

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DİKDÖRTGEN KESİTLİ BİR KANALDAKİ KARARSIZ
ISI TRANSFERİNİN SAYISAL İNCELENMESİ**

DOKTORA TEZİ

Kadir İSA

Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ

Enstitü Bilim Dalı : ENERJİ

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Hasan Rıza GÜVEN

Ekim 2009

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DİKDÖRTGEN KESİTLİ BİR KANALDAKİ
KARARSIZ ISI TRANSFERİNİN SAYISAL
İNCELENMESİ

DOKTORA TEZİ

Kadir İSA

Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ

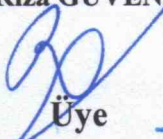
Enstitü Bilim Dalı : ENERJİ

Bu tez 05/ 10 /2009 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.

Prof.Dr.Salim
ÖZCELEBİ


Jüri Başkanı

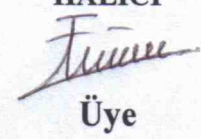
Prof. Dr. H.
Rıza GÜVEN


Üye

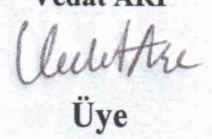
Prof. Dr. H.
İbrahim SARAC


Üye

Prof. Dr. Fethi
HALICI


Üye

Yrd. Doç. Dr.
Vedat ARI


Üye

TEŞEKKÜR

Üniversitedeki meslek yaşamımın neredeyse tamamında ve lisans üstü eğitimlerim süresince bilimsel, maddi ve manevi katkıları ile sürekli yanımda olan değerli danışman hocam Prof. Dr. H. Rıza GÜVEN'e minnettarlığımı ifade etmek isterim. Zaman kısıtı olmadan sabırla destek olan Prof. Dr. İsmail EKMEKÇİ'ye sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Tez izleme komitesindeki hocalarım, Prof. Dr. Fethi HALICI ve Yrd. Doç. Dr. Vedat ARI, değerli yönlendirmeleri ile bana cesaret verdiler, teşekkürü bir borç bilirim.

Analizlerim esnasındaki yardımlarından dolayı Yrd. Doç. Dr. Nedim SÖZBİR'e, Mak.Y. Müh. Emir AYDAR'a, Dr. Y. Müh. Mustafa YILMAZ'a, Mak. Y. Müh. Nariman MEHDİYEV'e, Yrd. Doç. Dr. Gürcan ATAKÖK'e ve sağladığı donanım desteği nedeniyle Hakan AKGÜN'e teşekkür ederim.

Bu tez çalışması 2006.50.02.051 numaralı proje kapsamında Sakarya Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyonu Başkanlığı tarafından desteklenmiştir. Katkıları için teşekkür ederim.

Çalışmalarım esnasında oğlum Berk Orkun ile kızım Elif Yağmur'a ve aileme yeteri kadar zaman ayıramadım, fedakarlıkları ve sabırları için şükranlarımı sunmak isterim.

Kadir İSA

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	ii
İÇİNDEKİLER	iii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	v
ŞEKİLLER LİSTESİ	vii
TABLOLAR LİSTESİ	xx
ÖZET.....	xxi
SUMMARY	xxii

BÖLÜM 1.

GİRİŞ.....	1
1.1. Literatür Araştırması	3
1.2. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı	12
1.3. Çalışmanın Ana Hatları	13

BÖLÜM 2.

DENEYSEL ÇALIŞMA	14
2.1. Deneysel Çalışma Hakkındaki Veriler	14

BÖLÜM 3.

SAYISAL MODELİN HAZIRLANMASI	18
3.1. Sayısal Model.....	20
3.1.1. Ayrık (segregated) çözüm yöntemi.....	22
3.2. Sınır Şartlarının Tanımlanması	23
3.2.1. Giriş sıcaklık şartı.....	23
3.2.2. Duvar sıcaklık şartı	24
3.2.3. Hava giriş hızı	24
3.2.4. Türbülans modeli	26

3.2.4.1. Türbülans modelinde iki katmanlı yaklaşım.....	26
3.3. Sonlu Hacim Ayırıklaştırması	27
3.3.1. Ana denklemler	28
3.3.1.1. Korunum denklemleri.....	28
3.3.1.2. Kütleinin korunumu.....	28
3.3.1.3. Momentumun korunumu	29
3.3.1.4. Enerjinin korunumu.....	30
BÖLÜM 4.	
SONUÇLAR	31
4.1. Sonuçların Değerlendirilmesi.....	31
4.1.1. Pürüzsüz kanalda laminer ve türbülanslı akışta x ekseni boyunca sıcaklık genliğinin değişimi	31
4.1.2. Bloklı kanalda türbülanslı akışta x ekseni boyunca sıcaklık genliğinin değişimi	32
4.1.3. Uzunlamasına bloklı kanalda değişik x/D_e değerleri için kanal duvarındaki sıcaklık genliğinin değişimi.....	33
4.1.4. Bloksuz kanalda değişik x/D_e değerlerinde kanal giriş sıcaklığının zamana göre değişimi.....	33
4.1.5. Bloklı ve bloksuz kanalda değişik x/D_e değerlerinde kanal giriş sıcaklığının zaman göre değişimi	34
4.1.6. Uzunlamasına bloklı kanalda $Re = 11242$ $\beta=0.04$ Hz için x-y, x-z ve y-z düzlemlerindeki sıcaklık ve hız dağılımları	34
BÖLÜM 5. TARTIŞMA VE ÖNERİLER	89
5.1. Öneriler.....	90
KAYNAKLAR	91
ÖZGEÇMİŞ	97

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

a	: akışkanın termal difüzyonu, m^2/s
a^*	: akışkandan duvara termal kapasitans oranı, $(\rho C_p)_f b/(\rho c)_w L$
b	: kanal yüksekliğinin yarısı, m
C, C_p	: özgül ısı, J/kg K
D_e	: dikdörtgen kesitli kanalın hidrolik çapı, m
h	: ısı taşınım katsayısı, $W/m^2 K$
h_t	: toplam ısı taşınım katsayısı $(1/h+k_w/L)^{-1}$, $W/m^2 K$
H	: blok yüksekliği, m
k	: ısı iletim katsayısı, $W/m K$, izotropik üs
L	: duvar kalınlığı, m
m	: kütleli debi, kg/s
Nu	: Nusselt sayısı, $h b/k$
P_b	: barometrik basınç, Pa
P_a	: mutlak basınç, Pa
q	: boyutsuz ısı akısı, $q_w b/k \Delta T_c$
Pr	: Prandtl sayısı, ν/a
R	: boyutsuz normal koordinat
Re	: Reynold sayısı, $U_m D_e / \nu$
t	: zaman, s
T	: sıcaklık, °C, K
T_e	: ortalama giriş sıcaklığı, K
T_i	: ortam sıcaklığı, °C, K
T_{max}	: maksimum hava sıcaklığı, °C, K
T_{min}	: Minimum hava sıcaklığı, °C, K
$u(y)$: tamamen gelişmiş hız profili, m/s
U_m	: ortalama hız, m/s

x	: aksenel koordinat, m
X	: boyutsuz aksenel koordinat, x/D_e
y	: kanal duvarından merkeze koordinat, m
z	: aksenel koordinat, m

Semboller

α	: sıcaklık genliğinin eğimi
β	: giriş frekansı, Hz
ϵ_h	: türbülanslı eddy difüzyonu, m/s^2
ϵ_m	: türbülanslı eddy vizkozitesi, m/s^2
ρ	: yoğunluk, kg/m^3
ΔT_c	: giriş kanal merkezindeki sıcaklık genliği, K
ΔT_e	: kanal kesitindeki giriş sıcaklık genliği, K
μ	: akışkanın dinamik vizkozitesi, Pa s
ν	: akışkanın kinematik vizkozitesi, m^2/s

Alt İndisler

hv	: hava
amp	: genlik
c	: kanal eksenindeki değer
f	: akışkan
m	: ortalama
w	: duvar
∞	: çevre

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1.	Elektronik devrelerdeki hata oranının sıcaklığa bağlı artışı.....	1
Şekil 2.1.	Sözbir [14] tarafından kullanılan deney tesisatı.....	15
Şekil 2.2.	Test bölümündeki kanala termo eleman çiftlerinin yerleştiriliş düzeni [14].....	16
Şekil 2.3.	Test bölümündeki bloklar	16
Şekil 2.4.	Bloklu kanalda termo eleman çiftinin yerleşimi [14].....	17
Şekil 3.1.	Bloklu kanal giriş kesitinde (y-z) polyhedral ağ yapısının görünüşü.....	20
Şekil 3.2.	Bloksuz kanal giriş kesitinde (y-z) ağ yapısı	21
Şekil 3.3.	Uzunlamasına bloklu kanal geometrisi	21
Şekil 3.4.	Ayrık (segregated) çözüm yöntemi akış diyagramı	22
Şekil 3.5.	Giriş kanalında $Re = 1121$ için giriş sınır şartının kütleli debi olarak tanımlandığı durumda x-z düzleminde elde edilen hız profili	25
Şekil 4.1.	Laminer termal giriş bölgesinde pürüzsüz (bloksuz) kanalda, $Re \approx 1121$ ve $\beta = 0.02$ Hz giriş frekansı için x eksenini boyunca sıcaklık genliğinin değişiminin deneysel ve sayısal çözüm için karşılaştırılması	35
Şekil 4.2.	Laminer termal giriş bölgesinde pürüzsüz (bloksuz) kanalda, $Re \approx 1121$ ve $\beta = 0.04$ Hz giriş frekansı için x eksenini boyunca sıcaklık genliğinin değişiminin deneysel ve sayısal çözüm için karşılaştırılması	35
Şekil 4.3.	Laminer termal giriş bölgesinde pürüzsüz (bloksuz) kanalda, $Re \approx 1121$ ve $\beta = 0.08$ Hz giriş frekansı için x eksenini boyunca sıcaklık genliğinin değişiminin deneysel ve sayısal çözüm için karşılaştırılması	36

Şekil 4.4. Laminer termal giriş bölgesinde pürüzsüz (bloksuz) kanalda, $Re \approx 1121$ ve $\beta=0.16$ Hz giriş frekansı için x eksenini boyunca sıcaklık genliğinin değişiminin deneysel ve sayısal çözüm için karşılaştırılması	36
Şekil 4.5. Laminer termal giriş bölgesinde pürüzsüz (bloksuz) kanalda, $Re \approx 1121$ ve $\beta=0.24$ Hz giriş frekansı için x eksenini boyunca sıcaklık genliğinin değişiminin deneysel ve sayısal çözüm için karşılaştırılması	37
Şekil 4.6. Laminer termal giriş bölgesinde pürüzsüz (bloksuz) kanalda, $Re \approx 1479$ ve $\beta=0.02$ Hz giriş frekansı için x eksenini boyunca sıcaklık genliğinin değişiminin deneysel ve sayısal çözüm için karşılaştırılması	37
Şekil 4.7. Laminer termal giriş bölgesinde pürüzsüz (bloksuz) kanalda, $Re \approx 1479$ ve $\beta=0.04$ Hz giriş frekansı için x eksenini boyunca sıcaklık genliğinin değişiminin deneysel ve sayısal çözüm için karşılaştırılması	38
Şekil 4.8. Laminer termal giriş bölgesinde pürüzsüz (bloksuz) kanalda, $Re \approx 1479$ ve $\beta=0.08$ Hz giriş frekansı için x eksenini boyunca sıcaklık genliğinin değişiminin deneysel ve sayısal çözüm için karşılaştırılması. Modelin ağ yapısı	38
Şekil 4.9. Laminer termal giriş bölgesinde pürüzsüz (bloksuz) kanalda, $Re \approx 1479$ ve $\beta=0.16$ Hz giriş frekansı için x eksenini boyunca sıcaklık genliğinin değişiminin deneysel ve sayısal çözüm için karşılaştırılması	39
Şekil 4.10. Laminer termal giriş bölgesinde pürüzsüz (bloksuz) kanalda, $Re \approx 1479$ ve $\beta=0.24$ Hz giriş frekansı için x eksenini boyunca sıcaklık genliğinin değişiminin deneysel ve sayısal çözüm için karşılaştırılması	39
Şekil 4.11. Laminer termal giriş bölgesinde pürüzsüz (bloksuz) kanalda, $Re \approx 1764$ ve $\beta=0.02$ Hz giriş frekansı için x eksenini boyunca sıcaklık genliğinin değişiminin deneysel ve sayısal çözüm için karşılaştırılması	40

Şekil 4.12. Laminer termal giriş bölgesinde pürüzsüz (bloksuz) kanalda, $Re \approx 1764$ ve $\beta=0.04$ Hz giriş frekansı için x eksenini boyunca sıcaklık genliğinin değişiminin deneysel ve sayısal çözüm için karşılaştırılması	40
Şekil 4.13. Laminer termal giriş bölgesinde pürüzsüz (bloksuz) kanalda, $Re \approx 1764$ ve $\beta=0.08$ Hz giriş frekansı için x eksenini boyunca sıcaklık genliğinin değişiminin deneysel ve sayısal çözüm için karşılaştırılması	41
Şekil 4.14. Laminer termal giriş bölgesinde pürüzsüz (bloksuz) kanalda, $Re \approx 1764$ ve $\beta=0.16$ Hz giriş frekansı için x eksenini boyunca sıcaklık genliğinin değişiminin deneysel ve sayısal çözüm için karşılaştırılması	41
Şekil 4.15. Laminer termal giriş bölgesinde pürüzsüz (bloksuz) kanalda, $Re \approx 1764$ ve $\beta=0.24$ Hz giriş frekansı için x eksenini boyunca sıcaklık genliğinin değişiminin deneysel ve sayısal çözüm için karşılaştırılması	42
Şekil 4.16. Laminer termal giriş bölgesinde pürüzsüz (bloksuz) kanalda, $Re \approx 2225$ ve $\beta=0.02$ Hz giriş frekansı için x eksenini boyunca sıcaklık genliğinin değişiminin deneysel ve sayısal çözüm için karşılaştırılması	42
Şekil 4.17. Laminer termal giriş bölgesinde pürüzsüz (bloksuz) kanalda, $Re \approx 2225$ ve $\beta=0.04$ Hz giriş frekansı için x eksenini boyunca sıcaklık genliğinin değişiminin deneysel ve sayısal çözüm için karşılaştırılması	43
Şekil 4.18. Laminer termal giriş bölgesinde pürüzsüz (bloksuz) kanalda, $Re \approx 2225$ ve $\beta=0.08$ Hz giriş frekansı için x eksenini boyunca sıcaklık genliğinin değişiminin deneysel ve sayısal çözüm için karşılaştırılması	43
Şekil 4.19. Laminer termal giriş bölgesinde pürüzsüz (bloksuz) kanalda, $Re \approx 2225$ ve $\beta=0.16$ Hz giriş frekansı için x eksenini boyunca sıcaklık genliğinin değişiminin deneysel ve sayısal çözüm için karşılaştırılması	44

Şekil 4.20. Laminer termal giriş bölgesinde pürüzsüz (bloksuz) kanalda, $Re \approx 2225$ ve $\beta=0.24$ Hz giriş frekansı için x eksenini boyunca sıcaklık genliğinin değişiminin deneysel ve sayısal çözüm için karşılaştırılması	44
Şekil 4.21. Türbülanslı termal giriş bölgesinde pürüzsüz (bloksuz) kanalda, $Re \approx 11242$ ve $\beta=0.02$ Hz giriş frekansı için x eksenini boyunca sıcaklık genliğinin değişiminin deneysel ve sayısal çözüm için karşılaştırılması	46
Şekil 4.22. Türbülanslı termal giriş bölgesinde pürüzsüz (bloksuz) kanalda, $Re \approx 11242$ ve $\beta=0.04$ Hz giriş frekansı için x eksenini boyunca sıcaklık genliğinin değişiminin deneysel ve sayısal çözüm için karşılaştırılması	46
Şekil 4.23. Türbülanslı termal giriş bölgesinde pürüzsüz (bloksuz) kanalda, $Re \approx 11242$ ve $\beta=0.08$ Hz giriş frekansı için x eksenini boyunca sıcaklık genliğinin değişiminin deneysel ve sayısal çözüm için karşılaştırılması	47
Şekil 4.24. Türbülanslı termal giriş bölgesinde pürüzsüz (bloksuz) kanalda, $Re \approx 11242$ ve $\beta=0.16$ Hz giriş frekansı için x eksenini boyunca sıcaklık genliğinin değişiminin deneysel ve sayısal çözüm için karşılaştırılması	47
Şekil 4.25. Türbülanslı termal giriş bölgesinde pürüzsüz (bloksuz) kanalda, $Re \approx 11242$ ve $\beta=0.24$ Hz giriş frekansı için x eksenini boyunca sıcaklık genliğinin değişiminin deneysel ve sayısal çözüm için karşılaştırılması	48
Şekil 4.26. Türbülanslı termal giriş bölgesinde pürüzsüz (bloksuz) kanalda, $Re \approx 17673$ ve $\beta=0.02$ Hz giriş frekansı için x eksenini boyunca sıcaklık genliğinin değişiminin deneysel ve sayısal çözüm için karşılaştırılması	48
Şekil 4.27. Türbülanslı termal giriş bölgesinde pürüzsüz (bloksuz) kanalda, $Re \approx 17673$ ve $\beta=0.04$ Hz giriş frekansı için x eksenini boyunca sıcaklık genliğinin değişiminin deneysel ve sayısal çözüm için karşılaştırılması	49

Şekil 4.28. Türbülanslı termal giriş bölgesinde pürüzsüz (bloksuz) kanalda, $Re \approx 17673$ ve $\beta=0.08$ Hz giriş frekansı için x eksenini boyunca sıcaklık genliğinin değişiminin deneysel ve sayısal çözüm için karşılaştırılması	49
Şekil 4.29. Türbülanslı termal giriş bölgesinde pürüzsüz (bloksuz) kanalda, $Re \approx 17673$ ve $\beta=0.16$ Hz giriş frekansı için x eksenini boyunca sıcaklık genliğinin değişiminin deneysel ve sayısal çözüm için karşılaştırılması	50
Şekil 4.30. Türbülanslı termal giriş bölgesinde pürüzsüz (bloksuz) kanalda, $Re \approx 17673$ ve $\beta=0.02$ Hz giriş frekansı için x eksenini boyunca sıcaklık genliğinin değişiminin deneysel ve sayısal çözüm için karşılaştırılması	50
Şekil 4.31. Türbülanslı termal giriş bölgesinde pürüzsüz (bloksuz) kanalda, $Re \approx 22284$ ve $\beta=0.02$ Hz giriş frekansı için x eksenini boyunca sıcaklık genliğinin değişiminin deneysel ve sayısal çözüm için karşılaştırılması	51
Şekil 4.32. Türbülanslı termal giriş bölgesinde pürüzsüz (bloksuz) kanalda, $Re \approx 22284$ ve $\beta=0.04$ Hz giriş frekansı için x eksenini boyunca sıcaklık genliğinin değişiminin deneysel ve sayısal çözüm için karşılaştırılması	51
Şekil 4.33. Türbülanslı termal giriş bölgesinde pürüzsüz (bloksuz) kanalda, $Re \approx 22284$ ve $\beta=0.08$ Hz giriş frekansı için x eksenini boyunca sıcaklık genliğinin değişiminin deneysel ve sayısal çözüm için karşılaştırılması	52
Şekil 4.34. Türbülanslı termal giriş bölgesinde pürüzsüz (bloksuz) kanalda, $Re \approx 22284$ ve $\beta=0.16$ Hz giriş frekansı için x eksenini boyunca sıcaklık genliğinin değişiminin deneysel ve sayısal çözüm için karşılaştırılması	52
Şekil 4.35. Türbülanslı termal giriş bölgesinde pürüzsüz (bloksuz) kanalda, $Re \approx 22284$ ve $\beta=0.24$ Hz giriş frekansı için x eksenini boyunca sıcaklık genliğinin değişiminin deneysel ve sayısal çözüm için karşılaştırılması	53

Şekil 4.36. Türbülanslı termal giriş bölgesinde uzunlamasına bloklu kanalda, $Re \approx 11242$ ve $\beta=0.02$ Hz giriş frekansı için x ekseninde sıcaklık genliğinin değişiminin deneysel ve sayısal çözüm için karşılaştırılması	55
Şekil 4.37. Türbülanslı termal giriş bölgesinde uzunlamasına bloklu kanalda, $Re \approx 11242$ ve $\beta=0.04$ Hz giriş frekansı için x ekseninde sıcaklık genliğinin değişiminin deneysel ve sayısal çözüm için karşılaştırılması	55
Şekil 4.38. Türbülanslı termal giriş bölgesinde uzunlamasına bloklu kanalda, $Re \approx 11242$ ve $\beta=0.08$ Hz giriş frekansı için x ekseninde sıcaklık genliğinin değişiminin deneysel ve sayısal çözüm için karşılaştırılması	56
Şekil 4.39. Türbülanslı termal giriş bölgesinde uzunlamasına bloklu kanalda, $Re \approx 11242$ ve $\beta=0.16$ Hz giriş frekansı için x ekseninde sıcaklık genliğinin değişiminin deneysel ve sayısal çözüm için karşılaştırılması	56
Şekil 4.40. Türbülanslı termal giriş bölgesinde uzunlamasına bloklu kanalda, $Re \approx 11242$ ve $\beta=0.24$ Hz giriş frekansı için x ekseninde sıcaklık genliğinin değişiminin deneysel ve sayısal çözüm için karşılaştırılması	57
Şekil 4.41. Türbülanslı termal giriş bölgesinde uzunlamasına bloklu kanalda, $Re \approx 17673$ ve $\beta=0.02$ Hz giriş frekansı için x ekseninde sıcaklık genliğinin değişiminin deneysel ve sayısal çözüm için karşılaştırılması	57
Şekil 4.42. Türbülanslı termal giriş bölgesinde uzunlamasına bloklu kanalda, $Re \approx 17673$ ve $\beta=0.04$ Hz giriş frekansı için x ekseninde sıcaklık genliğinin değişiminin deneysel ve sayısal çözüm için karşılaştırılması	58
Şekil 4.43. Türbülanslı termal giriş bölgesinde uzunlamasına bloklu kanalda, $Re \approx 17673$ ve $\beta=0.08$ Hz giriş frekansı için x ekseninde sıcaklık genliğinin değişiminin deneysel ve sayısal çözüm için karşılaştırılması	58

Şekil 4.44. Türbülanslı termal giriş bölgesinde uzunlamasına bloklu kanalda, $Re \approx 17673$ ve $\beta=0.16$ Hz giriş frekansı için x ekseninde sıcaklık genliğinin değişiminin deneysel ve sayısal çözüm için karşılaştırılması	59
Şekil 4.45. Türbülanslı termal giriş bölgesinde uzunlamasına bloklu kanalda, $Re \approx 17673$ ve $\beta=0.24$ Hz giriş frekansı için x ekseninde sıcaklık genliğinin değişiminin deneysel ve sayısal çözüm için karşılaştırılması	59
Şekil 4.46. Türbülanslı termal giriş bölgesinde uzunlamasına bloklu kanalda, $Re \approx 22284$ ve $\beta=0.02$ Hz giriş frekansı için x ekseninde sıcaklık genliğinin değişiminin deneysel ve sayısal çözüm için karşılaştırılması	60
Şekil 4.47. Türbülanslı termal giriş bölgesinde uzunlamasına bloklu kanalda, $Re \approx 22284$ ve $\beta=0.04$ Hz giriş frekansı için x ekseninde sıcaklık genliğinin değişiminin deneysel ve sayısal çözüm için karşılaştırılması	60
Şekil 4.48. Türbülanslı termal giriş bölgesinde uzunlamasına bloklu kanalda, $Re \approx 22284$ ve $\beta=0.08$ Hz giriş frekansı için x ekseninde sıcaklık genliğinin değişiminin deneysel ve sayısal çözüm için karşılaştırılması	61
Şekil 4.49. Türbülanslı termal giriş bölgesinde uzunlamasına bloklu kanalda, $Re \approx 22284$ ve $\beta=0.16$ Hz giriş frekansı için x ekseninde sıcaklık genliğinin değişiminin deneysel ve sayısal çözüm için karşılaştırılması	61
Şekil 4.50. Türbülanslı termal giriş bölgesinde uzunlamasına bloklu kanalda, $Re \approx 22284$ ve $\beta=0.24$ Hz giriş frekansı için x ekseninde sıcaklık genliğinin değişiminin deneysel ve sayısal çözüm için karşılaştırılması	62
Şekil 4.51. Türbülanslı kombine giriş bölgesinde uzunlamasına bloklu kanal boyunca, $Re \approx 11242$ ve $\beta=0.02$ Hz giriş frekanslarında x ekseninde doğrultusunda değişik x/D_e değerleri için kanal duvarı sıcaklık genlik (amplitüd) değişiminin deneysel ve sayısal çözüm için karşılaştırılması	64

Şekil 4.52. Türbülanslı kombine giriş bölgesinde uzunlamasına bloklu kanal boyunca, $Re \approx 11242$ ve $\beta = 0.04$ Hz giriş frekanslarında x eksenine doğrultusunda değişik x/D_e değerleri için kanal duvarı sıcaklık genlik (amplitüd) değişiminin deneysel ve sayısal çözüm için karşılaştırılması	64
Şekil 4.53. Türbülanslı kombine giriş bölgesinde uzunlamasına bloklu kanal boyunca, $Re \approx 11242$ ve $\beta = 0.08$ Hz giriş frekanslarında x eksenine doğrultusunda değişik x/D_e değerleri için kanal duvarı sıcaklık genlik (amplitüd) değişiminin deneysel ve sayısal çözüm için karşılaştırılması	65
Şekil 4.54. Türbülanslı kombine giriş bölgesinde uzunlamasına bloklu kanal boyunca, $Re \approx 11242$ ve $\beta = 0.16$ Hz giriş frekanslarında x eksenine doğrultusunda değişik x/D_e değerleri için kanal duvarı sıcaklık genlik (amplitüd) değişiminin deneysel ve sayısal çözüm için karşılaştırılması	65
Şekil 4.55. Türbülanslı kombine giriş bölgesinde uzunlamasına bloklu kanal boyunca, $Re \approx 11242$ ve $\beta = 0.24$ Hz giriş frekanslarında x eksenine doğrultusunda değişik x/D_e değerleri için kanal duvarı sıcaklık genlik (amplitüd) değişiminin deneysel ve sayısal çözüm için karşılaştırılması	66
Şekil 4.56. Türbülanslı kombine giriş bölgesinde uzunlamasına bloklu kanal boyunca, $Re \approx 17673$ ve $\beta = 0.02$ Hz giriş frekanslarında x eksenine doğrultusunda değişik x/D_e değerleri için kanal duvarı sıcaklık genlik (amplitüd) değişiminin deneysel ve sayısal çözüm için karşılaştırılması	66
Şekil 4.57. Türbülanslı kombine giriş bölgesinde uzunlamasına bloklu kanal boyunca, $Re \approx 17673$ ve $\beta = 0.04$ Hz giriş frekanslarında x eksenine doğrultusunda değişik x/D_e değerleri için kanal duvarı sıcaklık genlik (amplitüd) değişiminin deneysel ve sayısal çözüm için karşılaştırılması	67

Şekil 4.58. Türbülanslı kombine giriş bölgesinde uzunlamasına bloklu kanal boyunca, $Re \approx 17673$ ve $\beta=0.08$ Hz giriş frekanslarında x eksenine doğrultusunda değişik x/D_e değerleri için kanal duvarı sıcaklık genlik (amplitüd) değişiminin deneysel ve sayısal çözüm için karşılaştırılması	67
Şekil 4.59. Türbülanslı kombine giriş bölgesinde uzunlamasına bloklu kanal boyunca, $Re \approx 17673$ ve $\beta=0.16$ Hz giriş frekanslarında x eksenine doğrultusunda değişik x/D_e değerleri için kanal duvarı sıcaklık genlik (amplitüd) değişiminin deneysel ve sayısal çözüm için karşılaştırılması	68
Şekil 4.60. Türbülanslı kombine giriş bölgesinde uzunlamasına bloklu kanal boyunca, $Re \approx 17673$ ve $\beta=0.24$ Hz giriş frekanslarında x eksenine doğrultusunda değişik x/D_e değerleri için kanal duvarı sıcaklık genlik (amplitüd) değişiminin deneysel ve sayısal çözüm için karşılaştırılması	68
Şekil 4.61. Türbülanslı kombine giriş bölgesinde uzunlamasına bloklu kanal boyunca, $Re \approx 22284$ ve $\beta=0.02$ Hz giriş frekanslarında x eksenine doğrultusunda değişik x/D_e değerleri için kanal duvarı sıcaklık genlik (amplitüd) değişiminin deneysel ve sayısal çözüm için karşılaştırılması	69
Şekil 4.62. Türbülanslı kombine giriş bölgesinde uzunlamasına bloklu kanal boyunca, $Re \approx 22284$ ve $\beta=0.04$ Hz giriş frekanslarında x eksenine doğrultusunda değişik x/D_e değerleri için kanal duvarı sıcaklık genlik (amplitüd) değişiminin deneysel ve sayısal çözüm için karşılaştırılması	69
Şekil 4.63. Türbülanslı kombine giriş bölgesinde uzunlamasına bloklu kanal boyunca, $Re \approx 22284$ ve $\beta=0.08$ Hz giriş frekanslarında x eksenine doğrultusunda değişik x/D_e değerleri için kanal duvarı sıcaklık genlik (amplitüd) değişiminin deneysel ve sayısal çözüm için karşılaştırılması	70

Şekil 4.64. Türbülanslı kombine giriş bölgesinde uzunlamasına bloklı kanal boyunca, $Re \approx 22284$ ve $\beta=0.16$ Hz giriş frekanslarında x eksenı doğrultusunda değişik x/D_e değerleri için kanal duvarı sıcaklık genlik (amplitüd) değişiminin deneysel ve sayısal çözüm için karşılaştırılması	70
Şekil 4.65. Türbülanslı kombine giriş bölgesinde uzunlamasına bloklı kanal boyunca, $Re \approx 22284$ ve $\beta=0.24$ Hz giriş frekanslarında x eksenı doğrultusunda değişik x/D_e değerleri için kanal duvarı sıcaklık genlik (amplitüd) değişiminin deneysel ve sayısal çözüm için karşılaştırılması	71
Şekil 4.66. Laminer termal giriş bölgesinde bloksuz kanal boyunca, $Re \approx 1121$ ve $\beta=0.02$ Hz giriş frekansında x eksenı doğrultusunda değişik x/D_e değerlerinde kanal giriş sıcaklığının zamana göre değişimi	73
Şekil 4.67. Laminer termal giriş bölgesinde bloksuz kanal boyunca, $Re \approx 1121$ ve $\beta=0.08$ Hz giriş frekansında x eksenı doğrultusunda değişik x/D_e değerlerinde kanal giriş sıcaklığının zamana göre değişimi	73
Şekil 4.68. Laminer termal giriş bölgesinde bloksuz kanal boyunca, $Re \approx 1121$ ve $\beta=0.24$ Hz giriş frekansında x eksenı doğrultusunda değişik x/D_e değerlerinde kanal giriş sıcaklığının zamana göre değişimi	74
Şekil 4.69. Laminer termal giriş bölgesinde bloksuz kanal boyunca, $Re \approx 1479$ ve $\beta=0.02$ Hz giriş frekansında x eksenı doğrultusunda değişik x/D_e değerlerinde kanal giriş sıcaklığının zamana göre değişimi	74
Şekil 4.70. Laminer termal giriş bölgesinde bloksuz kanal boyunca, $Re \approx 1479$ ve $\beta=0.08$ Hz giriş frekansında x eksenı doğrultusunda değişik x/D_e değerlerinde kanal giriş sıcaklığının zamana göre değişimi	75
Şekil 4.71. Laminer termal giriş bölgesinde bloksuz kanal boyunca, $Re \approx 1479$ ve $\beta=0.24$ Hz giriş frekansında x eksenı doğrultusunda değişik x/D_e değerlerinde kanal giriş sıcaklığının zamana göre değişimi	75
Şekil 4.72. Laminer termal giriş bölgesinde bloksuz kanal boyunca, $Re \approx 1764$ ve $\beta=0.02$ Hz giriş frekansında x eksenı doğrultusunda değişik x/D_e değerlerinde kanal giriş sıcaklığının zamana göre değişimi	76

Şekil 4.73. Laminer termal giriş bölgesinde bloksuz kanal boyunca, $Re \approx 1764$ ve $\beta=0.08$ Hz giriş frekansında x eksenini doğrultusunda değişik x/D_e değerlerinde kanal giriş sıcaklığının zamana göre değişimi	76
Şekil 4.74. Laminer termal giriş bölgesinde bloksuz kanal boyunca, $Re \approx 1764$ ve $\beta=0.24$ Hz giriş frekansında x eksenini doğrultusunda değişik x/D_e değerlerinde kanal giriş sıcaklığının zamana göre değişimi	77
Şekil 4.75. Laminer termal giriş bölgesinde bloksuz kanal boyunca, $Re \approx 2225$ ve $\beta=0.02$ Hz giriş frekansında x eksenini doğrultusunda değişik x/D_e değerlerinde kanal giriş sıcaklığının zamana göre değişimi	77
Şekil 4.76. Laminer termal giriş bölgesinde bloksuz kanal boyunca, $Re \approx 2225$ ve $\beta=0.08$ Hz giriş frekansında x eksenini doğrultusunda değişik x/D_e değerlerinde kanal giriş sıcaklığının zamana göre değişimi	78
Şekil 4.77. Laminer termal giriş bölgesinde bloksuz kanal boyunca, $Re \approx 2225$ ve $\beta=0.24$ Hz giriş frekansında x eksenini doğrultusunda değişik x/D_e değerlerinde kanal giriş sıcaklığının zamana göre değişimi	78
Şekil 4.78. Türbülanslı kombine giriş bölgesinde sıralı bloklu kanal boyunca, $Re \approx 11242$ ve $\beta=0.02$ Hz giriş frekansında x eksenini doğrultusunda değişik x/D_e değerlerinde kanal giriş sıcaklığının zamana göre değişimi	79
Şekil 4.79. Türbülanslı kombine giriş bölgesinde sıralı bloklu kanal boyunca, $Re \approx 11242$ ve $\beta=0.08$ Hz giriş frekansında x eksenini doğrultusunda değişik x/D_e değerlerinde kanal giriş sıcaklığının zamana göre değişimi	79
Şekil 4.80. Türbülanslı kombine giriş bölgesinde sıralı bloklu kanal boyunca, $Re \approx 11242$ ve $\beta=0.24$ Hz giriş frekansında x eksenini doğrultusunda değişik x/D_e değerlerinde kanal giriş sıcaklığının zamana göre değişimi	80
Şekil 4.81. Türbülanslı kombine giriş bölgesinde sıralı bloklu kanal boyunca, $Re \approx 22284$ ve $\beta=0.02$ Hz giriş frekansında x eksenini doğrultusunda değişik x/D_e değerlerinde kanal giriş sıcaklığının zamana göre değişimi	80

Şekil 4.82. Türbülanslı kombine giriş bölgesinde sıralı bloklu kanal boyunca, $Re \approx 22284$ ve $\beta=0.08$ Hz giriş frekansında x eksenini doğrultusunda değişik x/D_e değerlerinde kanal giriş sıcaklığının zamana göre değişimi.	81
Şekil 4.83. Türbülanslı kombine giriş bölgesinde sıralı bloklu kanal boyunca, $Re \approx 22284$ ve $\beta=0.24$ Hz giriş frekansında x eksenini doğrultusunda değişik x/D_e değerlerinde kanal giriş sıcaklığının zamana göre değişimi.	81
Şekil 4.84. Türbülanslı kombine giriş bölgesinde sıralı bloklu kanal boyunca, $Re \approx 22284$ ve $\beta=0.02$ Hz giriş frekansında y eksenini doğrultusunda değişik x/D_e değerlerinde kanal iç yüzey sıcaklığının zamana göre değişimi.	82
Şekil 4.85. Türbülanslı kombine giriş bölgesinde sıralı bloklu kanal boyunca, $Re \approx 22284$ ve $\beta=0.08$ Hz giriş frekansında y eksenini doğrultusunda değişik x/D_e değerlerinde kanal iç yüzey sıcaklığının zamana göre değişimi.	82
Şekil 4.86. Türbülanslı kombine giriş bölgesinde sıralı bloklu kanal boyunca, $Re \approx 22284$ ve $\beta=0.24$ Hz giriş frekansında y eksenini doğrultusunda değişik x/D_e değerlerinde kanal iç yüzey sıcaklığının zamana göre değişimi.	83
Şekil 4.87. Laminer termal giriş bölgesinde bloksuz kanal boyunca, $Re \approx 1121$ ve $\beta=0.02 - 0.24$ Hz aralığındaki giriş frekanslarında x eksenini doğrultusunda değişik x/D_e değerleri için sıcaklık genliğinin değişimi.	83
Şekil 4.88. Laminer termal giriş bölgesinde bloksuz kanal boyunca, $Re \approx 1479$ ve $\beta=0.02 - 0.24$ Hz aralığındaki giriş frekanslarında x eksenini doğrultusunda değişik x/D_e değerleri için sıcaklık genliğinin değişimi.	84
Şekil 4.89. Laminer termal giriş bölgesinde bloksuz kanal boyunca, $Re \approx 1764$ ve $\beta=0.02 - 0.24$ Hz aralığındaki giriş frekanslarında x eksenini doğrultusunda değişik x/D_e değerleri için sıcaklık genliğinin değişimi.	84

Şekil 4.90. Laminer termal giriş bölgesinde bloksuz kanal boyunca, $Re \approx 2225$ ve $\beta=0.02 - 0.24$ Hz aralığındaki giriş frekanslarında x eksenini doğrultusunda değişik x/D_e değerleri için sıcaklık genliğinin değişimi.	85
Şekil 4.91. Türbülanslı kombine giriş bölgesinde sıralı bloklu kanal boyunca, $Re \approx 11242$ ve $\beta=0.02 - 0.24$ Hz aralığındaki giriş frekanslarında x eksenini doğrultusunda değişik x/D_e değerleri için sıcaklık genliğinin değişimi.	85
Şekil 4.92. Türbülanslı kombine giriş bölgesinde sıralı bloklu kanal boyunca, $Re \approx 17673$ ve $\beta=0.02 - 0.24$ Hz aralığındaki giriş frekanslarında x eksenini doğrultusunda değişik x/D_e değerleri için sıcaklık genliğinin değişimi.	86
Şekil 4.93. Türbülanslı kombine giriş bölgesinde sıralı bloklu kanal boyunca, $Re \approx 22284$ ve $\beta=0.02 - 0.24$ Hz aralığındaki giriş frekanslarında x eksenini doğrultusunda değişik x/D_e değerleri için sıcaklık genliğinin değişimi.	86
Şekil 4.94. Uzunlamasına bloklu kanalda $Re 11242$ $\beta=0.04$ Hz için x-z düzleminde sıcaklık dağılımı.	87
Şekil 4.95. Uzunlamasına bloklu kanalda $Re 11242$ $\beta=0.04$ Hz için x-y düzleminde sıcaklık dağılımı.	87
Şekil 4.96. Uzunlamasına bloklu kanalda $Re 11242$ $\beta=0.04$ Hz için y-z düzleminde sıcaklık dağılımı.	87
Şekil 4.97. Uzunlamasına bloklu kanalda $Re 11242$ $\beta=0.04$ Hz için x-y düzleminde hız dağılımı.	88
Şekil 4.98. Uzunlamasına bloklu kanalda $Re 11242$ $\beta=0.04$ Hz için x-z düzleminde hız dağılımı.	88
Şekil 4.99. Uzunlamasına bloklu kanalda $Re 11242$ $\beta=0.04$ Hz için y-z düzleminde hız dağılımı.	88

TABLolar LİSTESİ

Tablo 3.1	Deneysel çalışmadaki kanal girişindeki hızlar.....	25
Tablo 4.1	Bloksuz kanal için laminer termal giriş bölgesinde farklı Reynolds sayıları (Re) ve giriş frekansları (β) için deneysel ve nümerik sıcaklık genliklerinin eğim değerlerinin (α) karşılaştırılması	45
Tablo 4.2	Bloksuz kanal için türbülanslı termal giriş bölgesinde farklı Reynolds sayıları (Re) ve giriş frekansları (β) için deneysel ve nümerik sıcaklık genliklerinin eğim değerlerinin (α) karşılaştırılması	54
Tablo 4.3	Uzunlamasına bloklu kanalda türbülanslı termal giriş bölgesinde farklı Reynolds (Re) sayıları ve giriş frekansları (β) için x eksenı boyunca deneysel ve sayısal sıcaklık genliklerinin (amplitüd) eğim değerlerinin (α) karşılaştırılması	63
Tablo 4.4	Türbülanslı kombine giriş bölgesinde uzunlamasına bloklu kanal boyunca, farklı Reynolds ve giriş frekanslarında x eksenı doğrultusunda değişik x/D_e değerleri için kanal duvarı sıcaklık genlik (amplitüd) değişiminin deneysel ve sayısal çözüm için karşılaştırılması.....	72

ÖZET

Anahtar Kelimeler: Isı Transferi, Elektronik Soğutma, Sayısal Akışkanlar Dinamiği, Zorlanmış Isı Transferi, Laminer, Türbülans.

Elektronik devrelerdeki ısı üreten elemanlarla benzeşim kurmak üzere, dikdörtgen kesitli bir kanal girişindeki ısının sinüoidal olarak değiştirildiği kabul edilmiş ve daimi olmayan rejimde laminer ile türbülanslı akış için ısı taşınımı sayısal ve üç boyutlu olarak incelenmiştir.

İlk çalışmalar pürüzsüz (bloksuz) kanal geometrisi için yapılmış ve daha sonraki aşamada ise, elektronik devre elemanlarını temsilen yerleştirilen bloklar ile zorlanmış ısı taşınımı sayısal olarak incelenmiştir. Çalışmalarda Reynolds sayısı, laminer akış için 1120 – 2225 ve türbülanslı akış içinse 11240 - 22284 aralığında alınmış, ısı giriş frekansı da 0.02 Hz'den 0.24 Hz'e kadar değiştirilmiştir.

Termal giriş bölgesindeki daimi olmayan ısı transferi, sayısal akışkanlar dinamiği (CFD) kodu olan Star-CCM+ ile çözülmüş ve kanalın uzun eksenini boyunca sıcaklık değişimleri ve genliği, Reynolds sayısı ve giriş frekansına bağlı olarak elde edilmiştir.

Elde edilen sayısal sonuçlarla, deneysel ve sayısal sonuçlar karşılaştırılmış ve küçük hata değerleri elde edilmiştir.

NUMERICAL INVESTIGATION OF UNSTEADY HEAT TRANSFER IN A RECTANGULAR DUCT

SUMMARY

Key words: Heat Transfer, Electronic Cooling, Computational Fluid Dynamics, Forced Heat Transfer, Laminar, Turbulent.

In order to simulate heat producing elements on electronic circuits, heat input at the inlet of a rectangular duct is supposed to vary sinusoidally and three dimensional transient forced convection for laminar and turbulent flows are investigated numerically.

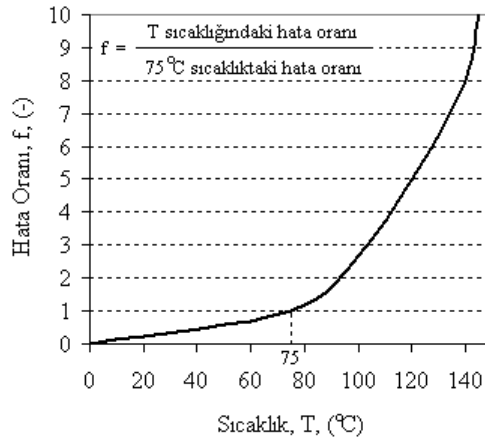
Initial studies were conducted for smooth rectangular duct (without arrays of block-like electronic components) and further implementations were focused on numerical investigation of forced convection heat transfer with blocks. Reynolds numbers in the range of 1120 – 2225 for laminar flow and 11240 - 22284 for turbulent flow were selected. Inlet frequencies (β) varied between 0.02 Hz and 0.24 Hz.

Transient heat transfer in the thermal entrance region was solved by computational fluid dynamics (CFD) code called Star-CCM+ and temperature amplitudes were obtained through centerline of the duct.

Numerical results were compared with experimental results. Acceptable derivations were obtained with small differentiations.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Elektronikteki hızlı gelişmeler modern hayatı baştan başa çevrelemiş ve elektronik cihazlar günlük hayatın ayrılmaz bir parçası haline gelmiştir. Elektronik ve bilgisayar destekli uygulamalar, yaşadığımız ve çalıştığımız ortamların ısıtılması ve soğutulmasından, savunma sanayisine, sağlıktan eğitime kadar geniş bir alanda yer bulmuş, güvenlik ve konforumuz için yoğun şekilde kullanılabilir hale gelmiştir. Uygulama alanlarının yoğun ve vazgeçilmez oluşu elektronik sistemlerin güvenle ve yüksek performansla çalışmasını gerekli kılmaktadır. Özellikle, savunma, sağlık, iş ve eğitim sistemlerinde kullanılan bilgisayarlarda oluşacak problemler, yalnızca bu servislerin aksamasına sebep olmayacak, aynı zamanda insan hayatını önemli derecede olumsuz etkileyecektir. Elektronik cihazların performanslarının, güvenilirliklerinin, ömürlerinin arttırılması ihtiyacı kaçınılmazdır. Bu nedenle konu üzerindeki sistemli çalışmalar tüm dünyada sürdürülmektedir. Bir dirençten akım geçirildiğinde ısı üretildiği bilinen bir gerçektir. Elektronik cihazlar da görevlerini yerine getirirken bu yolla ısı üretirler. Elektronik cihazların küçülmesine paralel olarak, birim hacimde üretilen ısı miktarı da doğal olarak artmaktadır. Elektronik cihazlarda hata oranı, sıcaklığın artışıyla üssel olarak artmaktadır [1].



Şekil 1.1. Elektronik devrelerdeki hata oranının sıcaklığa bağlı artışı

Devre kartı üzerindeki kritik elemanların sıcaklıklarının kontrolü, optimum kart ve sistem performansı için halen önem arz etmektedir. Cihaz hasarlarının önlenmesi toplam ısı transferinin hassas tahminini gerektirmektedir. İşletim süresince bölgesel taşınım ısı transferi değerlerini hassas bir şekilde belirlemek halen oldukça güç görünmektedir. Çözüm, büyük ölçüde bölgesel hava akış karakterinin bilinmesine bağlı görünmektedir. Bununla birlikte; alçak hızlar ve küçük ölçekli elektronik kabinler, düşük Reynolds sayılarına denk gelmektedir. Akış genelde hayli kompleks, üç boyutlu, türbülanslı ve geçiş bölgesinde yer almaktadır. Akışın ayrılması, yeniden birleşmesi, yeniden sirkülasyon ve buna bağlı türbülans alanları bölgesel taşınım ısı transferi dağılımının belirlenmesini güçleştirmektedir [2].

Elektronik elemanların ısısal açıdan kontrolünün ana hedefi, eleman sıcaklığını belirlenen sınırlar içerisinde tutabilmektir. Çalışma sıcaklığının sınırları aşması, performansın azalmasına ve mantıksal hataların oluşmasına neden olur. Arzu edilmeyen bu çalışma ortamının oluşmasını önlemek için uygun bir soğutma metodu kullanılmalıdır. Genel olarak mikroelektronik elemanların yüzey sıcaklıklarının 50-100 °C arasında olması kart üzerindeki üniformluğu, uygun bir fiyatı ve güvenilirliği sağlamaktadır [3].

Elektronik sistemlerin ısısal tasarımı, ısı transferinin uygulama alanlarından biri olup, incelemek üzere alınan sistem tek bir yongadan oluşabileceği gibi, birden fazla yongadan da oluşabilir. Her iki durumda da yonga veya yongalar baskı devre (PCB) üzerine, baskı devreyle aynı hızda olacak şekilde ya da baskı devre üzerinde çıkıntı oluşturacak şekilde monte edilebilirler.

Bir kanal içerisindeki akışta ya da iki paralel levha arasında hareket eden akışkanla ilgili olarak pratikte ısıtma ve soğutma problemleri için zaman bağlı çözümlere ulaşmaya çalışırken, bu çözümlerde salınımlar ve kararsızlıklar görülmektedir. Bu nedenle, akışkanın veya elektronik devre elemanlarının yüzey sıcaklıklarının zamana bağlı olarak gerçeğe uygun şekilde elde edilmesi büyük önem kazanmaktadır [4].

Birçok mühendislik problemlerinde kanal içindeki akış türbülanslıdır. Duvardaki ısı akısı ve giriş sıcaklığı zamana bağlı olarak periyodik şekilde değişir. Bununla beraber, zamana bağlı türbülanslı zorlanmış taşınım çözümleri sınırlıdır.

Bu çalışmada, kanal girişindeki sıcaklığın zamana bağlı olarak değiştiği zorlanmış ısı taşınımını incelenmiştir. Daha önce yapılmış deneysel çalışmanın sonuçları sayısal olarak doğrulanmıştır. Deneysel ve sayısal çalışma, dikdörtgen kanal geometrisinde termal giriş ve kombine giriş bölgelerinde icra edilmişlerdir.

Akışkan olarak hava kullanılmıştır. Deneysel ve sayısal incelemeler iki parametrenin değiştirilmesi esasına dayanmaktadır. Bunlar, kanal girişindeki ısıtıcının frekansı ve Reynolds sayısı ile sınır şartlarıdır.

Kanal eksen boyunca sıcaklık dağılımları ve bunun sonucunda genlik (amplitüd) değerleri elde edilmiştir. Deneysel ve sayısal sonuçlar grafik olarak düzenlenmişlerdir. Giriş frekansı, Reynolds sayısı ve sınır şartlarının periyodik olarak değişen giriş şartlarının eğimi üzerindeki etkileri, hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) yazılımı olan Star-CCM+ ile sayısal olarak geçirilmiştir.

1.1. Literatür Araştırması

Son yıllarda elektronik alanında çok hızlı gelişmeler olmuş ve buna paralel olarak elektronik devre elemanlarının soğutulması konusundaki çalışmalar da hızlanarak artmıştır. Devre elemanlarının fonksiyonlarını yerine getirirken oluşan ısı artmakta, ancak eleman boyutlarının küçülmesinden dolayı ısı transferi için ihtiyaç duyulan yüzey alanı küçüldüğünden, soğutma problemi ortaya çıkmaktadır. Bu konunun önemi, Steinberg [5], Kraus ve Bar-Cohen [6], Jaluria [7], Chu [8], Incropera [9] ve Aung [10] tarafından yapılan çalışmalarla ortaya konmuştur. Bu çalışmaların çoğu zamana bağlı olmayan durumdaki çözümleri içermektedir.

Kakaç ve Li [11], giriş sıcaklığının sinuzoidal olarak değiştiği iki paralel plaka arasında türbülanslı akışta zorlanmış ısı taşınımının deneysel ve teorik çalışmalarını yapmışlardır. Analitik çözümü, genelleştirilen integral transform tekniği ile elde etmişlerdir. Analitik çözümler deneysel sonuçlarla karşılaştırılmış ve tatmin edici sonuçlar elde edilmiştir.

Brown ve arkadaşları [12], dairesel kesitli bir kanalda deneysel ve analitik olarak daimi olmayan türbülanslı zorlanmış ısı taşınımını incelemişlerdir. Kanalda çalışma yapılan bölgede hız profili hidrodinamik yönden gelişmiştir. Çalışma, termal olarak gelişmekte olan bu bölge için yapılmıştır. Nümerik ve deneysel sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Pauliakos ve arkadaşları [13], mikroelektronik bir cihazın zorlanmış taşınım ile soğutulması amacıyla sayısal bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada, akış sıkıştırılmaz, daimi ve iki boyutlu olarak ele alınmış ve $k-\epsilon$ türbülans modeli kullanılmıştır. Eşlenik ısı transferinin etkileri incelenmiş ve sıcaklık dağılımları elde edilmiştir.

Sözber [14], doktora çalışmasında, dikdörtgen kesitli kanal girişinde akışkan giriş sıcaklığını zamana bağlı sinüsoidal olarak değiştirerek daimi olmayan rejimde zorlanmış ısı taşınımını deneysel olarak incelemiştir. İlk deneyler, kanal içinde hiç blok kullanılmadan ve sonra da elektronik elemana benzeyen dikdörtgenler prizması şeklinde bloklar kullanarak ve bunları değişik konfigürasyonlarda yerleştirerek bir dizi deney gerçekleştirmiştir. Bloklu kanallarda sıcaklık amplitüdlerinin eğiminin bloksuz duruma göre daha büyük olduğunu görmüş ve bunun nedenini arttırılmış yüzeyden dolayı ısı transferinin daha fazla olması şeklinde yorumlamıştır. Laminer akışta sıcaklık amplitüd değerlerinin, türbülanslı akışa göre daha büyük olduğunu deneysel çalışmalarının sonucunda elde etmiştir.

Igarashi ve arkadaşları [15], laminer bir sınır tabaka içine yerleştirilmiş iki boyutlu dikdörtgen bir blok etrafındaki akış ve ısı transferini deneysel olarak incelerken, her yüzdeki ortalama Nusselt sayısı ifadeleri çıkarılmıştır.

Arık ve arkadaşları [16], giriş sıcaklığının sinüsoidal değiştiği kanalda, termal giriş bölgesinde, türbülanslı akışta zorlanmış ısı taşınımıyla ilgili olarak hibrid nümerik-analitik çözüm kullanarak ısı transferi analizi yapmışlardır. Sabit duvar sıcaklığı ve lineer değişen duvar sıcaklığı sınır şartları olarak kabul edilmişlerdir.

Uysal [17], doktora tezinde daimi olmayan ısı transferi problemini termal giriş bölgesi için çözmüş ve sayısal sonuçlar elde etmiştir. İkinci derece explicit sonlu farklar şemasını enerji denkleminin çözümü için kullanmıştır.

Chereto ve arkadaşları [18], daimi olmayan laminer zorlanmış ısı taşınımının termal yönden gelişmekte olan ve paralel plakalar arasındaki akış için teorik inceleme yapmışlardır. Kanal giriş sıcaklığının periyodik olarak değiştiği durum ve beşinci tip sınır şartı kullanılmıştır. Hibrid analitik-nümerik çözüm yapılmış ve geliştirilmiş integral transform tekniği kullanılmışlardır.

Brown ve arkadaşları [19], dairesel kesitli kanalda türbülanslı akış için daimi zorlanmış ısı taşınımı ve sabit duvar sıcaklığı şartlarında, geliştirilmiş integral transform tekniği kullanarak tam analitik çözüm elde etmek için yeni bir teorik yaklaşım sunmuşlardır.

Travelho ve arkadaşları [20], dairesel kesitli bir kanalda, periyodik olarak kanal giriş sıcaklığının değiştiği ve ortama ısı taşınımı olan durum için daimi olmayan zorlanmış ısı taşınımını incelemişlerdir.

Leung ve arkadaşları [21], bir dikdörtgen kanal içine periyodik olarak ısıtılan ve baskılı devre kartını temsil eden bloklar yerleştirilerek taşınım ile ısı transferini deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Kanal ve blok yüksekliklerindeki değişimlerin, blok yüzeyinden havaya gerçekleşen taşınım ile ısı transferine etkilerini örnekleyen korelasyonlar elde etmişlerdir.

Pimentel ve arkadaşları [22], sıkıştırılamaz akışkan kullanarak tamamen gelişmiş türbülanslı akış için simetrik ve asimetric olan prüzlü duvarlı kanallarda çalışma yapmışlardır. Değiştirilmiş cebirsel türbülans modeli kullanmışlardır. Dairesel kesitli

ve dikdörtgen kesitli kanal için nümerik sonuçlar elde etmişler, bunların literatürdeki deneysel sonuçlarla uyumlu olduğunu görmüşlerdir.

Leung ve arkadaşları [23], baskılı devre kartı üzerinde ısı taşınımı ve basınç düşümü karakteristiklerini tam gelişmiş bölgede, laminer akışta, zamandan bağımsız deneysel ve sayısal olarak incelemiştir. Devre kartı üzerindeki blokların boyutlarının ve akışkanın Re sayısının ısı taşınımına olan etkilerini vurgulamışlardır.

Kim ve arkadaşları [24], bir kanalda ısıtılmış iki bloktaki darbeli akış ve buna bağlı ısı transferi karakteristiklerini sayısal olarak incelemiştir. Blok yüzeylerinin sabit sıcaklıkta ve kanal yüzeylerinin ise adyabatik olduklarını kabul etmişlerdir. Zamana bağlı detaylı akış ve sıcaklık verileri elde etmişlerdir. Reynolds ve Strouhal sayıları, darbe genliği ile iki blok arasındaki boşluk gibi önemli parametrelerin, bloklardan olan ısı transferine ve blokların çevresindeki akışa olan etkilerini de detaylı olarak incelemiştir. Havanın; blokun arkasında yeniden dolaşımı kadar, bloklar arasında kalan bölgenin de Strouhal sayısından ve boşluk mesafesinden önemli ölçüde etkilendiğini tesbit etmişlerdir. Sonuçları ve etkileri darbesiz akışla kıyaslamışlardır.

Liu ve arkadaşları [25], sonlu elemanlar metodunu kullanarak yaptıkları sayısal çalışmada, elektronik devre elemanlarının devre kartı üzerinde geleneksel eşit aralıklı yerleşimlerinin optimum çözüm olmadığını ortaya koymuşlardır. Optimum ısı performansın; çiplerin merkezleri arasındaki mesafenin geometrik bir seri izlediği yerleşimde elde edildiğini ve bu durumda maksimum bağıl sıcaklık düşüşünün de eşit aralıklı yerleşime göre %20 daha fazla olduğunu görmüşlerdir.

Cheroto ve arkadaşları [26], paralel plakalı kanalda termal giriş bölgesinde daimi olmayan zorlanmış ısı taşınımıyla ısı transferini çalışmışlardır. Genelleştirilmiş integral transform tekniği kullanarak ve sembolik sayısal hesaplamalarla teorik çözüm elde etmişlerdir. Giriş sıcaklığının periyodik olarak değiştiği beşinci tip sınır şartı kullanmışlardır.

Nakagawa ve arkadaşları [27], değişik genişlik/yükseklik oranına sahip blokların yer aldığı türbülanslı kanal içi akışta, farklı üç Reynolds sayısı için ısı transferini

deneysel olarak incelemişlerdir. Isı akısı değişimlerini kanal yüzeyindeki üç farklı noktada ölçmüşler ve duvar ısı akısının bloklar dolayısı ile oluşan vorteksler nedeniyle sürekli değiştiğini gözlemlemişlerdir. Maksimum duvar ısı akısının kanal sonuna doğru gerçekleştiğini ve dolayısıyla ısı transferinde iyileşmeye neden oldukları sonucuna varmışlardır.

Leung ve arkadaşları [28], havayla soğutulan yatay bir elektronik devre kartıyla ilgili bir sayısal simülasyon çalışması yapmışlar ve laminar akış hali için zorlanmış ısı taşınımını incelemişlerdir.

Sultan [29], yatay konumdaki küçük kesitli bir kanalda ısı üreten bloklar kullanarak zorlanmış ısı taşınımını deneysel olarak çalışmıştır. Pasif soğutma yöntemi kullanarak en fazla ısı transferinin $Re = 3428$ de gerçekleştiğini belirlemiş ve ortalama Nusselt sayısı ile maksimum boyutsuz sıcaklığı Richardson sayısının (Gr/Re^2) fonksiyonu olarak belirlemiştir.

Sezai ve arkadaşları [30], dikdörtgen bir kanal içine yerleştirilmiş ayrık bir ısı kaynağındaki (chip) kararlı hal doğal taşınım ısı transferini laminar akışta sayısal olarak incelemişlerdir. Üç boyutlu Navier-Stokes denklemlerini çoklu grid tekniği kullanarak çözmüşlerdir. Kanalı üst yüzeyden soğutmuş ve alt yüzeyden izole etmişlerdir. Düşey sınır şartlarının, kaynaktan gerçekleşen ısı transferine etkisini araştırmışlar ve ısı transferinin bu sınır şartlarına duyarlı olmadığını tespit etmişlerdir.

Nakamura ve arkadaşları [31], bir düzlem üzerine yerleştirilmiş küp etrafındaki akışkan hareketini ve bölgesel ısı transferini incelemek üzere deneysel çalışma yapmışlardır. Sabit ısı akısı altında kübün yüzey ve taban sıcaklıkları ölçülmüş ve deneylerin yapıldığı Reynolds sayısı aralığında kübün toplam Nusselt sayısı belirlenmiştir.

Zhao ve Lu [32], bir mikro kanalda zorlanmış taşınım ile olan ısı transferini sayısal olarak incelemişlerdir. Çalışmalarında yonga üzerinde kanatçık ve gözenekli ortam olmak üzere iki durumu incelemişlerdir. Nusselt sayısı üzerine ısı iletim katsayısı ve

kanal geometrisinin etkilerini belirlemişlerdir. Sonuçları, sabit ısı akısı ve sabit yüzey sıcaklığı şartları için test etmişlerdir.

Liu ve arkadaşları [33], geliştirilmiş bir genetik algoritma kullanarak, bunu elektronik sistemlerin soğutma benzeşimlerinde sıcaklık dağılımı ve ısı transfer katsayısını belirlemek için kullanmışlardır. Ticari bir yazılım olan I-DEAS bu tür bir çözüm elde edilmek üzere adapte edilmiştir.

Valencia ve arkadaşları [34], bir kanal içine yerleştirilmiş blokların bulunduğu ortamdaki zamana bağlı türbülanslı ısı transferi karakteristiğini belirlemek için sayısal bir çalışma yapmışlardır. Bloklar arasındaki mesafeler periyodik olarak değiştirilmiş ve kanal duvar sıcaklığı sabit kabul edilmiştir. Modelde $k-\epsilon$ türbülans modeli ve Reynolds ağırlıklı momentum ve enerji eşitlikleri kullanılmıştır. Sonlu hacim tekniğinin kullanıldığı modelde, zamana bağlı akış karakterinin, basınç düşümünün ve ısı transferinin büyük ölçüde bloklar arasındaki mesafeye bağlı olduğu sonucuna varılmıştır.

Meinders ve arkadaşı [35], yaptıkları deneysel çalışmada, tam gelişmiş türbülanslı akış içine yerleştirilmiş iki kübün bağıl pozisyonlarının taşınım ısı transferine olan etkilerini incelemişlerdir. Bölgesel taşınım ısı transfer katsayısının dağılımında kübelerin pozisyonlarına bağıl olarak önemli değişimler olduğunu gözlemlemişlerdir. Bununla beraber, kübelerin ortalama ısı transfer katsayılarının bağıl pozisyonlarından bağımsız oldukları sonucuna varmışlardır.

Eveloy ve arkadaşları [36], hesaplamalı akışkanlar dinamiğinin (HAD) elektronik sistemlerin çalışma sıcaklıklarının tahmini konusundaki kabiliyetlerini inceledikleri çalışmalarında, elektronik elemanların birleşme yerlerindeki sıcaklıkların tasarım kararları öncesi deneysel ölçümleri gerektiğini ortaya koymuşlardır.

Silva ve arkadaşları [37]; laminer akışta, ısı taşınımını iyileştirmek üzere yatay konumdaki devre kartı üzerindeki blokların konfigürasyonları ile ilgili yapısal bir teori üzerinde çalışmışlar ve birincisi çok sayıda küçük, diğeri ise az sayıda sonlu uzunluğa sahip ısı kaynaklarına yer veren iki farklı analitik yaklaşım kullanmışlardır.

Her iki analiz sonucunda; elektronik devre elemanlarını simüle eden ısı kaynaklarının, aralarındaki mesafe en az olacak şekilde sınır tabakanın ucuna yakın gelişigüzel yerleştirilmesi gerektiği sonucuna varmışlardır. Analitik çalışmalarının sonuçlarını sayısal çalışmayla geçermişlerdir.

Rodgers [38], son yıllarda HAD yazılımlarının kabiliyetlerinin gelişmesi sonucunda, elektronik devrelerin imalat öncesi son tasarımlarında güvenilir bir araç olduklarını vurgulamıştır. Bununla beraber, zorlanmış taşınım problemlerinin karmaşık ısı ve kinematik özellikleri sebebiyle modellenmesinin halen bazı güçlükler içerdiğini yapmış olduğu çalışmada gözler önüne sermiştir.

Başkaya ve arkadaşları [39], dikdörtgen bir kanal içine sıralı yerleştirilmiş ayrık ısı kaynaklarındaki taşınım ısı transferini hava için deneysel incelemişlerdir. Kanal alt yüzeyine 8 x 4 boyutlarında, sabit ısı akısına sahip elemanlar yerleştirmişler, yan ve üst yüzeylerini izole etmişlerdir. Çalışmalar, $864 \leq Re_{Db} \leq 7955$ ve değiştirilmiş Grashof sayıları $Gr=1.72 \times 10^8$ den 2.76×10^9 aralığında yapılmıştır. Deneysel ölçümler sonucunda ısı kaynaklarına ait yüzeysel sıcaklık dağılımları ve Reynolds ile Grashof sayılarının bu sıcaklıklara etkisi incelenmiştir. Ayrıca, değişik Reynolds ve Grashof sayıları için Nusselt sayısı dağılımını da hesaplamışlardır. Bununla beraber, ısı transferindeki gelişmenin sonucu olarak kaldırma etkisindeki artışın; ikincil akışı, sıcaklık seviyesindeki düşmeyi ve girişteki kararsızlığı etkilediğini gözlemlemişlerdir.

Tao ve arkadaşları [40], sıkıştırılmayan akış ve ısı transferi için sonlu hacim yaklaşımında, taşınım teriminin ayrıklaştırılması ve hız ile basınç arasındaki bağıın iyileştirilmesinin sonucun kararlılığını, doğruluğunu ve yakınsama hızını etkileyen iki önemli konu olduğunu vurgulamışlardır. Patankar ve Spalding tarafından öngörülen SIMPLE algoritmasının üzerine yapılandırılan CLEAR algoritmasını kullanarak, laminer akışta dört farklı çeşit blok konfigürasyonu için sayısal çözümler üretmişlerdir. Isı transferinin iyileştirilmesi için optimum yerleşim düzeni üzerinde çalışmışlardır.

Korichi ve arkadaşı [41], dikdörtgen bir kanal içine iki tane alta ve bir tane de üste yerleştirilmiş bloklarla hava arasındaki taşınım ısı transferini sayısal incelemişlerdir. Akışı laminer kabul ederek, Reynolds sayısının, blokların boyutları ile aralarındaki mesafenin ve ısı iletkenlik katsayısının etkilerini incelemişlerdir. Kararlı akıştan kararsız akışa geçişin düşük Reynolds sayılarında ve blokun kanalın üst yüzeyine yerleştirildiği durumda gerçekleştiğini belirlemişlerdir. Bloklar çevresinde eş sıcaklık bölgelerinin varlığını tesbit etmişler ve ısı transferini Nusselt sayısına bağlı olarak değerlendirmişlerdir. Reynolds sayısının artmasıyla, bloklar arasındaki sıcaklık farkının azaldığını görmüşlerdir.

Rodgers ve Eveloy [42], elektronik devre kartlarındaki bazı sıcaklıkların HAD ile belirlenmesinde daha kararlı bir sonuç elde etmek üzere, düşük Reynolds sayılarında üç farklı türbülans modeli denemiştir. Kayma gerilmesi transport $k-w$ modelinin standart $k-\epsilon$ modeline göre daha iyi sonuçlar verdiğini gözlemlemiştir..

Moon ve arkadaşları [43], bloklu kanal içindeki darbeli akışın taşınım ısı transferine olan etkisini deneysel olarak incelemişlerdir. Bloklar arasındaki mesafe sürekli değiştirilmiş ve darbe frekansı 10 – 100 Hz arasında değiştirilmiştir. Deneyle göstermiştir ki, bloklardan olan ısı transferi büyük ölçüde frekans, darbenin genliği ve bloklar arasındaki mesafeden etkilenmektedir.

Eveloy ve Rodgers [44], gerek elektronik elemanların sıcaklıklarının gerekse de ısı- mekanik davranışlarının belirlenmesinde eşlenik (taşınım ve iletim) ısı transferinin önemini vurgulamıştır. Bir HAD kodunun, elektronik devre elemanlarının ısı analizinde zamana bağlı eşlenik ısı transferi çözümünün kısıtlılıklarını araştırmıştır.

Eveloy ve Rodgers [45], bir elektronik devre kartı (PCB) üzerinde deneysel olarak sıcaklık ölçümleri yapmışlar ve bunu bir HAD kodu kullanarak serbest taşınım için modellemişlerdir. Sayısal çalışma ile elde edilen değerler ile ölçüm neticesinde elde edilenler arasında %7'lik bir hata oranı elde etmişlerdir.

Doğan ve arkadaşları [46], dikdörtgen kesitli yatay bir kanalda karışık taşınım ısı transferini deneysel incelemiştir. Alt ve üst yüzeye yerleştirilmiş sabit ısı akısına sahip elemanlarla yapılan çalışmada, değişik kesit alanları ile Reynolds ve Grashof sayıları kullanılmışlardır. Bu ısı kaynaklarının Nusselt sayısı ve ortalama yüzey sıcaklığı dağılımlarının Reynolds ve Grashof sayıları üzerine olan etkileri ele alınmıştır. Sonuçlar, alt ve üst ısı kaynaklarının yüzey sıcaklıklarının Grashof sayısı ile orantılı olarak arttığını göstermiştir.

Perng ve arkadaşları [47], bir kanal içine yatay olarak yerleştirilmiş ısıtılmış bloklardaki türbülanslı akış bölgelerini ve taşınım ile ısı transferindeki iyileşmeyi incelemiştir. LES (Large Eddy Simulation) ve SIMPLE-C metodları kombine olarak kullanılmışlardır. Kanal girişine yerleştirilen türbülantörün ideal konumu araştırılmıştır.

Öztürk ve Tarı [48], bir kişisel bilgisayarın ATX kasesini detaylı olarak HAD kodu olan Fluent® ile modellemiştir. Sayısal çözüm, bir soğutucu kullanan bilgisayarın merkezi işlem ünitesinin zorlanmış hava ile soğutulmasına dayandırılmıştır. Kasa içinde akışa engel teşkil eden elemanlar ve sonucunda değişen hava dağılımının, soğutucunun sıcaklık dağılımını etkilediğini görmüşlerdir. Farklı işlemci soğutucu paketleri kullanmalarına rağmen hepsinin benzer özgül ısı direncine sahip olduklarını tespit etmişlerdir.

Literatürde görüldüğü gibi, özellikle son yıllarda zamana bağlı sayısal çözümlerin sayısı artmakla birlikte, üç boyutlu çözümlerin sayısı sınırlıdır. Yapılan çalışmaların çoğunda kanal duvarında sabit ısı akısı ön görülmüştür. Kanal içindeki bloklarda ve blokların monte edildiği kanal duvarına iletimle olan ısı transferinin zamana bağlı değişimi önemli ise, eşlenik (conjugate) ısı transferi analizinin de oluşturulan modele aktarılması gerektiği ortaya çıkmaktadır.

1.2. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Bu çalışmada, dikdörtgen kesitli bir kanalda giriş sıcaklığının zaman bağlı değişmesinden kaynaklanan daimi olmayan zorlanmış taşınım ısı transferi, sonlu hacim metodunu kullanan bir Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yazılımı olan Star-CCM+ ile sayısal olarak incelenmesi amaç edinilmiştir. Dikdörtgen kesitli kanal üç boyutlu olarak modellenmiştir. Sözbir [3]'in Miami Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümü'nde laminer ve türbülanslı akış için termal giriş ve kombine giriş bölgesinde bloksuz ve bloklu olarak yapmış olduğu deneylerin sonuçları karşılaştırma amaçlı olarak kullanılmıştır. Deneyler esnasında, ısıtıcıya girilen frekans değeri ve sınır şartları sabit olan kanal geometrisine bağlı Reynolds sayıları değiştirilmiştir.

Tezdeki modelde akışkan olarak hava kullanılmıştır. Deneyle ilgili sınır ve başlangıç şartları modellenmiş ve sonlu hacim metoduyla sayısal çözüme ulaşılmıştır. Bloksuz kanalda, laminer ve türbülanslı termal giriş bölgesinde değişik Reynold değerleri (1121, 1479, 1764, 2225, 11242, 17673 ve 22284) ve ısıtıcı frekansları (0.02 Hz, 0.04 Hz, 0.08 Hz, 0.16 Hz ve 0.24 Hz) için sayısal çözümler elde edilmiştir. Diğer bir çalışma ise, uzunlamasına bloklu kanalda türbülanslı kombine giriş bölgesinde değişik Reynolds (11242, 17673 ve 22284) değerleri ve 0.02, 0.08 ve 0.24 Hz ısıtıcı frekansları için gerçekleştirilmiştir.

Deneysel çalışmada, hidrodinamik yönden tamamen gelişmiş hız profili elde etmek için kullanılan emme bölümü, sayısal çalışmada üç boyutlu ve zamandan bağımsız olarak ayrıca modellenmiştir. Reynolds sayısına bağlı olarak hesaplanan havanın kütledebisi, bu bölüm için giriş sınır şartı olarak tanımlanmıştır. Buna bağlı olarak, emiş bölümünün çıkışındaki hızın x, y, z doğrultularındaki bileşenleri elde edilmiş ve bu değerler test bölümündeki dikdörtgen kesitli kanalın giriş sınır şartı olarak verilmiştir.

1.3. Çalışmanın Ana Hatları

Bu tez, toplam beş bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde konuya giriş yapılmış ve elektronik devrelerdeki soğutma problemine dikkat çekilmiştir. Ayrıca, konuyla ilgili son yıllar ağırlıklı olmak üzere literatür araştırması sonuçları ile, çalışmanın amacı ve metodu hakkında özet bilgilere yer verilmiştir. İkinci bölümde, sayısal çalışmadaki modele esas teşkil eden deneysel çalışma [14] hakkında bilgiler verilmiştir. Üçüncü bölümde, sayısal model hakkında bilgi verilmiş ve kanal duvarı, giriş ve çıkış sınır şartları ile kullanılan türbülans modeli hakkındaki ilgili eşitlikler çıkartılmıştır. Sonuçların yer aldığı dördüncü bölümde ise, deneysel ve sayısal çalışmalarla ilgili karşılaştırılmalı grafik ve tablolara yer verilmiştir. Beşinci ve son bölümde, sonuçlar tartışılmış ve bu konuda yapılabilecek çalışmalara dikkat çekilmiştir. Atıfta bulunulan kaynaklar, tez içinde yer aldıkları sırada numaralandırılmış ve kaynaklar kısmında listelenmiştir.

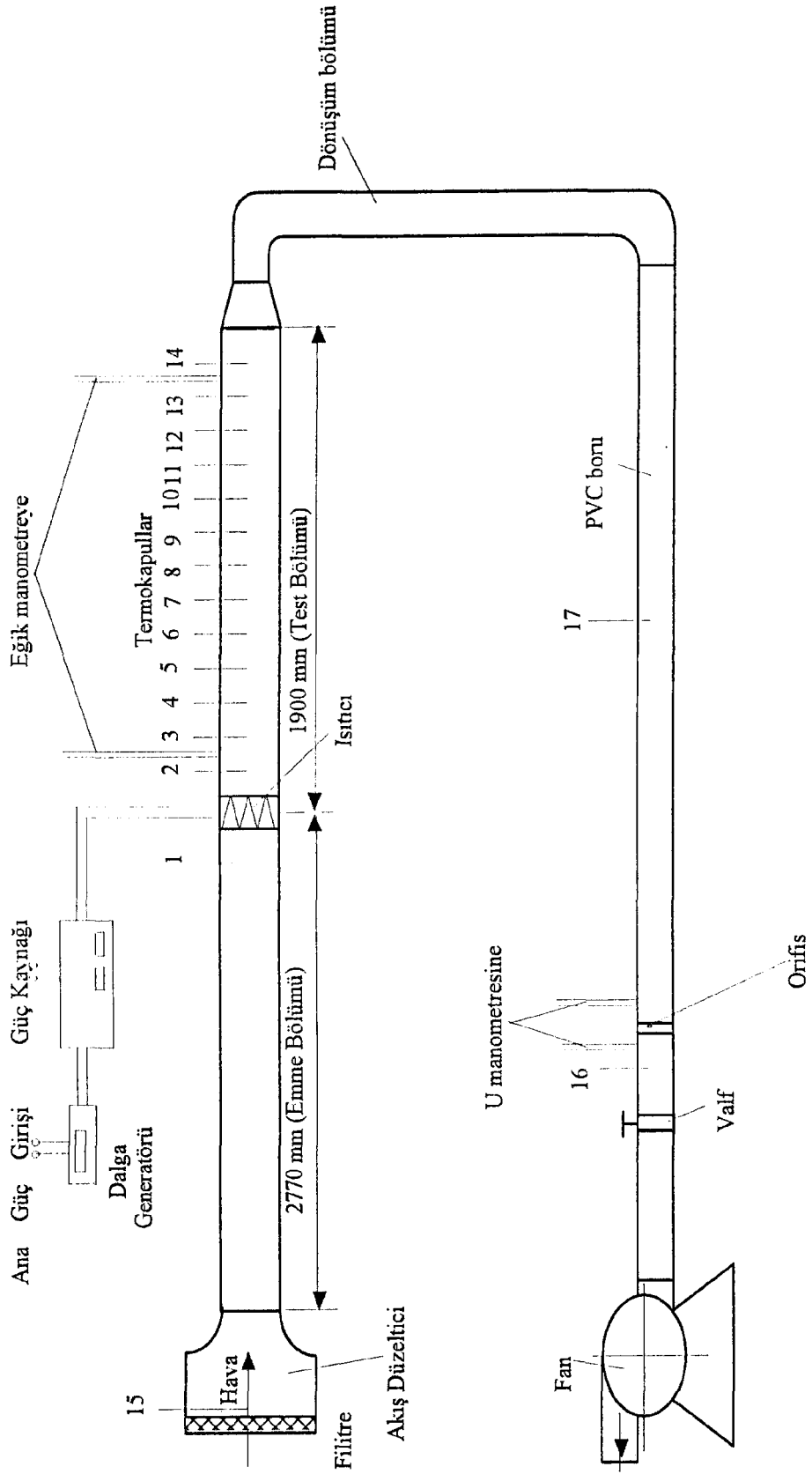
BÖLÜM 2. DENEYSEL ÇALIŞMA

Elektronik devre elemanlarının zorlanmış taşınımli hava ile soğutulması, elektronik modüllerin devre kartları üzerine düşey ve/veya yatay olarak sıralanmasından oluşur. Bu kart üzerindeki bir elemandan ısının taşınması, havanın sıcaklığında artmaya sebep olacaktır. Daimi hava akışının temini, herhangi bir soğutma sisteminin güvenilirliğini belirlemede esastır. Bu durum, kanaldaki zorlanmış havanın daimi olmayan ısı transfer analizini gerektirir.

2.1. Deneysel Çalışma Hakkındaki Veriler

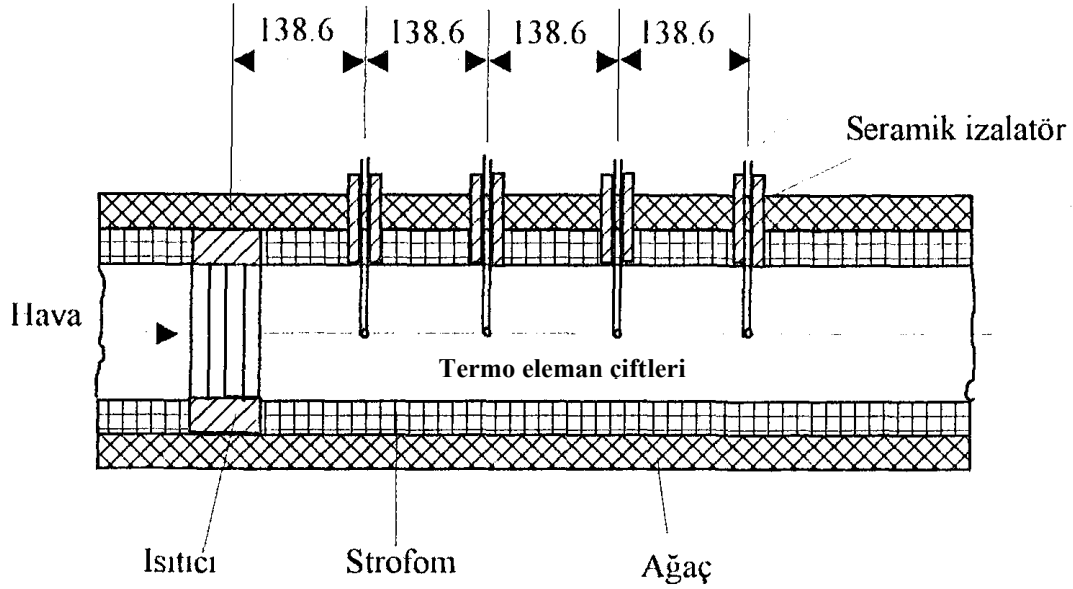
Sözber [14]'in doktora çalışmasında kullandığı deney tesisatının amacı, laminer ve türbülanslı zorlanmış taşınım için termal giriş şartlarının sinüzoidal olarak değişmesini sağlamaktır. Özellikle kanal eksenini boyunca hassas sıcaklık ölçümleri yapılmıştır. Dikdörtgen kanal ölçümleri, 254mm x 25.4mm'dir. Şekil 2.1'de deney tesisatı görülmektedir.

Hava sabit sıcaklıkta temin edilmiştir. Hidrodinamik yönden tamamen gelişmiş hız profili elde edebilmek için emme bölümü 2770 mm uzunluğunda aynı boyutlarda dikdörtgen kesitli olarak düzenlenmiştir. Test bölümü girişine elektrikli ısıtıcı yerleştirilmiştir. Bu bölümün kesit ölçümleri de diğer bölümler ile aynı tutulmuştur. Deneyler süresince kanal boyunca tüm sıcaklık ölçümleri termo eleman çiftleri ile bu bölümde gerçekleştirilmiştir. Şekil 2.2'de test bölümüne termo eleman çiftlerinin yerleştiriliş düzenine ilişkin detaylar verilmiştir.



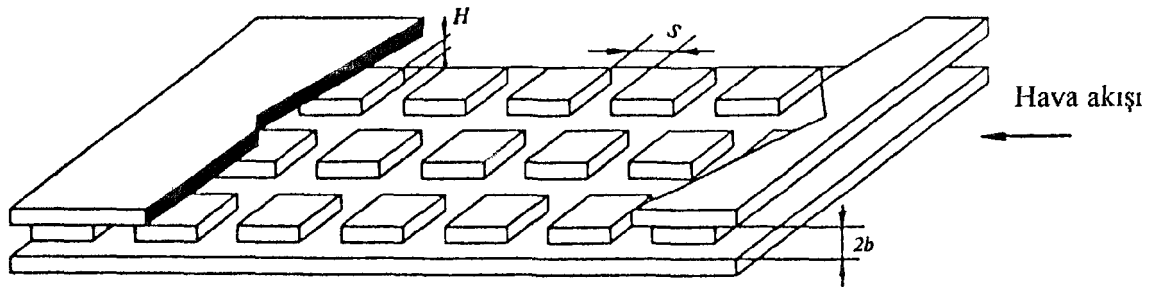
Sekil 2.1. Sözbir [14] tarafından kullanılan deney tesisi

Test bölümündeki Reynolds sayısının hassasiyetini belirlemek için önemli olan basınç düşümünü ölçmek için U manometreler kullanılmıştır.



Şekil 2.2. Test bölümündeki kanala termo eleman çiftlerinin yerleştiriliş düzeni [14]

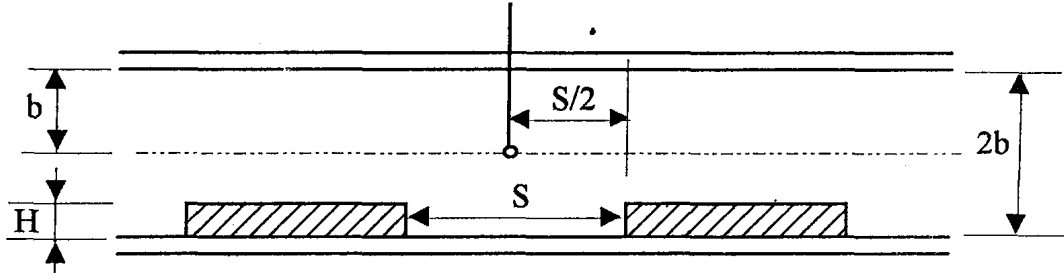
Bloksuz olarak gerçekleştirilen deneysel çalışma sonrasında, kanal içine Şekil 2.3’de gösterilen bloklar yerleştirilerek deneylere devam edilmiştir.



Şekil 2.3. Test bölümündeki bloklar

Deneyde, boyutları 63.5 x 38.1 x 4.8 mm olan dikdörtgen prizma şeklindeki strofor bloklar kullanılmıştır. Bloklar, ısıtıcıdan sonraki termo eleman çiftinden başlamak üzere 12 sıra olarak yerleştirilmişlerdir. Termo eleman çiftleri Şekil 2.4’de görüldüğü gibi blokların ortasına gelecek şekilde kanal eksenine üzerine monte edilmişlerdir.

Termo eleman çifti



Şekil 2.4. Bloklu kanalda termo eleman çiftinin yerleşimi[14]

Test kanalı boyunca 13 adet termo eleman çifti kanal eksenine üzerine yerleştirilmiştir. Farklı giriş frekansı (β) ve Reynolds sayıları (Re) için sıcaklık genliği (amplitüd), boyutsuz mesafe (x/D_e) değerine göre belirlenmiştir.

BÖLÜM 3. SAYISAL MODELİN HAZIRLANMASI

Günümüzde özellikle tüketici elektroniğine yönelik birçok uygulamalarda tek yongalı elektronik sistemler yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca çok fazla rekabetin olduğu bu alanda gerek tek yongalı gerekse çok yongalı sistemlerin ısı tasarımında Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) kullanımı da artmaktadır. HAD ile tasarım ve geliştirme zamanının kısa oluşu, deneylere göre daha ucuz oluşu ve farklı akış koşullarının rahatlıkla modellenip incelenebilmesi HAD'ın avantajlarından bazılarıdır. Bu çalışmada, elektronik sistemlerin hava ile soğutulması ve buradaki ısı transferini incelemek için hazırlanan deney düzeneğindeki dikdörtgen kesitli kanalda, tek fazlı zorlanmış taşınım ile ısı transferi hem laminer hem türbülanslı akış şartlarında bloksuz/bloklu olarak bir HAD kodu olan StarCCM+ ile modellenmiş ve analiz edilmiştir.

Geçmiş on yıl içinde kullanılan HAD kodlarının çoğu için büyük hafıza gereksinimi vardır ve taşınabilir hesaplama ortamları için henüz uygun değillerdir. Vasta [49], yaptığı çalışmada paralel işlemciler kullanarak bir Navier-Stokes kodu olan TLNS3D ile sayısal çözümü araştırmıştır. Paralel sanal makina (PVM) ve mesaj gönderme ara yüzünü (MPI) kullanarak en üst düzeyde veri iletişimini sağlamaya çalışmıştır. Merkezi işlem ünitesi (CPU) çalışma süresi ve hafıza gereksinimini klasik sistemlerle karşılaştırma imkanı bulmuştur.

Yılmaz [50], sonlu hacim metodunu esas alan FLUENT kodu kullandığı bir çalışmada, türbülanslı akışta zorlanmış ısı taşınımını sayısal olarak incelemiştir. Dikdörtgen kanalın alt yüzeyi ısıtılmıştır ve standart $k-\epsilon$ türbülans modeli kullanılmıştır. Değişik parametrelerin ısı transferi ve akış üzerine etkileri araştırılmıştır.

Talukdar [51], yatay dikdörtgen kesitli bir kanaldaki su yüzeyi ile nemli hava arasındaki taşınım ısı ve kütle transferinin HAD ile üç boyutlu olarak modellenmişlerdir. Daha önce bu konuda yapılmış olan deneysel çalışmaya dayanan sayısal çözümde, sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Esmailzadeh [52], dikdörtgen kesitli ve içinde bloklar bulunan kanaldaki hidrodinamik ve taşınım ısı transferinin sayısal incelemesi yapılmıştır. Amaç, bloklardan olan ısı transferini arttırmak için bir metod geliştirmektir. Problemin geometrisi ve fiziği, elektronik devre kartlarının soğutulmasına benzerdir. Türbülanslı akışta bloklar arasındaki boşlukların bazı vortekslere sebep olduğu ve bunun ısı transferine olumsuz etkileri olduğuna işaret edilmiştir. Bunu bertaraf etmek için bloklar arasına küçük delikler açılmış ve sonlu hacim metoduna göre sayısal çözüm üreten PHOENICS yazılımı ile HAD analizi yapılmıştır.

Jouhara [53], HAD kodu ve matematiksel modelleme ile dikdörtgen kanatlardaki soğumayı, laminer zorlanmış taşınım koşullarında sayısal olarak incelemiştir. Kanatçıkların bulunduğu kanal içindeki hava sıcaklığının arttırmayı amaçlayan teorik ve hesaplamalı yöntemleri sonucunda elde edilen değerlerin deneysel çalışma ile uyumlu olduğu irdelenmiştir.

Duplain [54], kararlı, laminer ve tam gelişmiş zorlanmış taşınım şartlarında bir kanaldaki kanat geometrilerinin optimizasyonu konusunda HAD çalışması yapmıştır. İlgili denklemler sonlu hacim metodu ile çözülmüştür. Kanatların ısıl performansına etki eden parametreler, daha önce yapılan çalışmaların da ışığında değerlendirilmiştir.

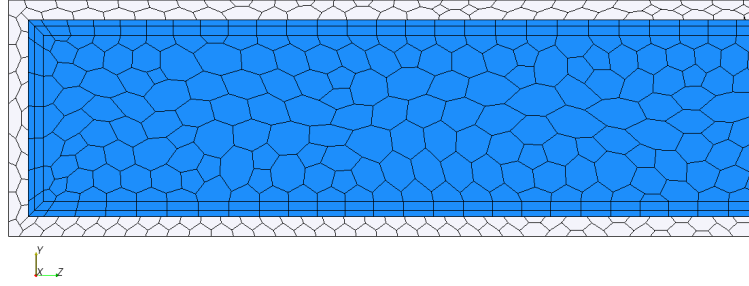
Onur [55], akışkan olarak hava kullanılan ikizkenar yamuk kesitindeki bir kanalda, hidrodinamik olarak tam gelişmiş, termal olarak gelişmekte olan bölgede zorlanmış taşınım ısı transferini ve basınç düşüm karakteristiklerini türbülanslı akışta üç boyutlu olarak FLUENT’de analiz etmişlerdir. Deneysel ve sayısal sonuçların birbirine uyumlu oldukları sonucuna varmışlardır.

Bu incelemelerden de görüleceği gibi, HAD yazılımlarının ve buna bağlı sayısal çözümlerin yaygınlaşmasının en önemli nedenleri arasında, kullanım kolaylıkları ve bilgisayarların işlemci hızlarının hatırı sayılır derecede artması gösterilebilir. Ayrıca, modele ait geometri kolaylıkla ön işlemciye girilebilmektedir. Ayrıklaştırma işlemi bünyede gerçekleştirilebilmektedir. Sınır şartları ve değişkenler kolaylıkla değiştirilebilmektedir. Çözüm sonrasında sonuçlar, grafikler ve animasyonlarla ifade edilebilmekte, böylece daha hızlı değerlendirmeye imkan sağlamaktadır.

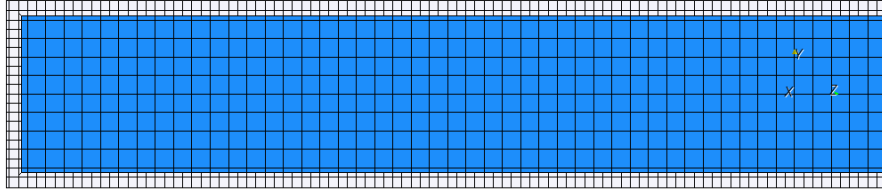
3.1. Sayısal Model

HAD'nin daha önce bahsedilen avantajları göz önüne alınarak, elektronik elemanların soğutulması süreci, Star-CCM+ programı kullanılarak sonlu hacim metoduyla çözülmüştür. Dikdörtgen kesitli kanalda zamanla değişen giriş sıcaklığında daimi olmayan zorlanmış taşınımın sayısal çözümü, tam gelişmiş laminer ve türbülanslı akış için bloksuz ile uzunlamasına bloklu (Şekil 3.3) kanallar için üç boyutlu olarak incelenmiştir. Sayısal hesaplama bölgesi üç boyutlu olarak Star - Design yazılımıyla çizilmiştir.

Modellemede ağ boyutu seçimi önemlidir. Ağ boyutları ne kadar küçük olursa, eleman sayısı da o kadar çok olacak ve çözüme esas teşkil edecek denklem sayısı ve çözüm hassasiyeti de o kadar artacaktır. Bununla beraber, çözüm için gereken işlemci kapasitesi ve çözüm zamanı da artacaktır. Bundan dolayı, daha hassas hesaplamalara ihtiyaç duyulan kanal yüzeyine yakın bölgelerde ve blokların yüzeyine yakın bölgelerdeki ağ dokusu bir ağırlık faktörü kullanılarak diğer bölgelerdeki elemanlara nazaran daha küçük elemanlardan oluşturulmuştur (Şekil 3.1 ve Şekil 3.2).

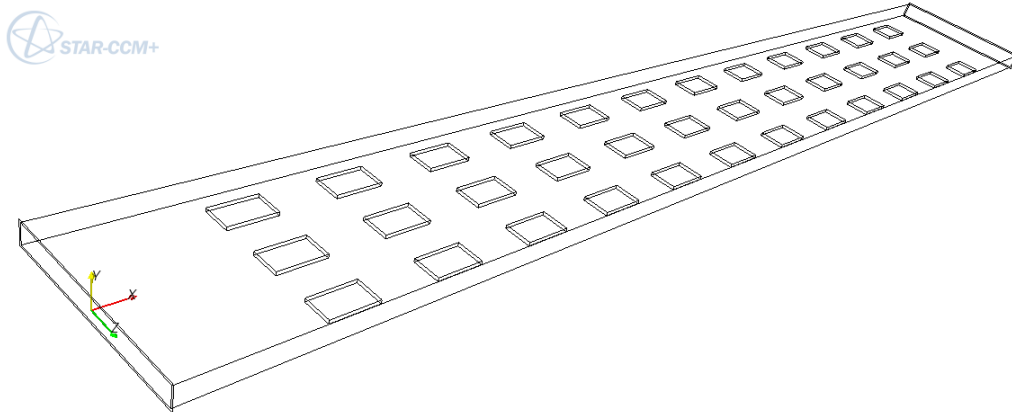


Şekil 3.1. Bloklı kanal giriş kesitinde (y-z) polyhedral ağ yapısının görünüşü



Şekil 3.2. Bloksuz kanal giriş kesitinde (y-z) ağ yapısı

Kanal içindeki akışta vizkoz dağılıma ihmal edilmiştir. Hava hızı düşük ve akışkan sıcaklık farkı azdır. Akış sürekli, sıkıştırılmaz ve üç boyutludur. Akışkanın termofiziksel özellikleri sabittir. Giriş sıcaklığı zamana bağlı olarak sinüzoidal olarak değişiklik göstermektedir. Kanal duvarından taşınım ve iletim (eşlenik) ısı transferi mevcuttur.



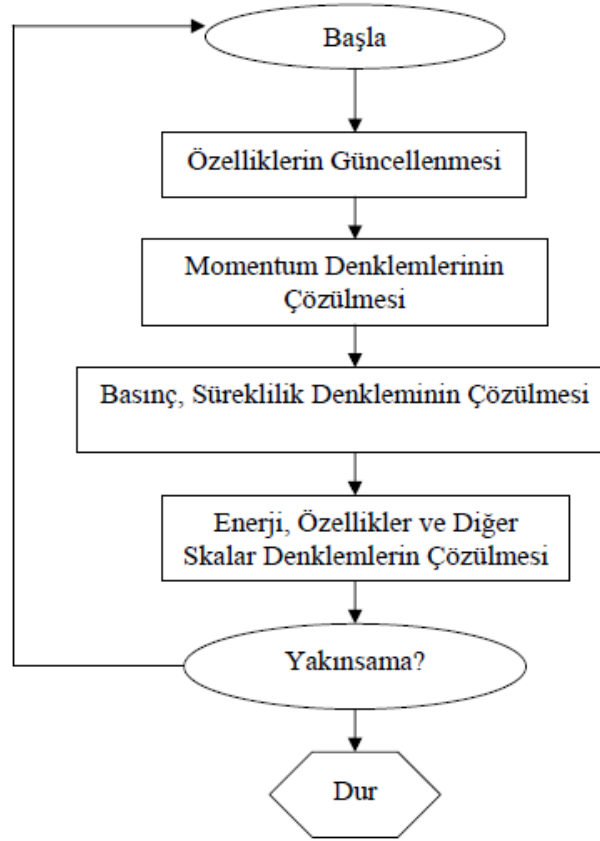
Şekil 3.3.Uzunlamasına bloklı kanal geometrisi

Hem giriş hem de test bölümleri (Şekil 3.3) sayısal çözüm için matematiksel olarak modellenmişlerdir. Esas akış x doğrultusundadır. Laminer ve türbülanslı hava, test bölümüne tamamen gelişmiş hız profilinde ve sabit sıcaklıkta girmektedir. Hesaplama bölgesindeki akış ve ısı transferini tanımlamak için üç boyutlu Navier-Stokes ve enerji eşitlikleri kullanılmıştır. Test bölümünün girişinde süreklilik, momentum ve türbülans eşitlikleri Star-CCM+ tarafından çözülmüştür.

Hava, giriş bölümüne sabit hızda girmektedir. Modelde, kanal duvarlarında kayma olmadığı (no-slip) kabul edilmiş ve kanal çıkışında basınç çıkış sınır şartı yazılıma tanımlanmıştır.

3.1.1. Ayrık (segregated) çözüm yöntemi

Star-CCM+ programında denklemlerin çözümü için ayrık (segregated) metot kullanılmıştır. Çözüm metodunda, önce hesaplama hacmi olarak, genel bir hesaplama ağı kullanılmakta olup, model yapı üzerinde ayrıklaştırmalar yapılır. Ayrık çözüm metodu uygulanırken denklemler ayrı ayrı çözülmektedir. Bir denklem çözüldükten sonra elde edilen sonuçlar diğer denklemlerde de kullanılmaktadır. Sonuçlar yakınsama (örtüşme) elde edilinceye kadar çözüm döngüsü yapan iterasyon işlemi devam etmektedir. Ayrıca Şekil 3.4'de bir ayrık çözüm yöntemi ile iterasyon işleminde kullanılan basamaklar ve iterasyon adımlarına ait akış şeması verilmiştir.



Şekil 3.4. Ayrık (segregated) çözüm yöntemi akış diyagramı [65]

3.2. Sınır Şartlarının Tanımlanması

HAD yazılımında tanımlanan sınır şartları bu bölümde ayrıntılı olarak tanımlanmıştır.

3.2.1. Giriş sıcaklık şartı

Giriş sıcaklığı test bölümünün girişinde sinüzoidal olarak değişmektedir.

$$T(x, y, z, 0) = T_i \quad t=0 \quad (3.1)$$

$$T(0, y, z, t) = T_e + \Delta T_e \sin(2\pi\beta t) \quad t>0 \quad (3.2)$$

T_i ortam sıcaklığı, T_e ortalama hava giriş sıcaklığı, ΔT_e kanal eksenine boyunca sıcaklık genliğinin değişimi ve β ise kanal girişindeki ısıtıcının frekansdır.

$$\Delta T_e = \frac{T_{\max} - T_{\min}}{2} \quad (3.3)$$

3.2.2. Duvar sıcaklık şartı

STAR-CCM+ da kanal duvarının ısı kapasitesi ve duvar kalınlığına bağlı olarak çözüm yapılabildiğinden, bunları dikkate alan beşinci çeşit sınır şartı tanımlanmıştır.

$$h_t [T(x, y, z, t) - T_\infty] + k \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial y} + (\rho c)_w L \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial t} = 0, y = b \quad (3.4)$$

Burada, $h_t = (1/h + k_w/L)^{-1}$ toplam ısı transfer katsayısını, k_w , ρ_w ve c_w sırasıyla iletim katsayısı, yoğunluk ve kanal duvar malzemesinin özgül ısısıdır. Bu parametreler model oluşturulurken yazılıma girilmiştir.

3.2.3. Hava giriş hızı

Tam gelişmiş akımın elde edildiği giriş kanalı ayrıca modellenmiştir. Deneysel çalışmadaki ortalama hız değerleri (Tablo 3.1) esas alınarak (3.5) eşitliğinden her bir Reynolds sayısı için kütleli debi hesaplanarak üç boyutlu sayısal modele giriş sınır şartı olarak tanımlanmıştır.

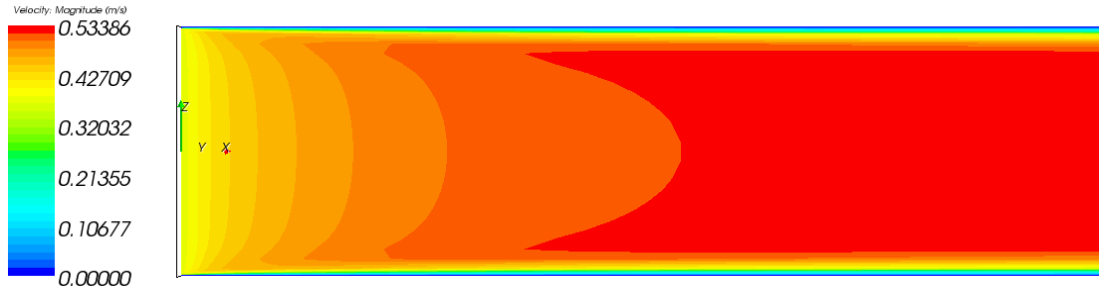
$$m = U_m \cdot A \cdot \rho \quad (3.5)$$

burada, m kütleli debi, A kanal kesit alanı, U_m ortalama hız ve ρ havanın yoğunluğudur.

Tablo 3.1. Deneysel çalışmadaki kanal girişindeki ortalama hızlar

Test Kanalı Girişindeki Ortalama Hızlar	
Reynolds Sayısı	Ortalama Hız ($U_m - \text{m/s}$)
1121	0.40
1479	0.53
1764	0.63
2225	0.80
11242	3.77
17673	5.93
22284	7.47

Bunun sonucunda, giriş kanalının sonunda elde edilen hidrodinamik olarak tam gelişmiş havaya ait hız değerlerinin x, y, z bileşenleri tablo halinde elde edilmiştir. Elde edilen bu değerler test bölümündeki kanala ait sayısal modele giriş sınır şartı olarak tanımlanmıştır (Şekil 3.4).



Şekil 3.5. Giriş kanalında Re 1121 için giriş sınır şartının kütleli debi olarak tanımlandığı durumda x-z düzleminde elde edilen hız profili

Laminer akış için hız profili bir paraboldür ve genel olarak şu şekilde tanımlanır.

$$U(y) = \frac{3}{2} U_m \left[1 - (y/b)^2 \right], \quad 0 < y < b \quad (3.6)$$

burada U_m , kanal içindeki akışkanın ortalama hızı, $U(y)$ ise, y doğrultusundaki hız profilidir.

Bununla beraber, tamamen gelişmiş türbülanslı akış için sade bir ifade yoktur.

3.2.4. Türbülans modeli

Star-CCM+ da türbülans modeli olarak gerçekçi k -epsilon türbülans modeli (realizable k -epsilon) kullanılmıştır. Shih ve arkadaşları [56] tarafından geliştirilen başarılı bir türbülans modelidir. Bu model, türbülans dağılma oranı (ϵ) için yeni bir transport denklemi tanımlamaktadır. Ayrıca, modelin kritik katsayısı olan C_μ , ortalama debi ve türbülans özelliklerinin bir fonksiyonu olarak tanımlanmaktadır. Bu katsayı, standart k - ϵ modelinde sabit kabul edilmekteydi. Bu durum, modelin türbülansın fiziğine bağlı bazı matematiksel sınırlamaları aşmasını sağlamaktadır. C_μ değişkeni aynı zamanda sınır tabakalardaki deneysel sonuçlarla da uyumlu sonuç vermiştir. Gerek standart gerekse de gerçekçi k - ϵ modelleri Star-CCM+ da iki katmanlı yaklaşımla uygulanmışlardır. Böylece, vizkoz alt tabakanın analizinin yapılabilmesi için hassas ağ yapılarının kullanılmasını mümkün kılmaktadır.

3.2.4.1. Türbülans modelinde iki katmanlı yaklaşım

İki katmanlı model ilk olarak Rodi [57] tarafından düşük Reynolds sayısı yaklaşımına alternatif olarak tavsiye edilmiştir. Bu modelde hesaplama iki katmana ayrılmıştır. Duvara yakın katmanda türbülans dağılma oranı ϵ ve türbülans vizkozitesi μ_t , duvardan uzaklığın bir fonksiyonu olarak tanımlanmışlardır. Duvara yakın tabaka için belirlenen ϵ değerleri, duvardan uzak kısım için transport denklemlerinin çözümü sonucu bulunan değerlerle uygun tarzda harmanlanmışlardır.

Türbülanslı kinetik enerji denklemi tüm akış için çözülmüştür. İki katmanlı model, uzunluğun,

$$l_{\varepsilon} = f(y, Re_y) \quad (3.7)$$

ve türbülans vizkozitesi oranının

$$\mu_t / \mu = f(Re_y) \quad (3.8)$$

bir fonksiyonu olarak tanımlanmıştır.

Türbülanslı Reynolds sayısı,

$$Re_y = \frac{\sqrt{k_y}}{\nu} \quad (3.9)$$

İki katmanlı modelde yayılma oranı ε basitçe şöyle hesaplanmaktadır.

$$\varepsilon = \frac{k^{3/2}}{l_{\varepsilon}} \quad (3.10)$$

Türbülanslı taşınım ile ısı transferi için eddy vizkozitesini (ε_m) ve eddy difüzyonunu (ε_h) bilmek yeterlidir. Eddy vizkozitesinin iki tabakalı modeli ve türbülanslı Prandtl sayısı (Pr_t) literatürde yer almaktadır [58].

3.3. Sonlu Hacim Ayırıklaştırması

Sonlu hacim ayırıklaştırma metodunun temel akış denklemlerine uygulanması ile ilgili detaylı çalışmalar Demirdzic ve arkadaşları [59, 60], Peric [61, 62] ile Mathur ve Murthy [63, 64] tarafından detaylı olarak çalışılmıştır. Bu metodlar, süreklilik ve momentum denklemlerinin eşleştirilmesi esasına dayanmaktadır.

Sonlu hacim metodunda çözüm alanı, hesaplama yapılan ağ hücresine ilişkin sonlu sayıda küçük kontrol hacimlerine ayrılmaktadır. Süreklilik transport denkleminin integrali alınmış halinin ayırıklaştırılmış uyarlaması, her bir kontrol hacmine

uygulanır. Buradaki amaç, bir dizi cebirsel denklem elde etmektir. Her bir denklem sistemindeki bilinmeyen sayısı, ağdaki hücre sayısına bağlıdır. Sonuç olarak lineer denklemler bir cebirsel algortima ile çözülür.

Star-CCM+ de kullanılan sonlu hacim ayrıklaştırma metoduna ilişkin bazı temel denklemler aşağıda incelenmiştir [65].

3.3.1. Ana denklemler

Akış problemlerinin hesaplanmasında; kütle, momentum ve enerji korunum denklemleri ile çözüm yapılmaktadır. Bu diferansiyel denklemler problemlere uygun sınır şartları kullanılarak çözülmektedir.

3.3.1.1. Korunum denklemleri

Hesaplamalarda kullanılan matematiksel modeller; kütle, momentum, enerji ve skaler değişkenler için korunum denklemlerinin sayısal çözümüne dayanmaktadır.

3.3.1.2. Kütle korunumu

Süreklilik denklemi kütle korunumu prensibinden elde edilmektedir. Sabit bir kontrol hacmi için, kütle korunumu oluşturulursa, giren ve çıkan akışkan kütlelerin kontrol hacmindeki zamanla değişimi süreklilik denklemini verir.

$$\nabla \left(\rho \cdot \vec{V} \right) + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (3.11)$$

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (3.12)$$

Burada ρ akışkan yoğunluğunu, u , x doğrultusundaki, v , y doğrultusundaki ve w , z doğrultusundaki akışkan hız bileşenlerini, t ise zamanı temsil etmektedir.

Akışın sürekli olduğu durumda;

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad \left(\frac{\partial \rho}{\partial t} \right) = 0 \quad (3.13)$$

3.3.1.3. Momentumun korunumu

x doğrultusundaki momentum denklemi;

$$\left(u \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + v \frac{\partial(\rho u)}{\partial y} + w \frac{\partial(\rho u)}{\partial z} \right) + \frac{\partial P}{\partial x} = \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (3.14)$$

y doğrultusundaki momentum denklemi;

$$\left(u \frac{\partial(\rho v)}{\partial x} + v \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + w \frac{\partial(\rho v)}{\partial z} \right) + \frac{\partial P}{\partial y} = \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + \rho g \beta (T - T_i) \quad (3.15)$$

z doğrultusundaki momentum denklemi;

$$\left(u \frac{\partial(\rho w)}{\partial x} + v \frac{\partial(\rho w)}{\partial y} + w \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} \right) + \frac{\partial P}{\partial z} = \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (3.16)$$

şeklinde ifade edilmekte olup, P statik basınç, μ moleküler viskozite, y yönündeki momentum denkleminde bulunan $\rho g \beta (T - T_i)$ ifadesi fiziksel olarak kaldırma kuvveti ile ilgili terim olup, akışkanın doğal taşınım nedeniyle ivmelendiğini gösterir. g yerçekimi ivmesi, β ısıl genleşme katsayısı, T_i ise giriş sıcaklığını göstermektedir [66].

3.3.1.4. Enerjinin korunumu

Entalpinin korunumu basınç ve dış kuvvetler ihmal edilirse şu şekilde yazılabilir.

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{k}{\rho c_p} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (3.17)$$

burada, ρ akışkan yoğunluğu, u , x doğrultusundaki, v , y doğrultusundaki ve w , z doğrultusundaki akışkan hız bileşenleri olup, k ısı iletim katsayısı, T sıcaklık, c_p özgül ısıdır.

BÖLÜM 4. SONUÇLAR

4.1. Sonuçların Değerlendirilmesi

Bu bölümde sayısal hesaplamalardan elde edilen sonuçlar değerlendirilip, literatürdeki [14] deneysel verilerle karşılaştırılmaktadır. Dikdörtgen kesitli kanal için laminer ve türbülanslı termal giriş bölgesinde, bloksuz ve uzunlamasına bloklu kanal için daimi olmayan zorlanmış ısı taşınımına ilişkin deneysel çalışma ile bu çalışmada elde edilen üç boyutlu sayısal değerler değerlendirmeye esas alınmıştır.

4.1.1. Pürüzsüz kanalda laminer ve türbülanslı akışta x ekseni boyunca sıcaklık genliğinin değişimi

Şekil 4.1 ve 4.20 arasında uzun kanal ekseni boyunca (x) değişik Reynolds sayıları (Re 1121, 1479, 1764 ve 2225) için laminer akışta ve bloksuz kanalda 0.02, 0.04, 0.08, 0.16 ve 0.24 Hz) ısı giriş frekansları için boyutsuz sıcaklık genliklerinin deneysel ve sayısal değerleri grafik formda ifade edilmişleridir. Sıcaklık genliğinin doğrusal olarak azaldığı gözlenmiştir. Deneysel ve sayısal çalışma sonuçlarının eğim değerleri arasındaki farkların kabul edilebilir sınırlar aralığında oldukları gözlenmiştir.

Tablo 4.1'de bloksuz (pürüzsüz) kanal için laminer termal giriş bölgesinde farklı Reynolds sayıları (Re 1121, 1479, 1764 ve 2225) ve giriş frekansları (β) için deneysel ve nümerik sıcaklık genliklerinin eğim değerlerinin (α) karşılaştırılmasına yer verilmiştir. Deneysel ve sayısal çalışmaya ait sonuçların mutlak eğim değerleri arasındaki mutlak farkların kabul edilebilir sınırlar içinde olduğu görülmüştür.

Şekil 4.21 ve 4.35 arasında uzun kanal eksenini boyunca (x) değişik Re değerleri (Re 11242, 17673 ve 22284) için türbülanslı akışta ve bloksuz kanalda 0.02 Hz - 0.24 Hz arasındaki ısı giriş frekansları için boyutsuz sıcaklık genliklerinin deneysel ve sayısal değerleri grafik formda ifade edilmişlerdir. Sıcaklık genliğinin doğrusal olarak azaldığı gözlenmiştir. Deneysel ve sayısal çalışma sonuçlarının eğim değerleri arasındaki farkların kabul edilebilir sınırlar aralığında oldukları gözlenmiştir.

Tablo 4.2’de bloksuz (pürüzsüz) kanal için türbülans termal giriş bölgesinde farklı Reynolds sayıları (Re 11242, 17673 ve 22284) ve giriş frekansları (β) için deneysel ve nümerik sıcaklık genliklerinin eğim değerlerinin (α) karşılaştırılmasına yer verilmiştir. Deneysel ve sayısal çalışmaya ait sonuçların mutlak eğim değerleri arasındaki mutlak farkların kabul edilebilir sınırlar içinde olduğu görülmüştür.

4.1.2. Bloklı kanalda türbülanslı akışta x eksenini boyunca sıcaklık genliğinin değışimi

Şekil 4.36 ve 4.50 arasında uzun kanal eksenini boyunca (x) değişik Re değerleri (Re 11242, 17673 ve 22284) için türbülanslı akışta ve uzunlamasına bloklı kanalda 0.02 Hz - 0.24 Hz arasındaki ısı giriş frekansları için boyutsuz sıcaklık genliklerinin deneysel ve sayısal değerleri grafik formda ifade edilmişlerdir. Sıcaklık genliğinin doğrusal olarak azaldığı gözlenmiştir. Deneysel ve sayısal çalışma sonuçlarının eğim değerleri arasındaki mutlak farkların kabul edilebilir sınırlar aralığında oldukları gözlenmiştir. Özellikle düşük frekans değerlerinde z ekseninde yayılma etkisi dolayısıyla, sayısal ve deneysel sonuçlar arasındaki farkın bağıl olarak daha yüksek olduğu görülmüştür. Buna deneysel çalışmadaki ölçme hatalarının da etkisi olabileceği sonucuna varılmıştır.

Tablo 4.3’de uzunlamasına bloklı kanal için türbülanslı termal giriş bölgesinde farklı Reynolds sayıları (Re 11242, 17673 ve 22284) ve 0.02 – 0.24 Hz aralığındaki giriş frekansları (β) için deneysel ve nümerik sıcaklık genliklerinin eğim değerlerinin (α) karşılaştırılmasına yer verilmiştir. Deneysel ve sayısal çalışmaya ait sonuçların mutlak eğim değerleri arasındaki mutlak farkların kabul edilebilir sınırlar içinde olduğu görülmüştür.

4.1.3. Uzunlamasına bloklı kanalda değişik x/D_e değerleri için kanal duvarındaki sıcaklık genliğinin değişimi

şekil 4.51 ve 4.65 arasında, türbölanslı kombine giriş bölgesinde uzunlamasına bloklı kanal boyunca, Re 11242, 17673 ve 22284 değerleri ve $\beta=0.02-0.24$ Hz giriş frekanslarında x eksenini doğrultusunda değişik x/D_e değerleri için kanal duvarındaki sıcaklık genlik (amplitüd) değişiminin deneysel ve sayısal çözüm için karşılaştırılması yapılmıştır. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) modelinde kanal duvarı için eşlenik ısı transferi tanımlanmıştır. Elde edilen sonuçların deneysel çalışma ile kabul edilebilir korelasyona sahip olduğu görölmüştür.

Tablo 4.4'de, türbölanslı kombine giriş bölgesinde uzunlamasına bloklı kanal boyunca, farklı Reynolds ve giriş frekanslarında x eksenini doğrultusunda değişik x/D_e değerleri için kanal duvarı sıcaklık genlik (amplitüd) değişiminin deneysel ve sayısal çözüm için karşılaştırılması yapılmış ve deneysel ve sayısal çalışmaya ait sonuçların mutlak eğim değerleri arasındaki mutlak farkların kabul edilebilir sınırlar içinde olduğu görölmüştür.

4.1.4. Bloksuz kanalda değişik x/D_e değerlerinde kanal giriş sıcaklığının zamana göre değişimi

şekil 4.66 ve 4.77 arasında uzun kanal eksenini boyunca Reynolds sayıları 1121, 1479, 1764 ve 2225 için laminer akışta ve bloksuz kanalda 0.02, 0.08, 0.24 Hz ısı giriş frekanslarında değişik x/D_e değerlerinde kanal giriş sıcaklığının zamana göre değişimi gösterilmiştir. Kanal eksenini üzerinde farklı noktalarda maksimum ve minimum sıcaklık ile genlik değerlerinin, ısıtıcıdan itibaren giderek azalmakta olduğu görölmektedir. Bu aşamada, elde edilen sayısal ve deneysel sonuçlar arasındaki bağıl farkın en fazla % 19 olduğu sonucuna varılmıştır.

4.1.5. Bloklu ve bloksuz kanalda değişik x/D_e değerlerinde kanal giriş sıcaklığının zamana göre değişimi

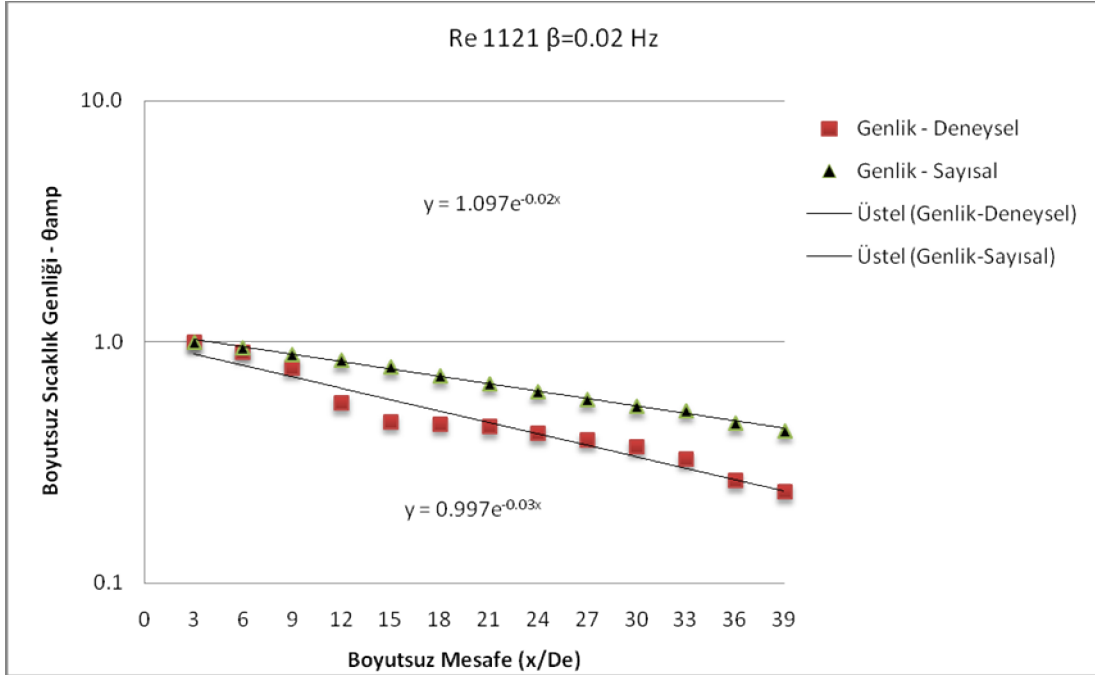
Şekil 4.78 ve 4.86 arasında, türbülanslı kombine giriş bölgesinde uzunlamasına sıralı bloklu kanal boyunca, Re 11242, 17673, 22284 değerleri ve $\beta=0.02, 0.08, 0.24$ Hz giriş frekanslarında x eksenini doğrultusunda değişik x/D_e değerlerinde kanal giriş sıcaklığının zamana göre değişimi gösterilmiştir. Kanal eksenini üzerinde farklı noktalarda maksimum ve minimum sıcaklık ile genlik değerlerinin, ısıtıcıdan itibaren giderek azalmakta olduğu görülmektedir.

Şekil 4.87 ve 4.90 arasında, laminer termal giriş bölgesinde bloksuz kanal boyunca, Re 1121, 1479, 1764, 2225 ve $\beta=0.02 - 0.24$ Hz aralığındaki giriş frekanslarında x eksenini doğrultusunda değişik x/D_e değerleri için sıcaklık genliğinin değişimine ilişkin grafikler yer almaktadır. Kanal eksenini boyunca, yarı logaritmik ekseninde sıcaklık genliğinin doğrusal olarak azaldığı görülmektedir. Aynı Reynolds sayısı için, frekans arttığı zaman sıcaklık genliğinin azaldığı izlenmektedir.

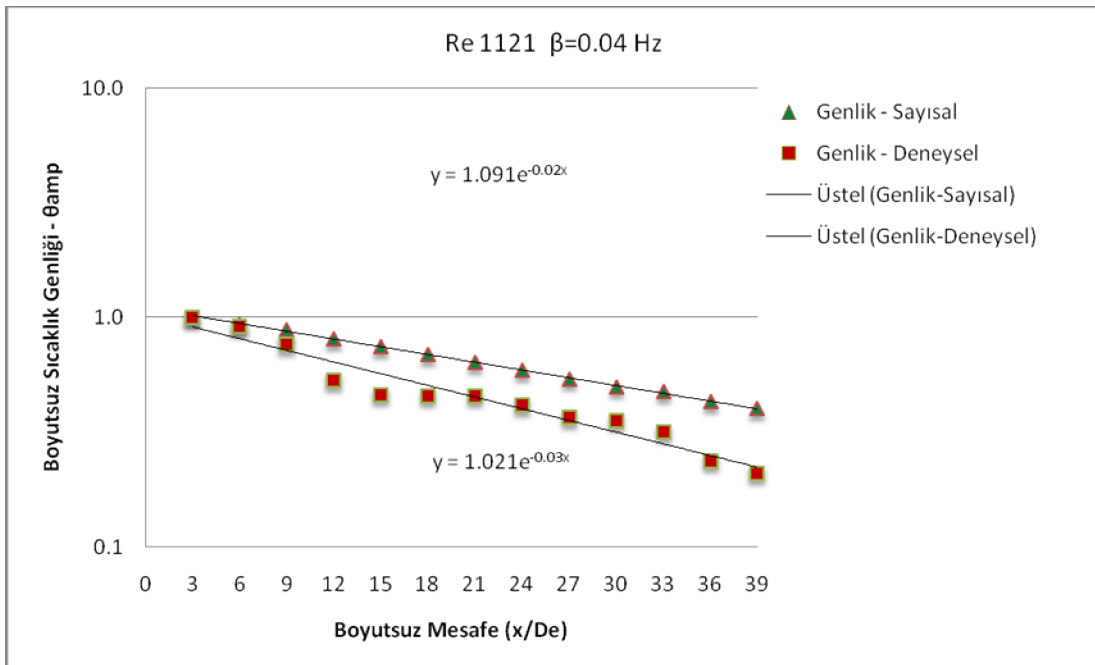
Şekil 4.91 ve 4.93 arasında ise, türbülanslı kombine giriş bölgesinde uzunlamasına sıralı bloklu kanal boyunca, Re 11242, 17673, 22284 ve $\beta=0.02 - 0.24$ Hz aralığındaki giriş frekanslarında x eksenini doğrultusunda değişik x/D_e değerleri için sıcaklık genliğinin değişimi görülmektedir. Aynı Reynolds sayısı için, frekans arttığı zaman sıcaklık genliğinin azaldığı izlenmektedir.

4.1.6. Uzunlamasına bloklu kanalda Re 11242 $\beta=0.04$ Hz için x - y , x - z ve y - z düzlemlerindeki sıcaklık ve hız dağılımları

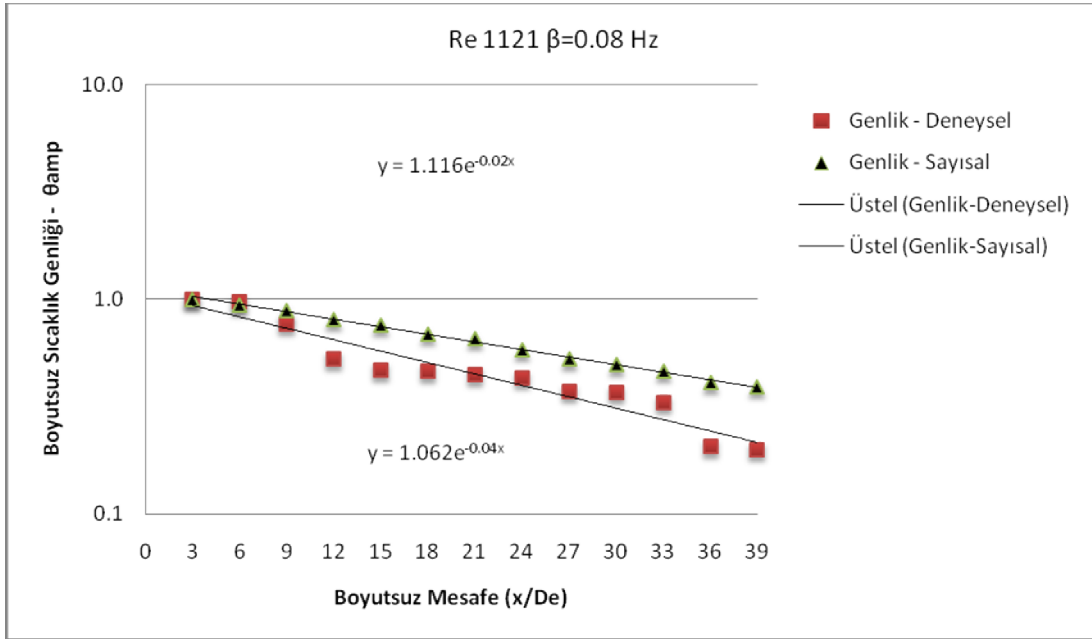
Star-CCM+ da, Re 11242 ve $\beta=0.04$ Hz için x - y , x - z ve y - z kesitlerinde elde edilen sıcaklık ve hız dağılımları herhangi bir t zamanında Şekil 4.94, 4.95, 4.96'da verilmiştir. Üç boyutlu hız dağılımları da, Şekil 4.97, 4.98 ve 4.99'da görülmektedir. Zamana bağlı çözüm nedeniyle tüm parametreler anlık değişiklikler göstermektedir. Tüm konfigürasyonlar için benzer sonuçların elde edilebilmesine rağmen, aşırı yoğunluğa sebebiyet vermemek için sadece uzunlamasına bloklu kanaldaki Re 11242 $\beta=0.04$ Hz için elde edilen sonuçlara yer verilmiştir



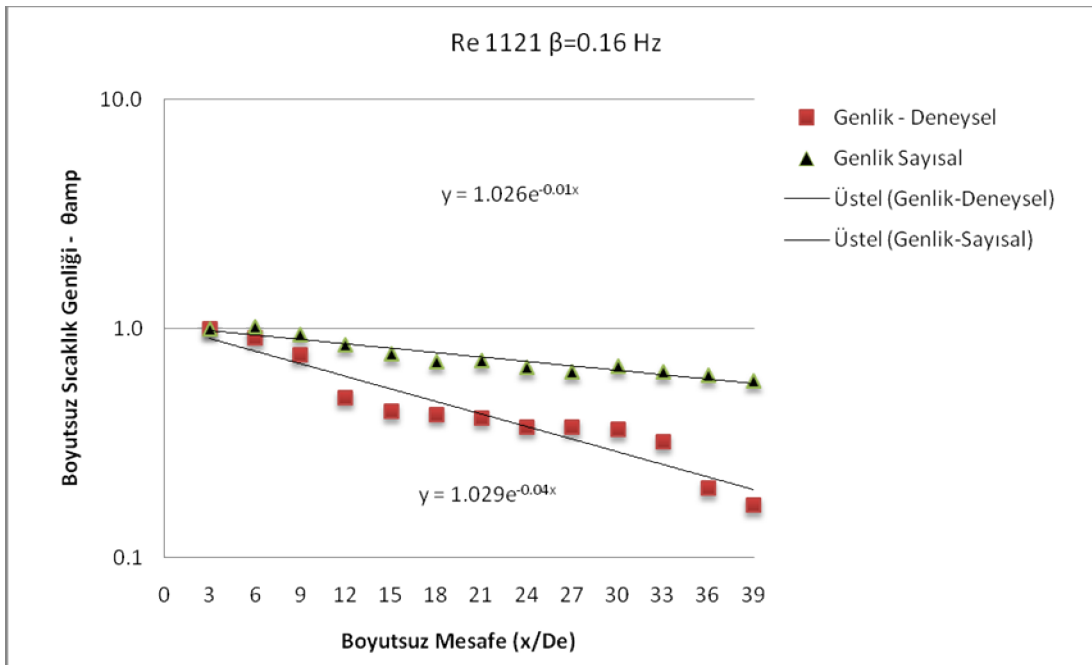
Şekil 4.1. Laminer termal giriş bölgesinde pürüzsüz (bloksuz) kanalda, $Re \approx 1121$ ve $\beta = 0.02$ Hz giriş frekansı için x eksenini boyunca sıcaklık genliğinin değişiminin deneysel ve sayısal çözüm için karşılaştırılması



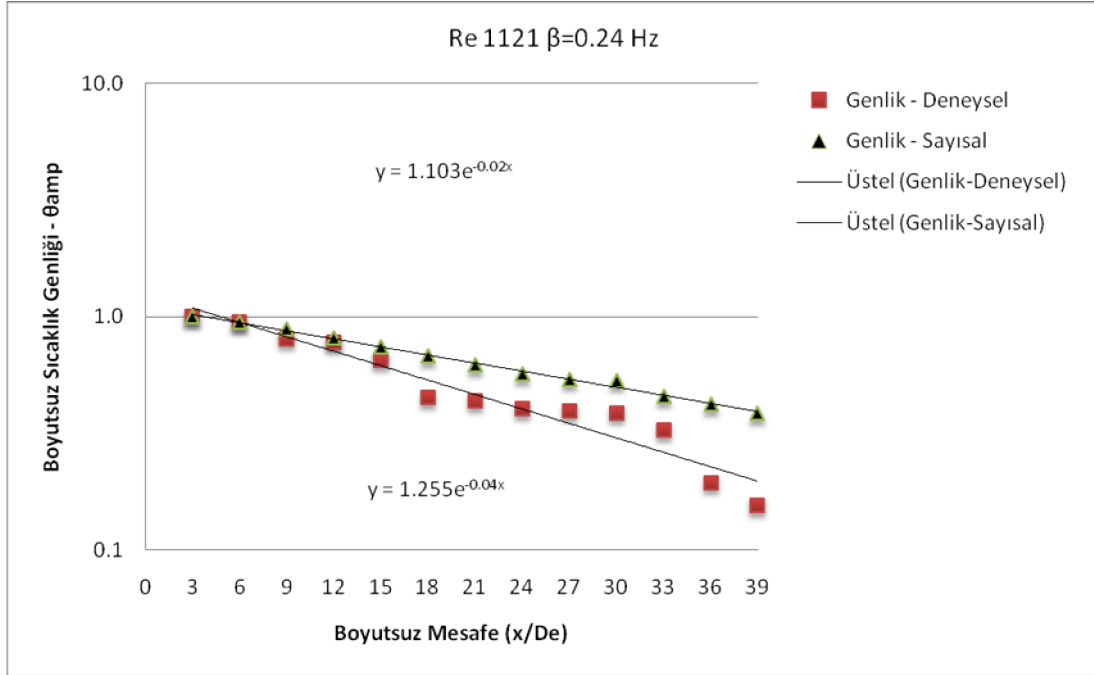
Şekil 4.2. Laminer termal giriş bölgesinde pürüzsüz (bloksuz) kanalda, $Re \approx 1121$ ve $\beta = 0.04$ Hz giriş frekansı için x eksenini boyunca sıcaklık genliğinin değişiminin deneysel ve sayısal çözüm için karşılaştırılması



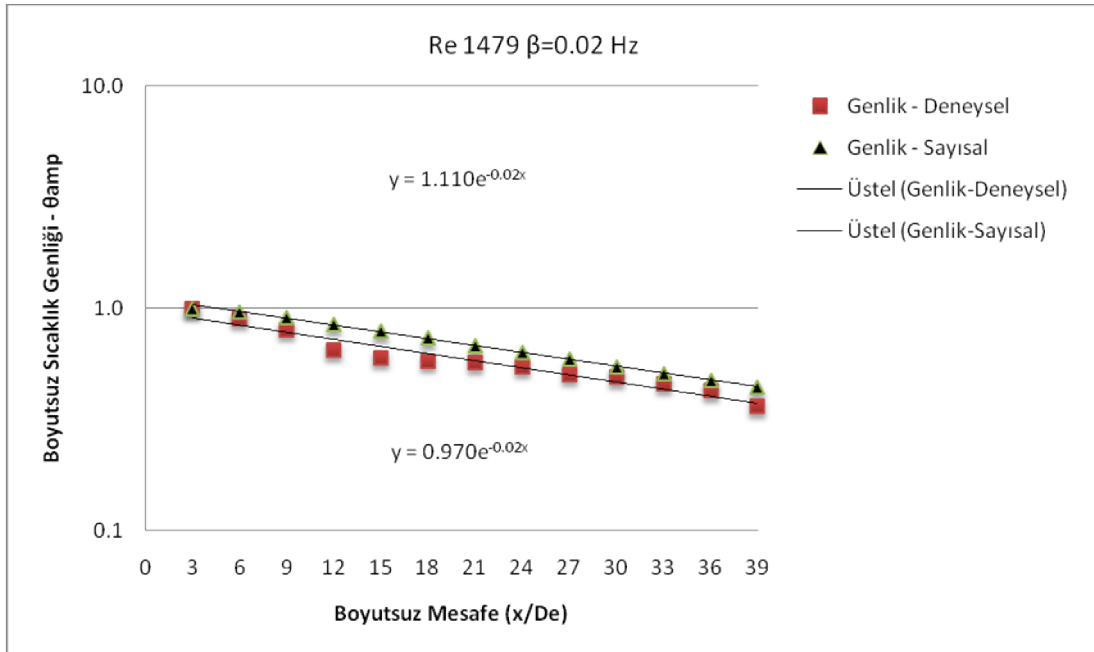
Şekil 4.3. Laminer termal giriş bölgesinde pürüzsüz (bloksuz) kanalda, $Re \approx 1121$ ve $\beta=0.08$ Hz giriş frekansı için x eksenı boyunca sıcaklık genliğinin değişiminin deneysel ve sayısal çözümler için karşılaştırılması



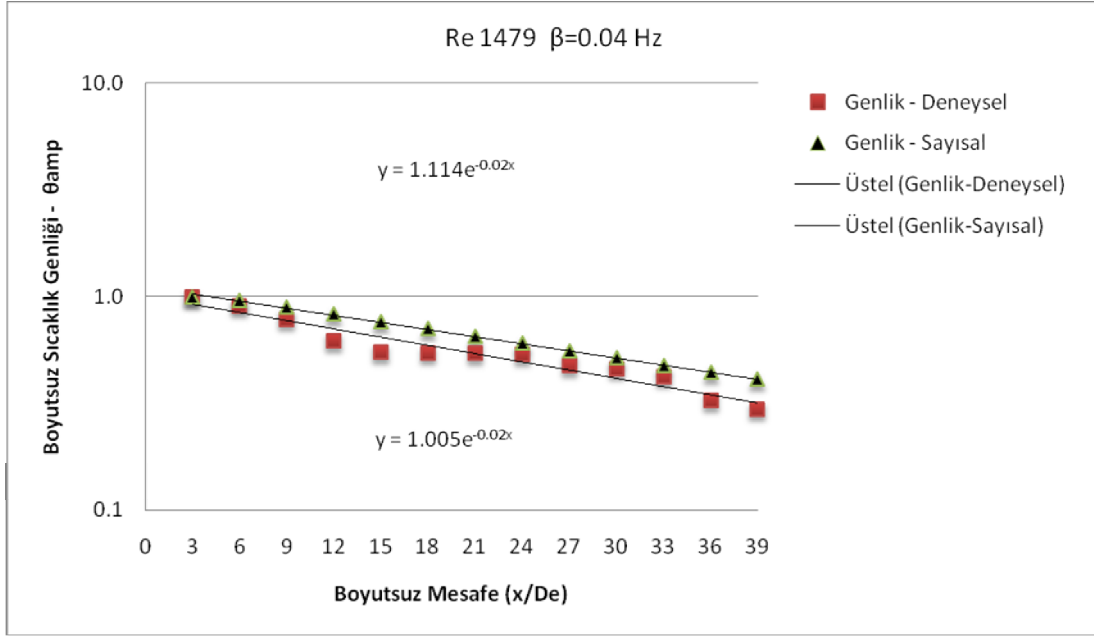
Şekil 4.4. Laminer termal giriş bölgesinde pürüzsüz (bloksuz) kanalda, $Re \approx 1121$ ve $\beta=0.16$ Hz giriş frekansı için x eksenı boyunca sıcaklık genliğinin değişiminin deneysel ve sayısal çözümler için karşılaştırılması



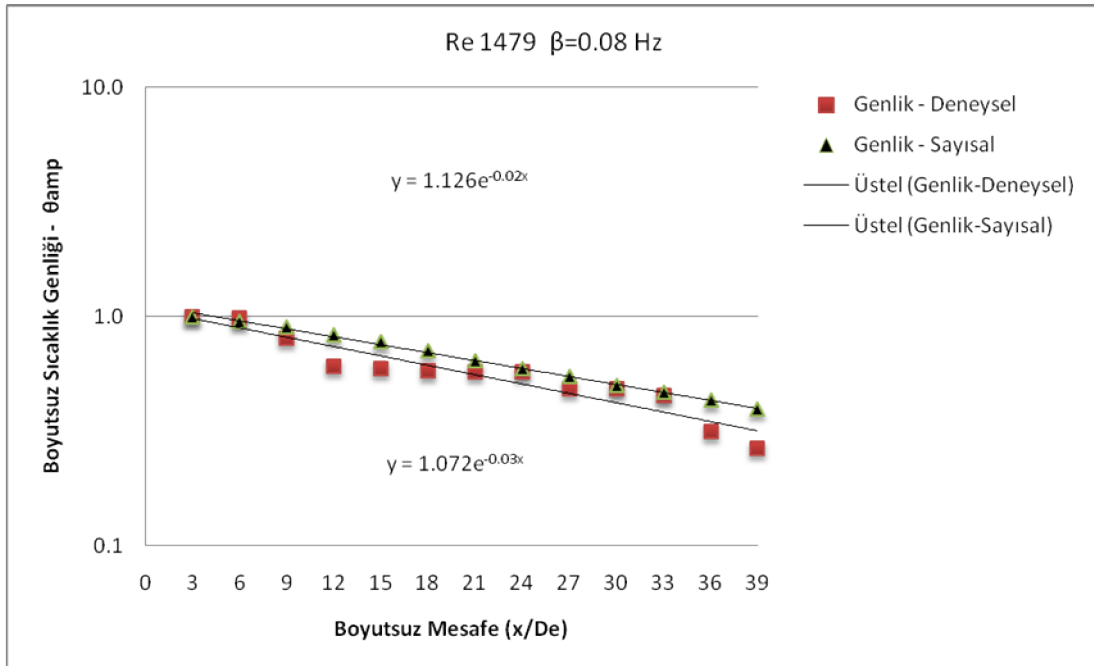
Şekil 4.5. Laminer termal giriş bölgesinde pürüzsüz (bloksuz) kanalda, $Re \approx 1121$ ve $\beta=0.24$ Hz giriş frekansı için x eksenini boyunca sıcaklık genliğinin değişiminin deneysel ve sayısal çözümler için karşılaştırılması



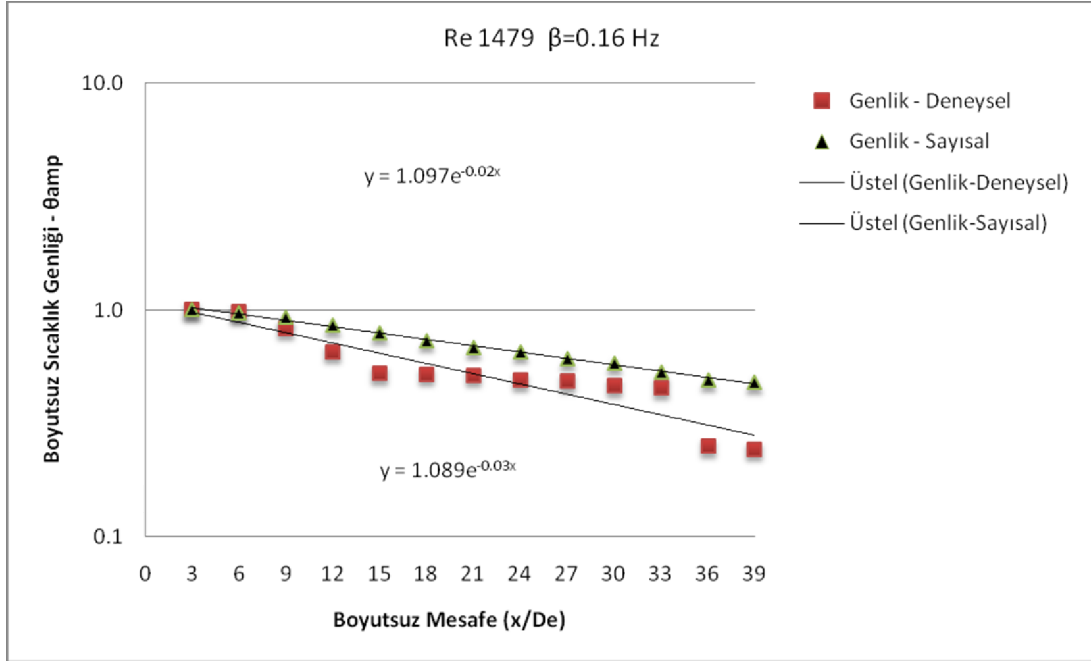
Şekil 4.6. Laminer termal giriş bölgesinde pürüzsüz (bloksuz) kanalda, $Re \approx 1479$ ve $\beta=0.02$ Hz giriş frekansı için x eksenini boyunca sıcaklık genliğinin değişiminin deneysel ve sayısal çözümler için karşılaştırılması



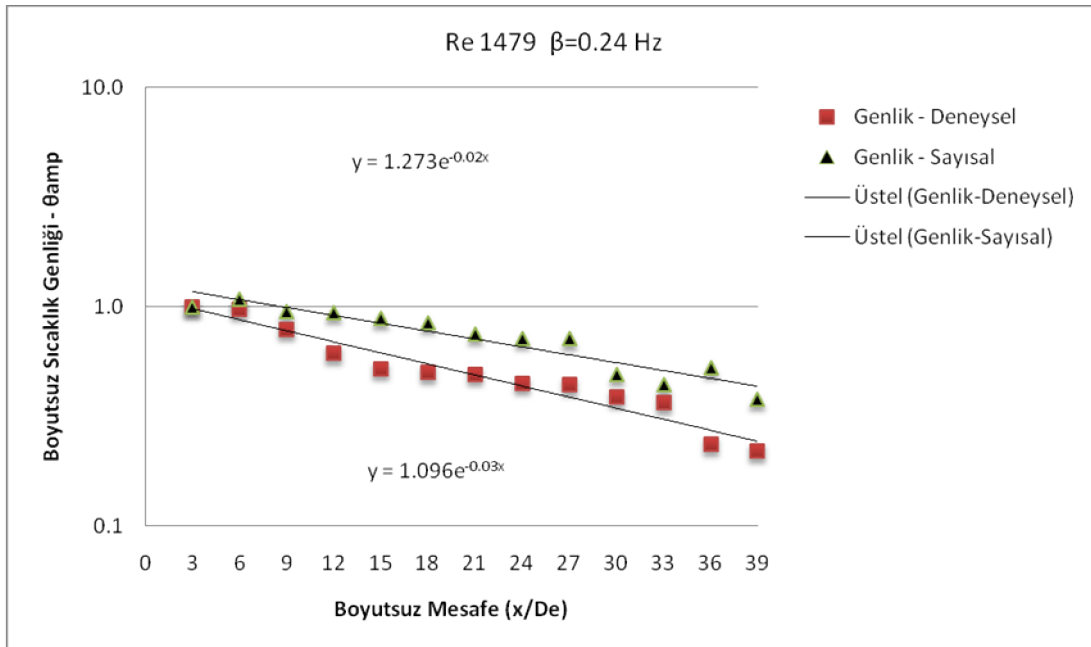
Şekil 4.7. Laminer termal giriş bölgesinde pürüzsüz (bloksuz) kanalda, $Re \approx 1479$ ve $\beta=0.04$ Hz giriş frekansı için x eksenini boyunca sıcaklık genliğinin değişiminin deneysel ve sayısal çözümler için karşılaştırılması



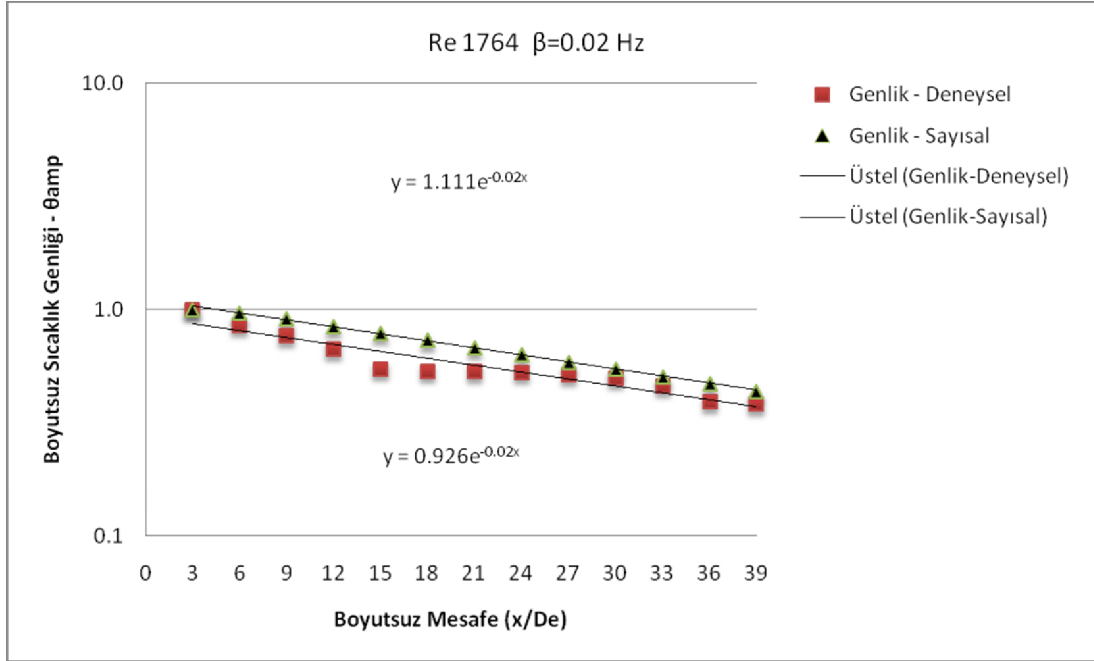
Şekil 4.8. Laminer termal giriş bölgesinde pürüzsüz (bloksuz) kanalda, $Re \approx 1479$ ve $\beta=0.08$ Hz giriş frekansı için x eksenini boyunca sıcaklık genliğinin değişiminin deneysel ve sayısal çözümler için karşılaştırılması



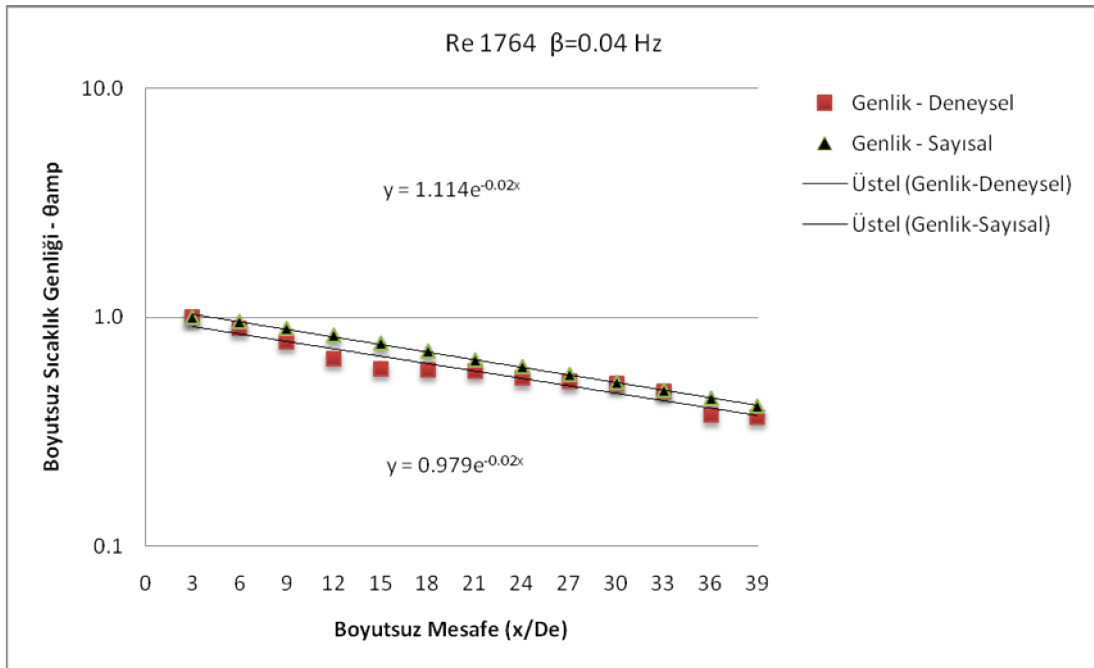
Şekil 4.9. Laminer termal giriş bölgesinde pürüzsüz (bloksuz) kanalda, $Re \approx 1479$ ve $\beta=0.16$ Hz giriş frekansı için x eksenine boyunca sıcaklık genliğinin değişiminin deneysel ve sayısal çözümler için karşılaştırılması



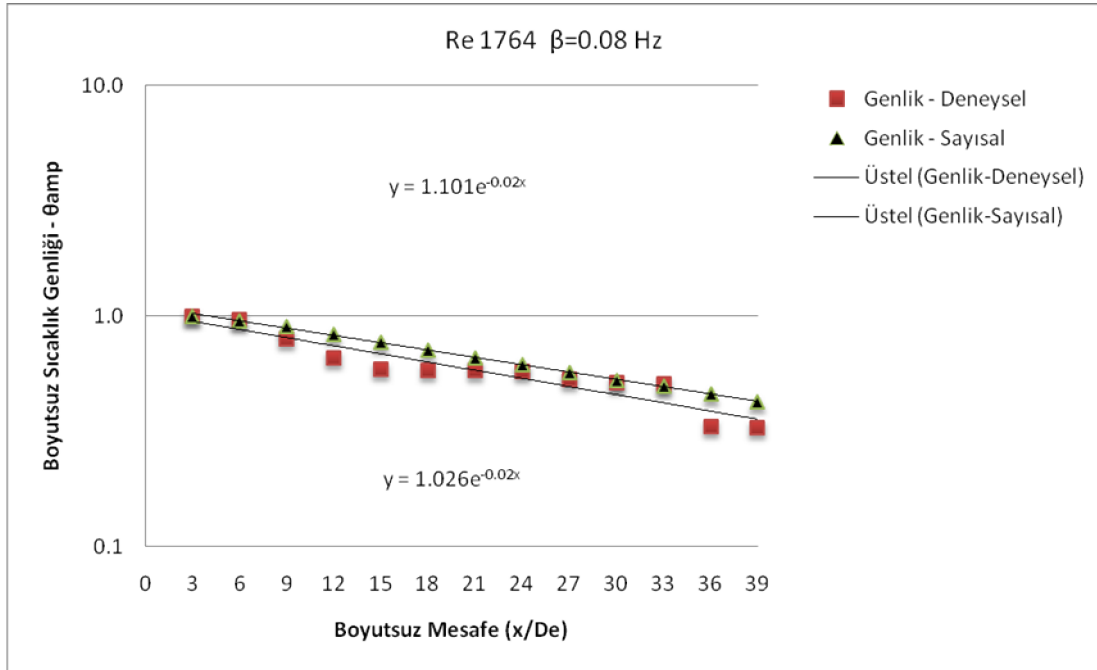
Şekil 4.10. Laminer termal giriş bölgesinde pürüzsüz (bloksuz) kanalda, $Re \approx 1479$ ve $\beta=0.24$ Hz giriş frekansı için x eksenine boyunca sıcaklık genliğinin değişiminin deneysel ve sayısal çözümler için karşılaştırılması



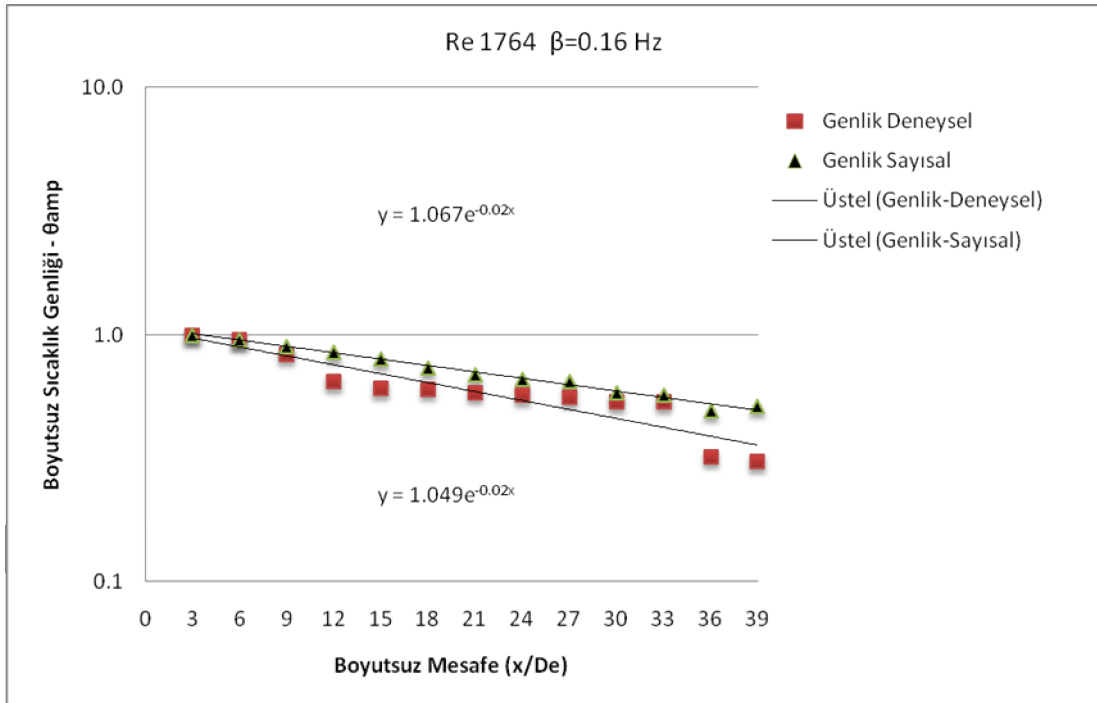
Şekil 4.11. Laminer termal giriş bölgesinde pürüzsüz (bloksuz) kanalda, $Re \approx 1764$ ve $\beta=0.02$ Hz giriş frekansı için x eksenini boyunca sıcaklık genliğinin değişiminin deneysel ve sayısal çözümler için karşılaştırılması



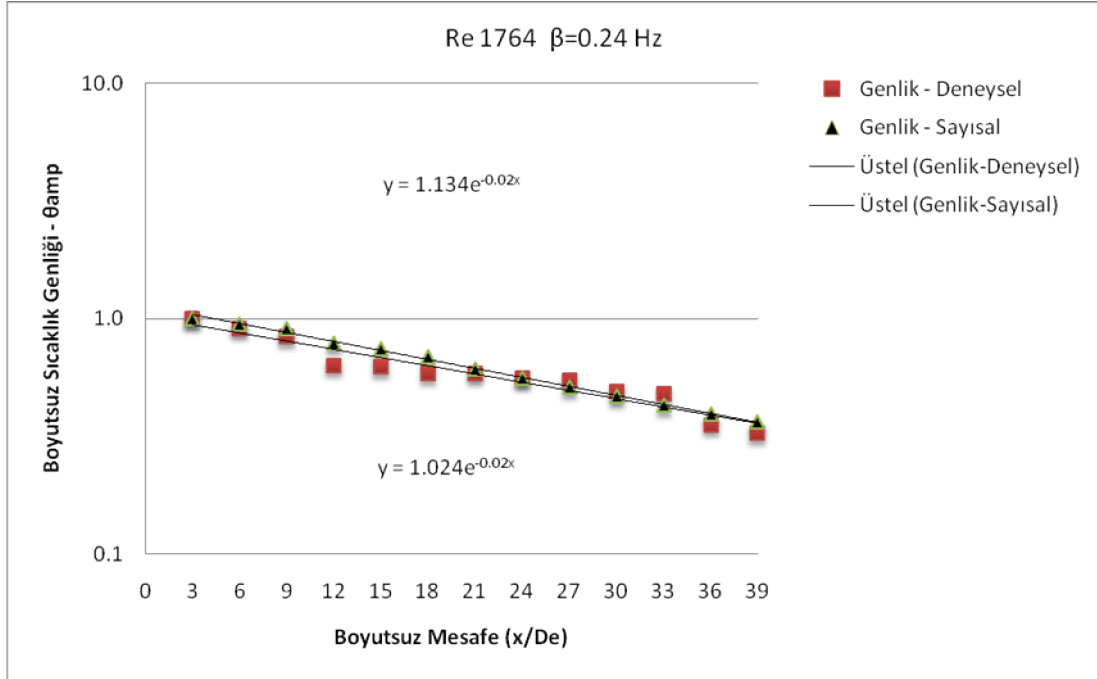
Şekil 4.12. Laminer termal giriş bölgesinde pürüzsüz (bloksuz) kanalda, $Re \approx 1764$ ve $\beta=0.04$ Hz giriş frekansı için x eksenini boyunca sıcaklık genliğinin değişiminin deneysel ve sayısal çözümler için karşılaştırılması



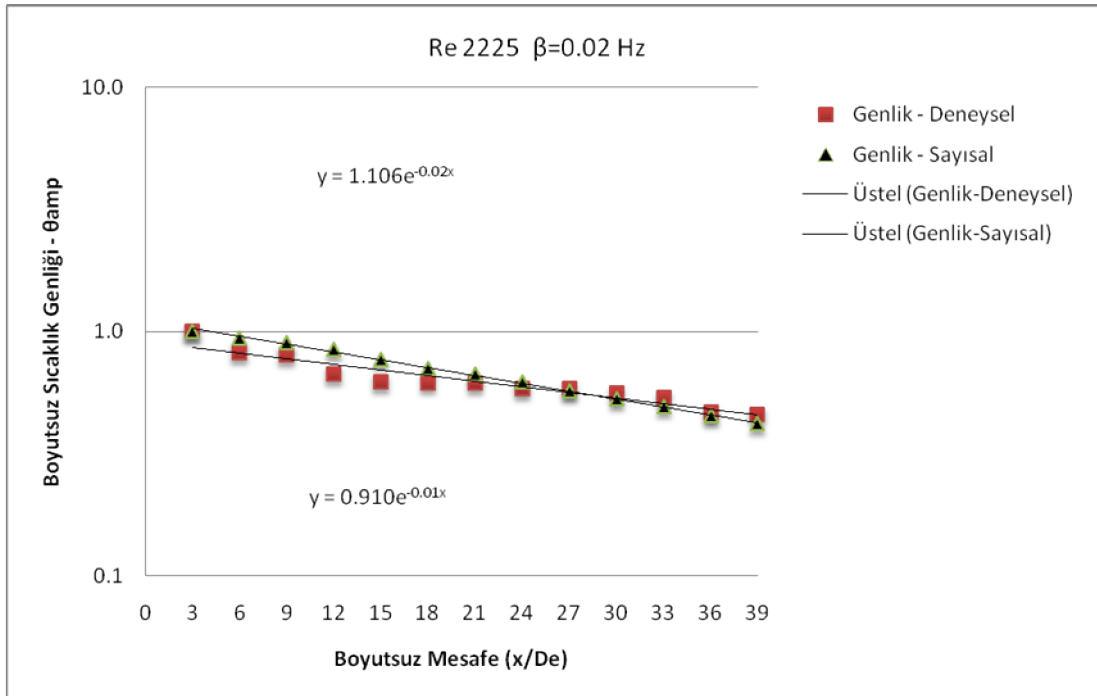
Şekil 4.13. Laminer termal giriş bölgesinde pürüzsüz (bloksuz) kanalda, $Re \approx 1764$ ve $\beta=0.08$ Hz giriş frekansı için x eksenine boyunca sıcaklık genliğinin değişiminin deneysel ve sayısal çözümlerinin karşılaştırılması



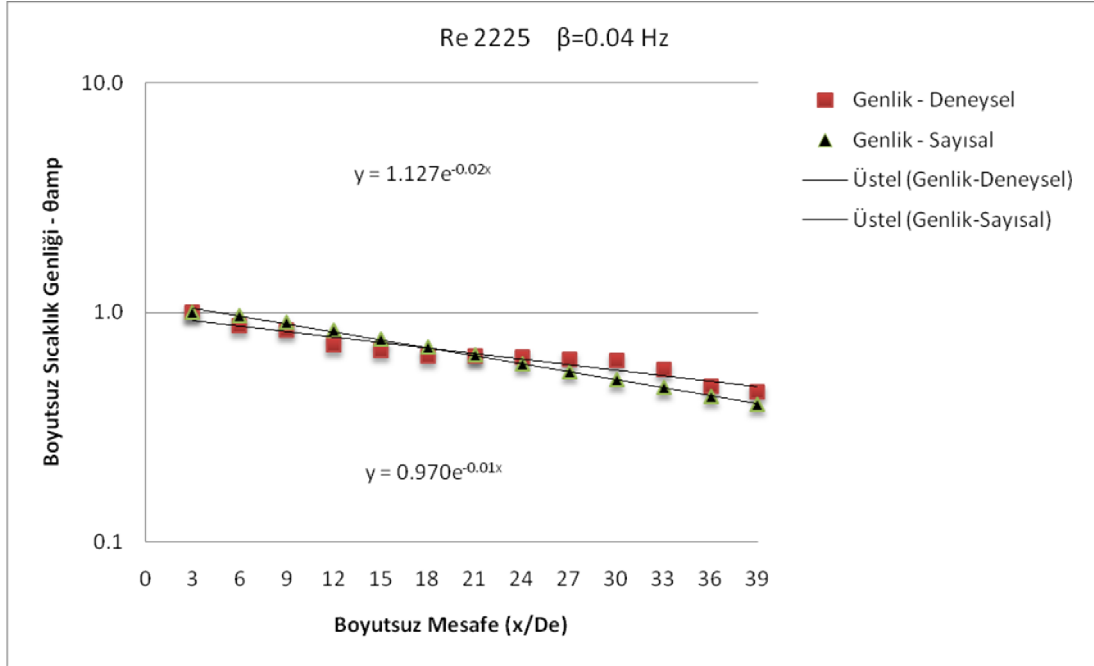
Şekil 4.14. Laminer termal giriş bölgesinde pürüzsüz (bloksuz) kanalda, $Re \approx 1764$ ve $\beta=0.16$ Hz giriş frekansı için x eksenine boyunca sıcaklık genliğinin değişiminin deneysel ve sayısal çözümlerinin karşılaştırılması



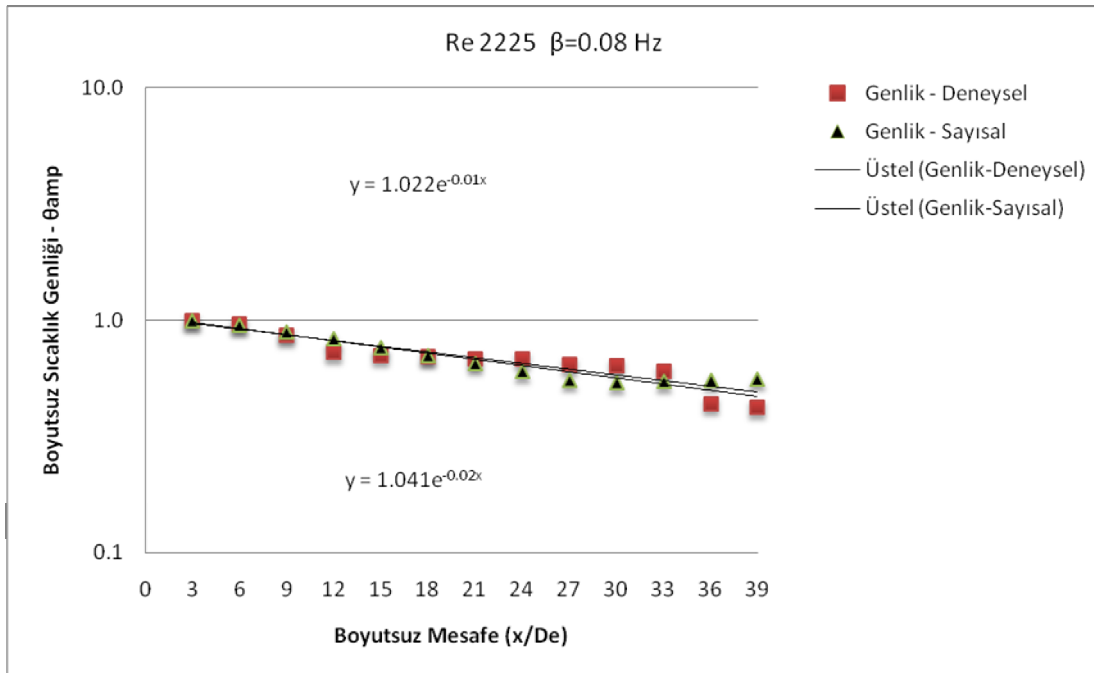
Şekil 4.15. Laminer termal giriş bölgesinde pürüzsüz (bloksuz) kanalda, $Re \approx 1764$ ve $\beta=0.24$ Hz giriş frekansı için x eksenini boyunca sıcaklık genliğinin değişiminin deneysel ve sayısal çözüm için karşılaştırılması



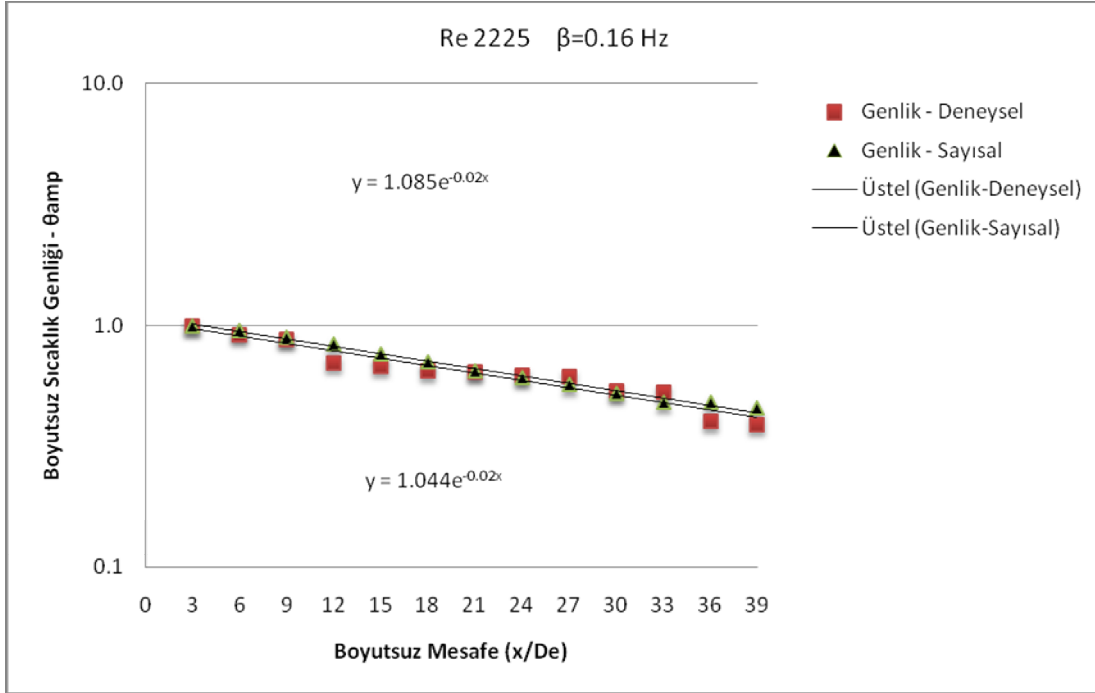
Şekil 4.16. Laminer termal giriş bölgesinde pürüzsüz (bloksuz) kanalda, $Re \approx 2225$ ve $\beta=0.02$ Hz giriş frekansı için x eksenini boyunca sıcaklık genliğinin değişiminin deneysel ve sayısal çözüm için karşılaştırılması



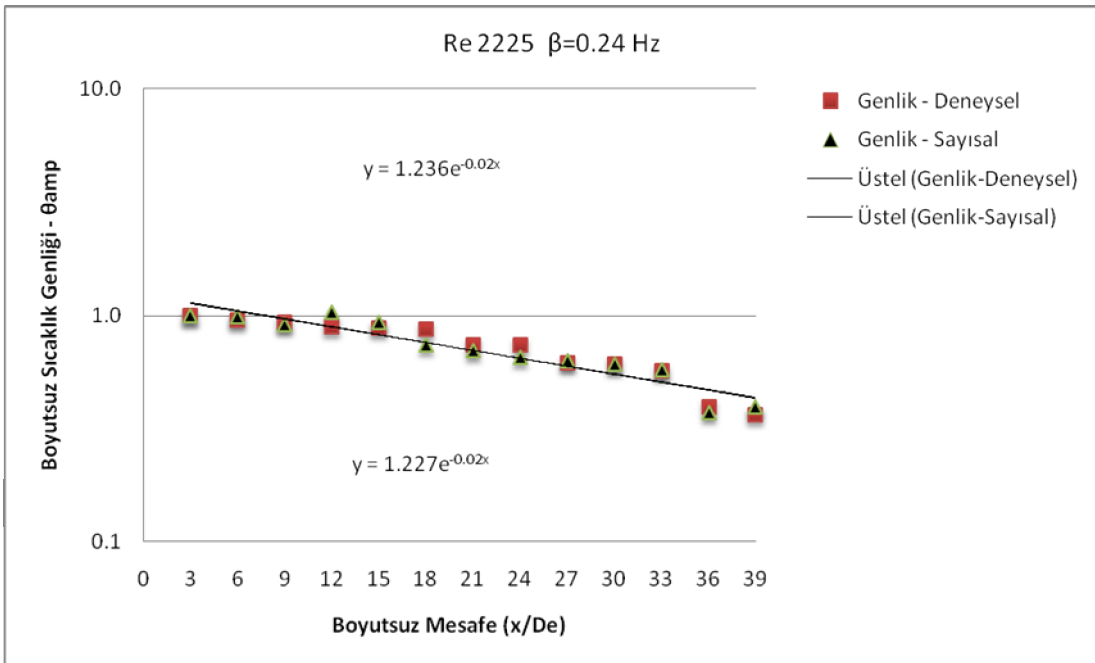
Şekil 4.17. Laminer termal giriş bölgesinde pürüzsüz (bloksuz) kanalda, $Re \approx 2225$ ve $\beta=0.04$ Hz giriş frekansı için x eksenı boyunca sıcaklık genliğının değışiminin deneysel ve sayısal çözümler için karşılaştırılması



Şekil 4.18. Laminer termal giriş bölgesinde pürüzsüz (bloksuz) kanalda, $Re \approx 2225$ ve $\beta=0.08$ Hz giriş frekansı için x eksenı boyunca sıcaklık genliğının değışiminin deneysel ve sayısal çözümler için karşılaştırılması



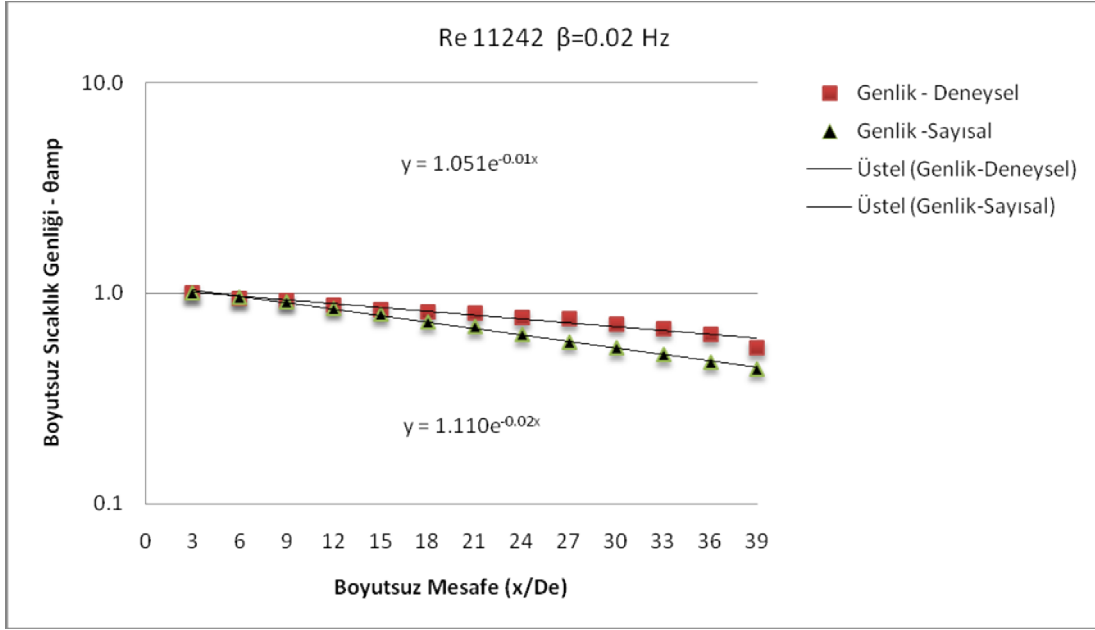
Şekil 4.19. Laminer termal giriş bölgesinde pürüzsüz (bloksuz) kanalda, $Re \approx 2225$ ve $\beta=0.16$ Hz giriş frekansı için x ekseninde sıcaklık genliğinin değişiminin deneysel ve sayısal çözümlerinin karşılaştırılması



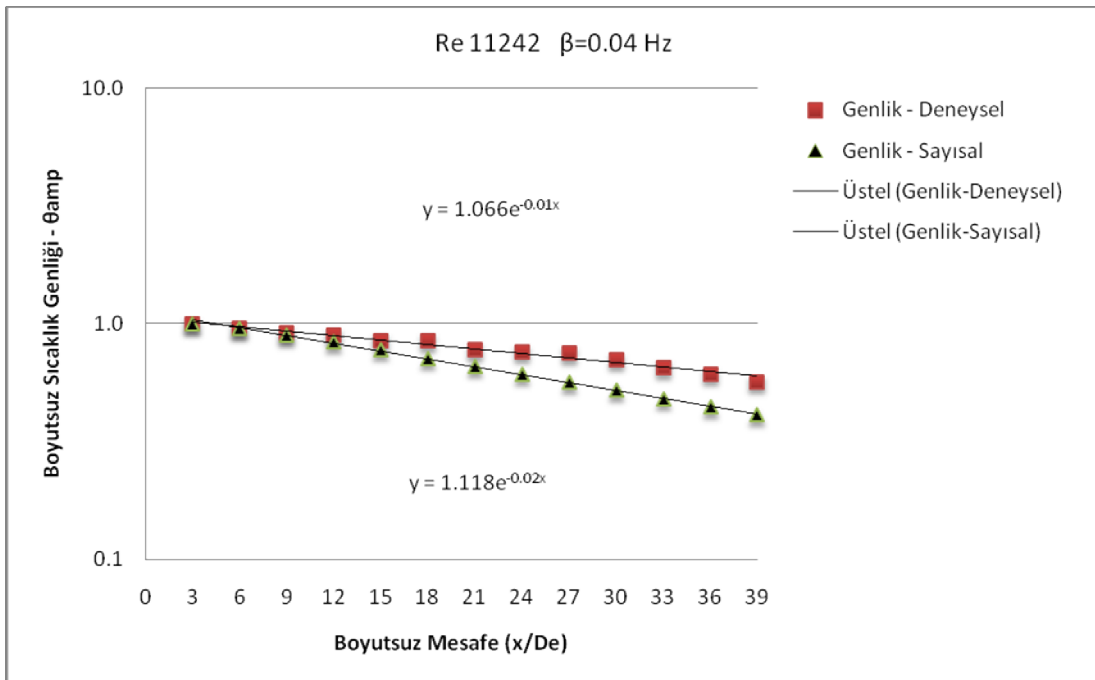
Şekil 4.20. Laminer termal giriş bölgesinde pürüzsüz (bloksuz) kanalda, $Re \approx 2225$ ve $\beta=0.24$ Hz giriş frekansı için x ekseninde sıcaklık genliğinin değişiminin deneysel ve sayısal çözümlerinin karşılaştırılması

Tablo 4.1. Bloksuz kanal için laminar termal giriş bölgesinde farklı Reynolds sayıları (Re) ve giriş frekansları (β) için deneysel ve nümerik sıcaklık genliklerinin eğim değerlerinin (α) karşılaştırılması

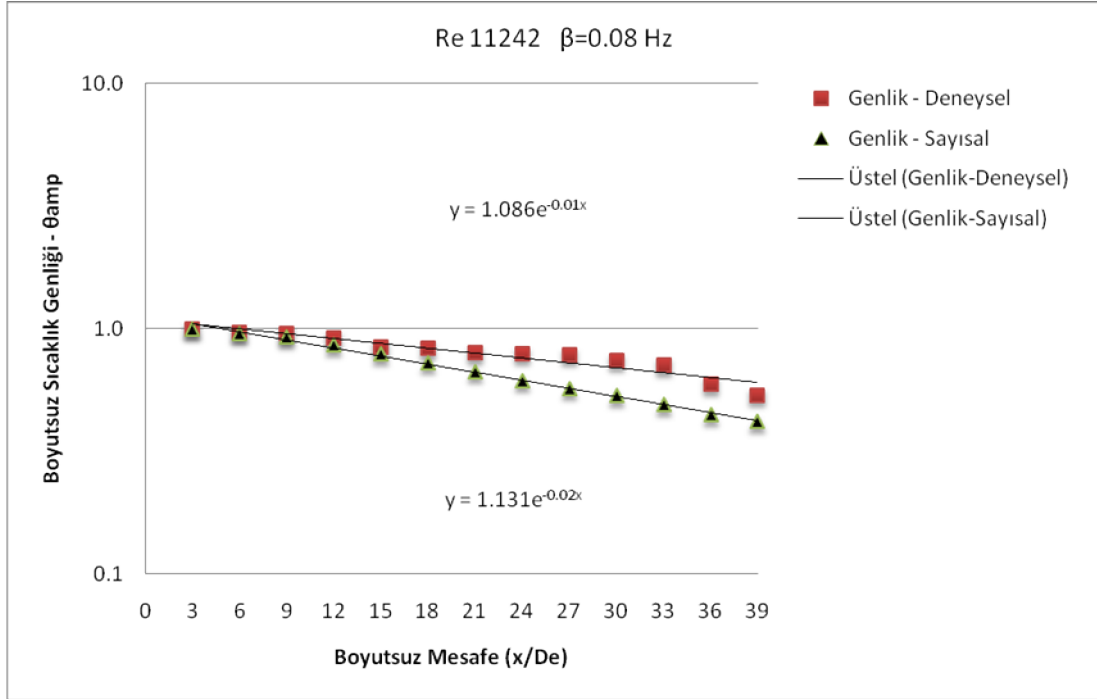
Re	Frekans (Hz)	Deneysel (α)	Sayısal (α)	Mutlak Fark
1121	0.02	0.036	0.024	0.012
1121	0.04	0.039	0.026	0.013
1121	0.08	0.041	0.027	0.014
1121	0.16	0.042	0.015	0.027
1121	0.24	0.048	0.027	0.021
1479	0.02	0.024	0.024	0.000
1479	0.04	0.029	0.026	0.003
1479	0.08	0.031	0.027	0.004
1479	0.16	0.035	0.022	0.013
1479	0.24	0.039	0.028	0.011
1764	0.02	0.023	0.024	-0.001
1764	0.04	0.025	0.025	0.000
1764	0.08	0.027	0.024	0.003
1764	0.16	0.028	0.020	0.008
1764	0.24	0.027	0.029	-0.002
2225	0.02	0.018	0.025	-0.007
2225	0.04	0.018	0.026	-0.008
2225	0.08	0.020	0.019	0.001
2225	0.16	0.024	0.023	0.001
2225	0.24	0.026	0.027	-0.001



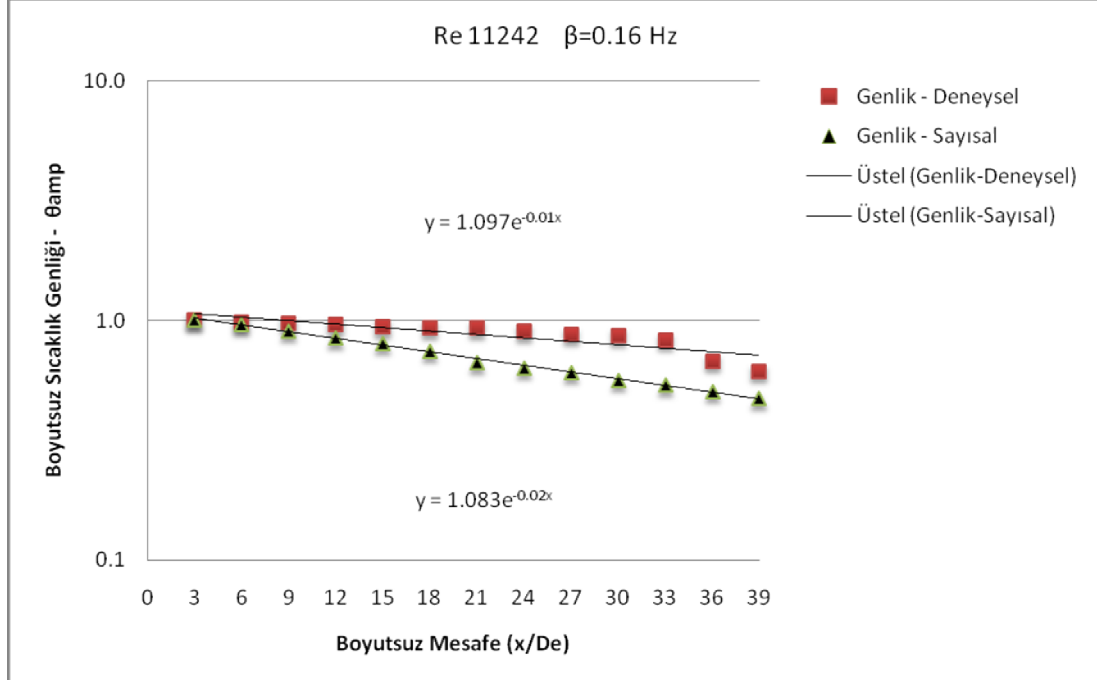
Şekil 4.21. Turbulanslı termal giriş bölgesinde pürüzsüz (bloksuz) kanalda, $Re \approx 11242$ ve $\beta=0.02$ Hz giriş frekansı için x eksenı boyunca sıcaklık genliğinin değişiminin deneysel ve sayısal çözümler için karşılaştırılması



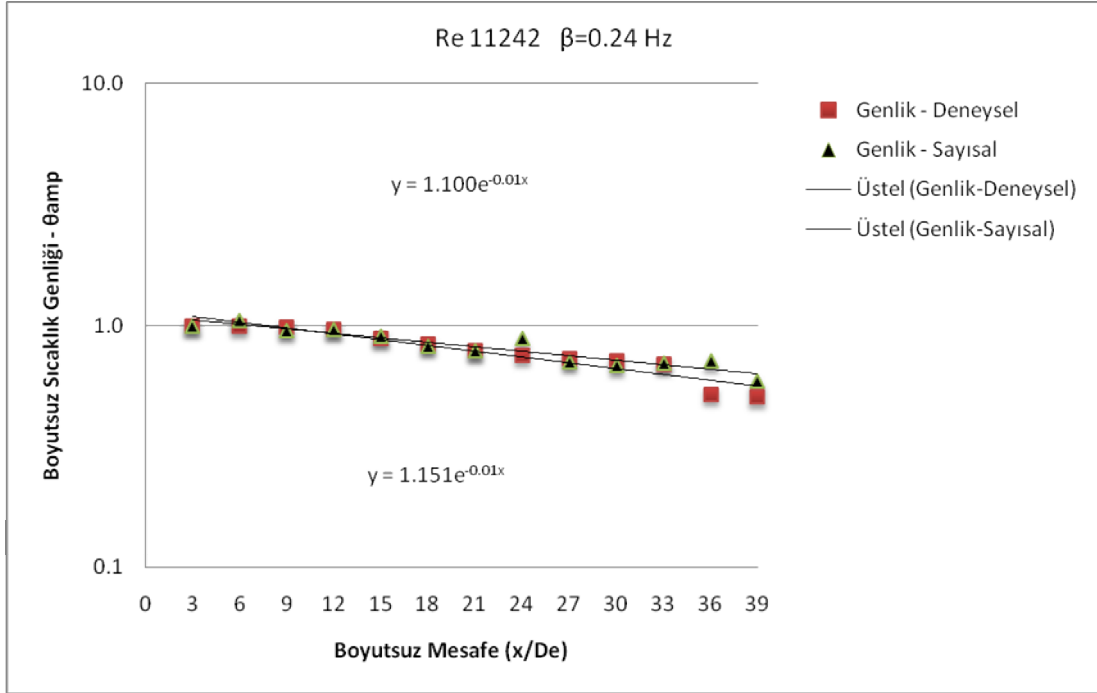
Şekil 4.22. Turbulanslı termal giriş bölgesinde pürüzsüz (bloksuz) kanalda, $Re \approx 11242$ ve $\beta=0.04$ Hz giriş frekansı için x eksenı boyunca sıcaklık genliğinin değişiminin deneysel ve sayısal çözümler için karşılaştırılması



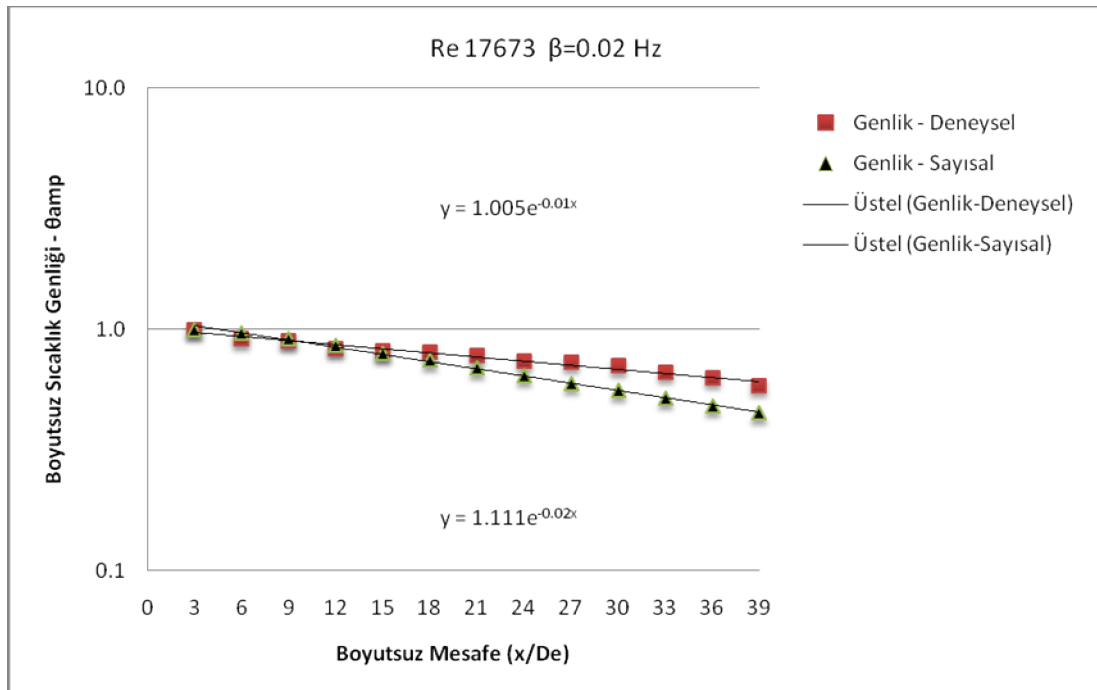
Şekil 4.23. Turbulanslı termal giriş bölgesinde pürüzsüz (bloksuz) kanalda, $Re \approx 11242$ ve $\beta=0.08$ Hz giriş frekansı için x ekseninde sıcaklık genliğinin değişiminin deneysel ve sayısal çözümlerinin karşılaştırılması



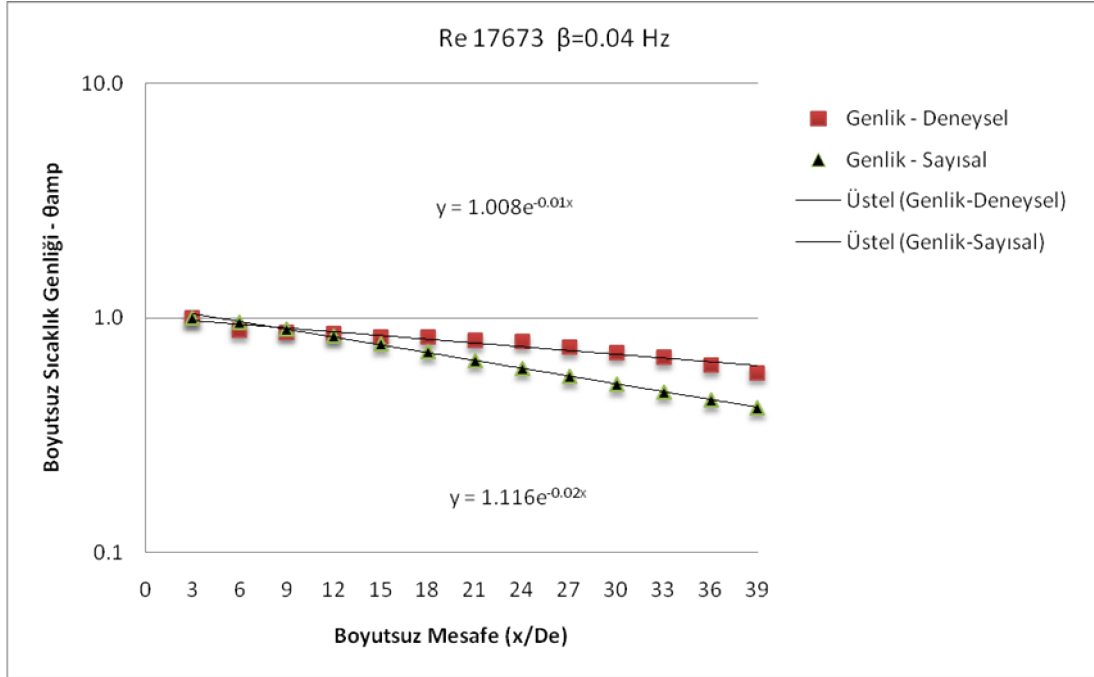
Şekil 4.24. Turbulanslı termal giriş bölgesinde pürüzsüz (bloksuz) kanalda, $Re \approx 11242$ ve $\beta=0.16$ Hz giriş frekansı için x ekseninde sıcaklık genliğinin değişiminin deneysel ve sayısal çözümlerinin karşılaştırılması



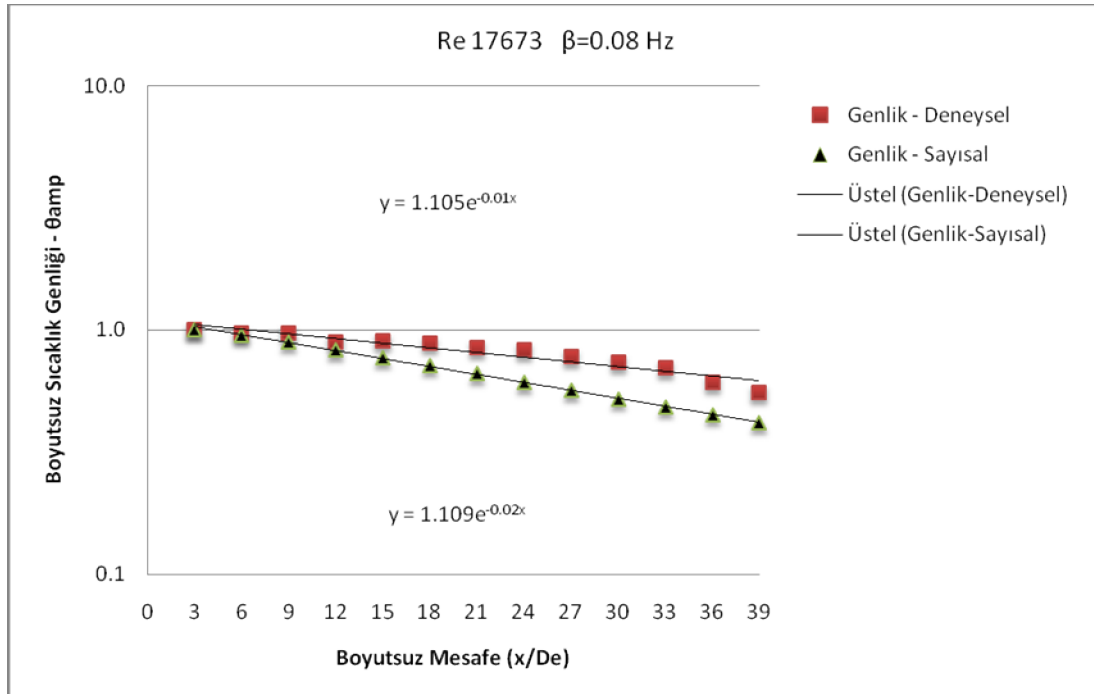
Şekil 4.25. Turbulanslı termal giriş bölgesinde pürüzsüz (bloksuz) kanalda, $Re \approx 11242$ ve $\beta=0.24$ Hz giriş frekansı için x eksenı boyunca sıcaklık genliğinin değişiminin deneysel ve sayısal çözümler için karşılaştırılması



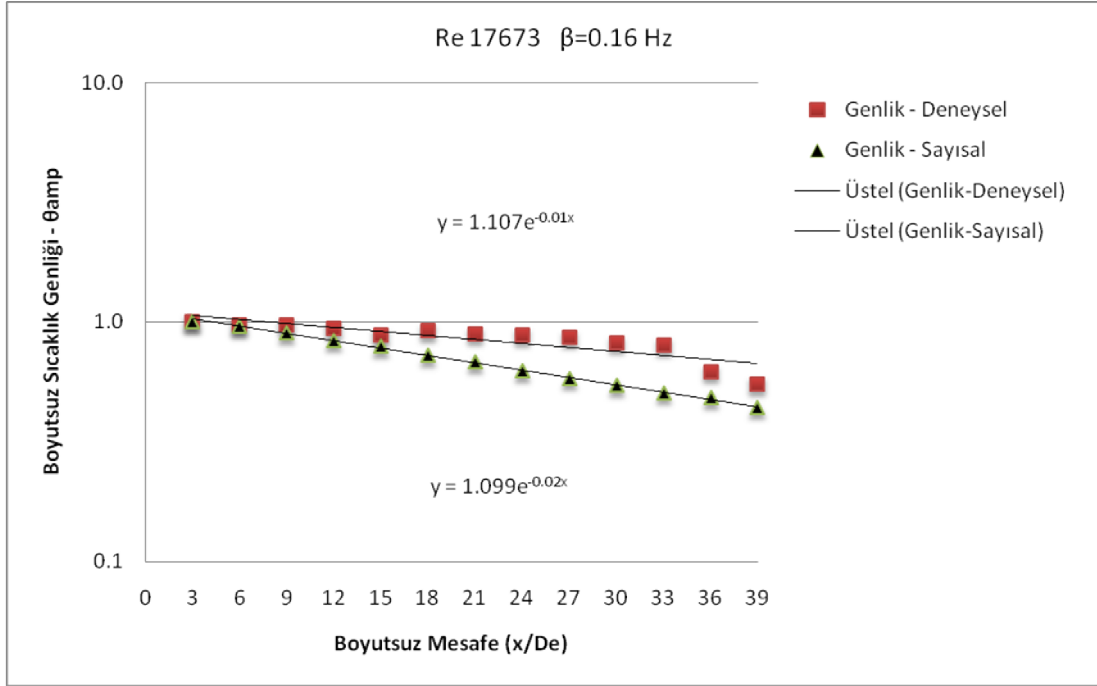
Şekil 4.26. Turbulanslı termal giriş bölgesinde pürüzsüz (bloksuz) kanalda, $Re \approx 17673$ ve $\beta=0.02$ Hz giriş frekansı için x eksenı boyunca sıcaklık genliğinin değişiminin deneysel ve sayısal çözümler için karşılaştırılması



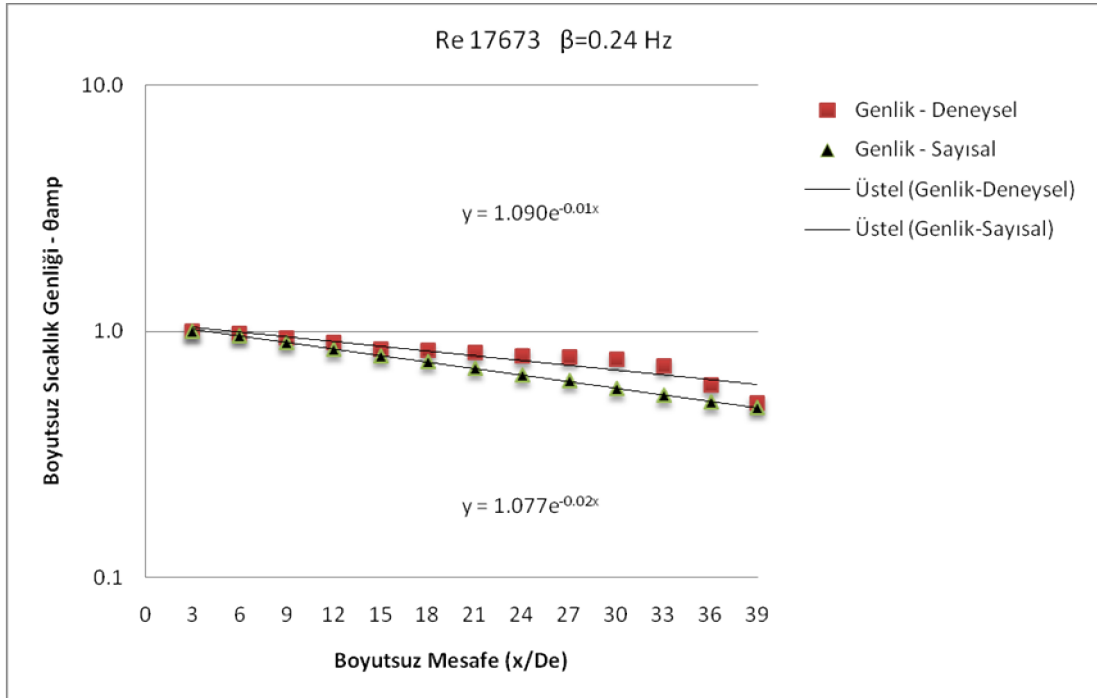
Şekil 4.27. Türbülanslı termal giriş bölgesinde pürüzsüz (bloksuz) kanalda, $Re \approx 17673$ ve $\beta=0.04$ Hz giriş frekansı için x eksenı boyunca sıcaklık genliğının değişiminin deneysel ve sayısal çözüm için karşılaştırılması



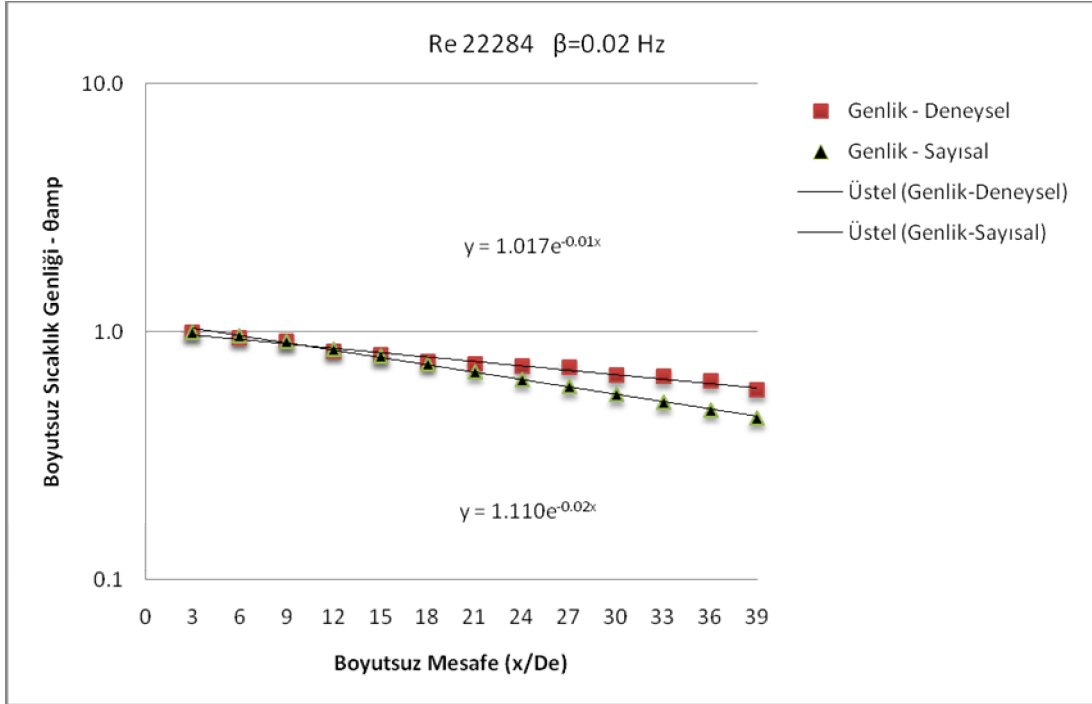
Şekil 4.28. Türbülanslı termal giriş bölgesinde pürüzsüz (bloksuz) kanalda, $Re \approx 17673$ ve $\beta=0.08$ Hz giriş frekansı için x eksenı boyunca sıcaklık genliğının değişiminin deneysel ve sayısal çözüm için karşılaştırılması



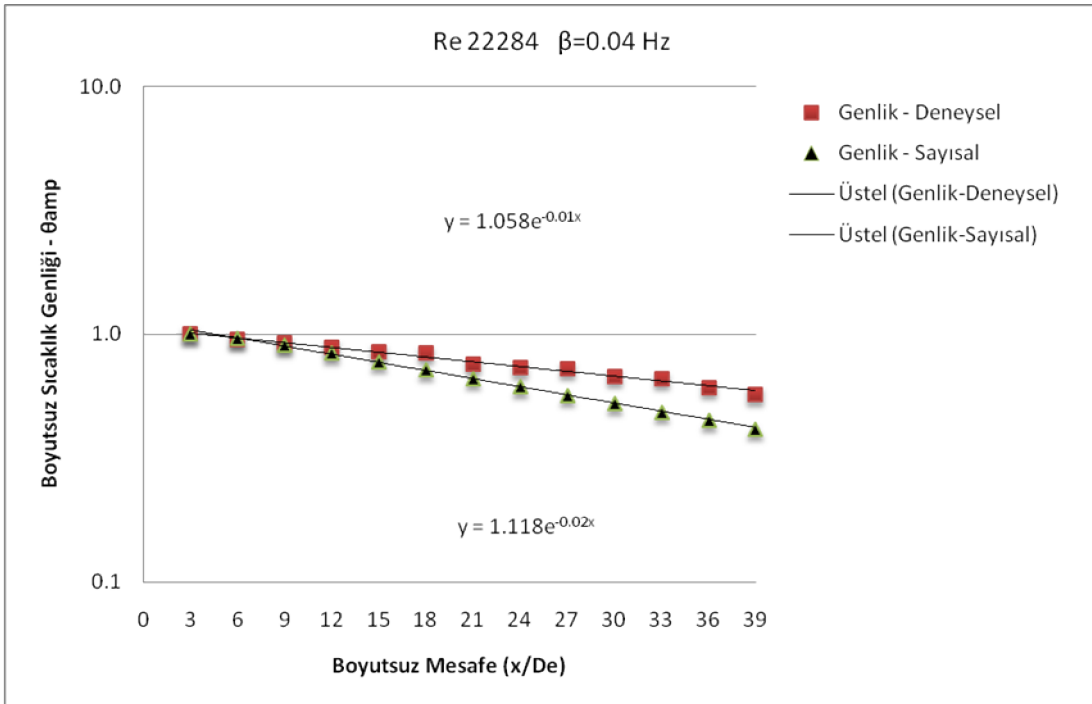
Şekil 4.29. Turbulanslı termal giriş bölgesinde pürüzsüz (bloksuz) kanalda, $Re \approx 17673$ ve $\beta=0.16$ Hz giriş frekansı için x eksenı boyunca sıcaklık genliğinin değişiminin deneysel ve sayısal çözümler için karşılaştırılması



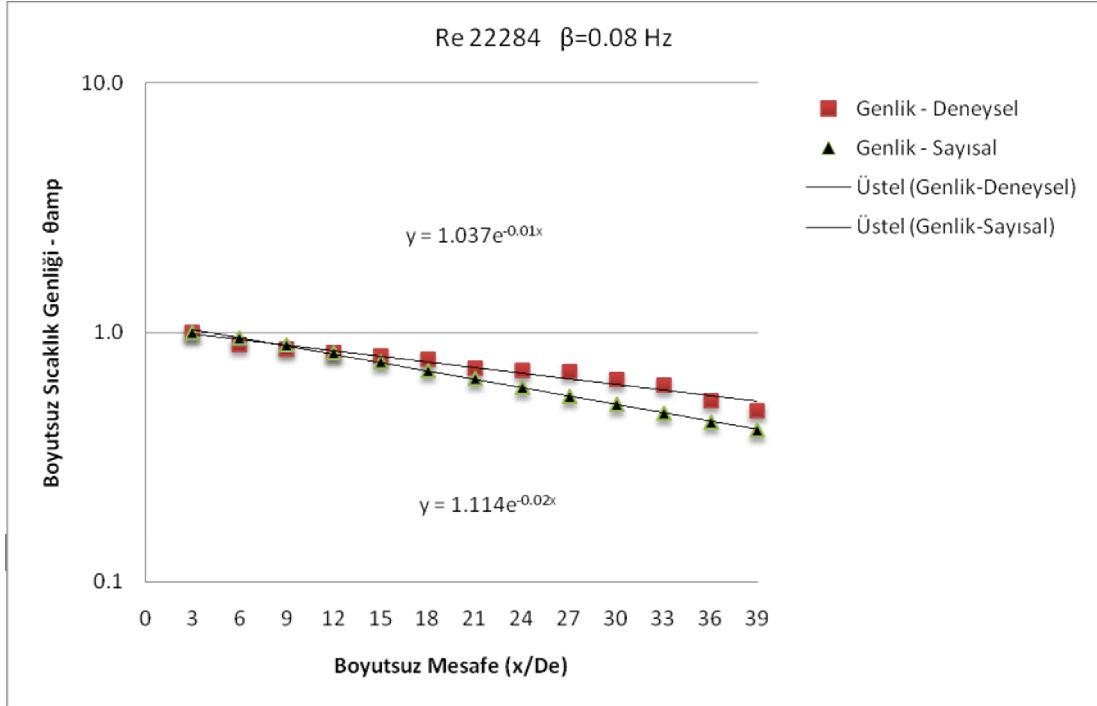
Şekil 4.30. Turbulanslı termal giriş bölgesinde pürüzsüz (bloksuz) kanalda, $Re \approx 17673$ ve $\beta=0.24$ Hz giriş frekansı için x eksenı boyunca sıcaklık genliğinin değişiminin deneysel ve sayısal çözümler için karşılaştırılması



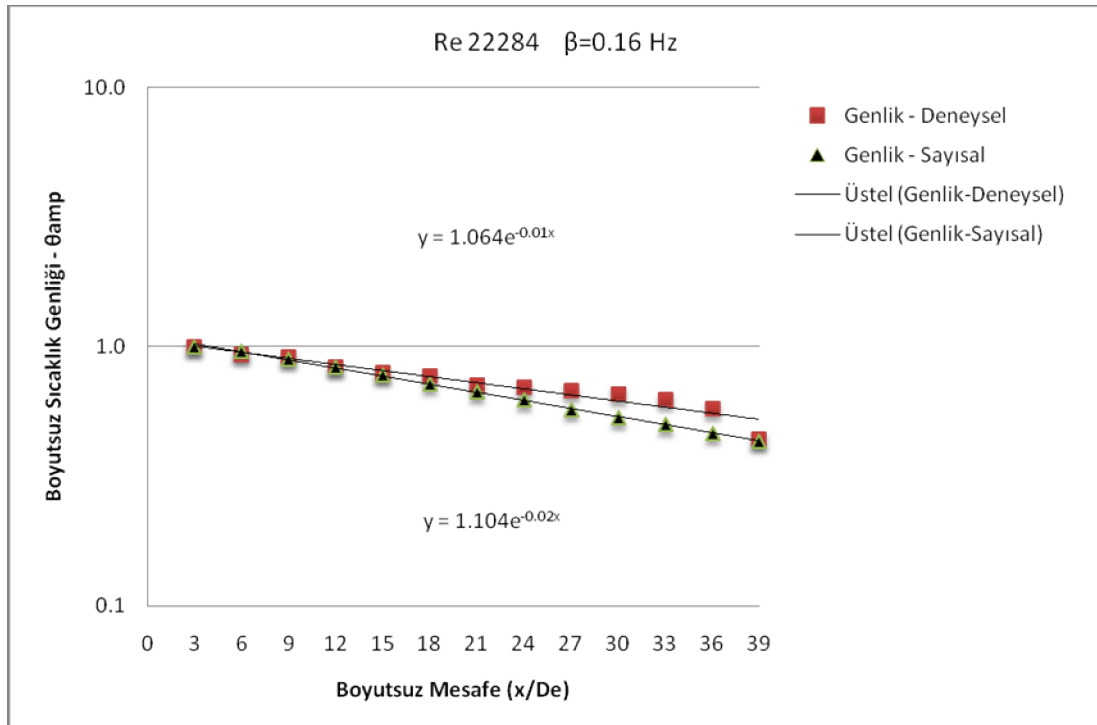
Şekil 4.31. Turbulanslı termal giriş bölgesinde pürüzsüz (bloksuz) kanalda, $Re \approx 22284$ ve $\beta=0.02$ Hz giriş frekansı için x ekseninde sıcaklık genliğinin değişiminin deneysel ve sayısal çözümlerinin karşılaştırılması



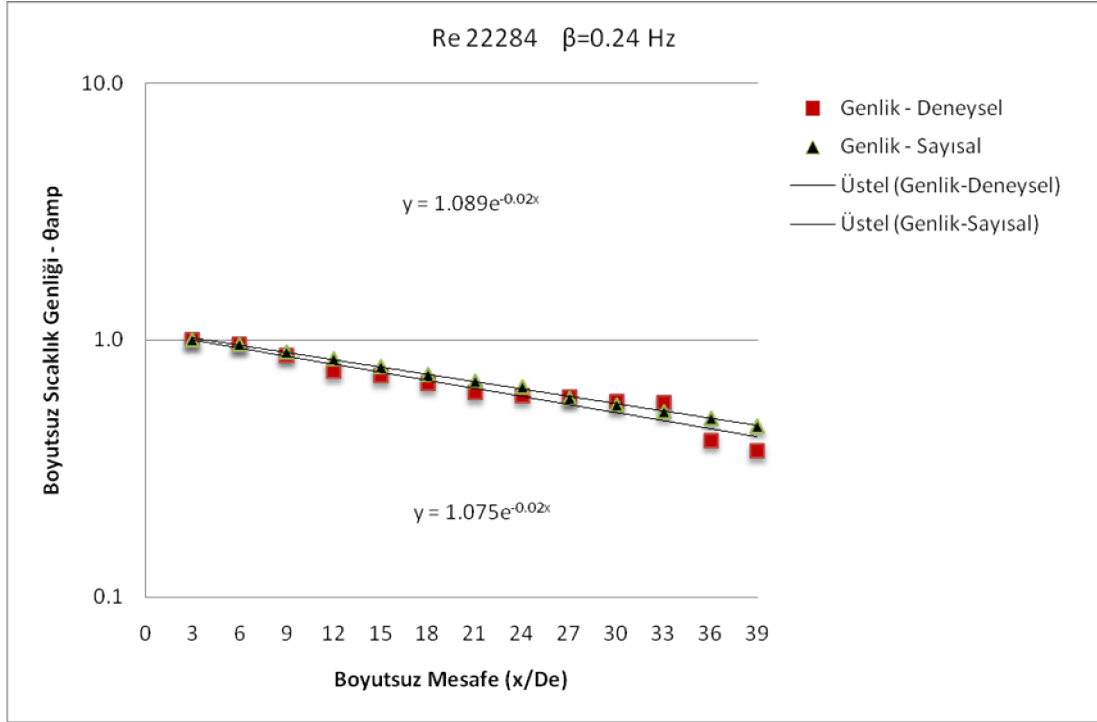
Şekil 4.32. Turbulanslı termal giriş bölgesinde pürüzsüz (bloksuz) kanalda, $Re \approx 22284$ ve $\beta=0.04$ Hz giriş frekansı için x ekseninde sıcaklık genliğinin değişiminin deneysel ve sayısal çözümlerinin karşılaştırılması



Şekil 4.33. Türbülanslı termal giriş bölgesinde pürüzsüz (bloksuz) kanalda, $Re \approx 22284$ ve $\beta=0.08$ Hz giriş frekansı için x eksenı boyunca sıcaklık genliğının değişiminin deneysel ve sayısal çözüm için karşılaştırılması



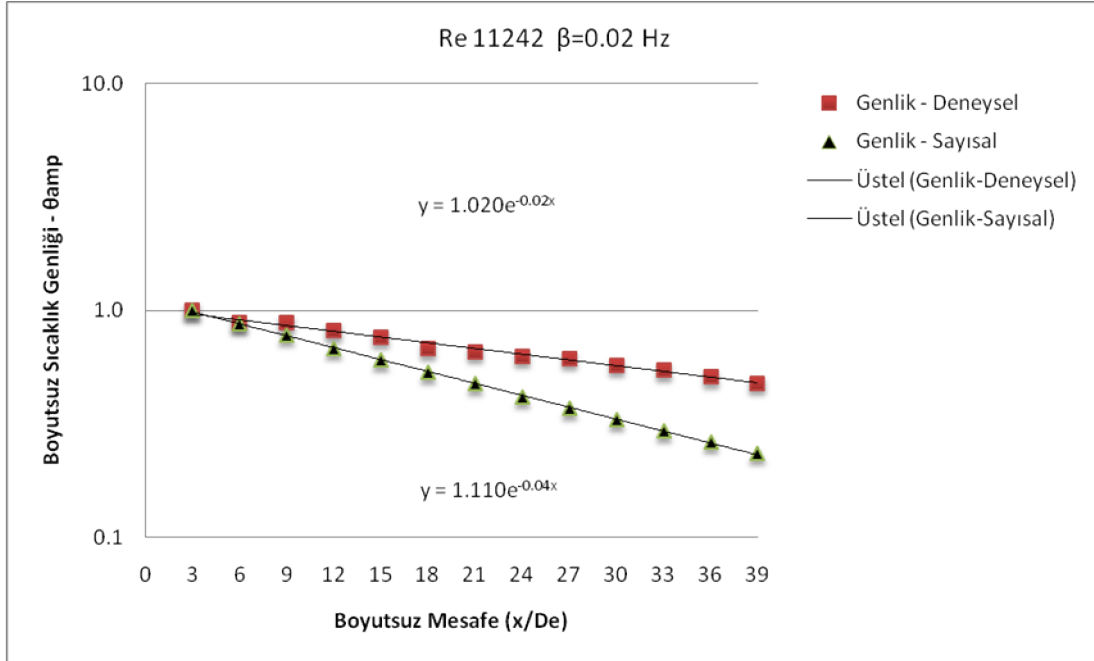
Şekil 4.34. Türbülanslı termal giriş bölgesinde pürüzsüz (bloksuz) kanalda, $Re \approx 22284$ ve $\beta=0.16$ Hz giriş frekansı için x eksenı boyunca sıcaklık genliğının değişiminin deneysel ve sayısal çözüm için karşılaştırılması



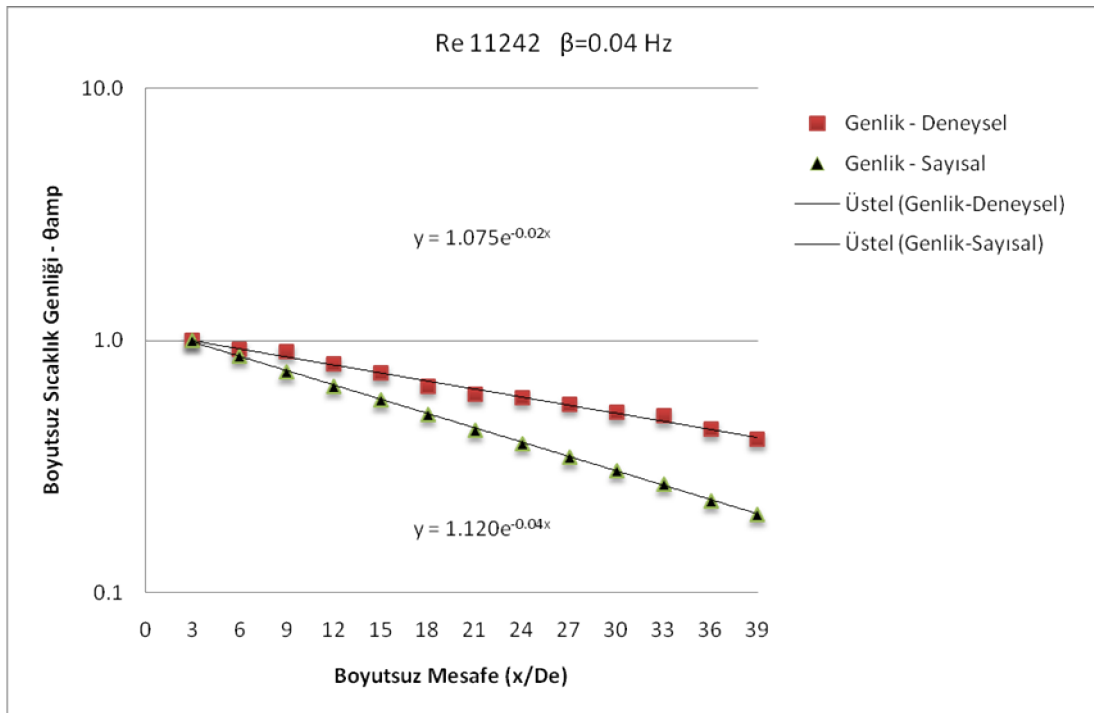
Şekil 4.35. Türbülanslı termal giriş bölgesinde pürüzsüz (bloksuz) kanalda, $Re \approx 22284$ ve $\beta=0.24$ Hz giriş frekansı için x eksenı boyunca sıcaklık genliğının değişiminin deneysel ve sayısal çözümler için karşılaştırılması

Tablo 4.2. Bloksuz kanal için türbülanslı termal giriş bölgesinde farklı Reynolds sayıları (Re) ve giriş frekansları (β) için deneysel ve nümerik sıcaklık genliklerinin eğim değerlerinin (α) karşılaştırılması

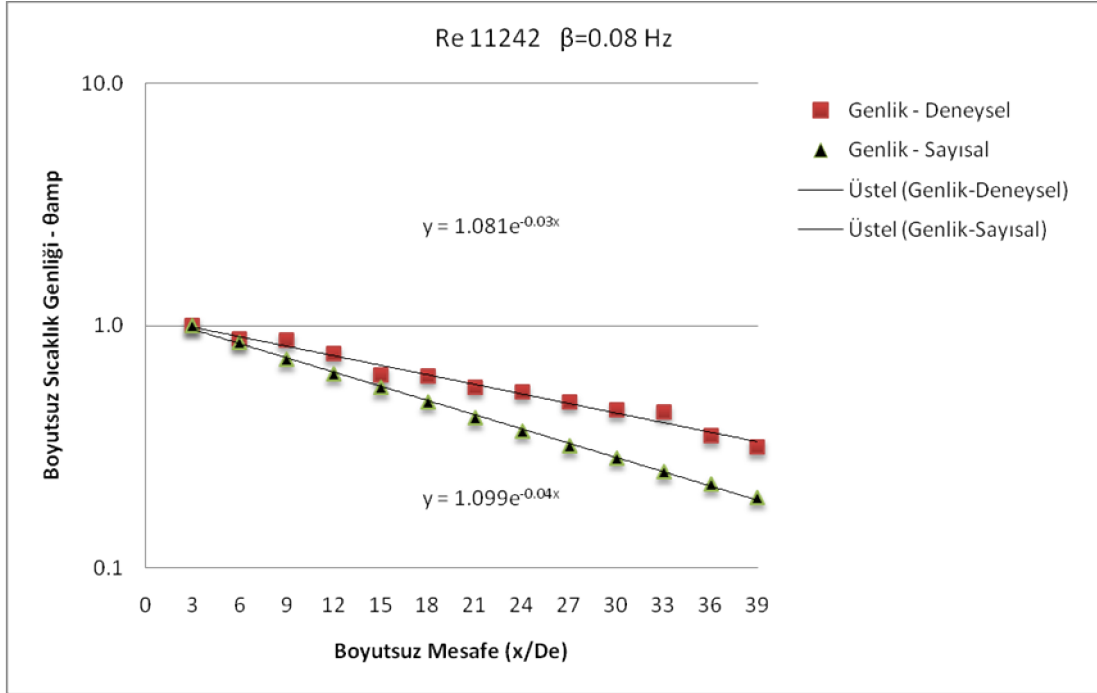
Re	Frekans (Hz)	Deneysel (α)	Nümerik (α)	Mutlak Fark
11242	0.02	0.014	0.023	-0.009
11242	0.04	0.015	0.025	-0.010
11242	0.08	0.015	0.025	-0.010
11242	0.16	0.011	0.021	-0.010
11242	0.24	0.018	0.014	0.004
17673	0.02	0.013	0.023	-0.010
17673	0.04	0.012	0.025	-0.013
17673	0.08	0.015	0.025	-0.010
17673	0.16	0.013	0.023	-0.010
17673	0.24	0.015	0.020	-0.005
22225	0.02	0.014	0.023	-0.009
22225	0.04	0.015	0.025	-0.010
22225	0.08	0.017	0.026	-0.009
22225	0.16	0.018	0.024	-0.006
22225	0.24	0.024	0.022	0.002



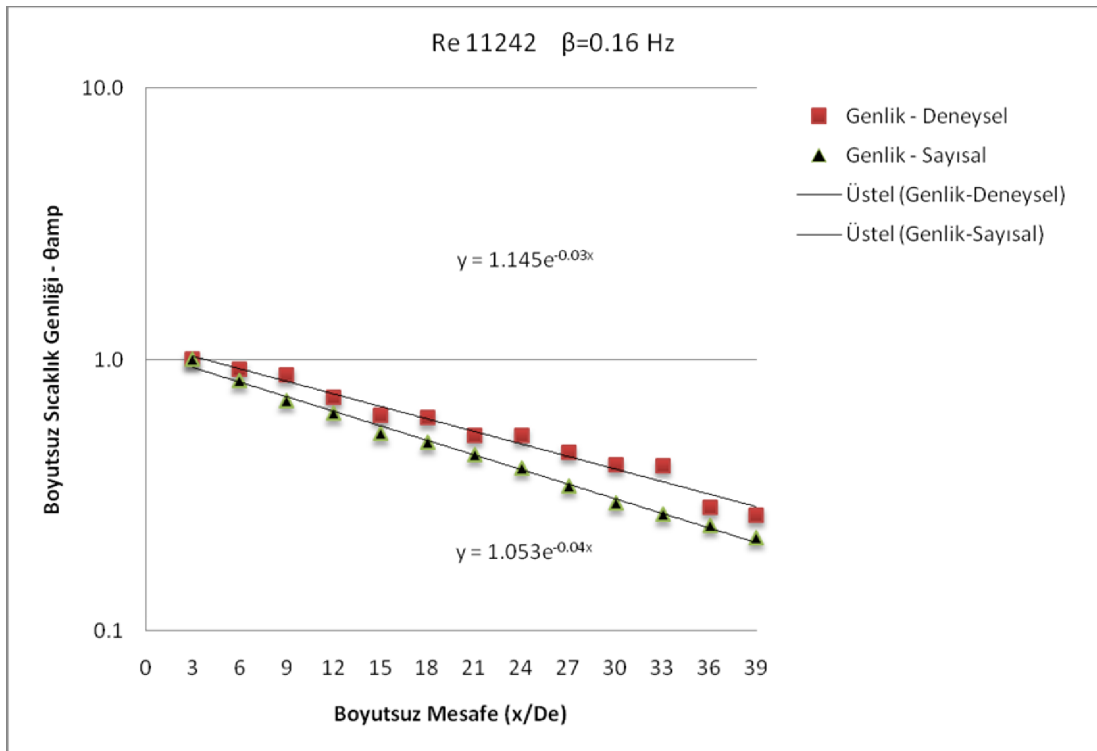
Şekil 4.36. Türbülanslı termal giriş bölgesinde uzunlamasına bloklı kanalda, $Re \approx 11242$ ve $\beta=0.02$ Hz giriş frekansı için x eksenı boyunca sıcaklık genliğının değişiminin deneysel ve sayısal çözüm için karşılaştırılması



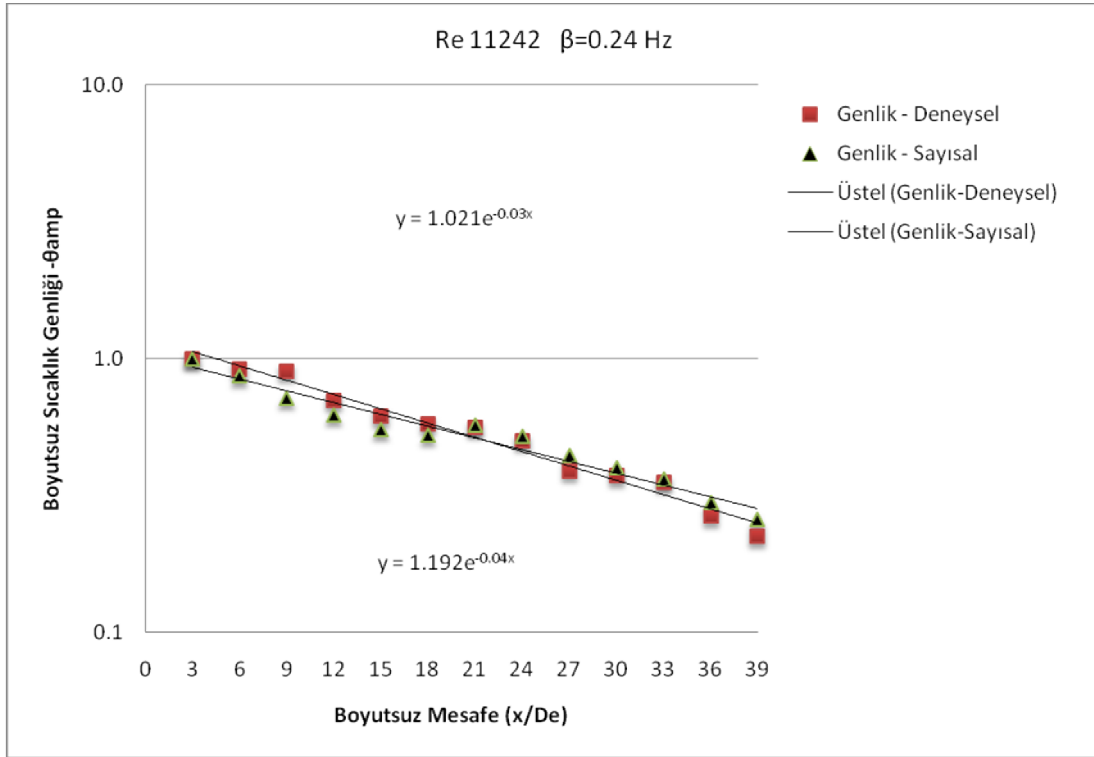
Şekil 4.37. Türbülanslı termal giriş bölgesinde uzunlamasına bloklı kanalda, $Re \approx 11242$ ve $\beta=0.04$ Hz giriş frekansı için x eksenı boyunca sıcaklık genliğının değişiminin deneysel ve sayısal çözüm için karşılaştırılması



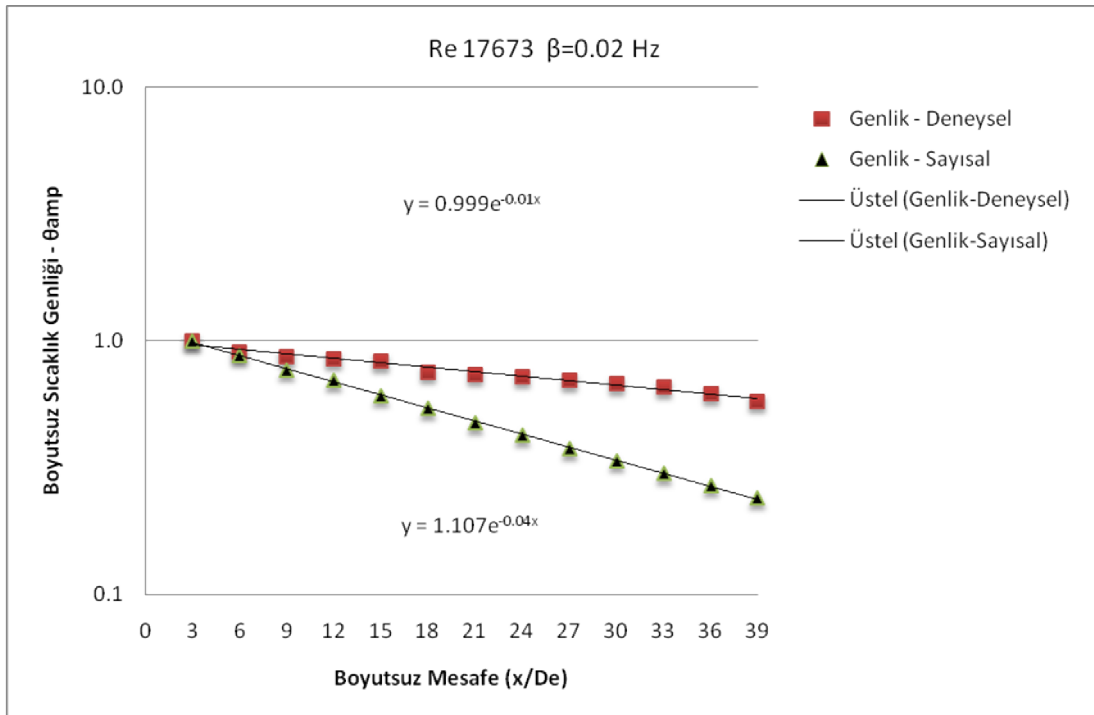
Şekil 4.38. Türbülanslı termal giriş bölgesinde uzunlamasına bloklı kanalda, $Re \approx 11242$ ve $\beta=0.08$ Hz giriş frekansı için x eksenı boyunca sıcaklık genliğının değişiminin deneysel ve sayısal çözüm için karşılaştırılması



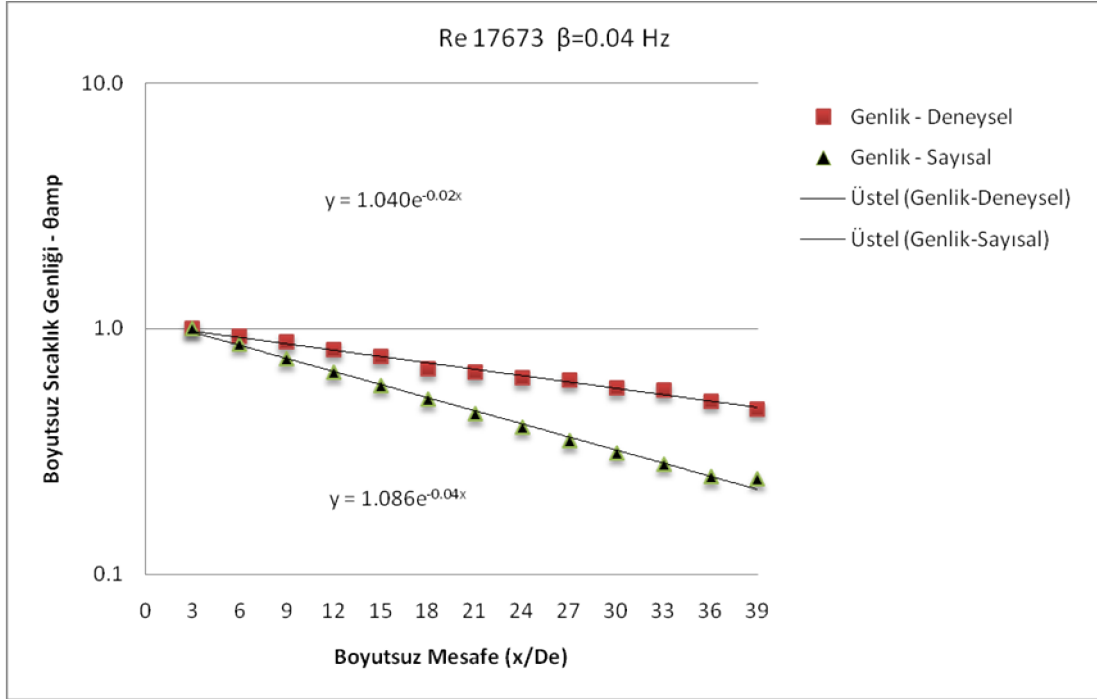
Şekil 4.39. Türbülanslı termal giriş bölgesinde uzunlamasına bloklı kanalda, $Re \approx 11242$ ve $\beta=0.16$ Hz giriş frekansı için x eksenı boyunca sıcaklık genliğının değişiminin deneysel ve sayısal çözüm için karşılaştırılması



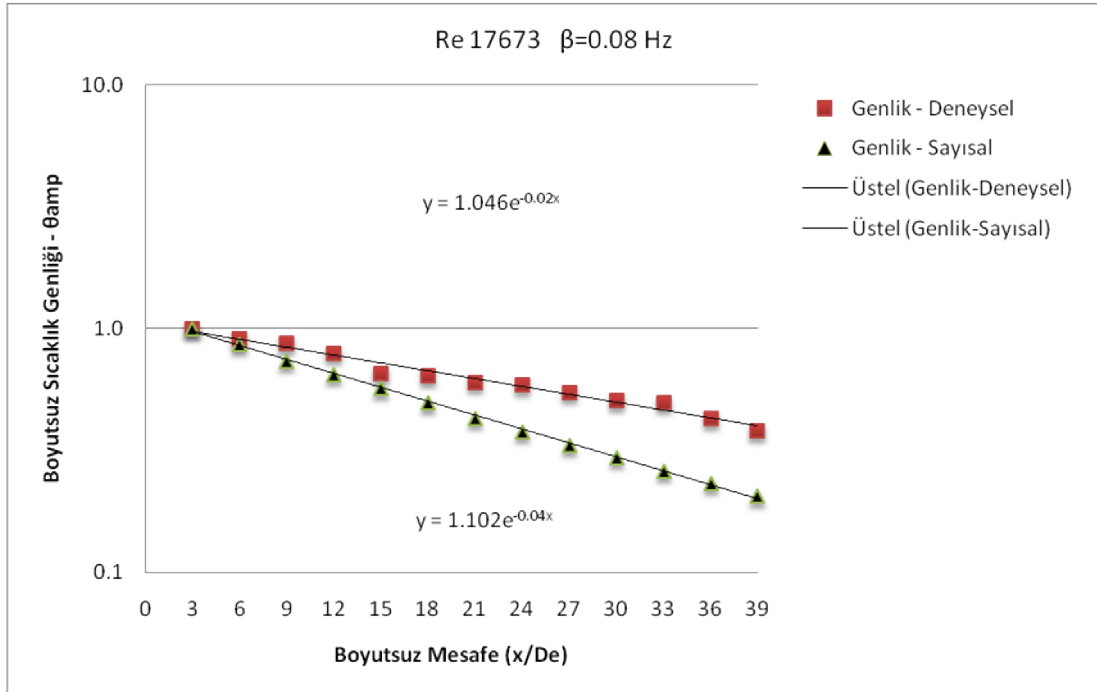
Şekil 4.40. Türbülanslı termal giriş bölgesinde uzunlamasına bloklı kanalda, $Re \approx 11242$ ve $\beta=0.24$ Hz giriş frekansı için x eksenı boyunca sıcaklık genliğının değışiminin deneysel ve sayısal çözümler için karşılaştırılması



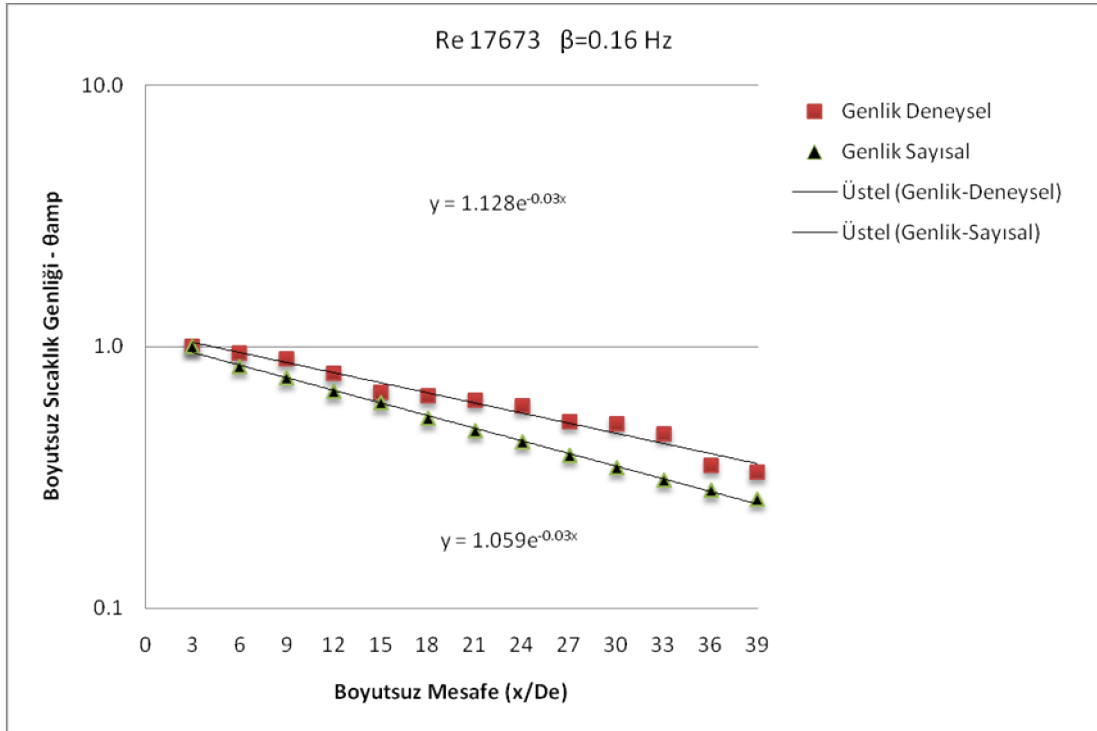
Şekil 4.41. Türbülanslı termal giriş bölgesinde uzunlamasına bloklı kanalda, $Re \approx 17673$ ve $\beta=0.02$ Hz giriş frekansı için x eksenı boyunca sıcaklık genliğının değışiminin deneysel ve sayısal çözümler için karşılaştırılması



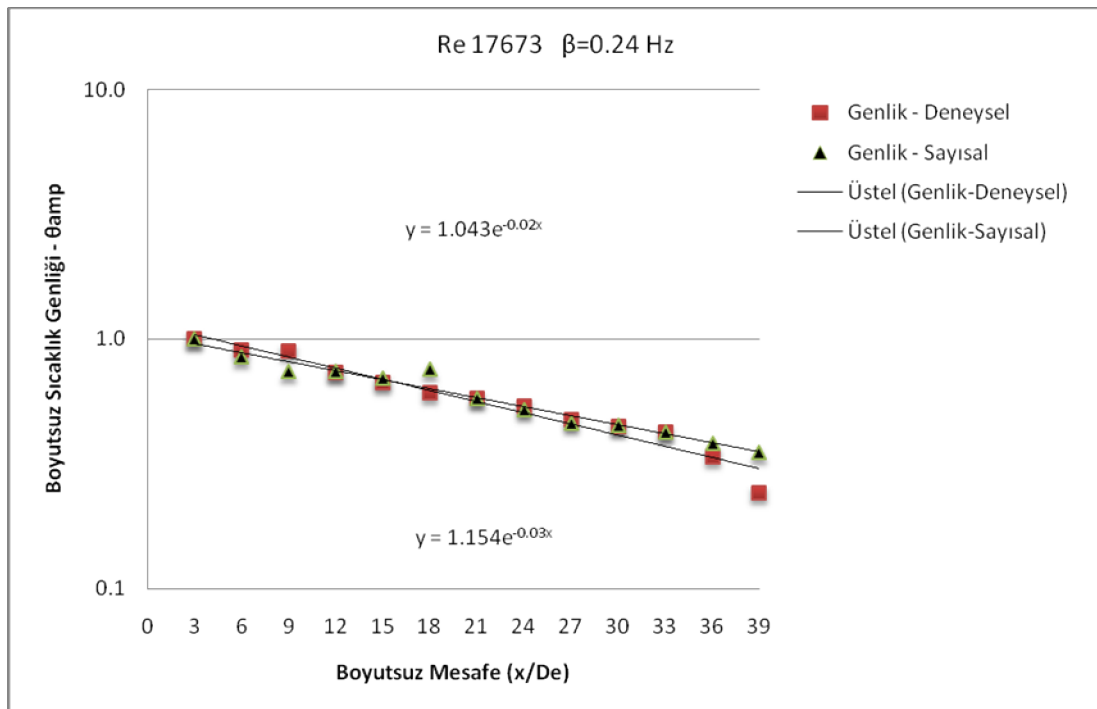
Şekil 4.42. Türbülanslı termal giriş bölgesinde uzunlamasına bloklı kanalda, $Re \approx 17673$ ve $\beta=0.04$ Hz giriş frekansı için x eksenı boyunca sıcaklık genliğının değışiminin deneysel ve sayısal çözümler için karşılaştırılması



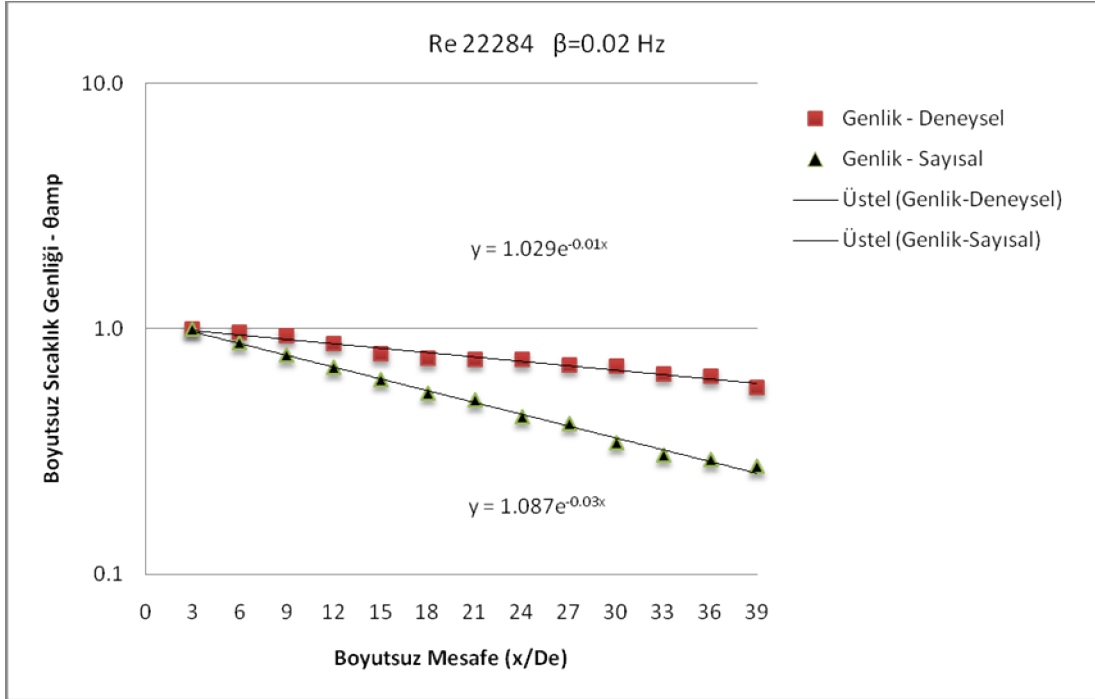
Şekil 4.43. Türbülanslı termal giriş bölgesinde uzunlamasına bloklı kanalda, $Re \approx 17673$ ve $\beta=0.08$ Hz giriş frekansı için x eksenı boyunca sıcaklık genliğının değışiminin deneysel ve sayısal çözümler için karşılaştırılması



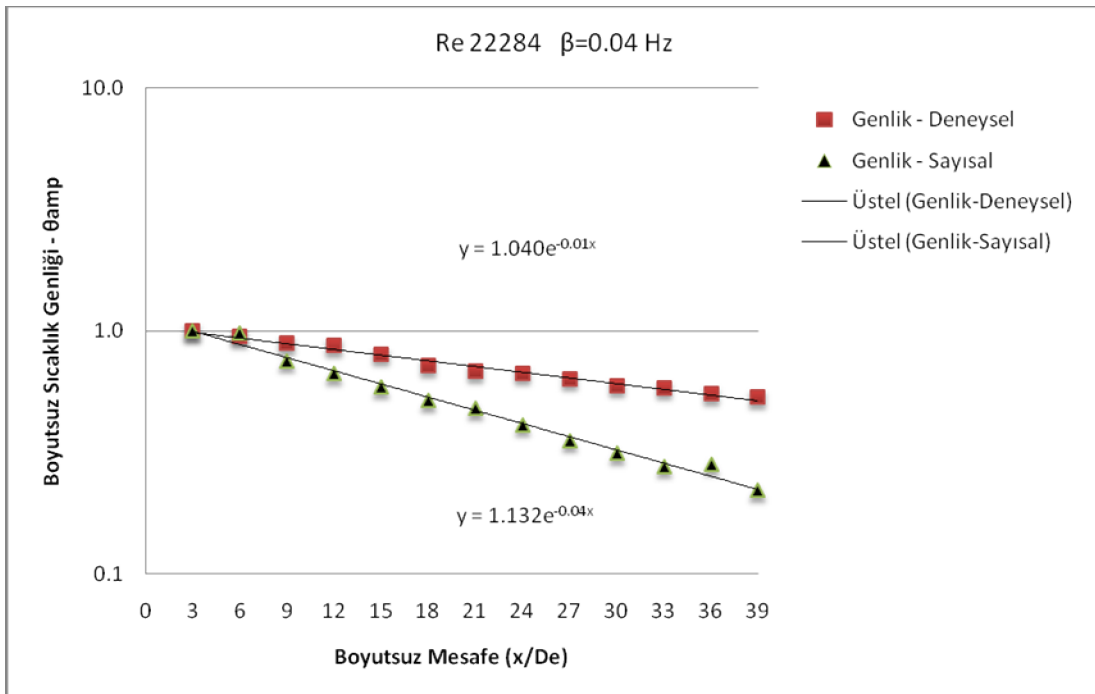
Şekil 4.44. Turbulanslı termal giriş bölgesinde uzunlamasına bloklı kanalda, $Re \approx 17673$ ve $\beta=0.16$ Hz giriş frekansı için x ekseninde boyutsuz sıcaklık genliğinin değişiminin deneysel ve sayısal çözümlerinin karşılaştırılması



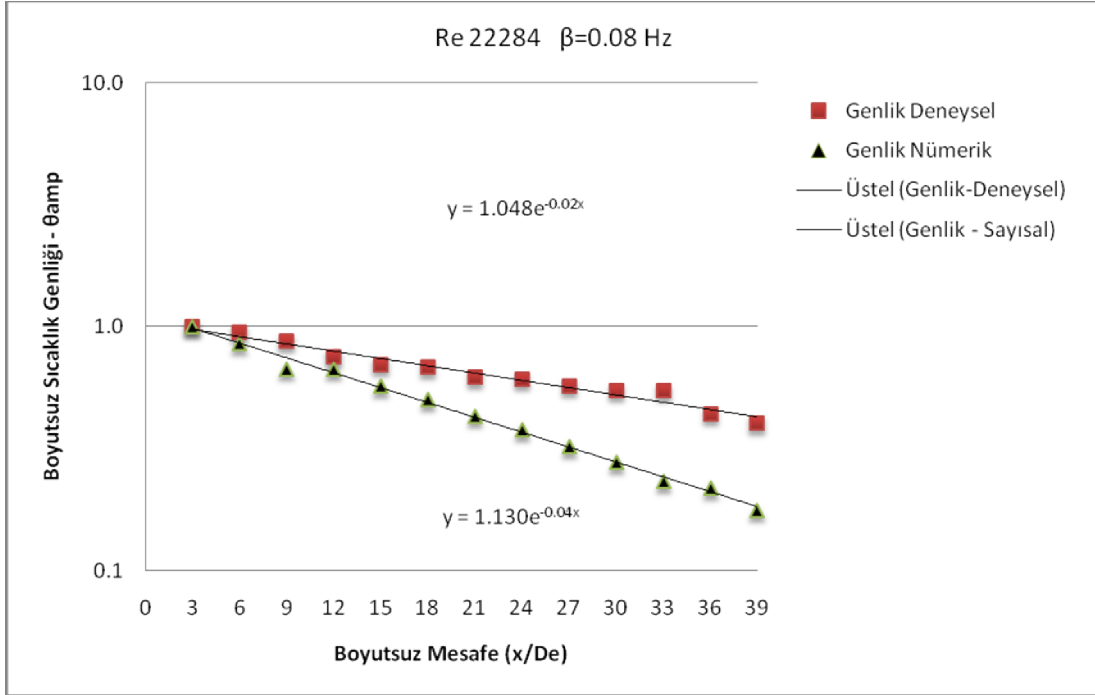
Şekil 4.45. Turbulanslı termal giriş bölgesinde uzunlamasına bloklı kanalda, $Re \approx 17673$ ve $\beta=0.24$ Hz giriş frekansı için x ekseninde boyutsuz sıcaklık genliğinin değişiminin deneysel ve sayısal çözümlerinin karşılaştırılması



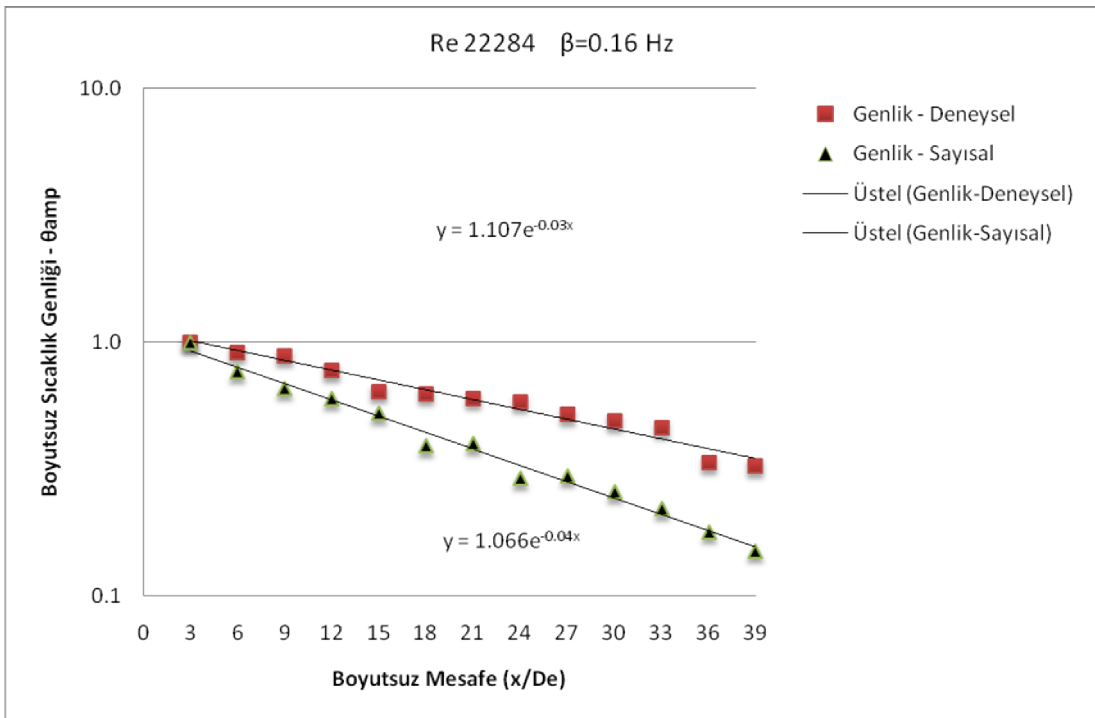
Şekil 4.46. Türbülanslı termal giriş bölgesinde uzunlamasına bloklı kanalda, $Re \approx 22284$ ve $\beta=0.02$ Hz giriş frekansı için x eksenı boyunca sıcaklık genliğının değişiminin deneysel ve sayısal çözüm için karşılaştırılması



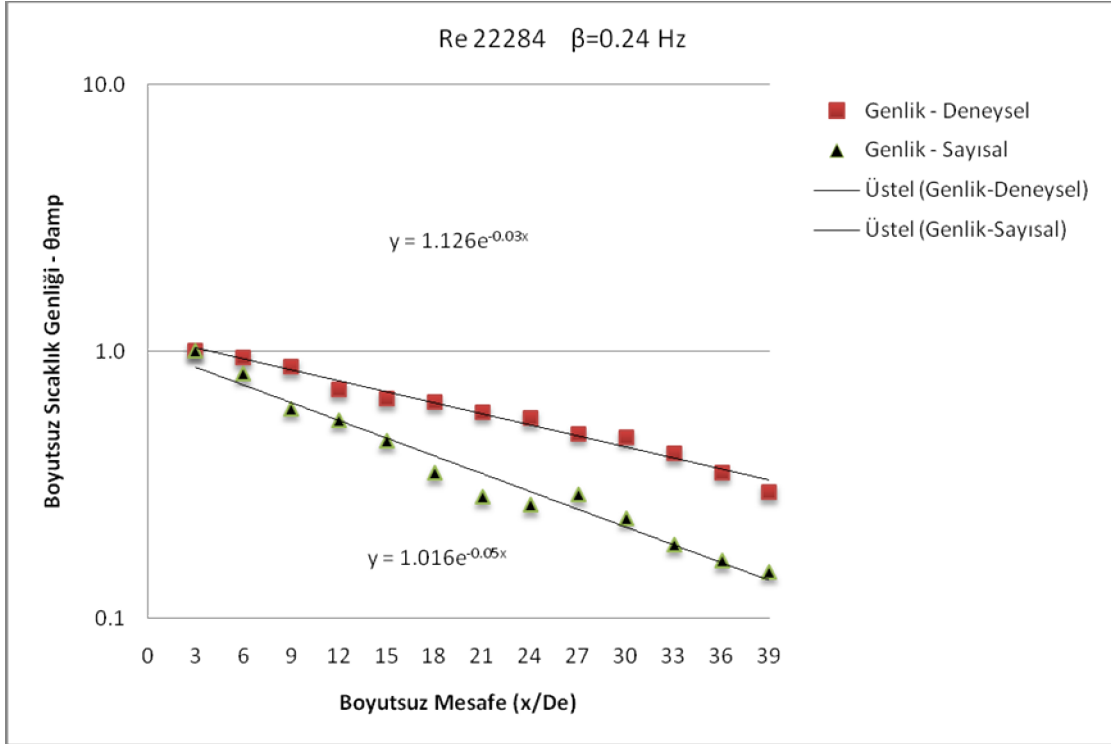
Şekil 4.47. Türbülanslı termal giriş bölgesinde uzunlamasına bloklı kanalda, $Re \approx 22284$ ve $\beta=0.04$ Hz giriş frekansı için x eksenı boyunca sıcaklık genliğının değişiminin deneysel ve sayısal çözüm için karşılaştırılması



Şekil 4.48. Turbulanslı termal giriş bölgesinde uzunlamasına bloklu kanalda, $Re \approx 22284$ ve $\beta=0.08$ Hz giriş frekansı için x ekseninde sıcaklık genliğinin değişiminin deneysel ve sayısal çözümler için karşılaştırılması



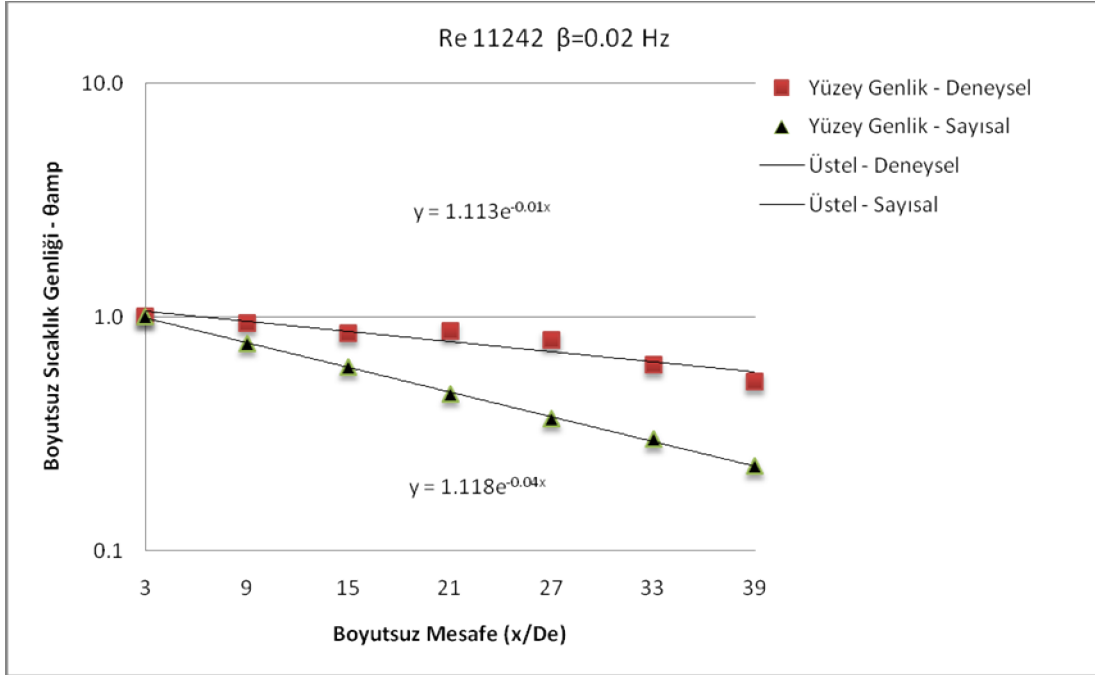
Şekil 4.49. Turbulanslı termal giriş bölgesinde uzunlamasına bloklu kanalda, $Re \approx 22284$ ve $\beta=0.16$ Hz giriş frekansı için x ekseninde sıcaklık genliğinin değişiminin deneysel ve sayısal çözümler için karşılaştırılması



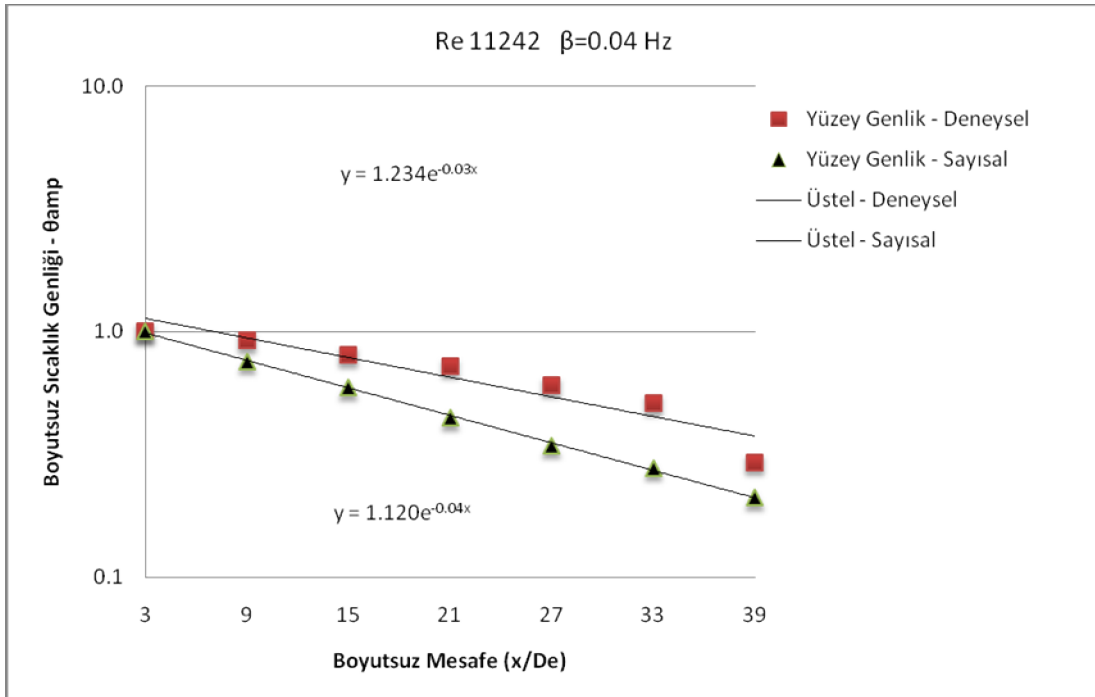
Şekil 4.50. Türbülanslı termal giriş bölgesinde uzunlamasına bloklı kanalda, $Re \approx 22284$ ve $\beta=0.24$ Hz giriş frekansı için x eksenini boyunca sıcaklık genliğinin değişiminin deneysel ve sayısal çözüm için karşılaştırılması

Tablo 4.3. Uzunlamasına bloklı kanalda türbülanslı termal giriş bölgesinde farklı Reynolds (Re) sayıları ve giriş frekansları (β) için x eksenı boyunca deneysel ve sayısal sıcaklık genliklerinin (amplitüd) eğim değerlerinin (α) karşılaştırılması

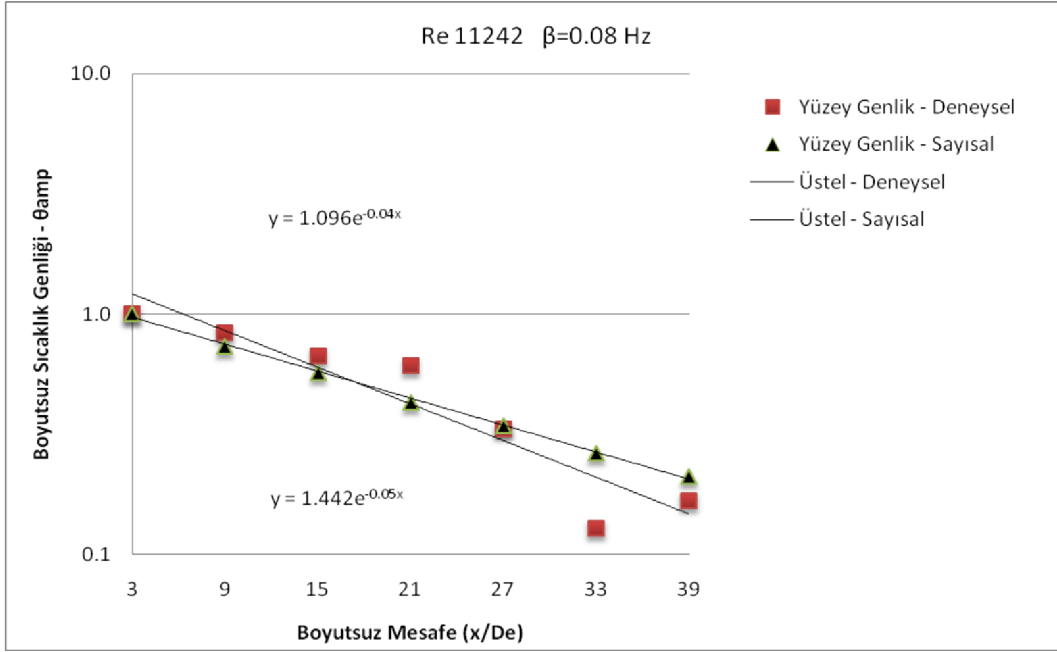
Re	Frekans (Hz)	Deneysel (α)	Nümerik (α)	Mutlak Fark
11242	0.02	0.020	0.040	-0.020
11242	0.04	0.025	0.044	-0.019
11242	0.08	0.030	0.045	-0.015
11242	0.16	0.035	0.041	-0.006
11242	0.24	0.040	0.033	0.007
17673	0.02	0.014	0.040	-0.026
17673	0.04	0.020	0.041	-0.021
17673	0.08	0.025	0.044	-0.019
17673	0.16	0.030	0.037	-0.007
17673	0.24	0.034	0.028	0.006
22225	0.02	0.014	0.032	-0.018
22225	0.04	0.018	0.042	-0.024
22225	0.08	0.023	0.047	-0.024
22225	0.16	0.030	0.049	-0.019
22225	0.24	0.032	0.051	-0.019



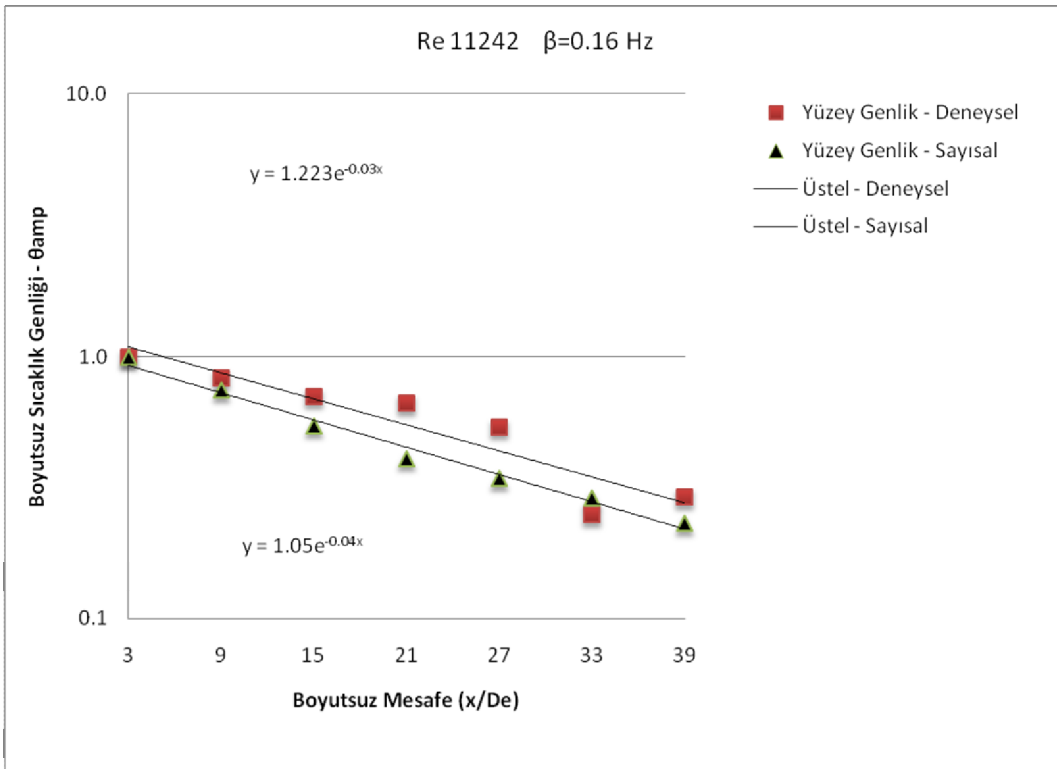
Şekil 4.51. Turbulanslı kombine giriş bölgesinde uzunlamasına bloklu kanal boyunca, $Re \approx 11242$ ve $\beta=0.02$ Hz giriş frekanslarında x eksenine doğrultusunda değişen x/D_e değerleri için kanal duvarı sıcaklık genlik (amplitüd) değişiminin deneysel ve sayısal çözümler için karşılaştırılması



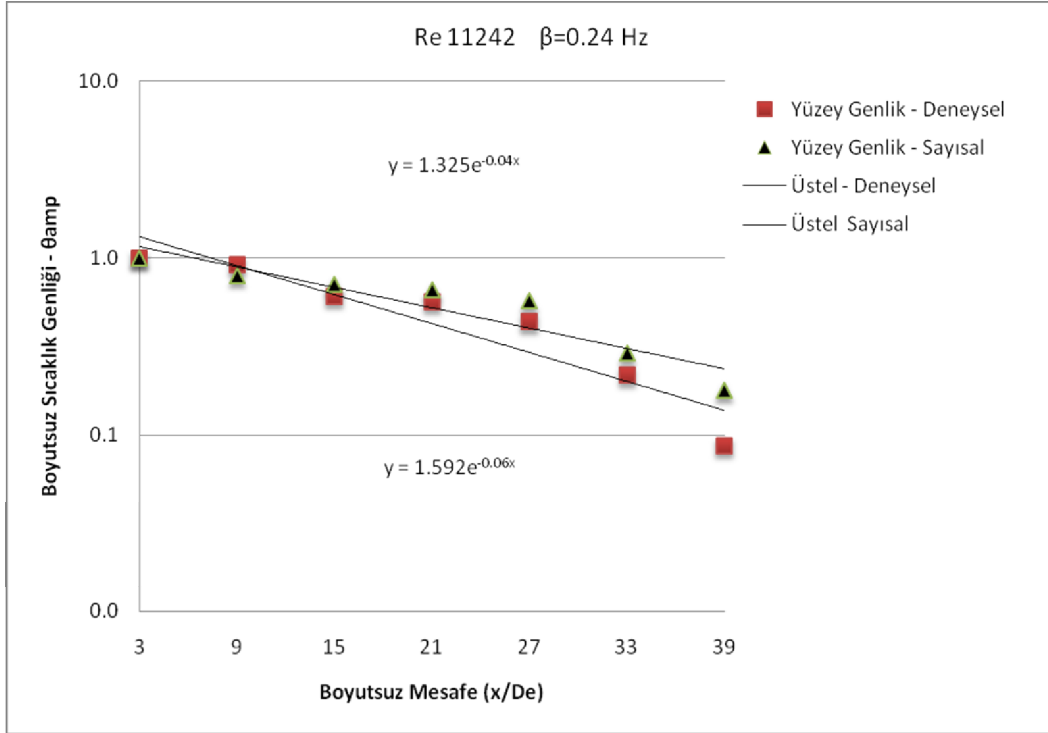
Şekil 4.52. Turbulanslı kombine giriş bölgesinde uzunlamasına bloklu kanal boyunca, $Re \approx 11242$ ve $\beta=0.04$ Hz giriş frekanslarında x eksenine doğrultusunda değişen x/D_e değerleri için kanal duvarı sıcaklık genlik (amplitüd) değişiminin deneysel ve sayısal çözümler için karşılaştırılması



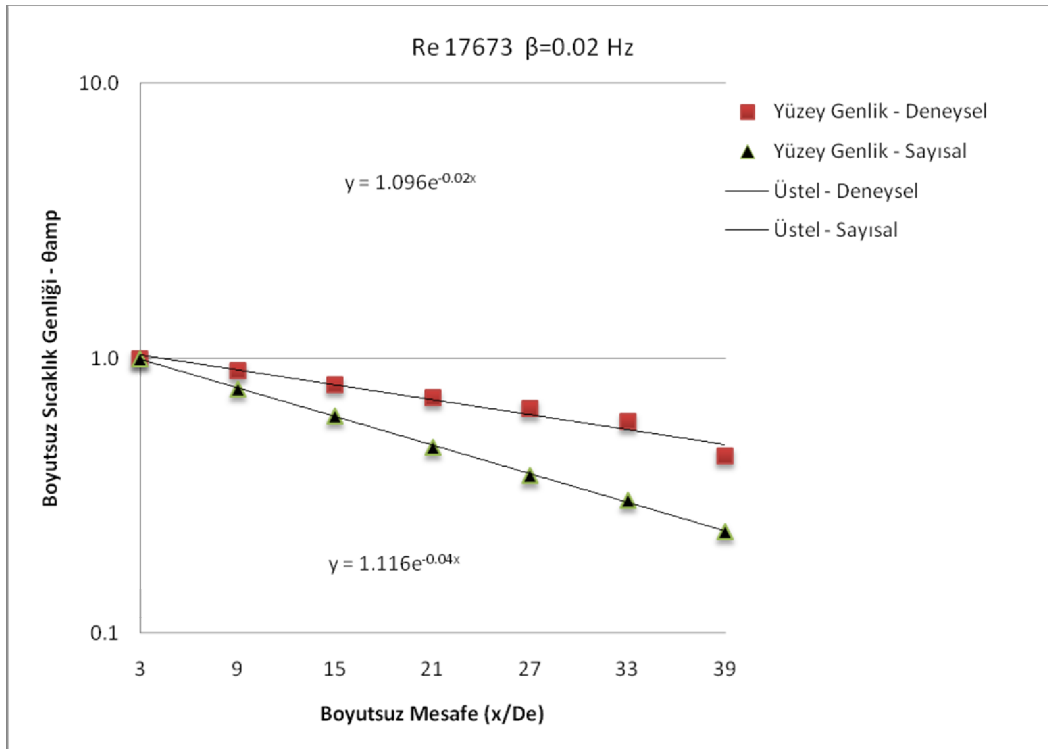
Şekil 4.53. Turbulanslı kombine giriş bölgesinde uzunlamasına bloklu kanal boyunca, $Re \approx 11242$ ve $\beta=0.08$ Hz giriş frekanslarında x ekseninde farklı x/D_e değerleri için kanal duvarı sıcaklık genlik (amplitüd) değişiminin deneysel ve sayısal çözümlerinin karşılaştırılması



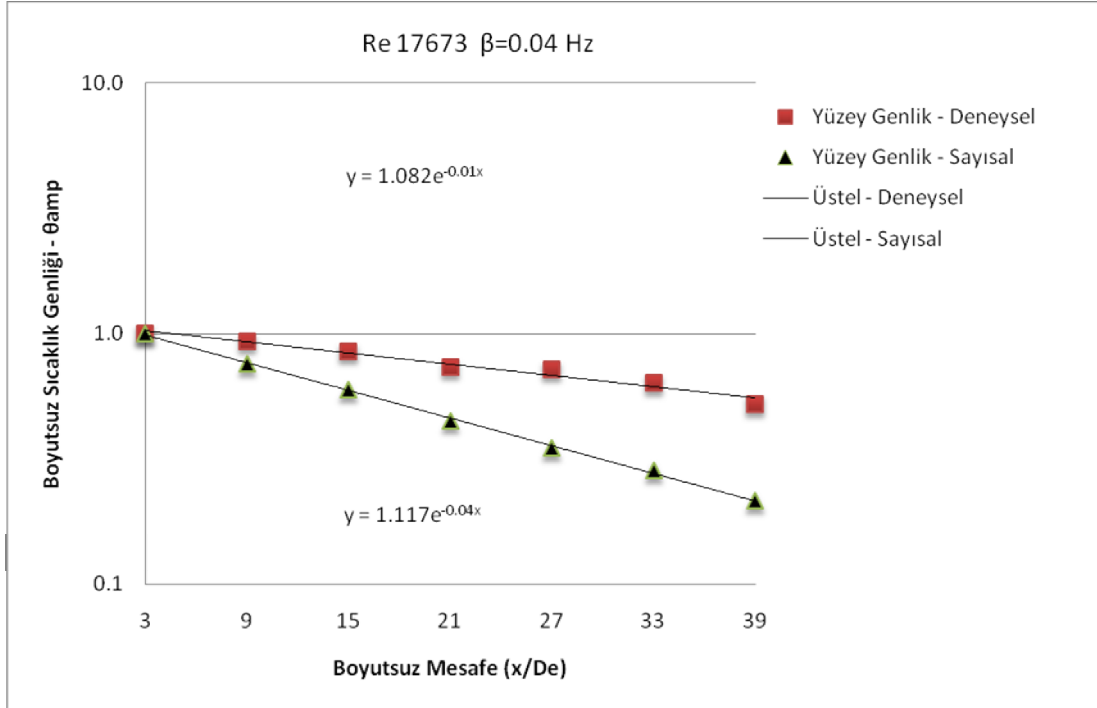
Şekil 4.54. Turbulanslı kombine giriş bölgesinde uzunlamasına bloklu kanal boyunca, $Re \approx 11242$ ve $\beta=0.16$ Hz giriş frekanslarında x ekseninde farklı x/D_e değerleri için kanal duvarı sıcaklık genlik (amplitüd) değişiminin deneysel ve sayısal çözümlerinin karşılaştırılması



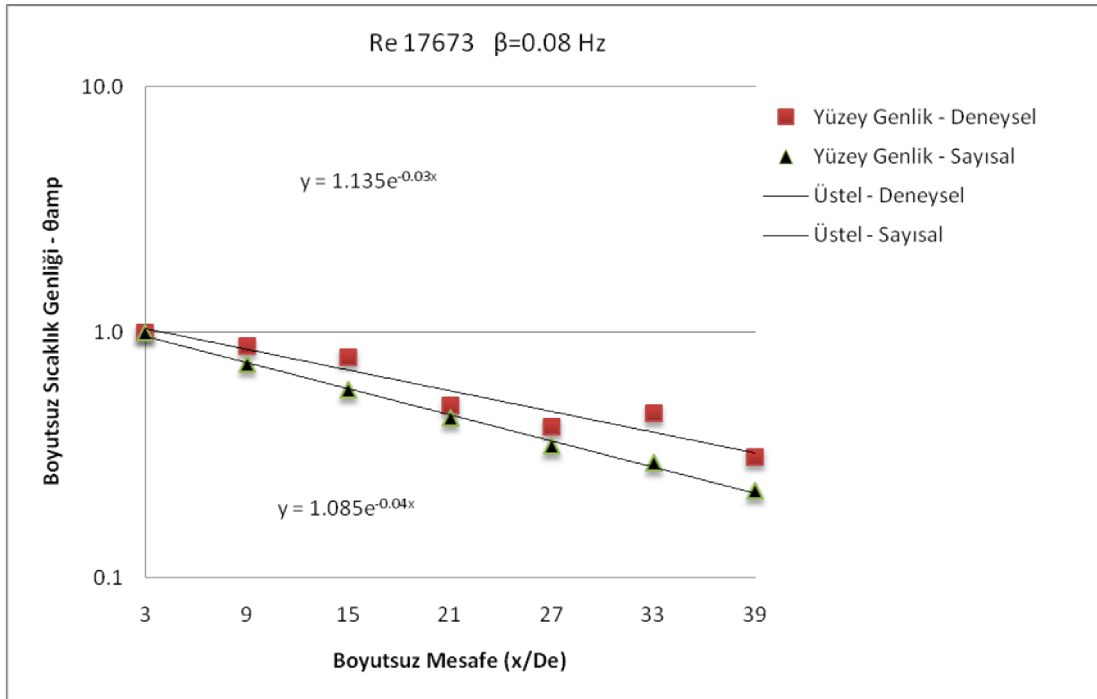
Şekil 4.55. Türbülanslı kombine giriş bölgesinde uzunlamasına bloklı kanal boyunca, $Re \approx 11242$ ve $\beta=0.24$ Hz giriş frekanslarında x eksenini doğrultusunda değişik x/D_e değerleri için kanal duvarı sıcaklık genlik (amplitüd) değişiminin deneysel ve sayısal çözümler için karşılaştırılması



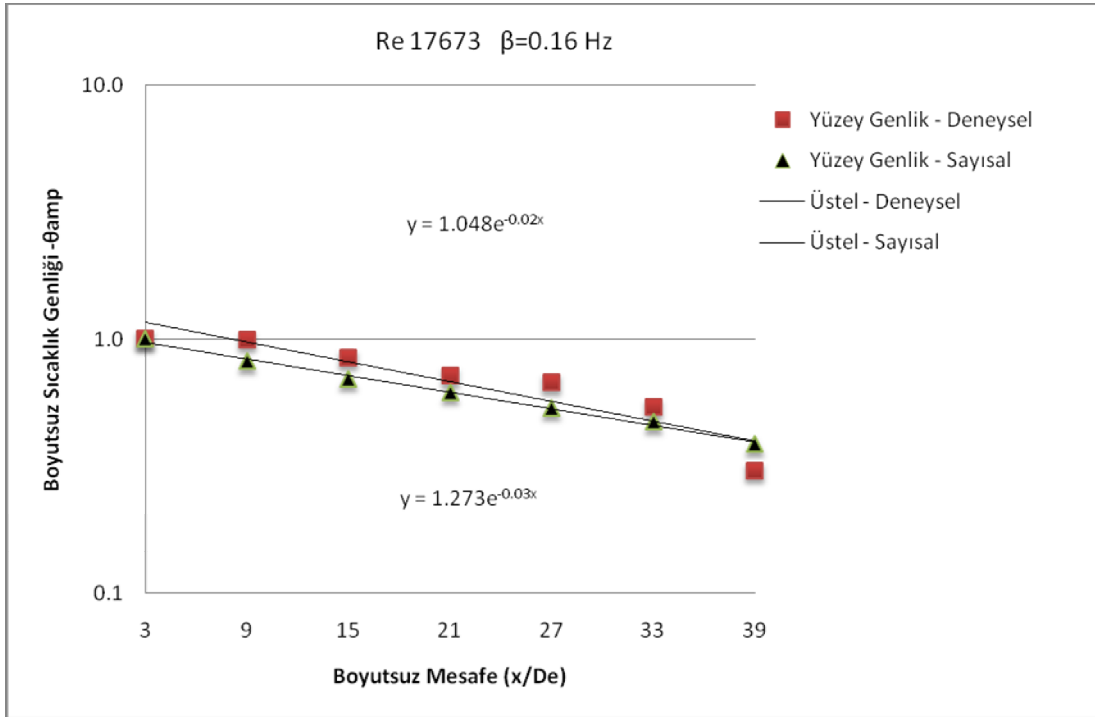
Şekil 4.56. Türbülanslı kombine giriş bölgesinde uzunlamasına bloklı kanal boyunca, $Re \approx 17673$ ve $\beta=0.02$ Hz giriş frekanslarında x eksenini doğrultusunda değişik x/D_e değerleri için kanal duvarı sıcaklık genlik (amplitüd) değişiminin deneysel ve sayısal çözümler için karşılaştırılması



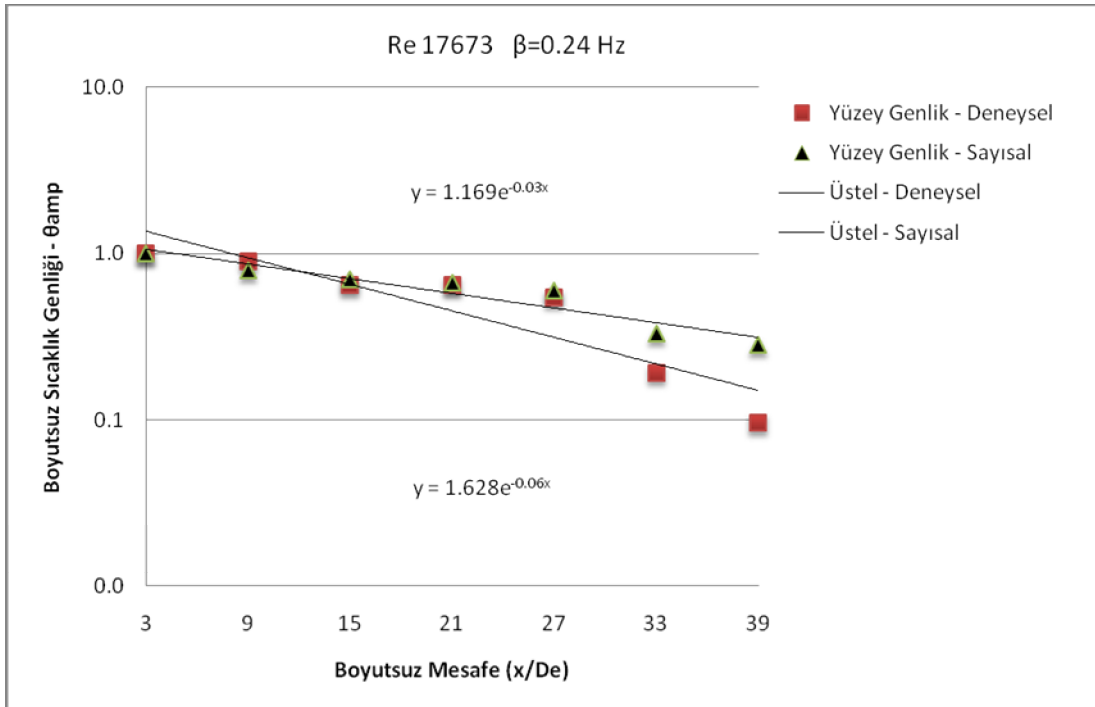
Şekil 4.57. Türbülanslı kombine giriş bölgesinde uzunlamasına bloklu kanal boyunca, $Re \approx 17673$ ve $\beta=0.04$ Hz giriş frekanslarında x eksenine doğrultusunda değişen x/D_e değerleri için kanal duvarı sıcaklık genlik (amplitüd) değişiminin deneysel ve sayısal çözüm için karşılaştırılması



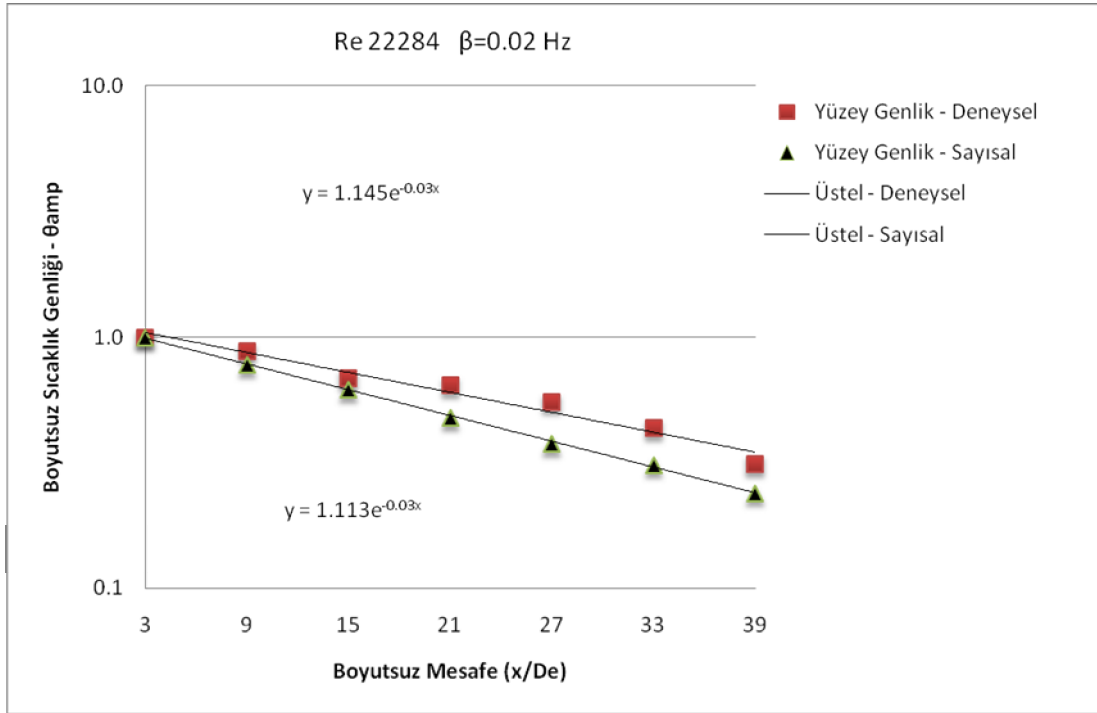
Şekil 4.58. Türbülanslı kombine giriş bölgesinde uzunlamasına bloklu kanal boyunca, $Re \approx 17673$ ve $\beta=0.08$ Hz giriş frekanslarında x eksenine doğrultusunda değişen x/D_e değerleri için kanal duvarı sıcaklık genlik (amplitüd) değişiminin deneysel ve sayısal çözüm için karşılaştırılması



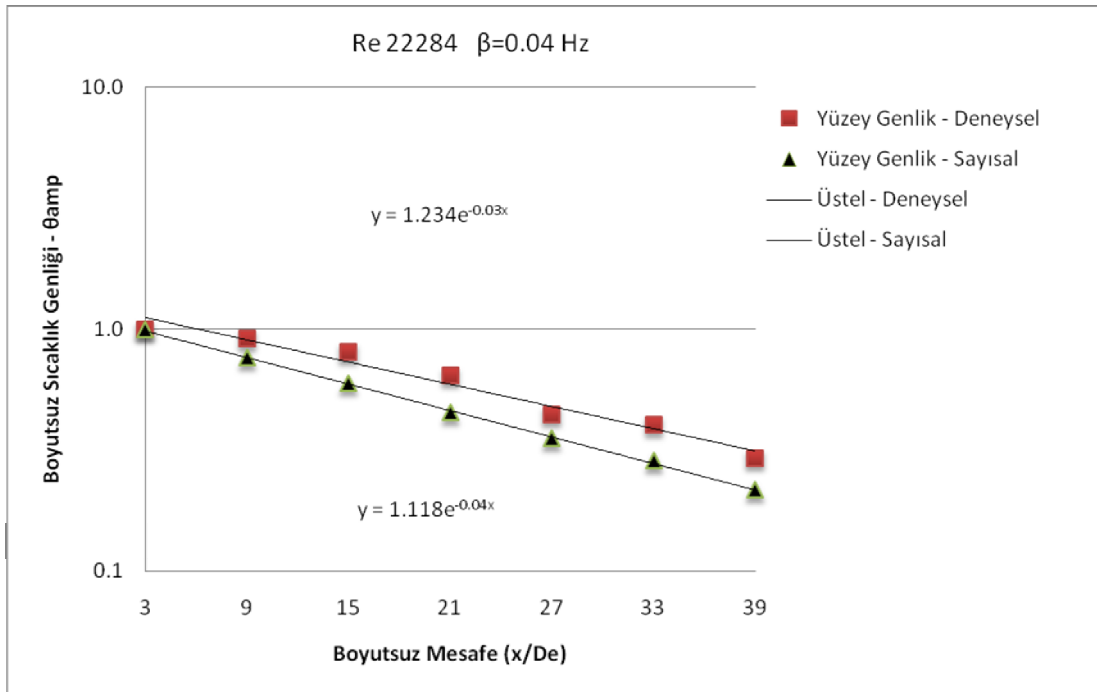
Şekil 4.59. Türbülanslı kombine giriş bölgesinde uzunlamasına bloklı kanal boyunca, $Re \approx 17673$ ve $\beta=0.16$ Hz giriş frekanslarında x eksenı doğrultusunda değişik x/D_e değerleri için kanal duvarı sıcaklık genlik (amplitüd) değişiminin deneysel ve sayısal çözümler için karşılaştırılması



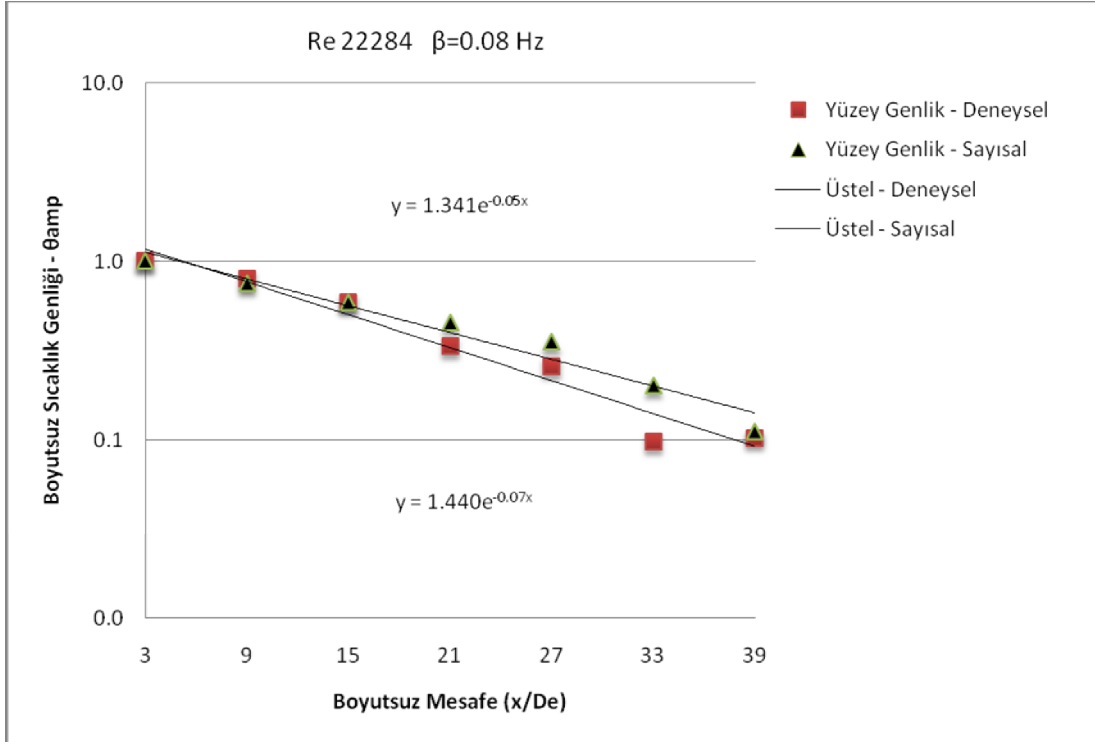
Şekil 4.60. Türbülanslı kombine giriş bölgesinde uzunlamasına bloklı kanal boyunca, $Re \approx 17673$ ve $\beta=0.24$ Hz giriş frekanslarında x eksenı doğrultusunda değişik x/D_e değerleri için kanal duvarı sıcaklık genlik (amplitüd) değişiminin deneysel ve sayısal çözümler için karşılaştırılması



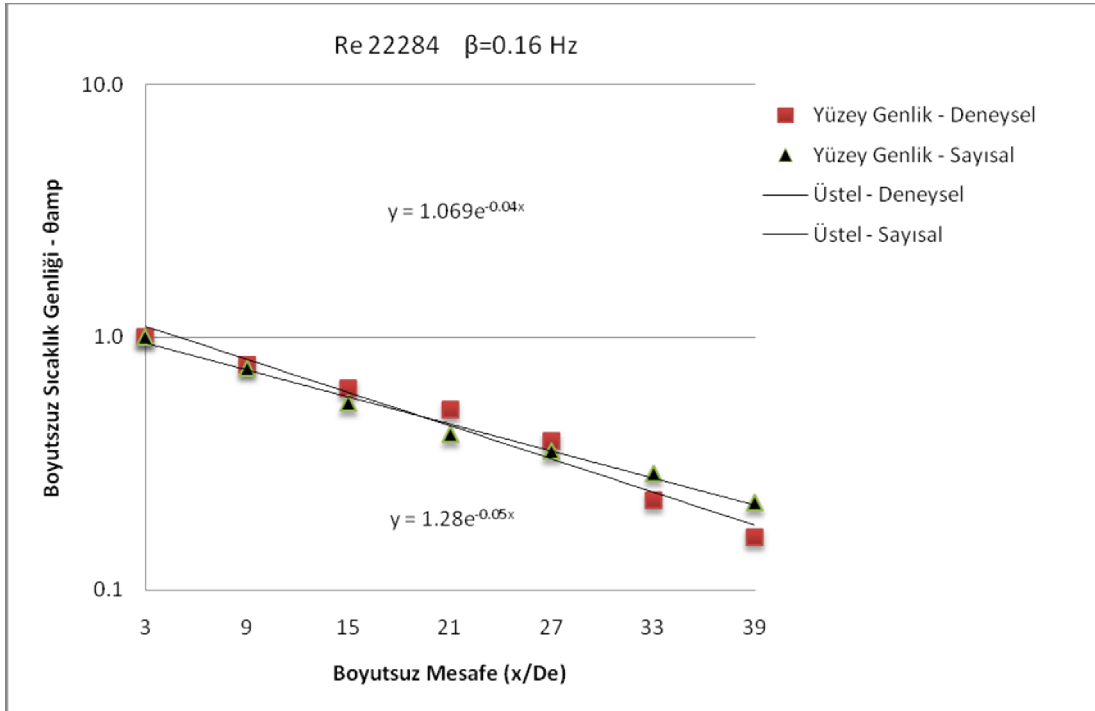
Şekil 4.61. Türbülanslı kombine giriş bölgesinde uzunlamasına bloklı kanal boyunca, $Re \approx 22284$ ve $\beta=0.02$ Hz giriş frekanslarında x eksenı doğrultusunda değişik x/D_e değerleri için kanal duvarı sıcaklık genlik (amplitüd) değişiminin deneysel ve sayısal çözüm için karşılaştırılması



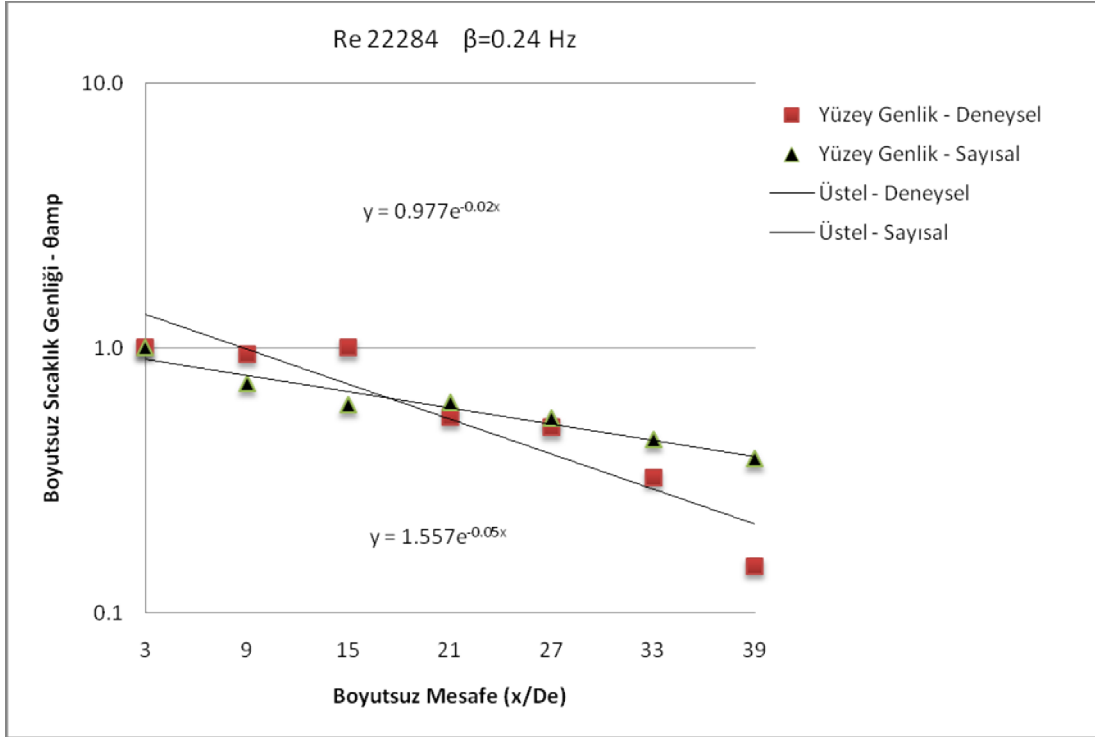
Şekil 4.62. Türbülanslı kombine giriş bölgesinde uzunlamasına bloklı kanal boyunca, $Re \approx 22284$ ve $\beta=0.04$ Hz giriş frekanslarında x eksenı doğrultusunda değişik x/D_e değerleri için kanal duvarı sıcaklık genlik (amplitüd) değişiminin deneysel ve sayısal çözüm için karşılaştırılması



Şekil 4.63. Türbülanslı kombine giriş bölgesinde uzunlamasına bloklı kanal boyunca, $Re \approx 22284$ ve $\beta=0.08$ Hz giriş frekanslarında x eksenı doğrultusunda değişik x/D_e değerleri için kanal duvarı sıcaklık genlik (amplitüd) değişiminin deneysel ve sayısal çözüm için karşılaştırılması



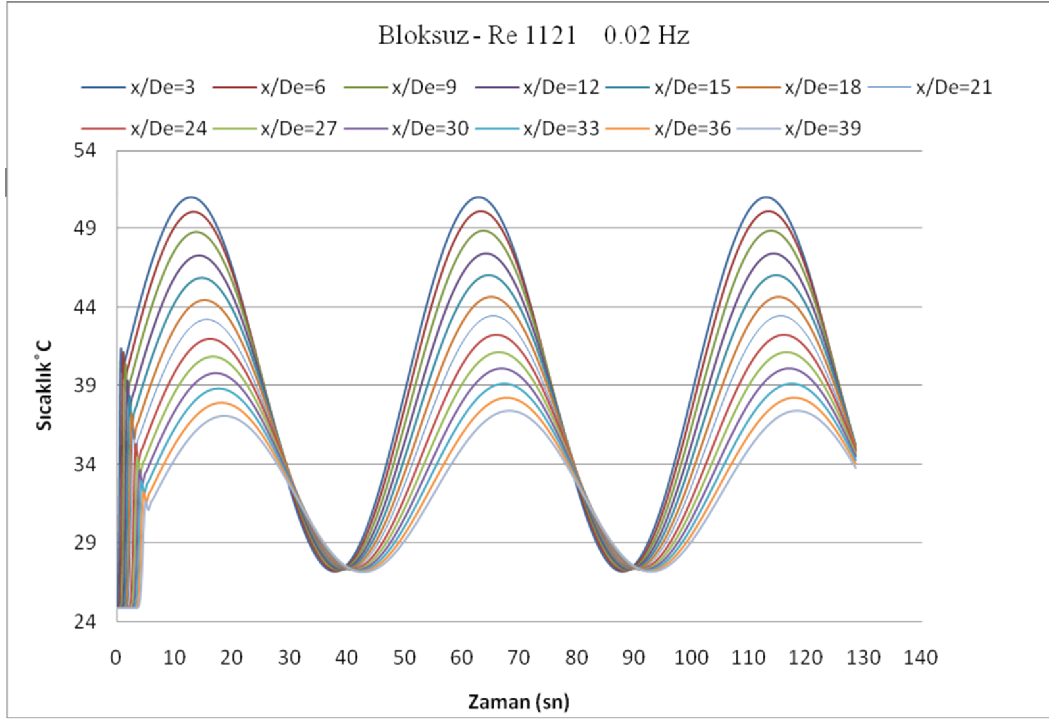
Şekil 4.64. Türbülanslı kombine giriş bölgesinde uzunlamasına bloklı kanal boyunca, $Re \approx 22284$ ve $\beta=0.16$ Hz giriş frekanslarında x eksenı doğrultusunda değişik x/D_e değerleri için kanal duvarı sıcaklık genlik (amplitüd) değişiminin deneysel ve sayısal çözüm için karşılaştırılması



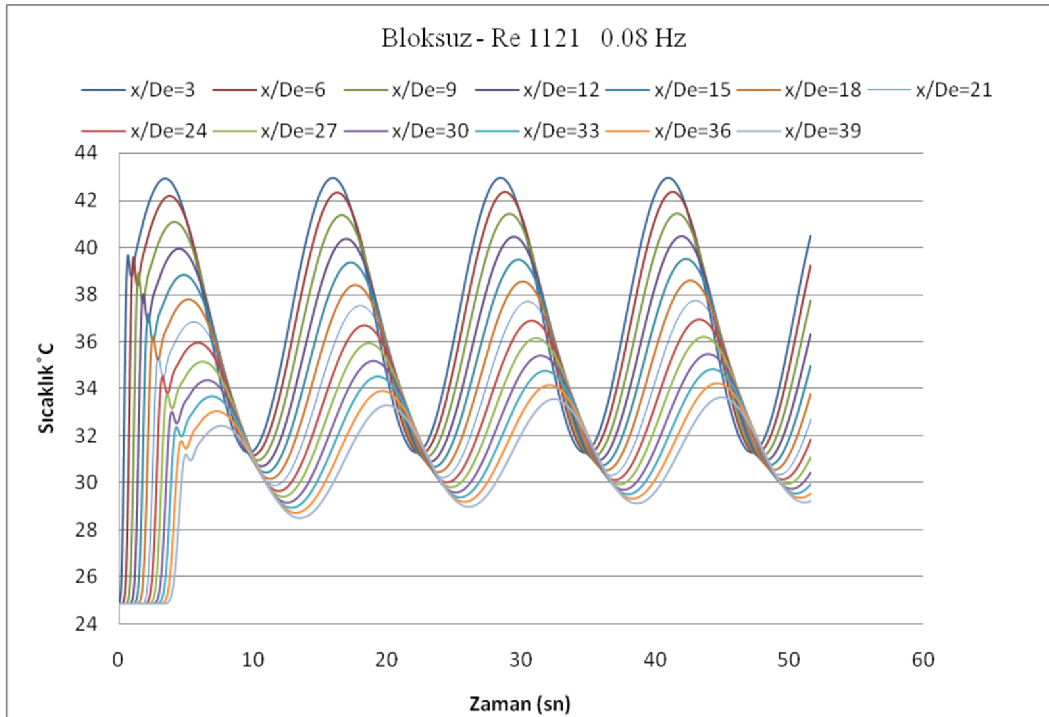
Şekil 4.65. Türbülanslı kombine giriş bölgesinde uzunlamasına bloklu kanal boyunca, $Re \approx 22284$ ve $\beta=0.24$ Hz giriş frekanslarında x eksenine doğrultusunda değişik x/D_e değerleri için kanal duvarı sıcaklık genlik (amplitüd) değişiminin deneysel ve sayısal çözüm için karşılaştırılması

Tablo 4.4. Türbülanslı kombine giriş bölgesinde uzunlamasına bloklı kanal boyunca, farklı Reynolds ve giriş frekanslarında x eksenı doğrultusunda değişik x/D_e değerleri için kanal duvarı sıcaklık genlik (amplitüd) değişiminin deneysel ve sayısal çözüm için karşılaştırılması

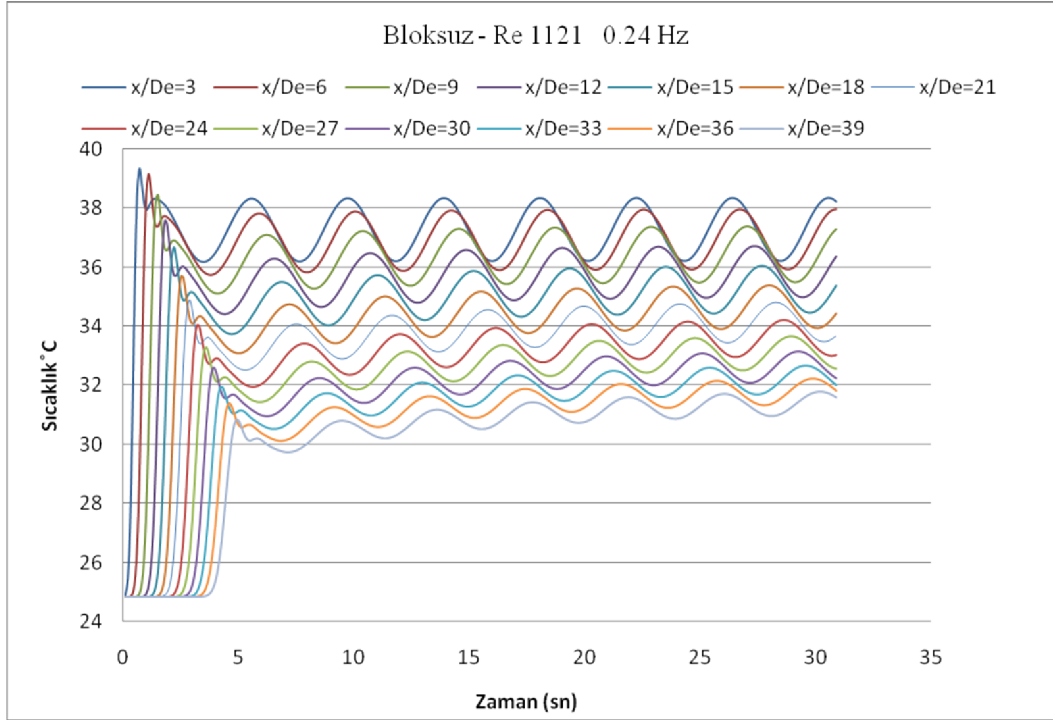
Re	Frekans (Hz)	Deneysel (α)	Sayısal (α)	Mutlak Fark
11242	0.02	0.017	0.041	-0.024
11242	0.04	0.031	0.043	-0.012
11242	0.08	0.071	0.058	0.013
11242	0.16	0.038	0.040	-0.002
11242	0.24	0.063	0.044	0.019
17673	0.02	0.021	0.040	-0.019
17673	0.04	0.017	0.042	-0.025
17673	0.08	0.032	0.041	-0.009
17673	0.16	0.030	0.025	0.005
17673	0.24	0.061	0.034	0.027
22225	0.02	0.030	0.039	-0.009
22225	0.04	0.035	0.042	-0.007
22225	0.08	0.071	0.058	0.013
22225	0.16	0.050	0.041	0.009
22225	0.24	0.051	0.024	0.027



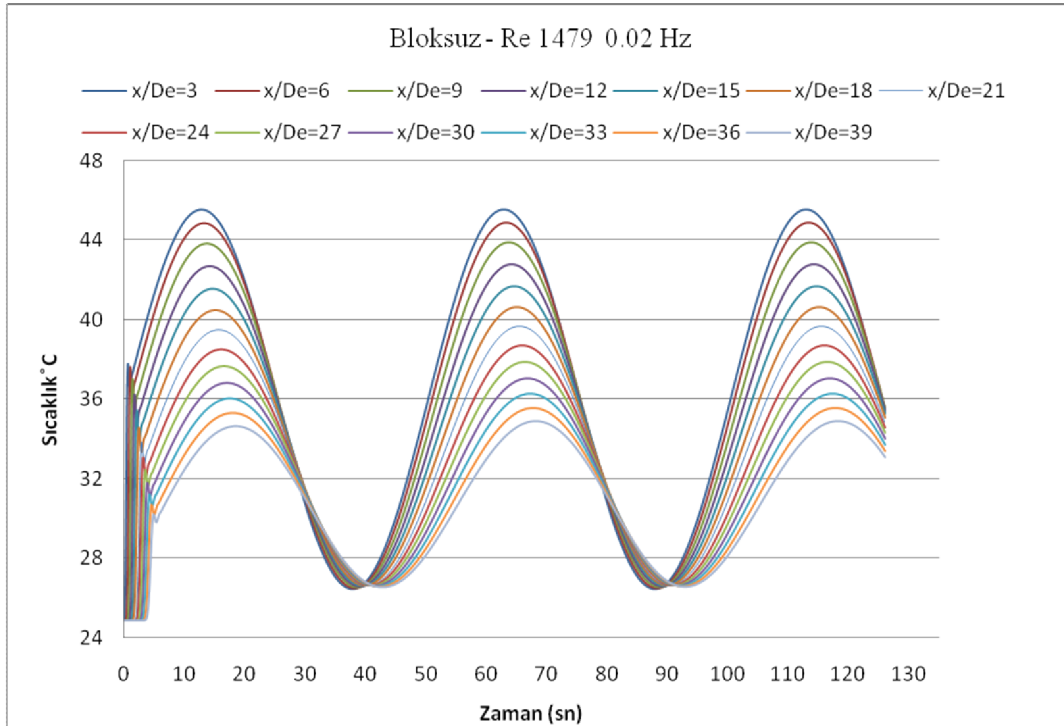
Şekil 4.66. Laminer termal giriş bölgesinde bloksuz kanal boyunca, $Re \approx 1121$ ve $\beta=0.02$ Hz giriş frekansında x eksenine doğrultusunda değişik x/D_e değerlerinde kanal giriş sıcaklığının zamana göre değişimi



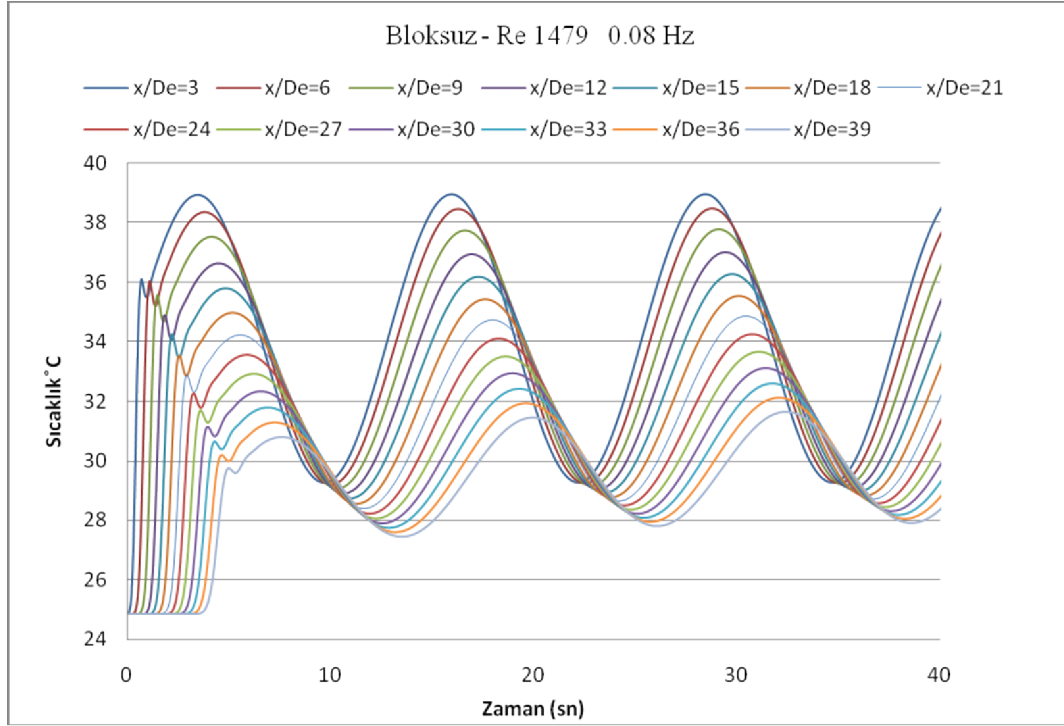
Şekil 4.67. Laminer termal giriş bölgesinde bloksuz kanal boyunca, $Re \approx 1121$ ve $\beta=0.08$ Hz giriş frekansında x eksenine doğrultusunda değişik x/D_e değerlerinde kanal giriş sıcaklığının zamana göre değişimi



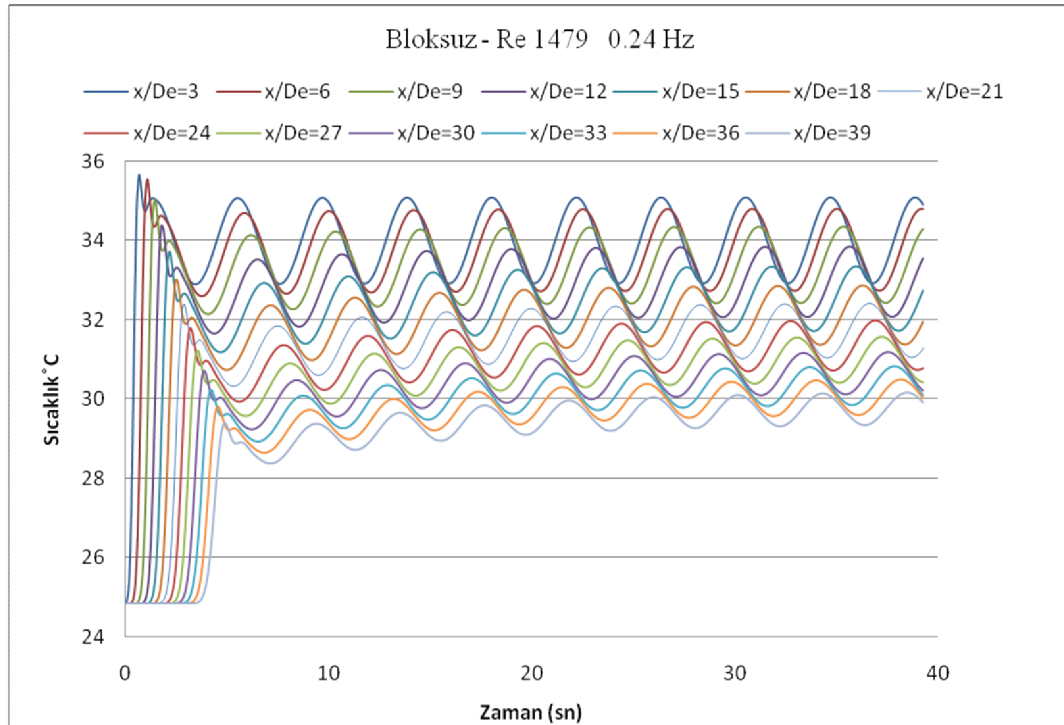
Şekil 4.68. Laminer termal giriş bölgesinde bloksuz kanal boyunca, $Re \approx 1121$ ve $\beta=0.24$ Hz giriş frekansında x eksenine doğrultusunda değişik x/D_e değerlerinde kanal giriş sıcaklığının zamana göre değişimi



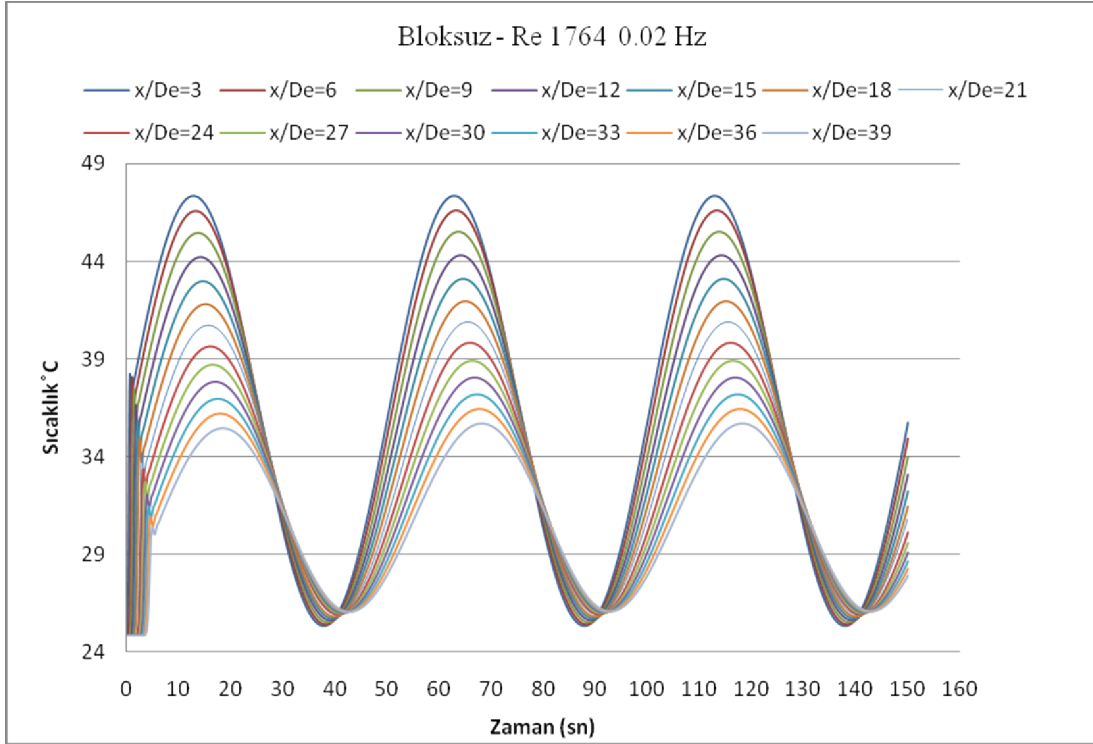
Şekil 4.69. Laminer termal giriş bölgesinde bloksuz kanal boyunca, $Re \approx 1479$ ve $\beta=0.02$ Hz giriş frekansında x eksenine doğrultusunda değişik x/D_e değerlerinde kanal giriş sıcaklığının zamana göre değişimi



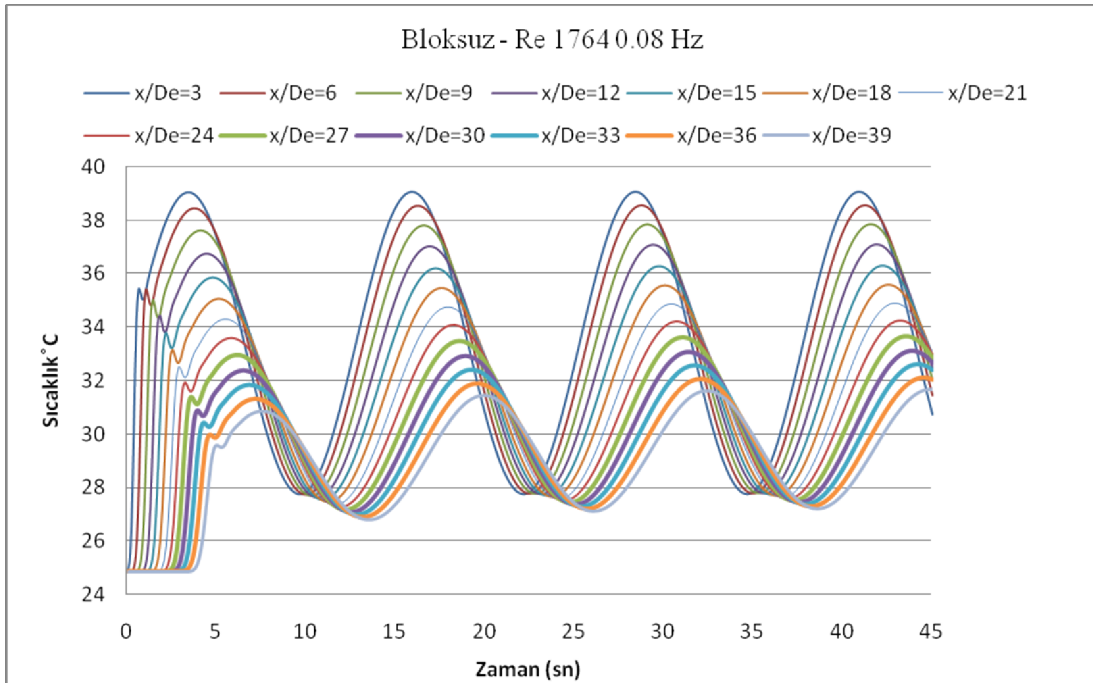
Şekil 4.70. Laminer termal giriş bölgesinde bloksuz kanal boyunca, $Re \approx 1479$ ve $\beta=0.08$ Hz giriş frekansında x eksenine doğrultusunda değişik x/D_e değerlerinde kanal giriş sıcaklığının zamana göre değişimi



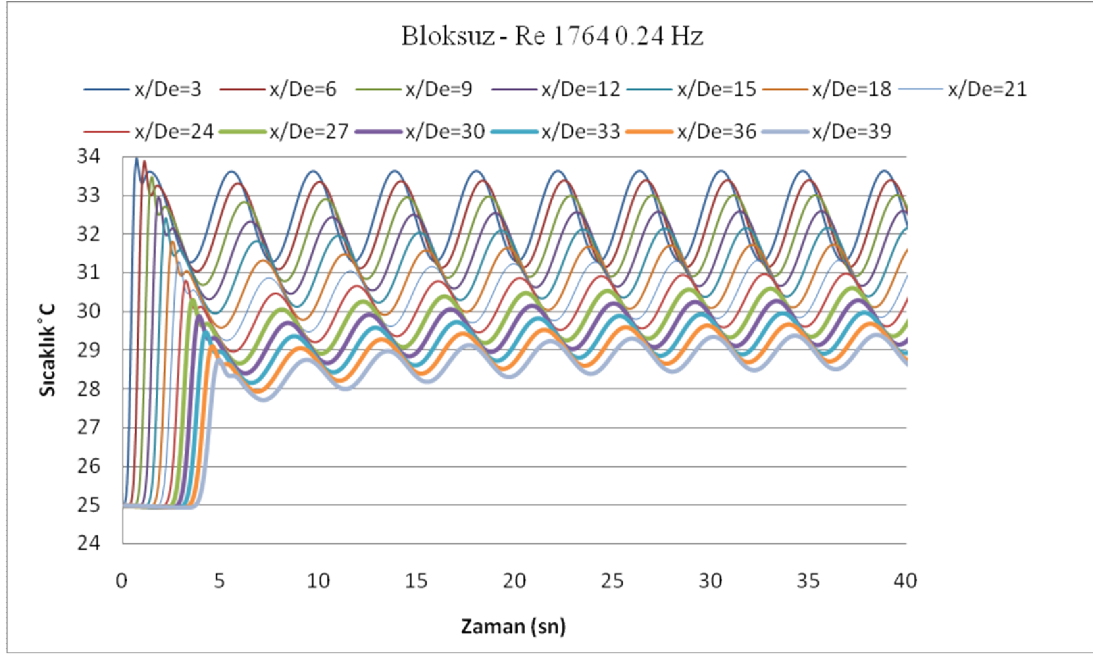
Şekil 4.71. Laminer termal giriş bölgesinde bloksuz kanal boyunca, $Re \approx 1479$ ve $\beta=0.24$ Hz giriş frekansında x eksenine doğrultusunda değişik x/D_e değerlerinde kanal giriş sıcaklığının zamana göre değişimi



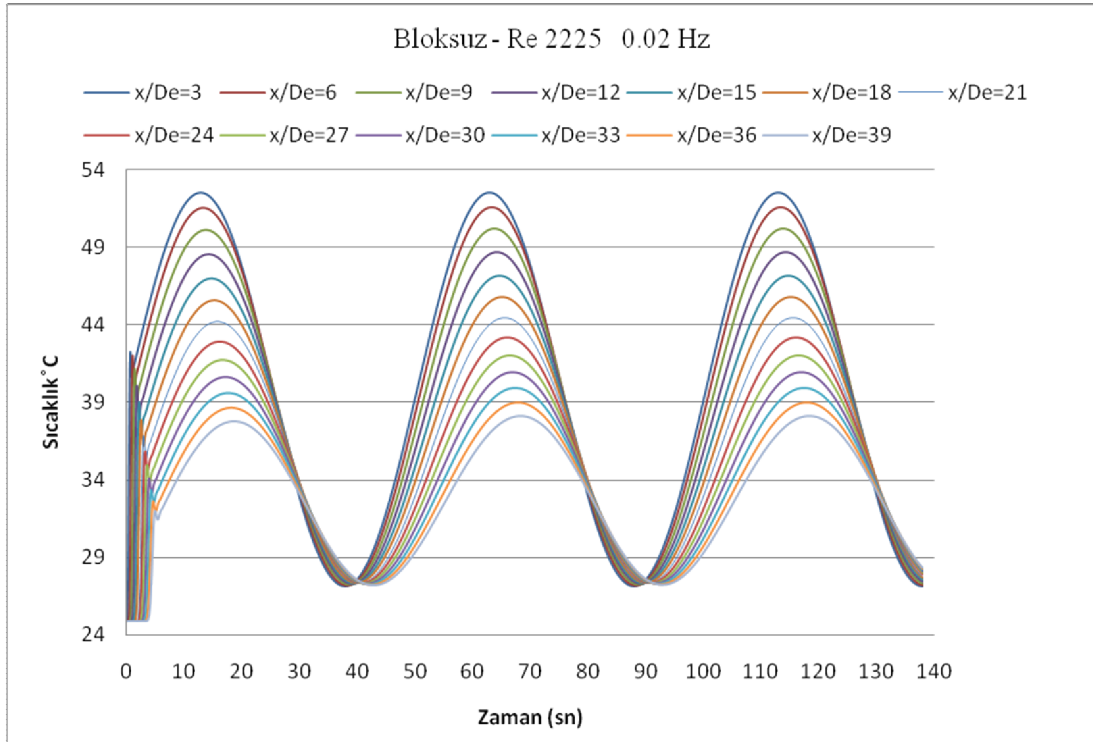
Şekil 4.72. Laminer termal giriş bölgesinde bloksuz kanal boyunca, $Re \approx 1764$ ve $\beta=0.02$ Hz giriş frekansında x eksenine doğrultusunda değişik x/D_e değerlerinde kanal giriş sıcaklığının zamana göre değişimi



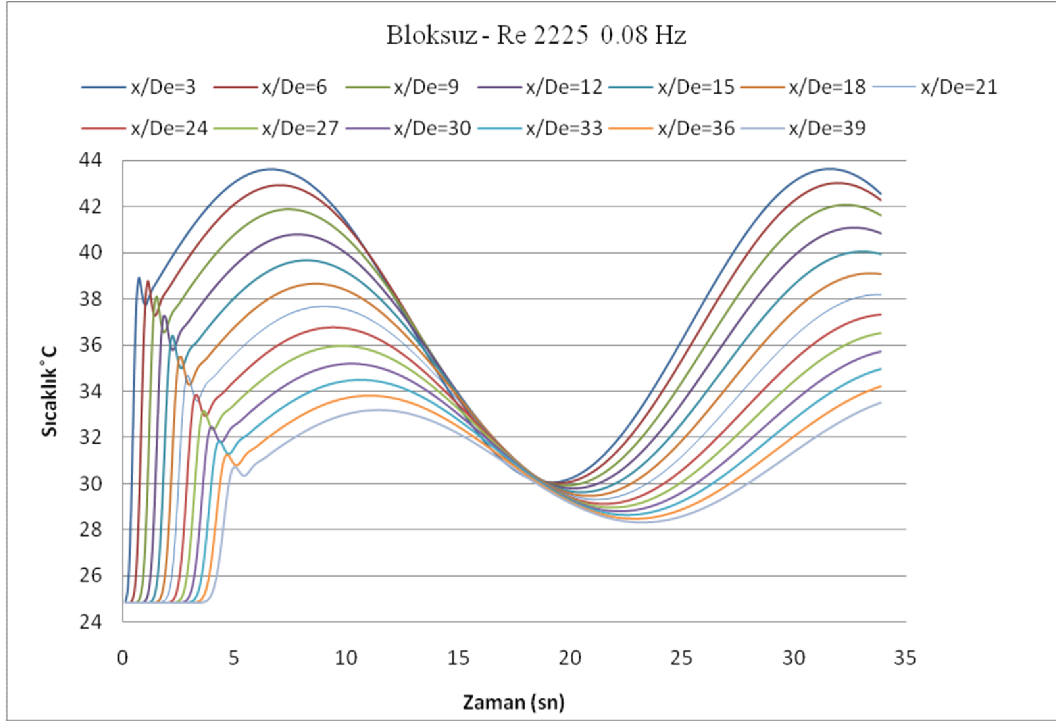
Şekil 4.73. Laminer termal giriş bölgesinde bloksuz kanal boyunca, $Re \approx 1764$ ve $\beta=0.08$ Hz giriş frekansında x eksenine doğrultusunda değişik x/D_e değerlerinde kanal giriş sıcaklığının zamana göre değişimi



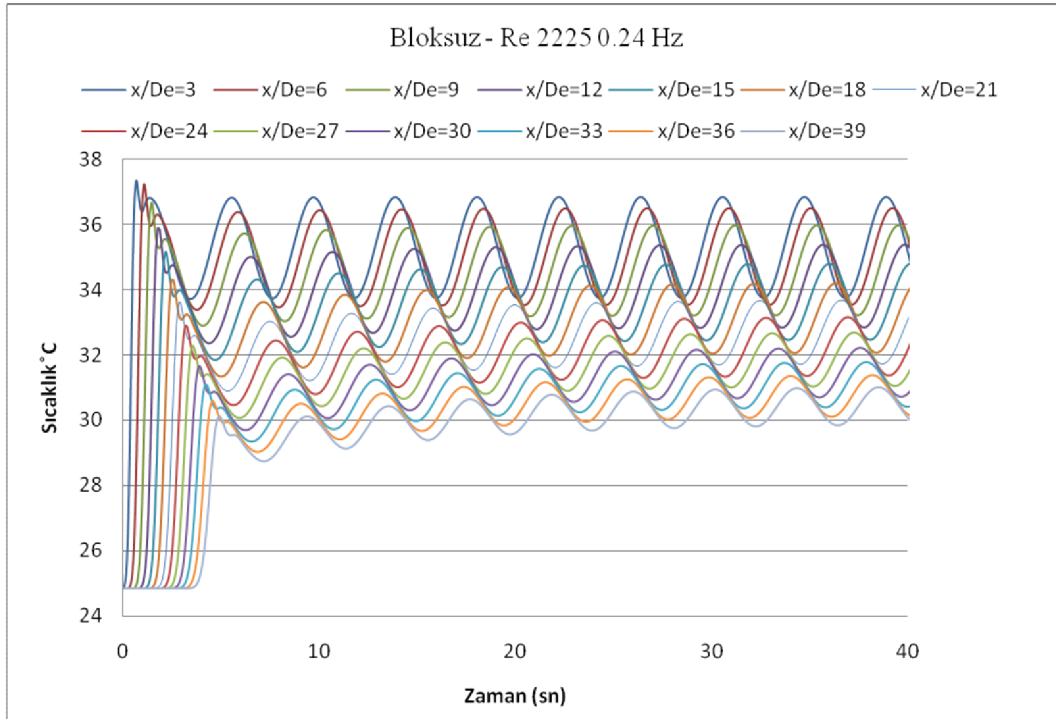
Şekil 4.74. Laminer termal giriş bölgesinde bloksuz kanal boyunca, $Re \approx 1764$ ve $\beta=0.24$ Hz giriş frekansında x eksenine doğrultusunda değişik x/D_e değerlerinde kanal giriş sıcaklığının zamana göre değişimi



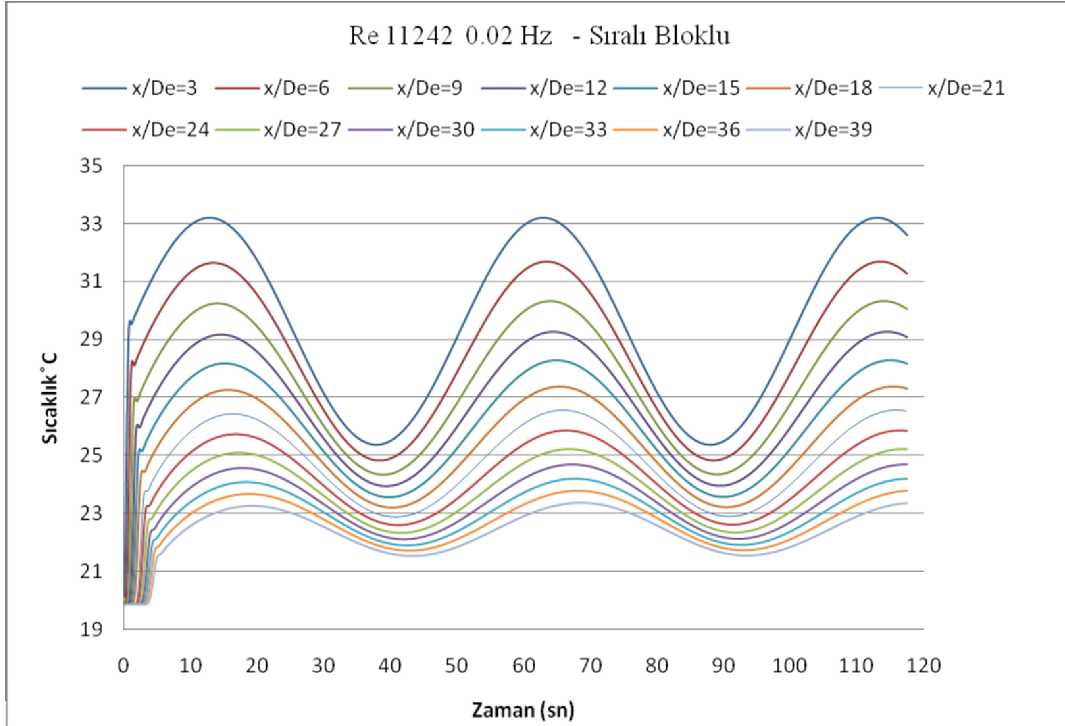
Şekil 4.75. Laminer termal giriş bölgesinde bloksuz kanal boyunca, $Re \approx 2225$ ve $\beta=0.02$ Hz giriş frekansında x eksenine doğrultusunda değişik x/D_e değerlerinde kanal giriş sıcaklığının zamana göre değişimi



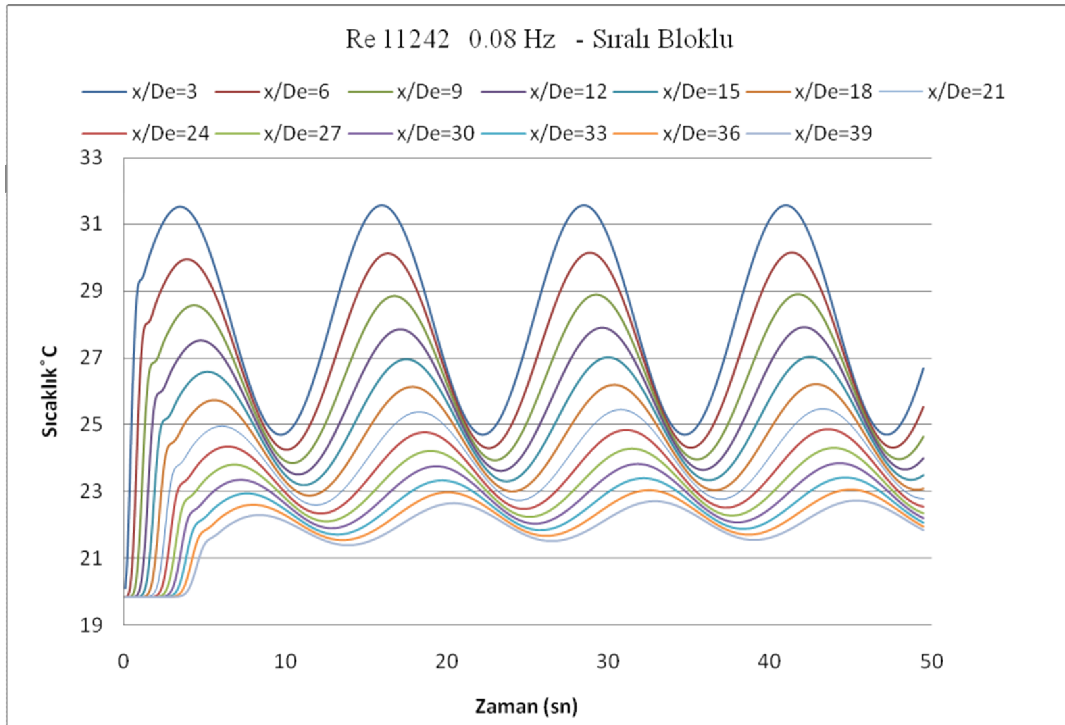
Şekil 4.76. Laminer termal giriş bölgesinde blocsuz kanal boyunca, $Re \approx 2225$ ve $\beta=0.08$ Hz giriş frekansında x eksenine doğrultusunda değişik x/D_e değerlerinde kanal giriş sıcaklığının zamana göre değişimi



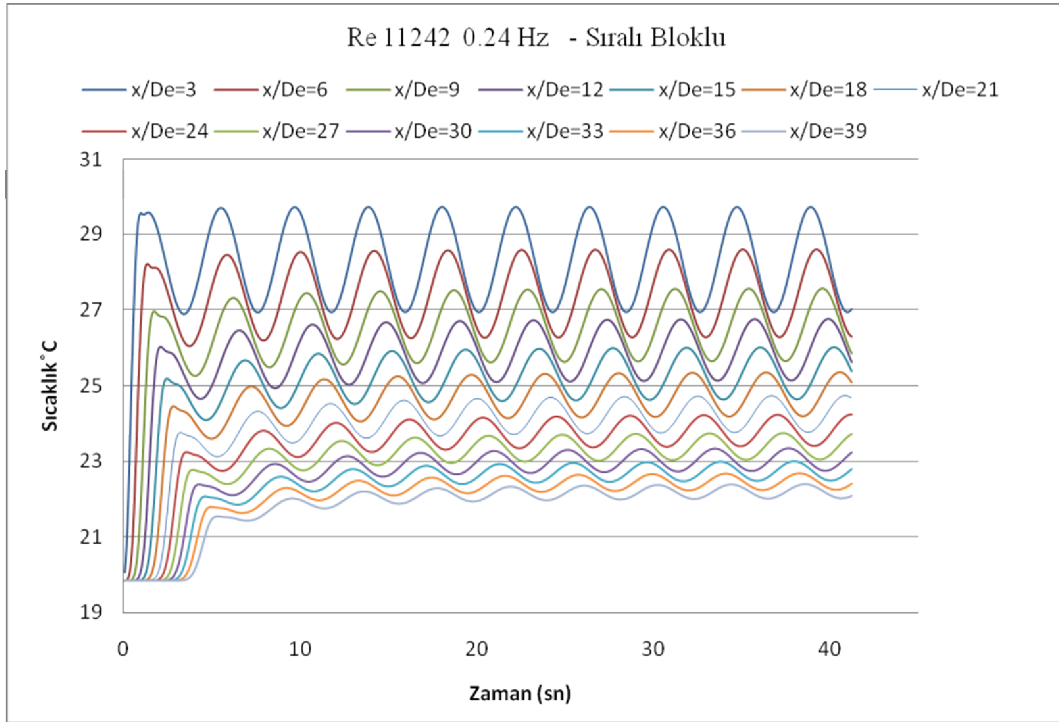
Şekil 4.77. Laminer termal giriş bölgesinde blocsuz kanal boyunca, $Re \approx 2225$ ve $\beta=0.24$ Hz giriş frekansında x eksenine doğrultusunda değişik x/D_e değerlerinde kanal giriş sıcaklığının zamana göre değişimi



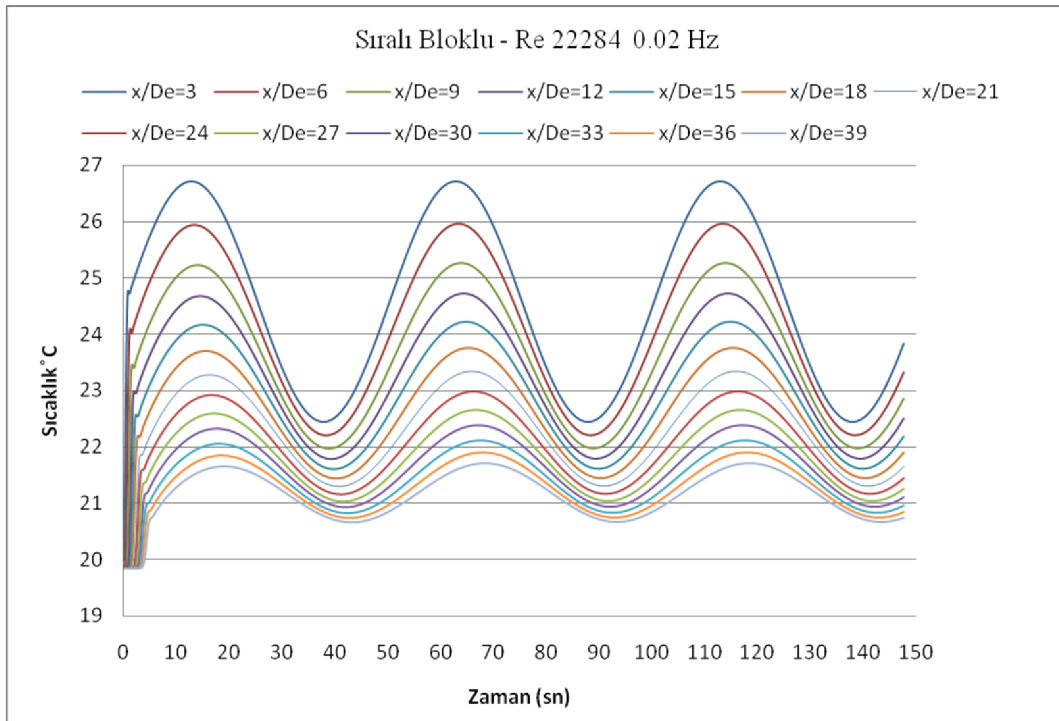
Şekil 4.78. Türbülanslı kombine giriş bölgesinde sıralı bloklı kanal boyunca, $Re \approx 11242$ ve $\beta=0.02$ Hz giriş frekansında x eksenı doğrultusunda değişik x/D_e değerlerinde kanal giriş sıcaklığının zamana göre değişimi



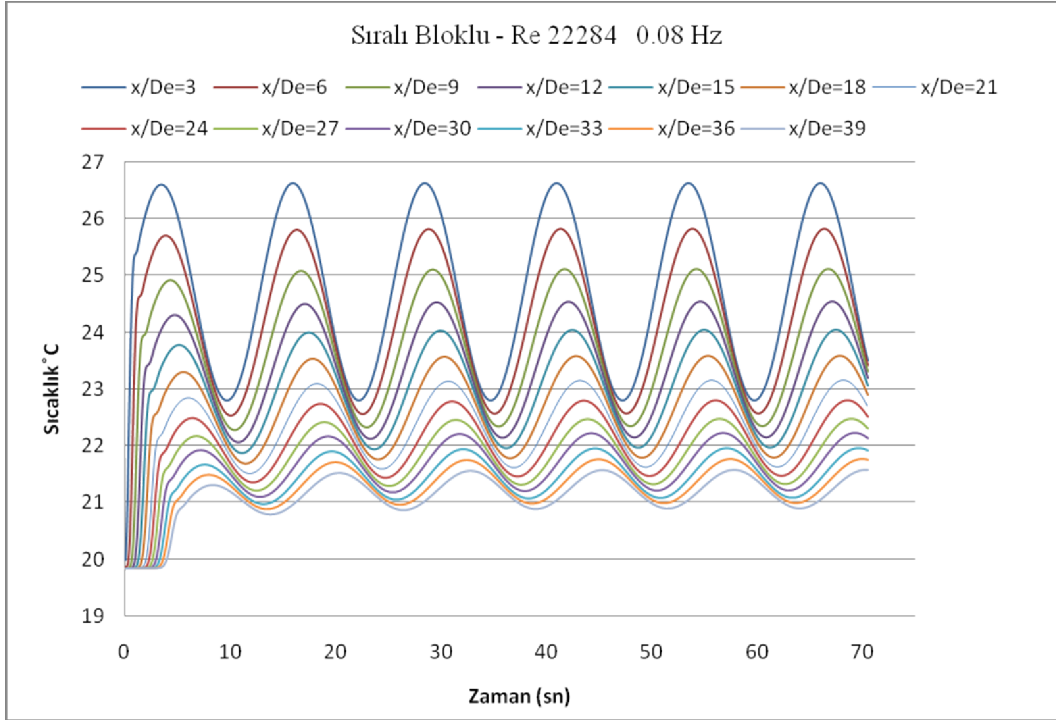
Şekil 4.79. Türbülanslı kombine giriş bölgesinde sıralı bloklı kanal boyunca, $Re \approx 11242$ ve $\beta=0.08$ Hz giriş frekansında x eksenı doğrultusunda değişik x/D_e değerlerinde kanal giriş sıcaklığının zamana göre değişimi



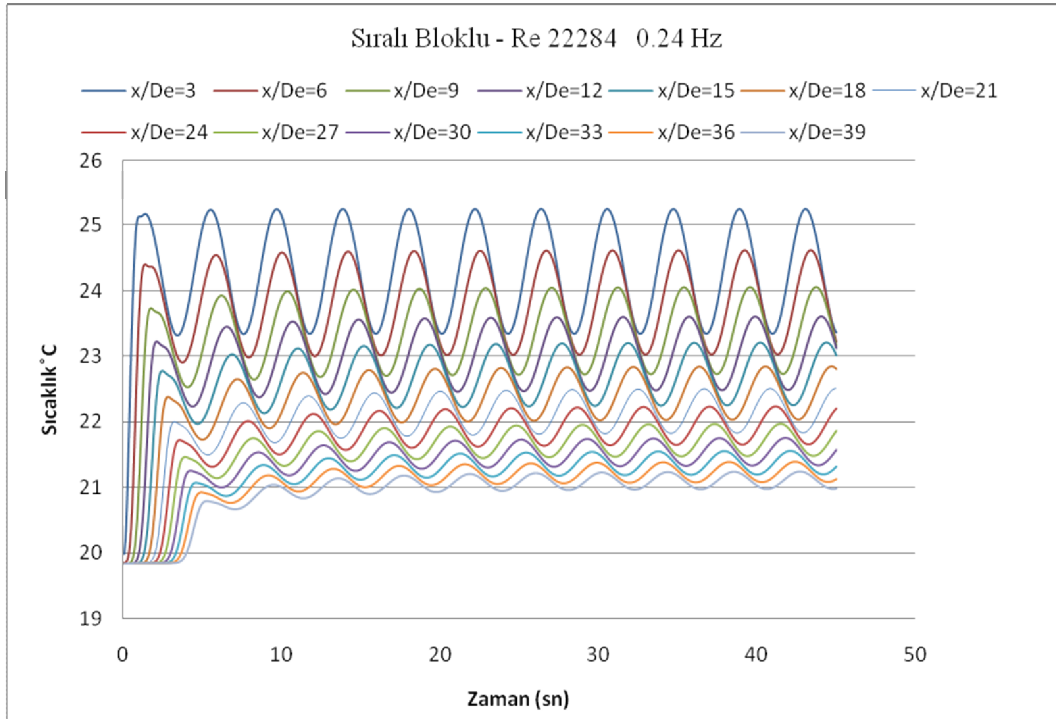
Şekil 4.80. Türbülanslı kombine giriş bölgesinde sıralı bloklu kanal boyunca, $Re \approx 11242$ ve $\beta=0.24$ Hz giriş frekansında x eksenı doğrultusunda değişik x/D_e değerlerinde kanal giriş sıcaklığının zamana göre değişimi



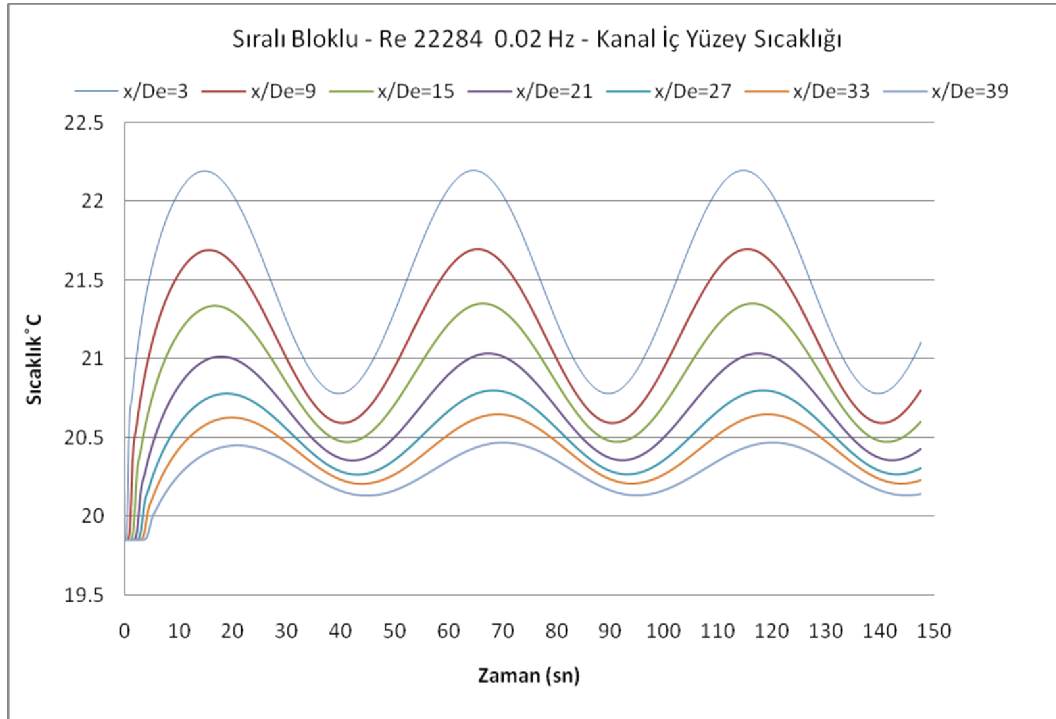
Şekil 4.81. Türbülanslı kombine giriş bölgesinde sıralı bloklu kanal boyunca, $Re \approx 22284$ ve $\beta=0.02$ Hz giriş frekansında x eksenı doğrultusunda değişik x/D_e değerlerinde kanal giriş sıcaklığının zamana göre değişimi



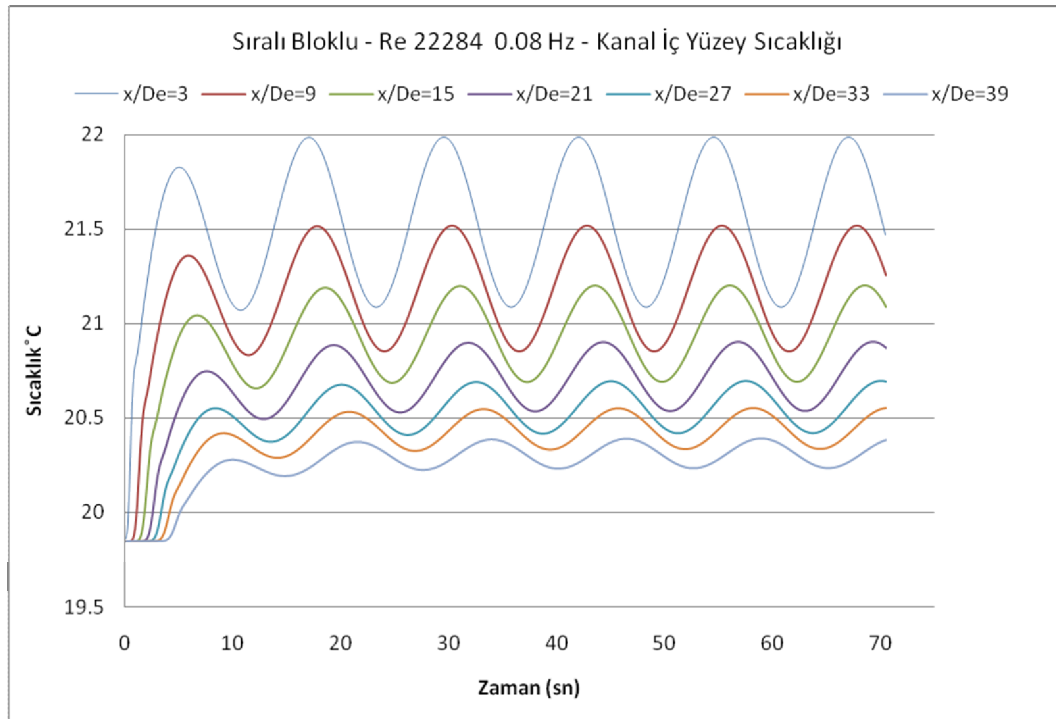
Şekil 4.82. Türbülanslı kombine giriş bölgesinde sıralı bloklu kanal boyunca, $Re \approx 22284$ ve $\beta=0.08$ Hz giriş frekansında x eksenine doğrultusunda değişik x/D_e değerlerinde kanal giriş sıcaklığının zamana göre değişimi



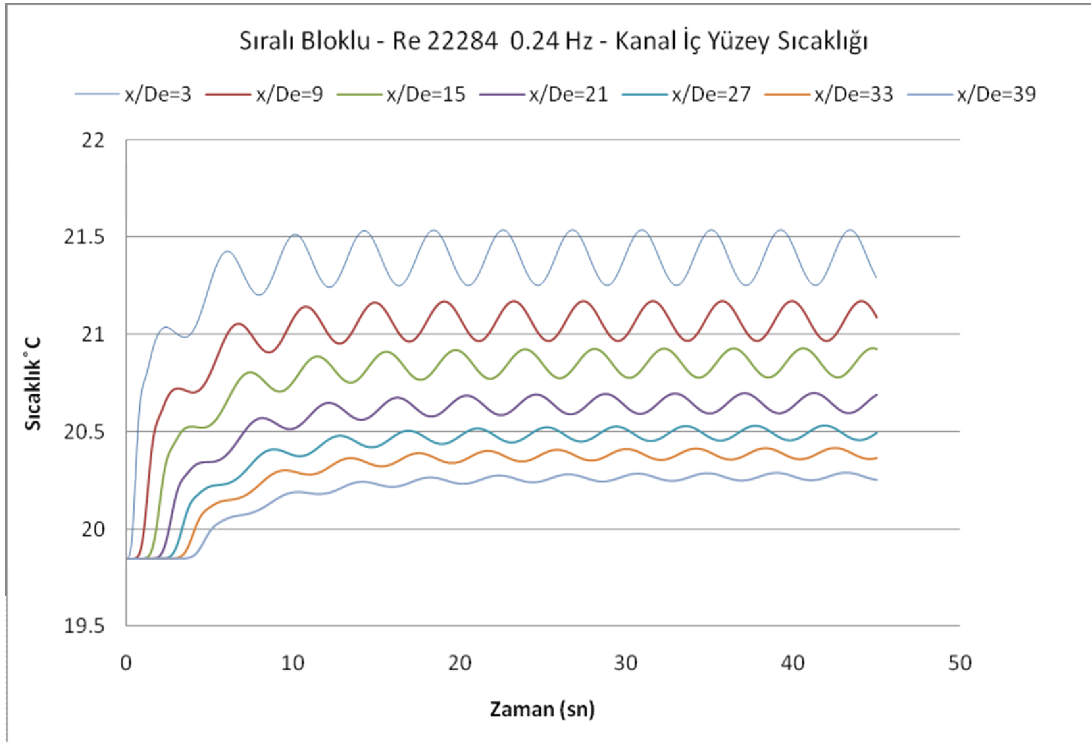
Şekil 4.83. Türbülanslı kombine giriş bölgesinde sıralı bloklu kanal boyunca, $Re \approx 22284$ ve $\beta=0.24$ Hz giriş frekansında x eksenine doğrultusunda değişik x/D_e değerlerinde kanal giriş sıcaklığının zamana göre değişimi



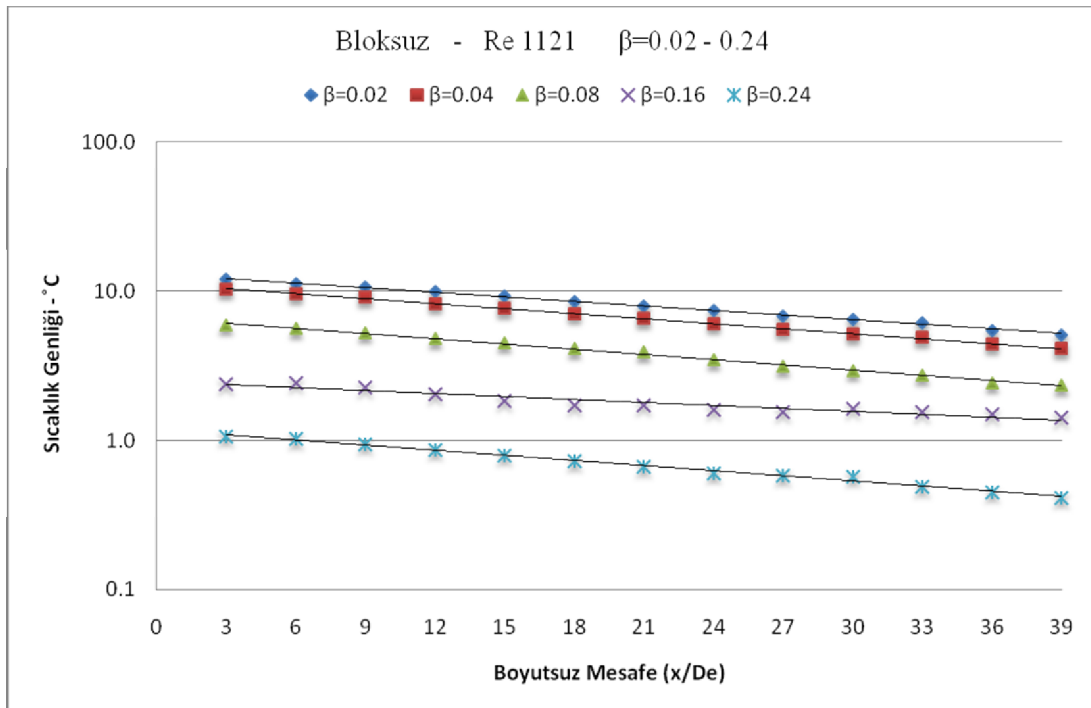
Şekil 4.84. Türbölanslı kombine giriş bölgesinde sıralı bloklı kanal boyunca, $Re \approx 22284$ ve $\beta=0.02$ Hz giriş frekansında y eksenini doğrultusunda değişik x/D_e değerlerinde kanal iç yüzey sıcaklığının zamana göre değişimi



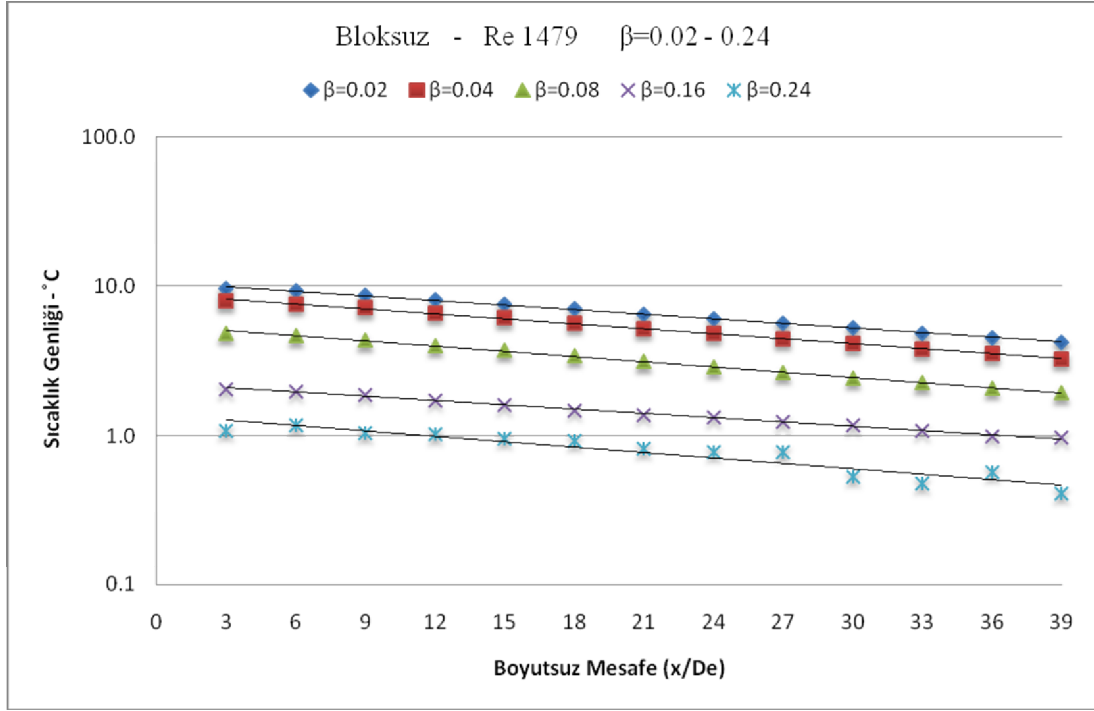
Şekil 4.85. Türbölanslı kombine giriş bölgesinde sıralı bloklı kanal boyunca, $Re \approx 22284$ ve $\beta=0.08$ Hz giriş frekansında y eksenini doğrultusunda değişik x/D_e değerlerinde kanal iç yüzey sıcaklığının zamana göre değişimi



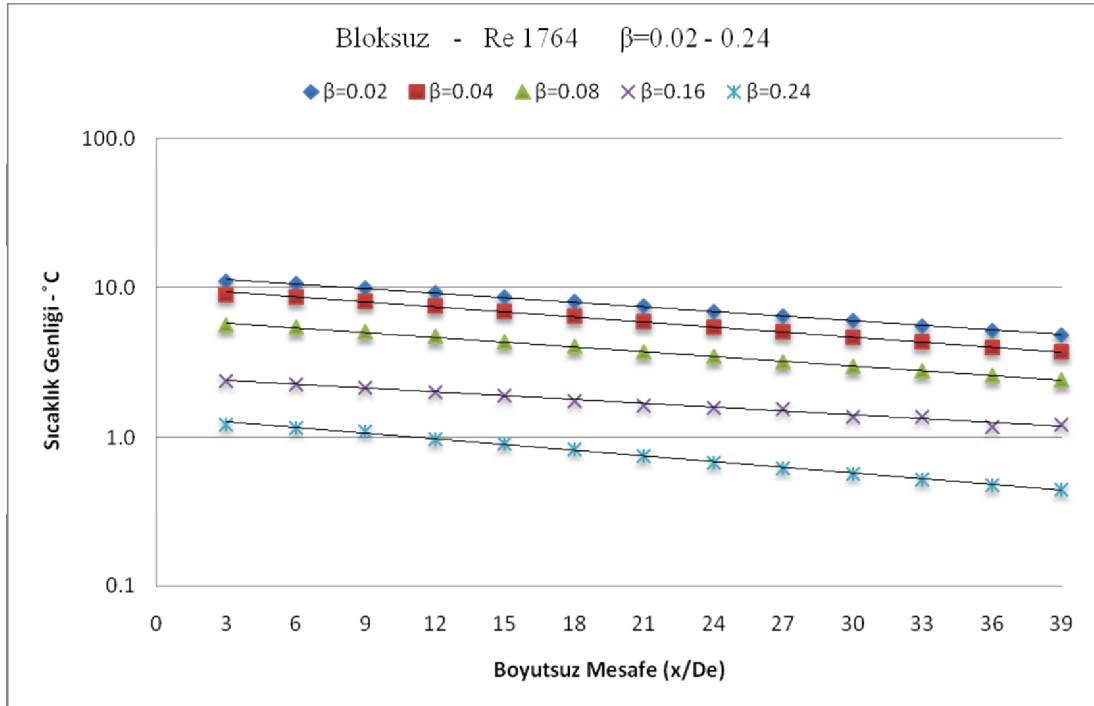
Şekil 4.86. Türbülanslı kombine giriş bölgesinde sıralı bloklı kanal boyunca, $Re \approx 22284$ ve $\beta=0.24$ Hz giriş frekansında y eksenı doğrultusunda değişik x/D_e değerlerinde kanal iç yüzey sıcaklığının zamana göre değişimi



Şekil 4.87. Laminer termal giriş bölgesinde bloksuz kanal boyunca, $Re \approx 1121$ ve $\beta=0.02 - 0.24$ Hz aralığındaki giriş frekanslarında x eksenı doğrultusunda değişik x/D_e değerleri için sıcaklık genliğinin değişimi

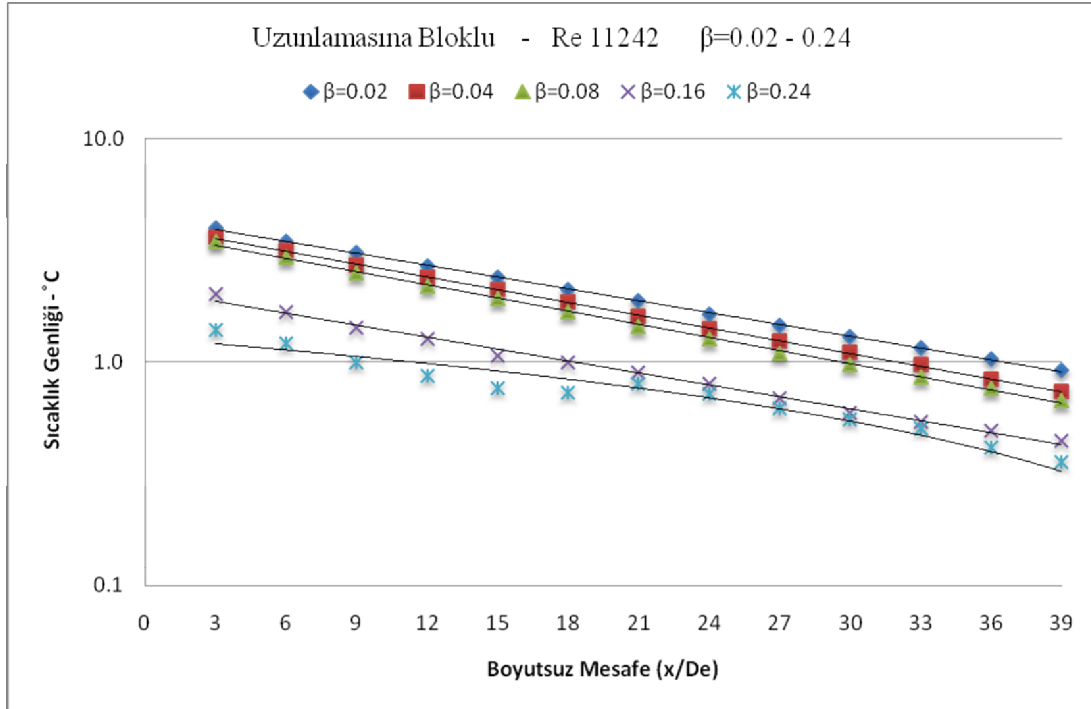


Şekil 4.88. Laminer termal giriş bölgesinde bloksuz kanal boyunca, $Re \approx 1479$ ve $\beta=0.02 - 0.24$ Hz aralığındaki giriş frekanslarında x eksenini doğrultusunda değişik x/D_e değerleri için sıcaklık genliğinin değişimi

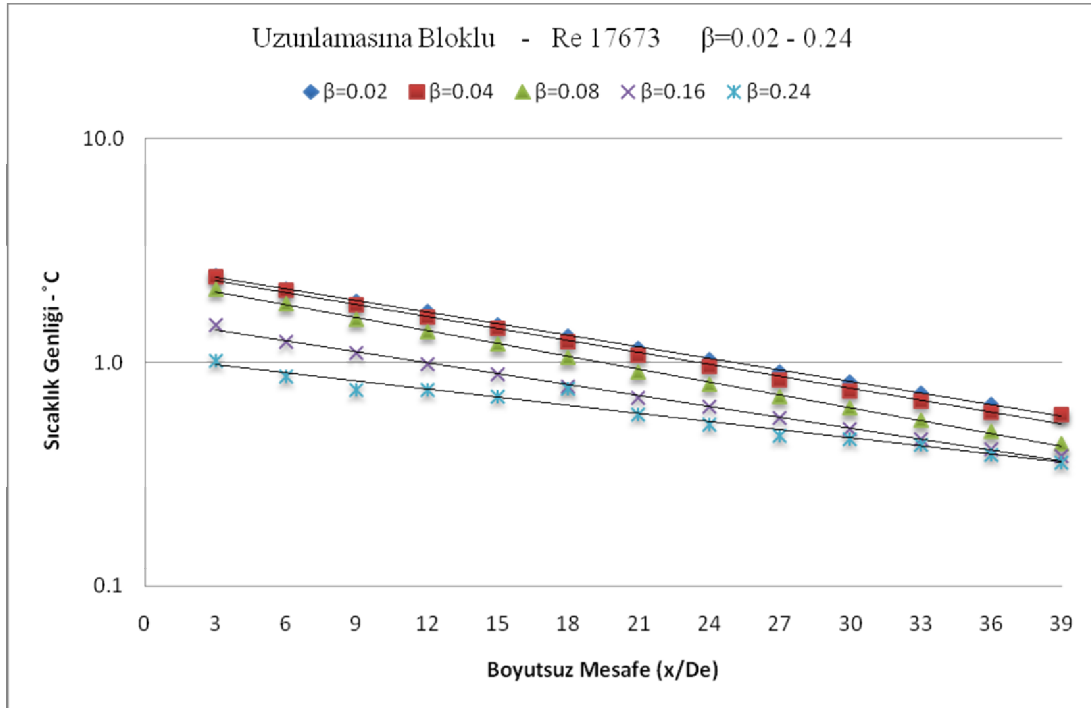


Şekil 4.89. Laminer termal giriş bölgesinde bloksuz kanal boyunca, $Re \approx 1764$ ve $\beta=0.02 - 0.24$ Hz aralığındaki giriş frekanslarında x eksenini doğrultusunda değişik x/D_e değerleri için sıcaklık genliğinin değişimi

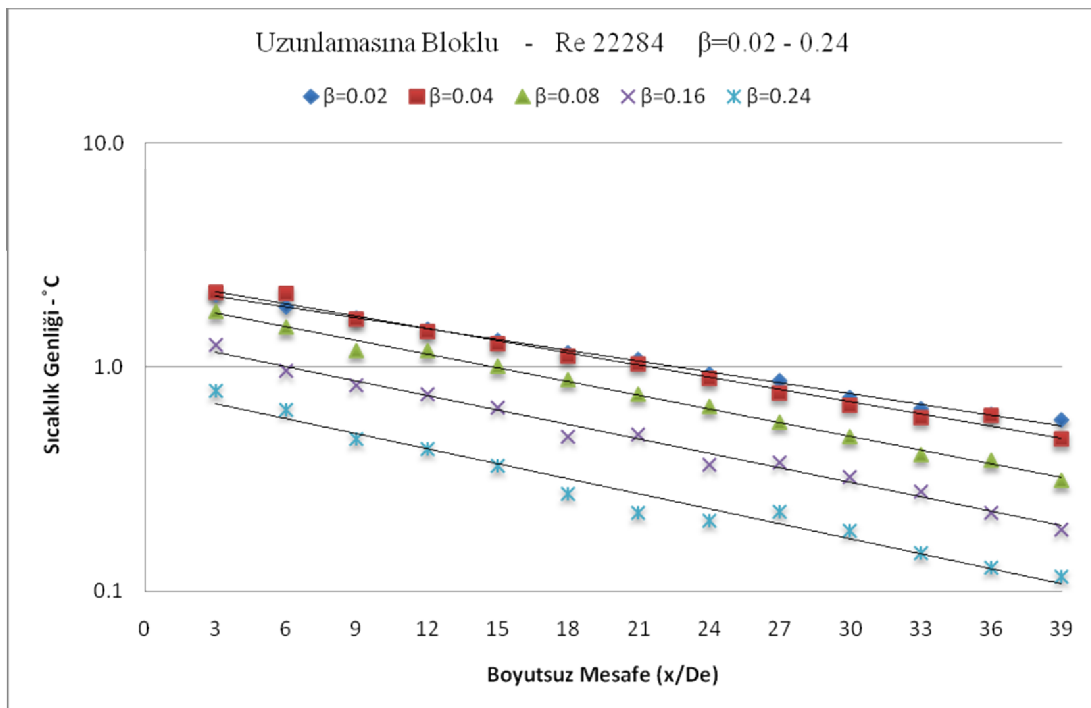
Şekil 4.90. Laminer termal giriş bölgesinde bloksuz kanal boyunca, $Re \approx 2225$ ve $\beta=0.02 - 0.24$ Hz aralığındaki giriş frekanslarında x eksenini doğrultusunda değişik x/D_e değerleri için sıcaklık genliğinin değişimi



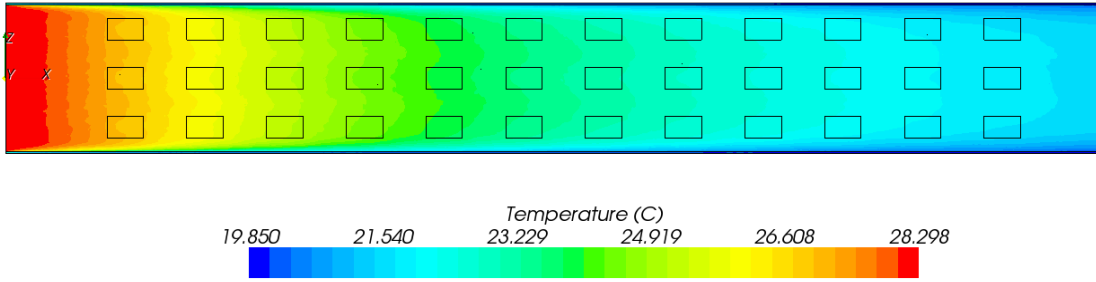
Şekil 4.91. Türbülanslı kombine giriş bölgesinde sıralı bloksuz kanal boyunca, $Re \approx 11242$ ve $\beta=0.02 - 0.24$ Hz aralığındaki giriş frekanslarında x eksenini doğrultusunda değişik x/D_e değerleri için sıcaklık genliğinin değişimi



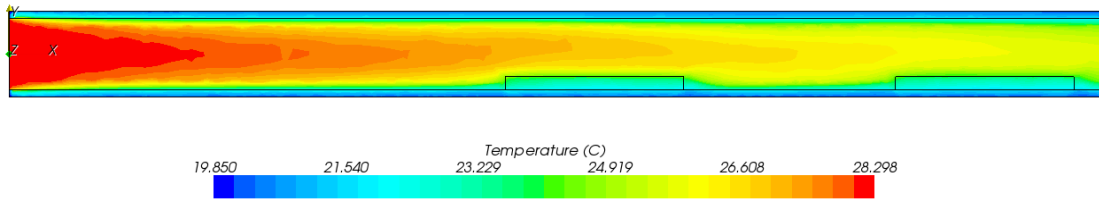
Şekil 4.92. Türbülanslı kombine giriş bölgesinde sıralı bloklu kanal boyunca, $Re \approx 17673$ ve $\beta=0.02 - 0.24$ Hz aralığındaki giriş frekanslarında x eksenine doğrultusunda değişik x/D_e değerleri için sıcaklık genliğinin değişimi



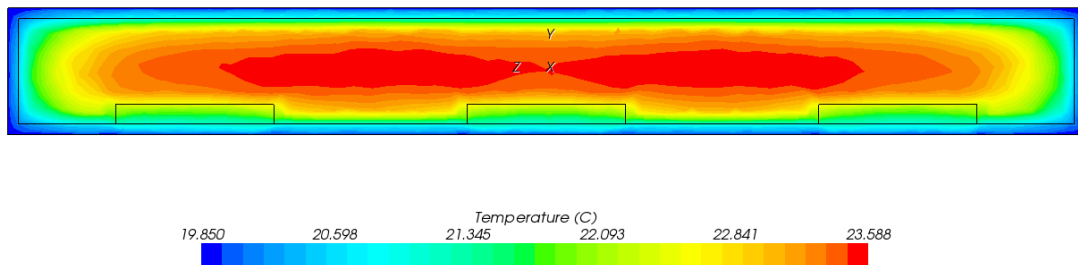
Şekil 4.93. Türbülanslı kombine giriş bölgesinde sıralı bloklu kanal boyunca, $Re \approx 22284$ ve $\beta=0.02 - 0.24$ Hz aralığındaki giriş frekanslarında x eksenine doğrultusunda değişik x/D_e değerleri için sıcaklık genliğinin değişimi



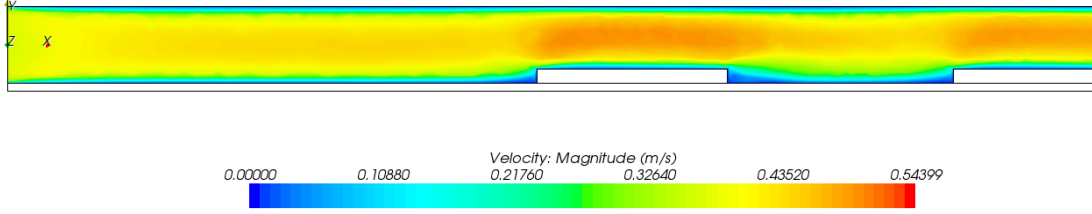
Şekil 4.94. Uzunlamasına bloklı kanalda $Re = 11242$ $\beta = 0.04$ Hz için x-z düzleminde sıcaklık dağılımı



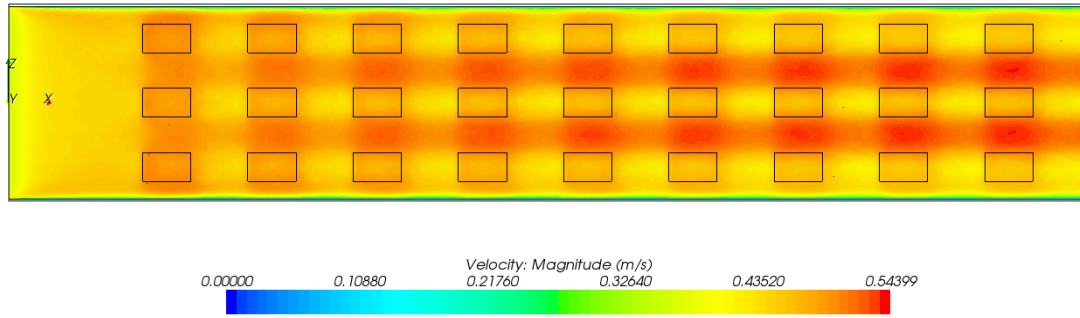
Şekil 4.95. Uzunlamasına bloklı kanalda $Re = 11242$ $\beta = 0.04$ Hz için x-y düzleminde sıcaklık dağılımı



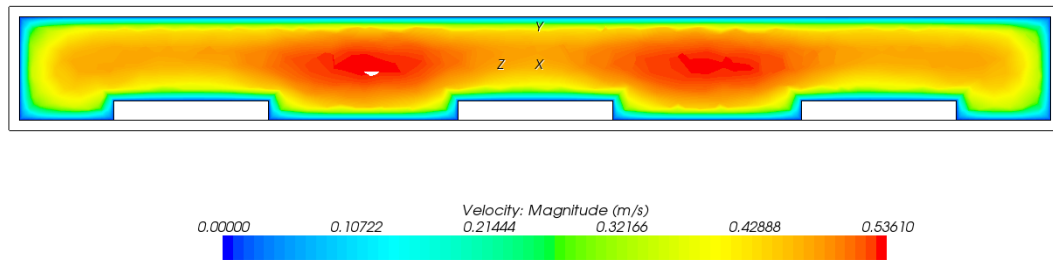
Şekil 4.96. Uzunlamasına bloklı kanalda $Re = 11242$ $\beta = 0.04$ Hz için y-z düzleminde sıcaklık dağılımı



Şekil 4.97. Uzunlamasına bloklı kanalda $Re = 11242$ $\beta = 0.04$ Hz için x-y düzleminde hız dağılımı



Şekil 4.98. Uzunlamasına bloklı kanalda $Re = 11242$ $\beta = 0.04$ Hz için x-z düzleminde hız dağılımı



Şekil 4.99. Uzunlamasına bloklı kanalda $Re = 11242$ $\beta = 0.04$ Hz için y-z düzleminde hız dağılımı

BÖLÜM 5. TARTIŞMA VE ÖNERİLER

Dikdörtgen kesitli kanalda zamanla değişen giriş sıcaklığından dolayı daimi olmayan zorlanmış taşınım problemi, bir HAD yazılımı olan Star-CCM+ ile bloksuz ve uzunlamasına bloklu kanal için sayısal olarak incelenmiştir. Çalışmalar, laminar ve türbülanslı akış için termal ve kombine giriş bölgelerinde yapılmıştır. Hesaplamalar ile literatürdeki [14] deneysel sonuçlar karşılaştırıldığında, maksimum bağıl hata oranı % 20 olarak tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçları şu şekilde özetlemek mümkündür..

1. Kanal boyunca sıcaklık salınımları girişteki ile aynı frekansa sahiptir. Genel olarak zamana bağlı sıcaklık dağılımı, giriş frekansının (β), Reynolds sayısının (Re) ve akışkandan duvara termal kapasitans oranının $[a^* = (\rho.C_p)_f d / (\rho.c)_w L]$ bir fonksiyonudur.
2. Mevcut model ve hesaplama yöntemi, kanal içindeki sıcaklık dağılımını ve laminar ile türbülanslı termal giriş bölgesinde kanal boyunca zamana bağlı olarak değişen giriş sıcaklığı değişimini kabul edilebilir sınırlar dahilinde tahmin edebilmektedir.
3. Verilen bir giriş frekansında (β), sıcaklık genliğinin değeri Reynolds sayısına bağlıdır. Reynolds sayısı arttığında, sıcaklık genliğinin eğimi (α) azalmaktadır.
4. Herhangi bir Reynolds değeri için, sıcaklık genliğinin değeri giriş sıcaklık frekansına bağlıdır. Giriş frekansı (β) arttıkça, sıcaklık genliğinin eğimi (α) artmaktadır. Öyleyse, giriş frekansı arttıkça, giriş sıcaklığının genliği kanal boyunca daha hızlı düşmektedir.

5. Duvar sıcaklığındaki değişimler de Reynolds sayısının ve giriş frekansının fonksiyonu olarak görülmektedir. Reynolds sayısı arttıkça, herhangi bir noktadaki (x/D_e) duvar sıcaklığı azalmaktadır. Giriş frekansı arttığında da duvar sıcaklık genliği azalmaktadır. Dolayısı ile, kanal eksenine boyunca meydana gelen sıcaklık değişimleri ile aynı davranış özelliklerine sahiptir. $\beta > 0.08$ Hz değerinde ise duvar sıcaklığı sabit kalmaktadır.
6. Bloklu kanaldaki sıcaklık genliğinin eğimi (α) bloksuz kanala göre daha fazladır. Bu ise, bloklu kanalda artırılmış yüzeyden dolayı ısı transferinin daha fazla olmasıdır.
7. Kanal boyunca maksimum duvar sıcaklığı doğrusal olarak azalmakta, minimum sıcaklık ise doğrusal olarak artmaktadır.
8. Giriş sıcaklığının genliği kanal girişinde parabolik olarak değişmektedir.
9. Sayısal çalışmadaki bazı mutlak hata değerlerinin yüksek olması, ağ yapısının sınır tabaka bölgesinde yeniden belirlenmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

Bu tezde söz konusu edilmeyen bazı fiziksel büyüklükler, sayısal modelin sonuçları üzerinden elde edilebilmektedir. Deneysel çalışmada sıcaklıkların ölçüldüğü termo eleman çiftlerinin yeri, sayısal modelde kısa sürede değiştirilebilmektedir. Ayrıca, istenen koordinatlardaki değerler sayısal modelden alınabilmektedir.

5.1. Öneriler

Kanal içindeki blokların değişik konfigürasyonları için sayısal çözüm yapıp, optimizasyon yazılımları ile en iyi çözüme ulaşılabilir.

Elektronik devre elemanlarının soğutulmasında akışkan olarak hava yerine suyun kullanılması konusundaki çalışmaların gelecekte önemli yere sahip olacağı görülmektedir. Bu alanda sayısal çalışmalar yapılması diğer bir çalışma alanı olarak önerilebilir.

KAYNAKLAR

- [1] ETEMOĞLU, A.B., İŞMAN, M.K., PULAT, E., CAN, M., “Tek Yongalı Elektronik Cihazların Laminer ve Türbülanslı Akışta Soğutulmalarının Analizi”, Mühendis ve Makina, Cilt: 45, Sayı: 535, pp.18-28, 2004.
- [2] LI, W., Experimental and Theoretical Investigation of Unsteady Forced Convection in Ducts, Doktora Tezi, Miami Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümü, 1990.
- [3] SÖZBİR, N., EKMEKÇİ, İ., SARAÇ, H.İ., ÇALLI, İ., “Elektronik Sistemlerin Isı Taşımını İle Soğutulması”, ULIBTK 97, 11.Ulusal Isı Bilimi ve Tekniği Kongresi, Edirne, pp.546-555, 1997.
- [4] ÇOBAN, M., Bir Kanaldaki Tek Fazlı Zorlanmış Isı Taşımının Nümerik İncelenmesi, Doktora Tezi, SAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, SF.7, 2001.
- [5] STEINBERG, D.S., Cooling Techniques for Electronic Equipment, John Willey, New York, 1980.
- [6] KRAUS, A.D., BAR-COHEN, A., Thermal Analysis and Control of Electronic Equipment, Hemisphere, New York, 1983.
- [7] JALURIA, Y., Natural Convective Cooling of Electronic Equipment in Natural Convection, Editors KAKAÇ, S., AUNG, W., VISKANTA, R., Hemisphere, New York, 1985.
- [8] CHU, R.C., Heat Transfer in Electronic System, Proceedings of the 8th International Heat Transfer Conference, 1, 293, 1986.
- [9] INCROPERA, F.P., Research Needs in Electronic Cooling, Proceedings of a Workshop Sponsored by NSF and Purdue University, Andover, Massachutes, June 4-6, 1986.
- [10] AUNG, W., Modern Developments in Cooling Technology for Electronic Equipment, Hemisphere, New York, 1988.
- [11] KAKAÇ, S., LI, W., Unsteady Turbulent Forced Convection in a Parallel-Plate with Timewise Variation of Inlet Temperature, International Journal of Heat and Mass Transfer, 37 (1), 447-456, 1990

- [12] BROWN, D.M., LI, W., KAKAÇ, S., Numerical and Experimental Analysis of Unsteady Heat Transfer Periodic Variation of Inlet Temperature in Circular Ducts, *International Communication Heat and Mass Transfer*, 20 (6), pp.883-899, 1993.
- [13] PAULIKAKOS, D., WIETRZAK, A., Cooling of Microelectronic Systems by Turbulent Forced Convection, *Cooling of Electronic Systems* (Editors S. Kakaç, H. Yüncü, K. Hijikata), NATO-ASI Series, Serie E, Applied Sciences, Kluwer Academic Publishers, 203-224, 1994.
- [14] SÖZBİR, N., Kanallarda Tek Fazlı Cebri Konveksiyonun Deneysel ve Nümerik İncelenmesi, Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 1995.
- [15] IGARASHI, T., TAKASAKI, H., Fluid Flow and Heat Transfer Around a Rectangular Block Fixed on a Flat Plate Laminar Boundary Layer, *Proceedings of the ASME/JSME Thermal Engineering*, No: H0933A, pp.295-302, 1995.
- [16] ARIK, M., SANTOS, C.AC., KAKAÇ, S., “Turbulent Forced Convection with Sinusoidal Variation of Inlet Temperature Between Two Parallel-Plates”, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 23: (8), pp.1121-1132, 1996.
- [17] UYSAL, Ü., Dikdörtgen Kesitli Kanallarda Daimi Olmayan Zorunlu Konveksiyonun Nümerik Modellenmesi, Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 1996.
- [18] CHEROTO, S., SANTOS, C.A.C, KAKAÇ, S., “Hybrid-Analytical Investigation of Unsteady Forced Convection in Parallel-Plate Channels for Thermally Developing Flow”, *Heat and Mass Transfer*, 32: (5), pp.317-324, 1997.
- [19] BROWN, D.M., SANTOS, C.AC., COTTA, R.M., KAKAÇ, S., “Analysis of Steady Forced Convection in Thermally Developing Turbulent Duct Flows”, *International Journal of Numerical Methods for Heat and Fluid Flow*, 7: (5-6), pp.425-432, 1997.
- [20] TRAVELHO, J.S., SANTOS, W.F.N., “Unsteady Conjugate Heat Transfer in a Circular Duct with Convection from the Ambient and Periodically Varying Inlet Temperature”, *Journal of Heat Transfer-Transactions of the ASME*, 120: (2), pp.506-510, 1998.
- [21] LEUNG, C.W., KANG, H.J., “Convective Heat Transfer from Simulated Air-Cooled Printed-Circuit Board Assembly on Horizontal or Vertical Orientation”, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 25: (1), pp.67-80, 1998.

- [22] PIMENTEL, L.C.G., COTTA, R.M., KAKAÇ, S., “Fully Developed Turbulent Flow in Ducts with Symmetric and Asymmetric Rough Walls”, *Chemical Engineering Journal*, 74: (3), pp.147-153, 1999.
- [23] LEUNG, C.W., KANG, H.J., PROBERT, S.D., “Horizontal Simulated Printed-Circuit Board Assembly in Fully-Developed Laminar-Flow Convection”, *Applied Energy*, 56: (1), pp.71-91, 1997.
- [24] KIM, S.Y., KANG, B.H., “Forced Convection Heat Transfer from Two Heated Blocks in Pulsating Channel Flow”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 41: (3), pp.625-634, 1998.
- [25] LIU, Y., PHAN-THIEN, N., LEUNG, C.W., CHAN, T.L., “An Optimum Spacing Problem for Five Chips on a Horizontal Substrate in a Vertically Insulated Enclosure”, *Computational Mechanics*, 24: (4), pp.310-317, 1999.
- [26] CHEROTO, S., MIKHAILOV, M.D., KAKAÇ, S., COTTA, R.M., *Periodic Laminar Forced Convection: Solution via Symbolic Computation and Integral Transforms*, *International Journal of Thermal Sciences*, 38: (7), pp.613-621, 1999.
- [27] NAKAGAWA, S., SENDA, M., HIRAIDE, A., KIKKAWA, S., *Heat Transfer Characteristics in a Channel Flow with a Rectangular Cylinder*, *JSME Int. J. Ser. B* 42, pp. 188–196, 1999.
- [28] LEUNG C.W., CHEN, S., CHAN, T.L., “Numerical Simulation of Laminar Forced Convection in an Air-Cooled Horizontal Printed Circuit Board Assembly”, *Numerical Heat Transfer Part A-Applications*, 37: (4), pp.373-393, 2000.
- [29] SULTAN, G.I., “Enhancing Forced Convection Heat Transfer from Multiple Protruding Heat Sources Simulating Electronic Components in a Horizontal Channel by Passive Cooling”, *Microelectronics Journal*, 31: (9-10), pp.773-779, 2000.
- [30] SEZAI, I., MOHAMAD, A.A., “Natural Convection from a Discrete Heat Source on the Bottom of a Horizontal Enclosure”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 43: (13), pp.2257-2266, 2000
- [31] NAKAMURA, H., IGARASHI, T., TSUTSUI, T., “Local Heat Transfer Around a Wall-Mounted Cube in the Turbulent Boundary Layer”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 44, pp.3385-3395, 2001.
- [32] ZHAO, C.Y., LU, T.J., “Analysis of Microchannel Heat Sinks for Electronics Cooling”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 45, 4857-4869, 2002.

- [33] LIU, G.R., ZHOU, J.J., WANG, J.G., “Coefficients Identification in Electronic System Cooling Simulation Through Genetic Algorithm”, *Computers and Structures*, 80, pp.23-30, 2002.
- [34] VALENCIA, A., CID, M., Turbulent Unsteady Flow and Heat Transfer in Channels with Periodically Mounted Square Bars, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 45, pp.1661-1673, 2002.
- [35] MEINDERS, E.R., HANJALIC, K., “Experimental Heat Transfer from In-line and Staggered Configurations of Two Wall-Mounted Cubes”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 45, pp.465-482, 2002.
- [36] EVELOY, V., RODGERS, P., HASHIMI, M.S.H., Numerical Prediction of Electronic Component Heat Transfer: An Industry Perspective, 19th Annual IEEE Semiconductor Thermal Measurement and management Symposium, San Jose, CA, pp.14-26, 2003.
- [37] SILVA, A.K., LORENTE, S., BEJAN, A., “Optimal Distribution of Discrete Heat Sources on a Plate with Laminar Forced Convection”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 47, pp.2139-2148, 2004.
- [38] RODGERS, P., EVELOY, V., CFD Prediction of Electronic Component Operational Temperature on PCBs, *Electronics Cooling*, Vol.10, pp.22-28, 2004.
- [39] BAŞKAYA, S., ERTURHAN, U., SİVRİOĞLU, M., “An Experimental Study on Convection Heat Transfer from an Array of Discrete Heat Sources”, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 32: (1-2), pp.248-257, 2005.
- [40] TAO, W.Q., HE, Y.L., LI, Z.Y., QU, Z.G., “Some Recent Advances in Finite Volume Approach and Their Applications in the Study of Heat Transfer Enhancement”, *International Journal of Thermal Sciences*, 44, pp.623-643, 2005.
- [41] KORICHI, A., OUFER, L., “Numerical Heat Transfer in a Rectangular Channel with Mounted Obstacles on Upper and Lower Walls, *International Journal of Thermal Sciences*, 44, pp.644-655, 2005.
- [42] RODGERS, P., EVELOY, V., An Investigation into the Potential of Low-Reynolds Number Eddy Viscosity Turbulent Flow Models to Predict Electronic Component Operational Temperature, *Transactions of the ASME, Journal of Electronic Packaging*, Vol. 127, Issue 1, pp. 67-75, 2005.
- [43] MOON, J.W., KIM, S.Y., CHO, H.H., “Frequency-Dependent Heat Transfer Enhancement from Rectangular Heated Block Array in a Pulsating Channel Flow”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 48, pp.4904-4913, 2005.

- [44] EVELOY, V., RODGERS, P., Prediction of Electronic Component-Board Transient Conjugate Heat Transfer, *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, Vol. 28, No.4, 2005.
- [45] EVELOY, V., RODGERS, P., Numerical Heat Transfer Predictive Accuracy for an In-Line Array of Board-Mounted PQFP Components in Free Convection, *Transactions of the ASME, Journal of Electronic Packaging*, Vol. 127, pp.245-254, 2005.
- [46] DOĞAN, A., SİVRİOĞLU, M., BAŞKAYA, S., “Investigation of Mixed Convection Heat Transfer in a Horizontal Channel with Discrete Heat Sources at the Top and at the Bottom”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 49, pp.2652-2662, 2006.
- [47] PERNG, S.W., WU, H.W., Numerical Investigation of Mixed Convective Heat Transfer for Unsteady Turbulent Flow over Heated Blocks in a Horizontal Channel, *International Journal of Thermal Sciences*, 47, pp.620-632, 2008.
- [48] OZTURK, E., TARI, I., Forced Air Cooling of CPUs with Heat Sinks: A Numerical Study, *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, Vol. 31, No. 3, pp.650-660, 2008.
- [49] VASTA, V.N., WEDAN, B.W, Parallelization of a Multiblock Flow Code: An Engineering Implementation, *Computers and Fluids*, 28, pp.603-614, 1999.
- [50] YILMAZ, İ., ÖZTOP, H.F., Turbulence Forced Convection Heat Transfer Over Double Forward Facing Step Flow, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 33, pp.508-517, 2006.
- [51] TALUKDAR, P., ISKRA, C.R., SIMONSON, C.J., Combined Heat and Mass Transfer for Laminar Flow of Moist Air in a 3D Rectangular Duct: CFD Simulation and Validation with Experimental Data, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 51, pp.3091-3102, 2008.
- [52] ESMAEILZADEH, E., ALAMGHOLILOU, A., MIRZAIE, H., Numerical Investigation on Heat Transfer Enhancement of Traverse Ribs in 3D Turbulent Duct Flow, *Asian Journal of Applied Sciences*, 1 (4): pp.286-303, 2008.
- [53] JOUHARA, H., AXCELL, B.P., Modeling and Simulation Techniques for Forced Convection Heat Transfer in Heat Sinks with Rectangular Fins, *Simulation Modeling Practice and Theory*, 17, pp.871-882, 2009.
- [54] DUPLAIN, E., BALIGA, B.R., Computational Optimization of the Thermal Performance of Internally Finned Ducts, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 52, pp.3929-3942, 2009.

- [55] ONUR, N., TURGUT, O., ARSLAN, K., KURTUL, Ö., An Experimental and Three-dimensional Numerical Study on the Convective Heat Transfer Inside a Trapezoidal Duct Under Constant Wall Temperature, *Heat Mass Transfer*, 45: pp.263–274, 2009.
- [56] SHIH, T.H., LIOU, W.W., SHABBIR, A., YANG, Z., ZHU, J., A New k - ϵ Eddy Viscosity Model for High Reynolds Number Turbulent Flows -- Model Development and Validation, NASA TM 106721, 1994.
- [57] RODI, W., Experience with Two-Layer Models Combining the k - ϵ Model with a One-Equation Model Near the Wall, 29th Aerospace Sciences Meeting, January 7-10, Reno, NV, AIAA 91-0216, 1991.
- [58] BHATTI, M.S., SHAH, R.K., Turbulent and Transition Flow Convective Heat Transfer in Ducts, *Handbook of Single-Phase Convective Heat Transfer*, Edited by KAKAÇ, S., SHAH, R.M, AUNG, W., John Wiley, New York, 1997.
- [59] DEMIRDZIC, I., LILEK, Z., PERIC, M., A collocated finite volume method for predicting flows at all speeds, *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 16, pp. 1029-1050, 1993.
- [60] DEMIRDZIC, I., MUSAFERIJA, S., Numerical method for coupled fluid flow, heat transfer and stress analysis using unstructured moving meshes with cells of arbitrary topology, *Computational Methods Applied Mechanical Engineering*, pp. 1-21, 1995.
- [61] FERZIGER, J.H., PERIC, M., *Computational Methods for Fluid Dynamics*, 3rd rev. ed., Springer-Verlag, Berlin, 2002.
- [62] PERIC, M., KRESSLER, R., SCHEUERER, G., Comparison of finite-volume numerical methods with staggered and collocated grids, *Computer and Fluids*, 16 (4), pp. 389-403, 1988.
- [63] MATHUR, S.R., MURTHY, J.Y., Pressure-based method for unstructured meshes, *Numerical Heat Transfer, Part B: Fundamentals*, 31(2), pp. 195-214, 1997.
- [64] MATHUR, S.R., MURTHY, J.Y., Pressure boundary conditions for incompressible flow using unstructured meshes, *Numerical Heat Transfer, Part B: Fundamentals*, 32(3), pp. 283-298, 1997.
- [65] STAR-CCM+ 3.02.006 User Manual, 2007.
- [66] DAL, A.R., Kombilerde Kullanılan Isı Değiştiricisi Farklı Kanatçık Geometrilerinin Kombi Verimine Etkisinin Sayısal Analizi, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2007.

ÖZGEÇMİŞ

Kadir İSA, 1962 yılında İstanbul'da doğdu. Haydarpaşa Teknik Lisesi Makina bölümünden mezuniyetinin ardından girdiği Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Makina Eğitimi Bölümü'nden 1985'de lisans derecesini aldı. 1993 yılında İstanbul Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümü'nde yüksek lisansını tamamladı. 1988-1989 yılları arasında YÖK-Dünya Bankası I. Endüstriyel Eğitim Projesi kapsamında İngiltere ve ABD'de öğretim teknikleri ve iklimlendirme-soğutma teknolojisi alanlarında eğitim görmüştür. İ.T.Ü. Sakarya Mühendislik Fakültesi Düzce MYO ve İstanbul Üniversitesi Teknik Bilimler MYO İklimlendirme Soğutma programlarında öğretim görevlisi-program başkanı olarak çalışmıştır. Halen, Sakarya Üniversitesi Akyazı Meslek Yüksekokulu İklimlendirme-Soğutma Programı'nda öğretim görevlisi olarak çalışmaktadır. Türk Isı Bilimi ve Tekniği Derneği (TIBTD), Refrigeration Service Engineers Society (RSES), Council of Air Conditioning and Refrigeration Educators (CARE) üyesidir. Evli ve iki çocuk babasıdır.