Modeli 8
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI 9
3. MATEMATİKSEL FORMÜLASYONLAR 13
3.1. Analizlerde İncelenen Geometriler: 16
3.1.1. Tek dalgalı kaviteler 16
3.1.2. 3 dalgalı kaviteler 17
4. NÜMERİK ANALİZ 19
4.1. Kodun Doğrulanması 19
4.2. Mesh Bağımsızlığının İncelenmesi 21
5. SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ 23
5.1. 0° Eğimli “1” Dalgalı Kavite için Analiz Sonuçları 23
5.1.1. Akım çizgileri eğrileri 23
5.1.2. Eş sıcaklık eğrileri 26
5.2. 0° Eğimli “3” Dalgalı Kavite için Analiz Sonuçları 29
5.2.1. Akım çizgileri eğrileri 29
5.2.2. Eş sıcaklık eğrileri 32
5.3. 45° Eğimli “1” Dalgalı Kavite için Analiz Sonuçları 35
5.3.1. Akım çizgileri eğrileri 35
5.3.2. Eş sıcaklık eğrileri 38
5.4. 45° Eğimli “3” Dalgalı Kavite için Analiz Sonuçları 41
5.4.1. Akım çizgileri eğrileri 41
5.4.2. Eş sıcaklık eğrileri 44
5.5. 90° Eğimli “1” Dalgalı Kavite için Analiz Sonuçları 47
5.5.1. Akım çizgileri eğrileri 47
5.5.2. Eş sıcaklık eğrileri 50
5.6. 90° Eğimli “3” Dalgalı Kavite için Analiz Sonuçları 53
5.6.1. Akım çizgileri eğrileri 53
5.6.2. Eş sıcaklık eğrileri 56
5.7. 0° Eğimli “1” Dalgalı Kavite için Sıcak Duvar Boyunca Yerel Nusselt Değerlerinin Değişimleri 59
5.7.1. Rayleigh sayısının değişimlerine göre 59
5.7.2. Genlik değerinin değişimlerine göre 60
5.7.3. Hacim fraksiyonlarının değişimlerine göre 61

5.8. 45° Eğimli “1” Dalgalı Kavite için Yerel Nusselt Değerlerinin Değişimleri....62
5.8.1. Rayleigh sayısının değişimlerine göre....62
5.8.2. Genlik değerinin değişimlerine göre....63
5.8.3. Hacim fraksiyonlarının değişimlerine göre....64
5.9. 90° Eğimli “1” Dalgalı Kavite için Yerel Nusselt Değerlerinin Değişimleri....65
5.9.1. Rayleigh sayısının değişimlerine göre....65
5.9.2. Genlik değerinin değişimlerine göre....66
5.9.3. Hacim fraksiyonlarının değişimlerine göre....67
5.10. “0,05” Genlikli “1” Dalgalı Kavite için Yerel Nusselt Değerinin Açıyla Beraber Değişimi....68
5.11. “0,05” Genlikli “3” Dalgalı Kavite için Yerel Nusselt Değerinin Açıyla Beraber Değişimi....69
5.12. “0,05” Genlikli 0° Eğimli “1” Dalgalı Kavite için Ortalama Nusselt Değerlerinin Değişimleri....70
5.13. “0,05” Genlikli 0° Eğimli “3” Dalgalı Kavite için Ortalama Nusselt Değerlerinin Değişimleri....71
5.14. “0,05” Genlikli 45° Eğimli “1” Dalgalı Kavite için Ortalama Nusselt Değerlerinin Değişimleri....72
5.15. “0,05” Genlikli 45° Eğimli “3” Dalgalı Kavite için Ortalama Nusselt Değerlerinin Değişimleri....73
5.16. “0,05” Genlikli 90° Eğimli “1” Dalgalı Kavite için Ortalama Nusselt Değerlerinin Değişimleri....74
5.17. “0,05” Genlikli 90° Eğimli “3” Dalgalı Kavite için Ortalama Nusselt Değerlerinin Değişimleri....75
5.18. “1” Dalgalı Kavite için Ortalama Nusselt Değerlerinin Açıya Göre Değişimleri....76
5.19. “3” Dalgalı Kavite için Ortalama Nusselt Değerlerinin Açıya Göre Değişimleri....77
5.20. “1” Dalgalı Kavite için Ortalama Nusselt Değerlerinin Genlik Değerine Göre Değişimleri....78
5.21. “3” Dalgalı Kavite için Ortalama Nusselt Değerlerinin Genlik Değerine Göre Değişimleri....79
5.22. “1” Dalgalı “0,05” Genlikli Kavite için Farklı Nanopartiküllerle Oluşturulan Nanoakışkanlarla Ortalama Nu değerlerinin Değişimi....81
6. TEK DUVARI DALGALI KAPALI BÖLGE İÇİN YAPILAN ÇALIŞMALAR....82
6.1. Analiz Sonuçları....83
6.1.1. Akım çizgileri....83
6.1.2. Eş sıcaklık eğrileri....84
6.1.3. Yerel nusselt grafikleri....85
6.1.4. Ortalama nusselt grafiği....86
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER....87
KAYNAKLAR....89
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER....92
ÖZGEÇMİŞ....93

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3.1. Farklı Genliklere Sahip Tek Dalgalı Kaviteler....16
Şekil 3.2. Farklı Genliklere Sahip 3 Dalgalı Kaviteler....17
Şekil 4.1. "0,1" Genlikli Meshlenmiş Kavite....21
Şekil 5.1. "0,05" Genlikli 0° Eğimli "1" Dalgalı Kavite için Akım Çizgileri....23
Şekil 5.2. "0,075" Genlikli 0° Eğimli "1" Dalgalı Kavite için Akım Çizgileri....24
Şekil 5.3. "0,1" Genlikli 0° Eğimli "1" Dalgalı Kavite için Akım Çizgileri....25
Şekil 5.4. "0,05" Genlikli 0° Eğimli "1" Dalgalı Kavite için Eş Sıcaklık Eğrileri....26
Şekil 5.5. "0,075" Genlikli 0° Eğimli "1" Dalgalı Kavite için Eş Sıcaklık Eğrileri....27
Şekil 5.6. "0,1" Genlikli 0° Eğimli "1" Dalgalı Kavite için Eş Sıcaklık Eğrileri....28
Şekil 5.7. "0,05" Genlikli 0° Eğimli "3" Dalgalı Kavite için Akım Çizgileri....29
Şekil 5.8. "0,075" Genlikli 0° Eğimli "3" Dalgalı Kavite için Akım Çizgileri....30
Şekil 5.9. "0,1" Genlikli 0° Eğimli "3" Dalgalı Kavite için Akım Çizgileri....31
Şekil 5.10. "0,05" Genlikli 0° Eğimli "3" Dalgalı Kavite için Eş Sıcaklık Eğrileri....32
Şekil 5.11. "0,075" Genlikli 0° Eğimli "3" Dalgalı Kavite için Eş Sıcaklık Eğrileri....33
Şekil 5.12. "0,1" Genlikli 0° Eğimli "3" Dalgalı Kavite için Eş Sıcaklık Eğrileri....34
Şekil 5.13. "0,05" Genlikli 45° Eğimli "1" Dalgalı Kavite için Akım Çizgileri....35
Şekil 5.14. "0,075" Genlikli 45° Eğimli "1" Dalgalı Kavite için Akım Çizgileri....36
Şekil 5.15. "0,1" Genlikli 45° Eğimli "1" Dalgalı Kavite için Akım Çizgileri....37
Şekil 5.16. "0,05" Genlikli 45° Eğimli "1" Dalgalı Kavite için Eş Sıcaklık Eğrileri....38
Şekil 5.17. "0,075" Genlikli 45° Eğimli "1" Dalgalı Kavite için Eş Sıcaklık Eğrileri....39
Şekil 5.18. "0,1" Genlikli 45° Eğimli "1" Dalgalı Kavite için Eş Sıcaklık Eğrileri....40
Şekil 5.19. "0,05" Genlikli 45° Eğimli "3" Dalgalı Kavite için Akım Çizgileri....41
Şekil 5.20. "0,075" Genlikli 45° Eğimli “3” Dalgalı Kavite için Akım Çizgileri....42
Şekil 5.21. "0,1" Genlikli 45° Eğimli "3" Dalgalı Kavite için Akım Çizgileri....43
Şekil 5.22. "0,05" Genlikli 45° Eğimli "3" Dalgalı Kavite için Eş Sıcaklık Eğrileri....44
Şekil 5.23. "0,075" Genlikli 45° Eğimli "3" Dalgalı Kavite için Eş Sıcaklık Eğrileri....45
Şekil 5.24. "0,1" Genlikli 45° Eğimli "3" Dalgalı Kavite için Eş Sıcaklık Eğrileri....46
Şekil 5.25. "0,05" Genlikli 90° Eğimli "1" Dalgalı Kavite için Akım Çizgileri....47
Şekil 5.26. "0,075" Genlikli 90° Eğimli "1" Dalgalı Kavite için Akım Çizgileri....48
Şekil 5.27. "0,1" Genlikli 90° Eğimli "1" Dalgalı Kavite için Akım Çizgileri....49
Şekil 5.28. "0,05" Genlikli 90° Eğimli "1" Dalgalı Kavite için Eş Sıcaklık Eğrileri....50
Şekil 5.29. "0,075" Genlikli 90° Eğimli "1" Dalgalı Kavite için Eş Sıcaklık Eğrileri....51

Şekil 5.30. "0,1" Genlikli 90° Eğimli "1" Dalgalı Kavite için Eş Sıcaklık Eğrileri....52
Şekil 5.31. "0,05" Genlikli 90° Eğimli "3" Dalgalı Kavite için Akım Çizgileri....53
Şekil 5.32. "0,075" Genlikli 90° Eğimli "3" Dalgalı Kavite için Akım Çizgileri....54
Şekil 5.33. "0,1" Genlikli 90° Eğimli "3" Dalgalı Kavite için Akım Çizgileri....55
Şekil 5.34. "0,05" Genlikli 90° Eğimli "3" Dalgalı Kavite için Eş Sıcaklık Eğrileri....56
Şekil 5.35. "0,075" Genlikli 90° Eğimli "3" Dalgalı Kavite için Eş Sıcaklık Eğrileri....57
Şekil 5.36. "0,1" Genlikli 90° Eğimli "3" Dalgalı Kavite için Eş Sıcaklık Eğrileri....58
Şekil 5.37. "0,05" Genlik ve "0,05" Hacim Fraksiyonu için Yerel Nusselt Değerinin Rayleigh Sayısıyla Değişimi....59
Şekil 5.38. "0,05" Hacim Fraksiyonu ve Ra= 10^5 için Yerel Nusselt Değerinin Genlik Değeriyle Değişimi....60
Şekil 5.39. "0,05" Genlik ve Ra= 10^5 için Yerel Nusselt Değerinin Hacim Fraksiyonuyla Değişimi....61
Şekil 5.40. "0,05" Genlik ve "0,05" Hacim Fraksiyonu için Yerel Nusselt Değerinin Rayleigh Sayısıyla Değişimi....62
Şekil 5.41. "0,05" Hacim Fraksiyonu, 45° eğimli , “1” dalgalı ve Ra= 10^5 için Yerel Nusselt Değerinin Genlik Değeriyle Değişimi....63
Şekil 5.42. "0,05" Genlik, 45° eğimli “1” dalgalı, ve Ra= 10^5 için Yerel Nusselt Değerinin Hacim Fraksiyonuyla Değişimi....64
Şekil 5.43. "0,05" Genlik, 90° eğimli “1” dalgalı ve "0,05" Hacim Fraksiyonu için Yerel Nusselt Değerinin Rayleigh Sayısıyla Değişimi....65
Şekil 5.44. "0,05" Hacim Fraksiyonu, 90° eğimli “1” dalgalı ve Ra= 10^5 için Yerel Nusselt Değerinin Genlik Değeriyle Değişimi....66
Şekil 5.45. "0,05" Genlik 90° eğimli “1” dalgalı ve Ra= 10^5 için Yerel Nusselt Değerinin Hacim Fraksiyonuyla Değişimi....67
Şekil 5.46. "0,05" Genlikli "1" Dalgalı Kavite için Yerel Nusselt Değerinin Açıyla Değişimi....68
Şekil 5.47. "0,05" Genlikli "3" Dalgalı Kavite için Yerel Nusselt Değerinin Açıyla Değişimi....69
Şekil 5.48. ”0,05” Genlikli 0° Eğimli "1" Dalgalı Kavite için Ortalama Nu Değerinin Rayleigh Sayısına Göre Değişimi....70
Şekil 5.49. “0,05” Genlikli 0° Eğimli "3" Dalgalı Kavite için Ortalama Nu Değerinin Rayleigh Sayısına Göre Değişimi....71
Şekil 5.50. ”0,05” Genlikli 45° Eğimli "1" Dalgalı Kavite için Ortalama Nu Değerinin Rayleigh Sayısına Göre Değişimi....72
Şekil 5.51. ”0,05” Genlikli 45° Eğimli "3" Dalgalı Kavite için Ortalama Nu Değerinin Rayleigh Sayısına Göre Değişimi....73
Şekil 5.52. ”0,05” Genlikli 90° Eğimli "1" Dalgalı Kavite için Ortalama Nu Değerinin Rayleigh Sayısına Göre Değişimi....74
Şekil 5.53. ”0,05” Genlikli 90° Eğimli "3" Dalgalı Kavite için Ortalama Nu Değerinin Rayleigh Sayısına Göre Değişimi....75
Şekil 5.54. "0,05" Hacim Fraksiyonu "0,05" Genlik Değeri ve "1" Dalgalı Kavite için Ortalama Nu Değerinin Rayleigh Sayısına Göre Değişimi....76
Şekil 5.55. "0,05" Hacim Fraksiyonu "0,05" Genlik Değeri ve "3" Dalgalı Kavite için Ortalama Nu Değerinin Rayleigh Sayısına Göre Değişimi....77

Şekil 5.56. "1" Dalgalı ve 0° Eğimli Kavite için "0,05" Hacim Fraksiyonunda Ortalama Nu Değerinin Genlik Değeriyle Değişimi 78
Şekil 5.57. "3" Dalgalı ve 0° Eğimli Kavite için "0,05" Hacim Fraksiyonunda Ortalama Nu Değerinin Genlik Değeriyle Değişimi 79
Şekil 5.58. "1" Dalgalı "0,05" Genlikli Kavite için Farklı Nanopartiküllerin Ortalama Nu Değerlerinin Karşılaştırılması 81
Şekil 6.1. 0° Eğimli "0,05" Genlikli Tek Duvarı Dalgalı Kavite 82
Şekil 6.2. Cu-su Nanoakışkanı için Akım Çizgileri 83
Şekil 6.3. Cu-su Nanoakışkanı için Eş Sıcaklık Eğrileri 84
Şekil 6.4. Sıcak duvar boyunca a) $Ra=10^4$, b) $Ra=10^5$ ve c) $Ra=10^6$ için yerel Nusselt sayısının değişimi 85
Şekil 6.5. Cu-su Nanoakışkanı için Ortalama Nu Grafiği 86

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo 3.1. Termofiziksel Özellikler 13
Tablo 4.1. Mevcut Çalışma ile Literatür Çalışmasının Ortalama Nu Değerleri için Karşılaştırması 20
Tablo 4.2. Mesh Bağımsızlığı için Ortalama Nu Değerlerinin Karşılaştırılması 22
Tablo 5.1. Dalgasız ve Dalgalı Kapalı Kavitelere Ait Ortalama Nu Değerlerinin Karşılaştırılması 80

SİMGELER DİZİNİ VE KISALTMALAR

C_p : Sabit basınçtaki özgül ısı, (kj/kgK)
g : Yerçekimi ivmesi, (m/s^2)
Gr : Grashof sayısı, (Boyutsuz)
H : Duvar yüksekliği, (m)
k : Termal ısıl iletkenlik, (W/mK)
L : Dikey duvarlar arası uzaklık, (m)
n : Dalgalı yüzeye dik yön, (→)
Nu : Yerel nusselt sayısı, (Boyutsuz)
$\overline{Nu}$: Ortalama nusselt sayısı, (Boyutsuz)
p : Boyutsuz basınç
p^* : Basınç, (Pa)
Pr : Prandlt sayısı, (Boyutsuz)
Ra : Rayleigh sayısı, (Boyutsuz)
S : Dalgalı yüzey toplam uzunluğu, (m)
T^* : Sıcaklık, (K)
Q : Isı transfer oranı, (W)
u : x yönlü hız bileşeni, (Boyutsuz)
u^* : x yönlü hız bileşeni, (m/s)
v : y yönlü hız bileşeni, (Boyutsuz)
v^* : y yönlü hız bileşeni, (m/s)
X : x yönlü kartezyen koordinat
Y : y yönlü kartezyen koordinat
Θ : Boyutsuz sıcaklık
α : Isıl difüzivite, (m^2/s)
β : Isıl genleşme katsayısı, (1/K)
φ : Kapalı bölgenin eğim açısı, (^{0})
Φ : Hacimsel konsantrasyon, (%)
μ : Dinamik viskozite, (Ns/m^2)
υ : Kinematik viskozite, (m^2/s)
ρ : Yoğunluk, (kg/m^3)
η : Sıvı tabaka kalınlığının orijinal partikül yarıçapına oranı, (Boyutsuz)

Kısaltmalar

C : Cold (Soğuk)
F : Fluid (Sıvı)
H : Hot (Sıcak)
HW : Hot Wire (Sıcak Tel)
MEMS : Mikroelektro-Mekanik Sistemler
NF : Nanofluid (Nanoakışkan)

PH : Power of Hydrogen (Hidrojenin Gücü)

S : Solid (Katı Parçacık)

SIMPLE : Semi İmplicit Method for Pressure Linked Equations (Basınç Bağımlı Denklemler için Yarı İmplisit Metodu)

DALGALI DUVARA SAHİP KAPALI KAVİTE İÇERİSİNDE BULUNAN NANOAKIŞKANIN KONVEKSİYONLA ISI TRANSFERİNİN İNCELENMESİ

ÖZET

Isı transferi için kullanılan su, yağ, etilen glikol gibi geleneksel akışkanlar birçok mühendislik sistemlerinde performansı ve kompaktlığı sınırlayan birincil etkenlerdir.

Bu engeli aşmak maksadıyla ısı transfer seviyesi yüksek akışkanlar üretmek önemli bir hedef haline gelmiştir. İşte bu noktada adına nanoakışkanlar denen nano seviyesinde partiküller barındıran yüksek ısı transfer oranlarına sahip akışkanlar ortaya çıkmıştır.

Bu tezde farklı geometrik özelliklere sahip kapalı kaviteler içerisinde bulunan su bazlı nanoakışkanların doğal konveksiyonu yoluyla ısı transferi nümerik olarak incelenmiştir. Farklı genlik ve dalga sayılarına sahip kavitelerde dikey duvarlar farklı sıcaklıklarda, üst ve alt duvarlar ise adyabatik olarak alınmıştır. Yönetici denklemler ANSYS Fluent 14.0 ile çözülmüştür. Nano partikül olarak Cu, CuO ve Al_2O_3 alınmıştır. Analizler 1 ve 3 dalgalı duvar durumları için %0, %5 ve %10 hacim fraksiyonlarında, Rayleigh sayısı 10^4, 10^5, 10^6 için 0,05, 0,075, 0,1 genlik değerleri ve 0°, 45° ve 90° eğim açıları için yapılmıştır. Sonuçlar göstermiştir ki, nanoakışkan kullanımının ısı transferi üzerinde büyük bir etkisi bulunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Dalgalı Duvar, Doğal Konveksiyon, Kavite, Nanoakışkan.

ANALYSING OF HEAT TRANSFER WITH NATURAL CONVECTION OF NANOFLUID IN A CAVITY WITH WAVY WALLS

ABSTRACT

Low thermal conductivity of conventional heat transfer fluids such as water, oil and ethylene glycol is a primary limitation in enhancing the performance and the compactness of many engineering electronic devices.

To overcome this impediment, there is a strong motivation to develop advanced heat transfer fluids with substantially higher conductivities. A new and efficient method appeared which is called nano-fluid which is a suspension of nano-sized solid particles with high thermal conductivity in a base fluid.

In this thesis, a numerical simulation performed to study natural convection of water based nano-fluid in cavities with different geometrical shapes. The horizontal walls of the cavity are adiabatic and the vertical walls are kept at different constant temperatures. The governing equations of nano-fluid are solved in ANSYS Fluent 14.0. Cu, CuO and Al_2O_3 is used in the study. The computations are conducted for 1 and 3 undulation number, for solid volume fractions of 0%, 5% and 10% for Rayleigh number 10^4, 10^5, 10^6 for amplitude 0,05, 0,075, 0,1 and for the inclination angle 0°, 45° and 90°. The results show that nanoparticle usage has significant effects on the fluid flow and heat transfer inside the wavy cavity.

Keywords: Wavy Wall, Natural Convection, Cavity, Nanofluid.

GİRİŞ

Öncelikle temel ısı transfer mekanizmalarından söz etmek konunun daha iyi anlaşılması bakımdan önem arz etmektedir. Konunun temelini ısı transferi oluşturmaktadır. Nanoakışkanlar kavramı da bu temel etrafında örgülenmektedir. Öncelikle, termodinamiğin de temelini oluşturan ısı transferi için iki sistem arasında bir sıcaklık farkı olması gerekmektedir. Bu sıcaklık farkı neticesinde iki sistem arasında ısı transferi sağlanmaktadır. Mühendislikte ısı değiştiricileri, kazanlar, yoğuşturucular, radyatörler, ısıtıcılar, ocaklar, soğutucular ve güneş kollektörleri gibi ısı transferi cihazları ile karşılaşırız. Bu cihazların temelini oluşturan ısı transferi olgusu üç şekilde gerçekleşebilmektedir.

1) Isı İletimi : İletimle ısı transferi durgun bir ortamda gerçekleşir. Malzeme içerisindeki parçacıklar arasındaki etkileşmelerin sonucunda enerjinin yüksek potansiyele sahip parçacıktan daha düşük potansiyele sahip parçacığa aktarılmasıdır. Bu aktarım katı, sıvı veya gazlarda olabilir. Gazlarda ve sıvılarda iletim, moleküllerin gelişigüzel hareketleri sırasında birbirleri ile çarpışmaları ve yayılmaları sebebiyle olur. Katılarda ise iletim, yapısındaki kafeslerdeki moleküllerin titreşimleri ve bunun yanında yörüngelerinde bulunan serbest elektronlarla enerji aktarımı sonucu olur [1].

2) Isı Taşınımı : Bu transfer mekanizmasında hareketli bir akışkan ortamı bulunmaktadır. Bu ortam sıvı veya gaz fazında olabilmektedir. Aslında iletim ile ısı transferini de içerir. Eğer akışkan ortamı durgun olursa ısı transferi salt iletim ile gerçekleşir. Isı transferi hareketli akışkan içerisinde oluşan akımlar (laminer veya türbülans) sayesinde, yine sıcaklık farkı esası çerçevesinde gerçekleşmektedir. Isı taşınımı birçok faktörden etkilenebilmektedir. Dolayısıyla ısı iletimi hesapları sadece maddenin özelliklerine değil aynı zamanda bazı mekanik faktörlere de bağlıdır. Örneğin akışkanın hızı, akışkanın aktığı yüzeyin geometrisi vs. Dolayısıyla iletimde maddenin termal özellikleri göz önünde bulundurulurken konveksiyon (taşınım)'da akışkan ortamın mekanik özelliklerinin de göz önünde bulundurulması gerekir.

3) Isı Işınımı (Radyasyon) : Bir maddeden, yapısındaki atomların veya moleküllerin elektronik şekillerinde meydana gelen değişimler sonucunda enerjinin, elektromanyetik dalgalar (veya fotonlar) halinde yayılmasıdır. İletim ve taşınımdan farklı olarak ışınımla ısı transferi bir aracı ortam gerektirmez [1]. Sıcaklığı mutlak sıfırın

(0^o K) üzerinde olan tüm cisimlerin ışınım yaptığı kabul edilir. Bu elektromanyetik dalgaların yayınımı veya soğurulması yoluyla bu ısı transfer mekanizması gerçekleştirilmiş olur.

Bahsedilen ısı transfer mekanizmaları ısı transferinin nasıl gerçekleştiğini anlatmakta fakat bu mekanizmaların hızlarından söz etmemektedir. Yalnızca termodinamik çözümlemeler yoluyla bir sistemden diğerine geçen ısı miktarı bulunulabilir. Ancak ısı transferinin hızı da önemlidir. Isı transferi de bahse konu ısıl enerjinin hızını konu alan bir bilim dalıdır. Günümüze kadar gelişen teknoloji çerçevesinde ısı transferini arttırmaya veya iyileştirmeye yönelik birçok çalışma yapılmıştır.

Isı transferini iyileştirmeye yönelik çalışmaları genel olarak;

1) Pasif

2) Aktif

3) Karma

Olmak üzere üç başlık altında inceleyebiliriz.

1) Pasif Yöntemler : Pasif yöntemler, dış güç kullanılmasını gerektirmeyen yöntemlerdir. Dönmeli akış cihazları, pürüzlü yüzeyler, borunun içine yerleştirilen iyileştirme elemanları vs. pasif yöntemlere örnek olarak verilebilir. Pasif yöntemler uygulandığında ısı transferinde önemli miktarda iyileşmeler gözlenirken, basınç düşümünde dolayısıyla akışkanı pompalamak için gerekli enerji miktarlarında büyük bir artış meydana gelmektedir. Bunun yanında pasif iyileştirme yöntemlerinin kullanılması, sistemde çözümlenmesi gereken çeşitli problemler oluşturmaktadır. Örneğin, nükleer santrallerde, boru içerisine yerleştirilen türbülatörler nedeniyle ortaya çıkan akış kaynaklı titreşimler boru sistemlerinde yorulmalara, hatta rezonans durumunda sistemde yorulma kaynaklı kırılma ve çatlamalara neden olmaktadır. Kimyasal proseslerde ise akışkanın özelliklerine bağlı olarak çökelme, kirlenme gibi problemler meydana gelmekte bu ise belli bir süre sonra ısı transferini olumsuz yönde etkilemektedir [2].

2) Aktif Yöntemler : Aktif yöntemler ise dış güç kaynağının kullanılmasını gerektiren yöntemlerdir. Mekanik karıştırıcılar, akışkan titreşimi, yüzey titreşimi, elektrostatik alanlar vs. bu yöntemlere örnek olarak gösterilebilir [2].

3) Karma Yöntemler : Karma yöntemlerde ise aktif veya pasif yöntemlerden iki veya daha fazlası birlikte kullanılmaktadır [2].

Su, motor yağı ve etilen glikol (antifriz) gibi akışkanlar genellikle ısı değiştiricilerinde kullanılan akışkanlarıdır. Isı transferini iyileştirmek amacıyla yukarıda bahsedilen iyileştirme yöntemleri kullanılmasına rağmen, bu geleneksel akışkanların ısı transferi performanslarının düşük olması iyileşme veriminin az olmasına neden olmakta ayrıca ısı değiştiricisinin küçük boyutlarda ve az yer kaplayan geometride olmasını sınırlamaktadır [2].

Bu noktaya kadar anlatılan ısı transferini arttırma yöntemlerinin etkisinin az olması veya bazı kısıtlamalar sebebiyle, farklı bir yöntem olan akışkan içerisine katı partikül karıştırılarak bir süspansiyon elde edilerek ısı transferini sağlama yöntemi gündeme gelmiştir. Aslında bu yöntem pasif yöntemler içerisinde yer almaktadır. Bahsedilen konu iş yapan akışkan içerisine nano boyutlarda ve belli seviyelerde karıştırılacak partiküllerle ısı transfer işleminin iyileştirilmesi yöntemidir. Burada esas olan karıştırılan katı partikülün ısıl iletkenliğinin temel akışkanın ısıl iletkenliğinden fazla olmasıdır.

Bu yöntem uzun zamandır yapılan bir yöntemdir. Bu yöntemin geçmişinin yüz yıldan fazla olduğu bilinmektedir. Ancak önceleri kullanılan partiküllerin boyutları teknolojik yetersizlikler sebebiyle milimetre veya mikrometre seviyelerinde oluşturulabilmektedir. Bu partiküllerin boyutlarının büyük olması ise sistemde bazı problemlerin ortaya çıkmasına sebep olmaktadır. Bunlardan bazıları çökelme, aşınma, titreşim, boru sistemlerinde yorulma veya yüksek basınç düşümleri gibi. Bu sebeplerden dolayı bu yöntem çok tercih edilmemiştir.

Günümüzün gelişen teknolojileri ile paralel olarak gelişen malzeme bilimi sayesinde daha önce bahsettiğimiz milimetre veya mikrometre seviyelerinde üretilen partiküllerin nanometre seviyelerinde üretilmeleri sağlanmıştır. Bu sayede sistemlerde partikül boyutundan dolayı oluşan problemlerin giderilebileceği görülmüştür. Isıl iletkenlikleri yüksek olan metal partiküllerin iş yapan akışkan içerisine katılmasıyla elde edilen bu süspansiyona nanoakışkan (nanofluid) denmektedir.

Isı transfer akışkanları olarak genellikle su, yağ ve etilen glikol gibi akışkanlar kullanılmaktadır. Mühendislikte kullanılan pek çok elektronik cihazların performansının yükseltilmesi ve boyutlarının küçültülmesinde bu akışkanların düşük ısı transfer performansına sahip olmaları temel engeli oluşturmaktadır. Bu engeller

yüksek ısıl iletkenliğine sahip ısı transfer akışkanlarının geliştirilmesi için, nanoakışkanlar konusunda çalışmaya yönelimi artırmıştır. Isı transfer akışkanlarının ısı transfer karakteristiklerinin arttırılması için kullanılan tekniklerden birisi de akışkan içerisine ısıl iletkenlikleri akışkanlara göre daha yüksek olan katı partiküllerin ilave edilmesidir [3]. Günümüze kadar bu tür sıvı ve katı partiküllerden oluşan süspansiyonlar da milimetre büyüklüğünde katı partiküllerin kullanımı söz konusuydu. Son zamanlarda yapılan çalışmalar sonucunda içerisinde 10-50 nanometre büyüklükte katı partiküllerin söz konusu olduğu yeni bir süspansiyon tipi olan nanoakışkanların keşfi ile ısı transfer akışkanları konusuna eğilim başlanmıştır. Bunun en önemli nedeni çok küçük nanopartikül konsantrasyonlarında bile nanoakışkanların şaşırtıcı mertebede yüksek termal iletkenlik değerlerine sahip olmasıdır [4, 5, 6].

Nanoakışkan terimi, basitçe sıvı-katı karışımı olarak nitelenemez. Bazı özel karakteristikleri eş dağılı süspansiyon olması, stabil olması, katı partiküllerin düşük derecede yığılma göstermesi ve kimyasal değişimin olmaması sayılabilir. Nanoakışkanların ısı transfer karakterini belirlemede en önemli parametre ısı iletim katsayısı olup [7], nanoakışkanlarda söz konusu olan ısıl iletkenlik katsayısındaki önemli artışın, katı partiküllerin Brownian hareketine, sıvı katı ortak yüzeyinde söz konusu olan moleküler seviyedeki sıvı tabakalaşması, ısı transfer mekanizmasının doğası ve nanopartikül yığılmaları etkisi gibi faktörlere bağlı olmaktadır. Nanopartikül olarak genellikle bakır, gümüş, bakır oksit, titanyum oksit ve alüminyum oksit kullanılmaktadır.

Nanoakışkanları üretmek için iki temel teknik kullanılmaktadır. Bunlar; iki-adım tekniği ve tek-adım tekniğidir. İki adım tekniğinde, ilk adımda fiziksel veya kimyasal sentez tekniği yardımıyla nanoakışkanlar üretilir ve ana akışkan içine dağıtılır. Genelde oksit nanopartikülleri içeren nanoakışkanların (carbon nanotubes) üretiminde kullanılır. Ticari açıdan iki-adım tekniğinin avantajı, inert-gaz yoğuşma tekniği ile ekonomik açıdan avantajlı, ton mertebesinde nanopartiküller üretilebilir olmasıdır.

Tek-adım tekniğinde ise, nanopartiküllerin eş zamanlı üretimi ve ana akışkan içine dağıtımı söz konusu olmaktadır. Yüksek iletkenlikte metaller içeren nanoakışkanların üretiminde oksidasyonu önlemek amacıyla diğer tekniğe nazaran tercih edilebilir.

Metaller (Ag, Cu, Fe ve Au), metal oksitler (Al_2O_3, CuO), nitrit seramikler ve karbon nanotüpler, nanoakışkanların üretiminde kullanılabilir. Isıl iletkenlik bir maddenin ısı

iletme kapasitesini gösterir ve birçok faktöre bağlıdır. Bunlar; nanopartikül boyutu, şekli, hacim oranı, temel akışkan, sıcaklık ve asitlik derecesidir. Keblinski [8], ısıl iletkenliğin arttırılması amacıyla nanometre mertebesindeki partiküllerin katkısı için dört olası sebep göstermişlerdir: Partiküllerin Brownian hareketi, sıvı-katı ara yüzeyindeki sıvının moleküler seviyedeki tabakası, nanopartiküllerin içindeki ısı transferinin doğası ve nanopartiküllerin kümelenmesinin etkisidir.

Süreksiz sıcak-tel yöntemi (transient hot-wire method) ısıl iletkenliğin deneysel olarak ölçülmesi amacıyla kullanılan en etkin yöntemdir. Süreksiz sıcak-tel yöntemi test malzemesinin içine gömülmüş lineer ısı kaynağından (sıcak tel) belirli bir uzaklıkta sıcaklık yükselmesinin ölçme tekniği üzerine çalışan standart, süreksiz ve dinamik bir tekniktir. Test örneği uzunluğu boyunca ısın kaynağının sabit ve üniform bir çıkış verdiği düşünülürse, bilinen bir zaman aralığında meydana gelen sıcaklık değişimi ile ısıl iletkenlik belirlenebilmektedir [37].

Nanoakışkanların ısıl iletkenliğini tahmin edebilmek için birçok teorik ve deneysel denklemler geliştirilmiştir [9, 10, 11].

Nanoakışkanlar, saf sıvılara nazaran mikro ölçülerde metal parçacıklar içerdiğinden daha üstün özelliklere sahiptir. Bunun sebepleri aşağıda belirtildiği gibidir;

1) Askıdaki nanopartiküller ısı transferi için yüzey alanını ve akışkanın ısı kapasitesini arttırırlar,

2) Askıdaki nanopartiküller akışkanın efektif ısıl iletkenliğini arttırırlar,

3) Partiküller arasındaki etkileşim ve çarpışmalar sonucu akışkan ve akış pasajı yüzeyi artar,

4) Akışkanın türbülansı ve karışım düzensizliği artar,

5) Nanoparçacıkların dağılımı, akışkanın enlemesine sıcaklık gradyenini azaltır (eğimi düzleştirir).

Yukarıda belirtilen sebeplerden dolayı, nanoakışkanların ısı transfer katsayısı; nanopartiküllerin boyutunun, hacim oranının, akışkanın akış hızının ve diğer akışkan özelliklerinin bir fonksiyonudur. Isı transfer katsayısındaki iyileştirme neticesinde; ısıl sistemlerin boyutları küçülmekte, enerji verimliliği artmakta, kirlilik azalmakta ve sistemin güvenilirliği artmaktadır.

Nanoakışkanların özellikleri, akışkan malzemesi, parçacık malzemesi, hacim konsantrasyonu, parçacık boyutu, ortamın pH derecesi ve sıcaklık gibi bir takım özelliklere bağlıdır. Bu faktörlerin bilinmesine bağlı olarak nanoakışkanın özellikleri hakkında bilgi sahibi oluruz. Bu faktörlerin tamamının detaylarını bilmedikçe nanoakışkanın efektif özellikleri hakkında bilgi sahibi olmamız mümkün değildir. İşte bundan yola çıkılarak yapılan deneyler neticesinde ve birtakım varsayımlara dayanarak nanoakışkanların efektif ısıl iletkenliği ile ilgili birtakım modeller sunulmuştur. Nanoakışkanların ısıl iletkenlik katsayılarını ifade etmek üzere önerilmiş sofistike teoriler söz konusu değildir. Bu nedenle bir kısım araştırıcı tarafından iki fazlı karışımlara ait ısıl iletkenlik katsayısı için önerilen değişik modellerin kullanılması yoluna gidilmiştir. Bu modellerden en çok bilinenleri Hamilton ve Crosser Maxwell-Garnett, Wasp, Bruggeman ve Wang vd. tarafından önerilen modellerdir. Nanoakışkanların ısıl iletkenlik katsayılarını ifade etmede bu klasik modellerin başarısız olduğu görülmüştür. Deneysel sonuçlar daima bu modellerden daha yüksek ısı iletkenlik katsayıları üretmişlerdir [9, 12, 13, 14, 15].

1. ISIL İLETKENLİK KORELASYONLARI

1.1. Maxwell Modeli

Maxwell, akışkan içerisinde asılı konumdaki parçacıklar aracılığıyla ısı iletimini analitik olarak inceleyen ilk bilim adamlarından biridir. Çalışmalarında, parçacıklar arasındaki etkileşimi göz ardı ederek, küresel parçacıkları içeren katı-sıvı karışımlarının ısıl iletkenliğini hesaplayabilmek için aşağıda sunulan denklemi geliştirmiştir [10];

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = \frac{k_s+2k_f+2\phi(k_s-k_f)}{k_s+2k_f-\phi(k_s-k_f)} \tag{1.1}$$

Burada;

k_s = Partiküllerin ısıl iletim katsayısı

k_f = Akışkanın ısıl iletim katsayısı

k_{nf} = Nanoakışkanın efektif ısıl iletim katsayısı

Φ = Hacimsel konsantrasyon

Maxwell bu denkleminde parçacık şekli ve boyutunu hesaba katmamıştır. Daha sonra Maxwell'in bu modeli Hamilton ve Crosser tarafından geliştirilmiştir [9].

1.2. Hamilton & Crosser Modeli

Hamilton ve Crosser, katı parçacık şeklini de hesaba katarak, Maxwell modelini geliştirmişlerdir. Geliştirdikleri bu model denklem aşağıda sunulmuştur [9];

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = \frac{k_s+(n-1)k_f-(n-1)\phi(k_f-k_s)}{k_s+(n-1)k_f+\phi(k_f-k_s)} \tag{1.2}$$

Burada;

$$n = \frac{3}{\Psi}$$

Ψ = Boyut faktörü

n = Şekil faktörü

1.3. Bruggeman Modeli

Bruggeman termal ısıl iletkenlik modeli aşağıda sunulmuştur [14];

$$k_{nf}=\frac{1}{4}[(3\phi-1)k_s+(2-3\phi)k_f]+\frac{k_f}{4}\sqrt{\Delta} \tag{1.3}$$

$$\Delta=\left[(3\phi-1)^2\left(\frac{k_s}{k_f}\right)^2+(2-3\phi)^2+2(2+9\phi-9\phi)^2\left(\frac{k_s}{k_f}\right)\right] \tag{1.4}$$

1.4. Yu ve Choi Modeli

Nanoakışkanların ısı iletim kabiliyetlerini ifade etmek üzere alternatif bir model Yu ve Choi tarafından önerilmiştir. Yu ve Choi nanoakışkanlarda katı sıvı yüzeyinde oluşan sıvı tabakanın sıvı ve katı arasında bir termal köprü görevini gördüğünü ifade etmiş ve ısı iletim kabiliyetindeki önemli artışları bu etkiye bağlamıştır. Yu ve Choi, model sonuçlarını nanoakışkanlar için yapılmış pek çok deneysel sonuçla karşılaştırmışlar ve modellerinin nanoakışkanların ısı iletim kabiliyetini ifade etmede oldukça başarılı olduğunu görmüşlerdir [11].

Yu ve Choi tarafından önerilen bir diğer ısıl iletkenlik modeli aşağıda sunulmuştur;

$$\frac{k_{nf}}{k_f}=\frac{k_s+2k_f+2(k_s-k_f)(1+\eta)^3\phi}{k_s+2k_f-(k_s-k_f)(1+\eta)^3\phi} \tag{1.5}$$

Burada η sıvı tabaka kalınlığının orijinal partikül yarıçapına oranıdır. Bu çalışmada η=0,1 alınmıştır.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Kapalı kavitelerdeki doğal konveksiyonla ısı transferinin birçok mühendislik sisteminde, elektronik soğutma cihazlarında, ısı değiştiricilerde, mikroelektro-mekanik sistemlerde (MEMS), güneş enerjisi sistemlerinde ve daha birçok sistemde uygulamaları bulunmaktadır. Isı transferinde kullanılan geleneksel akışkanların (su, yağ ve etilen glikol) düşük ısıl iletkenliğe sahip olmaları ısı transfer performansını ciddi oranda kısıtlamaktadır. Bu nedenle ihtiyacı karşılayacak yeni akışkanların üretilmesi gündeme gelmiştir.

Temel akışkan içerisinde asılı durumda bulunan (su, yağ ve etilen glikol gibi) ve yüksek ısıl iletkenliğe sahip nanopartiküller (Al_2O_3, Cu ya da TiO_2 gibi) birçok sistemde etkin bir ısı transfer artışını sağlayabilmektedir. Bu tip akışkanlarla ısı transfer artışı ilk olarak Choi tarafından 1995 yılında incelenmiştir [16]. Bu tarihten sonra termofiziksel özellikleri farklı birçok nanoakışkan üzerinde çalışılmış ve bunların ısıl iletkenliklerinin ölçülebilmesi maksadıyla birçok model ortaya konmuştur [17,6]. Neticede sonuçlar göstermiştir ki nanoakışkanların diğer geleneksel akışkanlarla karşılaştırıldığında efektif bir ısı transfer artışı sağladığı ortaya konmuştur. Bununla birlikte ısı transfer artışının kullanılan nanopartikülün büyüklüğüne, şekline ve konsantrasyonuna bağlı olduğu da görülmüştür. Sonuç olarak ısı transfer performansının artan konsantrasyon ve azalan nanopartikül büyüklüğüne bağlı olarak arttığı görülmüştür.

Son yıllarda literatürde kare ya da dikdörtgen şeklindeki kapalı ortam içindeki nanoakışkanlara ait doğal taşınımla ısı transferi üzerine pek çok çalışmalar yapılmıştır. Bunlardan bazılarına örnek vermek gerekirse, Khanafer vd. dikey dikdörtgen kapalı bir ortamdaki su bazlı bakır nanoakışkanların, doğal konveksiyonla ısı transferini nümerik olarak incelemişlerdir [18]. Elde ettikleri sonuçlara göre, herhangi bir Grashof sayısında, su içindeki bakır nanopartiküllerin hacim fraksiyonu arttıkça ısı transferinde de artış söz konusu olmaktadır. Jou and Tzeng tarafından yeniden, Khanafer vd.'nin yapmış oldukları çalışmaya benzer çalışmada, nanoakışkan kullanımının ortalama Nusselt sayısında önemli artışlara neden olduğu görülmüştür [19]. Santra vd. de benzer bir çalışma yapmışlardır. Santra vd. çalışmalarında ısıl iletkenlik katsayısı için farklı iki model kullanmışlar ve kullandıkları

modellerden Bruggemann modelinin Maxwell-Garnett modeline göre daha yüksek ortalama ısı transfer katsayıları ürettiğini görmüşlerdir [20]. Diğer bir çalışmada Hwang vd., alüminyum bazlı nanoakışkanın alttan ısıtılmış dikdörtgen bir kapalı ortamda doğal konveksiyonunu incelemişler ve nanopartikül çapının artmasıyla ortalama Nusselt sayısında önemli düşüşler söz konusu olduğunu görmüşlerdir [21]. Ho vd. kare kapalı bir ortam içindeki laminer doğal konveksiyon üzerinde alüminyum su bazlı nanoakışkanın efektif ısıl iletkenliği ve efektif dinamik viskozitesindeki karasızlıklar üzerine modeller formüle etmişlerdir [22]. Oztop ve Abu-Nada sol duvarı kısmen ısıtılan ve sağ duvarı soğutulan, diğer duvarları adyabatik tutulan dikdörtgen bir kavite içindeki çeşitli nanoparçaçıklarla oluşturulan nanoakışkanın doğal konveksiyonunu nümerik olarak incelemişlerdir [23]. Isıtıcı uzunluğu arttıkça ısı transferinin arttığını gözlemlemişlerdir. Ayrıca nanoakışkan kullanımıyla ısı transferinin arttığını ve yüksek boyut oranından ziyade düşük boyut oranında bu etkinin daha belirgin olduğunu görmüşlerdir. Son zamanlarda ise Ogut, yan duvardan sabit ısı akısıyla kısmen ısıtılmış, eğik kare bir kapalı ortam içindeki farklı nanoparçaçık ile oluşturulan su bazlı nanoakışkanların, doğal konveksiyonunu incelemiştir [24]. Elde edilen sonuçlara göre, Rayleigh sayısı ve parçaçık hacim fraksiyonu arttıkça, ortalama ısı transferi miktarının arttığını ve ısıtıcı uzunluğu arttıkça ısı transfer miktarının düştüğünü gözlemlemiştir. Ayrıca ısıtıcı uzunluğu arttıkça, ortalama ısı transfer oranı, küçük eğim açıları için azalmaya başlamakta olduğunu belirtmektedir.

Dalgalı kavite içerisindeki konveksiyonla ısı transfer mekanizmalarına birçok mühendislik uygulamalarında rastlanır. Örneğin çift duvarlı izolasyonlar, yer altı kablo sistemleri ve mikro-elektronik sistemlerin soğutma mekanizmalarında. Basit geometriye sahip kavitelere nazaran kompleks şekilli kaviteler üzerindeki deneysel ve nümerik çalışmalar daha azdır.

Abu Nada ve Oztop farklı sıcaklıklardaki dalgalı duvarlara sahip kapalı kavite içerisindeki Al_2O_3 su bazlı nanoakışkanının doğal konveksiyonla ısı transferini nümerik olarak incelemiştir [25]. Geometrik parametresi, ısı ve akışkan akışı üzerinde önemli bir kontrol parametresidir. Aynı Rayleigh ve nanopartikül hacim konsantrasyonlarında, artan geometrik parametrelerinin artışıyla ısı transfer miktarı artmaktadır. Artan Rayleigh sayısıyla ortalama Nusselt sayısında önemli artış sağladığını görmüşlerdir. Nikfar ve Mahmoodi MLPG (Meshless Local Petrov-Galerkin) yöntemiyle dalgalı yan duvarlara sahip bir kavite içerisindeki Al_2O_3-su bazlı nanoakışkanının laminer doğal konveksiyon akışını nümerik olarak incelemişlerdir

[26]. Sonuçlar göstermiştir ki, kavite içerisinde iki farklı viskozite modelinde çok farklı ısı transfer oranları elde etmişlerdir. Ra = 10^3 için, ortalama Nusselt sayısı her iki viskozite modelinde nanopartiküllerin artan hacim konsantrasyonu ile beraber sıcak duvar için artış göstermiştir. Diğer Rayleigh sayılarında (Ra=10^4, 10^5 ve 10^6) ortalama Nusselt sayısı, Brinkman modeli ile artan nanopartikül hacim konsantrasyonu ile artarken Maiga korelasyonu ile azaldığını gözlemlemişlerdir. Nasrin vd. CuO-su bazlı nanoakışkanının üçgen şeklinde dalgalı dikey duvarlara sahip kapalı kavite içerisindeki daimi ve laminer karışık konveksiyon akışını incelemişlerdir [27]. Nanoakışkanlar için Brinkman modelini ve Pak and Cho korelasyonunu kullanmışlardır [28, 29]. Görülmüştür ki nanopartikül kullanımı ısı transferini önemli ölçüde arttırmış, elde edilen bu artış nanopartikülün hacimsel konsantrasyonunun makul seviyelere arttırılması ve yüksek Reynold sayılarının kullanılmasıyla daha da ileri seviyelere taşımıştır.

Mansour ve Bakier kompleks dalgalı duvarları farklı sıcaklıklarda tutulan ve içerisinde bir üniform ısı üretimine sahip kapalı kavite içerisindeki doğal konveksiyon akışı üzerinde çalışmışlardır. Sonuçlar göstermektedir ki, Rayleigh sayısının tüm değerleri için, nanopartikül hacim konsantrasyonun artışıyla, ortalama Nusselt sayısı artmaktadır. Buna ilaveten, bu ısı transferi performansı Rayleigh sayısına bağlı olarak dalgalı yüzey geometrisi parametrelerinin ayarlanması sureti ile optimize edilebileceği gösterilmiştir [30].

Cho vd. alt ve üst duvarları düz, dikey duvarları dalgalı kapalı kavite içerisindeki su bazlı nanoakışkanın entropi üretimini ve doğal konveksiyonlu ısı transfer karakteristiğini nümerik olarak incelemişlerdir. Sonuçlar göstermiştir ki nanoakışkan kullanımında Cu-su bazlı nanoakışkanının minimum entropi üretimini ve en iyi ısı transfer performansını göstermiştir. Ayrıca dalgalı duvarın geometrik parametrelerini değiştirerek entropi üretiminin minimize, ortalama Nu sayısının ise maksimize edilebileceği anlaşılmıştır [31].

Cho vd. su bazlı nanoakışkan içeren, sol duvarı sabit ısı akısına sahip ve sağ duvarı düşük sıcaklıkta tutulmuş olup dalgalı dikey duvarlara sahip, alt ve üst duvarları düz, hareketli ve adyabatik durumdaki yatay duvarlara sahip kapalı kavite içerisindeki laminer karışık konveksiyon akışını nümerik olarak incelemişlerdir. Sonuçta Cu-su bazlı nanoakışkanının en iyi ısı transfer performansını verdiği görülmüştür. Ayrıca verilen bir Richardson sayısı için Grashof sayısının artmasıyla ortalama Nu sayısının

arttığı sonucuna ulaşılmış ve dalgalı duvarın parametrik değerlerinin değiştirilerek yine ortalama Nu sayısının arttırılabileceği gösterilmiştir [32].

Esmaeilpour ve Abdollahzadeh, saf sıvıya konulan ultra küçük metalik partiküllerin ısı transferine olan etkisini ve dikey duvarları dalgalı formda bulunan kavite içerisindeki entropi artışının dağılımını incelemişlerdir. Sonuçta ortalama ısı transfer oranının nanopartiküllerin hacimsel konsantrasyonunu ve Grashof sayısının artmasıyla azaldığı, ayrıca azalan ısı transfer oranıyla nanopartiküllerin entropi üretimini azaltmak maksadıyla kullanılabileceği görülmüştür [33].

Kashani vd, iki boyutlu ve değişik dalgalı duvar örneğine sahip kavite içerisinde bulunan Cu-su bazlı nanoakışkanının laminer doğal konveksiyona bağlı entropi üretimini incelemişlerdir. Sonuçlarda akım fonksiyonları, izoterm eğrileri yerel entropi üretim, ortalama Nu sayısı ve ortalama entropi üretimi şekilleri incelenmiştir. Burada nanoakışkan kullanımının akış yapısında, ısı transfer karakteristiğinde ve entropi üretiminde önemli etkilere sahip olduğu görülmüştür [34].

Dalgalı duvarlara sahip eğik kapalı kaviteler içerisindeki nano akışkanların ısı transferine etkisinin incelenmesini esas alan çalışmalara literatürde rastlanmamıştır. Dalgalı duvarlara sahip kare ya da dikdörtgen kapalı ortam içerisinde nanoakışkanın doğal konveksiyon akışı yukarıda da bahsedilen çalışmalardan da görüleceği gibi incelenmiş olup, literatürde kapalı bölgenin eğim açısının, hem tek duvarlı hem de iki dikey duvarında dalgalı olduğu çalışmalara rastlanmamıştır. Bu çalışmanın amacı, hem tek hem de her iki dikey duvarı dalgalı, eğik kare bir kapalı ortama ait, su bazlı nanoakışkanın laminer doğal konveksiyon akışının hız ve sıcaklık alanlarını nümerik olarak incelemektir. Temel hedef, yönetici parametrelerden farklı genlik değerlerinin, dalga sayısının, farklı eğim açılarının, farklı Rayleigh ve nanopartikül konsantrasyonun akış ve ısı transfer üzerindeki etkilerini incelemektir.

3. MATEMATİKSEL FORMÜLASYONLAR

Analizlerde incelenen dikdörtgen kapalı kavitelerin yüksekliği H ve uzunluğu L ile sınırlandırılmış, eş sıcaklıklı yan duvarlarından sol yan duvarı T_h sıcaklığında olup, sağ yan duvarı ise T_c sıcaklığındadır. Diğer duvarları ise adyabatiktir. Nanopartikül ve akışkanın aynı hızla aktığı ve termodinamik dengede olduğu kabul edilmiştir. Kavite içerisinde su ve nanopartiküllerin karışımından oluşmuş nanoakışkan bulunmaktadır. Nanoakışkanın sıkıştırılamaz olduğu kabul edilmiştir. Nanopartiküller ile suyun termal dengede olduğu ve aralarında kayma olmadığı kabulü yapılmıştır. Su ve farklı nanopartiküllere ait termofiziksel özellikler Tablo 3.1.'de verilmiştir.

Tablo 3.1. Termofiziksel Özellikler [24]

Özellikler	Su (H_2O)	Bakır (Cu)	CuO	Al_2O_3
ρ(kg/m^3)	997,1	8933	6500	3970
c_p (j/kg K)	4179	385	535,6	765
k (W/m K)	0,613	400	20	40
$\alpha x10^7$ (m^2/s)	1,47	1163,1	57,45	131,7
β(K^{-1})	0,00021	0,000051	0,000051	0,000024

İçerisinde nanoakışkanın bulunduğu kapalı bir bölgede iki boyutlu, daimi, laminer doğal konveksiyon akışı için, boyutlu yönetici denklemler, Boussinesq yaklaşımı altında aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir.

Süreklilik denklemi;

$$\frac{\partial u^*}{\partial x^*}+\frac{\partial v^*}{\partial y^*}=0 \tag{3.1}$$

x- momentum denklemi;

$$u^*\frac{\partial u^*}{\partial x^*}+v^*\frac{\partial u^*}{\partial y^*}=-\frac{1}{\rho_{nf}}\frac{\partial p^*}{\partial x^*}+\frac{\mu_{nf}}{\rho_{nf}}\left(\frac{\partial^2 u^*}{\partial x^{*2}}+\frac{\partial^2 u^*}{\partial y^{*2}}\right)+\frac{1}{\rho_{nf}}(\rho\beta)_{nf}\,g(T-T_c)\sin\varphi \tag{3.2}$$

y- momentum denklemi;

$$u^{*}\frac{\partial v^{*}}{\partial x^{*}}+v^{*}\frac{\partial v^{*}}{\partial y^{*}}=-\frac{1}{\rho_{nf}}\frac{\partial p^{*}}{\partial y^{*}}+\frac{\mu_{nf}}{\rho_{nf}}\left(\frac{\partial^{2}v^{*}}{\partial x^{*2}}+\frac{\partial^{2}v^{*}}{\partial y^{*2}}\right)+\frac{1}{\rho_{nf}}(\rho\beta)_{nf}\,g(T-T_{c})\cos\varphi \tag{3.3}$$

Enerji denklemi;

$$\left(u^{*}\frac{\partial T^{*}}{\partial x^{*}}+v^{*}\frac{\partial T^{*}}{\partial y^{*}}\right)=\alpha_{nf}\left(\frac{\partial^{2}T}{\partial x^{*2}}+\frac{\partial^{2}T^{*}}{\partial y^{*2}}\right) \tag{3.4}$$

Burada nanoakışkanın ısıl difüzivite katsayısı olan α_{nf};

$$\alpha_{nf}=\frac{k_{nf}}{(\rho c_{p})_{nf}} \tag{3.5}$$

Yönetici denklemleri boyutsuzlaştırabilmek için gerekli parametreler aşağıda sunulmuştur;

$$x=\frac{x^{*}}{L},\quad y=\frac{y^{*}}{L},\quad u=\frac{u^{*}}{\alpha_{f}/L},\quad v=\frac{v^{*}}{\alpha_{f}/L},\quad p=\frac{L^{2}}{\rho_{f}\alpha_{f}^{2}}p^{*},\quad \theta=\frac{T^{*}-T_{c}}{T_{H}-T_{c}} \tag{3.6}$$

Burada u^{*} ve v^{*} sırasıyla x^{*} ve y^{*} yönlerindeki boyutlu hız bileşenlerini, p^{*} boyutlu basıncı, T^{*} boyutlu sıcaklık, $\rho_{f,}$ T_{c} sıcaklığındaki akışkanın yoğunluğunu ve α_{f} akışkanın ısıl difüzivitesini göstermektedir.

Prandlt ve Rayleigh sayıları aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir;

$$Pr=\frac{\gamma_{f}}{\alpha_{f}},\quad Ra=\frac{g\beta_{f}L^{3}\Delta T}{\gamma_{f}\alpha_{f}} \tag{3.7}$$

Burada g yerçekimi ivmesi, β ısıl genleşme katsayısı, γ kinematik viskozitedir. ΔT ise kapalı bölgenin eş sıcaklıklı dikey duvarlar arasındaki sıcaklık farkını göstermektedir.

Nanoakışkanın efektif dinamik viskozitesi iki fazlı modeller ile ifade edilebilir. Bu çalışmada nanoakışkanda küresel parçacıkların kullanıldığı Brinkman [28] modeli kullanılmıştır;

$$\mu_{nf}=\frac{\mu_{f}}{(1-\phi)^{2,5}} \tag{3.8}$$

Nanoakışkanın efektif yoğunluğu şu şekilde ifade edilebilir;

$$\rho_{nf} = (1-\phi)\rho_f + \phi\rho_s \tag{3.9}$$

Nanoakışkanın ısı kapasitesi ve Boussinesq terimi aşağıdaki gibi ifade edilebilir;

$$(\rho c_p)_{nf} = (1-\phi)\rho_f c_{p_f} + \phi\rho_s c_{ps} \tag{3.10}$$

$$(\rho\beta)_{nf} = (1-\phi)\rho_f\beta_f + \phi\rho_s\beta_s \tag{3.11}$$

Bu denklemlerde "ϕ" hacim konsantrasyonunu, "nf", "f" ve "s" alt indisleri sırasıyla nanoakışkanı, temel akışkanı ve katı partikülü ifade eder.

Çalışmada nanoakışkanın efektif ısıl iletkenlik katsayısı için ise Yu ve Choi [11] modeli kullanılmıştır;

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = \frac{k_s+2k_f+2(k_s-k_f)(1+\eta)^3\phi}{k_s+2k_f-(k_s-k_f)(1+\eta)^3\phi} \tag{3.12}$$

Bu modelde "η" sıvı tabaka kalınlığının orijinal partikül yarıçapına oranı olup bu değer 0,1 olarak ele alınmıştır.

Isıtılmış duvar için boyutsuz yerel Nusselt sayısı aşağıdaki şekilde ifade edilebilir;

$$Nu = -\frac{k_{nf}}{k_f}\frac{\partial\theta}{\partial n}\bigg|_{\text{sıcak duvar}} \tag{3.13}$$

Burada n duvara dik yönü belirtir.

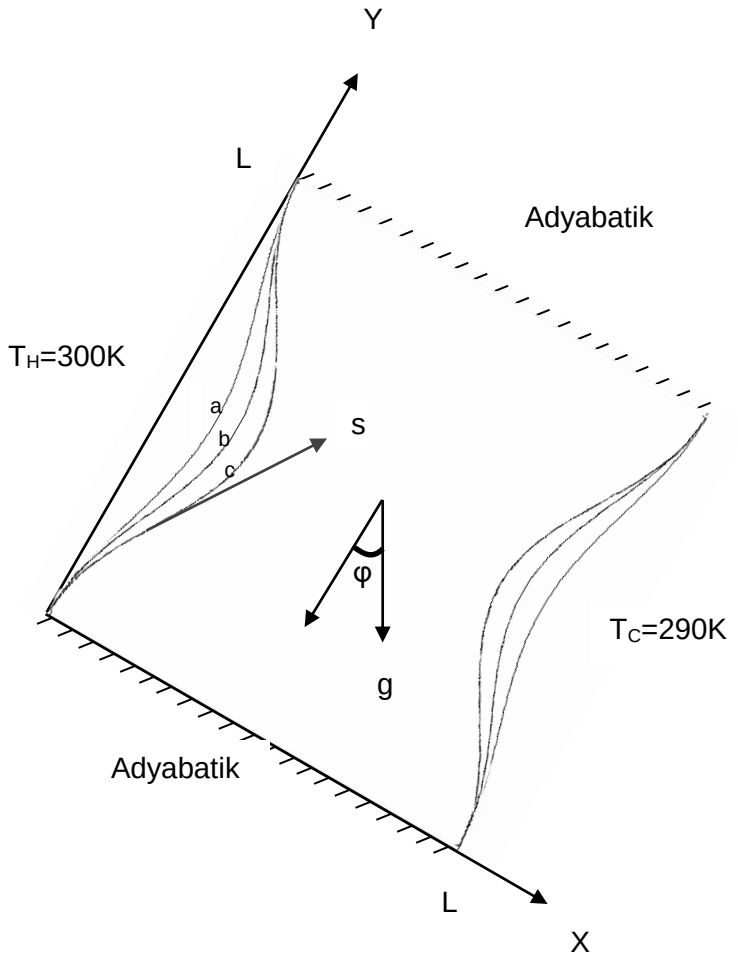
Ortalama Nusselt sayısını ise kapalı kavitenin sıcak duvarı boyunca yerel Nusselt sayısının integrasyonu ile ifade edebiliriz. Burada S dalgalı yüzeyin toplam uzunluğunu, s ise dalgalı yüzey boyunca olan koordinatı göstermektedir;

$$\overline{Nu} = \frac{1}{S}\int_0^S Nu\, ds \tag{3.14}$$

3.1. Analizlerde İncelenen Geometriler:

Çalışmalarda irdelenen kaviteler aşağıda gösterilmiştir.

3.1.1. Tek dalgalı kaviteler



Şekil 3.1. Farklı Genliklere Sahip Tek Dalgalı Kaviteler

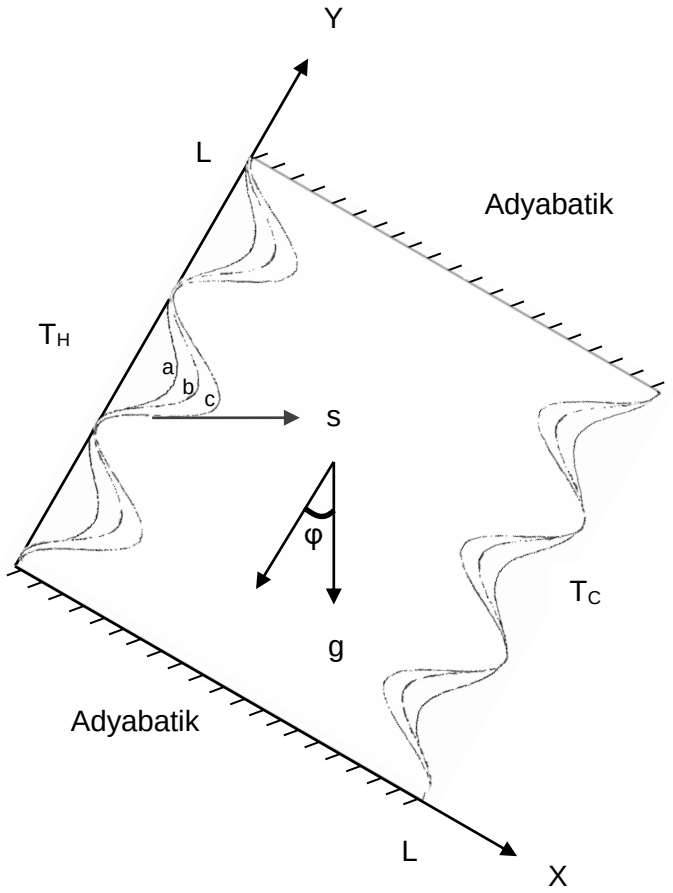
Şekil 3.1.'de gördüğümüz kavitelerden "a" kavitesi 0,05, "b" kavitesi 0,075 ve "c" kavitesi 0,1 genlik değerine sahiptir. Dalga sayısı 1'dir. Dikey duvarların her ikisi de dalgalı olup sol duvar 300K sıcaklığında, sağ duvar ise 290K sıcaklığında sabit tutulmaktadır. Kavitenin karakteristik uzunluğu 1'dir. Kavitelerin sol ve sağ dalgalı duvarlar için denklemleri sırasıyla a, b, c şekilleri için aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır;

$x_{sol}=0,05(-1+\cos(2\pi y)),\quad x_{sağ}=1+0,05(-1+\cos(2\pi y))$ (3.15)

$x_{sol}=0,075(-1+\cos(2\pi y)),\quad x_{sağ}=1+0,075(-1+\cos(2\pi y))$ (3.16)

$x_{sol}=0,1(-1+\cos(2\pi y)),\quad x_{sağ}=1+0,1(-1+\cos(2\pi y))$ (3.17)

3.1.2. 3 dalgalı kaviteler



Şekil 3.2. Farklı Genliklere Sahip 3 Dalgalı Kaviteler

Şekil 3.2.'de gördüğümüz kavitelerden "a" kavitesi 0,05 "b" kavitesi 0,075 ve "c" kavitesi 0,1 genlik değerine sahiptir. Dalga sayısı 3'tür. Dikey duvarların her ikisi de dalgalı olup sol duvar 300K sıcaklığında, sağ duvar ise 290K sıcaklığında sabit tutulmaktadır. Kavitenin karakteristik uzunluğu 1'dir. Kavitelerin sol ve sağ dalgalı duvarlar için denklemleri ise sırasıyla a, b, c şekilleri için aşağıda olduğu gibidir;

$x_{sol}=0,05(-1+\cos(6\pi y))$ $x_{sağ}=1+0,05(-1+\cos(6\pi y))$ (3.18)

$x_{sol}=0,075(-1+\cos(6\pi y))$ $x_{sağ}=1+0,075(-1+\cos(6\pi y))$ (3.19)

$x_{sol}=0,1(-1+\cos(6\pi y))$ $x_{sağ}=1+0,1(-1+\cos(6\pi y))$ (3.20)

Şekillerden de görüldüğü üzere çalışmalarda dikey duvarları dalgalı formda bulunan kaviteler incelenmiştir. Bahse konu kavitelerde dalgalı duvarların genlik durumları ve dalga sayılarının farklılaştırılması ile ilgili durumların ısı transferine etkisi incelenmeye çalışılmıştır. Sadece dalga sayıları ve genlik durumları değil aynı zamanda kavitelere

saat yönünde verilen eğimlerle eğimin etkisi incelenmeye çalışılmıştır. Kapalı kavitenin eğim açısı 0°, 45° ve 90° olarak seçilmiştir. Çalışmalarda Rayleigh sayıları 10^4, 10^5 ve 10^6 olarak alınmıştır. Hacimsel konsantrasyonlar ise %0, %5 ve %10 alınarak analizler yapılmıştır. Kavite içerisinde nanopartikül olarak Cu, CuO ve Al_2O_3 seçilerek su bazlı nanoakışkan kullanılmıştır.

4. NÜMERİK ANALİZ

Isı iletim problemlerinde basit geometriler için çözümler, basit sınır şartları uygulanarak çözülebilir. Pratikte rastlanan çoğu iki ve üç boyutlu ıs iletim denklemleri düzensiz geometri ve karmaşık sınır şartlarından dolayı çözülemezler. Tıpkı bu çalışmamızda ele aldığımız kavitelerin sahip olduğu dalgalı duvarlar gibi. Bu tip durumlarda elde edilen diferansiyel denklemlerin çözülmesi için analitik çözümler yerine sayısal yöntemlerin kullanılması zorunlu hale gelir.

Sayısal yöntemlerin kullanılması basit ve etkilidir. Yaklaşımların neden olduğu hatalar mevcuttur ancak bunlar genellikle kabul edilebilir ve tahmin edilebilirdir ve her türlü geometri ve sınır şartlarında uygulanabilir. Ancak bu yöntemlerin kullanılmasında genellikle bilgisayarlar kullanılması zorunludur.

Sayısal yöntemlerin kullanılmasında, elde edilen diferansiyel denklemlerin integrasyon bölgesi dikdörtgen bölgeciklere ayrılır ve çözüm cebrik denklemler çözümüne indirgenir. Burada her ağ noktasında kısmi türevli diferansiyel denklemin her bir türevinin yaklaşımı etraftaki diğer komşu noktalardan faydalanılarak elde edilir. Bu işlem böylece elde edilen küçük denklem sistemlerinin ardarda çözümü ile tüm zaman aralığında çözüm elde edilir.

Denklem sistemlerinin yazılmasında kullanılan çeşitli modeller vardır. First Order Upwind modelinde bir noktadaki çözüme yaklaşmak için 2 noktadan faydalanılır. Bu modelde çözüme hızlı ulaşılır ancak sonuçların doğruluğu düşüktür. Second Order Upwind modelinde ise bir noktadaki çözüme yaklaşmak için 3 noktadan faydalanılır. Bu modelde çözüme ulaşmak biraz zaman alır ancak sonuçların doğruluğu First Order Upwind'e göre daha iyidir. Bu çalışmamızda momentum ve enerji denklemleri Second Order Upwind modeliyle çözülmüştür.

Basınç-hız denklemi SIMPLE (Semi Implicit Method for Pressure Linked Equations) algoritmasıyla çözülmüştür.

4.1. Kodun Doğrulanması

ANSYS Fluent 14.0 paket programı kullanılarak yukarıda bahsedilen kavitelerde nanoakışkanın geleneksel ısı transfer aracı olarak kullanılan suya göre ısı transfer

artışına etkisi incelenmeye çalışılmıştır. Dikey duvarlar arasında meydana gelen sabit sıcaklık farkı ile birlikte duvarların genliklerinde ve dalga sayılarındaki farklılıklar ve kaviteye saat yönünde verilen eğimler sonucunda elde edilen analiz sonucunda eş sıcaklık eğrileri ve akım çizgileri eğrileri incelenmiştir. Ayrıca nanoakışkan kullanımına bağlı olarak ısı transferinde meydana gelen artışın etkilerini, ortalama Nusselt ve sıcak duvar boyunca elde edilen Yerel Nusselt grafikleri ile irdelenmeye çalışılmıştır.

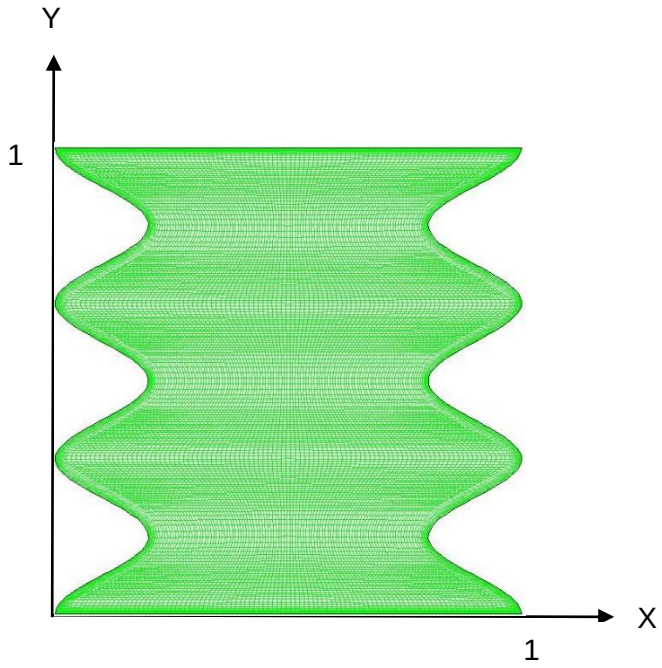
Khanafer vd. iki boyutlu kare kapalı bir kavite içerisinde bulunan Cu- su nanoakışkanın farklı Grashof ve hacim fraksiyonlarındaki ısı transfer artışının, doğal konveksiyon üzerindeki etkilerini incelemişlerdir [18]. Çalışmaya başlamadan önce analizlerin sağlıklı bir biçimde elde edilip yorumlanabilmesi için, halihazırda kullanılacak nümerik programın doğruluğunun sağlanması gerekmektedir. Bu sayede elde edilecek sonuçların doğruluğundan emin olabiliriz. Bu maksatla; daha önce bahsedilen Khanafer vd. çalışmasıyla elde edilen sonuçların mevcut çalışmayla yaptığımız kıyaslama Tablo 4.1' de ifade edilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde her iki çalışmanın sonuçları arasında çok iyi seviyede bir uyuşma olduğu görülmektedir.

Tablo 4.1. Mevcut Çalışma ile Literatür Çalışmasının Ortalama Nu Değerleri için Karşılaştırması

		Hacimsel Oran					
Karşılaştırılan Çalışmalar	Gr	0	0,04	0,08	0,12	0,16	0,20
Mevcut	10^3	1,9	2,1	2,2	2,3	2,4	2,6
Khanafer vd.[18]	10^3	1,9	2,1	2,3	2,4	2,5	2,7
Mevcut	10^4	4,1	4,4	4,7	5	5,2	5,5
Khanafer vd.[18]	10^4	4,1	4,4	4,7	5	5,3	5,7
Mevcut	10^5	8,1	8,7	9,3	10	10,1	11,2
Khanafer vd. [18]	10^5	8,4	8,9	9,6	10,2	10,9	11,6

4.2. Mesh Bağımsızlığının İncelenmesi

Çalışmalarda kullanılan kavitelerin mesh boyutları da incelenerek en uygun mesh boyutları seçilerek analizlere başlanmıştır.



Şekil 4.1. "0,1" Genlikli Meshlenmiş Kavite

Şekil 4.1.' de "0,1" genlikli 3 dalgalı kavite görülmektedir. Cu-su nanoakışkanı kullanılarak, 0,05 hacim fraksiyonunda ve $Ra=10^6$ için yapılan irdelemeler sonucunda, mesh bağımsızlığı için ortalama Nu değerlerinin karşılaştırılması Tablo 4.2.'de sunulmuştur. Tablodan da görüldüğü üzere 81x81 düğüm sayısından itibaren ortalama Nu değeri kayda değer bir değişiklik göstermemiştir. Bu nedenle analizlerde 81x81 düğüm sayısı seçilmiştir. Analizler neticesinde elde edilen sonuçların mesh boyutundan bağımsız olduğu görülmektedir.

Tablo 4.2. Mesh Bağımsızlığı için Ortalama Nu Değerlerinin Karşılaştırılması

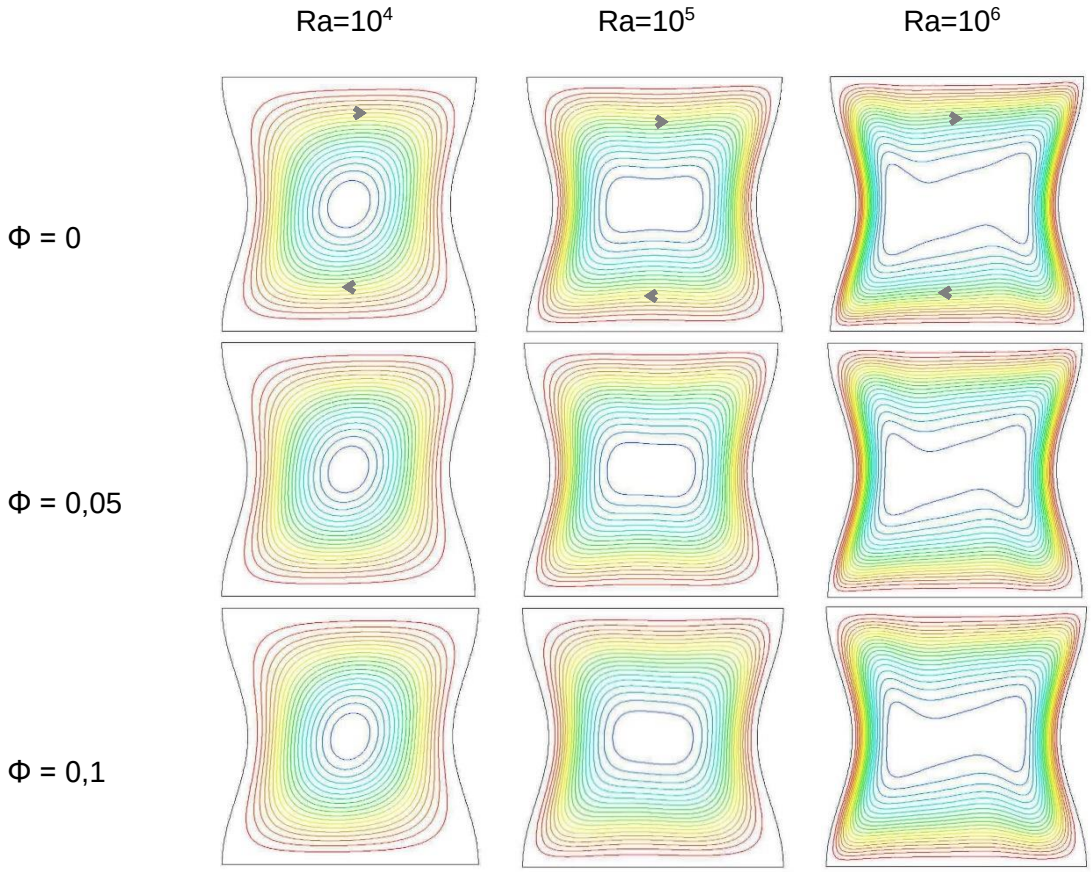
Düğüm Sayısı	Ortalama Nu
41x41	11,05
61x61	10,85
81x81	10,82
101x101	10,82

5. SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

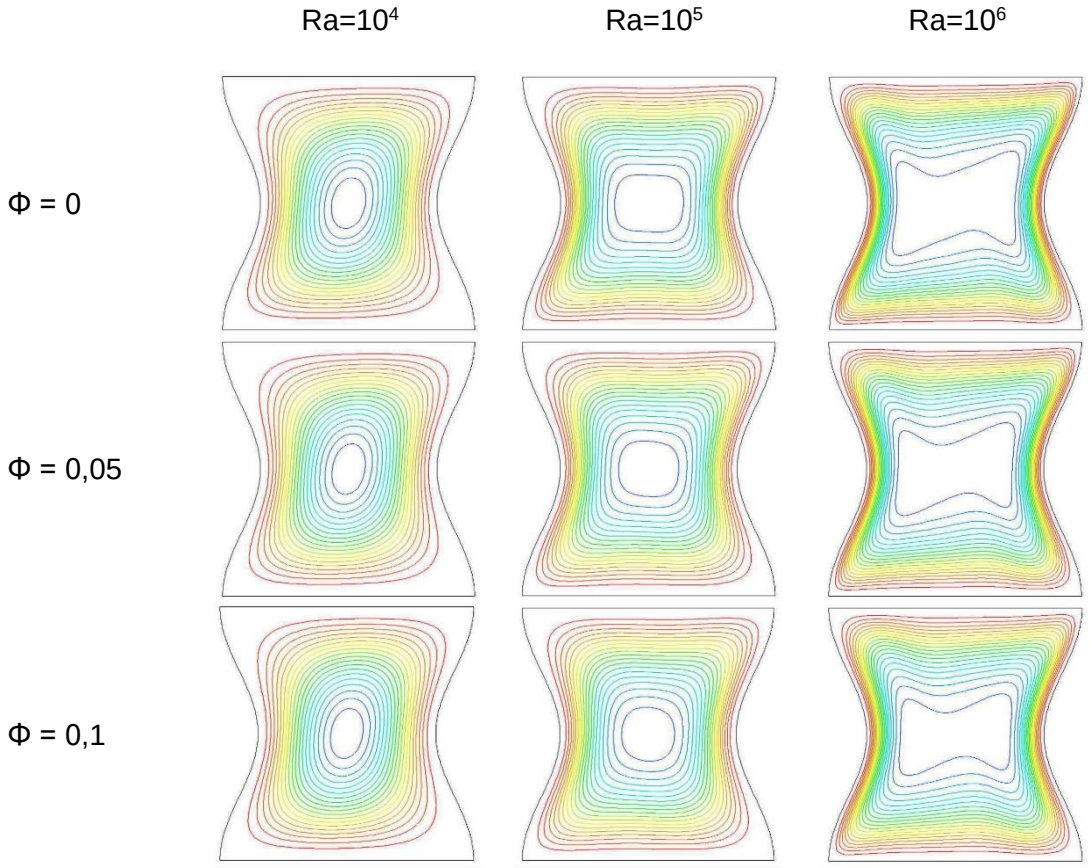
5.1. 0° Eğimli “1” Dalgalı Kavite için Analiz Sonuçları

5.1.1 Akım çizgileri eğrileri

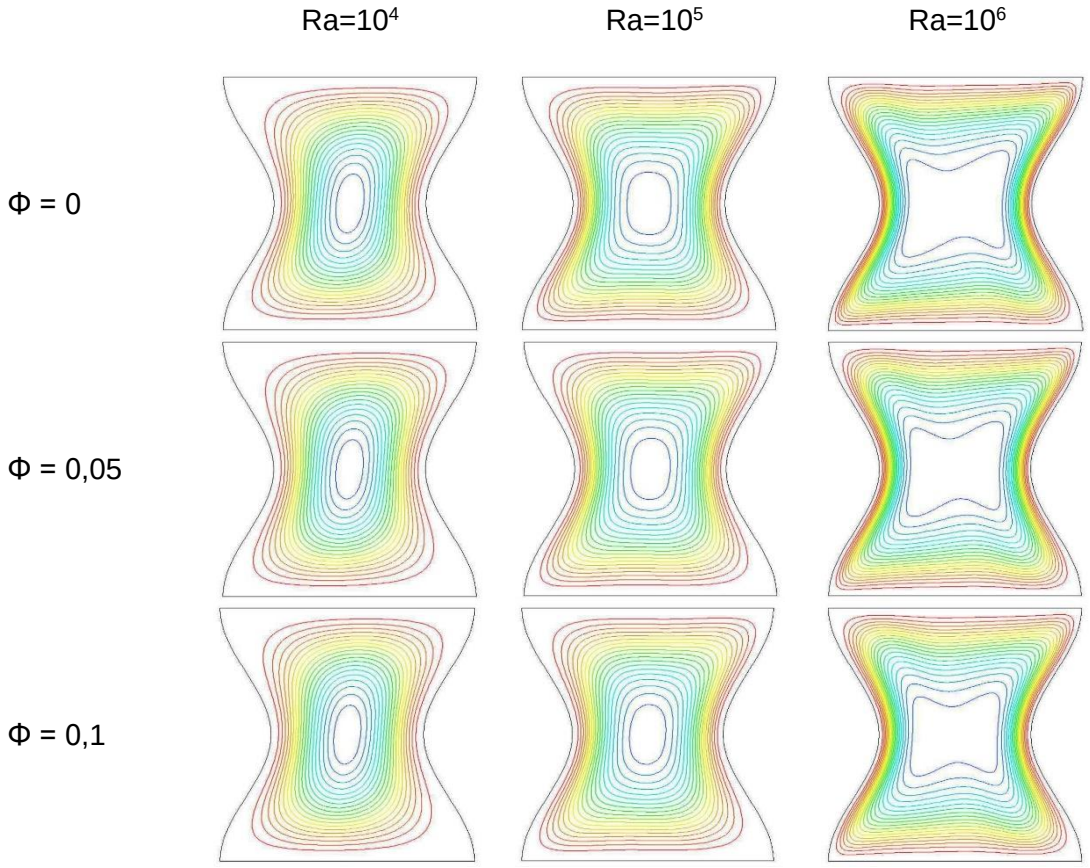
Aşağıda farklı genlik değerlerine sahip, eğimsiz ve “1” dalgalı durum için kavitelerde meydana gelen akım çizgileri eğrileri görülmektedir. Kavite içerisinde Cu-su nanoakışkanı kullanılmıştır.



Şekil 5.1. "0,05" Genlikli 0° Eğimli "1" Dalgalı Kavite için Akım Çizgileri



Şekil 5.2. "0,075" Genlikli 0° Eğimli "1" Dalgalı Kavite için Akım Çizgileri

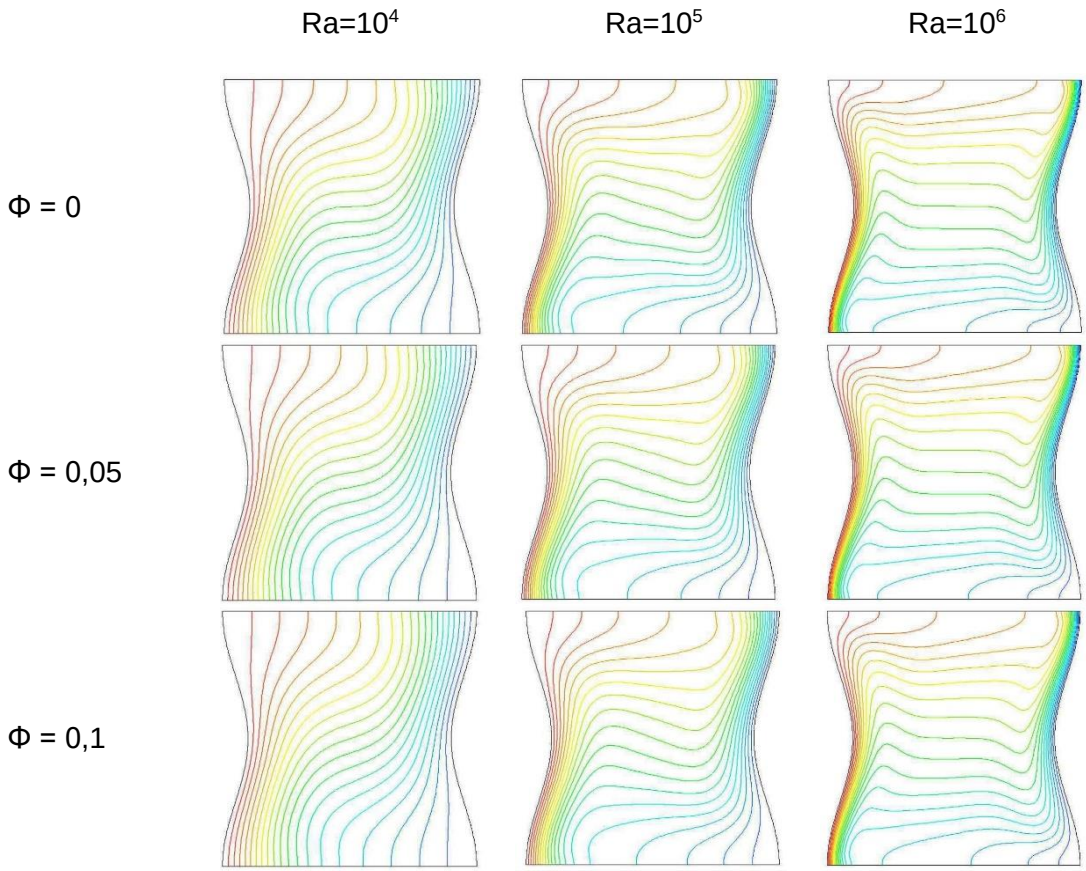


Şekil 5.3. "0,1" Genlikli 0° Eğimli "1" Dalgalı Kavite için Akım Çizgileri

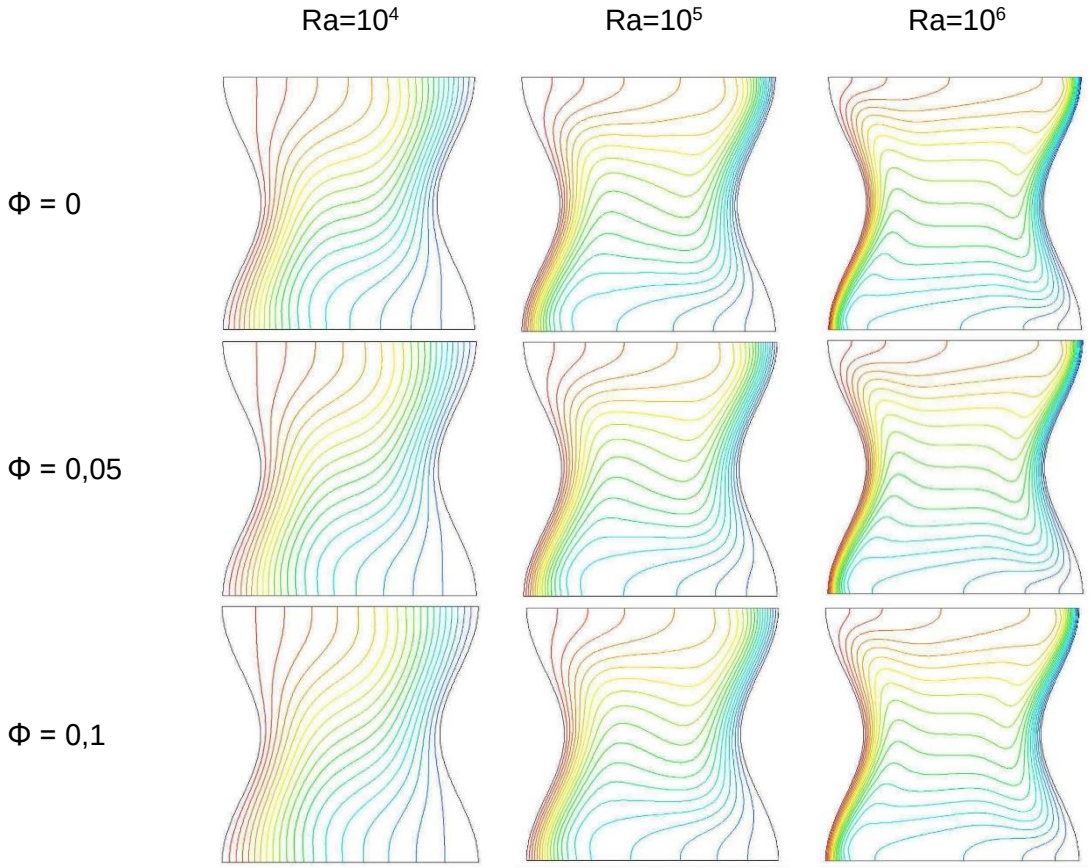
Şekil 5.1.-5.3.' de görüldüğü üzere akım çizgileri, eğim açısının olmadığı (φ=0°) durum için, akış alanın merkezine yerleşmiş saat ibresi yönünde dönen bir eddy (dönel akış) şeklinde görünmektedir. Farklı Rayleigh sayıları için verilen grafiklerde kavitenin merkezinde eliptik bir akış hücresinin oluştuğu görülmektedir. Rayleigh sayısının artmasına bağlı olarak dairesel/eliptik akış hücresi giderek dikdörtgensel bir form almaktadır. Kavite içerisinde oluşan akış hücresinin genlik değerindeki artışa bağlı olarak dairesel formdan eliptik forma doğru değiştiği görülmektedir. Nanopartiküllerin hacim fraksiyonundaki artışıyla akış eğrilerinde önemli bir değişiklik görülmemektedir. Akım fonksiyonu hem sirkülasyonun hem de girdabın, Rayleigh sayısı attıkça güçlenmeye başladığını göstermektedir

5.1.2. Eş sıcaklık eğrileri

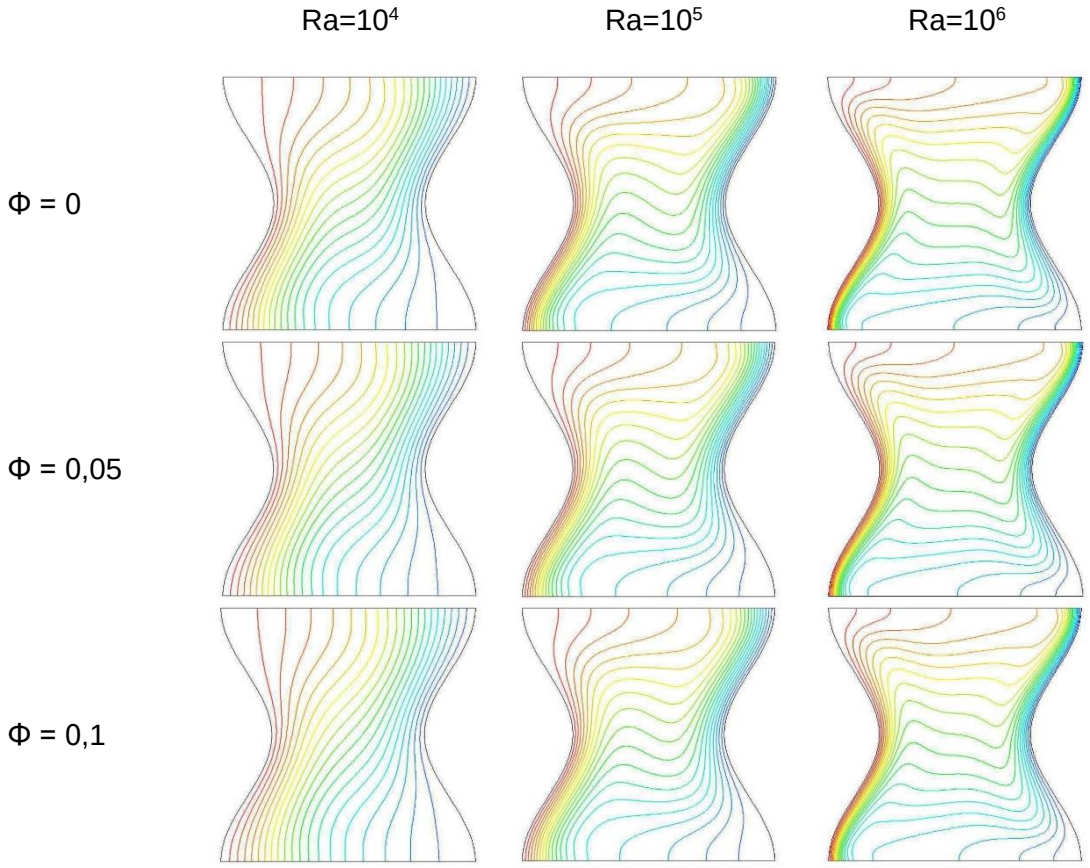
Aşağıda farklı genlik değerlerine sahip, eğimsiz ve “1” dalgalı durum için kavitelerde meydana gelen eş sıcaklık eğrileri görülmektedir.



Şekil 5.4. "0,05" Genlikli 0° Eğimli "1" Dalgalı Kavite için Eş Sıcaklık Eğrileri



Şekil 5.5. "0,075" Genlikli 0° Eğimli "1" Dalgalı Kavite için Eş Sıcaklık Eğrileri



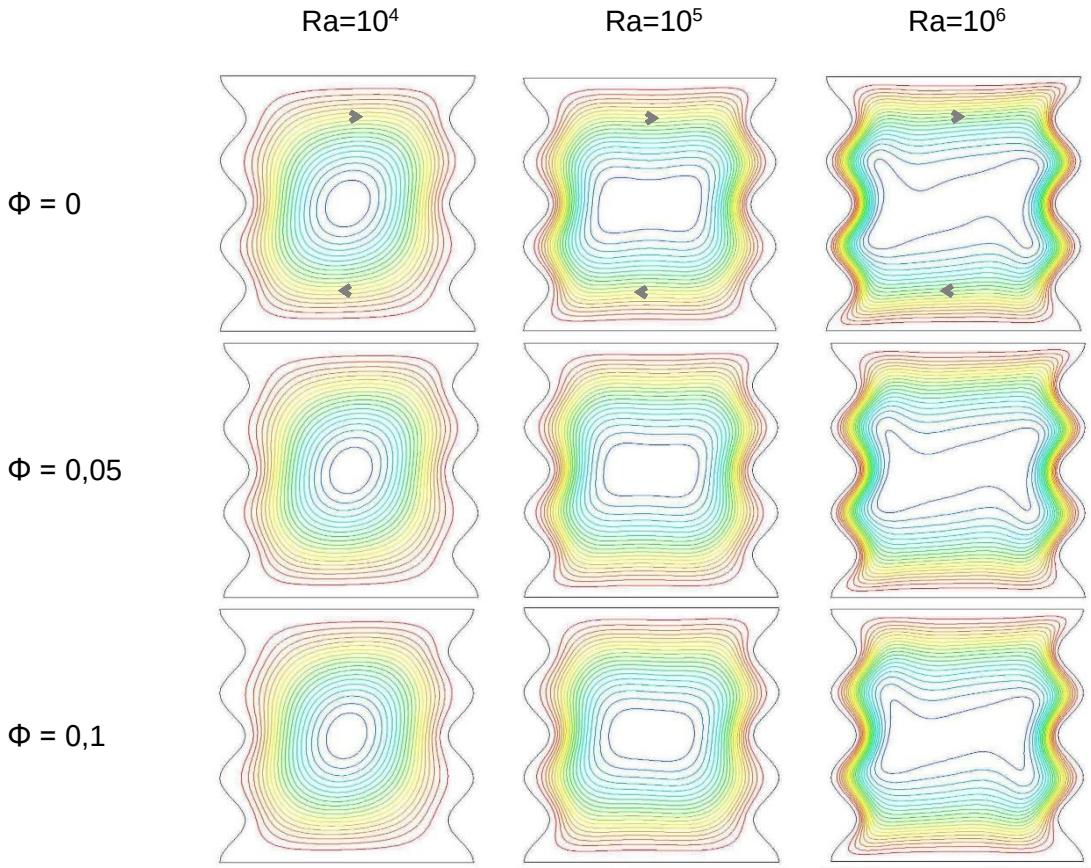
Şekil 5.6. "0,1" Genlikli 0° Eğimli "1" Dalgalı Kavite için Eş Sıcaklık Eğrileri

Şekil 5.4.-5.6.'da kavitelerde meydana gelen eş sıcaklık eğrileri incelendiğinde nispeten küçük Rayleigh sayıları için konveksiyon, zayıf ve eşsıcaklık eğrileri, saf iletim yoluyla ısı transferine benzer biçimde sıcak ve soğuk yüzeyler arasındaki bölgede olduğu görülmektedir. Rayleigh sayısı arttıkça, konveksiyon daha baskın olmakta ve bu yüzden sirkülasyon güçlenmeye başlamaktadır. Sıcak duvar yakınında ısınmış akışkan parçacıkları, sol yan duvar boyunca yukarıya doğru taşınmakta ve soğuk akışkan parçacıkları, sağ yan duvar boyunca aşağıya doğru inmektedir. Rayleigh sayısının artmasına bağlı olarak meydana gelen akış şiddetindeki artışla beraber sıcaklık eğrileri kavitenin merkezinde giderek birbirine paralel bir görünüm almaktadır. Ayrıca Rayleigh sayısındaki artışla beraber yan duvarlarda ısıl sınır tabakalar gelişmektedir. Hacim konsantrasyonundaki artışla beraber ısı transferi artmakta ve ısıl sınır tabakalar incelmektedir. Genlik değerinin artışıyla ısı transfer miktarı azalmaktadır.

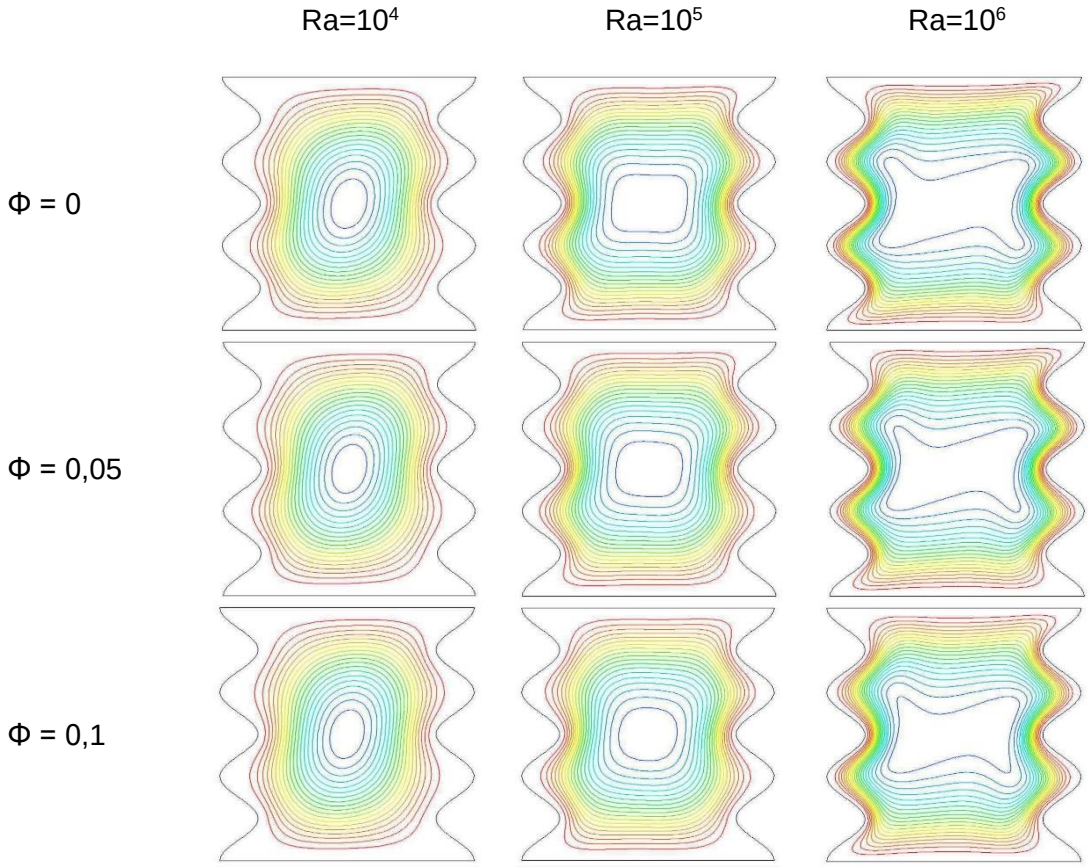
5.2. 0° Eğimli “3” Dalgalı Kavite için Analiz Sonuçları

5.2.1. Akım çizgileri eğrileri

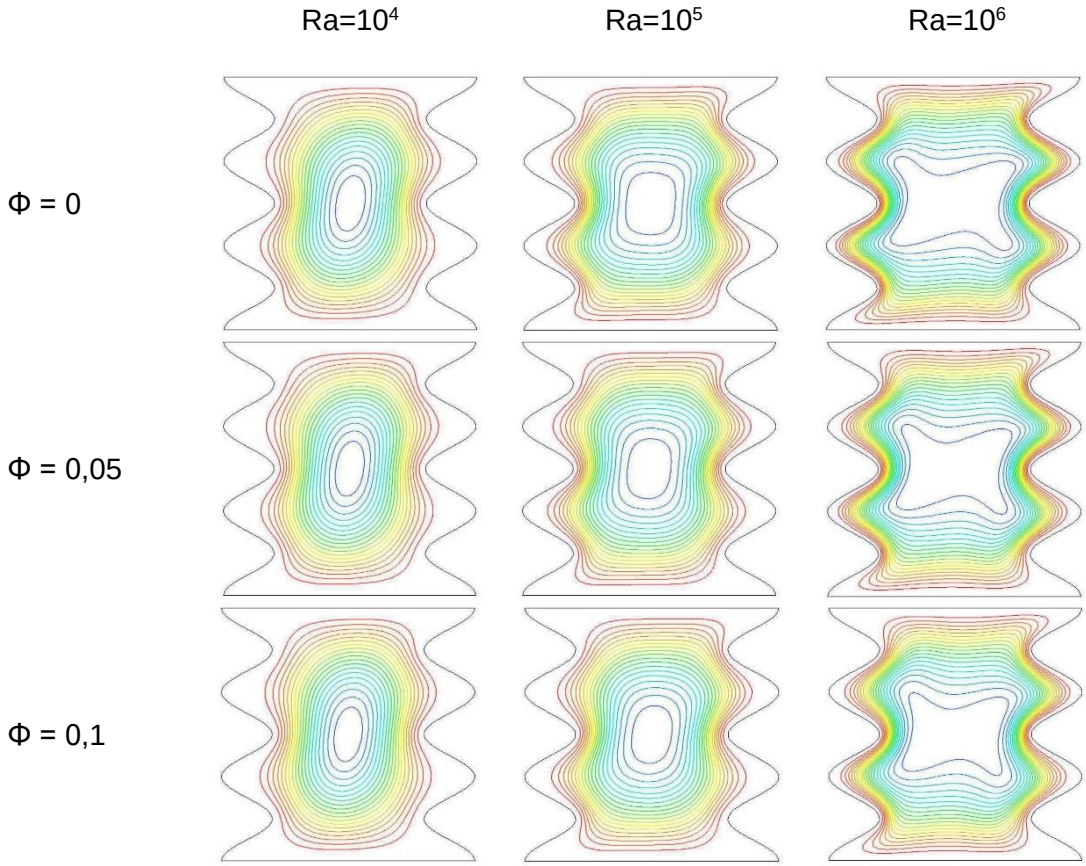
Aşağıda farklı genlik değerlerine sahip, eğimsiz ve “3” dalgalı durum için kavitelerde meydana gelen akım çizgileri eğrileri görülmektedir.



Şekil 5.7. "0,05" Genlikli 0° Eğimli "3" Dalgalı Kavite için Akım Çizgileri



Şekil 5.8. "0,075" Genlikli 0° Eğimli "3" Dalgalı Kavite için Akım Çizgileri



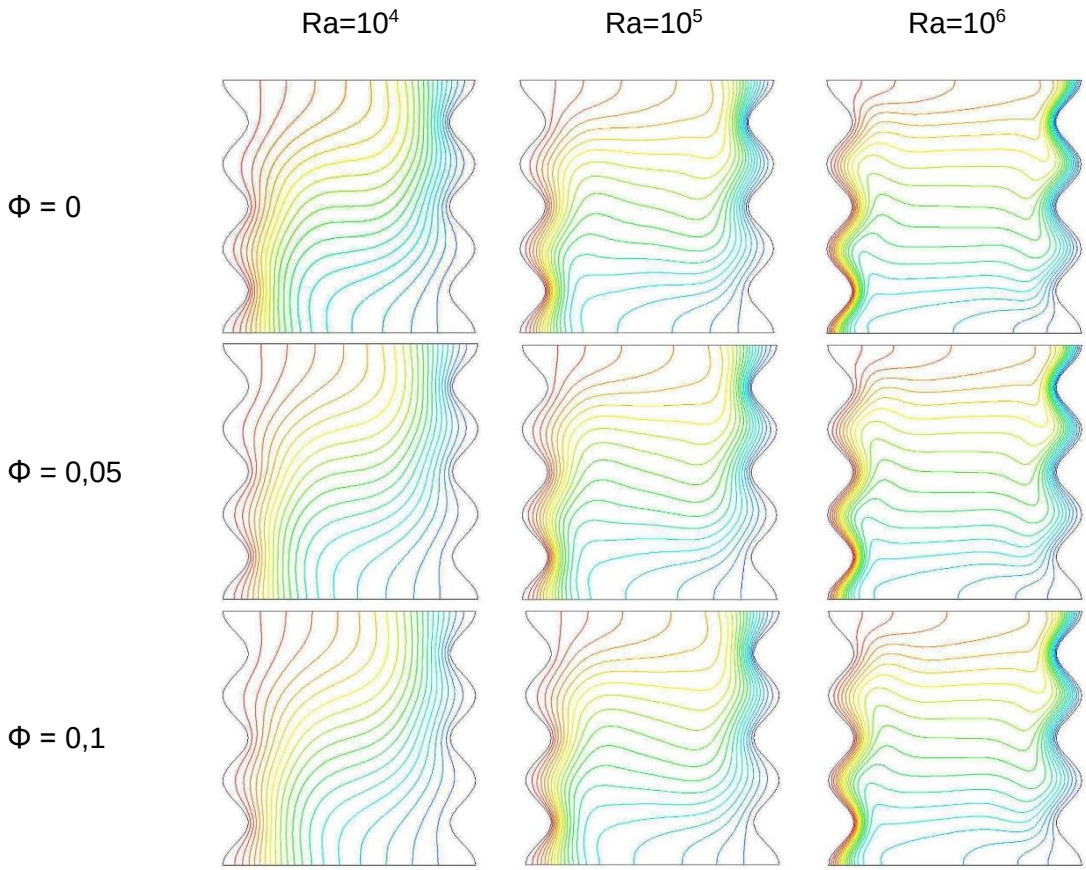
Şekil 5.9. "0,1" Genlikli 0° Eğimli "3" Dalgalı Kavite için Akım Çizgileri

Şekil 5.7.-5.9.'da farklı Rayleigh sayıları için verilen grafiklerde kavite ortasında saat ibresi yününde dönen eliptik bir akış hücresi oluşmaktadır. Rayleigh sayısının artmasına bağlı olarak akış sirkülasyonu artmakta ve dairesel/eliptik akış hücresi giderek dikdörtgensel, daha sonra karesel bir form almaktadır. Genlik değerlerindeki değişim ile ilgili olarak; kavite içerisinde oluşan akış hücresinin genlik değerindeki artışa bağlı olarak yüzey alanı daraldığından merkezdeki hücre dairesel formdan gittikçe uzayarak eliptik forma değişmektedir.

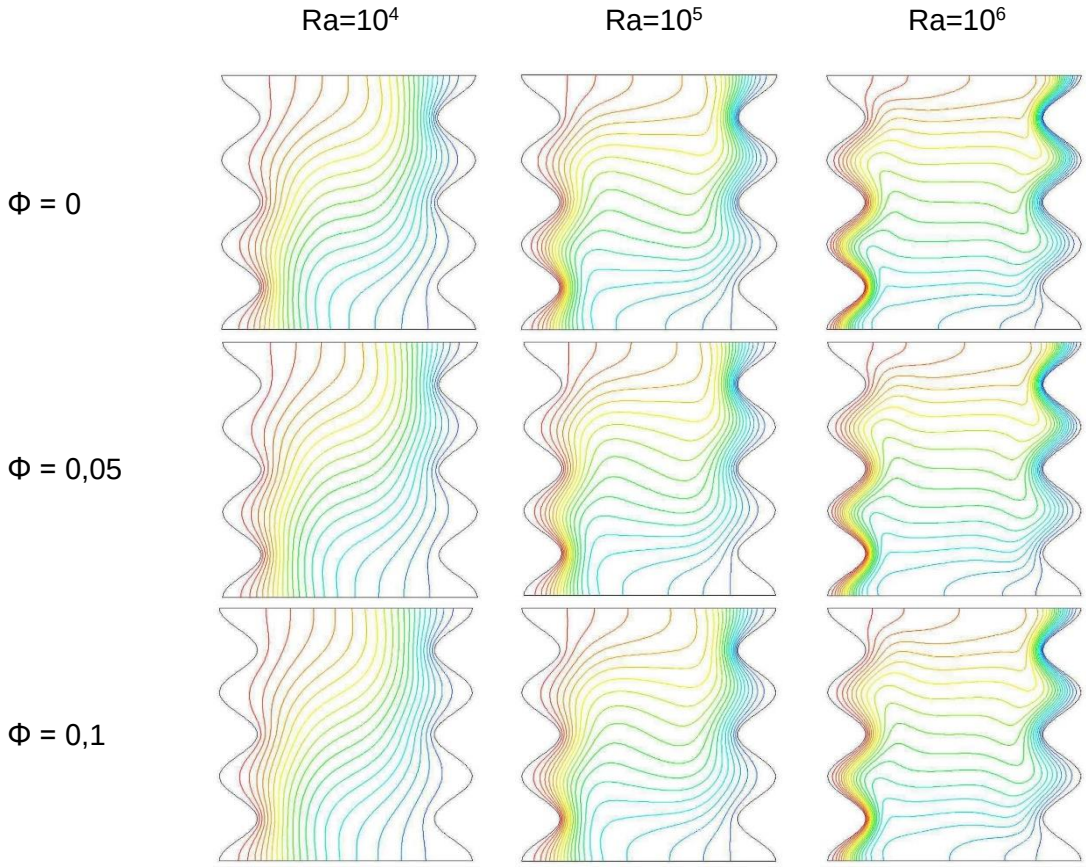
Hacim fraksiyonunun artmasıyla kapalı bölge içerisinde akış alanı üzerinde önemli bir etki görülmemektedir.

5.2.2. Eş sıcaklık eğrileri

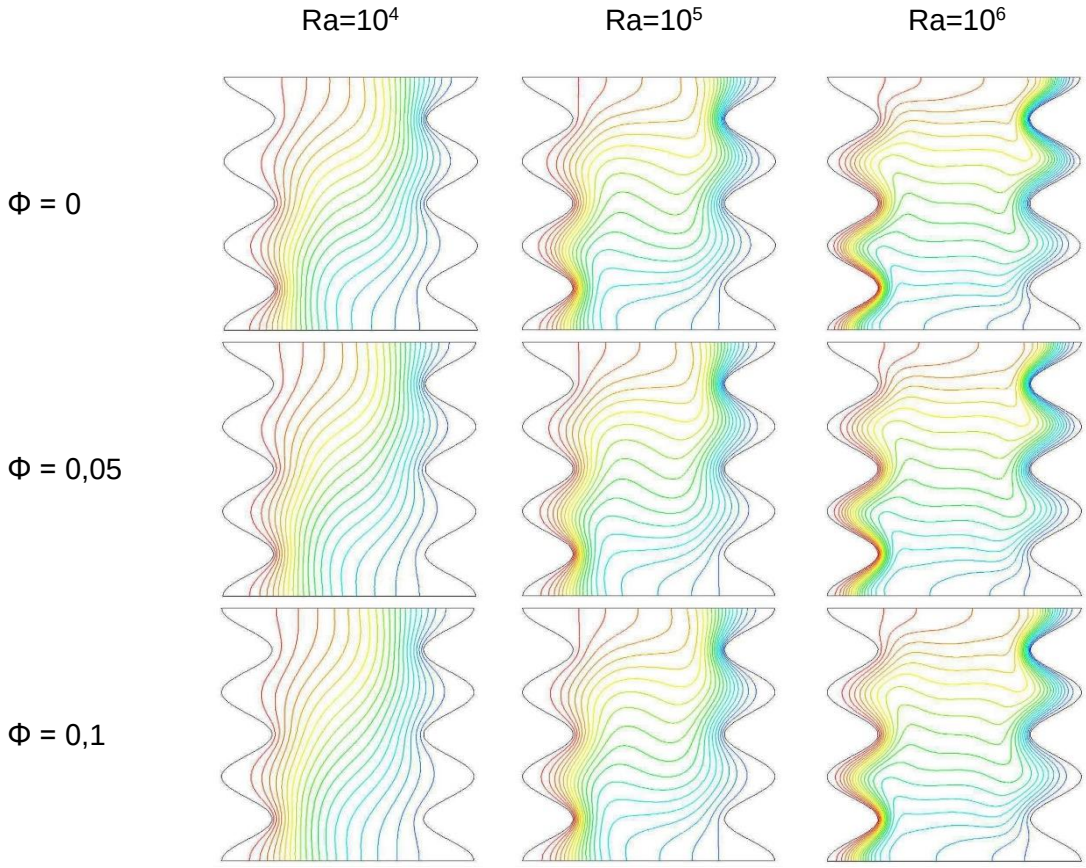
Aşağıda farklı genlik değerlerine sahip, eğimsiz ve “3” dalgalı durum için kavitelerde meydana gelen eş sıcaklık eğrileri görülmektedir.



Şekil 5.10. "0,05" Genlikli 0° Eğimli "3" Dalgalı Kavite için Eş Sıcaklık Eğrileri



Şekil 5.11. "0,075" Genlikli 0° Eğimli "3" Dalgalı Kavite için Eş Sıcaklık Eğrileri



Şekil 5.12. "0,1" Genlikli 0° Eğimli "3" Dalgalı Kavite için Eş Sıcaklık Eğrileri

Şekil 5.10.-5.12.'de verilen eş sıcaklık eğrileri incelendiğinde akışkanın sıcak duvar (sol duvar) boyunca yükseldiği, soğuk duvar boyunca da alçaldığı görülmektedir. Rayleigh sayısının artmasına bağlı olarak meydana gelen akış şiddetindeki artışla beraber sıcaklık eğrileri kavitenin orta bölgesinde giderek birbirine paralel bir görünüm almaktadır.

Bununla beraber genlik değerinde meydana gelen artışa bağlı olarak sıcak duvar boyunca yükselen akışkanın paralel olarak soğuk duvara doğru izlediği yol uzaklığı değişmekte, genlik değerinin artmasıyla beraber akışın paralel izlediği yol azalmaktadır. Rayleigh sayısı artıkça konveksiyonun şiddetinin artışına bağlı olarak dalgalı duvarlarda ısıl sınır tabakalar gelişmektedir.

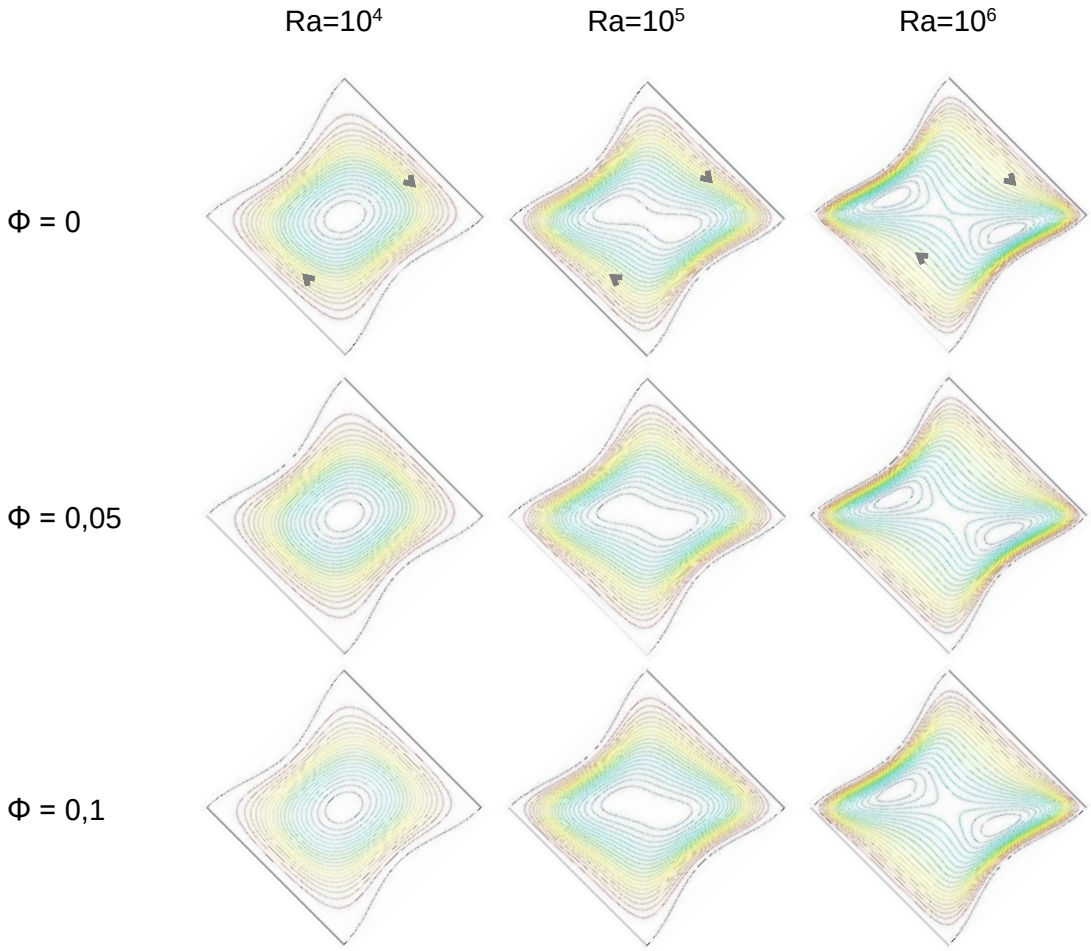
Nanopartiküllerin hacim fraksiyonun artışıyla eş sıcaklık eğrilerinde kaydadeğer önemli bir değişiklik gözlenmemektedir.

Kavitenin dalgalı duvarlarına ait dalga sayısındaki artışa bağlı olarak, akış ve ısı transferi üzerinde önemli değişiklikler gözlenmektedir.

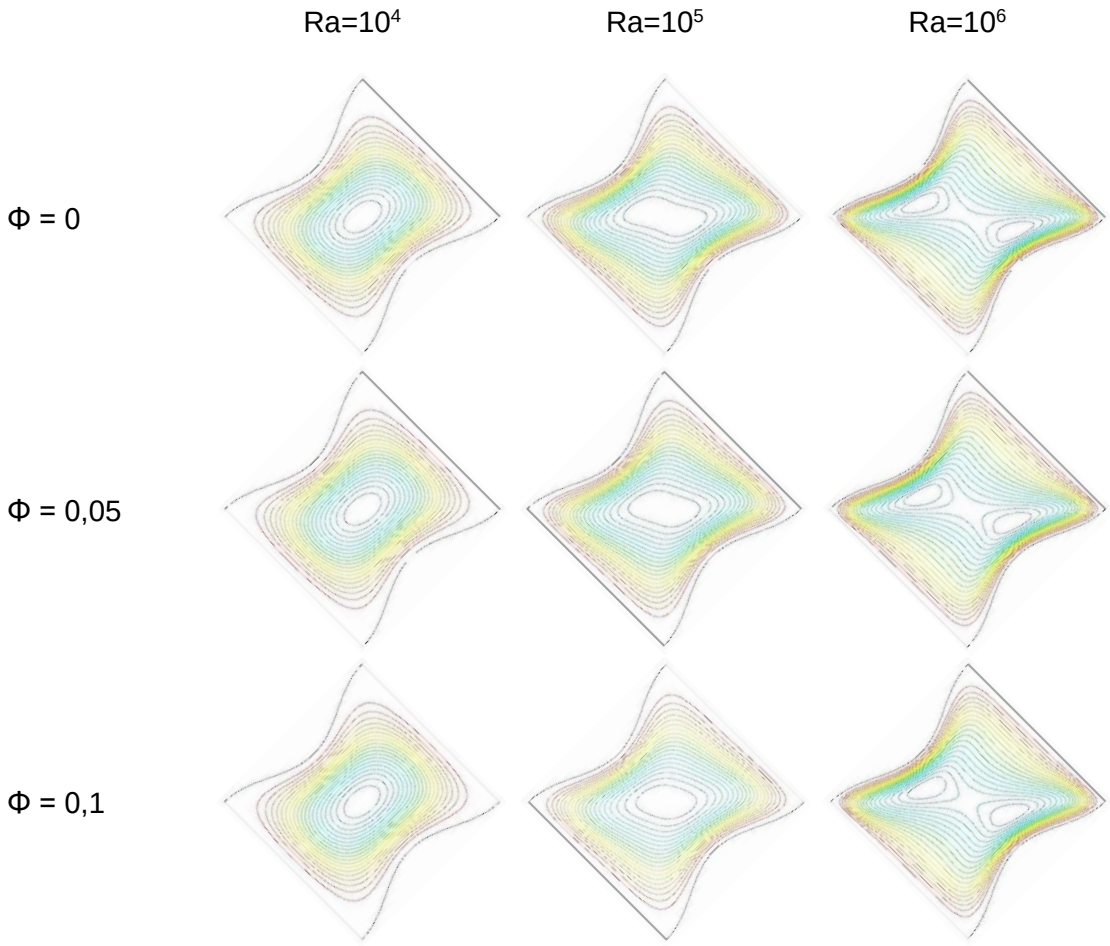
5.3. 45° Eğimli “1” Dalgalı Kavite için Analiz Sonuçları

5.3.1. Akım çizgileri eğrileri

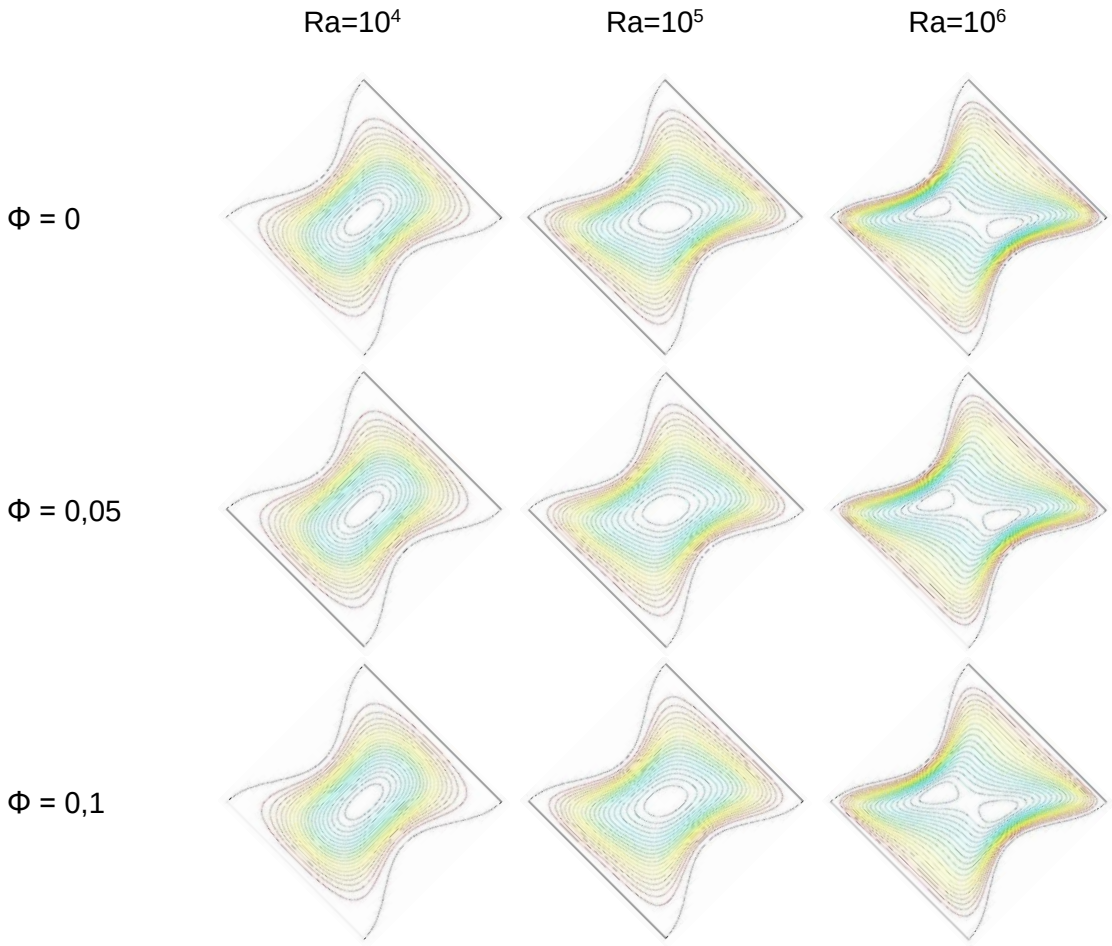
Aşağıda farklı genlik değerlerine sahip, 45^0 eğimli ve “1” dalgalı durum için kavitelerde meydana gelen akım çizgileri eğrileri görülmektedir.



Şekil 5.13. "0,05" Genlikli 45° Eğimli "1" Dalgalı Kavite için Akım Çizgileri



Şekil 5.14. "0,075" Genlikli 45° Eğimli "1" Dalgalı Kavite için Akım Çizgileri



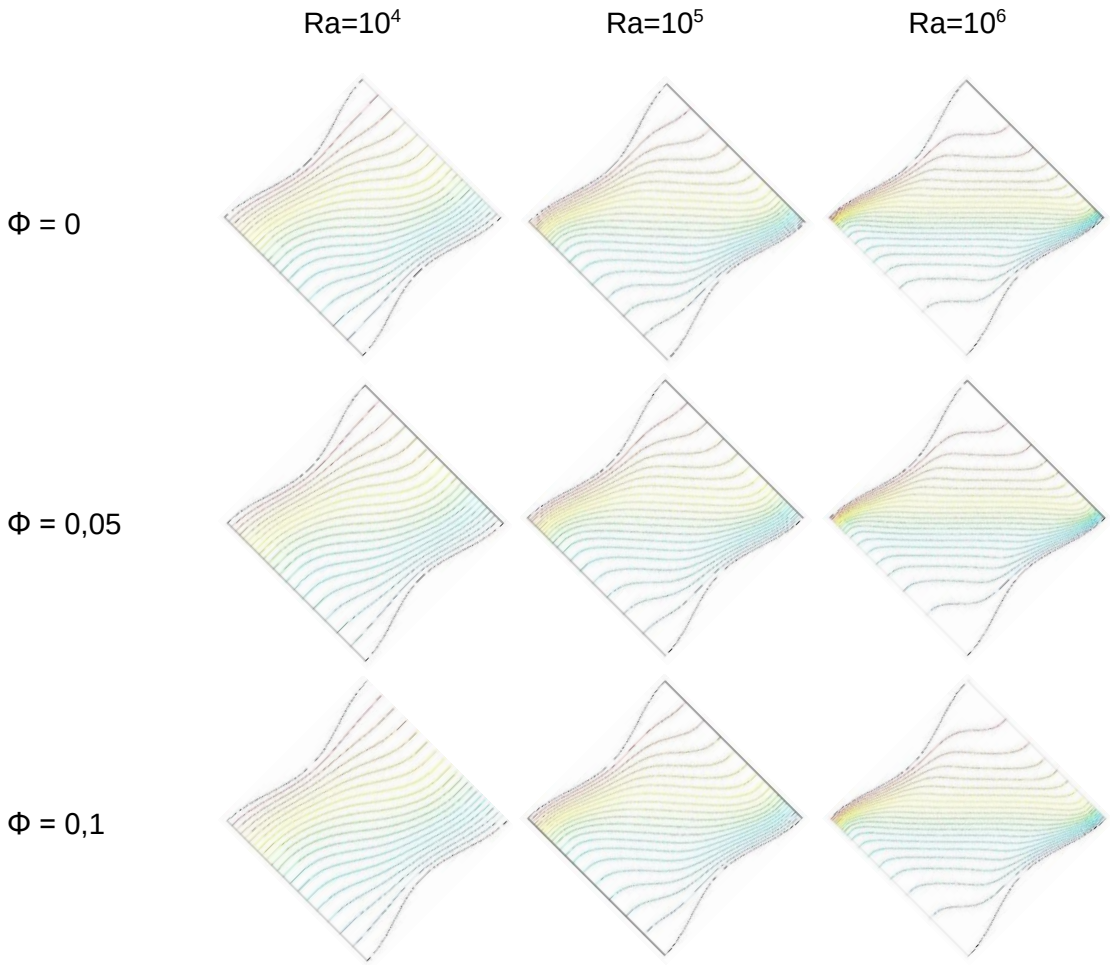
Şekil 5.15. "0,1" Genlikli 45° Eğimli "1" Dalgalı Kavite için Akım Çizgileri

Şekil 5.13.-5.15.'te görüldüğü üzere kapalı bölge saat ibresi yönünde eğildiğinde (φ=45°), sıcak duvar, yerçekimi ile sıcaklık gradyanını daha kötü bir durumda düzene sokarak üst kısma yaklaşmaktadır ve kapalı bölge içindeki sirkülasyon, akım fonksiyonun küçük değerlerinin bir göstergesi olarak daha zayıf görünmektedir. Farklı Rayleigh sayıları için verilen grafiklerde kavitenin merkezinde saat ibresi yönünde dönen dairesel bir akış hücresi oluşmaktadır. Rayleigh sayısının artmasına bağlı olarak dairesel akış hücresinin formu bozularak $Ra=10^6$ da çift halkalı bir form almaktadır. Oluşan halkalar arasında görüldüğü üzere akış durgundur. Kavite ortasında bulunan akış alanı küçülerek birbirine zıt yönlerde dönen hücreleri oluşturmaktadır.

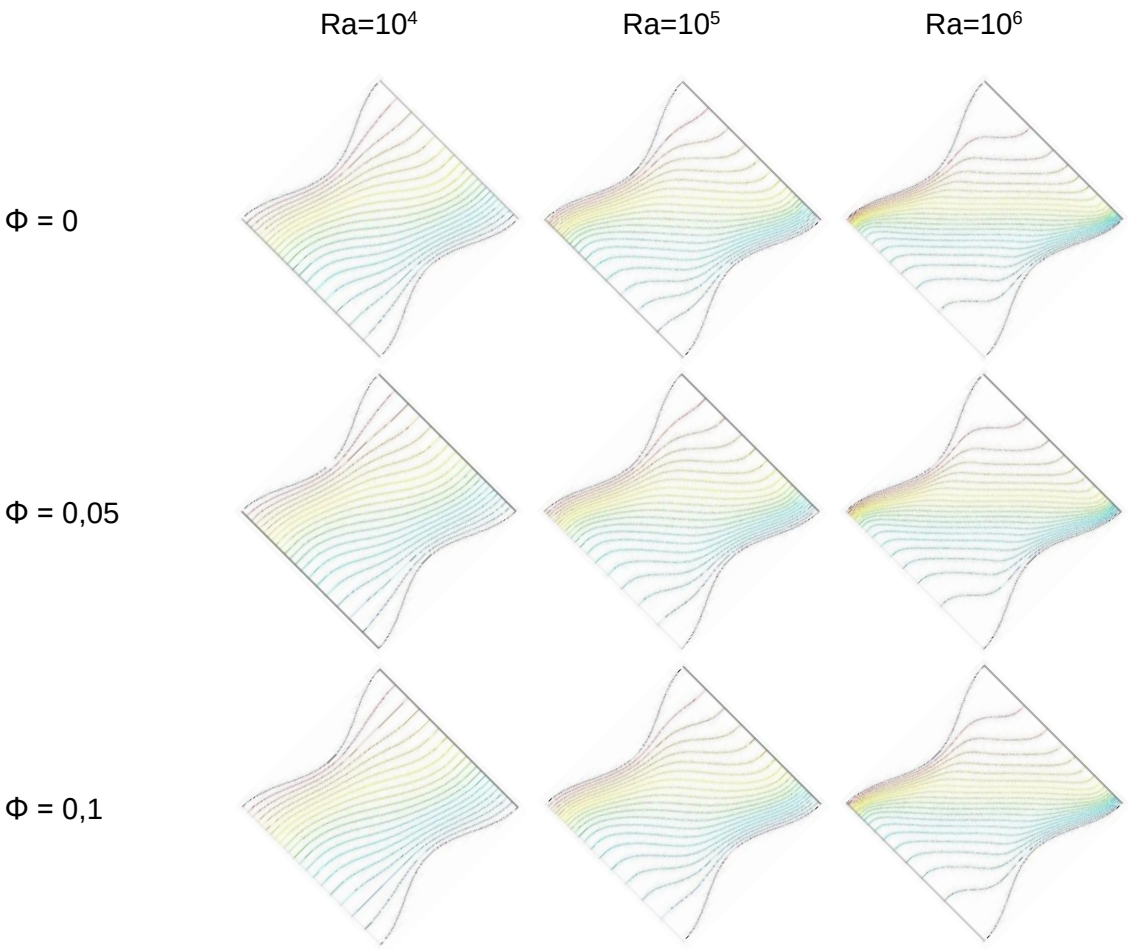
Genlik değerlerindeki değişim ile ilgili olarak; kavite içerisinde oluşan akış hücresi genlik değerindeki artışa bağlı olarak dairesel formdan eliptik forma dönüşmektedir. $Ra = 10^6$ da akış şiddetinin artmasından dolayı, genlik değerinin artmasına bağlı olarak kavite ortasında oluşan hücreler birbirine giderek yakınlaşmaktadır.

5.3.2. Eş sıcaklık eğrileri

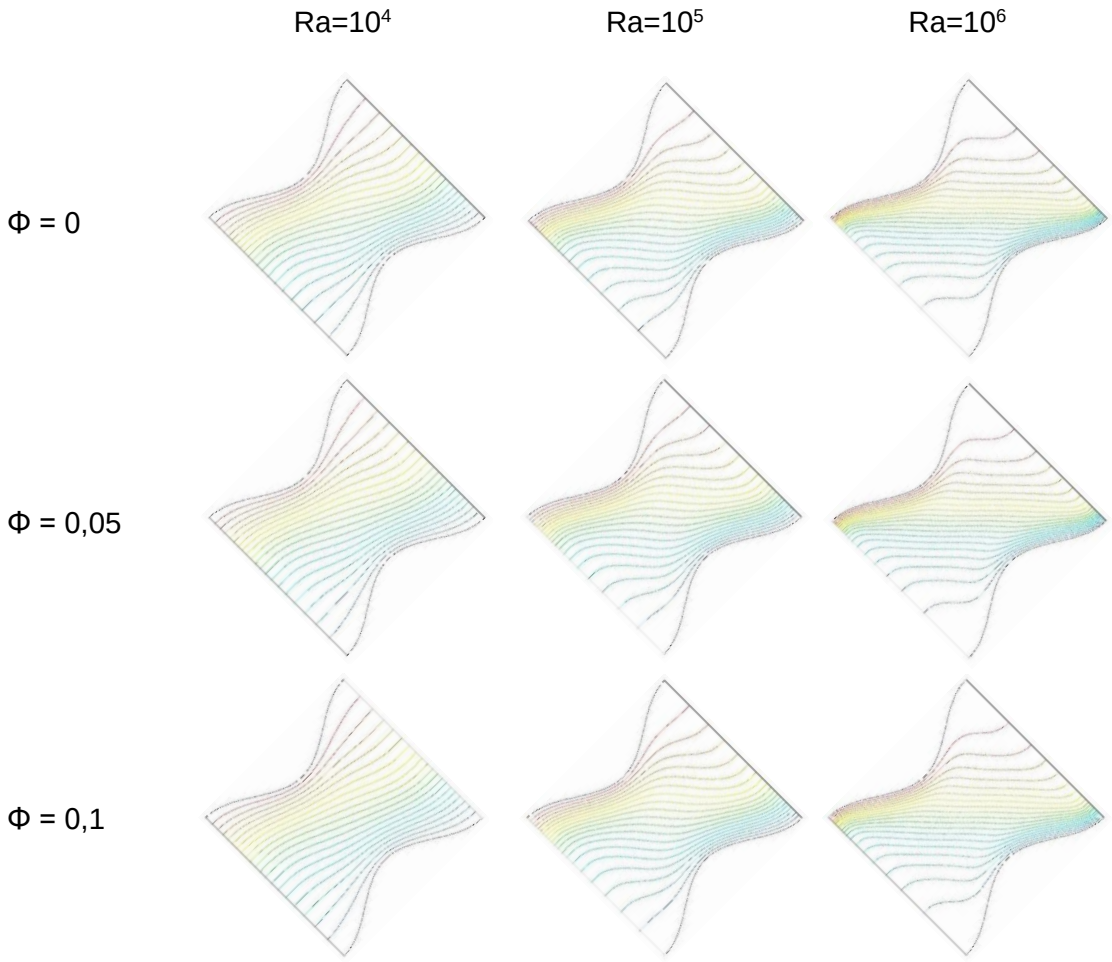
Aşağıda farklı genlik değerlerine sahip, 45^0 derece eğimli ve “1” dalgalı durum için kavitelerde meydana gelen akım çizgileri eğrileri görülmektedir.



Şekil 5.16. "0,05" Genlikli 45◦ Eğimli "1" Dalgalı Kavite için Eş Sıcaklık Eğrileri



Şekil 5.17. "0,075" Genlikli 45° Eğimli "1" Dalgalı Kavite için Eş Sıcaklık Eğrileri



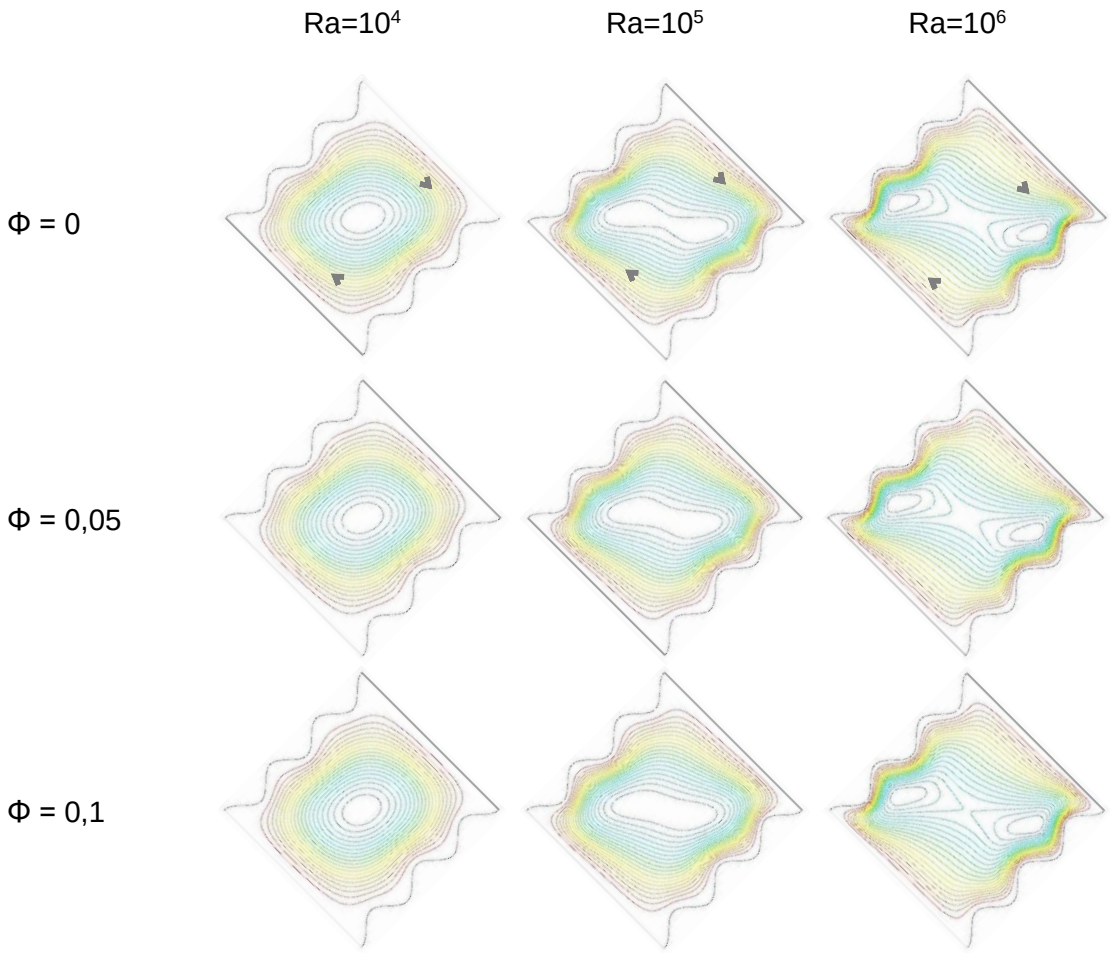
Şekil 5.18. "0,1" Genlikli 45° Eğimli "1" Dalgalı Kavite için Eş Sıcaklık Eğrileri

Şekil 5.16.-5.18.'de verilen kavitelerin saat ibresi yönünde 45° eğilmesiyle sıcak duvar nispeten üst kısımda soğuk duvarda alt kısımda kalmaktadır. Saat ibreleri yönündeki sirkülasyon tarafından, sıcak duvar yakınındaki ısıtılmış akışkan parçacıkları sol yan duvar boyunca yukarı doğru taşınmaktadır ve soğuk akışkan parçacıkları onların yerini alarak soğuk yan duvar boyunca aşağı doğru çekilmektedir. Sirkülasyon ve girdap, Rayleigh sayısı attıkça güçlenmeye başlamaktadır. Eşsıcaklık eğrileri, Rayleigh sayısının küçük değerlerinde neredeyse düşey dalgalı duvarlara paraleldir. Bu da ısı geçişinin çoğunun saf iletim yoluyla olduğunu göstermektedir. Rayleigh sayısının artmasıyla sirkülasyon artmakta ve buna bağlı olarak meydana gelen akış şiddetindeki artışla beraber eş sıcaklık eğrileri kapalı bölgenin orta bölgesinde giderek formları bozularak bükülme davranışı göstermektedir.

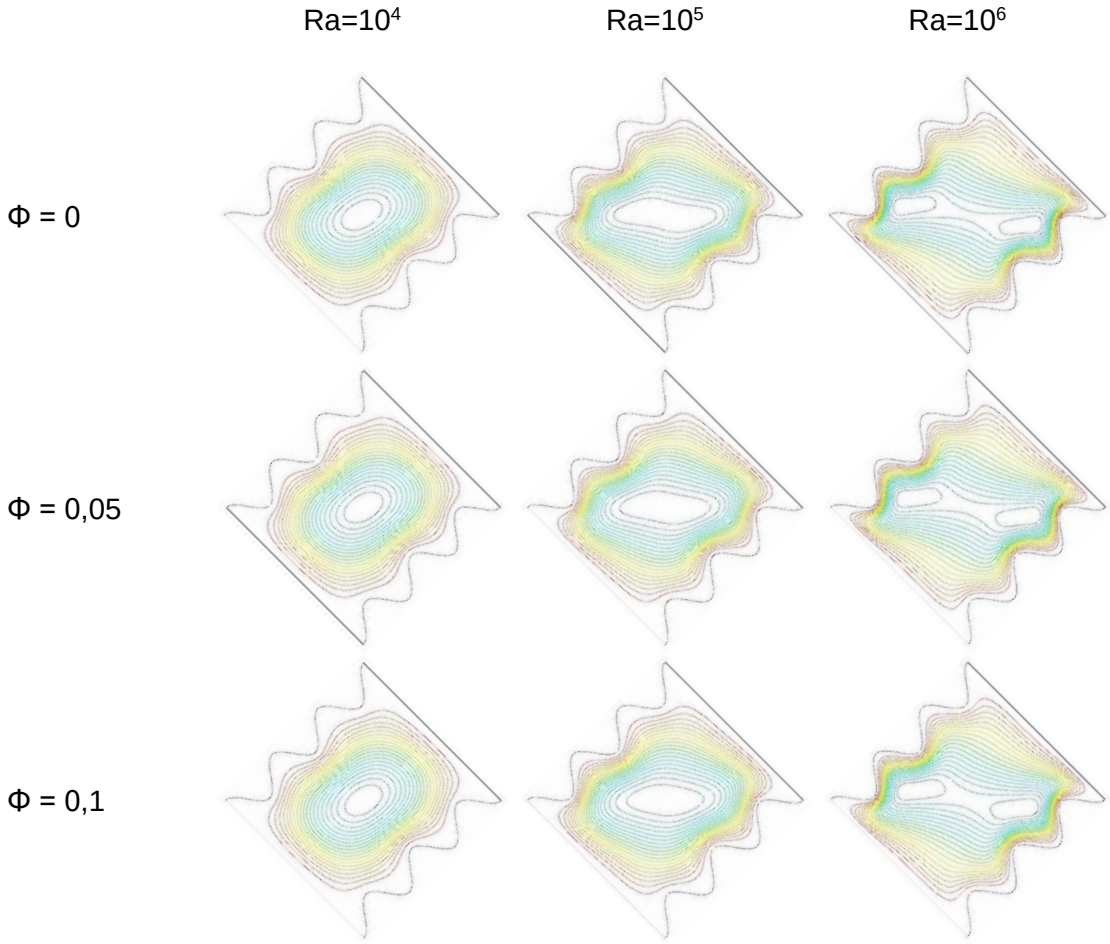
5.4. 45° Eğimli “3” Dalgalı Kavite için Analiz Sonuçları

5.4.1. Akım çizgileri eğrileri

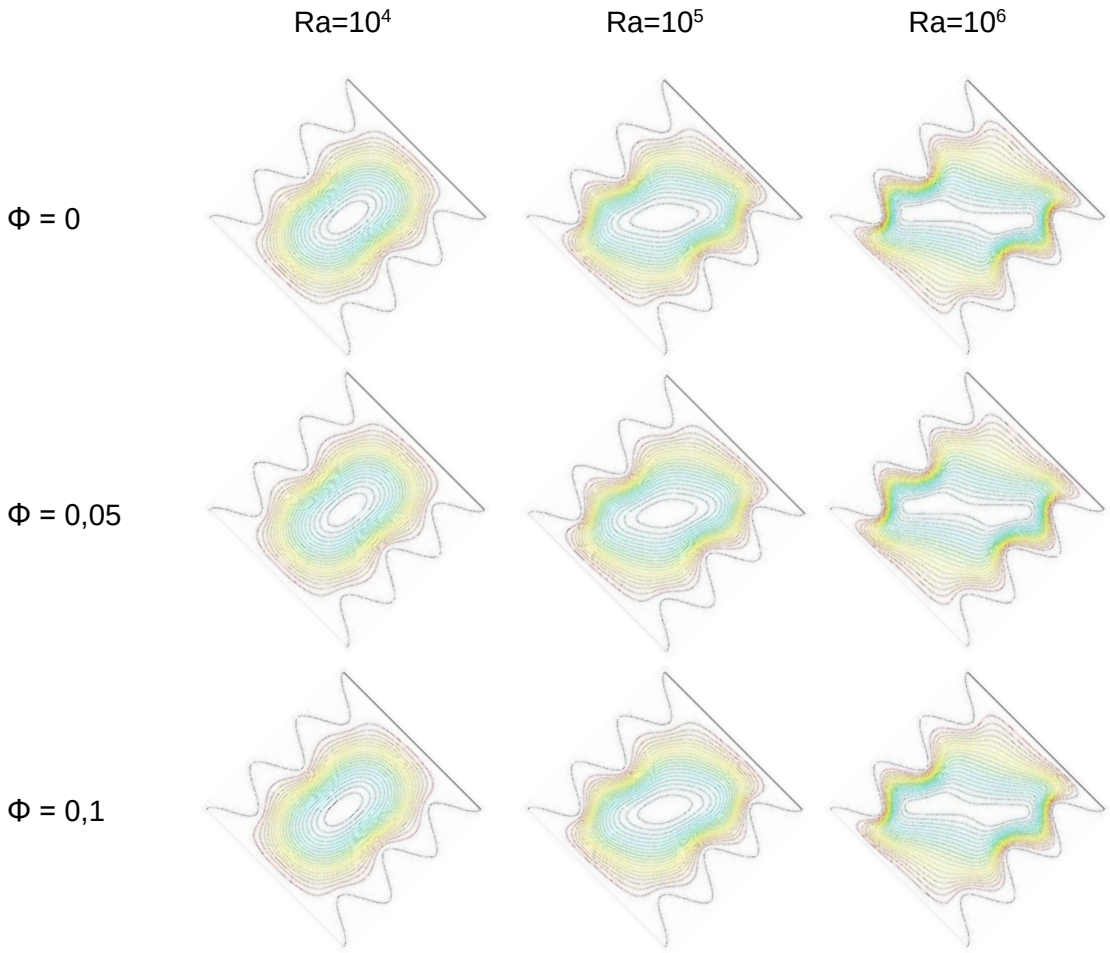
Aşağıda farklı genlik değerlerine sahip, 45^0 eğimli ve “3” dalgalı durum için kavitelerde meydana gelen akım çizgileri eğrileri görülmektedir.



Şekil 5.19. "0,05" Genlikli 45° Eğimli "3" Dalgalı Kavite için Akım Çizgileri



Şekil 5.20. "0,075" Genlikli 45° Eğimli “3” Dalgalı Kavite için Akım Çizgileri

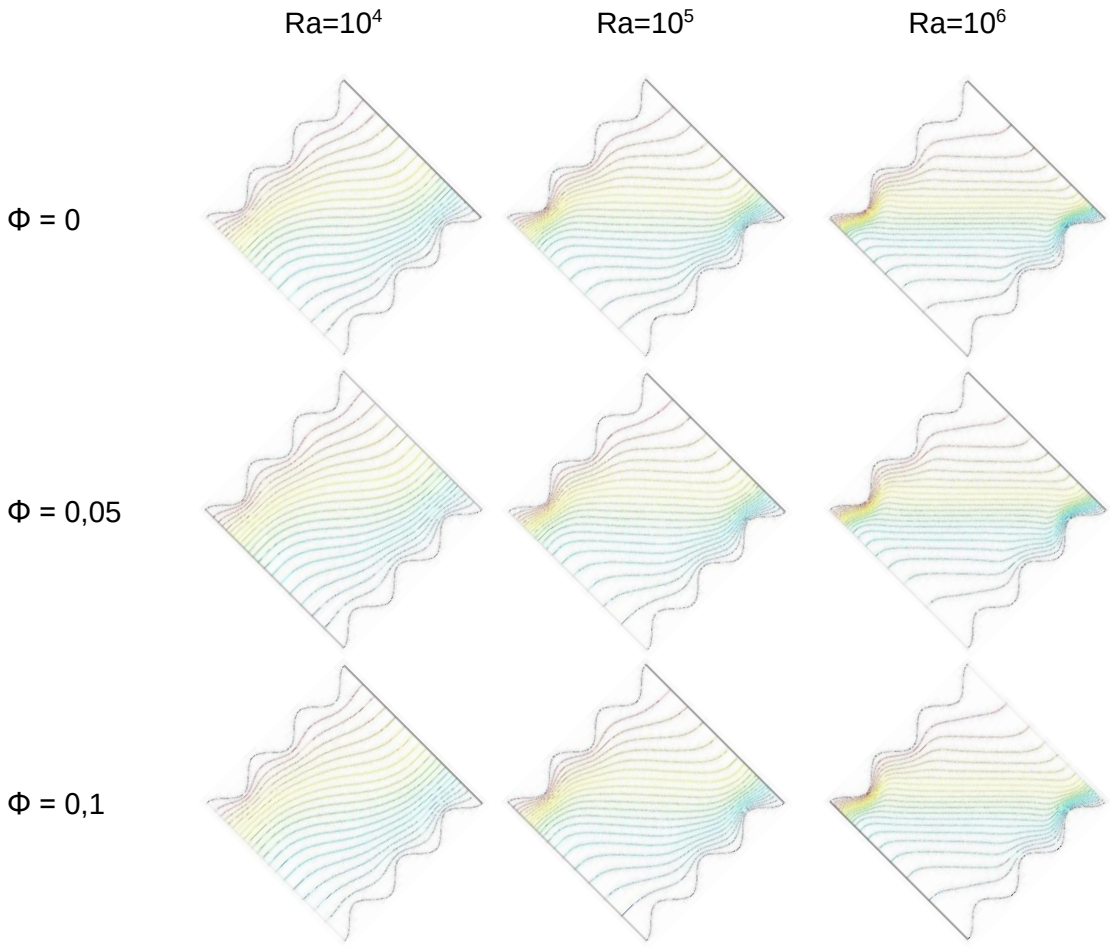


Şekil 5.21. "0,1" Genlikli 45° Eğimli "3" Dalgalı Kavite için Akım Çizgileri

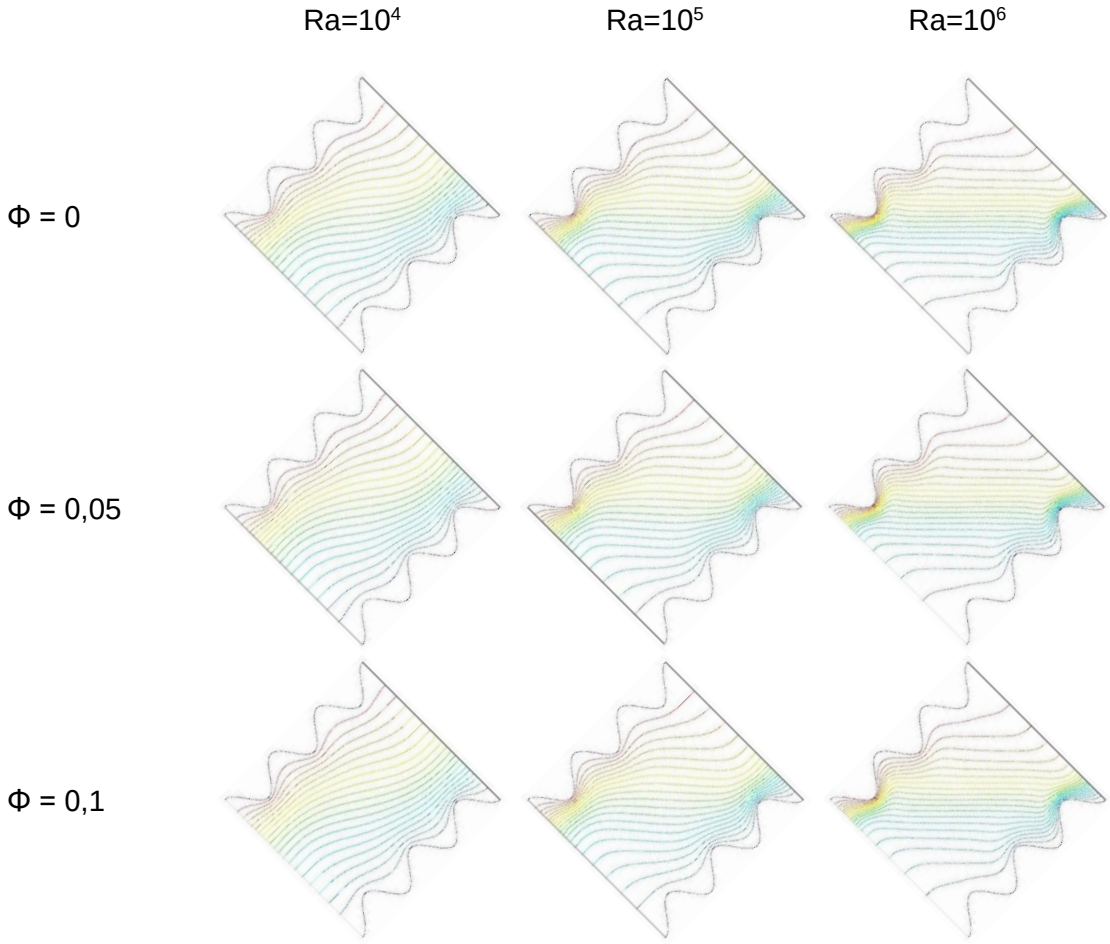
Şekil 5.19.-5.21.'de verilen kaviteler incelendiğinde farklı Rayleigh sayıları için kavite ortasında saat ibresi yönünde dönen dairesel bir akış hücresi oluştuğu görülmektedir. Rayleigh sayısının artmasına bağlı olarak dairesel akış hücresi giderek diagonal boyunca uzayarak eliptik, daha sonra çift halkalı bir form almaktadır. Bu çift halka arasındaki akışın neredeyse durgun olduğu görülmektedir. Kavite ortasında bulunan akış alanı küçülerek birbirine zıt yönlerde dönen hücreleri oluşturmaktadır. Genlik değerlerindeki değişim ile ilgili olarak; kavite içerisinde oluşan akış hücresi genlik değerindeki artışa bağlı olarak dairesel formdan eliptik forma dönüşmektedir. Ra = 10^6 değer analizleri incelendiğinde genlik değerinin artmasına bağlı olarak kavite ortasında oluşan hücreler birbirine giderek yakınlaşmakta ve genlik değerinin 0,1 olması ile beraber bu iki akış hücresi birleşerek tek bir halka oluşturmaktadır.

5.4.2. Eş sıcaklık eğrileri

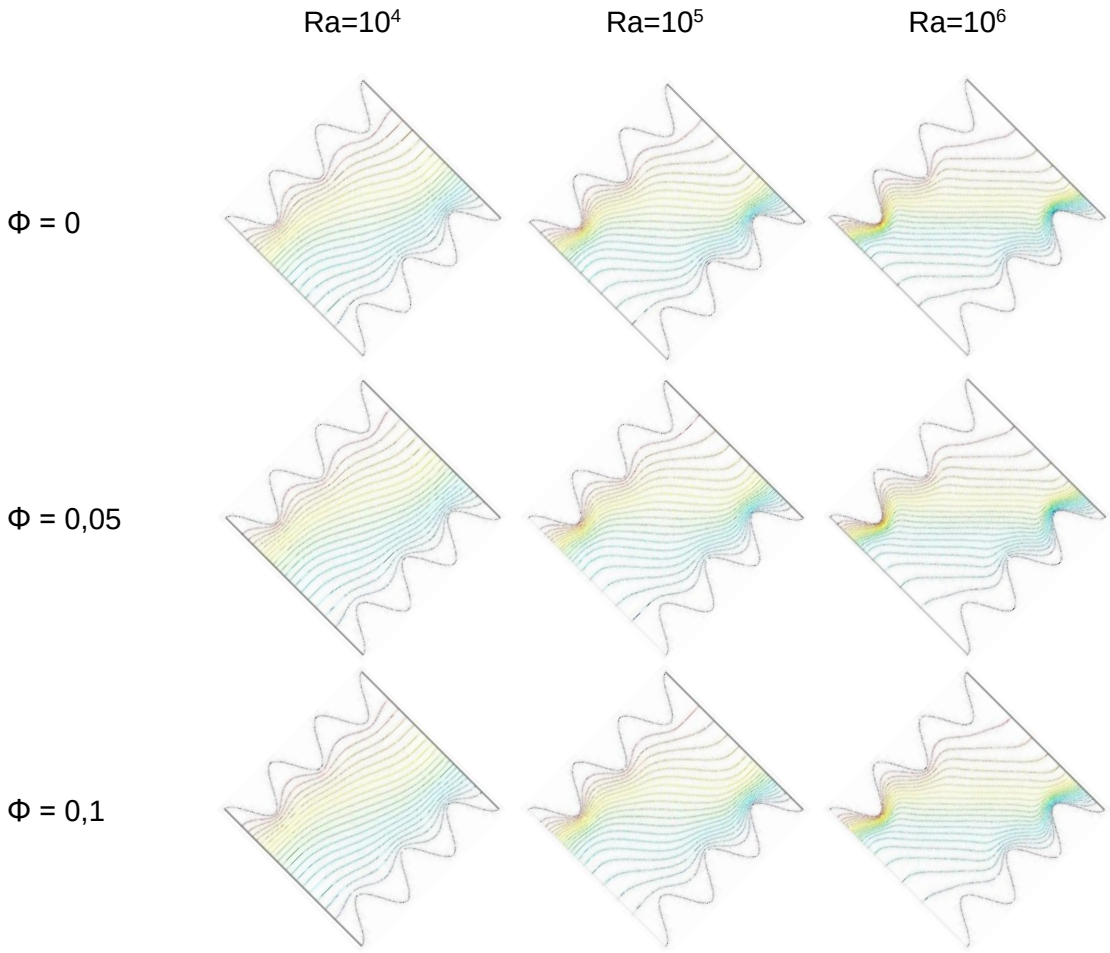
Aşağıda farklı genlik değerlerine sahip, 45^0 eğimli ve “3” dalgalı durum için kavitelerde meydana gelen eş sıcaklık eğrileri görülmektedir.



Şekil 5.22. "0,05" Genlikli 45° Eğimli "3" Dalgalı Kavite için Eş Sıcaklık Eğrileri



Şekil 5.23. "0,075" Genlikli 45° Eğimli "3" Dalgalı Kavite için Eş Sıcaklık Eğrileri



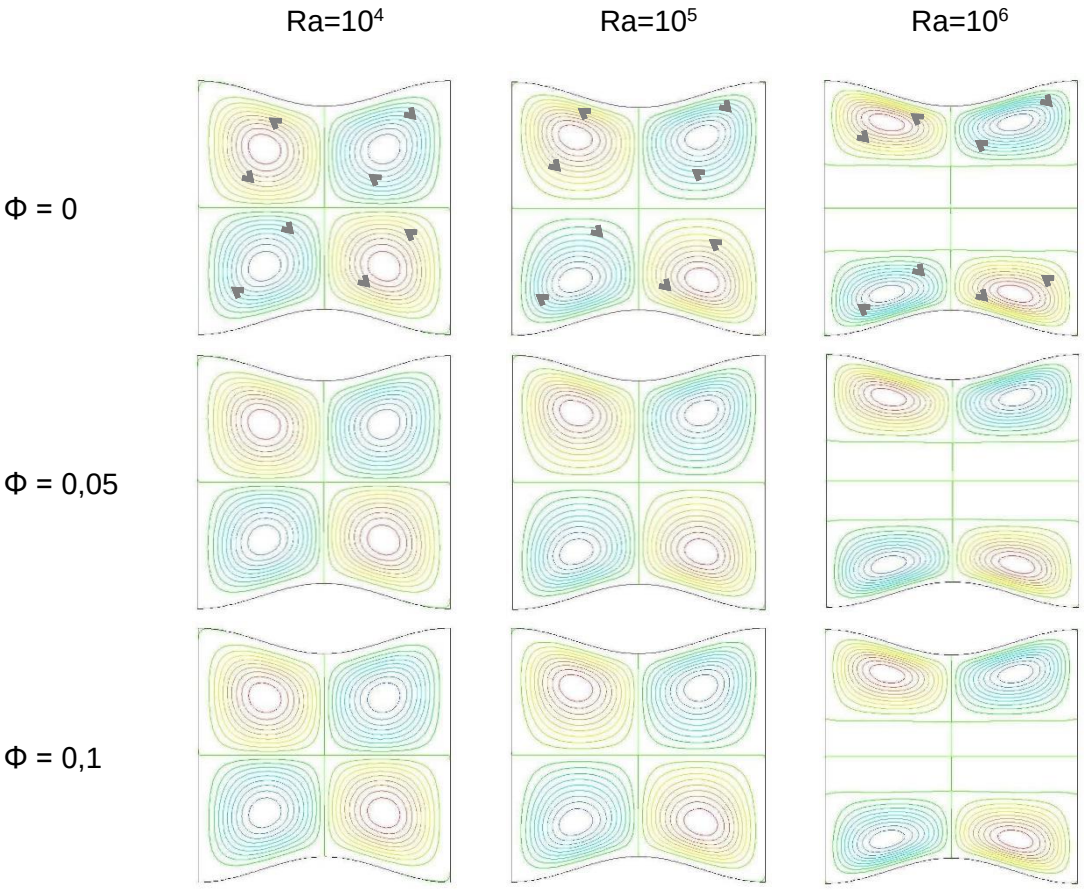
Şekil 5.24. "0,1" Genlikli 45° Eğimli "3" Dalgalı Kavite için Eş Sıcaklık Eğrileri

Şekil 5.22.-5.24.'de verilen eş sıcaklık eğrileri incelendiğinde akışın sıcak duvar (sol duvar) boyunca yükseldiği, soğuk duvar boyunca da alçaldığı görülmektedir. Rayleigh sayısının küçük değerlerinde iletimle ısı geçişinde olduğu gibi eş sıcaklık eğrileri dalgalı duvarlara neredeyse paraleldir. Rayleigh sayısının artmasına bağlı olarak meydana gelen akış şiddetindeki artışla beraber eş sıcaklık eğrilerinin formu bozularak daha fazla bükülme davranışı göstererek dalgalı bir form görünümü almaktadır. Bununla beraber genlik değerinde meydana gelen artışa bağlı olarak iki duvar arasındaki mesafe değişiminin bir sonucu olarak eş sıcaklık eğrileri birbirine daha yakın olmakta ve ısı transfer miktarını artırmaktadır. "1" dalgalı kapalı bölge analiz sonuçları ile kıyaslandığında ise eş sıcaklık eğrilerinde kaydadeğer bir değişikliğin görülmediği anlaşılmaktadır.

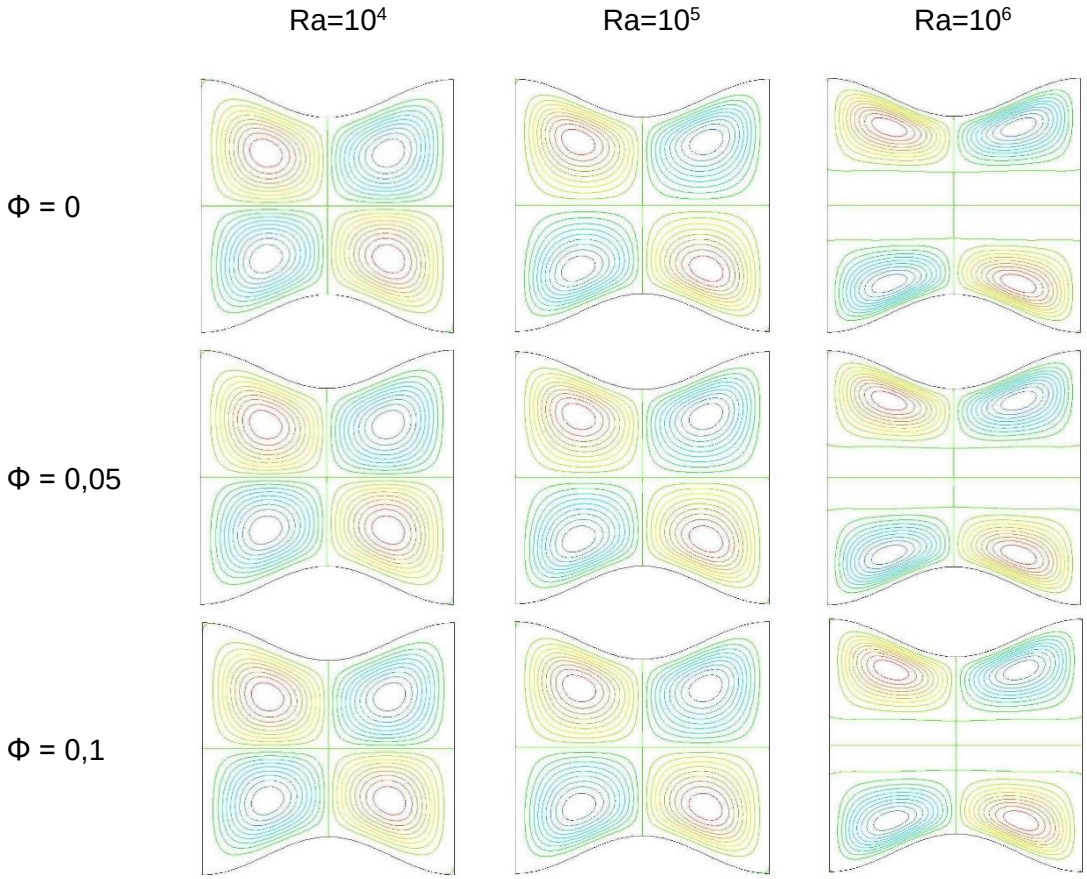
5.5. 90° Eğimli “1” Dalgalı Kavite için Analiz Sonuçları

5.5.1. Akım çizgileri eğrileri

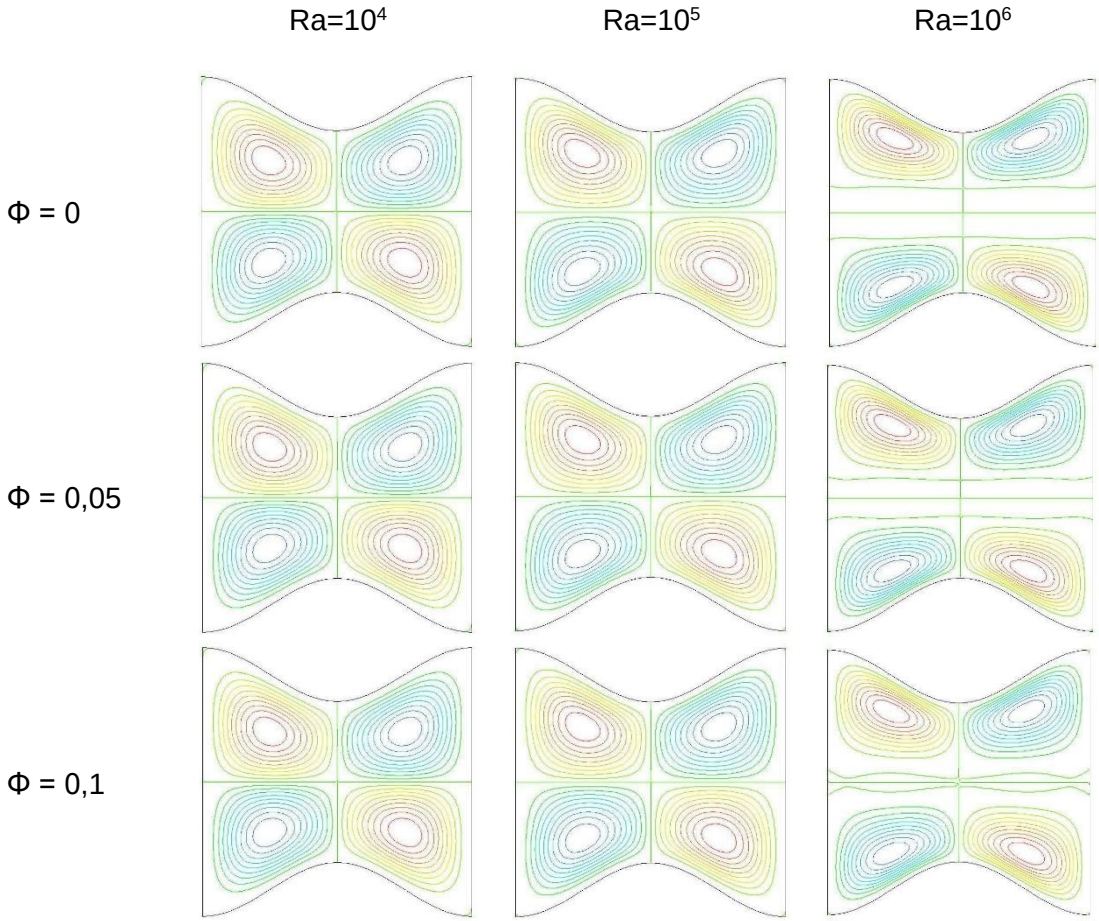
Aşağıda farklı genlik değerlerine sahip, 90^0 eğimli ve “1” dalgalı durum için kavitelerde meydana gelen akım çizgileri eğrileri görülmektedir.



Şekil 5.25. "0,05" Genlikli 90° Eğimli "1" Dalgalı Kavite için Akım Çizgileri



Şekil 5.26. "0,075" Genlikli 90° Eğimli "1" Dalgalı Kavite için Akım Çizgileri



Şekil 5.27. "0,1" Genlikli 90° Eğimli "1" Dalgalı Kavite için Akım Çizgileri

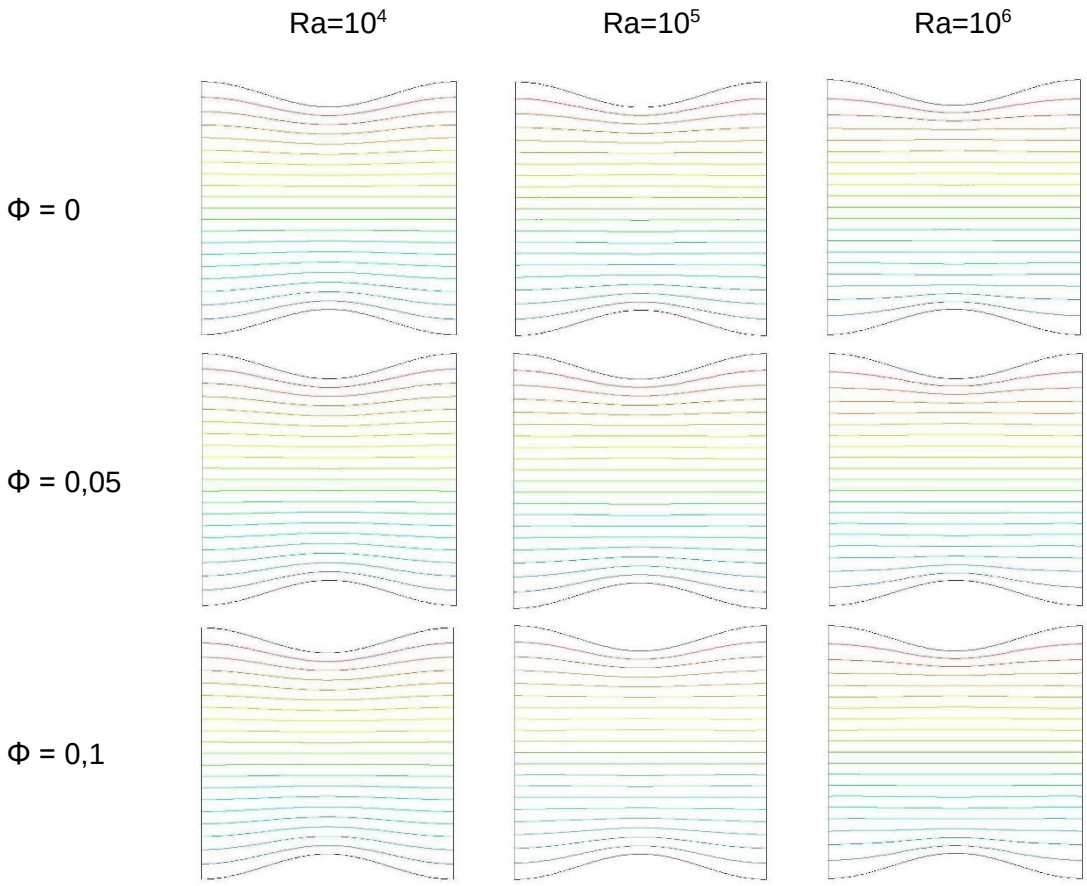
Şekil 5.25.-5.27.'de verilen kaviteler incelendiğinde 90° eğim verilmesiyle sıcak duvar yukarıda kalmakta ve sıcak duvarın kapalı bölgenin en üst noktasına gelmesiyle beraber konveksiyonun giderek zayıfladığı görülmektedir. Sıcak duvarın yukarıda kalması ve soğuk duvarın alt bölgede kalmasıyla akışın kararlı halde olduğu ve ısının sadece iletimle gerçekleştiği söylenebilir. Sıcak ve soğuk duvarlar arasında, çok zayıf akışkan hareketinde bile birbirine zıt yönde dönen hücreler oluşmuştur. Akım fonksiyonun değerinin çok küçük olmasından da sirkülasyonun olmadığı söylenebilir.

Rayleigh sayısının artmasına bağlı olarak oluşan bu hücreler birbirinden gittikçe uzaklaşmakta sıcak ve soğuk duvarlara doğru sıkışmakta ve hücrelerin arasında kalan akışkan giderek durgunlaşmaktadır.

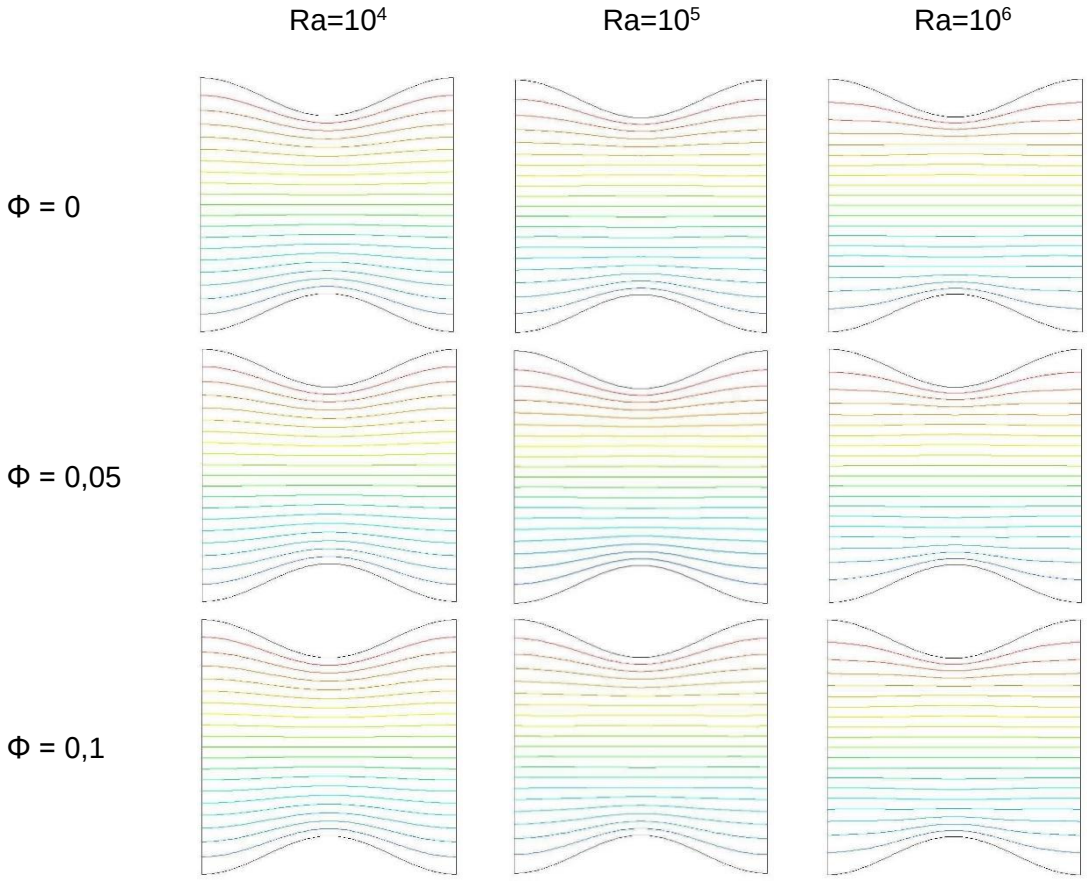
Genlik değerindeki ve hacim fraksiyonundaki artışların ise akış yapısı üzerinde çok etkili olmadığı görülmektedir.

5.5.2. Eş sıcaklık eğrileri

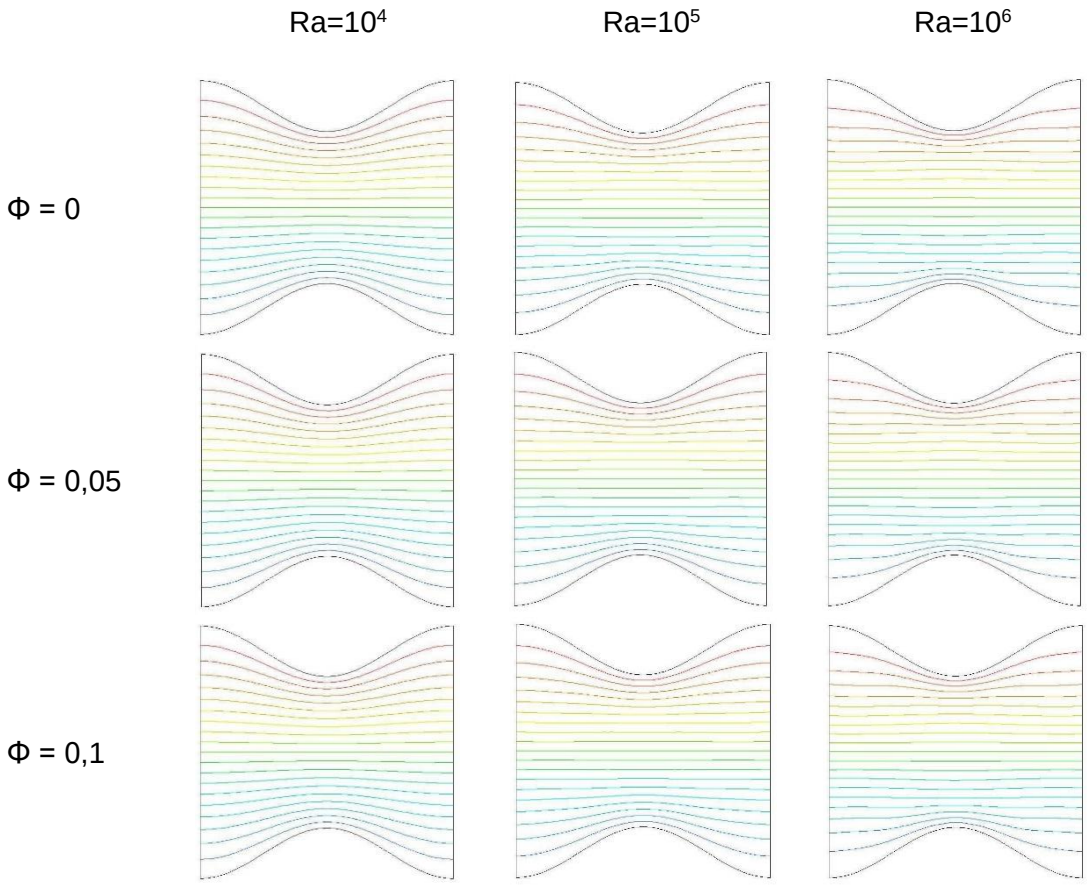
Aşağıda farklı genlik değerlerine sahip, 90^0 eğimli ve “1” dalgalı durum için kavitelerde meydana gelen eş sıcaklık eğrileri görülmektedir.



Şekil 5.28. "0,05" Genlikli 90° Eğimli "1" Dalgalı Kavite için Eş Sıcaklık Eğrileri



Şekil 5.29. "0,075" Genlikli 90° Eğimli "1" Dalgalı Kavite için Eş Sıcaklık Eğrileri



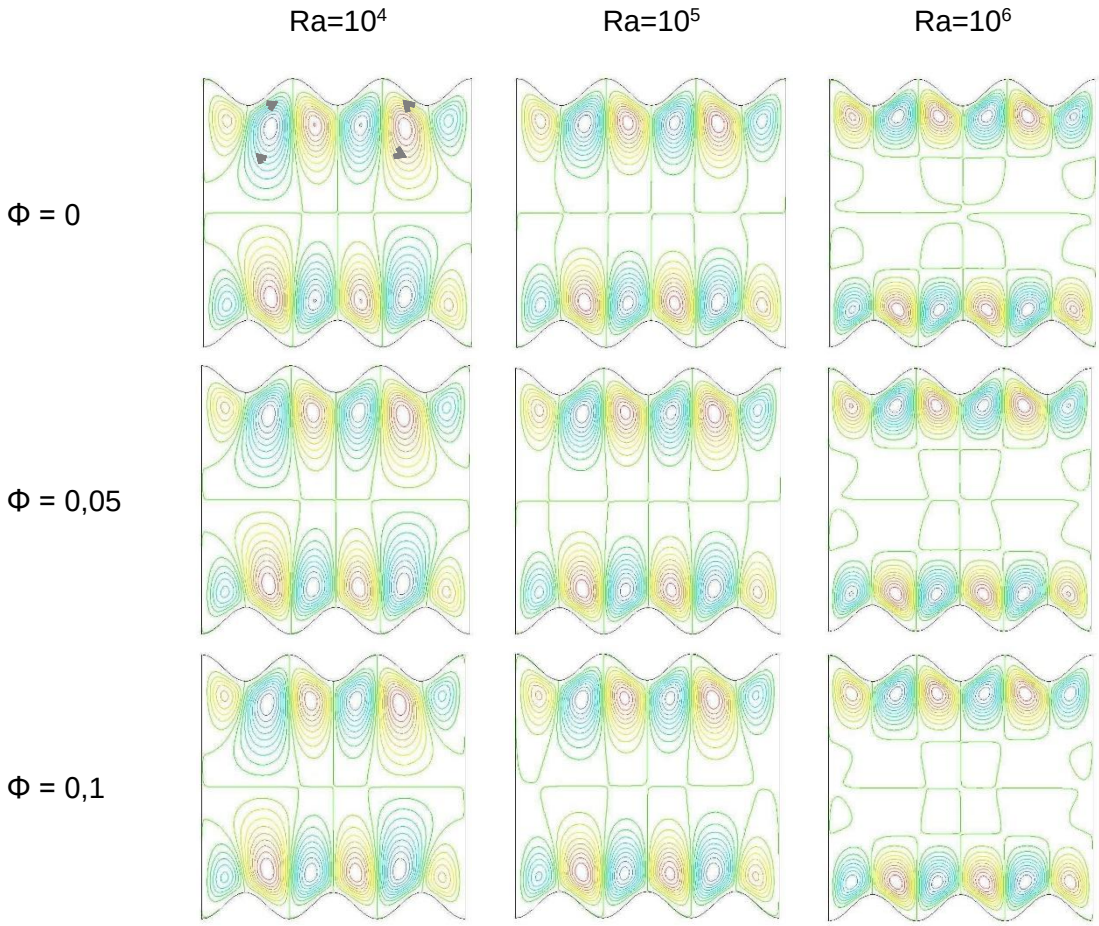
Şekil 5.30. "0,1" Genlikli 90° Eğimli "1" Dalgalı Kavite için Eş Sıcaklık Eğrileri

Şekil 5.28.-5.30.'da verilen eş sıcaklık eğrileri incelendiğinde kaviteye verilen 90°'lik eğim neticesinde sıcak duvar yukarıda kalmakta ve soğuk duvar aşağıda kaldığı için akış sirkülasyonu oluşamamaktadır. Sıcaklık değişimleri üzerinde akışkan hareketinin önemli bir etkisi yoktur. Akışkan hareketinin zayıf olmasından dolayı kavite içerisinde termal tabakalaşmalar oluşmaktadır. Akış kararlı halde bu da konveksiyon ile ısı transferini zayıflattığından iletimle ısı transferi şeklinde sıcak duvardan soğuk duvara ısı geçişi gerçekleşmektedir. Eş sıcaklık eğrileri iletimle ısı transferinde olduğu gibi davranarak sıcak ve soğuk yüzeylere paralel bir şekilde sıralanmışlardır. Eş sıcaklık eğrileri, farklı Rayleigh ve genlik değerlerinde kaydadeğer bir değişime uğramamaktadır. Hacim fraksiyonundaki artışın da eş sıcaklık eğrileri üzerinde bir etki yaratmadığı görülmektedir.

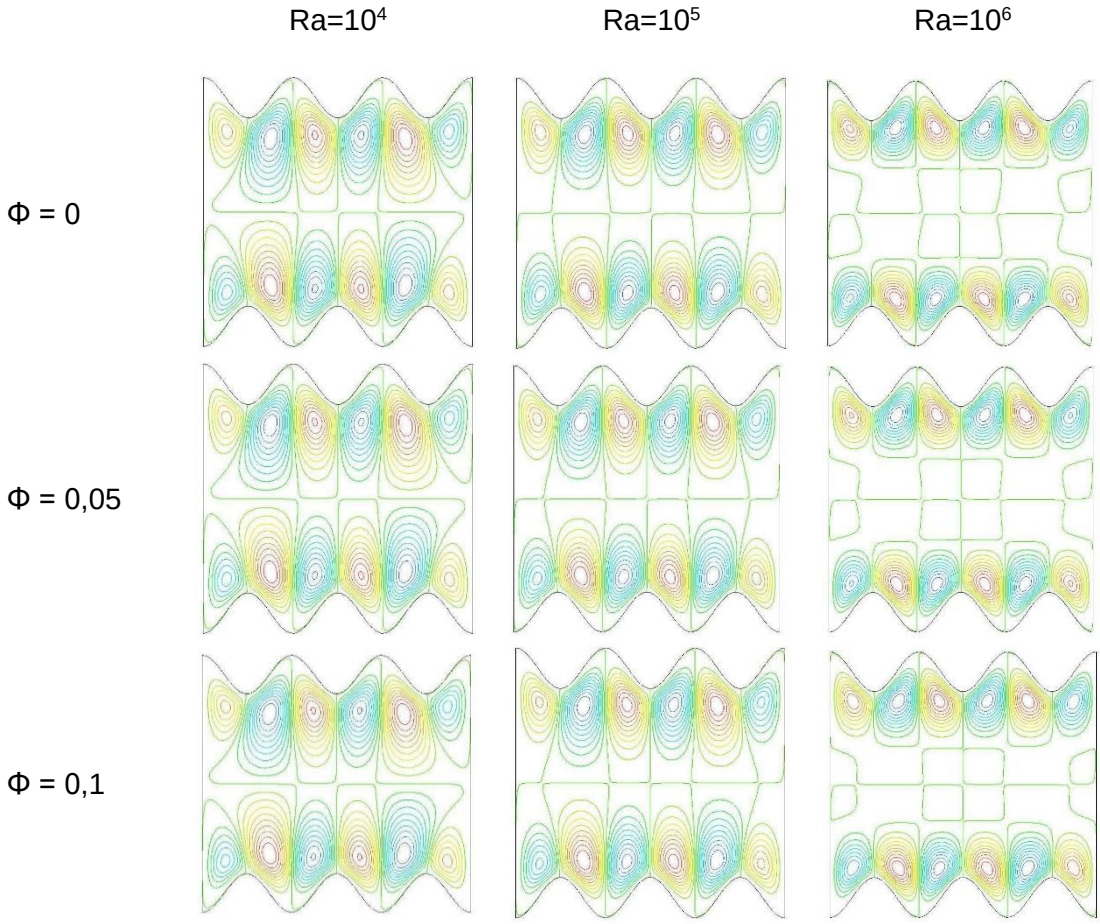
5.6. 90° Eğimli “3” Dalgalı Kavite için Analiz Sonuçları

5.6.1. Akım çizgileri eğrileri

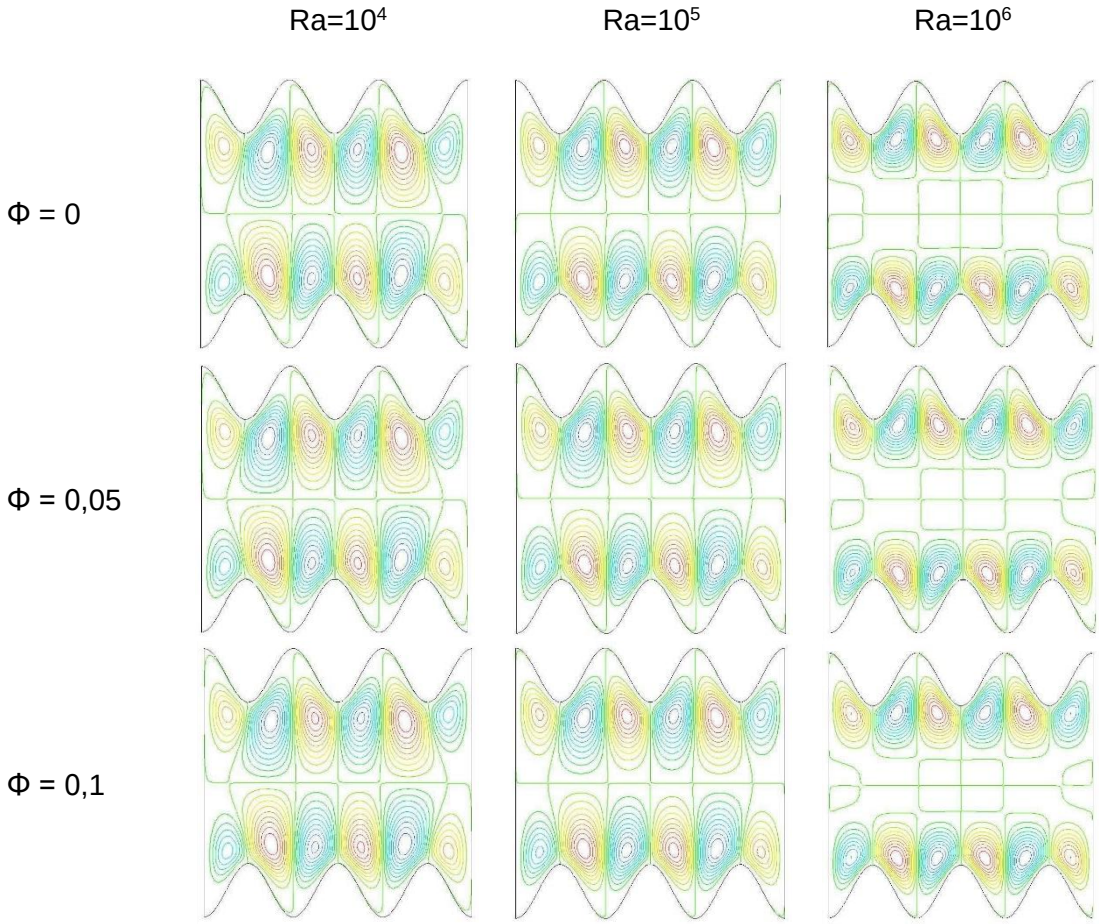
Aşağıda farklı genlik değerlerine sahip, 90^0 eğimli ve “3” dalgalı durum için kavitelerde meydana gelen akım çizgileri eğrileri görülmektedir.



Şekil 5.31. "0,05" Genlikli 90° Eğimli "3" Dalgalı Kavite için Akım Çizgileri



Şekil 5.32. "0,075" Genlikli 90° Eğimli "3" Dalgalı Kavite için Akım Çizgileri



Şekil 5.33. "0,1" Genlikli 90° Eğimli "3" Dalgalı Kavite için Akım Çizgileri

Şekil 5.31.-5.33.'te görüldüğü üzere kaviteye 90° eğim verilmesiyle sıcak duvar yukarıda kalmaktadır. Bu nedenle konveksiyon giderek zayıflamaktadır. Akım çizgileri kavite içerisinde birbirine zıt yönlerde dönen hücreler şeklinde oluşmaktadır. Zayıf akışkan hareketi sebebiyle sıcak ve soğuk duvarlar yakınında, dalga sayısının artmasına bağlı olarak "1" dalgalı kavitede oluşan 4 adet hücreden farklı olarak burada 12 adet hücre oluşmaktadır. Bu hücreler arasında akışkan neredeyse durgundur. Rayleigh sayısının artmasıyla zıt yönlerde dönen hücreler birbirinden uzaklaşarak sıcak ve soğuk duvarlara doğru sıkışmaktadır.

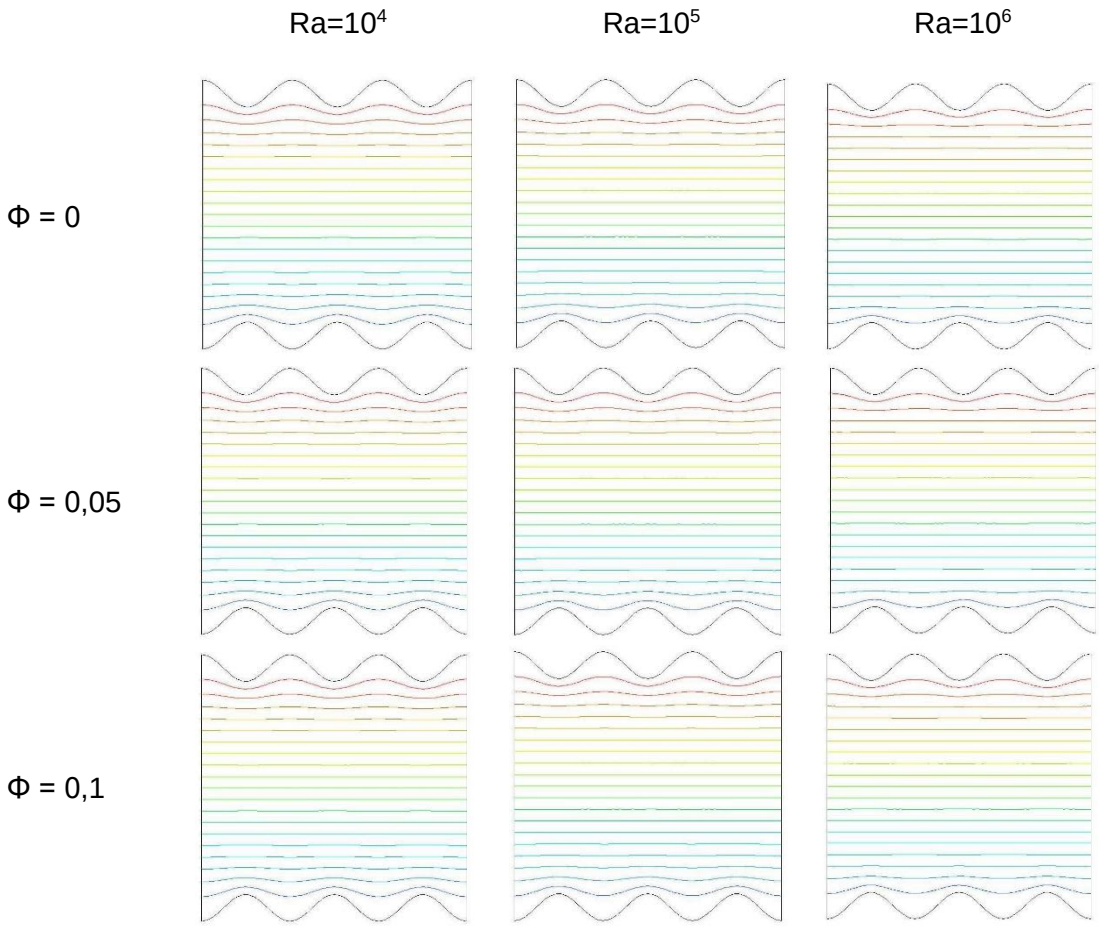
Hücreler arasındaki mesafe gittikçe açılarak akışın durgunlaştığı görülmektedir.

Hacim fraksiyonundaki artış ise akış yapısında önemli bir değişiklik meydana getirmemektedir.

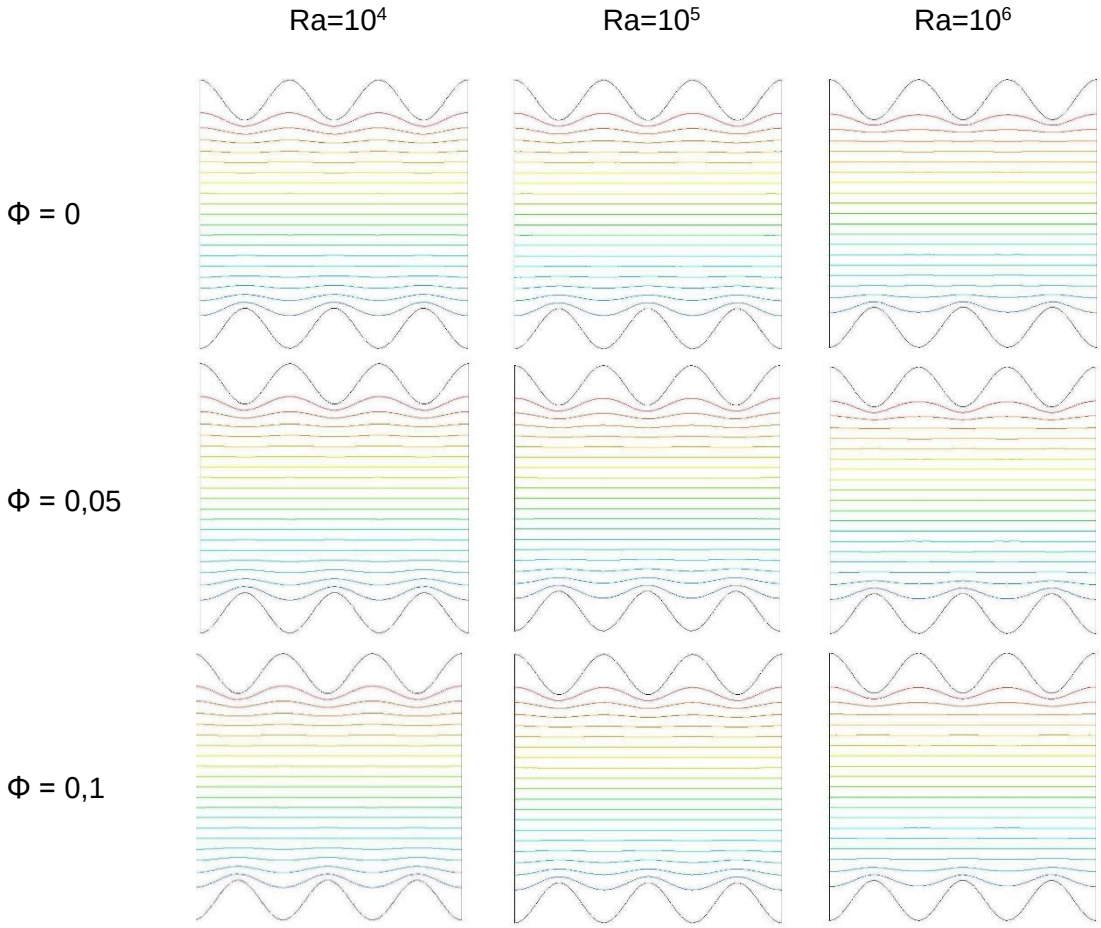
Genlik değerinin artmasına bağlı olarak benard hücrelerinin karşılıklı olarak birbirlerine yaklaştıkları görülmüştür.

5.6.2. Eş sıcaklık eğrileri

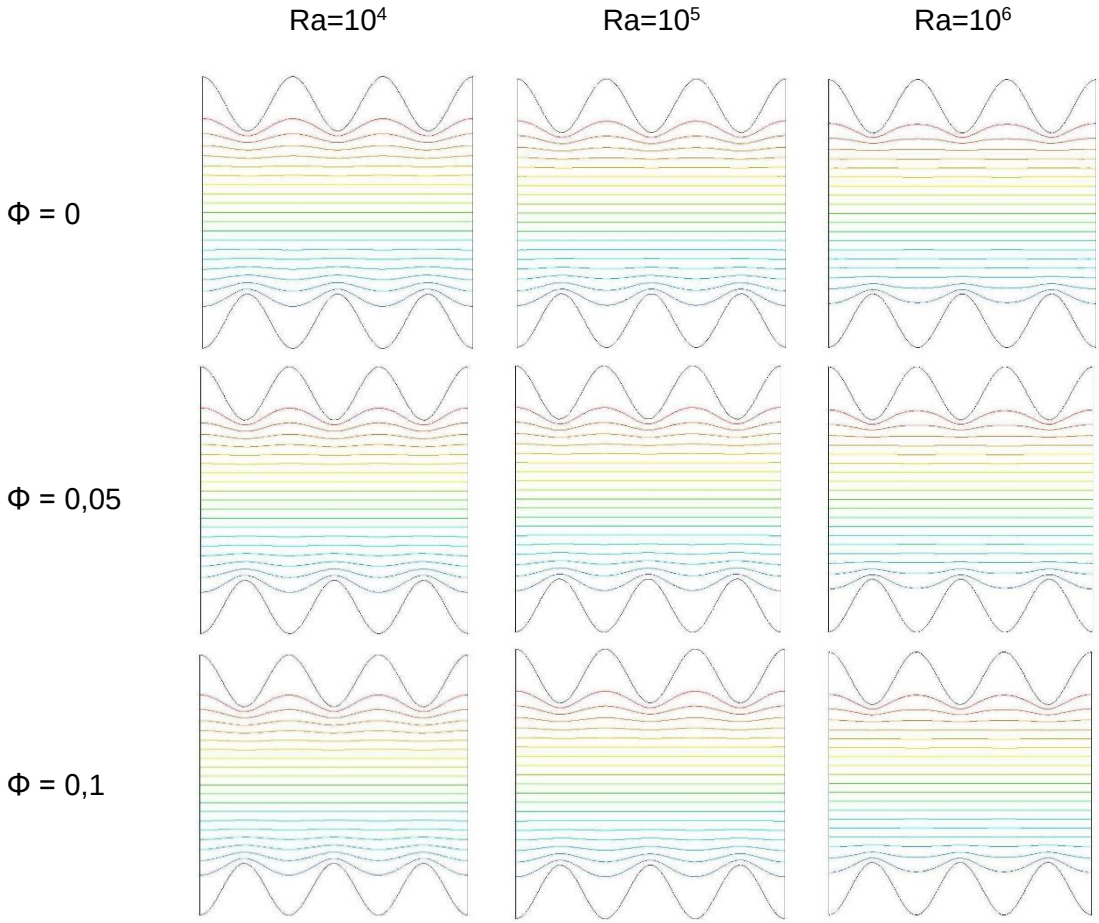
Aşağıda farklı genlik değerlerine sahip, 90^0 eğimli ve “3” dalgalı durum için kavitelerde meydana gelen eş sıcaklık eğrileri görülmektedir.



Şekil 5.34. "0,05" Genlikli 90° Eğimli "3" Dalgalı Kavite için Eş Sıcaklık Eğrileri



Şekil 5.35. "0,075" Genlikli 90° Eğimli "3" Dalgalı Kavite için Eş Sıcaklık Eğrileri



Şekil 5.36. "0,1" Genlikli 90° Eğimli "3" Dalgalı Kavite için Eş Sıcaklık Eğrileri

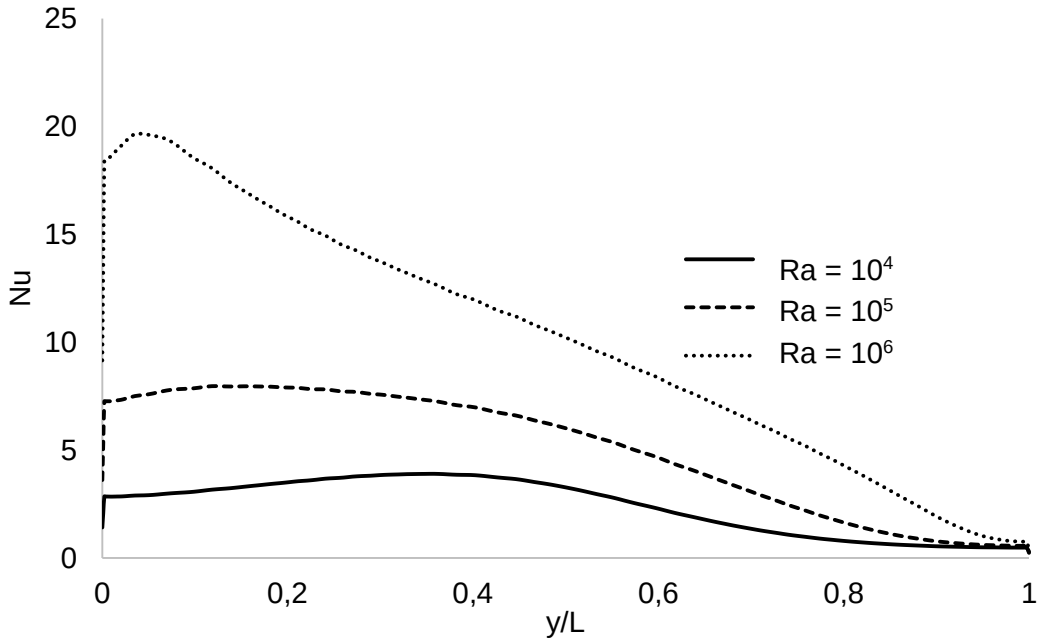
Şekil 5.34.-5.36.'da verilen eş sıcaklık eğrileri incelendiğinde kaviteye verilen 90° eğim neticesinde akış şiddeti azalmaktadır. Bu da konveksiyon ile ısı transferini zayıflattığından eş sıcaklık eğrileri farklı Rayleigh veya genlik değerlerinde kayda değer bir değişime uğramamaktadır. Eş sıcaklık eğrileri tamamen birbirine ve x-düzlemine paralel bir görünüm almaktadır. Dalga sayısının artmasına bağlı olarak, eş sıcaklık eğrilerinde, dalgalı duvarlara yakın olan bölgelerde paralel yapılarda hafif bozulmalar meydana gelip kıvrılma davranışı göstermektedir.

Hacim fraksiyonunda yapılan değişikliğin de aynı şekilde etkisiz kaldığı görülmektedir.

Genlik değerinin artmasıyla da akış yapısında önemli bir değişiklik meydana gelmemiştir.

5.7. 0° Eğimli “1” Dalgalı Kavite için Sıcak Duvar Boyunca Yerel Nusselt Değerlerinin Değişimleri

5.7.1. Rayleigh sayısının değişimlerine göre

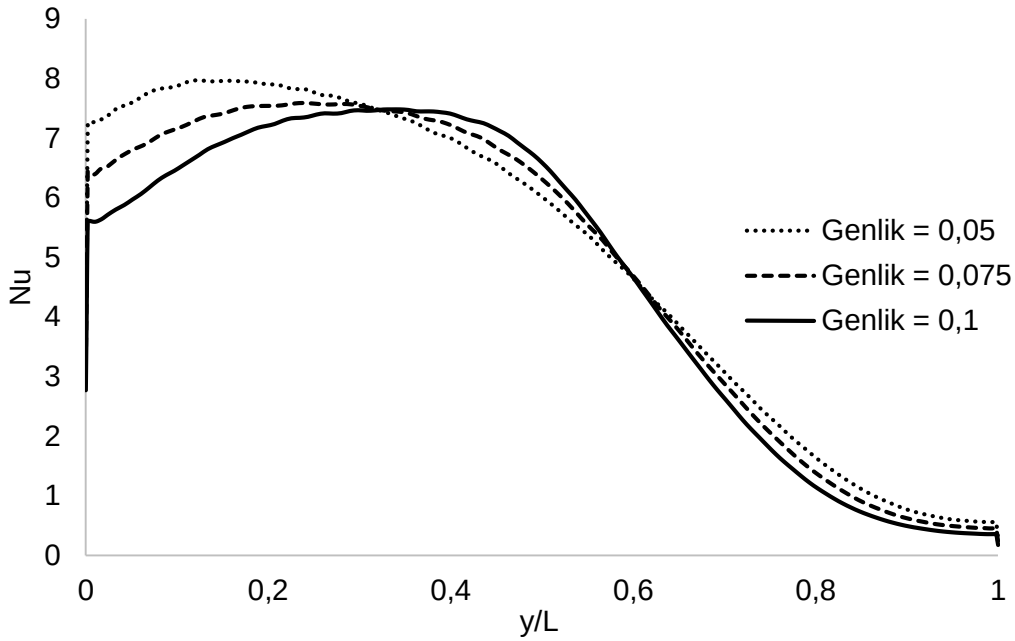


Şekil 5.37. "0,05" Genlik ve "0,05" Hacim Fraksiyonu için Yerel Nusselt Değerinin Rayleigh Sayısıyla Değişimi

Şekil 5.37.’de 0° eğimli “1” dalgalı, 0,05 hacim konsantrasyonuna sahip Cu-Su bazlı nanoakışkanla dolu, 0,05 genlik değerine sahip kavitenin sıcak duvar boyunca yerel Nusselt grafiği görülmektedir. Daha önceki eş sıcaklık eğrilerinden de görüldüğü gibi sıcak duvarın alt kısmında eş sıcaklık eğrileri daha yoğunken sıcaklık gradyanı daha yüksek, üstte doğru gidildikçe eğriler arası mesafe açılmakta sıcaklık gradyanı düşmektedir.

Bunun bir sonucu olarak Yerel Nusselt değeri sıcak duvarın alt kısımlarında maksimum değerdeyken yukarı doğru gidildikçe düşmektedir. Rayleigh sayısının artmasıyla şiddetlenen konvektif ısı transferinin bir sonucu olarak yerel Nusselt değeri de artmaktadır.

5.7.2. Genlik değerinin değişimlerine göre

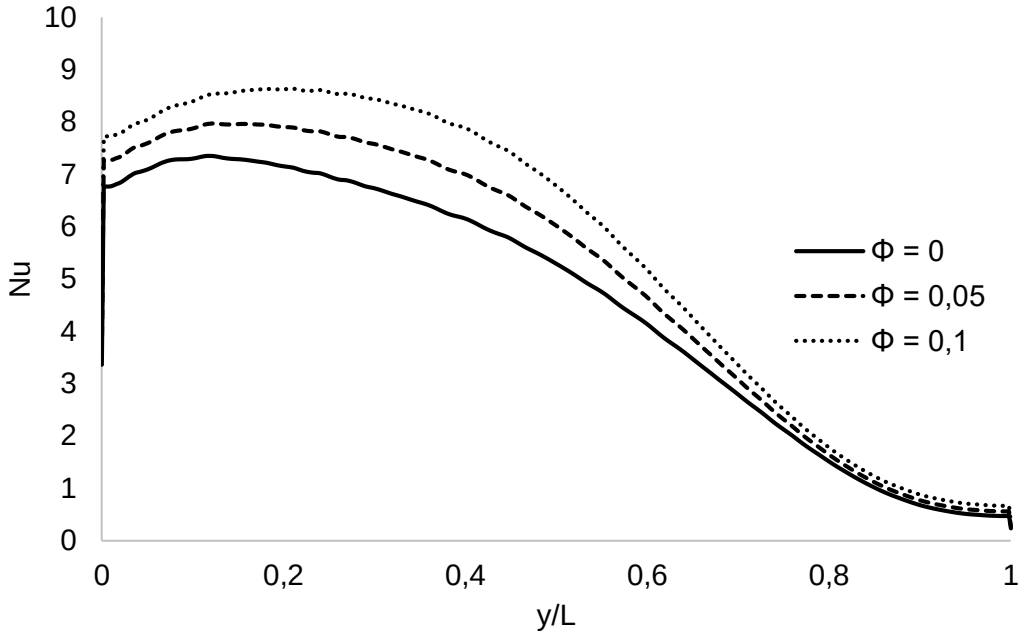


Şekil 5.38. "0,05" Hacim Fraksiyonu ve Ra= 10^5 için Yerel Nusselt Değerinin Genlik Değeriyle Değişimi

Şekil 5.38.'de 0° eğimli "1" dalgalı 0,05 hacim konsantrasyonuna sahip nanoakışkanla dolu, farklı genlik değerlerine sahip kavitelerin sıcak duvar boyunca yerel Nu grafiği görülmektedir.

Genlik değerinin artmasına bağlı olarak sıcak duvarın alt kısımlarında yerel Nu değerinin azaldığı, duvarın dalga tepesinde ise genlik değerinin artmasıyla yerel Nu değerinin arttığı görülmektedir. Sıcak duvarın üst kısmında ise Nu değerlerinde yine genlik değerlerinin artmasıyla yerel Nu değeri azalmaktadır. Yerel Nusselt sayısının, duvarın üst ucuna yakın yerlerde, birden daha küçük olduğu görülmektedir ki bu da, konvektif etkilerin zayıflayıp, kondüksiyonla ısı transferinin gerçekleştiğini göstermektedir.

5.7.3. Hacim fraksiyonlarının değişimlerine göre



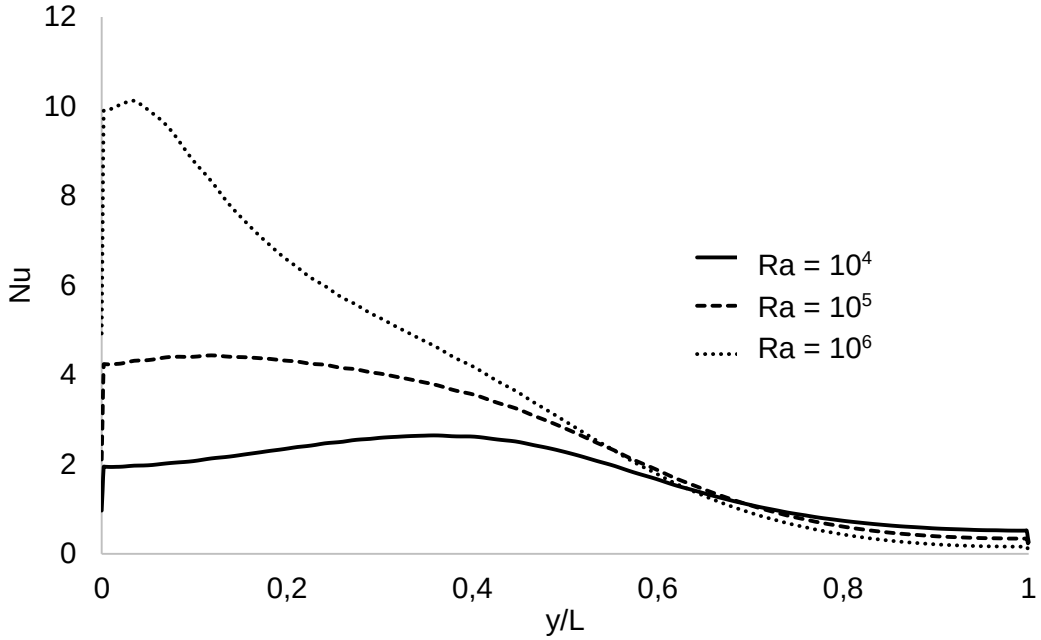
Şekil 5.39. "0,05" Genlik ve Ra= 10^5 için Yerel Nusselt Değerinin Hacim Fraksiyonuyla Değişimi

Şekil 5.39.'da 0° eğimli "1" dalgalı, 0,05 genlik değerine sahip kavitenin değişen hacim fraksiyonuyla sıcak duvar boyunca yerel Nu grafiği görülmektedir.

Saf akışkanla kıyaslandığında yüksek ısı iletim katsayısına sahip nanopartiküllerin ilavesiyle, hacimsel konsantrasyonunun artmasına bağlı olarak ısı transfer oranı artmaktadır. Isı transferinin artışına bağlı olarak sıcak duvar boyunca yerel Nu değeri de artış göstermiştir.

5.8. 45° Eğimli “1” Dalgalı Kavite için Yerel Nusselt Değerlerinin Değişimleri

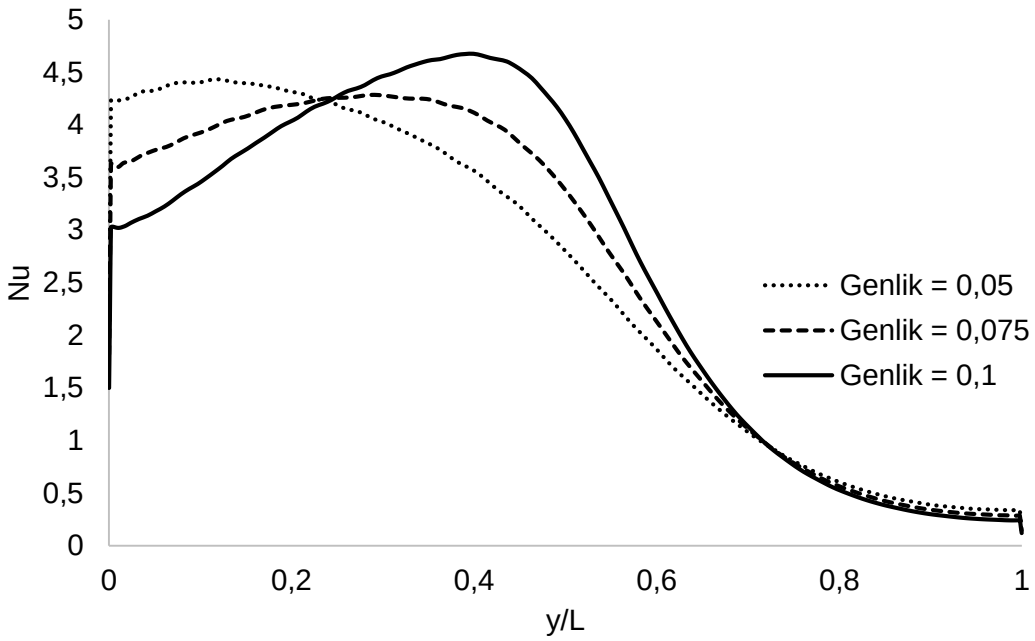
5.8.1. Rayleigh sayısının değişimlerine göre



Şekil 5.40. "0,05" Genlik ve "0,05" Hacim Fraksiyonu için Yerel Nusselt Değerinin Rayleigh Sayısıyla Değişimi

Şekil 5.40.’da 45° eğimli, “1” dalgalı ve 0,05 hacim konsantrasyonuna sahip Cu-Su bazlı nanoakışkanla dolu, 0,05 genlik değerine sahip kavitenin sıcak duvar boyunca yerel Nusselt grafiği görülmektedir. Şekil 5.37.’deki eğimsiz kavite ile karşılaştırıldığında sıcak duvarın alt kısmından yukarı doğru gidildikçe yerel Nu grafik eğrisi daha düz bir görünüm almakta ve yerel Nu daha hızlı bir biçimde düşüş göstermektedir. Yerel Nu sayısının değeri, eğim verilmemiş kaviteyle kıyasladığında daha düşüktür. Bununda sebebi, kavitenin saat ibresi yönünde 45° eğilerek, sıcak eşsıcaklıklı duvar, yerçekimi ile sıcaklık gradyanını daha kötü bir durumda düzene sokarak üst kısma yaklaşmaktadır ve kapalı bölge içindeki sirkülasyon, daha zayıf görünmektedir. Rayleigh sayısının artışının sıcak duvarın alt kısmında daha büyük bir farka yol açtığı, yukarı çıkıldıkça bu farkın azaldığı görülmektedir.

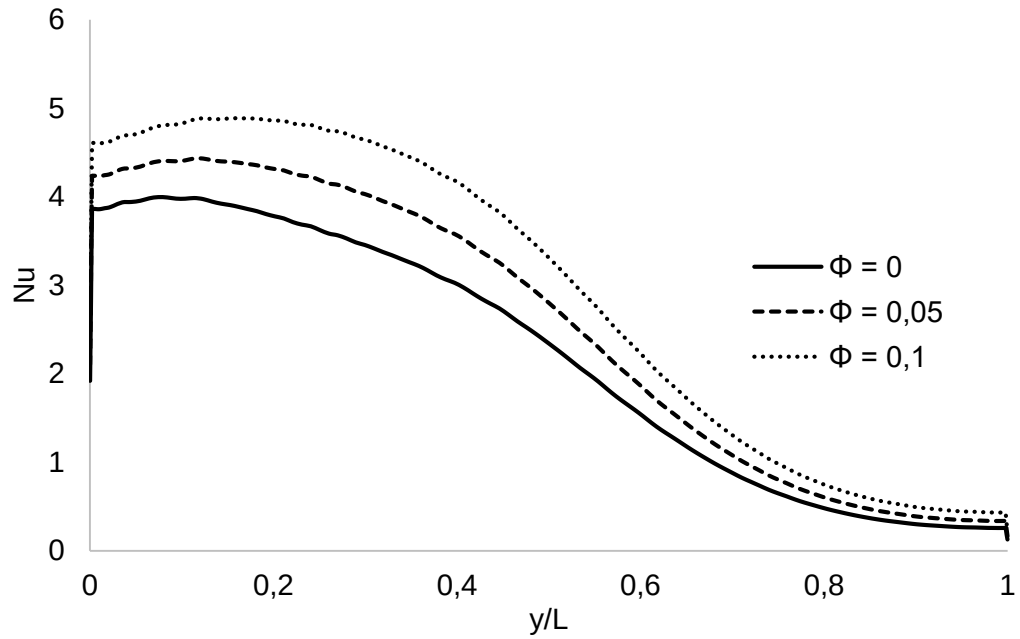
5.8.2. Genlik değerinin değişimlerine göre



Şekil 5.41. "0,05" Hacim Fraksiyonu, 45° eğimli , “1” dalgalı ve Ra= 10^5 için Yerel Nusselt Değerinin Genlik Değeriyle Değişimi

Şekil 5.41.’de 45° eğimli, “1” dalgalı, 0,05 hacim konsantrasyonuna sahip Cu-Su bazlı nanoakışkanla dolu, farklı genlik değerlerine sahip kavitelerin sıcak duvar boyunca Yerel Nu grafiği görülmektedir. Şekil 5.38.’deki eğimsiz kavite ile karşılaştırıldığında Yerel Nu değerleri açısından sıcak duvarın alt kısmında meydana gelen fark dalga tepesinde yeniden oluşmakta, yukarı doğru çıkıldıkça bu farkın yok olduğu görülmektedir. Yerel Nu sayısı, eş sıcaklık eğrilerindeki davranışların bir göstergesi olarak sıcak duvarın üst kısmında mininum bir değer almaktadır. Genlik değerinin artmasıyla yüzey alanın azalmasına bağlı olarak ısı transfer miktarı azalmaktadır.

5.8.3. Hacim fraksiyonlarının değişimlerine göre

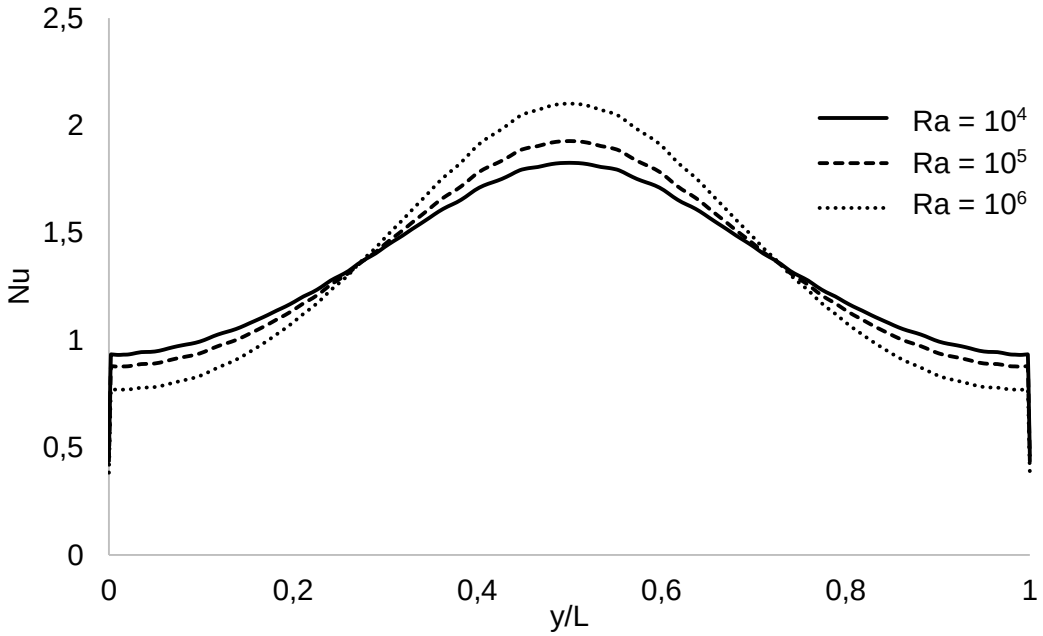


Şekil 5.42. "0,05" Genlik, 45° eğimli “1” dalgalı, ve Ra= 10^5 için Yerel Nusselt Değerinin Hacim Fraksiyonuyla Değişimi

Şekil 5.42.’de 45° eğimli “1” dalgalı, 0,05 genlik değerine sahip kavitenin değişen hacim fraksiyonuyla sıcak duvar boyunca yerel Nu grafiği görülmektedir. Hacimsel konsantrasyonun artmasına bağlı olarak ısı transfer oranı artmakta ve ısı transferinin artışına bağlı olarak sıcak duvar boyunca yerel Nu değerinin arttığı görülmektedir.

5.9. 90° Eğimli “1” Dalgalı Kavite için Yerel Nusselt Değerlerinin Değişimleri

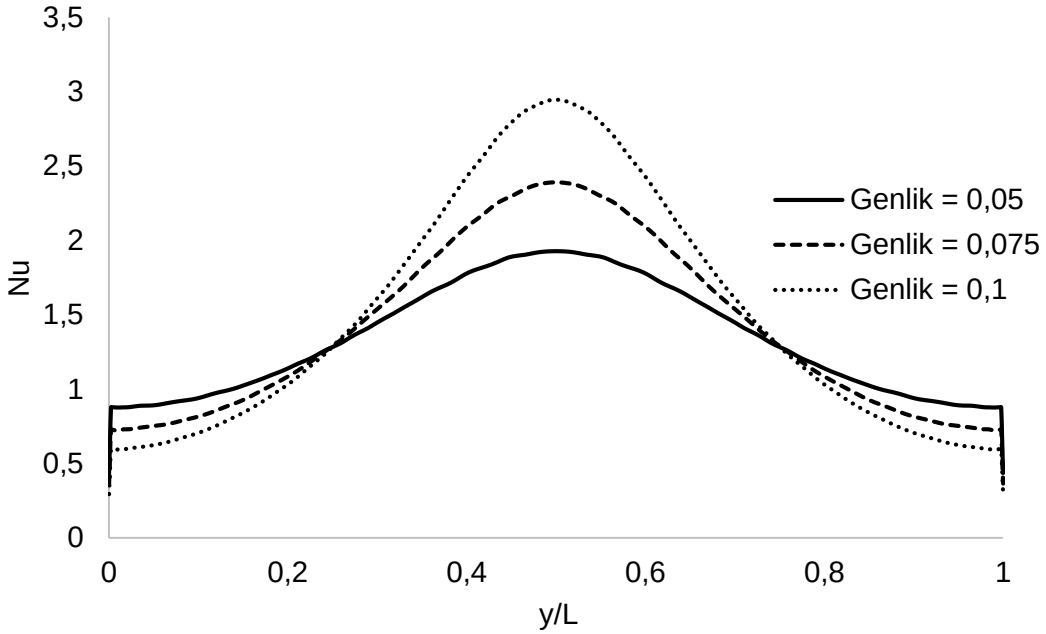
5.9.1. Rayleigh sayısının değişimlerine göre



Şekil 5.43. "0,05" Genlik, 90° eğimli “1” dalgalı ve "0,05" Hacim Fraksiyonu için Yerel Nusselt Değerinin Rayleigh Sayısıyla Değişimi

Şekil 5.43.’te 90° eğimli “1” dalgalı 0,05 hacim konsantrasyonuna sahip nanoakışkanla dolu, 0,05 genlik değerine sahip kavitenin sıcak duvar boyunca yerel Nu grafiği görülmektedir. Daha önceki eş sıcaklık eğrilerinden de görüldüğü gibi sıcak duvarın yukarıda kalmasına bağlı olarak konvektif ısı transferi zayıflamaktadır. Isı transferi iletimle gerçekleşmektedir. Nusselt değerinin 1 den küçük olduğu yerlerde iletimle ısı transferi gerçekleşmektedir. Bu sebeple, eğim açısının verilmediği durumla kıyaslandığında yerel Nu değeri en düşük değeri almaktadır. Buna bağlı olarak Rayleigh sayısının artışı, sıcak duvarın ortasında etkisini göstererek yerel Nu değerinde artışa neden olmuştur.

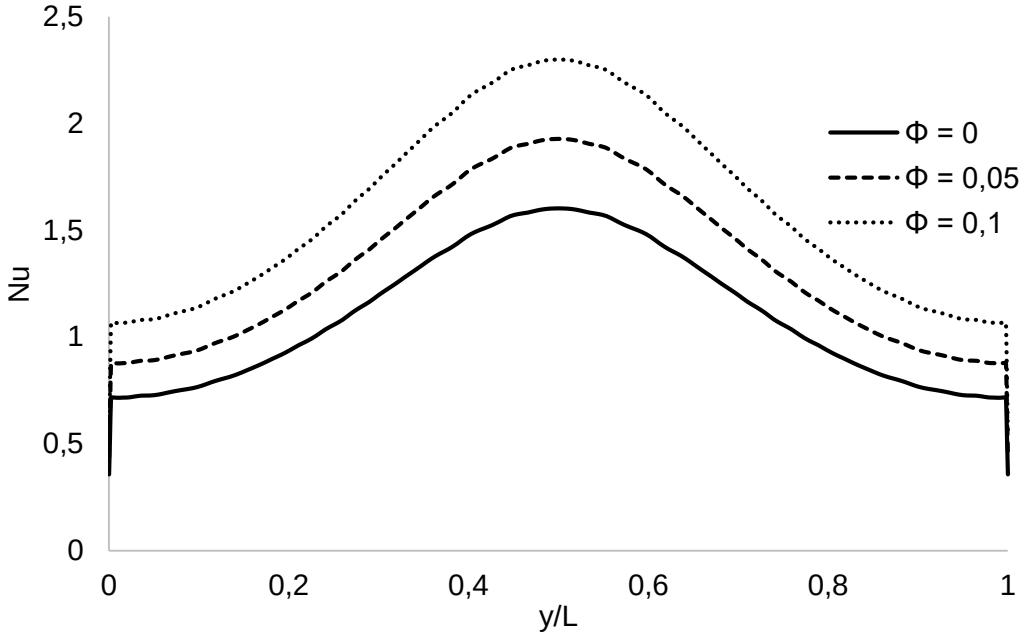
5.9.2. Genlik değerinin değişimlerine göre



Şekil 5.44. "0,05" Hacim Fraksiyonu, 90° eğimli "1" dalgalı ve Ra= 10^5 için Yerel Nusselt Değerinin Genlik Değeriyle Değişimi

Şekil 5.44.'de 90° eğimli "1" dalgalı 0,05 hacim konsantrasyonuna sahip nanoakışkanla dolu, farklı genlik değerlerine sahip kavitelerin sıcak duvar boyunca yerel Nu grafiği görülmektedir. Şekilden de görüldüğü üzere duvarın alt kısmında genlik değerindeki artış, yerel Nu değerinde azalmaya neden olmakta, ancak dalga tepesine doğru çıkıldıkça genlik değerindeki artış, yerel Nu değerinde önemli bir artış meydana getirmektedir. Sıcak duvarın en üst kısmında ise alt kısma benzer davranış sergilemektedir.

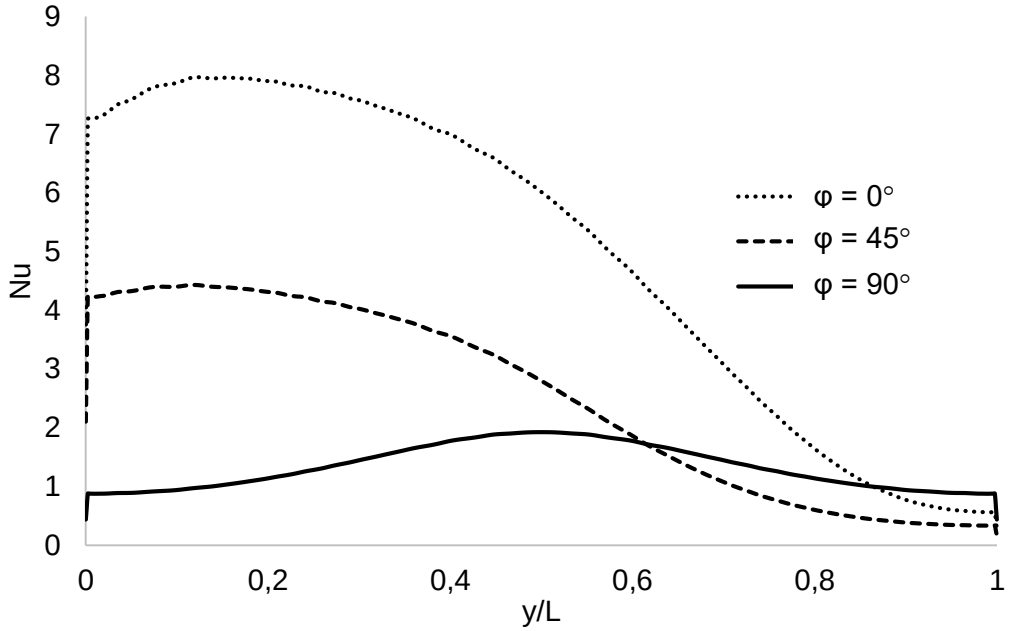
5.9.3. Hacim fraksiyonlarının değişimlerine göre



Şekil 5.45. "0,05" Genlik 90° eğimli "1" dalgalı ve Ra= 10^5 için Yerel Nusselt Değerinin Hacim Fraksiyonuyla Değişimi

Şekil 5.45.'te 90° eğimli "1" dalgalı, 0,05 genlik değerine sahip kavitenin değişen hacim fraksiyonuyla kavite boyunca Yerel Nusselt grafiği görülmektedir. Nanoakışkan içerisinde bulunan nanopartiküllerin hacimsel konsantrasyonunun arttırılmasıyla ısı transfer oranı artmaktadır. Isı transfer oranında meydana gelen artışa istinaden Yerel Nusselt değerinin arttığı görülmektedir. Sıcak duvarın tam ortasında yani dalganın tepesinde maksimum değer almaktadır.

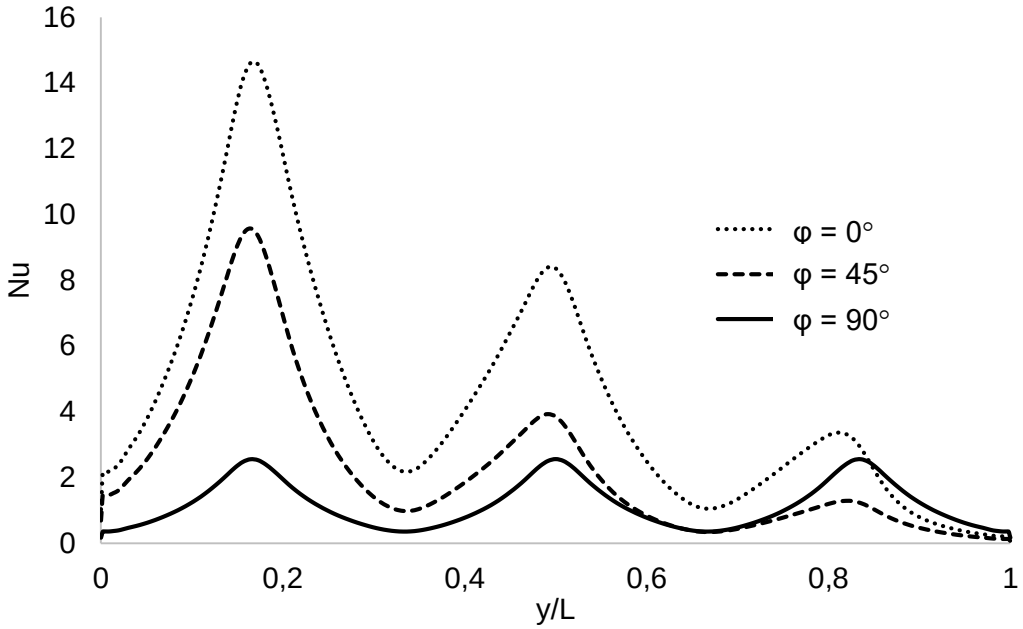
5.10. “0,05” Genlikli “1” Dalgalı Kavite için Yerel Nusselt Değerinin Açıyla Beraber Değişimi



Şekil 5.46. "0,05" Genlikli "1" Dalgalı Kavite için Yerel Nusselt Değerinin Açıyla Değişimi

Şekil 5.46.’da “0,05” genlikli, “1” dalgalı kavite için, farklı eğim açılarındaki sıcak duvar boyunca yerel Nu değişimleri verilmiştir. Eğimin artmasına bağlı olarak sıcak duvar üst kısma yaklaşmakta, bunun sonucunda sıcak duvar boyunca ısınan akışkan sirkülasyon gerçekleştirememektedir. Sirkülasyonun azalmasına bağlı olarak konveksiyonla ısı transferi azalmakta ve kararlı bir halde ısı transferi iletimle gerçekleşmektedir. Bu nedenle kaviteye verilen saat yönündeki eğimler yerel Nu değerini azaltmıştır.

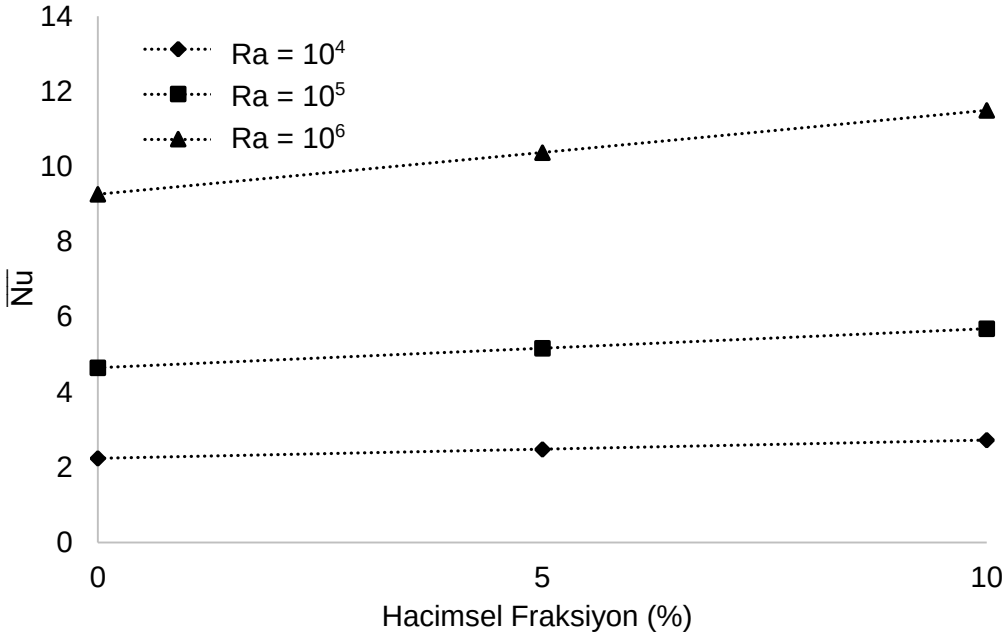
5.11. “0,05” Genlikli “3” Dalgalı Kavite için Yerel Nusselt Değerinin Açıyla Beraber Değişimi



Şekil 5.47. "0,05" Genlikli "3" Dalgalı Kavite için Yerel Nusselt Değerinin Açıyla Değişimi

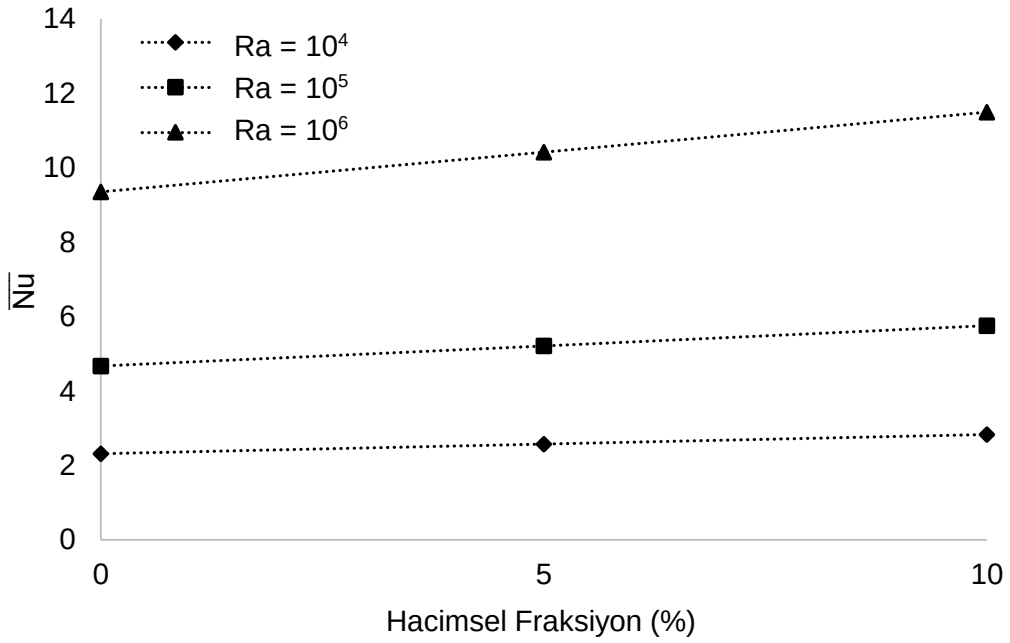
Şekil 5.47.’de “0,05” genlikli, “3” dalgalı kavite için farklı eğim açılarındaki sıcak duvar boyunca yerel Nu değişimleri verilmiştir. Şekil 5.46. ile karşılaştırıldığında tek dalgalı kavite için olan sonuçlara benzer şekilde, eğimdeki artış, sıcak duvar boyunca olan yerel Nu değerini azaltmıştır. Bir taraftan da dalga sayısındaki artışla, ısı transfer miktarı artarak, yerel Nu değerlerinde bir artış olduğu görülmüştür.

5.12. “0,05” Genlikli 0° Eğimli “1” Dalgalı Kavite için Ortalama Nusselt Değerlerinin Değişimleri



Şekil 5.48. ”0,05” Genlikli 0° Eğimli "1" Dalgalı Kavite için Ortalama Nu Değerinin Rayleigh Sayısına Göre Değişimi

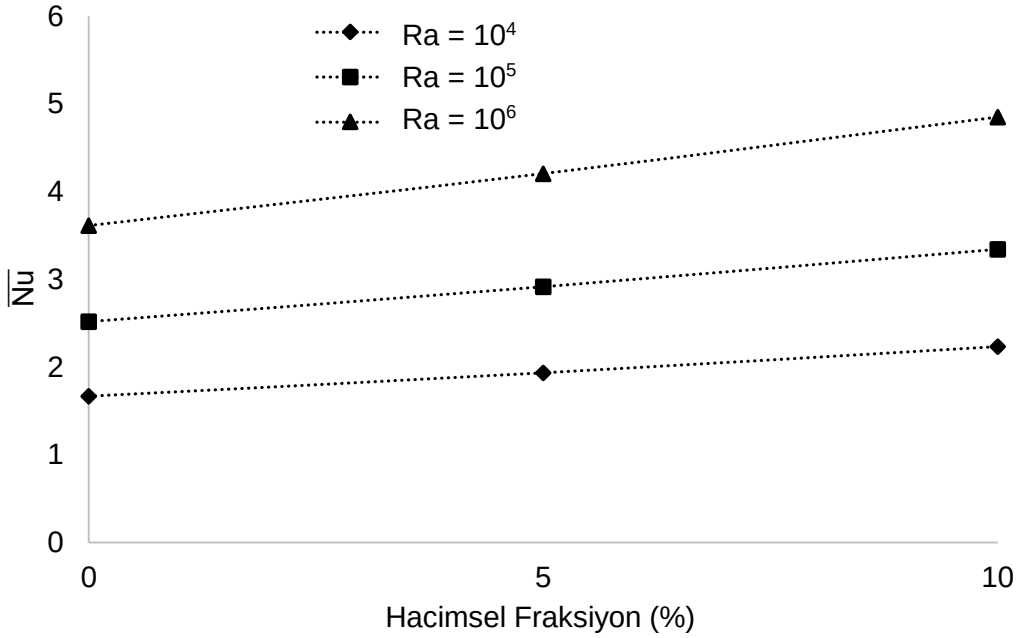
5.13. “0,05” Genlikli 0° Eğimli “3” Dalgalı Kavite için Ortalama Nusselt Değerlerinin Değişimleri



Şekil 5.49. “0,05” Genlikli 0° Eğimli "3" Dalgalı Kavite için Ortalama Nu Değerinin Rayleigh Sayısına Göre Değişimi

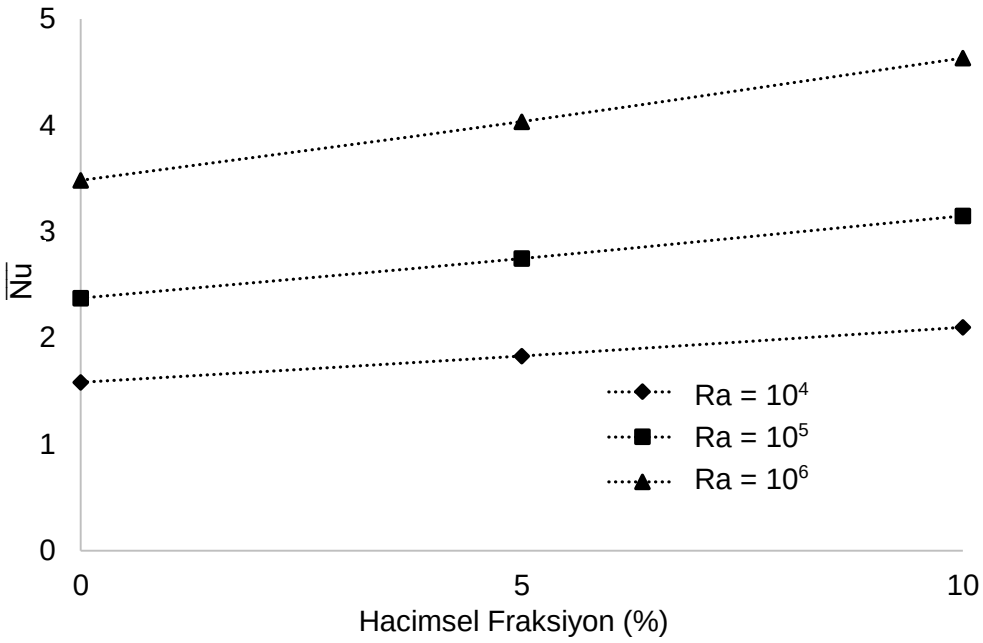
Şekil 5.48. ve 5.49.’da 0° eğimli, “0,05” genlikli ve “1” ve “3” dalgalı kapalı kavitelerin Rayleigh sayılarındaki değişimlere göre ortalama Nu değerleri gösterilmiştir. Genel olarak Rayleigh sayılarındaki artışla beraber şiddetlenen akış neticesinde ısı transfer oranı artmış ve sonuç olarak ortalama Nu değerleri artış göstermiştir. 3 dalgalı olması halinde 1 dalgalı durumuyla kıyaslandığında Ortalama Nusselt değerinin daha fazla olduğu görülmektedir. Dalga sayısı arttıkça yüzey alanı artmakta ve ortalama Nusselt değeri yükselmektedir.

5.14. “0,05” Genlikli 45° Eğimli “1” Dalgalı Kavite için Ortalama Nusselt Değerlerinin Değişimleri



Şekil 5.50. ”0,05” Genlikli 45° Eğimli "1" Dalgalı Kavite için Ortalama Nu Değerinin Rayleigh Sayısına Göre Değişimi

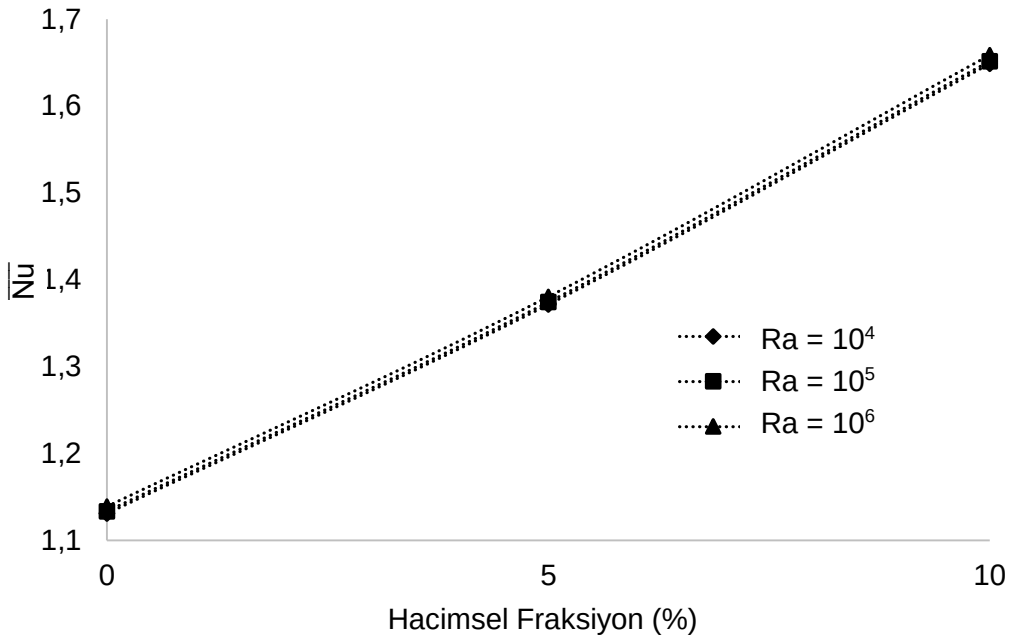
5.15. “0,05” Genlikli 45° Eğimli “3” Dalgalı Kavite için Ortalama Nusselt Değerlerinin Değişimleri



Şekil 5.51. ”0,05” Genlikli 45° Eğimli "3" Dalgalı Kavite için Ortalama Nu Değerinin Rayleigh Sayısına Göre Değişimi

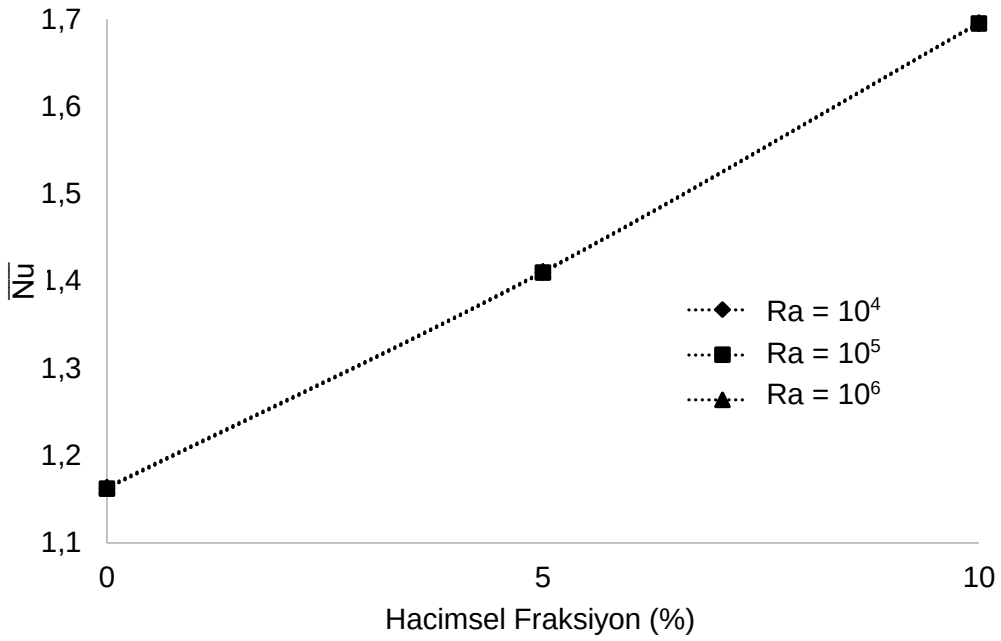
Şekil 5.50. ve 5.51.’de 45° eğimli ve “1” ve “3” dalgalı kapalı bölgelerin Rayleigh sayılarındaki değişimlere göre ortalama Nu değerleri gösterilmiştir. Rayleigh sayısının artmasıyla akış sirkülasyonu artmış ve ortalama Nu değerleri artış göstermiştir. Şekil 5.48. ve 5.49.’daki eğim verilmemiş durumla karşılaştırıldığında, eğim artışıyla ortalama Nu değerinde azalma olduğu, bununda nedeninin sıcak duvarın üst bölgeye yaklaşarak sirkülasyonun baskılanmasından kaynaklandığı söylenebilir. Ayrıca dalga sayılarındaki artışında yine aynı şekilde ortalama Nu değerlerinde artışa neden olduğu görülmüştür.

5.16. “0,05” Genlikli 90° Eğimli “1” Dalgalı Kavite için Ortalama Nusselt Değerlerinin Değişimleri



Şekil 5.52. ”0,05” Genlikli 90° Eğimli "1" Dalgalı Kavite için Ortalama Nu Değerinin Rayleigh Sayısına Göre Değişimi

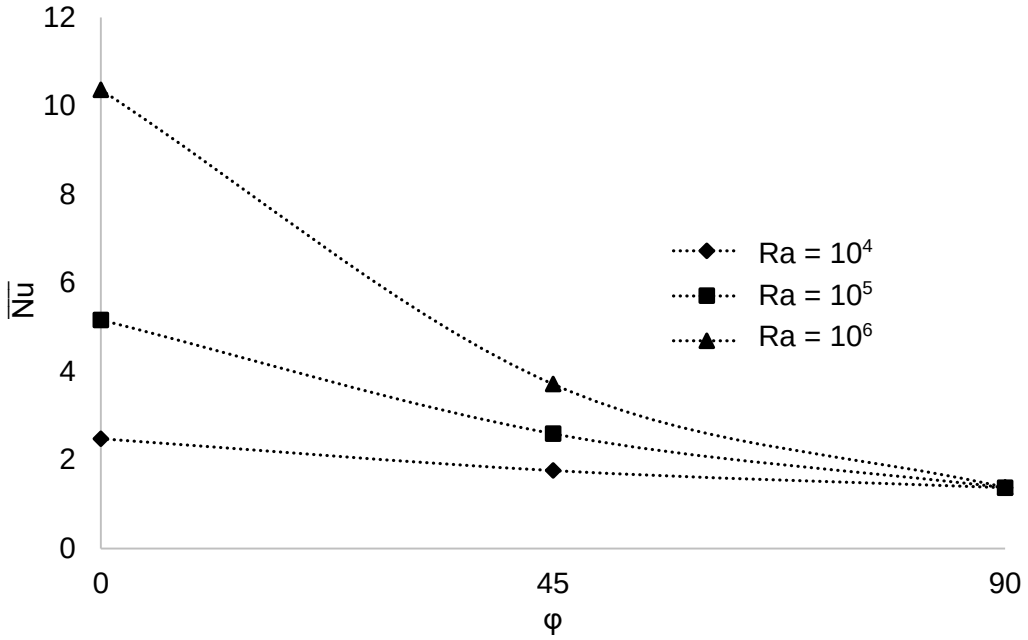
5.17. “0,05” Genlikli 90° Eğimli “3” Dalgalı Kavite için Ortalama Nusselt Değerlerinin Değişimleri



Şekil 5.53. ”0,05” Genlikli 90° Eğimli "3" Dalgalı Kavite için Ortalama Nu Değerinin Rayleigh Sayısına Göre Değişimi

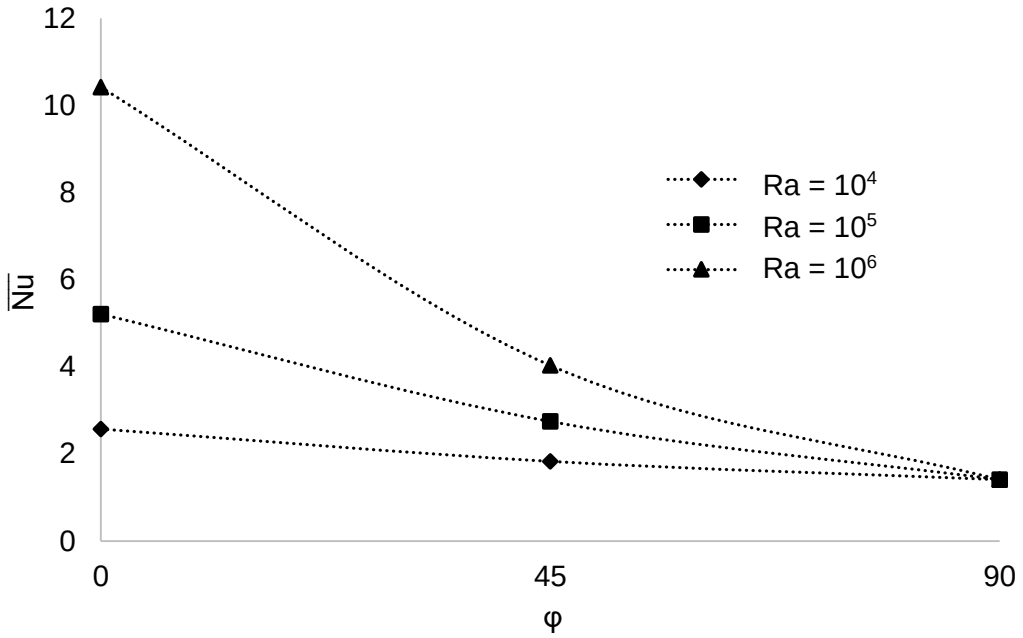
Şekil 5.52. ve 5.53.’de 90° eğimli, “1” ve “3” dalgalı kapalı bölgelere ait Rayleigh sayılarındaki değişimlere bağlı ortalama Nu grafikleri verilmiştir. Görüldüğü üzere 90°’lik eğim sonucunda sıcak duvarın yukarıda kalmasıyla akış şiddeti azalmış ve Rayleigh sayılarındaki değişim akış yapısında önemli bir değişikliğe yol açmamıştır. Yani Rayleigh sayısı arttıkça ortalama Nusselt değerlerinde önemli bir artış olmamıştır. Eğim açısının olmadığı durumla kıyaslandığında, 90°’lik eğim sonucunda, iletimle ısı transferinin gerçekleşmesi nedeniyle ortalama Nusselt değerlerinde düşüş meydana gelmektedir. Dalga sayılarındaki artışla, ortalama Nusselt değerleri artmaktadır.

5.18. “1” Dalgalı Kavite için Ortalama Nusselt Değerlerinin Açıya Göre Değişimleri



Şekil 5.54. "0,05" Hacim Fraksiyonu "0,05" Genlik Değeri ve "1" Dalgalı Kavite için Ortalama Nu Değerinin Rayleigh Sayısına Göre Değişimi

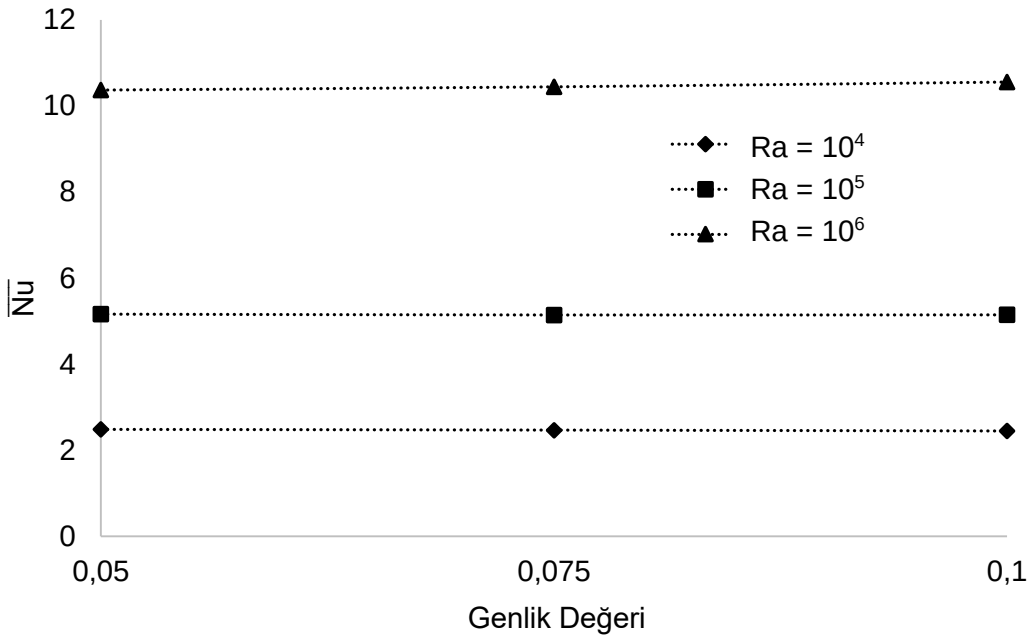
5.19. “3” Dalgalı Kavite için Ortalama Nusselt Değerlerinin Açıya Göre Değişimleri



Şekil 5.55. "0,05" Hacim Fraksiyonu "0,05" Genlik Değeri ve "3" Dalgalı Kavite için Ortalama Nu Değerinin Rayleigh Sayısına Göre Değişimi

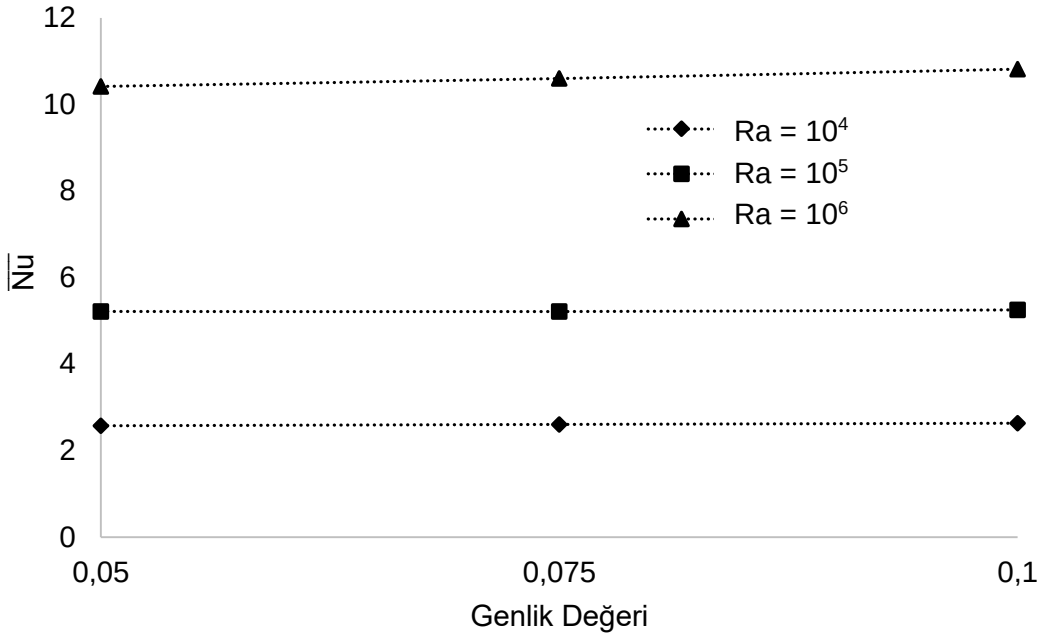
Şekil 5.54. ve 5.55.’te ortalama Nu değerlerinin eğime bağlı olarak gösterdiği değişikler incelenmiştir. Görüldüğü üzere dalga sayısından bağımsız olarak saat yönündeki eğim arttıkça ortalama Nu değerleri azalma göstermiştir. 90°’lik eğimde ortalama Nu değeri minimum değerine ulaşmıştır.

5.20. “1” Dalgalı Kavite için Ortalama Nusselt Değerlerinin Genlik Değerine Göre Değişimleri



Şekil 5.56. "1" Dalgalı ve 0° Eğimli Kavite için "0,05" Hacim Fraksiyonunda Ortalama Nu Değerinin Genlik Değeriyle Değişimi

5.21. “3” Dalgalı Kavite için Ortalama Nusselt Değerlerinin Genlik Değerine Göre Değişimleri



Şekil 5.57. "3" Dalgalı ve 0° Eğimli Kavite için "0,05" Hacim Fraksiyonunda Ortalama Nu Değerinin Genlik Değeriyle Değişimi

Şekil 5.56. ve 5.57.’de ortalama Nu değerlerinin genlik değerine bağlı olarak gösterdiği değişikler incelenmiştir. Görüldüğü üzere küçük Rayleigh sayılarında, genlik değerindeki artışın ortalama Nu değeri üzerinde önemli bir değişikliğe yol açmadığı ve akış yapısı üzerinde etkili olmadığı görülmüştür. Yüksek Rayleigh değerlerinde ise, $Ra=10^6$ da artan genlik sayısıyla ortalama Nusselt değerlerinde artış olmaktadır.

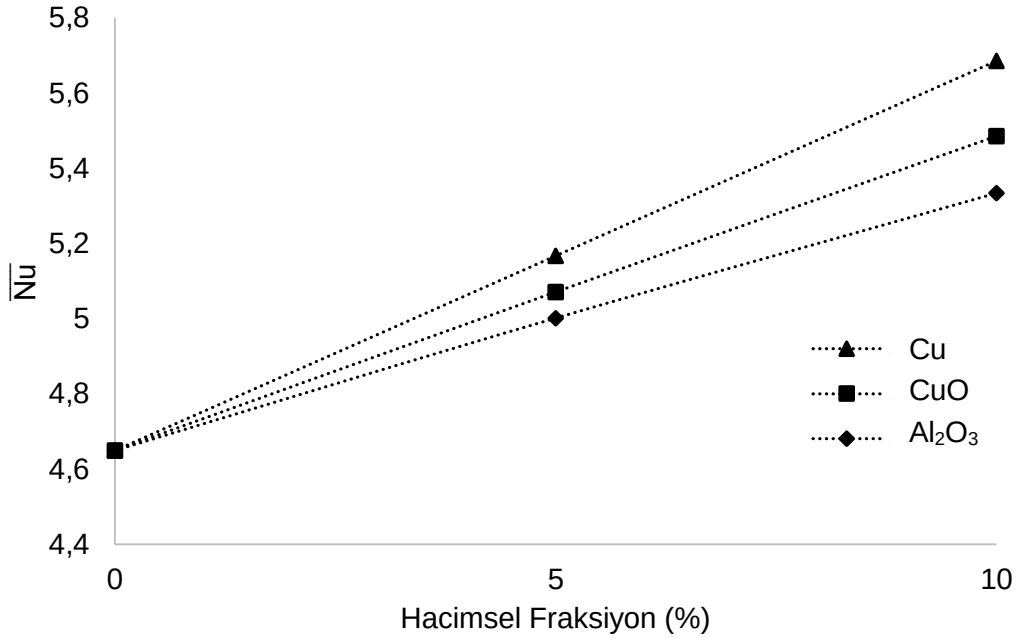
Dalga sayısındaki etkiler incelendiğinde, tek dalgalı ve üç dalgalı kaviteler kıyaslandığında, dalga sayısındaki artışla beraber ısı transfer miktarı önemli ölçüde artmaktadır. Tablo 5.1.’de Kahveci [36] tarafından yapılan kapalı kare kavite içerisindeki nanoakışkanın konveksiyonla ısı transferi ve dalgalı kavite ortalama Nu değerleri karşılaştırılmıştır.

Tablo 5.1. Dalgasız ve Dalgalı Kapalı Kavitelere Ait Ortalama Nu Değerlerinin Karşılaştırılması

Hacimsel Konsantrasyon	Ra Sayısı	Kare Kavite (Kahveci [36])	1 Dalgalı Kavite	3 Dalgalı Kavite
Φ = 0	10^4	2,27	2,31	2,36
	10^5	4,72	4,73	4,74
	10^6	9,23	9,32	9,68
Φ = 0,05	10^4	2,48	2,55	2,63
	10^5	5,20	5,22	5,25
	10^6	10,24	10,41	10,71
Φ = 0,1	10^4	2,68	2,79	2,90
	10^5	5,66	5,72	5,81
	10^6	11,23	11,49	11,84

Yapılan karşılaştırmada dalgalı duvara sahip kavitelerde 0,1 genlik değeri seçilmiş, Cu-su bazlı nanoakışkan kullanılmıştır. Görüldüğü üzere kaviteye verilen dalgalı form ortalama Nu sayısını arttırmakta ve ısı transfer oranını ortalama %6'ya varan değerlerde arttırmaktadır. Nanoakışkan kullanımı sonucunda elde edilen sonuçlar incelendiğinde ise ortalama Nu değerinin arttığı ve her iki durumun etkisi beraber ele alındığında %28'e varan değerlerde ısı transfer oranının arttığı görülmektedir.

5.22. “1” Dalgalı “0,05” Genlikli Kavite için Farklı Nanopartiküllerle Oluşturulan Nanoakışkanlarla Ortalama Nu Değerlerinin Değişimi

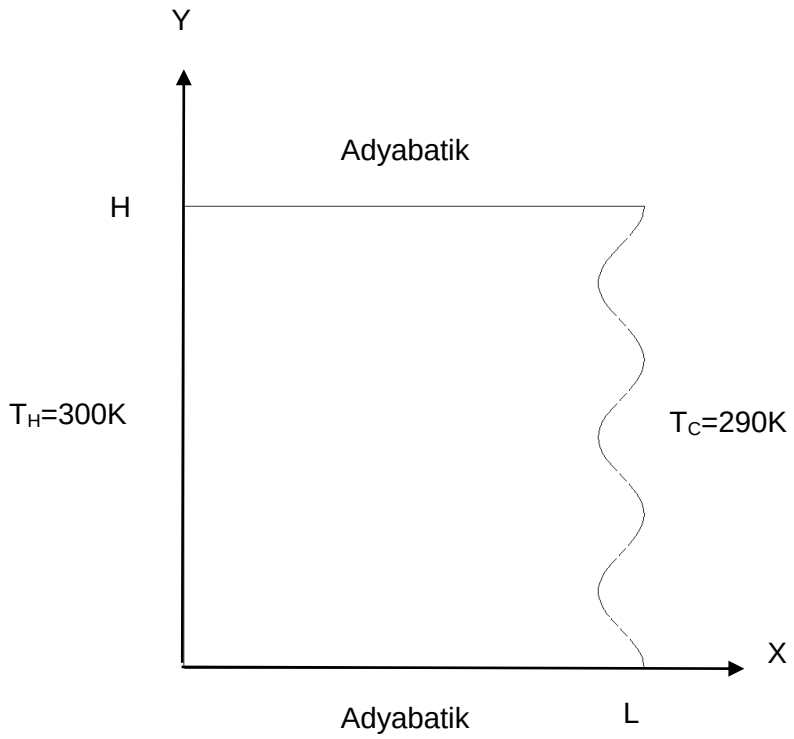


Şekil 5.58. "1" Dalgalı "0,05" Genlikli Kavite için Farklı Nanopartiküllerin Ortalama Nu Değerlerinin Karşılaştırılması

Şekil 5.58.’de “1” dalgalı ve “0,05” genlik değerine sahip kavite içerisinde farklı nanopartiküllerle oluşturulmuş nanoakışkanın ortalama Nu değerlerinin değişimi verilmiştir. Görüldüğü üzere metal parçacıklı nanoakışkanın oksit parçacığa sahip nanoakışkana nazaran ortalama Nu değerinin daha yüksek olduğu ve ısı transfer miktarının daha fazla olduğu görülmektedir. Isı iletim katsayısı yüksek olan nanopartiküllerin ilavesiyle, saf akışkana göre olan ısı transfer miktarı artmaktadır. Ortalama Nusselt değerleri, Cu, CuO ve Al_2O_3 su bazlı nanoakışkan kullanılarak bir kıyaslama yapıldığında, Cu nanopartiküller kullanılarak elde edilen nanoakışkanda ısı transfer oranı daha yüksektir. Bunun da nedeni Cu ile oluşturulan nanoakışkanın ısıl iletkenlik katsayısının Al_2O_3 den daha yüksek olmasıdır.

6. TEK DUVARI DALGALI KAPALI BÖLGE İÇİN YAPILAN ÇALIŞMALAR

Yapılan çift duvarı dalgalı kapalı bölge çalışmalarına ek olarak geometrik yapısı Şekil 6.1.'de verilen tek duvarı dalgalı kavite için gerçekleştirilen çalışmalar ve sonuçları Öğüt vd. tarafından sunulmuştur [35].



Şekil 6.1. 0° Eğimli "0.05" Genlikli Tek Duvarı Dalgalı Kavite

Şekil 6.1.'de görülen kapalı bölgenin sağ tarafı soğuk (290 K), sol tarafı ise (300 K) sıcak tutulmaktadır. Alt ve üst duvarlar ise adyabatiktir. Soğuk duvar "0,05" genlik değerine sahip olup "3" dalgalı yapıdadır.

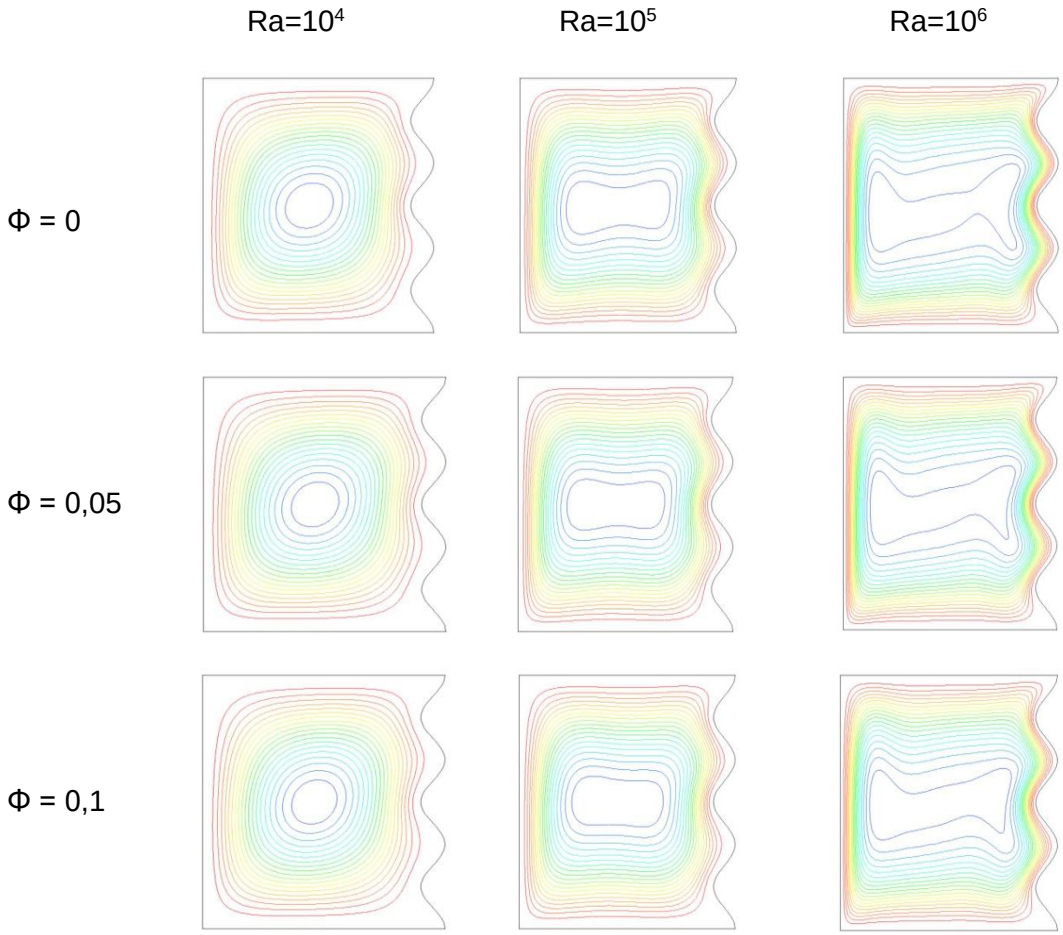
Kapalı bölge içerisinde nanoakışkan bulunmaktadır. Analizler Bakır (Cu)-su bazlı nanoakışkan için yapılmıştır. Nanoakışkan sıkıştırılamaz kabul edilmiş olup partiküllerin su ile termal dengede oldukları varsayımı yapılmıştır.

Sağ duvar aşağıdaki şekilde ifade edilmiştir;

$$X_{sağ} = 1+0,05(-1+\cos(6\pi y)) \quad (6.1)$$

6.1. Analiz Sonuçları

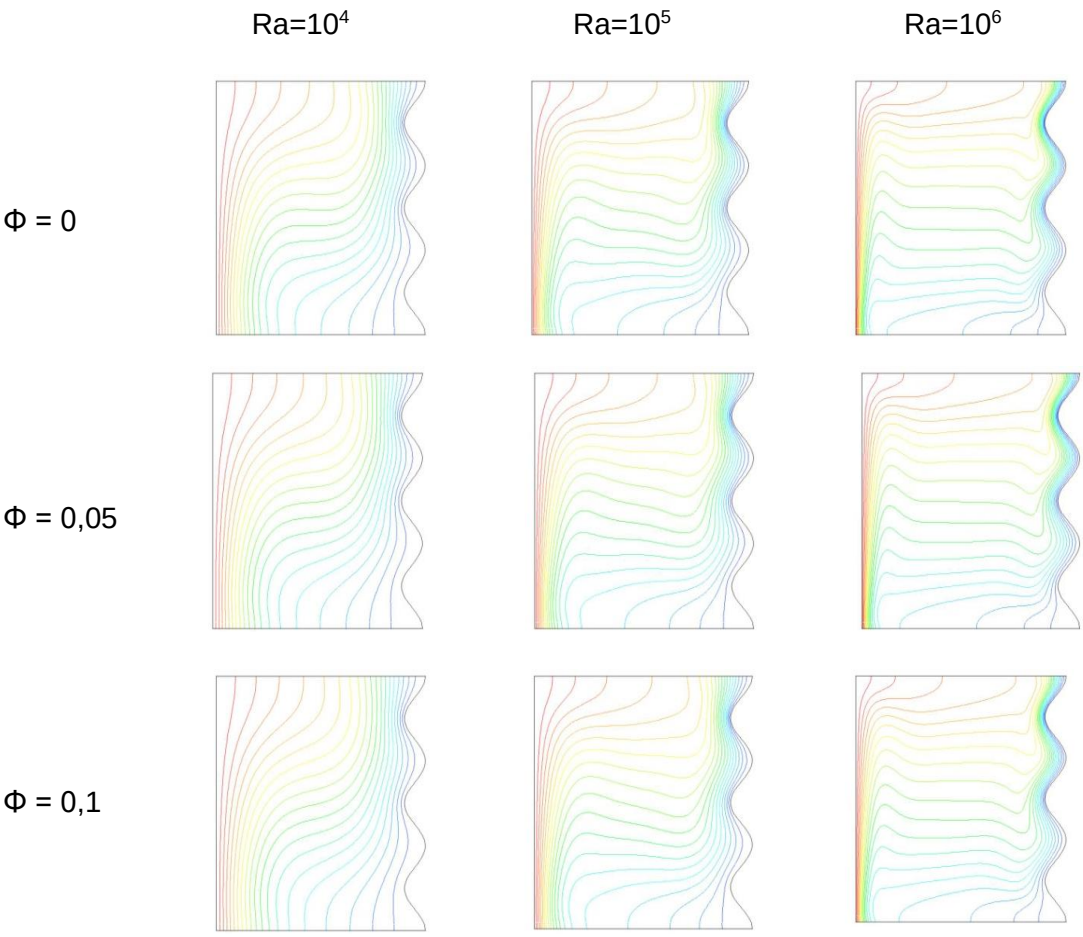
6.1.1. Akım çizgileri



Şekil 6.2. Cu-su Nanoakışkanı için Akım Çizgileri

Şekil 6.2.'de farklı Rayleigh sayıları ve hacim fraksiyonlarında Cu-su nanoakışkanına ait akım çizgileri eğrileri verilmiştir. $Ra=10^4$ de akım çizgileri, kare kapalı bölge içerisinde akış alanının merkezinde saat ibresi yönünde dönen bir halka görünümündedir. Bunun nedeni ise nanoakışkanın sıcak duvar boyunca yaptığı yukarı yönlü, soğuk duvar boyunca ise aşağı yönlü hareketinden kaynaklanmaktadır. Rayleigh sayısının artmasına bağlı olarak, artan akış sirkülasyonu nedeniyle akışın merkezinde bulunan hücre genişleyerek ikincil bir akış hücresini meydana getirmektedir. Rayleigh sayısının artmasıyla konveksiyonla meydana gelen ısı transferi artmaktadır. Rayleigh sayısının sabit tutulup, hacim fraksiyonunun artmasıyla, akım çizgileri eğrilerinden de görüldüğü gibi akış yapısında önemli bir değişim meydana gelmemektedir.

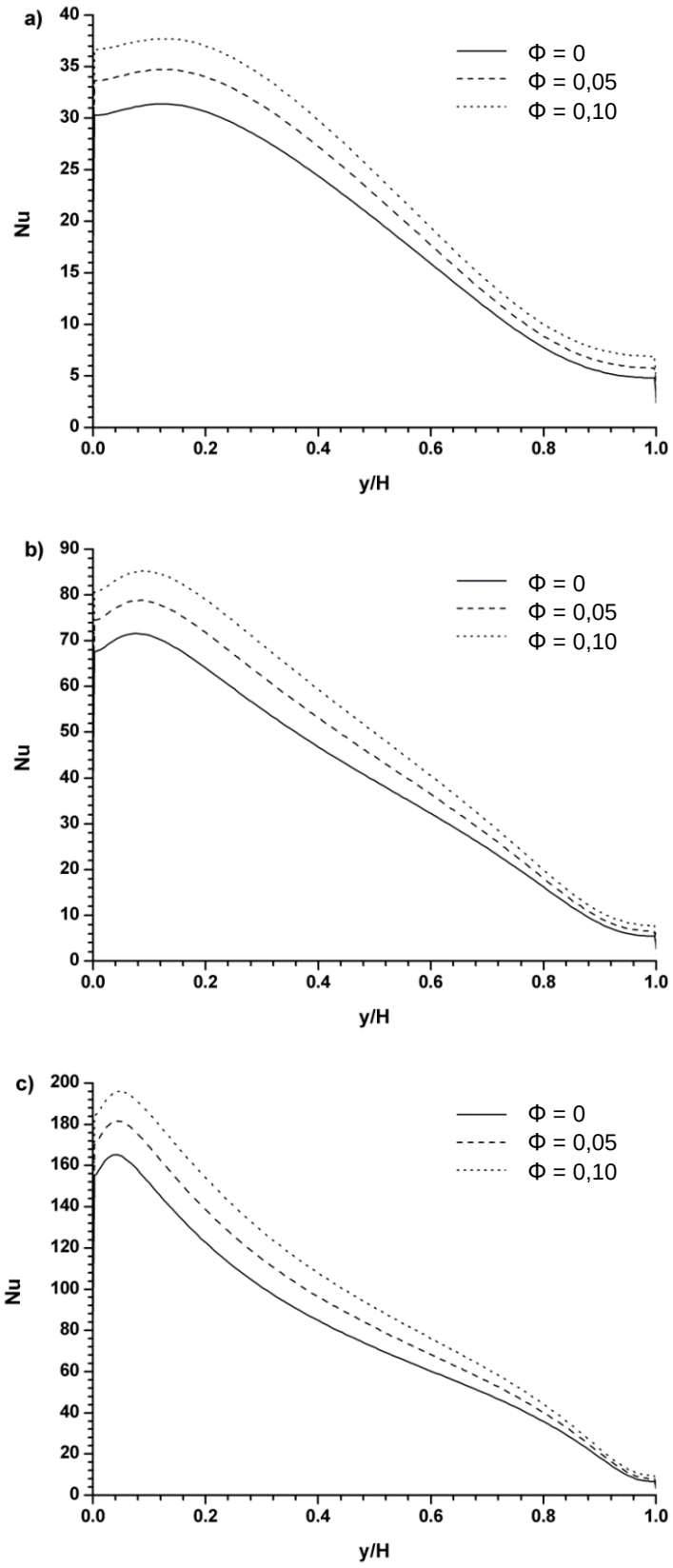
6.1.2. Eş sıcaklık eğrileri



Şekil 6.3. Cu-su Nanoakışkanı için Eş Sıcaklık Eğrileri

Şekil 6.3.'te Cu-su nanoakışkanına ait farklı Rayleigh ve hacim fraksiyonlarında eş sıcaklık eğrileri verilmiştir. Eş sıcaklık eğrileri incelendiğinde sıcak duvar boyunca yukarı doğru, soğuk duvar boyunca ise aşağı yönlü genişledikleri görülmektedir. Rayleigh sayısında meydana gelen artışa bağlı olarak eş sıcaklık çizgileri orta bölümde paralel bir yapı almaktadırlar. Sıcak ve soğuk duvarlar boyunca termal tabakalar gelişmektedir.

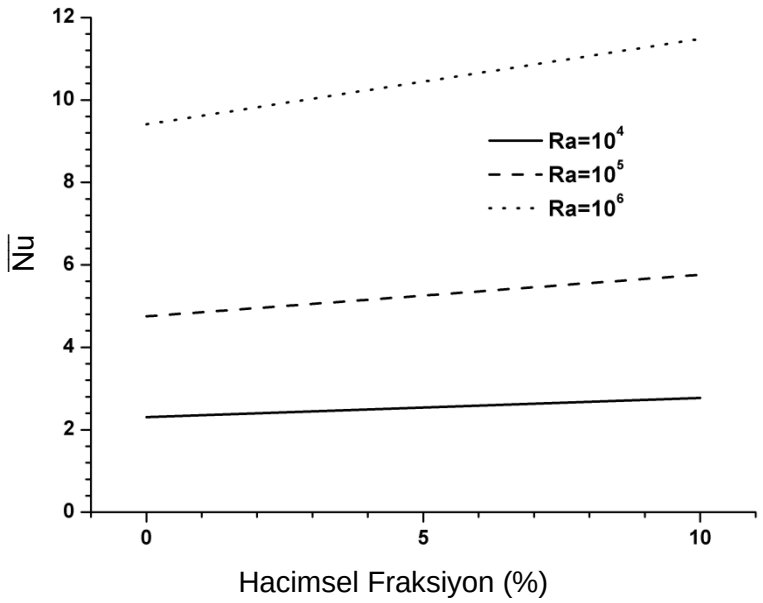
6.1.3. Yerel nusselt grafikleri



Şekil 6.4. Sıcak duvar boyunca a) $Ra=10^4$, b) $Ra=10^5$ ve c) $Ra=10^6$ için yerel Nusselt sayısının değişimi

Şekil 6.4.'te farklı Rayleigh sayılarında ve hacim fraksiyonlarında Nusselt sayılarının değişimleri verilmiştir. Eş sıcaklık eğrilerinden de görüldüğü üzere sıcak duvarın alt kısmında eş sıcaklık eğrileri daha yoğun olurken, sıcaklık gradyanı yüksek, yukarı doğru çıkıldığında eğriler arasındaki mesafe açılmakta ve sıcaklık gradyanı düşmektedir. Bunun sonucu olarak, yerel Nu sayıları sıcak duvarın alt kesiminde maksimum değerine ulaşırken, yukarı doğru gidildikçe azalmaktadır. Yerel Nu sayısı, hem hacim fraksiyonunun hem de Rayleigh sayısının artmasıyla artmaktadır.

6.1.4. Ortalama nusselt grafiği



Şekil 6.5. Cu-su Nanoakışkanı için Ortalama Nu Grafiği

Şekil 6.5.'te Cu-su nanoakışkanına ait farklı Rayleigh ve hacim fraksiyonlarında ortalama Nu değerleri verilmiştir. Rayleigh sayısının artmasına bağlı olarak akış sirkülasyonu giderek güçlenmekte ve ısı transfer oranı artmaktadır. Ortalama Nusselt değeri hacim fraksiyonunun artmasıyla artmaktadır.

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada sol duvarı sıcak ve sağ duvarı soğuk olan dalgalı duvarlar ile alt ve üst duvarları adyabatik tutulan eğik bir kare kapalı bölge içindeki su bazlı nanoakışkanların doğal konveksiyonu nümerik olarak incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, farklı Rayleigh sayısı, katı hacim konsantrasyonu, nanopartikül cinsi, genlik değerleri, dalga sayıları ve kapalı bölgenin eğim açısının akış ve ısı transferi üzerinde önemli etkilere sahip olduğu görülmektedir.

Rayleigh sayısının değişiminin etkisi incelendiğinde, Rayleigh sayısının artmasıyla şiddetlenen sirkülasyona bağlı olarak ısı transfer miktarı artmaktadır. Küçük Rayleigh sayılarında iletimle ısı transferi gerçekleşirken, artan Reyleigh sayısıyla beraber konveksiyonla ısı transferi gerçekleşmektedir.

Nanopartikül cinsinin etkisi incelendiğinde, ısı iletim katsayısı yüksek olan nanopartiküllerin ilavesiyle oluşturulan nanoakışkanın, saf akışkana göre, ısı transfer miktarını önemli ölçüde artırdığı görülmektedir. Ortalama Nusselt değerleri, Cu, CuO ve Al_2O_3 su bazlı nanoakışkan kullanıldığında, bir kıyaslama yapıldığında, Cu nanopartikuller kullanılarak elde edilen nanoakışkanda daha yüksektir. Bunun da nedeni Cu ile oluşturulan nanoakışkanın ısıl iletkenlik katsayısının Al_2O_3'den daha yüksek olmasıdır.

Nanopartiküllerin hacimsel konsantrasyon etkisi incelendiğinde, elde edilen sonuçlar neticesinde, nanoakışkanın hacimsel konsantrasyonun arttırılmasıyla da ısı transferinin arttığı görülmektedir.

Genlik değerlerindeki değişikler incelendiğinde, genlik değerlerinin değiştirilmesiyle ortalama Nusselt değerlerinde kayda değer bir değişiklik görülmemiştir. Her ne kadar genlik değerinin arttırılmasının önemli bir değişiklik meydana getirmediği ifade edilse de $Ra = 10^6$ için sonuçlar incelendiğinde genlik değerindeki artışla beraber ısı transferinin arttığı söylenebilir.

Kapalı bölgenin eğim açısının etkisi incelendiğinde; sol duvarı sıcak olan kaviteye saat yönünde verilen eğimler nedeniyle sıcak duvarın üst bölgeye yaklaşmasıyla ısı transferinin önemli ölçüde azaldığı görülmüştür. Kavitenin saat ibresi yönünde

eğilerek, sıcak duvar, yerçekimi ile sıcaklık gradyanını daha kötü bir durumda düzene sokarak üst kısma yaklaşmaktadır ve kapalı bölge içindeki sirkülasyon, daha zayıf görünmektedir. Özellikle 90° verilen eğimle sıcak duvar yukarıda kaldığında konvektif etkilerin azalmasıyla ısı iletimle gerçekleşmektedir. Konveksiyonla ısı transferinin artmasının istendiği durumlarda, saat yönünün tersine verilecek eğimlerle sıcak duvarın alt bölgede kalmasına bağlı olarak ısı transferinin arttırılabileceği değerlendirilmektedir.

Dalga sayısındaki etkiler incelendiğinde, dalgasız, tek dalgalı ve üç dalgalı kaviteler kıyaslandığında, dalga sayısındaki artışla beraber ısı transfer miktarı önemli ölçüde artmaktadır. Kaviteye verilen dalgalı form ortalama Nu sayısını arttırmakta ve ısı transfer oranını ortalama yaklaşık olarak %6'ya varan değerlerde arttırmakta, nanoakışkan kullanımının etkisi de düşünüldüğünde bu değerin %28'e kadar çıktığı görülmektedir.

Sonuç olarak; konveksiyonla ısı transferi mekanizmasından yararlanan mühendislik sistemlerinde ilgili parametreler dikkate alınarak nanoakışkan kullanılmasının faydalı olacağı değerlendirilmiştir. Verilen bir akışkan için ortalama Nu sayısı dalgalı yüzey geometrik parametrelerinin uygun özellikleri üzerinden arttırılabilmektedir.

KAYNAKLAR

[1] Çengel Y., *Heat and mass transfer: a practical approach*, 3rd ed., İzmir Güven Kitabevi, İzmir, 2011.

[2] Şahin B., Çomaklı K., Çomaklı Ö., Yılmaz M., Nanoakışkanlar ile ısı transferinin İyileştirilmesi, *Mühendis ve Makine*, 2007, **47**, 559.

[3] Lee S., Choi S. U. S., Li S., Eastman J. A., Measuring thermal conductivity of fluids containing oxide nanoparticles, *Journal of Heat Transfer*, 1999, **121**, 280–289.

[4] Eastman J. A., Choi S. U. S., Yu W., Thompson L.J., Anomalously increased effective thermal conductivity of ethylene glycol-based nanofluids containing copper nanoparticles, *Applied Physics Letters*, 2001, **78**, 718–720.

[5] Das S. K., Putra N. Thiesen P. Roetzel W., Temperature dependence of thermal conductivity enhancement for nanofluids, *Journal of Heat Transfer*, 2003, **125**, 567–574.

[6] Wang X. Q., Mujumdar A. S., Heat transfer characteristics of nanofluids: a review, *International Journal of Thermal Sciences*, 2007, **46**, 1-19.

[7] Keblinski P., Phillpot S. R., Choi S. U. S., Eastman J. A., Mechanisms of Heat Flow in Suspensions of Nano-sized Particles (nanofluids), *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2002, **45**, 855–863.

[8] Keblinski P., Eastman, J. A., Cahill D. G., *Nanofluids for Thermal Transport, Materialstoday*, 2005, **8**, 36-44.

[9] Hamilton R. L., Crosser O. K., Thermal conductivity of heterogeneous two component systems, *I & EC Fundamentals*, 1962, **1**, 187-191.

[10] Maxwell J. C., *A treatise on electricity and magnetism*, 2nd ed., Oxford University Press, Cambridge, 1904.

[11] Choi S. U. S., Yu W., The role of interfacial layers in the enhanced thermal conductivity of nanofluids: a renovated maxwell model, *Journal of Nanoparticle Research*, 2003, **5**, 167-173.

[12] Maxwell J. C., Colours in Metal Glasses and in Metallic Films, *Philosophical Transactions of the Royal Society*. DOI: 10.1098/rsta.1904.0024.

[13] Wasp J., Kenny P., Gandhi L., *Solid–liquid flow slurry pipeline transportation*, 1st ed., Trans Tech Publications, Berlin, 1977.

[14] Bruggeman D. A. G., Berechnung verschiedener physikalischer konstanten von heterogenen substanzen. I. Dielektrizitatskonstanten und leitfahigkeiten der mischkorper aus isotropen substanzen, *Annalen der Physik*, DOI: 10.1002/andp.19354160705.

[15] Wang B. X., Zhou L. P., Peng, X. F., A fractal model for predicting the effective thermal conductivity of liquid with suspension of nanoparticles, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2003, **46**, 2665–2672.

[16] Choi S. U. S., Eastman J. A., Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles, *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, San Fransisco, USA, 12-17 November 1995.

[17] Das S. K., Choi S. U. S., Patel H. E., Heat transfer in nanofluids - a review, *Heat Transfer Engineering*, 2006, **27**, 3-19.

[18] Khanafer K., Vafai K., Lightstone M., Buoyancy-driven heat transfer enhancement in a two-dimensional enclosure utilizing nanofluids, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2003, **46**, 3639-3653.

[19] Jou R. Y., Tzeng, S. C., Numerical research of nature convective heat transfer enhancement filled with nanofluids in rectangular enclosures, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2006, **33**, 727–736.

[20] Santra A. K., Sen S., Chakraborty, N., Study of heat transfer augmentation in a differentially heated square cavity using copper–water nanofluid, *International Journal of Thermal Sciences*, 2008, **47**, 1113-1122.

[21] Hwang K. S., Lee J. H., Jang S. P., Buoyancy-driven heat transfer of water-based Al_2O_3 nanofluids in a rectangular cavity, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2007, **50**, 4003-4010.

[22] Ho C. J., Chen M. W., Li Z. W., Numerical simulation of natural convection of nanofluid in a square enclosure: effects due to uncertainties of viscosity and thermal conductivity, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2008, **51**, 4506-4516.

[23] Oztop H. F., Abu-Nada E., Numerical study of natural convection in partially heated rectangular enclosures filled with nanofluids, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2008, **29**, 1326-1336.

[24] Ogut E. B., Natural convection of water-based nanofluids in an inclined enclosure with a heat source, *International Journal of Thermal Sciences*, 2009, **48**, 2063–2073.

[25] Abu-Nada E., Oztop H. F., Numerical analysis of Al_2O_3/water nanofluids natural convection in a wavy walled cavity, *Numerical Heat Transfer*, DOI: 10.1080/10407782.2011.552363

[26] Nikfar M., Mahmoodi M., Meshless local petrov–galerkin analysis of free convection of nanofluid in a cavity with wavy side walls, *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 2012, **36**, 433–445.

[27] Nasrin R., Alim M. A., Chamkha A. J., Combined convection flow in triangular wavy chamber filled with water–CuO nanofluid: effect of viscosity models, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2012, **39**, 1226–1236.

[28] Brinkman H. C., The viscosity of concentrated suspensions and solutions, *The Journal of Chemical Physics*, 1952, **20**, 571–581.

[29] Pak B. C., Cho Y. I., Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles, *Experimental Heat Transfer*, 1998, **11**, 151-170.

[30] Mansour M. A., Bakier M. A. Y., Free convection heat transfer in complex-wavy-wall enclosed cavity filled with nanofluid, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2013, **44**, 108–115.

[31] Cho C. C., Chen C. L., Chen C. K., Natural convection heat transfer and entropy generation in wavy-wall enclosure containing water-based nanofluid, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2013, **61**, 749–758.

[32] Cho C. C. Chen C. L., Chen C. K., Natural convection heat transfer performance in complex-wavy-wall enclosed cavity filled with nanofluid, *International Journal of Thermal Sciences*, 2012, **60**, 255-263.

[33] Esmaeilpour M., Abdollahzadeh M., Free convection and entropy generation of nanofluid inside an enclosure with different patterns of vertical wavy walls, *International Journal of Thermal Sciences*, 2012, **52**, 127-136.

[34] Kashani S., Ranjbar A. A., Mastiani M., Mirzaei H., Entropy generation and natural convection of nanoparticle-water mixture (nanofluid) near water density inversion in an enclosure with various patterns of vertical wavy walls, *Applied Mathematics and Computation*, 2014, **226**, 180–193.

[35] Ogut E., Arıcı M., Akyol M., Natural convection of nanofluids in a square with one side wavy wall cavity, *7th International Ege Energy Symposium and Exhibition*, Uşak, Türkiye, 18-20 June 2014.

[36] Kahveci K., Buoyancy driven heat transfer of nanofluids in a tilted enclosure, *Journal of Heat Transfer*, DOI: 10.1115/1.4000744.

[37] http://www.tpl.fpv.ukf.sk/engl_vers/hot_wire.htm (Ziyaret tarihi: 06 Eylül 2015)

KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

[1] Ogut E., Arıcı M., **Akyol M.**, Natural convection of nanofluids in a square with one side wavy wall cavity, *7th International Ege Energy Symposium and Exhibition*, Uşak, Türkiye, 18-20 June 2014.

ÖZGEÇMİŞ

1985 yılında Diyarbakır'da doğdu. İlk, orta öğrenimini İstanbul'da tamamladı. 2000 yılında girdiği Liselere Giriş Sınavında Şişli Anadolu Lisesi'ni kazanarak 2004 yılında mezun oldu. 2004 yılında girdiği Öğrenci Seçme Sınavında Deniz Harp Okulu'nu kazandı. 2008 yılında Deniz Harp Okulu Makine Mühendisliği Bölümünden Teğmen rütbesiyle mezun oldu. 2009-2011 yılları arasında Sahil Güvenlik TCSG-121 Komutanlığı Samsun'da II.Komutan'lık görevinde bulundu. 2011 yılında Üsteğmen rütbesine terfi etti. 2011-2015 yılları arasında TCSG YAŞAM Komutanlığı Mersin'de Muhabere Subaylığı görevinde bulundu. 2015 yılından beri TCSG YAŞAM Komutanlığı Mersin'de Gemi Kontrol Subayı olarak görev yapmaktadır. Evli olup 2 çocuk babasıdır.