

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TEL KANATLI YOĞUŞTURUCULARIN HAVA TARAFI ISIL VE
AKIŞ PERFORMANSININ İNCELENMESİ

Alişan GÖNÜL

DOKTORA TEZİ
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Isı Proses Programı

Danışman
Prof. Dr. Özden AĞRA

Temmuz, 2020

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**TEL KANATLI YOĞUŞTURUCULARIN HAVA TARAFI ISIL VE AKIŞ
PERFORMANSININ İNCELENMESİ**

Alişan GÖNÜL tarafından hazırlanan tez çalışması 03.07.2020 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Isı Proses Programı **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Özden AĞRA
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Özden AĞRA, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. İsmail TEKE, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Seyhan UYGUR ONBAŞIOĞLU, Üye
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Şevket Özgür ATAYILMAZ, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Semiha ÖZTUNA, Üye
Trakya Üniversitesi

Danışmanım Prof. Dr. Özden AĞRA sorumluluğunda tarafımca hazırlanan Tel Kanatlı Yoğuşturucuların Hava Tarafı Isıl ve Akış Performansının İncelenmesi başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Alişan GÖNÜL

Bu alışma, Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Proje Koordinatörlüğü'nün FBA-2017-3063 numaralı araştırma projesi ile desteklenmiştir.

Aileme

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam kapsamında desteklerini esirgemeyen danışman hocam Prof. Dr. Özden AĞRA'ya; tezin şekillenmesinde verdikleri değerli öneriler dolayısıyla başta tez izleme komitesi üye hocalarım Prof. Dr. İsmail TEKE ve Prof. Dr. Seyhan UYGUR ONBAŞIOĞLU olmak üzere Prof. Dr. Ş.Özgür ATAYILMAZ ve Prof. Dr. Hakan DEMİR'e teşekkürlerimi sunarım.

Tez sürecinde çalışmalarına yardımcı olan Dr. Yakup KARAKOYUN, Arş. Gör. Ahmet DOĞAN ve deney tesisatının düzenlenmesinde emeği olan Mak. Müh. Ali DEMİRBAĞ, Mak. Müh. Çağatay BURAN ve teknisyen Ahmet GÜNEY'e, teşekkür ederim.

Hayatımın zorlu her sürecinde desteklerini her daim hissettiğim tüm aileme şükranlarımı sunarım.

Çalışmalarım süresince gösterdiği sabır ve ilgi için eşim Melike' ye ve tez sürecinde aramıza katılıp, enerji kaynağımız olan oğlumuz Ali Özgün'e sevgi ve minnetlerimi sunarım.

Alişan GÖNÜL

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ	viii
KISALTMA LİSTESİ	xii
ŞEKİL LİSTESİ	xiii
TABLO LİSTESİ	xviii
ÖZET	xx
ABSTRACT	xxiii
1 GİRİŞ	1
1.1 Literatür Özeti.....	4
1.1.1 Doğal Taşınım	4
1.1.2 Zorlanmış Taşınım.....	14
1.1.3 Çapraz Akışa Maruz Silindir Çiftlerinin Isı ve Akış Karakteristiği Üzerine Çalışmalar	27
1.1.4 Boru Demetlerinde Isı ve Akış Karakteristiği Üzerine Çalışmalar	36
1.1.5 Isı Değiştirici Uygulamalarında HAD Kullanımı ve Optimizasyon Çalışmaları	42
1.2 Tezin Amacı	47
1.3 Hipotez	48
2 DENEYSEL ÇALIŞMALAR	50
2.1 Deney Düzeneği ve Test Numularının Hazırlık Süreci	50
2.2 Deneyin Yapılışı ve Veri Toplama Sistematiği.....	56
2.3 Kalibrasyonlar ve Belirsizlik Analizi.....	58
2.4 Isı Geçişi ve Basınç Düşümü Hesaplama Metodolojisi.....	63
2.4.1 Işınım Isı Geçiş Hızı Hesaplamaları.....	63
2.4.2 Taşınım Isı Geçiş Hızı Hesaplamaları.....	65
3 NÜMERİK ÇALIŞMALAR	72
4 DUYARLILIK ANALİZİ VE OPTİMİZASYON	91
4.1 Deney Tasarımı	92

4.2	Cevap Yüzey Yöntemi.....	95
4.3	Duyarlılık Analizi	97
4.4	Optimizasyon	98
5	BULGULAR VE TARTIŞMA	103
5.1	Tek Sıralı Yoğuşturucular	103
5.2	Çok Sıralı Yoğuşturucular.....	134
5.3	Cevap Yüzey Yöntemi ve Duyarlılık Analizi	153
5.4	Optimizasyon	163
5.5	Korelasyon	167
5.5.1	Zorlanmış Taşınım Isı Geçişi İçin Önerilen Korelasyonlar	167
5.5.2	Basınç Düşümü Hesaplamaları İçin Önerilen Korelasyonlar....	177
6	SONUÇ VE ÖNERİLER	182
	KAYNAKÇA	190
A	DENEYSEL VERİLER	200
B	İŞİNİM ISI GEÇİŞ HIZI HESAPLAMALARI	207
C	DENEY TASARIMLARI VE VERİLER	213
	TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR	227

SİMGE LİSTESİ

A	Amper [A]
D_{bw}	Arka Tel Çapı [mm]
Nu_{bw}	Arka Tel Üzeri Nusselts Sayısı [-]
$h_{w,b}$	Arka Tel Üzeri Taşınım Katsayısı [$Wm^{-2}K^{-1}$]
α	Atak açısı [$^{\circ}$]
u	Belirsizlik oranı [%]
ΔP	Basınç Düşümü [Pa]
A_t	Boru Alanı [m^2]
S_t	Boru Aralığı veya Borular Arası Mesafe [mm]
L	Boru Aralığının Yarıları [m]
Nu_t	Boru Çapına göre Nusselts Sayısı [-]
Re_t	Boru Çapına göre Reynolds Sayısı [-]
F_{ta}	Borunun Çevreyi Görme Faktörü [-]
D_t	Boru Dış Çapı [mm]
J_{ta}	Boru ile Hava Arası Işınsallık [Wm^{-2}]
L_t	Boru Uzunluğu [m]
h_t	Boru Üzeri Ortalama Taşınım Katsayısı [$Wm^{-2}K^{-1}$]
N_t	Boru Sayısı [adet]
T_t	Boru Yüzey Sıcaklığı [$^{\circ}C$]
T_c	Çıkış Sıcaklığı [$^{\circ}C$]
$\bar{T}_w$	Çok Sıralı Yoğuşturucularda Ortalama Tel Yüzey Sıcaklığı [$^{\circ}C$]
$\bar{T}_{eq}$	Çok Sıralı Yoğuşturucularda Ortalama Yüzey Sıcaklığı [$^{\circ}C$]
S_{LT}	Çok Sıralı Yoğuşturucularda Boru Sıralı Dizilim
S_{ST}	Çok Sıralı Yoğuşturucularda Boru Şaşırtmalı Dizilim
j	Colburn j Faktörü [-]
C_p	Direnç Katsayısı [-]
D_{eq}	Eşdeğer Çap [mm]
Re_{eq}	Eşdeğer Çapa Göre Reynolds Sayısı [-]
F_{eq}	Eşdeğer Görme Faktörü [-]
h_{eq}	Eşdeğer Taşınım Katsayısı [$Wm^{-2}K^{-1}$]

F_{eff}	Etkin Görme Faktörü [-]
f	Fanning Sürtünme Faktörü [-]
T_f	Film Sıcaklığı [°C]
Pr	Film Sıcaklığındaki Prandtl Sayısı [-]
η	Genel Kanat Verimi [-]
T_g	Giriş Sıcaklığı [°C]
ΔT	Giriş ve Çıkış Sıcaklık Farkı [K]
ε_g	Görünür Yayıcılık Oranı [-]
Gr	Grashof Sayısı [-]
$\dot{Q}_{gk}$	Güç Kaynağı ile Serpantinlere Aktarılan Isıl Güç[W]
β	Hacimsel Isıl Genleşme Katsayısı [1/K]
ρ	Havanın Yoğunluğu [kgm ⁻³]
k	Isı İletim Katsayısı [WK ⁻¹]
JF	Isıl-Akış Performans Ölçüt Faktörü [-]
$\dot{Q}_R$	Işınım Isı Geçiş Hızı [W]
h_r	Işınım Isı Geçiş Katsayısı [Wm ⁻² K ⁻¹]
ε	Işınım Isı Geçişindeki Yayıcılık Oranı [-]
η_w	Kanat Verimi [-]
ϕ	Kanat Verimi Düzeltme Faktörü [-]
D	Karakteristik Çap [mm]
ν	Kinematik Viskozite [m ² s ⁻¹]
F_c	Korelasyon Düzeltme Faktörü [-]
F_p	Korelasyon Düzeltme Faktörü [-]
$\dot{m}$	Kütleli Debi [kgs ⁻¹]
ΔT_m	Logaritmik Sıcaklık Farkı [-]
Re_{max}	Maksimum Hıza göre Reynolds Sayısı [-]
A_m	Minimum Alan [m ²]
T_∞	Ortam Sıcaklığı [°C]
Nu_w	Ortalama Tel Üzeri Nusselts Sayısı [-]
T_w	Ortalama Tel Yüzey Sıcaklığı [°C]
S_{sw}	Ön Sıra ile Arka Sıradaki Tellerin Simetri Eksenine Göre Birbirinden Uzaklığı [mm]
D_{fw}	Ön Tel Çapı [mm]

Nu_{fw}	Ön Tel Üzeri Nusselts Sayısı [-]
$h_{w,f}$	Ön Tel Üzeri Taşınım Katsayısı [$Wm^{-2}K^1$]
C_p	Özgül Isı [$J kg^{-1}K^{-1}$]
Ra	Rayleigh Sayısı [-]
C	Sabit [-]
m	Sabit
n	Sabit
V	Serbest Hava Akım Hızı [$m s^{-1}$]
ψ	Serpantin Akış Doğrultusunda Yerleşim Şekilleri [-]
T_{eq}	Serpantin Yüzeyi Ortalama Sıcaklığı [$^{\circ}C$]
N_L	Sıra Sayısı [adet]
S_L	Sıralar Arası Mesafe [mm]
L	Silindir Çiftlerinde Silindirler Arası Boyuna Adım [m]
T	Silindir Çiftlerinde Silindirler Arası Enine Adım [m]
σ	Stefan-Boltzmann sabiti [$5,6704 \times 10^{-8} W/m^2K^4$]
$\dot{Q}_{C,bw}$	Taşınım ile Arka Tel Yüzeyinden Olan Isı Geçiş Hızı [W]
$\dot{Q}_{C,t}$	Taşınım ile Boru Yüzeyinden Olan Isı Geçiş Hızı [W]
$\dot{Q}_{C,fw}$	Taşınım ile Ön Tel Yüzeyinden Olan Isı Geçiş Hızı [W]
$\dot{Q}_C$	Taşınım ile Isı Geçiş Hızı [W]
$\dot{Q}_{C,w}$	Taşınım ile Tel Yüzeyinden Olan Isı Geçiş Hızı [W]
S_w	Tel Aralığı veya Teller Arası Mesafe [mm]
L_w	Tel Uzunluğu [m]
m	Teller Üzerindeki Sıcaklık Gradyeninin Belirleyen Sayı
C_f	Sürtünme Katsayısı [-]
A_{tp}	Tekrarlayan Geometrik Alan [m^2]
A_w	Tel Alanı [m^2]
D_w	Tel Çapı [mm]
Re_w	Tel Çapına Göre Reynolds Sayısı [-]
F_{wa}	Telin Çevreyi Görme Faktörü [-]
J_{wa}	Tel ile Hava Arası Işınsallık [Wm^{-2}]
N_w	Tel Sayısı [adet]
S_s	Tellerin Şaşırtma Oranı [-]

h_w	Tel Üzeri Ortalama Taşınım Katsayısı [$\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$]
ω	Türbülans Özgöl Yayılma Hızı [m^2/s^3]
η_c	Temas Verimi [-]
A_T	Toplam Alan [m^2]
$\dot{Q}_T$	Toplam Isı Geçiş Hızı [W]
k	Türbülans Kinetik Enerjisi [m^2s^{-2}]
g	Yer Çekim İvmesi [ms^{-2}]
W	Yoğuşturucu Genişliği [m]
H	Yoğuşturucu Yüksekliği
Pr_s	Yüzey Sıcaklığındaki Prandtl Sayısı [-]
η_o	Yüzey Verimi [-]
h_z	Žkauskas Korelasyonu ile Elde Edilen Taşınım Katsayısı [$\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$]

KISALTMA LİSTESİ

ANFIS	Uyarlamalı Sinirsel Bulanık Çıkarım Sistem
CFD	Computational Fluid Dynamic (Hesaplamaları Akışkanlar Dinamiği)
CYY	Cevap Yüzey Yöntemi
ÇAGA	Çok Amaçlı Genetik Algoritma
DO	Discrete Ordinate Işınım Isı Geçişi Modeli
DVM	Destek Vektör Makinesi
EWT	Enhanced Wall Treatment Duvar Fonksiyonu
GA	Genetik Algoritma
HAD	Hesaplamaları Akışkanlar Dinamiği
LHK	Latin Hiper Küp
MSA	Ortalama Mutlak Hata
MSE	Ortalama Kare Hata
BSGA	Baskılanmayan Sıralamalı Genetik Algoritma
RMSE	Kök Ortalama Kare Hata
RSM	Response Surface Method (Cevap Yüzey Yöntemi)
SE	Kare Hata
SST	Shear Stress Transport
YSA	Yapay Sinir Ağları
PIV	Parçacık Görüntülemeli Hız Ölçüm Yöntemi

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1	Tel kanatlı yoğunlaştırıcı şematik gösterimi a) Tandem dizilim b) Şaşırtmalı dizilim.....	3
Şekil 1.2	Lee vd. tarafından kullanılan deney düzeneği [25].....	15
Şekil 1.3	Samana vd. tarafından kullanılan deney düzeneği [22], [31].....	18
Şekil 1.4	Zhang vd. tarafından kullanılan deney düzeneği [33].....	19
Şekil 1.5	Zikzaklı şekilde imal edilen çok sıralı yoğunlaştırıcı [35].....	20
Şekil 1.6	Lum vd. tarafından kullanılan rüzgâr tüneli [36].....	21
Şekil 1.7	Admiraal ve Bullard tarafından kullanılan deney düzeneği [37].....	22
Şekil 1.8	Çapraz akışa maruz silindir çiftleri a) Tandem dizilim, b) Yan yana dizilim, c) Şaşırtmalı dizilim [40].....	27
Şekil 1.9	Girdap ve yakınlık etkileşimli bölge sınırları [41].....	28
Şekil 1.10	Tandem dizilimde akış rejimleri dolayısıyla oluşan akış desenleri [47].....	29
Şekil 1.11	Tandem dizilimde $Re=100$ ile $Pr=0,7$ ve $7,0$ değerleri için farklı L/D oranlarına göre akış desenleri [43].....	30
Şekil 1.12	Yan yana dizilim şartlarındaki akış rejimleri dolayısıyla oluşan akış desenleri [47].....	31
Şekil 1.13	Yan yana dizilimde $T/D=1,0$ için akış görselleme çalışmaları a) $Re=1320$ 'de oluşan akış deseni, b) $Re=820$ 'de oluşan akış deseni [51].....	32
Şekil 1.14	Yan yana dizilimde $Re=1000-3000$ 'de "Etkileşimli Akış" rejimi sonucu oluşan akış desenleri a) $T/D=1,5$, b) $T/D=2,0$ [51].....	32
Şekil 1.15	Yan yana dizilimde $Re=1000-3000$ 'de "Paralel Girdap Caddeleri" rejiminde oluşan akış desenleri a) $T/D=2,5$, b) $T/D=4,5$ [51].....	33
Şekil 1.16	$Re=850-1900$ 'de şaşırtmalı dizilim dolayısıyla oluşan akış rejimleri a) Tek Küt Cisim Tip 1, b) Tek Küt Cisim Tip 2, c) Kısmi Tahliye, d) Kayma Tabakasına Tutunma, e) Endüklenmiş Ayrılma, f) Girdap Çarpması, g) Girdap Çiftleri ve Sarmalı, h) Girdap Çiftleri, Saçılımı ve Sarmalı, i) Senkron Girdap Caddeleri [51].....	34
Şekil 2.1	Deney düzeneği a) Gerçek görüntü, b) 3 boyutlu çizim, c) Şematik çizim.....	51
Şekil 2.2	Tel kanatlı yoğunlaştırıcılar ve borular arası direnç teli geçiş detayları.....	53
Şekil 2.3	Termal kamera ile alınan görüntü ve veriler a) Kanal içi görünüm, b) Detay görünüm, c) Boru üzeri sıcaklık değişimi.....	56
Şekil 2.4	Termokupl ve kalibre edilen termokupl ilişkisi.....	58

Şekil 2.5	Kanal içi hız ölçüm noktaları.....	60
Şekil 2.6	4,75 mm tel çapındaki boru için deneysel verilerle literatürdeki korelasyonların kıyaslanması.....	61
Şekil 3.1	Tek ve çok sıralı tel kanatlı yoğunlaştırucularda HAD analizi için seçilen bölge.....	74
Şekil 3.2	HAD analizinde kullanılan yoğunlaştırucu geometrileri ve sınır şartları a) Tek sıra, b) Çok sıra boru sıralı dizilim (4 Sıra) , c) Çok sıra boru şaşırtmalı dizilim (4 Sıra).....	75
Şekil 3.3	HAD analizlerinde çalışılan tüm geometriler.....	76
Şekil 3.4	Çözümlemede kullanılan ağ yapıları a) Tek sıralı dizilim üç boyutlu sayısal ağ görünümü, b) 4 sıra boru sıralı dizilim üç boyutlu sayısal ağ görünümü, c) 4 sıra boru şaşırtmalı dizilim üç boyutlu sayısal ağ görünümü, d) Tek sıra boru etrafı detay görünümü, e) Çok sıra boru sıralı dizilim boru etrafı detay görünümü, f) Çok sıra boru şaşırtmalı dizilim boru etrafı detay görünümü, g) Tel etrafı detay (Tandem), h) Tel etrafı detay (Şaşırtmalı), ı) Boru etrafı detay.....	77
Şekil 3.5	Tel kanatlı yoğunlaştırucu ısı ve akış analizleri için türbülans modellerin karşılaştırılması a) Isı geçiş hızı, b) Basınç düşümü.....	78
Şekil 3.6	HAD analizi hesaplama metodolojisi.....	85
Şekil 3.7	Deneysel sonuçlar ile HAD analizi sonuçlarının kıyaslanması a) $Q_{T,den}$ vs $Q_{T,num}$ (Tek sıralı), b) ΔP_{den} vs ΔP_{num} (Tek sıralı), c) $Q_{T,den}$ vs $Q_{T,num}$ (Çok sıralı- $S_L=37,8$ mm), d) ΔP_{den} vs ΔP_{num} (Çok sıralı- $S_L=37,8$ mm).....	87
Şekil 3.8	Deneysel veriler ile HAD analizinden elde edilen ışınlım ısı geçiş hızının karşılaştırılması.....	88
Şekil 3.9	Boyanın ısı geçişine etkisinin irdelenmesi.....	89
Şekil 4.1	Duyarlılık analizi ve optimizasyon için kullanılan akış şeması.....	92
Şekil 4.2	Üç seviye 2^2 Box-Behnken deney matrisi [120].....	94
Şekil 4.3	Latin Hiper Küp deney matrisi örneği.....	95
Şekil 4.4	Temel genetik algoritma adımları.....	100
Şekil 5.1	Farklı serbest hava akım hızı değerlerine göre h_{fw} , h_{bw} ve h_w değerlerinin değişimi.....	104
Şekil 5.2	Hız ve sıcaklık konturlarını incelemek için atanan düzlemler.....	105
Şekil 5.3	Düzlem A üzeri a) Basınç, b) Hız, c) Sıcaklık konturları.....	106
Şekil 5.4	Farklı düzlemler üzerindeki hız konturları a) Düzlem B, b) Düzlem C, c) Düzlem D.....	106
Şekil 5.5	Farklı düzlemler üzerindeki sıcaklık konturları a) Düzlem B, b) Düzlem C, c) Düzlem D.....	107

Şekil 5.6	$V=2$ m/s için hız eşyüzeyleri a) 0,25, b) 0,50, c) 0,75, d) 1,00, e) 1,25 ve f) 1,50 m/s.....	109
Şekil 5.7	Farklı tel çapı ve hız değerine göre a) h_w , b) h_t değişimi.....	111
Şekil 5.8	Farklı D_t/D_w ve hız değerine göre a) h_w , b) h_t değişimi.....	112
Şekil 5.9	Farklı S_w/D_w ve hız değerine göre a) h_w , b) h_t değişimi.....	114
Şekil 5.10	Farklı S_t/D_t ve hız değerine göre a) h_w , b) h_t değişimi.....	115
Şekil 5.11	Farklı S_t/D_t ve hız değerine göre kanat veriminin değişimi.....	117
Şekil 5.12	Farklı hız değerine göre eşdeğer taşınım katsayısının değişimi a) $V-D_w$, b) $V-D_t/D_w$, c) $V-S_w/D_w$, d) $V-S_t/D_t$	118
Şekil 5.13	Farklı hız değerine göre f değerinin değişimi a) $V-D_w$, b) $V-D_t/D_w$, c) $V-S_w/D_w$, d) $V-S_t/D_t$	120
Şekil 5.14	Tek tel ve boru diziliminde hıza bağlı h_w ve h_t değişimi.....	122
Şekil 5.15	Tek sıra üzeri tek tel dizilimine bağlı Düzlem A üzeri a) Ön telli durumdaki hız konturu, b) Ön telli durumdaki sıcaklık konturu, c) arka telli durumdaki hız konturu, d) Arka telli durumdaki sıcaklık konturu.....	123
Şekil 5.16	Farklı S_s ve hız değerlerinin a) h_w ve b) h_t üzerine etkisi.....	124
Şekil 5.17	S_s değerinin değişiminin h_{fw} ve h_{bw} üzerindeki etkisi.....	125
Şekil 5.18	Düzlem C ve D üzerinde oluşan a) Hız ve b) Sıcaklık konturları.....	126
Şekil 5.19	HAD analiz sonuçlarına göre $S_s=0$ ve $S_s=0,25$ değerlerinde a) D_w-h_w , b) D_t/D_w-h_w , c) S_w/D_w-h_w , d) S_t/D_t-h_w grafikleri.....	127
Şekil 5.20	Farklı S_s ve hız değerlerine göre a) h_{eq} , b) f değerlerinin değişimi.....	129
Şekil 5.21	Tel ve boru temas alanı.....	130
Şekil 5.22	Temas alanının farklı hızlarda kanat verimi üzerine etkisi.....	131
Şekil 5.23	Temas alanının farklı hızlarda temas verimi üzerine etkisi.....	132
Şekil 5.24	Değişen serbest hava akım hızlarında farklı kanat malzemelerine göre kanat veriminin değişimi.....	133
Şekil 5.25	HAD analizi sonuçlarına göre farklı kanat malzemeleri üzerindeki sıcaklık dağılımı.....	134
Şekil 5.26	Çok sıralı yoğunlaştıruculardan elde edilen h_w ve h_t değerlerin tek sırada elde edilen h_w ve h_t değerlerine oranı a) $h_{w,NL}/h_{w,1}$ ($S_s=0$), b) $h_{t,NL}/h_{t,1}$ ($S_s=0$), c) $h_{w,NL}/h_{w,1}$ ($S_s=0,25$), d) $h_{t,NL}/h_{t,1}$ ($S_s=0,25$).....	136
Şekil 5.27	5 sıralı tel kanatlı yoğunlaştırucu üzeri Düzlem A hız akım çizgileri a) Boru sıralı dizilim, b) Boru şaşırtmalı dizilim.....	139
Şekil 5.28	5 sıralı tel kanatlı yoğunlaştırucu Düzlem A üzeri sıcaklık konturları a) Boru sıralı dizilim, b) Boru şaşırtmalı dizilim.....	140

Şekil 5.29	5 sıralı tel kanatlı yoğuşturucularda hız konturları a) $S_s = 0$ (Düzlem C), b) $S_s = 0$ (Düzlem D), c) $S_s = 0,25$ (Düzlem C), d) $S_s = 0,25$ (Düzlem D).....	141
Şekil 5.30	Çok sıralı yoğuşturuculardan elde edilen f değerlerin tek sıralı yoğuşturuculardan elde edilen f değerine oranı a) $S_s = 0$, b) $S_s = 0,25$ için.....	142
Şekil 5.31	Tek ve çok sıralı yoğuşturucularda $V-JF$ faktör ilişkisi a) $S_s = 0$ için, b) $S_s = 0,25$ için.....	143
Şekil 5.32	4 sıralı yoğuşturucularda S_L/D_t değişiminin a) h_{eq} , b) f üzerine etkisi.....	144
Şekil 5.33	4S _{LT} dizilimde oluşan hız eşyüzeyleri a) $S_s = 0$, b) $S_s = 0,25$ için.....	146
Şekil 5.34	4S _{ST} dizilimde oluşan hız eşyüzeyleri a) $S_s = 0$, b) $S_s = 0,25$ için.....	149
Şekil 5.35	Çok sıralı yoğuşturucularda $S_s = 0$ ve $S_s = 0,25$ için elde edilen JF değerlerinin a) D_w , b) D_t/D_w , c) S_w/D_w , d) S_t/D_t değişimine göre mukayesesi.....	151
Şekil 5.36	Cevap Yüzey Yöntemi ile h_{eq} ve f üzerinden yerel duyarlılık analizleri a) 4S _{LT} ve $S_s = 0$, b) 4S _{LT} ve $S_s = 0,25$, c) 4S _{ST} ve $S_s = 0$, d) 4S _{ST} ve $S_s = 0,25$	155
Şekil 5.37	Cevap Yüzey Yöntemi ile JF üzerinden yerel duyarlılık analizleri a) 4S _{LT} ve $S_s = 0$, b) 4S _{LT} ve $S_s = 0,25$, c) 4S _{ST} ve $S_s = 0$, d) 4S _{ST} ve $S_s = 0,25$	157
Şekil 5.38	Cevap Yüzey Yöntemi ile elde edilen h_{eq} değeri değişimleri a) D_w-S_s , b) D_t/D_w-S_s , c) S_w/D_w-S_s , d) S_t/D_t-S_s	159
Şekil 5.39	Cevap Yüzey Yöntemi ile elde edilen f değişimleri a) D_w-S_s , b) D_t/D_w-S_s , c) S_w/D_w-S_s , d) S_t/D_t-S_s	160
Şekil 5.40	Önerilen optimizasyon noktaları ile HAD analizi ile elde edilen sonuçlar a) 4S _{LT} , b) 4S _{ST}	166
Şekil 5.41	Önerilen ve literatürde bulunan korelasyonların nümerik sonuçlar ile karşılaştırılması a) $h_{w,num} - h_{w,kor}$, b) $h_{t,num} - h_{t,kor}$	169
Şekil 5.42	Nümerik analiz ve korelasyonla elde edilen h_{eq} değerlerinin karşılaştırılması.....	170
Şekil 5.43	Çok sıra boru şaşırtmalı dizilimli tel kanatlı yoğuşturuculardan nümerik analiz ve korelasyonla elde edilen h_{eq} değerlerinin karşılaştırılması a) 2S _{ST} , b) 3S _{ST} , c) 4S _{ST} , d) 5S _{ST}	171
Şekil 5.44	Çok sıra boru sıralı dizilimli tel kanatlı yoğuşturuculardan nümerik analiz verileri ve korelasyonla elde edilen h_{eq} değerlerinin karşılaştırılması a) 2S _{LT} , b) 3S _{LT} , c) 4S _{LT} , d) 5S _{LT}	172
Şekil 5.45	h_{eq} değerine bağlı kanat verimi düzeltme faktörü için önerilen korelasyon ve nümerik analiz sonuçlarının uyumluluğu.....	173
Şekil 5.46	Tek sıra yoğuşturucularda önerilen korelasyonlarla hesaplanan ve deneysel elde edilen ısı geçiş hızlarının karşılaştırılması a) Nu_w ve Nu_t	

	yaklaşımına göre, b) Nu_{eq} ve ϕ yaklaşımına göre.....	174
Şekil 5.47	Çok sıralı yoğuşturucularda önerilen korelasyonlar ile hesaplanan ve deneysel elde edilen ısı geçiş hızlarının karşılaştırılması a) $4S_{LT} (Nu_w \text{ ve } Nu_t)$, b) $4S_{LT} (Nu_{eq} \text{ ve } \phi)$, c) $3S_{LT} (Nu_w \text{ ve } Nu_t)$, d) $3S_{LT} (Nu_{eq} \text{ ve } \phi)$, e) $2S_{LT} (Nu_w \text{ ve } Nu_t)$, f) $2S_{LT} (Nu_{eq} \text{ ve } \phi)$	175
Şekil 5.48	Sürtünme faktörü için önerilen korelasyonla nümerik verilerden elde edilen sonuçların karşılaştırılması.....	177
Şekil 5.49	Çok sıralı yoğuşturucularda nümerik analiz verileri ve korelasyonla elde edilen sürtünme faktörlerinin mukayesesi a) $2S_{ST}$, b) $3S_{ST}$, c) $4S_{ST}$, d) $5S_{ST}$	178
Şekil 5.50	Çok sıralı yoğuşturucularda nümerik analiz sonuçları ve korelasyonla elde edilen f değerlerinin mukayesesi a) $2S_{LT}$, b) $3S_{LT}$, c) $4S_{LT}$, d) $5S_{LT}$	179
Şekil 5.51	Tek sıralı yoğuşturucularda önerilen korelasyonlarla hesaplanan ve deneysel verilerden elde edilen f değerlerinin karşılaştırılması.....	180
Şekil 5.52	Çok sıralı yoğuşturucularda önerilen korelasyonlar ile hesaplanan ve deneysel verilerden elde edilen f değerlerinin karşılaştırılması a) $4S_{LT}$, b) $3S_{LT}$, c) $2S_{LT}$	181
Şekil B.1	Tek sıra yoğuşturucularda ısınım ısı geçişini belirlemek için seçilen alan ve görme faktörleri hesabı için verilen notasyonlar.....	207
Şekil B.2	Borunun boruyu görme faktörü.....	208
Şekil B.3	Borunun Sanal A ve Sanal B yüzeylerini görme faktörü.....	208
Şekil B.4	Borunun telleri ve Sanal 4 ile 5 yüzeylerini görme faktörü.....	209
Şekil B.5	Aynı sıradaki tellerin birbirini görme faktörleri.....	210
Şekil B.6	Tellerin Sanal A ve Sanal B ile Sanal 4 ve Sanal 5 yüzeylerini görme faktörü.....	210
Şekil B.7	Tel sıraların karşı tel sıralarını görme faktörü.....	211
Şekil B.8	Tek sıralı yoğuşturucularda ısınım ısı geçişinin direnç devresi.....	211

TABLO LİSTESİ

Tablo 1.1	Literatürde doğal taşınım şartlarında tel kanatlı yoğuşturucular için önerilen korelasyonlar.....	11
Tablo 1.2	Literatürde doğal taşınım çalışmalarında kullanılan tel kanatlı yoğuşturuculara ait geometrik özellikler.....	13
Tablo 1.3	<i>Re</i> sayısının değişimine bağlı olarak <i>C</i> ve <i>m</i> katsayılarının değişimi [26].....	16
Tablo 1.4	Literatürde zorlanmış taşınım şartlarında tel kanatlı yoğuşturucular için önerilen korelasyonlar.....	23
Tablo 1.5	Literatürde zorlanmış taşınım çalışmalarında kullanılan tel kanatlı yoğuşturuculara ait geometrik özellikler.....	26
Tablo 1.6	Boru demetleri üzerine yapılan çalışmalar ve sonuçlar.....	37
Tablo 1.7	Isı değiştirici çalışmalarında CYY ve optimizasyon uygulamaları...	42
Tablo 2.1	Deney düzeneği cihaz ve ekipman listesi.....	52
Tablo 2.2	Tek sıralı yoğuşturucular üzerinden yapılan deneylerde kullanılan serpantinlerin geometrik özellikleri.....	54
Tablo 2.3	Çok sıralı yoğuşturucular üzerinden yapılan deneylerde kullanılan serpantinlerin geometrik özellikleri $N_L=2, 3, 4$	55
Tablo 2.4	Termokupl ve RTDlere ait kalibrasyon denklemleri.....	59
Tablo 2.5	Kanal içi ölçüm noktalarındaki hız değerleri.....	60
Tablo 3.1	Sayısal ağdan bağımsızlık çalışması sonuçları.....	83
Tablo 5.1	CYY ile nümerik sonuçların uyumlulukları.....	154
Tablo 5.2	Nu_{eq} için 2. dereceden polinomal çoklu regresyon modeline ait katsayılar.....	162
Tablo 5.3	Önerilen optimizasyon noktaları ile HAD analizi ile elde edilen sonuçlar a) $4S_{LT}$, b) $4S_{ST}$	164
Tablo A.1	Tek sıralı yoğuşturuculara ait deneysel sonuçlar.....	200
Tablo A.2	Çok sıralı yoğuşturuculara ait deneysel sonuçlar.....	202
Tablo C.1	$4S_{LT}$ için yapılan duyarlılık analizinde LHK deney tasarımına göre elde edilen veriler.....	214
Tablo C.2	$4S_{ST}$ için yapılan duyarlılık analizinde Box - Behknen deney tasarımına göre elde edilen veriler.....	218
Tablo C.3	Tek sıralı yoğuşturucular için yapılan duyarlılık analizinde Box- Behknen deney tasarımına göre elde edilen veriler.....	221
Tablo C.4	$4S_{LT}$ için yapılan optimizasyon işleminde LHK deney tasarımına göre elde edilen veriler.....	222

Tablo C.5	$4S_{ST}$ için yapılan optimizasyon işleminde LHK deney tasarımına göre elde edilen veriler.....	223
Tablo C.6	Nu_w için 2. dereceden polinomal çoklu regresyon modeline ait katsayılar.....	224
Tablo C.7	Nu_t için 2. dereceden polinomal çoklu regresyon modeline ait katsayılar.....	225
Tablo C.8	f için 2. dereceden polinomal çoklu regresyon modeli modeline ait katsayılar.....	226

Tel Kanatlı Yoğuşturucuların Hava Tarafı Isıl ve Akış Performansının İncelenmesi

Alişan GÖNÜL

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Doktora Tezi

Danışman: Prof. Dr. Özden AĞRA

Tel kanatlı yoğuşturucular uzun yıllardır soğutucularda sıklıkla kullanılmaktadır. Endüstriyel uygulamalarda bu tip yoğuşturucular ağırlıklı olarak zorlanmış taşınım şartlarında çalışmaktadır. Bu çalışma kapsamında çapraz akışa maruz düz tip tek ve çok sıralı tel kanatlı yoğuşturucularda ısı geçişi ve basınç düşümü deneysel ve nümerik analiz yöntemlerle incelenmiştir.

Tez çalışması altı ana bölümden oluşmaktadır. İlk bölümde tel kanatlı yoğuşturucular için literatürde yapılan çalışmalar incelenmiştir. Bu kapsamda doğal taşınım ve zorlanmış taşınım şartlarında yapılan çalışmalar iki alt bölümde verilmiştir. Her bir alt bölüm sonunda çalışmalarda kullanılan yoğuşturucu geometrik özellikleri ve önerilen korelasyonlar tablolar halinde özetlenmiştir. Tel kanatlı yoğuşturucular silindirik yapıdaki tel ve borulardan imal edildiğinden, ısı geçiş ve basınç düşümü karakteristiğini anlamak açısından silindir çiftleri üzerine yapılan çalışma sonuçları da ayrı bir başlık altında incelenmiştir. Bununla birlikte, ısı değiştiricilerde Cevap Yüzey Yöntemi(CYY) ve optimizasyon çalışmaları da bu bölümde incelenmiştir. İkinci bölümde tek ve çok sıralı yoğuşturucular için kurulan deney düzeneği, ölçüm sistemi ve belirsizlik

analizi sunulmuştur. Ayrıca hem tek hem de çok sıralı yoğunlaştırucularda ısı geçişi ve basınç düşümü hesaplamaları için kullanılan hesaplama yöntemi anlatılmıştır. Üçüncü bölüm tezin nümerik analiz kısmı olup hem tek sıra hem de çok sıralı yoğunlaştırucular üzerinden yapılan Hesaplamalı Akış Dinamiği(HAD) analizi deneysel verilerle doğrulanmıştır. Ayrıca ışınlam ısı geçişi ve boya etkisi de bu kısımda incelenmiştir. Dördüncü bölümde tezde kullanılan Genetik Kümeleme CYY ve Çok Amaçlı Genetik Algoritma(ÇAGA) yöntemleri açıklanmıştır. Beşinci bölüm, çalışmadan elde edilen bulguları ve bulgulara ilişkin tartışmaları içermektedir. Son bölümde ise çalışmanın sonuçları ve öneriler sıralanmıştır.

Çalışma kapsamında öncelikle tek sıra tel kanatlı yoğunlaştırucularda tellerin uygulamada kullanıldığı gibi tellerin tandem dizilimli olması durumu irdelenmiştir. Bu şartlar altında tek sıradaki arka tel üzeri taşınım katsayısı ile ön tel üzeri taşınım katsayısı arasında %50'ye yakın fark olduğu belirlenmiştir. Arka telin ön tele göre şaşırtmalı dizilimiyle ortalama tel taşınım katsayısında %20-25 aralığında bir iyileşme tespit edilmiştir. Şaşırtma oranı incelemeleri 0-0,25 aralığı için yapılmış olup, artan şaşırtma oranlarıyla ısı geçişinde ve basınç düşümünde artış olduğu belirlenmiştir. Ancak 0,125-0,25 aralığında ısı geçiş hızı ve basınç düşümündeki sonuçlarının birbirine oldukça yakın olduğu anlaşılmıştır. Parametrik çalışma kapsamında tel çapı, boru çapı, teller arası mesafe ve borular arası mesafenin etkisi geniş bir aralıkta incelenmiştir. Çok sıralı dizilimde hem boru sıralı hem boru şaşırtmalı dizilime göre ısı-akış performans incelenmiştir. Boru şaşırtmalı dizilimin ısı geçişi açısından boru sıralı dizilime nazaran daha iyi sonuçlar verdiği gözlenmiştir. Tellerin tandem dizilimli olduğu çok sıralı yoğunlaştırucularda sıralar arası mesafenin oldukça önemli olduğu belirlenmiştir. Buna karşın tellerin şaşırtmalı dizilimi sonucunda hem boru sıralı hem de boru şaşırtmalı dizilimli çok sıralı yoğunlaştırucularda sıralar arası mesafenin etkisinin büyük ölçüde ortadan kalktığı anlaşılmıştır. Çok sıra uygulamalarında ardışık sıralardaki her bir sıranın büyük oranda sıra sayısından bağımsız olarak benzer ısı geçiş davranışı gösterdiği belirlenmiştir. Tellerin şaşırtmalı dizilimiyle elde edilen JF faktörün tellerin tandem dizilimiyle elde edilenden %10-15 civarında daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Dört sıra yoğunlaştırucularda Latin Hiper Küp deney tasarımına göre Genetik Kümeleme

CYY ile tel kanatlı yoğuşturucularda ısı geçişi ve basınç düşümünün incelemesi yapılmıştır. Bu yaklaşımla elde edilen sonuçlarla nümerik olarak elde edilen sonuçların oldukça uyumlu sonuçlar verdiği gözlenmiştir. Bu yöntem uyarınca tel kanatlı yoğuşturucularda etkili olan parametreler için duyarlılık analizi yapılmıştır. Isı geçişini en çok etkileyen parametrenin serbest hava akım hızının olduğu gözlenmiştir. Tellerin şaşırtmalı diziliminin ısı-akış performans açısından en önemli geometrik özellik olduğu anlaşılmıştır. Aynı zamanda teller arası mesafe, borular arası mesafe, şaşırtma oranı ve sıralar arası mesafenin değişimine göre çok sıralı yoğuşturucularda Çok Amaçlı Genetik Algoritma yöntemiyle optimizasyon çalışmaları yapılmıştır. Şaşırtma miktarının maksimum, tel ve boru aralığının minimum değerlerinde ısı-akış performans faktörünün en iyi sonuçlara ulaştığı belirlenmiştir. Sıralar arası mesafenin bu şartlardaki ısı geçişi ve basınç düşümüne etkisinin az olduğu saptanmıştır. Ayrıca hem ısı geçişi hem de basınç düşümü ile ilgili yapılan nümerik çalışmalar neticesinde korelasyonlar önerilmiştir. Önerilen korelasyonların nümerik analiz sonuçlarıyla %10-15 hata aralığının altında oldukça yakın sonuçlar verdiği gözlenmiştir. Benzer şekilde hem tek sıralı hem de çok sıralı yoğuşturucular üzerinden deneysel olarak elde edilen ısı geçiş hızı ve basınç düşümünün ilgili korelasyonlar ile bulunan sonuçlarla oldukça uyumlu olduğu belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Tel kanatlı yoğusturucu, zorlanmış taşınım, ısı geçişi, basınç düşümü, optimizasyon

Investigation of Airside Thermal and Flow Performance of Wire-on-Tube Condensers

Alişan GÖNÜL

Department of Mechanical Engineering

Doctor of Philosophy Thesis

Advisor: Prof. Dr. Özden AĞRA

Wire-on-tube condensers have been used frequently in refrigerators for many years. These types of condensers operate mainly under forced convection conditions in industrial applications. In this study, heat transfer and pressure drop in single and multi-layer wire-on-tube condensers exposed to cross-flow have been investigated by experimental and numerical analysis methods. The thesis study consists of six main sections. In the first section, studies for wire-on-tube condensers are examined in the literature. In this context, studies carried out under natural and forced convection conditions are given in two subsections. Geometric specifications and proposed correlations found in the literature are summarized in tables at the end of each subsection. Since wire-on-tube condensers are manufactured from circular cylindrical wires and tubes, the results of the study on circular cylinder pairs are also examined under a separate heading to understand the heat transfer and pressure drop characteristics. At the same time, as wire-on-tube condensers are a kind of tube bundle, the results of the pioneering studies in this area are summarized in the literature section. Also, the Response Surface Method (RSM) and optimization studies in heat exchangers are examined.

The experimental setup, measurement systematic, and uncertainty analysis established for single and multi-layer condensers are presented in the second section. Besides, the equations and approaches used for calculating the heat transfer and pressure drop in both single and multi-layer condensers are explained in detail. The numerical analysis approach is described in the third section. First of all, Computational Fluid Dynamics (CFD) analysis performed on both single and multi-layer condensers has been confirmed by experimental data. Also, radiation heat transfer and paint effects are investigated in this section. In the fourth chapter, Genetic Aggregation RSM and Multi-Objective Genetic Algorithm (MOGA) methods used in the thesis are explained. The fifth section includes the findings obtained from the study and discussions about the findings. The results and recommendations are sorted in the last section.

First of all, the situation of wires in single layer wire-on-tube condensers with tandem arrangement as used in the application is examined. Under these conditions, it has been determined that there is about 50% difference between the convective heat transfer coefficient on the back wire and the front wire. An enhancement in the average convective coefficient on wires in the range of 20-25% is observed with a staggered arrangement of the back wire relative to the front wire. The staggering rate examinations have been performed for the range of 0-0.25, and it is determined that there is an increase in heat transfer and pressure drop with increasing the staggering rate. However, it is understood that the results of heat transfer rate and pressure drop in the range of 0.125-0.25 are quite close to each other. Within the scope of the parametric study, the effect of wire diameter, tube diameter, the distance between wires, and the distance between the tubes have been examined extensively. In the multi-layer sequence, heat transfer due to both in-line and staggered sequence of layers is examined. It has been observed that the staggered sequence yields better results than the in-line sequence. It is determined that the distance between layers is quite important in multi-layer condensers where the wires are tandem arranged. However, as a result of the staggered arrangement of the wires, it is pointed out that the effect of the distance between the layers is largely eliminated in multi-layer condensers with both in-line and staggered sequences. It is determined that

each layer shows similar heat transfer behaviour largely regardless of the number of layers. It is pointed out that JF factor obtained by the staggered arrangement of the wires is around 10-15% higher than that of the tandem arrangement of wires. The heat transfer and pressure drop have been investigated in wire-on-tube condensers by the Genetic Aggregation RSM according to the Latin Hyper Cube experiment design infrastructure in four layers condensers. It is indicated that the results obtained with this approach are quite compatible with the results obtained numerically. Sensitivity analysis has been performed for the parameters that are effective in wire-on-tube condensers by this method. It is concluded that the free stream air velocity is the parameter that most affected the heat transfer. The staggering rate is the most influential geometrical properties in terms of thermal-flow performance. At the same time, optimization studies have been carried out with the Multi-Objective Genetic Algorithm method in multi-layer condensers according to the distance between the wires and the tubes, the staggering rate and the distance between the layers. It has been determined that the thermal-hydraulic performance factor reaches the best results at the maximum values of the staggering rate and minimum values of the distance between the wires and the tubes. It has been concluded that the distance between layers has little effect on heat transfer and pressure drop in these geometrical specifications. Also, correlations are proposed through numerical study data for use in both heat transfer and pressure drop examinations. It is observed that the proposed correlations give very close results below the 10-15% error range. It has been determined that the heat transfer rate and pressure drop obtained experimentally on both single and multi-layer condensers are quite compatible with the results found with the correlations.

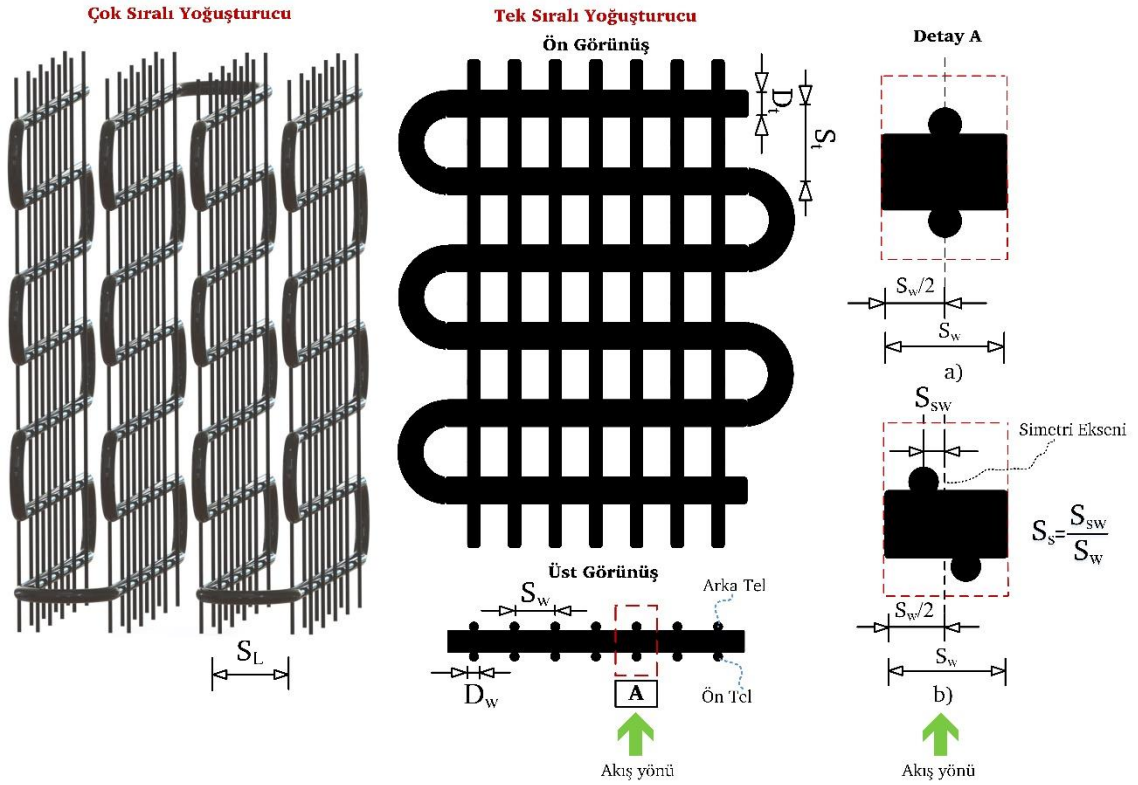
Keywords: Wire-on-tube condenser, forced convection, heat transfer, pressure drop, optimization

Artan nüfus, ekonomik gelişmeler ve refah seviyesine bağlı olarak enerji tüketiminde sürekli bir artış görülmektedir. Günümüzde dünyadaki enerji ihtiyacının %80'ine yakını fosil yakıtlardan karşılanmaktadır. Artan enerji talebini karşılamak için kullanılan fosil yakıt tüketimi, yakıt rezervlerini hızla azaltmaktadır. Fosil yakıt tüketiminin artması dünya üzerinde büyük olumsuzluklar oluşturmakta ve küresel iklim değişikliğine neden olmaktadır. Bu yüzden mevcut kaynaklardan elde edilen enerjinin verimli şekilde kullanılması ve yenilenebilir enerji kaynaklarından daha fazla yararlanılması bir zorunluluk haline gelmiştir. Elde edilen enerjinin verimli kullanılabilmesi için enerji kullanan sistemlerin bütün olarak ve/veya sistemi oluşturan ekipmanların enerjiiyi etkin kullanacak şekilde dizayn edilmesi gerekmektedir. Enerjinin yoğun olarak kullanıldığı sistemlerden birisi de soğutuculardır. Evsel ve endüstriyel buzdolaplarının enerji tüketimleri toplam enerji tüketimi içinde az görünmesine karşın, bu tip ürünlerin çok fazla kullanılması dolayısıyla halen enerji tasarrufu açısından büyük bir potansiyel bulunmaktadır. Öyle ki, enerji tüketiminin %32'ye yakını evde kullanılan cihazlardan gerçekleşirken, ilgili tüketimin büyük bir çoğunluğu buzdolabı ve klimalardan kaynaklanmaktadır [1], [2]. Endüstriyel uygulamalarda kullanılan soğutucuların toplam tüketilen enerjideki payı %40-50 aralığındadır [3]. Soğutucu üreticileri sıklıkla düzenlenen enerji regülasyonlarından dolayı ürünlerinde devamlı iyileştirmeler yapmak zorundadırlar. Evsel ve endüstriyel uygulamalarda kullanılan soğutucularda enerji tasarrufuna yönelik yapılan çalışmalar sırasıyla; kapı ve gövde üzerinde yapılan ısı yalıtımında iyileştirmeler, kompresör veriminde yapılan iyileştirmeler ile ısı değiştiricileri üzerinde yapılan iyileştirmeler olmak üzere üç başlıkta toplanabilir. Yalıtımda 1980lerden günümüze %30lara varan iyileştirmeler yapılmıştır [4]. Kompresör geometrisi üzerinde yapılan çalışmalar ve frekans

konvertörlü kompresörlerin kullanımı soğutucularda enerji tüketimi azaltan başlıca unsurlardır. Soğutma sistemlerinde kullanılan ısı değiştiricileri üzerine yapılan çalışmalar enerji verimliliğini arttırmanın yanı sıra üretim maliyetlerini azaltmaya ve yenilikçi tasarımları göz önünde bulundurmaya yönelik çalışmalardır [5]. Soğutma sistemlerinde kullanılan ısı değiştiricileri buharlaştırıcı ve yoğuşturucu olarak adlandırılmaktadır. Yoğuşturucular, çevrimde oluşan ısı enerjisiyi sistemden uzaklaştıran komponentlerdir. Soğutuculardaki sistem elemanlarının her biri için ayrı ayrı performans değerlendirmesi yapılabilir. Ancak yoğuşturucu, dış ortam şartlarından en çok etkilenen sistem elemanı olup, sistem performansı için büyük önem taşımaktadır. Soğutucularda ortamdaki çekilen ısı enerjisi ve kompresördeki sıkıştırma süreci için kullanılan enerjinin, yoğuşturucudan atıldığı düşünüldüğünde çevrim performansına yoğuşturucunun etkisi daha iyi anlaşılmaktadır. Şöyleki; yoğuşturucu üzerinden atılan ısı miktarının artması beraberinde soğutucu akışkandaki aşırı soğumayı getirmekte bu da buharlaştırıcıya giren akışkanın kuruluk derecesini düşürerek, ortamdaki daha çok ısı çekilmesini sağlamak ve soğutma performansına direkt etki etmektedir.

Endüstriyel ve evsel soğutma sistemlerinde genellikle çelik boru ve tellerden imal edilmiş tel kanatlı yoğuşturucular kullanılmaktadır. Tel kanatlı yoğuşturucular bir boru üzerine çift taraflı ve boruya dik olarak genellikle birbirine paralel şekilde spot kaynağı ile kaynak edilen tellerden imal edilmektedir. Tek ve çok sıralı şekilde üretilen düz tip tel kanatlı yoğuşturucular yanı sıra zikzak ve spiral şeklinde tasarlanmış tipleri de mevcuttur. Tel kanatlı yoğuşturucular soğutucu üreticileri tarafından basit yapıları, sağlamlıkları ve düşük maliyetleri sebebiyle yoğuşturucu olarak uzun yıllardır tercih edilmektedir. Tel kanatlı tip yoğuşturucular tipik olarak, evsel buzdolaplarının ve endüstriyel soğutucuların dondurucu ve taze yiyecek bölmelerinden çıkan ısı enerjisini dış ortama aktarmak için kullanılırlar. Bu tarz ısı değiştiricilerinde sistemden uzaklaştırılması gereken ısı, tellerin ve boruların dış yüzeylerinden dış ortama aktarılır. Günümüzde bazı yoğuşturucular doğal taşınım ile çalışacak şekilde

tasarlanmış olsalar da, çoğu modern buzdolabında ve endüstriyel uygulamalarda kullanılan yoğuşturucular zorlanmış taşınım esasında çalışmaktadır.



Şekil 1.1 Tel kanatlı yoğuşturucu şematik gösterimi a) Tandem dizilim b) Şişirtmalı dizilim

Tek sıra tel kanatlı yoğuşturucularda temelde altı adet karakteristik uzunluktan bahsedilebilir. Bunlar sırasıyla tel çapı (D_w), boru çapı (D_p), tel aralığı (S_t), boru aralığı (S_w), toplam tel uzunluğu (L_w) ve boru uzunluğudur (L_p). Boru uzunluğu ve tel uzunluğunun doğal taşınım açısından oldukça önemli olması karşın, zorlanmış taşınım şartlarında ilgili karakteristik uzunlukların etkisi oldukça azdır. Bu çalışma kapsamında göz önüne alınacak olan akışa dik konumdaki boru ön ve arka yüzeyine kaynatılan tellerin birbirine göre şişirtmalı dizilimi dolayısıyla tel şişirtme oranı (S_s) olarak adlandırılan yeni bir geometrik özellik daha ortaya çıkmaktadır. Bu oran Eşitlik 1.1 de gösterildiği gibi

$$S_s = \frac{S_{sw}}{S_w} \quad (1.1)$$

şeklinde hesaplanmaktadır.

1.1 Literatür Özeti

Tel kanatlı yoğuşturucularda hava tarafındaki ısı geçiş katsayısının belirlenmesi ve iyileştirilmesine yönelik literatürde çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. Bu çalışmalar doğal taşınım üzerine yapılanlar ve zorlanmış taşınım üzerine yapılanlar olmak üzere iki başlıkta incelenmiştir. Her iki grupta incelenen yoğuşturuculara ait geometrik özellikler ve önerilen korelasyonlar bölüm sonlarında tablolar halinde özetlenmiştir. Bu bölümde aynı zamanda silindir çiftleri ve boru demetleri üzerine yapılan çalışmalar da incelenmiştir. Literatür araştırmasının son bölümünde ise ısı değiştiricilerde optimizasyon ve duyarlılık analizi üzerine yapılan çalışmalar özetlenmiştir.

1.1.1 Doğal Taşınım

Witzell ve Fontaine, tel kanatlı yoğuşturucular ile ilgili ilk bilimsel çalışmayı yapmışlardır. İçerisinden kontrollü bir şekilde sıcak su dolaştırılan tel kanatlı yoğuşturucu düzeneginde serbest hava akımlarına bağlı, farklı tel çapları ve sayıları için yatay olarak yerleştirilmiş yoğuşturucu üzerinden deneyler yapılmış ve elde ettikleri verilerden Nu korelasyonu önerilmiştir [6].

Witzell ve Fontaine aynı yıl yaptıkları ikinci bir çalışma ile daha önce yaptıkları çalışmaya ek olarak ışıınım etkilerini de göz önüne almışlardır [7].

Papanek yaptığı tez çalışmasında yoğuşturucuların yatay, dikey ve eğik yerleşimine göre hem doğal taşınım ile hem de ışıınım ile olan ısı geçişini incelemiş ve elde edilen veriler ile korelasyonlar önermiştir. Çalışmada dört farklı tel aralığı kullanılan yoğuşturucular ile testler yapılırken tel ve boru üzeri taşınım katsayısının eşit olduğu ($h = h_t = h_w$) kabulü yapılmış ve etkili ısı geçiş alanı kanat verimini de göz önüne alarak $A = A_t + \eta A_w$ şeklinde ifade edilmiştir. Doğal taşınımın artan atak açılara bağlı olarak düştüğünü ve tel aralığı azaldığında ise taşınım katsayısının açığa bağımlılığının arttığı ifade edilmiştir [8].

Witzell vd. yaptıkları bir diğer çalışma ile test bölümü odundan yapılmış ve siyaha boyanmış bir düzenekte ışıınım ve doğal taşınımın tel aralığı değişimine göre hava tarafı ısı geçiş katsayısı üzerine etkisini birlikte incelemişler ve

korelasyon önermişlerdir. Yoğuşturucular, düzeneğe dikey konumda yerleştirilmiş olup hepsi aynı çaplardan oluşan borulardan imal edilmiştir. Değişik tel çapı, tel aralıkları ve eğimli durumlara bağlı ısı performans değişimlerini belirlemek için deneyler yapmışlardır. Işınım ile olan ısı geçişinin toplam ısı geçişinin yaklaşık %30'ları civarında olduğunu ifade etmişlerdir. Tel çapları ve teller arası mesafe üzerinde yapılan çalışmalar sonucunda dikey konumda ısı geçişini arttırdığını belirlemişler ve çalışma sonucunda, doğal taşınım katsayısını bulmaya yönelik olarak yeni bir korelasyon önermişlerdir [9].

Cyphers vd. tel kanatlı yoğuşturucularda eğimi ve sınırlandırmalara bağlı ısı geçişinin değişimini incelemişlerdir. Herhangi bir sınırlandırma olmaksızın dikey konumdaki tel kanatlı yoğuşturucunun aynı özellikteki yatay konumdaki tel kanatlı yoğuşturucuya göre %25 daha iyi ısı geçişi gerçekleştirdiği belirtilmiştir. Sınlandırmayı yoğuşturuculara paralel ve aynı boyutlarda olacak şekilde kullanılan iki adet dikey, bir adet yatay levha ile yapmışlardır. İlgili şartlara göre doğal taşınım katsayısını bulmaya yönelik tel ve boru çapını karakteristik uzunluk alan iki adet korelasyon önerilmiştir [10].

Collicott vd. tel kanatlı yoğuşturucularda ısı ısı geçişi etkisi üzerine araştırma yapmışlar, görme faktörlerini belirlemeye çalışmışlardır. Çalışmada on iki adet yoğuşturucu kullanılmış ve her bir yoğuşturucu serpantini vakum odasına yerleştirilmiş ve ısı ısı geçişi ölçülmüştür. Serpantinden çevresine görme faktörü tel ve boru çapı ile boru ve tel aralıklarına göre ilişkilendirilmiştir. Sonuçta ısı geçişinin genel olarak tel çapı ve boşluk oranının bir fonksiyonu olduğu belirlenmiştir. Yatay durumdaki yoğuşturucuların ısı geçişinde tel çapı ve teller arası boşluğun çok da etkili olmadığını belirtmiş ve doğal taşınımına bağlı korelasyon önermişlerdir.

Işınım ile bağlı ısı geçişi hesaplamalarında ise F_{eff} şeklinde teller üzerindeki sıcaklık dağılımına etkin bir görme faktörü oluşturulmuştur.

$$\dot{Q}_R = F_{eff} \varepsilon_{eff} \sigma (A_t + A_w) (T_t - T_\infty) \quad (1.2)$$

F_{eff} üzerindeki en etkili geometrik özelliğin ise D_w / S_w olduğu belirtilmiştir [11].

C. Melo vd. doğal taşınımına maruz tel kanatlı yoğunlaştırucularda ısı geçiş katsayısını belirlemeye yönelik çalışma yapmışlardır. Kurdukları deney tesisatında boru çapları 4,8 den 6,2mm'ye, kanat sayısı 13'ten 25'e ve 10 ile 90 arasında tel çifti kullanılmak suretiyle 24 farklı yoğunlaştırucu tipi üzerinde 72 adet deney yapmışlardır. Deneyler, yoğunlaştırucu ile ortamdaki hava arasındaki ortalama sıcaklık farkının 3,6 ile 36,1°C arasında olacak şekilde sıcaklık kontrollü bir odada gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlarla ısı geçişi verilerinin %90'ını %10 hata aralığının altında tahmin edebilen bir korelasyon önerilmiştir [12].

Espíndola vd. doğal taşınımına maruz tel kanatlı yoğunlaştırucularda deneysel ve teorik çalışmalar yapmış ve boru ve teller arası mesafenin ısı geçişi açısından oldukça önemli olduğunu belirtmişlerdir. 54 numune üzerinden yapılan deneysel çalışmada doğal taşınımın yanı sıra ışınlı ısı geçişine de incelenmişlerdir. Bu çalışmalar sonucunda bir korelasyon önerilmiştir. Önerilen korelasyonun deneysel verilerin %90'ından fazlasını %10 hata aralığında hesapladığı ifade edilmiştir. Işınım ısı geçiş katsayısı (h_r) aşağıdaki eşitlik uyarınca hesaplanmaktadır. Yayıcılık değeri 0,95 alınmıştır.

$$h_r = \varepsilon_g \sigma (T_{eq} + T_\infty) (T_{eq}^2 - T_\infty^2) \quad (1.3)$$

Burada ε_g görünür yayıcılığı ifade etmektedir. Bu değerin hesaplanması için öncelikle yoğunlaştırucunun çevreyi görme faktörü aşağıdaki eşitliğe göre hesaplanmıştır.

$$F = \frac{A_t F_{ta} + A_w F_{wa}}{A_t + A_w} \quad (1.4)$$

Burada F_{ta} ve F_{wa} sırasıyla boru ve tellerin çevreyi görme faktörlerini ifade etmektedir. Basitleştirme açısından F aşağıdaki gibi bir korelasyon ile ifade edilmiştir.

$$F = 0,5 \left(\frac{S_t}{D_t} \right)^{0,03} \left(\frac{S_w}{D_w} \right)^{0,16} \quad (1.5)$$

Bu korelasyon ile elde edilen sonuçlarla analitik olarak hesaplananlar arasındaki hata oranının %2'nin altında olduğu belirtilmiştir [13].

Tanda ve Tagliafico, tel kanatlı yoğuşturucularda doğal taşınım ile ısı geçişini, gerçek çalışma şartları altında çalışan bir soğutucu üzerinde incelemiş, tel ve boru çapı ile aralıklarını ve yoğuşturucunun yüksekliğini dikkate alan bir korelasyon önermişlerdir. Çalışmada, deney düzeneği iyice yalıtılmış olup boru içi akışkanı olarak su kullanılmıştır. Yoğuşturucu yüzey sıcaklıkları kızıl ötesi termometreler aracılığıyla ölçülmüştür. Deneysel verilerden elde edilen korelasyonun deneysel çalışmalarla $\pm\%6$ hata aralığında uyduğu belirtilmiştir [14].

Tagliafico ve Tanda tel kanatlı yoğuşturucularda hava tarafı ışıınım ve doğal taşınım ısı geçişini ayrı ayrı incelenmiştir. Işıınım ısı geçişi hesabı teorik olarak serpantin her bir kısmı ile çevresi arasında etkileşim gösteren difüz, gri-cisim kabulüyle hesaplamıştır. Doğal taşınımlı ısı geçişi için, çeşitli geometrik özelliklere sahip bir dizi 42 düşük yayıcılığa ($\epsilon=0,35$) sahip yoğuşturucular üzerinde gerçekleştirilen deneysel testlere dayanarak, yarı ampirik bir korelasyon geliştirilmiştir. İlgili korelasyonlar ile toplam ısı geçiş hızı tahminleri ise sekiz adet yüksek yayıcılığa ($\epsilon=0,95$) sahip ısı değıştiriciler üzerinde yapılan bağımsız, ikinci bir deney seti ile de karşılaştırılmıştır. Çalışma ile doğal taşınım ve ışıınım etkisi geniş bir aralıkta test edilmiştir. Kanat verimini tel yüzey sıcaklıklarına göre Eşitlik 1.6'da görüldüğü üzeri basit bir biçimde ifade etmişlerdir. Işıınım ısı geçişinde yoğuşturucu üzerinde ortalama sıcaklık kabulü yapılmıştır. Eşitlik 1.6 ile yapılan basitleştirme sonrasında serpantin ortalama sıcaklığını bulmaya yönelik Eşitlik 1.9'da görülen ifadeyi önermişlerdir [15].

$$\eta_w = \frac{(T_w - T_\infty)}{(T_t - T_\infty)} \quad (1.6)$$

$$\eta_w = \frac{\tanh(mS_t / 2)}{(mS_t / 2)} \quad (1.7)$$

$$m = \left(\frac{4h_w}{k_w D_w} \right)^{1/2} \quad (1.8)$$

$$T_{eq} = \frac{(A_t T_t + A_w T_w)}{A_T} = \frac{T_t + D\eta_w(T_t - T_\infty) + DT_\infty}{1 + D} \quad (1.9)$$

Burada D ,

$$D = \frac{2S_t / D_t}{S_w / D_w} \quad (1.10)$$

şeklinde ifade edilmiştir.

Melo ve Maykot evsel buzdolabı üzerine entegre edilmiş içerisinde su dolaştırılan tel kanatlı yoğuşturucunun ısıl davranışını soğutucuların arkasında bulunan duvar ve sınırlandırılmış alana göre incelemişlerdir. Deneysel çalışmada 6,5 mm çapında 19 sıra boru, 1,5 mm çapında 65 sıra telden imal edilen 440 mm genişliğinde 1100 mm uzunluğunda tel kanatlı yoğuşturucu kullanılmıştır. Sınırlandırma düzeneği odundan yapılmış, tamamı siyah mat boyayla boyanmış olup 430 litrelik bir nofrost buzdolabını simüle edecek şekilde ISO 7371 standartlarına göre yapılmış olup üst tarafından hava akışını bozabilecek olası etkileri önlemek için üst yapı da yapılmıştır. Düzeneğin yerleşimine bağlı olarak sağ, sol ve arka duvara olan mesafelere göre ısı geçişinin değişimini incelenmiştir [16].

Bansal ve Chin farklı çalışma şartlarında çalışan evsel bir buzdolabında yaygın olarak kullanılan tel kanatlı yoğuşturucuları nümerik olarak modellemiş ve sonuçları deneysel çalışma verileri ile karşılaştırmışlardır. Sonlu elemanlar yöntemi kullanarak bir simülasyon modeli geliştirmiştir. Birim ağırlığa göre yoğuşturucunun kapasitesi, boru ve tellerin çapları ile aralıklarını dikkate alınarak optimizasyon çalışması yapılmıştır. Bu optimizasyona göre aşağıdaki gibi bir optimizasyon faktörü (f_0) belirlenmiştir [5].

$$f_0 = \frac{\dot{Q}_{opt} / w_{opt}}{\dot{Q}_{\%100} / w_{\%100}} \quad (1.11)$$

Yukarıdaki eşitlikte $\dot{Q}_{opt}$ ve $\dot{Q}_{\%100}$ sırasıyla optimize edilen ve mevcut tasarıma göre yoğuşturucu ısıl gücü vermektedir. Benzer şekilde w_{opt} ve $w_{\%100}$ ise optimize edilen ve deneylerde kullanılan yoğuşturucu ağırlığını ifade etmektedir. Bu faktöre göre yapılan optimizasyon çalışmasına bağlı dizayn sonucunda gerçek buzdolabın uygulanmasında yoğuşturucu kapasitesinin %3 arttığı ve yoğuşturucu ağırlığının %6 azaldığı saptanmıştır. Modelleme çalışmalarında tel

kanatlı yoğuşturucuların yalnızca hava tarafı değil aynı zamanda soğutucu akışkan tarafı da modele dâhil edilmiştir [5].

Bassiouny çalışmasında ev tipi buzdolaplarında kullanılan yoğuşturucular ile duvar arasındaki mesafenin ortama verilen ısı miktarı üzerindeki etkilerini sayısal analiz ve sonlu elemanlar yöntemiyle analiz ederek incelemiştir. Elde ettiği sonuçlarda yoğuşturucu ile duvar arasındaki mesafenin 200 mm'den daha fazla olması durumunda ısı geçişinin iyileştiğini belirtmiştir. Bunun yanı sıra yoğuşturucu ile duvar arasındaki boşluğun az miktarda bile olsa azaltılması ve oda sıcaklığındaki küçük miktardaki artışın, dış ortama atılan ısı miktarını önemli ölçüde azaltarak sistemin soğutma performansını önemli ölçüde düşürdüğü belirtilmiştir [17].

Quadir vd. çalışmalarında dört farklı tel kanatlı yoğuşturucuda doğal taşınım ile oluşan ısı geçişini sonlu elemanlar yöntemi aracılığıyla belirlemeye çalışmışlardır. Ortam sıcaklığının ve soğutucu akışkanın debisinin ısı geçişine etkileri saptanmıştır. Uygulanan sonlu eleman metodolojisiyle elde edilen sonuçlarla deneysel sonuçların birbirine oldukça yakın değerler verdiği belirtilmiştir [18].

Ameen vd. R134a soğutucu akışkanı kullanılan buzdolaplarında yoğuşturucu etrafındaki doğal taşınımı analiz etmek için sonlu elemanlar metodunu kullanmışlardır. Bu çalışmada boru ve tel aralığı, sayısı ve uzunluğu farklı olan iki farklı yoğuşturucu incelemiştir. Önerilen yöntem ile farklı çalışma şartlarında gerekli boru sıra sayısının belirlenebileceği belirtilmiştir. Benzer şekilde soğutucu akışkan tarafında faz değişim noktalarını tahmin etmede de deneysel sonuçlar ile $\pm 10\%$ hata aralığında doğru sonuçlar verdiği ifade edilmiştir [19].

Kaushik ve Manjunath doğal taşınım maruz bir tel kanatlı yoğuşturucuda entropi üretim analizini geometrik ve işletme parametrelere göre araştırmışlardır. Bununla birlikte termoekonomi analizi de yapılmıştır. Analitik çalışmada yoğuşturucu boru dış çapı, tel çapı, tel sayısı, boru sayısı, boru aralığı, tel aralığı ve soğutucu akışkan (R134a) sıcaklığını gibi parametreler dikkate alınmış ve ısı geçişi, basınç düşümü, kuruluk oranı, Bejan sayısı ve termal

ekonomik faktörlere göre ekserji-ekonomik faktör incelenmiştir. Elde edilen model ile daha iyi performans sağlayan yoğunlaştırucu dizaynlarının elde edilebileceği ifade edilmiştir [20].

Arsana vd. şaşırtmalı tel dizilime sahip tel kanatlı yoğunlaştırucuları Matlab programı üzerinden yazdıkları bir program ve ANSYS Fluent programı ile nümerik olarak incelemişler ve deneysel veriler ile mukayese etmişlerdir. Ortam 30 °C sıcaklığında iken, akışkan debisi 0,006 kg/s olarak ayarlanmıştır. Akışkan giriş sıcaklığı 60 °C ve 70 °C olarak ayarlanmış ve geliştirilen model ile deneysel sonuçların $\pm\%5$ aralığında uyumlu sonuçlar verdiği ifade edilmiştir. Şaşırtmalı diziliminde taşınım katsayısının iyileştiği belirtmişlerdir [21].

Samana vd. doğal taşınıma maruz tel kanatlı yoğunlaştırucularda kanat olarak teller yerine ısı borusu kullanımının ısı geçişine etkisini incelemişlerdir. İçerisinde R123 akışkanı bulunan salınlı ısı borusu uygulamalarının tel kullanımına nazaran ısı geçiş performansını kısmen arttırdığı ifade edilmiştir. Yatay yerleşim durumunun dikey yerleşime nazaran %15-20 civarında daha iyi sonuçlar verdiği saptanmıştır. Çalışma ile tel kanatlı yoğunlaştırucularda ısı geçişinde tel ve boru çapı ile tel ve boru aralığının oldukça etkili parametreler olduğu belirlenmiş ve bu parametrelere göre bir korelasyon önerilmiştir. İlgili korelasyonun hem tel hem de ısı borusu uygulamalarında $\pm\%10$ civarında hata aralığıyla ısı geçiş katsayısını tahmin edebileceği belirtilmiştir [22].

Tablo 1.1 Literatürde doğal taşınım şartlarında tel kanatlı yoğunlaştırıcılar için önerilen korelasyonlar

No	Yazar	Karakteristik Uzunluk	Korelasyon/ Model	Yerleşim
1	Witzell ve Fontaine[7]	$D_{eq} = \frac{A_t D_t + A_w D_w}{A_t + A_w}$	$Nu = 0,4724Gr^{0,2215}$	Yatay
2	Papanek [8]	$D_{eq} = \frac{A_t D_t + A_w D_w}{A_t + A_w}$	$Nu_{\alpha=0^\circ} = 0,2714Gr^{0,307}$, $Nu_{\alpha=90^\circ} = 0,0188Gr^{0,7556}$,	Yatay Dikey
3	Witzell vd.[9]	$D_{eq}^{-1/4} = \frac{A_t D_t^{-1/4} + A_w D_w^{-1/4}}{A_t + A_w}$	$Nu_{\alpha=0^\circ} = 0,905Gr^{0,176} \left(\frac{S_w - D_w}{S_w} \right)^{1,2}$, $Nu_{\alpha=90^\circ} = 0,034Gr^{0,726}$	Yatay Dikey
4	Cyphers vd.[10]	D_t, D_w	$Nu_t = \frac{2}{\ln(1 + 5Gr^{-1/4})}$, $Nu_w = \frac{2}{\ln(1 + 4Gr(D_w / L)^{-1/4})}$	Yatay Dikey
5	Collicott vd.[11]	$D_{eq} = \frac{A_t D_t + A_w D_w}{A_t + A_w}$	$Nu = 0,11(GrPr)^{1/3} + (GrPr)^{0,1}$	Yatay, Eğik, Dikey
6	Melo ve Hermes[12]		$\pi_o = 5,68\pi_1^{0,60}\pi_2^{-0,28}\pi_3^{0,49}\pi_4^{0,08}$, $\pi_o = \frac{h_c + h_r}{h_r}$, $\pi_1 = \frac{A_w}{A_t + A_w}$, $\pi_2 = \frac{S_t - D_t}{D_t}$, $\pi_3 = \frac{S_w - D_w}{D_t}$, $\pi_4 = \frac{T_{eq} - T_\infty}{T_f}$	Dikey

Tablo 1.1 Literatürde doğal taşınım şartlarında tel kanatlı yoğunlaştırıcılar için önerilen korelasyonlar (devamı)

No	Yazar	Karakteristik Uzunluk	Korelasyon/ Model	Yerleşim
7	Espíndola vd.[13]	$L_c = \frac{A_o}{H}$	$Nu = 6,2 Ra_{L_c}^{0,2} Z^{0,6}$ $Ra_{L_c} = \frac{g \beta (T_{br} - T_{\infty}) L_c^3}{\nu \alpha}$ $Z = \frac{WH - N_t D_t W - N_w D_w H + N_t N_w D_t D_w}{WH}$	Dikey
8	Tanda ve Tagliafico [14]	H	$Nu = 0,66 \left(\frac{Ra H}{D_t} \right)^{0,25} \left\{ 1 - \left[1 - 0,45 \left(\frac{D_t}{H} \right)^{0,25} \right] \exp(-S_w / \varphi) \right\}$ $Ra = \left(\frac{\beta \rho^2 C_p}{\mu k} \right) g (T_t - T_{\infty}) H^3, \quad C_1 = 28,2, \quad C_2 = 264$ $\varphi = \left(\frac{C_1}{H} \right)^{0,4} \frac{\left(\frac{S_w - D_w}{D_w} \right)^{0,9}}{\left(\frac{S_t - D_t}{D_t} \right)} + \left(\frac{C_1}{H} \right)^{0,8} \left(\frac{C_2}{T_t - T_{\infty}} \right)^{0,5} \frac{\left(\frac{S_w - D_w}{D_w} \right)^{-1,5}}{\left(\frac{S_t - D_t}{D_t} \right)^{0,5}}$	Dikey
9	Samana vd.[22]	D_t	$Nu = 0,1112 Ra^{0,661} (1 + \xi)^{0,3915} \left(\frac{S_t - D_t}{D_t} \right)^{0,2260} \left(\frac{S_w - D_w}{D_w} \right)^{0,0433}$	Dikey

Tablo 1.2 Literatürde doğal taşınım çalışmalarında kullanılan tel kanatlı
yoğuşturuculara ait geometrik özellikler

No	Yazar	D_w (mm)	D_t (mm)	S_w (mm)	S_t (mm)	N_w (adet)	N_t (adet)	$H(L_w)$ (mm)	$W(L_t)$ (mm)
1	Witzell ve Fontaine [6]	0,88 - 2,32	4,76 - 15,9	4,23 - 25,4	25,4-102	-	-	610	914
2	Melo ve Hermes [12]	1,5	6,2	4,94, 7,46, 15, 17, 48, 89	50, 60, 100	10, 30, 60, 90	13, 21, 25	13, 21, 25	440
3	Espíndola vd. [13]								
4	Tanda ve Tagliafico [14]	$S_w/D_w =$ 4,38-6,2	$S_t/D_t = 3, 5, 10,$ 20	4,3-14,6	1,7-7,8	-	-	0,15-1,1	
5	Tagliafico ve Tanda[15]	$S_w/D_w =$ 4,38-6,2	$S_t/D_t = 3, 5, 10,$ 20	4,3-14,6	1,7-7,8	-	-	0,15-1,1	
6	Melo ve Maykot [16]	1,5	6,5			65	19	440	1100
7	Bansal ve Chin [23]	1	4,5	4,8	45	81	26	-	-
8	Bassiouny [17]	1	4,5	6	50	64	16	800	-
9	Quadir vd. [18]	1,22, 1,62	4,80, 4,92, 6,21	4,57, 5,34	25,4, 31,8	166, 168, 176	12, 16, 18	660	
10	Ameen vd. [19]	1,5	4,9	6,5, 7,5	40,9, 55,4	100, 114	13, 22	487, 531	
11	Kaushik ve Manjunath [20]	1	4,5	4,8	45	81	26	-	-
12	Arsana vd. [21]	1,2	4,8	7, 14, 21	40	-	12	445	431
13	Samana [22]	3,45	6,35, 9,53, 12,70	20, 25	30, 40, 50	-	10	-	500

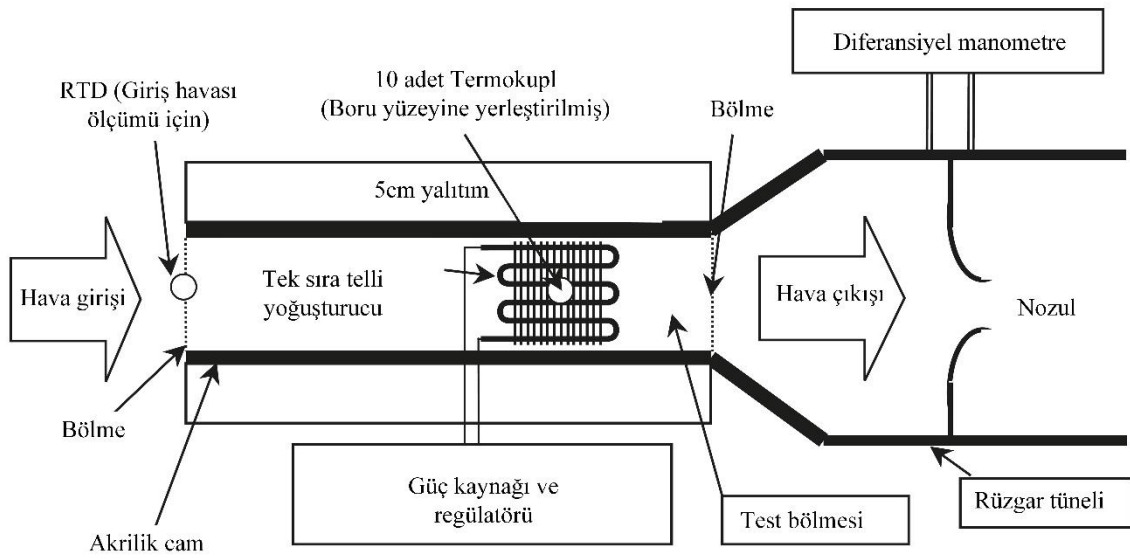
1.1.2 Zorlanmış Taşınım

Hoke vd. yaptıkları çalışma ile tel kanatlı yoğuşturucuların hava tarafı doğal ve zorlanmış taşınım ile ısı geçiş katsayısını; atak açısına ve yoğuşturucuların geometrik özelliklerini parametrik olarak incelenmiştir. Yedi farklı tek sıralı yoğuşturucu kullanılarak yapılan deneylerde ısı değiştirici içinden su geçirilmiştir. Tel çapları 1,22 ila 1,65 mm aralığında değişirken boru çapı 4,73 ila 6,21 arasında değişmiştir. Teller arası mesafe 4,56 ila 6,81 mm arasında değişirken borular arası mesafe 25,4 ila 50,8 mm arasında değişmiştir. Hava hızı 0,15 ila 2,0 m/s arasında değiştirilmiş ve tüm deneyler 0,3 metre yüksekliğinde 0,9 metre genişliğinde ve 0,76 metre uzunluğunda test bölümüne sahip rüzgâr tüneline yapılmıştır. Deneyler sırasında yalnızca tek sıra yoğuşturucular üzerinde testler yapılmış ve yoğuşturucular atak açısı -90 ile 90 derece arasında değiştirilerek ısı geçişi incelenmiştir. Çalışmanın sonucunda atak açısının ısı geçişi açısından çok önemli olduğu belirlenmiştir. Özellikle 0-20° arasında taşınım katsayısının yaklaşık 2 katına yükseldiğini ifade edilmiştir. Çalışma sonucunda yoğuşturucunun eğik veya dikey yerleştirilmesine göre iki adet korelasyon önerilmiştir. Deneysel çalışmalarda altı farklı serpantin ile çalışmasına karşın yalnızca bir serpantin akışa dik konumlandırmıştır. Yapılan çalışmada ısı geçişi hesaplanmasında kanat veriminin oldukça önemli olduğu belirtilmiştir. Tel kanatlarını olmaması durumunda taşınım katsayısı büyük oranda boru aralığına bağlı olacağını bildirilmiştir. Artan hızlarda teller arası boşluğun artmasının tel üzeri taşınım katsayısını oldukça azalttığı gözlenmiştir. Atak açısı 70° ile 90° arasında değiştiğinde tel üzeri taşınım katsayısındaki değişimin oldukça az olduğu ifade edilmiştir. Tel kanatlı yoğuşturucular yatay yerleştirildiğinde tel üzeri taşınım katsayısının aynı çaplı silindir üzeri taşınım katsayısının dörtte birinden daha küçük değerler verdiği saptanmıştır. Çalışma da tel ve boru üzeri taşınım katsayılarının değişimini Eşitlik 1.12'de görüldüğü gibi çaplar oranının karekökü ile ifade etmişlerdir.

$$\frac{h_t}{h_w} \cong \sqrt{\frac{D_w}{D_t}} \quad (1.12)$$

Deneysel veriler ile önerilen korelasyonların $\pm\%15$ hata aralığında uyumluluk gösterdiği belirtilmiştir [24].

Lee vd. yaptıkları deneysel çalışmada tek sıralı tel kanatlı yoğuşturucularda hava tarafı taşınım katsayısını bulmaya yönelik deneysel ve analitik çalışmalar yapmışlardır. Deneysel çalışmada ısı kayıplarını minimize etmek için 10 mm kalınlığındaki akrilik malzeme üzerine uygulanan 30 mm kalınlığındaki strafor ile çevrelenmiş düzenek ile sağlanmıştır. Kanal içi hava akışını kontrol etmek ve ölçümlemek için 18-60 mm çapında değişen dört adet nozul kullanılmıştır. Yoğuşturucudan uzaklaştırılması gereken ısı, yoğuşturucu boruları içerisine yerleştiren direnç telleri ile sağlanmıştır. Böylelikle boru yüzey sıcaklıklarının eşit olması sağlanmıştır [25].



Şekil 1.2 Lee vd. tarafından kullanılan deney düzeneği [25]

Analitik çözümleme de Žkauskas[26] korelasyonuna yönelik düzeltme faktörleri deneysel sonuçlar yardımı ile elde edilmiştir. Korelasyon düzeltme faktörü bir adet yoğuşturucu ile yapılan deneysel çalışmalarla hesaplanmıştır. Düzeltme faktörlerinin uygulanabilirliğini doğrulamak amacıyla üç yoğuşturucu üzerinde deneysel çalışmalar yapılmıştır. Bu üç serpantinde de tel çapı 4,76 mm iken tel çapı 1,53 mm olarak sabit ölçülerdedir. Korelasyonlar ve deneyler ile elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında; düzeltme faktörü kullanılarak elde edilen sonuçlarla deneysel veriler arasındaki fark %3,7, düzeltme faktörünün kullanılmadığı korelasyonlarda ise %24,7 olarak belirlenmiştir. Akışın tele dik($\alpha=0^\circ$ ve $\psi=0^\circ$), boruya dik($\alpha=0^\circ$ ve $\psi=90^\circ$), ve her ikisine de dik olması ($\alpha=90^\circ$) durumu incelenmiştir.

Mevcut çalışmadan elde edilen sonuçlar;

- ✓ Akışın hem tel hem de boruya dik akması durumunda ($\alpha=90^\circ$) tek bir serpantin için taşınım katsayıları, tek bir silindir için önerilen Žkauskas[26] korelasyonundan elde edilen ısı geçiş değerinin oranı aşağıda ifade edildiği gibi bulunurken eşitliklerde gösterilen F_c değeri sabit 1,3 olarak bulunmuştur.

$$K_{AC} = C_{ac} Re_t^{m_{ac}} Pr^n \frac{k_a}{D_t} A_t + \eta_w C_{ac} Re_w^{m_{ac}} Pr^n \frac{k_a}{D_w} A_w \quad (1.13)$$

Buradaki C ve m değerleri Reynolds sayısına göre değişmektedir ve ilgili değerler Tablo 1.3 'de görülmektedir.

Tablo 1.3 Re Sayısının Değişimine Bağlı Olarak C ve m Katsayılarının Değişimi [26]

Re Sayısı	C	m
1 – 40	0,75	0,4
40 – 1000	0,52	0,5
1000 - 2x10 ⁵	0,26	0,6
2x10 ⁵ - 2x10 ⁶	0,023	0,8

$$F_c = \frac{K_{AC}}{h_{z,t} A_t + \eta h_{z,w} A_w} \quad (1.14)$$

- ✓ Tek bir silindir için Žkauskas[26] korelasyonunun tel kanatlı yoğuşturucuda tele dik akış durumundaki taşınım katsayısına oranı, hava hızının bir fonksiyonu olarak belirlenmiştir.
- ✓ Korelasyon düzeltme faktörü ile elde edilen verilerle deneysel sonuçlar arasında yaklaşık ± 7 hata aralığında bir uyumluluk olduğu gösterilmiştir.
- ✓ Bu çalışmada düzeltme faktörleri ile elde edilen değerlerin deneysel verilerle %10 civarında hata aralığında uygun sonuçlar verdiği gözlenirken ve Hoke vd. [24] önerdikleri korelasyonların %80'lere varan hata aralığında sonuçlar verdiğini ifade edilmiştir.

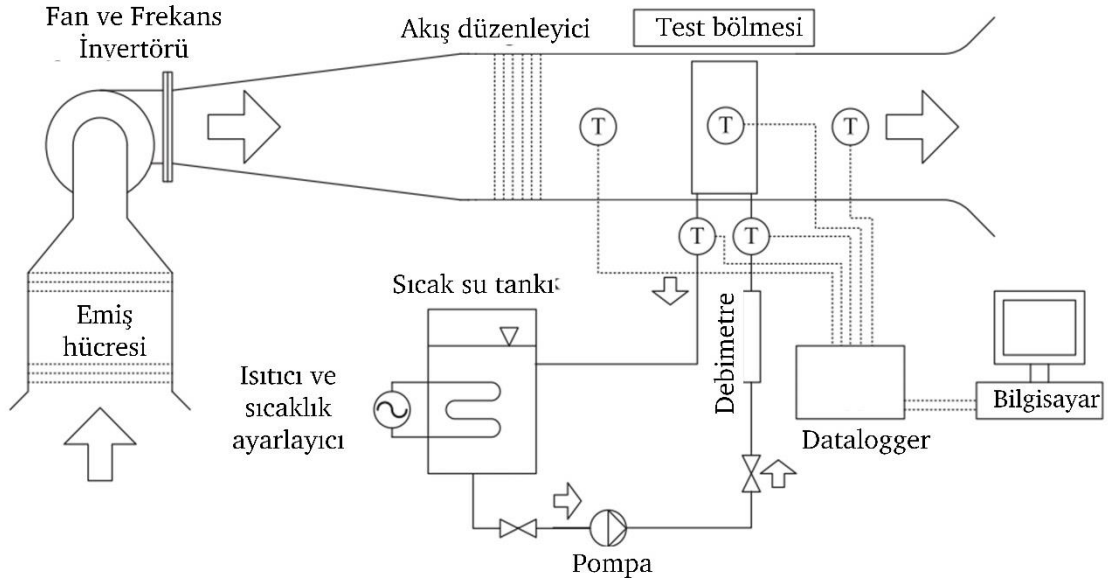
İslamoğlu, Lee vd.[25] tarafından yapılan hava tarafı taşınım katsayısını belirleyen çalışma verileri üzerinden tel kanatlı yoğuşturucunun ısı geçişi

hesaplarında yapay sinir ağlarının (YSA) uygulanabilirliğini incelemişlerdir. YSA yöntemleri için en yaygın öğrenme metodu olan geri yayılım algoritmasını ağın eğitimi ve testinde kullanılmış-ve bu algoritmayı çözmek için C++ programlama dili kullanılarak bir bilgisayar programı geliştirilmiş, deneysel ve YSA yaklaşımı sonuçlarının uyumluluk hata aralığının %3'ten daha az olduğu belirlenmiştir. YSA modelin ısı geçiş hızını belirlemede iyi bir modelleme aracı olduğu ifade edilmiştir [27].

Kumra vd. tel kanatlı yoğunlaştırucuların ısı geçiş hızını belirlemek için Destek Vektör Makinesi(DVM) kullanmıştır. Yöntemin uygulamasında Lee vd.[25] tarafından elde edilen veriler kullanılmıştır. Bir algoritma geliştirmiş ve bu algoritmayı çözmek için MATLAB kullanmıştır. Bu yenilikçi yaklaşımın, geleneksel tekniklerle karşılaştırıldığında minimum hata veren toplam ısı geçişi için denklem oluşturulmasına yardımcı olmuştur. Çalışmada ayrıca Yapay Sinir Ağları ve Destek Vektör Makinesi (DVM) yaklaşımı birbirleri ile mukayese edilmiştir. DVM modelinin YSA modeline göre daha iyi bir performans ve sonuç verdiği ifade edilmiştir [28].

Lee vd.[25] tarafından yapılan deneysel çalışmalarının sonuçlarına göre tel kanatlı yoğunlaştırucularda ısı geçiş hızını belirlemek için alternatif yöntemleri kullanan bir başka çalışma Hayati vd. tarafından yapılmıştır. Çalışmada Uyarlamalı Sinirsel Bulanık Çıkarım Sistem (ANFIS) modeli kullanılmıştır. ANFIS yapılandırmasını test etmek için hibrid öğrenme algoritması yardımıyla ANFIS modelin eğitimi için tahmin edilen değerlerin, deneylerde elde edilen gerçek değerlere göre ortalama bağıl hatası %2,55'den az bulunmuştur ve kurgulanan ANFIS Modeli Islamoğlu [27] tarafından sunulan YSA model ile karşılaştırılmıştır. Bu çalışma ANFIS modelin YSA modeline göre daha iyi sonuçlar verdiği ve ısı geçişi uygulamalarında kullanılabilirliğini göstermektedir [29].

Samana vd. tel kanatlı yoğunlaştırucularda kanat verimini arttırmak için teller yerine R123 akışkanı kullanılan salınlı ısı borusu kullanılmıştır. Zorlanmış taşınım ısı geçişi şartlarında kanat verimini incelemek için deneyler bir hava tüneline yapılmış ve ısı, test yoğunlaştırucu boruları içerinden geçirilen su ile sağlanmıştır [30].



Şekil 1.3 Samana vd. tarafından kullanılan deney düzeneği [22], [31]

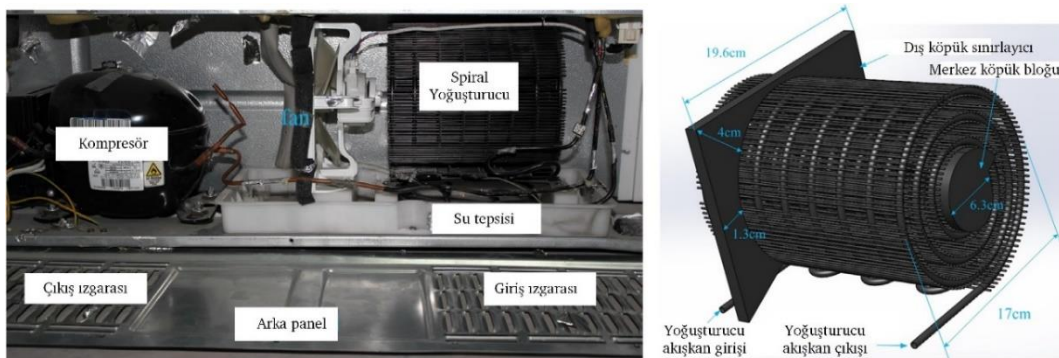
Çalışmanın sonucunda artan hava debilerinde hem tel hem de ısı borularındaki kanat veriminin azaldığı ancak, genel olarak ısı borularının kullanılması durumunda sabit tellere göre kanat veriminin %5 iyileştiği belirlenmiştir. Bunun sebebini ise ısı borularındaki ısı geçişinin iletim ve taşınım ısı geçişine birlikte izin vermesi olarak ifade edilmiştir. Ayrıca tel çapı, boru çapı, tel ve boru aralıkları gibi parametrelerinde değişik hava debilerine göre kanat verimine etkisi incelenmiş ve kanat verimini belirlemeye yönelik korelasyon önermişlerdir. Önerilen korelasyonla elde edilen verilerin deneysel verilerle $\pm\%10$ civarında saptığı belirlenmiştir. Aynı geometrik şartlara göre hava tarafı taşınım katsayısında ise çok belirgin bir değişiklik olmadığı ifade edilmiştir [30].

Nuntaphan vd., Samana vd.[30] yaptığına benzer şekilde aynı test düzeneği üzerinde R123 akışkanının yanı sıra metanol ve asetonun da akışkan olarak kullanılmasına bağlı olarak kanat veriminin değişimini incelemişlerdir. Her üç akışkan içinde kılcal borular içerisinde akışkanın kullanıldığı durumun akışkanın kullanılmadığı duruma nazaran ısı geçişinde %10'a varan iyileşme sağladığı gözlenmiştir. Yoğuşturucu içerisinden dolaştırılan suyun sıcaklığı 45 °C ile 85 °C arasında değişirken havanın sıcaklığının 25 °C sıcaklıkta sabit tutulduğu ifade edilmiştir. 500 mm x 500 mm kesitinde bir kanal içerisine yerleştirilen numuneler 0,2-1,5 kg/s hava debisine maruz bırakılmışlardır. Her üç akışkanın performans değerlerinin birbirine oldukça yakın olduğu belirtilmiştir. Deneysel verilerle

± 10 aralığında uyumluluk gösteren boru çapı karakteristik uzunluk alan bir Nu korelasyonu önerilmiştir [31].

Barbosa Jr. ve Sigwalt spiral şeklinde dizayn edilmiş tel kanatlı yoğuşturucuların ısı-akış performansını incelemişlerdir. Açık çevrim şeklinde çalışan bir rüzgâr tüneline 16 farklı geometride üretilen yoğuşturucular, 0,2 ile 2,0 m/s arasında değişen hava hızlarında test edilmiştir. Tel çapı ve boru çapı sırasıyla 1,4 mm ve 4,76 mm olan yoğuşturucular kullanılmıştır. Tüm deneylerde boru uzunluğu 4 m olarak belirlenmiştir. Tel boşlukları 5 mm ve 10 mm olarak, borular arası mesafe 25 ve 50 mm olarak belirlenmiştir. Radyal yönde borular arası mesafe ise 11 mm ve 15 mm olarak belirlenmiş ve bu değerlerin kombinasyonlarına göre geometriler oluşturulmuştur. Isı kaynağı olarak kapalı çevrim esasına göre çalışan ve akışkan olarak suyun kullanıldığı bir düzenek kullanılmıştır. Ayrıca basınç düşümü de bir fark basınçölçer aracılığıyla belirlenmiştir. Isı geçişi ile basınç düşümü sırasıyla *Colburn-j* ve *Fanning f* faktörler uyarınca incelenmiş ve ilgili parametreleri için korelasyonlar önerilmiştir. Hem f hem de j faktör korelasyonlarıyla bulunan değerler ile deneysel değerler mukayese edildiğinde ± 15 hata aralığında uyumluluk olduğu tespit edilmiştir [32].

Zhang vd. spiral şeklinde imal edilmiş tel kanatlı yoğuşturucuların bir soğutucudaki gerçek çalışma şartları altındaki hava akış alanını ve bu alanın soğutma performansına etkisini araştırmışlardır.



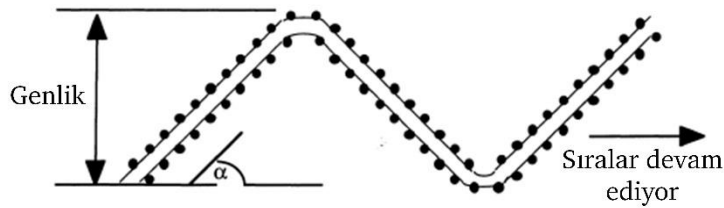
Şekil 1.4 Zhang vd. tarafından kullanılan deney düzeneği [33]

Spiralin merkez ve en dış kısmına köpük plakalar yerleştirilerek bu kısımlarda meydana gelen hava akışındaki kısa devrelerin önüne geçilmiştir. Bunun sonucunda ise yoğuşma sıcaklığında yaklaşık 0,76 ile 0,70 °C arasında değişen bir

düşüş olduğu gözlemlenmiş ve köpüklü durumun köpüksüz duruma göre günlük enerji tüketimini %2,37 oranında azalttığı belirlenmiştir. Kompresörün çalışmadığı süre %4,09 oranında arttığı ifade edilmiştir [33].

Schwentker yaptığı tez ile optimum yoğuşturucu seçimi için tasarlanan CoilDesinger adlı bir programı geliştirmek için 448 adet evsel buzdolaplarında kullanılan tel kanatlı yoğuşturucudan optimum olanını bulmak için çalışma yapmış ve çalışmasında literatürde kabul görmüş olan Hoke vd.[24] ile Lee vd.[25] tarafından önerilen korelasyonları kullanılmıştır [34].

Petroski ve Clausing zikzaklı(testere) şekilde oluşturulmuş tel kanatlı tip yoğuşturucular üzerine deneysel çalışmalar yapılmıştır. Deneysel çalışmalarda akışkan olarak su ve Hoke vd. [24] tarafından kullanılan deney düzeneğini kullanılmıştır. Rüzgâr tüneline yerleştirilen yoğuşturucular üzerinden 0,2 ile 2,0 m/s aralığında değişen hava geçirilerek test edilmiştir. Ayarlanabilir bir test düzeneği ile farklı ebatlardaki yoğuşturucuların performansları incelenmiştir. Işınım ısı geçişi ve kanat verimi, hesaplamalarda göz önünde bulundurulmuştur. Yoğuşturucu hem akış tele dik ($\psi=0^\circ$) hem de akış boruya dik ($\psi=90^\circ$) olmak üzere iki farklı durum için incelenmiştir. Çalışma ile tel boşluğu, toplam boşluk durumunun ısı performans üzerine etkisi araştırılmıştır. Tüm test yoğuşturucularında aynı çaplı teller kullanılmıştır.



Şekil 1.5 Zikzaklı şekilde imal edilen çok sıralı yoğuşturucu [35]

Zikzaklı şekilde oluşturulan yoğuşturucular için tel aralığının, genliğin ve akışa karşı konumun çok etkili parametreler olduğu ifade edilmiştir. Artan genliğin telin taşınım katsayısını arttırdığı gözlenmiştir. Bir diğer sonuç ise yoğuşturucu yan yüzeylerinin kapatılmasına bağlı olarak havanın tel yüzeylerinden daha iyi geçtiği için ısı geçişinde bir iyileşme gözlemlendiği, ancak basınç düşümünün bu duruma bağlı olarak arttığı ifade edilmiştir. İki ayrı tel aralığı için ısı geçişinin değişimi incelenmiş ve artan tel aralıklarının ısı geçişini kısmen iyileştirdiğini

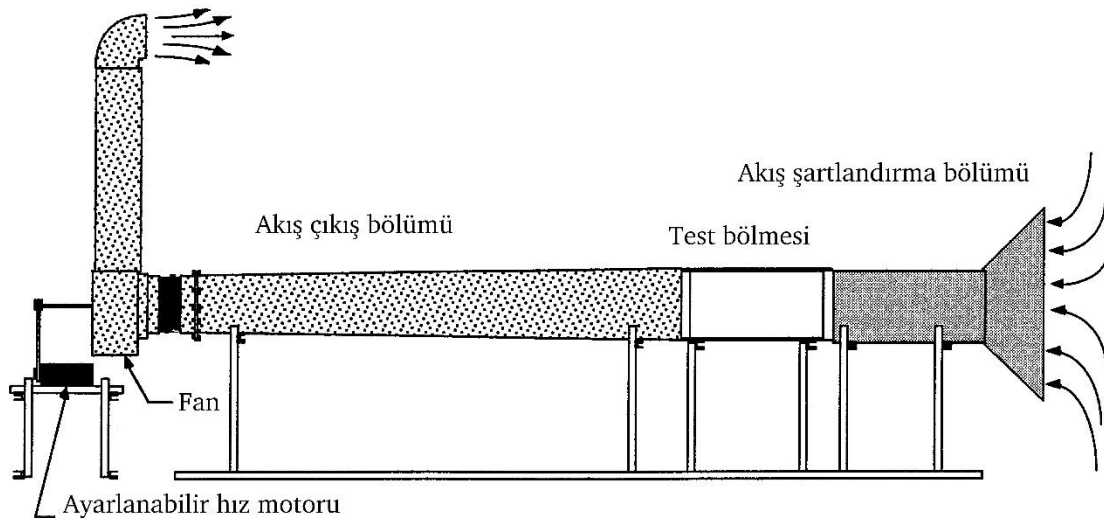
belirlenmiştir. Çalışmada ayrıca hem ısı geçişi hem de basınç katsayısı için Re sayısına bağlı olarak korelasyonlar elde etmişlerdir.

Direnç katsayısı aşağıdaki formül ile ifade edilmiştir.

$$C_p = \frac{\Delta P}{(1/2)\rho_a V_{\max}^2} \quad (1.15)$$

Ancak korelasyonların geçerli olabilmesi açısından $Re_{\max}$ değerinin 370'i aşmaması gerektiği ifade edilmiştir. Taşınım katsayısını bulmaya yönelik korelasyonun ± 10 hata aralığında uyumlu sonuçlar gösterirken C_p katsayısının bulunmasına yönelik korelasyonun ± 12 hata aralığında uyumlu sonuçlar verdiği ifade edilmiştir [35].

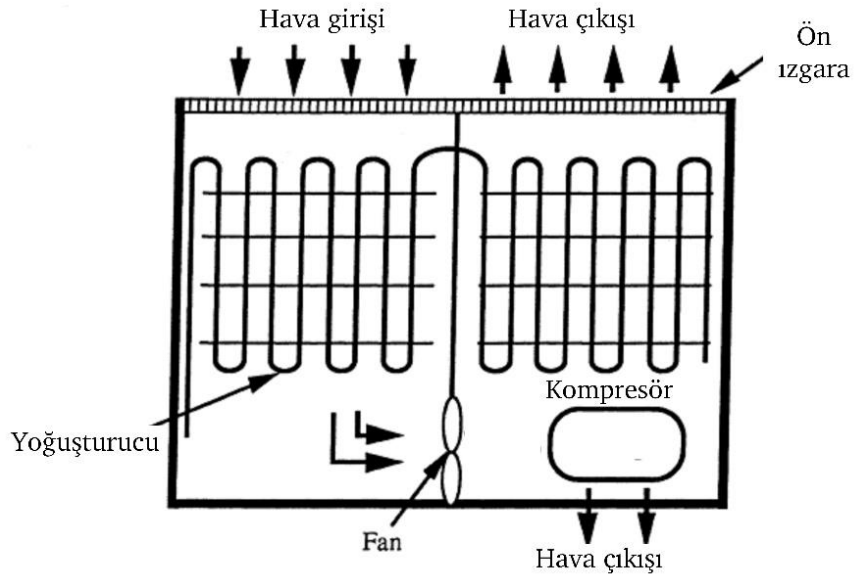
Lum ve Clausing yaptıkları araştırma projesi kapsamında çok sıralı yoğunlaştırucularda ısı geçişi ve basınç düşümünü irdelemişlerdir. 0,2 m/s ile 2,0 m/s arasında değişen hava hızlarında Şekil 1.6'da görülen rüzgâr tüneli ile deneyler yapılmıştır. Yoğuşturucu iç tarafında akışkan olarak su kullanılmıştır. Yoğuşturucu atak açısı $45^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$ aralığında $\psi=0^\circ$ ve $\psi=90^\circ$ şartlarına bağlı olarak incelenirken tel çapı, tel aralığı, boru aralığı ve sıralar arası boşluk gibi geometrik parametrelerin ısı geçişine etkisi de incelenmiştir. Bunun yanı sıra zikzaklı tel yerleşimine, tek yüzeye tellerin eklenmesine ve zikzak şeklinde boru yerleşimine bağlı ısı performans üzerine çalışılmıştır. Çalışma da aynı zamanda ısıtım ile gerçekleşen ısı geçişi hesaplamaları da yapılmıştır [36].



Şekil 1.6 Lum vd. tarafından kullanılan rüzgâr tüneli [36]

Sonuç olarak ise tek sıralı yoğuşturucuların çok sıralı yoğuşturucuları simüle etmek noktasında yeterli olduğunu, çalışılan hız aralığına bağlı olarak tel üzerindeki taşınım katsayısının sıralar arası mesafenin 3 cm üzerinde olması durumunda yine tek sıralı yoğuşturucular gibi davrandığı ifade edilmiştir. Atak açısının teller üzerindeki ısı geçişinde oldukça önemli olduğu ve mümkün olduğunca büyük atak açılara göre dizayn yapılması gerektiği ifade edilmiştir. Basınç düşümü ise $\psi=0^\circ$ durumunda $\psi=90^\circ$ durumuna göre oldukça büyük basınç düşümüne neden olmaktadır. Bu nedenle $\psi=0^\circ$ oryantasyonlu tel kanatlı yoğuşturucu dizaynların çok tercih edilmemesi gerektiğinin öngörüldüğü ifade edilmektedir. Çalışmanın sonunda C_p ve Nu_w 'e ait korelasyonlar önerilmiştir [36].

Admiraal ve Bullard soğutucu sistemlerdeki hem yoğuşturucu hem de evaporatör için çapı ve soğutucu akışkanı göz önüne alan değişken iletkenlik adında bir model önermişlerdir. Bu kapsamda tel kanatlı yoğuşturucular dikkate alınmış ve önerilen model ile boru çapının ve hava debisinin çok önemli iki parametre olduğu belirtilmiştir [37].



Şekil 1.7 Admiraal ve Bullard tarafından kullanılan deney düzeneği [37]

Yoğuşturucuya temas etmeyen hava kaçaklarının önlemesi durumunda aynı miktarda ısı geçişini sağlamak üzere yoğuşturucu boyutlarında %10'a varan küçülmelere gidilebileceği ifade edilmiştir.

Tablo 1.4 Literatürde zorlanmış taşınım şartlarında tel kanatlı
yoğuşturucular için önerilen korelasyonlar

No	Yazar	Karakteristik Uzunluk	Korelasyon	Yerleşim
1	Hoke vd. [24]	D_w, D_t	$Nu_w = CRe_w^n$	$\psi = 0^\circ, 0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$
			$C = 0,385 - 0,350 \cos(\alpha) \exp(-0,00102\alpha^2)$	
			$n = 0,531 - 0,267 \cos(\alpha) \exp(-0,00181\alpha^2)$	$\psi = 90^\circ, 0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$
			$C = 0,339 - 0,290 \cos(\alpha) \exp(-0,00121\alpha^2)$	
			$n = 0,540 - 0,241 \cos(\alpha) \exp(-0,00344\alpha^2)$	$\psi = 0^\circ, -20^\circ \leq \alpha \leq 20^\circ$
			$Nu_w = CRe_w^n \left[1 - C_2 \left\{ e^{(-C_3 S_w)} \right\} \right]$	
			$C = 0,270 - 0,243 \cos(abs(\alpha) - 4,87) \exp(-0,00234(\alpha - 0,902)^2)$	
			$n = 0,585 + 0,249 \cos(abs(\alpha) + 20,0) \exp(-0,00181(\alpha + 1,62)^2)$	
			$C = 0,259 - 0,232 \cos(\alpha) \exp(-0,00289\alpha^2)$	$\psi = 90^\circ, -40^\circ \leq \alpha \leq 40^\circ$
			$n = 0,55 + 0,269 \cos(\alpha) \exp(-0,00597\alpha^2), C_2=2,32, C_3= 100$	

Tablo 1.4 Literatürde zorlanmış taşınım şartlarında tel kanatlı
yoğuşturucular için önerilen korelasyonlar (devamı)

No	Yazar	Karakteristik Uzunluk	Korelasyon	Yerleşim
2	Lee vd.[25]	D_w, D_t	$Nu_{w, Lee vd.} = F_a Nu_{\check{Z}kauskas}$ $Nu_{t, Lee vd.} = F_a Nu_{\check{Z}kauskas}$ $F_a = 1,3$ $Nu_{w, Lee vd.} = F_p Nu_{\check{Z}kauskas}$ $Nu_{t, Lee vd.} = F_p Nu_{\check{Z}kauskas}$ $F_p = 0,063 Re_{D_t}^{0,37}$	Dikey Yatay
3	Samana vd.[30]		$\eta = 37,098 Re_{D,max}^{-0,0277} Pr^{9,3026} \left(\frac{S_t - D_t}{D_t} \right)^{-0,01619} \left(\frac{S_w - D_w}{D_w} \right)^{0,1017}$	Dikey
4	Nuntaphan vd. [31]		$Nu = 1,293 Re_{D,max}^{0,43} Pr^{0,30}$	Dikey
5	Barbosa Jr ve Sigwalt[32]		$j = a_j \ln(Re_a) + b_j$ $f = a_f \ln(Re_a) + b_f$	Dikey

Tablo 1.4 Literatürde zorlanmış taşınım şartlarında tel kanatlı
yoğuşturucular için önerilen korelasyonlar (devamı)

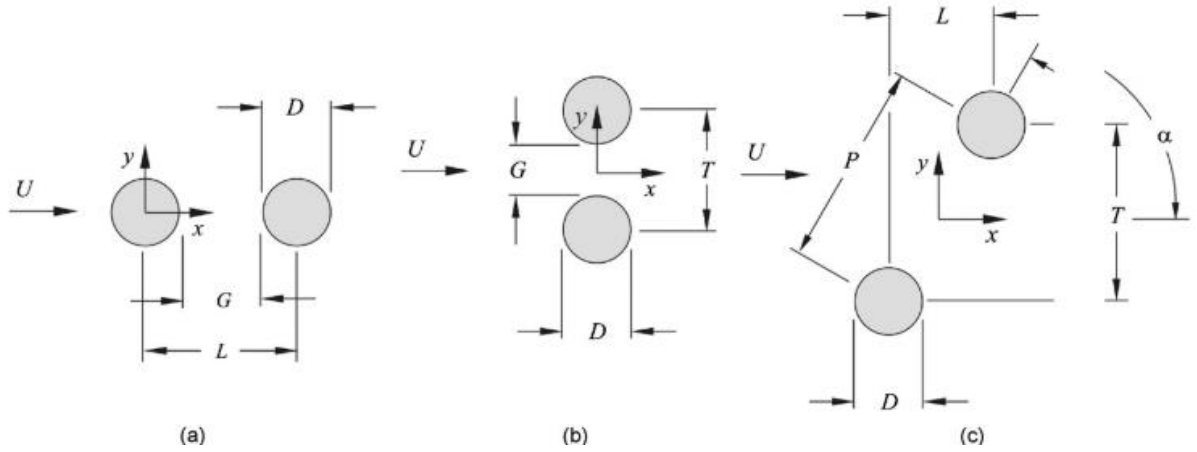
No	Yazar	Karakteristik Uzunluk	Korelasyon	Yerleşim
6	Petroski ve Clausing[35]	H, D_t	$Nu_w = 0,112 Re_{max}^{0,667}$ $C_p = 72,7 Re_{max}^{0,603}$	Yatay Dikey
7	Lum ve Clausing[36]	D_w, D_t	$Nu_w = C Re_{max}^{0,5744}$ $C = 0,2591$ $C = 0,502 \sin(\alpha) \exp(-1,014\alpha + 0,3775\alpha^2)$ $C_p = D_1 + D_2 Re_{w,max}^{-0,06533}$ $D_1 = -0,7856 \sin(\alpha) \exp(1,117\alpha - 0,3229\alpha^2)$ $D_2 = 2,451 \sin(\alpha) \exp(0,2858\alpha)$	$\psi = 0^\circ, 45^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$ $\psi = 90^\circ, 45^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$ $\psi = 0^\circ, 45^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$ $\psi = 90^\circ, 45^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$

Tablo 1.5 Literatürde zorlanmış taşıma çalışmalarında kullanılan tel kanatlı yoğunlaştıruculara ait geometrik özellikler

No	Yazar	D_w (mm)	D_t (mm)	S_w (mm)	S_t (mm)	N_w (adet)	N_t (adet)	L_w (mm)	L_t (mm)	S_L (mm)
1	Hoke vd. [24]	1,21, 1,22, 1,24, 1,35, 1,58, 1,6	4,74, 4,75, 4,76, 4,80, 4,92, 6,21	4,56, 4,57, 5,22, 5,34, 5,39, 5,68, 6,81	25,4, 31,8, 50,8	64, 148, 150, 166, 168, 176	9, 10, 11, 12, 16, 18, 24	279, 383, 406, 446, 559, 572, 610	256, 483, 575, 578, 591, 629, 660, 679	-
2	Lee vd. [25]	1,55	4,66	-	28	14	-	154	220	-
3	Nuntaphan vd. [30]	2,45	22,25	28,3	50	-	10	-	510	-
4	Barbosa Jr ve Sigwalt [32]	1,4	4,76	5, 10	25, 50	-	-	-	-	-
5	Zhang vd. [33]	1,4	4,76	-	-	-	-	-	-	-
6	Petroski ve Clausing [35]	1,45, 1,59	4,7, 4,78	4,78, 5,77	-	182, 220, 690	28	-	-	Genlik: 56,4-132
7	Lum ve Clausing [36]	1,38, 1,58	4,80, 4,83, 4,85	5,08, 6,07, 6,34, 6,35	25,4, 31,8, 50,8	60, 66, 150, 204	3, 5, 6	148, 150, 151, 152	186, 202, 471, 515	16,3, 31,2, 46,2, 61,1, 76

1.1.3 Çapraz Akışa Maruz Silindir Çiftlerinin Isı ve Akış Karakteristiği Üzerine Çalışmalar

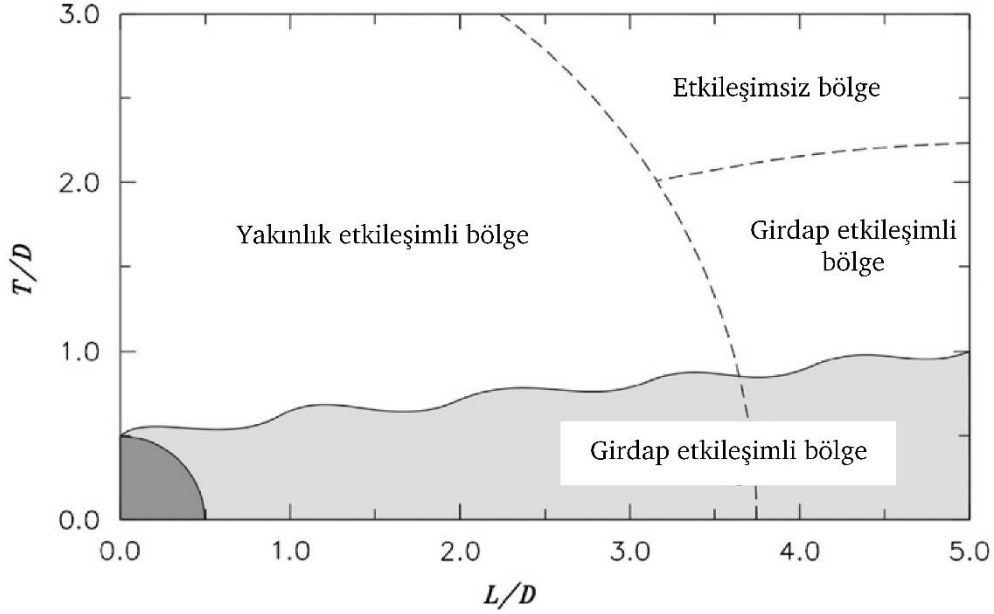
Çapraz akışa maruz silindirler, tekli, çiftli ve çok sıralı olarak pek çok mühendislik uygulamasında sıklıkla kullanılmaktadır. Bu alanda çok sayıda çalışma yapılmış olup yapılan çalışmalar ağırlıklı olarak cisimlerin neden olduğu türbülansın görselleştirilmesi, titreşim, aerodinamik kuvvetler vb. parametrelerin etkilerini incelemeye yöneliktir [38–42]. Isı geçişinin incelendiği çalışmalar ise oldukça az sayıdadır [43], [44]. Tek sıra tel kanatlı yoğuşturucu göz önüne alındığında boru ön ve arka yüzeyine kaynatılan tellerde silindir çiftleri olarak düşünülebilir. Ayrıca iki ve üstü sıralı dizilimlerde boru sıralarının birbiriyle ilişkisi de bu kapsamda değerlendirilebilir. Bununla birlikte silindir çiftleri üzerine yapılan çalışmalar ağırlıklı olarak düşük Re ($Re < 1000$) sayılarında yapılmıştır [40]. Uygulamada kullanılan zorlanmış taşınım maruz tel kanatlı yoğuşturucularda tel ve boru çapına göre Re sayıları büyük oranda 40-1000 aralığında kalmaktadır. Hem yerleşim hem de Re sayısı aralığı göz önünde bulundurulduğunda silindir çiftleri üzerinde yapılan incelemelerin irdelenmesi tel kanatlı yoğuşturucularda akış ve ısı geçişinin anlaşılmasında faydalı olacaktır.



Şekil 1.8 Çapraz akışa maruz silindir çiftleri a) Tandem dizilim, b) Yan yana dizilim, c) Şaşırtmalı dizilim [40]

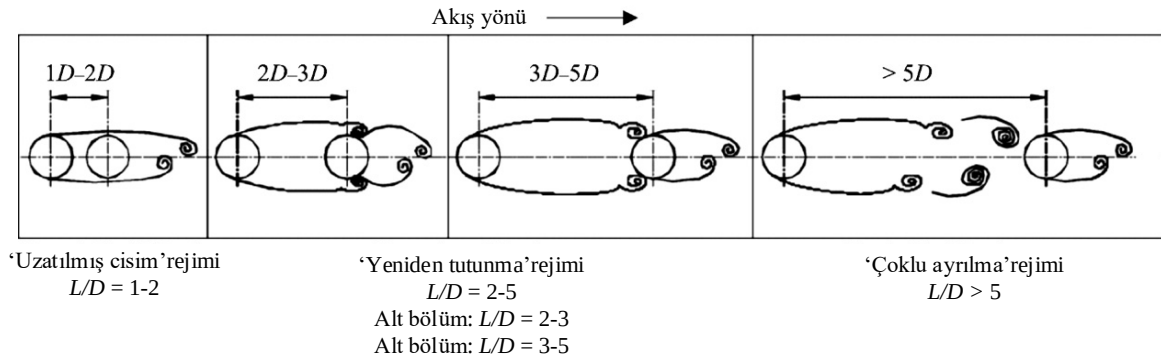
Silindir çiftleri temel olarak Şekil 1.8’de görüldüğü üzere yan yana, tandem ve şaşırtmalı olarak yerleştirilebilmektedir. Her bir dizilim kendi içerisinde farklı akış karakteristikleri oluşturur. Akış karakteristiklerini etkileyen temel parametreler enine adım(L/D) , boyuna adım(T/D), çapraz adım (P/D) oranı, atak açısı(α) ve Re sayısı

olarak sıralanabilir. Silindir çiftleri ilgili dizilim şartlarında Re sayısına da bağlı olarak girdap etkileşimli, yakınlık etkileşimli ve etkileşimsiz bölge olmak üzere üç bölge oluşturmaktadır.



Şekil 1.9 Girdap ve yakınlık etkileşimli bölge sınırları [41]

Tandem dizilim: İki silindir akış yönünde birbirine göre tandem (sıralı/ardışık) yerleştirildiğinde akış yönündeki arka sırada bulunan silindirin ön silindir kaynaklı akış bölgesinden etkisi altında kaldığı belirlenmiştir. Bu durum ön silindirden kaynaklı girdap caddeleri ve şekilleri dolayısıyla akış karakteristiğini önemli ölçüde etkilemektedir [45]. Böylesi akışlarda ön silindir bir “türbülans üretici”, arka sıradaki silindir “sürüklenme azaltıcı aygıt” veya “girdap sabitleyici” olarak karşılıklı ilişki içerisinde [46]. Tandem dizilimde akış görselleştirme çalışmaları sonucunda enine adım(L/D) ve Re sayılarına göre akış rejimleri temelde üç farklı akış rejimi üzerinden adlandırılmıştır. Bu rejimler sırasıyla L/D oranı yaklaşık 2 değerine kadar “**uzatılmış cisim**”, 2-5 aralığında “**yeniden tutunma**” ve 5 üzeri “**çoklu ayrılma**” rejimi olarak adlandırılmıştır [47].



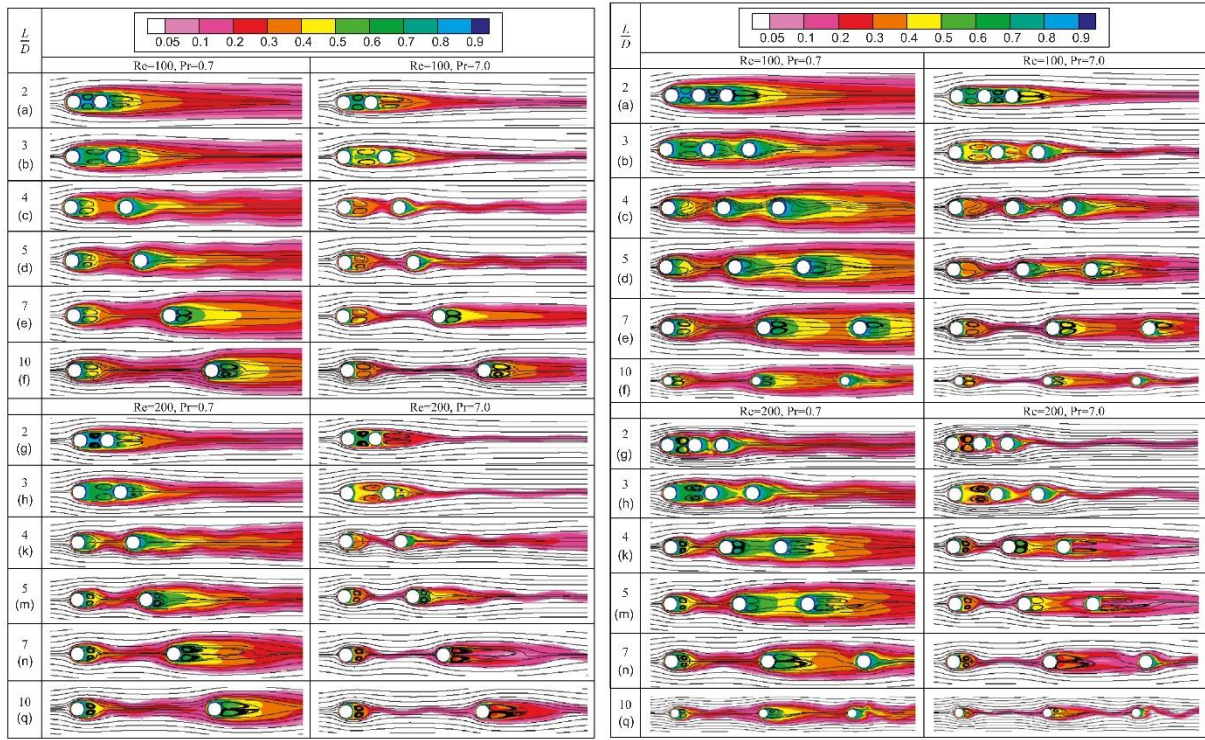
Şekil 1.10 Tandem dizilimde akış rejimleri dolayısıyla oluşan akış desenleri [47]

- **Uzatılmış cisim rejimi:** Bu tip akış rejimleri boyuna adımın $1 < L/D < 2$ aralığında olduğu akış şartlarında görülmektedir. Silindirler birbirine çok yakın olduğundan ara bölgedeki akış durgun bir karakter sergilemektedir. Ayrıca, ön silindirden ayrılan akış bölgesi arka silindiri etkisi altına alarak uzatılmış tek bir cisim gibi davranış göstermektedir.
- **Yeniden tutunma rejimi:** Bu akış rejiminin temel özelliği ön silindirden ayrılan akışın arka silindir üzerindeki sınır tabakayı yakalaması dolayısıyla iki silindir arasında düşük hızda dönüşlü akışın meydana gelmesidir [40], [47]–[49]. Zdravkovich silindir çiftleri üzerinde öncü çalışmalara sahip olup, yaptığı çalışmalarda bu aralığın Re sayısına bağlı olarak $1,2 < L/D < 3,8$ aralığında değişebildiğini ifade etmiştir. Genel olarak artan Re sayılarında yeniden tutunma rejimini oluşturan L/D oranının azaldığı gözlenmiştir [41]. Zhou ve Yiu bu rejimde ön silindirden ayrılan akışın arka silindir üzerinde sınır tabakayı ön ($L/D=3-5$) veya arka yüzeyden ($L/D=2-3$) yakalamasına göre iki alt bölüme ayırmıştır [47].
- **Çoklu ayrılma rejimi:** Boyuna adım oranı (L/D) Zdravkovich’e [41] göre 3,4-3,8 oranının üzerinde olduğunda, Zhou ve Yiu’ya göre ise $L/D > 5$ oranlarında arka silindir sonrasının yanı sıra ara boşlukta da Karman girdap caddeleri olduğu rejimdir [47].

Mahir ve Altaç 2, 3, 4, 5, 7 ve 10 olmak üzere altı farklı L/D aralığı ve $Re=100$ ve 200 değerlerinde tandem dizilim silindir çiftlerinin ısı geçiş etkilerini de HAD analiz ile incelemişlerdir. Her iki Re sayısı için de $L/D=4$ oranına kadar ön silindir üzeri ortalama Nu sayısının arttığı bu değerden sonra ise Nu sayısındaki değişimin çok az olduğu belirlemişlerdir. Bu şartlar altında $L/D=2-3$ değerinde arka silindir üzeri Nu

sayısı $L/D=4$ aralığındaki değerin yaklaşık %50'sine karşılık gelmektedir. Bununla birlikte sayısal çalışma $L/D > 4$ üzerine çıktığında arka sıradaki silindir üzeri ortalama Nu sayısı ön sıradaki silindir üzeri Nu sayısının yaklaşık %80'ine ulaştığı ifade edilmiştir. Akış rejiminin yeniden tutunma rejiminden çoklu ayrılma rejimine geçmesinin ısı geçişini oldukça etkilediği görülmektedir [44].

Benzer sonuçlar benzer aralıklarda çalışan Harimi ve Saghafian tarafından yapılan çalışma ile de örtüşmektedir. Çalışmada üç adet silindir üzerinde de çalışmalar yapılmış olup $Re=200$ ve $L/D=5$ oranında 2. ve 3. sıradaki silindir üzeri ortalama Nu sayısı ilk sıradakinin Nu sayısına oranla sırayla %40 ve %32'sine denk gelmektedir [43].

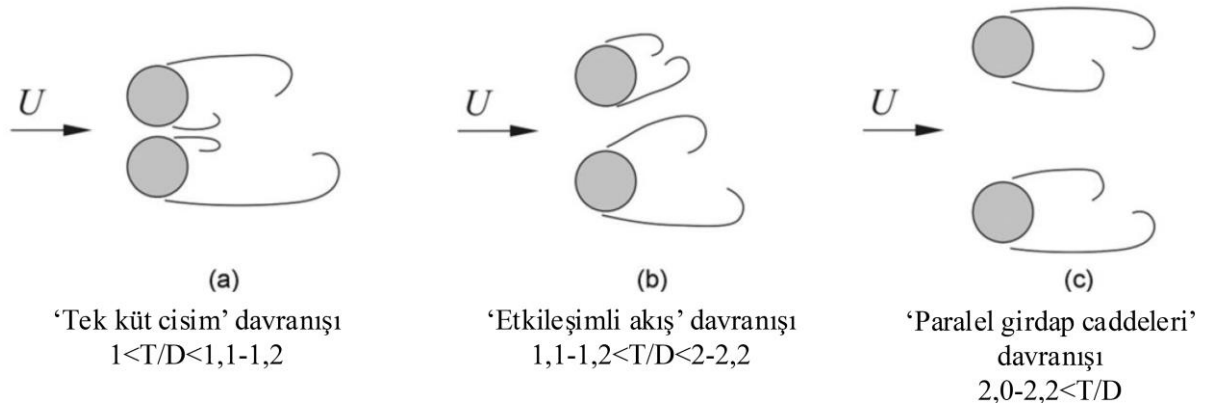


Şekil 1.11 Tandem dizilimde $Re= 100$ ile $Pr=0,7$ ve $7,0$ değerleri için farklı L/D oranlarına göre akış desenleri [43]

Buyruk[50] $L/D = 1, 13, 2, 3, 6$ ve $Re=80, 120, 200$ değerlerinde tandem dizilimde ısı geçişini incelemiştir. Tüm Re aralıklarında ön tel üzeri yerel Nu sayısının 120° 'ye kadar benzer karakter gösterdiği ancak bu açıdan sonra aralıklara göre taşınım katsayısının değiştiği gözlenmiştir. Buna karşın arka silindir üzeri yerel Nu sayısının $0-60^\circ$ arasında L/D oranıyla önemli ölçüde ilişkili olduğu ve bu değerden sonra L/D oranının etkisinin az olduğu belirlenmiştir.

Tandem dizilime göre oluşan akış türlerinde “uzatılmış cisim”, “yeniden tutunma” rejimlerindeki basınç katsayısının tek bir silindire nazaran ortalamada daha az olduğu ve L/D oranı arttıkça bu değerin arttığı ifade edilmektedir. “çoklu ayrılma” rejiminde artan L/D oranlarında ise basınç katsayısının tek silindir kaynaklı basınç katsayısına yaklaştığı ifade edilmektedir [40].

Yan yana dizilim: İki veya daha çok sayıda silindir akışa dik konumda yan yana dizildiğinde birbirlerine olan mesafeleri akışı oldukça etkilemektedir. Bu mesafe enine adım olarak ifade edilip T/D olarak gösterilmektedir. Yan yana dizilim dolayısıyla silindir çiftlerinde yakınlık etkileşimli akış karakteristikleri oluşmaktadır. Yan yana dizilimde aşağıdaki T/D oranlarına göre oluşan akış davranışı üç farklı şekilde adlandırılmıştır [40];

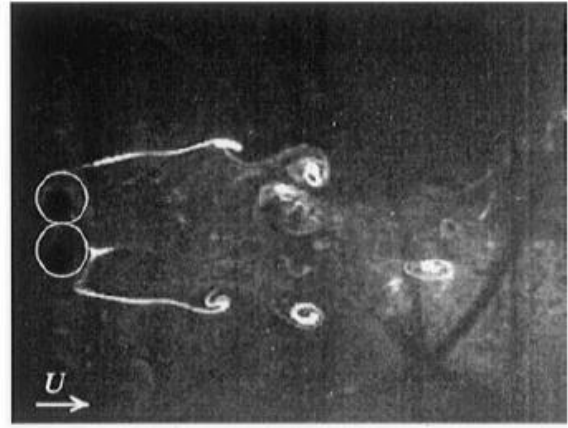


Şekil 1.12 Yan yana dizilimde şartlarındaki akış rejimleri dolayısıyla oluşan akış desenleri [47]

- **Tek küt cisim rejimi (Single-bluff-body behaviour):** İki silindir birbirine bitişik ya da $T/D < 1,2$ değerlerinde tek bir cisim gibi davranış sergilemektedir. Bu durumda cisimlerin arkasında tek bir Karman girdap caddesi oluşmaktadır [51].



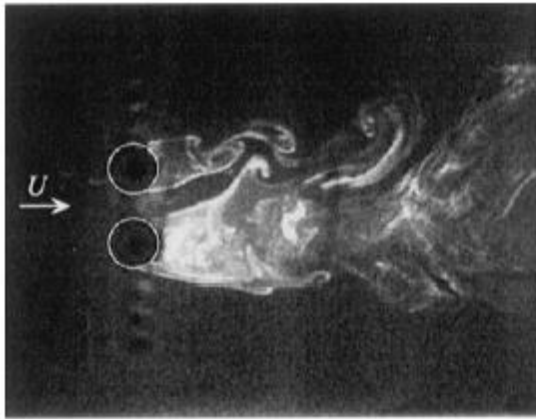
(a)



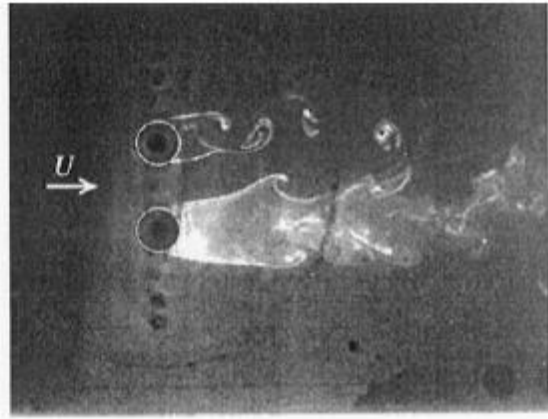
(b)

Şekil 1.13 Yan yana dizilimde $T/D = 1,0$ için akış görselleme çalışmaları a) $Re=1320$ 'de oluşan akış deseni, b) $Re=820$ 'de oluşan akış deseni [51]

- **Etkileşimli akış rejimi (Biased flow pattern) ($1,2 < T/D < 2-2,2$):** T/D oranı 1,2 ile 2-2,2 aralığında oluşan akış karakteristiği bu ad ile ifade edilmektedir. Her bir silindir arka tarafında Karman girdap caddeleri oluşturmaya karşın bu girdap caddelerin birbirini etkilediği asimetrik davranış gösterdiği gözlenmiştir.



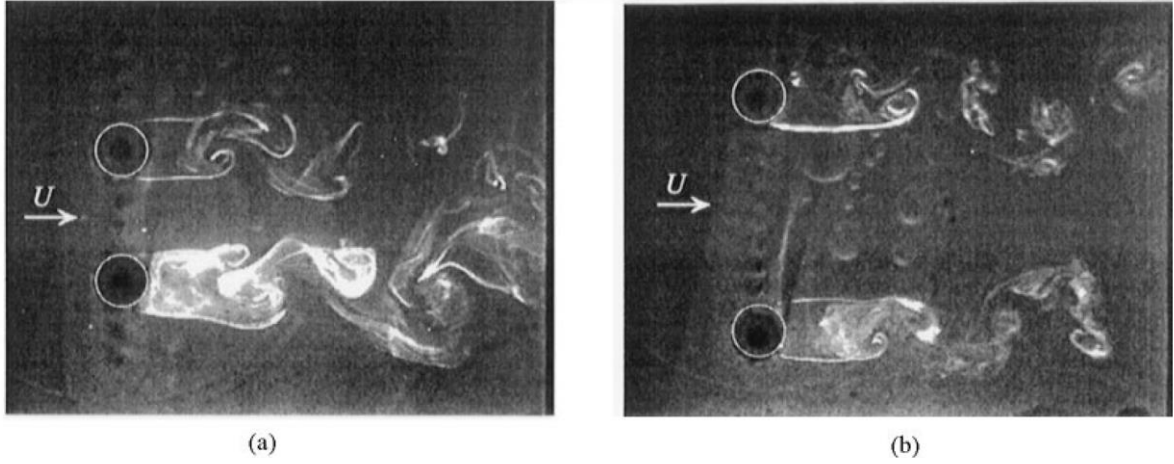
(a)



(b)

Şekil 1.14 Yan yana dizilimde $Re=1000-3000$ 'de "Etkileşimli Akış" rejimi sonucu oluşan akış desenleri a) $T/D=1,5$, b) $T/D=2,0$ [51]

- **Paralel girdap caddeleri rejimi (Parallel vortex streets) ($2-2,2 < T/D$):** Bu aralıktan sonra her bir silindir tek silindir üzeri akışa benzer akış karakteristiği göstermektedir. Sumner vd. Parçacık Görüntülemeli Hız Ölçüm(PIV) yöntemi ile $Re=500-1300$ aralığında yaptıkları görselleme çalışmalarında T/D aralığının 2-2,2 değerlerinin üzerine çıktığında silindirlerin birbirine paralel, daha bağımsız ve daha senkron akış karakteristiği gösterdiklerini görselleştirmişlerdir[51].

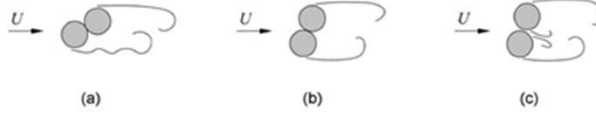


Şekil 1.15 Yan yana dizilimde $Re=1000-3000$ 'de "Paralel Girdap Caddeleri" rejiminde oluşan akış desenleri a) $T/D = 2,5$, b) $T/D = 4,5$ [51]

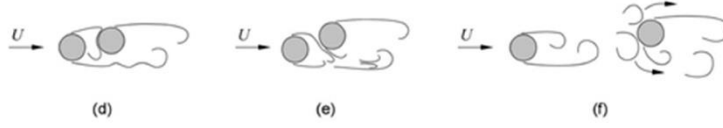
Yamamoto ve Hattori Re aralığının 75-100 aralığında olduğu akış şartlarında tek sıra çok sayıdaki silindir üzerinde ısı geçişinin T/D oranına göre incelemişlerdir. Sonuç olarak T/D oranının 3,3 ve üzeri olduğu durumda girdap caddelerinin tek silindir sonrası oluşan yapıya benzediğini ifade etmişlerdir. Buna karşın $T/D = 2,0$ olduğunda girdap caddelerin birbirini etkilemesi dolayısıyla farklı akış yapıları oluştuğunu saptamışlardır. Ancak her iki durumda da ortalama ve yerel Nu sayısının çok değişmediğini tek bir silindir üzeri akışta bulunan Nu sayısına yakın olduğunu belirlemişlerdir [52].

Şaşırtmalı dizilim: Şaşırtmalı dizilimde hem yan yana dizilimde hem de tandem dizilimde görülen akış tipleriyle karşılaşılmaktadır. Şaşırtmalı dizilim ön ve arka sıradaki silindirlerin akış yönüne göre geliş açısıyla veya enine adımın (T/D) boyuna adıma (L/D) oranına göre incelenmektedir. Şaşırtmalı dizilim yan yana dizilime benzer şekilde tek küt cisim ile küçük ve büyük geliş açılarına göre üç temel davranış göstermektedir. Sumner vd. Re sayısının 850-1900 arasında değiştiği PIV testleri sonucunda her bir yapının kendi içerisinde üç farklı akış karakteristiği gösterdiğini ifade etmişlerdir[39].

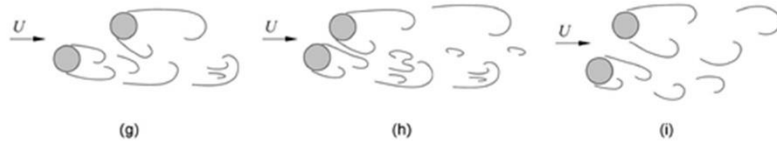
Tek küt cisim akış
desenleri



Düşük geliş açısına
bağlı akış desenleri



Büyük geliş açısına
bağlı akış desenleri



Artan P/D oranları
→

Şekil 1.16 $Re=850-1900$ 'de şaşırtmalı dizilim dolayısıyla oluşan akış rejimleri a) Tek Küt Cisim Tip 1, b) Tek Küt Cisim Tip 2, c) Kısmi Tahliye, d) Kayma Tabakasına Tutunma, e) Endüklenmiş Ayrılma, f) Girdap Çarpması, g) Girdap Çiftleri ve Sarmalı, h) Girdap Çiftleri, Saçılımı ve Sarmalı, i) Senkron Girdap Caddeleri [51]

- **Tek küt cisim Tip 1 (Single bluff-body)** – ($P/D= 1,0 -1,125$, $\alpha = 0^\circ-45^\circ$) : Silindir üst kayma tabakalarında dengesizlikler mevcuttur.
- **Tek küt cisim Tip 2 (Single bluff-body)** – ($P/D= 1,0 -1,125$, $\alpha = 45^\circ-90^\circ$): Düşük frekansta nispeten düzgün tek bir Karman girdap caddesi görülmektedir.
- **Kısmi tahliye (Base bleed)** – ($P/D= 1,125 -1,25$, $\alpha = 45^\circ-90^\circ$): Cisimler arasındaki dar boşlukta zayıf bir hareket gözlenirken tek bir Karman girdap caddesi oluşmaktadır.
- **Kayma tabakasına tutunma (Shear layer reattachment)** ($P/D= 1,125 -4$, $\alpha = 0^\circ-20^\circ$): Ön silindirin üst kısmından ayrılan akış arka silindirin sınır tabakasını yakalar. Alt kısmında ayrılan akış ise Tek küt cisim tip 1 akış davranışı sergiler.
- **Endüklenmiş ayrılma (Induced separation)**– ($P/D= 1,125 - 3$, $\alpha = 10^\circ - 30^\circ$): Cisimler arası dar bölgede oluşan akış, arka silindirin alt yüzeyinde de ayrılmaya ve girdaplara neden olur.
- **Girdap çarpması (Vortex impingement)** – ($P/D= 3,0 - 5,0$, $\alpha = 0^\circ-20^\circ$): Ön silindir kaynaklı girdaplı bölge bir tutunma olmaksızın arka silindire çarpar.
- **Girdap çiftleri ve sarmalı (Vortex pairing and enveloping)** – ($P/D= 1,25 - 4,0$, $\alpha = 20^\circ-90^\circ$): Her iki cisim arkasında da girdaplar oluşmaktadır. Bu durumda boşlukta da girdaplar oluşur. Her iki cisim sonrası oluşan girdaplar birbirinin etki alanına girerek birbirini sarmalar.

- *Girdap çiftleri, saçılımı ve sarmalı (Vortex pairing, splitting and enveloping)–* ($P/D= 1,25 - 4,0$, $\alpha= 20^\circ-90^\circ$): Üstteki duruma benzer ancak ara boşlukta girdap olmaz. Ara bölgede oluşan girdaplar birbirini sarmaksızın belli hat boyunca yalnız bir saçılım davranışı gösterir.
- *Senkron girdap caddeleri(Synchronized vortex shedding)–* ($P/D= 1,25 - 4,0$, $\alpha= 20^\circ-90^\circ$) : Her iki cisim arkasında da farklı şekillerde Karman girdap caddeleri oluşmakta ve cisimler birbirinden daha bağımsız karakter sergilemektedir [39].

Han vd. $Re=120$ değerinde şaşırtmalı, tandem ve yan yana dizilimde silindir çiftleri üzerinde ısı geçişini sayısal olarak incelemişlerdir. Tek silindire göre kıyaslandığında ön silindirin $L/D=1$ ve $T/D =2,5$ değerinde maksimum değere ulaştığını belirlemişlerdir. Buna karşın $L/D=1,25$ ve $T/D=0$ (tandem dizilim) şartlarında girdap bölgesinin ön silindir üzeri Nu sayısını minimize ettiğini saptamışlardır. Benzer sonuçların arka silindir üzeri Nu sayılarında da bulunduğu gözlenmiştir. Silindir çiftlerinin birlikte düşünüldüğü $L/D= 1$ ve $T/D= 1,25$ değerlerinin üzerinde ısı geçişinde iyileşme gözlendiğini ifade edilmiştir [53].

1.1.4 Boru Demetlerinde Isı ve Akış Karakteristiği Üzerine Çalışmalar

Silindir çiftleri üzerine yapılan çalışmalar akış karakteristiğini anlamak açısından önemlidir. Ancak ısı değiştirici uygulamalarında silindir kullanımı ağırlıklı olarak çok sıralı dizilimlerde olmaktadır. Genel olarak ısı değiştiricilerde çok sıralı silindirler boru demetleri olarak adlandırılmaktadır. Bu kapsamda çok sıralı boru demetlerinde ısı geçişi ve basınç düşümüne ilişkin çalışmalar incelenmiştir. Boru demetleri üzerine çalışmaların 20 yy. başlarından itibaren başladığı görülmektedir. Günümüzde de pek çok araştırmacı için halen ilgi çekici bir alan olup, pek çok çalışmanın yapıldığı anlaşılmaktadır. Bu alandaki öncü çalışmalar Colburn[54], Grimison [55], Hüge[56] ve Pierson[57] tarafından yapılan şaşırtmalı ve/veya sıralı dizilim üzerine deneysel çalışmalardır. İlgili çalışmalardan elde edilen veriler hem ısı geçişi hem de basınç düşümünün belirlenmesine öncü korelasyonlar oluşturulmasında altyapı olmuştur. Žkauskas ve Ulinskas boru demetlerini $T/D \times L/D$ oranlarına göre kompakt veya geniş boşluklu ısı değıtiricisi olarak adlandırmıştır. Buna göre $T/D \times L/D \leq 1,25 \times 1,25$ ise kompakt , $2 \times 2 \leq T/D \times L/D$ ise geniş boşluklu olarak adlandırılmaktadır [58], [59]. Boru demetlerinde genel olarak şaşırtmalı dizilimin tandem dizilime nazaran ısı geçişini iyileştirdiğı ancak basınç düşümünü de arttırdığı belirlenmiştir [50], [60], [61]. Boru demetleri üzerine yapılan çalışmalardan bazıları L/D , T/D , P/D , Re sayısı, Dizilime göre Tablo 1.6'da gösterilmiştir. Tablo 1.6'da L/D , T/D , P/D , sırasıyla enine adım, boyuna adım ve şaşırtma oranını, S ve Ş, sıralı dizilim ve şaşırtmalı dizilimi, N, D ve A ise nümerik, deneysel ve analitik çalışmayı ifade etmektedir.

Tablo 1.6 Boru demetleri üzerine yapılan çalışmalar ve sonuçlar

Yazar			<i>Re</i>	Dizilim	Önemli Bulgu
Beale ve Spalding [62]	<i>L/D</i>	-	30-3000	Ş/S (N)	Kare ve elmas dizilim şeklinde oluşturulan silindirler üzeri ısı-akış incelemeyi Strouhal sayısı (<i>St</i>), Nusselts sayısı (<i>Nu</i>), Euler sayısı (<i>Eu</i>), sürtünme, kaldırma kuvveti ve basınç kuvvetleri üzerinden zamana bağlı nümerik analiz yöntemleriyle incelemişlerdir.
	<i>T/D</i>	-			
	<i>P/D</i>	2			
Hassan ve Ibrahim [63]	<i>L/D</i>	1,4, 1,5	$10^4 - 10^5$	S (N)	4 sıra boru demetleri üzerinde türbülans nedeniyle oluşan akış karakteristiklerini bulmak için LES yöntemi ile HAD analizi ve deneysel çalışma yapmışlardır. Görselleme ile art izi bölgesindeki girdap oluşumları incelenmiştir.
	<i>T/D</i>	1,4, 1,5			
	<i>P/D</i>	-			
Kumar ve Jayavel [64]	<i>L/D</i>	1,54-5	50-1000	Ş(N)	Boru demetleri arasındaki akışı sınırlandırılmış akış olarak nitelemişlerdir. <i>T/D</i> ve <i>L/D</i> eşit olacak şekilde parametrik çalışmalar yapılmıştır. İlgili oranların 3 ve üzeri olması durumunda hem basınç düşümü hem de taşınım katsayılarındaki değişimin az olduğu saptanmıştır. Bununla birlikte ilgili oranlar 1,54'e çekildiğinde ısı geçişinde %56'ya varan iyileşme gözlemlendiği ifade edilmiştir. Ancak orantılı olarak azalan <i>T/D</i> ve <i>L/D</i> oranlarının basınç düşümünün ısı geçişinin tam tersi karakter gösterdiğini ifade etmişlerdir.
	<i>T/D</i>	1,54-5			
	<i>P/D</i>	-			
Kim [65]	<i>L/D</i>	1,2-3	$8,3 \times 10^4$ - $3,3 \times 10^5$	S (N)	Žkauskas[26] korelasyonu bu alandaki en önemli korelasyonlardan biridir ancak <i>L/D</i> ve <i>T/D</i> oranlarının etkisini geniş bir aralıkta verememektedir. Sıralı boru demetlerinde $1,2 < L/D < 3$ oranının ısı geçişini, Žkauskas[26] korelasyonu ile karşılaştırılmıştır. <i>L/D</i> aralığının 2,5 sonrası korelasyon ile oldukça uyumlu olduğu gözlenmiştir. Buna karşın <i>L/D</i> =2,5 ve altındaki değerlerde korelasyon ile analiz verileri arasındaki farkın yükseldiği gözlenmiştir. Öyle ki <i>L/D</i> aralığı 1,2'e indirildiğinde aradaki farkın %37'lere ulaştığını gözlemlemişlerdir. <i>L/D</i> oranının 2,7'in üzerinde olduğu durumlarda boyuna adımın ısı geçişi üzerindeki etkisinin az olduğunu belirlenmiştir.
	<i>T/D</i>	1,4			
	<i>P/D</i>	-			
	<i>T/D</i>	1,25, 2,0, 3,0			
	<i>P/D</i>	-			

Yazar			Re	Dizilim	Önemli Bulgu
Buyruk [50]	L/D	1,13, 2,0, 3,0, 6,0	80, 120, 200	S (N)	Aynı çaplı dört silindir üzeri akışı, sıralı ve şaşırtmalı dizilime göre nümerik olarak incelemiştir. Tandem dizilimde tüm aralıklarda arka sıradaki silindirden kaynaklı ısı geçişinin öndekine nazaran daha az olduğu görülmüştür. Tandem dizilimde yan yana sıra sayısı artsa da akış karakterinin iki silindir üzeri akışta görülen karaktere benzediği ifade edilmiştir. Şaşırtmalı dizilimde ön sıradan kaynaklı artan hızlarından kaynaklı arka sıra üzeri ortalama Nu sayısının öndekine nazaran daha yüksek olduğu belirlenmiştir.
	T/D	-			
	P/D	-			
Yao ve Zhu [66]	L/D	1,5, 1,75, 2,0	1000 6000	Ş (N)	Taşınım katsayısının artan sıra sayılarıyla arttığı ifade edilmiştir. İlk sıra üzeri Nu sayısına nazaran 2. ve 3. Sıra üzeri Nu sayısının %30 ve %65 oranında arttığını saptamışlardır. 5. Sıradan sonra ise taşınım katsayısındaki değişimin oldukça az olduğu gözlenmiştir. Boyuna ve enine adım oranların 2,0 olması durumundaki ortalama Nu sayısının 1,5 ve 1,75 olması durumunda sırasıyla %45 ve %25 daha az olduğu görülmüştür. 3. sıraya kadar sürtünme faktörünün azaldığını 3. sıradan sonra değişimin az olduğu belirlemişlerdir.
	T/D	1,5, 1,75, 2,0			
	P/D	-			
Aiba vd. [67]	L/D	1,2, 1,6, 2,4, 3,2	1 $\times 10^4$ – 6 $\times 10^4$	S (N)	İlk sıra üzeri ortalama Nu sayısının L/D ve T/D 3,2 olduğunda tek silindir üzeri ortalama Nu sayısına yaklaşık eşit olduğunu belirlemiştir. Bu değerlerin azalmasının ilk sıra üzeri ısı geçişini oldukça etkilediği saptanmıştır. T/D ve L/D oranı 1,2 olduğunda basınç katsayısının ikinci sıradan sonra çok değişmediği ancak ilk sıranın ikinci sıraya nazaran 2,5 kattan fazla olduğu gözlenmiştir. Buna göre kompakt ısı değiştiricilerinde basınç düşümünde ilk sıranın hem ısı geçişi hem de basınç kayıpları açısından kritik olduğu belirlenmiştir. Sıra sayısı arttıkça taşınım katsayısının arttığı ifade edilmiştir.
	T/D	1,2, 1,6, 2,4, 3,2			
	P/D	-			
	T/D	1,25, 2,0, 3,0			
	P/D	-			

Tablo 1.6 Boru demetleri üzerine yapılan çalışmalar ve sonuçlar (devamı)

Yazar			Re	Dizilim	Önemli Bulgu
Aiba vd. [68]	L/D	1,2, 1,6	8600 - 36000	Ş (D)	T/D ve L/D oranı 1,2 iken ikinci ve sonrasındaki sıralar üzeri taşınım katsayısının birbirine oldukça yakın değerler verdiğini gözlemlemişlerdir. İlgili aralıklarda arka sıralar üzerindeki taşınım katsayılarının birbirine yakın olduğu belirlenmiştir.
	T/D	1,2, 1,6			
	P/D	-			
Wang vd. [69]	L/D	-	100, 300	Ş (N)	$Re=100$ ve 300 değerlerinde P/D aralığı 1,25, 1,5 ve 2,0 için eşkenar üçgen ve döndürülmüş kare dizilimli 10 sıra boru demetinde parametrik çalışma yapılmıştır. İlk sıra üzeri Nu sayısı ve C_f sürtünme katsayısının ilgili aralıklarda sıralı dizilimdekine eşit olduğu belirlenmiştir. İlk sıra üzeri Nu sayısının takip eden sıralara nazaran daha düşük olduğu gözlenmiştir. Aynı P/D aralıklarında yerel Nu sayısı ile C_f sürtünme katsayısının eşkenar üçgen dizilimin daha yüksek değerler verdiği belirlenmiştir. P/D değeri arttırıldığında Nu ve C_f değerlerinin benzer bir eğilim gösterdiği belirlenmiştir. Ayrıca $(T/D)/ (P/D)$ değerinin artmasının Nu sayısını azalttığı, C_f katsayısını arttırdığı belirlenmiştir.
	T/D	-			
	P/D	1,25, 1,5, 2,0			
Chen ve Wung [70]	L/D	2	40, 120, 400, 800	S (N)	Isı geçişi ve basınç düşümü Pr sayısı 0,1, 1,0 ve 10 değerleri için irdelenmiştir. Isı geçişinin Pr sayısına oldukça bağımlı olduğu ifade edilmiştir. Sıralı dizilimde boru sıraları arasında dönüşlü bölgelerde ısı geçişin daha düşük olduğu belirlenmiştir. Boru yüzeyindeki basınç dağılımının tek silindir üzeri basınç dağılımına benzer olduğu saptanmıştır. Şaşırtmalı dizilimde basınç düşümünün sıralı dizilime nazaran daha yüksek olduğu saptanmıştır.
	T/D	1,25, 2,0, 3,0			
	P/D	-			
Dhaubhadel vd. [71]	L/D	-	100, 200, 300	S (N)	Üçgen ve döndürülmüş kare dizilimli 5 sıra boru demeti için mümerik analiz yapmışlardır. Döndürülmüş kare dizilimin üçgen dizilime nazaran ısı geçişi açısından daha iyi sonuçlar verdiği gözlenmiştir.
	T/D	-			
	P/D	1,5, 2,0			

Tablo 1.6 Boru demeteri üzerine yapılan çalışmalar ve sonuçlar (devamı)

Yazar			Re	Dizilim	Önemli Bulgu
El-Shaboury ve Ormiston [72]	L/D	1,25, 1,5, 2,0	100, 300	S (N)	$T/D = 1,5$ ve $Pr=0,71$ değerlerinde sabit tutulmuştur. Çalışılan aralıkta ilk sıra üzeri taşınım katsayısının diğer sıralara nazaran daha yüksek olduğu ifade edilmiştir. 3. sıra sonrasında görülen akış desenlerinin daha sonraki sıraların akış desenleriyle benzer olduğu gözlenmiştir. Azalan T/D oranlarının basınç düşümünü oldukça arttırdığı belirlenmiştir. Buna karşın sabit T/D oranında L/D 'nin artmasının basınç düşümünü nispeten arttırdığı bulunmuştur. Isı geçişi iyileştirmesi için T/D oranının azaltılması L/D oranının arttırılması gerektiği sonucuna ulaşılmıştır.
	T/D	1,5			
	P/D	-			
Murray [73]	L/D	-	500-1000	Ş/S (N)	Sekiz sıra şaşırtmalı ve sıralı dizilimli boru demetlerinde 58 ve 127 um boyutundaki partiküller ile yalnızca hava üzerinden ısı geçişini incelemişlerdir. Şaşırtmalı her durumda ısı geçişinin sıralıdan iyi olduğu gözlenmiştir. İlk sıranın ısı davranışının şaşırtmalı ve sıralı dizilimde benzer olduğu belirlenmiştir. Eşkenar üçgen şeklinde şaşırtmalı dizilim ile sıralı dizilimde görülen akışın arka sıradaki boru sınır tabakasına yapışması önlenir. Art bölgesinde Nu sayısının küçük olduğu, ancak şaşırtmalı dizilimle bu bölgenin daraltılarak ısı geçişinin iyileştiği gözlenmiştir.
	T/D	-			
	P/D	2			
	T/D	1,25, 2,0, 3,0			
	P/D	-			
Chen vd. [74]	L/D	1,75, 1,875, 2,0	2100-9200	Ş (N)	Kanatlı ve kanatsız boru demetleri karşılaştırılmıştır. Artan Re sayılarında Nu sayısının kanatlı durumun kanatsız duruma göre %40lara varan oranlarda iyileştiği, ancak Eu sayısının azaldığı saptanmıştır. Artan T/D ve L/D değerlerinde taşınım katsayısının azaldığı basınç düşümünün arttığı gözlenmiştir. 10 farklı geometri ile çalışılmış ve Re sayısı 4500'e kadar j/f değerinin arttığı, daha yüksek Re sayılarında ısı-akış performanstaki değişimin az olduğu gözlenmiştir.
	T/D	1,75, 1,875, 2,0			
	P/D				

Tablo 1.6 Boru demetleri üzerine yapılan çalışmalar ve sonuçlar (devamı)

Yazar			Re	Dizilim	Önemli Bulgu
Ahmed vd. [75]	L/D	1,25, 1,5, 1,75	100 - 600	Ş (N)	Azalan T/D ortalama Nu sayısını kısmen arttırdığı ifade edilmiştir. Buna karşın sürtünme faktöründe %30 varan değişim görülmektedir $L/D=1,25$ ile 1,5 değerlerinde Ortalama Nu ve sürtünme faktörü(f) birbirine yakın ancak $L/D=1,75$ için daha düşük olduğu gözlenmiştir. Artan Re sayılarında Nu sayısının kanatlı durumun kanatsız duruma göre %40lara varan oranlarda iyileştiği, buna karşın Eu sayısının azaldığı belirlenmiştir. Artan T/D ve L/D değerlerinde taşınım katsayısının azaldığı basınç düşümünün arttığı gözlenmiştir. 10 farklı geometri ile çalışılmış ve Re sayısı 4500'e kadar j/f değerinin arttığı bu değer üzerindeki Re sayılarında ısı-hidrolik performanstaki değişimin az olduğu belirlenmiştir.
	T/D	1,5, 2,0, 2,5			
	P/D	-			
Khan vd. [76]	L/D	1,25, 2,0, 3,0	1-10 ⁵	Ş/S (A)	Kompakt ısı değiştiricilerin geniş boşluklulara nazaran daha yüksek ısı geçişi sağladığı ifade edilmiştir. L/D , T/D değerlerinin her ikisi de 3 olduğunda şaşırtmalı ve sıralı dizilimde ortalama Nu sayısının birbirine eşit olduğu saptanmıştır.
	T/D	1,25, 2,0, 3,0			
	P/D	-			

Tablo 1.6 Boru demetleri üzerine yapılan çalışmalar ve sonuçlar (devamı)

1.1.5 Isı Değiştirici Uygulamalarında HAD Kullanımı ve Optimizasyon

Çalışmaları

Gelişen bilgisayar ve yazılım teknolojisi sonucunda ısı değiştiriciler incelemelerinde HAD analiz yöntemlerinden faydalanma oranı oldukça artmıştır. Ayrıca pek çok araştırmada deneysel çalışmalara nazaran HAD programlarının kullanılması ekonomik açıdan oldukça avantajlı ve alternatif bir çözüm olarak görünmektedir [77]. Fluent, CFX, Comsol, Star CCM, PHOENICS, OpenFOAM vb. pek çok paket program HAD analizlerinde sıklıkla kullanılmaktadır. Pek çok ısı değiştirici üzerinde ısı geçişi ve basınç düşümünü inceleyen çalışma bulunmasına karşın zorlanmış taşınım maruz tel kanatlı yoğunlaştırıcılar için yapılmış bir optimizasyon çalışmasına rastlanılmamıştır. Genellikle bu kapsamdaki çalışmalar düz kanatlı[78], [79], dalgalı kanatlı[78], [80], [81], panjur kanatlı[82], [83], gövde borulu[84]–[86] ısı değiştiriciler üzerine yoğunluktadır. Literatürdeki ısı değiştiriciler üzerine optimizasyon çalışmalarının ağırlıklı olarak HAD analizi ile yapılan çalışmaların CYY yöntemleriyle incelenmesi uyarınca olduğu belirlenmiştir. İlgili çalışmalardan bazıları Tablo 1.7’de özetlenmiştir.

Tablo 1.7 Isı değiştirici çalışmalarında CYY ve optimizasyon uygulamaları

Yazar	Isı değiştirici tipi	Amaç Fonksiyonu	Cevap Yüzey Yöntemi	Optimizasyon Yöntemi
			Önemli Bulgu	
Yang vd.[87]	Düz plaka kanatlı	Maksimize: h Minimize: Çalışma süresi	2. Dereceden Polinomal	Tagucci
			Donma koşullarında çalışan ısı değiştiricilerinde kanatlar arası boşluğun optimizasyonuna yönelik çalışmalar yapmışlardır. Referans geometriye göre ısı geçişinde %6,3’e varan iyileşme sağlandığını ifade etmişlerdir. Çalışma süresi ise %12 oranında azaltmıştır	
Salviano vd. [88]	Düz plaka kanatlı	Maksimize: $JF, JF^{1/3}, j$ Minimize: f	Yapay Sinir Ağları	Direkt ve Genetik Algoritma
			Bu tip ısı değiştiricilerde ısı geçişini arttırmak için kullanılan küçük kanatçık şeklindeki girdap üreticilerinin yerleşimi üzerine ANSYS DesingXplorer ile optimizasyon çalışmaları yapmışlardır. Deney tasarımı olarak Latin Hiperküp yöntemi kullanılmıştır.	

Tablo 1.7 Isı değiştirici çalışmalarında CYY ve optimizasyon uygulamaları
(devamı)

Yazar	Isı değiştirici tipi	Amaç Fonksiyonu	Cevap Yüzey Yöntemi	Optimizasyon Yöntemi
			nemli Bulgu	
Wen vd. [89]	Gövde Borulu	Maksimize: Q Minimize: İşletme ve ilk yatırım maliyeti	<i>Kriging</i>	<i>BSGA-II Genetik Algoritma</i>
			Helisel şaşırtma levhalı ısı değiştiricileri üzerine analizler ile etkili parametrelerin amaç fonksiyonlarına göre duyarlılık analizleri yapılmıştır.	
Wen vd.[90]	Tırtıklı Kanatlı	Maksimize: JF, j, Q Minimize: $f, S_{re}$ maliyet	<i>Kriging</i>	<i>Genetik algoritma</i>
			Akışkan – yapı etkileşimi yöntemi kullanılarak ısı değiştiricilerde ısı-akış davranışın yanı sıra gerilmeler de incelenmiştir. Yapılan optimizasyon ile maliyet açısından %10'a yakın bir iyileşme sağlandığı ifade edilmiştir.	
Wen vd.[91]	Tırtıklı Kanatlı	Maksimize: JF, j Minimize: f , Gerilme	İkinci dereceden polinomal CYY ve Varyans analiz ile optimizasyon yapılmıştır. Çok Amaçlı Genetik Algoritma kullanılmıştır. Akışkan – yapı etkileşimi yöntemi kullanılarak ısı değiştirici üzerindeki gerilmelerde incelenmiştir.	
Sanaye ve Hajabdollahi [92]	Tırtıklı Kanatlı	Maksimize: Kanat etkenliği Minimize: Yıllık maliyet	<i>Yapay Sinir Ağları</i>	<i>Genetik algoritma</i>
			Kanat adımı, kanat yüksekliği, genişliği gibi parametrelere göre optimizasyon yapılmıştır. YSS ile elde edilen cevap yüzeyler GA yöntemiyle yapılan optimizasyonda kullanılmıştır.	
Salviano vd. [93]	Düz plaka kanatlı kompakt	Maksimize: $JF, JF^{1/3}$	<i>Yapay Sinir Ağları</i>	<i>Genetik algoritma</i>
			Kanatlı ısı değiştiricilerinde girdap üreteçlerin ısı-akış performansına etkisini incelemişlerdir. Hem şaşırtmalı hem de sıralı boru dizilimleri göz önüne alınmıştır.	
Damavandi vd. [80]	Dalgalı kanatlı eliptik borulu	Maksimize: j Minimize: f	<i>Yapay Sinir Ağları</i>	<i>BSGA-II Genetik Algoritma</i>
			Isı geçişinin maksimize edilmesi, basınç düşümünün ise minimize edilmesi amaçlanmıştır.	

Tablo 1.7 Isı değiştirici çalışmalarında CYV ve optimizasyon uygulamaları
(devamı)

Yazar	Isı değiştirici tipi	Amaç Fonksiyonu	Cevap Yüzey Yöntemi	Optimizasyon Yöntemi
			Önemli Bulgu	
Salviano vd. [93]	Düz plaka kanatlı kompakt	Maksimize: $JF, JF^{1/3}$	Yapay Sinir Ağları	Genetik algoritma
			Kanatlı ısı değiştiricilerinde girdap üreteçlerin ısı-akış performansa etkisini incelemişlerdir. Hem şaşırtmalı hem de sıralı boru dizilimleri göz önüne alınmıştır.	
Damavandi vd. [80]	Dalgalı kanatlı eliptik borulu	Maksimize: j Minimize: f	Yapay Sinir Ağları	BSGA-II Genetik Algoritma
			Isı geçişinin maksimize edilmesi, basınç düşümünün ise minimize edilmesi amaçlanmıştır.	
Ke vd. [78]	Düz ve Dalgalı kanatlı	Maksimize: Q Minimize: ΔP	-	BSGA-II Genetik Algoritma
			Re sayısı 500 - 1300 aralığında girdap üreteçlerin neden olduğu ısı değiştiriciler üzerindeki ısı geçişi ve basınç düşümünü incelemişlerdir.	
Wang vd. [94]	Gövde Borulu	Maksimize: Nu Minimize: ΔP	2. Dereceden Polinomal	BSGA-II Genetik Algoritma
			Parametrelerin etkisini belirlemek için duyarlılık analizi yapılmıştır.	
Mann ve Eckels [95]	Helisel Mikro kanatlı	Maksimize: Nu Minimize: f	-	BSGA-II Genetik Algoritma
			Kanat yüksekliği, helis açısı ve kanat sayısına göre optimizasyon yapmışlardır.	
Sun ve Zhang [96]	Eliptik kanatlı	Maksimize: PEC (Isıl -akış performans)	2. Dereceden Polinomal	-
			Eliptik kanatlarda elipsi olurturan eksen oranlarının (a/b) ısıl-hidrolik performansı etkilini incelenmiştır.	
Sun ve Zhang [96]	Eliptik kanatlı	Maksimize: PEC (Isıl -akış performans)	2. Dereceden Polinomal	-
			Eliptik kanatlarda elipsi olurturan eksen oranlarının (a/b) ısıl-hidrolik performansı etkilini incelenmiştır.	
Wang vd. [97]	Spiral sargılı	Maksimize: U Minimize: ΔP	Genetik Kümeleme	BSGA-II Genetik Algoritma
			Referans geometriye göre taşıyım katsayısı %3'e yakın iyileştirilirken basınç düşümü yaklaşık %40 azaltılmıştır.	

Literatür taraması sonuçları;

- Günümüzde kullanılan tel kanatlı yoğuşturucuların pek çoğu zorlanmış taşınım ile çalışmasına rağmen bu alanda yapılan yayınlanmış bilimsel çalışmaların oldukça az olduğu, yayınlanmış çalışmaların çoğunun doğal taşınım ile çalışan yoğuşturucular ilgili olduğu tespit edilmiştir.
- Doğal taşınım maruz yoğuşturucular için yapılan çalışmaların hava tarafı taşınım katsayısının tespiti ve iyileştirilmesine yönelik deneysel ve nümerik çalışmalar olduğu belirlenmiştir.
- Zorlanmış taşınım maruz düz tip tel kanatlı yoğuşturucular ile ilgili Hoke vd.[24] ile Lee vd.[25] tarafından yapılan iki adet çalışma bulunmaktadır. Ancak her iki araştırmacının önerdiği korelasyonların birbirleriyle %80'e varan oranlarda saptığı ifade edilmiştir.
- Hoke vd. yapmış olduğu deneysel çalışma esnasında 7 farklı yoğuşturucu için testler yapmış ve genel olarak atak açısının hava tarafı ısı geçişine etkisini incelemiştir [24]. Yoğuşturucuların akışa dik olması durumu yalnızca bir tip tek sıra yoğuşturucu için test edilmiştir. Oysaki özellikle endüstriyel uygulamalarda kullanılan tel kanatlı yoğuşturucular büyük oranda akışa dik konumlandırılmaktadır.
- Benzer şekilde Lee vd. aynı tel ve boru çapında üç farklı yoğuşturucu için deneyler yapmış ve Žkauskas korelasyonu üzerinden bir takım düzeltme katsayıları ile hava tarafı taşınım katsayısının bulunabileceğini ifade etmişlerdir. Korelasyon düzeltme faktörlerinin az sayıda veri ile oluşturulduğu belirlenmiştir [25].
- Hoke vd. [24] önerdikleri korelasyonda 1,35 mm tel çapı ve 4,76 mm boru çap değerlerini kullanırken, Lee vd. [25] tarafından tel kanatlı yoğuşturucular için düzeltilmiş Žkauskas bağıntısında 1,53 mm tel çapı ve 4,76 mm boru çapı kullanılmıştır. Uygulamada hem tel hem de boru çapının bu değerlerinin üzerinde ve altında pek çok çapta ürün bulunmaktadır.
- Literatürde sarmal yoğuşturucular üzerine yapılan çalışmalarda basınç düşümü incelenirken düz tip tel kanatlı yoğuşturucularda basınç düşümünü araştıran herhangi bir çalışma bulunmamaktadır.

- Literatürde sadece tek sıra tel, çapraz tel ve boru dizilimi gibi geometrik parametreleri göz önünde bulunduran herhangi bir çalışmaya rastlanmamıştır.
- Illionis üniversitesinde yapılan bir çalışmada çok sıra yoğunlaştırucular incelenmiştir. Ancak kullanılan tel çapı 1,38 ve 1,58 mm ve boru çapı 4,80 mm olmak kaydıyla sınırlı geometrik parametreye göre yapılmıştır.
- Literatürde tel kanatlı yoğunlaştırucularda temas direncinin etkisinin araştırıldığı bir çalışmaya rastlanılmamıştır.
- Kanat veriminin etkisini net şekilde ortaya koyan bir çalışmaya rastlanılmamıştır.
- Çalışmalar genel olarak çelik boru ve tel için yapılmış olup farklı malzemelerin ısı geçişine etkisini inceleyen herhangi bir çalışmaya rastlanılmamıştır.
- Literatürde tel kanatlı yoğunlaştırucularda zorlanmış taşınım ile ısı geçişini HAD analizi ile inceleyen çok az çalışma bulunmaktadır.
- Tel kanatlı yoğunlaştırucuların ısı geçişi ve basınç düşümünün incelenmesine Cevap yüzey yöntemlerinin(CYY) uygulanmalarından faydalanılmaya yönelik herhangi bir çalışmaya rastlanılmamıştır.
- Bu tip yoğunlaştırucularda ısı geçişi ve basınç düşümünü etkileyen geometrik parametrelerin birbirlerine göre duyarlılık analizi üzerine çalışma görülmemiştir.
- Zorlanmış taşınım maruz yoğunlaştırucularda ısı geçişini iyileştirme ve basınç düşümünü azaltmaya yönelik optimizasyon çalışması bulunmamaktadır.

1.2 Tezin Amacı

Bu tez çalışmasında özellikle endüstriyel uygulamalarda kullanılan çapraz akışa maruz düz tip tel kanatlı yoğuşturucularda hava tarafı ısı geçişi ve basınç düşümünü deneysel ve nümerik olarak kapsamlı bir şekilde incelenmesi amaçlanmıştır. Böylece;

- Zorlanmış taşınımına maruz tek ve çok sıralı yoğuşturucuların deneysel ve nümerik yöntemlerle incelenmesi,
- Tel kanatlı yoğuşturucuları oluşturan geometrik özelliklerin ısı-akış davranışa etkilerinin geniş bir aralıkta parametrik olarak belirlenmesi,
- Işınımın etkisinin incelenmesi,
- Deneysel ve nümerik çalışmalar sonucunda taşınım ile ısı geçişi için uygun korelasyonların önerilmesi,
- Deneysel ve nümerik çalışmalar sonucunda basınç düşümünün belirlenmesine yönelik sürtünme faktörü için korelasyonların oluşturulması,
- Kanat verimi ve temas direncinin ısı geçişine etkisinin belirlenmesi,
- Farklı kanat malzemelerinin ısı geçişine etkisinin incelenmesi,
- Boyanın etkisinin incelenmesi,
- Tek sıra üzerinde yalnızca bir yüze tellerin kaynatılması durumunun incelenmesi,
- Cevap yüzey yönteminin uygulanabilirliğinin irdelenmesi ve duyarlılık analizi yapılması,
- Isı geçişi ve basınç düşümünün iyileştirilmesine yönelik optimizasyon çalışmalarının yapılması amaçlanmıştır.

1.3 Hipotez

Yapılan tez çalışmasında zorlanmış taşınım şartlarındaki tel kanatlı yoğuşturucularda hava tarafı ısı geçişi ve basınç düşümü değerleri incelemeye ve iyileştirmeye odaklanılmıştır. Boru içi taşınım katsayısı, hava tarafı taşınım katsayısına nazaran oldukça yüksektir. Bu durumdan ötürü hava tarafındaki ısı direnç oldukça fazla olmaktadır. Eğer toplam ısı geçişinde iyileştirme yapılması bekleniyorsa çalışmaların hava tarafında yapılacak iyileştirmeler üzerinde olması daha önem kazanmaktadır. Hava tarafındaki ısı direnci azalmak amacıyla teller, boru yüzeyine sıklıkla kaynatılmaktadır. Böylece tek sıra yoğuşturucu karakteristik uzunlukları temel olarak S_b , S_w , D_t ve D_w ile serbest hava akım hızı olmak üzere şekillenir. Uygulamada kullanılan boru ve tel çapları üretim sürecine ve ekonomik durumlara bağlı olarak belli çap aralıklarında sınırlandırılmaktadır. Özellikle boya kalınlığı gözardı edildiğinde 4,75 mm boru çapı en fazla kullanılan çelik boru çapıdır. Buna karşın teller ise özellikle 1,2 mm ve 1,6 mm çapında üretilmektedir. Bu açıdan tel ve boru çapının değişimine bağlı optimizasyon oldukça sınırlı bir aralıkta kalmaktadır. Bu tip yoğuşturucuların üretiminde üretici firmaların tasarımda müdahil olabileceği ana geometrik özellikler S_t ve S_w olmaktadır. Her iki değer azalması sonucunda kesit alanının azalması ile ısı geçişi ve basınç düşümünün artması beklenir. Bu tip yoğuşturucuların temel kullanım avantajlarından birisi de temizlik kolaylığıdır. Özellikle S_w değerinin yüksek miktarda azaltılması kullanım yerlerinde kirlenme oranının arttıracaktır. Bu durum sonucunda basınç düşümünün artış gözlenirken, ısı geçişinde de düşüş oluşacaktır. S_t değerinin azaltılması ile hem kanat verimi artması, hem de taşınım katsayısı bir miktar yükselmesi beklenir. Ancak boru maliyeti tel maliyetine nazaran oldukça yüksektir. Bu kapsamda S_t aralığı mümkün olduğunca yüksek tutulmalıdır. Bu değerlendirmelere göre ilgili geometrik özelliklerin ısı-akış davranışının belirlenmesi oldukça önemlidir. Bir diğer önemli özellik ise serbest hava akım hızının etkisinin belirlenmesidir. Artan hızların ısı geçişini oldukça arttırdığı bilinmektedir. Ancak zorlanmış taşınımı oluşturan fanların küçük güçlerde tutulması enerji verimliliği açısından oldukça önemlidir. Literatür çalışmalarında görüldüğü üzere boru demetleri ve silindir çiftlerinin şaşırtmalı diziliminin ısı geçişini sıralı(tandem) dizilime nazaran

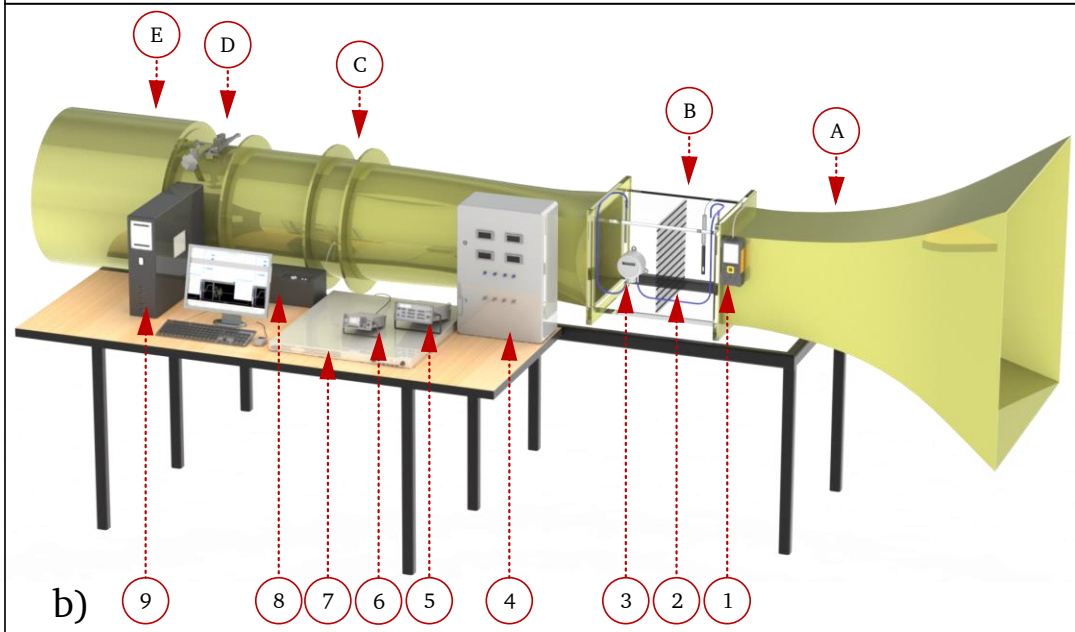
arttırdığı belirlenmiştir. Bu durumda tel kanatlı yoğuşturucularda hem tek sıra üzeri teller hem sıralar arasındaki borular birbirine göre şaşırtmalı olarak tasarımlanabilirler. Uygulama da kullanılan tel kanatlı yoğuşturucular üzerindeki bu teller akış doğrultusunda tandem dizilime göre yerleştirilmektedir. Bu tellerin akış doğrultusunda şaşırtmalı diziliminin sonucunda elde bulunan şartlar altında iyileştirme sağlanabilecektir. Bu süreçte basınç düşümü kısmen artacaktır. Isı geçişinin artışına karşın basınç düşümünün azalmasını optimize edecek tasarımlar oluşturulabilir. Çok sıralı dizilimlerde iyileştirme kapsamında ilk akla gelen tasarım sıraların şaşırtmalı dizilimidir. Bununla birlikte tellerin şaşırtmalı dizilimi de ısı geçişi ve basınç düşümü açısından avantajlı tasarımlar oluşturulabilir. Yoğuşturucu kapasitesi arttıkça daha fazla yüzey alana ihtiyaç duyulur. Soğutucu boyutları da gözönüne alındığında yoğuşturucu da sıra sayısının artırılması gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Bu durum da sıralar arası mesafe(S_d) etkili bir parametre olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu mesafenin mümkün olduğunca küçük tutulması ile daha kompakt ve küçük hacme sahip yoğuşturucular oluşturulabilir. Ancak bu mesafenin azalması özellikle sıralı dizilimde ısı geçişini azaltıcı bir etki ortaya koymaktadır. Uygun aralıkların belirlenmesi oldukça önemlidir. Yukarıda belirtilen tüm parametreleri göz önüne alacak şekilde korelasyonların oluşturulması ısı geçişi ve basınç düşümünü kolaylıkla hesaplanabilmesine olanak sağlayacaktır. Uygulama da üretilen yoğuşturucuların geometrik özellikleri genelde sınırlı bir aralıktadır. Bu değerler uyarınca literatürde ve bu çalışma kapsamında deneysel çalışmalar yapılmıştır. Ancak hem geometrik aralıklarının geniş aralıkta tutulması hem ileri de ilgili aralıklarda üretimler yapılabileceği düşünülerek HAD analizlerinden faydalanılabilir. Böylece parametrelerin etkileri oldukça geniş bir aralık için ortaya konulabilir. HAD analizlerinin uygunluğu ile bilgisayar ortamında pek çok farklı deney tasarımları oluşturulabilir. İlgili deney tasarımları ve parametrik çalışmalara göre CYY ve YSA gibi ısı geçişi ve basınç düşümü için alternatif hesaplama yöntemlerinin kullanımı da uygulama açısından uygun sonuçlar verebilir. Bu yöntemlerle elde edilen matematiksel altyapı farklı optimizasyon yöntemleriyle işlenerek, optimum geometrilerin oluşturulmasında faydalı olacaktır.

2.1 Deney Düzeneği ve Test Numulerinin Hazırlık Süreci

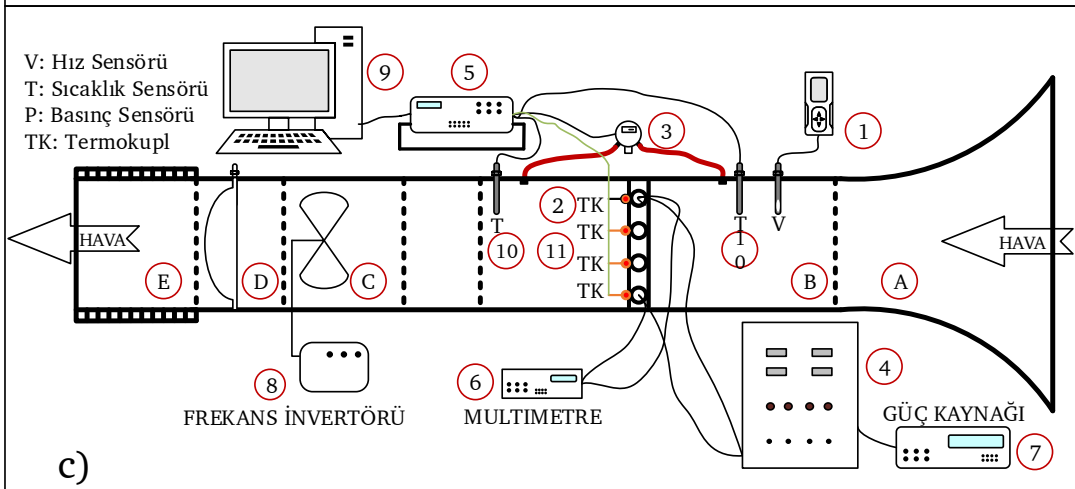
Deneyisel çalışma Yıldız Teknik Üniversitesi Termodinamik laboratuvarında bulunan Şekil 2.1’de görülen rüzgâr tüneli ile yapılmıştır. Düzenek ve ölçüm sistemine ilişkin gerçek görünüm, üç boyutlu ve iki boyutlu çizimler sırasıyla Şekil 2.1a), b) ve c)’de gösterilmiştir. Düzeneğe ait veri toplama ve ölçüm sistemi Tablo 2.1’de verilmiştir. Düzenek beş kısımdan meydana gelmektedir. Bunlar test bölümüne giren hava akışını düzgünleştirmeyi sağlayan bölüm(A), test bölmesi(B), fan ünitesi(C), damper ünitesi(D) ve susturucu bölmesi(E) şeklinde sıralandırılmıştır. Test bölmesi 30,6 cm x 30,6 cm kesitinde ve 60 cm uzunlukta olup pleksiglass malzemeden yapılmıştır. Ünite içerisindeki fan, bir frekans inverteri ile kontrol edilmektedir.



a)



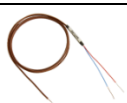
b)



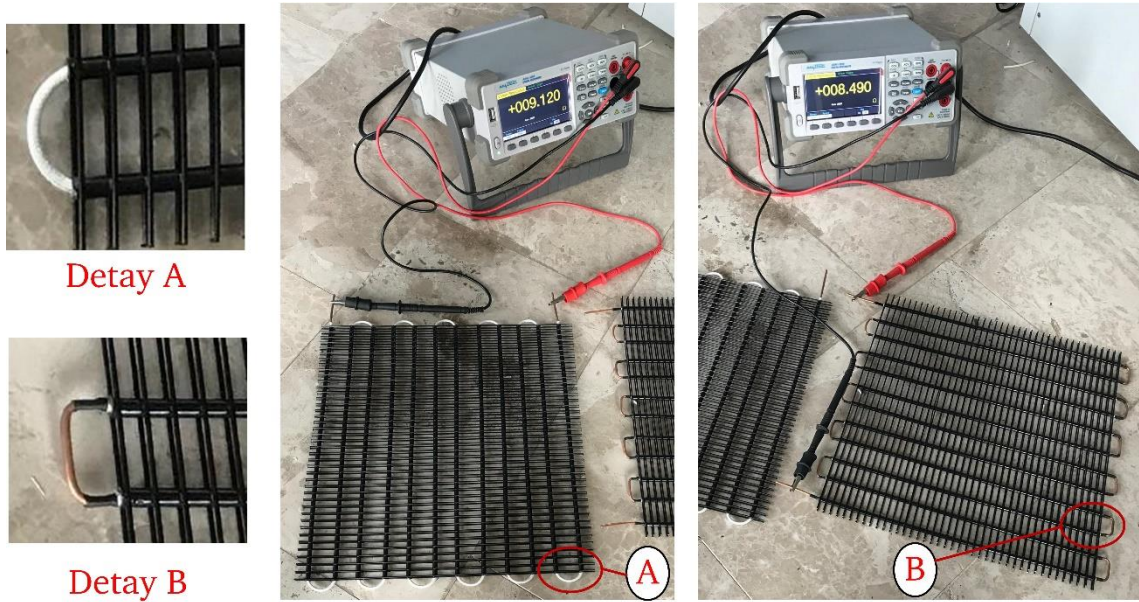
c)

Şekil 2.1 Deney düzeneği a) Gerçek görüntü, b) 3 Boyutlu çizim, c) Şematik çizim

Tablo 2.1 Deney düzeneği cihaz ve ekipman listesi

No Cihaz	Marka-Model (Teknik Özellik)	Cihaz Görseli
1. Hızölçer	Testo 440 ($\pm (0,03 \text{ m/sn} + \%4)$)	
2. Test Numunesi	ATM Beyaz Eşya Parçaları San. ve Tic. Ltd. Şti	
3. Fark Basınç Aktarıcısı	Dwyer MS2-W101 ($\pm \%1$)	
4. Çok Sıra için Güç Ayarlayıcı	-	
5. Datalogger	Agilent 34970A	
6. Multimetre	AATech ADM-3055 ($\pm 0,015$)	
7. Güç Kaynağı	Agilent N5767A (60V/ 25A, 1500 W)	
8. Frekans İnvörtörü	Siemens MicroMaster 420 (0,12 – 11 kW)	
9. Bilgisayar	HP	
10. Termoeleman (RTD)	Watlow ($\pm \%1$)	
11. Termoeleman (T Tipi)	TermoElectric NN 24 (TT $\pm \%0,25$)	

Soğutma sistemlerinde kullanılan yoğuşturucularda boru içerisinde bulunan soğutucu akışkan sistemden uzaklaştırılması gereken ısıyı ağırlıklı olarak faz değiştirme işlemiyle dış ortama aktarır. Soğutucu akışkan faz değiştirirken halkalı, tıkaçlı, çalkantılı, kabarcıklı vb. pek çok farklı akış rejimi oluşmaktadır. Bu akış rejimleri kendi içerisinde farklı taşınım katsayına sahip olmasına karşın, faz değişimi süresince faz değiştiren bölgede sıcaklık sabit kalır. Çalışmanın amacı hava tarafı ısı geçişi ve basınç düşümünü incelemek olduğundan boru yüzeyinde sabit sıcaklığı simüle etmek amacıyla boru içerisine direnç telleri yerleştirilmiştir. Böylelikle soğutucu akışkan kullanımı sırasında karşılaşılabilecek şarj optimizasyonu, debi ve sıcaklık kontrolü gibi problemlerin üstesinden gelinmiştir. Direnç tellerinin kullanılmasıyla deneysel çalışmalarda kararlı hal şartlarına ulaşma süresi de oldukça azaltılmıştır. Sonuçta, istenen deney koşullarının oluşturulması oldukça kolaylaşmıştır. Literatürde yoğuşturucularda hava tarafının incelenmesinde benzer yöntemle hem tel kanatlı yoğuşturucular [25] hem de farklı tip yoğuşturucular [98] için yapılan çalışmalar bulunmaktadır. Deneysel çalışmalar tek ve çok sıralı yoğuşturucular için yapılmıştır. Test numunelerine ait görseller Şekil 2.2’de görülmektedir.



Şekil 2.2 Tel kanatlı yoğuşturucular ve borular arası direnç teli geçiş detayları

Deneysel çalışmalarda borular arası geçişteki büküm bölgeleri dikkate alınmamıştır. Endüstriyel uygulamalarda da bu büküm bölgeleri zorlanmış taşınım bölgesi dışında tutulmaktadır. Borular arası geçiş 2 mm çaplı bakır

kapiler borular ile yapılmıştır. Bu boruların yüzeyi makaran kablo malzeme ile kaplanarak elektrik akımının serpantin yüzeylerine aktarımının önüne geçilmiştir. İlgili detay Şekil 2.2’de verilmiştir. İlgili şekilde görüldüğü üzere bir adet hassas multimetre ile boru dönüşlerinin etkisi hem direnç teli hem de bakır boru ile geçiş durumuna göre ölçümler yapılmıştır. Bakır telin sağladığı avantaj okunan direnç değerinden görülmektedir. Detay A direnç teli ile geçişi göstermekte ve direnç değeri yaklaşık 9,12 ohmdur. Buna karşılık Detay B bakır parça ile dönüşü göstermekte ve 8,49 ohm değerindedir. İki yaklaşım arasında direnç ölçümlerinde yaklaşık %7’ye varan bir fark görülmektedir. Boru geçişinin direnç teli yerine bakır boru ile yapılmış olması oluşturulan elektriksel gücün tamamına yakının test bölmesindeki serpantin üzerinden geçmesi sağlanmıştır. Bakır borularla serpantin birleştirilmesi sonrasında bu yüzeyler 1 cm kalınlıktaki kauçuk yalıtım malzeme ve 5 cm kalınlıktaki XPS malzeme ile tamamen yalıtılmış ve test bölgesi dışında alınmıştır. Yapılan yalıtımın dış yüzeyine iki adet termokupl yerleştirilmiştir ve yapılan ölçümler sonrasında direnç telinden bakır dönüşlere olan iletimle ısı geçişinin %1-1,5 civarında olduğu saptanmıştır. Deneysel çalışmalarda kullanılan serpantinlere ait geometrik özellikler sırasıyla tek sıra ve 2, 3 ve 4 olmak üzere çok sıra için Tablo 2.2 ve Tablo 2.3’de verilmiştir.

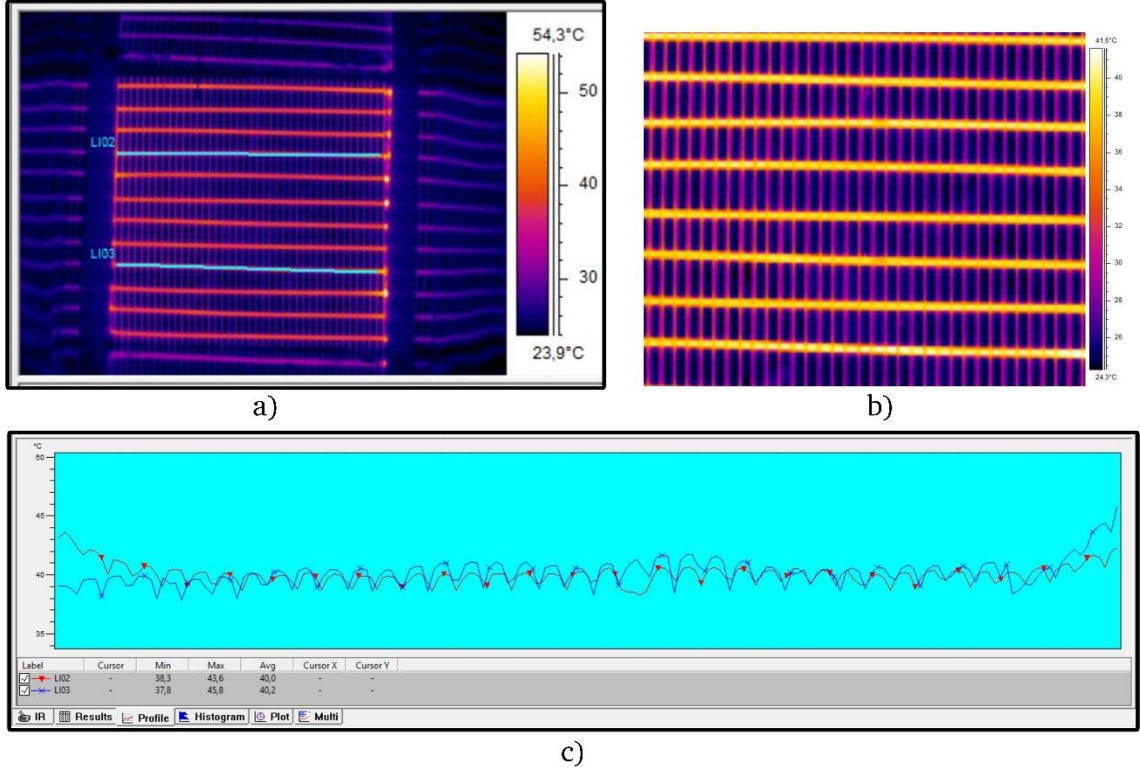
Tablo 2.2 Tek sıra yoğunlaştırıcılar üzerinden yapılan deneylerde kullanılan serpantinlerin geometrik özellikleri

Serpantin	D_w (mm)	D_t (mm)	S_w (mm)	S_t (mm)	S_s	N_w (mm)	N_t (mm)	L_w (mm)	L_t (mm)
1	1,4	4,95	7,5	25	-	82	12	30,5	30,5
2	1,4	4,95	6,5	25	-	94	12	30,5	30,4
3	1,4	6,20	5,0	25	-	122	12	30,5	30,5
4	1,8	4,95	5,0	50	-	122	6	30,5	30,4
5	1,4	4,95	5,0	25	-	122	12	30,5	30,4
6	1,4	4,95	5,0	50	-	122	6	30,5	30,4
7	1,4	4,95	10,0	25	0,25	60	12	30,5	30,5

Tablo 2.3 Çok sıralı yoğuşturucular üzerinden yapılan deneylerde kullanılan serpantinlerin geometrik özellikleri $N_L= 2, 3, 4$

Serpantin	S_L (mm)	D_w (mm)	D_t (mm)	S_w (mm)	S_t (mm)	S_s	N_w (mm)	N_t (mm)	L_w (mm)	L_t (mm)
1	17,8	1,4	4,95	7,5	25	-	82	12	30,5	30,5
1	27,8	1,4	4,95	7,5	25	-	82	12	30,5	30,5
1	37,8	1,4	4,95	7,5	25	-	82	12	30,5	30,5
7	17,8	1,4	4,95	10	25	0,25	60	12	30,5	30,4
7	27,8	1,4	4,95	10	25	0,25	60	12	30,5	30,4
7	37,8	1,4	4,95	10	25	0,25	60	12	30,5	30,4

Serpantinlerin üzerinden Flir ThermoVision A320 modelindeki termal kamera ile görüntü alınarak yüzeyde olan sıcaklık dağılımı incelenmiştir. Şekil 2.3’de Serpantin 1 için 2 m/s serbest giriş hava hızı ve 40 °C yüzey sıcaklığında elde edilen görüntüler verilmiştir. Test bölmesine giren akışın bozulmaması için termal kamera, rüzgâr tüneli giriş kısmının hemen öncesine yerleştirilmiştir. Şekil 2.3a) kanal içerisindeki serpantinin genel görünümü, Şekil 2.3b) yakınlaştırılmış detay görünümü, Şekil 2.3c) ise Şekil 2.3a)’da görülen ve ThermaCAM Researcher Professional® programı ile oluşturulan LI02 ve LI03 adı verilen çizgiler üzerindeki ilgili boru sıraları boyunca sıcaklık değerlerinin değişimini gösteren program arayüz grafiği görselidir.



Şekil 2.3 Termal kamera ile alınan görüntü ve veriler a) Kanal içi görünüm, b) Detay görünüm, c) Boru üzeri sıcaklık değişimi

Şekil 2.3 incelendiğinde teller ve borular üzerindeki sıcaklık dağılımlarının homojen ve sabit olduğu görülmektedir. Şekil 2.3c)'de görüldüğü üzere boru yüzeyi boyunca ilgili çizgiler üzerinden alınan 25'er adet nokta üzerinden sıcaklık verisi alınmıştır. Bu verilere göre boru boyunca sıcaklık dağılımının dönüş noktalarına yakın yerlerde kısmen artmasına karşın boru boyunca genel olarak sabit kaldığı belirlenmiştir. Aynı zamanda sıralar arasındaki sıcaklık değerlerinin de birbiriyle örtüştüğü belirlenmiştir. Bu sonuçlar uyarınca HAD analizlerinde boru iç yüzeyi için uygulanan sabit yüzey sınır şartının oldukça uygun bir yaklaşım olduğu da ortaya çıkmaktadır.

2.2 Deneyin Yapılışı ve Veri Toplama Sistematiği

Rüzgar tüneli test bölmesine giren ve çıkan havanın sıcaklığı test numunesi öncesi ve sonrasına konulan birer adet RTD aracılığıyla, yüzey sıcaklıkları ise farklı noktalarda boru yüzeyine yerleştirilen T tipi termokupllar ile ölçülmüştür. Bununla birlikte tel sıcaklığını görebilmek açısından $S/2$ mesafesinde tel içerisine iki noktadan termokupllar yerleştirilmiştir. Yoğuşturucu boruları içerisine dışı yanmaz malzeme kaplı direnç telleri yerleştirilerek verilen

elektriksel güç ile yoğuşturucu yüzeyinde sabit sıcaklık sağlanmıştır. İstenen yüzey sıcaklıklarını sağlamak için ayarlanabilir DC güç kaynağı kullanılmıştır. Bununla birlikte serpantinlere aktarılan gücü ölçmek için ölçüm hassasiyeti yüksek bir multimetre serpantin giriş ve çıkışına yerleştirilmiştir. Tek sıra için yapılan çalışmalarda güç kaynağı doğrudan serpantinlere bağlanmıştır. Çok sıralı yoğuşturucular üzerinde yapılan çalışmalarda ise güç kaynağı Şekil 2.1a)'da görülen 4 kanallı bir güç ayarlayıcısına bağlanmıştır. Her bir kanal ile serpantinlere aktarılabilecek elektriksel güç ayarlanabilmektedir. Deneysel çalışmalar boyunca yüzey sıcaklığı yaklaşık 40 °C ve 50 °C olmak üzere iki farklı sıcaklık değerinde tutulmuştur.

Test bölmesine giren havanın hızı bir frekans invertörü ile tünel içerisindeki fanı kontrol ederek sağlanmıştır. Hava hızları kanala monte edilmiş sıcak tel probu ile anlık olarak ölçülmüştür. Deneyler 0,5, 1,0, 1,5 ve 2,0 olmak üzere dört farklı hız değerinde yapılmıştır.

Basınç düşümünü incelemek için deney düzeneğinde görülen Dwyer marka MS2-101 modelinde bir fark basınç aktarıcısı kullanılmıştır. Test bölgesi giriş ve çıkış bölgelerinde bulunan statik basınç ölçüm noktalarından fark basınç aktarıcısına basınç hortumları ile bağlantı yapılmıştır. Fark basınç aktarıcısı sırasıyla 0-25 Pa, 0-40 Pa, 0-50 Pa ve 0-125 Pa aralıklarda ölçüm yapabilecek şekilde ayarlanabilmektedir. İlgili cihaz 4-20 mA çıkış verecek şekilde üretilmiştir. Tel kanatlı yoğuşturucuların en önemli avantajlarından birisi de sebep oldukları basınç düşümünün oldukça az olmasıdır. Yapılan deneysel çalışmalarda da basınç düşümünün 25 Pa değerinin altında olduğu görülmüştür. Bundan dolayı fark basınç aktarıcısı 0-25 Pa aralığında çalıştırılmıştır. Bu aralıkta okunan 4-20 mA değerlerine göre basınç düşümü için hesaplama fonksiyonu Eşitlik 2.1 'deki gibi belirlenmiştir.

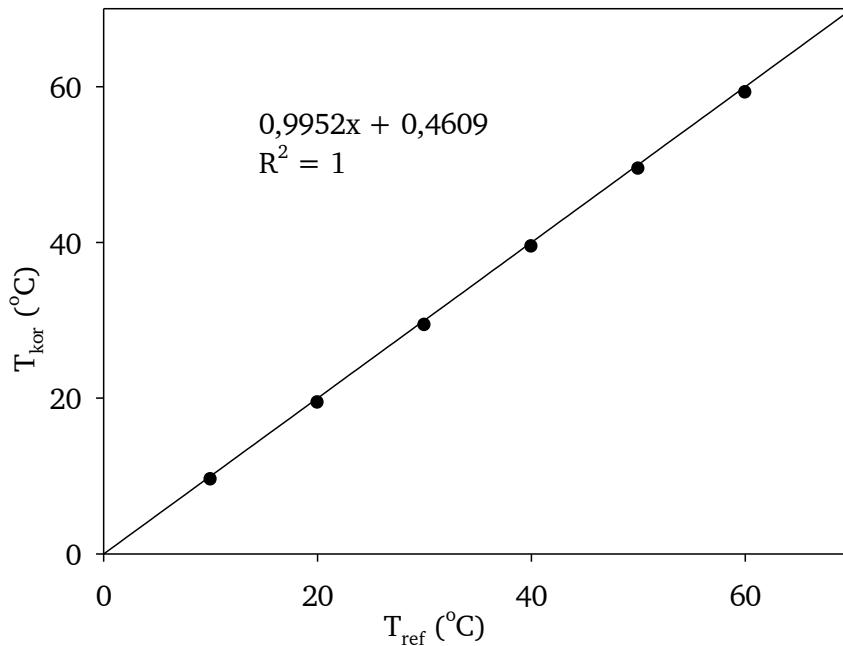
$$\Delta P = 1,5625A - 6,25 \quad (2.1)$$

Burada A okunan mA değerini, ΔP ise basınç düşümünü ifade etmektedir. Yalnızca serpantinlerden kaynaklı basınç düşümünü hesaplamak için kanal boş iken frekans inverterin üzerinden frekans değerlerinin değiştirilmesi ile oluşan basınç kayıpları hesaplanmıştır. Elde edilen bu değerler aynı frekans değerinde yapılan deneysel sonuçlardan çıkarılmıştır. Deneysel çalışma boyunca T tipi

termokupllar, RTDler ve fark basınç aktarıcısından alınan veriler anlık olarak bir veri toplama ünitesine aktarılmıştır. Elde edilen anlık veriler Agilent Benchlink® programı üzerinden takip edilerek, istenen deney şartlarına ulaşıldığında veriler kaydedilmiştir. Deneysel çalışmalarla tek ve çok sıralı yoğunlaştırucular için elde edilen veriler Ek A bölümünde Tablo A.1 ve Tablo A.2’de verilmiştir.

2.3 Kalibrasyonlar ve Belirsizlik Analizi

Deneysel çalışmada sıcaklık değerlerinin hassas bir şekilde belirlenebilmesi için çalışmada kullanılan 2 adet RTD ve 18 adet T tipi termokuplun kalibrasyonları yapılmıştır. Kalibrasyon işlemi daha önceden kalibre edilmiş referans termokupl ile tüm termokuplların eşit şartlarda ölçüm yapmaları sağlanarak, elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Kalibrasyon için gerekli sabit şartların sağlanabilmesi amacıyla şartlandırılabilen kalibrasyon su banyosu kullanılmıştır. Termoelemanların ölçüm sonuçları, veri toplama ünitesinde yardımıyla kaydedilmiş ve referans termoeleman ile kalibre edilen termoelemanın ölçmüş olduğu değerden çıkarılarak değerlendirilmiştir. Referans termokupl ile termoelemanların ölçtüğü değerler kullanılarak kalibrasyon eğrileri oluşturulmuş ve çizilen eğriler yardımıyla hata fonksiyonları bulunmuştur. Örnek bir kalibrasyon eğrisi ve hata fonksiyonu Şekil 2.4’de görülmektedir.



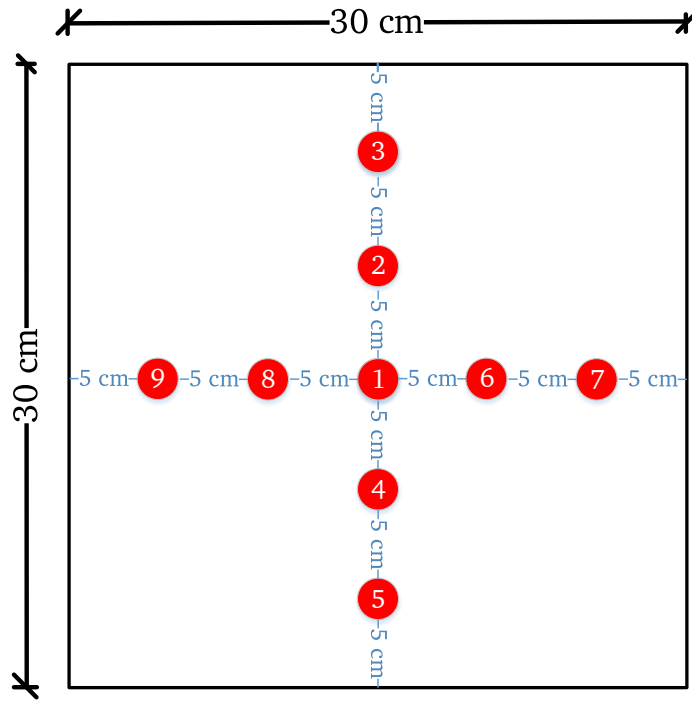
Şekil 2.4 Referans termokupl ve kalibre edilen termokupl ilişkisi

Yapılan kalibrasyon işlemi ile ilgili cihazlardan elde edilen ölçümler ve referans termokupl'dan alınan değerler sonucunda hesaplanan kalibrasyon denklemleri de Tablo 2.4'de görülmektedir.

Tablo 2.4 Termokupl ve RTDlere ait kalibrasyon denklemleri

Termoeleman adı	Kalibrasyon denklemi	Uyumluluk Değeri
1. Termokupl	$y = 0,9961x + 0,3703$	$R^2 = 1$
2. Termokupl	$y = 0,995x + 0,2846$	$R^2 = 1$
3. Termokupl	$y = 0,9952x + 0,2243$	$R^2 = 1$
4. Termokupl	$y = 0,9967x + 0,0581$	$R^2 = 1$
5. Termokupl	$y = 0,9934x + 0,1343$	$R^2 = 1$
6. Termokupl	$y = 0,9932x + 0,0116$	$R^2 = 1$
7. Termokupl	$y = 0,9948x - 0,0277$	$R^2 = 1$
8. Termokupl	$y = 0,9966x - 0,1392$	$R^2 = 1$
9. Termokupl	$y = 0,9953x - 0,1174$	$R^2 = 1$
10. Termokupl	$y = 0,9963x - 0,1413$	$R^2 = 1$
11. Termokupl	$y = 0,9965x - 0,141$	$R^2 = 1$
12. Termokupl	$y = 0,9953x - 0,1761$	$R^2 = 1$
13. Termokupl	$y = 0,9966x - 0,1834$	$R^2 = 1$
14. Termokupl	$y = 0,9948x - 0,0939$	$R^2 = 1$
15. Termokupl	$y = 0,9960x - 0,1183$	$R^2 = 1$
16. Termokupl	$y = 0,9956x + 0,0253$	$R^2 = 1$
17. Termokupl	$y = 0,9956x + 0,0484$	$R^2 = 1$
18. Termokupl	$y = 0,9958x - 0,0856$	$R^2 = 1$
1. RTD	$y = 0,9862x - 1,6805$	$R^2 = 0,999$
2. RTD	$y = 0,9855x - 1,255$	$R^2 = 0,999$

Rüzgar tüneli, Şekil 2.1'de gösterilen test bölmesine giren havanın türbülans yoğunluğu azaltacak ve gelen havanın düzgün dağılımlı olmasını sağlayacak şekilde özel dizayn edilmiş giriş kısmına sahiptir. Test bölmesine gelen hava hızlarının hassas bir şekilde belirlenebilmesi için, Şekil 2.5'de gösterildiği gibi kesit boyunca 5'er cm aralıklarla ölçümler alınmıştır.



Şekil 2.5 Kanal içi hız ölçüm noktaları

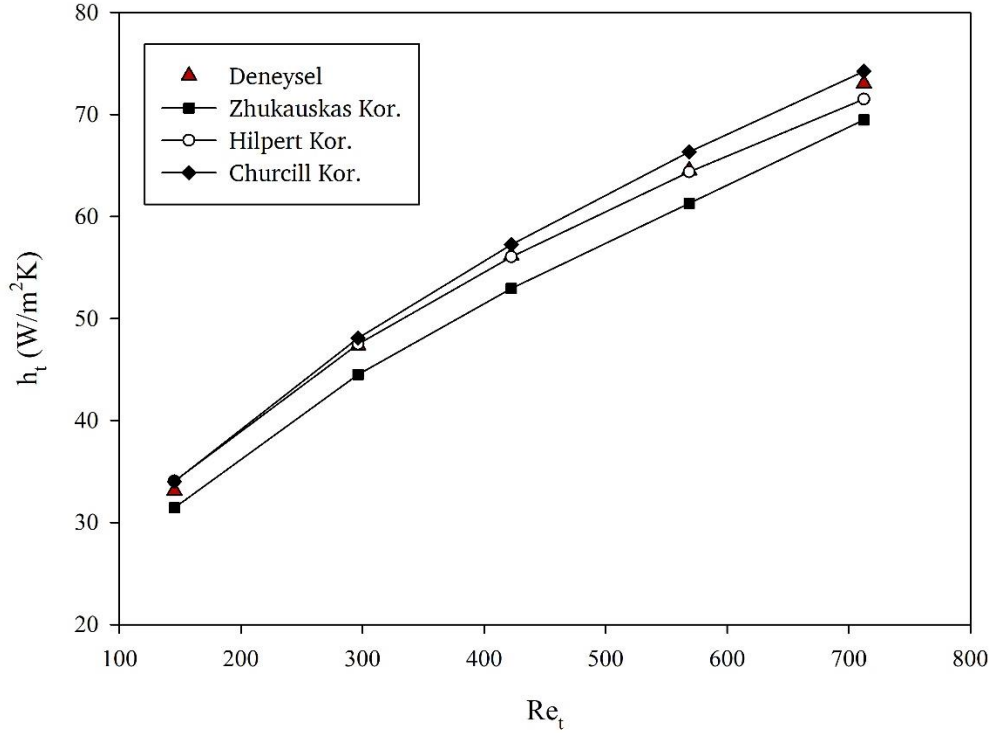
Tablo 2.5’de görüldüğü üzere ilgili noktalarda hız dağılımının kanal kesiti boyunca oldukça kararlı ve birbirine yakın olduğu belirlenmiştir.

Tablo 2.5 Kanal içi ölçüm noktalarındaki hız değerleri

Hız	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.
(m/s)	Nokta	Nokta	Nokta	Nokta	Nokta	Nokta	Nokta	Nokta	Nokta
0,5	0,50	0,50	0,48	0,50	0,49	0,50	0,49	0,48	0,49
1,0	1,01	1,01	1,00	1,01	0,99	1,00	0,99	1,00	1,00
1,5	1,49	1,48	1,48	1,49	1,49	1,50	1,49	1,50	1,49
2,0	2,01	2,00	2,00	2,01	2,00	1,99	1,99	2,00	1,99

Deneyssel çalışmada ölçüm sisteminin hassasiyeti irdelemek için ilk olarak 4,75 mm çapında ve 30 mm uzunluğunda bir boru tel bölmesi ortasına akışa dik şekilde konumlandırılarak havaya aktarılan ısı geçişi incelenmiştir. Boru, 50 °C ortalama yüzey sıcaklığı ve 23,7 °C ortalama giriş hava sıcaklıklarına göre 0,5-2,0 m/s hız aralığında deneyssel olarak incelenmiştir. Yüzey sıcaklıkları boru yüzeyine yerleştirilen üç adet termokupl ile anlık olarak ölçülmüştür. Çevrenin siyah cisim, boru yüzeyinin gri cisim davranışı sergilediği kabul edilerek ışınlama ısı geçiş hızları hesaplanmıştır. Hesaplanan değerler toplam ısı geçiş hızlarından

çıkarıldıktan sonra taşınım ile olan ısı geçiş hızları bulunmuştur. Elde edilen taşınım ile ısı geçiş hızları üzerinden deneysel olarak elde edilen taşınım katsayıları, literatürde ilgili akış şartlarında silindirik cisimler için kabul görmüş ve sıklıkla kullanılan Hilpert[61], [99], Žukauskas [61], [100] ve Churchill-Bernstein[61] korelasyonları ile karşılaştırılmıştır.



Şekil 2.6 4,75 mm çapındaki boru üzerinden elde edilen deneysel verilerle literatürdeki korelasyonların kıyaslanması

Şekil 2.6 incelendiğinde ilgili Re sayılarında sonuçların oldukça uyumlu olduğu gözlenmiştir.

Tek ve çok sıralı yoğuşturucuların belirsizlik analizi kullanılan tüm ölçüm cihazları ve geometrik özellikleri göz önünde bulundurularak Robert J. Moffat tarafından önerilen yöntemle yapılmıştır [101]. Bunlardan ilki serpantinlerden havaya aktarılan ısı geçişini göz önünde bulunduran Eşitlik 2.2'dir.

$$\dot{Q}_{T,den} = \dot{m}c_p\Delta T \quad (2.2)$$

Burada $\dot{Q}_{T,den}$ hava tarafına aktarılan toplam ısı gücü, $\dot{m}$ havanın kütleli debisini, c_p havanın özgül ısısını ifade etmektedir. ΔT , giriş-çıkış hava sıcaklık

farkını ifade etmektedir. Buna göre hava tarafı ısı geçiş hızındaki belirsizlik aşağıdaki gibi bulunabilir;

$$u_{\dot{Q}_{T,den}} = \sqrt{u_{\dot{m}}^2 \left(\frac{\partial \dot{Q}_{T,den}}{\partial \dot{m}} \right)^2 + \left(\frac{\partial \dot{Q}_{T,den}}{\partial \Delta T} \right)^2 u_{\Delta T}^2} \quad (2.3)$$

Yukarıdaki yaklaşımla hava giriş-çıkış sıcaklıklarını ölçen RTD termoelemanları ve sıcak tel tipi hızölçerin belirsizliğe etkisi irdelenmiştir. Güç kaynağı, yüzeye yerleştirilen termokuplların ve tel ile boru çaplarının belirsizliğe etkisi ise aşağıdaki gibi ikinci bir denklem aracılığıyla irdelenmektedir.

$$\dot{Q}_{gk} = KA_T \Delta T_{m,t} \quad (2.4)$$

Yukarıdaki $\dot{Q}_{gk}$ güç kaynağı ile sağlanan gücü, K kanat verimini de içine alacak şekilde hava tarafı taşınım katsayısını, A_s serpantin toplam yüzey alanının, $\Delta T_{m,t}$ ise boru yüzey sıcaklığı ile hava giriş-çıkış sıcaklıklarına bağlı logaritmik sıcaklık farkını ifade etmektedir. Buna göre belirsizlik denklemi;

$$u_K = \sqrt{\left(\frac{\partial K}{\partial \dot{Q}_{gk}} \right)^2 u_{\dot{Q}_{gk}}^2 + \left(\frac{\partial K}{\partial A_T} \right)^2 u_{A_{total}}^2 + \left(\frac{\partial K}{\partial \Delta T_{m,t}} \right)^2 u_{\Delta T_{m,t}}^2} \quad (2.5)$$

şeklinde verilebilir.

Basınç düşümü tarafında yapılan belirsizlik analizi aşağıda verilen Fanning f faktörüne göre hesaplanmıştır. İlgili formüle ilişkin detaylar bir sonraki bölümde anlatılmıştır.

$$f = \frac{\Delta P}{\frac{1}{2} \rho V^2} \frac{A_m}{A_{tp}} \quad (2.6)$$

Burada ΔP toplam basınç düşümünü, V serbest hava hızını, ρ ortalama yoğunluğu olup $1,19 \text{ kg/m}^3$ alınmıştır, A_m akışa dik konumdaki minimum kesit alanı ifade ederken A_s toplam ısı geçiş yüzey alanını ifade etmektedir.

Buna göre basınç tarafındaki belirsizlik denklemi;

$$u_f = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial \Delta P} \right)^2 u_{\Delta P}^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial V} \right)^2 u_V^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial A} \right)^2 u_A^2} \quad (2.7)$$

İlgili denklemler sonucunda deneysel çalışmaların ısı geçişi tarafında maksimum belirsizlik miktarı tek sıralı yoğuşturucularda $\pm\%10-11$, çok sıralı yoğuşturucularda $\%14-15$ civarında çıkmaktadır. Sürtünme faktörü f için belirsizlik oranı 0,5 m/s hız değerinde $\pm\%20$ 'lere ulaşmasına karşın diğer hız değerlerinde $\pm\%15$ 'in altındadır.

2.4 Isı Geçişi ve Basınç Düşümü Hesaplama Metodolojisi

2.4.1 Işınım Isı Geçiş Hızı Hesaplamaları

Tel kanatlı yoğuşturucularda hava tarafı ısı geçişi hem ışıınım hem de taşınım dolayısıyla gerçekleşmektedir. Bu durumda toplam ısı geçiş hızı

$$\dot{Q}_T = \dot{Q}_C + \dot{Q}_R \quad (2.8)$$

şeklinde hesaplanır.

Işınım ile olan ısı geçiş hızı Tagliafico ve Tanda tarafından yapılan çalışmaya benzer şekilde tel ve boru yüzey sıcaklıklarını dikkate alacak şekilde ortalama yüzey sıcaklığına göre hesaplanmıştır [15]. Işınım ile ısı geçişi hesaplamalarında ışınsallıkların (radiositiler) eşit dağılı, tel ve boru yüzeylerinin gri cisim, çevrenin siyah cisim davranışı sergilediği kabul edilmiştir. Tel kanatlı yoğuşturucularda ışıınım ısı geçişindeki görme faktörleri Ek B'de detaylı olarak verilmiştir. Buna göre tek sıra tel kanatlı yoğuşturucular için ışıınım ile ısı geçiş hızı Eşitlik 2.9 ile bulunabilir [102];

$$\dot{Q}_R = (N_t - 1) \frac{\varepsilon}{1 - \varepsilon} \left[A_{t,R} (\sigma T_{eq}^4 - J_{ta}) + A_{w,R} (\sigma T_{eq}^4 - J_{wa}) \right] \quad (2.9)$$

Burada

$$A_{t,R} = \pi D_t S_t \quad (2.10)$$

$$A_{w,R} = \pi D_w S_w \quad (2.11)$$

olarak ifade edilmiştir. Boyanın ε değeri 0,95 alınmıştır. Benzer şekilde Espíndola vd. yaptıkları çalışma ile ışıınım ile ısı geçişi hesaplamaları açısından ilk olarak yoğuşturucu yayıcılığını termografik yöntemle belirlenmişlerdir. Yapılan çalışma sonucunda yayıcılık değerinin 0,95 civarında olduğu görülmüştür [13].

Görme faktörü hesaplamaları simetri, kapalılık, toplama ve silindir çiftlerinin birbirini görmesine göre hesaplamalar yapılmış olup Ek B'de sunulmuştur.

Görünür ısı yayıcılık (ε_g) ilgili yüzey üzerinden elde edilen verilere göre bulunmuştur. Böylelikle ışınlama olan ısı geçiş hızı Eşitlik 2.12 formuna dönüşmüştür[102].

$$\dot{Q}_R = \varepsilon_g \sigma A_T (T_{eq}^4 - T_g^4) \quad (2.12)$$

Eşdeğer yüzey sıcaklığı aşağıdaki eşitlik üzerinden basit bir şekilde hesaplanabilir [15], [102].

$$T_{eq} = \frac{A_t T_t + A_w T_w}{A_T} \quad (2.13)$$

Burada T_w teller üzerindeki ortalama sıcaklığı ifade etmektedir. Boru dönüşleri dikkate alınmadığında tel, boru ve toplam yoğunlaştırucu yüzey alanı ise aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$A_t = \pi D_t S_w N_t \quad (2.14)$$

$$A_w = \pi D_w S_t N_w \quad (2.15)$$

$$A_T = A_t + A_w \quad (2.16)$$

Toplam kanat verimi bilindiğinde ortalama yüzey sıcaklığı aşağıdaki yaklaşımla kolayca bulunabilmektedir [15].

$$\eta = \frac{T_w - T_g}{T_t - T_g} \quad (2.17)$$

Burada η temas verimini de içeren genel kanat verimi olarak ifade edilmektedir.

Ancak deneysel çalışmalarda kanat verimi bilinmediği için iki noktadan boru sıralarının ortasına denk gelen ($S/2$) tel yüzeylerinin içerisine termokupllar yerleştirilerek kanat ucu sıcaklıkları ölçülmüştür. Deneysel çalışmalarda ışınlama ısı geçişi kapsamında kanat boyunca ısı geçişinin doğrusal değiştiği kabulü yapılarak ortalama tel yüzey sıcaklığı Eşitlik 2.18'deki gibi hesaplanabilmektedir.

$$T_w = \frac{T_t + T_{w,üst}}{2} \quad (2.18)$$

Böylelikle ışınlama olan ısı geçişi, toplam ısı geçiş hızından çıkarılarak yalnızca taşımla olan ısı geçişi bulunur.

2.4.2 Taşınım Isı Geçiş Hızı Hesaplamaları

Taşınım ile olan ısı geçişi hesaplamasında iki ayrı yaklaşım uygulanabilmektedir. Yapılan bu çalışmada da her iki yaklaşım kullanılarak taşınım ısı geçiş hızı hesaplanmış ve sonuçlar mukayese edilmiştir.

1. Yaklaşım

Taşınım yoluyla olan ısı geçiş hesaplamaları giriş-çıkış hava sıcaklığı ile yüzey sıcaklığı arasındaki sıcaklık farkı gözönüne alınarak Eşitlik 2.19'a göre hesaplanır.

$$\dot{Q}_C = \dot{Q}_{C,t} + \dot{Q}_{C,w} = (h_t A_t + \eta_c \eta_w h_w A_w) \Delta T_{m,t} \quad (2.19)$$

Burada ΔT_m logaritmik sıcaklık farkı olup, Eşitlik 2.20'de ifade edilmiştir. İlgili logaritmik sıcaklık farkı boru yüzeyi yanı sıra ön tel, arka tel ve ortalama tel yüzey sıcaklıklarına göre de hesaplanmaktadır. Bu eşitlik yardımıyla hesaplanacak logaritmik sıcaklık farkları daha sonra ilgili yüzeylerden hesaplanacak olan taşınım katsayıları için kullanılacaktır.

$$\Delta T_{m,i} = \frac{(T_i - T_g) - (T_i - T_c)}{\ln\left(\frac{T_i - T_g}{T_i - T_c}\right)} \quad i = t, w, bw, fw, eq \quad (2.20)$$

Boru aralıkları boyunca tel üzerindeki sıcaklık değişimi kanat verimi ile ifade edilmektedir. Kanat verimi tel kanatlı yoğuşturucularda ısı performansını etkileyen en büyük etmenlerden birisidir. Hem Lee vd.[25] hem de Hoke vd.[24] tel kanatlı tip yoğuşturucularda kanat verimini adyabatik kanat ucu sınır şartı kabulü Eşitlik 2.21'e göre hesaplamışlardır.

$$\eta_w = \frac{\tanh(mL)}{mL} \quad (2.21)$$

$$m^2 = \frac{4h_w}{k_w D_w} \quad (2.22)$$

Burada m sıcaklık gradyeninin ifade ederken, $L = S/2$ olarak ifade edilmektedir [25]. Zorlanmış taşınım şartlarında ışıınım ısı geçiş hızı, taşınım ısı geçiş hızına nazaran çok daha düşük olduğundan kanat verimi hesaplamalarında ışıınım etkisi gözardı edilmiştir.

Bilindiği üzere tel kanatlı yoğunlaştırucularda teller spot kaynağıyla boru yüzeyine kaynatılmaktadır. Bu işlem sırasında boru yüzeyinde bir bölge kısmen erimekte ve boru ile telin temas ettiği bölge eliptik bir şekil almaktadır. Kanat verimi hesaplanırken kanat dibi temas yüzeyinin alanı ve çevresi önemli olduğundan ilgili şartlara göre de kanat verimi aşağıdaki gibi hesaplanabilir. Bu amaçla ilk olarak sıcaklık gradyeni (m) elipsin alanı ve çevresine göre aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$m^2 = \frac{h_w A_{w,b}}{k_w P_w} \quad (2.23)$$

Burada $A_{w,b}$ elipsin taban alanı, P_w ise elipsin çevresini ifade etmektedir. Elipsin çevresinin bulunmasına yönelik pek çok yaklaşım vardır [103]. Çalışmada kullanılan yaklaşım a ile b arasında oranın 3'den fazla olmaması şartıyla %5'in altında hata oranıyla çevreyi hesaplayan bir yaklaşımdır [104]. İlgili hesaplamalar Eşitlik 2.24 ve 2.25 üzerinden yapılabilmektedir.

$$A_{w,b} = \pi ab \quad (2.24)$$

$$P \approx 2\pi \sqrt{\frac{1}{2}(a^2 + b^2)} \quad (2.25)$$

HAD analizi için oluşturulan geometri üzerinden okunan çevre uzunluğuyla yukarıdaki yaklaşımla elde edilen çevre uzunluğu arasında %2'in altında bir fark görülmektedir.

Tel çapı boru çapına nazaran daha küçük olduğundan aynı akış şartlarında tel üzeri taşınım katsayısı, boru üzeri taşınım katsayısına nazaran daha yüksek değerler vermektedir. Bu durumdan dolayı temas bölgesinde ısı gerilme oluşur. Isıl gerilmeye bağlı olarak kanat taban sıcaklığı boru iç yüzey sıcaklığına nazaran daha düşük bir değerdedir. Bu değeri işlemlere katabilmek açısından Eşitlik 2.26 gibi bir verim ifadesi oluşturulmuştur.

$$\eta_c = \frac{T_{w,b} - T_g}{T_t - T_g} \quad (2.26)$$

Nümerik analizler yardımıyla oluşturulan temas alanlarından ilgili temas yüzey sıcaklıkları okunmuştur. Kanat verimi de benzer şekilde basitleştirilmiş haliyle Eşitlik 2.27 ile hesaplanabilir.

$$\eta_w = \frac{T_w - T_g}{T_{w,b} - T_g} \quad (2.27)$$

Genel kanat verimi ise bu iki verimin çarpımıyla hesaplanabilir.

$$\eta = \eta_c \eta_w \quad (2.28)$$

Eşitlik 2.19 incelendiğinde temas verimi dikkate alınmazsa h_t , h_w ve η_w bu eşitliğin bilinmeyenleridir. Eğer h_w değeri belli ise η_w değeri adyabatik sınır koşulu kabulü ile bulunabilir. Bu durumda bilinmeyen sayısı ikiye düşmüş olur. Ancak h_t ve h_w değerlerinin matematiksel olarak hesaplanması oldukça güçtür. Bu değerlerin ayrı ayrı hesaplanması için Hoke vd. boru ve tel çapı arasında bir amprik bir ifade önermişlerdir [24]. Bu yaklaşımların da zorlanmış ve doğal taşınım maruz silindirler için önerilen korelasyonları incelemişler ve taşınım katsayısının değişiminin yaklaşık olarak çapların kareköküyle değiştiği yaklaşımına ulaşmışlardır. Buna karşın HAD analizi ile hem tel hem de boru üzerindeki ısı geçişi ayrıklaştırılabilmektedir. Aynı zamanda ilgili yüzey sıcaklıklarının da ortalaması program aracılığıyla okunabilmektedir. Böylece h_t ve h_w Eşitlik 2.29 uyarınca hesaplanmıştır. Uygulamada kullanım açısından telleri ön tel veya arka tel olarak ayırmaksızın bütün olarak almak uygun olacaktır. Ancak teorik hesaplama açısından telleri akış doğrultuna göre ön tel ve arka tel olarak düşünerek taşınım katsayıları da aşağıdaki eşitlik ile hesaplanabilir. Arka tel üzeri taşınım katsayısı, arka tele ulaşan hava sıcaklığı dolayısıyla daha farklı olmasına karşın basitleştirme amacıyla giriş-çıkış sıcaklığını göz önünde bulundurarak yapılan logaritmik sıcaklık farkına göre hesaplamalar yapılmıştır.

$$h_i = \frac{\dot{Q}_{C,i}}{A_i \Delta T_{m,i}} \quad i = t, w, bw, fw \quad (2.29)$$

Sonuçların değerlendirilmesi için hem tel hem de boru için kullanılan ortalama Nu ve Re sayıları aşağıdaki gibi tanımlanmıştır. Re sayıları serbest hava akım hızına göre hesaplanmıştır.

$$Re_i = \frac{\rho V D_i}{\mu} \quad i = t, w \quad (2.30)$$

Ön tel, arka tel, ortalama tel ve boru çapına göre Nu sayıları Eşitlik 2.31’de ifade edilmiştir.

$$Nu_i = \frac{h_i D_i}{k_f} \quad i = t, w, bw, fw \quad (2.31)$$

Hava tarafı taşınım ile olan ısı geçiş hızı Eşitlik 2.32 ile de hesaplanmaktadır.

$$\dot{Q}_C = \dot{m} c_p (T_c - T_g) \quad (2.32)$$

$\dot{m}$ kütleli debi olup,

$$\dot{m} = \rho_a V A_k \quad (2.33)$$

A_k serpantin kesit alanı olup Eşitlik 2.34 ile hesaplanmaktadır.

$$A_k = S_t S_w N_t \frac{N_w}{2} \quad (2.34)$$

Çıkış sıcaklığı ise olup Eşitlik 2.35 ile hesaplanır.

$$T_c = T_g - (T_{eq} - T_g) e^{-\left(\frac{h_w A_w + h_t A_t}{\dot{m} c_p} \right)} \quad (2.35)$$

Eşitlik 2.35 sadeleştirildiğinde aşağıdaki forma dönüşür.

$$T_c = T_g - (T_{eq} - T_g) e^{-\left(\pi \left(\frac{2 h_w D_w S_t + h_t D_t S_w}{V S_w S_t c_p} \right) \right)} \quad (2.36)$$

Çok sıralı yoğunlaştırıcılarda ise tüm sıralar birlikte düşünülerek ortalama tel ve boru yüzey sıcaklığına göre hesaplanmalıdır. Bu durum da ilk yaklaşıma göre taşınım ile ısı geçiş hızı Eşitlik 2.37 ile hesaplanmaktadır.

$$\dot{Q}_C = \dot{Q}_{C,t} + \dot{Q}_{C,w} = h_t A_t \Delta \bar{T}_{m,t} + h_w A_w \Delta \bar{T}_{m,w} \quad (2.37)$$

Burada $\bar{T}$ ilgili yüzeyin ortalama sıcaklığı göstermektedir. HAD analizleri üzerinden tek ve çok sıralı yoğunlaştırıcılarda taşınım katsayısı ve Nu sayısı hesaplamaları da ilgili yüzeylerden elde edilen ortalama sıcaklığa göre hesaplanmıştır.

Serpantin üzerindeki boru sıcaklığı yaklaşık olarak iç yüzey sıcaklığına eşit alınabilir. Ancak artan sıra sayılarında tel yüzey sıcaklığı artmaktadır. Bunun sebebi ise arka sıralara ulaşan hava sıcaklığının artmasıdır. Bu durumda çok sıralı yoğunlaştırıcılarda taşınım ile ısı geçiş hızını hesaplayabilmek açısından her bir sıradaki tellerin yüzey sıcaklığının hesaplanması gerekmektedir. Tel yüzey sıcaklığı bulunabilmesi iki aşamadan oluşmaktadır. Bunlardan ilki ilk sıradan başlayarak her bir sıra sonrasındaki çıkış sıcaklığının hesaplanmasıdır. Hesaplanan bu çıkış sıcaklığı bir sonraki serpantin için giriş sıcaklığını oluşturmaktadır. Daha sonra her bir sıradaki kanat verimi adyabatik sınır şartına

göre hesaplanır. Bu yöntemle elde edilen kanat verimi Eşitlik 2.17'ye eşitlenerek ilgili yaklaşım uyarınca ilgili sıradaki kanat yüzey sıcaklığı hesaplanır. İlgili yoğuşturucudaki ortalama tel yüzey sıcaklığı aşağıdaki gibi her bir sıra üzerindeki tellerin ortalama sıcaklıklarına göre hesaplanır.

$$\bar{T}_w = \frac{\sum_{i=1}^{N_L} T_{w,i}}{N_L} \quad (2.38)$$

2. Yaklaşım

Bu yaklaşımla tel ve boru üzeri taşınım katsayılarının birleştirilmesi ile ısı geçişi incelemesinde tek taşınım katsayısının kullanılması amaçlanmıştır. Taşınım ile ısı geçiş hızını bulmak amacıyla kullanılan eşitlik aşağıda sunulmuştur.

$$\dot{Q}_C = \eta_o h_{eq} A_T \Delta T_{m,t} \quad (2.39)$$

Logaritmik sıcaklık farkı boru yüzey sıcaklığına göre dikkate alınmalıdır. Burada η_o , h_{eq} ve A_T sırasıyla yüzey verimini, eşdeğer taşınım katsayısını ve toplam yoğuşturucu yüzey alanını göstermektedir. Bu yaklaşımda taşınım katsayısının bulunmasında uygulanacak ilk işlem eşdeğer çapın hesaplanmasıdır. Eşdeğer çap Eşitlik 2.40'da gösterildiği gibi hesaplanmaktadır. Benzer yaklaşımla eşdeğer çap Witzell ve Fontaine[7], Papanek[8] ve Collicott vd.[11] tarafından yapılan çalışmalarda da uygulanmıştır.

$$D_{eq} = \frac{A_t D_t + A_w D_w}{A_t + A_w} \quad (2.40)$$

Eşdeğer çapa göre Re_{eq} ve Nu_{eq} sayıları Eşitlik 2.41 ve 2.42'ye göre hesaplanabilir.

$$Re_{eq} = \frac{\rho V D_{eq}}{\mu_f} \quad (2.41)$$

$$Nu_{eq} = \frac{h_{eq} D_{eq}}{k_f} \quad (2.42)$$

Isı geçiş yüzey verimi ise Eşitlik 2.43 ile bulunabilmektedir.

$$\eta_o = 1 - (1 - \eta_w) \frac{A_w}{A_T} \quad (2.43)$$

Eşdeğer taşınım katsayısı dikkate alındığında kanat verimi değeri adyabatik kanat kabulüne göre oldukça değişmektedir. Bundan ötürü kanat verimi ifadesine ϕ adı verilen bir düzeltme faktörü eklenmelidir.

$$\eta_w = \frac{\tanh(mL\phi)}{mL\phi} \quad (2.44)$$

Bu katsayıyı belirlemeye yönelik herhangi bir çalışma bulunamamaktadır. Literatürde bu değer bulunmasına yönelik bir çalışma olmadığından tez çalışması kapsamında bu değer hesaplanabilmesine yönelik sonuçlar kısmında bir korelasyon önerilmiştir.

Sıcaklık gradyenini ifade eden m sayısının değişimi de Eşitlik 2.45'te verilmiştir.

$$m^2 = \frac{4h_{eq}}{k_w D_{eq}} \quad (2.45)$$

Bu yaklaşıma göre çıkış sıcaklığının hesabı ise Eşitlik 2.46 ile yapılabilir.

$$T_c = T_g - (T_{eq} - T_g) e^{-\left(\frac{h_{eq} A_T}{\dot{m} c_p}\right)} \quad (2.46)$$

İkinci yaklaşımla çok sıralı yoğunlaştırularda taşınım ısı geçişi hesaplamalarında ise yine benzer şekilde hesaplamalar yapılır. Buradaki temel fark kanat verimi analitik olarak hesaplanırken Eşitlik 2.44 kullanılarak tel yüzey sıcaklığının hesaplanmasıdır.

$$\dot{Q}_C = h_{eq} A_T \Delta \bar{T}_{m,eq} \quad (2.47)$$

Daha önce de bahsedildiği gibi yapılan bu çalışmada da her iki yaklaşımda kullanılarak taşınım ısı geçişi incelenmiştir. İlgili yaklaşımlar uyarınca ısı geçiş hızı yanı sıra taşınım katsayıları, çıkış sıcaklıkları hesaplanmış ve değerlendirmeler bu sonuçlara göre yapılmıştır.

Isı değiştiricilerin ısıl-akış(aero-thermal/thermal-hydraulic) performansı belirlenirken genellikle Colburn j ve Fanning sürtünme faktörünün(f) değişimi incelenir.

$$j = \frac{Nu_{eq}}{Re_{eq} Pr^{1/3}} \quad (2.48)$$

Colburn j faktörü, Nu_{eq} ve Re_{eq} sayılarına göre hesaplanmıştır.

$$f = \frac{\Delta P}{1/2 \rho V^2} \frac{A_m}{A_p} \quad (2.49)$$

Burada ΔP toplam basınç düşümünü, V serbest hava akım hızını, ρ ortalama yoğunluğu ifade etmektedir. Tel kanatlı yoğuşturucularda tel ve boru sıraları birbirini tekrar eden geometrilerden oluşmaktadır. Basınç düşümü için tekrar eden geometrik alan üzerinden hesaplanan basınç düşümü, toplam basınç düşümüne eşittir. Bu duruma göre A_m akışa dik konumdaki tekrar eden geometri minimum kesit alanı ifade ederken A_p ise tekrar eden geometri toplam ısı geçiş yüzey alanını ifade etmektedir. A_m ve A_p 'ye ilişkin eşitlikler sırasıyla aşağıda sunulmuştur.

$$A_m = (S_t - D_t)(S_w - D_w) \quad (2.50)$$

$$A_p = \pi(2S_t D_w + S_w D_t) N_L \quad (2.51)$$

Isı değiştiricilerinde performans incelemeleri genellikle j ve f faktörler üzerinden yapılır. Ancak j ve f faktörlerin birbiriyle direkt kıyaslanması doğru değildir. Çünkü j arttıkça f faktörde de artış gözlenir. Bu yüzden j ve f faktörlerin uygun şekilde boyutsuzlaştırılmasında fayda vardır. Hava tarafı ısı geçişinde iyileşmenin ölçüsünü değerlendirmek amacıyla son yıllarda ısıl-akış performans ölçüt faktörü diye adlandırılan ifadelerden faydalanılmaktadır [82], [90], [105]. Taşınım katsayısı ile pompalama gücü hızın dolayısıyla Re sayısının bir fonksiyonudur. Bu iki değer arasındaki ilişki performans değerlendirme kriteri kapsamında JF faktör ile ifade edilmiş olup, ilgili Eşitlik 2.52'de sunulmuştur [106]. Yapılan bu tez çalışmasında da ısıl-akış performans, JF faktör gözönüne alınarak değerlendirilmiştir.

$$JF = \frac{j}{f^{1/3}} \quad (2.52)$$

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği(HAD) akışkanların akış karakteristiği, ısı geçişi, kimyasal reaksiyonlar incelemek amacıyla kullanılan matematiksel eşitlikleri nümerik analiz yöntemleriyle inceleyen bilim dalıdır.

HAD analizleri Navier-Stokes denklemlerinin yanı sıra süreklilik, enerji ve ilave hareket denklemlerinin genellikle sonlu farklar veya sonlu hacimler yöntemlerinden birinden faydalanılarak yapılmaktadır.

Bu çalışma kapsamında akışkan dinamiği analizinde kullanılan korunum denklemlerine ait diferansiyel denklemler ANSYS Fluent programı aracılığıyla sonlu hacimler esasına göre ayrıştırılarak çözümleme yapılmıştır. Sonlu hacimler yöntemiyle akış hacmi temel korunum yasalarının uygulandığı küçük hacimlere bölünür. Bu küçük hacimler içerisinde hız, sıcaklık ve basınç gibi özelliklerin parçalı doğrusal olarak değiştiği kabul edilmektedir. Bu değişim oluşturulan sayısal ağ yapısı ile doğrudan ilişkili olup, elde edilen sonuçlar üzerinde oldukça etkilidir.

Günümüzde gelişen bilgisayar özellikleri ve HAD programları vasıtasıyla HAD analizleri ısı değiştirici tasarımı, iyileştirilmesi ve optimizasyonu amacıyla da sıklıkla kullanılmaktadır. Isı değiştiriciler geometrileri içerisinde birbirini tekrar eden geometrik özellikler çoğunlukta olduğundan tüm sistemi incelemek yerine küçük bir alan üzerinden analizler yapılabilmektedir. Bu işlem periyodik ve simetri sınır şartları ile sağlanır. Böylelikle ilgili alana uygulanan korunum denklemleri ile tüm sistemin incelenmesi sağlanmaktadır. Bu durumun sonucu olarak genellikle deneysel çalışmaya göre daha fazla parametrik çalışma daha kısa zamanda ve daha az maliyetle yapılabilmektedir. Ayrıca basınç, sıcaklık, hız gradyeni vs. gibi özelliklerin değişimine kolaylıkla bakılarak akışkanın çözüm bölgesindeki davranışı daha ayrıntılı olarak incelenebilmektedir [77].

Tel kanatlı yoğunlaştırucularda boru içerisindeki akışkandan olan ısı geçişi öncelikle iletimle boru yüzeyine ve tellere aktarılır. Daha sonra da havaya

aktarılmaktadır. Bu durumdan ötürü hesaplamalarda katı-akışkan etkileşimi göz önünde bulundurularak eşlenik(conjugated) ısı geçişi temelinde analizler yapılmıştır.

Süreklilik, momentum ve enerji denklemleri sırasıyla kararlı-hal koşullarında şu şekilde ifade edilir:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_j} = 0 \quad (3.1)$$

$$\rho u_j \frac{\partial (u_i)}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left((\mu + \mu_t) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \quad (3.2)$$

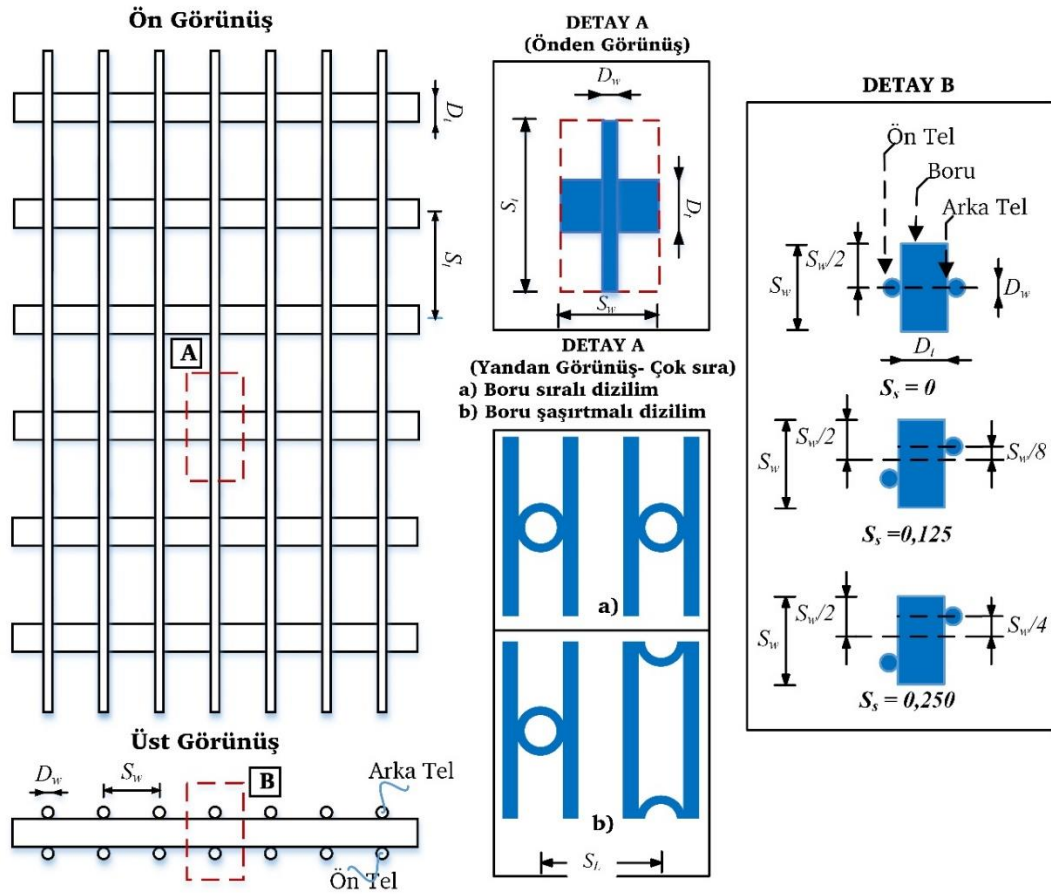
Akışkan bölge için enerji eşitliği,

$$\rho c_p \left(u_i \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left((k + k_t) \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) \quad (3.3)$$

Katı bölge için enerji eşitliği,

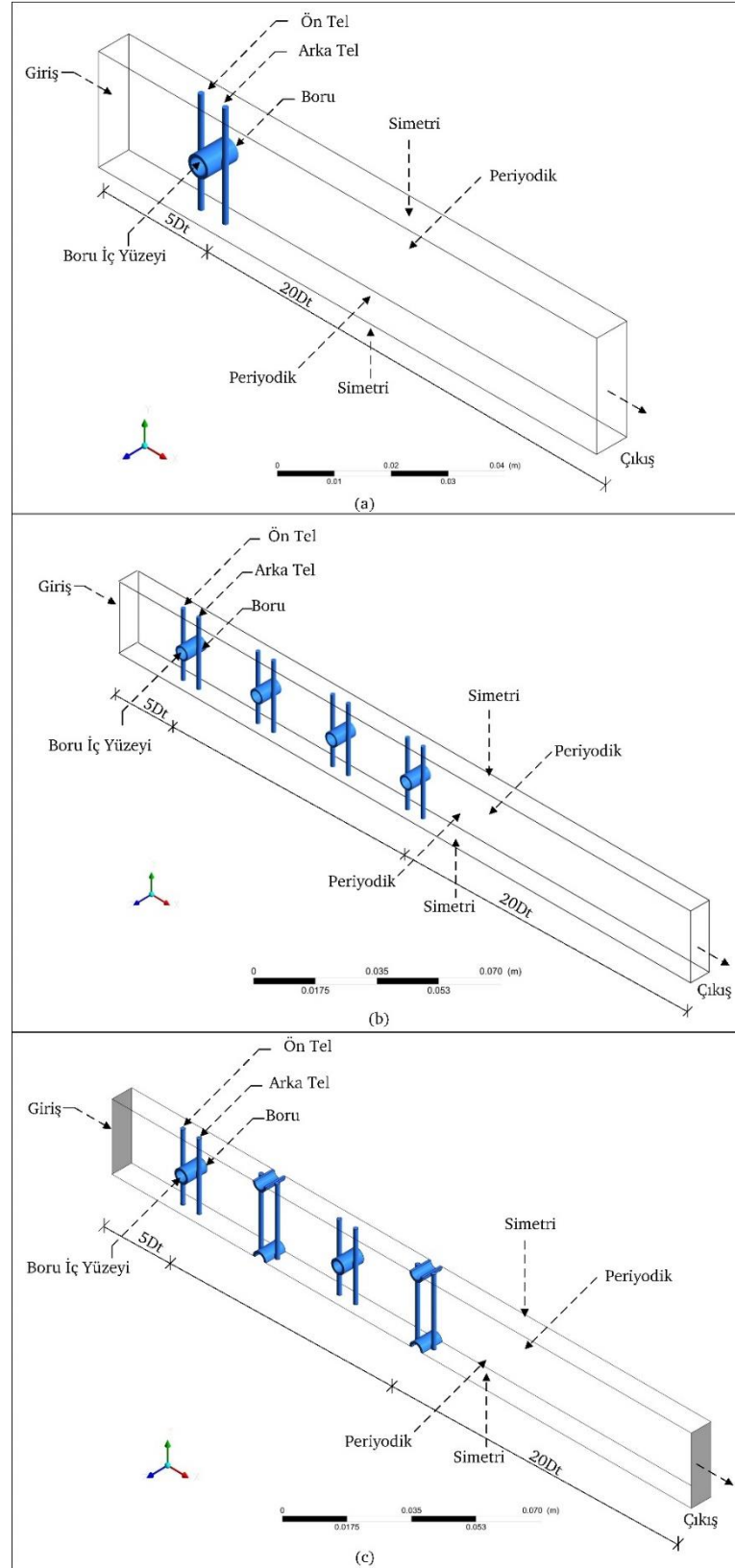
$$k_s \frac{\partial^2 T}{\partial x_j^2} = 0 \quad (3.4)$$

Burada $j=1, 2, 3$ için x_j Kartezyen koordinat sisteminde x, y ve z koordinatlarını ifade etmektedir. Bu çalışmada akışın üç boyutlu, kararlı ve akışkanın yoğunluğunun ideal gaz yasasına uyduğu, viskozite ve ısı iletim katsayısı gibi fiziksel değerlerinin sabit olduğu kabul edilmiştir. Tel kanatlı yoğuşturucuların Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği(HAD) yöntemiyle çözümlenebilmesi için Şekil 4.1’de görülen Detay A ile ifade edilen bölge üzerinden analizler yapılmıştır. İlgili bölge tek ve çok sıralı yoğuşturucularda enine ve boyuna alanda çok tekrarlı olduğundan simetri ve periyodik sınır şartlarının uygulanmasıyla tüm yoğuşturucuyu simüle ettiği kabul edilmiştir. Bu basitleştirme ile çapraz akışa maruz zorlanmış taşınım esasında çalışan yoğuşturucularda HAD analizleri yapılabilir şekle getirilmiştir.



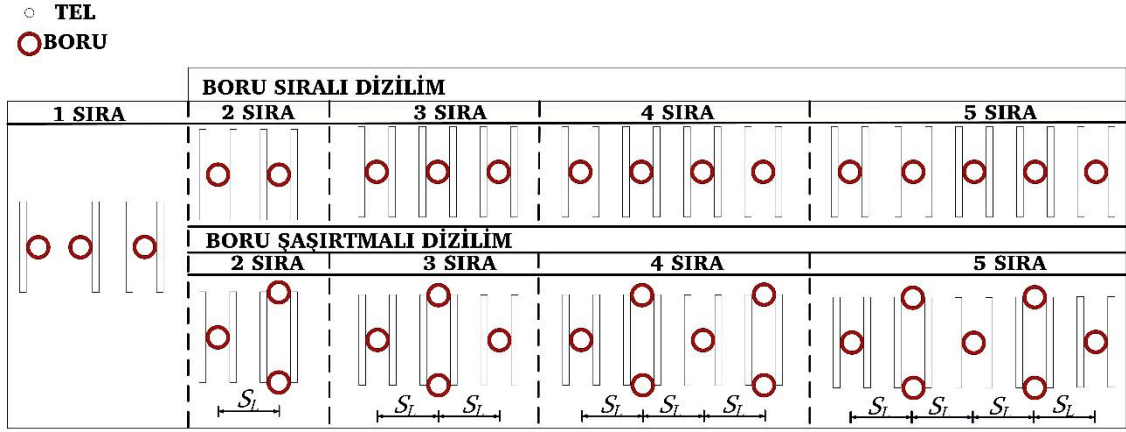
Şekil 3.1 Tek ve çok sıralı tel kanatlı yoğunlaştırıcılarda HAD analizi için seçilen bölge

Çok sıralı tel kanatlı yoğunlaştırıcılarda sıralar boru dizilimlerine göre şaşırtmalı ve sıralı olarak yerleştirilebilmektedir. Şekil 3.1 içerisinde görülen Detay A bölgesinin yandan görünüşünde a) boru sıralı, b) boru şaşırtmalı dizilimi incelemek için seçili bölgeler gösterilmiştir. Detay B ise hem tek hem de çok sıralı yoğunlaştırıcılarda seçili bölge içindeki tellerin birbirine göre tandem ve şaşırtmalı dizilimlerini göstermektedir. Hem tek sıra hem de çok sıra tel kanatlı yoğunlaştırıcılar için ilgili geometriler Ansys DesingModeler® programında akış bölgesiyle birlikte Şekil 3.2’de görüldüğü üzere oluşturulmuştur. Şekil 3.2 a), b) ve c) sırasıyla **tek sıra**, 4 sıra **boru sıralı** ve 4 sıra **boru şaşırtmalı** dizilim için oluşturulan domainler görülmektedir.



Şekil 3.2 HAD analizinde kullanılan yoğunlaştırucu geometrileri ve sınır şartları a) Tek sıra, b) Çok sıra boru sıralı dizilim (4 Sıra) , c) Çok sıra boru şaşırtmalı dizilim (4 Sıra)

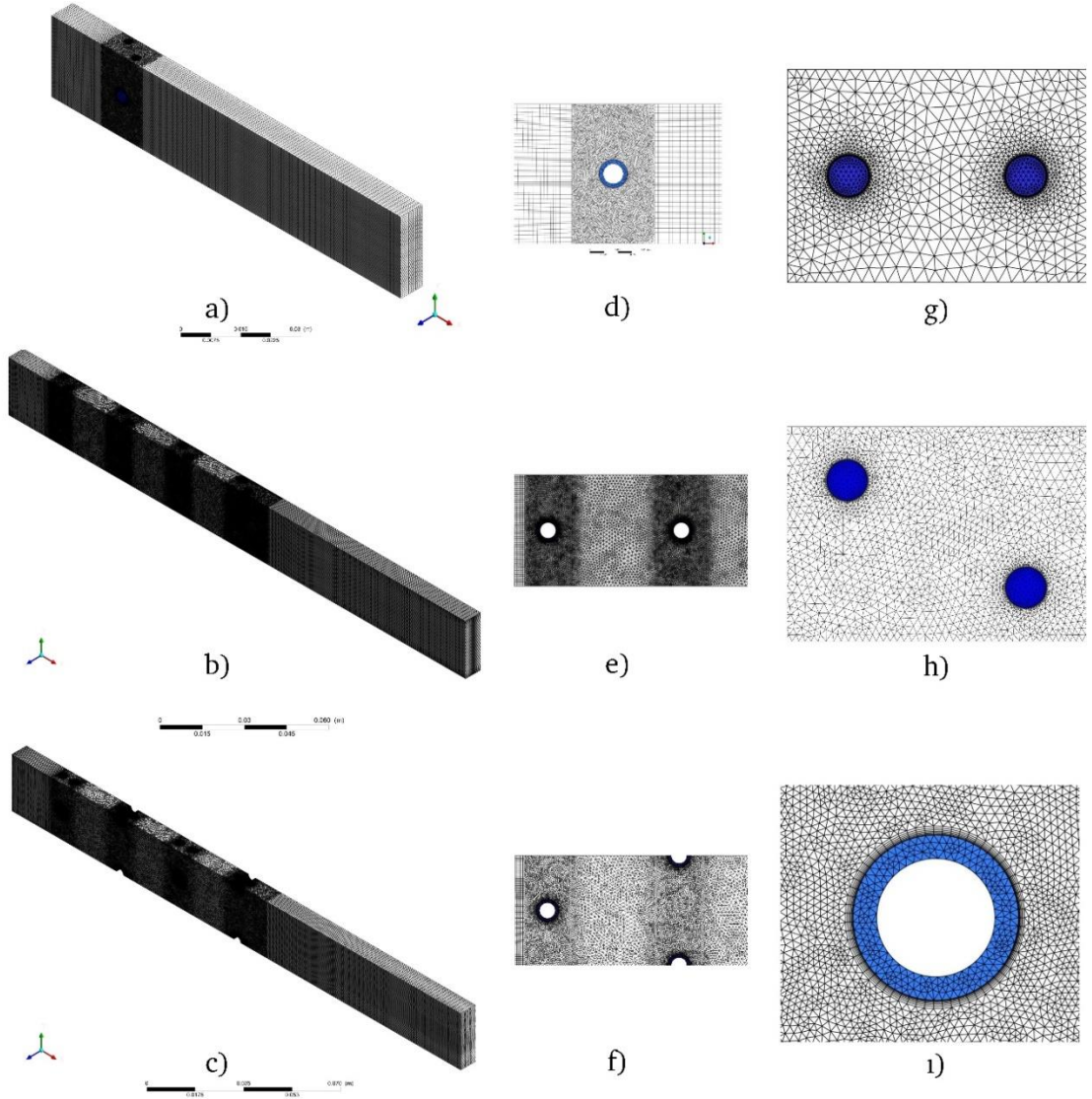
Akışın doğru şekilde incelemesi için giriş ile seçilen geometri arası mesafe boru çapının 5D seçilirken çıkış ile yoğunlaştırıcı arası mesafe boru çapının 20D katı seçilmiştir. HAD çalışması yapılan tüm geometriler Şekil 3.3’de gösterilmiştir.



Şekil 3.3 HAD analizlerinde çalışılan tüm geometriler

Analizlerde çapraz akışa maruz çok sıra tel kanatlı yoğunlaştırıcılarda uygulamada olduğu gibi her bir sırada boru ön ve arka yüzeyinde tellerin olduğu durum göz önüne alınarak analizler yapılmıştır. Aynı zamanda tellerin şaşırtmalı dizilimleri de incelenmiştir. Çok sıralı yoğunlaştırıcılarda 2, 3, 4 ve 5 sıra sayısı (N_L) için analizler yapılmıştır. Tek sıralılarda da çok sıralılara benzer çalışmalar yapılmasının yanı sıra boru yüzeyinin tek bir tarafına tellerin yerleşimi de incelenmiştir. Bu dizilim, çalışma içerisinde tek tel dizilim olarak adlandırılmıştır.

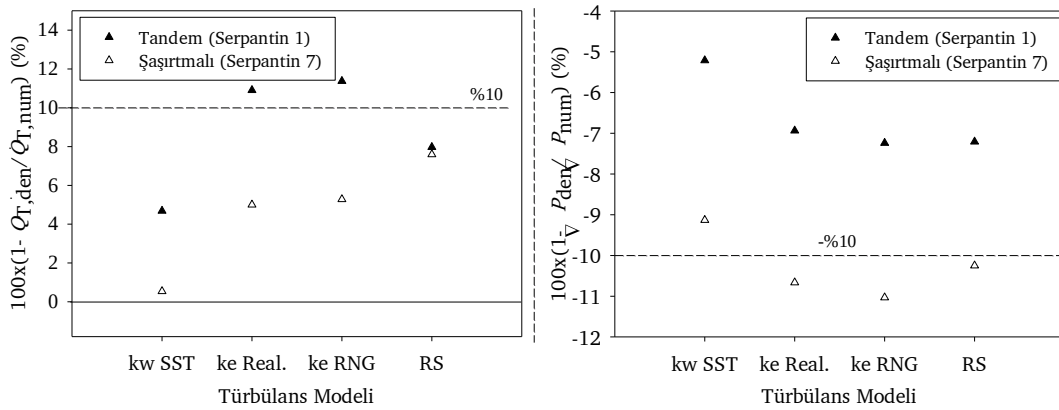
Çözüm için kullanılan sayısal çözüm ağ yönteminde ağ sayısını azalmak için hibrit ağ yöntemi ile sayısal çözüm ağlama yapılmış olup tetra, hexa, wedge ve piramit sayısal çözüm ağ tipleri kullanılmıştır. Tek ve çok sıralı yoğunlaştırıcılarda kullanılan sayısal çözüm ağ yapıları ile boru ve teller üzerindeki detayları Şekil 3.4’de gösterilmiştir. Tel kanatlı yoğunlaştırıcı geometrilerinin yakınındaki bölgelere uygulanan sayısal çözüm ağları akış ve ısı geçişi davranışını hassas şekilde analiz edebilmek için oldukça yoğun şekilde oluşturulmuştur. Boru ve tellerin etrafına özel ağ katmanları (inflation) uygulanarak sınır tabaka etkileri hassas şekilde incelenmiştir. İlgili detaylar Şekil 3.4 içerisinde görülmektedir.



Şekil 3.4 Çözümlemede kullanılan ağ yapıları a) Tek sıralı dizilim üç boyutlu sayısal ağ görünümü, b) 4 sıra boru sıralı dizilim üç boyutlu sayısal ağ görünümü, c) 4 sıra boru şaşırtmalı dizilim üç boyutlu sayısal ağ görünümü, d) Tek sıra boru etrafı detay görünümü, e) Çok sıra boru sıralı dizilim boru etrafı detay görünümü, f) Çok sıra boru şaşırtmalı dizilim boru etrafı detay görünümü, g) Tel etrafı detay (Tandem), h) Tel etrafı detay (Şaşırtmalı), ı) Boru etrafı detay

Çapraz akışa maruz tel kanatlı yoğunlaştırucularda çalışılan hız aralıklarına göre yalnızca tel çapı veya boru çapı dikkate alındığında akış şartları laminar aralıkta kalmaktadır. Ancak teller boru ön ve arka yüzeyine kaynatıldığından akış ve ısı geçiş davranışı oldukça değişmektedir. Bunun başlıca sebebi sınır tabaka etkileşimleri ve tel kanatlı yoğunlaştırucu geometrisi dolayısıyla akışında oluşan bozulmalardır. Tellerin boruya kaynatılması dolayısıyla akışla ilk karşılaşan ön tel, arka tel ve boru üzerindeki akış için bir girdap üretici görevi görmektedir. Boru ise ön tel üzeri akışı kısmen etkilemesine karşın arka tel üzerinde büyük

oranda girdap üretici görevi görmektedir. Bu nedenle akış alanındaki türbülans miktarı oldukça artmaktadır. Seçili tel kanatlı yoğunlaştırıcı alanı üzerinden laminar yaklaşımla yapılan analizlerde sonuçların yakınsaması olmamaktadır. Summer iki sıra tandem dizilime sahip çapraz akışa maruz silindirik cisimlerle yapılan çalışmalar da ön ve arka sıradaki cisimler arasında bölgenin yüksek miktarda türbülans ihtiva ettiğini belirtmiştir [40]. Ayrıca düşük Re sayılarında gaz akışkanın geçmek zorunda kaldığı dar alana bağlı olarak arka sıralara ulaşan akışın yüksek türbülans içerdiğini gösteren çalışmalar bulunmaktadır [79], [107], [108]. Bu duruma bağlı olarak akışın tam anlamıyla laminar olamayacağı ifade edilmiştir [79]. Şekil 3.5’de tel kanatlı yoğunlaştırıcılarda akış ve ısı geçişi incelemesinde hangi türbülans modelinin kullanılması gerektiği bulmak amacıyla $k-\epsilon$ Realizable EWT, $k-\epsilon$ RNG EWT, $k-\omega$ SST ve Reynolds Stress modelleri ile Serpantin 1 ve Serpantin 7 üzerinden elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır.



Şekil 3.5 Tel kanatlı yoğunlaştırıcı ısı ve akış analizleri için türbülans modellerin karşılaştırılması a) Isı geçiş hızı, b) Basınç düşümü

Deneysel çalışma verileri giriş hızı 2 m/s yüzey sıcaklığı 50 °C şartlarında elde edilen sonuçlardır. Analizler Tablo 3.1’de görülen Durum 2’den elde edilen sayısal ağ yapısına göre yapılmıştır. $\dot{Q}_{sel,num}$ değeri nümerik çalışma için seçilen yoğunlaştırıcı bölgesinden bulunan ısı geçiş hızının deneyde kullanılan alana genişletilmesine göre hesaplanmıştır. İlgili eşitlik aşağıda sunulmuştur.

$$\dot{Q}_{T,num} = \dot{Q}_{sel,num} N_t \frac{N_w}{2} \quad (3.5)$$

Şekil 3.5 incelendiğinde ısı geçişi açısından tüm modeller %10 civarında bir hata aralığında sonuçlar verirken, basınç düşümü açısından $k-\omega$ SST dışındaki

modeller %10 hata bandının üstüne çıkmaktadır. Yukarıdaki grafiklere göre hem basınç hem de ısı geçiş hızına göre en uyumlu sonuçların k- ω SST modeli ile yapılan çözümlemeler ile ulaşıldığı belirlenmiştir. k- ω SST modeli Menter tarafından geliştirilen standart k- ω ve standart k- ϵ modelinin harmanlanmış bir modelidir. k- ω temellinde oluşturulan SST türbülans modeli türbülanslı kopma gerilmelerini hesaplar ve akım ayrılmalarının başlangıcını ve ters basınç gradyenleri altındaki ayrılma miktarını yüksek kesinlikte tahmin eder. Bu model sınır tabaka akışlarının incelenmesinde oldukça başarılı sonuçlar veren bir modeldir. k- ω SST modelinin genel avantajı sınır tabaka etrafında k- ω modeli ile çözüm yaparken serbest akım bölgesinde k- ϵ modeline göre çözüm yapmasıdır. Ters basınç gradyeninin olduğu akışlar ile akış ayrılması ihtiva eden sistemlerin incelenmesinde iyi sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Bilindiği üzere k- ω modeli genel denklemlere ek olarak türbülans kinetik enerjisi (k) ve türbülans özgül yayılma hızı (ω) için yazılan iki adet transport denkleminin daha çözülmesi esasına dayanmaktadır [27, 28].

Bu model için transport denklemleri şu şekildedir: [34]

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial k}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - Y_k + S_k \quad (3.6)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial \omega}{\partial x_i}(\rho \omega u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_\omega - Y_\omega + D_\omega + S_\omega \quad (3.7)$$

Burada G_k ortalama hız gradyanından dolayı türbülans kinetik enerjinin üretimi, G_ω türbülansın özgül yayılma hızı üretimini, Γ_k ve Γ_ω sırasıyla k ve ω 'nın efektif yayılımını, Y_k ve Y_ω sırasıyla k ve ω 'nın dağılımını ifade eder. S_k ve S_ω kullanıcı tarafından tanımlanan kaynak terimleri iken D_ω difüzyon katsayıları arası ilişkiyi temsil eden terimdir.

k- ω SST modelinde efektif yayılımlar aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$\Gamma_k = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \quad (3.8)$$

$$\Gamma_\omega = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \quad (3.9)$$

Burada σ_k ve σ_ω sırasıyla k ve ω 'nın türbülans Prandtl sayılarını ifade etmektedir.

$$\sigma_k = \frac{1}{\frac{F_1}{\sigma_{k,1}} + \frac{(1-F_1)}{\sigma_{k,2}}} \quad (3.10)$$

$$\sigma_\omega = \frac{1}{\frac{F_1}{\sigma_{\omega,1}} + \frac{(1-F_1)}{\sigma_{\omega,2}}} \quad (3.11)$$

Türbülans viskozitesi μ_T ise aşağıdaki gibi hesaplanır;

$$\mu_T = \frac{\rho k}{\omega} \frac{1}{\max\left[\frac{1}{a^*}, \frac{SF_2}{a_1 \omega}\right]} \quad (3.12)$$

Burada S gerilim oranının büyüklüğünü ifade etmektedir.

a^* küçük Reynolds sayısı korelasyonları dolayısıyla türbülans viskozitesini azaltan katsayıdır ve aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır

$$a^* = a_\infty^* \left(\frac{a_0^* + Re_t / R_k}{1 + Re_t / R_k} \right) \quad (3.13)$$

$$Re_t = \frac{\rho k}{\mu \omega} \quad (3.14)$$

$$a_0^* = \frac{\beta_i}{3} \quad (3.15)$$

$$\beta_i = 0,072 \quad (3.16)$$

F_1 ve F_2 harmanlama fonksiyonlarıdır ve aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$F_1 = \tanh(\Phi_1^4) \quad (3.17)$$

$$\Phi_1 = \min \left[\max \left(\frac{\sqrt{k}}{0,09 \omega y}, \frac{500 \mu}{\rho y^2 \omega} \right), \frac{4k}{\sigma_{\omega,2} D_\omega^+ y^2} \right] \quad (3.18)$$

$$D_\omega^+ = \max \left(2\rho \frac{1}{\sigma_{\omega,2}} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}, 10^{-10} \right) \quad (3.19)$$

$$F_2 = \tanh(\Phi_2^2) \quad (3.20)$$

$$\Phi_2 = \max \left(\frac{2\sqrt{k}}{0,09 \omega y}, \frac{500 \mu}{\rho y^2 \omega} \right) \quad (3.21)$$

Burada y , sonraki yüzeye olan uzaklığı ifade ederken D_ω^+ difüzyon katsayıları arası ilişkiyi temsil eden terimin pozitif oranıdır

Türbülans kinetik enerjisi üretimi aşağıdaki gibi bulunmaktadır.

$$G_k = -\overline{\rho u'_i u'_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \quad (3.22)$$

Türbülans özgül yayılım oranı üretimi de benzer şekilde aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$G_\omega = \frac{\alpha}{\nu_t} G_k \quad (3.23)$$

$$a_\infty = F_1 a_{\infty,1} + (1 - F_1) a_{\infty,2} \quad (3.24)$$

$$a_{\infty,1} = \frac{\beta_{i,1}}{\beta_\infty^*} - \frac{\kappa^2}{\sigma_{w,1} \sqrt{\beta_\infty^*}} \quad (3.25)$$

$$a_{\infty,2} = \frac{\beta_{i,2}}{\beta_\infty^*} - \frac{\kappa^2}{\sigma_{w,2} \sqrt{\beta_\infty^*}} \quad (3.26)$$

Burada $\kappa = 0,41$ 'dir.

Türbülans kinetik enerjisinin dağılımı aşağıdaki gibi bulunmaktadır.

$$Y_k = \rho \beta^* k \omega \quad (3.27)$$

Burada,

$$\beta^* = \beta_i^* \left[1 + \zeta^* F(M_t) \right] \quad (3.28)$$

$$\beta_i^* = \beta_\infty^* \left(\frac{4/15 + (Re_t / R_\beta)^4}{1 + (Re_t / R_\beta)^4} \right) \quad (3.29)$$

$$F(M_t) = \begin{cases} 1 & M_t \leq M_{t0} \\ M_t^2 - M_{t0}^2 & M_t \geq M_{t0} \end{cases} \quad (3.30)$$

$$M_t^2 = \frac{2k}{a^2} \quad (3.31)$$

Türbülans özgül yayılım oranı dağılımı ise aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$Y_\omega = \rho \beta \omega^2 \quad (3.32)$$

$$\beta = \beta_i \left[1 - \frac{\beta_i^*}{\beta_i} + \zeta^* F(M_t) \right] \quad (3.33)$$

Burada,

$$\beta_i = F_1 \beta_{i,1} + (1 - F_1) \beta_{i,2} \quad (3.34)$$

Daha önce bahsedildiği üzere standart k- ω ve standart k- ε modellerinin harmanlanmış bir şekliydi. Bu modeller arasındaki bağlantı aşağıda ifade edilen

difüzyon katsayıları arası ilişkiyi temsil eden terimin hesaplanmasıyla bulunmaktadır.

$$D_{\omega} = 2(1 - F_1) \rho \frac{1}{\omega \sigma_{\omega,2}} \frac{\partial k}{\partial X_j} \frac{\partial \omega}{\partial X_j} \quad (3.35)$$

$$\sigma_{k,1} = 1,176, \sigma_{k,2} = 1,0, \sigma_{\omega,1} = 2,0, \sigma_{\omega,2} = 1,168, a_1 = 0,31, \beta_{i,1} = 0,075, \\ \beta_{i,2} = 0,0828, \alpha_{\infty}^* = 1,0, \alpha_{\infty} = 0,52, \alpha_0 = 1/9, \beta_{\infty}^* = 0,09, M_{t0} = 0,25, \zeta^* = 1,5, \\ R_{\beta} = 8, R_k = 6, R_{\omega} = 2,95$$

Bu sabit değerler, çeşitli akışlar için yapılan deneysel çalışmalardan elde edilmiştir [38,39,40].

Akışkan için ideal gaz kabulü yapılmıştır. İdeal gaz için ısı geçiş denklemi aşağıda ifade edilmiştir.

$$pV = \rho RT \quad (3.36)$$

Çalışma da ışıınım etkisi de incelenmiştir. Bu kapsamda akışkan olarak hava ile çalışıldığından dolayı havanın ısı geçişine etkisi olmadığından ışıınım ısı geçişi yüzeylere bağlı olarak hesaplanmıştır. Işıınım hesaplamalarında Discrete Ordinate yöntemi kullanılmıştır [110]. Bu model hesaplamalarda saçılım, soğurma ve yayıcılığı göz önünde bulundurmaktadır.

Genel denklemi;

$$\frac{dI(\vec{r}, \vec{s})}{ds} + (a + \sigma_s) I(\vec{r}, \vec{s}) = an^2 \frac{\sigma T^4}{\pi} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I(\vec{r}, \vec{s}') \Phi(\vec{s}, \vec{s}') d\Omega' \quad (3.37)$$

Gri yüzeylerdeki net ısı geçişi aşağıdaki denkleme göre bulunmaktadır.

$$Q''_{rad,out} = n^2 \varepsilon \sigma T^4 + (1 - \varepsilon) Q''_{rad,in} \quad (3.38)$$

Burada $Q''_{rad,in}$ gelen ısı akı olmak üzere aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$Q''_{rad,in} = \int_{\vec{s} \cdot \vec{n} > 0} I_{in} \vec{s} \cdot \vec{n} d\Omega \quad (3.39)$$

Sayısal çözüm ağı bağımsızlık analizi için Tablo 1'de görüldüğü üzere üçer farklı değerde analizler yapılmıştır. Tek ve çok sıralı yoğunlaştırucu analizlerinde hız değeri 2 m/s, boru iç yüzey sıcaklıkları tek sıra için 50 °C, çok sıra için 40 °C'ye

göre yapılan deneysel çalışma şartları uygulanmıştır. Çok sıralı yoğuşturucu analizlerinde sıralar arası mesafe $S_L=37,8$ mm olan çalışma referans alınmıştır.

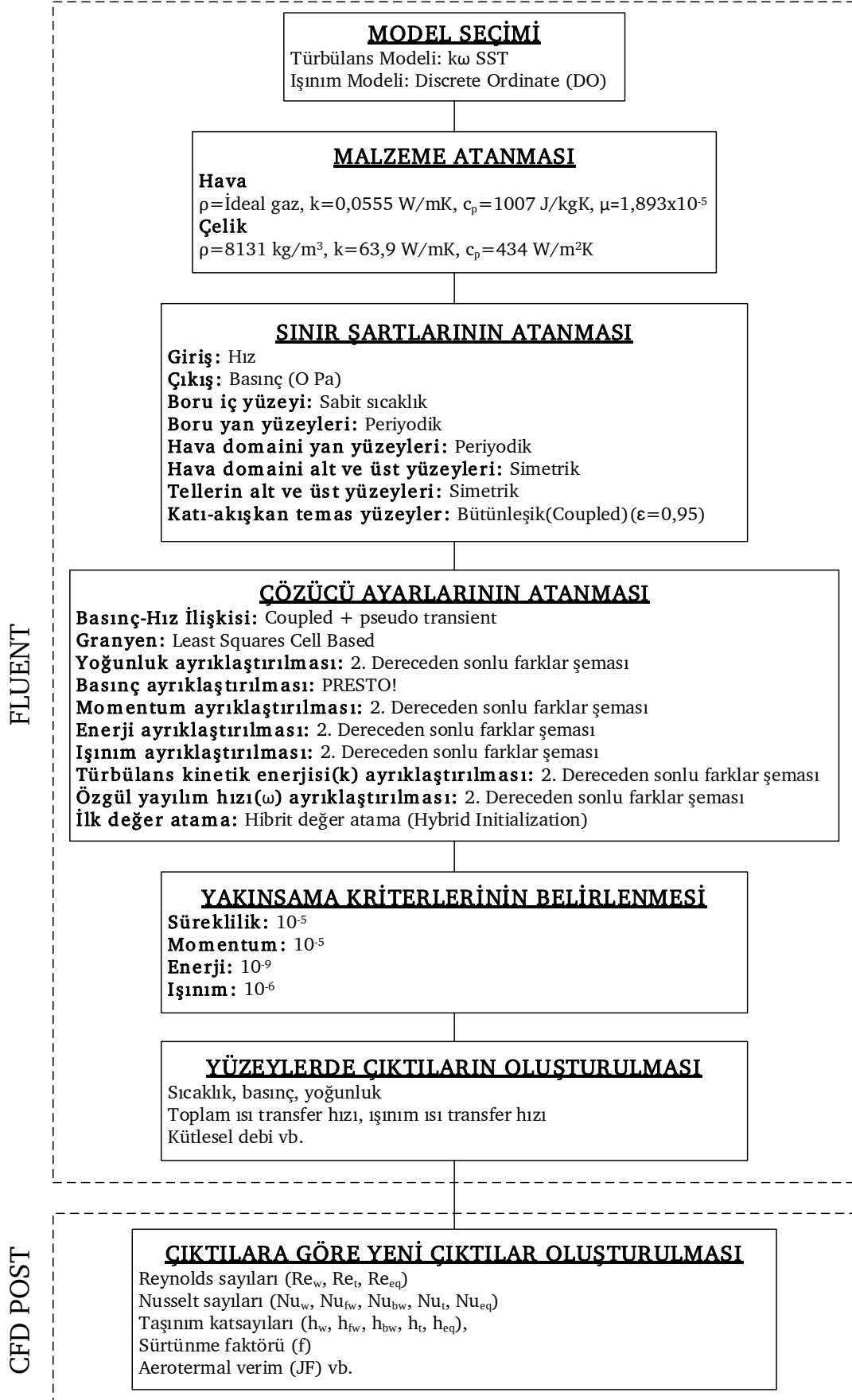
Tablo 3.1 Sayısal ağdan bağımsızlık çalışması sonuçları

Serpantin	Sıra Sayısı	Durum	Eleman Sayısı	$Q_{T,sel}$ (W)	T_c (°C)
1	1	1	431463	0,762	24,45
		2	1476709	0,759	24,41
		3	3966211	0,758	24,40
	4	1	1290246	1,624	25,92
		2	4191875	1,661	26,13
		3	8371582	1,662	26,14
	1	1	509575	0,853	24,02
		2	1076778	0,861	24,25
		3	1817405	0,861	24,20
7	4	1	1389262	2,006	25,84
		2	3254823	2,113	26,18
		3	6754821	2,115	26,20

Farklı parametrik çalışmalarda değişen geometrik özelliklerle sayısal çözüm ağının uygun şekilde değişebilmesi için program aracılığıyla gövde yüzey ve kenarlara belli boyutlar(sizing) atanmıştır. İlgili boyutlar ağdan bağımsızlık analizi ile tek sıralı Serpantin 1 geometrisi sonuçlarına göre belirlenmiştir. Ancak çoklu kontrol açısından 4 sıralı Serpantin 1 ile tek ve 4 sıralı Serpantin 7 üzerinden de ağdan bağımsızlık analizleri aynı ayarlamalara göre yapılmıştır. 2. Durumdaki sayısal ağ ayarları göz önünde bulundurularak sayısal analizler gerçekleştirilmiştir.

Analiz için ilgili geometri ve sayısal ağ oluşturulduktan sonra Fluent programı üzerinden yapılan ilk işlem türbülans modeli ile ısıtım modelinin seçilmesidir. Daha sonra analiz için oluşturulan geometri içerisindeki akışkan ve katı bölgelere ilgili malzeme özellikleri atanır. Şekil 4.2’de belirtilen yüzeylere uygun sınır şartları atanır. Hava domaini ve tellerin diferansiyel formdaki korunum ve diğer denklemler uygun yöntemler ile nümerik forma dönüştürülür. İlgili sınır şartlarına göre iteratif çözüm yapılır. Alınacak sonuçlar belirlenir ve Workbench

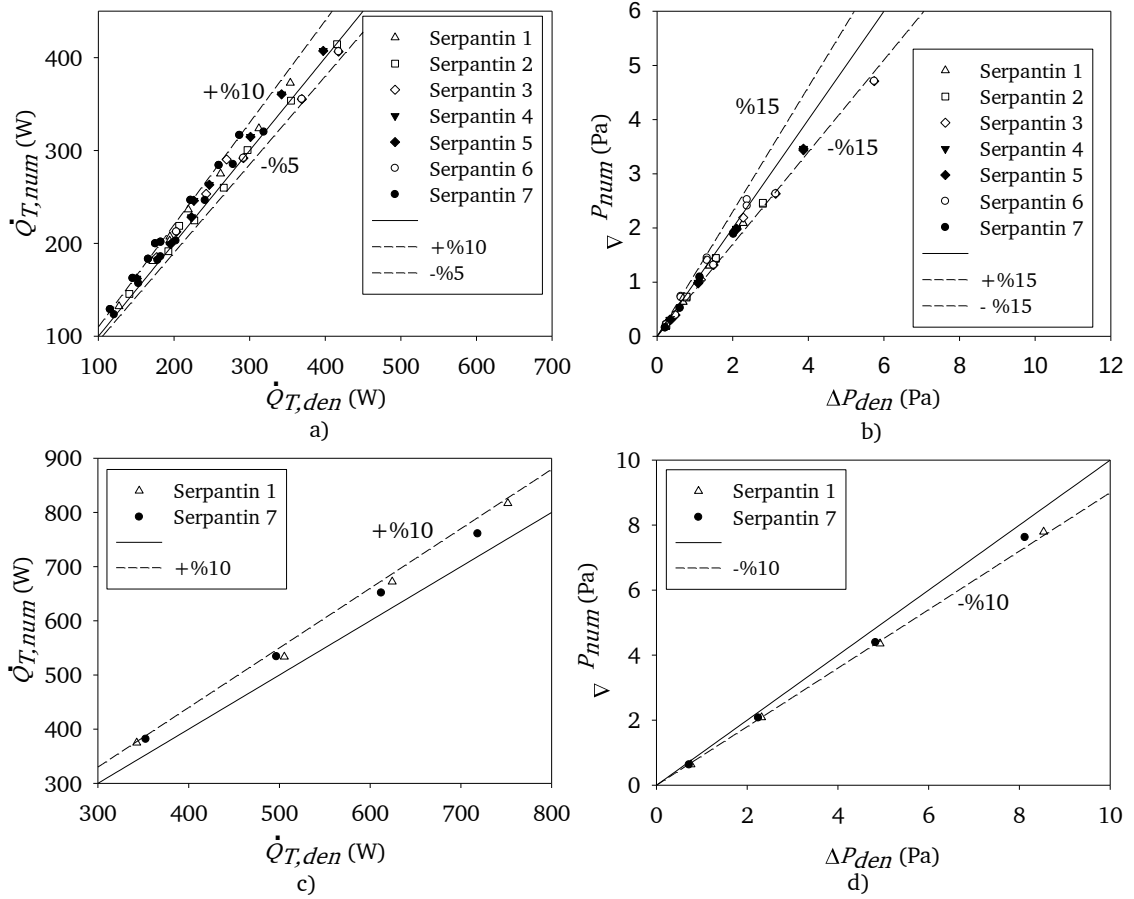
arayüzüne alınır. İteratif çözüm belirlenen yakınsama değerlerine ulaştığında çözüm sonlandırılır. Fluent programı arayüzünde hız, sıcaklık, basınç ve ısı geçiş hızı gibi değerler okunabilmektedir. Bu değerler, CFD-Post programında işlenerek kullanıcının incelemek istediği program arayüzünde olmayan yeni fonksiyonlar oluşturulabilir. İlgili fonksiyonlar Workbench arayüzüne çekilerek işlenebilir. Aşağıda verilen akış diyagramında bu işlemler detaylıca ifade edilmiştir.



Şekil 3.6 HAD analizi hesaplama metodolojisi

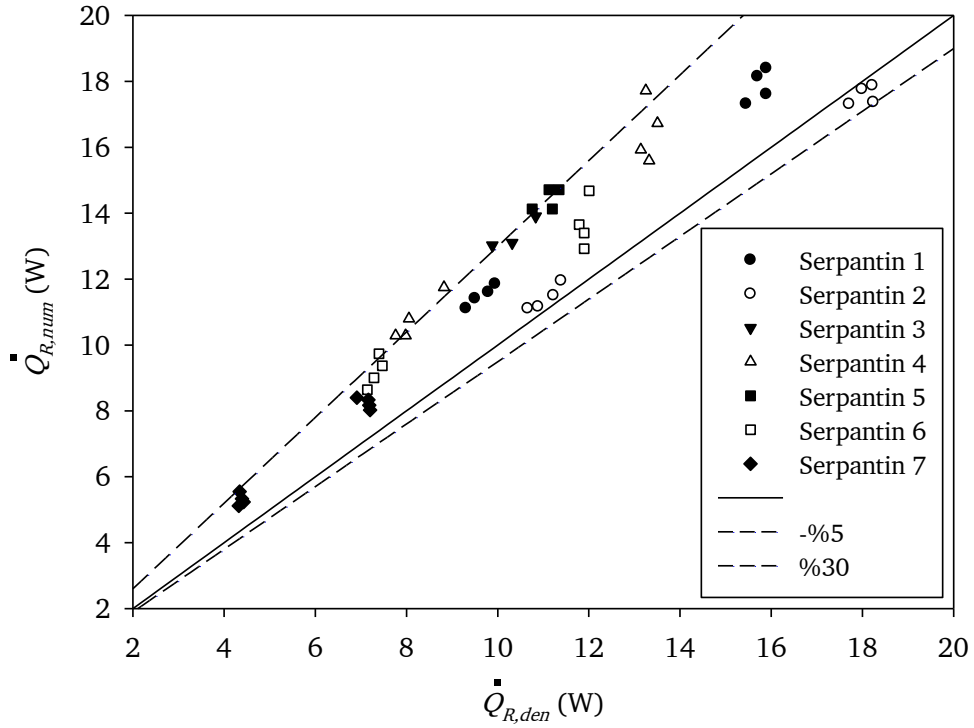
Program içerisindeki çözücü rahatlatma değerleri (under relaxation) değerleri değiştirilmemiştir. Yakınsama kontrolü için ayrıca program aracılığıyla çıkış sıcaklığı ile toplam ısı geçiş hızının değişimi düzenli olarak kontrol edilmiştir. Akışkan olarak hava, katı bölgeye ise karbon çeliği özellikleri atanmıştır. Havanın yoğunluğu ideal gaz yasasına göre hesaplanmış olup, diğer özellikleri film sıcaklığına göre girilmiştir. Yoğuşma prosesini simüle etmek amacıyla boru iç yüzeyine sabit sıcaklık sınır şartı uygulanmıştır. Boru iç yüzey sıcaklığı 50 °C, giriş hava sıcaklığı 22,5 °C’de sabit tutulmuştur. Giriş sınır şartı hız olarak belirlenirken, hız aralığı 0,5- 2,5 m/s hız değerleri arasında girilmiştir. Giren havanın türbülans yoğunluğu %5 alınırken türbülans viskozite oranı 5 olarak alınmıştır. Doğrulama deneylerinde boru iç yüzey sıcaklığı 40 °C civarında olacak şekilde de analizler yapılmıştır. Normalde tellerin tandem diziliminde hava domaini ve boru yanal yüzeylerine simetri sınır şartının uygulanması makul bir yaklaşımdır. Ancak geometrilerin oluşturulması aşamasında bir sıra da bulunan tel çiftlerinin merkezleri $S_w \times 10^{-6}$ mm oranında saptırılacak şekilde oluşturulmuştur. Böylelikle bu değerlerdeki analizlerin tandem dizilimde davranış gösterdiği kabul edilmiştir. Başka bir deyişle S_s değeri (10^{-6} ile 0,25) aralığında değiştirilmiştir. Böylece CYY ve optimizasyon çalışmaları için farklı geometrik özelliklere sahip yoğuşturucu geometrileri ve akış alanı hızlıca oluşturulmuştur. Bu yaklaşımın bir diğer avantajı ise sürekli kullanıcı müdahalesi gerekmeksizin pek çok bilgisayar kullanılarak yapılan analiz sayısının oldukça artırılmasıdır.

Hem tek sıra hem de çok sıralı yoğuşturucular yapılan deneysel çalışmalar ile HAD çalışmasının uyumluluğu Şekil 3.7’de görülmektedir. Şekil 3.7a) ve 3.7b) sırasıyla tek sıra yoğuşturucu deneylerinde dikkate alınan 7 serpantin üzerinden yapılan deneysel çalışmalarla bulunan ısı geçiş hızları ile basınç düşümünün karşılaştırmasıdır. Şekil 3.7c) ve 3.7d) ise 4 sıralı Serpantin 1 ve Serpantin 7 üzerinden $S_L=37,8$ mm için yapılan deneysel çalışmalar ile nümerik çalışmaların ısı geçiş hızı ve basınç düşümünün karşılaştırmasıdır.



Şekil 3.7 Deneysel sonuçlar ile HAD analizi sonuçlarının kıyaslanması a) $Q_{T,den}$ vs $Q_{T,num}$ (Tek sıralı), b) ΔP_{den} vs ΔP_{num} (Tek sıralı), c) $Q_{T,den}$ vs $Q_{T,num}$ (Çok sıralı- $S_L=37,8$ mm), d) ΔP_{den} vs ΔP_{num} (Çok sıralı- $S_L=37,8$ mm)

Şekil 3.7’de görüldüğü gibi tek ve çok sıralı yoğuşturucularda HAD ve deneysel çalışmalar arasında hem basınç düşümü hem de ısı geçişi arasındaki uyumluluğu göstermektedir. Sürekli çizgi $y=x$ değerleriyle oluşturulan çizgiyi, kesikli çizgiler ise hata aralığını göstermek üzere genel olarak $\pm\%10$ oranının altında bir uyumluluk vardır. Bu bilgiler ışığında HAD analizinin tel kanatlı yoğuşturucular üzerinde uygulanmasının oldukça makul bir yaklaşım olduğu belirlenmiştir. Tel kanatlı yoğuşturucular üzerinden ısı geçişi taşınım ve ısıyımla olduğundan bu mekanizmalarla olan ısı geçişini ayırklaştırıp belirlemekte fayda vardır. Bu amaçla hem deneysel ve hem de HAD analizinden elde edilen ısıtım miktarları hesaplanmıştır. Şekil 3.8’de deneysel veriler üzerinden hesaplanan ısıtım ısı geçiş miktarı HAD sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır [24].



Şekil 3.8 Deneysel veriler ile HAD analizinden elde edilen ısınım ısı geçiş hızının karşılaştırılması

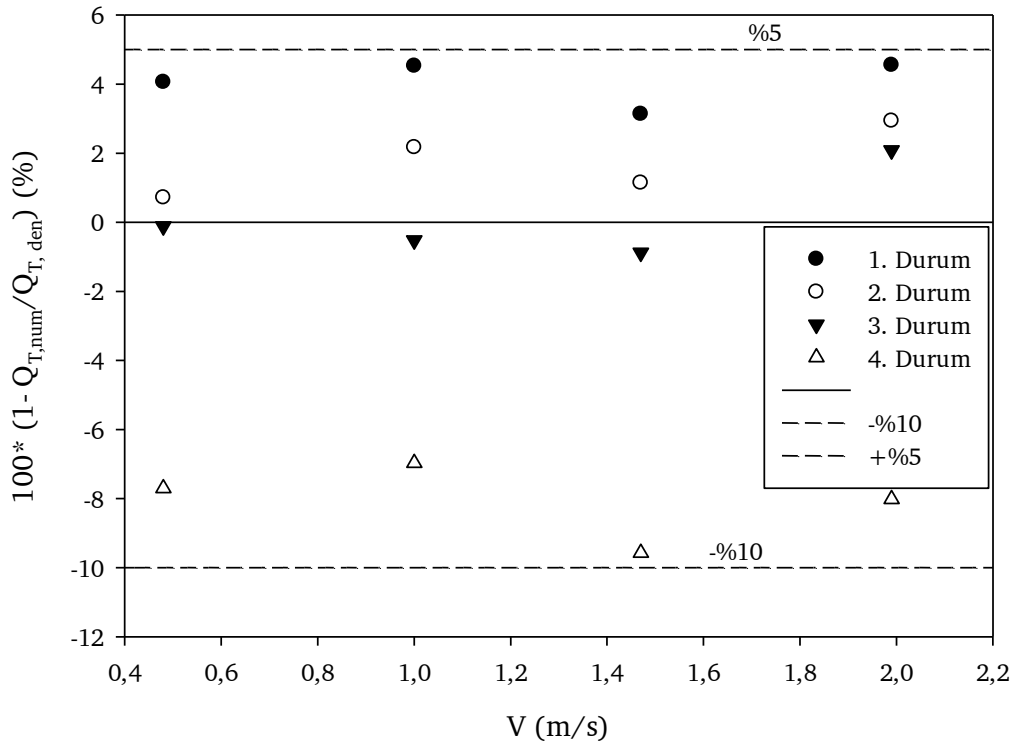
Artan hızlara bağlı olarak hem deneysel hem de HAD analizinde DO ısınım modeli ile elde edilen ısınım ısı geçiş hızı üzerindeki değişim nispeten az olduğu belirlenmiştir. Buna karşın artan hızlarda taşınım ile ısı geçişi oldukça arttığından ısınım ısı geçişinin toplam ısı geçişindeki oranı azalmaktadır. Deneysel veriler üzerinden yapılan hesaplamalar sonucunda ısınım ile ısı geçişinin toplam ısı geçişinin %2-9'una karşılık geldiği belirlenmiştir. Bu sonuçlar Hoke vd. tarafından yapılan çalışmalarla benzer sonuçlar vermektedir [24].

Bilindiği üzere tel kanatlı yoğuşturucuların yüzeyleri korozyon etkilerinden korunmak amacıyla boya ile kaplanır. Deneysel çalışmalar sırasında kullanılan yoğuşturucularda uygulamadaki haline uygun şekilde boyalı olarak test edilmiştir. Boyanın ısı iletim katsayısının çeliğin ısı iletim katsayısından düşük olması dolayısıyla boya ısı yalıtımına neden olur. Buna karşın yüzey alanındaki artış ısı geçişini arttırıcı bir rol oynamaktadır. Ayrıca, boyanmamış çelik paslandığında yayıcılığı 0,52 civarındadır. Boyanın yayıcılık değerinin 0,95'ler civarında olduğu düşünüldüğünde boya yapılmasının ısınım ile ısı geçişini iyileştirdiği görülür. Boya kalınlığı 0,1 mm civarındadır. Analizleri basitleştirme amacıyla boyanın da çelik gibi davrandığı kabul edilmiş olup, yayıcılık değeri

0,95 olacak şekilde Durum 1'e göre yapılmıştır. Ancak bu yaklaşımın uygunluğunu gözlemlemek amacıyla aşağıda belirtilen durumlara göre dört farklı analiz yapılmıştır.

- 1. Durum: $D_t = 4,95$ mm, $D_w = 1,4$ mm, $\varepsilon = 0,95$ (Her ikisi de çelik)
- 2. Durum: $D_t = 4,95$ mm, $D_w = 1,4$ mm, $\varepsilon = 0,52$ (Her ikisi de çelik)
- 3. Durum: $D_t = (4,75 \pm 0,2)$ mm, $D_w = (1,2 \pm 0,2)$ mm, $\varepsilon = 0,95$ (Çelik ve boya)
- 4. Durum: $D_t = 4,75$ mm, $D_w = 1,2$ mm, $\varepsilon = 0,52$ (Her ikisi de çelik)

Boyanın ısı iletim katsayısı 0,35 W/mK alınmıştır.



Şekil 3.9 Boyanın ısı geçişine etkisinin irdelenmesi

Şekil 3.9'da ilgili 4 durumun değişen hızlara karşılık deneysel ve HAD analizine göre hata oranıyla kıyaslanması gösterilmiştir. Durum 1 ile Durum 2 arasındaki fark %2 civarındadır. Bu durumda yayıcılık değerinin 0,52 değerinden 0,95 değerine yükseltilmesinin toplam ısı geçiş hızı açısından %2'lik bir değişime neden olduğu görülmektedir. Analizler için gerçek şartlara en uygun yöntem 3. Durum şartlarıdır. Ancak bu yöntemle oluşturulan sayısal ağ sayısı analizlerde kullanılan 1. Durumda oluşturulan sayısal ağ sayısından yaklaşık dört kat fazladır. Bunun sebebi ise boya kalınlığı çok küçük olduğundan bu bölgedeki ağ

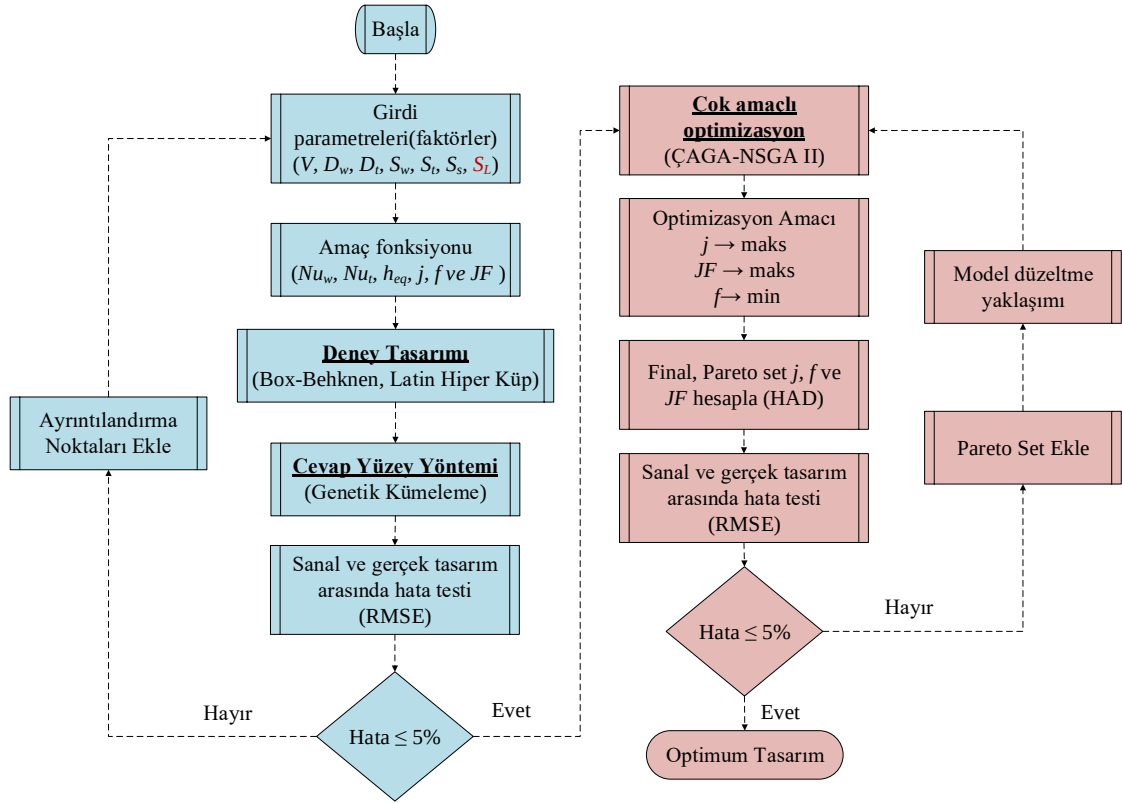
yapılarının oldukça küçük olmasıdır. Sayısal ağ boyutları incelenen yüzeylerden daha uzak bölgelere belli oranlarda (genellikle 1,2) oranında büyüyerek oluşturulmasından kaynaklanmaktadır. Bu durum sonucunda incelenen domaindeki çok küçük ağ yapıları toplam ağ sayısının oldukça artmasına neden olmaktadır. Durum 3 ile Durum 1 arasındaki fark ise %3-4 civarındadır.

Boya olmadığı durumda çeliğin yayıcılığı 0,52 olmakla beraber tel ve boru çapı 0,2 mm azalmaktadır. Bu durumda ısı geçiş hızı 3. Durum analizlerine göre ortalama %8 oranında fark göstermektedir.

Yukarıda belirtilen sonuçlara göre yayıcılığının %2 civarında bir etkisi olduğu gözlenirken, boya kullanılmasının %8'lere yakın bir oranda ısı geçişini iyileştirdiği gözlenmiştir. Sonuç olarak boya kalınlığını göz önüne alındığı ve boyanın çelik gibi düşünüldüğü 1. Durumun analizlerde kullanılmasının uygun bir yaklaşım olacağı anlaşılmıştır.

Pek çok kısıtlama ve maliyet göz önüne alındığında incelenen sistemler üzerinde deney yapmak her zaman mümkün olamamaktadır. Bu kapsamda ilgili sistemleri incelemek amacıyla korelasyon modellerinden faydalanılmaktadır. Çoğu korelasyonun karmaşık yapısı dolayısıyla çıktıları bulmak açısından basit modeller oluşturulabilir. Oluşturulan bu modeller, Jack. P.C. Kleijnen tarafından modellerin modeli anlamında kullanılan metamodel olarak adlandırılmıştır [111]. Bu metamodellerin oluşturulması sürecinde ilk aşama uygun bir deney tasarım metoduna göre deneylerin yapılmasıdır. Elde edilen veriler bir Cevap yüzey yöntemi(CYY) aracılığıyla metamodellere dönüştürülür. Bu metamodeller çıktıların doğru tahmin edilmesi açısından oldukça önemli birer araçtır. Elde edilen modellerin farklı optimizasyon yaklaşımlarına uygulanması ile sistem ve/veya komponentlerin optimum çalışma şartları bulunabilmektedir. Bununla beraber faktörlerin çıktı üzerindeki etkilerini bulabilmek için yapılan duyarlılık analizine de temel oluşturmaktadırlar. Son yıllarda daha az deneysel ve bilgisayarlarla analiz çalışması yapılması ve sonuçların yorumlanmasında deney tasarımları ve cevap yüzey yöntemleri sıklıkla kullanılmaktadır. Literatür araştırması bölümünde belirtildiği üzere bu yaklaşımlar ısı değiştirici çalışmalarında da oldukça kullanılmaktadır [87], [112]–[115]. Tel kanatlı yoğunlaştırucularda ısı geçişi ve akış davranışını belirlemeye yönelik olarak bu yaklaşımlarla yapılmış bir çalışma bulunmamaktadır. Bu kapsamda tek sıralı ile dört sıra tel kanatlı yoğunlaştırucularda boruların sıralı ve şaşırtmalı dizilimi üzerinden duyarlılık ve optimizasyon çalışmaları yapılmıştır. Göz önüne alınan girdi parametreleri sırasıyla tek sıra için V , D_w , D_b , S_w , S_b , S_s 'dir. Çok sıralı yoğunlaştırucularda bu girdi parametrelerine S_L eklenmektedir. Böylece temel olarak tek sıra için 6, çok sıra için 7 parametre söz konusudur. Optimizasyon çalışmalarında tel çapı, boru çapı ve giriş hızı sabit kalmak şartıyla S_w , S_b , S_s ve S_L değerlerinin etkileri Colburn j , Fanning f ve JF faktörleri üzerinden incelenmiştir. Buradaki amaç, tel kanatlı yoğunlaştırucu üretiminde üreticinin

doğrudan değiştirebileceği S_w , S_b , S_s ve S_L gibi geometrik özellik değerleriyle sabit hava akım hızında oluşturulabilecek optimum boyutları belirleyebilmektedir. Duyarlılık analizlerinde hem Ansys DesingXplorer hem de Minitab programlarından faydalanılmıştır. Optimizasyon çalışmaları ise yalnızca Ansys DesingXplorer programı üzerinden gerçekleştirilmiştir. İlgili analiz süreci Şekil 4.1'deki akış diyagramlarıyla ifade edilmiştir.



Şekil 4.1 Duyarlılık analizi ve optimizasyon için kullanılan akış şeması

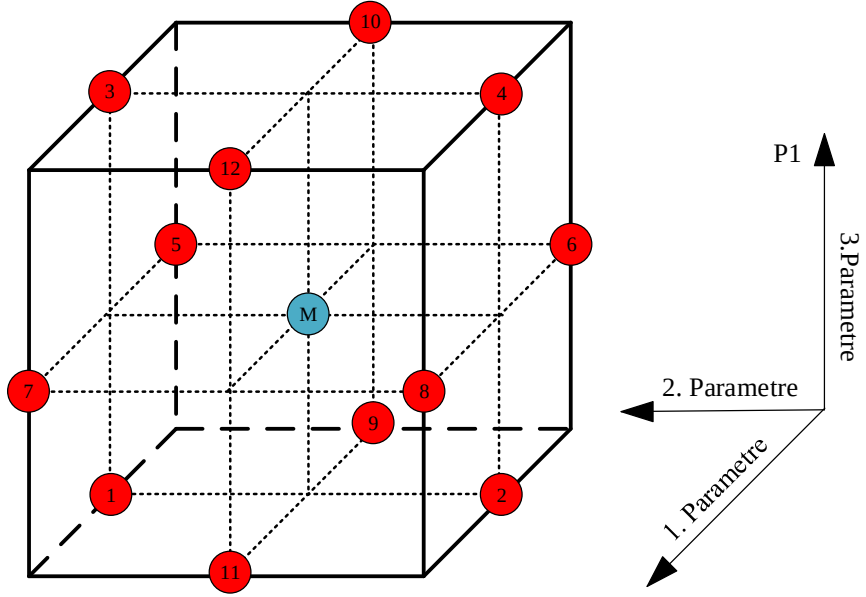
4.1 Deney Tasarımı

Akış diyagramlarından görüleceği üzere hem optimizasyon hem de duyarlılık analizi kapsamındaki ilk aşama uygun bir deney tasarımı yaklaşımının uygulanmasıdır. Deney tasarımının temel amacı incelenen çalışma kapsamındaki girdi parametrelerinin(faktörler) çıktılar üzerinde neden-sonuç ilişkisini etkin bir şekilde incelemek için veri altyapısı oluşturmaktır. Literatürde en sık kullanılan deney tasarım yöntemleri Tam faktöriyel, Azaltılmış faktöriyel, Merkezi Bileşik Tasarım, Box-Behnken, Latin Hiper Küp yöntemleridir. Tam faktöriyel dizayn ile gözönüne alınan girdi parametrelerinin tüm seviyelerinin birbiriyle kombinasyonu gözönüne almaktadır. Klasik deney yaklaşımları genellikle bu

yaklaşım üzerinden oluşturulur. Bu yaklaşımın uygulanması ile faktörlerin ana etkileri ile etkileşim etkileri verimli bir şekilde incelenebilir. k faktör sayısını ifade etmek üzere uygulama da genel olarak 2 veya 3 seviye üzerinden çalışmalar yapılmaktadır. Bu seviyelere göre tam faktöriyel deney tasarımına ait deney sayısı genellikle 2^k veya 3^k olarak belirlenir [116]. 2^k tasarım doğrusal etkiler dolayısıyla oluşan etkileşimleri incelemek için kullanılırken, 3^k tasarım bu etkilerin yanı sıra faktörlerin ikinci dereceden etkilerini de incelemek amacıyla kullanılırlar. Faktörlerin seviye sayısının artması daha esnek ve doğru sonuçların alınması açısından faydalıdır. Ancak bu yaklaşım uyarınca deney sayısı oldukça arttırmaktadır. Bununla birlikte incelenen çalışmadaki faktör sayısının artması da deney sayısının artmasında önemli bir etkindir. Örneğin bu çalışmada dikkate alınan 7 faktörün üç seviyesine göre (3^7 tasarımı) 2187 adet analize ihtiyaç duyulmaktadır. Boru şaşırtmalı ve sıralı durumla beraber sıra sayıları da dikkate alındığında onbinlerce analize ihtiyaç duyulduğu görülür. Bu kadar analizin yapılması maliyet ve zaman açısından makul bir yaklaşım değildir. Bu durumda anlamlı sonuçlara ulaşılabilecek alternatif deney tasarım yöntemlerinden faydalanmak analiz sayısını oldukça azaltacaktır. Yukarıda bahsedilen diğer yöntemler bu amaçla sıklıkla kullanılmaktadır. Çalışma kapsamında Box-Bekhnén ve Latin Hypercube deney tasarım yöntemlerinden faydalanılmıştır.

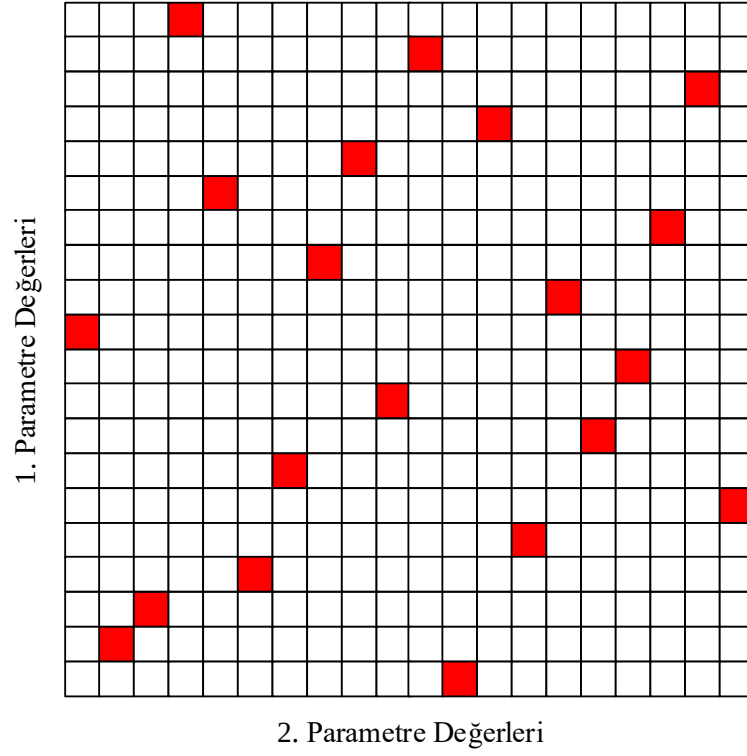
Box-Bekhnén yöntemi, Box ve Wilson tarafından ortaya konulan Merkezi Bileşik Tasarım yaklaşımının özel bir formudur. Herbir faktör için üç seviye göz önüne alan bir yöntemdir. İlgili girdi parametresine ait üç seviye -1, 0, +1 olarak ifade edilir ve bu değerler dikkate alınan girdi parametresinin en küçük, orta ve en yüksek değerine karşılık gelmektedir[117].

İkinci dereceden regresyon modellerine temel teşkil eden sonuçların bulunması amacıyla geliştirilmiş bir yöntemdir. Bu yaklaşım George E. P. Box ve Donald Behnken tarafından 1960 yılında önerilmiştir [118], [119]. Şekil 4.2’de üç faktörlü bir sisteme ait Box-Bekhnén dizayn örneklendirilmiştir.



Şekil 4.2 Üç seviye 2^3 Box-Behnken deney matrisi [120]

Latin Hiper Küp yöntemi birbirinden bağımsız şekilde Vilnis Eglajs[121] ve Michael Mckay vd. [122]. tarafından sırasıyla 1977 ve 1979 yıllarında önerilen bir deney tasarım yaklaşımıdır. Ronald L.Iman vd. [123] tarafından 1981 yılında geliştirilmiştir. Örnekleme yaklaşımı özellikle bilgisayar üzerinden yapılan deney çalışmalarına(analizlere) uygundur. Temel olarak faktörler için belli bir seviye değerinden ziyade deney matrisi faktör değerlerinin en düşük ve en yüksek değerleri arasındaki kombinasyonu içeren çok boyutlu bir dağılımla oluşturulur. Bununla beraber tasarım alanı boyunca rassal oluşturulan faktör değerleri herhangi iki nokta üzerinde aynı değerleri alamaz.



Şekil 4.3 Latin Hiper Küp deney matrisi örneği

4.2 Cevap Yüzey Yöntemi

Deney tasarımlardan elde edilen verilerden metamodellerin oluşturulmasında Cevap Yüzey Yöntemlerinden birisinin kullanılması gerekmektedir. En çok kullanılan CYY yöntemleri 2. Dereceden Polinomal, Genetik Kümeleme, Kriging, ve Sparse Grid vs. metamodellerdir. Ansys DesingXplorer programı yukarıda bahsedilen tüm modelleri içermektedir. Buna karşın Minitab programı CYY olarak başlıca 2.Dereceden polinomal yöntemi kullanmaktadır. Ansys DesingXplorer aracılığıyla yapılan çalışmalarda CYY olarak Genetik Kümeleme yöntemi gözönünde bulundurulmuştur[124], [125]. Wang vd. çapraz doğrulama ve cevap yüzeylerin çoklu çözümleri dolayısıyla Genetik Kümeleme yönteminin klasik metamodel yöntemlerinden daha güvenilir olduğu ifade etmişlerdir[97]. Bu yöntem temel olarak aşağıdaki gibi cevap yüzeyini oluşturmaktadır;

$$\hat{y}_{ens}(x) = \sum_{i=1}^{N_m} w_i \cdot \hat{y}_i \quad (4.1)$$

Burada $\hat{y}_{ens}(x)$ ve $\hat{y}_i$ sırasıyla topluluğun tahmini, i.ninci cevabın tahminidir. N_m ve w_i ise sırasıyla kullanılan metamodellerin sayısı ile i.ninci cevap yüzeyinin ağırlık faktörünü ifade etmektedir.

$$\sum_{i=1}^{N_m} w_i = 1, \quad w_i \geq 0, 1 \leq i \leq N_m \quad (4.2)$$

İlgili yaklaşımda Eşitlik 4.2 sağlandığında çözüm uygundur. Doğru bir topluluğun inşası, ağırlık faktörlerinin akılcıca seçilmesini gerektirir. Metamodellerin ağırlık faktörleri, w_p , topluluğun tahmin doğruluğunu en üst düzeye çıkaracak şekilde seçilmelidir. Bu yöntem ile en etkili cevap yüzeyini oluşturmak için farklı CYY uygulamalarının metamodel popülasyonları ile genetik algoritmanın 1. nesli oluşturulur. Çaprazlama ve mutasyon işlemleri ile sonraki nesiller oluşturulur. Bu yöntemde CYY'lerdeki çeşitliliği korumak amacıyla popülasyonda çok fazla bulunan cevap yüzeylerinden bazıları kaldırılır. Buna karşın çok az sayıdaki cevap yüzeyleri bulunanlar ise tutulur. Bu işlemlerin sonucunda tahmin edebilme kabiliyeti ve hata oranları azaltılmış olur [97], [124], [125].

Minitab aracılığıyla uygulanan 2. Dereceden polinomal CYY aşağıdaki çıktıyı tahmin etmeye yönelik tüm girdi parametrelerini içeren bir denklem vermektedir.

$$\hat{y}(x) = b_0 + \sum_{i=1}^L b_i x_i + \sum_{i=1}^L b_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^{L-1} \sum_{j=i+1}^L b_{ij} x_i x_j \quad (4.3)$$

y gerçek cevap yüzey değerini ifade etmek üzere, $\hat{y}$ cevap yüzey yaklaşımı ile elde edilen sonuçları, L girdi vektörü(x) içerisindeki değişken sayısını, b_0, b_i, b_{ii} ve b_{ij} ise en küçük kareler tekniği ile belirlenen katsayıları ifade etmektedir [124].

Modellerin veya korelasyonların hassasiyetini incelemek amacıyla bir takım eşitliklerin sonuçları incelemek gerekir. Bunlardan bazıları aşağıda ifade edilmiştir.

Belirleme katsayısı (R^2): Model ile elde edilen değerlerin orjinal değerlere ne kadar yakın sonuçlar verdiğini gösterir. 0 ile 1 arasındaki değer yüzde olarak yorumlanır. Değer ne kadar 1'e yakınsa model o kadar iyi anlamına gelir. Bir modelin kabul edilebilir olması açısından belirleme katsayısının 0,85 üzeri olması beklenir. 0,95 ve üzeri sonuçlar veren modeller güçlü tahmin modelleri olarak kabul edilir.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (4.4)$$

Düzeltilmiş Belirleme Katsayısı (R_{adj}^2): Belirleme katsayısı hesaplanmasında örneklem büyüklüğünü de dikkate alan metriktir. Her zaman R^2 değerinden daha küçük değerler verir.

$$R_{adj}^2 = 1 - \frac{\frac{1}{n-(p+1)} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (4.5)$$

Ortalama Kare Hatası (MSE): veri seti üzerindeki kare farkı ortalama farkı tarafından çıkarılan orijinal ve tahmin edilen değerler arasındaki farkı temsil eder.

$$MSE = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (4.6)$$

Kök Ortalama Kare Hatası (RMSE): Ortalama kare hatasının karekökünün hata oranıdır. Bu değer 0 değerine ne kadar yakınsa modelin tahmin gücü o kadar yüksektir.

$$RMSE = \sqrt{MSE} = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (4.7)$$

4.3 Duyarlılık Analizi

Çalışma kapsamında girdi parametrelerinin etkinliğini belirlemek amacıyla duyarlılık analizi yapılmıştır. Temel olarak duyarlılık analizi, oluşturulan modeldeki amaç fonksiyonu üzerinde girdi parametre değerlerinin değişiminin etkilerinin detaylı olarak belirlenmesine olanak sağlar. Böylelikle sistemde iyileştirme yapılması için hangi parametrelerin daha ön planda tutulması gerektiği ortaya koyması itibarıyla önemli bir analizdir. Temelde yerel ve global duyarlılık analizi olmak üzere iki başlıkta değerlendirilebilir. Yerel duyarlılık analizi temel olarak çok sayıda girdi parametresinden birinin değerleri değişirken diğerlerinin bir değerinde sabit tutulması esasına göre yapılmaktadır. Global duyarlılık analizi ise değişkenlerin varyans değerlerinin de gözönüne alındığı bir çözüm sunar.

Ansyes DesingXplorer ile yapılan cevap yüzey yönteminde yerel duyarlılık analizi Eşitlik 4.8'e göre yapılmaktadır.

$$X_{sens}(\%) = \frac{Y_{max} - Y_{min}}{Y_{ort}} \quad (4.8)$$

4.4 Optimizasyon

Bilindiği üzere optimizasyon eldeki kısıtlı kaynaklardan optimum biçimde faydalanma işlemidir. Optimizasyon, modelleme ve çözümleme olmak üzere iki aşamada gerçekleştir. Modelleme, daha önceden ifade edildiği üzere incelenecek gerçek sistemin matematiksel olarak ifade edilmesidir. Bu aşamada sistemin karar değişkenlerine göre matematiksel olarak oluşturulan bir değerlendirme kriteri oluşturulması ile sağlanır. Çözümleme aşamasında ise oluşturulan modele uygun bir yöntem kullanılarak en iyi sonuca ulaşılmasıdır. Karar değişkenlerinin belirli aralıklarda kısıtlı olmasına göre optimizasyon kısıtlı, aksi durumda kısıtsız model olarak adlandırılır. Gerçek hayatta karşılaşılan optimizasyon çalışmaları büyük oranda kısıtlı modellere göre yapılmaktadır. Optimizasyon işlemlerinde tek veya birden çok değerlendirme kriterinin optimize edilmesi gerekebilir. Bu durumlara göre optimizyon işlemleri tek veya çok amaçlı optimizasyon yöntemi olarak adlandırılır. Uygulamada karşılaşılan optimizasyon işlemleri genellikle çok amaçlı problemler üzerinden eniyilemeye yöneliktir. Bazı durumlarda birden çok amaç, tek bir değerlendirme kriteri üzerinden ifade edilebilir. Ancak bu durumda çözüm uzayının yeterince taranamaması veya sağlıklı sonuçların elde edilememesi gibi durumlar ortaya çıkmaktadır. Çok amaçlı optimizasyon yöntemleri genellikle çözüm uzayını daha iyi tarayacak algoritmalara sahiptir [126]. Genellikle bu tip optimizasyon problemleri bir dizi eşitsizlik ve/veya eşitlik kısıtlamasıyla ilişkilidir. Matematiksel olarak, optimizasyon problemi aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$\begin{aligned} g_j(x) &\leq 0 & j = 1, 2, \dots, J \\ h_k(x) &= 0 & k = 1, 2, \dots, K \\ \text{olmak üzere} \end{aligned} \quad (4.9)$$

Minimize/Maksimize $f_i(x)$

Burada x karar değişkenini, $f_i(x)$, $g_j(x)$, ve $h_k(x)$ sırasıyla amaç fonksiyonunu, eşitsizlik ve eşitlik kısıtlarını belirtmektedir. Birden çok amacın olduğu durumda

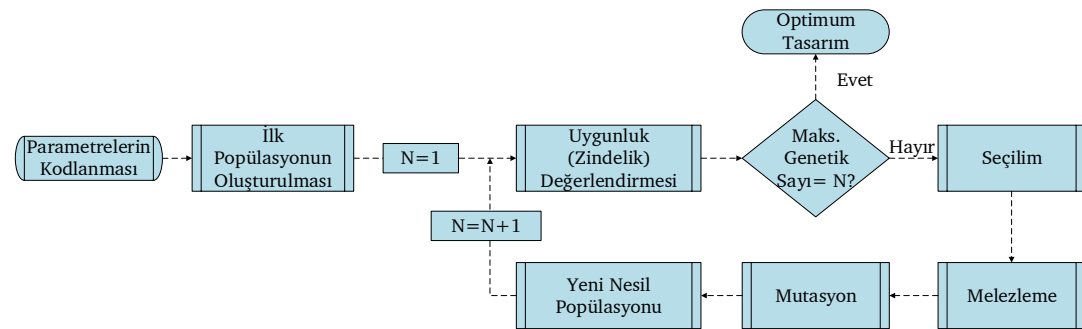
büyük oranda değişen şartlara göre amaçlar genellikle birbiriyle çelişki içerisinde. Bundan dolayı optimizasyon sonucunda tek bir optimum çözümden ziyade pekçok optimum çözümlerin olduğu Pareto optimal küme adı verilen bir küme oluşur [126]. Pareto optimal küme içerisinde temel olarak bir amaç kötüleşmeden bir diğeri iyileşemez . Örnek bir en küçükleme probleminde aşağıda verilen eşitliği sağlayan başka bir x çözümü yoksa x^* pareto optimal çözüm olarak tanımlanır.

$$\begin{aligned} f_i(x) &\leq f_i(x^*) \quad \forall i \text{ için} & i = 1, 2, \dots, n \\ f_i(x) &< f_i(x^*) \quad \text{en az bir } i \text{ için} & i = 1, 2, \dots, n \end{aligned} \quad (4.10)$$

Optimizasyon için kullanılan algoritmalar gradyan tabanlı veya gradyansız olarak sınıflandırılır. Gradyan tabanlı algoritmalar, muadillerine göre daha hızlı olmasına rağmen, daha basit amaç fonksiyonları gerektirir. Bu onları karmaşık simülasyon modelleri kullanarak optimizasyon için uygun hale getirmez. Gradyan tabanlı olmayan yöntemlerde, arama işlemini yürütmek için yalnızca nesnel işlevler ve kısıtlamalar kullanılır. Bu tip yöntemlerde türevler kullanılmadığından, bu yöntem yavaştır ve pek çok sayıda fonksiyonun değerlendirilmesini gerektirir. Aynı zamanda, uygulamada değişiklik yapılmadan çeşitli sorunlara uygulanabilirler. Gradyan tabanlı olmayan yöntemlerin önemli sınıflarından biri, genetik algoritma olarak da bilinen evrimsel algoritmadır. İlk olarak Holland tarafından tasarlanmıştır [97], [127]. Optimizasyon süreci biyolojik evrimde meydana gelen süreçleri taklit eder [128]. Genetik algoritmalar geleneksel algoritmalarından pek çok bakımdan farklıdır. Bu tip algoritmalar problemi kendi değişkenleri üzerinden değil de değişkenlerinin kodlanması esasına dayalı bir süreçte işlerler. Aynı anda çözüm uzayında tek noktayı değil pek çok noktadaki değişimi araştırır. Çözüm uzayının sürekli olmaması ve ek bilgiye ihtiyaç duymadan çözüm yapılabilmesi genel avantajları içerisindedir. Genellikle genetik algoritmalar potansiyel çözümler içerisindeki çözümlerin önemli bileşenlerini çıkaracak şekilde temsil edilebildiğinde ve bu bileşenleri mutasyona uğratan ve melezleyen operatörler bulunduğunda en iyi performansı gösterir. Buna karşılık, seçilen kodlama tekniği potansiyel çözümlerin temel özelliklerini temsil etmediğinde veya operatörler ilginç yeni adaylar oluşturmadığında genetik algoritmalar engellenir.

Aşağıdakiler, genetik algoritmaların temel bileşenleridir[128];

- Kromozomları oluşturmak için potansiyel çözümlerin nasıl temsil edileceğini belirleyen bir kodlama stratejisi
- Her kromozomu değerlendirmek için mekanizma (uygunluk fonksiyonu)
- Bir kromozom veya birey popülasyonu
- Çaprazlama ve mutasyon gibi genetik operatörler
- Seçim / çoğaltma prosedürü
- Genetik operatör gerçekleştirme olasılıkları
- Bazı fesih kriteri



Şekil 4.4 Temel genetik algoritma adımları

Şekil 4.4’de Genetik algoritmanın temel adımları gösterilmiştir. GA’lar, bir dizi sonlandırma kriteri ile karşılanıncaya kadar popülasyon içerisindeki her bir kromozom üzerinde uygunluk değerini, kromozomların seçimini ve genetik manipülasyonu oluşturan bir dizi iterasyon (kuşak) yapar. Oluşturulan döngü ile yeni bir kromozom popülasyonu oluşturmak için elde etmek için popülasyondaki her kromozomun bir değerlendirme döngüsü boyunca çalışır. Yukarıdaki işlem adımları bu kısımda kısaca özetlenmiştir. Kodlama stratejisi aşamasında problemin değişkenlerini kromozomlara kodlamak gerekir. Değişkenler, sonlu uzunluktaki bir alfabe üzerinde sonlu uzunluklu bir dize olarak kodlanacaktır. Örneğin, $\langle 1001010111 \rangle$ ikili bir diziye örnektir. Dizi uzunluğunu l olarak seçildiğinde, olası kombinasyonların sayısının ve dolayısıyla olası kodlanmış çözümlerin sayısının 2^l olduğu açıktır. Büyüklüğü sabit veya nesilden nesile değişen bir grup kromozom, popülasyon olarak adlandırılır. Bu aşamada kodlanmış çözümlerin uygunluğu değerlendirilir. Kromozomun iyiliği bir uygunluk fonksiyonu(amaç fonksiyonu) ile incelenir. Uygunluk ya da amaç

fonksiyonu çözüm uzayındaki optimal çözüme yakın bir kromozomun daha iyi uygunluk değerine sahip olacağı gözönüne alınacak şekilde seçilmelidir. Amaç fonksiyonu, GA'ların olası çözümleri ararken kullandığı tek bilgidir. Seçim operatörü, *doğal seçim* sürecini ve Darwinci evrim teorisinin *en uygununun hayatta kalmasını* taklit eder. Çaprazlama, iki kromozomu (ebeveyn) iki yeni kromozom (yavru) üretmek için birleştiren (eşleştiren) genetik bir operatördür. Çaprazlamanın arkasındaki temel fikir, yeni kromozomların ebeveynlerin her birinden en iyi özellikleri almaları durumunda her iki ebeveyninden de daha iyi olabileceğidir. Mutasyon işlemi, ise bir kromozomdaki bir veya daha fazla gen değerini başlangıç durumundan farklı bir değere değiştiren genetik bir operatördür. Bu süreçle gen havuzuna tamamen yeni bir gen değerlerinin eklenmesi de gerçekleşebilir. Bu yeni gen değerleri ile GA, daha önce mümkün olandan daha iyi bir çözüme ulaşabilir. Mutasyon, popülasyonun herhangi bir yerel optimumda durgunlaşmasını önlemeye yardımcı olduğu için genetik araştırmanın önemli bir parçasıdır [128]. Döngü içerisinde bulunan en iyi kromozomun GA'lardaki rastgele operatörler nedeniyle kaybolmamasını sağlamak için genellikle GA'ların elitist modelleri kullanılır. Elitist GA modellerinde, mevcut nesle kadar görülen en iyi kromozom, popülasyonda veya bunun dışında bir yerde tutulur. Bazen elitizm, mevcut neslin en kötü kromozomunun, önceki neslin en iyi kromozomu ile değiştirilmesiyle gerçekleştirilir, ancak ikincisi öncekinden daha iyi zindeliğe sahiptir. Yukarıdaki adımları içeren iterasyon döngüsü aşağıdaki şartlar altında sonlandırılır;

- Belirlenen kuşak sayısının aşağı yukarı sabit hale geldiğinde,
- İstenen amaç fonksiyonuna popülasyon içerisinde en az bir kromozonun ulaşması halinde,
- Nesil sayısının önceden tanımlanmış, bazı eşik değerlerinin üzerine çıkması durumunda.

Sonuç olarak amaç fonksiyonu üzerinden en uygun diziler seçilerek optimum sonuçlara ulaşılır [128].

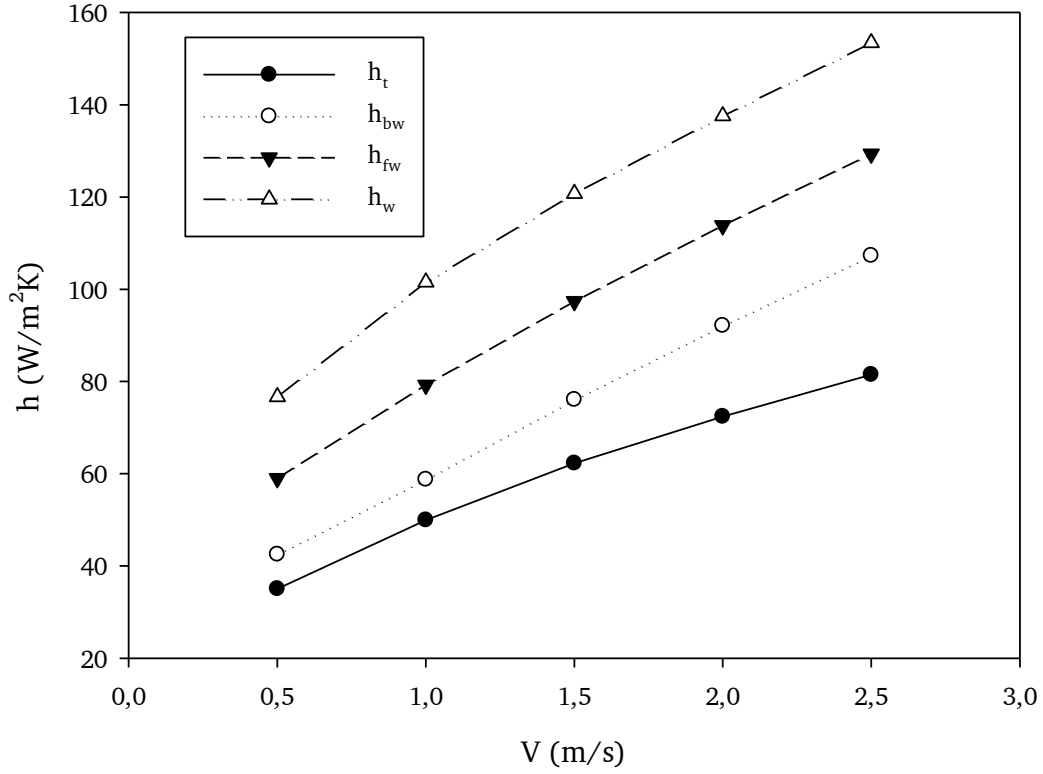
Ansys DesingXplorer programı çok amaçlı optimizasyon problemlerinde Çok Amaçlı Genetik Algoritma(ÇAGA) yöntemini kullanır. ÇAGA yöntemi, kontrollü

elitizm kavramlarına dayanan popüler Baskılanmayan Sıralı Genetik Algoritma-II'nin (BSGA-II) bir çeşididir. Deb vd. [129] tarafından Srinivas ve Deb [130] tarafından önerilen BSGA yöntemindeki eksiklikleri gidermek amacıyla geliştirilmiştir. Bu yöntem ile çözüm karmaşıklığı ilk yönteme nazaran azaltılmıştır. Bununla birlikte daha sağlıklı optimum sonuçlara ulaşmak için elitist genetik algoritma adımlarına ek olarak yığılma uzaklığı ve baskınlık derecesi şeklinde iki işlem daha eklemiştir. Bu yöntem birden fazla hedefi ve kısıtlamayı destekler ve küresel optimumu bulmayı amaçlar. En iyi pareto cephesi bulunana kadar numunelerin “genetik” olarak evrilmesine izin verir. Bu işlemi yaptığı çok sayıda iterasyonun her birindeki numunelerin “elit” yüzdesini tutarak sağlar [129], [131].

Tez çalışması kapsamında yapılan parametrik çalışmalar tek sıra ve çok sıralı yoğuşturucular olmak üzere iki başlıkta incelenmiştir. Çalışma kapsamında referans geometri olarak Sepantin 1 kabul edilmiştir. Serpantin 1'e ait geometrik özellikler $D_w=1,4$ mm, $D_t=4,95$ mm, $S_w=7,5$ mm, $S_t=25$ mm ve $S_s=0$ 'dır. Çok sıralı yoğuşturucularda yukarıda belirtilen parametrelere ek olarak sıralar arası mesafe(S_d) 30 mm olarak alınırken, serbest hava akım hızı ise 2 m/s olarak alınmıştır. Parametrik çalışmalarda bu değerlerden herhangi biri değiştirilirken diğerleri sabit tutulmuştur. Çalışılan hız aralıkları dolayısıyla doğal taşınım etkileri göz ardı edilmiştir. Tel kanatlı yoğuşturucular üzerinden ısı geçişi taşınım ve ışınila olduğundan bu mekanizmalarla olan ısı geçişini ayırklaştırılmıştır.

5.1 Tek Sıralı Yoğuşturucular

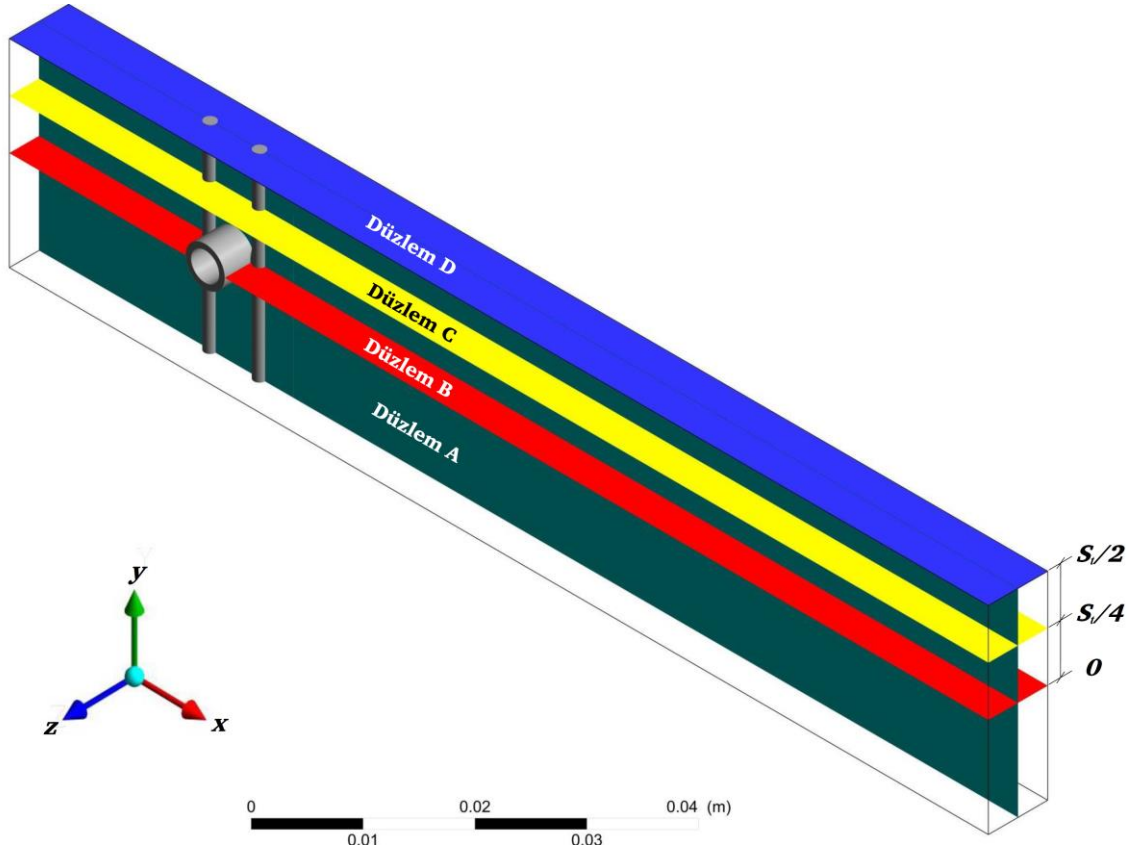
Uygulamada tek sıra tel kanatlı yoğuşturucular zorlanmış taşınım şartlarında kullanılsa da literatürde ağırlıklı olarak doğal taşınım şartlarında araştırmalar yapılmıştır. Bu konuda yapılmış kapsamlı bir çalışma olması açısından öncelikle tek sıra tel kanatlı yoğuşturucu gözönüne alınarak geometrik faktörlerin ısı geçişi ve basınç düşümü üzerine etkileri incelenmiştir. İlk olarak referans geometrinin giriş hızına göre taşınım katsayısındaki değişimi Şekil 5.1'de incelenmiştir.



Şekil 5.1 Farklı serbest hava akım hızı değerlerine göre h_{fw} , h_{bw} ve h_w değerlerinin değişimi

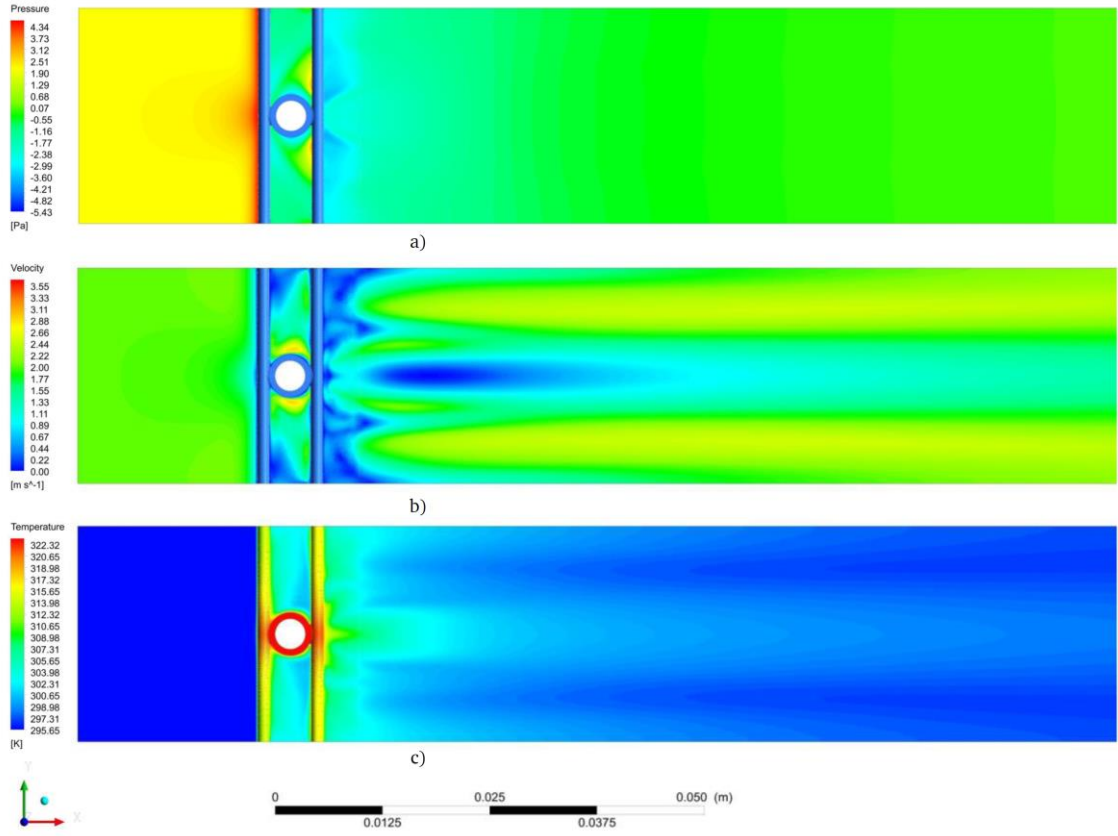
Şekil 5.1’de farklı serbest hava akım hızlarına göre sırasıyla boru (h_t), ön tel(h_{fw}), arka tel(h_{bw}) ve ortalama tel(h_w) üzeri taşınım katsayısının değişimi görülmektedir. Artan serbest hava akım hızları dolayısıyla beklenildiği üzere hem boru üzeri hem de tel üzeri taşınım katsayısının arttığı belirlenmiştir. Aynı zamanda teller üzeri ortalama taşınım katsayısının, boru çapının tel çapından daha büyük olması dolayısıyla boruya göre daha yüksek olduğu da görülmektedir. Çalışılan koşullarda teller üzerindeki ortalama taşınım katsayısının, boru üzeri taşınım katsayısına göre yaklaşık 1,5 kat fazla olduğu tespit edilmiştir. Aynı zamanda Şekil 5.1 incelendiğinde ön tel üzeri taşınım katsayısının arka tel üzeri taşınım katsayısına göre oldukça yüksek olduğu görülmektedir. Bu durumun sebebini belirlemek için referans geometri için yapılan analiz üzerinden bir takım hız ve sıcaklık konturları alınarak inceleme yapılmıştır.

Bu kapsamda Şekil 5.2’de görülen hava domaini üzerine 4 farklı Düzlem tanımlanmıştır.

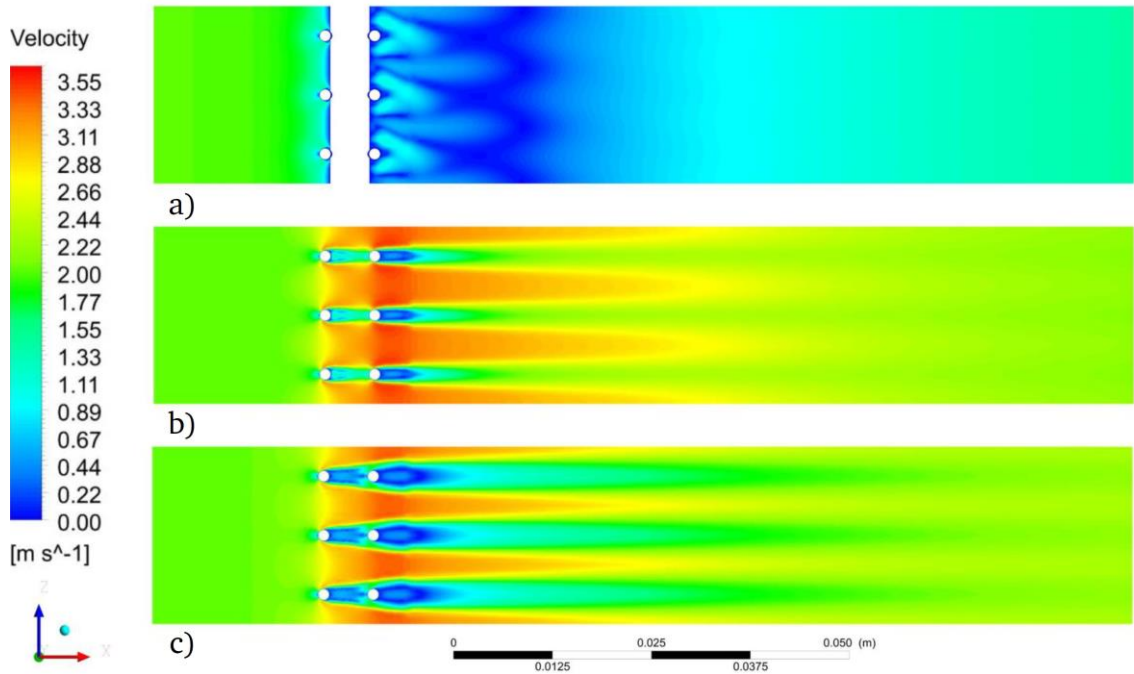


Şekil 5.2 Hız ve sıcaklık konturlarını incelemek için atanan düzlemler

Sırasıyla gri yüzey Düzlem A'yı, kırmızı yüzey Düzlem B'yi, sarı yüzey Düzlem C'yi, mavi yüzey ise Düzlem D'yi ifade etmektedir. Hava akışı $-x$ yönünde olmak üzere havanın ilk temas ettiği tel, ön tel (fw), diğeri arka tel(bw) olarak adlandırılmıştır.



Şekil 5.3 Düzlem A üzeri a) Basınç, b) Hız, c) Sıcaklık konturları



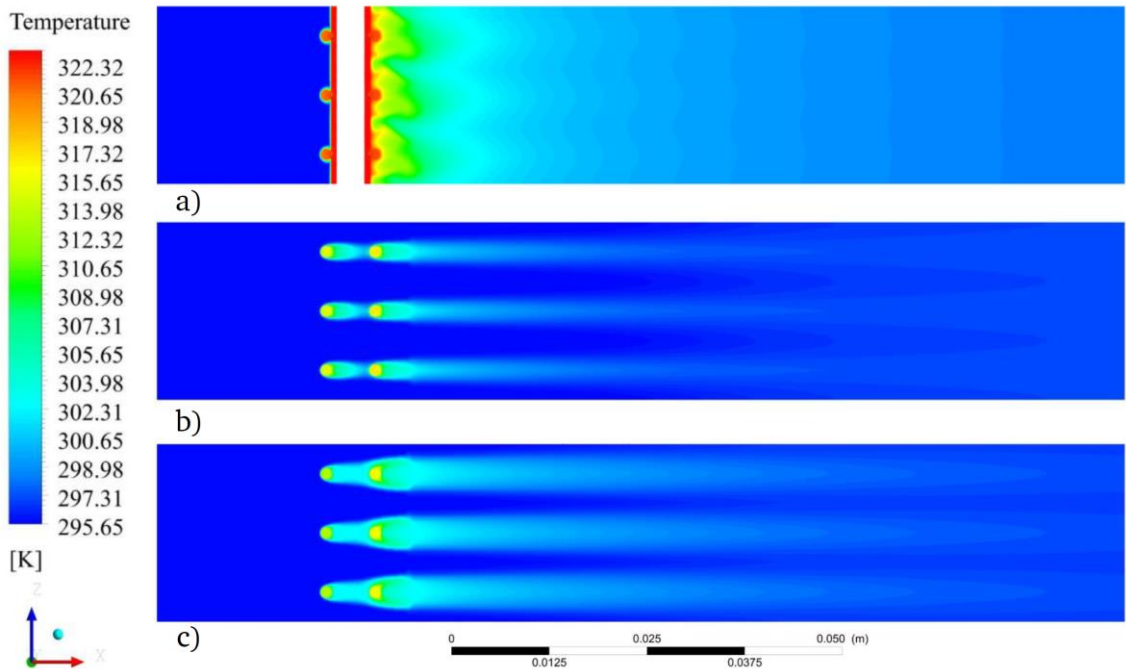
Şekil 5.4 Farklı düzlemler üzerindeki hız konturları a) Düzlem B, b) Düzlem C, c) Düzlem D

Şekil 5.3’de akış görselleştirilmesi amacıyla Düzlem A üzerinde oluşan sırasıyla a) basınç, b) hız, c) sıcaklık konturları görülmektedir.

Benzer biçimde Şekil 5.4a), b) ve c) sırasıyla Düzlem B, Düzlem C ve Düzlem D düzlemlerinde oluşan hız konturlarını göstermektedir. Şekil 5.3 ve Şekil 5.4’de oluşturulan görsellere bakıldığında ön tel dolayısıyla oluşan art izi bölgesinin arka tele ulaşan hava hızını oldukça düşürdüğü görülmektedir.

Şekil 5.3b) incelendiğinde borunun etkisiyle arka tel öncesi artan hız değerleri arka tel üzerinde belli mesafelere kadar kısmen hızı arttırdığı ancak borunun etkisinin borular arası mesafenin ortalarına yakın bölgelerde büyük ölçüde etkisizleştiği anlaşılmaktadır. Bu bölgelerde arka telin ön telin art izi bölgesinden oldukça etkilendiği görülmektedir. Bu durum Şekil 5.4b) ve c)’de daha net şekilde görülmektedir. Buna göre arka tel üzeri taşınım katsayısının düşük olmasında arka tele ulaşan hava hızlarındaki azalma önemli bir etmendir.

Şekil 5.5’de ise Düzlem B, Düzlem C ve Düzlem D üzeri sıcaklık konturlarında değişim görülmektedir.



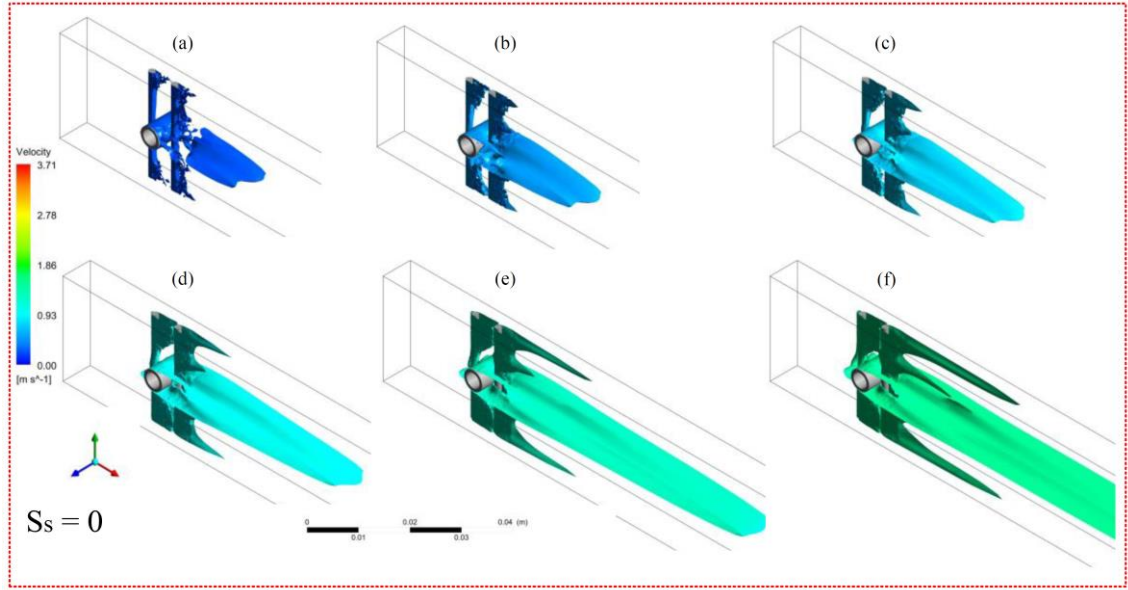
Şekil 5.5 Farklı düzlemler üzerindeki sıcaklık konturları a) Düzlem B, b) Düzlem C, c) Düzlem D

Şekil 5.5 dikkatle incelendiğinde ön telin direkt gelen hava sıcaklığıyla temas ettiği ancak arka tele ulaşan sıcaklık değerinde boru ve ön telden kaynaklı bir artış olduğu görülmektedir. Bu durum yüzey ile gelen hava sıcaklığı arasındaki farkın azalmasına neden olur. Böylece azalan sıcaklık farkı da arka tel üzeri ısı geçişini azaltıcı bir etki ortaya koymaktadır. Serpantin 1 için Düzlem B($S/4$) seviyelerinde arka tele ulaşan hava sıcaklığı borudan kaynaklı artan hızlar dolayısıyla serbest hava sıcaklığına yakın iken Düzlem C($S/2$) seviyelerine doğru arka tel büyük ölçüde ön telin etkisi altında kalmaktadır. Arka tele ulaşan hava sıcaklığının ön tele nazaran daha yüksek olması ve taşınım katsayısının daha düşük olması dolayısıyla arka tel yüzey sıcaklığının ön tel yüzey sıcaklığından ortalama 2 °C daha yüksek olduğu belirlenmiştir. HAD analizi olmaksızın akışı bozmadan ön tel ile arka tel arasındaki bölgedeki sıcaklık değerlerinin deneysel olarak ölçülmesi oldukça güçtür. Bu kapsamda zorlanmış taşınım maruz tel kanatlı yoğuşturucuların HAD analizi ile incelenmesi ısı geçişini incelemek açısından oldukça faydalı olmuştur. Hızdaki azalma ve sıcaklık farkının azalışı arka telden olan ısı geçiş hızında ön tele nazaran %50'lere yakın azalma olduğu belirlenmiştir.

Taşınım ile ısı geçiş Serpantin 1'de kullanılan boru çapı ve tel çapı tek başına düşünülerek 2 m/s giriş hızı ve 50 °C yüzey sıcaklığı şartlarında Hilpert[61], [99] korelasyonuna göre hesaplandığında $h_t=62,7$ W/m²K bulunurken $h_w=123,2$ W/m²K olarak hesaplanmaktadır. Ancak Serpantin 1 üzerinden yapılan çalışma sonucunda $h_t= 72,34$ W/m²K bulunurken, $h_w= 112,70$ W/m²K bulunmuştur. Yapılan hesaplama sonucunda $h_{fw}= 137,58$ W/m²K bulunurken, $h_{bw}= 92,12$ W/m²K olarak bulunmuştur. Serpantin 1 göz önüne alındığında boru üzerine gelen hava hızı yüzeye yan yana kaynatılan teller dolayısıyla artmaktadır. Aynı zamanda ön sıradaki tel hem arka sıradaki tele hem de boruya ulaşan akışı bozmaktadır. Ön sıradaki teller önceden belirtildiği üzere bir nevi girdap üretici görevi görmektedir. Bu durum sonucunda beklenildiği üzere boru üzerindeki taşınım katsayısı iyileşmektedir. Boru üzeri taşınım katsayısını arttıran bir diğer durum ise boruların üst üste dizilmesine bağlı kesitteki hız artışıdır. Ön tel büyük oranda boru üzeri taşınım katsayısını arttırıcı bir etki gösterse de boru üzerine kaynatıldığında akış doğrultusundaki yaklaşık tel çapı

genişliğinde ve boru çapı yüksekliğinde bir alanı da kısmen etkisiz kılmaktadır. Benzer şekilde boru çapı yüksekliğinde ve tel çapı genişliğinde bir alanda arka tel üzeri ısı geçiş hızı nispeten etkisiz hale gelir. Bu bölgelerde hava hız değeri sıfıra yakın olup, ısı geçişi temelde sıcaklık farkı kaynaklı gerçekleşmektedir.

Şekil 5.7’de Serpantin 1 için 2 m/s serbest hava akım hızına bağlı oluşan hız eşyüzeyleri(isosurface) örneklendirilmiştir.



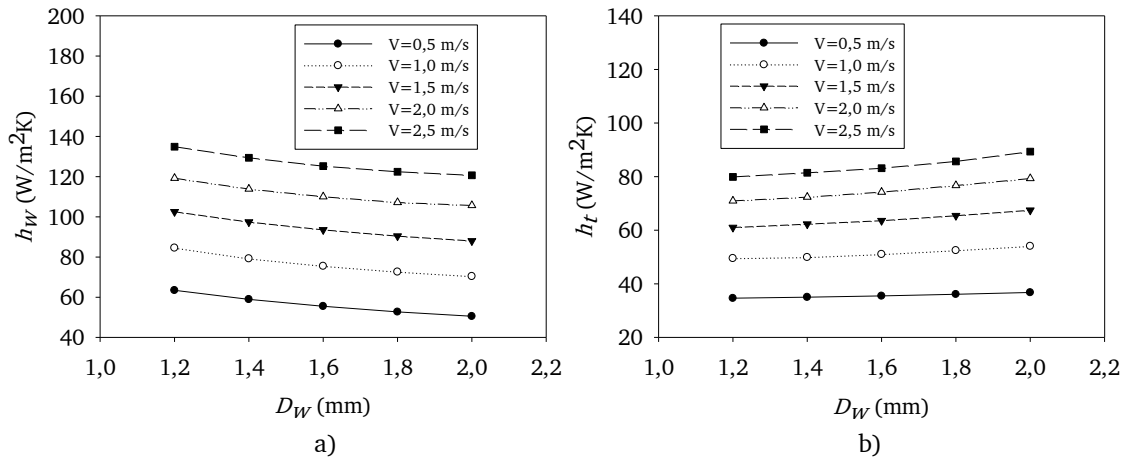
Şekil 5.6 $V=2$ m/s için hız eşyüzeyleri a) 0,25, b) 0,50, c) 0,75, d) 1,00, e) 1,25 ve f) 1,50 m/s

Şekil 5.6’da $V=2$ m/s değeri için Serpantin 1’in geometrik özelliklerinde oluşan hız eşyüzeyleri görülmektedir. Sırasıyla a) 0,25, b) 0,50, c) 0,75, d) 1,00, e) 1,25 ve f) 1,50 m/s değerindeki eşyüzeylerdir. Şekillerden görüleceği üzere ara boşlukta yaklaşık 0,75 m/s civarında arka tel üzerinde kayma tabakası üzerinde ilk temas gerçekleşmekte ve daha yüksek hız değerlerinde arka tel büyük oranda ön telin etkisi altında kalmaktadır. Sonuç olarak 2 m/s serbest hava hızı değerinde yeniden tutunma rejimi hızın 0,75 m/s hız değerinde ortaya çıkarken hızın 1,5 m/s ve altında olduğu bölgenin arka teli büyük oranda etkisi altına aldığı görülmektedir.

Literatürde hem boru demetleri hem de yalnızca silindir çiftleri üzerine pek çok çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmaların bir çoğu literatür özeti bölümünde detaylandırılmıştır. Zorlanmış taşınım maruz tel kanatlı yoğunlaştırıcılarda Re sayısı 50-1000 aralığında değişmektedir. Bu aralık düşük Re sayısı aralığında

kabul edilmektedir. Yapılan çalışmada Re_w yaklaşık 40-320 arasında değişirken, Re_t ise 135-1160 arasında değişmektedir. Temel olarak akış doğrultusunda arka arkaya dizili(tandem) silindir çiftleri üç farklı rejim altında adlandırılmıştır. Araştırmalarda bu adlandırmalar silindir çapı D ile, silindirler arası mesafede L ile gösterilmek üzere ve L/D oranlarına göre yapılmıştır. Xu ve Zhou[132] ile Zhou ve Yiu[47] yaptıkları çalışmalar ile L/D oranı 1-2 olduğunda akış rejimini “uzatılmış cisim”, 2-5 olduğunda “yeniden tutunma”, 5’den büyük olduğunda ise “çoklu ayrılma” olarak adlandırmışlardır. İlgili aralıklar Re sayısının değişimine de bağlı olarak değişmektedir. Ancak düşük Re sayılarında genellikle yukarıda belirtilen L/D aralığındaki rejimler görüldüğü ve bu rejimlerden “uzatılmış cisim” rejiminde iki silindirin tek bir silindir gibi davrandığı gözlenmiştir. Bunun sebebini ise arka sıradaki silindirin ön sıradaki silindirdeki akış ayrılması sonucunda oluşan girdap bölgesi içerisinde kalması olarak ifade etmişlerdir. Bunun yanı sıra ön silindirden ayrılan akışın arka sırada silindirin sınır tabakasıyla temas etmeksizin sardığı ve Karman girdap caddelerinin arka sıradaki silindirden sonra oluştuğunu göstermişlerdir. Yeniden tutunma rejiminde ise ön sıradaki silindirden olan akış ayrılmasının arka sıradaki silindiri sarmadığını belirlemişlerdir. Ancak ön silindirden ayrılan akışın arka sıradaki silindirin sınır tabakasına yapıştığını saptanmıştır. Aradaki boşlukta ise dönümlü akış oluştuğu gözlenmiştir. Uygulamada D/D_w aralığı da büyük oranda 2,5-5,0 aralığındadır. Re ve D/D_w aralığı gözönünde bulundurulduğunda silindirler üzerindeki akış karakteristiği yeniden tutunma rejim şartlarında olmaktadır. Bu akış rejiminin temel özelliği ön silindirden ayrılan akışın arka silindir üzerindeki sınır tabakayı yakalaması dolayısıyla iki silindir arasında düşük hızda dönüşlü akışın meydana gelmesidir [4], [5], [10], [11]. El-Shaboury ve Ormiston’da laminar akış koşullarında tandem dizilimli boru demetleri üzerinde yaptıkları çalışmalarda arka borunun ön boru kaynaklı dönümlü akış etkisi altında kalmasının ısı geçişini azalttığını belirlemişlerdir [12]. Çoklu ayrılma rejimde ise ön ve arka silindirler arasındaki boşluğun artmasına bağlı olarak hem ön silindir hem de arka sıradaki silindirin arkasında Karman girdap caddeleri oluşur. Her üç akış rejimi koşulunda da ara boşluk ve arka silindir arkasındaki bölgede yüksek yoğunlukta türbülanslı bölge oluştuğu ifade edilmiştir [40]. Yan yana silindir

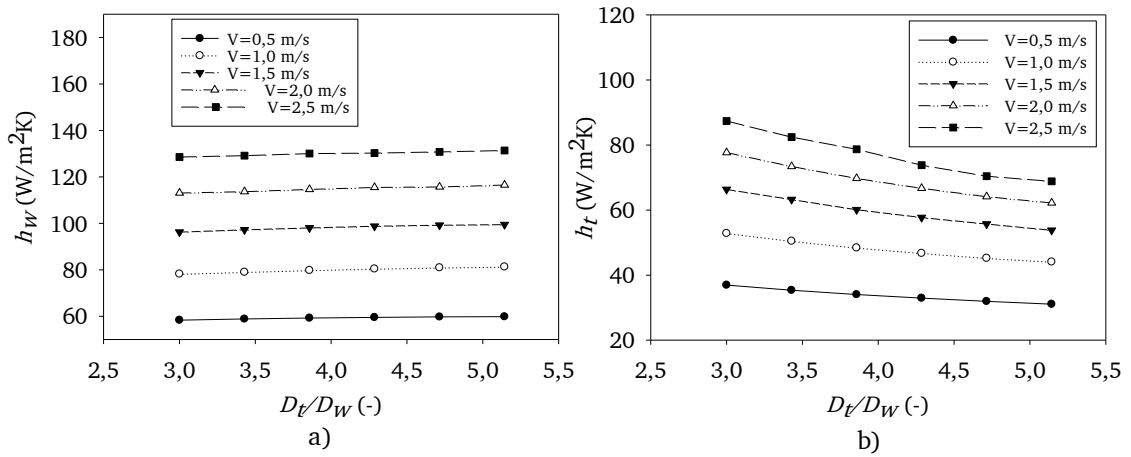
çifleri açısından teller göz önüne alındığında S_w/D_w değerleri literatürde T/D olarak belirtilen boyuna adım oranına karşılık gelmektedir. Boru için boru çapı ile borular arası mesafe oranı S_t/D_t değeri T/D oranına karşılık gelmektedir. Uygulamada kullanılan tel kanatlı yoğunlaştırucularda hem borular hem de teller için $T/D > 2,5$ aralığındadır. Bu aralık literatürde “Paralel girdap caddeleri davranışı” adıyla anılan akış rejimi içerisinde kalmaktadır [51]. Bu akış rejiminde yan yana silindir çiftlerinin birbirini çok etkilemediği, daha çok bağımsız akış karakteristiği gösterdiği ifade edilmektedir. Bundan sonraki kısımda tel kanatlı yoğunlaştıruculardaki D_w , D_p , S_w ve S_t gibi geometrik parametrelerin farklı serbest akım hızlarına göre silindir çiftlerinin ısı geçişi davranışı da göz önüne alınarak irdelenmiştir. İlk olarak tel çapının h_w ve h_t üzerindeki etkisi Şekil 5.7’de görülmektedir.



Şekil 5.7 Farklı tel çapı ve hız değerine göre a) h_w , b) h_t değişimi

Şekil 5.7 üzerinde tel çapı değişiminin beş farklı hız değerinde a) tel üzeri taşınım katsayısı değişimi, b) boru üzeri taşınım katsayısı değişimine etkisini görülmektedir. Silindir çiftleri üzeri yapılan çalışmalar gözönüne alındığında tek sıralı tel kanatlı yoğunlaştırucularda D_w , D_y yi temsil ederken D_t ise L 'ye karşılık gelmektedir. Tel çapı artışının tüm hız değerlerinde benzer bir eğilim içerisinde h_w değerini azalttığı görülmüştür. Tel çapının 1,2 mm değerinden 2,0 mm değerine çıkarılmasıyla taşınım katsayısındaki değişim artan hızlara göre %26 değerinde %12'lere kadar azalmaktadır. Tel çapının %68 artmasına karşın taşınım katsayısındaki azalmanın küçük olmasının nedeni artan tel çaplarına bağlı olarak akışın geçtiği kesit alanın daralması ve buna bağlı olarak hızın artmasıdır. Bu

duruma benzer şekilde artan tel çapları dolayısıyla daralan kesitte artan hızların boru üzeri taşınım katsayısını arttırdığı görülmektedir. Tel çaplarındaki artış dolayısıyla boru yüzey alanında ısı geçiş hızı açısından azalma söz konusudur. Ancak kesitin daralmasına bağlı boru yüzeyine ulaşan hız artışının ısı geçişini artırma açısından tel dolayısıyla etkisizleştirilen alandan daha fazla etki gösterdiği anlaşılmaktadır. h_t üzerindeki değişim düşük hız değerlerinde nispeten az olmasına karşın artan hızlarla değişimde artmaktadır. Serbest hava hızı 0,5 m/s değerinden 2,5 m/s değerine yükseltilmesine paralel şekilde çapın 1,2 mm değerinden 2,0 mm değerine yükseltilmesiyle h_t üzerinde %6'dan %11'e ulaşan bir artış gözlenmiştir. Buna göre h_t değerinin S_w/D_w değerinin değişiminden de oldukça etkilendiği görülmektedir.

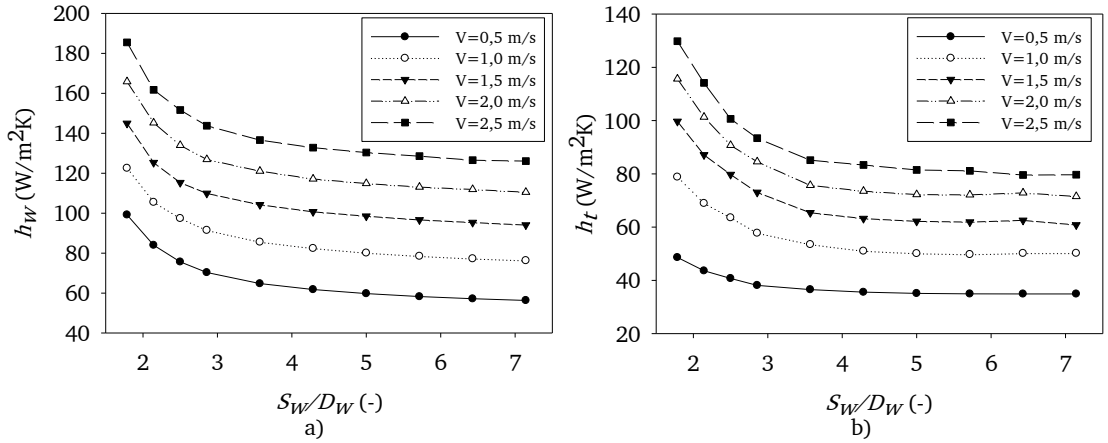


Şekil 5.8 Farklı D_t/D_w ve hız değerine göre a) h_w , b) h_t değişimi

Yukarıdaki şekilde beş farklı serbest hava akım hızına göre D_t/D_w oranının Şekil 5.8a)'da tel üzeri taşınım katsayısına etkisi, Şekil 5.8b)'de ise boru üzeri taşınım katsayısına etkisi görülmektedir. D_w değeri referans olarak seçilen Serpantin 1'de olduğu gibi 1,4 mm olup, D_t ise 4,2 mm ile 7,2 mm arasında değişmektedir. İlgili hız değişim aralığında Re_w , 45-226 arasında değişirken, Re_t , 160-800 arasında değişmektedir.

Şekil 5.8a) incelendiğinde artan hava hızlarına göre tel üzeri taşınım katsayıları arasındaki farkın arttığı görülmektedir. Bununla birlikte artan boru çaplarının tel üzeri taşınım katsayısına etkisinin kısmen arttırıcı bir etki ortaya koyduğu görülmektedir. Mahir ve Altaç'ın $Re=100$ ve 200 değerlerinde yaptıkları çalışmada L/D değerinin artmasının arka silindir üzerindeki taşınım katsayısını

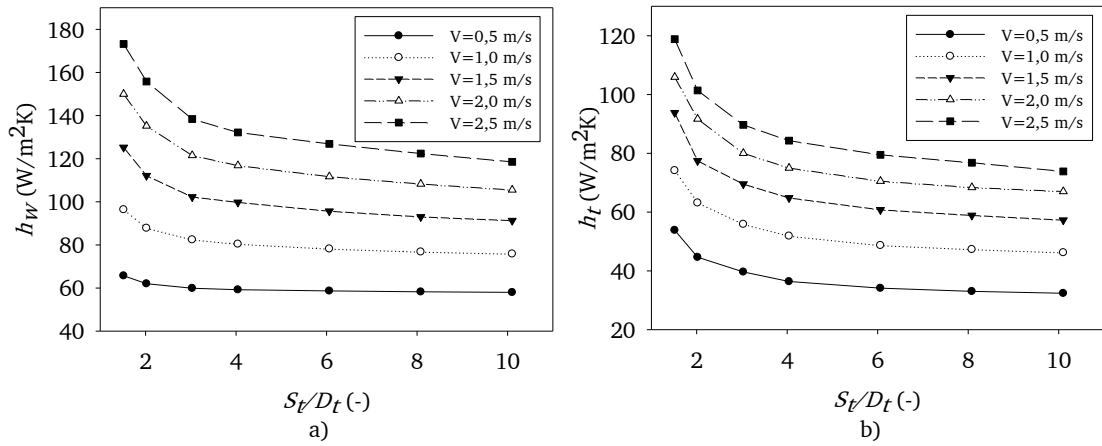
arttırdığını ifade etmiştir. L/D değeri 4'ün üzerine çıktığında arkadaki tel üzerindeki taşınım katsayısının ön silindirin %80'lerine kadar ulaştığını belirlemişlerdir [14]. Tel kanatlı yoğunlaştırucularda da $D_t/D_w=4$ 'e kadar olduğunda taşınım katsayısındaki değişim az iken bu değerin üzerinde tel üzeri taşınım katsayısında artış daha fazla olmaktadır. Bu durumun iki nedeni bulunmaktadır. Liang vd. $Re=100$ için yeniden tutunma rejiminden çoklu ayrılma rejimine geçişte kritik L/D oranı 3,6 olarak ifade etmişlerdir [15]. Kostic ve Oka ise 1200-40000 arasında değişen Re sayılarına karşılık gelen kritik L/D oranını 3,8 olarak belirlemişlerdir [16]. Ancak teller arasında bulunan boru dolayısıyla akış karakteristiği bir miktar değişmektedir. Şekil 5.3b), Şekil 5.4c) ve Şekil 5.4d) incelendiğinde boruya çarpan havanın etkisiyle arka tele ulaşan hava hızı yeniden tutunma şartlarını kısmen bozmaktadır. Bununla beraber arka tel boyunca borulardan uzaklaştığında bu etkinin azaldığı ve arka telin daha büyük oranlarda ön telin etkisi altında kaldığı anlaşılmaktadır. Benzer şekilde, borunun akış karakteristiğine etkisi Şekil 5.5'de görülen sıcaklık konturlarında da görülmektedir. İlgili D_t/D_w aralığı yeniden tutunma akış rejimi aralığında olup genel olarak arka tel üzeri taşınım katsayısını attırıcı bir etki bu aralıkta ortaya konulmamaktadır. Tel üzeri taşınım katsayısı S_t/D_t oranının azalması dolayısıyla kısmen armaktadır. Bu değişim $D_t/D_w=3$ değerinden 5,14 değerine çıkarıldığında tüm hız değerlerinde ortalama %2-2,5 aralığında bir iyileşme gözlenmektedir. Buna karşın boru üzeri taşınım katsayısındaki değişim çok daha fazla olmaktadır. Beklenildiği üzere küçük çaplar üzerinde oluşan taşınım katsayısı tüm hız değerlerin daha yüksektir. Şekil 5.8b) incelendiğinde boru çapının 4,2 mm ($D_t/D_w=3$) değerinden 7,2 mm değerine yükseldiğinde 0,5 m/s serbest akım hızında %19 oranında bir fark oluşmaktadır. Serbest akım hızı 2,5 m/s değerine çıkarıldığında bu fark %27 oranlarına çıkmaktadır.



Şekil 5.9 Farklı S_w/D_w ve hız değerine göre a) h_w , b) h_t değişimi

Şekil 5.9 teller arası mesafenin değişiminin h_w ve h_t üzerine etkisi görülmektedir. Tel kanatlı yoğuşturucularda boru içi akış ağırlıklı olarak iki fazlı akış şartlarında olduğundan taşınım katsayısı oldukça yüksektir. Buna karşın hava tarafı taşınım katsayısı bu değere nazaran oldukça azdır. Bu durum hava tarafı ısıl direncin çok daha yüksek olmasına neden olur. Önceden belirtildiği üzere bu tip yoğuşturucularda teller ısı geçişi yüzey alanını arttırmanın yanı sıra hava tarafı ısıl direnci azaltma amacıyla kullanılan oldukça etkili elemandır. Teller arası mesafe azaltıldığında kesit daralması dolayısıyla arka sıradaki tellere ve boru yüzeyine ulaşan hava hızları arttığından ve akışta hacminde oluşan türbülans seviyesindeki artış ile hem tel üzeri hem de boru üzeri taşınım katsayıları artmaktadır. Teller arası mesafenin değişimi tel kanatlı yoğuşturucularda ısıl performansı etkileyen en önemli parametrelerden biridir. Uygulamada kullanılan tel kanatlı yoğuşturucular büyük oranda S_w/D_w oranı 2,5 değerinin üzerinde olacak şekilde dizayn edilirler. Şekil 5.9'da görüldüğü üzere $S_w/D_w = 3,5$ oranının altındaki oranlarda hem h_w hem de h_t değerlerinde hızlı bir artış görülmektedir. Şekil 5.9a)'da görüldüğü üzere S_w/D_w oranı yaklaşık 3,5 değerinden yaklaşık 1,8 değerine düşürüldüğünde h_w değeri serbest hava akım hızı 0,5 m/s değerinde %53, 2,5 m/s değerinde %35 iyileşmektedir. Buna karşın bu oran 3,5 değerinden 7,1 değerine çıkarıldığında 0,5 m/s için %15'lik bir azalma söz konusu iken 2,5 m/s değerinde %8 civarında bir azalma söz konusudur. Ayrıca S_w/D_w değeri 5 ve üzeri için tel üzeri taşınım katsayısındaki değişim oldukça azdır. Boru üzeri taşınım katsayısı üzerinde ise S_w/D_w oranı 3,5 değerinden 1,8 değerine azaltıldığında hıza bağlı olarak ortalama iyileşme miktarı 0,5 m/s

hızında %53, 2,5 m/s değerinde %43 civarında olmaktadır. S_w/D_w değeri 3,5 değerinden 7,1 değerine yükseltildiğinde h_t değerinde 0,5 m/s serbest hava akım hızında %5 civarında bir azalma görülmektedir. 2,5 m/s serbest hava akım hızında ise %7 civarında bir azalma olmaktadır. Görüldüğü üzere ısı geçişinde iyileşmenin en önemli işlemlerinden birisi S_w/D_w değerini azalmaktır. Uygulamada kullanılan tel çapları genellikle sabit ve kısıtlı çaplarda üretildiğinden S_w değerinin değiştirilmesi ile yapılabilecek tasarımlar ağırlık kazanmaktadır. Zorlanmış taşınım maruz tel kanatlı yoğuşturucuların kullandığı en önemli avantajlardan birisi kirlenme oranının diğer kanatçıklı yoğuşturuculara nazaran çok daha az olmasıdır. Aynı zamanda çelik tel ve borudan oluşması dayanıklılığını arttırmaktadır. Bu avantajları dolayısıyla özellikle dış ortamda kullanılan sistemlerde tercihen daha çok kullanılırlar. Zorlanmış taşınım bir fan aracılığıyla sağlandığından yakın bölgelerde bulunan toz ve diğer kirlenici partiküller yoğuşturucu yüzeyine tutunabilir. Bu durum sonrasında ısı performansında büyük oranda düşüşler gerçekleşir. Bu amaçla ısı geçişini iyileştirmesine karşın kullanım yerleri göz önüne alınarak S_w/D_w değerleri mümkün olduğunca 2,5 değerinin altında kullanılmamalıdır.

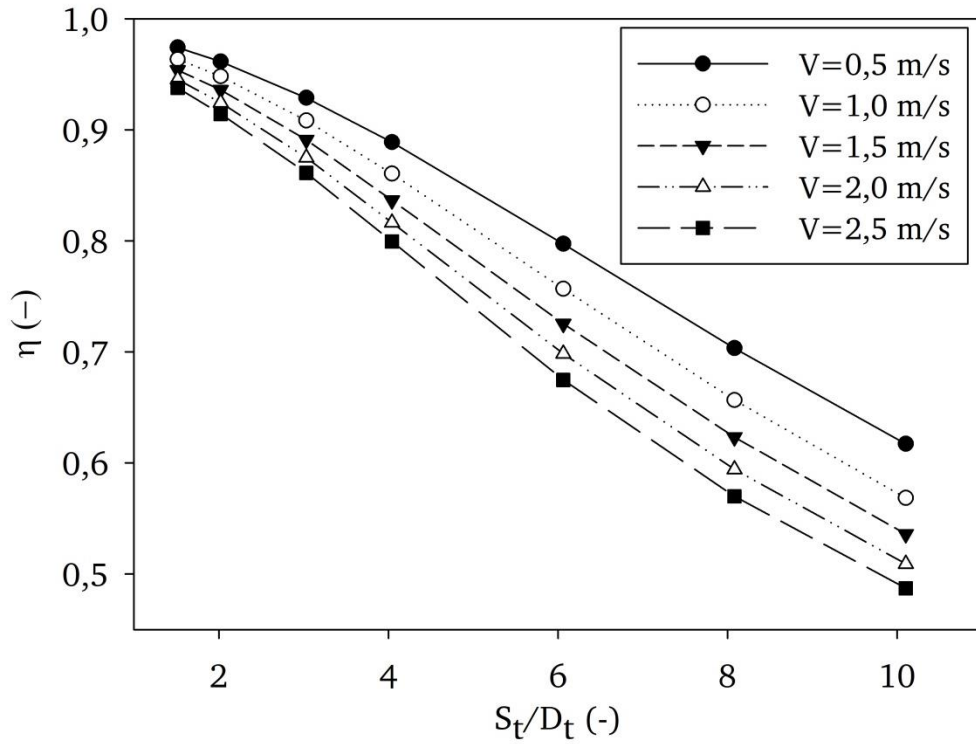


Şekil 5.10 Farklı S_t/D_t ve hız değerine göre a) h_w , b) h_t değişimi

Şekil 5.10a) ve 5.10b)'de sırasıyla S_t/D_t değişimine göre beş farklı hız değerinde tel üzeri taşınım katsayısı değişimi ve boru üzeri taşınım katsayısı değişimi görülmektedir. S_t değerleri sırasıyla 7,5 mm, 10 mm, 15 mm, 20 mm, 25 mm, 30 mm, 40 mm ve 50 mm değerindedir. Isı geçişi ve basınç düşümü açısından S_t/D_t oranı daha anlamlı olduğundan boyutsuzlaştırma boru çapına göre yapılmıştır.

Şekil 5.10 incelendiğinde düşük hızlarda borular arası mesafenin teller üzerindeki taşınım katsayısını çok etkilemediği görülürken artan hızlara bağlı olarak hem h_t hem de h_w değerinde artış gözlenmektedir. Bu durum artan hızlar dolayısıyla yoğunlaştırucu yüzeyine temas eden hava hızlarının artmasına neden olmaktadır. S_f/D_t değerleri tel kanatlı yoğunlaştırucu uygulamalarında büyük oranda “Paralel girdap caddeleri davranışı” akış rejimi aralığında kalmaktadır. S_f/D_t değerinin 2 ve altı olduğu durumda “etkileşimli akış” şeklinde adlandırılan akış rejimi görülür. Bu akış rejimine göre akış doğrultusunda yan yana dizili silindir çiftleri üzerindeki akış birbirini oldukça etkilemektedir [51]. Buna bağlı olarak ilgili aralığın altındaki değerlerde h_t oldukça hızlı şekilde artmaktadır. Bununla birlikte kesitte artan hızlar dolayısıyla h_w üzerinde de ısı geçişinde iyileşme olmaktadır. S_f/D_t oranı 4 değerinden 10 değerine yükseltiğinden tüm hız değerlerinde h_t yaklaşık %12 azalırken, h_w değeri artan hızlarla %3 ile %20 arasında değişmektedir. Artan S_f/D_t oranlarında yeniden tutunma rejimini tel çiftleri üzerinde etkin kıldığı önceki kısımlarda detaylıca anlatılmıştı. Düşük hızlarda ön tel sonrası oluşan girdap caddeleri arka teli büyük oranda etkisi altına almaktadır. Artan hızlarla birlikte boruya çarpan hava akımı sonucunda arka tel üzeri taşınım katsayısı artmaktadır. Ancak bu etkinin ilgili hız aralığında $S_f/D_t = 6$ ve sonrasındaki etkisi oldukça düşük kalmaktadır. S_f/D_t değeri 4 ile 1,5 arasındaki h_w ve h_t üzerindeki artış ise artan hızlara bağlı olarak sırasıyla %12-30 ve %40-47 civarındadır. Tel kanatlı yoğunlaştırucular ilk olarak doğal taşınım esasında çalışan yoğunlaştırucu uygulamalarında kullanılmıştır [6], [7]. Bu amaçla kullanıldıklarında hava tarafı taşınım katsayısı, zorlanmış taşınım şartlarına nazaran oldukça düşüktür. Taşınım katsayısı ne kadar küçükse kanat verimi o kadar yükselir. Bu durumdan ötürü doğal taşınım S_f/D_t oranının yüksek değerlerinde de sıklıkla kullanılırlar. Aynı zamanda yüzey alanı arttırmada tel kanatlar kullanmak oldukça avantajlıdır. Bunun iki temel nedeni bulunmaktadır. Bunlardan ilki tel maliyetinin boru maliyetine nazaran daha uygun olmasıdır. İkincisi ise artacak boru uzunluğu dolayısıyla boru içi basınç düşümlerinin artmasıdır. Basınç düşümünün artması ile daha yüksek basma yüksekliğine sahip kompresöre ihtiyaç duyulur. Bu durumda elektrik sarfiyatında artışa neden olur. Ancak taşınım katsayısı arttıkça kanat verimi büyük oranda

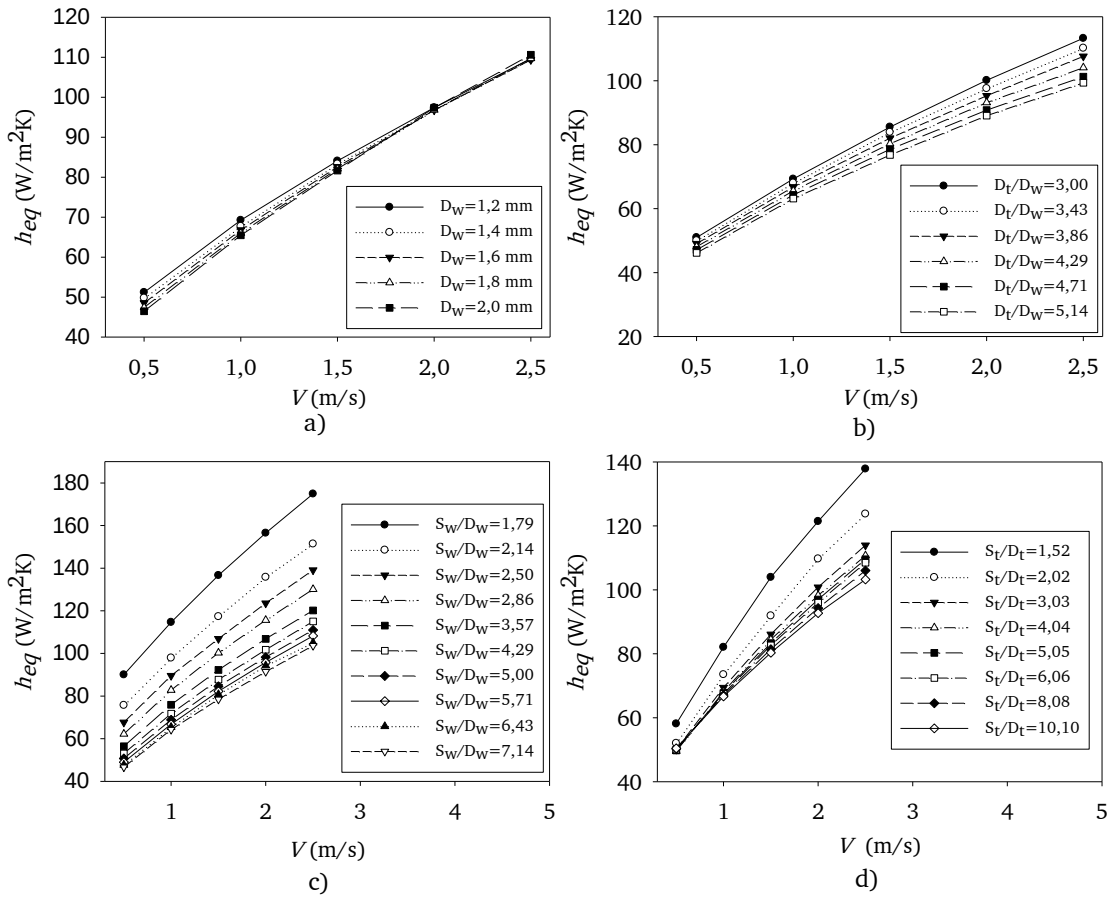
düşme eğilimi gösterir. Bu amaçla da S_t/D_t oranının daha düşük değerlerde olması beklenir. Bu durumda önceden belirtildiği üzere bu tip yoğuşturucuların temel avantajlarından biri olan temizlik kolaylığı açısından problemler oluşabilir. Dolayısıyla ısı geçişi ve basınç düşümü bakımından sorunlar ortaya çıkar. Bu açıdan S_w/D_w oranına benzer şekilde çok düşük S_t/D_t oranlarında kullanılmamalıdır. Bilindiği üzere tel kanatlı yoğuşturucudaki teller ısı geçişi açısından kanat görevi görmektedir. Kanatlarda performansın ölçütü kanat verimidir. Kanat verimi taşınım katsayısının bir fonksiyonudur. Bu açıdan Eşitlik 2.17’de basitleştirilmiş şekliyle verilen denklem üzerinden kanat verimi ilgili S_t/D_t aralıkları için hesaplanmış ve Şekil 5.11’de sunulmuştur.



Şekil 5.11 Farklı S_t/D_t ve hız değerine göre kanat veriminin değişimi

Şekil 5.11’de beş farklı hız değerinde artan S_t/D_t oranına karşılık kanat verimindeki değişim görülmektedir. Şekil incelendiğinde artan S_t/D_t oranlarının kanat verimini büyük oranda azalttığı görülmektedir. Benzer şekilde artan hızlarında kanat verimini azalttığı görülmektedir. S_t/D_t oranı 2 değerinin altında olduğu durumlarda kanat verimindeki değişimin nispeten daha az olduğu görülmektedir. Genel olarak kanat veriminin çalışılan aralıklarda 0,5 değerinin

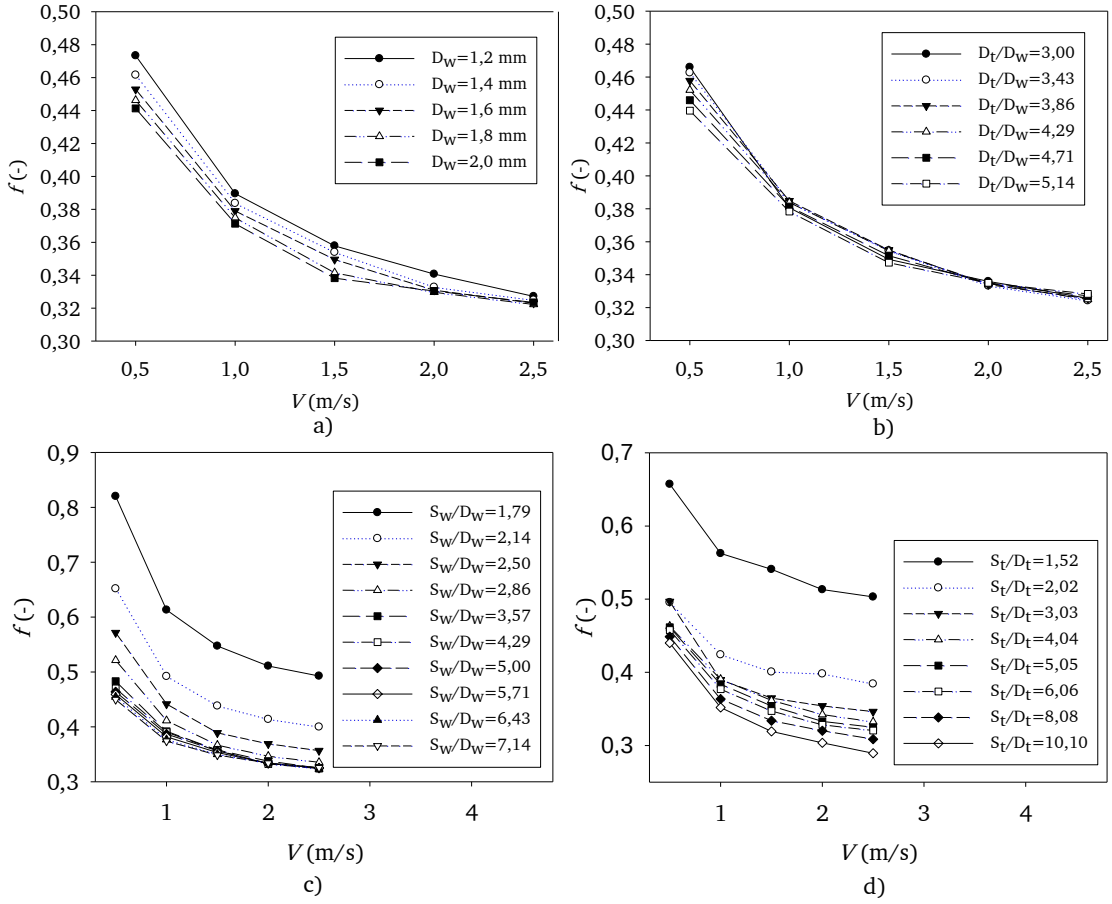
üzerinde olduğu ve azalan S_t/D_t oranının beklenildiği üzere kanat verimini arttırıcı bir etki ortaya koyduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 5.12 Farklı hız değerine göre h_{eq} değerlerinin değişimi a) V - D_w , b) V - D_t/D_w , c) V - S_w/D_w , d) V - S_t/D_t

Şekil 5.12 farklı hava hızlarında D_w , D_t , S_w ve S_t değişiminin eşdeğer taşınım katsayısına etkisini göstermektedir. Şekil 5.12a)'da görüldüğü üzere artan hız değerlerinde tüm tel çapları için eşdeğer taşınım katsayısındaki değişim azdır. Bunun sebebi Şekil 5.8'de görüldüğü üzere artan çaplarda tel üzeri taşınım katsayısının azalmasına karşın boru üzeri taşınım katsayısının azalan kesite bağlı olarak artmasıdır. Düşük hız değerlerinde hem ön telin boru üzerine hem de borunun arka tele etkisi az olduğundan düşük hız değerlerinde eşdeğer taşınım katsayısı farkı daha yüksek olmaktadır. Bu sonuçlara göre tel çapının değiştiği durumlarda artan hızlarda ısı geçişinde artış taşınım katsayısına bağlı iyileşme dolayısıyla gerçekleşmez. Isı geçişi bu durumlarda yüzey alanının artması dolayısıyla artmaktadır. Şekil 5.12b)'de ise değişen boru çaplarının ortalama taşınım katsayısına etkisi D_t/D_w oranına göre irdelenmiştir. Artan D_t/D_w oranları

artan hızlarda eşdeğer taşınım katsayısı üzerindeki etkisi arttırmaktadır. 0,5 m/s değerinde D_t/D_w 3 değerinden 5,14 değerine çıkarılmasıyla h_{eq} üzerindeki iyileştirme %4 civarında iken, 2,5 m/s serbest hava akım hızında iyileşme miktarı %14-15 civarında olmaktadır. Şekil 5.12c)'de ise artan serbest akım hızlarına göre farklı S_w değerlerinde h_{eq} üzerindeki değişim irdelenmiştir. S_w/D_w değeri 3,5 altında olduğunda hem tel hem de boru üzeri taşınım katsayısı üzerindeki artış daha büyük olduğundan eşdeğer taşınım katsayısını bu aralık için oldukça iyileşmektedir. S_w/D_w oranının büyük değerlerinde ise h_{eq} üzerindeki değişim daha az olmaktadır. Şekil 5.9'da görüldüğü üzere S_w aralığının hem tel hem de boru üzeri taşınım katsayısı üzerine etkisi oldukça fazladır. Bundan ötürü S_w/D_w değerinin h_{eq} üzerindeki etkisi de oldukça yüksektir. Şekil 5.12d)'de farklı hız değerlerinde S_t 'nin değişiminin h_{eq} üzerine etkisi görülmektedir. Düşük hız değerlerinde h_{eq} üzerindeki değişim nispeten az iken arttan hızlarda S_t/D_t oranları dolayısıyla h_{eq} değişimi artmaktadır. Genel olarak düşük hızlarda boru demetleri içerisindeki borular daha bağımsız bir karakter sunmaktadır. Artan hızlar sıraların birbirini etkisini arttırmaktadır. S_t/D_t aralığı 3 ve üzeri olduğu durumda arka tel, ön telin daha çok etkisi altında kaldığından eşdeğer taşınım katsayısı azalmaktadır. Bir diğer neden ise bu değerlerin üzerinde Şekil 5.10'da görüldüğü üzere boru üzeri taşınım katsayısının çok değişmemesidir. S_t/D_t oranı 3 altı olduğu durumda h_{eq} üzerindeki iyileşme oldukça yüksektir. Ancak S_t/D_t oranı 3 değerinin altında olduğunda hem kirlilik hem de basınç düşümü ve maliyet açısından problemler oluşturacağından bu değerlerde üretim genel olarak düşünülmez.



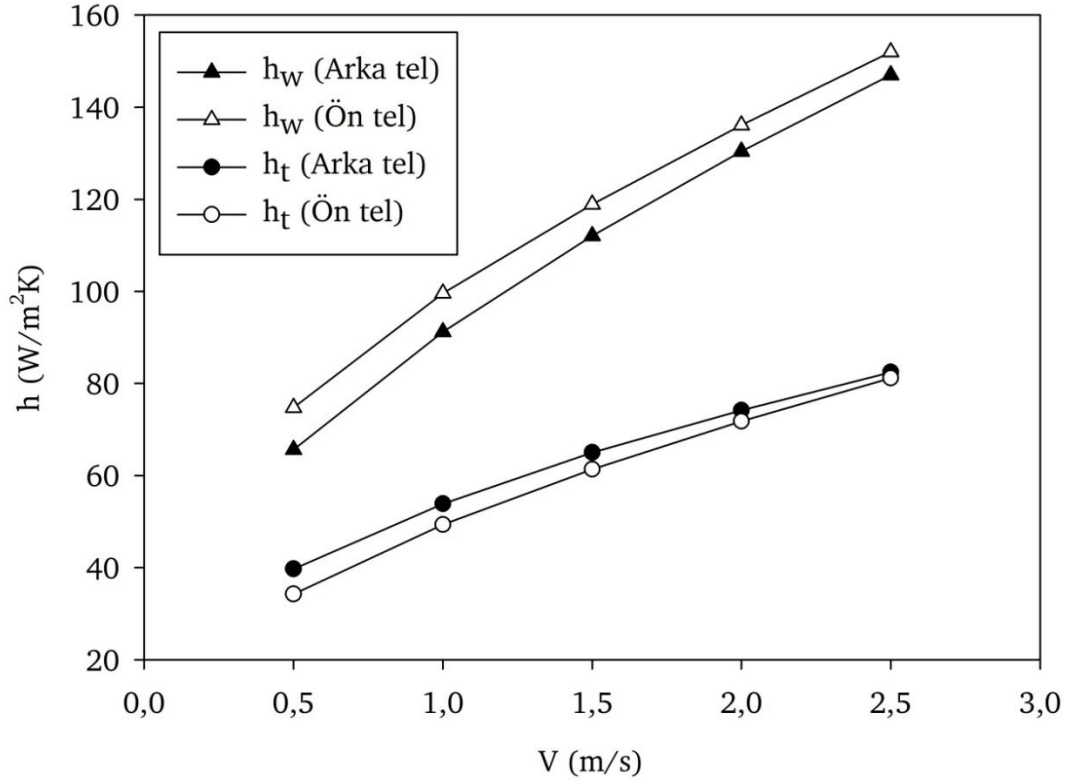
Şekil 5.13 Farklı hız değerine göre f değerinin değişimi a) V - D_w , b) V - D_t/D_w , c) V - S_w/D_w , d) V - S_t/D_t

Şekil 5.13’de ise değişen hız değerlerine göre farklı geometrik özelliklerin basınç düşümüne etkisi irdelenmiştir. Bu amaçla basınç düşümü etkisi Fanning sürtünme faktörü(f) üzerinden incelenmiştir. Tüm şekillerde görüldüğü gibi artan hızlarla beklenildiği üzere basınç düşümü artarken sürtünme katsayısı azalmaktadır. Şekil 5.13a), b), c) ve d) sırasıyla D_w , D_t/D_w , S_w/D_w ve S_t/D_t değerlerinin farklı hız değerindeki değişimlerinin f üzerindeki etkisini göstermektedir. Buna göre tüm grafiklerden anlaşılabacağı üzere 0,5 m/s serbest hava akım hızında f en yüksek değere ulaşmaktadır. Artan hızlarda f değerlerinin ilgili geometrilerde birbirine yaklaştığı görülmektedir. Genel olarak uygulamada kullanılan aralıklar için f değeri 0,3-0,5 arasında değişmektedir. Şekil 5.13a)’da görüldüğü üzere düşük hızlarda D_w değeri 1,2 mm’den 2,00 mm değerine çıktığında f değerindeki değişim %7 civarında azalmaktadır. Buna karşın yüksek hızlarda f üzeri değişim oldukça az olmaktadır. Benzer sonuçlar D_t değişiminde de görülmektedir. Aynı zamanda düşük hızlarda D_t/D_w değerinin

büyük değerleri için f değeri büyük iken, artan hızlarda f değeri tam tersi bir karakter göstermektedir.

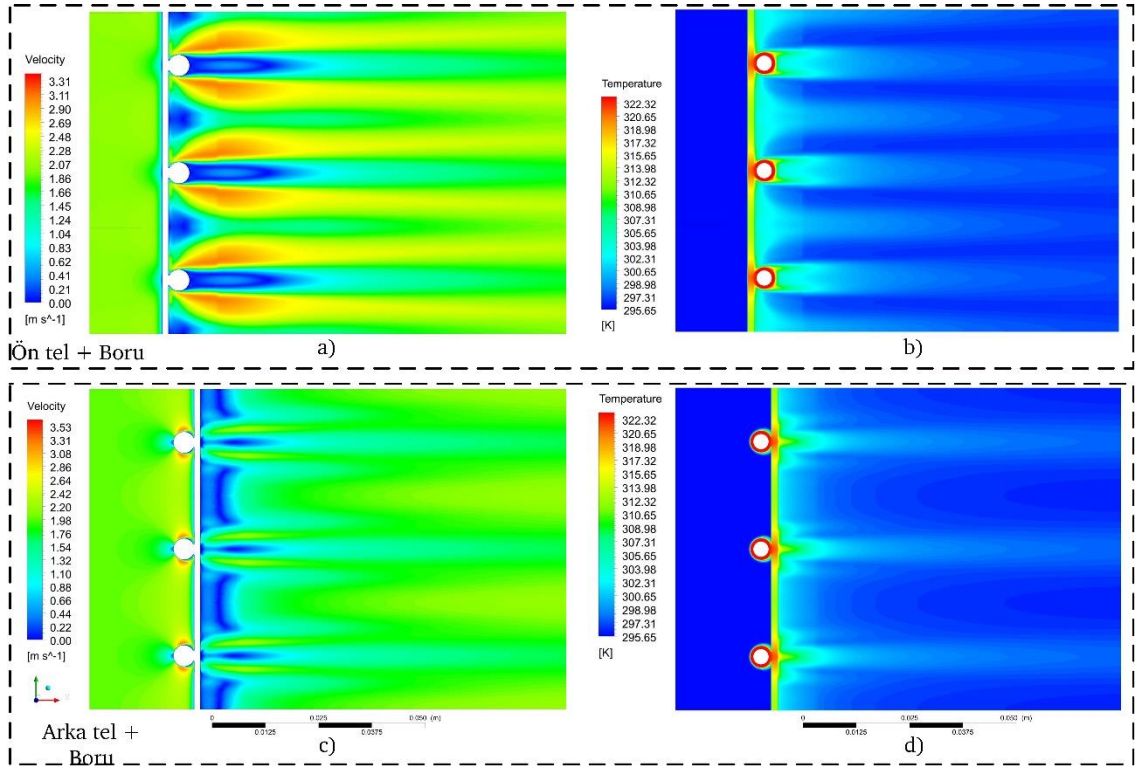
S_w değerinin değişiminin f faktörü üzerine etkisi Şekil 5.13c)'de görülmektedir. S_w/D_w değeri 3,5 ve altı olduğu durumda f değerleri üzerindeki artış oldukça yüksektir. Bu oran yaklaşık 3,5 ile 7 arasında değiştiğinde f faktöründeki değişim %7 civarındayken, 1,5 ile 3,5 arasındaki fark %70'lere ulaşmaktadır. 2,5 m/s değerinde ise 3,5 ile 7 arasında değişim %1'in altındadır. Buna karşın ilgili hız değerinde 1,5-3,5 arasındaki değişim %50lerin üzerindedir.

Son olarak S_t değerinin değişiminin f üzerine etkisi irdelenmiştir. Şekil 5.13d)'ye göre S_t değerinin artmasının f değerini azalttığı belirlenmiştir. Buna paralel olarak bu sonuç tüm hız değerlerinde benzer şekilde olmuştur. Bu durum artan S_t değerlerinde ön telden kaynaklı bozulan akışın arka tel tarafından düzeltilmesi dolayısıyla meydana gelmektedir. Arka tel bir nevi basınç düşümü sönümleyici görevi görmektedir. Diğer bir anlatımla artan S_t mesafeleri tel çiftleri üzerinde yeniden tutunma rejimini büyük ölçüde etkin kılar. Yapılan çalışmalar sonucunda tel kanatlı yoğunlaştırucularda ısı geçişini iyileştirmek için özellikle arka tel taşınım katsayısının iyileştirilmesi gerektiği anlaşılmaktadır. Bu kapsamda ilk çalışma boru yüzeyinin tek tarafına tel diziliminin incelenmesidir. Bu dizilim tarzı tek tel dizilimi olarak adlandırılmıştır.



Şekil 5.14 Tek tel ve boru diziliminde hıza bağlı h_w ve h_t değişimi

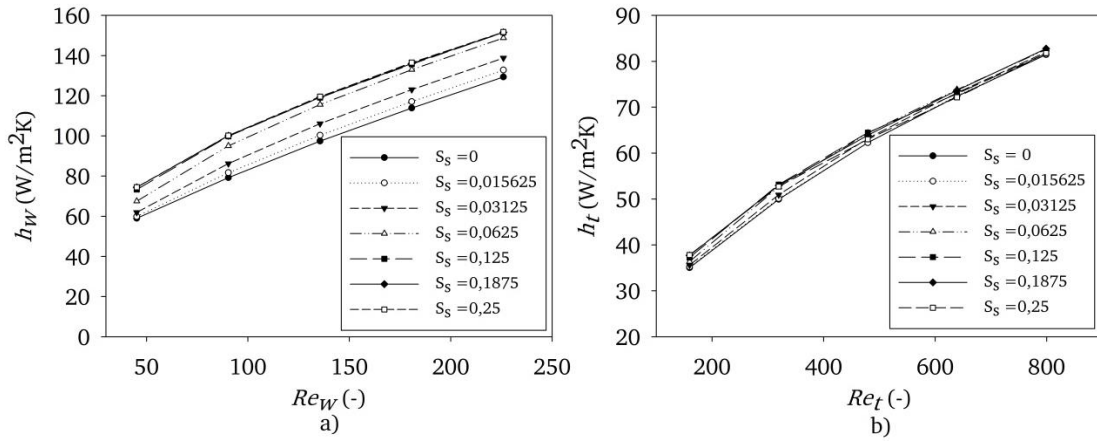
Şekil 5.14'da akış doğrultusuna göre boru ön veya arka yüzeyinde tellerin dizilimi olması durumundaki tel ve boru üzeri taşınım katsayılarını göstermektedir. Akış doğrultusunda boru yüzeyinde tek sıra tel olması durumu ön tel, arka yüzeyinde tek sıra tel olması durumu ise arka tel olarak adlandırılmıştı. Şekil 5.14'den görüleceği üzere boru üzeri taşınım katsayısı ön ve arka yüzeyinde tek sıra tel olması durumunda çok değişmemektedir. İlgili durumlarda h_w üzerindeki değişimin daha çok olduğu belirlenmiştir. Bu sonuçların daha iyi anlaşılabilmesi için her iki duruma ait Düzlem A üzerinde alınan hız ve sıcaklık konturları Şekil 5.15'de görülmektedir.



Şekil 5.15 Tek sıra üzeri tek tel dizilimine bağlı Düzlem A üzeri a) Ön telli durumdaki hız konturu, b) Ön telli durumdaki sıcaklık konturu, c) arka telli durumdaki hız konturu, d) Arka telli durumdaki sıcaklık konturu

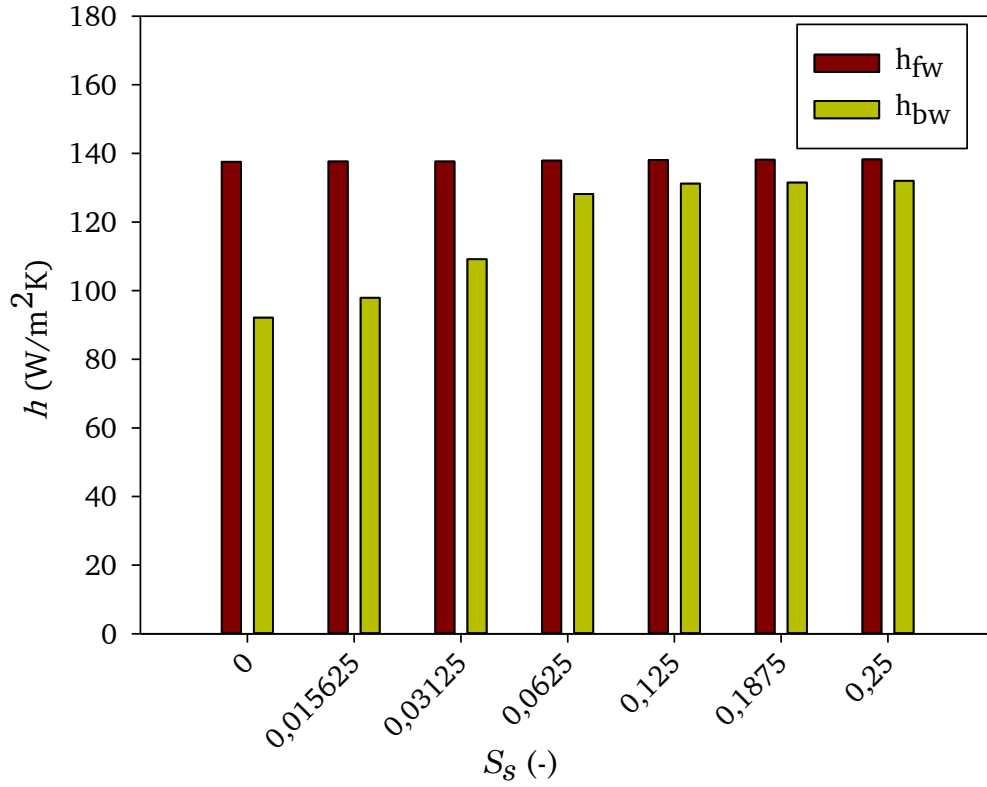
h_t üzerindeki fark incelendiğinde ön tel kanatlı durumun arka tel kanatlı duruma göre kısmen daha düşük olduğu görülmektedir. Ön tel kaynaklı boru yüzeyine ulaşan hız artmasına karşın daha önce belirtildiği üzere ön tel çapı genişliğinde ve boru çapı yüksekliğinde bir alandan olan ısı geçişi azalmaktadır. Bir diğer neden ise Şekil 5.15b)'de görüldüğü üzere ön telden kaynaklı artan sıcaklık ile boru yüzey sıcaklığı arasındaki farkın azalmasıdır. Arka tel durumunda ise boru yüzey sıcaklığı direkt olarak giriş hava sıcaklığıyla temas etmektedir. Aynı zamanda arka tel, borunun ısı geçişi açısından daha etkisiz olduğu akış bölgesinde olduğundan taşınım ile olan ısı geçişi bir miktar yüksektir. Artan hızlarda h_t değerleri birbirine yaklaşmaktadır. h_w açısından ön tel durumu ile arka tel durumu artan hızlarda %13-4 arasında bir değişim göstermektedir. Şekil 5.1'de verilen tandem tel çiftlerinden oluşan tel kanatlı yoğunlaştırıcı üzerinde ön tel ve arka tel üzeri taşınım katsayıları tek tel kanatlı durumlarla kıyaslanmıştır. Buna göre ön tel üzeri taşınım katsayısı ile tek tel kanatlı durumundaki ön tel üzeri taşınım katsayısıyla oldukça benzer sonuçlar verdiği belirlenmiştir. Murray sıralı ve şaşırtmalı dizilimdeki boru demetleri üzerine yaptığı karşılaştırma

çalışmasında ilk sıranın benzer ısı ve akış karakteristiği gösterdiğini ifade etmiştir[73]. Ayrıca, çapraz akışa maruz çok sıra boru demetlerinde ilk sıranın, aynı akış şartlarında tek silindirinkine yakın olduğu belirlenmiştir[61]. Arka tel üzeri taşınım katsayısı ise tek tel kanatlı durumdaki arka tel üzeri taşınım katsayısındaki değişim %54-37 arasında değişmektedir. h_t üzerindeki değişimin üç durumda da birbirine yakın olduğu belirlenmiştir. Bu sonuçlara göre tel kanatlı yoğunlaştırucularda yapılabilecek iyileştirmelerin arka tel üzeri taşınım katsayısının artırılmasıyla sağlanabileceği anlaşılmaktadır. Bu amaçla tellerin akış doğrultusunda birbirine göre şaşırtmalı dizilimi göz önüne alınarak deneysel ve nümerik çalışmalar yapılmıştır. Şekil 5.16'da 6 farklı S_s oranına göre h_t ve h_w üzerindeki değişim görülmektedir.



Şekil 5.16 Farklı S_s değeri ve hız değerlerinin a) h_w ve b) h_t üzerine etkisi

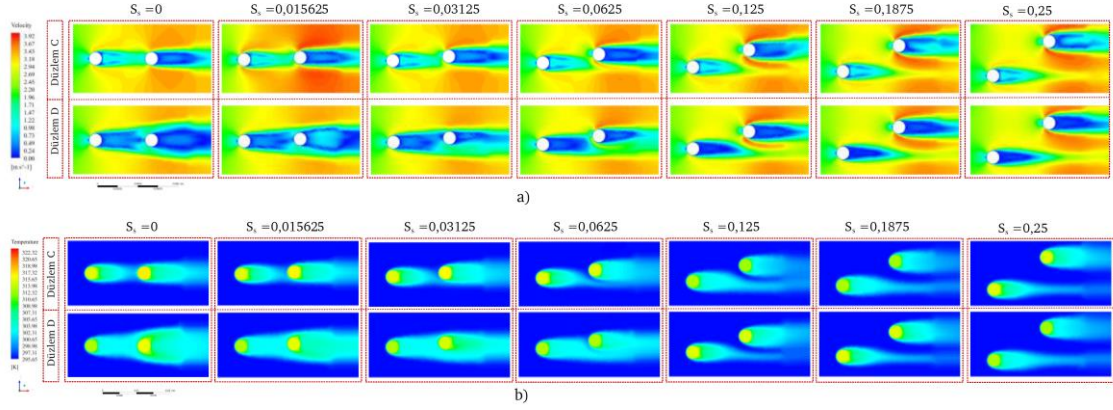
Şekil 5.16a) serbest hava akım hızı ile teller üzerindeki eşdeğer taşınım katsayısının değişimini, Şekil 5.16b) ise farklı hız ve S_s değerlerinde h_t 'deki değişimi göstermektedir. Tel üzeri taşınım katsayısı artan S_s değerlerine göre artmaktadır. Ancak $S_s = 0,125$ değerinden sonraki şaşırtma değerinde büyük değişiklikler olmadığı gözlenmiştir. Öyle ki tüm hız değerlerinde $S_s = 0$ dan $S_s = 0,25$ değerine çıkarıldığında h_w değerinde %20-25 aralığında bir artış gözlenmektedir. Şaşırtmalı dizilim ile taşınım katsayısı üzerinde iyileştirmenin büyük oranda yapılabileceği belirlenmiştir. Şekil 5.16b)'de görüldüğü üzere şaşırtma miktarının boru üzerinde oluşan taşınım katsayısına etkisinin oldukça az olduğu gözlenmiştir. Bu kapsamda 2 m/s serbest hava akım hızında farklı S_s değerlerine göre h_{bw} ve h_{fw} değişimi Şekil 5.17'da verilmiştir.



Şekil 5.17 S_s Değerinin Değişiminin h_{fw} ve h_{bw} Üzerindeki Etkisi

Görüldüğü üzere S_s değerinin 0-0,25 arasında değişmesi durumunda ön tel üzerindeki taşınım katsayısı yaklaşık aynı kalmaktadır. İlgili akış koşullarında S_s değerinin 0 değerinden 0,25 artırılması ile arka tel üzeri taşınım katsayısı üzerinde %44'e varan bir iyileşme sağlandığı gözlenmiştir. Şekil 5.17'deki serbest akım hızına göre Re_w değeri 180 civarındadır. Harimi ve Saghavian iki sıra tandem dizilime sahip silindirler üzerinden $Re=100$ ve $Re=200$ değerleri üzerinden yaptıkları çalışma sonucunda arka sıradaki taşınım katsayısının %40'a varan oranlarda daha düşük olduğunu ifade etmişlerdir [43]. Lee vd. uygulamada teller üzerinden olan ısı geçişinin toplam ısı geçişinin %70-77lik kısmını oluşturduğunu belirtmişlerdir [25]. Bu açıdan teller üzerinden yapılacak ısı geçişi iyileştirmelerinin toplam ısı geçişinin iyileştirilmesine büyük katkı sağlayacağı anlaşılmaktadır. Tellerin şaşırtmalı diziliminin ısı geçişini iyileştirme de oldukça önemli bir yaklaşım olduğu sonucu ortaya çıkmaktadır. Grafikten anlaşılabileceği üzere arka tel üzerindeki taşınım katsayısının $S_s=0$ 'da minimum değerindeyken artan $S_s=0,125$ değerlerine kadar arttığı bu değerden sonra S_s değerinin artışının taşınım katsayısına etkisinin az olduğu belirlenmiştir. Artışın

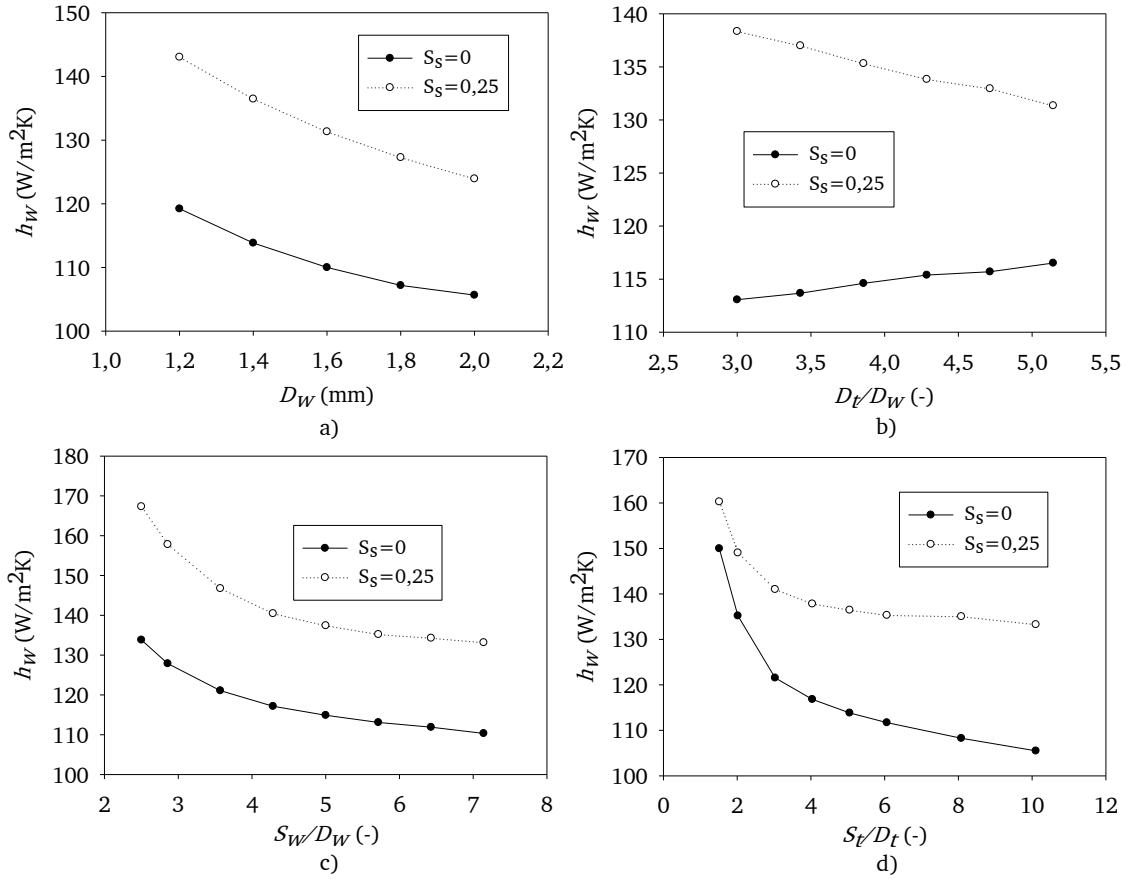
nedeninin anlaşılabilmesi açısından Şekil 5.4 ve 5.5’de verilen Düzlem C ve Düzlem D üzerinde yoğunlaştırıcı yüzeyine yakın bölgelerdeki hız ve sıcaklık konturları Şekil 5.18’de verilmiştir.



Şekil 5.18 Düzlem C ve Düzlem D üzerinde oluşan a) hız ve b) sıcaklık konturları

Şekil 5.18’ de görüldüğü üzere ısı geçişinin iyileşmesi için akışın yeniden tutunma rejiminden ayrılması gerektiği belirlenmiştir. S_s değerinin artması ile öntelden ayrılan akışın arka tel üzerindeki etkisi azalmaktadır. S_s değeri 0,125 değerine ulaştığında yeniden tutunma rejimi etkisini kaybetmektedir. Bu değer sonrasında arka tel üzeri taşınım katsayısı çok değişmemektedir. Isı geçişi açısından sıcaklık davranışı hız konturlarına paralel şekilde oluşmaktadır. Dönümlü akış bölgelerindeki sıcaklık değerlerin yükseldiği görülmektedir. S_s maksimum değeri 0,25’e çıkarıldığında her iki tel birbirinden bağımsız akışa dik iki tel gibi bir görüntü vermektedir. Bu şartlardaki ön tel ve arka tel üzeri taşınım katsayıları tek tel ve boru üzerinde yapılan çalışmadaki değerlere benzer sonuçlar vermektedir. Literatürde şaşırtmalı dizilime sahip boru demetleri üzerine pek çok çalışma bulunmaktadır [73], [78], [133], [134]. Bu çalışmalarda taşınım katsayısının genel olarak benzer şartlardaki sıralı dizilime nazaran daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Literatür bölümünde belirtildiği üzere silindir çiftleri üzerinde de şaşırtmalı dizilime yönelik birçok çalışma bulunmaktadır. Ancak bu çalışmalar özellikle akış karakteristiğini anlamaya yönelik olarak yapılmıştır. Isı geçişini inceleyen çalışmalar oldukça azdır. Sumner vd. özellikle de farklı P/D ve atak açılarında akış karakteristiği belirten bir takım adlandırmalar yapmıştır [39]. Ancak Re aralığı 800 ve 1320 arasında tutulmuştur. İlgili çalışmayla Şekil 5.18’dekine benzer akış rejimlerini

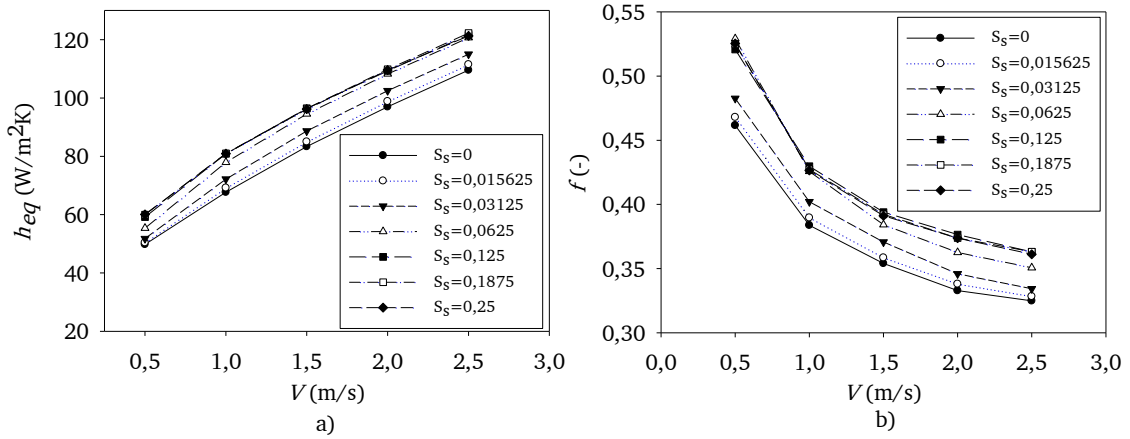
görülmektedir. Örneğin $S_s = 0,015625$ ve $0,03125$ değerleri “Kayma Tabakasına Tutunma” rejimine benzer bir davranış gösterirken, $S_s = 0,0625$ değeri durum “Endüke Ayrılma” rejimine benzer karakter sunmaktadır. $S_s = 0,125$ değeri “Girdap Çiftleri ve Sarmalı” rejimine benzer karakter sunarken, $S_s = 0,1875$ ve $0,25$ aralığında ise Senkron Girdap Gaddeleri rejimine uygun bir karakter sunmaktadır. İlgili çalışmaya benzer daha düşük Re aralığı ve ısı geçişini içeren çalışmalar şaşırtmalı dizilimin daha iyi anlaşılması açısından temel oluşturabilir.



Şekil 5.19 HAD analiz sonuçlarına göre $S_s = 0$ ve $S_s = 0,25$ değerlerinde a) D_w - h_w , b) D_t/D_w - h_w , c) S_w/D_w - h_w , d) S_t/D_t - h_w grafikleri

Şekil 5.19’da sırasıyla D_w , D_t/D_w , S_w/D_w ve S_t/D_t değerlerinin $S_s = 0$ ve $S_s = 0,25$ değerlerindeki ve 2 m/s serbest akım hızında tel üzeri taşınım katsayısı üzerine etkisi incelenmiştir. Bilindiği üzere tel üzeri taşınım katsayısı tel çapının fonksiyonudur. Şekil 5.19a)’da artan tel çapları ile her iki durum içinde tel taşınım katsayısının beklenildiği üzere azaldığı görülmektedir. Azalma eğilimi her iki durumda benzer şekilde olup h_w üzerindeki ortalama iyileşme %20 civarında görülmektedir. Şekil 5.19b)’de görüldüğü üzere artan boru çapları dolayısıyla tellerin tandem dizilimleri h_w değerini arttırırken, tellerin şaşırtmalı

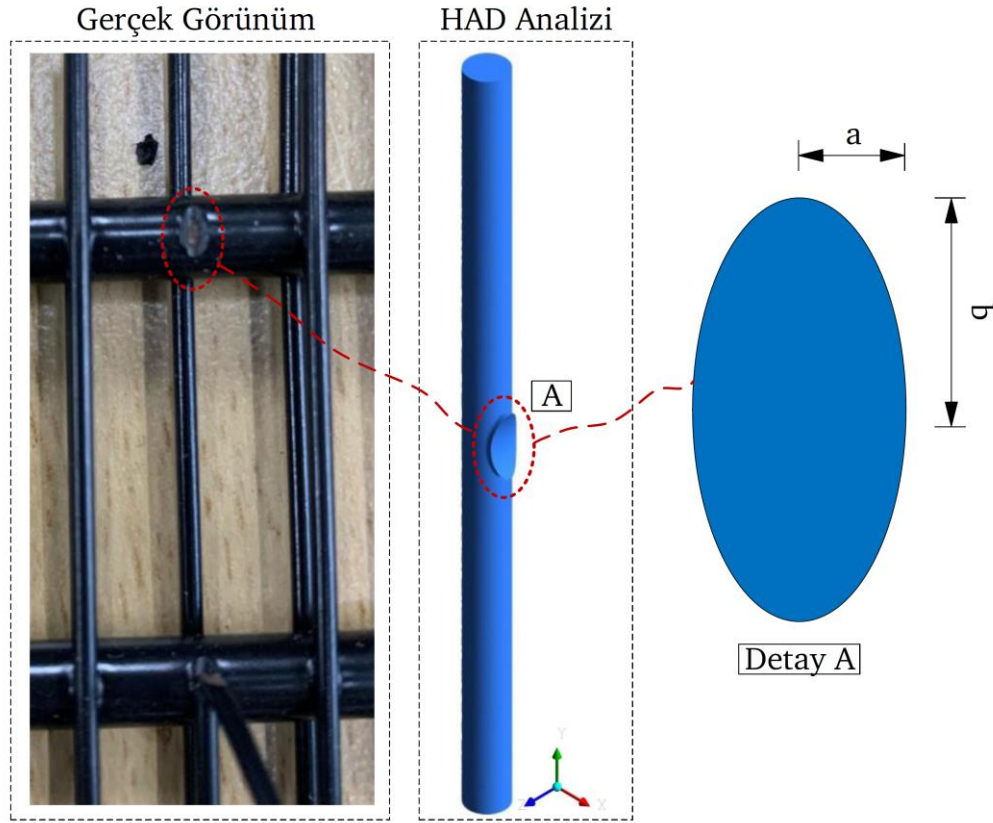
dizilimde h_w değerini azalttığı anlaşılmaktadır. İlgili değişim değerlerinin %3-5 civarında bir aralıkta olduğu gözlenmektedir. Şekil 5.19c)'de S_w değerinin değişiminin h_w üzerindeki etkisi $S_s=0$ ve $S_s =0,25$ değerinde benzer bir eğilimdedir. Her iki durumda da S_w/D_w oranı 4'ün altında h_w üzerindeki artışın daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Genel olarak değişen S_w/D_w oranlarında S_s değerinin 0 ile 0,25 arasında değişmesiyle ısı geçişinde %20-25 arasında artış görülmektedir. Şekil 5.19d)'ye göre azalan S_t/D_t oranlarında $S_s =0$ ve $S_s =0,25$ olması halinde h_w değerlerinin birbirine yaklaştığı saptanmıştır. Şaşırtmalı dizilim sonrasında arka sıradaki tellerde ön telin etkisinden kurtulup bağımsız bir ısı karakter sunduğu anlaşılmaktadır. S_t/D_t oranı 4'ün üzerinde olduğunda şaşırtmalı dizilim şartlarında h_w üzerindeki değişimin az olduğu görülmektedir. Bunun sebebi bu değer üzerinde havanın geçtiği kesit alandaki hız değişimlerinin nispeten daha az olmasıdır. Bu değer altında borudan kaynaklı bozulan akış arka teli daha çok etkilemektedir. Tandem dizilimde önceden belirtildiği üzere artan S_t/D_t oranların ön telin girdap bölgesi dolayısıyla arka tel üzeri taşınım katsayısında azalmaya neden olmaktadır. S_t/D_t değerinin yaklaşık 4'den 10'a çıkarılmasıyla $S_s =0$ ile $S_s = 0,25$ arasındaki h_w oranı %16'dan %28'e çıkmaktadır.



Şekil 5.20 Farklı S_s ve hız değerlerine göre a) h_{eq} , b) f değerlerinin değişimi

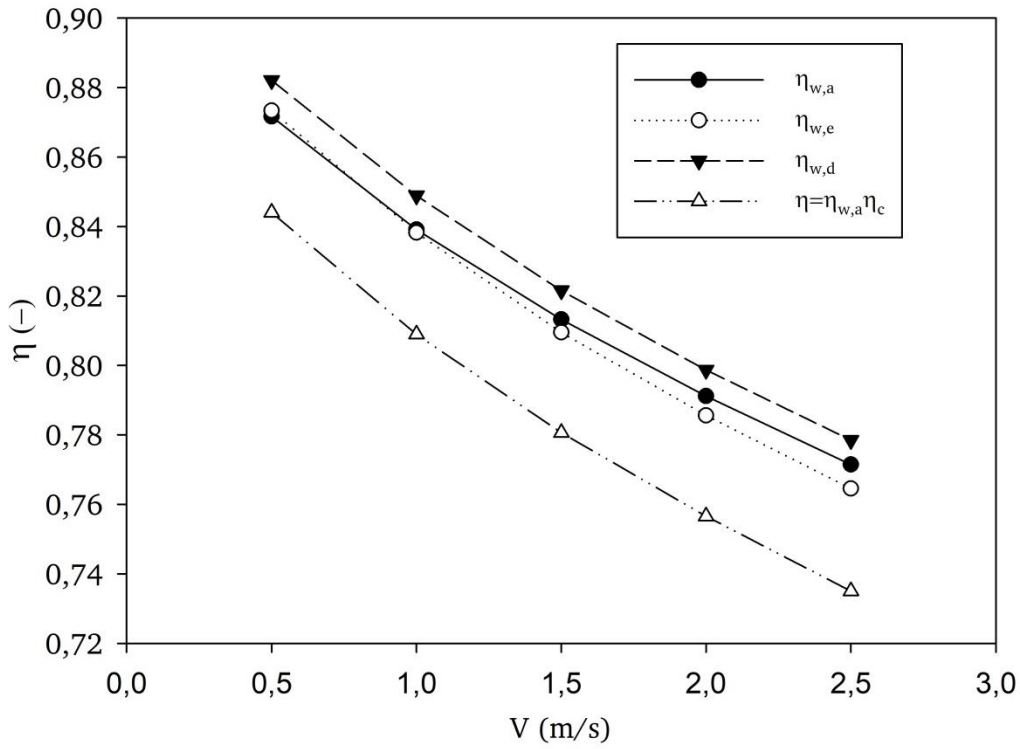
Şekil 5.20’de farklı hız değerlerinde değişen tel şaşırtma oranlarında tel kanatlı yoğunlaştırıcı üzeri eşdeğer taşınım katsayısı ve sürtünme faktörünün değişimi görülmektedir. Hem eşdeğer taşınım katsayısı hem de sürtünme faktörü üzerindeki değişim ilgili S_s değerleri dolayısıyla h_{bw} üzerindeki değişime benzer şekilde olmaktadır. Artan S_s miktarlarında hem h_{eq} hem de f değerlerinin arttığı görülmektedir. Bununla birlikte $S_s = 0,125$ değeri sonrasında artan S_s değerlerinin hem h_{eq} hem de f üzerindeki değişim oldukça azdır. $S_s = 0$ ile $S_s = 0,25$ arasındaki h_{eq} arasındaki fark azalan hızlarda %11-20 arasında değişmektedir. Buna karşın benzer şartlarda f üzerindeki değişim %8-14 arasında değişmektedir. Bu bilgilere göre şaşırtma miktarının artışı ile olan ısı geçiş miktarının basınç düşümüne nazaran daha fazla olduğu görülmektedir.

Tel kanatlı yoğunlaştırucularda ısı geçişini etkileyen önemli faktörlerden biri de kanat verimidir. Literatürde kanat verimi hesaplamalarında basitleştirme amacıyla kanat dibi geometrisinin tel çapında kabul edildiği görülmektedir. Ancak tellerin boru yüzeyine kaynatılması sırasında boru ile telin temas yüzeyinde bir bölge kısmen erimekte ve boru ile telin temas ettiği bölge eliptik bir şekil almaktadır. İlgili temas alanına ait görsel ve ona uyarınca HAD analizlerinde çizilen bölge Şekil 5.21’de görülmektedir.



Şekil 5.21 Tel ve boru temas alanı

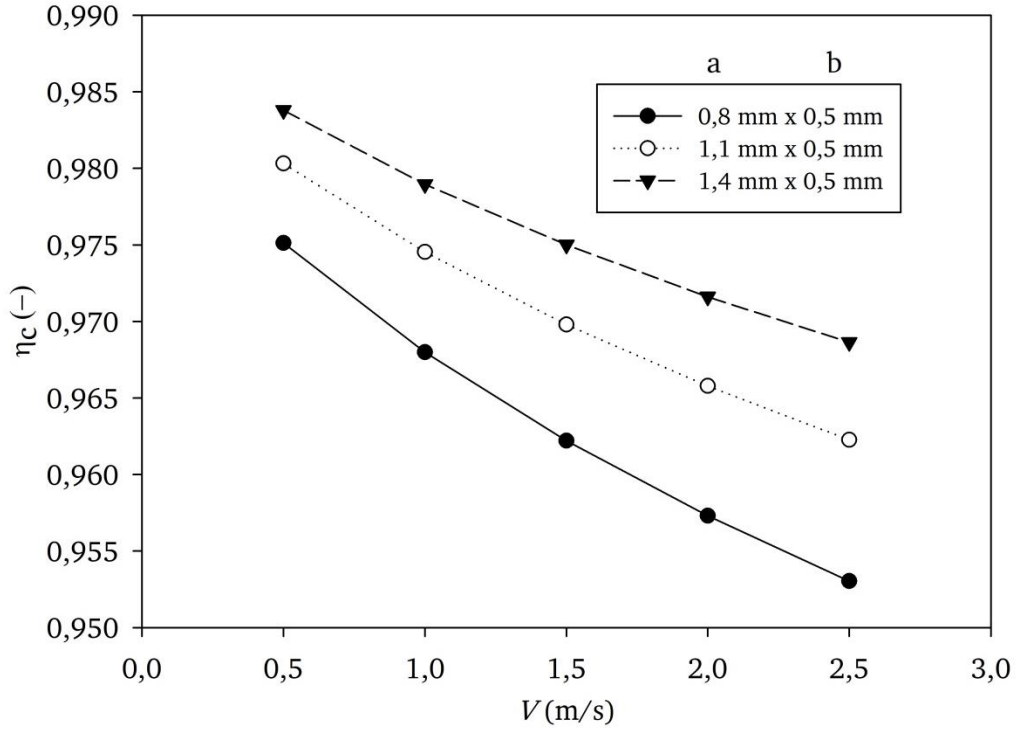
HAD analizleri için kullanılan elips boyutları gerçek görsel üzerindeki yalnızca kaynak kısmı dikkate alınarak çizilmiştir. Boya alanı dikkate alınmamıştır. Tel kanatlı yoğunlaştırucular üzerinden teller ile yoğunlaştırucudan uzaklaştırılacak ısı açısından ilgili temas alanı köprü vazifesi üstlenmektedir. Bu sebepten ötürü tellerin yüzeye iyi şekilde kaynatılması gerekir. Temas alanı bir bakımdan kaynak işleminin kalitesini belirtir. Mümkün olduğunca geniş bir temas alanı tel yüzeyinden olan ısı geçişinin arttırıcı bir etki ortaya koymaktadır. Yapılan ölçümler sonrasında a ve b değerlerinin sırasıyla yaklaşık 0,5 mm ile 1,1 mm civarında olduğu görülmüştür. Lum ve Clausing yaptıkları deneysel çalışmada bu aralıkların yaklaşık olarak 0,6 mm ile 1,2 mm civarında olduğunu ifade etmişlerdir [36]. Kanat verimi incelemeleri kapsamında ilk olarak dairesel($\eta_{w,d}$) ile eliptik kanat dibi($\eta_{w,e}$) yaklaşımına göre bulunan kanat verimleri Şekil 5.22’de incelenmiştir. Aynı zamanda ortalama yüzey sıcaklığına göre basitleştirilmiş kanat verimi hem kanat dibi sıcaklığına($\eta_{w,a}$) göre hem de boru iç yüzey sıcaklığı(η) referans alınarak hesaplanmış Şekil 5.22’da gösterilmiştir.



Şekil 5.22 Temas alanının farklı hızlarda kanat verimi üzerine etkisi

Şekil 5.22'den anlaşılaçağı üzere eliptik kanat dibi ile dairesel kanat dibine göre hesaplanan kanat verimlerinin birbirine oldukça yakın olduğı belirlenmiştir. Serpantin 1'de kullanılan 1,4 mm çapındaki telin kesit alanı 1,54 mm²dir. Kanat dibi eliptik şekline göre hesaplanan yüzey alanı ise yaklaşık 1,73 mmdir. Çevrelerinde birbirine yakın olduğı gözönüne alındığında ilgili kanat verimlerinin birbirine yakın sonuçlar vermesi anlaşılmaktadır. Bu durumda literatürde sıklıkla uygulanan kanat dibinin tel çapına eşit olması kabülünün hesaplamaları kolaylaştırma açısından uygun bir yaklaşım olduğı anlaşılmıştır. Şekilde HAD analizleri yardımıyla okunan kanat dibi temas bölgesi sıcaklığına göre hesaplanan $\eta_{w,a}$ değerinin hem eliptik kanat dibi hem de dairesel kanat dibi yaklaşımlarıyla hesaplanan kanat verimlerine oldukça yakın sonuçlar verdiğı görülmektedir. Böylece adyabatik kanat ucu kabülüyle yapılan hesaplamalar sonucunda elde edilen kanat verimi üzerinden kanat yüzey sıcaklıklarının ortalama değerinin bulunmasında oldukça uygun bir yaklaşım olduğı ortaya çıkmıştır. Ancak genel kanat verimi incelendiğinde verimin diğ er verimlerden %2-4 civarında daha az olduğı görülmektedir. Bu sonuç temas veriminin etkisini ortaya koymaktadır. Temas veriminin etkisini görmek amacıyla üç farklı

boyuttaki kanat dibi geometrisi üzerinden hesaplanma yapılmış ve sonuçlar Şekil 5.23’de sunulmuştur. Kanat dibi geometrilerinde elipsin en kısmı 0,5 mm sabit alınırken boy kısmının üç farklı değeri için irdelenmiştir. İlgili değerler sırasıyla 0,8 mm, 1,1 mm ve 1,4 mmdir. Bu değerlere karşılık gelen temas alanları ise sırasıyla 1,26, 1,73 ve 2,20 mm²dir.

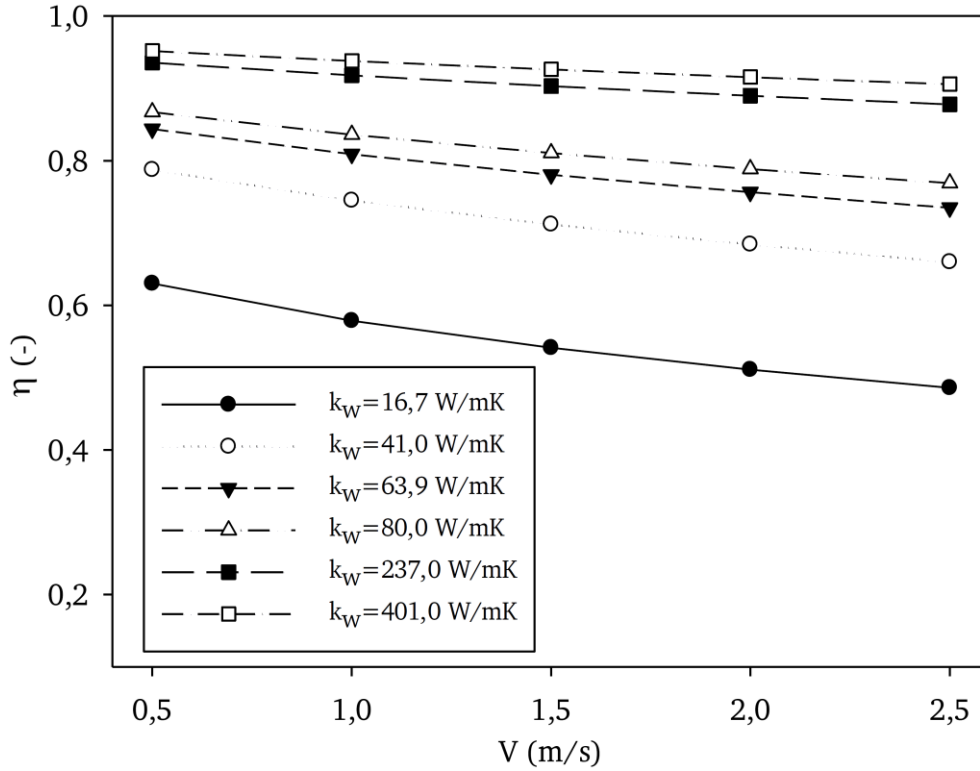


Şekil 5.23 Temas alanının farklı hızlarda temas verimi üzerine etkisi

Şekil 5.23’de görüldüğü üzere temas alanının yaklaşık 2 katına çıkmasına karşılık temas verimindeki değişimini %1-2 civarında etkilediği görülmektedir. Daha önceden belirtildiği üzere h_w , h_t değerinden yüksek olduğu için her durumda temas direnci 1’den küçük bir değer alacaktır.

Tel kanatlı yoğunlaştırucularda maliyet ve dayanıklılık açısından hem tel hem de boru çelik malzemedan imal edilir. Bu çelik genellikle karbon çeliğidir [13]. Hoke vd.[135], Lum ve Clausing[36] çalışmalarında kullandıkları çeliğin ısı iletim katsayısının 60,5 W/mK olduğunu belirtmişlerdir. Buna karşın farklı kanat malzemelerinin kullanımın ısı geçişine etkisini araştırmak açısından altı farklı kanat malzemesi nümerik olarak incelenmiştir. İlgili malzemeler sırasıyla paslanmaz çelik ($k=16,7$ W/mK), karbon çeliği ($k=41,0$ W/mK), karbon çeliği ($k=63,9$ W/mK), demir ($k=80,2$ W/mK), alüminyum ($k=237,0$ W/mK) ve bakır

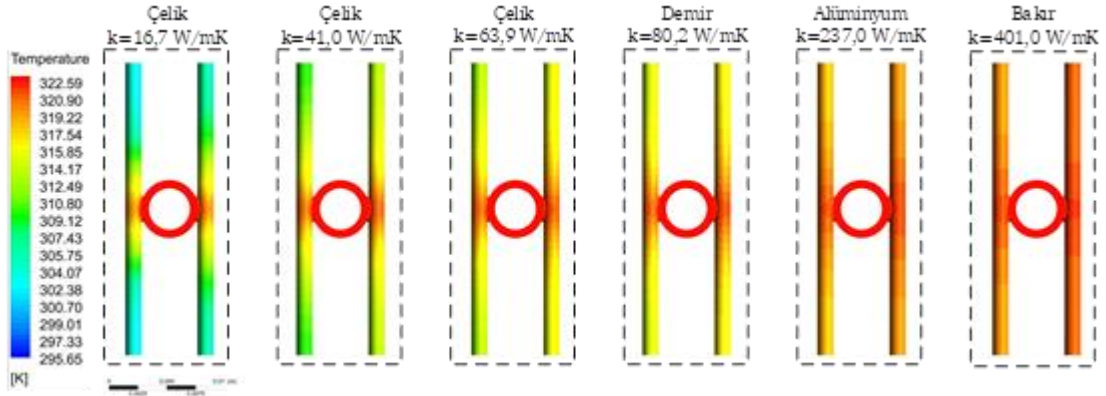
($k=401,0$ W/mK) malzemedir [136]. Kanat malzemesinin farklı malzemelerden imal edilmesi durumunda elde edilen kanat verimleri Şekil 5.24’de verilmiştir.



Şekil 5.24 Değişen serbest hava akım hızlarında farklı kanat malzemelerine göre kanat veriminin değişimi

Genel olarak tel üzeri taşınım katsayısı sıcaklıkla çok değişmediğinden farklı kanat malzemelerinin ısı geçişi açısından etkisi kanat verimi üzerine olmaktadır. Tel üzeri taşınım sayısı yaklaşık sabit kalırken artan ısı iletim katsayısının kanat veriminin artmasında çok önemli bir etmen olduğu görülmektedir. Kanatın bakır veya alüminyum olması durumunda kanat verimi en yüksek hız değerinde dahi 0,90 civarındadır. Kanat malzemesi olarak demir ile 63,9 W/mK ısı iletim katsayısına sahip karbon çelikleri kullanıldığı takdirde kanat verimleri arasında %2-3 civarında fark olduğu görülmektedir. Bu malzemelerin kullanımında hız 0,5 - 2,5 m/s değiştiğinde kanat verimi yaklaşık 0,85-0,75 arasında değişmektedir. Isı iletim katsayısı 41,0 W/mK karbon çeliği kullanıldığında kanat verimi 0,80-0,65 civarında değişmektedir. Paslanmaz çelik malzemedan kanat kullanımıyla ise kanat veriminin oldukça azaldığı görülmektedir. Bu durumda genel olarak kanat verimi hızlara da bağlı olarak 0,63-0,50 civarında olmaktadır.

Nümerik analiz sonucunda farklı kanat malzemelerine ait yüzey sıcaklık dağılımları Şekil 5.25’de verilmiştir.



Şekil 5.25 HAD analizi sonuçlarına göre farklı kanat malzemeleri üzerindeki sıcaklık dağılımı

5.2 Çok Sıralı Yoğuşturucular

Zorlanmış taşınım şartlarında kullanılan düz tip tel kanatlı yoğuşturucular genel olarak üç farklı şekilde konumlandırılmaktadır. Bu konumlandırmalar sırasıyla,

i)akışın tele dik boruya paralel,

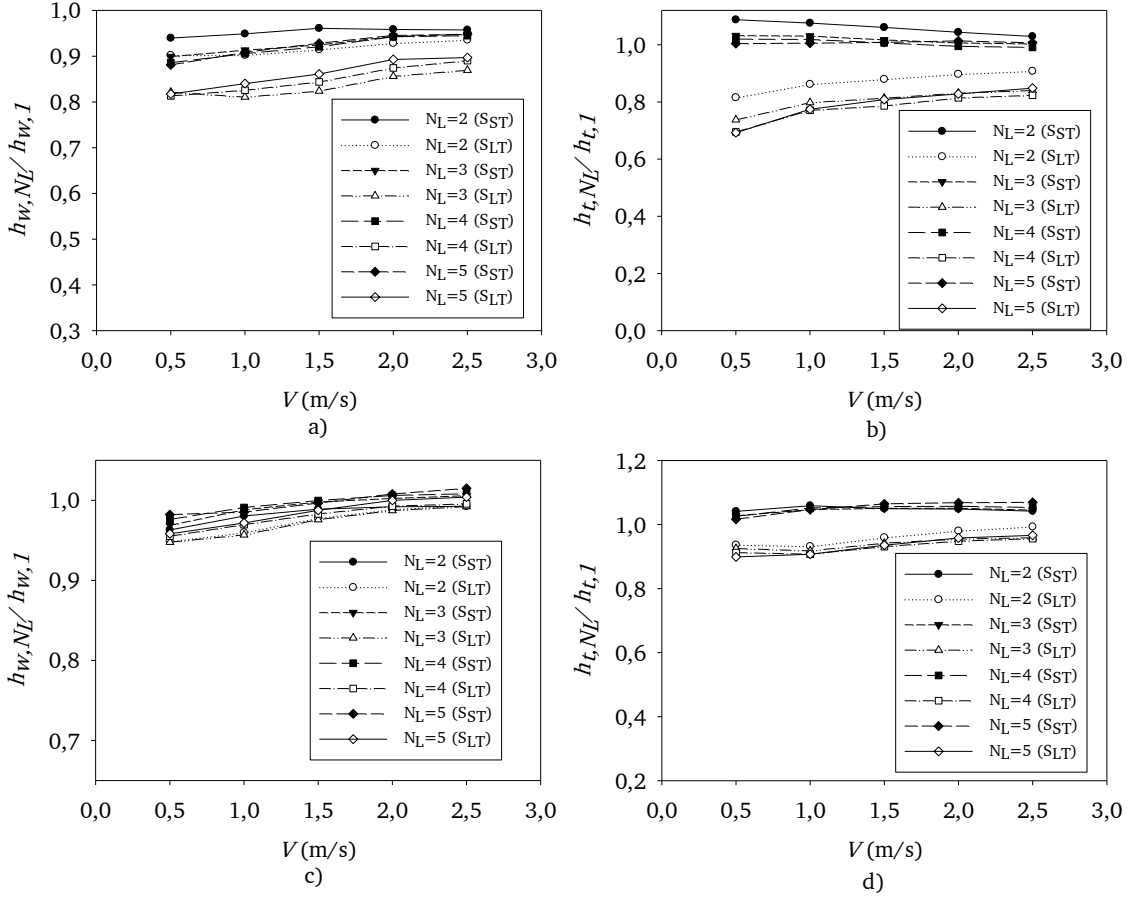
ii)akışın boruya dik tele paralel,

iii)akışın hem tele hem de boruya dik olması şekilde ifade edilebilir. Genel olarak hem tel hem de boruya dik konumlandırma ile ısı geçişinin daha yüksek olduğu belirlenmiştir [24], [25]. Enerji verimliliği çalışmaları kapsamında evsel soğutucu ürünlerinin enerji tüketimini sürekli azaltmaya yönelik olarak sık sık güncellenen uluslararası normlara uyması gerekmektedir. Bundan dolayı enerji tüketen komponenti ve/veya sistemlerin sürekli iyileştirilmesi gerekir. Soğutucularda yoğuşturucu tarafından kaynaklanan enerji tüketimi fanın çektiği elektriksel güç dolayısıyla oluşmaktadır. Bu gücü azaltmanın en temel yolu yoğuşturucunun neden olduğu basınç düşümünü azaltmaktır. Evsel soğutucularda bu kapsamda tel kanatlı yoğuşturucular tek veya çok sıralı olmak kaydıyla akışın tele dik, boruya paralel veya boruya dik tele paralel durumlarına göre yerleştirilebilir. Ancak endüstriyel uygulamalarda düz tip tel kanatlı yoğuşturucularda uzaklaştırılması gereken ısı evsel uygulamalara nazaran çok daha fazla olmaktadır. Bu durum dolayısıyla hem tel hem de borunun akışa dik konumlandırılması daha makul bir yaklaşımdır. Aynı zamanda kapasiteye göre

akış doğrultusunda sıra sayısı artırılarak daha küçük bir hacme sahip yoğuşturucular oluşturmak mümkün olabilir. Ayrıca böylelikle soğutucu boyutlarının azaltılması da mümkün olabilmektedir. Yoğuşturucunun fan önündeki kesit alanının küçültülmesi fan tarafından sağlanan hava akışının yoğuşturucu yüzeyini homojen şekilde ulaşmasını sağlar. Böylelikle kullanılan tel ve boru yüzeyleri etkin ve verimli şekilde kullanılabilir. Bu tez çalışması kapsamında incelenen yoğuşturucu özellikle endüstriyel uygulamalarda kullanılan yoğuşturucuların kullanım şartlarındadır. Bu açıdan hem deneysel hem de nümerik çalışmalar akışın hem tel hem de boruya dik olması durumuna göre incelenmiştir. Endüstriyel uygulamalarda tel kanatlı yoğuşturucular ağırlıklı olarak çok sıralı olarak tasarlanırlar. Çok sıralı uygulamalar akış doğrultusundaki boruların birbirine göre paralel(sıralı) veya şaşırtmalı dizilimi şeklinde olmak üzere iki şekilde üretilmektedir. Çalışma içerisinde ilgili durumlar sırasıyla boru sıralı ve boru şaşırtmalı dizilim şeklinde adlandırılmıştır. Çalışma kapsamında 2, 3 ve 4 sıra boru sıralı dizilime sahip yoğuşturucular deneysel olarak incelenmiştir. Aynı zamanda boru sıralı ve boru şaşırtmalı dizilim durumuna göre 2, 3, 4 ve 5 sıralı yoğuşturucular nümerik olarak incelenmiştir. Uygulamada kullanılan hem tek sıra hem de çok sıralı tel kanatlı yoğuşturucularda aynı sıradaki teller birbirine göre tandem dizilime sahiptir. Ancak tek sıra analizlerinde ön ve arka sıradaki tellerin şaşırtmalı diziliminin ısı geçişini arttırmada oldukça etkili olduğu belirlenmiştir. Bu açıdan benzer çalışmalar çok sıralı yoğuşturucular içinde hem deneysel hem de nümerik çalışmalar kapsamında uygulanmıştır. Nümerik çalışmalar, 4 sıra boru sıralı dizilimin hem $S_s=0$ hem de $S_s=0,25$ değerleri üzerinden alınan deneysel çalışma sonuçlarıyla nümerik çalışmalar bölümünde görüldüğü üzere doğrulanmıştır.

Ek Tablo A.2’de görüleceği üzere çok sıralı yoğuşturucular üzerinde yapılan deneysel çalışmalarda ilk sıranın aynı şartlarda yapılan tek sıra serpantinlere benzer ısı geçiş hızında olduğu görülmüştür. Bununla birlikte sıralar arasındaki ısı geçiş hızının artan her bir sıra üzerinden azaldığı belirlenmiştir. Aynı zamanda her bir sıradaki ısı geçiş hızının sıra sayısından bağımsız olarak birbirine yakın sonuçlar verdiği gözlenmiştir. Grafikler içerisinde kısaltma açısından çok sıralı dizilimde boru sıralı dizilim(S_{LT}), boru şaşırtmalı dizilim

ise(S_{ST}) ile ifade edilmiştir. Çok sıralı yoğuşturucular için referans yoğuşturucu özellikleri Serpantin 1' özelliklerinde olup sıralar arası mesafe(S_d) 30 mm olarak alınmıştır. Çok sıralı yoğuşturucular üzerindeki yapılan ilk çalışma nümerik olarak elde edilen h_w ve h_t değerlerinin tek sıra ile elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmasıdır.



Şekil 5.26 Çok sıralı yoğuşturuculardan elde edilen h_w ve h_t değerlerin tek sırada elde edilen h_w ve h_t değerlerine oranı a) $h_{w,NL}/h_{w,1}$ ($S_s=0$), b) $h_{t,NL}/h_{t,1}$ ($S_s=0$), c) $h_{w,NL}/h_{w,1}$ ($S_s=0,25$), d) $h_{t,NL}/h_{t,1}$ ($S_s=0,25$)

Şekil 5.26a) ve b) sırasıyla $S_s=0$ durumundaki çok sıralı yoğuşturucularda tel ve boru üzeri taşınım katsayısının aynı şartlardaki tek sırada elde edilen taşınım katsayılarına oranını göstermektedir. Şekil 5.26c) ve d) ise benzer şekilde $S_s=0,25$ değerindeki değişimi göstermektedir. Şekil 5.26'da verilen tüm grafiklerde hem h_t hem de h_w açısından boru şaşırtmalı dizilimin daha yüksek değerler verdiği görülmektedir. Şekil 5.26'da görülen bir diğer ortak sonuç ise artan sıra sayılarının hem boru şaşırtmalı hem de boru sıralı dizilimlerin üzerinden hesaplanan h_w ve h_t değerlerinin kendi içerisinde birbirine yakın sonuçlar

verdiği. Özellikle $N_L=3$ ve üzeri olduğunda elde edilen sonuçlar arasındaki fark %1-1,5'in altındadır.

Şekil 5.26a)'da tellerin tandem, sıraların boru şaşırtmalı diziliminde h_w değerleri, tek sıra üzeri h_w değerine benzer eğilimde değişmektedir. Bununla birlikte ilgili şartlarda artan hızlarla h_w oranlarının tek sıra h_w değerine yaklaştığı görülmüştür. $h_{w,NL}/h_{w,1}$ oranı artan hızlar dolayısıyla 0,89'dan 0,95'e yükselmektedir. Buna karşın hem tellerin hem de boruların sıralı dizilimde $h_{w,NL}/h_{w,1}$ oranı artan hızlara göre 3 ve üzeri sıra sayısında 0,82-0,90 aralığında değişmektedir. Görüldüğü üzere çok sıralı yoğunlaştırucularda hem boru sıralı hem de boru şaşırtmalı dizilimde h_w tek sıraya nazaran yaklaşık %5-20 aralığında daha düşüktür. Bununla birlikte boru şaşırtmalı yoğunlaştırucularda boru sıralı dizilime nazaran h_w üzerinde %5-7 aralığında bir iyileştirme sağlandığı görülmektedir. Hem boru şaşırtmalı hem de boru sıralı olan iki sıralı dizilimde kendi grupları içerisinde tek sıraya daha yakın sonuçlar vermektedir.

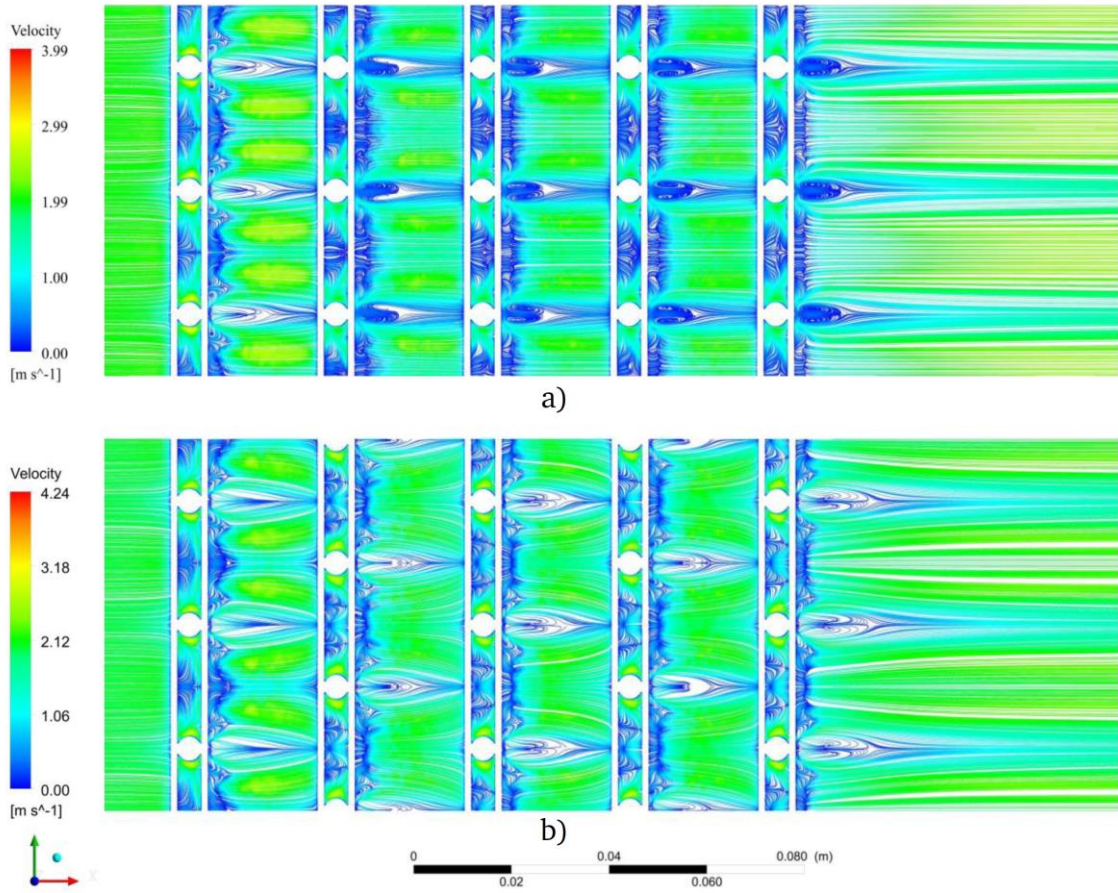
Şekil 5.26b)'de tandem dizilimli tellere sahip sıralar için hem sıraların boru şaşırtmalı hem de boru sıralı dizilim durumuna göre çok sıralı tel kanatlı yoğunlaştırucular üzerinden hesaplanan h_t değerinin tek sıra üzerinden hesaplanan h_t değerine oranları ($h_{t,NL}/h_{t,1}$) görülmektedir. Şekil 5.26b)'den anlaşılabileceği üzere boru şaşırtmalı durumunda üç ve üzeri sıra üzerinden elde edilen taşınım katsayısı tek sıradan elde edilen değerlerle oldukça benzerdir. İki sırada ise fark artan hızlarla birlikte %9-2 arasında değişmektedir. Buna karşın sıraların akış doğrultusunda boru sıralı diziliminde artan hızlarla $h_{t,NL}/h_{t,1}$ oranını arttırdığı görülmektedir. Bununla birlikte ilgili şartlar altında fark artan hızlarda %30-15 aralığında değişmektedir. İki sıra için bu fark %20-10 arasında değişmektedir.

Şekil 5.26c)'de ise sıralar üzerindeki tellerin şaşırtmalı dizilimine göre ($S_s=0,25$) çok sıralı durumlardaki tel üzeri taşınım katsayılarının aynı şartlardaki tek sıra tel üzeri taşınım katsayısına oranını ($h_{w,NL}/h_{w,1}$) göstermektedir. İlgili grafikler tel şaşırtma oranı $S_s=0,25$ değeri için alınmıştır. $S_s=0,25$ için boru şaşırtmalı durumda $h_{w,NL}/h_{w,1}$ artan hızlara göre 0,98-1,02 arasında değişmektedir. Benzer şekilde boru sıralı dizilimde $h_{w,NL}/h_{w,1}$ oranı ise 0,95-1,00 arasında değişmektedir. Görüldüğü üzere $S_s=0,25$ olmak kaydıyla çok sıralı durumda boru sıralı dizilimin

boru şaşırtmalı dizilime yakın sonuçlar verdiği görülmektedir. Bu açıdan tellerin şaşırtmalı dizilimi ile artan sıra sayıları dolayısıyla h_w üzerindeki düşüşün büyük ölçüde bertaraf edildiği söylenebilir.

Şekil 5.26d)'ye göre sıraların boru şaşırtmalı, tellerin şaşırtmalı dizilimiyle h_t değerinin %5 civarında arttığı saptanmıştır. Oysaki Şekil 5.26b)'de sıraların boru şaşırtmalı, tellerin tandem dizilimdeki $h_{t,NL}/h_{t,I}$ oranının 1 civarında olduğu görülmüştür. Bu açıdan boru şaşırtmalı ve tellerin şaşırtmalı diziliminin ortalama h_t değerini iyileştirdiği görülmektedir. $S_s=0,25$ olmak şartıyla çok sıralı tel kanatlı yoğuşturucularda boru sıralı dizilime göre $h_{t,NL}/h_{t,I}$ oranının değişimi artan hızlara göre 0,89-0,99 aralığında değişmektedir. Bu sonuçlara göre çok sıralı uygulamalarda boru sıralı dizilimle üretilen yoğuşturucularda ortalama boru üzeri taşınım katsayısının tek sıradan elde edilen değerlere nazaran azaldığı görülmektedir. Aynı zamanda tüm sıra sayılarının $h_{t,NL}/h_{t,I}$ kendi grupları içerisinde birbirine yakın değerler verdiği görülmektedir. Bununla birlikte ilgili S_L aralığı için sıra sayılarının artışının nispeten h_t üzerinde bir düşüşe neden olduğu görülmektedir.

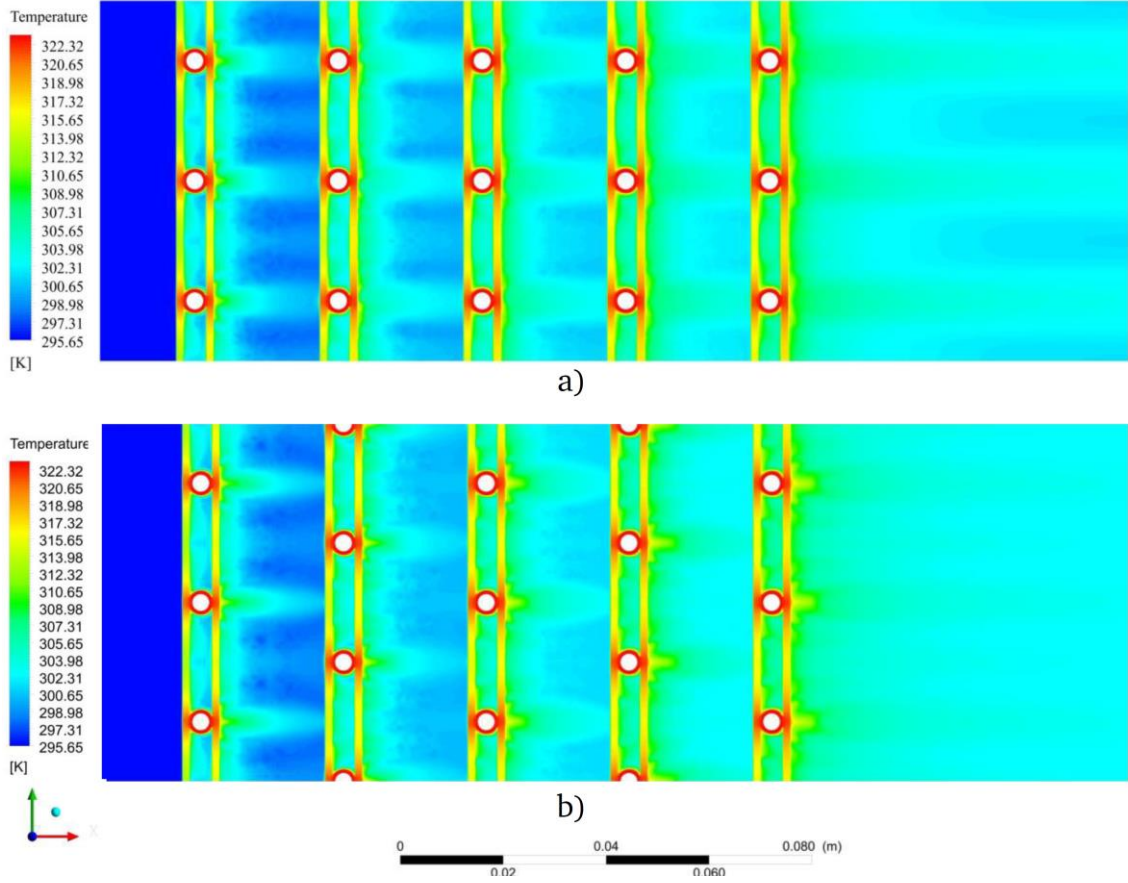
HAD analizleri üzerinden yukarıda bahsedilen değişimlerin nedenini anlamak açısından bir takım akım çizgileri ve konturları alınmıştır. Bu kapsamda Şekil 5.27'de Düzlem A üzeri 5 sıralı dizilime göre hız akım çizgileri görülmektedir. Şekil 5.27a) boru sıralı dizilim üzeri akışı örneklendirirken, Şekil 5.27b) ise boru şaşırtmalı dizilimi örneklendirmektedir. İlgili görsellerde serbest hava akım hızı 2 m/s değerindedir.



Şekil 5.27 5 sıralı tel kanatlı yoğunlaştırucu Düzlem A üzeri hız akım çizgileri a) Boru sıralı dizilim, b) Boru şaşırtmalı dizilim

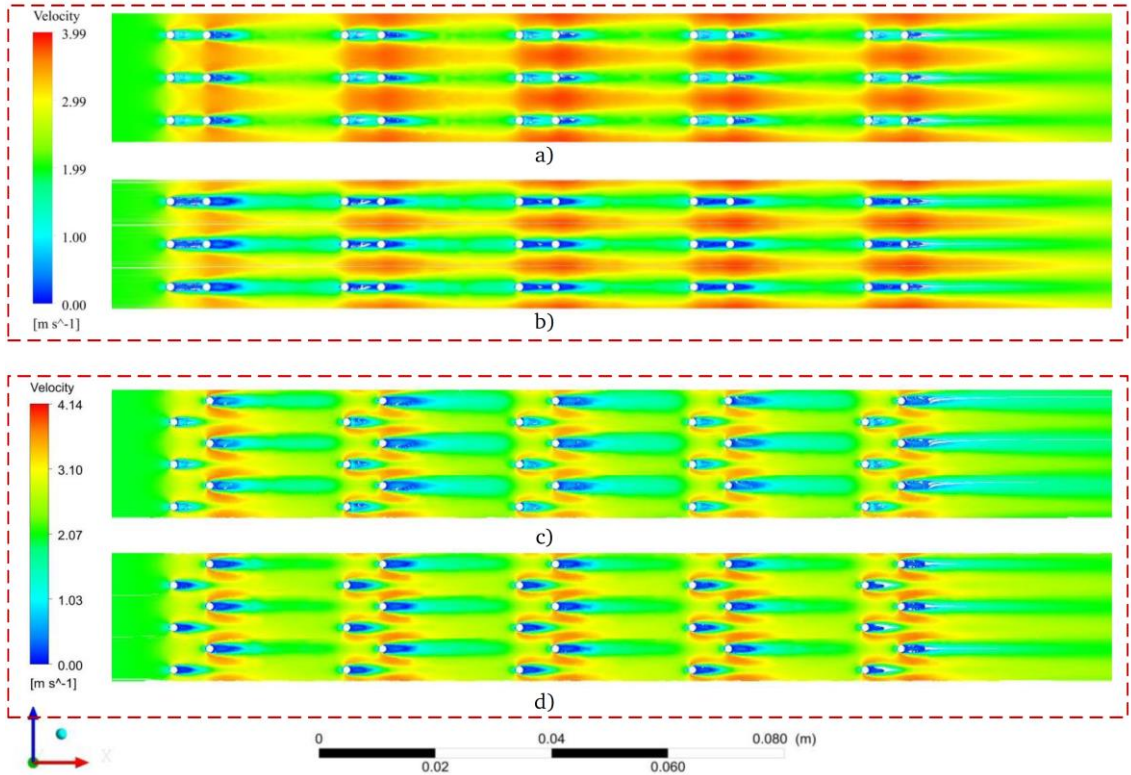
Hem Şekil 5.27a) hem de Şekil 5.27b)'de görüldüğü üzere hem boru şaşırtmalı hem de boru sıralı dizilimde ilk sıra benzer bir akış karakteristiği göstermektedir. Buna karşın boru sıralı dizilim şartlarında 2. sıra sonrasındaki akış karakteristiklerinin sonraki sıralardakıyla birbirine benzer olduğu görülmüştür. Genel olarak boru sıralı dizilimde boru arkasında oluşan girdap bölgelerinin aynı hizadaki arka sıralarda bulunan boruları etkilediği görülmektedir. S_L/D_t oranı yaklaşık 5 civarında olduğundan sıralar arasındaki borular üzerinde yeniden tutunma rejimi oluşmamaktadır. Ancak girdap bölgesi içerisindeki dönümlü akışın neden olduğu hız düşüşlerinin aynı hizadaki bir sonraki boruya ulaşan hızları azalttığı görülmektedir. Bu durumdan dolayı boru sıralı dizilimde h_t değeri azalmaktadır. h_t değeri ortalama olarak hesaplandığından iki sıralı durumda ilk sıranın ısı geçiş hızının yüksek olması dolayısıyla Şekil 5.26a)ve 5.26b)'de görüldüğü üzere tellerin tandem dizilimleri durumunda h_w ve h_t değerleri artan sıralardakine nazaran daha yüksek çıkmaktadır.

Sıraların boru şaşırtmalı dizilimiyle ise tüm sıralardaki akış karakteristiği birbirine benzemektedir. Özellikle boruların arkasında oluşan çevri caddelerinin etkisinin ardışık sıralara etkisinin azalmasıyla her bir sıradaki ısı geçişi davranışının tek sıra üzeri ısı geçişi davranışına yakın olduğu görülmektedir.



Şekil 5.28 5 sıralı tel kanatlı yoğuşturucu Düzlem A üzeri sıcaklık konturları a) Boru sıralı dizilim, b) Boru şaşırtmalı dizilim

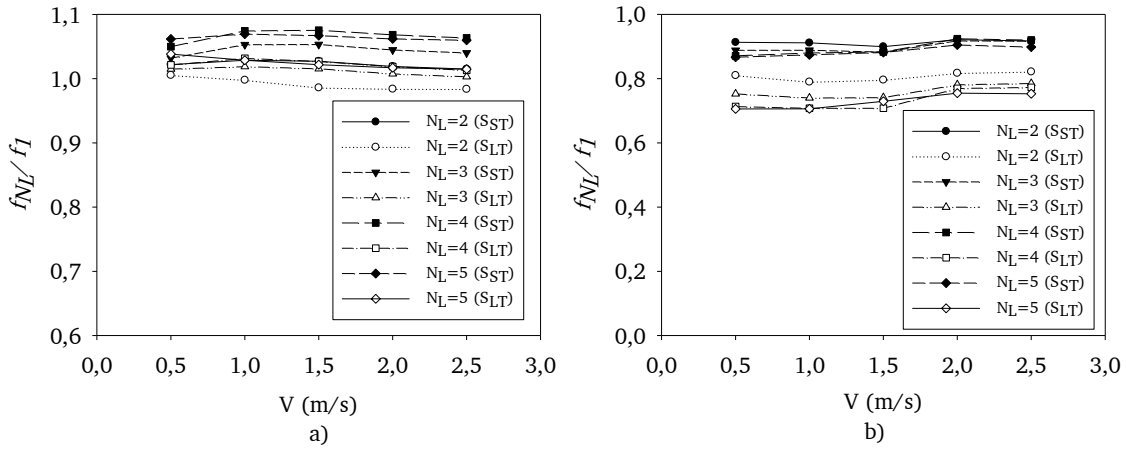
Şekil 5.28a)'da tellerin tandem dizilime sahip olduğu şartlarda 5 sıralı bir yoğuşturucuda boru sıralı dizilimine bağlı Düzlem A üzerinden alınan sıcaklık konturları gösterilmiştir. Şekil 5.28b)'de ise sıraların boru şaşırtmalı olması halindeki sıcaklık değişimi görülmektedir. Tek sıra üzerinde yapılan HAD analizi görselleştirmelerinde de görüldüğü üzere dönümlü akışın olduğu ve sonrasındaki hızın düşük olduğu bölgede sıcaklık değerleri daha yüksektir. Bu durum özellikle boru sıralı dizilim dolayısıyla ardışık sıralarda aynı hizadaki borulara ulaşan hava sıcaklıklarını arttırmaktadır. Böylece yüzey ile ortam arasındaki azalan sıcaklık farkı ısı geçişini azaltıcı bir etki ortaya koymaktadır.



Şekil 5.29 5 sıralı tel kanatlı yoğunştucu hız konturları a) $S_s=0$ (Düzlem C), b) $S_s=0$ (Düzlem D), c) $S_s=0,25$ (Düzlem C), d) $S_s=0,25$ (Düzlem D)

Çok sıralı dizilim şartlarında sıra üzerindeki tellerin tandem ve şaşırtmalı durumuna göre Düzlem C ve D de oluşan hız akım çizgileri Şekil 5.29'da görülmektedir. Şekil 5.29a) ve 5.29b) sırasıyla Düzlem C ve D üzeri tellerin tandem dizilimi dolayısıyla oluşan akım çizgilerini örneklendirmektedir. Şekil 5.29c) ve 5.29d) ise tellerin $S_s=0,25$ olduğu durumdaki şaşırtmalı dizilimine bağlı akım çizgilerini örneklendirmektedir. Şekil 5.29a) ve 5.29b)'de görüldüğü üzere artan sıra sayılarında yeniden tutunma rejimi tüm sıralar üzerinde görülmektedir. Kesit daralması dolayısıyla artan hızların tel sıraları arasındaki boşluktan geçtiği görülmektedir. Bu durumun sonucunda artan hızların ardışık sıradaki tel üzeri taşınım katsayısını iyileştirme açısından etkisinin az olduğu anlaşılmaktadır. Ardışık sıralar üzerindeki ön tele ulaşan hava hızlarının serbest hava akım hızına yakın olduğu görülmektedir. Buna karşın tellerin şaşırtmalı diziliminin arka sıralar üzerindeki ön tele ulaşan hava hızını artırdığı saptanmıştır. Benzer şekilde sıralar üzerindeki ön tel ve boru dolayısıyla arka tele ulaşan hava hızlarının da arttığı görülmektedir. Şaşırtmalı dizilimle ön tel

sonrası oluşan girdap caddelerinin tandem dizilime nazaran oldukça küçültüldüğü saptanmıştır.



Şekil 5.30 Çok sıralı yoğunlaştıruculardan elde edilen f değerlerin tek sırada elde edilen f değerine oranı a) $S_s = 0$ için, b) $S_s = 0,25$ için

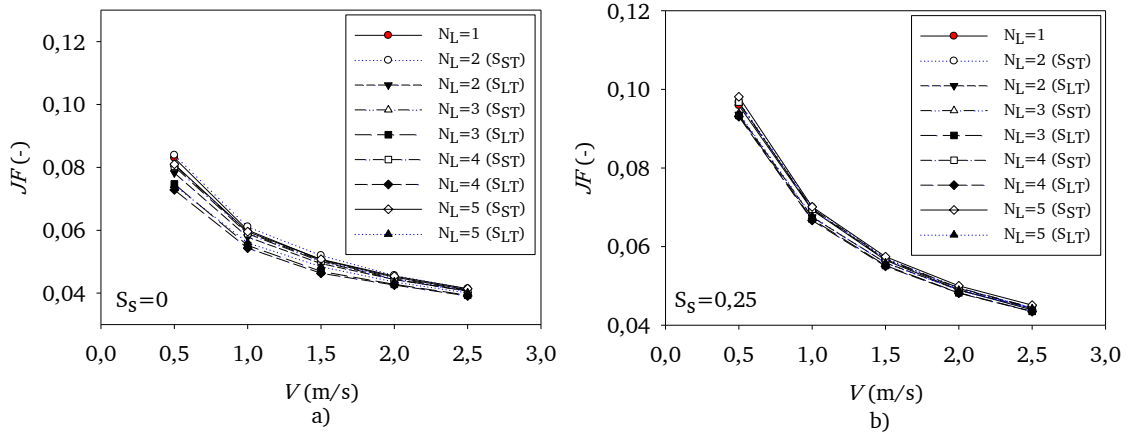
Şekil 5.30a) ve 5.30b)'de sırasıyla tellerin tandem dizilimli ve şaşırtmalı dizilimli olduğu çok sıralı yoğunlaştırucular üzerinden elde edilen Fanning sürtünme faktörünün, aynı akış şartları ve geometrik özellikteki tek sıra yoğunlaştırucular üzerinden elde edilen f faktörüne oranını (f_{NL}/f_I) vermektedir. Şekil 5.30'da verilen grafiklerde görüleceği üzere artan sıra sayılarına bağlı f_{NL}/f_I oranlarını tüm hız değerlerinde yaklaşık sabit bir davranış sergiler. Bu sonuçla artan sıra sayıları dolayısıyla oluşan basınç düşümü değişiminin sıra sayılarıyla yaklaşık doğrusal bir artış gösterdiği anlaşılmaktadır.

Şekil 5.30a)'da görüldüğü üzere çok sıralı dizilimlerde hem boru sıralı hem de boru şaşırtmalı dizilim sonucunda elde edilen f faktörü değerleri tek sıranın değerine nazaran daha düşüktür. Sıraların boru şaşırtmalı dizilimi sonucunda oluşan f_{NL}/f_I oranlarının boru sıralı dizilime nazaran daha az değiştiği görülmüştür.

Şekil 5.30b)'de boru şaşırtmalı dizilimde tellerin $S_s = 0,25$ değerinde şaşırtmalı dizilimi dolayısıyla f_{NL}/f_I oranlarının 1,03-1,08 aralığında değiştiği görülmektedir. Buna karşın $S_s = 0,25$ için boru sıralı dizilimiyle f_{NL}/f_I oranlarının değişiminin oldukça az olduğu belirlenmiştir.

Genel olarak taşınım katsayısının iyileşmesi halinde basınç düşümünün de arttığı görülmektedir. Bu durumda ısı geçişindeki iyileşmeyle basınç düşümündeki

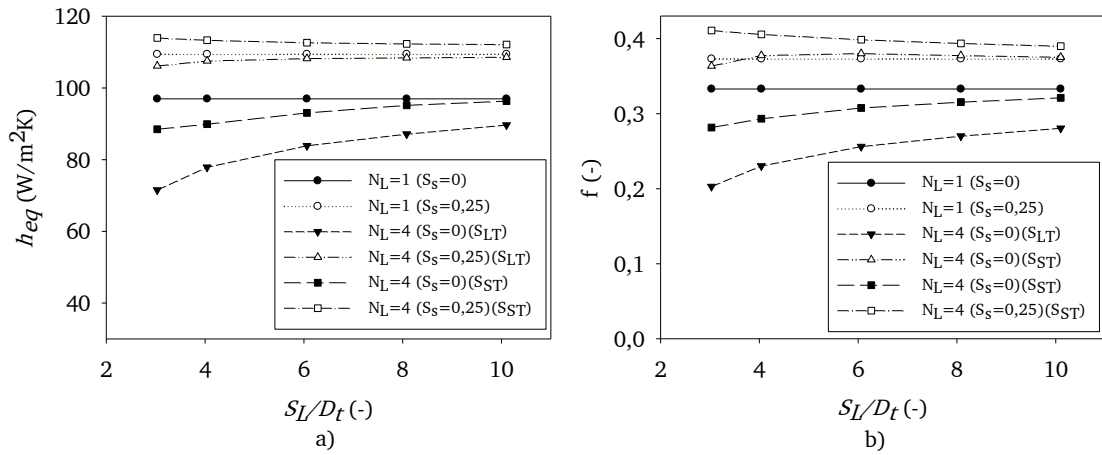
artışın değişimi gösteren bir ifade olması genel olarak iyileşmenin oranını göstermesi açısından faydalı olacaktır. Bu amaçla veri inceleme bölümünde Eşitlik 2.52 ile verilen ısıl-akış performans ölçüt faktörü (JF) ifadesi çalışılan tüm yoğunlaştırıcı geometrilerine $S_s=0$ ve $S_s=0,25$ değerlerinde uygulanmıştır.



Şekil 5.31 Tek ve çok sıralı yoğunlaştırıcılarda $V-JF$ faktör ilişkisi a) $S_s=0$ için, b) $S_s=0,25$ için

Şekil 5.31a) ve 5.31b)'de sırasıyla tek ve çok sıralı yoğunlaştırıcılarda sırasıyla sıralar üzeri tel dizilimi $S_s=0$ ve $S_s=0,25$ değerlerine göre JF faktöründeki değişimi incelenmektedir. Hem tellerin tandem hem de şaşırtmalı diziliminde artan serbest hava akım hızlarının JF faktörünü azalttığı görülmektedir. Aynı zamanda sıraların boru şaşırtmalı dizilimleri dolayısıyla elde edilen iyileşmenin, boru sıralı dizilimlere nazaran daha yüksek olduğu görülmektedir. Bir diğer sonuç ise tellerin şaşırtmalı diziliminde JF faktörü tandem dizilime nazaran oldukça arttırdığıdır. Örneğin 4 sıra boru şaşırtmalı dizilimde $S_s=0$ değerinde elde edilen verim değeri $S_s=0,25$ 'de elde edilen JF faktörü değerinden artan hızlara göre %20-10 arasında daha düşük değer verir. 4 sıra boru sıralı dizilimde ise bu aralık hıza bağlı olarak %28-12 arasında daha azdır. Genel olarak boru şaşırtmalı ve boru sıralı dizilim üzerinden elde edilen JF faktörlerinin sıra sayısından bağımsız olarak kendi grupları içerisinde birbirine yakın olduğu belirlenmiştir. Şekil 5.31a)'da kısmen değerler birbirinden farklı görülse de Şekil 5.31b)'de tellerin şaşırtmalı dizilimiyle JF değerlerinin boru sıralı ve boru şaşırtmalı dizilimlerin kendi grupları içerisinde aynı sonuçları verdiği belirlenmiştir.

Çok sıralı yoğuşturucularda ısı geçişi ve basınç düşümü üzerine etki eden diğer bir geometrik özellikte sıralar arası mesafedir. Bu mesafe çalışma içerisinde S_L olarak adlandırılmaktadır. S_L değerinin değişmesine bağlı eşdeğer taşınım katsayısı ve Fanning sürtünme faktörünün değişimi sırasıyla Şekil 5.32a) ve 5.32b)'de görülmektedir. Tek sıra üzerinden elde edilen değerlerin kıyaslanabilmesi açısından 2 m/s hız değerinde elde edilen h_{eq} ve f değerleri tüm S_L/D_t aralıklarında gösterilmiştir.

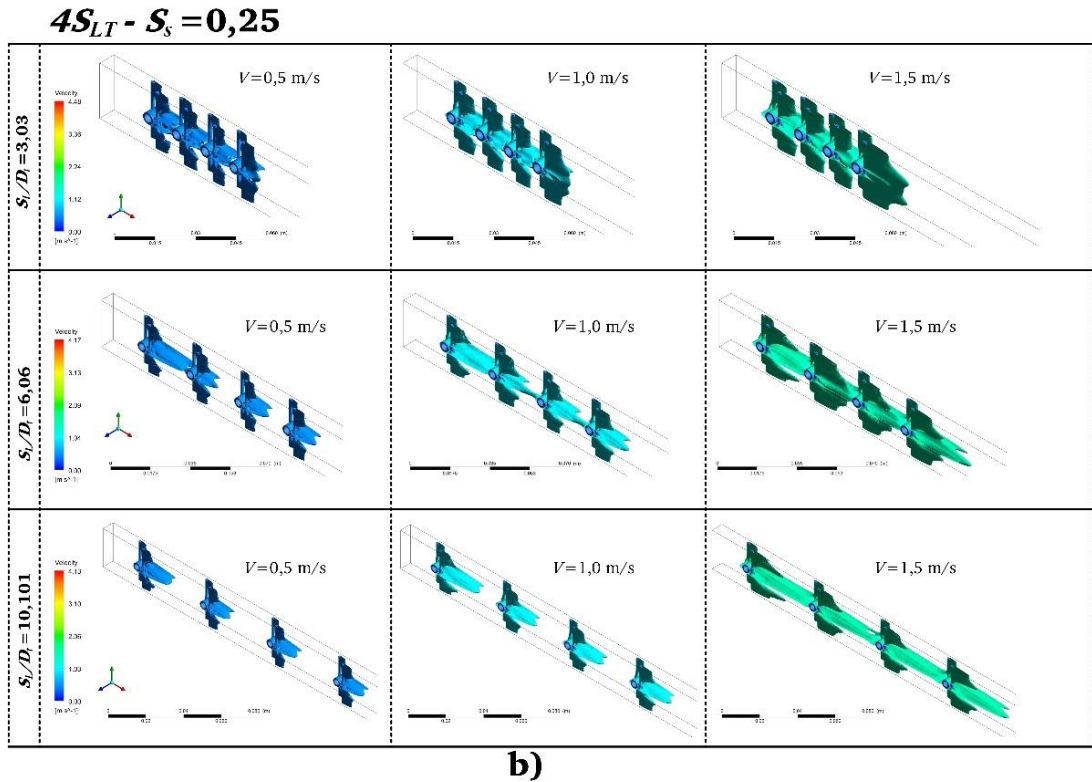
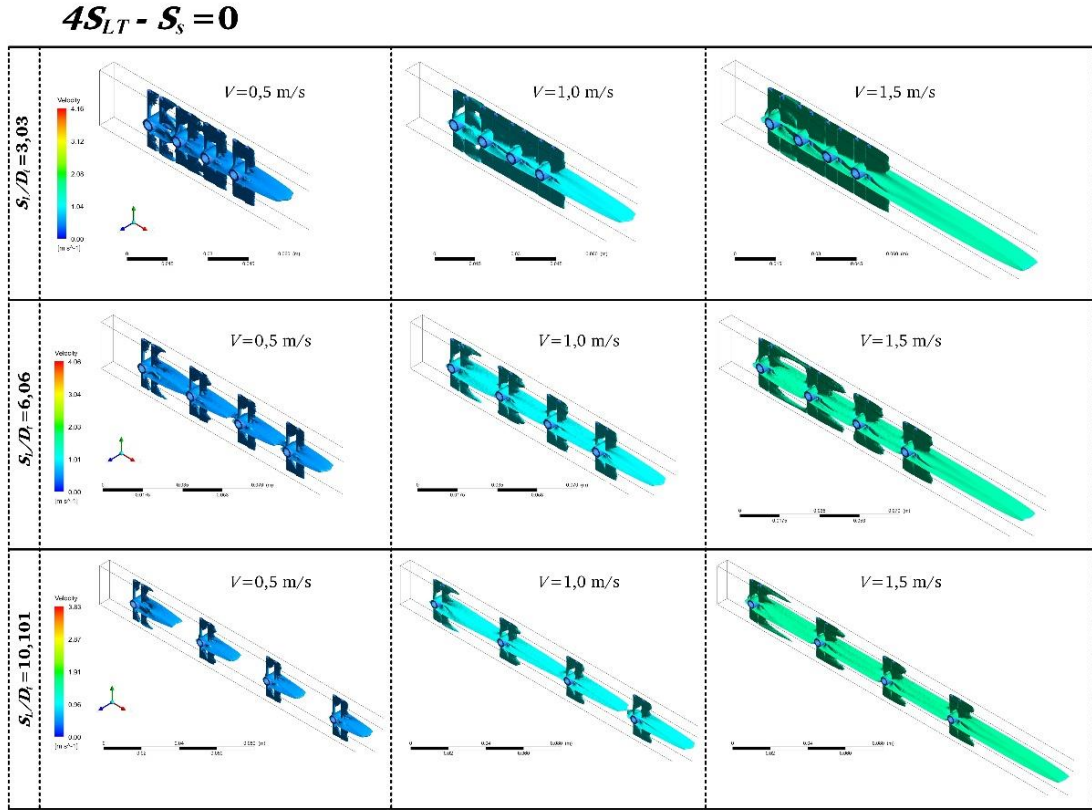


Şekil 5.32 4 sıralı yoğuşturucularda S_L/D_t değişiminin a) h_{eq} , b) f üzerine etkisi

Şekil 5.32a)'da sıralar üzerindeki tellerin tandem dizilimiyle elde edilen çok sıralı yoğuşturucularda ortalalama taşınım katsayısı aynı şartlardaki tek sıra yoğuşturucu üzerinden elde edilen ortalalama taşınım katsayısından daha düşük değerler verdiği belirlenmiştir. Bununla birlikte artan S_L/D_t oranlarında çok sıra üzerinden elde edilen taşınım katsayısının tek sıra üzerinden elde edilen değerlere yaklaştığı görülmektedir. Boru sıralı diziliminde S_L/D_t değerleri yaklaşık 6 ve üzeri olduğunda hem h_{eq} üzerindeki değişim $S_L/D_t = 10$ değerine nazaran yaklaşık %7 civarında az olduğu görülmüştür. Buna karşın $S_L/D_t = 3$ değeri $S_L/D_t = 6$ değerinde elde edilen h_{eq} açısından yaklaşık %17 daha düşük sonuç vermektedir. Şaşırtmalı dizilimde ise S_L/D_t oranları arasındaki değişim 6-10 arasında olduğunda %3,5, 3-6 arasında olduğunda ise %5 civarında bir değişim görülmektedir. Tel şaşırtmalı dizilim ile ise tüm S_L/D_t değerlerinde h_{eq} değerleri sıraların hem boru şaşırtmalı hem de boru sıralı diziliminde benzer sonuçlar vermektedir. Bu sonuç uyarınca tel şaşırtmalı dizilim ile S_L/D_t oranlarının h_{eq} üzerine etkisi bertaraf edilmektedir. Sıraların boru şaşırtmalı

dizilimi %3 civarında tek sıraya nazaran daha iyi değer verirken, boru sıralı dizilimin tek sıra üzeri h_{eq} değerlerine oldukça yakın değer verdiği saptanmıştır.

Şekil 5.32b)'de ise tek ve 4 sıralı yoğuşturucular üzerinden elde edilen sürtünme faktörünü göstermektedir. f üzerindeki değişimin h_{eq} üzerindeki değişime paralel bir davranış sergilediği belirlenmiştir. $S_s=0,25$ olduğundaki tel şaşırtmalı dizilim ile h_{eq} üzerinde olduğu gibi f değerlerinin de S_L/D_t değişiminden etkilenmediği anlaşılmaktadır. Tellerin şaşırtmalı olduğu durumda tek sıra ve çok sıralı dizilimlerine göre hesaplanan f değerleri birbirine oldukça yakındır. Sıraların boru şaşırtmalı dizilimi sonucunda elde edilen f değerleri ise bu değerlerden %5 civarında daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Tellerin tandem dizilimli olduğu boru sıralı dizilimde değişen S_L/D_t oranlarının f üzerine etkisinin oldukça fazla olduğu saptanmıştır. S_L/D_t oranı yaklaşık 3'den-10'a çıkarıldığında %23'e yakın bir değişim görülmektedir. Buna karşın ilgili aralıkta tellerin tandem, sıraların boru şaşırtmalı dizilimiyle değişim oranı %14 civarındadır. Artan S_L aralıklarının f faktörünü arttırdığı görülmektedir. İlgili grafikteki tüm f değerleri 2 m/s serbest hava hızına göre hesaplanmıştır. Isı geçişi ve basınç düşümlerine yönelik değişimleri görmek açısından sıraların hem boru şaşırtmalı hem de boru sıralı dizilimi durumlarına göre ilgili akış alanı üzerinden hız eşyüzeyleri incelenmiştir. İncelemeler S_L/D_t oranının 3,03, 6,06 ve 10,1 oranları üzerinden yapılmıştır. Her bir S_L/D_t oranında sırasıyla 0,5, 1,0 ve 1,5 m/s hızlarına ait eşyüzeyler görselleştirilmiştir. İlgili şekillerde serbest hava hızı 2 m/s olup, diğer geometrik özellikler Serpantin 1'in özelliklerindedir.

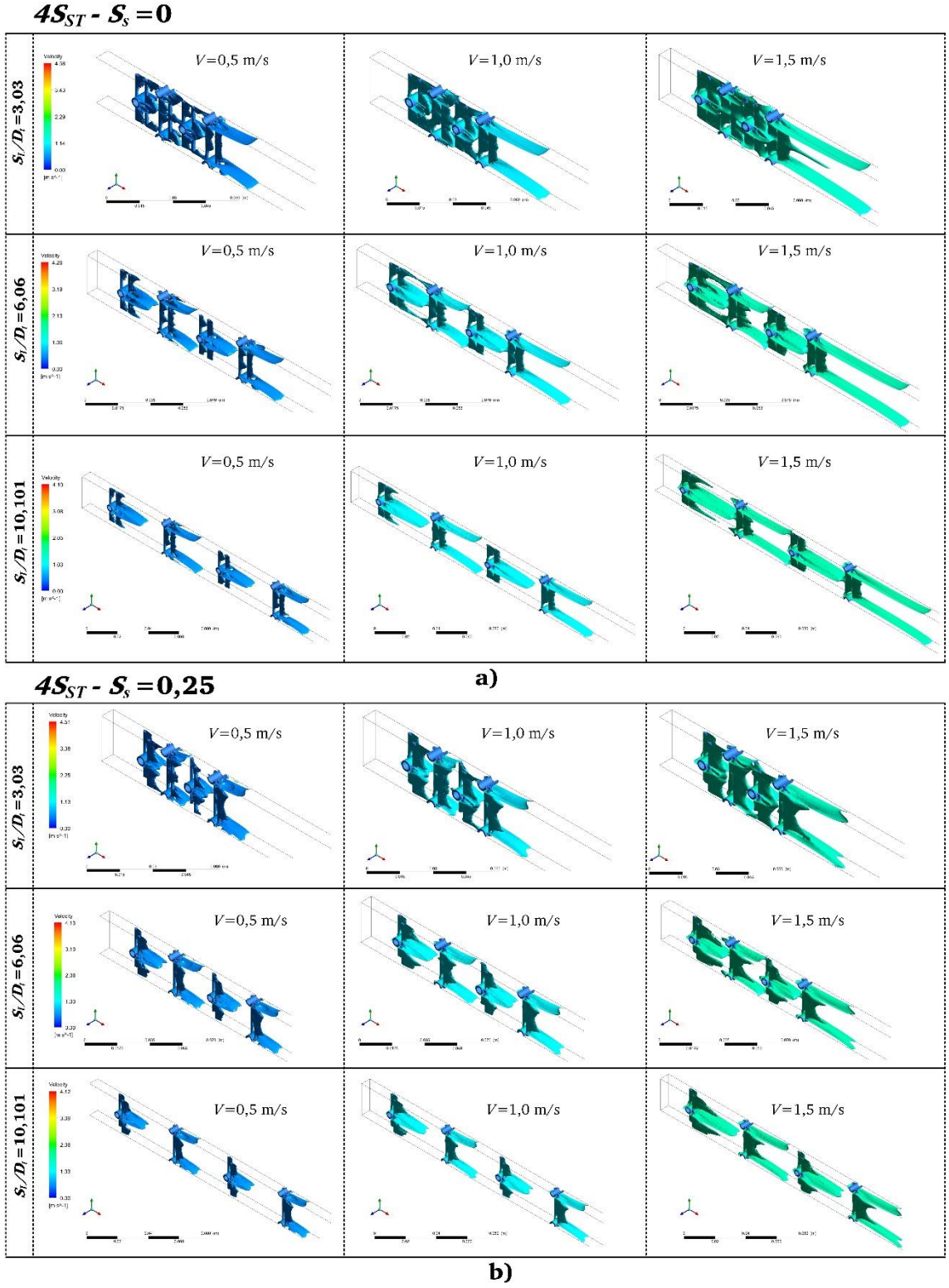


Şekil 5.33 $4S_{LT}$ dizilimde oluşan hız eşyüzeyleri a) $S_s = 0$, b) $S_s = 0,25$ için

Şekil 5.33a) dört sıralı tellerin tandem dizilime sahip olduğu bir yoğunlaştırucuda sıralı dizilim şartlarına göre HAD analizi aracılığıyla elde edilen hız eşyüzeyleri

örneklendirmektedir. Şekil 5.33b) ise dört sıralı tellerin şaşırtmalı dizilimi dolayısıyla oluşan eşyüzeyleri göstermektedir. Şekil 5.33a) incelendiğinde S_L/D_t oranı 3,03 iken tellerin hem kendi sıraları üzerindeki hem diğer sıralar üzerindeki telleri oldukça etkilediği görülmektedir. Özellikle herbir sıradaki arka tel kaynaklı düşük hıza sahip girdap bölgesinin ardışık sıralardaki ön tele ulaşan hız değerlerini önemli ölçüde azalttığı belirlenmiştir. Serbest hava akım hızı 2 m/s olmasına karşın ardışık sıralardaki ön tele ulaşan hız değerleri ağırlıklı olarak 1 m/s civarındadır. Tellerin tandem diziliminin boru üzeri akışa etkisinin az olduğu görülmektedir. İlgili şartlar altında borular yalnız boru demetine benzer bir akış karakteristiği ortaya koymaktadır. Bu durumda tek sıra yoğunlaştırucularda teller için ifade edilen “yeniden tutunma rejimi” şartlarının ardışık boru sıralarında da oluştuğu görülmüştür. Şekilden görüleceği üzere $S_L/D_t=3,03$ 'de tüm yoğunlaştırucu yüzeyinin 1,5 m/s hız değerinin altındaki hava hızına maruz kaldığı anlaşılmaktadır. Dönümlü akış bölgelerinde hızın düşük olması, ilgili bölgelerdeki akışkan sıcaklığının yükselmesine sebebiyet vermektedir. Özellikle ardışık tel yüzeylerinin yüksek sıcaklığa maruz kalması dolayısıyla da ısı geçiş hızlarında azalma olmaktadır. S_L/D_t oranı 6,06'ya çıkarıldığında herbir sıra üzerinden tellerin ardışık sıralar üzerindeki telleri etkileme oranının azaldığı anlaşılmaktadır. Buna karşın ardışık sıralarda bulunan boruların halen bir miktar birbirini etkilediği belirlenmiştir. S_L/D_t oranı 10,1'e çıkarıldığında arka sıralara ulaşan hava hızları ilk sıraya ulaşan hava hızlarına daha yakın hız değerlerine ulaşmaktadır. Böylece her bir sıra tek sıra yoğunlaştırucu üzerinden elde edilen ısı ve akış karakteristiğine yakın bir davranış sergilemektedir. Harimi ve Saghafian üç adet tandem dizilimli silindir üzerinden ısı geçişini L/D oranı 2 ile 10 arasında değiştiği 6 farklı değer için $Re=100$ ve 200'de incelemişlerdir. Orta ve en arka sıradaki silindir üzeri Nu sayılarının ilk sıra üzeri Nu sayısına kıyasla sırasıyla %40 ve %52 daha düşük olduğunu belirtilmiştir. Buna karşın artan Re ve L/D aralıklarıyla ilgili oranların oldukça azaldığını ifade edilmiştir [43]. Yukarıda görüldüğü üzere tel kanatlı yoğunlaştırucularda da ısı geçişi açısından benzer aralıklarda benzer sonuçlar görülmektedir.

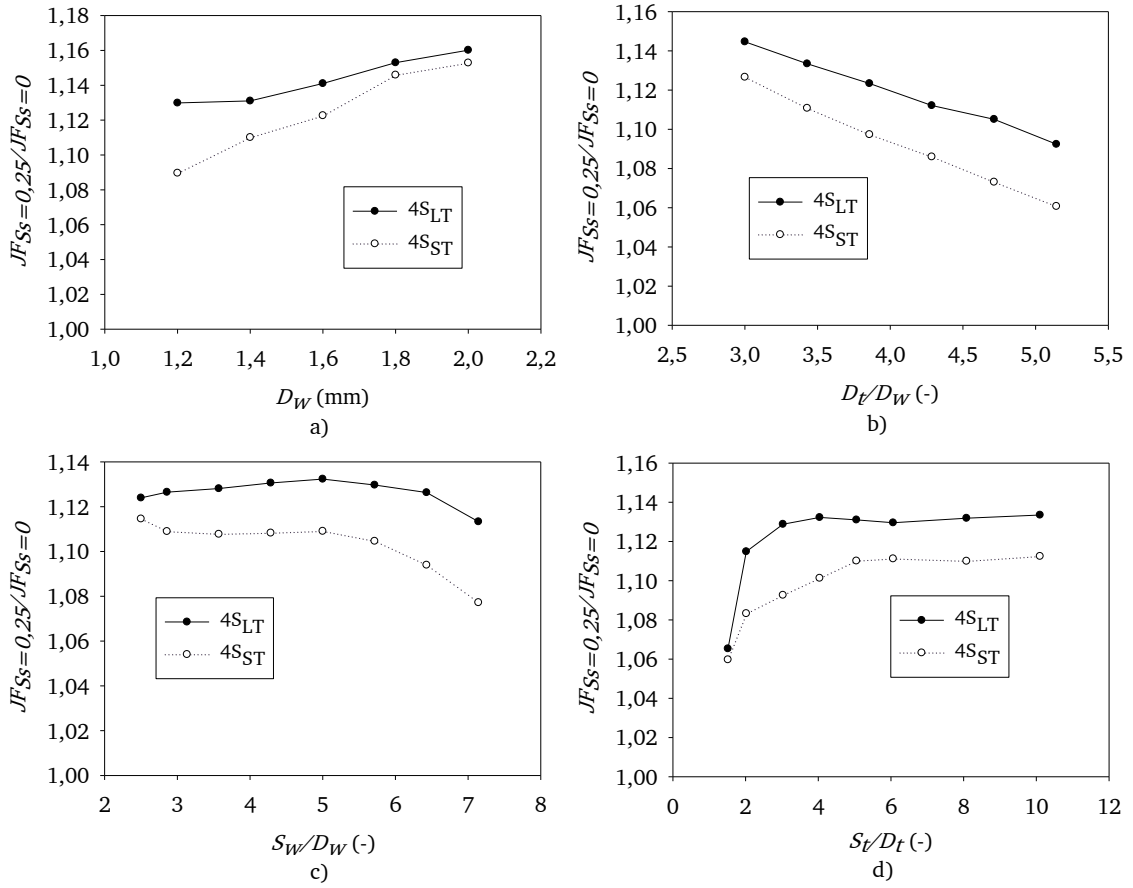
Sıraların boru sıralı, tellerin şaşırtmalı dizilimiyle aynı sıradaki tellerin birbirine etkisinin ortadan kalktığı önceki bölümlerde belirlenmişti. Bu durumun aynı zamanda ardışık sıraların birbirine etkisini de önemli ölçüde yok ettiği anlaşılmaktadır. Bu sonuç tellerin şaşırtmalı dizilimi dolayısıyla akış içerisinde oluşan türbülans artışından kaynaklanmaktadır. Örneğin $S_L/D_t = 3,03$ için tellerinin tandem dizilimli olmasına bağlı olarak ardışık sıralar üzerindeki borulara ulaşan hava hızları ağırlıklı olarak 1 m/s'nin altındayken, tellerin şaşırtmalı dizilimiyle aynı aralık için arka sıradaki borulara ulaşan hava hızları 1,5 m/s'ye ulaşmaktadır. Aynı zamanda tellerin şaşırtmalı dizilimiyle arka sıralara ulaşan hava sıcaklıkları giriş şartlarına daha yakınlaşmaktadır. Böylelikle her bir sıra tek sıra yoğunlaştırucudan elde edilen ısı-akış karakterine oldukça yakın bir karakter sergilemektedir. Çok sıralı yoğunlaştırucular üzerinden yapılan deneysel çalışmalarda tellerin tandem dizilimli durumunda hem basınç hem de ısı geçişinin S_L/D_t oranına oldukça bağımlı olduğu anlaşılmaktadır. Buna karşın tellerin şaşırtmalı dizilimiyle bu etkinin önemli ölçüde azaldığı belirlenmiştir.



Şekil 5.34 $4S_{ST}$ dizilimde oluşan hız eşyüzeyleri a) $S_s = 0$, b) $S_s = 0,25$ için

Şekil 5.34a) dört sıralı tellerin tandem dizilimli sıraların boru şaşırtmalı olduğu bir yoğunlaştırıcı üzerinden HAD analizi aracılığıyla elde edilen hız eşyüzeyleri, Şekil 5.34b) ise dört sıralı tellerin şaşırtmalı dizilimli durumuna göre oluşan hız

eşyüzeylerini belirtmektedir. Şekil 5.34'den anlaşılacağı üzere sıraların boru şaşırtmalı dizilimiyle ardışık sıralar üzerindeki boruların birbirine etkisini yok olmaktadır. Böylelikle boru sıralı dizilime nazaran boru yüzeyinden olan ısı geçişinde artış gözlenmektedir. S_L/D_t oranı 3,03 civarında olduğunda sıralardaki borulardan ve arka tellerden kaynaklı oluşan dönüşlü akışın ardışık sıradaki ön teller üzerinde belli bölgelere ulaşan hız değerlerini azalttığı görülmektedir. Bununla birlikte arka teller dolayısıyla bozulan akışın ardışık sıralardaki boruda belli yüzeylere ulaşan hız değerlerini kısmen azalttığı belirlenmiştir. Tellerin şaşırtmalı dizilimiyle boruların ön tel üzerine etkisi ortadan kalkarken, arka tel kaynaklı bozulan akışın boru yüzeyini etkilemesinin S_L/D_t oranı 3,03'de kısmen devam ettiği anlaşılmıştır. S_L/D_t oranı 6,06 ve üzeri olduğunda sıralardan kaynaklı dönüşlü akış bölgelerinin arka sıraları etkileme oranının azaldığı anlaşılmaktadır. Ancak ardışık sıralarda bulunan boruların arka telden kaynaklı bozulan akıştan halen bir miktar birbirini etkilediği belirlenmiştir. S_L/D_t oranı 10,1'e yükseltildiğinde tüm sıralar birbirine benzer bir akış karakteristiği göstermektedir. Hem sıraların hem de tellerin şaşırtmalı dizilimiyle arka sıralardaki boru ve teller giriş havası sıcaklığına maruz kaldığından ilgili yüzey ile temas eden hava sıcaklığı arasındaki sıcaklık farkı yüksek olmaktadır. Böylece ısı geçişini açısından boru şaşırtmalı dizilim daha iyi bir yaklaşım olarak karşımıza çıkmaktadır.



Şekil 5.35 Çok sıralı yoğuşturucularda $S_s=0$ ve $S_s=0,25$ için elde edilen JF değerlerinin a) D_W , b) D_t/D_W , c) S_W/D_W , d) S_t/D_t değişimine göre mukayesesi

Şekil 5.35’de 4 sıralı yoğuşturucularda sıraların hem boru şaşırtmalı hem de boru sıralı dizilimine göre elde ısı-akış performans faktör değerleri tellerin şaşırtmalı ve tandem dizilimine oranlanarak incelenmiştir. Şekil 5.35a) artan tel çaplarına, 5.35b) artan boru çaplarına, 5.35c) artan tel aralıklarına ve 5.35d) ise artan boru aralıklarına bağlı değişimi göstermektedir. Tüm grafiklerde görüldüğü üzere hem boru sıralı hem de boru şaşırtmalı dizilim şartlarında tellerin şaşırtmalı diziliminin ısı-akış performans ölçütüne göre daha iyi sonuçlar verdiği anlaşılmaktadır. Aynı zamanda ısı-akış performans ölçütünde tellerin şaşırtmalı dizilimiyle boru sıralı durumdaki iyileşmenin boru şaşırtmalı dizilime nazaran daha fazla iyileşme gözlenmiştir.

Şekil 5.35a)’ya göre artan tel çaplarında $JF_{S_s=0,25}/JF_{S_s=0}$ oranının arttığı görülmektedir. Bu duruma göre tellerin şaşırtmalı dizilimiyle oluşan ısı geçişindeki iyileşmenin basınç düşümündeki değişime nazaran daha iyi olduğu anlaşılmaktadır. Artan tel çaplarında boru sıralı dizilimdeki değişim boru

şasırtmalı dizilime nazaran daha az olmaktadır. Tel çapı 1,2 mm'den 2,00 mm'ye çıkarıldığında boru sıralı dizilimde %2,5-3 civarında iyileşme gözlenirken, boru şasırtmalı dizilimdeki iyileşme %5-6 aralığında olmaktadır.

Şekil 5.35b)'de artan boru çaplarının $JF_{Ss=0,25}/JF_{Ss=0}$ oranını hem boru sıralı hem de boru şasırtmalı dizilimde azalttığı görülmektedir. Her iki tasarıma göre de D_t/D_w oranı 3 değerinden 5,14 değerine çıktığında yaklaşık %5-6 civarında bir azalma görülmektedir. Artan boru çapları dolayısıyla tandem dizilimde h_w değerinin arttığı, h_t değerinin ise azaldığı görülmüştür. Böylelikle eşdeğer taşınım katsayısı tandem dizilimde çok değişmemektedir. Bu durum tellerin şasırtmalı dizilimine bağlı ısı geçişinin artan tel çaplarıyla basınç düşümüne kıyasla daha az değişmesinden kaynaklanır. Çünkü analizin yapıldığı 2 m/s değerinde hızın tandem dizilimdeki f katsayısı üzerindeki değişiminin artan boru çaplarından bağımsız olarak birbirine oldukça yakın olduğu görülmüştür.

Şeki 5.35c)'de artan S_w değerlerinin $JF_{Ss=0,25}/JF_{Ss=0}$ oranı üzerinde geniş bir aralıkta sabit tuttuğu anlaşılmaktadır. Sıraların hem boru şasırtmalı hem de boru sıralı dizilimi artan S_w/D_w oranlarında benzer bir eğilim göstermektedir. Her iki duruma ilişkin $JF_{Ss=0,25}/JF_{Ss=0}$ oranları arasındaki fark %2 civarındadır.

Şekil 5.35d)'de S_t/D_t değerinin 4 ve üzeri olması durumunda $JF_{Ss=0,25}/JF_{Ss=0}$ oranının yüksek olduğu görülmektedir. S_t/D_t oranı bu değer altına düştükçe tandem dizilimde arka tel üzeri taşınım katsayısı ön tele yaklaştığından eşdeğer taşınım katsayısı iyileşmektedir. Böylece tellerin şasırtmalı ve tandem dizilimlerinden elde edilen ısı geçiş hızları birbirine yakın sonuçlar vermektedir. Bu durumda $JF_{Ss=0,25}/JF_{Ss=0}$ oranının azalmasının sebebini teşkil eder.

5.3 Cevap Yüzey Yöntemi ve Duyarlılık Analizi

Bilindiği üzere ısı değıştiricilerinde iyileştirme çalışmaları kapsamında ısı geçişı ile basınç düşümü etkisi birlikte incelenmektedir. İncelenme sürecinde farklı çalışma şartlarına ve geometrik özelliklere sahip ısı değıştiricilerin incelenmesi için boyutsuz veya pek çok parametreyi içeren sayılar kullanılır. Bu açıdan taşınım katsayıları ile Nu , f ve JF gibi pek çok boyutsuz sayıdan faydalandığı görölmektedir. Önceden belirtildiği üzere özellikle endüstriyel uygulamalarda zorlanmış taşınım şartlarında kullanılan yoğuşturucular sıklıkla çok sıralı olarak kullanılırlar. Parametrik ve deneysel çalışmalar kapsamında görüldüğü üzere bu tip yoğuşturucularda sıra sayısı 3 ve üzeri olduğunda taşınım katsayıları ve sürtünme faktörü üzerindeki değışim oldukça az olmaktadır. Bu kapsamda Cevap Yüzey Yöntemi ve duyarlılık analizi açısından genelleme yapabilmek için 4 sıralı yoğuşturucular gözönüne alınmıştır. Sıraların boru şaşırtmalı ve boru sıralı olması durumlarından her ikisi de göz önüne alınarak çalışmalar yapılmıştır. Çalışmanın bu kısmında ANSYS DesingXplorer aracılığıyla 4 sıra tel kanatlı yoğuşturucularda tandem ve şaşırtmalı dizilime göre V , D_w , D_b , S_w , S_b , S_L parametrelerinin h_{eq} , f ve JF üzerine etkisi incelenmiştir. Deney tasarımı olarak Ek C’de sunulan Latin Hiperküp metoda göre deney matrisi oluşturulmuştur. Girdi parametrelerinin seçili aralıkları sırasıyla $V=0,5-2,5$ m/s, $D_w=1,2-2,0$ mm, $D_b=4,2-7,2$ mm, $S_w=5-10$ mm, $S_b=15-50$ mm, $S_L=15-50$ mm olarak seçilmiştir.

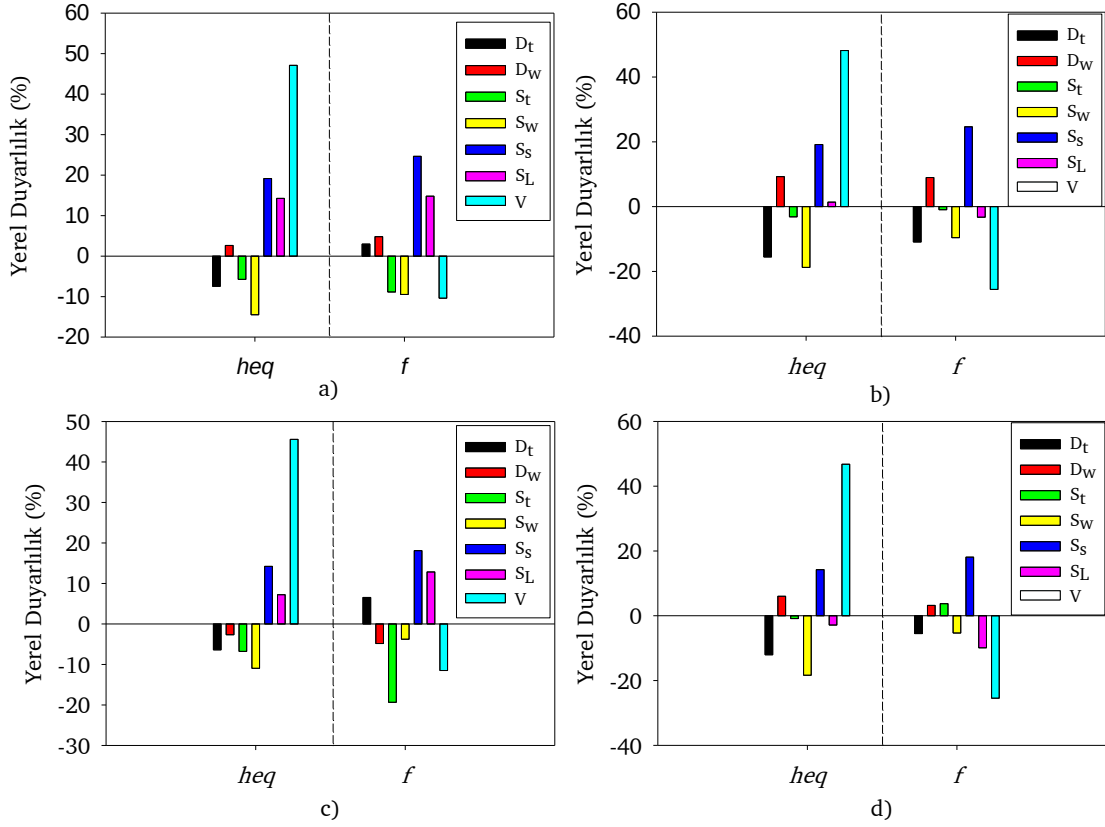
Program içerisinde belirlenen CYY Genetik Kümeleme yöntemidir. Bu bölümde duyarlılık analizi h_{eq} , f ve JF üzerinden yapılmıştır. Yöntemin uyumluluğunu ölçümleyebilmek için R^2 ve $RMSE$ değeri incelenmiştir ve sonuçlar Tablo 5.1’de gösterilmiştir. Bu değeri iki aşamada değeriendirilmektedir. Bunlardan ilki veriler işlenmesinin uyumluluğu diğeri adıyla öğrenme noktalarının uyumluluğu, diğeri ise oluşturulan metamodeller ile yapılan analizlerle deneysel sonuçlar arasındaki uyumluluktur.

Tablo 5.1 CYY ile nümerik sonuçların uyumlulukları

4S_{LT}				
		h_{eq}	f	JF
R^2	Öğrenme	1	1	1
	Çapraz-Validasyon	0,99437	0,97129	0,99228
$RMSE$	Öğrenme	0,00010932	1,8617E-08	4,7457E-10
	Çapraz-Validasyon	1,6914	0,013665	0,0013686
4S_{ST}				
		h_{eq}	f	JF
R^2	Öğrenme	0,99999	0,99841	0,99948
	Çapraz-Validasyon	0,99041	0,9436	0,98557
$RMSE$	Öğrenme	0,21581	0,0022106	0,000436
	Çapraz-Validasyon	2,0898	0,013178	0,002294

Bilindiği üzere bu tip modellerin uygunluğu açısından R^2 mümkün olduğunca 1'e yakın $RMSE$ değerinin ise 0 değerine yakın olması gerekmektedir. Tablo 5.1'de görüldüğü üzere çalışma kapsamında kullanılan Genetik kümeleme yöntemiyle elde edilen metamodelin hem boru sıralı hem de boru şaşırtmalı diziliminde h_{eq} , f ve JF tahmin etmede oldukça uygun bir yöntem olduğu belirlenmiştir.

Bu yöntem ile yapılan duyarlılık analizine göre parametrelerin h_{eq} ve f üzerindeki etkileri Şekil 5.36'da verilmiştir.



Şekil 5.36 Cevap Yüzey Yöntemi ile h_{eq} ve f üzerinden yerel duyarlılık analizleri
a) $4S_{LT}$ ve $S_s=0$, b) $4S_{LT}$ ve $S_s=0,25$, c) $4S_{ST}$ ve $S_s=0$, d) $4S_{ST}$ ve $S_s=0,25$

Şekil 5.36 4 sıra boru sıralı ve boru şaşırtmalı dizilimin $S_s=0$ ve $S_s=0,25$ değerlerindeki değişimini göstermektedir. Duyarlılık analizi kapsamında h_{eq} ve f üzerindeki değişimler irdelenmiştir. 7 parametre içinde eşdeğer taşınım katsayısı açısından en fazla etkinin %50'lere varan oranlarda serbest hava akım hızının olduğu anlaşılmaktadır. Şekil 5.36a) sıraların boru sıralı dizilimi, tellerin tandem dizilimi dolayısıyla parametrelerin h_{eq} ve f üzerindeki etkisi incelenmiştir. Şekilden anlaşılacağı üzere h_{eq} açısından hızdan sonra en etkili parametrenin S_s olduğu saptanmıştır. S_s değerinin artışıyla h_{eq} açısından %20'lerin üzerinde bir artış etkisi görülmektedir. Bununla birlikte S_s değerinin f üzerindeki etkisi %25'lere varmaktadır. Tel çapı değişiminin h_{eq} üzerinde en etkisiz parametre olduğu belirlenmiştir. Başka bir deyişle parametrik çalışma bölümünde de belirtildiği üzere tel çapı değişimi ısı geçişi açısından yalnızca yüzey alanı arttırmak için kullanılabilir. Sıralar arası mesafenin de hem h_{eq} hem de f üzerinde etkili bir parametre olduğu görülmektedir. S_L değerinin 15-50 mm arasında artışıyla hem h_{eq} hem de f değerleri %15 civarında artmaktadır. S_w

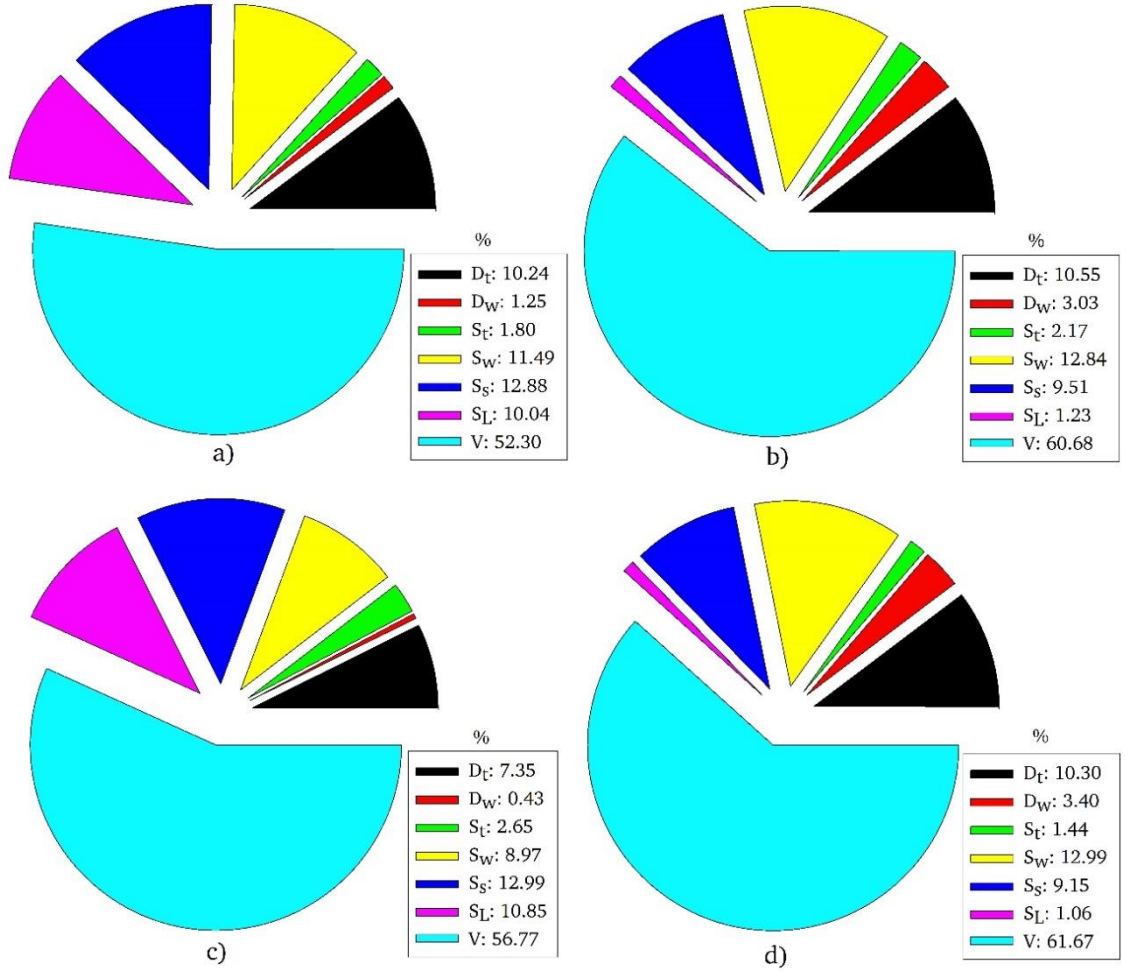
aralığının artmasıyla beklenildiği üzere hem h_{eq} hem de f azalmaktadır. İlgili aralıktaki değişime bağlı olarak h_{eq} üzerindeki değişim %15 civarındayken f üzerindeki etki %10 civarında görülmektedir. S_t değeri artışının h_{eq} ve f üzerine etkisi ise sırasıyla %6 ve %8 civarındadır. Boru çapının artışının genel olarak h_{eq} değerini %7 civarında azaltmasına karşılık f değerini %3 civarında arttırdığı gözlenmiştir.

Şekil 5.36b), sıraların boru sıralı ve tellerin şaşırtmalı dizilimine ($S_s=0,25$) göre oluşturulmuştur. Tellerin şaşırtmalı dizilimi ile sıralar arası mesafenin h_{eq} ve f açısından pek bir önemi kalmadığı gözlenmiştir. Deneysel ve parametrik çalışma sonuçları da bu durumu desteklemektedir. Aynı zamanda S_t değişimine bağlı değişimlerinde büyük ölçüde ortadan kalktığı gözlenmiştir. Teller arası mesafe etkisini nispeten aynı oranda korumuştur. Boru çapının etkisi ise yükselmiştir. h_{eq} ve f boru çapının artışıyla %15 ve %10 civarında bir azalış ortaya koymaktadır.

Şekil 5.36c) sıraların boru şaşırtmalı, tellerin tandem diziliminde S_t aralığının önem kazandığı görülmektedir. Özellikle f üzerinde %20'lere varan bir etki söz konusudur. S_s yine önemli bir parametre olarak karşımıza çıkmaktadır. Artan S_s değerlerinin h_{eq} ve f üzerine etkisi sırasıyla %15 ve %18 civarında görülmektedir. Sıraların boru şaşırtmalı dizilimde S_s değerinin artmasının boru sıralı dizilime nazaran h_{eq} ve f üzerine etkisinin daha az olduğu görülmektedir. S_L mesafesi özellikle f açısından %12 civarında bir etkiye sahipken h_{eq} açısından bu değişimin %7 civarındadır.

Şekil 5.36d) hem boru hem de tellerin şaşırtmalı dizilimi ile D_w , S_t ve S_L 'nin h_{eq} üzerine etkisi büyük oranda yok olmuştur. S_L 'nin etkisi h_{eq} üzerinde oldukça az iken f açısından %7-8'lere varan bir etki ortaya koymaktadır.

Genel olarak tellerin tandem diziliminde S_L değerinin artışıyla hem h_{eq} hem de f artmaktadır. Buna karşın tellerin şaşırtmalı diziliminde S_L 'nin artışıyla h_{eq} ve f üzerinde azalma görülmektedir.

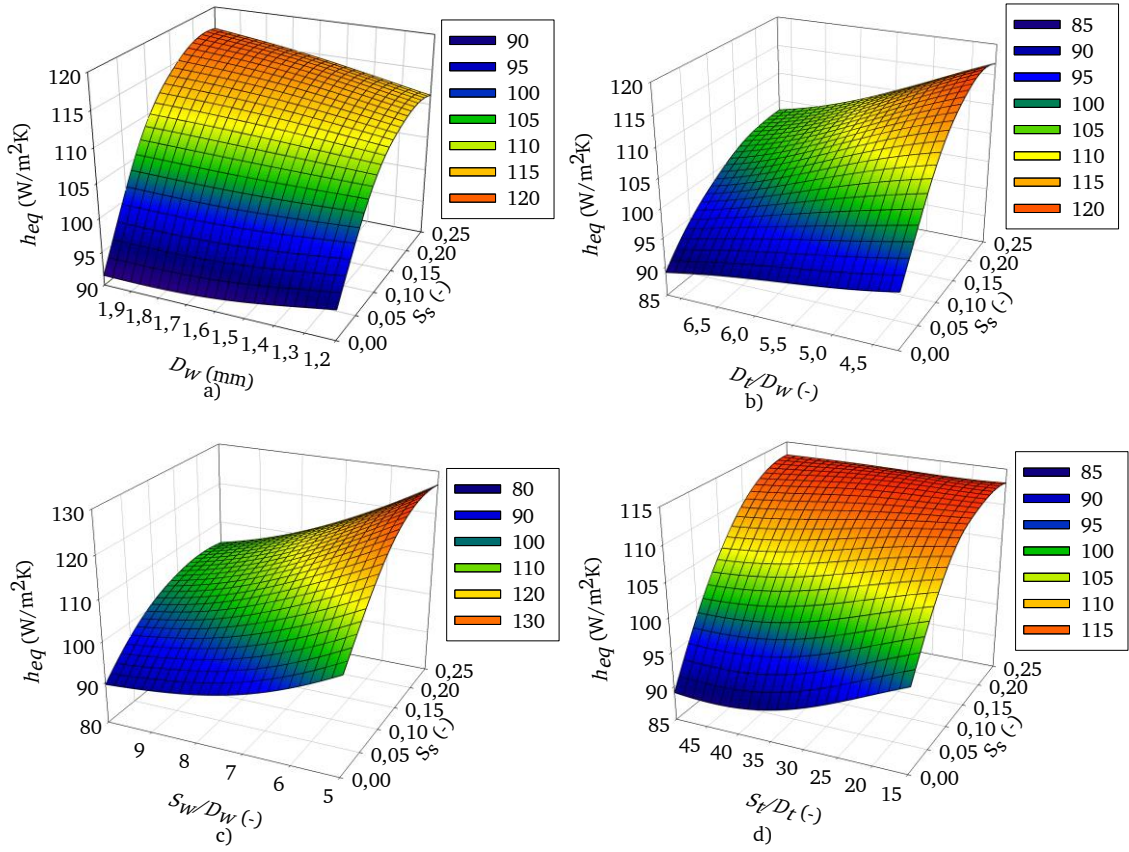


Şekil 5.37 Cevap Yüzey Yöntemi ile JF üzerinden yerel duyarlılık analizleri a) $4S_{LT}$ ve $S_s=0$, b) $4S_{LT}$ ve $S_s=0,25$, c) $4S_{ST}$ ve $S_s=0$, d) $4S_{ST}$ ve $S_s=0,25$

Şekil 5.37 4 sıra boru sıralı ve boru şaşırtmalı dizilimin $S_s=0$ ve $S_s=0,25$ değerlerinde serbest akım hızı ve geometrik özelliklerin JF üzerine etkisini göstermektedir. Genel olarak JF üzerine en etkili parametrenin serbest hava akım hızı olduğu anlaşılmaktadır. Tellerin şaşırtmalı dizilimiyle serbest hava akım hızının JF üzerindeki etkisinin arttığı saptanmıştır. Genel olarak tüm şartlarda D_t değişimin %10'a varan bir etki ortaya koyduğu anlaşılmıştır. Bununla birlikte S_t ve D_w değişiminin JF üzerindeki etkisi oldukça az olmaktadır. S_L tellerin tandem diziliminde etkili bir parametredir. Ancak bu etki tellerin şaşırtmalı dizilimiyle ortadan kalkmaktadır. Tellerin şaşırtmalı dizilimi dolayısıyla sıraların hem boru şaşırtmalı hem de boru sıralı diziliminde geometrik özelliklerden D_t ve S_w değerlerinin etkili olduğu görülmektedir. Diğer geometrik parametrelerin etkisi %5'in altındadır. Tellerin tandem dizilimiyle bu

geometrik özelliklerin etkisinin yanı sıra S_L 'de önemli bir parametre olarak karşımıza çıkmaktadır.

Yerel duyarlılık analizi girdi parametrelerinin çıktılar üzerine etkilerinin değişimi vermesi açısından önemli araçlardır. Ancak yukarıdaki grafikler çıktı üzerindeki değişimde girdi parametrelerinin hangi aralıkta önemli değişikliğine neden olduğunu göstermemektedir. Bu açıdan CYY ile elde edilen metamodel üzerinden pek çok parametrenin değer aralığının değişiminin çıktı üzerine etkisini birlikte incelemekte fayda vardır. Tez çalışması kapsamında özellikle boru şaşırtmalı dizilimin ısı geçişini iyileştirmede büyük bir avantaj olduğu görülmüştür. Bu açıdan bu geometrik özelliğin değişimi sabit tutulmuştur. Böylece tel kanatlı yoğunlaştırucularda D_p , D_w , S_t ve S_w gibi temel geometrik özellikler değerlerinin değişimi ile S_s değerlerinin değişiminin h_{eq} üzerine etkisi Şekil 5.38'da incelenmiştir. Çok sıra uygulamalarında genel olarak boru şaşırtmalı dizilimin sıralı dizilimle benzer şekilde değişmesi ve kısmen daha iyi sonuçlar vermesi dolayısıyla aşağıdaki grafikler boru şaşırtmalı dizilim göz önüne alınarak oluşturulmuştur.



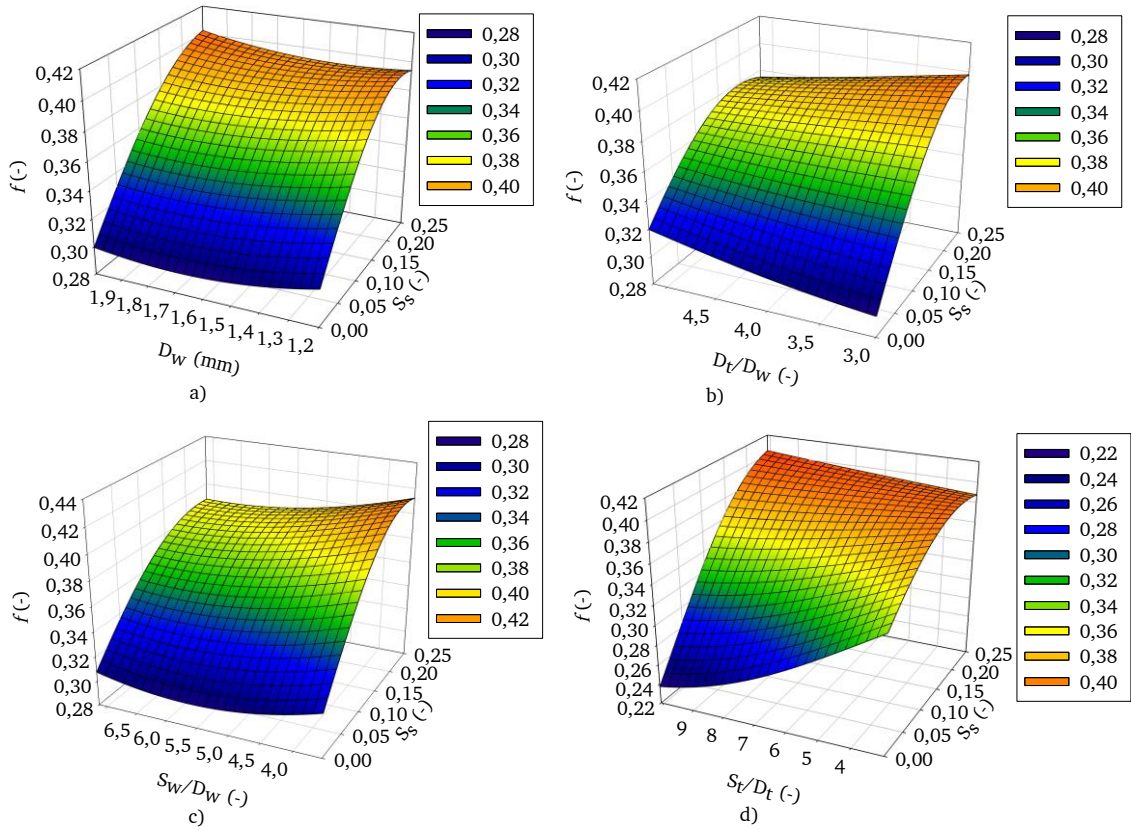
Şekil 5.38 Cevap Yüzey Yöntemi ile elde edilen h_{eq} değişimleri a) D_w - S_s , b) D_t/D_w - S_s , c) S_w/D_w - S_s , d) S_t/D_t - S_s

İlgili geometrik özellikler uygun şekilde boyutsuzlaştırılarak grafik üzerinde daha fazla parametrenin etkisi belirlenmiştir. Bu kapsamda ilk olarak Şekil 5.38a)'da tel çapı ve şaşırtma oranı değerinin birlikte değişiminin h_{eq} üzerine etkisi görülmektedir. Genel olarak duyarlılık analizinde de görüldüğü üzere tel çapı değişiminin h_{eq} üzerindeki etkisi oldukça azdır. Buna karşın parametrik çalışmalar kapsamında da görüldüğü üzere S_s değerinin artışıyla taşınım katsayısı iyileşmektedir. $S_s=0,125$ ve sonrasındaki artışın eşdeğer taşınım katsayısına etkisi nispeten az olmaktadır.

Şekil 5.38b)'de ise D_t/D_w oranıyla S_s değerinin birlikte değişimi gözönüne alınmıştır. Şekilden anlaşılacağı üzere D_t/D_w oranının azalması tandem dizilim şartlarında %5'e yakın bir iyileştirme sunmaktadır. Buna karşın D_t/D_w ile S_s değerlerinin birlikte artışı ile ısı geçişindeki iyileşme önemli ölçüde artmaktadır. Benzer sonuçlar Şekil 5.38c)'de verilen S_w/D_w ile S_s değerinin birbiriyle artışı dolayısıyla da görülmektedir. Şekil 5.38d)'den anlaşılacağı üzere S_t/D_t oranı

tandem dizilimde önemli bir parametre iken $S_s=0,125$ ve sonrası taşınım katsayısına etkisi ortadan kalmaktadır.

h_{eq} üzerinden yapılan çalışmaya benzer bir çalışma da f katsayısı içinde yapılmış ve Şekil 5.39'de sunulmuştur.



Şekil 5.39 Cevap Yüzey Yöntemi ile elde edilen f değişimleri a) D_w - S_s , b) D_t/D_w - S_s , c) S_w/D_w - S_s , d) S_t/D_t - S_s

Şekil 5.39a)'da görüldüğü üzere tel çapı değişiminin h_{eq} üzerinde olduğu gibi f üzerinde de etkili olmadığı görülmektedir. f üzerindeki S_s değerinin oldukça etkili olduğu anlaşılmaktadır. Şekil 5.39b)'de görüldüğü üzere boru çapının artışıyla f sürtünme katsayısı tellerin tandem dizilim şartlarında artarken, şaşırtmalı dizilim şartlarında ise azalmaktadır. Bu değişimin dönüm noktası $S_s=0,125$ civarında olduğu görülmektedir. S_w/D_w değerinin değişiminin f üzerine etkisinin nispeten az olduğu görülmektedir. S_t/D_t değerinin azalmasının tandem dizilim şartlarında oldukça önemli bir parametre olduğu CYY yaklaşımıyla da anlaşılmaktadır. Buna karşın hem parametrik çalışma hem de duyarlılık analizi kapsamında görüldüğü üzere tellerin şaşırtmalı diziliminde S_t/D_t değerinin değişiminin f üzerine etkisi yok denecek kadar azalmıştır.

Genel olarak artan S_L ve S_s değerleriyle çok sıralı yoğuşturucularda her bir sıranın tek sıra yoğuşturucu karakteristiği gösterdiği anlaşılmaktadır. Bu kapsamda tek sıra yoğuşturucular üzerinden Box-Behnken deney tasarımı alt yapısıyla 2. Dereceden Polinomal CYY ile de incelemiştir. İlgili CYY yaklaşımıyla Nu_w , Nu_p , Nu_{eq} ve f için elde edilen ikinci dereceden polinomal çoklu regresyon modeli önerilmiştir. Önerilen model tüm parametreleri içerisinde bulundurduğundan ısı geçişi, basınç düşümü hesaplamaları için kullanılmasının yanı sıra optimizasyon çalışmalarında da önemli bir altyapı oluşturabilir. CYY ile verilerden elde edilen çoklu regresyon modeline ait katsayılar Tablo 5.2'de Nu_{eq} için sunulmuştur. Nu_w , Nu_t ve f ise Ek C'de sırasıyla Tablo C.6, Tablo C.7 ve Tablo C.8'de sunulmuştur.

Tablo 5.2 Nu_{eq} için 2. dereceden polinomal çoklu regresyon modeline ait katsayılar

Term	Coef	SECoef	T	P
Constant	9,55949	0,12026	79,491	0
S_s	0,62204	0,06013	10,345	0
D_t	1,51772	0,06013	25,241	0
D_w	0,32336	0,06013	5,378	0
S_t	-1,86587	0,06013	-31,031	0
S_w	-0,05255	0,06013	-0,874	0,39
V	3,25588	0,06013	54,148	0
$S_s * S_s$	-0,54822	0,09185	-5,969	0
$D_t * D_t$	0,10049	0,09185	1,094	0,284
$D_w * D_w$	0,1805	0,09185	1,965	0,06
$S_t * S_t$	0,68422	0,09185	7,449	0
$S_w * S_w$	0,1709	0,09185	1,861	0,074
$V * V$	-0,54798	0,09185	-5,966	0
$S_s * D_t$	-0,13606	0,10415	-1,306	0,203
$S_s * D_w$	0,13339	0,10415	1,281	0,212
$S_s * S_t$	0,09115	0,07364	1,238	0,227
$S_s * S_w$	-0,14726	0,10415	-1,414	0,169
$S_s * V$	0,05727	0,10415	0,55	0,587
$D_t * D_w$	-0,2128	0,10415	-2,043	0,051
$D_t * S_t$	-0,82089	0,10415	-7,882	0
$D_t * S_w$	0,09351	0,07364	1,27	0,215
$D_t * V$	0,39031	0,10415	3,748	0,001
$D_w * S_t$	0,25482	0,10415	2,447	0,021
$D_w * S_w$	-0,31178	0,10415	-2,994	0,006
$D_w * V$	0,2393	0,07364	3,249	0,003
$S_t * S_w$	-0,08493	0,10415	-0,816	0,422
$S_t * V$	-0,80596	0,10415	-7,739	0
$S_w * V$	-0,0273	0,10415	-0,262	0,795
S = 0,294573 PRESS = 11,787				
$R^2 = 99,48\%$ $R^2_{pred} = 97,28\%$ $R^2_{adj} = 98,94\%$				

İlgili regresyon modelleri P testi kapsamında incelenmiştir. P testinde risk seviyesi %5'in altında tutulmuştur. Başka bir deyişle P değerinin 0,05'in altında olduğu tüm parametre ve parametre etkileşimlerinin model üzerinde etkisinin yüksek olduğu anlaşılmaktadır. Bu sonuçlar uyarınca genel olarak tüm parametrelerin ilgili regresyon modeli içerisinde önemli olduğu anlaşılmaktadır. Nu_{eq} , Nu_w , Nu_t ve f için oluşturulan çoklu regresyon modelinde değerlendirme katsayılarının (R^2) değerinin %99'un üzerinde olduğu belirlenmiştir.

5.4 Optimizasyon

Uygulamada üretici firmaların tasarımı müdahale edebileceği temel geometrik parametreler sırasıyla S_w , S_t , S_s ve S_L olarak karşımıza çıkmaktadır. Ağırlıklı olarak uygulamada kullanılan tel ve boru çapı sabittir. Tel kanatlı yoğunlaştırucularda en sık kullanılan tel ve boru çapı sırasıyla 1,2 mm ve 4,75 mmdir. Her iki çapta da boya uygulaması ile 0,2 mmlik bir artış görülmektedir. Optimizasyon çalışmaları kapsamında özellikle tasarımı değiştirilebilir geometrik özelliklerin ısı geçişi ve basınç düşümünün iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla tel çapı ve boru çapı sabit 1,4 ve 4,95 mm olarak alınmıştır. Optimizasyon çalışmaları kapsamında serbest akım hava hızı değeri de 2 m/s alınmıştır. Optimizasyon çalışmaları Genetik Algoritma BSGA-II yöntemine göre yapılmıştır.

Optimizasyon kapsamındaki geometrik özelliklerin aralıkları ve amaç fonksiyonları aşağıdaki gibidir.

$$\begin{aligned} 4 \text{ mm} &\leq S_w \leq 10 \text{ mm} \\ 15 \text{ mm} &\leq S_t \leq 50 \text{ mm} \\ 15 \text{ mm} &\leq S_L \leq 50 \text{ mm} \\ 0 &\leq S_s \leq 0,25 \\ &\text{olmak üzere} \end{aligned}$$

Maksimize J

Minimize f

Maksimize JF

Program aracılığıyla ilgili özelliklerini uygulanabilir değerleri tanımlanabilmektedir. Bu kapsamda S_w için aralıkların artış oranı 0,5 mm, S_t ve S_L için ise 1,0 mm olarak belirlenmiştir. S_s değeri ise 0 ile 0,25 olacak şekilde seçilmiştir. İlgili geometrik aralıklar gözönüne alınarak deney tasarımları $4S_{LT}$ için Latin Hiper Küp, $4S_{ST}$ için Box-Behnken yöntemlerince oluşturulmuş ve sonuçlar Ek C'de verilmiştir.

4 sıra hem boru şaşırtmalı hem de boru sıralı dizilim üzerinden optimizasyon çalışmaları yapılmıştır. Optimizasyon işlemi Genetik Kümeleme CYY ile elde edilen metamodel uyarınca yapılmıştır. Program optimizasyon çıktısı olarak üç adet optimum nokta vermektedir. Doğrulama çalışmaları kapsamında ilgili

noktalar üzerinden tekrar analizler yapılmıştır. Hem önerilen noktalar hem de ilgili noktalar için HAD ile yapılan doğrulama çalışmalarının sonuçları Tablo 5.6'da verilmiştir. Tablo 5.6a) dört sıra boru sıralı dizilim için ilgili sonuçları gösterirken, Tablo 5.6b) ise boru şaşırtmalı durumuna ait sonuçları sunmaktadır. j , f ve JF değerleri için HAD analizleri ile Genetik Kümeleme CYY arasındaki R^2 ilişkisi sırasıyla 0,99, 0,975, 0,992 olarak değişmektedir. Bu açıdan ilgili CYY ile yapılacak optimizasyon işleminin oldukça hassas bir sonuç verebileceği söylenebilir.

Tablo 5.3 Önerilen optimizasyon noktaları ile HAD analizi ile elde edilen sonuçlar a)4S_{LT}, a)4S_{ST}

	Optimum Nokta 1		Optimum Nokta 2		Optimum Nokta 3	
S_t	15		15		15	
S_w	4		4		4	
S_s	0,25		0,25		0,25	
S_L	31		36		46	
	Opt.	HAD	Opt.	HAD	Opt.	HAD
						
j	0,0450	0,0448	0,0444	0,0448	0,0451	0,0449
						
f	0,4146	0,4026	0,4083	0,4000	0,4184	0,3979
						
JF	0,0597	0,0607	0,0597	0,0608	0,0598	0,0610

a)

	Optimum Nokta 1		Optimum Nokta 2		Optimum Nokta 3	
S_t	15		15		15	
S_w	4		4		4	
S_s	0,25		0,25		0,25	
S_L	15		20		31	
	Opt.	HAD	Opt.	HAD	Opt.	HAD
						
j	0,0461	0,0468	0,0459	0,0455	0,0454	0,0452
						
f	0,4308	0,4210	0,4289	0,4053	0,4228	0,4003
						
JF	0,0607	0,0624	0,0605	0,0615	0,0603	0,0613

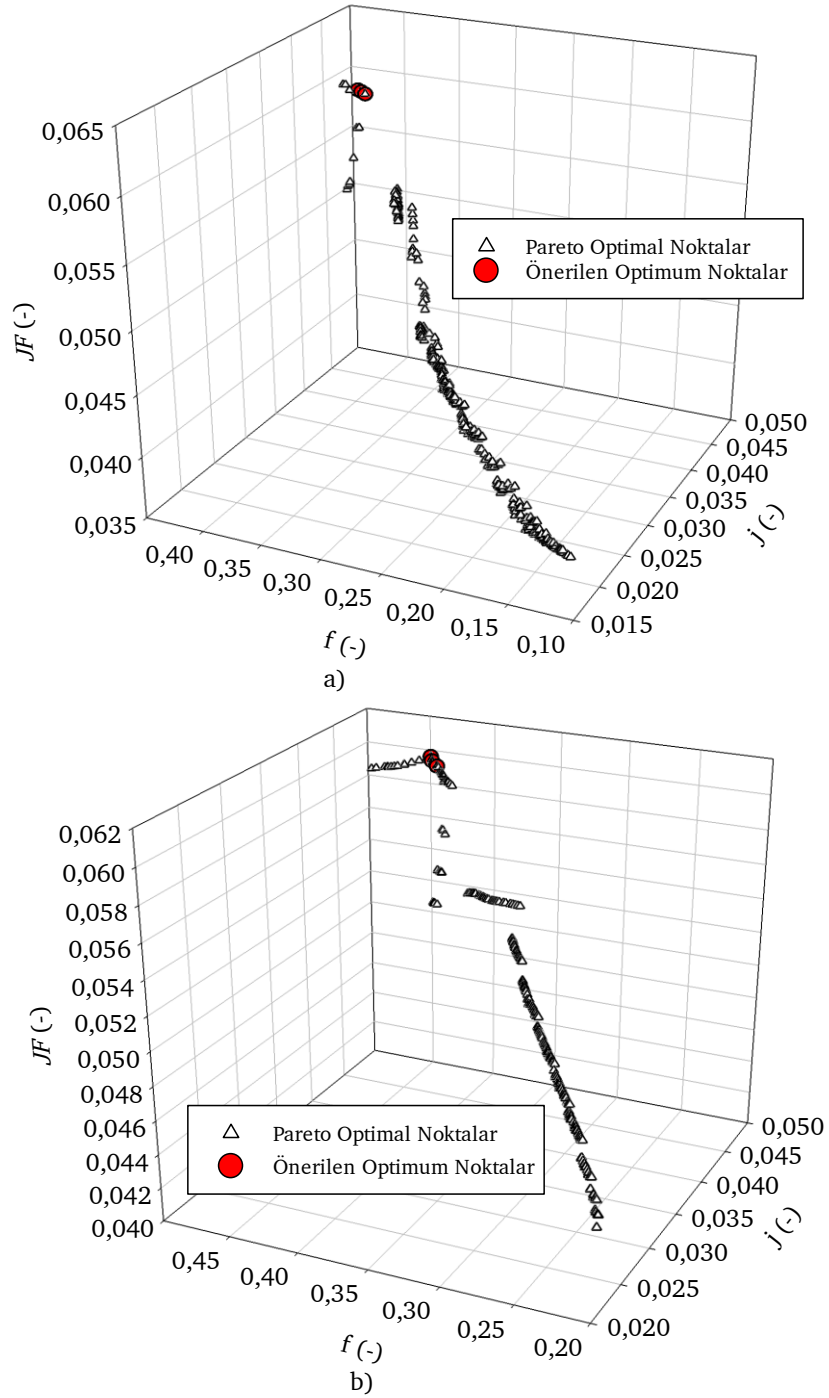
b)

Ansys DesingXplorer aracılığıyla yapılan optimizasyon işlemlerinde önerilen aday noktalar ile Pareto cephesi üzerinde noktalar arasındaki uyumluluklar amaç fonksiyonu beklentisine göre üç seviye yıldız ve üç seviye (X) değerlerine göre

değerlendirilir. Bu ifadeye göre amaç fonksiyonuna en iyi şekilde ulaşılan değerler üç yıldız ile ifade edilirken, amaç fonksiyonuna ulaşamayan sonuçlar ise üç (X) ile ifade edilmektedir. Tablolardan anlaşılacağı üzere metamodel sonuçları ile HAD analizi sonuçları birbirine oldukça yakındır. Aynı zamanda hem tel hem de borunun akışa dik konumlandırıldığı zorlanmış taşınım şartlarında optimum sonuçlara ulaşabilmek için hem S_t hem de S_w değerlerinin en küçük değerinde olması gerektiği anlaşılmaktadır. Buna karşın S_s değerinin 0,25 olması gerektiği belirlenmiştir. İlgili aralıklarda *Colburn j* faktörünün maksimum değere ulaşması beklenen bir sonuçtur. Optimizasyon işlemi sonucunda önerilen geomerik özelliklerde basınç düşümünün artışı da oldukça artmaktadır. Ancak *JF* faktörünün ilgili geometrik şartlarda maksimum değere ulaştığı anlaşılmaktadır. Bu durumda çapraz akışa maruz yoğunlaştırucularda ilgili geometrik aralıklar için ısı geçişindeki iyileşmenin basınç düşümündeki artışa nazaran daha iyi olduğu sonucuna varılmıştır. Hem $4S_{LT}$ hem de $4S_{ST}$ için S_L değerinin optimum şartlar açısından geniş bir aralıkta kullanılabileceği görülmektedir. Bunun temel sebebi parametrik çalışma ve duyarlılık analizinde görüldüğü üzere $S_s=0,25$ olduğunda aslında S_L değişiminin ısı geçişi ve basınç düşümü açısından büyük ölçüde etkisiz kalmasıdır.

İlgili Tablolardan görüldüğü üzere önerilen üç optimum noktadan elde edilen sonuçlar birbiriyle neredeyse eşittir. Aynı zamanda ilgili aralıklarda hem sıraların boru şaşırtmalı hem de boru sıralı diziliminde yoğunlaştırucuların ısı-akış performans ölçütlerinin birbirine oldukça yakın olduğu anlaşılmıştır. Başka bir ifadeyle ilgili aralıklarda sıraların boru şaşırtmalı veya boru sıralı dizilimli oluşturulmasının ısı geçişi ve basınç düşümü açısından bir fark oluşturmamaktadır.

Her iki duruma ilişkin pareto optimal cephe ve önerilen noktalar Şekil 5.40'da verilmiştir.



Şekil 5.40 Önerilen optimizasyon noktaları ile had analizi ile elde edilen sonuçlar a) 4S_{LT}, b) 4S_{ST}

Şekil 5.40a) 4 sıra boru sıralı dizilimli yoğunlaştırucularda oluşan pareto optimal cepheyi sunarken, Şekil 5.40b) 4 sıra boru şaşırtmalı dizilimli yoğunlaştıruculardaki optimum noktaları vermektedir. Her iki yaklaşımla önerilen optimizasyon noktalarına bağlı ısıl-akış performans faktör değerlerinin birbirine oldukça yakın olduğu anlaşılmaktadır.

5.5 Korelasyon

Duyarlılık analizi bölümünde önerilen regresyon modeli tüm parametreleri içerdiğinden ve değerlendirme katsayıları 1'e çok yakın olduğundan optimizasyon işlemlerinde faydalı olabilir. Ancak parametre sayısının çokluğu ve ilgili parametrelerin birbiriyle etkisini de içeren oldukça uzun bir eşitlik ortaya koymaktadır. Isı geçişi ve basınç düşümü hesaplamalarında literatürde de görüldüğü üzere çıktı üzerine özellikle etkili parametreleri gözönüne alan daha basit korelasyonlar önerilmektedir. Bu yaklaşım uyarınca korelasyon bölümünde ısı geçişi ve basınç düşümü için korelasyonlar önerilmiştir. Bu bölüm ısı geçişi ve basınç düşümü hesaplamalarına yönelik korelasyonlar olarak iki başlıkta toplanmıştır.

Hem ısı geçişi hem de basınç düşümü için önerilen korelasyonlar aşağıda gösterildiği üzere geniş bir aralıkta yapılan incelemeler sonucunda elde edilmiştir.

$$38,70 \leq Re_w \leq 322,80,$$

$$135,60 \leq Re_t \leq 1162,20,$$

$$0 \leq S_s \leq 0,25,$$

$$1,20 \text{ mm} \leq D_w \leq 2,00 \text{ mm},$$

$$2,10 \leq D_t/D_w \leq 6,0,$$

$$2,00 \leq S_w/D_w \leq 8,33,$$

$$2,00 \leq S_t/D_t \leq 11,90$$

$$3,00 \leq S_t/D_t \leq 11,90 \text{ (Çok sıra)}$$

$$2,08 \leq S_L/D_t \leq 11,90 \text{ (Çok sıra)}$$

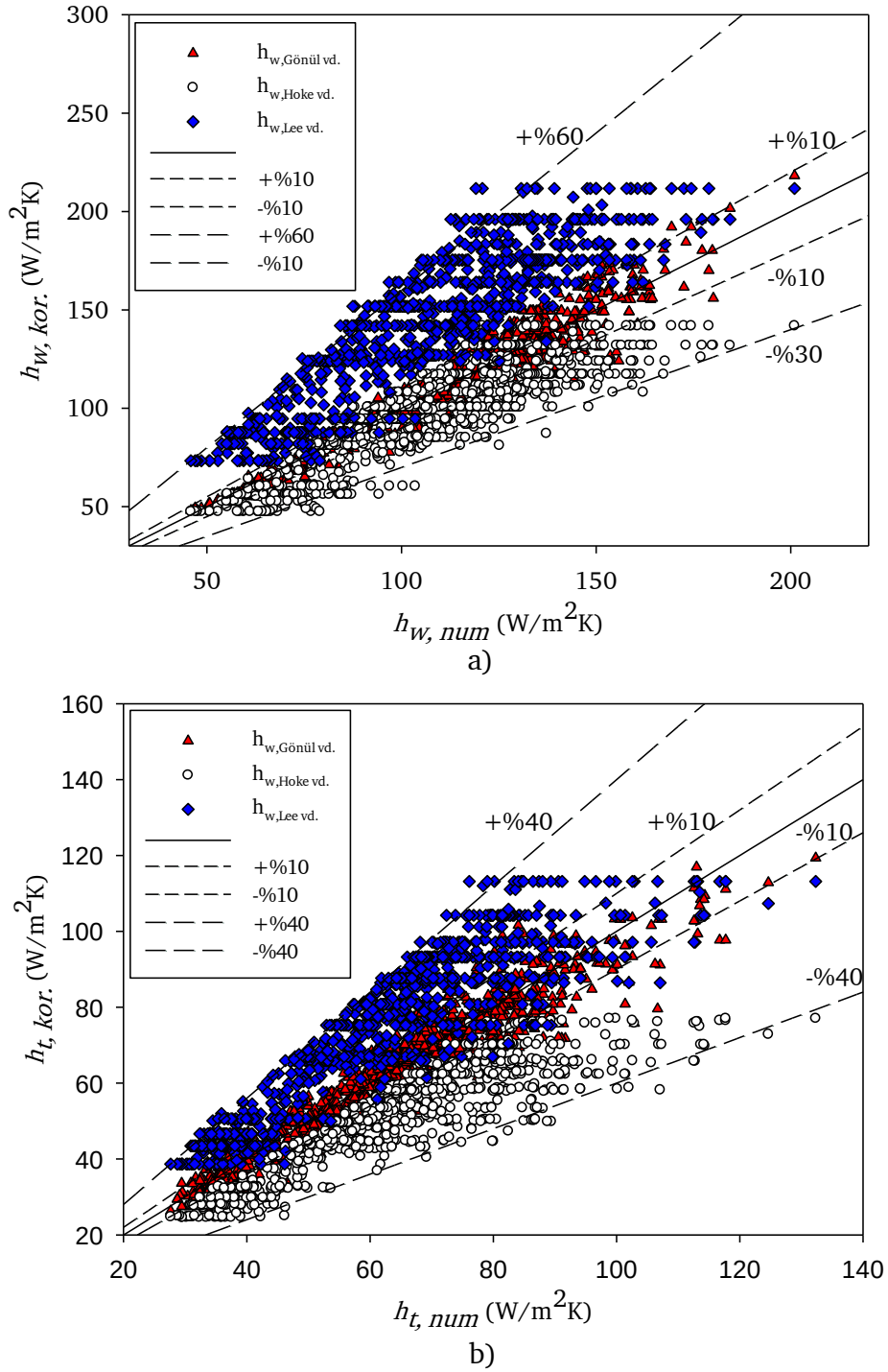
5.5.1 Zorlanmış Taşınım Isı Geçişi İçin Önerilen Korelasyonlar

Literatürde daha öncede ifade edildiği üzere hem tellerin hem de boruların akışa dik konumlandırıldığı tel kanatlı yoğuşturucuların ısı geçişi incelemesi için önerilmiş bir adet korelasyon bir adette korelasyon düzeltme faktörü bulunmaktadır [24], [25]. Hoke vd. 7 farklı Numune ile çalışmasına karşın yalnızca bir Numune akışa dik konumlandırmış ve buna bağlı olarak bir korelasyon önermiştir [24]. Benzer şekilde Lee vd. yalnızca bir boru ve tel

apında analizler yaparak düzeltme faktörü önermişlerdir [25]. İki korelasyonun birbiri arasında %80lere varan oranlarda oldukça yüksek oranda sapma olduğu ifade edilmiştir. Hem az sayıda geometrik özellik ve aralığa bağlı olması hem de birbirleri arasında oldukça sapan değerler vermesi açısından yeni korelasyonların önerilmesi uygun olacaktır. Bu kapsamda deneysel çalışmalarla HAD analizi arasındaki uyumluluk yüksek olduğundan geniş bir aralık için Fluent programı vasıtasıyla pek çok analiz yapılmıştır. HAD analizlerinde parametrik çalışmalara ek olarak farklı deney tasarımlarının önerilerine göre tek sıra üzerinden 950'nin üzerinde analiz yapılmıştır. Çok sıralı yoğuşturucular için de benzer şekilde pek çok analiz yapılmıştır. Tek sıralı yoğuşturucular üzerinden ısı geçişinde iki farklı yaklaşıma göre Nu korelasyonları önerilmiştir. İlk olarak tel ve boru üzeri taşınım katsayısını bulmak amacıyla Nu_w ve Nu_t olmak üzere iki adet korelasyon önerilmiştir.

$$Nu_t = 0,72Re_t^{0,53} \left(\frac{S_w}{D_t} \right)^{-0,32} \left(\frac{D_w}{D_t} \right)^{0,31} \quad (5.1)$$

$$Nu_w = 0,70Re_w^{0,49} \left(\frac{S_w}{D_w} \right)^{-0,25} \left(1 + S_s^{0,77} \right) \quad (5.2)$$



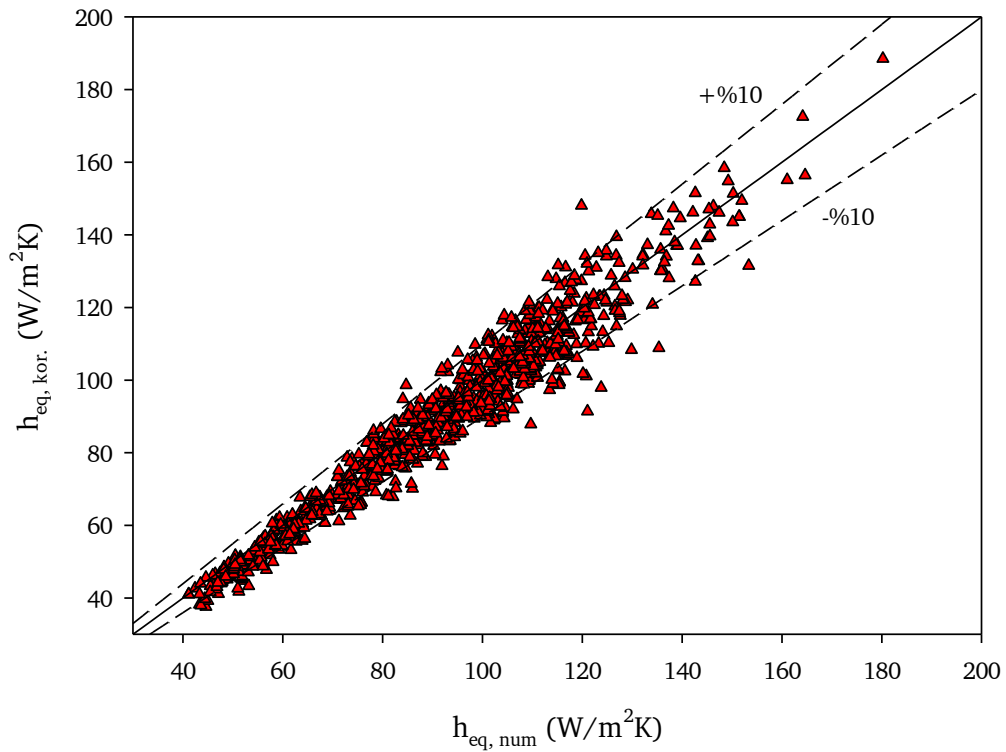
Şekil 5.41 Önerilen ve literatürde bulunan korelasyonların nümerik sonuçlar ile karşılaştırılması a) $h_{w,num} - h_{w,kor}$ b) $h_{t,num} - h_{t,kor}$

Şekil 5.41a) ve 5.41b)'de görüldüğü üzere önerilen korelasyonlar ile bulunan h_w ve h_t değerleri %10'un altında hata aralığındadır. Buna karşın Hoke vd. önerdiği korelasyon h_w değeri %30, h_t değeri %40ları aşkın hata aralığında sonuçlar vermektedir [24]. Lee vd. nin önerdiği düzeltme faktörüne göre ise hata aralıkları h_w ve h_t için sırasıyla %50 ve %40 aralığında değişmektedir [25]. Bu

sonuçlara göre önerilen korelasyonların ilgili geometrilerin çok geniş bir aralığında taşınım katsayılarını belirlemede iyi birer tahmin aracı olduğu saptanmıştır.

İkinci yaklaşımda eşdeğer taşınım katsayısı üzerinden aşağıdaki gibi yine tellerin şaşırtmalı dizilimini de dikkate alacak şekilde bir korelasyon sunulmuştur. Karakteristik uzunluk D_{eq} şeklinde belirlenmiş ve Re_{eq} sayısı bu değer uyarınca hesaplanmıştır. Çalışmada D_{eq} aralığı 1,57-5,20 mm aralığında değişmektedir. Bu değere bağlı olarak hesaplanan Re_{eq} değeri ise 52,6-780,7 aralığında değişmektedir. HAD analizinden elde edilen eşdeğer taşınım katsayıları ile korelasyon ile elde edilen taşınım katsayısı arasındaki değişim Şekil 5.42’de verilmiştir.

$$Nu_{eq} = 0,74 Re_{eq}^{0,49} \left(\frac{S_w}{D_{eq}} \right)^{-0,31} (1 + S_s^{0,97}) \quad (5.3)$$

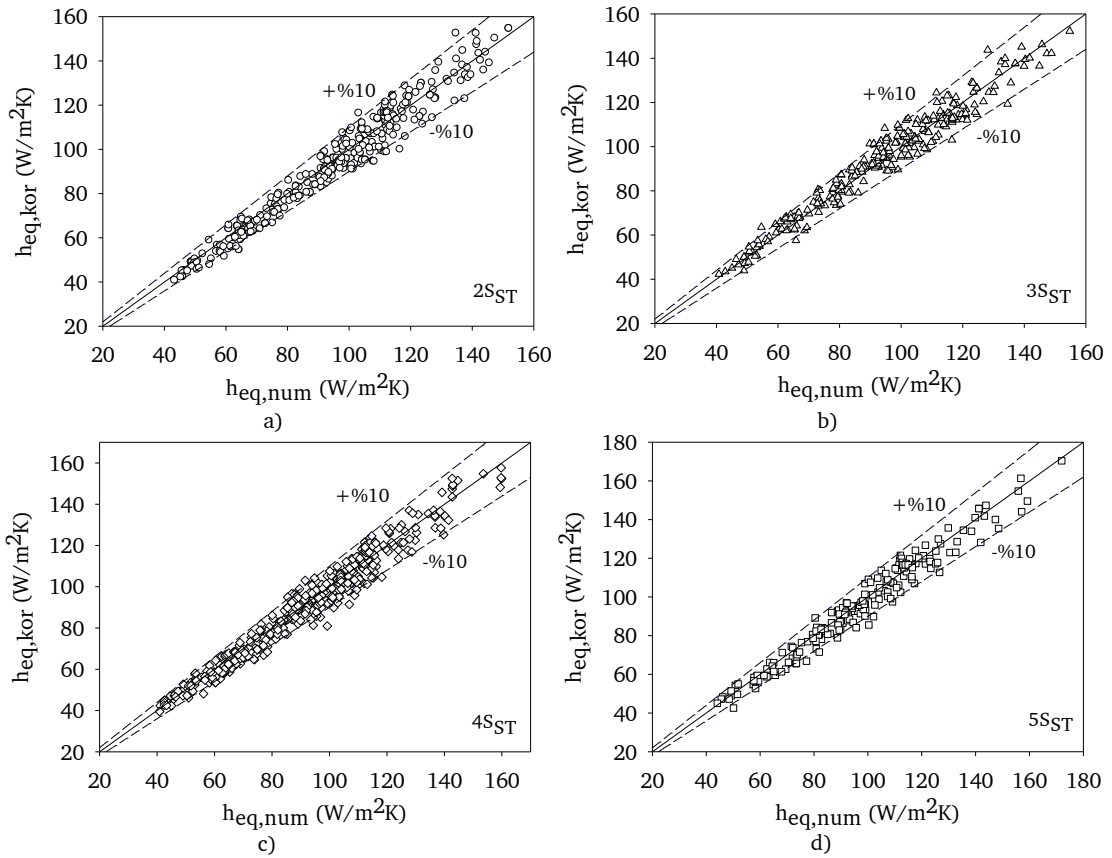


Şekil 5.42 Nümerik analiz ve korelasyonla elde edilen h_{eq} değerlerinin karşılaştırılması

Şekil 5.42’de görüleceği üzere önerilen korelasyon ile nümerik olarak hesaplanan korelasyon arasındaki oran $\pm\%10$ ’un altındadır. Bu açıdan oldukça güçlü bir korelasyon olduğu görülmektedir. Bu yaklaşımın temel avantajı h_w ve h_t

taşıyım katsayılarını h_{eq} içerisinde birleştirilmesidir. Uygulamadaki kanatlı borulu ısı değıştirici hesaplamalarında kanat ve boru üzeri taşıyım katsayısının ayrıklaştırılması genellikle mümkün olmadığından eşdeğer taşıyım katsayısı üzerinden hesaplamalar yapılmaktadır. Bu açıdan bu şekilde bir korelasyonun önerilmesiyle deneysel çalışmalarda taşıyım ile ısı geçiş hızı hesaplamalarında bilinmeyen sayısını azaltılmaktadır.

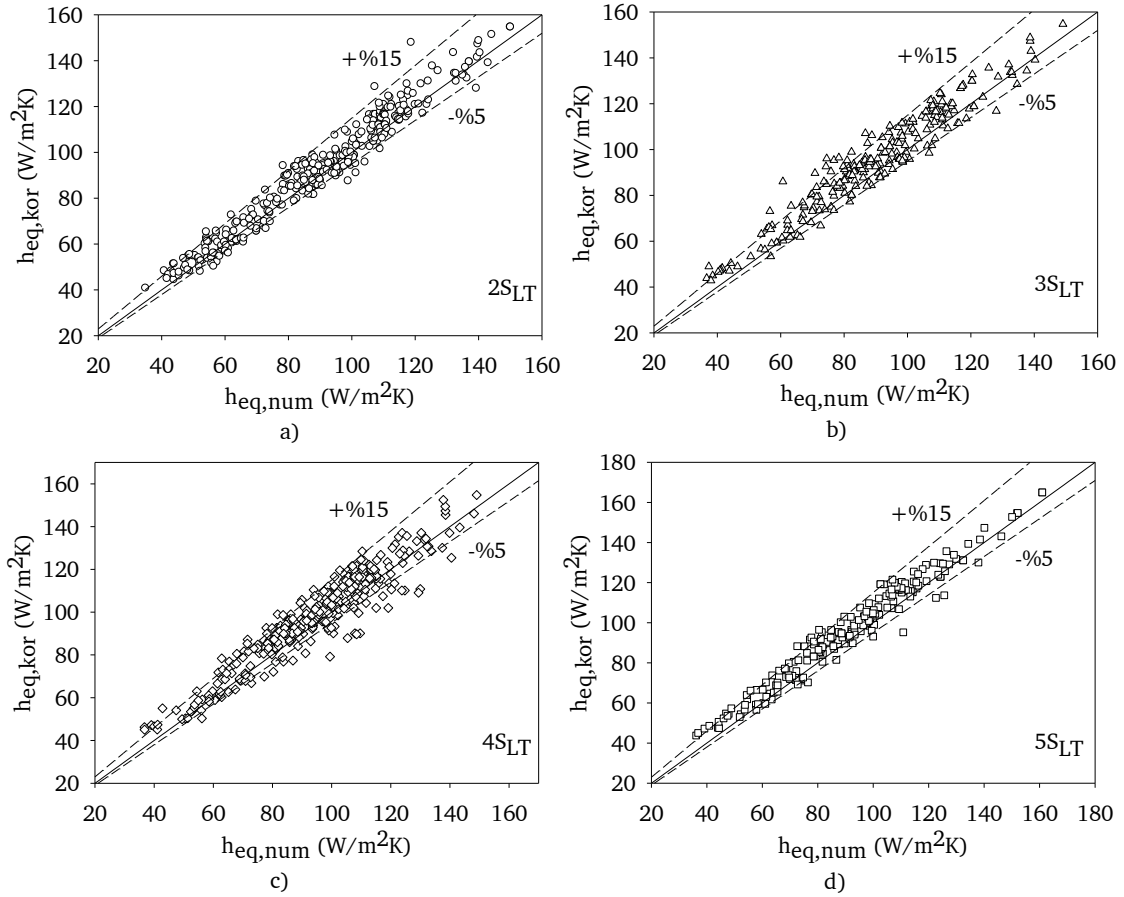
Çok sıralı yoğuşturucular için yapılan HAD analizlerinden elde edilen eşdeğer taşıyım katsayıları da ilgili korelasyon sonuçlarıyla Şekil 5.43 ve Şekil 5.44’de incelenmiştir. Tek sıra HAD analizleri ile elde edilen Nu_{eq} korelasyonu çok sıralı sıralı yoğuşturucular için yapılan HAD analizi verileriyle karşılaştırılmıştır.



Şekil 5.43 Çok sıra boru şaşırtmalı dizilimli tel kanatlı yoğuşturuculardan nümerik analiz ve korelasyonla elde edilen h_{eq} değerlerinin karşılaştırılması a) 2S_{ST}, b) 3S_{ST}, c) 4S_{ST}, d) 5S_{ST}

Şekil 5.43 2, 3, 4 ve 5 sıra boru şaşırtmalı dizilim üzerinden elde edilen sonuçlarla, korelasyonla elde edilen h_{eq} sonuçlarını karşılaştırmaktadır. Parametrik çalışmalarda da görüldüğü üzere sıralar boru şaşırtmalı şekilde dizayn edildiğinde her bir sıra büyük ölçüde tek sıralı yoğuşturucu özelliği

sergilemektedir. Bu duruma göre tek sıralı yoğuşturuculardan elde edilen veriler ile önerilen korelasyonların, çok sıralı yoğuşturucularda da geniş bir aralıkta elde edilen sonuçlarla uyumluluğu görülmektedir. Tüm sıra sayılarında korelasyon ile nümerik verilerin $\pm\%10$ 'un altında bir hata aralığında sonuçlar verdiği belirlenmiştir.

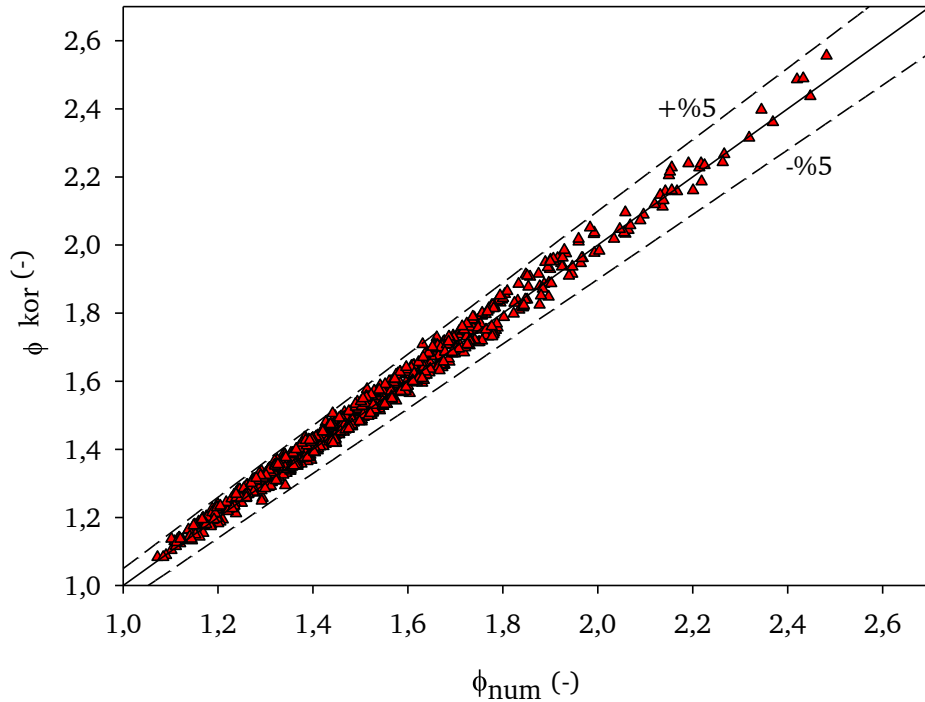


Şekil 5.44 Çok sıra boru sıralı dizimli tel kanatlı yoğuşturuculardan nümerik analiz verileri ve korelasyonla elde edilen h_{eq} değerlerinin karşılaştırılması a) 2S_{LT}, b) 3S_{LT}, c) 4S_{LT}, d) 5S_{LT}

Şekil 5.44 2, 3, 4 ve 5 sıralı yoğuşturucularda boru sıralı dizilim üzerinden elde edilen sonuçlarla korelasyonla elde edilen h_{eq} sonuçlarını karşılaştırmaktadır. Boru sıralı dizilimde sıralar arası mesafenin (S_D) ısı geçişine bir miktar etkisi olduğundan korelasyon sonuçları ile HAD analizi sonuçlarına göre hata aralığı boru şaşırtmalı diziliminle bulunan sonuçlara nazaran daha yüksek çıkmaktadır. Ancak sonuçlar büyük oranda kabul edilebilir bir aralık olan $\pm\%15$ ile $\pm\%5$ arasında değişmektedir.

Hesaplama metodolojisi kısmında belirtildiği üzere eşdeğer taşınım katsayısı ile taşınım ile ısı geçiş hızının hesabında kanat verimi üzerinde bir düzenlemeye ihtiyaç vardır. Çünkü adyabatik kanat ucu kabulüyle analitik olarak kanat hesabında tel üzeri taşınım katsayısı kullanılmaktadır. Eşdeğer taşınım katsayısı ile tel üzeri taşınım katsayısından oldukça farklı değerler verdiğinden kanat verimi değeri değişmektedir. Bu durumda sıcaklık gradyeni m sayısına bir düzeltme katsayısı uygulanmalıdır. Bu katsayı göz önüne alınırken kanat veriminde en etkili parametreler tel çapı ve borular arası mesafe olduğundan ilgili geometrik özellikleri dikkate alan bir korelasyon önerilmiştir. İlgili korelasyon tek sıra HAD analiziyle elde edilen h_w taşınım katsayılarına göre elde edilen (mL) ile h_{eq} üzerinden elde edilen $(mL\phi)$ değerlerinin eşitlenmesiyle elde edilen ϕ değerleri üzerinden önerilmiştir.

$$\phi = 0,91 Re_{eq}^{0,0034} \left(\frac{S_t}{D_{eq}} \right)^{0,03} \left(\frac{D_w}{D_{eq}} \right)^{-0,67} \quad (5.4)$$

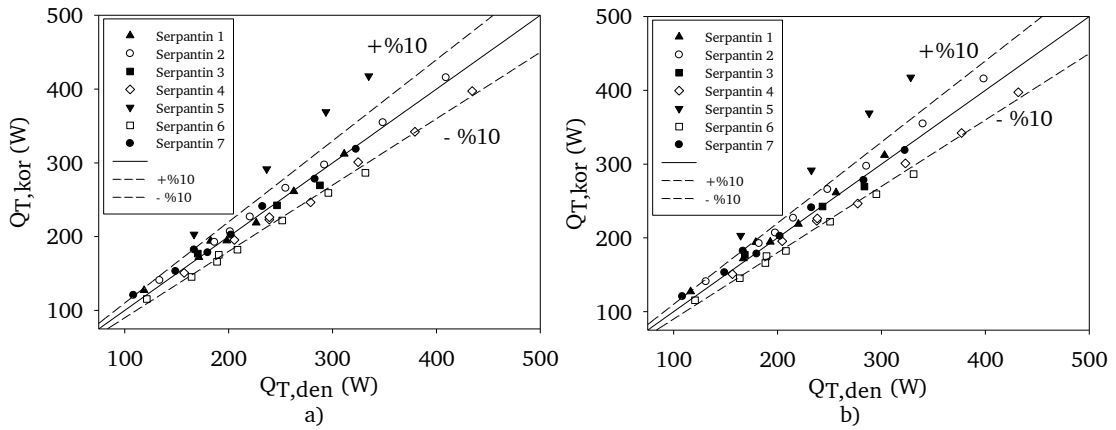


Şekil 5.45 h_{eq} değerine bağlı kanat verimi düzeltme faktörü için önerilen korelasyon ve nümerik analiz sonuçlarının uyumluluğu

İlgili korelasyonun R^2 değeri %99 civarında olup hata aralığı büyük oranda $\pm\%2$ 'in altındadır. Bu düzeltme katsayısının uyumluluğun bu kadar yüksek olması

hesaplamalarda uygulanabilirliği açısından oldukça makul bir sonuç oluşturmaktadır.

Bu bölümde ilgili korelasyon yaklaşımlarıyla ısı geçiş hızı hesaplamaları yapılacak olup elde edilen sonuçlarla hem tek hem de çok sıralı yoğunlaştıruculardan deneysel olarak elde edilen ısı geçiş hızlarıyla karşılaştırılacaktır. Önceki bölümlerde ışınlama ısı geçiş hızının toplam ısı geçiş hızı içerisinde %2-9 aralığında olduğu belirtilmiştir. Isı geçiş hızı hesaplamalarında deneysel çalışmaların belirsizliği de %11lere yakın olduğu gözlenmiştir. Bu sonuçlar uyarınca ışınlama ısı geçiş hızı deneysel belirsizlik içerisinde kaldığından ilgili korelasyonlarla elde edilen veriler toplam ısı geçiş hızlarıyla karşılaştırılarak verilmiştir. Çalışma kapsamında temas veriminin etkisinin %2-4,5 civarında olduğu ifade edilmiştir. Ancak hesaplamaları kolaylaştırmak açısından temas verimi ısı geçiş hızı hesaplamalarında kullanılmamıştır.

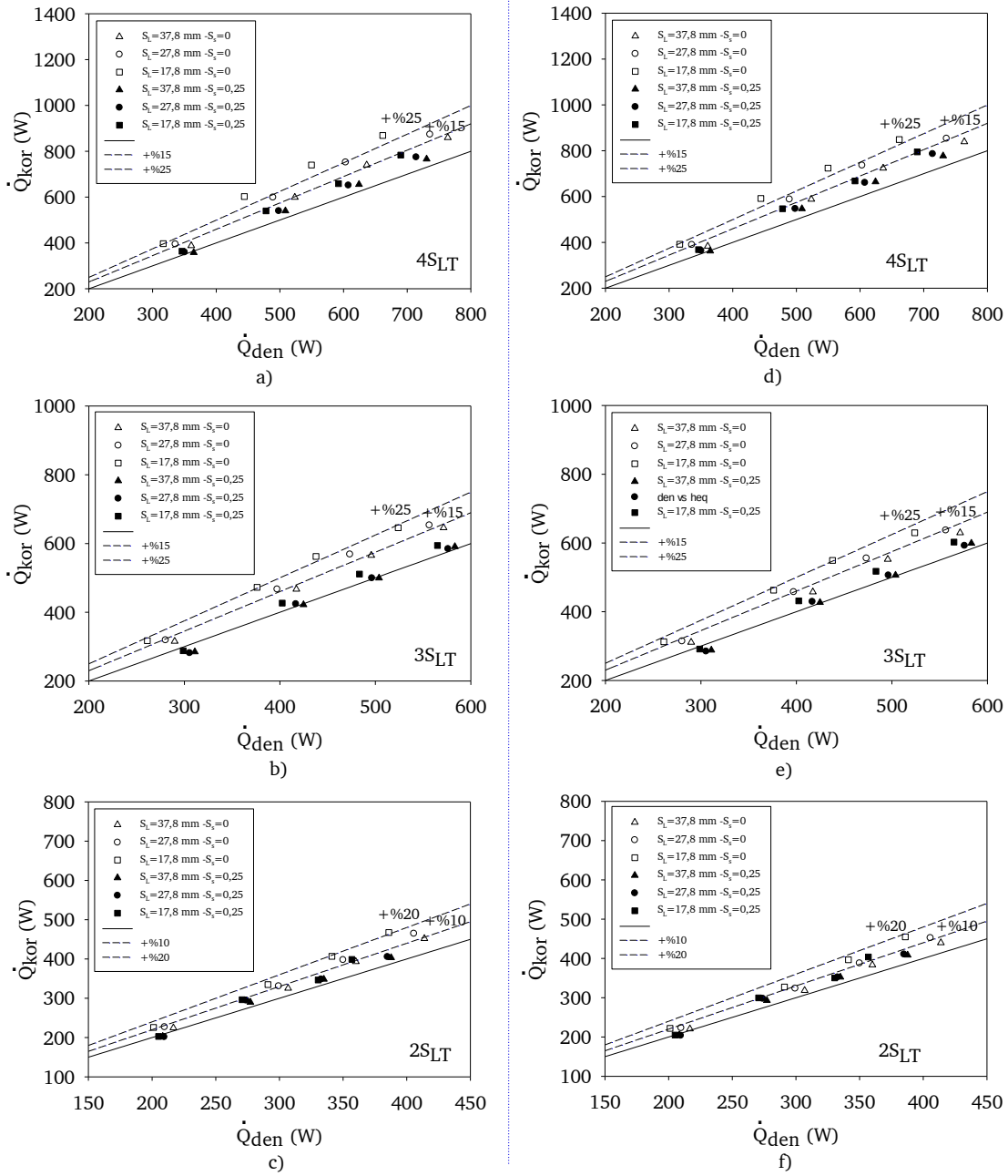


Şekil 5.46 Tek sıra yoğunlaştırucularda önerilen korelasyonlarla hesaplanan ve deneysel elde edilen ısı geçiş hızlarının karşılaştırılması a) Nu_w ve Nu_t yaklaşımına göre, b) Nu_{eq} ve ϕ yaklaşımına göre

Şekil 5.46'da tek sıra yoğunlaştırucular için her iki yaklaşımla elde edilen ısı geçiş hızları ile deneysel sonuçlar ile elde edilen ısı geçiş hızları kıyaslanmıştır. Şekil 5.46a) Nu_w ve Nu_t yaklaşımına göre hesaplanan ısı geçiş hızını, 5.46b) ise Nu_{eq} ve ϕ yaklaşımıyla elde edilen ısı geçiş hızını göstermektedir.

Her iki yaklaşımla elde edilen sonuçlar birbirine oldukça yakındır. Bununla birlikte deneysel sonuçlarla da $\pm 10\%$ 'un altında hata aralığında uyumlu

sonuçlar verdikleri gözlenmiştir. Benzer alışma çok sıralı yoğuşturuculara yapılan deneysel çalışma sonuçlarıyla da yapılmıştır.



şekil 5.47 çok sıralı yoğuşturucularda önerilen korelasyonlar ile hesaplanan ve deneysel elde edilen ısı geçiş hızlarının karşılaştırılması a) $4S_{LT}$ (Nu_w ve Nu_t), b) $4S_{LT}$ (Nu_{eq} ve ϕ), c) $3S_{LT}$ (Nu_w ve Nu_t), d) $3S_{LT}$ (Nu_{eq} ve ϕ), e) $2S_{LT}$ (Nu_w ve Nu_t), f) $2S_{LT}$ (Nu_{eq} ve ϕ)

şekil 5.47 a), b), c) sırasıyla 2, 3 ve 4 sıralı yoğuşturucularda Nu_w , Nu_t korelasyonuna göre hesaplanan ısı geçiş hızıyla deneysel olarak hesaplanan ısı geçiş hızının uyumluluğu göstermektedir. şekil 5.47d), e) ve f) ise benzer şekilde sırasıyla 2, 3, ve 4 sıralı yoğuşturucularda Nu_{eq} ve ϕ yaklaşımına göre

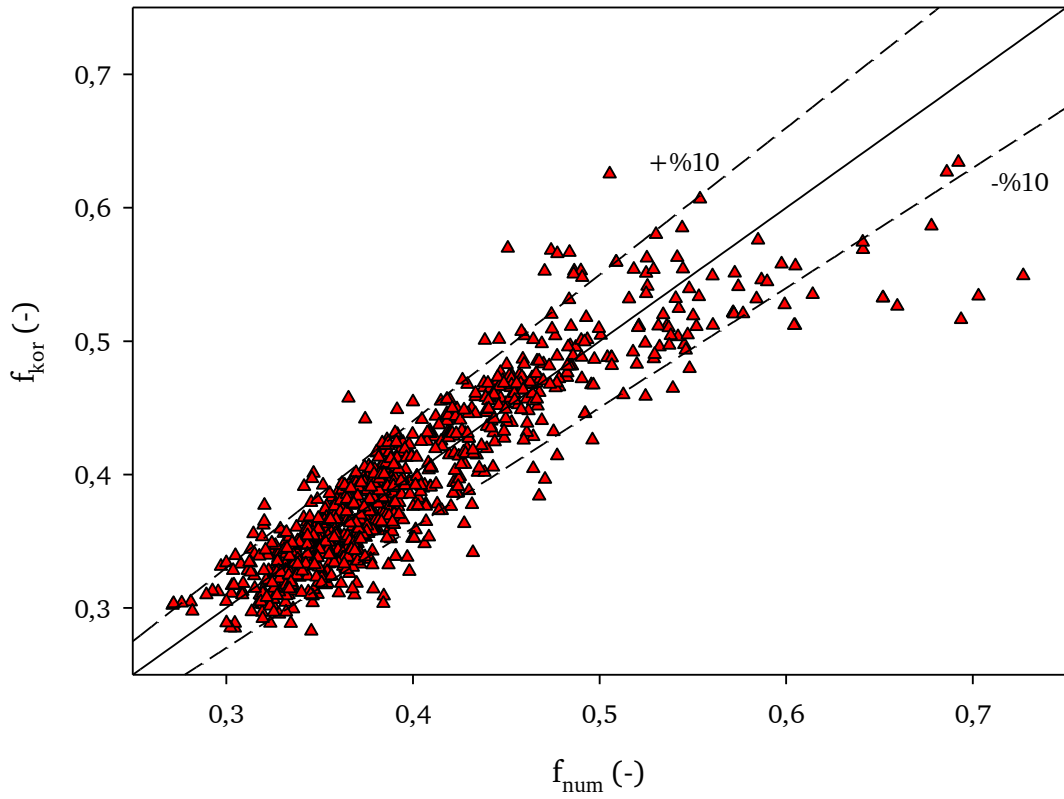
hesaplanan ısı geçiş hızıyla uyumluluğu belirtmektedir. Deneysel alışmalar bölümünde belirtildiği üzere sırasıyla $S_L = 17,8$ mm, 27,8 mm ve 37,8 mm olmak üzere üç aralıkta deneysel çalışmalar yapılmıştır. Çok sıralı uygulamalarında kullanılan serpantin zellikleri Serpantin 1 ve Serpantin 7 geometrik özelliklerindedir. Böylelikle çok sıra uygulamalarında hem $S_s=0$ hem de $S_s=0,25$ değerlerine bağlı değişim görülmüştür. Sonuç olarak ilgili korelasyonların çok sıralı yoğuşturucularda da uygulanabilir olduğu deneysel çalışmalar üzerinden de belirlenmiştir. Her iki yaklaşımında tek sırada olduğu gibi birbirine oldukça yakın sonuçlar verdiği belirlenmiştir. Özellikle tellerin şaşırtmalı dizilimi sonucunda elde edilen sonuçlar korelasyon ile elde edilen sonuçların her iki durumda da %10 hata aralığının altında uyumlu sonuçlar verdiği saptanmıştır. Buna karşın tellerin tandem dizilimli olduğu azalan S_L mesafelerine göre elde edilen deneysel ısı geçiş hızıyla korelasyon aracılığıyla elde edilen ısı geçiş hızlarının arttığı anlaşılmaktadır. Ancak ilgili şartlarda dahi hata oranı %25 civarlarında kabul edilebilir aralıktadır.

5.5.2 Basınç Düşümü Hesaplamaları İçin Önerilen Korelasyonlar

Basınç düşümü incelemelerinde f sürtünme katsayısı üzerinden korelasyonlar önerilmiştir. Tek sıra f değerinin hesabına yönelik olarak sunulan korelasyon aşağıdaki gibidir.

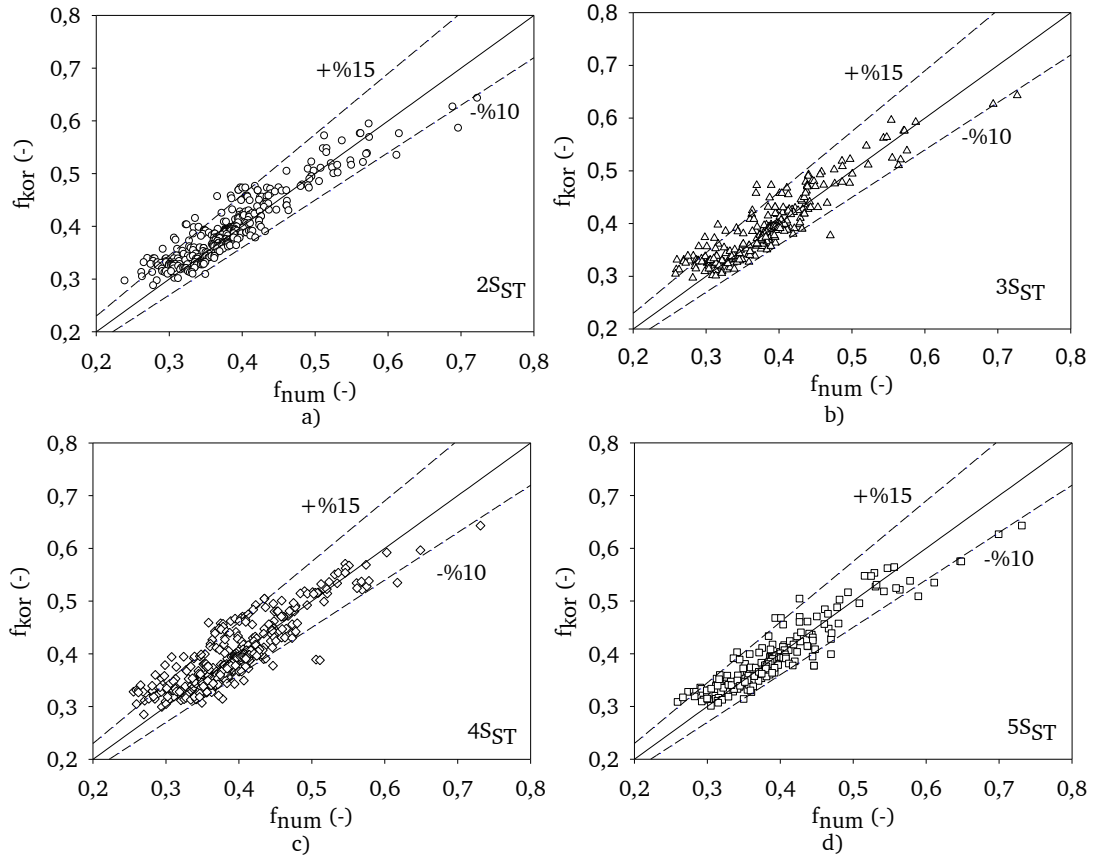
$$f = 1,76 Re_{eq}^{-0,26} \left(\frac{S_w}{D_{eq}} \right)^{-0,11} \left(\frac{S_t}{D_{eq}} \right)^{-0,03} (1 + S_s^{1,15}) \quad (5.5)$$

Önerilen korelasyon ile nümerik sonuçlar arasındaki uyumluluk oranı Şekil 5.48'de gösterilmiştir.



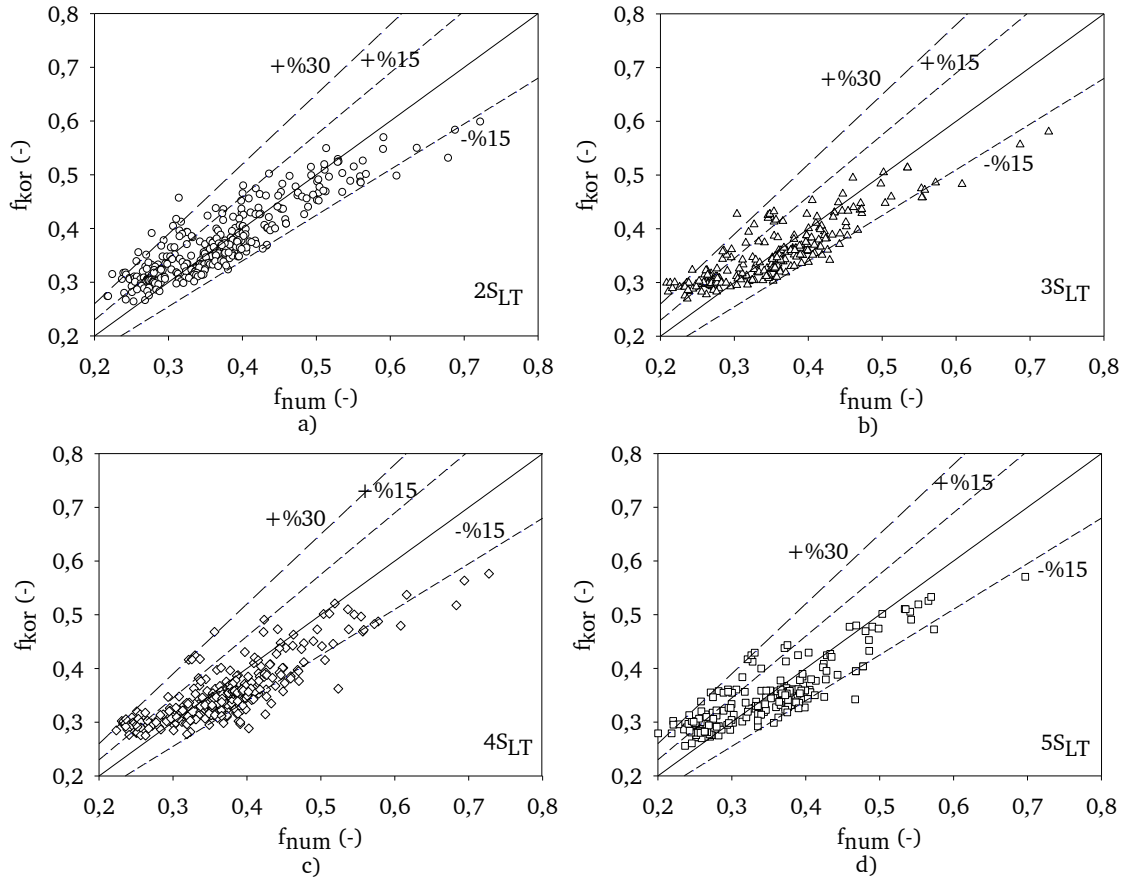
Şekil 5.48 Sürtünme faktörü için önerilen korelasyonla nümerik verilerden elde edilen sonuçların karşılaştırılması

Önerilen korelasyon ile nümerik sonuçlar arasındaki uyumluluk ağırlıklı olarak $\pm\%10$ hata oranının altında uyumlu sonuçlar vermiştir. İlgili korelasyonla çok sıralı yoğunlaştırucularda nümerik analizlerle elde edilen f değerleri ile de uyumluluk irdelenmiştir. Analizler ısı geçişi uyumluluklarında olduğu gibi sıraların hem boru şaşırtmalı hem de boru sıralı dizilimlerine göre yapılmıştır.



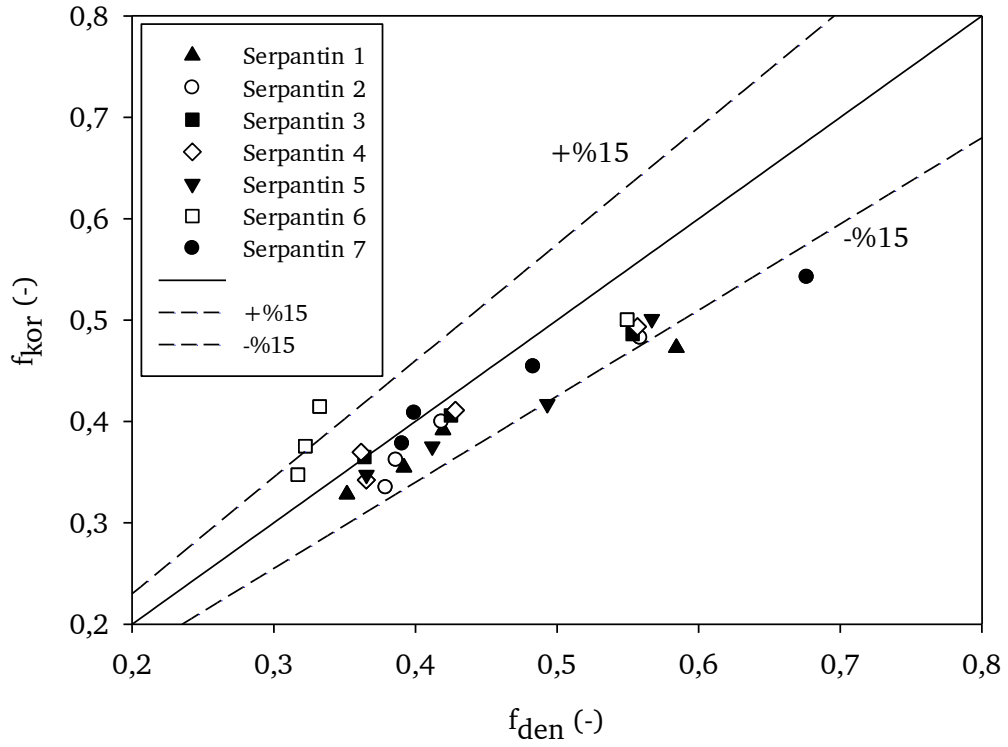
Şekil 5.49 Çok sıralı yoğuşturucularda nümerik analiz verileri ve korelasyonla elde edilen sürtünme faktörlerinin mukayesesi a) 2S_{ST}, b) 3S_{ST}, c) 4S_{ST}, d) 5S_{ST}

Şekil 5.49a), b), c) ve d) sırasıyla 2, 3, 4 ve 5 sıra sayısındaki yoğuşturuculardan nümerik analiz verilerinden elde edilen f değerleriyle korelasyon aracılığıyla elde edilen f değerlerinin uyumluluğu göstermektedir. İlgili şekilden anlaşılaçağı üzere ısı geçişi için önerilen korelasyonlara paralel şekilde tek sıra verileri üzerinden önerilen f korelasyonunun sıraların boru şaşırtmalı diziliminde %15 ile -%10 hata aralığında uyumlu sonuçlar verdiği görölmektedir.



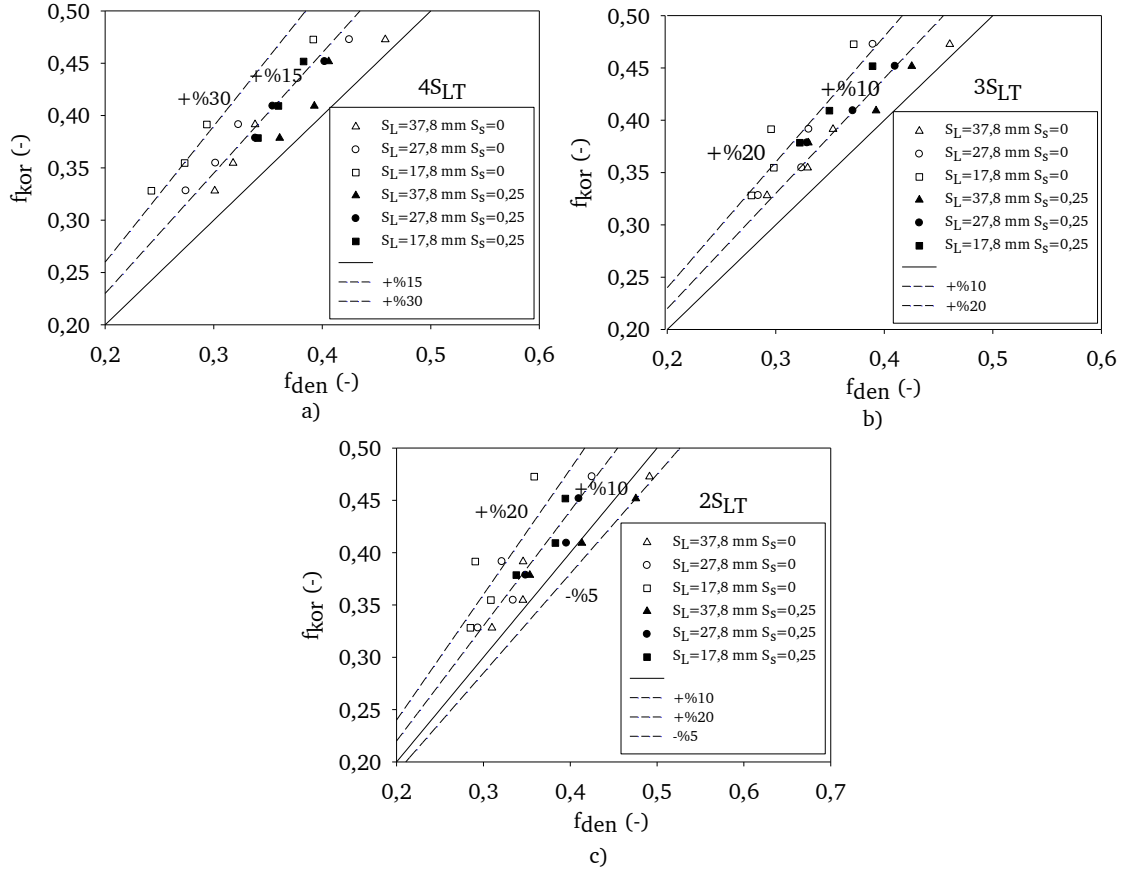
Şekil 5.50 Çok sıralı yoğunlaştırucularda nümerik analiz verileri ve korelasyonla elde edilen f değerlerinin mukayesesi a) 2S_{LT}, b) 3S_{LT}, c) 4S_{LT}, d) 5S_{LT}

Benzer şekilde Şekil 5.50 ise a), b), c) ve d) sırasıyla 2, 3, 4 ve 5 sıra sayısındaki yoğunlaştıruculardan nümerik analiz sonuçlarından elde edilen f değerleriyle korelasyon aracılığıyla hesaplanan f değerlerinin uyumluluğunu göstermektedir. Çok sıralı yoğunlaştırucularda sıralı dizilimde ilgili korelasyonun ağırlıklı olarak %15 hata aralığında olmasına karşın %25-30'lara varan hata aralığına ulaşan sonuçlar verdiği belirlenmiştir.



Şekil 5.51 Tek sıra yoğuşturucularda önerilen korelasyonlarla hesaplanan ve deneysel verilerden elde edilen f değerlerinin karşılaştırılması

Şekil 5.51 Önerilen korelasyon ile deneysel olarak elde edilen f değerlerinin kıyaslanması göstermektedir. 7 farklı geometrik özelliğe sahip serpantin üzerinden elde edilen sonuçlara göre uyumluluk oranı $\pm\%15$ varan aralıkta olması karşın serpantinlerinde çoğunda bu aralık $\%10$ 'un altında sonuçlar vermektedir. Çok sıralı yoğuşturucular içinde benzer çalışmalar yapılmıştır. Bu kapsamda 2, 3 ve 4 sıra sayısındaki yoğuşturucular üzerinden elde edilen deneysel sonuçlar ile korelasyonla elde edilen sonuçlar Şekil 5.52'de kıyaslanmıştır.



Şekil 5.52 Çok sıralı yoğunlaştırucularda önerilen korelasyonlar ile hesaplanan ve deneysel verilerden elde edilen f değerlerinin karşılaştırılması a) 4S_{LT}, b) 3S_{LT}, c) 2S_{LT}

Şekil 5.52’da görüldüğü üzere Serpantin 7 üzerinden elde edilen sonuçlar -%5 ile +%15 aralığında uygun sonuçlar vermektedir. Tellerin tandem dizilimiyle elde edilen sonuçlarda azalan S_L mesafeleriyle korelasyon ile deneysel verilerden elde edilen sonuçların %20’lere varan hata aralığına ulaştığı görülmektedir.

Yukarıdaki veriler üzerinden tek sıra yoğunlaştırucular üzerinden elde edilen korelasyonların çok sıralı yoğunlaştırucularda kullanılabilir bir yaklaşım olduğunu belirlenmiştir.

6 SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışma ile zorlanmış taşınım maruz tek ve çok sıralı tel kanatlı yoğunlaştırucularda ısı geçişi ve basınç düşümü deneysel ve nümerik olarak incelenmiştir. Nümerik çalışmalar hem tek sıra hem de çok sıralı yoğunlaştıruculardan deneysel olarak elde edilen verilerle büyük oranda %10 hata aralığının altında doğrulanmıştır. Deneysel çalışmalar kapsamında tek sıra için 7 farklı geometrik özelliğe sahip serpantin üzerinde çalışma yapılırken, çok sıra için ise 2, 3 ve 4 sıra boru sıralı 2 farklı serpantin çok sıralı yoğunlaştırucular incelenmiştir.

İlk çalışmalar tek sıra tel kanatlı yoğunlaştırucular üzerinden yapılmıştır. Uygulamada bu tip yoğunlaştırucularda boru ön ve arka yüzeyindeki teller birbirine göre tandem dizilime sahiptirler. Bu açıdan ilk olarak tek sıra tel kanatlı yoğunlaştırucularda tellerin tandem dizilimi dolayısıyla aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır;

- Ön tel üzeri taşınım katsayısının boru ve arka tel üzeri akış ve ısı geçişi davranışlarından etkilenmediği görülmüştür. Ön tel üzeri taşınım katsayısının aynı özelliklerdeki tek silindir üzeri taşınım katsayısına oldukça yakın olduğu belirlenmiştir.
- Arka tel üzeri taşınım katsayısının ön tele nazaran %50 civarında daha düşük olduğu belirlenmiştir.
- Tel çapının 1,2 mm ile 2,0 mm arasındaki değişiminin eşdeğer taşınım katsayısına etkisinin oldukça az olduğu görülmüştür.
- Boru çapının değişiminin tel üzeri taşınım katsayısına etkisinin oldukça az olduğu belirlenmiştir. Artan hızlarda boru üzeri taşınım katsayısında %19-27 arasında bir değişim görülmektedir.
- Teller arası mesafenin ısı geçiş açısından oldukça önemli olduğu belirlenmiştir. Özellikle $S_w/D_w = 3,5$ oranının altındaki değerlerde hem h_w hem de h_t değerlerinde %40lara ulaşan bir iyileşme olduğu belirlenmiştir.

- Borular arası mesafenin etkisinin S_f/D_t oranı 4 değerinden 10 değerine yükseltiğinden tüm hız değerlerinde h_t yaklaşık %12 azalırken, h_w değeri artan hızlarla %3 ile %20 arasında değiştiği saptanmıştır.

Tek sıra üzeri tellerin şaşırtmalı diziliminin ısı geçişini iyileştirmede oldukça etkili olduğu görülmüştür. Zorlanmış taşınım maruz tel kanatlı yoğunlaştırucuların büyük oranda bu şekilde dizayn edilmesinin iyi bir yaklaşım olacağı sonucuna ulaşılmıştır.

- Şaşırtma miktarı değişiminde $S_s=0,125$ değeri sonrasında h_w üzerindeki değişimin oldukça az olduğu belirlenmiştir. Bu değer sonrasında arka tel üzeri taşınım katsayısı %44-50'ye yakın bir artış göstermiştir.
- $S_s=0,25$ 'de h_w üzerindeki iyileşmenin %20-25 civarında olduğu saptanmıştır. Bu sonuçlara göre uygulamada kullanılan yoğunlaştırucu boyutlarına göre toplam ısı geçişi iyileşme miktarı %15'in üzerindedir.
- Şaşırtma miktarı değişiminin ön tel ve boru üzeri taşınım katsayısına etkisinin oldukça az olduğu belirlenmiştir.

Tek sıra üzeri basınç düşümü incelemeleri Fanning sürtünme katsayısı (f) üzerinden yapılmıştır.

- Deneysel çalışmalar sonucunda 7 farklı serpantin üzerinden alınan verilere göre basınç düşümünün 4 Pa değerinin altında olduğu görülmüştür.
- Boru çapı değişiminin f üzerine etkisinin oldukça az olduğu saptanmıştır.
- S_s değerinin 0-0,125 aralığındaki değişimi ile f değerinde artış görülmektedir. $S_s=0,125$ -0,25 aralığında f üzerindeki değişimin oldukça az olduğu belirlenmiştir.

Ayrıca ısı geçişinde etkili olan kanat verimi ve ısınım ısı geçişi etkileri üzerine de aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

- Tek sıra tel kanatlı yoğunlaştırucularda tek tel durumuna bağlı ısı geçişi incelenmiştir. Boru ön yüzeyindeki tel üzeri taşınım katsayısının arka tel üzeri taşınım katsayısından düşük hızlarda %14'e varan oranlarda

olmasına karşın artan hızlarda ilgili farkın %4'lere kadar azaldığı belirlenmiştir.

- Tek sıra üzeri tek tel diziliminde boru taşınım katsayısının arka tel diziliminin ön tel dizilimine nazaran artan hızlara bağlı olarak %16-%2 civarında daha yüksek değer verdiği anlaşılmıştır.
- Aynı zamanda tek sıra üzeri tek tel dizilimiyle ön tel üzeri taşınım katsayısının tellerin tandem ve şaşırtmalı durumundaki ön tel üzeri taşınım katsayısına oldukça yakın olduğu görülmüştür.
- Kanat verimi hem dairesel kanat dibi yaklaşımına hem de eliptik kanat dibi yaklaşımına göre analitik olarak hesaplanmış ve sonuçların birbirine oldukça yakın olduğu belirlenmiştir.
- Temas verimi ifadesi tanımlanmış ve bu ifadeye göre temas veriminin %98-96 arasında değiştiği belirlenmiştir.
- Farklı kanat malzemelerinin kanat verimine etkisi incelenmiştir. Uygulama da kullanılan çelik teller ile kanat veriminin %70 ile %90 arasında değiştiği belirlenmiştir.
- Işınım ile ısı geçiş hızının artan serbest hava akım hızlarına da bağlı olarak toplam ısı geçiş hızının %10-4 aralığında olduğu saptanmıştır.
- Boyalı durumun boyasız duruma nazaran %8 civarında ısı geçişinde bir iyileşme sağladığı anlaşılmıştır.
- Boya kalınlığında çelik malzeme gibi düşünülmesi ile yapılan analizlerle boyalı durumun göz önüne alındığı çalışmalar arasında %5 civarında bir fark olduğu görülmüştür.

Zorlanmış taşınımına maruz düz tip tel kanatlı yoğuşucular genellikle çok sıralı imal edilirler. Çok sıralı imalat akış doğrultusundaki sıralar üzerindeki boruların birbirine göre paralel(sıralı) ya da şaşırtmalı olması esasına göre iki şekilde imal edilebilirler. Aynı zamanda sıralar arası mesafe (S_L) ısı geçişi ve basınç düşümünü etkileyen bir parametre olarak karşımıza çıkmaktadır.

- Deneysel çalışmalar sonucunda çok sıralı yoğuşturucularda ilk sıranın tek sıra yoğuşturucuya benzer ısı geçiş davranışı gösterdiği belirlenmiştir.

- Aynı zamanda akış doğrultusunda ardışık sıraların sıra sayısından bağımsız şekilde birbirine oldukça yakın sonuçlar verdiği gözlenmiştir.
- 2 sıralı yoğunlaştırucuların ısı geçiş ve basınç düşümü karakteristikleri tek sıraya yakın olduğu görülmüştür.
- 3 ve üzeri sıra sayısında akış ve ısı geçiş davranışının birbirine oldukça yakın olduğu saptanmıştır.
- Boru sıralı diziliminde teller tandem dizilimli ise sıralar arası mesafenin oldukça önemli olduğu belirlenmiştir. Buna karşın tellerin şaşırtmalı dizilimiyle S_L/D_t değişiminin ısı geçişi ve basınç düşümüne etkisi büyük ölçüde bertaraf olmaktadır.
- Artan S_L/D_t oranlarında sıraların birbirini etkileme miktarı önemli ölçüde azalmaktadır. S_L/D_t oranı 6 üzeri olduğunda her bir sıra tek sıra yoğunlaştırucuya benzer karakteristik sunmaktadır.
- Genel olarak boru şaşırtmalı dizilim ile sıralı dizilime nazaran ısı geçişi artmaktadır.
- Boru şaşırtmalı dizilimde oluşan taşınım katsayıları ve sürtünme katsayılarının tek sıra üzeri elde edilen değerlere sıralı dizilime nazaran daha yakın olduğu belirlenmiştir.
- Çok sıralı yoğunlaştırucularda boru sıralı dizilim üzerinden yapılan ısı-akış performans faktörü (JF) incelemelerinde tellerin şaşırtmalı dizilimiyle ($S_s=0,25$) elde edilen sonuçların tellerin tandem dizilimiyle elde edilen sonuçlara nazaran arasındaki farkın %8-18 civarında daha yüksek olduğu gözlenmiştir.
- Boru şaşırtmalı dizilimde tellerin şaşırtmalı ($S_s=0,25$) dizilimiyle tellerin tandem dizilimine karşılık JF faktöründeki artışın %6-14 civarında bir artış olduğu belirlenmiştir.

Tel kanatlı yoğunlaştırucularda ısı geçişi ve basınç düşümü incelemelerinde farklı yaklaşımların kullanılması kapsamında Genetik Kümeleme CYY'den faydalanılmıştır.

- İlgili CYY yöntemi sonucunda yapılan duyarlılık analizi sonuçlarına göre hem basınç düşümü hem de ısı geçişi açısından en etkili parametrenin serbest hava akım hızının olduğu anlaşılmıştır.
- Sıraların hem boru şaşırtmalı hem de boru sıralı dizilimlerinde tellerin şaşırtmalı dizilimiyle hem ısı geçişi hem de basınç düşümünün yaklaşık %15-25 aralığında arttığı saptanmıştır.
- Genel olarak tel çapı ve boru çapının f ve h_{eq} üzerine etkisinin diğer geometrik özelliklere nazaran daha az olduğu belirlenmiştir.
- Yoğuşturucuların $S_s=0,25$ değerine göre dizayn edilmesi dolayısıyla hem boru şaşırtmalı hem de boru sıralı dizilimde S_b , S_t ve D_w değerlerinin değişiminin JF faktörü üzerine etkisi yok denecek azdır.
- Teller arası mesafenin ısı geçişinde %10-18 aralığında bir etkisi varken, basınç düşümünde bu etkinin %4-10 civarında olduğu görülmüştür.
- CYY ile elde edilen f ve h_{eq} değerleriyle HAD analizleri sonuçlarının birbirine oldukça yakın olduğu belirlenmiştir.
- Tek sıra yoğuşturucular 2.Dereceden Polinomal CYY ile incelenmiştir. Bu yaklaşımla elde edilen veriler ile Nu_w , Nu_b , Nu_{eq} ve f için çoklu regresyon modeli oluşturulmuştur.
- Önerilen regresyon modellerinin %97'in üzerinde bir hassasiyette olduğu belirlenmiştir.

Tez çalışması kapsamında çok sıralı tel kanatlı yoğuşturucularda optimizasyon çalışması da yapılmıştır. Optimizasyon çalışması j , f ve JF değerlerine göre yapılmıştır. Bu amaçla tel çapı 1,4 mm ve boru çapı 4,95 mm serbest hava akım hızı 2 m/s olacak şekilde sabit alınmıştır. Optimizasyon çalışmasında S_w , S_b , S_t , ve S_s değerlerinin değişimine göre yapılmıştır. Çok amaçlı Genetik Algoritma BSGA-II yöntemi uyarınca optimizasyon çalışmaları yapılmıştır.

- Zorlanmış taşınım maruz tel kanatlı yoğuşturucularda havanın geçtiği ön kesit alanın minimum tellerin şaşırtma oranının maksimum olması durumunda Colburn j ve JF faktörlerin en iyi değerlere ulaştığı, f sürtünme faktöründe yüksek bir artış görüldüğü anlaşılmıştır.

- Sıraların hem boru şaşırtmalı hem de boru sıralı dizilimi için benzer geometrik özelliklerde optimum sonuçlar oluşmaktadır.

Çalışma kapsamında hem ısı geçişi hem de basınç düşümünü hesaplayabilmek için Nu ve f korelasyonları önerilmiştir.

- Tek sıra yoğuşucular üzerinden elde edilen hem Nu korelasyonlarının hem de f korelasyonunun çok sıralı yoğuşturucularda da kullanılabileceği belirlenmiştir.
- Taşınım ısı geçişi kapsamında iki farklı yaklaşıma göre Nu korelasyonu sunulmuştur.
- İlk yaklaşım uyarınca Nu_w ve Nu_t şeklinde sırasıyla tel ve boru çapını karakteristik uzunluk olarak kabul eden iki korelasyon önerilmiştir. İlgili korelasyonlarla nümerik olarak elde edilen veriler arasındaki uyumluluk $\pm\%10$ 'un altındadır.
- İlgili yaklaşımla tek sıralı yoğuşturucular üzerinden yapılan deneysel çalışmalarda ısı geçiş hızları da genel olarak $\pm\%10-15$ hata oranının altında sonuçlar vermektedir.
- Bu yaklaşımla çok sıralı sıralı dizilime sahip yoğuşturucular üzerinden hesaplanan ısı geçiş hızıyla deneysel veriler arasındaki uyumda $\%20$ 'in altında görülmektedir.
- İkinci yaklaşımda serpantin geometrisine göre D_{eq} şeklinde bir karakteristik uzunluk tanımlanmıştır.
- Bu karakteristik uzunluğa göre Nu_{eq} şeklinde eşdeğer Nu korelasyonu önerilmiştir. Bu korelasyonla nümerik sonuçlar arasındaki farkın $\pm\%10$ un altında olduğu görülmüştür.
- Nu_{eq} yaklaşımına göre serpantin yüzeyinden hesaplanan eşdeğer taşınım katsayısı uyarınca kanant verimi ifadesine ϕ düzeltme katsayısı eklenmiştir.
- İlgili ϕ düzeltme katsayısını hesaplamak amacıyla bir korelasyon önerilmiştir. Önerilen korelasyon ile HAD analizine bağlı uyumluluk $\%2$ 'nin altındadır.

- Bu yaklaşımla da hesaplanan ısı geçiş hızı deneysel çalışmanın yapıldığı hem tek sıra hem de çok sıralı yoğuşturucularla kıyaslanmıştır. Deneysel verilerle ilgili korelasyon sonuçlarının oldukça uyumlu olduğu belirlenmiştir.
- Basınç düşümü açısından önerilen f korelasyonunda hem nümerik hem de deneysel sonuçlarla $\pm\%10-15$ hata aralığının altında uyumlu sonuçlar verdiği görülmüştür.

Çalışmanın önemli çıktıları özetlenecek olursa;

Çapraz akışa maruz tel kanatlı yoğuşturucularda ısı geçişi iyileştirme incelenmelerinde öncelikle tek tel ve tandem dizilimli yoğuşturucular incelenmiştir. Böylelikle tek sıralı yoğuşturucularda akış doğrultusunda arka sırada bulunan tel üzerinde ısı geçişi iyileştirme kapsamında büyük bir potansiyel olduğu anlaşılmıştır. Bu durum uyarınca yapılan tellerin şaşırtmalı dizilimiyle arka tel üzeri taşınım katsayısının $\%20-25$ oranında iyileştiği görülmüştür. Tellerin şaşırtmalı dizilimiyle çok sıralı yoğuşturucularda da ardışık sıralara ulaşan akış içerisindeki türbülans seviyesinin artışı dolayısıyla ısı geçişinde benzer bir iyileşme gözlenmiştir. Tellerin şaşırtmalı dizilimi sonucunda hem boru sıralı hem de boru şaşırtmalı dizilimli çok sıralı yoğuşturucularda ısı-akış davranışının birbirine yaklaştığı görülmüştür. Aynı zamanda tellerin şaşırtmalı dizilimi ile çok sıralı yoğuşturucularda sıralar arası mesafenin (S_d) ve borular arası mesafenin (S_b) ısı-akış performans etkisinin ortadan kalktığı anlaşılmıştır. Tellerin şaşırtmalı dizilimiyle basınç düşümünde de bir miktar artış olduğu belirlenmiştir. Tellerin tandem dizilimli olması durumunda arka telin akış sönümleyici etkisi dolayısıyla basınç düşümünün azaldığı belirlenmiştir. Benzer sonuçlar S_b/D_t aralığı 5'in altında olduğunda boru sıralı dizilimli yoğuşturucularda da görülmüştür. Hem ısı geçişi hem de basınç düşümü arasında kurulan ısı-akış performans ilişkisi çalışmalarında genel olarak şaşırtmalı dizilimle $\%10-15$ civarında bir iyileşme sağlandığı anlaşılmıştır. S_w/D_w ve S_b/D_t oranlarına bağlı yapılan çalışma sonucunda her iki aralık içinde 3,5 değeri üzerinde taşınım katsayıları ve sürtünme faktörü üzerindeki değişimin az olduğu saptanmıştır. Buna karşın S_w/D_w ve/veya S_b/D_t oranının 3,5'in altına azaltılmasıyla taşınım katsayıları ve sürtünme faktörü değerlerinin hızlıca arttığı

görülmüştür. Tek sıralı yoğuşturucular üzerindeki ısıl –akış incelemelerinin çok sıra boru şaşırtmalı dizilimli yoğuşturucular üzeri akışa oldukça yakın karakter gösterdiği belirlenmiştir. Tellerin şaşırtmalı dizilimiyle ise boru sıralı dizilimin de ilgili şartlardaki tek sıra dizilime yakın sonuçlar verdiği görülmüştür. Boru sıra şaşırtmalı dizilimli yoğuşturucularda tellerin tandem dizilimli olması sonucunda ardışık sıralardaki boruların birbirini etkilediği anlaşılmıştır. Bu etki özellikle $S_L/D_t = 5$ ve altında olduğunda oldukça fazladır. S_L/D_t oranı 5 üzeri olduğunda tellerin tandem dizilimli durumunda elde edilen ısı geçişi ve sürtünme faktörünün tek sıralı yoğuşturuculardan elde edilen taşınım katsayısı ve basınç düşümü değerlerine oldukça yakındır. Bu sonuçlar uyarınca tek sıralı yoğuşturucular üzerinden elde edilen verilerle önerilen korelasyonların çok sıralı yoğuşturucu hesaplamaları için de oldukça makul bir yaklaşım olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Çalışma kapsamında CYY yaklaşımının ısı geçişi ve basınç düşümü hesaplamalarında kullanılmasının uygun olduğu anlaşılmıştır.

Zorlanmış taşınım şartlarında tel kanatlı yoğuşturucular üzerine yapılabilecek diğer çalışmalar için aşağıdaki öneriler sıralanabilir;

- ❖ Tek sıra üzeri farklı tel çaplarının ısı geçişi ve basınç düşümüne etkisi,
- ❖ Termoeconomik incelemeler ve optimizasyon,
- ❖ Farklı elips, dikdörtgen, kare, üçgen vb. kanat şekillerinin ısıl-akış performans etkisi,
- ❖ Tellerin şaşırtmalı dizilimli olduğu akışa paralel ve eğik yerleşimde ısı geçişi ve basınç düşümünün tek ve çok sıralı yoğuşturucular için incelemeleri,
- ❖ Farklı tel kanatlı yoğuşturucularda (spiral, zikzaklı vb.) tellerin şaşırtmalı dizilimi,
- ❖ Kirlenmenin ısıl-akış performansına etkisi,

Tez çalışması yoğuşturucular üzerinden yapılmasına karşın tel kanatlı ısı değiştiriciler hem boru içerisi tek fazlı akış içeren ısı değiştiricilerinde hem de buharlaştırıcı uygulamalarında kullanılabilirler. Bu açıdan yapılan çalışmanın hesaplama yaklaşımı ve sonuçları büyük ölçüde bu tarz ısı değiştiricilerin hava tarafı incelemeleri için de kullanılabilir.

- [1] F. H. Abanda ve L. Byers, "An investigation of the impact of building orientation on energy consumption in a domestic building using emerging BIM (Building Information Modelling)," *Energy*, vol. 97, pp. 517–527, 2016.
- [2] (IEA), *COOL APPLIANCES: Policy Strategies for Policy Strategies for Energy Efficient Homes*. Paris, 2003.
- [3] S. Tassou ve Y. Ge, "Reduction of refrigeration energy consumption and environmental impacts in food retailing," *Handb. Water Energy Manag. Food Process.*, pp. 585–611, Jan. 2008.
- [4] G. Sonnenrein, A. Elsner, E. Baumhögger, A. Morbach, K. Fieback ve J. Vrabec, "Reducing the power consumption of household refrigerators through the integration of latent heat storage elements in wire-and-tube condensers," *Int. J. Refrig.*, vol. 51, pp. 154–160, 2015.
- [5] P. K. Bansal ve T. C. Chin, "Modelling and optimisation of wire-and-tube condenser," *Int. J. Refrig.*, vol. 26, pp. 601–613, 2003.
- [6] W. E. Witzell ve O.W., Fontaine, "Design of Wire and Tube Condensers," *Refrig. Eng.*, vol. 65, pp. 41–44, 1957.
- [7] W. E. Witzell ve O.W., Fontaine, "What are the Heat Transfer Characteristics of Wire and Tube Condensers?," *Refrig. Eng.*, vol. 65, pp. 33–37, 1957.
- [8] W. J. Papanek, "Convective Film Coefficients for a Wire and Tube Heat Exchanger," Purdue University, 1958.
- [9] W. J. Witzell, O.W., Fontaine ve W.E., Papanek, "Convective Films Evaluated for Wire and Tube Heat Exchangers," *ASHRAE J.*, vol. 1, pp. 35–37, 1959.
- [10] E. V. Cyphers, J. A., Cess ve R.D., Somers, "Heat Transfer Character of Wire and Tube Heat Exchangers," *ASHRAE J.*, vol. 1, pp. 86–90, 1959.
- [11] O. W. Collicott, H.E., Fontaine ve W.E., Witzell, "Radiation and Free Convection Heat Transfer from Wire on Tube Heat Exchangers," *ASHRAE J.*, vol. 5, pp. 79–83, 1963.
- [12] C. Melo ve C. J. L. Hermes, "A heat transfer correlation for natural draft wire-and-tube condensers," *Int. J. Refrig.*, vol. 32, no. 3, pp. 546–555, 2009.
- [13] R. S. Espíndola, J. Boeng, F. T. Knabben ve C. J. L. Hermes, "A new heat transfer correlation for natural draft wire-on-tube condensers for a broad geometry span," *Int. J. Refrig.*, 2020.
- [14] G. Tanda ve L. Tagliafico, "Free Convection Heat Transfer From Wire-and-Tube Heat Exchangers," *J. Heat Transfer*, vol. 119, no. 2, pp. 370–372, 1997.

- [15] L. Tagliafico ve G. Tanda, "Radiation and natural convection heat transfer from wire-and-tube heat exchangers in refrigeration appliances," *Int. J. Refrig.*, vol. 20, no. 7, pp. 461–469, 1997.
- [16] C. Melo ve R. Maykot, "Experimental Evaluation of Wire & Tube Condensers : Confining Walls Effects," *Int. Refrig. Air Cond. Conf.*, 2004.
- [17] R. Bassiouny, "Evaluating the effect of the space surrounding the condenser of a household refrigerator," *Int. J. Refrig.*, vol. 32, no. 7, pp. 1645–1656, Nov. 2009.
- [18] G. A. Quadir, G. M. Krishnan ve K. N. Seetharamu, "Modeling of wire-on-tube heat exchangers using finite element method," *Finite Elem. Anal. Des.*, vol. 38, no. 5, pp. 417–434, 2002.
- [19] A. Ameen, S. A. Mollik, K. Mahmud, G. A. Quadir ve K. N. Seetharamu, "Numerical analysis and experimental investigation into the performance of a wire-on-tube condenser of a retrofitted refrigerator," *Int. J. Refrig.*, vol. 29, no. 3, pp. 495–504, 2006.
- [20] S. C. Kaushik ve K. Manjunath, "Entropy generation and thermoeconomic analysis of the wire-and-tube condenser," *Int. J. Ambient Energy*, vol. 35, no. 2, pp. 80–93, 2014.
- [21] I. M. Arsana, Susianto, K. Budhikarjono ve A. Altway, "Optimization of the Single Staggered Wire and Tube Heat Exchanger," *Int. J. Appl. Eng. Res.*, vol. 11, no. 8, pp. 5591–5599, 2016.
- [22] T. Samana, T. Kiatsiriroat ve A. Nuntaphan, "Air-side performance analysis of a wire-on-tube heat exchanger with an oscillating heat pipe as an extended surface under natural convection conditions," *Heat Transf. Eng.*, vol. 33, no. 12, pp. 1033–1039, 2012.
- [23] P. K. Bansal ve T. C. Chin, "Design and modelling of hot-wall condensers in domestic refrigerators," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 22, no. 14, pp. 1601–1617, Oct. 2002.
- [24] J. L. Hoke, A. M. Clausen ve T. D. Swofford, "An Experimental Investigation of Convective Heat Transfer From Wire-On-Tube Heat Exchangers," *J. Heat Transfer*, vol. 119, no. 2, pp. 348–356, 1997.
- [25] T. H. Lee, J. Y. Yun, J. S. Lee, J. J. Park ve K. S. Lee, "Determination of airside heat transfer coefficient on wire-on-tube type heat exchanger," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 44, no. 9, pp. 1767–1776, 2001.
- [26] A. Žkauskas, "Heat Transfer from Tubes in Crossflow," *Adv. Heat Transf.*, vol. 18, no. C, pp. 87–159, 1987.
- [27] Y. Islamoglu, "A new approach for the prediction of the heat transfer rate of the wire-on-tube type heat exchanger - Use of an artificial neural network model," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 23, no. 2, pp. 243–249, 2003.
- [28] A. Kumra, N. Rawal ve P. Samui, "Prediction of heat transfer rate of a Wire-on-Tube type heat exchanger: An Artificial Intelligence approach," *Procedia Eng.*, vol. 64, pp. 74–83, 2013.

- [29] M. Hayati, A. Rezaei ve M. Seifi, "Prediction of the heat transfer rate of a single layer wire-on-tube type heat exchanger using ANFIS," *Int. J. Refrig.*, vol. 32, no. 8, pp. 1914–1917, Dec. 2009.
- [30] T. Samana, T. Kiatsiriroat ve A. Nuntaphan, "Enhancement of fin efficiency of a solid wire fin by oscillating heat pipe under forced convection," *Case Stud. Therm. Eng.*, vol. 2, pp. 36–41, 2014.
- [31] A. Nuntaphan, S. Vithayasai, N. Vorayos, N. Vorayos ve T. Kiatsiriroat, "Use of oscillating heat pipe technique as extended surface in wire-on-tube heat exchanger for heat transfer enhancement," *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, vol. 37, no. 3, pp. 287–292, 2010.
- [32] J. R. Barbosa ve R. A. Sigwalt, "Air-side heat transfer and pressure drop in spiral wire-on-tube condensers," *Int. J. Refrig.*, vol. 35, no. 4, pp. 939–951, 2012.
- [33] Z. Zhang, D. Huang, R. Zhao ve Y. Leng, "Effect of airflow field optimization around spiral wire-on-tube condenser on a frost-free refrigerator performance," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 114, pp. 785–792, 2017.
- [34] R. A. Schwentker, "Advances to a Computer Model Used in the Simulation ve Optimization of Heat Exchangers," University of Maryland, 2005.
- [35] S. J. Petroski ve A. M. Clausing, "An investigation of the performance of confined, saw-tooth shaped wire-on-tube condensers," Illinois, 1999.
- [36] J. . M. S. Lum ve A. M. Clausing, "An Investigation of the Air-Side Forced Convection Heat Transfer from Saw-Tooth Shaped , Multi-Layer , Wire-On-Tube Condensers," West Green Street Urbana, Illinois, 1997.
- [37] D. M. Admiraal ve C. W. Bullard, "Heat Transfer in Refrigerator Condensers and Evaporators," Illinois, 1993.
- [38] O. Inoue ve A. Sakuragi, "Vortex shedding from a circular cylinder of finite length at low Reynolds numbers," *Phys. Fluids*, vol. 20, no. 3, 2008.
- [39] D. Sumner, S. J. Price ve M. P. Paidoussis, "Flow-pattern identification for two staggered circular cylinders in cross-flow," *J. Fluid Mech.*, vol. 411, pp. 263–303, 2000.
- [40] D. Sumner, "Two circular cylinders in cross-flow: A review," *J. Fluids Struct.*, vol. 26, no. 6, pp. 849–899, Aug. 2010.
- [41] M. M. Zdravkovich, "The effects of interference between circular cylinders in cross flow," *J. Fluids Struct.*, vol. 1, no. 2, pp. 239–261, Apr. 1987.
- [42] M. M. Zdravkovich, "Review and classification of various aerodynamic and hydrodynamic means for suppressing vortex shedding," *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, vol. 7, no. 2, pp. 145–189, 1981.
- [43] I. Harimi ve M. Saghafian, "Numerical simulation of fluid flow and forced convection heat transfer from tandem circular cylinders using overset grid method," *J. Fluids Struct.*, vol. 28, pp. 309–327, 2012.
- [44] N. Mahir ve Z. Altaç, "Numerical investigation of convective heat transfer

- in unsteady flow past two cylinders in tandem arrangements,” *Int. J. Heat Fluid Flow*, vol. 29, no. 5, pp. 1309–1318, 2008.
- [45] J.-C. Lin, Y. Yank ve D. Rockwell, “Flow Past Two Cylinders in Tandem: Instantaneous and Averaged Flow Structure,” *J. Fluids Struct.*, vol. 16, no. 8, pp. 1059–1071, Dec. 2002.
 - [46] T. Lee ve S. Basu, “Nonintrusive measurements of the boundary layer developing on a single and two circular cylinders,” *Exp. Fluids*, vol. 23, no. 3, pp. 187–192, Jul. 1997.
 - [47] Y. Zhou ve M. W. Yiu, “Flow structure, momentum and heat transport in a two-tandem-cylinder wake,” *J. Fluid Mech.*, vol. 548, pp. 17–48, 2006.
 - [48] S. J. Price, M. P. Païdoussis ve B. Mark, “Flow visualization of the interstitial cross-flow through parallel triangular and rotated square arrays of cylinders,” *J. Sound Vib.*, vol. 181, no. 1, pp. 85–98, 1995.
 - [49] Y. Wang, Z. Yan ve H. Wang, “Numerical simulation of low-Reynolds number flows past two tandem cylinders of different diameters,” *Water Sci. Eng.*, vol. 6, no. 4, pp. 433–445, Oct. 2013.
 - [50] E. Buyruk, “Numerical study of heat transfer characteristics on tandem cylinders, inline and staggered tube banks in cross-flow of air,” *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, vol. 29, no. 3, pp. 355–366, 2002.
 - [51] D. Sumner, S. S. Wong, S. Price ve M. Païdoussis, “Fluid Behaviour of Side-By-Side Circular Cylinders in Steady Cross-Flow,” *J. Fluids Struct.*, vol. 13, no. 3, pp. 309–338, Apr. 1999.
 - [52] H. Yamamoto ve N. Hattori, “Flow and Heat Transfer Around a Single Row of Circular Cylinders,” *Heat Transf. Res.*, vol. 25, no. 3, pp. 192–200, 1996.
 - [53] T. Han, K.-S. Yang ve K. Lee, “Heat Transfer Characterization of Two Isothermal Circular Cylinders in Proximity,” *J. Heat Transfer*, vol. 132, no. 3, p. 034504, Dec. 2010.
 - [54] A. P. Colburn, “A method of correlating forced convection heat transfer data and a comparison with fluid friction,” *Trans. Am. Inst. Chem. Eng.*, vol. 29, pp. 174–210, 1933.
 - [55] E. D. Grimson, “Correlation and utilization of new data on flow resistance and heat transfer for cross flow of gases over tube banks,” *Trans. ASME*, vol. 59, pp. 583–594, 1937.
 - [56] E. C. Hüge, “Experimental investigation of effects of equipment size on convection heat transfer and flow resistance in cross flow of gases over tube banks,” *Trans. ASME*, vol. 59, pp. 573–581, 1937.
 - [57] O. L. Pierson, “Experimental investigation of the influence of tube arrangement on convective heat transfer and flow resistance in cross flow of gases over tube banks,” *Trans. ASME*, vol. 59, pp. 563–572, 1937.
 - [58] Žukauskas, A. ve R. Ulinskas, *Heat transfer in tube banks in crossflow*. 1988.

- [59] A. Žukauskas ve R. Ulinskas, "Efficiency parameters for heat transfer in tube banks," *Heat Transf. Eng.*, vol. 6, no. 1, pp. 19–25, 1985.
- [60] J.-Y. Jang, M.-C. Wu ve W.-J. Chang, "Numerical and experimental studies of threedimensional plate-fin and tube heat exchangers," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 39, no. 14, pp. 3057–3066, Sep. 1996.
- [61] A. S. Bergman, T. L. Incropera, F. P. DeWitt, D. P., & Lavine, *Fundamentals of heat and mass transfer*, 7th ed. John Wiley & Sons, 2011.
- [62] S. B. Beale ve D. B. Spalding, "A numerical study of unsteady fluid flow in in-line and staggered tube banks," *J. Fluids Struct.*, vol. 13, pp. 723–754, 1999.
- [63] Y. A. Hassan ve W. A. Ibrahim, "Turbulence Prediction in Two-Dimensional Bundle Flows Using Large-Eddy Simulation," *Nucl. Technol.*, vol. 119, no. 1, pp. 11–28, 2017.
- [64] R. S. Kumar ve S. Jayavel, "Influence of flow shedding frequency on convection heat transfer from bank of circular tubes in heat exchangers under cross flow," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 105, pp. 376–393, 2017.
- [65] T. Kim, "Effect of longitudinal pitch on convective heat transfer in crossflow over in-line tube banks," *Ann. Nucl. Energy*, vol. 57, pp. 209–215, 2013.
- [66] S. Yao ve D. Zhu, "Experimental research on heat transfer and pressure drop of two configurations of pin finned-tubes in an in-line array," *J. Therm. Sci.*, vol. 3, no. 3, pp. 167–172, 1994.
- [67] S. Aiba, H. Tsuchida ve T. Ota, "Heat transfer around tubes in in-line tube banks," *Bull. JSME*, vol. 25, no. 204, pp. 919–926, 1982.
- [68] S. Aiba, H. Tsuchida ve T. Ota, "Heat transfer around tubes in staggered tube banks," *Bull. JSME*, vol. 25, no. 204, pp. 927–933, 1982.
- [69] Y. Q. Wang, L. A. Penner ve S. J. Ormiston, "Analysis of laminar forced convection of air for crossflow in banks of staggered tubes," *Numer. Heat Transf. Part A Appl.*, vol. 38, no. 8, pp. 819–845, 2000.
- [70] C. J. Chen ve T. S. Wung, "Finite analytic solution of convective heat transfer for tube arrays in crossflow: Part II-Heat transfer analysis," *J. Heat Transfer*, vol. 111, no. 3, pp. 641–648, 1989.
- [71] M. N. Dhaubhadel, J. N. Reddy ve D. P. Telionis, "Finite-element analysis of fluid flow and heat transfer for staggered bundles of cylinders in cross flow," *Int. J. Numer. Methods Fluids*, vol. 7, no. 12, pp. 1325–1342, 1987.
- [72] A. M. F. El-Shaboury ve S. J. Ormiston, "Analysis of laminar forced convection of air crossflow in in-line tube banks with nonsquare arrangements," *Numer. Heat Transf. Part A Appl.*, vol. 48, no. 2, pp. 99–126, 2005.
- [73] D. B. Murray, "A comparison of heat transfer in staggered and inline tube banks with a gas-particle crossflow," *Exp. Therm. Fluid Sci.*, vol. 6, no. 2, pp. 177–185, 1993.

- [74] Z. yong Chen, M. Cheng, Q. Liao, Y. dong Ding ve J. nan Zhang, "Experimental investigation on the air-side flow and heat transfer characteristics of 3-D finned tube bundle," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 131, pp. 506–516, 2019.
- [75] M. A. Ahmed, M. M. Yaseen ve M. Z. Yusoff, "Numerical study of convective heat transfer from tube bank in cross flow using nanofluid," *Case Stud. Therm. Eng.*, vol. 10, no. October, pp. 560–569, 2017.
- [76] W. A. Khan, J. R. Culham ve M. M. Yovanovich, "Convection heat transfer from tube banks in crossflow: Analytical approach," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 49, no. 25–26, pp. 4831–4838, 2006.
- [77] M. M. Aslam Bhutta, N. Hayat, M. H. Bashir, A. R. Khan, K. N. Ahmad ve S. Khan, "CFD applications in various heat exchangers design: A review," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 32, no. 1, pp. 1–12, 2012.
- [78] H. Ke *et al.*, "Thermal-hydraulic performance and optimization of attack angle of delta winglets in plain and wavy finned-tube heat exchangers," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 150, no. December 2018, pp. 1054–1065, 2019.
- [79] D. Taler ve P. Ocloń, "Determination of heat transfer formulas for gas flow in fin-and-tube heat exchanger with oval tubes using CFD simulations," *Chem. Eng. Process. Process Intensif.*, vol. 83, pp. 1–11, 2014.
- [80] M. Darvish Damavandi, M. Forouzanmehr ve H. Safikhani, "Modeling and Pareto based multi-objective optimization of wavy fin-and-elliptical tube heat exchangers using CFD and NSGA-II algorithm," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 111, pp. 325–339, 2017.
- [81] Q. Zhang, L. Xu, J. Li ve M. Ouyang, "Performance prediction of plate-fin radiator for low temperature preheating system of proton exchange membrane fuel cells using CFD simulation," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 42, no. 38, pp. 24504–24516, Sep. 2017.
- [82] A. Okbaz, A. Pınarbaşı, A. B. Olcay ve M. Hilmi Aksoy, "An experimental, computational and flow visualization study on the air-side thermal and hydraulic performance of louvered fin and round tube heat exchangers," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 121, pp. 153–169, 2018.
- [83] A. Sadeghianjahromi, S. Kheradmand ve H. Nemati, "Developed correlations for heat transfer and flow friction characteristics of louvered finned tube heat exchangers," *Int. J. Therm. Sci.*, vol. 129, pp. 135–144, Jul. 2018.
- [84] C. Yu, J. Chen, M. Zeng ve B. Gao, "Numerical study on turbulent heat transfer performance of a new parallel-flow shell and tube heat exchanger with sinusoidal wavy tapes using RSM analysis," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 150, no. December 2018, pp. 875–887, 2019.
- [85] K. Somasekhar, K. N. D. Malleswara Rao, V. Sankararao, R. Mohammed, M. Veerendra ve T. Venkateswararao, "A CFD Investigation of Heat Transfer Enhancement of Shell and Tube Heat Exchanger Using Al₂O₃-Water Nanofluid," *Mater. Today Proc.*, vol. 5, no. 1, pp. 1057–1062, Jan. 2018.

- [86] S. Emani, M. Ramasamy ve K. Z. K. Shaari, "Discrete phase-CFD simulations of asphaltenes particles deposition from crude oil in shell and tube heat exchangers," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 149, pp. 105–118, Feb. 2019.
- [87] D. K. Yang, K. S. Lee ve S. Song, "Fin spacing optimization of a fin-tube heat exchanger under frosting conditions," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 49, no. 15–16, pp. 2619–2625, 2006.
- [88] L. O. Salviano, D. J. Dezan ve J. I. Yanagihara, "Optimization of winglet-type vortex generator positions and angles in plate-fin compact heat exchanger: Response Surface Methodology and Direct Optimization," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 82, pp. 373–387, 2015.
- [89] J. Wen, H. Yang, G. Jian, X. Tong, K. Li ve S. Wang, "Energy and cost optimization of shell and tube heat exchanger with helical baffles using Kriging metamodel based on MOGA," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 98, pp. 29–39, 2016.
- [90] J. Wen, H. Yang, X. Tong, K. Li, S. Wang ve Y. Li, "Configuration parameters design and optimization for plate-fin heat exchangers with serrated fin by multi-objective genetic algorithm," *Energy Convers. Manag.*, vol. 117, pp. 482–489, 2016.
- [91] J. Wen, K. Li, X. Zhang, C. Wang, S. Wang ve J. Tu, "Optimization investigation on configuration parameters of serrated fin in plate-fin heat exchanger based on fluid structure interaction analysis," *Int. J. Heat Mass Transf.*, 2017.
- [92] S. Sanaye ve H. Hajabdollahi, "Thermal-economic multi-objective optimization of plate fin heat exchanger using genetic algorithm," *Appl. Energy*, vol. 87, no. 6, pp. 1893–1902, 2010.
- [93] L. O. Salviano, D. J. Dezan ve J. I. Yanagihara, "Thermal-hydraulic performance optimization of inline and staggered fin-tube compact heat exchangers applying longitudinal vortex generators," *Appl. Therm. Eng.*, 2016.
- [94] S. Wang, J. Xiao, J. Wang, G. Jian, J. Wen ve Z. Zhang, "Application of response surface method and multi-objective genetic algorithm to configuration optimization of Shell-and-tube heat exchanger with fold helical baffles," *Appl. Therm. Eng.*, 2018.
- [95] G. W. Mann ve S. Eckels, "Multi-objective heat transfer optimization of 2D helical micro-fins using NSGA-II," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 132, pp. 1250–1261, 2019.
- [96] L. Sun ve C. L. Zhang, "Evaluation of elliptical finned-tube heat exchanger performance using CFD and response surface methodology," *Int. J. Therm. Sci.*, vol. 75, pp. 45–53, 2014.
- [97] S. Wang, G. Jian, J. Xiao, J. Wen ve Z. Zhang, "Optimization investigation on configuration parameters of spiral-wound heat exchanger using Genetic Aggregation response surface and Multi-Objective Genetic Algorithm," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 119, pp. 603–609, 2017.

- [98] Ö. Atayilmaz ve I. Teke, "Experimental and numerical study of the natural convection from a heated horizontal cylinder," *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, vol. 36, pp. 731–738, 2009.
- [99] R. Hilpert, "Heat transfer from cylinders.," *Forsch. Geb. Ingenieurwes*, vol. 4, p. 215, 1933.
- [100] A. Žukauskas, "Heat Transfer from Tubes in Crossflow," *Adv. Heat Transf.*, vol. 8, pp. 93–160, Jan. 1972.
- [101] R. J. Moffat, "Describing the uncertainties in experimental results," *Exp. Therm. Fluid Sci.*, vol. 1, no. 1, pp. 3–17, 1988.
- [102] A. Gönül, Ö. Ağra, Ö. Atayilmaz, H. Demir, M. K. Sevindir ve İ. Teke, "Experimental and numerical investigation of air-side forced convection on wire-on-tube condensers," *Int. J. Therm. Sci.*, vol. 151, May 2020.
- [103] M. B. Villarino, "Ramanujan's Perimeter of an Ellipse," vol. 3, pp. 1–12, 2005.
- [104] P. Rod, "Perimeter of Ellipse." [Online]. Available: <http://www.mathsisfun.com/geometry/ellipse-perimeter.html>. [Accessed: 03-Feb-2019].
- [105] C. T. Hsieh ve J. Y. Jang, "Parametric study and optimization of louver finned-tube heat exchangers by Taguchi method," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 42, pp. 101–110, 2012.
- [106] J. Y. Yun ve K. S. Lee, "Influence of design parameters on the heat transfer and flow friction characteristics of the heat exchanger with slit fins," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 43, no. 14, pp. 2529–2539, 2000.
- [107] S. Łopata ve P. Ocłoń, "Investigation of the flow conditions in a high performance heat exchanger," *Arch. Thermodyn.*, vol. 31, no. 3, pp. 37–53, 2010.
- [108] D. Taler ve A. Cebula, "A new method for determination of thermal contact resistance of a fin-to-tube attachment in plate fin-and-tube heat exchangers," *Chem. Process Eng.*, vol. 31, no. 4, pp. 839–855, 2010.
- [109] F. R. Menter, "Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications," *AIAA J.*, vol. 32, no. 8, pp. 1598–1605, 1994.
- [110] *ANSYS Fluent Theory Guide*, 15th ed. Canonsburg, PA 15317, 2013.
- [111] J. P. C. Kleijnen, "Regression Metamodels for Generalizing Simulation Results," *IEEE Trans. Syst. Man. Cybern.*, vol. 9, no. 2, pp. 93–96, 1979.
- [112] L. Pu, D. Qi, L. Xu ve Y. Li, "Optimization on the performance of ground heat exchangers for GSHP using Kriging model based on MOGA," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 118, pp. 480–489, May 2017.
- [113] S. Sakata, F. Ashida ve M. Zako, "Structural optimization using Kriging approximation," *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, vol. 192, no. 7–8, pp. 923–939, 2003.
- [114] A. K. Gholap ve J. A. Khan, "Design and multi-objective optimization of

- heat exchangers for refrigerators,” *Appl. Energy*, vol. 84, no. 12, pp. 1226–1239, 2007.
- [115] H. Han, R. Yu, B. Li ve Y. Zhang, “Multi-objective optimization of corrugated tube inserted with multi-channel twisted tape using RSM and NSGA-II,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 159, no. October 2018, p. 113731, 2019.
- [116] M. Balaban, “Regresyon ve Kriging Meta-Modelleri için Kullanılan Deney Tasarımı Yöntemleri,” *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknol. Derg.*, vol. 7, pp. 1444–1455, 2019.
- [117] G. E. P. Box ve K. B. Wilson, “On the Experimental Attainment of Optimum Conditions,” *J. R. Stat. Soc. Ser. B*, vol. 13, no. 1, pp. 1–38, 1951.
- [118] G. E. P. Box ve D. W. Behnken, “Some New Three Level Designs for the Study of Quantitative Variables,” *Technometrics*, vol. 2, no. 4, pp. 455–475, 1960.
- [119] G. E. P. Box, J. S. Hunter ve W. G. Hunter, *Statistics for Experimenters Desing, Innovation, and Discovery*. Wiley Series in Probability and Statistics. Hoboken, NJ: Wiley, 2005.
- [120] S. L. C. Ferreira *et al.*, “Box-Behnken design: an alternative for the optimization of analytical methods,” *Anal. Chim. Acta*, vol. 597, no. 2, pp. 179–86, 2007.
- [121] V. Eglājs ve P. Audze, “New approach to the design of multifactor experiments,” *Probl. Dyn. Strengths*, vol. 35, no. 1, pp. 104–107, 1977.
- [122] W. A. Khan, R. J. Culham ve M. M. Yovanovich, “Optimal Design of Tube Banks in Crossflow Using Entropy Generation Minimization Method,” *J. Thermophys. Heat Transf.*, vol. 21, no. 2, pp. 372–378, 2007.
- [123] R. L. Iman, J. C. Helton ve J. E. Campbell, “An Approach to Sensitivity Analysis of Computer Models: Part I—Introduction, Input Variable Selection and Preliminary Variable Assessment,” *J. Qual. Technol.*, vol. 13, no. 3, pp. 174–183, 1981.
- [124] E. Acar, “Various approaches for constructing an ensemble of metamodels using local measures,” *Struct. Multidiscip. Optim.*, vol. 42, no. 6, pp. 879–896, 2010.
- [125] F. A. C. Viana, R. T. Haftka ve V. Steffen, “Multiple surrogates: How cross-validation errors can help us to obtain the best predictor,” *Struct. Multidiscip. Optim.*, vol. 39, no. 4, pp. 439–457, 2009.
- [126] S. Kaya ve N. Fırlalı, “Çok Amaçlı Optimizasyon Problemlerinde Pareto Optimal Kullanımı,” vol. 5, no. 2, pp. 9–18, 2016.
- [127] J. H. Holland, “adaptation in natural and artificial systems, university of michigan press, ann arbor,” *Cité page*, vol. 100, 1975.
- [128] D. E. Goldberg ve J. H. Holland, “Genetic Algorithms and Multiobjective Optimization,” in *Machine Learning*, vol. 3, no. 2–3, 1988, pp. 95–99.
- [129] K. Deb, A. Pratap, S. Agarwal ve T. Meyarivan, “A fast and elitist

- multiobjective genetic algorithm: NSGA-II,” *IEEE Trans. Evol. Comput.*, vol. 6, no. 2, pp. 182–197, 2002.
- [130] N. Srinivas ve K. Deb, “Multiobjective Optimization Using Nondominated Sorting in Genetic Algorithms,” *Evol. Comput.*, vol. 2, no. 3, pp. 221–248, 1994.
- [131] E. D. Durmaz ve R. Şahin, “Çok amaçlı tek sıra tesis düzenleme probleminin çözümü için NSGA-II ve hedef programlama yaklasim,” *J. Fac. Eng. Archit. Gazi Univ.*, vol. 32, no. 3, pp. 941–955, 2017.
- [132] G. Xu ve Y. Zhou, “Strouhal numbers in the wake of two inline cylinders,” *Exp. Fluids*, vol. 37, no. 2, pp. 248–256, Aug. 2004.
- [133] L. O. Salviano, D. J. Dezan ve J. I. Yanagihara, “Optimization of winglet-type vortex generator positions and angles in plate-fin compact heat exchanger: Response Surface Methodology and Direct Optimization,” *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 82, pp. 373–387, Mar. 2015.
- [134] C. K. Mangrulkar, A. S. Dhoble, S. G. Chakrabarty ve U. S. Wankhede, “Experimental and CFD prediction of heat transfer and friction factor characteristics in cross flow tube bank with integral splitter plate,” *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 104, pp. 964–978, 2017.
- [135] A. M. Hoke, J. L. , Swofford ve T. D., Clausing, “An Experimental Investigation of the Air-Side Convective Heat Transfer Coefficient on Wire and Tube Refrigerator Condenser Coils,” West Green Street Urbana, Illinois, 1995.
- [136] Y. A. Cengel, *Heat and mass transfer: fundamentals and applications*. McGraw-Hill Higher Education, 2011.

A

DENEYSEL VERİLER

Tablo A.1 Tek sıralı yoğuşturuculara ait deneysel sonuçlar

Serpantin	V (m/s)	T_t (°C)	$T_{w,üst}$ (°C)	T_g (°C)	T_c (°C)	ΔP (Pa)	Q_{zk} (W)
1	0,48	40,0	34,4	22,4	24,7	0,22	127,26
1	1,00	40,3	33,7	22,5	24,5	0,69	172,02
1	1,47	39,8	32,7	22,6	24,1	1,38	194,59
1	1,99	39,8	31,4	22,7	23,7	2,28	218,81
1	0,48	49,6	41,9	22,5	25,8	0,22	194,13
1	1,00	49,8	40,4	22,5	25,2	0,69	261,49
1	1,47	49,7	38,6	22,7	24,9	1,38	312,17
1	1,99	49,8	37,8	22,7	24,5	2,28	353,82
2	0,48	40,2	33,7	22,7	25,1	0,24	140,85
2	1,00	39,8	32,2	22,7	24,2	0,78	192,53
2	1,47	39,6	31,3	22,7	24,0	1,56	226,75
2	1,99	39,7	30,9	22,7	24,1	2,80	265,74
2	0,48	49,1	39,9	22,7	26,8	0,24	206,73
2	1,00	49,4	39,1	22,6	25,5	0,78	297,28
2	1,47	49,4	38,2	22,7	25,2	1,56	354,63
2	1,99	50,0	37,7	22,7	24,8	2,80	415,62
3	0,49	39,7	34,4	22,7	25,6	0,37	177,08
3	0,99	40,1	33,9	22,7	24,6	1,16	242,53
3	1,50	39,4	32,4	22,7	24,1	2,28	269,57
4	0,48	40,8	29,4	22,6	25,8	0,34	150,83
4	0,98	40,2	27,6	22,6	24,7	1,09	195,55
4	1,48	40,1	26,7	22,7	24,2	2,10	223,10
4	2,00	40,8	26,8	22,7	24,0	3,87	246,61
4	0,48	50,3	35,1	22,6	27,1	0,34	226,27
4	0,98	50,5	32,9	22,7	25,8	1,09	301,09
4	1,48	50,2	31,7	22,6	24,9	2,10	342,19
4	2,00	50,9	30,2	22,7	24,6	3,87	397,38

Tablo A.1 Tek sıralı yoğuşturuculara ait deneysel sonuçlar (devamı)

Serpantin	V (m/s)	T_t (°C)	$T_{w,üst}$ (°C)	T_g (°C)	T_c (°C)	ΔP (Pa)	Q_{gk} (W)
5	0,48	39,9	33,3	22,7	26,6	0,32	203,10
5	0,98	39,8	32,7	22,6	25,3	1,16	291,71
5	1,48	40,2	31,6	22,6	24,8	2,21	369,05
5	2,00	40,1	31,2	22,6	24,5	3,58	417,61
6	0,48	50,5	32,4	22,7	25,6	0,24	175,31
6	1,00	50,1	29,5	22,7	25,0	0,63	221,93
6	1,47	50,5	28,2	22,6	24,3	1,32	259,26
6	1,99	50,6	27,5	22,6	24,3	2,38	286,55
7	0,49	40,4	33,4	22,6	25,0	0,21	120,67
7	0,98	40,2	32,3	22,6	24,6	0,60	152,98
7	1,48	40,3	31,6	22,7	24,4	1,13	178,39
7	2,00	40,0	30,6	22,7	24,2	2,02	202,33
7	0,49	49,8	39,5	22,4	25,8	0,21	182,22
7	0,98	50,2	38,0	22,7	25,5	0,60	240,96
7	1,48	50,3	36,5	22,6	25,1	1,13	278,11
7	2,00	50,3	35,2	22,7	24,8	2,02	318,71

Serpantin	N_L	V (m/s)	S_L (mm)	T_1 (°C)	T_2 (°C)	T_3 (°C)	T_4 (°C)	T_g (°C)	$T_{t,ort}$ (°C)	T_c (°C)	Q_1 (W)	Q_2 (W)	Q_3 (W)	Q_4 (W)	Q_T (W)	ΔP (Pa)
1,0	4,0	0,50	37,8	40,1	39,9	40,0	40,1	22,6	40,1	28,9	123,1	88,3	77,7	71,6	360,7	0,69
1,0	4,0	1,00	37,8	40,4	40,2	40,4	40,4	22,6	40,4	27,0	174,5	127,2	113,8	107,9	523,4	2,21
1,0	4,0	1,49	37,8	40,4	40,4	40,5	40,3	22,5	40,4	26,2	195,1	156,1	144,5	140,6	636,3	4,49
1,0	4,0	2,00	37,8	40,3	40,2	40,2	40,1	22,5	40,3	26,0	216,8	189,6	179,8	177,5	763,7	7,79
1,0	4,0	0,49	27,8	40,2	40,3	40,3	40,1	22,4	40,2	28,8	123,1	81,8	69,2	61,6	335,7	0,64
1,0	4,0	1,01	27,8	40,3	40,5	40,4	40,2	22,5	40,3	26,9	174,5	116,2	101,8	96,5	489,0	2,11
1,0	4,0	1,49	27,8	40,5	40,8	40,6	40,4	22,4	40,6	26,2	195,1	148,1	132,5	127,5	603,2	4,26
1,0	4,0	2,00	27,8	40,4	40,5	40,4	40,5	22,4	40,5	25,7	216,8	180,9	170,6	167,4	735,7	7,10
1,0	4,0	0,50	17,8	40,4	40,5	40,6	40,3	22,5	40,4	28,3	123,1	75,8	61,5	56,4	316,8	0,59
1,0	4,0	1,01	17,8	40,3	40,4	40,3	40,4	22,4	40,3	26,6	174,5	93,0	91,1	85,5	444,1	1,92
1,0	4,0	1,50	17,8	40,4	40,4	40,3	40,2	22,5	40,4	25,7	195,1	133,3	113,5	107,7	549,6	3,86
1,0	4,0	2,00	17,8	40,6	40,5	40,6	40,4	22,6	40,6	26,9	216,8	168,1	141,1	135,6	661,6	6,28
1,0	3,0	0,49	37,8	40,3	40,2	40,2	-	22,4	40,2	27,3	123,1	88,3	78,4	-	289,8	0,52
1,0	3,0	1,01	37,8	40,4	40,2	40,4	-	22,6	40,3	25,8	174,5	125,8	116,9	-	417,2	1,73

Tablo A.2 Çok sıralı yoğunlaştırıcılara ait deneysel sonuçlar

Serpantin	N_L	V (m/s)	S_L (mm)	T_1 (°C)	T_2 (°C)	T_3 (°C)	T_4 (°C)	T_g (°C)	T_{korr} (°C)	T_c (°C)	Q_1 (W)	Q_2 (W)	Q_3 (W)	Q_4 (W)	Q_T (W)	ΔP (Pa)
1,0	3,0	1,49	37,8	39,9	40,1	40,2	-	22,5	40,1	25,2	195,1	156,2	144,4	-	495,7	3,49
1,0	3,0	2,01	37,8	40,1	40,1	39,9	-	22,7	40,0	24,7	216,8	180,5	174,1	-	571,4	5,67
1,0	3,0	0,49	27,8	40,2	40,3	40,3	-	22,3	40,3	27,0	123,1	84,2	72,9	-	280,2	0,44
1,0	3,0	1,01	27,8	40,4	40,5	40,4	-	22,5	40,2	25,6	174,5	116,8	105,8	-	397,1	1,62
1,0	3,0	1,50	27,8	40,4	40,4	40,4	-	22,6	40,3	24,9	195,1	145,6	132,5	-	473,2	3,43
1,0	3,0	2,00	27,8	40,6	40,4	40,4	-	22,6	40,1	24,5	216,8	173,8	165,8	-	556,4	5,51
1,0	3,0	0,50	17,8	40,3	40,4	40,6	-	22,6	40,5	26,2	123,1	75,4	62,7	-	261,2	0,42
1,0	3,0	1,00	17,8	40,4	40,4	40,3	-	22,5	40,4	25,1	174,5	109,9	91,7	-	376,1	1,45
1,0	3,0	1,49	17,8	40,1	40,2	40,4	-	22,5	40,0	24,4	195,1	130,5	112,2	-	437,8	3,16
1,0	3,0	2,01	17,8	40,1	39,8	39,8	-	22,6	39,9	24,0	216,8	158,9	148,2	-	523,9	5,39
1,0	2,0	0,51	37,8	40,3	40,2	-	-	22,4	40,2	25,9	123,1	93,6	-	-	216,7	0,37
1,0	2,0	0,99	37,8	40,4	40,2	-	-	22,6	40,3	24,7	174,5	132,3	-	-	306,8	1,13
1,0	2,0	1,51	37,8	40,2	40,3	-	-	22,5	40,2	24,2	195,1	164,9	-	-	360,0	2,44
1,0	2,0	2,01	37,8	40,4	40,2	-	-	22,7	40,3	23,8	216,8	197,0	-	-	413,8	4,01

Tablo A.2 Çok sıralı yoğunlaştırıcılara ait deneysel sonuçlar (devamı)

Serpantin	N_L	V (m/s)	S_L (mm)	T_1 (°C)	T_2 (°C)	T_3 (°C)	T_4 (°C)	T_g (°C)	$T_{t,ort}$ (°C)	T_c (°C)	Q_1 (W)	Q_2 (W)	Q_3 (W)	Q_4 (W)	Q_T (W)	ΔP (Pa)
1,0	2,0	0,50	27,8	40,5	40,3	-	-	22,4	40,4	25,6	123,1	86,6	-	-	209,7	0,32
1,0	2,0	1,00	27,8	40,4	40,5	-	-	22,5	40,5	24,4	174,5	124,8	-	-	299,3	1,05
1,0	2,0	1,51	27,8	40,4	40,4	-	-	22,5	40,4	24,1	195,1	154,8	-	-	349,9	2,36
1,0	2,0	2,00	27,8	40,6	40,4	-	-	22,4	40,5	23,7	216,8	188,7	-	-	405,5	3,80
1,0	2,0	0,49	17,8	40,5	40,2	-	-	22,4	40,3	25,0	123,1	78,0	-	-	201,1	0,27
1,0	2,0	0,99	17,8	40,5	40,4	-	-	22,3	40,5	24,2	174,5	116,5	-	-	291,0	0,95
1,0	2,0	1,50	17,8	40,7	40,7	-	-	22,5	40,8	23,9	195,1	146,1	-	-	341,2	2,18
1,0	2,0	2,00	17,8	40,6	40,6	-	-	22,4	40,6	24,1	216,8	169,1	-	-	385,9	3,69
7,0	4,0	0,50	37,8	40,3	40,3	40,2	40,2	22,5	40,3	29,0	112,2	93,8	83,9	74,8	364,7	0,67
7,0	4,0	0,99	37,8	40,2	40,2	40,1	40,3	22,3	40,2	27,1	145,5	130,2	121,1	111,9	508,7	2,10
7,0	4,0	1,49	37,8	40,3	40,3	40,4	40,3	22,5	40,3	26,6	175,1	156,4	150,0	142,7	624,2	4,39
7,0	4,0	2,01	37,8	40,5	40,5	40,3	40,2	22,6	40,5	26,1	201,6	186,7	177,0	165,2	730,5	7,39
7,0	4,0	0,49	27,8	40,2	40,3	40,2	40,4	22,4	40,3	28,8	112,2	90,5	80,5	66,9	350,1	0,59
7,0	4,0	1,01	27,8	40,5	40,4	40,3	40,3	22,5	40,4	27,2	145,5	123,6	118,9	110,1	498,1	2,08

Tablo A.2 Çok sıralı yoğuşturuculara ait deneysel sonuçlar (devamı)

Serpantin	N_L	V (m/s)	S_L (mm)	T_1 (°C)	T_2 (°C)	T_3 (°C)	T_4 (°C)	T_g (°C)	$T_{t,ort}$ (°C)	T_c (°C)	Q_1 (W)	Q_2 (W)	Q_3 (W)	Q_4 (W)	Q_T (W)	ΔP (Pa)
7,0	4,0	1,49	27,8	40,2	40,2	40,3	40,4	22,6	40,3	26,4	175,1	149,6	142,9	139,8	607,4	3,96
7,0	4,0	2,00	27,8	40,6	40,5	40,4	40,5	22,4	40,5	26,0	201,6	174,8	168,4	169,0	713,8	6,93
7,0	4,0	0,49	17,8	40,3	40,2	40,5	40,4	22,3	40,4	28,7	112,2	85,8	77,4	70,9	346,3	0,56
7,0	4,0	1,00	17,8	40,2	40,5	40,4	40,3	22,4	40,3	27,1	145,5	115,8	110,2	106,7	478,2	1,98
7,0	4,0	1,50	17,8	40,3	40,5	40,4	40,4	22,5	40,4	26,1	175,1	144,9	137,2	134,8	592,0	4,02
7,0	4,0	2,01	17,8	40,5	40,6	40,4	40,3	22,3	40,6	25,7	201,6	167,0	162,0	159,2	689,8	6,98
7,0	3,0	0,49	37,8	40,2	40,3	40,1	-	22,4	40,2	27,4	112,2	104,0	94,7	-	310,9	0,53
7,0	3,0	1,00	37,8	40,2	40,2	40,1	-	22,3	40,2	25,7	145,5	142,7	136,5	-	424,7	1,65
7,0	3,0	1,49	37,8	40,3	40,3	40,4	-	22,8	40,3	25,3	175,1	166,9	161,8	-	503,8	3,29
7,0	3,0	2,00	37,8	40,2	40,5	40,3	-	22,5	40,4	24,7	201,6	193,2	188,4	-	583,2	5,07
7,0	3,0	0,51	27,8	40,1	40,0	40,2	-	22,5	40,1	27,1	112,2	101,0	92,2	-	305,4	0,48
7,0	3,0	1,00	27,8	40,3	40,4	40,2	-	22,3	40,3	25,4	145,5	137,1	134,0	-	416,6	1,59
7,0	3,0	1,49	27,8	40,1	40,2	40,0	-	22,6	40,1	25,1	175,1	161,7	159,4	-	496,2	3,11
7,0	3,0	2,00	27,8	40,3	40,5	40,4	-	22,7	40,4	24,3	201,6	188,3	186,1	-	576,0	5,05

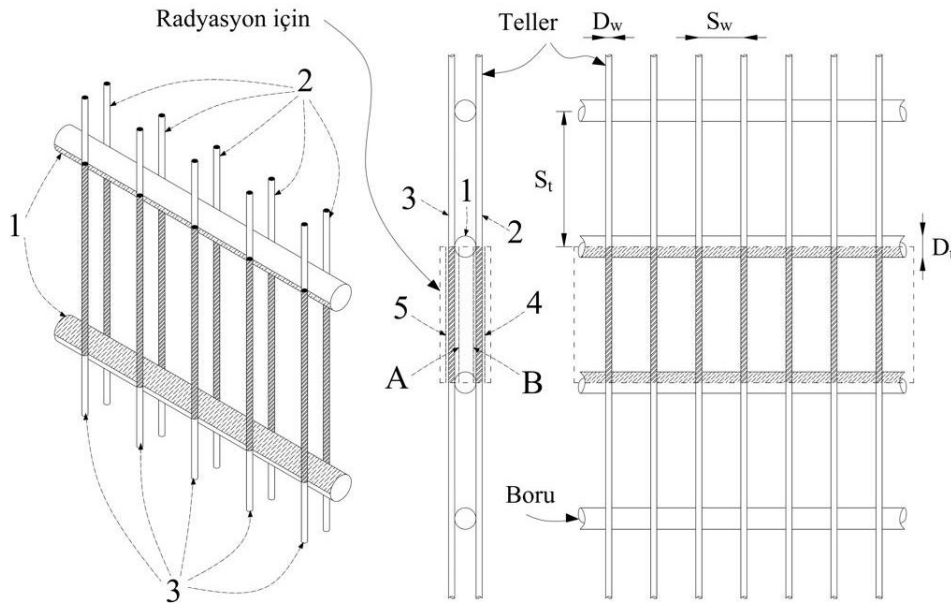
Tablo A.2 Çok sıralı yoğuşturuculara ait deneysel sonuçlar (devamı)

Serpantin	N_L	V (m/s)	S_L (mm)	T_1 (°C)	T_2 (°C)	T_3 (°C)	T_4 (°C)	T_g (°C)	$T_{t,ort}$ (°C)	T_c (°C)	Q_1 (W)	Q_2 (W)	Q_3 (W)	Q_4 (W)	Q_r (W)	ΔP (Pa)
7,0	3,0	0,50	17,8	40,2	40,7	40,5	-	22,6	40,6	26,8	112,2	97,1	89,4	-	298,7	0,42
7,0	3,0	1,01	17,8	40,3	40,5	40,4	-	22,3	40,4	25,1	145,5	130,4	126,5	-	402,4	1,51
7,0	3,0	1,49	17,8	40,2	40,1	40,3	-	22,5	40,4	24,9	175,1	156,8	151,4	-	483,3	2,93
7,0	3,0	1,99	17,8	40,3	40,3	40,4	-	22,6	40,6	24,1	201,6	184,8	178,6	-	565,0	4,95
7,0	2,0	0,50	37,8	40,1	40,2	-	-	22,3	40,2	25,8	112,2	96,2	-	-	208,4	0,35
7,0	2,0	1,00	37,8	40,2	40,2	-	-	22,5	40,2	24,6	145,5	131,7	-	-	277,2	1,23
7,0	2,0	1,50	37,8	40,2	40,3	-	-	22,6	40,3	24,2	175,1	159,8	-	-	334,9	2,31
7,0	2,0	2,01	37,8	40,3	40,4	-	-	22,6	40,4	23,8	201,6	186,1	-	-	387,7	3,62
7,0	2,0	0,51	27,8	40,2	40,3	-	-	22,4	40,2	25,5	112,2	97,2	-	-	209,4	0,35
7,0	2,0	0,99	27,8	40,3	40,4	-	-	22,3	40,3	24,3	145,5	128,4	-	-	273,9	1,06
7,0	2,0	1,50	27,8	40,2	40,2	-	-	22,5	40,2	23,8	175,1	157,6	-	-	332,7	2,21
7,0	2,0	2,01	27,8	40,3	40,3	-	-	22,4	40,3	23,4	201,6	183,2	-	-	384,8	3,57
7,0	2,0	0,49	17,8	40,4	40,6	-	-	22,6	40,5	25,1	112,2	92,9	-	-	205,1	0,34
7,0	2,0	0,98	17,8	40,2	40,5	-	-	22,3	40,4	24,1	145,5	125,2	-	-	270,7	1,02
7,0	2,0	1,50	17,8	40,2	40,1	-	-	22,5	40,1	23,7	175,1	155,3	-	-	330,4	2,14
7,0	2,0	2,00	17,8	40,1	40,3	-	-	22,6	40,2	23,4	201,6	155,3	-	-	356,9	3,46

Tablo A.2 Çok sıralı yoğunlaştırıcılara ait deneysel sonuçlar (devamı)

İŞINIM ISI GEÇİŞ HIZI HESAPLAMALARI

Bu bölümde ışınlama ile ısı geçişini belirlemek için kullanılan görme faktörleri hesaplanmıştır. Görme faktörleri iki boru arası ve bu alanda kalan teller ile ortam arasındaki alan dikkate alınarak hesaplanmıştır. Aşağıdaki şekilde ışınlama hesabı için seçilen bölge ile boru, tel ve sanal yüzeylere verilen notasyonlar görülmektedir. Burada 1 boruyu, 2 ön teli, 3 arka teli, 4 ön tel öncesi ortamı ve 5 arka tel sonrası ortamı ifade eden sanal yüzeyleri ifade etmektedir. A ve B yüzeyleri sanal yüzeyler olup tellerin birbirine bakan yüzeylerde tellere teğet olduğu düşünülen yüzeylerdir. İlgili yüzeyler tellerin ve boruların birbirini ve ortamı görme faktörlerini bulmada kullanılan yardımcı yüzeylerdir.

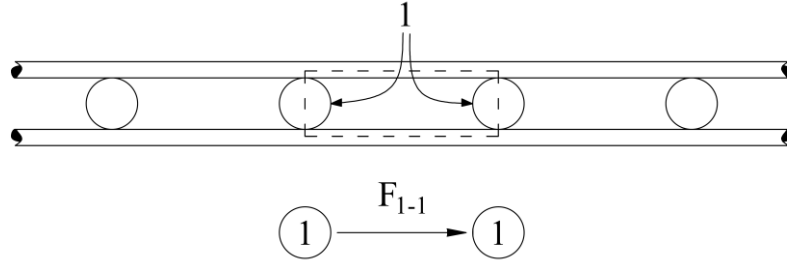


Şekil B.1 Tek sıralı yoğunlaştırıcılarda ışınlama ısı geçişini belirlemek için seçilen alan ve görme faktörleri hesabı için verilen notasyonlar

Görme faktörlerinin hesabına boru ile onu çevreleyen alan ile başlanmıştır. Borunun yüzeyleri görme faktörü toplama kuralından aşağıdaki eşitlik ile ifade edilebilir.

$$F_{11} + F_{12} + F_{13} + F_{14} + F_{15} = 1 \quad (\text{B.1})$$

Yukarıdaki ifade F_{11} faktörü borunun boruyu görme faktörüdür ve aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

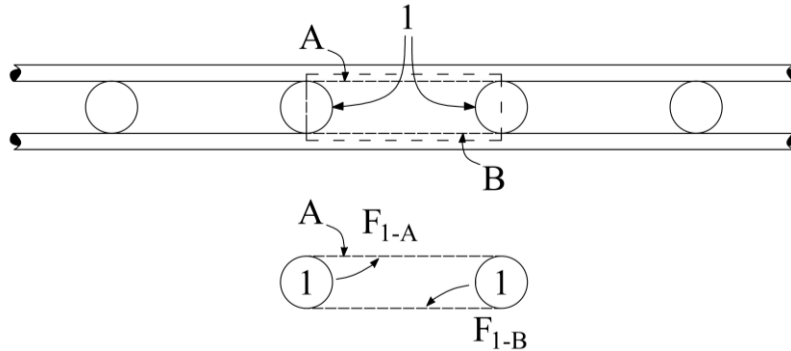


Şekil B.2 Borunun boruyu görme faktörü

$$F_{11} = \frac{1}{\pi} \left(\sqrt{x_t^2 - 1} + \arcsin(1/x_t) - x_t \right) \quad (\text{B.2})$$

$$x_t = 1 + \frac{S_t}{D_t} \quad (\text{B.3})$$

F_{12} ve F_{13} ile F_{14} ve F_{15} görme faktörleri birbirine eşittir. Bu değerleri bulmak için tellerin birbirini ve ortamı gördüğü tellere teğet sanal yüzeyler aracılığıyla çözüm yapılmıştır. Şekil B.3'de borunun telleri görme faktörlerini hesaplamada kullanılan yüzeyleri gösterilmektedir. Bu amaçla ilk olarak borunun A ve B sanal yüzeylerine olan görme faktörlerinin hesaplanması gerekmektedir.



Şekil B.3 Borunun Sanal A ve Sanal B yüzeylerini görme faktörü

Borunun sanal A ve sanal B yüzeyini görmesi kapalılık kuralı ve karşılıklık kurallarına göre aşağıdaki denklemler ile bulunmaktadır.

$$F_{11} + F_{1A} + F_{1B} = 1 \quad (\text{B.4})$$

$$F_{1A} = F_{1B} \quad (\text{B.5})$$

$$F_{1A} A_1 = F_{A1} A_A \quad (\text{B.6})$$

$$A_1 = \pi D_t \frac{L_t}{2} \quad (\text{B.7})$$

$$A_A = S_t L_t \quad (\text{B.8})$$

Boru yüzeyinin telleri ve ortamı görme faktörlerinin toplamı, boru yüzeyinin A ve B yüzeylerini görme faktörüne eşittir.

$$F_{1A} = F_{12} + F_{14} \quad (\text{B.9})$$

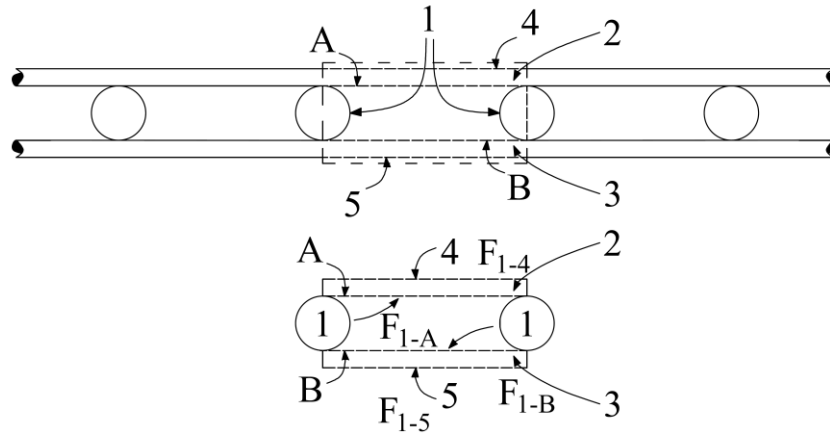
Borunun ön tel ve arka tel ile A ve B sanal yüzeylerini görme değerleri simetri kuralına göre eşittir.

$$F_{1A} = F_{1B} \quad (\text{B.10})$$

$$F_{12} = F_{13} \quad (\text{B.11})$$

$$F_{14} = F_{15} \quad (\text{B.12})$$

Borunun bir yüzeydeki sıra telleri görmesi için öncelikle tellerin birbirine bakan kısımlarında tellere teğet yüzeyleri görmesi gerekmektedir. Daha sonra ilgili sanal yüzeyin teğet olduğu teli görme faktörü bulunarak bu iki görme faktörünün çarpımı borunun telleri görme faktörünü verir.



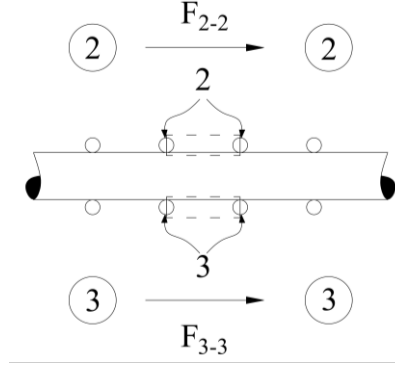
Şekil B.4 Borunun telleri ve Sanal 4 ile Sanal 5 yüzeylerini görme faktörü

Sanal A yüzeyinin sanal B yüzeyini görmesi,

$$2F_{A1} + F_{AB} = 1 \quad (\text{B.13})$$

$$F_{21}A_2 = F_{12}A_1 \quad (\text{B.14})$$

$$A_2 = \pi D_w S_t \frac{N_w}{2} \quad (\text{B.15})$$



Şekil B.5 Aynı sıradaki tellerin birbirini görme faktörleri

Aynı sıradaki teller için toplama kuralından genel denklem aşağıdaki gibi ifade edilmiştir. Simetri kuralı gereği aşağıdaki ifadelerin hepsi 3 notasyonlu teller için de aynıdır.

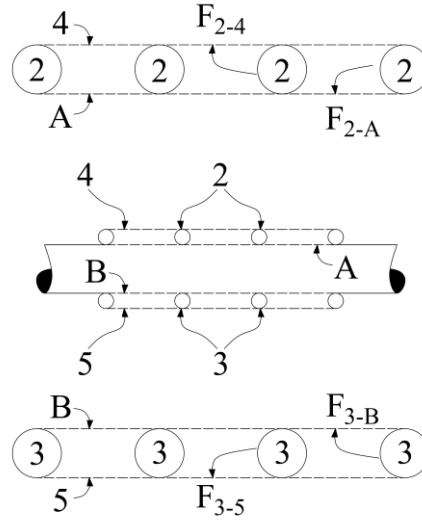
$$F_{21} + F_{22} + F_{23} + F_{24} + F_{25} = 1 \quad (\text{B.16})$$

$$F_{22} + F_{2A} + F_{24} = 1 \quad (\text{B.17})$$

$$F_{22} = \frac{1}{\pi} \left(\sqrt{x_w^2 - 1} + \arcsin(1/x_w) - x_w \right) \quad (\text{B.18})$$

$$x_w = 1 + \frac{S_w}{D_w} \quad (\text{B.19})$$

$$F_{22} = F_{33} \quad (\text{B.20})$$



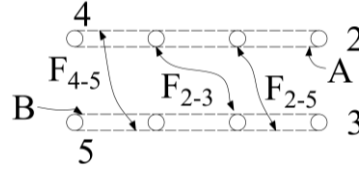
Şekil B.6 Tellerin Sanal A ve Sanal B ile Sanal 4 ve Sanal 5 yüzeylerini görme faktörü

Telin Sanal A ve sanal 4 yüzeyini görmesi,

$$F_{2A} A_2 = F_{A2} A_A \quad (\text{B.21})$$

$$F_{12} = F_{1A} F_{A2} \quad (B.22)$$

$$F_{2A} = F_{B3} \quad (B.23)$$



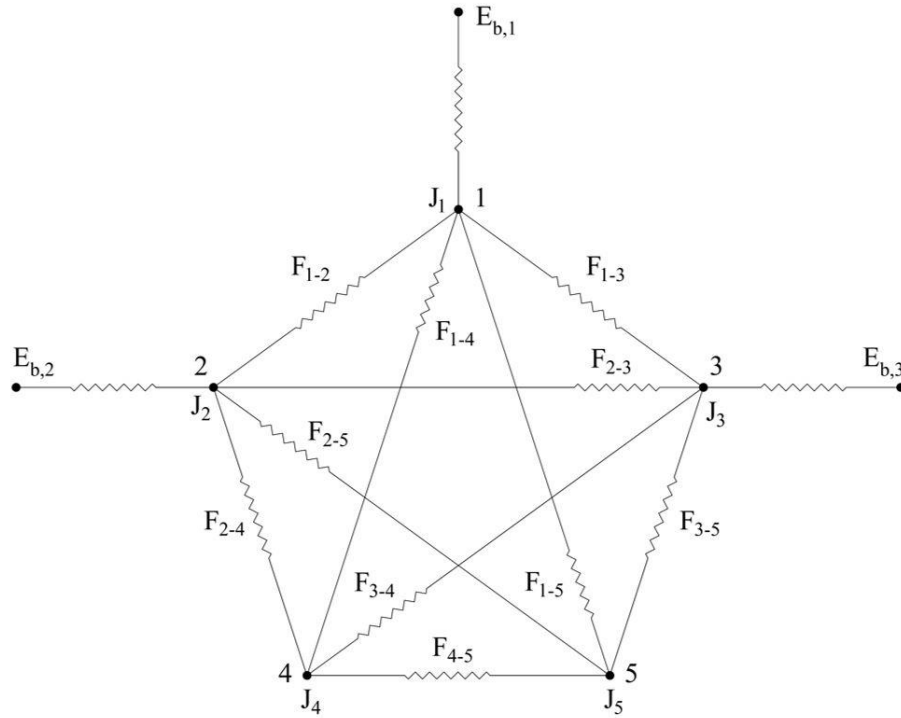
Şekil B.7 Tel sıraların karşı tel sıralarını görme faktörü

Telin karşı teli görmesi,

$$F_{23} = F_{AB} (F_{2A} F_{B3}) \quad (B.24)$$

Işınım ile olan ısı geçişi hesaplamalarında oluşan direnç devresi Şekil B.8’de görülmektedir. Teller ve borular gri cisim, yoğunlaştırucuyu çevreleyen ortam siyah cisim kabul edilerek hesaplamalar yapılmıştır. 4 ve 5 noktalarının radiositi (ışınsallık) değerleri siyah cisim kabulü ile aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$J_4 = J_5 = E_{b,4} = E_{b,5} = \sigma T_g^4 \quad (B.25)$$



Şekil B.8 Tek sıra yoğunlaştırucularda ısı geçişinin direnç devresi

Yapılan görme faktörleri hesapları sonucunda ilgili devredeki tüm görme faktörleri hesaplanmıştır.

Görme faktörleri hesaplandıktan sonra ışınlımla olan ısı geçişi aşağıdaki gibi tel ve boru veya eşdeğer yüzey sıcaklığına göre hesaplanabilmektedir.

$$\dot{Q}_R = (N_t - 1) \varepsilon \sigma \left(F_{ta} A_{t,R} (T_t^4 - T_g^4) + F_{wa} A_{w,R} (T_w^4 - T_g^4) \right) \quad (\text{B.26})$$

$$\dot{Q}_R = (N_t - 1) \varepsilon \sigma \left(F_{ta} A_{t,R} (T_{eq}^4 - T_g^4) + F_{wa} A_{w,R} (T_{eq}^4 - T_g^4) \right) \quad (\text{B.27})$$

Burada F_{ta} ve F_{wa} sırasıyla boruların ve tellerin dış ortamı görme faktörlerini ifade etmektedir.

$$F_{ta} = 2F_{14} \quad (\text{B.28})$$

$$F_{wa} = F_{24} + F_{25} \quad (\text{B.29})$$

İki yaklaşım arasındaki sonuçların %1'in altında olduğu görülmüştür. Eğer eşdeğer yüzey sıcaklığına göre hesaplama yapılırsa ilgili Eşitlik aşağıdaki gibi daha basit bir forma dönüştürülebilir.

$$\dot{Q}_R = \varepsilon_g \sigma A_T (T_{eq}^4 - T_g^4) \quad (\text{B.30})$$

Bu bölümde duyarlılık analizi ve optimizasyon çalışmaları için kullanılan veriler sunulmaktadır. Duyarlılık analizinde hem boru şaşırtmalı hem de boru sıralı dizilimde elde edilen sonuçlar sırasıyla Tablo C.1 ve Tablo C.2 içerisinde verilmiştir. Tablo C.1 içerisindeki veriler $4S_{LT}$ dizaynına göre Latin Hiper Küp(LHK) deney tasarımına uyarınca elde edilirken, Tablo C.2 $4S_{ST}$ Box-Behnken deney tasarımının yöntemi aracılığıyla elde edilmiştir. Tablo C.3 ise tek sıra yoğunlaştırucularda çoklu regresyon analizi için kullanılan Box-Behnken deney tasarım yöntemine göre elde edilen verileri ifade etmektedir.

Tablo C.4 ve C.5 sırasıyla $4S_{LT}$ ve $4S_{ST}$ dizilimlerine göre uygulanan optimizasyon işlemleri için LHK deney tasarım yöntemi uyarınca elde edilen verileri göstermektedir.

Tablo C.6, C.7 ve C.8’de ise sırasıyla tek sıralı yoğunlaştırucularda CYY yaklaşımı üzerinden Nu_w , Nu_t ve f faktör için önerilen 2. dereceden polinomal çoklu regresyon modeline ait katsayılar verilmektedir.

Tablo C.1 4S_{LT} için yapılan duyarlılık analizinde LHK deney tasarımına göre elde edilen veriler

No	D_t	D_w	S_t	S_w	S_s	S_L	V	h_{eq}	h_t	h_w	Nu_{eq}	Nu_t	Nu_w	j	f	JF
1	6,12	1,69	32,50	8,26	0,195	15,22	1,37	80,56	54,90	97,09	9,21	12,44	12,43	0,038	0,372	0,053
2	6,99	1,76	21,87	7,50	0,040	15,66	0,69	41,50	29,67	50,43	5,97	7,69	9,67	0,039	0,288	0,059
3	4,94	1,26	24,53	7,06	0,242	16,11	0,51	58,42	33,85	75,56	5,60	6,20	6,27	0,073	0,519	0,091
4	5,59	1,55	40,92	5,60	0,052	16,55	0,94	58,52	33,59	67,36	5,09	6,95	10,67	0,040	0,295	0,060
5	4,67	1,73	36,04	6,87	0,226	16,99	2,46	128,82	92,51	144,13	11,14	16,02	15,68	0,034	0,409	0,045
6	6,80	1,31	34,27	9,02	0,017	17,44	1,22	47,02	31,77	60,91	6,17	8,01	11,08	0,025	0,195	0,043
7	4,41	1,68	47,12	7,44	0,188	17,88	0,74	70,77	44,16	79,78	5,63	7,21	7,74	0,062	0,477	0,079
8	6,08	1,75	20,54	6,93	0,176	18,32	2,01	108,12	76,23	131,34	13,42	17,17	16,21	0,035	0,380	0,048
9	6,00	1,79	41,80	9,65	0,116	18,77	1,30	67,83	44,28	81,64	7,46	9,85	11,56	0,034	0,308	0,050
10	4,29	1,89	29,84	7,25	0,138	19,21	1,50	93,39	68,37	102,56	8,35	10,88	11,64	0,040	0,383	0,055
11	4,60	1,56	26,30	5,98	0,002	19,65	2,16	89,98	64,02	101,02	7,74	10,91	14,66	0,027	0,253	0,042
12	5,32	1,61	28,07	6,68	0,223	20,09	1,53	98,25	62,89	117,40	9,67	12,40	12,85	0,042	0,423	0,055
13	4,26	1,38	38,70	9,15	0,157	20,54	2,03	101,58	65,40	124,34	8,08	10,31	11,43	0,032	0,337	0,046
14	4,37	1,39	24,97	9,34	0,059	20,98	1,75	80,17	56,73	97,65	7,41	9,19	10,67	0,029	0,263	0,046
15	7,11	1,24	15,22	5,09	0,150	21,42	1,70	100,48	64,92	140,81	15,32	17,09	15,97	0,038	0,387	0,052
16	5,17	1,44	48,45	7,82	0,100	21,87	2,28	99,65	59,87	123,16	8,40	11,47	14,40	0,028	0,297	0,042
17	6,35	1,71	26,74	6,11	0,087	22,31	0,84	63,96	44,18	74,22	7,32	10,39	10,80	0,049	0,365	0,069
18	6,61	1,40	31,61	7,88	0,030	22,75	1,88	71,58	46,57	92,13	8,83	11,41	14,64	0,025	0,233	0,040
19	7,03	1,50	39,15	6,80	0,106	23,20	0,99	63,21	35,11	80,49	7,26	9,14	11,54	0,041	0,344	0,058
20	6,88	1,60	25,85	5,47	0,163	23,64	2,18	114,76	69,54	143,69	13,82	17,72	18,99	0,034	0,379	0,047
21	6,76	1,49	36,49	8,13	0,027	24,08	0,89	44,64	28,04	55,70	5,39	7,03	10,06	0,032	0,246	0,051
22	4,75	1,43	22,75	5,66	0,021	24,53	2,06	95,64	66,07	110,80	8,51	11,63	14,39	0,030	0,283	0,046
23	4,64	1,85	40,03	9,53	0,078	24,97	2,11	90,97	64,73	103,17	8,40	11,12	13,23	0,028	0,277	0,043
24	6,65	1,86	34,72	8,83	0,198	25,41	0,66	56,28	34,36	69,58	7,00	8,46	8,91	0,055	0,444	0,072
25	6,69	1,91	46,23	7,63	0,153	25,85	2,26	102,66	62,62	124,25	11,34	15,52	18,13	0,029	0,357	0,041

Tablo C.1 $4S_{LT}$ için yapılan duyarlılık analizinde LHK deney tasarımına göre elde edilen veriler (devamı)

No	D_t	D_w	S_t	S_w	S_s	S_L	V	h_{eq}	h_t	h_w	Nu_{eq}	Nu_t	Nu_w	j	f	JF
26	5,13	1,99	17,88	9,59	0,141	26,30	1,93	99,89	80,57	115,42	12,12	15,32	13,61	0,033	0,365	0,047
27	4,45	1,94	33,83	9,97	0,166	26,74	1,55	88,97	66,18	99,79	8,49	10,90	10,99	0,037	0,381	0,051
28	4,83	1,95	49,34	6,04	0,055	27,18	0,79	62,78	42,10	67,62	5,42	7,53	9,43	0,051	0,377	0,071
29	6,19	1,53	27,18	8,32	0,201	27,63	1,91	94,43	59,70	124,46	11,60	13,70	14,39	0,032	0,360	0,045
30	5,85	1,29	28,51	7,56	0,236	28,07	2,36	107,28	64,32	147,13	11,94	13,94	15,28	0,029	0,347	0,042
31	5,43	1,83	48,01	5,54	0,239	28,51	1,17	95,88	55,19	108,83	8,38	11,11	12,48	0,053	0,506	0,066
32	6,54	1,57	16,11	7,69	0,005	28,96	2,44	101,03	76,02	129,94	15,14	18,41	17,47	0,027	0,319	0,039
33	5,05	1,98	32,94	6,55	0,014	29,40	1,47	75,02	55,75	81,38	7,24	10,44	13,19	0,033	0,296	0,049
34	5,78	1,37	42,69	7,75	0,245	29,84	1,02	73,73	38,89	96,92	7,07	8,32	9,81	0,047	0,415	0,063
35	5,74	1,64	22,31	6,30	0,160	30,28	1,20	85,81	54,52	104,89	9,52	11,59	12,05	0,046	0,417	0,062
36	6,46	1,42	37,82	9,72	0,103	30,73	2,41	91,46	58,87	124,24	11,11	14,09	15,51	0,024	0,284	0,037
37	4,52	1,35	23,20	7,37	0,119	31,17	1,32	86,43	55,36	107,45	7,85	9,28	9,99	0,042	0,373	0,058
38	6,23	1,90	19,65	8,70	0,210	31,61	0,92	68,86	49,02	85,49	9,50	11,32	10,34	0,048	0,432	0,064
39	5,55	1,66	28,96	9,27	0,134	32,06	0,64	53,56	35,35	65,62	5,98	7,27	7,52	0,054	0,410	0,073
40	6,95	1,30	40,47	7,12	0,144	32,50	2,49	100,99	58,00	140,55	11,64	14,94	17,62	0,026	0,323	0,038
41	5,70	1,74	33,39	5,85	0,074	32,94	2,13	109,97	70,64	127,12	10,69	14,92	17,04	0,033	0,349	0,047
42	7,18	1,63	46,68	7,94	0,109	33,39	1,04	64,49	35,81	82,52	7,51	9,53	11,72	0,040	0,357	0,056
43	5,47	1,88	38,26	5,79	0,024	33,83	0,72	54,44	36,42	59,67	5,10	7,38	9,58	0,049	0,359	0,069
44	4,56	1,51	48,89	6,23	0,191	34,27	1,85	113,32	65,57	132,51	8,41	11,08	13,14	0,039	0,416	0,053
45	6,84	1,23	30,73	8,45	0,112	34,72	1,96	84,23	52,15	122,25	11,43	13,22	14,29	0,028	0,308	0,041
46	6,31	1,34	44,91	9,78	0,033	35,16	1,80	70,36	44,34	93,98	7,88	10,36	12,85	0,025	0,236	0,041
47	5,36	1,28	44,46	5,92	0,036	35,60	0,87	61,68	32,93	74,84	4,95	6,54	9,22	0,046	0,335	0,066
48	5,81	1,27	18,32	5,03	0,214	36,04	1,27	94,77	57,39	123,34	10,62	12,36	12,42	0,048	0,419	0,064
49	5,02	1,33	47,56	8,96	0,248	36,49	2,31	106,83	63,31	140,74	9,09	11,77	13,30	0,030	0,353	0,042
50	5,40	1,32	42,25	5,28	0,011	36,93	1,83	89,43	53,33	105,39	7,12	10,66	14,43	0,032	0,287	0,048

Tablo C.1 4S_{LT} için yapılan duyarlılık analizinde LHK deney tasarımına göre elde edilen veriler (devamı)

No	D_t	D_w	S_t	S_w	S_s	S_L	V	h_{eq}	h_t	h_w	Nu_{eq}	Nu_t	Nu_w	j	f	JF
51	6,57	1,84	43,13	7,31	0,043	37,37	1,35	70,02	43,96	82,11	7,63	10,71	13,66	0,033	0,304	0,050
52	6,73	1,82	36,93	6,17	0,131	37,82	0,59	62,83	35,21	74,96	6,93	8,77	9,36	0,069	0,501	0,087
53	6,50	1,48	15,66	9,08	0,062	38,26	1,65	83,72	63,36	113,35	13,31	15,25	13,17	0,033	0,360	0,046
54	5,97	1,93	31,17	5,22	0,207	38,70	1,25	99,07	64,40	111,82	10,14	14,24	14,07	0,051	0,468	0,066
55	4,86	1,67	20,98	7,18	0,046	39,15	1,40	80,93	58,76	93,95	8,20	10,59	11,56	0,037	0,329	0,054
56	6,42	1,87	24,08	9,46	0,169	39,59	1,42	79,79	55,63	100,12	10,95	13,24	12,86	0,036	0,374	0,050
57	5,28	1,72	43,58	8,64	0,090	40,03	0,61	53,31	30,29	63,57	5,04	5,93	7,41	0,056	0,409	0,075
58	7,14	1,96	21,42	6,42	0,128	40,47	1,98	107,45	75,74	129,23	15,09	20,05	18,65	0,035	0,366	0,049
59	4,90	1,25	18,77	6,49	0,179	40,92	0,56	62,09	37,81	81,17	6,27	6,87	6,73	0,071	0,495	0,090
60	4,71	1,41	16,99	9,40	0,097	41,36	1,73	92,92	68,98	118,77	10,32	12,05	11,05	0,035	0,350	0,049
61	6,27	1,62	45,79	6,36	0,233	41,80	1,15	84,16	45,15	103,07	8,12	10,49	12,26	0,047	0,448	0,062
62	4,48	1,59	19,21	8,58	0,217	42,25	0,77	70,88	51,24	85,07	7,11	8,52	7,46	0,060	0,474	0,077
63	5,21	1,22	17,44	8,77	0,125	42,69	0,54	51,35	34,29	71,96	6,25	6,62	6,11	0,062	0,453	0,080
64	6,38	1,21	39,59	8,07	0,220	43,13	1,12	71,90	38,65	103,26	8,05	9,14	10,33	0,041	0,386	0,057
65	4,33	1,47	25,41	9,84	0,081	43,58	1,09	72,59	49,98	88,80	6,75	8,02	8,27	0,043	0,354	0,060
66	6,16	1,92	16,55	8,01	0,172	44,02	2,34	117,35	90,88	141,63	16,39	20,73	17,40	0,032	0,366	0,045
67	5,62	1,45	49,78	8,20	0,147	44,46	1,45	84,50	47,99	107,84	7,70	10,00	11,67	0,038	0,374	0,052
68	5,93	1,65	45,35	6,61	0,185	44,91	2,23	112,63	66,12	136,58	10,59	14,52	16,87	0,032	0,384	0,045
69	7,07	1,70	35,60	9,91	0,071	45,35	1,07	59,73	37,72	77,45	8,11	9,88	11,11	0,036	0,322	0,052
70	6,04	1,97	20,09	6,99	0,182	45,79	1,58	98,07	71,89	114,91	12,31	16,09	14,71	0,040	0,390	0,055
71	4,79	1,58	29,40	8,39	0,068	46,23	2,08	102,20	68,46	122,96	9,65	12,15	13,24	0,032	0,317	0,046
72	4,98	1,46	32,06	5,35	0,008	46,68	0,97	66,83	43,11	75,72	5,54	7,95	10,13	0,044	0,336	0,064
73	5,89	1,80	27,63	8,51	0,229	47,12	1,63	91,56	60,56	112,62	10,76	13,22	13,46	0,036	0,387	0,050
74	6,92	1,54	35,16	5,16	0,204	47,56	2,39	122,69	70,56	152,40	13,05	18,08	20,11	0,033	0,390	0,045
75	5,66	1,52	44,02	8,89	0,065	48,01	1,60	82,05	49,80	103,37	8,06	10,45	12,21	0,033	0,314	0,049

Tablo C.1 4S_{LT} için yapılan duyarlılık analizinde LHK deney tasarımına göre elde edilen veriler (devamı)

No	D_t	D_w	S_t	S_w	S_s	S_L	V	h_{eq}	h_t	h_w	Nu_{eq}	Nu_t	Nu_w	j	f	JF
76	4,22	1,81	37,37	5,41	0,122	48,45	2,21	129,31	89,53	140,25	10,35	14,00	15,34	0,038	0,385	0,052
77	5,51	1,77	41,36	9,21	0,049	48,89	1,68	80,94	53,23	96,11	8,20	10,87	12,81	0,031	0,291	0,047
78	5,24	1,36	30,28	6,74	0,084	49,34	0,82	69,04	38,86	86,79	6,46	7,55	8,63	0,054	0,416	0,073
79	5,09	1,78	23,64	5,73	0,093	49,78	1,78	107,59	76,30	121,37	10,50	14,40	14,77	0,039	0,366	0,054
80	4,88	1,98	15,84	8,97	0,007	16,01	0,76	39,83	36,54	42,22	4,68	6,61	8,21	0,034	0,255	0,053
81	7,01	2,00	45,96	9,96	0,249	49,57	0,84	61,39	36,13	76,51	7,68	9,38	10,24	0,047	0,431	0,062
82	4,26	1,21	43,23	8,27	0,004	15,21	0,51	36,89	19,67	45,05	2,70	3,11	5,42	0,047	0,285	0,071
83	4,22	1,21	37,85	8,27	0,004	15,32	0,51	36,87	20,30	45,22	2,78	3,17	5,42	0,046	0,286	0,070
84	4,20	1,21	36,28	5,41	0,238	21,80	0,51	70,94	30,84	87,12	4,80	4,80	6,16	0,090	0,616	0,106
85	4,20	1,20	15,00	5,00	0,000	15,00	0,50	42,81	29,06	51,32	3,66	4,52	6,25	0,055	0,356	0,078
86	7,20	1,20	15,00	10,00	0,250	15,00	0,50	41,18	30,45	64,52	7,93	8,12	6,69	0,053	0,423	0,071
87	4,20	2,00	15,00	5,00	0,000	50,00	0,50	52,90	42,43	56,79	5,04	6,60	7,34	0,068	0,462	0,088
88	4,20	2,00	50,00	5,00	0,250	50,00	0,50	77,22	38,57	84,76	6,32	6,00	7,34	0,100	0,683	0,113
89	4,20	2,00	50,00	10,00	0,250	50,00	2,50	119,48	89,32	131,92	10,54	13,90	13,85	0,031	0,388	0,042
90	4,53	1,22	37,50	7,10	0,231	49,40	0,51	62,47	29,76	80,26	4,82	5,00	5,88	0,080	0,554	0,097

No	D_t	D_w	S_t	S_w	S_s	S_L	V	h_{eq}	h_t	h_w	Nu_{eq}	Nu_t	Nu_w	j	f	JF
1	5,7	1,6	32,5	7,5	0,125	32,5	1,5	92,18	64,00	108,98	9,54	13,52	12,71	0,0396	0,3890	0,1018
2	4,2	1,6	15,0	7,5	0,125	32,5	0,5	58,25	48,01	65,46	5,68	7,47	6,01	0,0751	0,490	0,1532
3	4,2	1,6	50,0	7,5	0,125	32,5	0,5	60,44	39,80	66,98	4,54	6,19	6,01	0,0779	0,5213	0,1494
4	7,2	1,6	15,0	7,5	0,125	32,5	0,5	51,11	41,26	63,10	8,64	11,01	8,03	0,0659	0,4374	0,1506
5	7,2	1,6	50,0	7,5	0,125	32,5	0,5	51,78	32,68	62,11	5,78	8,72	8,03	0,0667	0,4779	0,1396
6	4,2	1,6	15,0	7,5	0,125	32,5	2,5	128,70	104,63	146,79	12,54	16,28	14,16	0,0332	0,3638	0,0912
7	4,2	1,6	50,0	7,5	0,125	32,5	2,5	127,86	93,77	141,68	9,61	14,59	14,16	0,0330	0,3619	0,0911
8	7,2	1,6	15,0	7,5	0,125	32,5	2,5	117,32	90,68	152,48	19,84	24,19	18,92	0,0302	0,3779	0,0800
9	7,2	1,6	50,0	7,5	0,125	32,5	2,5	107,75	71,32	133,71	12,03	19,03	18,92	0,0278	0,3464	0,0802
10	5,7	1,6	32,5	7,5	0	15,0	0,5	38,79	32,31	41,91	4,02	6,82	7,08	0,0500	0,3333	0,1500
11	5,7	1,6	32,5	7,5	0	50,0	0,5	46,46	35,36	52,07	4,81	7,47	7,08	0,0599	0,4095	0,1462
12	5,7	1,6	32,5	7,5	0	15,0	2,5	95,84	77,75	106,20	9,92	16,42	16,68	0,0247	0,2597	0,0951
13	5,7	1,6	32,5	7,5	0	50,0	2,5	103,35	76,94	119,25	10,70	16,25	16,68	0,0266	0,3001	0,0888
14	5,7	1,6	32,5	7,5	0,25	15,0	0,5	58,64	40,33	68,48	6,07	8,52	7,08	0,0756	0,5457	0,1385
15	5,7	1,6	32,5	7,5	0,25	50,0	0,5	59,81	38,64	71,37	6,19	8,16	7,08	0,0771	0,5363	0,1437
16	5,7	1,6	32,5	7,5	0,25	15,0	2,5	124,30	91,27	145,62	12,87	19,28	16,68	0,0320	0,4036	0,0794
17	5,7	1,6	32,5	7,5	0,25	50,0	2,5	119,65	80,37	145,26	12,39	16,97	16,68	0,0308	0,3765	0,0819
18	4,2	1,2	32,5	7,5	0	32,5	1,5	80,41	64,73	89,12	6,15	10,07	9,85	0,0345	0,2854	0,1211
19	4,2	2,0	32,5	7,5	0	32,5	1,5	76,19	68,14	78,57	6,86	10,60	11,57	0,0327	0,2941	0,1113
20	7,2	1,2	32,5	7,5	0	32,5	1,5	72,83	53,41	92,32	9,86	14,25	13,16	0,0313	0,3134	0,0998
21	7,2	2,0	32,5	7,5	0	32,5	1,5	76,06	60,48	84,60	9,94	16,13	15,46	0,0327	0,3262	0,1002
22	4,2	1,2	32,5	7,5	0,25	32,5	1,5	104,16	68,13	127,14	7,96	10,60	9,85	0,0447	0,4224	0,1059
23	4,2	2,0	32,5	7,5	0,25	32,5	1,5	103,83	81,18	111,49	9,34	12,63	11,57	0,0446	0,4508	0,0989
24	7,2	1,2	32,5	7,5	0,25	32,5	1,5	85,44	55,45	118,47	11,57	14,79	13,16	0,0367	0,3988	0,0920
25	7,2	2,0	32,5	7,5	0,25	32,5	1,5	91,70	64,25	107,99	11,98	17,14	15,46	0,0394	0,4165	0,0946

Tablo C.2 4S_{ST} için yapılan duyarlılık analizinde Box-Behnken deney tasarımına göre elde edilen veriler

Tablo C.2 4S_{ST} için yapılan duyarlılık analizinde Box-Behnken deney tasarımına göre elde edilen veriler (devamı)

No	D_t	D_w	S_t	S_w	S_s	S_L	V	h_{eq}	h_t	h_w	Nu_{eq}	Nu_t	Nu_w	j	f	JF
26	5,7	1,2	15,0	7,5	0,125	15,0	1,5	94,78	74,00	123,01	12,79	15,63	11,61	0,0407	0,4064	0,1002
27	5,7	1,2	15,0	7,5	0,125	50,0	1,5	93,45	69,67	126,01	12,61	14,71	11,61	0,0401	0,4091	0,0981
28	5,7	2,0	15,0	7,5	0,125	15,0	1,5	95,27	82,91	105,03	12,49	17,51	13,63	0,0409	0,3534	0,1158
29	5,7	2,0	15,0	7,5	0,125	50,0	1,5	94,74	74,52	110,99	12,42	15,74	13,63	0,0407	0,3719	0,1094
30	5,7	1,2	50,0	7,5	0,125	15,0	1,5	87,49	60,41	107,08	7,72	12,76	11,61	0,0376	0,3551	0,1059
31	5,7	1,2	50,0	7,5	0,125	50,0	1,5	91,18	56,96	117,68	8,05	12,03	11,61	0,0392	0,3833	0,1022
32	5,7	2,0	50,0	7,5	0,125	15,0	1,5	89,88	73,89	95,65	8,83	15,61	13,63	0,0386	0,3578	0,1079
33	5,7	2,0	50,0	7,5	0,125	50,0	1,5	95,90	67,54	106,95	9,42	14,26	13,63	0,0412	0,4091	0,1007
34	5,7	1,6	15,0	5,0	0	32,5	1,5	95,10	76,80	107,15	11,02	16,22	14,47	0,0409	0,3563	0,1147
35	5,7	1,6	15,0	10,0	0	32,5	1,5	82,73	74,92	92,87	11,73	15,82	11,59	0,0355	0,3933	0,0904
36	5,7	1,6	50,0	5,0	0	32,5	1,5	89,01	65,39	96,40	7,32	13,81	14,47	0,0382	0,3444	0,1110
37	5,7	1,6	50,0	10,0	0	32,5	1,5	68,50	55,93	75,80	6,79	11,81	11,59	0,0294	0,2581	0,1140
38	5,7	1,6	15,0	5,0	0,25	32,5	1,5	109,18	79,29	129,50	12,65	16,74	14,47	0,0469	0,3913	0,1199
39	5,7	1,6	15,0	10,0	0,25	32,5	1,5	90,03	72,18	114,00	12,76	15,24	11,59	0,0387	0,4122	0,0938
40	5,7	1,6	50,0	5,0	0,25	32,5	1,5	112,33	69,73	127,97	9,24	14,73	14,47	0,0483	0,4780	0,1010
41	5,7	1,6	50,0	10,0	0,25	32,5	1,5	86,88	59,28	105,69	8,62	12,52	11,59	0,0373	0,3963	0,0942
42	4,2	1,6	32,5	5,0	0,125	15,0	1,5	113,68	87,24	121,27	8,58	13,58	12,28	0,0488	0,4240	0,1152
43	4,2	1,6	32,5	5,0	0,125	50,0	1,5	114,77	81,13	124,70	8,66	12,63	12,28	0,0493	0,4284	0,1151
44	4,2	1,6	32,5	10,0	0,125	15,0	1,5	88,15	71,95	97,13	7,67	11,20	9,83	0,0379	0,3559	0,1064
45	4,2	1,6	32,5	10,0	0,125	50,0	1,5	94,37	72,56	106,94	8,21	11,29	9,83	0,0405	0,3858	0,1051
46	7,2	1,6	32,5	5,0	0,125	15,0	1,5	105,93	76,47	121,19	11,93	20,40	16,41	0,0455	0,4059	0,1121
47	7,2	1,6	32,5	5,0	0,125	50,0	1,5	100,53	63,81	119,64	11,32	17,02	16,41	0,0432	0,4074	0,1060
48	7,2	1,6	32,5	10,0	0,125	15,0	1,5	81,84	62,24	101,23	11,80	16,60	13,14	0,0352	0,3851	0,0913
49	7,2	1,6	32,5	10,0	0,125	50,0	1,5	79,44	56,90	102,00	11,45	15,18	13,14	0,0341	0,3710	0,0920
50	5,7	1,2	32,5	5,0	0,125	32,5	0,5	65,37	35,57	80,96	5,82	7,51	7,36	0,0843	0,5613	0,1501

Tablo C.2 4S_{ST} için yapılan duyarlılık analizinde Box-Behnken deney tasarımına göre elde edilen veriler (devamı)

No	D_t	D_w	S_t	S_w	S_s	S_L	V	h_{eq}	h_t	h_w	Nu_{eq}	Nu_t	Nu_w	j	f	JF
51	5,7	2,0	32,5	5,0	0,125	32,5	0,5	66,03	42,88	72,82	6,52	9,06	8,65	0,0851	0,5754	0,1479
52	5,7	1,2	32,5	10,0	0,125	32,5	0,5	50,42	34,17	66,49	5,79	7,22	5,90	0,0650	0,4693	0,1385
53	5,7	2,0	32,5	10,0	0,125	32,5	0,5	48,97	38,38	54,67	5,67	8,11	6,93	0,0631	0,4536	0,1391
54	5,7	1,2	32,5	5,0	0,125	32,5	2,5	130,88	79,66	163,28	11,66	16,82	17,35	0,0337	0,3805	0,0887
55	5,7	2,0	32,5	5,0	0,125	32,5	2,5	141,41	107,05	152,99	13,96	22,61	20,38	0,0365	0,4068	0,0896
56	5,7	1,2	32,5	10,0	0,125	32,5	2,5	107,16	77,71	143,21	12,31	16,41	13,90	0,0276	0,3391	0,0815
57	5,7	2,0	32,5	10,0	0,125	32,5	2,5	110,67	87,69	125,45	12,82	18,52	16,32	0,0285	0,3461	0,0824
58	7,2	2,0	18	5,0	0	50	0,5	54,69	44,48	60,32	7,565	11,87	9,803	0,0705	0,4334	0,1626
59	7,2	2,0	15	10,0	0,25	50	0,5	49,30	39,07	62,59	8,834	10,42	7,852	0,0635	0,4569	0,1391
60	7,2	2,0	50	5,0	0,25	50	2,5	139,15	94,78	156,38	14,40	25,28	23,11	0,0359	0,4467	0,0803

Tablo C.3 Tek sıra yoğuşturucular için yapılan duyarlılık analizinde Box-Behnken deney tasarımına göre elde edilen veriler

No	S_s	D_t	D_w	S_t	S_w	V	Nu_{eq}	Nu_t	Nu_w	f
1	0,000	4,20	1,60	50,00	7,50	1,50	5,17	9,80	6,10	0,3145
2	0,125	4,20	1,60	32,50	10,00	2,50	8,39	14,19	10,63	0,3643
3	0,125	5,70	1,20	15,00	7,50	0,50	3,42	8,12	7,45	0,4919
4	0,125	7,20	1,60	32,50	5,00	0,50	4,36	9,38	6,92	0,5342
5	0,000	5,70	2,00	32,50	7,50	0,50	3,76	7,21	4,97	0,4335
6	0,125	4,20	1,20	32,50	10,00	1,50	5,45	10,09	8,00	0,4026
7	0,250	4,20	1,60	50,00	7,50	1,50	6,84	10,93	7,73	0,4192
8	0,000	5,70	1,60	15,00	5,00	1,50	6,44	15,44	10,95	0,3512
9	0,125	5,70	2,00	15,00	7,50	2,50	10,81	20,27	16,17	0,3429
10	0,125	5,70	1,20	50,00	7,50	2,50	6,67	14,39	9,89	0,3578
11	0,125	4,20	1,60	32,50	5,00	2,50	9,43	15,96	10,99	0,3877
12	0,250	5,70	1,20	32,50	7,50	0,50	3,47	6,93	6,04	0,5290
13	0,000	5,70	1,60	50,00	5,00	1,50	5,70	12,72	7,20	0,3415
14	0,125	5,70	1,60	32,50	7,50	1,50	6,65	12,56	9,56	0,3917
15	0,250	5,70	1,60	15,00	5,00	1,50	7,59	16,24	12,45	0,3744
16	0,125	5,70	1,60	32,50	7,50	1,50	6,65	12,56	9,56	0,3917
17	0,125	4,20	1,60	32,50	10,00	0,50	4,03	6,08	5,05	0,5374
18	0,250	5,70	2,00	32,50	7,50	0,50	4,91	8,04	6,26	0,5249
19	0,250	5,70	1,20	32,50	7,50	2,50	6,82	14,84	11,70	0,3558
20	0,125	4,20	1,20	32,50	5,00	1,50	6,00	10,76	7,84	0,4281
21	0,125	7,20	1,60	32,50	10,00	0,50	3,87	8,19	7,04	0,4771
22	0,125	5,70	2,00	15,00	7,50	0,50	4,85	8,87	7,25	0,4644
23	0,250	5,70	2,00	32,50	7,50	2,50	10,08	18,39	12,94	0,3686
24	0,125	4,20	2,00	32,50	5,00	1,50	8,86	13,46	9,70	0,4355
25	0,000	5,70	1,20	32,50	7,50	0,50	2,83	6,69	5,19	0,4640
26	0,125	4,20	1,60	32,50	5,00	0,50	4,50	6,49	5,19	0,5898
27	0,125	5,70	2,00	50,00	7,50	2,50	9,94	17,64	11,70	0,3638
28	0,125	5,70	2,00	50,00	7,50	0,50	4,75	7,57	5,61	0,5245
29	0,125	4,20	2,00	32,50	10,00	1,50	7,61	11,00	8,72	0,3898
30	0,000	5,70	1,20	32,50	7,50	2,50	5,81	15,26	10,72	0,3185
31	0,000	5,70	2,00	32,50	7,50	2,50	8,62	16,96	11,33	0,3170
32	0,250	7,20	1,60	50,00	7,50	1,50	6,38	13,31	9,46	0,3856
33	0,125	5,70	1,60	32,50	7,50	1,50	6,65	12,56	9,56	0,3917
34	0,125	5,70	1,20	15,00	7,50	2,50	7,29	17,63	15,77	0,3678
35	0,125	5,70	1,60	32,50	7,50	1,50	6,65	12,56	9,56	0,3917
36	0,125	7,20	1,60	32,50	5,00	2,50	9,09	20,40	14,17	0,3707
37	0,250	5,70	1,60	50,00	10,00	1,50	6,34	11,52	8,49	0,3842
38	0,125	5,70	1,20	50,00	7,50	0,50	3,41	6,64	5,18	0,5473
39	0,125	7,20	2,00	32,50	5,00	1,50	8,63	19,21	12,03	0,4091
40	0,250	7,20	1,60	15,00	7,50	1,50	6,95	16,75	14,67	0,3781
41	0,125	7,20	1,20	32,50	5,00	1,50	5,64	14,05	10,92	0,3958
42	0,125	5,70	1,60	32,50	7,50	1,50	6,65	12,56	9,56	0,3917

Tablo C.3 Tek sıra yoğuşturucular için yapılan duyarlılık analizinde Box-Behnken deney tasarımına göre elde edilen veriler (devamı)

No	S_s	D_t	D_w	S_t	S_w	V	Nu_{eq}	Nu_t	Nu_w	f
43	0,000	5,70	1,60	50,00	10,00	1,50	5,00	11,46	7,23	0,3131
44	0,000	5,70	1,60	15,00	10,00	1,50	5,83	14,24	11,45	0,3718
45	0,250	5,70	1,60	50,00	5,00	1,50	7,33	13,89	8,92	0,4497
46	0,250	5,70	1,60	15,00	10,00	1,50	6,78	13,81	12,23	0,3818
47	0,125	5,70	1,60	32,50	7,50	1,50	6,65	12,56	9,56	0,3917
48	0,000	7,20	1,60	50,00	7,50	1,50	5,24	13,21	8,25	0,3223
49	0,000	4,20	1,60	15,00	7,50	1,50	5,67	11,40	8,41	0,3582
50	0,125	7,20	2,00	32,50	10,00	1,50	7,34	14,39	11,32	0,3717
51	0,125	7,20	1,20	32,50	10,00	1,50	5,12	13,33	11,56	0,3721
52	0,125	7,20	1,60	32,50	10,00	2,50	8,03	17,54	14,29	0,3453
53	0,250	4,20	1,60	15,00	7,50	1,50	6,98	11,97	9,79	0,3905
54	0,000	7,20	1,60	15,00	7,50	1,50	6,34	16,85	13,96	0,3773

Tablo C.4 4S_{LT} için yapılan optimizasyon için LHK deney tasarımına göre elde edilen veriler

No	S_t	S_w	S_s	S_L	Nu_{eq}	Nu_t	Nu_w	j	f	JF
1	32,5	8,92	0,045	15,7	7,10	9,29	12,45	0,0241	0,2099	0,0406
2	38,1	9,64	0,065	17,1	7,39	9,64	12,15	0,0257	0,2362	0,0416
3	21,3	5,56	0,195	18,5	11,11	13,74	14,49	0,0383	0,4012	0,0519
4	17,1	6,28	0,055	19,9	9,83	12,38	13,94	0,0306	0,2959	0,0459
5	46,5	6,76	0,135	21,3	8,18	10,83	13,61	0,0335	0,3504	0,0475
6	22,7	9,88	0,245	22,7	10,72	12,60	12,05	0,0317	0,3535	0,0448
7	19,9	4,84	0,165	24,1	11,40	14,41	15,15	0,0402	0,4021	0,0544
8	42,3	5,80	0,175	25,5	8,94	11,75	14,29	0,0371	0,4003	0,0504
9	49,3	5,08	0,225	26,9	8,93	12,23	14,91	0,0399	0,4385	0,0525
10	18,5	4,12	0,015	28,3	10,25	14,95	15,95	0,0371	0,3484	0,0527
11	35,3	7,72	0,185	29,7	9,31	11,65	13,04	0,0339	0,3670	0,0473
12	45,1	6,04	0,075	31,1	8,12	10,92	14,11	0,0340	0,3368	0,0488
13	29,7	4,36	0,115	32,5	9,97	13,67	15,66	0,0407	0,3983	0,0553
14	40,9	8,20	0,205	33,9	8,96	11,36	12,79	0,0334	0,3689	0,0466
15	47,9	7,24	0,095	35,3	8,16	10,86	13,31	0,0330	0,3383	0,0474
16	33,9	9,40	0,035	36,7	8,03	10,47	12,25	0,0272	0,2520	0,0431
17	39,5	7,96	0,105	38,1	8,70	11,22	12,92	0,0324	0,3347	0,0467
18	28,3	9,16	0,025	39,5	8,42	10,88	12,35	0,0272	0,2563	0,0428
19	15,7	7,00	0,155	40,9	12,19	14,46	13,46	0,0357	0,3733	0,0496
20	25,5	6,52	0,235	42,3	10,50	12,86	13,77	0,0365	0,3857	0,0501
21	26,9	8,44	0,085	43,7	9,83	12,02	12,68	0,0321	0,3259	0,0466
22	43,7	4,60	0,005	45,1	7,57	12,04	15,39	0,0336	0,3181	0,0493
23	24,1	7,48	0,125	46,5	10,47	12,78	13,18	0,0343	0,3553	0,0484
24	36,7	5,32	0,215	47,9	9,56	12,78	14,69	0,0391	0,4106	0,0526
25	31,1	8,68	0,145	49,3	9,71	12,04	12,56	0,0328	0,3488	0,0466

Tablo C.5 4S_{ST} İçin Yapılan Optimizasyon için LHK Deney Tasarımına göre Elde Edilen Veriler

No	S_t	S_w	S_s	S_L	Nu_{eq}	Nu_t	Nu_w	j	f	JF
1	43,7	7,00	0,05	15,70	7,41	12,92	13,46	0,0295	0,2653	0,0459
2	47,9	7,96	0,07	17,10	7,68	13,00	12,92	0,0303	0,2810	0,0462
3	24,1	5,08	0,20	18,50	11,38	16,29	14,91	0,0419	0,4274	0,0556
4	28,3	4,36	0,06	19,90	9,75	16,35	15,66	0,0393	0,3692	0,0547
5	31,1	9,40	0,14	21,30	10,07	14,06	12,25	0,0332	0,3574	0,0468
6	49,3	5,32	0,25	22,70	9,32	14,66	14,69	0,0412	0,4459	0,0539
7	19,9	4,84	0,17	24,10	11,91	16,59	15,15	0,0420	0,4123	0,0564
8	25,5	8,68	0,18	25,50	10,94	14,55	12,56	0,0348	0,3839	0,0479
9	21,3	9,88	0,23	26,90	11,68	14,64	12,05	0,0339	0,3896	0,0464
10	15,7	4,60	0,02	28,30	11,25	16,89	15,39	0,0375	0,3555	0,0529
11	36,7	7,48	0,19	29,70	9,68	13,95	13,18	0,0360	0,3880	0,0493
12	26,9	9,16	0,08	31,10	10,20	13,81	12,35	0,0324	0,3370	0,0466
13	17,1	6,52	0,12	32,50	12,11	15,82	13,77	0,0372	0,3852	0,0512
14	39,5	8,44	0,21	33,90	9,56	13,73	12,68	0,0350	0,3837	0,0482
15	33,9	9,64	0,10	35,30	9,69	13,59	12,15	0,0326	0,3384	0,0467
16	46,5	7,24	0,04	36,70	7,81	12,89	13,31	0,0314	0,2919	0,0473
17	38,1	8,20	0,11	38,10	9,35	13,62	12,79	0,0342	0,3533	0,0484
18	45,1	6,28	0,03	39,50	7,73	13,12	13,94	0,0320	0,2956	0,0480
19	32,5	4,12	0,16	40,90	10,52	16,32	15,95	0,0446	0,4317	0,0590
20	29,7	5,80	0,24	42,30	10,38	14,38	14,29	0,0391	0,4081	0,0527
21	40,9	6,04	0,09	43,70	9,20	13,80	14,11	0,0375	0,3731	0,0521
22	18,5	8,92	0,01	45,10	10,73	14,60	12,45	0,0308	0,3468	0,0438
23	35,3	5,56	0,13	46,50	9,87	14,26	14,49	0,0395	0,4009	0,0535
24	22,7	7,72	0,22	47,90	11,28	14,45	13,04	0,0359	0,3880	0,0492
25	42,3	6,76	0,15	49,30	9,25	13,48	13,61	0,0369	0,3892	0,0505

Tablo C.6 Nu_w için 2. dereceden polinomal çoklu regresyon modeline ait katsayılar

Term	Coef	SECoef	T	P
Constant	6,64812	0,07006	94,888	0
S_s	0,58597	0,03503	16,727	0
D_t	-0,08092	0,03503	-2,31	0,029
D_w	1,17617	0,03503	33,575	0
S_t	-0,25825	0,03503	-7,372	0
S_w	-0,4078	0,03503	-11,641	0
V	2,20016	0,03503	62,805	0
$S_s * S_s$	-0,52562	0,05351	-9,823	0
$D_t * D_t$	-0,00754	0,05351	-0,141	0,889
$D_w * D_w$	0,01618	0,05351	0,302	0,765
$S_t * S_t$	0,0809	0,05351	1,512	0,143
$S_w * S_w$	0,17212	0,05351	3,217	0,003
$V * V$	-0,35242	0,05351	-6,586	0
$S_s * D_t$	-0,15323	0,06068	-2,525	0,018
$S_s * D_w$	0,12082	0,06068	1,991	0,057
$S_s * S_t$	0,10985	0,0429	2,56	0,017
$S_s * S_w$	-0,0613	0,06068	-1,01	0,322
$S_s * V$	0,08285	0,06068	1,365	0,184
$D_t * D_w$	0,02232	0,06068	0,368	0,716
$D_t * S_t$	-0,12943	0,06068	-2,133	0,043
$D_t * S_w$	-0,0027	0,0429	-0,063	0,95
$D_t * V$	-0,04893	0,06068	-0,806	0,427
$D_w * S_t$	-0,04096	0,06068	-0,675	0,506
$D_w * S_w$	-0,18401	0,06068	-3,033	0,005
$D_w * V$	0,48191	0,0429	11,232	0
$S_t * S_w$	-0,0326	0,06068	-0,537	0,596
$S_t * V$	-0,1732	0,06068	-2,855	0,008
$S_w * V$	-0,14214	0,06068	-2,343	0,027
$S = 0,171618$ PRESS = 4,00076				
$R^2 = \%99,56$ $R^2_{pred} = \%97,71$ $R^2_{adj} = \%99,11$				

Tablo C.7 Nu_t için 2. dereceden polinomal çoklu regresyon modeline ait katsayılar

Term	Coef	SECoef	T	P
Constant	12,5633	0,14284	87,954	0
S_s	0,2236	0,07142	3,131	0,004
D_t	1,8543	0,07142	25,963	0
D_w	1,0106	0,07142	14,149	0
S_t	-1,1887	0,07142	-16,643	0
S_w	-0,9228	0,07142	-12,921	0
V	4,72	0,07142	66,088	0
$S_s * S_s$	-0,1645	0,1091	-1,507	0,144
$D_t * D_t$	-0,0575	0,1091	-0,527	0,603
$D_w * D_w$	0,1999	0,1091	1,832	0,078
$S_t * S_t$	0,6861	0,1091	6,289	0
$S_w * S_w$	0,5813	0,1091	5,328	0
$V * V$	-0,8093	0,1091	-7,418	0
$S_s * D_t$	-0,2123	0,1237	-1,716	0,098
$S_s * D_w$	0,3058	0,1237	2,472	0,02
$S_s * S_t$	0,1016	0,08747	1,162	0,256
$S_s * S_w$	-0,2907	0,1237	-2,35	0,027
$S_s * V$	-0,0062	0,1237	-0,05	0,96
$D_t * D_w$	0,3254	0,1237	2,631	0,014
$D_t * S_t$	-0,5571	0,1237	-4,504	0
$D_t * S_w$	-0,2672	0,08747	-3,055	0,005
$D_t * V$	0,3493	0,1237	2,823	0,009
$D_w * S_t$	0,0995	0,1237	0,804	0,428
$D_w * S_w$	-0,7355	0,1237	-5,946	0
$D_w * V$	0,4895	0,08747	5,596	0
$S_t * S_w$	0	0,1237	0	1
$S_t * V$	-0,386	0,1237	-3,12	0,004
$S_w * V$	-0,378	0,1237	-3,056	0,005
S = 0,349887 PRESS = 16,6292				
R ² = %99,57 R ² pred = %97,75 R ² adj = %99,12				

Tablo C.8 f için 2. dereceden polinomal çoklu regresyon modeline ait katsayılar

Term	Coef	SECoef	T	P
Constant	0,391691	0,00578	67,765	0
S_s	0,027453	0,00289	9,499	0
D_t	-0,011597	0,00289	-4,013	0
D_w	-0,00354	0,00289	-1,225	0,232
S_t	0,003053	0,00289	1,056	0,301
S_w	-0,014859	0,00289	-5,142	0
V	-0,0774	0,00289	-26,781	0
$S_s * S_s$	-0,023196	0,004415	-5,254	0
$D_t * D_t$	0,004263	0,004415	0,966	0,343
$D_w * D_w$	-0,002384	0,004415	-0,54	0,594
$S_t * S_t$	-0,004551	0,004415	-1,031	0,312
$S_w * S_w$	0,00703	0,004415	1,592	0,123
$V * V$	0,047812	0,004415	10,83	0
$S_s * D_t$	-0,009103	0,005006	-1,819	0,081
$S_s * D_w$	0,005083	0,005006	1,015	0,319
$S_s * S_t$	0,017551	0,00354	4,958	0
$S_s * S_w$	-0,006282	0,005006	-1,255	0,221
$S_s * V$	-0,008445	0,005006	-1,687	0,104
$D_t * D_w$	0,002298	0,005006	0,459	0,65
$D_t * S_t$	-0,004063	0,005006	-0,812	0,424
$D_t * S_w$	0,000203	0,00354	0,057	0,955
$D_t * V$	0,010004	0,005006	1,999	0,056
$D_w * S_t$	0,004465	0,005006	0,892	0,381
$D_w * S_w$	-0,004229	0,005006	-0,845	0,406
$D_w * V$	0,004823	0,00354	1,363	0,185
$S_t * S_w$	-0,015238	0,005006	-3,044	0,005
$S_t * V$	-0,013077	0,005006	-2,612	0,015
$S_w * V$	0,007584	0,005006	1,515	0,142
S = 0,0141584 PRESS = 0,0272297				
R ² = 97,76% R ² pred = 88,31% R ² adj = 95,44%				

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

İletişim Bilgisi: alisangonul@gmail.com

Makaleler

- [1] **A. Gönül**, Ö. Ağra, Ö. Atayılmaz, H. Demir, M. K. Sevindir ve İ. Teke, “Experimental and numerical investigation of air-side forced convection on wire-on-tube condensers,” *Int. J. Therm. Sci.*, vol. 151, May 2020, 106241.
- [2] **A. Gönül** ve Ö. Ağra, “Investigation of Heat Transfer in Tandem and Staggered Arrangement of Wires on Single Layer Wire-on-Tube Condensers in Cross-Flow,” *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 158, September 2020, 119923.

Konferans Bildirileri

- [1] **A. Gönül**, M. K. Sevindir, Ö. Ağra, H. Demir, Ş. Ö. Atayılmaz ve İ. Teke “Farklı Tel Çaplarına Göre Telli Tip Yoğuşturucularda Hava Tarafı Isı Geçişinin Sayısal İncelenmesi,” in IV. Uluslararası Katılımlı Anadolu Enerji Sempozyumu, 2018, pp. 1–10.
- [2] **A. Gönül**, Ö. Ağra, E. Demirel, B. Güneri, E. Geze, H. Demir, Ş. Ö. Atayılmaz, M. K. Sevindir ve İ. Teke, “The Determination of the Best CFD Models For Calculation Of Air-Side Heat Transfer on Wire-on-Tube Type Condensers,” in *3rd International Conference on Advances in Mechanical Engineering Istanbul (ICAME 2017) 2017*, İstanbul.

Projeler

- [1] Ö. Ağra, **A. Gönül**, Ö. Atayılmaz, H. Demir, M. K. Sevindir ve İ. Teke,, Yükseköğretim Kurumları Destekli Proje, Endüstriyel Soğutucularda Kullanılan Telli Yoğuşturucuların Performanslarının İyileştirilmesi, 2017 – 2019.