

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ENERJİ ETKİN LEVHALI ISI DEĞİŞTİRİCİLERİN SAYISAL
YÖNTEMLERLE TASARIMI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ali ÇELİK

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Enerji Bilim Dalı

NİSAN 2025

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ENERJİ ETKİN LEVHALI ISI DEĞİŞTİRİCİLERİN SAYISAL
YÖNTEMLERLE TASARIMI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ali ÇELİK

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Enerji Bilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Hasan KÜÇÜK

Ortak Danışman: Doç. Dr. Murat ÜNVERDİ

NİSAN 2025

Ali ÇELİK tarafından hazırlanan “ENERJİ ETKİN LEVHALI ISI DEĞİŞTİRİCİLERİN SAYISAL YÖNTEMLERLE TASARIMI” adlı tez çalışması 22.04.2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği/~~oy çokluğu~~ ile Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı **Enerji** Bilim Dalı’nda Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

Jüri Başkanı :	Prof. Dr. Ahmet KOLİP Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi	
Jüri Üyesi :	Doç. Dr. Hasan KÜÇÜK (Danışman) Sakarya Üniversitesi	
Jüri Üyesi :	Prof. Dr. Ekrem BÜYÜKKAYA Sakarya Üniversitesi	



ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Eğitim-Öğretim Yönetmeliğine ve Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesine uygun olarak hazırlamış olduğum “ENERJİ ETKİN LEVHALI ISI DEĞİŞTİRİCİLERİN SAYISAL YÖNTEMLERLE TASARIMI” başlıklı tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın tüm aşamalarında yukarıda belirtilen yönetmelik ve yönergeye uygun davrandığımı, tezin içerdiği yenilik ve sonuçları başka bir yerden almadığımı, tezde kullandığım eserleri usulüne göre kaynak olarak gösterdiğimi, bu tezi başka bir bilim kuruluna akademik amaç ve unvan almak amacıyla vermediğimi ve 20.04.2016 tarihli Resmi Gazete’de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince Sakarya Üniversitesi’nin abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Enstitü tarafından belirlenmiş ölçütlere uygun rapor alındığını, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun ortaya çıkması halinde doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi beyan ederim.

(22/04/2025).

Ali Çelik





Anneme, babama, kardeşlerime ve babaanneme...



TEŐEKKÖR

Bu tez çalışmamda bana bilgi ve tecrübeleriyle yol gösteren ve aynı zamanda mesleki bilgi birikimimi geliştirmemde yardımcı olan danışmanım Doç. Dr. Hasan KÜÇÜK'e ve ortak danışmanım Doç.Dr. Murat ÜNVERDİ'ye, değerli arkadaşlarım Metehan ONAT'a ve Onur TANELİ'ye, hayatım boyunca ve bu tez çalışmam sırasında bana güvenen, maddi ve manevi destek olan aileme teşekkür ederim.



Ali elik



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ	v
TEŞEKKÜR	ix
İÇİNDEKİLER	xi
KISALTMALAR	xiii
SİMGELER	xv
TABLO LİSTESİ	xix
ŞEKİL LİSTESİ	xxiii
ÖZET	xxv
SUMMARY	xxvii
1. GİRİŞ	1
2. TAGUCHİ DENEYSEL TASARIM YÖNTEMİ	9
2.1. Tasarım Değişkenleri ve Ortogonal Dizi Seçimi	12
3. SAYISAL ANALİZ	15
3.1. Taguchi $L_{16}(4^4)$ OD'ye Göre Tasarlanan LID Modellerin Ağ Yapıları	17
3.2. Sayısal Çözüm Sonuçları	22
3.3. Taguchi $L_{16}(4^4)$ OD'ye Göre Tasarlanan LID Modellerinin HAD Sonuçları	25
4. ARAŞTIRMA VE SONUÇLAR	31
4.1. Performans Parametreleri	31
4.1.1. Temiz hava tarafında geri kazanılan ısı güç- Q_{gk}	31
4.1.2. Duyulur ısı etkenlik- ε	34
4.1.3. Akışın sağlanması için gerekli fan gücü- $P_{h,t+e}$	36
4.1.4. Hidrodinamik-ısı büyüme oranı-HIBO	39
4.1.5. Isı etkenlik ve hidrodinamik-ısı büyüme oranı- $\varepsilon \times \text{HIBO}$	41
4.2. Performans Parametrelerinin SGO'ya göre ANOM ve ANOVA Analizleri ..	44
4.2.1. Geri kazanılan ısı güç- Q_{gk}	45
4.2.2. Duyulur ısı etkenlik- ε	47
4.2.3. Akışın sağlanması için gerekli fan gücü- $P_{h,t+e}$	50
4.2.4. Hidrodinamik-ısı büyüme oranı-HIBO	52
4.2.5. Isı etkenlik ve hidrodinamik-ısı büyüme oranı- $\varepsilon \times \text{HIBO}$	54
4.3. En Uygun Tasarımlı LID Modellerinin HAD Sonuçları	57
4.4. En Uygun Tasarımlı LID Modellerinin Performans Sonuçları	59
4.5. En Uygun Tasarımlı LID Modellerinin Performans Sonuçları ile Taguchi Tahminlerinin Karşılaştırılması	63
4.6. En Uygun Tasarımlı LID Modellerin Parametrik Performans Sonuçları	64
4.6.1. Temiz hava tarafında geri kazanılan ısı güç- Q_{gk}	64
4.6.2. Duyulur ısı etkenlik- ε	66
4.6.3. Akışın sağlanması için gerekli fan gücü- $P_{h,t+e}$	68
4.6.4. Hidrodinamik-ısı büyüme oranı-HIBO	70
4.6.5. Isı etkenlik ve hidrodinamik-ısı büyüme oranı- $\varepsilon \times \text{HIBO}$	72
4.7. En Uygun Tasarımlı LID Modellerinde Basınç, Hız ve Sıcaklık Dağılımları ..	74

4.7.1. Geri kazanılan ısı güç- Q_{gk} ve duyulur ısı etkenlik- ε bakımından en uygun tasarımı LID modelleri	74
4.7.2. Toplam fan gücü- $P_{h,t+e}$ ve hidro dinamik-ısı büyüme oranı-HIBO bakımından en uygun tasarımı LID modelleri	78
4.7.3. Isı etkenlik ve hidro dinamik-ısı büyüme oranı- $\varepsilon \times HIBO$ bakımından en uygun tasarımı LID modelleri	80
4.8. Kanal Simetri Düzleminde Kanal Orta Kesiti Boyunca Basınç ve Hız Profili Değişimleri	83
5. HAD SONUÇLARININ ε-NTU YÖNTEMİ İLE KARŞILAŞTIRILMASI ..	93
5.1. ε -NTU Yöntemi	93
6. DEĞERLENDİRME	97
KAYNAKLAR	101
ÖZGEÇMİŞ	105



KISALTMALAR

ABS	: Akrilonitril Bütadiyen Stiren
AEM	: Akış Etken Model
ANOM	: Ortalamaların Analizi (Analysis of Means)
ANOVA	: Varyans Analizi (Analysis of Variance)
CA	: Selüloz Asetat
ED	: Etki Derecesi
HAD	: Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
HIBO	: Hidrodinamik-Isıl Büyütme Oranı
IEM	: Isıl Etken Model
KGG	: Kanal Giriş Geometrisi
LID	: Levhalı Isı Değiştirici
MCA	: Modifiye Selüloz Asetat
MN	: Model Numarası
NTU	: Transfer Birimi Sayısı (Number of Transfer Units)
OD	: Ortogonal Dizi
SGO	: Sinyal/Gürültü Oranı



SİMGELER

$\epsilon \times \text{HIBO}$	: Duyulur ısı etkenlik ve hidrodinamik-ısıl büyütme oranının çarpımı
$\Delta \epsilon_{\text{sbt.1a}}$	: $\epsilon_{\text{sbt.1a}}$ ile ϵ_{HAD} arasındaki yüzde fark [%]
$\Delta \epsilon_{\text{sbt.ys}}$	: $\epsilon_{\text{sbt.ys}}$ ile ϵ_{HAD} arasındaki yüzde fark [%]
$\Delta \epsilon_{\text{Steph}}$	: ϵ_{Steph} ile ϵ_{HAD} arasındaki yüzde fark [%]
ϵ_{HAD}	: HAD sonuçları ile hesaplanan duyulur ısı etkenlik
Δp	: Basınç düşümü [Pa]
$\epsilon_{\text{sbt.1a}}$	: Sabit ısı akısı Nu sayısı ile hesaplanan duyulur ısı etkenlik
$\epsilon_{\text{sbt.ys}}$	: Sabit yüzey sıcaklığı Nu sayısı ile hesaplanan duyulur ısı etkenlik
ϵ_{Steph}	: Stephan-Nu bağıntısından hesaplanan duyulur ısı etkenlik
ΔT	: Sıcaklık farkı [K, °C]
$\overline{\Delta T}_{\text{e,g-ç}}$	: Egzoz tarafı giriş-çıkış sıcaklık farkının, ortalamadan farkı [%]
$\overline{\Delta T}_{\text{t,g-ç}}$	: Temiz taraf giriş-çıkış sıcaklık farkının, ortalamadan farkı [%]
$\overline{\Delta P}_{\text{h,t+e}}$	: Akışın devamı için gerekli toplam fan gücünün, ortalamadan farkı [%]
$\overline{\Delta Q}_{\text{gk,t}}$	: Geri kazanılan ısıl gücün, ortalamadan farkı [%]
$\overline{\Delta p}_{\text{e,g-ç}}$	: Egzoz tarafı giriş-çıkış basınç farkının, ortalamadan farkı [%]
$\overline{\Delta p}_{\text{t,g-ç}}$	: Temiz taraf giriş-çıkış basınç farkının, ortalamadan farkı [%]
$\dot{m}_{\text{sıc.}}$	: Sıcak havanın kütleli debisi [kg/s]
$\dot{m}_{\text{soğ.}}$	: Soğuk havanın kütleli debisi [kg/s]
$\overline{\Delta \text{HIBO}}$	: Hidrodinamik-ısıl büyütme oranının, ortalamadan farkı [%]
$\overline{\Delta \epsilon}$	: Duyulur ısı etkenliğinin, ortalamadan farkı [%]
$\overline{\Delta \epsilon \times \text{HIBO}}$	: Duyulur ısı etkenlik ve hidrodinamik-ısıl büyütme oranı çarpımının, ortalamadan farkı [%]
C^*	: Isıl kapasitelerin oranı
$\dot{E}$	: Güç [W]
x_*	: Boyutsuz uzunluk
$\bar{y}$	: Gözlem değerlerinin ortalaması
∇	: Hacimsel debi [m^3/s , m^3/h]
A_c	: Akış en-kesit alanı [m^2]
A_s	: Isı değiştiricinin toplam ısı geçişi yüzey alanı [m^2]

C	: Çan ağzı kanal giriş geometrisi
C_{mak}	: Büyük ısıl kapasite [W/K]
C_{min}	: Küçük ısıl kapasite [W/K]
C_p	: Sabit basınçta özgül ısı [J/kgK]
C_{p,sıc.}	: Sıcak akışkanın özgül ısısı [J/kgK]
C_{p,soğ.}	: Soğuk akışkan özgül ısısı [J/kgK]
C_{sıc.}	: Sıcak akışkanın ısıl kapasitesi [kW/K]
C_{soğ.}	: Soğuk akışkanın ısıl kapasitesi [kW/K]
D	: Dairesel kanal giriş geometrisi
D_h	: Hidrolik çap [m]
h	: LID kanallarının yüksekliği, ısı taşınım katsayısı [m, W/m ² K]
H	: LID yüksekliği [m]
h_e	: Egzoz hava kanalındaki ortalama ısı taşınım katsayısı [W/m ² K]
h_t	: Temiz hava kanalındaki ortalama ısı taşınım katsayısı [W/m ² K]
I	: Türbülans yoğunluğu
k-ε	: Türbülans modeli
k	: Isı iletim katsayısı [W/mK]
K	: Küt kanal giriş geometrisi
L	: Levha boyutu, akış doğrultusundaki kanal uzunluğu [m]
L₁₆ (4⁴)	: Taguchi'nin dörder alt seviyeli dört parametre için ortogonal dizisi
L_h	: Hidrodinamik giriş uzunluğu [m]
L_t	: Isıl giriş uzunluğu [m]
n	: Bir denemede test sayısı
N_{egz}	: Egzoz tarafı kanal sayısı [adet]
N_{tem}	: Temiz taraf kanal sayısı [adet]
N_{top}	: Toplam kanal sayısı [adet]
Nu	: Nusselt sayısı
P	: Parametre
P_{h,t+e}	: Akışın devamı için gerekli toplam fan gücü [W]
Pr	: Prandtl sayısı
Q_{gk}	: Temiz hava tarafında geri kazanılan ısıl güç [W]
Q_{gk,mak}	: Temiz hava tarafında geri kazanılabilecek maksimum ısıl güç [W]
Re	: Reynolds sayısı
S	: Seviye
t	: Levha kalınlığı [m]

T_e	: Egzoz tarafı hava sıcaklığı [K, °C]
T_t	: Temiz taraf hava sıcaklığı [K, °C]
u	: Ortalama hava akış hızı [m/s]
U	: Üçgen kanal giriş geometrisi, toplam ısı geçiş katsayısı [W/m ² K]
U_f	: Sürtünme hızı [m/s]
v	: Sayısal çözüm bölgesi girişindeki ortalama hava akış hızı [m/s]
y	: İlk hücre yüksekliği [m]
y^+	: Boyutsuz mesafe
y_i	: Performans karakteristiğinin i. gözlem değeri
β	: Kompaktlık [m ² /m ³]
ε	: Duyulur ısıl etkenlik
μ	: Dinamik viskozite [Pa·s]
ρ	: Yoğunluk [kg/m ³]
τ_w	: Duvar kayma gerilmesi [kg/(ms ²)]
S^2	: Gözlem değerlerinin varyansı
c_f	: Yüzey sürtünme katsayısı



TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 1.1. Küçük kapasiteli levhalı ısı değiştiricilerin geometrik özellikleri.	6
Tablo 1.2. Levhalı ısı değiştiricilerde işletme şartları ve performans sonuçları.	7
Tablo 1.3. Levhalı ısı değiştiricilerde akış özellikleri ve performans sonuçları.	7
Tablo 2.1. Taguchi Ortogonal Dizi tablosu [16].	11
Tablo 2.2. Taguchi L_{16} (4^4) ortogonal dizisine göre deney tasarım tablosu [18].	12
Tablo 2.3. L_{16} (4^4)'e dizisine göre levhalı ısı değiştiricilerin tasarım parametreleri.	13
Tablo 3.1. Levhalı ısı değiştiricilerin yapısal özellikleri ve işletme koşulları.....	17
Tablo 3.2. Temiz havanın ve kirli egzoz havasının termofiziksel özellikleri.....	18
Tablo 3.3. Levhalı ısı değiştiricilerin yapısal özellikleri ve akış karakteristikleri. ...	18
Tablo 3.4. Küt KGG'li LID'de basınç düşümüne göre ağ yapısı ve eleman sayısından bağımsızlık ($V=200 \text{ m}^3/\text{h}$, $h=2 \text{ mm}$, $L=190 \text{ mm}$).....	23
Tablo 3.5. Küt KGG'li LID'de sıcaklık farkına göre ağ yapısı ve eleman sayısından bağımsızlık ($V=200 \text{ m}^3/\text{h}$, $h=2 \text{ mm}$, $L=190 \text{ mm}$).....	24
Tablo 3.6. Üçgen KGG'li LID'de basınç düşümüne göre ağ yapısı ve eleman sayısından bağımsızlık ($V=200 \text{ m}^3/\text{h}$, $h=2 \text{ mm}$, $L=190 \text{ mm}$).....	24
Tablo 3.7. Üçgen KGG'li LID'de sıcaklık farkına göre ağ yapısı ve eleman sayısından bağımsızlık ($V=200 \text{ m}^3/\text{h}$, $h=2 \text{ mm}$, $L=190 \text{ mm}$).....	24
Tablo 3.8. Dairesel KGG'li LID'de basınç düşümüne göre ağ yapısı ve eleman sayısından bağımsızlık ($V=200 \text{ m}^3/\text{h}$, $h=2 \text{ mm}$, $L=190 \text{ mm}$).....	24
Tablo 3.9. Dairesel KGG'li LID'de sıcaklık farkına göre ağ yapısı ve eleman sayısından bağımsızlık ($V=200 \text{ m}^3/\text{h}$, $h=2 \text{ mm}$, $L=190 \text{ mm}$).....	25
Tablo 3.10. Çan ağzı KGG'li LID'de basınç düşümüne göre ağ yapısı ve eleman sayısından bağımsızlık ($V=200 \text{ m}^3/\text{h}$, $h=2 \text{ mm}$, $L=190 \text{ mm}$).....	25
Tablo 3.11. Çan ağzı KGG'li LID'de sıcaklık farkına göre ağ yapısı ve eleman sayısından bağımsızlık ($V=200 \text{ m}^3/\text{h}$, $h=2 \text{ mm}$, $L=190 \text{ mm}$).....	25
Tablo 3.12. L_{16} 'daki küt KGG'li LID'lerin basınç düşümlerinin ağ yapısı ve eleman sayısından bağımsızlığı.	26
Tablo 3.13. L_{16} 'daki üçgen KGG'li LID'lerin basınç düşümlerinin ağ yapısı ve eleman sayısından bağımsızlığı.	27
Tablo 3.14. L_{16} 'daki dairesele KGG'li LID'lerin basınç düşümlerinin ağ yapısı ve eleman sayısından bağımsızlığı.....	27
Tablo 3.15. L_{16} 'daki çan ağzı KGG'li LID'lerin basınç düşümlerinin ağ yapısı ve eleman sayısından bağımsızlığı.....	28
Tablo 3.16. L_{16} 'daki küt KGG'li LID'lerin sıcaklık farklarının ağ yapısı ve eleman sayısından bağımsızlığı.	28
Tablo 3.17. L_{16} 'daki üçgen KGG'li LID'lerin sıcaklık farklarının ağ yapısı ve eleman sayısından bağımsızlığı.	29
Tablo 3.18. L_{16} 'daki dairesele KGG'li LID'lerin sıcaklık farklarının ağ yapısı ve eleman sayısından bağımsızlığı.....	29
Tablo 3.19. L_{16} 'daki çan ağzı KGG'li LID'lerin sıcaklık farklarının ağ yapısı ve eleman sayısından bağımsızlığı.....	30

Tablo 4.1. L_{16} 'daki küt KGG'li LID'lerde geri kazanılan ısı güçlerinin ağ yapısı eleman sayısından bağımsızlığı.	32
Tablo 4.2. L_{16} 'daki üçgen KGG'li LID'lerde geri kazanılan ısı güçlerinin ağ yapısı eleman sayısından bağımsızlığı.	32
Tablo 4.3. L_{16} 'daki dairesel KGG'li LID'lerde geri kazanılan ısı güçlerinin ağ yapısı eleman sayısından bağımsızlığı.	33
Tablo 4.4. L_{16} 'daki çan ağzı KGG'li LID'lerde geri kazanılan ısı güçlerinin ağ yapısı eleman sayısından bağımsızlığı.	33
Tablo 4.5. L_{16} 'daki küt KGG'li LID'lerde duyulur ısı etkenliğinin ağ yapısı eleman sayısından bağımsızlığı.	34
Tablo 4.6. L_{16} 'daki üçgen KGG'li LID'lerde duyulur ısı etkenliğinin ağ yapısı eleman sayısından bağımsızlığı.	35
Tablo 4.7. L_{16} 'daki dairesel KGG'li LID'lerde duyulur ısı etkenliğinin ağ yapısı eleman sayısından bağımsızlığı.	35
Tablo 4.8. L_{16} 'daki çan ağzı KGG'li LID'lerde duyulur ısı etkenliğinin ağ yapısı eleman sayısından bağımsızlığı.	36
Tablo 4.9. L_{16} 'daki küt KGG'li LID'lerde fan güçlerinin ağ yapısı eleman sayısından bağımsızlığı.	37
Tablo 4.10. L_{16} 'daki üçgen KGG'li LID'lerde fan güçlerinin ağ yapısı eleman sayısından bağımsızlığı.	37
Tablo 4.11. L_{16} 'daki dairesel KGG'li LID'lerde fan güçlerinin ağ yapısı eleman sayısından bağımsızlığı.	38
Tablo 4.12. L_{16} 'daki çan ağzı KGG'li LID'lerde fan güçlerinin ağ yapısı eleman sayısından bağımsızlığı.	38
Tablo 4.13. L_{16} 'daki küt KGG'li LID'lerde HIBO'nun ağ yapısı eleman sayısından bağımsızlığı.	39
Tablo 4.14. L_{16} 'daki üçgen KGG'li LID'lerde HIBO'nun ağ yapısı eleman sayısından bağımsızlığı.	40
Tablo 4.15. L_{16} 'daki dairesel KGG'li LID'lerde HIBO'nun ağ yapısı eleman sayısından bağımsızlığı.	40
Tablo 4.16. L_{16} 'daki çan ağzı KGG'li LID'lerde HIBO'nun ağ yapısı eleman sayısından bağımsızlığı.	41
Tablo 4.17. L_{16} 'daki küt KGG'li LID'lerin $\varepsilon \times \text{HIBO}$ sonuçlarının ağ yapısı eleman sayısından bağımsızlığı.	42
Tablo 4.18. L_{16} 'daki üçgen KGG'li LID'lerin $\varepsilon \times \text{HIBO}$ sonuçlarının ağ yapısı eleman sayısından bağımsızlığı.	42
Tablo 4.19. L_{16} 'daki dairesel KGG'li LID'lerin $\varepsilon \times \text{HIBO}$ sonuçlarının ağ yapısı eleman sayısından bağımsızlığı.	43
Tablo 4.20. L_{16} 'daki çan ağzı KGG'li LID'lerin $\varepsilon \times \text{HIBO}$ sonuçlarının ağ yapısı eleman sayısından bağımsızlığı.	43
Tablo 4.21. LID modellerinde geri kazanılan ısı güçleri ve “en büyük en iyi” kategorisine göre SGO'lar.	45
Tablo 4.22. Temiz hava tarafında geri kazanılan ısı güçleri için ANOM sonuçları.	46
Tablo 4.23. Temiz hava tarafında geri kazanılan ısı güçleri için ANOVA sonuçları.	47
Tablo 4.24. LID modellerinin duyulur ısı etkenlikleri ve “en büyük en iyi” kategorisine göre SGO'lar.	48
Tablo 4.25. Duyulur ısı etkenlikleri için ANOM sonuçları.	48
Tablo 4.26. Duyulur ısı etkenlikleri için ANOVA sonuçları.	49
Tablo 4.27. LID modellerinin toplam fan güçleri ve “en küçük en iyi” kategorisine göre SGO'lar.	50

Tablo 4.28. Toplam fan güçleri için ANOM sonuçları.	51
Tablo 4.29. Toplam fan gücü için ANOVA sonuçları.	52
Tablo 4.30. Hidrodinamik-ısıl büyütme oranları-HIBO ve “en büyük en iyi” kategorisine göre SGO’lar.....	52
Tablo 4.31. Hidrodinamik-ısıl büyütme oranları için ANOM sonuçları.	53
Tablo 4.32. Hidrodinamik-ısıl büyütme oranları için ANOVA sonuçları.....	54
Tablo 4.33. $\varepsilon \times \text{HIBO}$ sonuçları ve “en büyük en iyi” kategorisine göre SGO’lar.	55
Tablo 4.34. $\varepsilon \times \text{HIBO}$ için ANOM sonuçları.	55
Tablo 4.35. $\varepsilon \times \text{HIBO}$ için ANOVA sonuçları.	56
Tablo 4.36. En uygun tasarımı LID modellerinde basınç düşümlerinin ağ yapısı ve eleman sayısından bağımsızlığı.....	58
Tablo 4.37. En uygun tasarımı LID modellerinde sıcaklık farkına göre ağ yapısı ve eleman sayısından bağımsızlığı.....	58
Tablo 4.38. En uygun tasarımı LID modellerinin temiz hava tarafında geri kazanılan ısıl güçlerinin- Q_{gk} ağ yapısı eleman sayısından bağımsızlığı.	59
Tablo 4.39. En uygun tasarımı LID modellerinin duyulur ısıl etkenliklerinin- ε ağ yapısı eleman sayısından bağımsızlığı.	60
Tablo 4.40. En uygun tasarımı LID modellerinin fan güçlerinin- $P_{h,t+e}$ ağ yapısı eleman sayısından bağımsızlığı.	60
Tablo 4.41. En uygun tasarımı LID modellerinin hidrodinamik-ısıl büyütme oranlarının-HIBO ağ yapısı eleman sayısından bağımsızlığı.....	61
Tablo 4.42. En uygun tasarımı LID modellerinin $\varepsilon \times \text{HIBO}$ sonuçlarının ağ yapısı eleman sayısından bağımsızlığı.....	61
Tablo 4.43. En uygun tasarımı LID modellerinin hedef performans parametreleri için HAD sonuçları ve Taguchi tahminleri.	64
Tablo 5.1. HAD ve analitik yöntemlerle hesaplanan duyulur ısıl etkenliklerin karşılaştırılması.	96
Tablo 5.2. En uygun tasarımı LID’lerin HAD ve analitik yöntemlerle hesaplanan duyulur ısıl etkenliklerinin karşılaştırılması.	96



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1. Zhang ve ark. [4]'nın levhalı ısı değiştirici modeli.	2
Şekil 1.2. Al-Waked ve ark. [6] levhalı ısı değiştirici modeli.	3
Şekil 3.1. Levhalı ısı değiştiricinin ve sayısal çözüm bölgesinin şematik resmi.	15
Şekil 3.2. Eliptik Çan Ağzı Nozul Geometrisi için “Üç Yay Yaklaşımı” [19].	16
Şekil 3.3. Dairesel KGG'li temiz ve egzoz havası kanallarında sınır tabakalı ağ yapısı örneği.	19
Şekil 3.4. Düz levha üzerindeki akışta hız sınır tabakasının gelişimi ve akış doğrultusunda gelişen farklı akış rejimleri [22].	20
Şekil 3.5. Levhalı ısı değiştirici kanal giriş geometrileri: (a) küt-K, (b) üçgen-U, (c) dairesele-D, (d) çan ağzı-C (bell mouth).	22
Şekil 4.1. Temiz hava tarafında geri kazanılan ısı güçleri için SGO'lar.	46
Şekil 4.2. Duyulur ısıl etkenlikler için SGO'lar.	49
Şekil 4.3. Toplam fan güçleri için SGO'lar.	51
Şekil 4.4. Hidrodinamik-ısıl büyütme oranları için SGO'lar.	53
Şekil 4.5. $\varepsilon \times \text{HIBO}$ sonuçları için SGO'lar.	56
Şekil 4.6. Q_{gk} ve ε için en uygun tasarımı LID modelinde (K-20-10-240 ve K-32-10- 240) geri kazanılan ısıl gücün hacimsel debiyle değişimi.	65
Şekil 4.7. $P_{h,t+e}$ ve HIBO için en uygun tasarımı LID modelinde (D-20-25-100) geri kazanılan ısıl gücün hacimsel debiyle değişimi.	65
Şekil 4.8. $\varepsilon \times \text{HIBO}$ için en uygun tasarımı LID modelinde (D-20-25-120) geri kazanılan ısıl gücün hacimsel debiyle değişimi.	66
Şekil 4.9. Q_{gk} ve ε için en uygun tasarımı LID modelinde (K-20-10-240 ve K-32-10- 240) ısıl etkenliğin hacimsel debiyle değişimi.	67
Şekil 4.10. $P_{h,t+e}$ ve HIBO için en uygun tasarımı LID modelinde (D-20-25-100) ısıl etkenliğin hacimsel debiyle değişimi.	67
Şekil 4.11. $\varepsilon \times \text{HIBO}$ için en uygun tasarımı LID modelinde (D-20-25-120) ısıl etkenliğin hacimsel debiyle değişimi.	68
Şekil 4.12. Q_{gk} ve ε için en uygun tasarımı LID modelinde (K-20-10-240 ve K-32-10- 240) akışın sağlanması için gerekli toplam fan gücünün hacimsel debiyle değişimi.	69
Şekil 4.13. $P_{h,t+e}$ ve HIBO için en uygun tasarımı LID modelinde (D-20-25-100) akışın sağlanması için gerekli toplam fan gücünün hacimsel debiyle değişimi.	69
Şekil 4.14. $\varepsilon \times \text{HIBO}$ için en uygun tasarımı LID modelinde (D-20-25-120) akışın sağlanması için gerekli toplam fan gücünün hacimsel debiyle değişimi. .	70
Şekil 4.15. Q_{gk} ve ε için en uygun tasarımı LID modelinde (K-20-10-240 ve K-32-10- 240) HIBO'nun hacimsel debiyle değişimi.	71
Şekil 4.16. $P_{h,t+e}$ ve HIBO için en uygun tasarımı LID modelinde (D-20-25-100) HIBO'nun hacimsel debiyle değişimi.	71

Şekil 4.17. $\varepsilon \times \text{HIBO}$ için en uygun tasarımı LID modelinde (D-20-25-120) HIBO'nun hacimsel debiyle değişimi.	72
Şekil 4.18. Q_{gk} ve ε için en uygun tasarımı LID modelinde (K-20-10-240 ve K-32-10-240) $\varepsilon \times \text{HIBO}$ 'nun hacimsel debiyle değişimi.	73
Şekil 4.19. $P_{h,t+e}$ ve HIBO için en uygun tasarımı LID modelinde (D-20-25-100) $\varepsilon \times \text{HIBO}$ 'nun hacimsel debiyle değişimi.	73
Şekil 4.20. $\varepsilon \times \text{HIBO}$ için en uygun tasarımı LID modelinde (D-20-25-120) $\varepsilon \times \text{HIBO}$ 'nun hacimsel debiyle değişimi.	74
Şekil 4.21. K-20-10-240/K-32-10-240 modellerinin kanal simetri düzleminde basınç dağılımları.	75
Şekil 4.22. K-20-10-240/K-32-10-240 modellerinin kanal simetri düzleminde hız dağılımları.	76
Şekil 4.23. K-20-10-240/K-32-10-240 modellerinin kanal simetri düzleminde sıcaklık dağılımları.	77
Şekil 4.24. K-20-10-240/K-32-10-240 modellerinin levha yüzeyinde sıcaklık dağılımları.	77
Şekil 4.25. D-20-25-100 modelinin kanal simetri düzleminde basınç dağılımı.	78
Şekil 4.26. D-20-25-100 modelinin kanal simetri düzleminde hız dağılımı.	79
Şekil 4.27. D-20-25-100 modelinin kanal simetri düzleminde sıcaklık dağılımı.	80
Şekil 4.28. D-20-25-100 modelinin levha yüzeyinde sıcaklık dağılımı.	80
Şekil 4.29. D-20-25-120 modelinin kanal simetri düzleminde basınç dağılımı.	81
Şekil 4.30. D-20-25-120 modelinin kanal simetri düzleminde hız dağılımı.	82
Şekil 4.31. D-20-25-120 modelinin kanal simetri düzleminde sıcaklık dağılımı.	82
Şekil 4.32. D-20-25-120 modelinin levha yüzeyinde sıcaklık dağılımı.	83
Şekil 4.33. K-20-10-240/K-32-10-240 modellerinin kanal simetri düzleminde kanal orta kesiti boyunca giriş ve çıkış etkilerinin dahil edildiği basınç değişimleri.	84
Şekil 4.34. D-20-25-100 modelinin kanal simetri düzleminde kanal orta kesiti boyunca giriş ve çıkış etkilerinin dahil edildiği basınç değişimi.	86
Şekil 4.35. D-20-25-120 modelinin kanal simetri düzleminde kanal orta kesiti boyunca giriş ve çıkış etkilerinin dahil edildiği basınç değişimi.	87
Şekil 4.36. En uygun tasarımı LID modellerinin x-z düzleminde, kanal orta eksenini boyunca, y-z düzlemindeki farklı en-kesitlerde hız profillerinin değişimleri.	89

ENERJİ ETKİN LEVHALI ISI DEĞİŞTİRİCİLERİN SAYISAL YÖNTEMLERLE TASARIMI

ÖZET

Bu çalışmada, 1-4 kişinin bulunduğu kapalı ortamların ısı geri kazanımlı havalandırmayla iç hava kalitesinin sürdürülebilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla iklimlendirme sistemlerinde, kirli egzoz havasıyla atmosfere atılan ısıнын geri kazanılacağı küçük kapasiteli (50-200 m³/h) bir levhalı ısı değıştiricinin (LID) tasarımı hedeflenmiştir. LID tasarım ve işletme değışkenlerinin performans göstergelerine etkileri, Taguchi deney tasarımı ve Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiğı (HAD) ile incelenmiştir.

Etkileri incelenen dört LID tasarım parametresi; kanal giriş geometrisi (KGG), ortalama hava akış hızı (u-m/s), kanal yüksekliğı (h-mm) ve levha boyutudur (L-mm). Taguchi yöntemine göre bu tasarım parametrelerinin her biri için literatüre uygun dört alt seviye belirlenmiştir. Tasarım değışkenlerinin etkilediğı LID performans göstergeleri; temiz hava tarafında geri kazanılan ısı güç (Q_{gk}), duyulur ısıl etkenlik (ε), akışın devamı için gerekli toplam fan gücü (P_{h,t+e}), hidrodinamik-ısıl büyütme oranı (HIBO) ve ısıl etkenlik ile HIBO'nun birleştirilmiş etkisini gösteren ε×HIBO olarak seçilmiştir.

Bu LID performans göstergeleri için Taguchi'nin “en büyük-en iyi” ve “en küçük-en iyi” kategorilerine göre belirlenen en uygun tasarım ve işletme parametrelili LID modelleri; geri kazanılan ısıl güçte-Q_{gk} K-32-10-240 (276 m³/h), ısıl etkenlikte-ε K-20-10-240 (173 m³/h), toplam fan gücünde-P_{h,t+e} ve HIBO'da D-20-25-100 (32 m³/h) ve ε×HIBO'da D-20-25-120 (48 m³/h)'dir. Ayrıca HAD sonuçlarının doğruluğı, literatürdeki uygun analitik yöntemlerle incelenmiştir. LID performans göstergelerinin HAD sonuçları ile Taguchi tahminleri arasındaki farklar, geri kazanılan ısıl güç-Q_{gk}, duyulur ısıl etkenlik-ε, toplam fan gücü-P_{h,t+e}, HIBO ve ε×HIBO için sırasıyla; %9.66, %16.70, %2.31, %9.16 ve %14.03'dür.

En uygun tasarım ve işletme değışkenli LID modellerinin, temiz hava kanalı simetri düzleminde; statik basınç, akış doğrultusundaki hız ve sıcaklık dağılımları ile levha yüzeyindeki sıcaklık dağılımları HAD çözümleriyle görselleştirilmiş ve yorumlanmıştır.

Sonuç olarak, Taguchi deney tasarımı ve HAD analizlerinin birlikte kullanıldığı çalışmada, hedef performans göstergelerine göre belirlenen tasarım ve işletme parametrelerinin en uygun alt seviyeleri ile LID modelleri tasarlanmıştır. Bu en uygun tasarımlı LID modellerinin kapasiteleri (hacimsel debiler) ve performans göstergelerinin hacimsel debiye bağılı değışimleri yine HAD analizleri ile elde edilerek değerlendirilmiştir.



DESIGN OF ENERGY EFFICIENT PLATE HEAT EXCHANGERS USING NUMERICAL METHODS

SUMMARY

In this study, the aim was to sustain the indoor air quality of environments with 1-4 occupants via heat recovery ventilation. For this purpose, the design of a small capacity (50-200 m³/h) Plate Heat Exchanger (PHE) was planned to recover the heat exhausted to the atmosphere with the stale air in air-conditioning systems. The effects of PHE design and operating variables on the performance criteria (objective functions) were investigated using Taguchi experimental design and Computational Fluid Dynamics (CFD).

The design and operating parameters analyzed in the study were inlet geometry of the PHE channels (CIG), average air flow velocity in the channels (u -m/s), the height of the channels (h -mm) and dimension of the plates (L -mm) forming the PHE channels. As a result of the preliminary calculations made for these parameters, four sub-levels were determined in accordance with the literature. These parameters and their sub-levels were Blunt (B), Triangular (T), Circular (C) and Bell Mouth (BM) for CIG. Sub-levels of the average air flow velocity- u in the channels were 2.0 m/s, 2.4 m/s, 2.8 m/s and 3.2 m/s. The others were 1.0 mm, 1.5 mm, 2.0 mm, and 2.5 mm for channel height- h and 100 mm, 120 mm, 190 mm, and 240 mm for plate dimension- L .

The most appropriate orthogonal array (OA) based on the four design/operating parameters with four sub-levels was determined as $L_{16} (4^4)$ in the Taguchi experimental design method. Before the final numerical solutions, preliminary mesh structure element number independence tests were conducted for four different CIGs. These numerical solutions were performed by using PHE models with 190×190 mm plate dimension- L and 2.0 mm channel height- h at a flow rate of 200 m³/h. PHE numerical models were created at three different mesh element densities based on the preliminary mesh number independence tests and the parameter sub-level mappings defined in L_{16} OD.

CFD analyses (flow and heat transfer solutions) of these models were performed in ANSYS/Fluent. Thus, the independence of the mesh densities for 16 numerical PHE models generated based on Taguchi OA was guaranteed.

Through CFD analysis, i.e. numerical experiments, the temperatures and pressures to be used to evaluate the effects of design/operating variables on PHE performance criteria were calculated.

In PHE design, the main performance criteria affected by the design and operating variables are the recovered thermal power on the fresh air side ($Q_{rec.}$), the sensible thermal effectiveness (ϵ), the total fan power required to drive the flow in the PHE ($P_{h,f+s}$), the Electro-Thermal Amplification Ratio (ETAR) and the $\epsilon \times ETAR$, which takes into account the combined effect of thermal effectiveness and ETAR.

Signal to Noise Ratios (SNRs) were calculated in Taguchi's "larger the better" category, except for the total fan power- $P_{h,f+s}$ to determine the optimal sub-levels of design and operating variables based on the performance criteria. Similarly, SNRs were also calculated to minimize the total fan power- $P_{h,f+s}$ based on Taguchi's "smaller the better" category.

ANOM and ANOVA analyses were applied to the SNRs of the performance criteria. Using ANOM analyses, the most optimal sub-levels and significance rankings of the PHE design and operating variables were determined. Thus, a qualitative assessment of the design/operating variables was carried out. Through ANOVA analyses, a quantitative evaluation of the percentage effects on the performance criteria of the PHE design and operating variables was performed. Thus, the optimal sub-level combinations of the design/operating variables for the PHE performance criteria were determined based on the ANOM and ANOVA results.

B-32-10-240 (blunt CIG, $u=3.2$ m/s, $h=1.0$ mm and $L=240 \times 240$ mm) and B-20-10-240 (blunt CIG, $u=2.0$ m/s, $h=1.0$ mm and $L=240 \times 240$ mm) PHE models with identical geometrical design parameters but different operating parameter of average air flow velocities were determined for the performance criteria of recovered thermal power- Q_{rec} on the fresh side and sensible thermal effectiveness- ε , respectively.

According to the total fan power- $P_{h,f+s}$ required to drive the flow in PHE and ETAR performance criteria, the C-20-25-100 (circular CIG, $u=2.0$ m/s, $h=2.5$ mm and $L=100 \times 100$ mm) model was common.

The PHE model C-20-25-120 (circular CIG, $u=2.0$ m/s, $h=2.5$ mm and $L=120 \times 120$ mm) was obtained for $\varepsilon \times ETAR$ in which thermal and hydrodynamic effects were considered together.

It was determined that the PHE models with the optimal sub-levels of design and operating parameters were not available in Taguchi L_{16} OA. The new CFD analyses were performed by designing these optimal numerical PHE models in three different mesh densities as addressed above.

In the case where the objective performance criterion was selected as thermal power recovered on the fresh side- Q_{rec} (B-32-10-240), the fresh air volumetric flow rate was $276 \text{ m}^3/\text{h}$, the recovered thermal power- Q_{rec} was 1119.54 W , the sensible thermal effectiveness- ε was 77.47% , the total fan power- $P_{h,f+s}$ required to drive the flow was 36.29 W , the ETAR was 30.85 , $\varepsilon \times ETAR$ 23.90 and the total pressure drops for the fresh air side and stale air side were 238.8 Pa and 233.7 Pa , respectively.

In the case in which sensible thermal effectiveness- ε (B-20-10-240) was selected, the fresh air volumetric flow rate was $173 \text{ m}^3/\text{h}$, the recovered thermal power- Q_{rec} was 717.73 W , the sensible thermal effectiveness- ε was 79.47% , the total fan power- $P_{h,f+s}$ was 10.67 W , the ETAR was 67.3 , $\varepsilon \times ETAR$ 53.48 and the total pressure drops for the fresh and stale air sides were 111.4 Pa and 111.0 Pa , respectively.

In the case where the total fan power required to drive the flow in PHE- $P_{h,f+s}$ and ETAR (C-20-25-100) was selected, the fresh air volumetric flow rate was $32 \text{ m}^3/\text{h}$, the recovered thermal power- Q_{rec} was 67.41 W , the sensible thermal effectiveness- ε was 39.81% , the total fan power- $P_{h,f+s}$ was 0.17 W , the ETAR was 389.18 , $\varepsilon \times ETAR$ 154.94 and the total pressure drops for the fresh and stale air sides were 9.5 Pa and 9.7 Pa , respectively.

In the case of $\varepsilon \times \text{ETAR}$, which considers thermal and hydrodynamic effects together (C-20-25-120), the fresh air volumetric flow rate was $48 \text{ m}^3/\text{h}$, the recovered thermal power- $Q_{\text{rec.}}$ was 108.78 W , the sensible thermal effectiveness- ε was 43.80% , the total fan power- $P_{h,f+s}$ was 0.295 W , the ETAR was 367.84 and $\varepsilon \times \text{ETAR}$ 161.11 , and the total pressure drops for the fresh and stale air sides were 11.2 Pa and 11.2 Pa , respectively.

The CFD results, Taguchi predictions, and percentage differences between CFD and Taguchi prediction, according to performance criteria were 1119.54 W , 1227.7 W and 9.66% for thermal power recovered- $Q_{\text{rec.}}$ on the fresh side, 79.47% , 92.74% and 16.70% for sensible thermal effectiveness- ε , 0.173 W , 0.169 W and 2.31% for total fan power- $P_{h,f+s}$, 389.18 , 424.81 and 9.16% for ETAR, 161.11 , 183.71 and 14.03% for $\varepsilon \times \text{ETAR}$, respectively.

Based on these results, it was concluded that the selected PHE design and operating parameters and their sub-levels are suitable and the Taguchi method can be used in the design.

Considering that the flow in the PHE channels will remain under laminar conditions, the change of objective performance criteria at different volumetric flow rates was investigated for the optimally designed PHE models. Parametric numerical solutions were performed in the volumetric flow rate range from $30 \text{ m}^3/\text{h}$ to $300 \text{ m}^3/\text{h}$ for the case that the thermal power recovered on the fresh air side- $Q_{\text{rec.}}$ (B-32-10-240) and the sensible thermal efficiency- ε (B-20-10-240) were selected as the objective performance criteria, in the volumetric flow rate range from $10 \text{ m}^3/\text{h}$ to $100 \text{ m}^3/\text{h}$ for the case that the required total fan power- $P_{h,f+s}$ and ETAR (C-20-25-100) were selected, and in the volumetric flow rate range from $20 \text{ m}^3/\text{h}$ to $200 \text{ m}^3/\text{h}$ for the case that $\varepsilon \times \text{ETAR}$ (C-20-25-120) was selected.

Depending on the parametric variations of the volumetric flow rate in the B-32-10-240 and B-20-10-240 models, it was found that the recovered thermal power- $Q_{\text{rec.}}$ on the fresh air side ranges from 140 W to 1200 W , the sensible thermal effectiveness- ε ranges from 88% to 78% , the total fan power- $P_{h,f+s}$ required to drive the flow ranges from 0.25 W to 49 W , the ETAR ranges from 520 to 55 and $\varepsilon \times \text{ETAR}$ ranges from $45,300$ to 1960 .

Similarly, it was observed that the recovered thermal power- $Q_{\text{rec.}}$ on the fresh air side ranges from 30 W to 140 W , the sensible thermal effectiveness- ε ranges from 60% to 27% , the total fan power- $P_{h,f+s}$ required to drive the flow ranges from 0.010 W to 3 W , the ETAR ranges from 2450 to 50 , and the $\varepsilon \times \text{ETAR}$ ranges from $148,000$ to 1370 in the C-20-25-100 model.

In the C-20-25-120 model, the recovered thermal power- $Q_{\text{rec.}}$ on the fresh air side ranges from 60 W to 310 W , the sensible thermal effectiveness- ε ranges from 58% to 30% , the total fan power required- $P_{h,f+s}$ to drive the flow ranges from 0.05 W to 11 W , the ETAR ranges from 1360 to 27 and the $\varepsilon \times \text{ETAR}$ ranges from $78,600$ to 800 .

Static pressure contours, velocity contours in the flow direction and temperature contours on the symmetry plane of the fresh channel and temperature contours throughout the plate surface of the B-32-10-240, B-20-10-240, C-20-25-100 and C-20-25-120 PHE models at the optimal volumetric flow rates were visualized and discussed.

In addition, pressure variations in the flow direction through the mid-axis of the channel on the channel symmetry plane, including inlet and outlet effects, and variations in velocity profiles at different cross-sections in the y-z plane through the channel mid-axis in the x-z plane were comparatively evaluated.

The accuracy of the CFD results was also investigated by using the analytical Nu correlation and the effectiveness-Number of Transfer Unit (ε -NTU) method selected according to the problem. The analytical sensible effectiveness for the cases where both fluids are unmixed and mixed were compared with the sensible effectiveness calculated using CFD results. The sensible effectiveness of the PHE models in Taguchi L_{16} OA agree with the case of both fluids are unmixed. The differences for this case are -5.8% to 17.4% .

In conclusion, the qualitative and quantitative effects of the selected design and operating parameters on the performance criteria in the design of a small capacity air-to-air crossflow cubic PHE under balanced ventilation were determined. By using Taguchi experimental design and CFD analysis together, PHE models with the optimal sub-levels of design and operating parameters (B-32-10-240, B-20-10-240, C-20-25-100 and C-20-25-120) were obtained for the performance criteria. The capacities (volumetric flow rates) and performances of the optimally designed PHE models were obtained by CFD analysis, and the results of numerical analysis were visualized, explained and discussed.

1. GİRİŞ

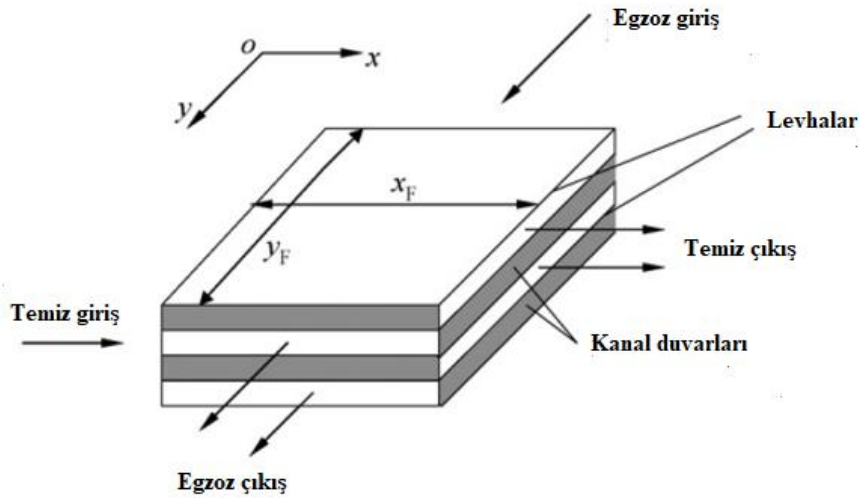
Kapalı ortamlardaki hava kalitesi insan sağlığı için oldukça 3nemlidir. Kapalı alanlara beslenen temiz/taze hava oranının ve/veya iç hava kalitesinin yeterli olmaması insanlarda kısa, orta ve uzun vadede çeşitli hastalıkların g3r3lmesine neden olmaktadır. Bu hastalıklardan en bilineni “Hasta Bina Sendromu” (Sick Building Syndrome) dur. Ayrıca iç hava kalitesizliğinin; baş ağrısı, halsizlik, yorgunluk şeklindeki yakınmalarla kendini g3steren basit belirtilerinin yanı sıra kısa vadede g3r3lebilen alerjik reaksiyonlar, burun, g3z ve boğazda kızarıklık, kaşıntılar ve akıntılar, kas ağrıları, stres gibi ve daha uzun vadede ise astım gibi solunum yolu hastalıkları, kalp hastalıkları ve kanser gibi çok daha ciddi kronik rahatsızlıklara neden olduğu tespit edilmiştir [1].

Kapalı ortamlarda iç hava sıcaklığının istenilen d3zeye tutulması ve iç ortam hava kalitesinin korunması amacıyla iklimlendirme sistemleri/cihazları kullanılmaktadır. İklmlendirme cihazları; ısı değiştiriciler, filtreler ve fanlar olmak 3zere genellikle 3 ana bileşenden oluşur ve kanallarla ya da kanalsız kullanılabilirler [2].

G3n3m3zde enerji maliyetlerinin y3kselmesi, sıcaklık farklarının çok d3ř3k olduğu iklimlendirme sistemlerinde de ısı geri kazanımının 3nemini arttırmıştır. Isı geri kazanımlı havalandırma ve iklimlendirme sistemleri ile ilk yatırım maliyeti bir miktar y3kselse de birincil enerji kaynaklarının t3ketimi azalacağından, orta ve uzun vadede işletme maliyetlerinden tasarruf edilecektir. Isı geri kazanımlı havalandırma; dışarıdan alınan taze hava ile kapalı ortamdan alınan kirli egzoz havası arasında, sistemdeki ısı değiştiricide ısı alışverişi ile (sıcak taraftan soğuk tarafa ısı geçişi) sağlanır. B3ylece kapalı alana verilecek taze havaya 3n ısıtma (veya 3n soğutma) yapılarak, ısıtma (veya soğutma) için harcanan enerji azaltılır [3].

Orta ve k33k kapasiteli havalandırma ve iklimlendirme sistemlerinde ısı geri kazanımı amacıyla genellikle levhalı ısı değiştiriciler (LID) kullanılır [2]. K33k kapasiteli ısı geri kazanımlı havalandırma sistemlerinde kullanılan LID’lerle ilgili literat3rden bazı çalışmalar aşağıda ayrıntılı ele alınacaktır.

Zhang ve ark. [4] levha ölçüleri 185×185 mm, kanal yüksekliği 2 mm ve toplam kanal sayısı 230 (115+115) olan, geometrik bakımdan özdeş ancak membran-levha malzemeleri farklı (kağıt, selüloz asetat-CA ve modifiye selüloz asetat-MCA) üç farklı çapraz akışlı LID'nin ısı performanslarını, 100-200 m³/h debi aralığında, deneysel ve sayısal incelemiştir. Membran-levhaların kalınlıkları; kağıt için 55 µm; CA için 5 µm ve MCA için 5 µm'dir. Tüm deneylerde sıcak ve soğuk havanın LID'ye giriş sıcaklıkları arasındaki fark 8 K'ye ayarlanmıştır. Üç ısı değiştirici ile yapılan deneylerde basınç kayıpları 43 Pa ölçülmüştür. Aynı çalışma koşullarındaki deneylerde, ihmal edilebilir duyulur ısı dirençler nedeniyle, her üç membran-levha malzemesi için eşdeğer duyulur etkenlikler gözlenmiştir. Dolayısıyla malzeme özelliklerinin ve çalışma koşullarının LID'lerin duyulur ısı etkenliklerine etkileri oldukça düşüktür. Ancak levha malzemelerinin LID'lerin gizli ısı etkenliklerine etkileri önemlidir. LID'lerde kullanılan membran-levhaların malzemeleri ve kalınlıkları farklı olsa da tüm ısı değiştiricilerde; 100 m³/h debide yaklaşık %80 olan duyulur ısı etkenliğinin, 200 m³/h debide %68 civarına düştüğü belirtilmiştir



Şekil 1.1. Zhang ve ark. [4]'nın levhalı ısı değiştirici modeli.

Zhang [5], levha ölçüleri 185×185 mm, kanal yüksekliği 4 mm ve toplam kanal sayısı 57 (29+28) olan, modifiye edilmiş kompozit membran-levhalı yarı-zıt akışlı LID'nin ısı performansını 50-200 m³/h debi aralığında, deneysel ve sayısal incelemiştir. Hacimsel debiler 50 m³/h'den 200 m³/h'e yükseltildiğinde, duyulur ısı etkenliğinin 0,80'den 0,51'e ve gizli ısı etkenliğinin de 0,76'dan 0,46'ya düştüğü belirtilmiştir.

Al-Waked ve ark. [6], Zhang'in deneysel çalışmasını (kaynak [5]'i) referans alarak modifiye edilmiş kompozit membran-levhali aynı geometrik boyutlarda ve özelliklerdeki LID'nin sayısal modelini HAD analizleri ile incelemişlerdir. HAD modeli ile yapılan sayısal çözümlerde Zhang'ın deneysel sonuçları [5] ile oldukça uyumlu sonuçlar elde edilmiştir. Araştırmacılar, LID'nin girişindeki akış yönünün ısıl etkenliğe etkilerini de araştırmıştır. Akış laminar kabul edilmiş ve membran-levhanın kalınlığı 102 μm 'dir. HAD analizlerinden elde edilen duyulur ısıl etkenlik, gizli ısıl etkenlik ve membran ısı değıştiricideki basınç düşümü değerlendirilmiştir. Çalışmada, membranda uygulanan ağ yapısının zıt, çapraz ve paralel aynı yönlü akış düzeni için duyulur ve gizli ısıl etkenliğe etkileri de incelenmiştir. Membranda uygulanan ağ yapısıyla; duyulur etkenliğin %0.1 ile %1.1, gizli etkenliğin ise %0.3 ile %0.8 arasında değıştiğı bildirilmiştir.



Şekil 1.2. Al-Waked ve ark. [6] levhali ısı değıştirici modeli.

Maksimum duyulur ve gizli ısıl etkenlikler, 38.9 m^3/h debide sırasıyla %84.3 ve %80.2 elde etmişlerdir. Buna karşılık, 194.7 m^3/h debide minimum etkenlikleri sırasıyla %46.5 ve %39.4 elde etmişlerdir. LID'de kanal başına geri kazanılan ısıl gücün, 38.9 m^3/h debide 5.5 W ve 194.7 m^3/h debide ise 17.5 W olduğunu belirlemişlerdir. [6].

Al-Waked ve ark. [7], çapraz akışlı membranlı bir LID'de; kanal yüksekliğinin, Reynolds (Re) sayısının ve girişteki akış yönünün, ısı değıştiricinin hem duyulur hem de gizli ısıl etkinliğe ve geri kazanılan ısıl enerjiye etkilerini HAD ile sayısal incelemişlerdir. LID'nin ısıl performansını belirlemek/karşılaştırmak amacıyla duyulur ısıl etkenlikleri kullanmışlardır. LID kanallarındaki akışın laminar olduğu varsayılmıştır. Farklı membran malzemeleri olan selüloz asetat (CA) ve değıştirilmiş selüloz asetat (MCA) membranların LID performansına etkileri incelenmiştir. Levha boyutları 185×185 mm, kanal yüksekliği 2 mm ve membran-levhaların kalınlığı 5

μm 'dir. Soğuk hava ve sıcak hava giriş sıcaklıkları arasındaki fark 8°C 'dir ve $100\text{--}200\text{ m}^3/\text{h}$ debi aralığında çalışılmıştır. Debi $100\text{ m}^3/\text{h}$ 'ten $200\text{ m}^3/\text{h}$ 'e çıkarıldığında; CA ve MCA membranlar için duyulur ısı etkenlik $\%80$ 'den $\%70$ 'e düşerken, gizli ısı etkenliğinin; CA membran için $\%62$ 'den $\%49$ 'a, MCA membran için $\%77$ 'den $\%67$ 'ye düştüğü bildirilmiştir. Re sayısındaki artışla duyulur ısı etkenlik düşmüş fakat geri kazanılan ısı güç artmıştır. Kanal başına geri kazanılan ısı güç 40.1 W ve duyulur ısı etkenlik $\%61$ hesaplanmıştır. Hacimsel debinin sabit olduğu durumda hidrolik çap arttıkça kanaldaki ortalama akış hızlarının azaldığını ve sabit hidrolik çapta ise hacimsel debi arttıkça basınç düşümünün de arttığını belirtmişlerdir.

Kocabaş ve Savaş [8], $20\times 20\times 30\text{ cm}$ boyutlarında tasarladıkları çapraz akışlı LID'de levha malzemesi alüminyumdur. Araştırmacılar işletme faktörlerinin duyulur ısı etkenliğe etki derecelerini, L_8 tam faktöriyel deney tasarım metodunu kullanarak araştırmışlardır. Taze havanın ve egzoz havasının giriş sıcaklıkları ile ortalama hava akış hızı olmak üzere etkili üç farklı işletme faktörü belirlemişlerdir. Bu faktörlerin seviyeleri; taze hava giriş sıcaklığı için birinci seviye 0°C , ikinci seviye 10°C 'dir. Ortalama hava hızı için birinci seviye 1.2 m/s ve ikinci seviye 2 m/s 'dir. Egzoz havası giriş sıcaklığı için birinci seviye 28°C ve ikinci seviye 40°C dir. Ortalama hava akış hızının diğer faktörlere göre duyulur ısı etkenlikte daha etkili olduğu sonucuna varmışlardır. Daha düşük hava akış hızı, daha düşük taze hava giriş sıcaklığı ve daha yüksek egzoz havası giriş sıcaklığında, daha yüksek duyulur ısı etkenliğe ulaşılabileceğini vurgulamışlardır. Performansı incelenen LID'nin en uygun işletme parametrelerini; taze hava giriş sıcaklığı için 0°C , hava akış hızı için 1.2 m/s ve egzoz havası giriş sıcaklığı için 40°C tespit etmişlerdir.

Kocabaş ve Savaş [9], kaynak [8]'deki çapraz akışlı LID'de, işletme faktörlerinin duyulur ısı etkenliğe etki derecelerini Taguchi deney tasarım yöntemini kullanarak incelemişlerdir. Deneylerde taze hava ve egzoz havası giriş sıcaklıkları, ortalama hava akış hızı olmak üzere etkili üç işletme faktörü belirlemişlerdir. Bu faktörlerin seviyeleri; taze hava giriş sıcaklığı için birinci seviye 0°C , ikinci seviye 5°C ve üçüncü seviye 10°C 'dir. Ortalama hava akış hızı için birinci seviye 1.2 m/s , ikinci seviye 1.6 m/s ve üçüncü seviye 2 m/s 'dir. Egzoz havası giriş sıcaklığı için birinci seviye 28°C , ikinci seviye 34°C ve üçüncü seviye 40°C 'dir. Deney planı olarak Taguchi'nin üç faktörlü ve üç seviyeli $L_9 (3^3)$ standart ortogonal dizisi (OD) seçilmiştir. Araştırmacılar; düşük taze hava giriş sıcaklığı, düşük ortalama hava akış hızı ve

yüksek egzoz havası giriş sıcaklığının, duyulur ısı etkenliği maksimum yaptığını belirlemişlerdir. Duyulur ısı etkenliği maksimum yapmak için en uygun işletme parametrelerini; taze hava giriş sıcaklığı için 0°C, hava akış hızı için 1.2 m/s ve egzoz havası giriş sıcaklığı için 40°C olarak belirlemişlerdir. Duyulur ısı etkenliği maksimum yapmak için elde edilen en uygun işletme parametrelerinin alt seviyeleri kaynak [8] ile aynıdır. Bu işletme parametreleri kullanılarak belirlenen duyulur ısı etkenliği %37 ve en etkili işletme parametresini ise ortalama hava akış hızı olarak belirlemişlerdir.

Küçük ve Ünverdi [2], küçük kapasiteli (50-200 m³/h) bir ısı geri kazanım cihazındaki, çapraz akışlı LID'lerin (levha boyutları 180×180 mm ve yüksekliği 180 mm) akış etkenliğine (geri kazanılan birim ısı enerjisi başına harcanan akış enerjisi) ve duyulur ısı etkenliğe (geri kazanılan ısı gücün, geri kazanılabilecek en yüksek ısı güce oranı); alt kanal sayısı, kanal yüksekliği, ortalama hava akış hızı ve levha malzemesinin etkilerini, Taguchi yöntemi ve HAD analizleri ile incelemişlerdir. Çalışmada, farklı malzemelerden (alüminyum folyo, kâğıt ve ABS film) üretilen levhaların kalınlıkları 0.2 mm alınmıştır. Taze hava ve egzoz havası giriş sıcaklıkları arasındaki fark 15°C seçilmiştir. Alt kanal sayısı, kanal yüksekliği, ortalama hava akış hızı ve levha malzemesi değiştirilerek sayısal deneyler yapılmıştır. Sayısal deneylerde alt kanal sayısı 2-18, kanal yüksekliği 2-4 mm ve ortalama hava akış hızı 2-3 m/s arasında değişmektedir. Yapılan analizlerin sonuçları ve Taguchi yöntemi kullanılarak, akış etken model (AEM) ve ısı etken model (IEM) olmak üzere iki farklı en uygun LID tasarımı önerilmiştir. Çalışmada alt kanal sayısı ve levha malzemesinin performans ölçütlerine etkilerinin ihmal edilebilecek kadar önemsiz olduğu belirtilmiştir. IEM için alt kanal sayısı 6, kanal yüksekliği 2 mm, ortalama hava akış hızı 3 m/s ve levha malzemesi alüminyum folyo iken; AEM için alt kanal sayısı 2, kanal yüksekliği 4 mm, ortalama hava akış hızı 2 m/s ve levha malzemesi kâğıttır. LID tasarımında en etkili değişkenlerin; kanal yüksekliği ve ortalama hava akış hızı olduğunu belirlemişlerdir. IEM'de, ortalama %50 daha fazla ısının geri kazanıldığı ve duyulur ısı etkenliğinin ortalama %35 daha yüksek olduğu; AEM'de ise ortalama 2.5 kat daha az basınç düşümü ve akış etkenliğinin ortalama %10 daha yüksek olduğu gösterilmiştir. Geri kazanılan ısı gücü ve akış etkenliği birlikte değerlendirildiğinde her iki model için en uygun ortalama akış hızlarının 1.5-2 m/s (90-110 m³/h) aralığında olduğunu ve IEM'de geri kazanılan gücün 302 W, AEM'de ise 180 W olduğunu bildirmişlerdir.

Küçük ve Ünverdi [10], levha boyutları 180×180 mm ve levha yüksekliği 180 mm olan, küçük kapasiteli (50-200 m³/h) çapraz akışlı bir LID'nin, en yüksek duyulur ısıl etkenlikle, tasarlanmasını amaçlamışlardır. Çapraz akışlı bu LID'de; alt kanal sayısı, kanal yüksekliği, ortalama hava akış hızı ve levha malzemesinin, duyulur ısıl etkenliğe etkileri, Taguchi yöntemi ile incelenmiştir. LID kanallarının girişinde ve çıkışında oluşacak türbülans etkilerini de dikkate almak için sayısal çözümlerde, Standart k-ε (epsilon) türbülans modelini seçmişlerdir. Sayısal çözümlerde, egzoz havasının 298 K'de ve temiz havanın 283 K'de LID'ye girdiğini kabul etmişlerdir. Levha malzemesi olarak Akrilonitril Bütadiyen Stiren (ABS), alüminyum folyo ve kâğıt seçilmiştir. Levhaların kalınlıkları eşit ve 0.2 mm'dir. En yüksek duyulur ısıl etkenliği; alt kanal sayısı-18, kanal yüksekliği-2 mm, ortalama hava akış hızı-2 m/s ve levha malzemesi-alüminyum folyo olan tasarım kombinasyonunda elde etmişlerdir. Ancak levha malzemesinin duyulur ısıl etkenliğe etkisi düşük olduğundan, levha malzemesi olarak kâğıdı önermişler ve duyulur ısıl etkenliği en çok etkileyen tasarım parametresinin kanal yüksekliği olduğunu belirlemişlerdir. Konuttaki temiz hava ihtiyacını karşılamak için gerekli hava debisini ~105 m³/h, basınç düşümünü 30 Pa, ısıl etkenliği %62 olarak elde ederlerken, geri kazanılan ısıl gücü ise 330 W hesaplamışlardır.

Yukarıda özetlenen literatür çalışmalarının geometrik özellikleri, işletme şartları, akış özellikleri ve performans sonuçları Tablo 1.1'de, Tablo 1.2'de ve Tablo 1.3'te özetlenmiştir.

Tablo 1.1. Küçük kapasiteli levhalı ısı değişiricilerin geometrik özellikleri.

Araştırmacılar	L (mm)	h (mm)	N (adet)	H (mm)	t (mm)
Zhang ve diğ. [4]	185×185	2	230	---	Kağıt: 55 µm CA: 5 µm MCA: 5 µm
Zhang [5]	185×185	4	57	---	Modifiye edilmiş kompozit membran: 102 µm
Al-Waked ve ark. [6]	185×185	4	57	---	Modifiye edilmiş kompozit membran: 102 µm
Al-Waked ve diğ. [7]	185×185	2	115	---	CA: 5 µm MCA: 5 µm
Kocabaş ve Savaş [8]	200×200	---	---	300	Alüminyum
Kocabaş ve Savaş [9]	200×200	---	---	300	Alüminyum
Küçük ve Ünverdi [2]	180×180	IEM: 2 AEM: 4	---	180	IEM: Alüminyum folyo: 0.2 mm AEM: Kağıt: 0.2 mm
Küçük ve Ünverdi [10]	180×180	2	---	180	Alüminyum folyo: 0.2 mm

Tablo 1.2. Levhalı ısı değıştiricilerde işleme şartları ve performans sonuçları.

Araştırmacılar	V (m ³ /h)	u (m/s)	T _{t,g} (°C)	T _{e,g} (°C)	ΔT (°C)	Δp (Pa)	ε (%)
Zhang ve diğ. [4]	100	---	35	27	8	43	80
	200						68
Zhang [5]	50	0.5	35	27	8	1.6	80
	200	2.5				6	51
Al-Waked ve diğ. [6]	38.9	---	35	27	8	1.6	84.3
	194.7					6	46.5
Al-Waked ve diğ [7]	100	---	35	27	8	---	80
	200						70
Kocabaş ve Savaş [8]	---	1.2	0	40	40	---	36
		2					34
Kocabaş ve Savaş [9]	---	1.2	0	40	40		37
Küçük ve Ünverdi [2]	50-200	IEM: 1.75 AEM: 1.5	10	25	15	IEM: 28 AEM: 7	IEM: 60.2 AEM: 40.8
Küçük ve Ünverdi [10]	50-200	2.5	10	25	15	30	62

Tablo 1.3. Levhalı ısı değıştiricilerde akış özellikleri ve performans sonuçları.

Araştırmacılar	Akış Türü	Akış Düzenlemesi	Türbülans Modeli	Q _{gk} (W)
Zhang ve diğ. [4]	Laminer	Çapraz	Laminer	---
Zhang [5]	Laminer	Yarı-Zıt	Laminer	---
Al-Waked ve diğ. [6]	Laminer	Yarı-Zıt	Laminer	Düşük debide: 5.5 Yüksek debide: 17.5 Kanal başına: 40.1
Al-Waked ve diğ. [7]	Laminer	Çapraz	Laminer	
Kocabaş ve Savaş [8]	Laminer	Çapraz	Laminer	---
Kocabaş ve Savaş [9]	Laminer	Çapraz	Laminer	---
Küçük ve Ünverdi [2]	Laminer	Çapraz	Standart k-ε	IEM: 302 AEM: 180
Küçük ve Ünverdi [10]	Laminer	Çapraz	Standart k-ε	330

Bu çalışmamızda ısı geri kazanımlı havalandırma ve iklimlendirme sistemlerinde kullanılan küçük kapasiteli (50-200 m³/h), havadan havaya, çapraz akışlı kübik bir LID'nin tasarımı hedeflenmiştir. İncelenen çalışmalarda, tüm LID modellerinde akışın laminer olduğu ve hacimsel debinin 200 m³/h'ten küçük (küçük kapasiteli) olduğu görülmüştür. LID'nin tasarım parametrelerinin, seçilen performans parametrelerine etkileri Taguchi deney tasarımı yöntemi ve HAD analizleri ile incelenmiştir. Çalışmada etkileri incelenen tasarım parametreleri: LID kanallarının giriş geometrisi, LID kanallarındaki ortalama hava akış hızı, LID kanallarının yüksekliği ve LID kanallarını oluşturan levhaların boyutudur. Literatürdeki çalışmalarda ve bu çalışmada incelenen ortak tasarım parametreleri; kanal yüksekliği ve ortalama hava akış hızıdır. Literatür çalışmalarında bu parametrelerin hedef performans parametresine etkileri ya tek başına ya da birlikte incelenmiştir. Literatürdeki çalışmalardan farklı olarak, bu çalışmada kanal giriş geometrisinin ve levha boyutundaki değışimlerin hedef performans parametrelerine etkileri araştırılmıştır. Bu çalışmada ve incelenen tüm çalışmalarda, duyulur ısı etkenlik, LID modellerinin ortak hedef performans parametresidir. LID tasarım parametrelerinin literatürden farklı olarak etkilerinin

incelendiği diğer LID performans parametreleri; temiz hava tarafında geri kazanılan ısıl güç, LID’de akışın devamı için gerekli toplam fan gücü ve hidrodinamik-ısıl büyütme oranıdır. Bu performans parametreleri dışında mevcut literatürden farklı olarak duyulur ısıl etkenlik (ϵ) ve hidrodinamik-ısıl büyütme oranı (HIBO) kullanılarak oluşturulan çalışmamıza özgü diğer bir performans parametresi ise $\epsilon \times \text{HIBO}$ ’dur. $\epsilon \times \text{HIBO}$ ile hem duyulur ısıl etkenliğin hem de HIBO’nun birlikte maksimum olacağı bir LID modelinin tasarlanması hedeflenmiştir.



2. TAGUCHİ DENEYSEL TASARIM YÖNTEMİ

Taguchi yöntemi, Dr. Genichi Taguchi tarafından 1940'ların sonlarında geliştirilen kalite iyileştirme yöntemidir [11]. Taguchi tarafından geliştirilen istatistiksel deney tasarımı, imalat sektöründe kalitenin geliştirilmesi amacıyla etkin bir şekilde uygulanmaktadır. Taguchi deney tasarımıyla, kalite özelliklerini etkileyen parametreleri doğru bir şekilde belirlemek ve alternatif tasarımlardan en uygununun/uygunlarının tespit edilmesi hedeflenmektedir [12].

Birçok parametrenin etkili olduğu deneysel çalışmalarda, her bir faktörün etkisinin belirlenmesinde çok sayıda deney yapılması hem maliyeti hem de zamanı artırmaktadır. Taguchi deneysel tasarım metodu, maliyetleri ve harcanan zamanı minimum seviyede tutmak için en az sayıda deney yapma prensibine dayanan yöntemlerden biridir. Ayrıca yöntem, farklı parametrelerin farklı seviyeleri arasından en iyi kombinasyonu belirlemede, son derece kullanışlıdır ve yapılmamış olan diğer deneylerin sonuçları ile olası maksimum ve minimum sonuçlar da tahmin edilebilmektedir. Taguchi yönteminin diğer (tam faktöriyel) istatistiksel deney tasarım yöntemlerinden farkı; bir deneyi etkileyen parametreleri, kontrol edilebilen ve kontrol edilemeyen olmak üzere iki grupta incelemesi ve birçok parametreyi ikiden fazla seviyede incelemeye olanak tanımasıdır [13].

Taguchi yöntemi bir tür kesirli faktöriyel tasarımıdır. Deneylerde tüm kombinasyonların denenmesi yerine OD'ler kullanılmaktadır. Böylece deneylerin bir bölümünün yapılması ile en uygun performans karakteristiğini veren faktör seviyeleri belirlenebilmektedir. OD'ler bir sayı matrisi olup, satırlar faktörlerin seviyelerini ve sütunlar ise etkili faktörleri göstermektedir. OD'lerin temel özelliği, her bir faktörün deneye eşit deneme sayıları ile katılmasıdır. $L_x (y^z)$ şeklinde gösterilen OD'ler Latin kare (L) tasarımından türetilmiştir. Deney tasarımı gösteriminde; x deneylerin sayısını, y alt seviye sayısını, z ise etkili faktörlerin sayısını ifade etmektedir [14].

OD'ler problemin özelliğine göre 2 seviyeli, 3 seviyeli veya daha fazla seviyeli ya da 2 ve 3 seviyeli (karışık) olarak belirlenmektedir. OD'ler tasarım matrisi olarak da adlandırılmaktadır. Genellikle OD'ler 2 seviyeliler için L_4 , L_8 , L_{16} ve L_{32} ve 3

seviyeliler için L_9 , L_{18} , ve L_{27} 'dir. OD'lerin seçimi seviye sayısı ve toplam serbestlik derecesine göre yapılmaktadır. Başka bir ifadeyle OD'ler tam faktöriyel tasarım gereği (2^k veya 3^k) çok fazla sayıda yapılması gereken denemeleri büyük oranda azaltmaktadır. Örneğin, klasik tam faktöriyel deney tasarıma göre 3'er seviyesi olan 4 etkili parametrenin sonuçlara etkisini incelemeye ve en uygun kombinasyonu/modeli belirlemeye gerekli deneylerin sayısı, $3^4=81$ 'dir. Ancak aynı seviye ve etkili parametreye sayısına göre Taguchi yöntemiyle, L_9 (3^4) OD kullanılarak sadece 9 deney yeterlidir [15].

Taguchi yönteminde, sistemi etkileyen parametreler, kontrol edilebilen faktörler (girdiler) ve kontrol edilemeyen faktörler (gürültü) olarak ikiye ayrılır. Gürültü faktörlerini kontrol etmek ya oldukça zor ve maliyetlidir ya da imkansızdır. Taguchi'de, gürültü faktörlerinin deneysel sonuçlara etkisini ortadan kaldırmak ve/veya azaltmak amacıyla, kontrol faktörlerinin ve alt seviye değişkenliğinin ortalama sonuca etkilerini tanımlamada, Sinyal/Gürültü oranı (SGO) kullanılmaktadır [10; 11].

Taguchi deney tasarım yönteminde incelenen deneyin hedefine göre farklı analiz kategorilerinde; "en küçük-en iyi", "en büyük-en iyi" ve "nominal-en iyi" olmasına göre aşağıda eşitlikleri verilen SGO'lar hesaplanır [16].

En düşük (küçük)-en iyi olduğu durumda:

$$SGO = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (2.1)$$

En yüksek (büyük)-en iyi olduğu durumda:

$$SGO = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (2.2)$$

Nominal (ağırlıklı)-en iyi olduğu durumda:

$$SGO = 10 \log \left(\frac{\bar{y}^2}{S^2} \right) \quad (2.3)$$

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \quad (2.4)$$

$$S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \quad (2.5)$$

Yukarıda verilen eşitliklerde y_i ; performans karakteristiğinin i . gözlemindeki değerini, n ; bir serideki deney sayısını, $\bar{y}$; gözlemlerin ortalamasını, S^2 ; gözlemlerin varyansını (ortalamadan sapmasını) ifade etmektedir.

Taguchi deney tasarım yönteminde hangi OD'nin seçileceği, faktör (parametre) ve seviye sayısına göre Taguchi OD seçim tablosundan belirlenir.

Tablo 2.1. Taguchi Ortogonal Dizi tablosu [16].

Seviye Sayısı			
2	3	4	5
<u>L4</u> P = 2, S = 2 P = 3, S = 2	<u>L9</u> P = 2, S = 3 P = 3, S = 3 P = 4, S = 3	<u>L16</u> P = 2, S = 4 P = 3, S = 4 P = 4, S = 4 P = 5, S = 4	<u>L25</u> P = 2, S = 5 P = 3, S = 5 P = 4, S = 5 P = 5, S = 5 P = 6, S = 5
<u>L8</u> P = 4, S = 2 P = 5, S = 2 P = 6, S = 2 P = 7, S = 2	<u>L18</u> P = 5, S = 3 P = 6, S = 3 P = 7, S = 3 P = 8, S = 3	<u>L32</u> P = 6, S = 4 P = 7, S = 4 P = 8, S = 4 P = 9, S = 4 P = 10, S = 4	<u>L50</u> P = 7, S = 5 P = 8, S = 5 P = 9, S = 5 P = 10, S = 5 P = 11, S = 5 P = 12, S = 5
<u>L11</u> P = 8, S = 2 P = 9, S = 2 P = 10, S = 2 P = 11, S = 2	<u>L27</u> P = 9, S = 3 P = 10, S = 3 P = 11, S = 3 P = 12, S = 3 P = 13, S = 3		
<u>L16</u> P = 12, S = 2 P = 13, S = 2 P = 14, S = 2 P = 15, S = 2	<u>L36</u> P = 14, S = 3 P = 15, S = 3 P = 16, S = 3 P = 17, S = 3 P = 18, S = 3		
<u>L32</u> P = 16, S = 2 P = 17, S = 2 P = 18, S = 2 P = 19, S = 2 P = 20, S = 2 P = 21, S = 2 P = 22, S = 2 P = 23, S = 2 P = 24, S = 2 P = 25, S = 2 P = 26, S = 2 P = 27, S = 2 P = 28, S = 2 P = 29, S = 2 P = 30, S = 2 P = 31, S = 2	P = 19, S = 3 P = 20, S = 3 P = 21, S = 3 P = 22, S = 3 P = 23, S = 3		

P: parametre sayısını, S: seviye sayısını göstermektedir.

2.1. Tasarım Değişkenleri ve Ortogonal Dizi Seçimi

Çalışmada, yapılan ön hesaplamalarla literatüre uygun olarak belirlenen LID tasarımında etkili parametreler ve alt seviyeleri; kanal giriş geometrisi (KGG: küt-K, üçgen-U, dairesel-D ve çan ağzı-C), kanaldaki ortalama hava akış hızı (u : 2 m/s, 2.4 m/s, 2.8 m/s ve 3.2 m/s), kanal yüksekliği (h : 1 mm, 1.5 mm, 2 mm ve 2.5 mm) ve levha boyutu (L : 100 mm, 120 mm, 190 mm ve 240 mm) seçilmiştir. Ele alınan durum için dört parametrenin her birinin alt seviye sayısı dördür. Dört parametrelili ve dört seviyeli Taguchi analizinde kullanılması gereken OD'nin serbestlik derecesi [17]; her bir parametrenin serbestlik derecesi $4-1=3$, parametrelerin toplam serbestlik derecesi $4 \times 3=12$ ve kullanılması gerekli OD'nin serbestlik derecesi $12+1=13$ 'tür. Dolayısıyla Taguchi analizinde 4 alt seviyeli 4 parametre için Tablo 2.1'deki Taguchi OD seçim tablosundan en uygun OD'nin L_{16} (4^4) olduğu tespit edilmiştir. L_{16} OD'nin deney tasarım tablosu Tablo 2.2'de verilmiştir. Tablo 2.3'te ise deney tasarım tablosuna uygun olarak çalışmadaki tasarım değişkenleri ve her bir LID modeline ait kodlar verilmiştir. Örneğin, K-20-10-100 kodlu LID modelinde KGG; K-küt, ortalama hava akış hızı; u -2 m/s, kanal yüksekliği; h -1 mm ve levha boyutu; L -100 mm'dir.

Tablo 2.2. Taguchi L_{16} (4^4) ortogonal dizisine göre deney tasarım tablosu [18].

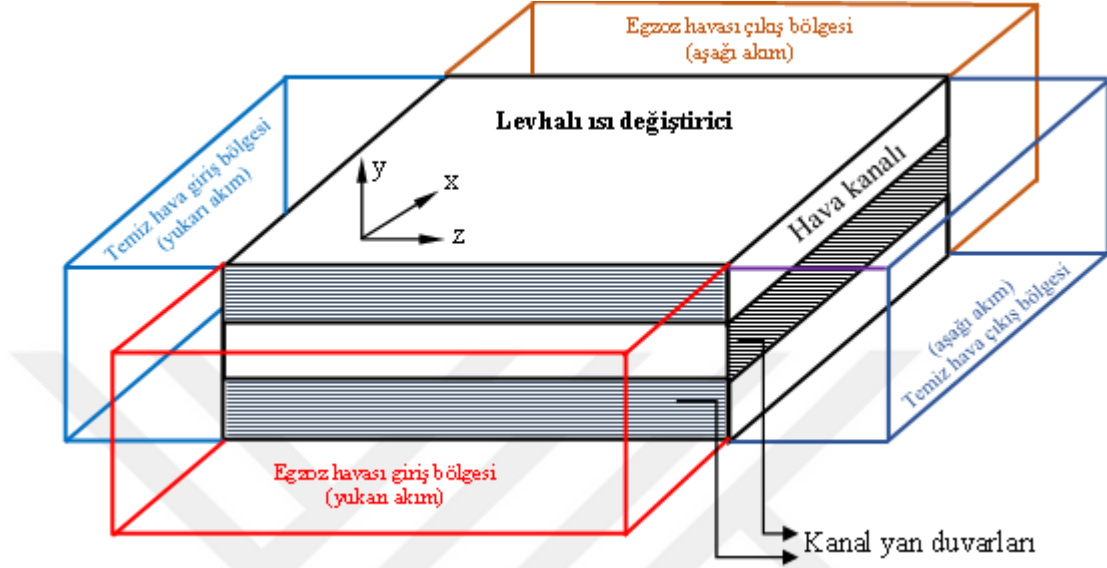
MN	P1	P2	P3	P4
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	1	4	4	4
5	2	1	2	3
6	2	2	1	4
7	2	3	4	1
8	2	4	3	2
9	3	1	3	4
10	3	2	4	3
11	3	3	1	2
12	3	4	2	1
13	4	1	4	2
14	4	2	3	1
15	4	3	2	4
16	4	4	1	3

Tablo 2.3. L₁₆ (4⁴)'e dizisine göre levhalı ısı değiştiricilerin tasarım parametreleri.

MN	Kod	KGG	u (m/s)	h (mm)	L (mm)	u (m/s)	h (mm)	L (mm) ve H (mm)
1	K-20-10-100	K	2.0	1.0	100	En dūřuk	En Kūçük	En Kūçük
2	K-24-15-120	K	2.4	1.5	120	Dūřuk	Kūçük	Kūçük
3	K-28-20-190	K	2.8	2.0	190	Yūksek	Būyük	Būyük
4	K-32-25-240	K	3.2	2.5	240	En yūksek	En būyük	En būyük
5	U-20-15-190	U	2.0	1.5	190	En dūřuk	Kūçük	Būyük
6	U-24-10-240	U	2.4	1.0	240	Dūřuk	En kūçük	En būyük
7	U-28-25-100	U	2.8	2.5	100	Yūksek	En būyük	En Kūçük
8	U-32-20-120	U	3.2	2.0	120	En yūksek	Būyük	Kūçük
9	D-20-20-240	D	2.0	2.0	240	En dūřuk	Būyük	En būyük
10	D-24-25-190	D	2.4	2.5	190	Dūřuk	En būyük	Būyük
11	D-28-10-120	D	2.8	1.0	120	Yūksek	En kūçük	Kūçük
12	D-32-15-100	D	3.2	1.5	100	En yūksek	Kūçük	En Kūçük
13	C-20-25-120	C	2.0	2.5	120	En dūřuk	En būyük	Kūçük
14	C-24-20-100	C	2.4	2.0	100	Dūřuk	Būyük	En Kūçük
15	C-28-15-240	C	2.8	1.5	240	Yūksek	Kūçük	En būyük
16	C-32-10-190	C	3.2	1.0	190	En yūksek	En kūçük	Būyük



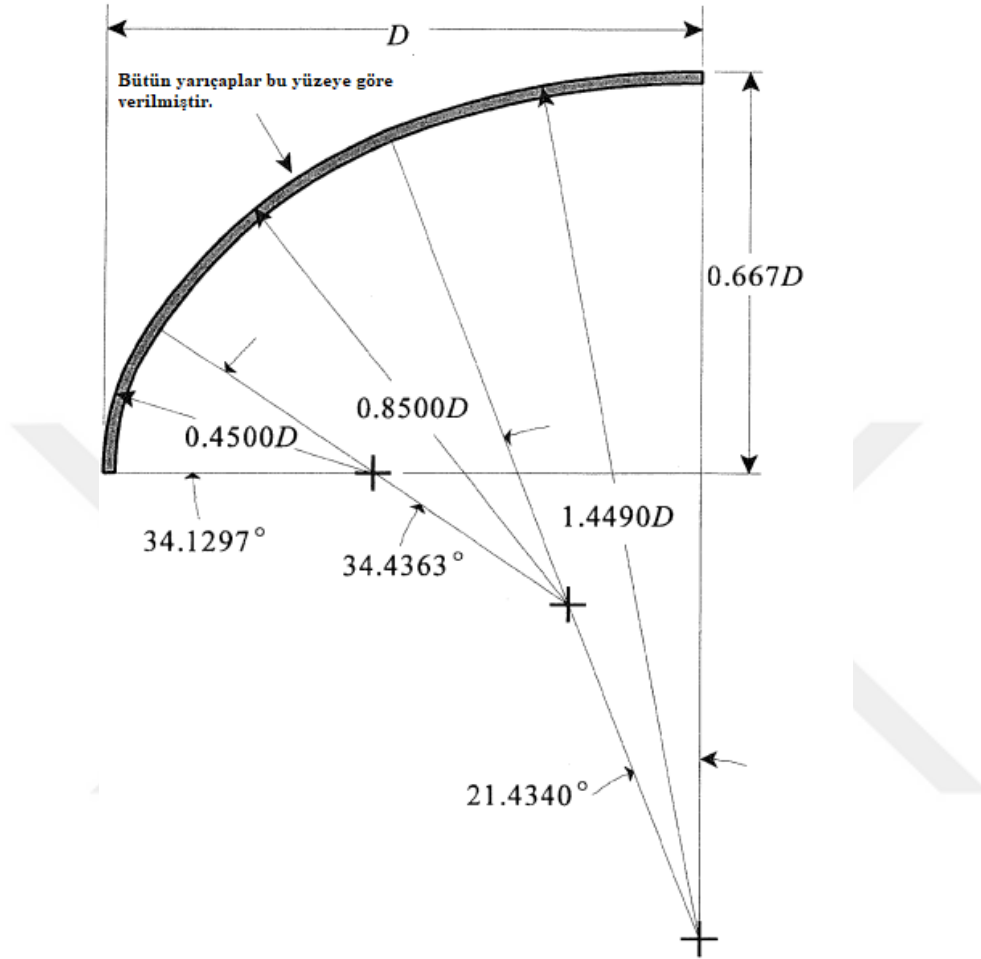
3. SAYISAL ANALİZ



Şekil 3.1. Levhalı ısı değiştiricinin ve sayısal çözüm bölgesinin şematik resmi.

Çalışmamızda tasarladığımız sayısal LID modellerinde; KGG'sinin, kanal yüksekliğinin- h , LID kanallarındaki ortalama hava akış hızının- u_z ve LID levha boyutlarının- L (aynı zamanda LID yüksekliğinin- H ve dolayısıyla kanal sayısının- N) seçilen performans parametrelerine etkileri incelenmiştir. KGG'leri; küt (K), üçgen (U-45°-45°-90° üçgeni), dairesel (D) ve çan ağzı (C-bell mouth) geometrileri ile oluşturulmuştur. Kanal yükseklikleri için literatüre uygun olarak 1.0 mm, 1.5 mm, 2.0 mm ve 2.5 mm olmak üzere dört farklı kanal yüksekliği belirlenmiştir. Bütün LID modelleri kübik (LID yüksekliği yaklaşık levha kenar uzunluğuna eşit) tasarlanmıştır. Dört farklı levha boyutu, seçilen debi aralığına ve literatürde çalışılan LID boyutlarına yakın (örneğin; [2], [7], [8], [10]) olarak belirlenmiştir. Bunlar; 100×100 mm, 120×120 mm, 190×190 mm ve 240×240 mm'dir. Yapılan ön hesaplamalarla kanallardaki ortalama hav akış hızları, istenen hacimsel debi aralığında ve akış laminar koşullarda kalacak şekilde, 2.0 m/s, 2.4 m/s, 2.8 m/s ve 3.2 m/s olarak belirlenmiştir. LID'nin, temiz hava ve egzoz havası kanalları ile giriş ve çıkış bölgeleri (akış yönleri) Şekil 3.1'de verilmiştir.

Çan ağzı (bell mouth) kanal giriş geometrisi AMCA-210 standardına göre tasarlanmıştır. Şekil 3.2’de Eliptik Çan Ağzı Nozul Geometrisinin oluşturulmasında kullanılan “Üç Yay Yaklaşımı” gösterilmiştir [19].



Şekil 3.2. Eliptik Çan Ağzı Nozul Geometrisi için “Üç Yay Yaklaşımı” [19].

Sayısal çözümlerde LID’ye giren temiz hava ve egzoz havası hacimsel debileri eşit (dengelenmiş havalandırma-balanced ventilation) tutulmuştur. LID’lerdeki kanal sayısının fazla ve tüm kanallar için ısı ve hidrodinamik sınır şartlarının da özdeş olması nedeniyle, LID’nin tamamı yerine, temiz hava ve egzoz hava taraflarından birer kanal ele alınarak sayısal modellemeler yapılmıştır. Temiz hava ve egzoz hava kanallarının da yarısı ile simetrik sınır şartı tanımlanarak, LID’lerin sayısal modelleri oluşturulmuştur [2].

LID’lerin temiz ve egzoz hava kanallarının girişinde ve çıkışında oluşacak yerel basınç kayıplarını da dikkate almak amacıyla, LID sayısal modellerine yukarı akım ve aşağı akım yönlerinde, giriş-çıkış bölgeleri (60 mm) eklenmiştir (Şekil 3.1). Yukarı akımdaki giriş bölgesinin girişinde, hız ve sıcaklığın düzgün dağılımlı (üniform) ve

sabit olduğu kabul edilmiştir. Aşağı akımdaki çıkış bölgesinin çıkışında ise basınç düzgün dağılımlı ve sabit (etkin basınç sıfır-atmosfer basıncı) kabul edilmiştir.

Taguchi L_{16} (4^4) OD'ye göre oluşturulan 16 farklı LID modelinin toplam kanal sayısı- N_{top} , temiz hava kanalı sayısı- N_t , egzoz hava kanalı sayısı- N_e , LID yüksekliği- H , temiz hava ve egzoz havasının yaklaşık hacimsel debisi- V ve sayısal çözüm geometrisi/bölgesi girişindeki ortalama hava akış hızları hesaplanmıştır. Yapılan hesaplamaların önemli sonuçları Tablo 3.1.'de verilmiştir.

Tablo 3.1. Levhalı ısı değiştiricilerin yapısal özellikleri ve işletme koşulları.

TASARIM PARAMETRELERİ					YAPISAL ÖZELLİKLER VE İŞLETME KOŞULLARI								
MN	Kod	KGG (-)	L (mm)	h (mm)	u (m/s)	N_t (adet)	N_e/N_t (adet)	H (mm)	A (m ²)	V (dm ³)	β (m ² /m ³)	$\dot{V}$ (m ³ /s)	$\dot{V}$ (m ³ /h)
1	K-20-10-100	K	100	1.0	2.0	82	41	98.2	0.794	0.982	808.4	0.008200	30 (-%40)
2	K-24-15-120	K	120	1.5	2.4	70	35	118.8	0.977	1.711	571.2	0.015120	54
3	K-28-20-190	K	190	2.0	2.8	86	43	189	3.036	6.823	445.0	0.045752	165
4	K-32-25-240	K	240	2.5	3.2	88	44	237.4	4.970	13.674	363.4	0.084480	304 (+%52)
5	U-20-15-190	U	190	1.5	2.0	110	55	186.8	3.894	6.743	577.4	0.031350	113
6	U-24-10-240	U	240	1.0	2.4	200	100	239.8	11.367	13.812	823.0	0.057600	207 (+%3.5)
7	U-28-25-100	U	100	2.5	2.8	36	18	97.0	0.343	0.970	353.6	0.012600	45 (-%10)
8	U-32-20-120	U	120	2.0	3.2	54	27	118.6	0.751	1.708	439.5	0.020736	75
9	D-20-20-240	D	240	2.0	2.0	108	54	237.4	6.112	13.674	447.0	0.051840	187
10	D-24-25-190	D	190	2.5	2.4	70	35	188.8	2.465	6.816	361.6	0.039900	144
11	D-28-10-120	D	120	1.0	2.8	100	50	119.8	1.402	1.725	812.7	0.016800	60
12	D-32-15-100	D	100	1.5	3.2	58	29	98.4	0.559	0.984	567.7	0.013920	50
13	C-20-25-120	C	120	2.5	2.0	44	22	118.6	0.609	1.708	356.5	0.013200	48 (-%4)
14	C-24-20-100	C	100	2.0	2.4	44	22	96.6	0.421	0.966	436.3	0.010560	38 (-%24)
15	C-28-15-240	C	240	1.5	2.8	140	70	237.8	7.940	13.697	579.7	0.070560	254 (+%27)
16	C-32-10-190	C	190	1.0	3.2	158	79	189.4	5.608	6.837	820.2	0.048032	173

Tablo 3.1'den de görüldüğü gibi L_{16} OD'ye göre oluşturulan 16 LID modelinden yedisinin hacimsel debisi başta hedeflenen hacimsel debi (50-200 m³/h) aralığının dışındadır. Hedeflenen hacimsel debi aralığı dışındaki modeller Tablo 3.1'de koyu renkle gösterilmiştir.

3.1. Taguchi L_{16} (4^4) OD'ye Göre Tasarlanan LID Modellerin Ağ Yapıları

Çalışılan tüm modellerde temiz hava giriş sıcaklığı 283 K (10°C), egzoz havası giriş sıcaklığı 298 K (25°C)'dir. Başka bir ifadeyle, egzoz havası ile temiz havanın LID'ye giriş sıcaklıkları arasındaki fark 15 K'dir. Levha malzemesi bütün LID modellerinde kağıt ($k=0.09$ W/mK) [20] olarak seçilmiştir. Levhaların kalınlıkları bütün LID

modellerinde eşittir ve 0.2 mm'dir. Temiz hava ve egzoz havasının LID'ye giriş sıcaklıklarında sabit kabul edilen termofiziksel özellikleri [21] Tablo 3.2'te verilmiştir.

Tablo 3.2. Temiz havanın ve kirli egzoz havasının termofiziksel özellikleri.

Termofiziksel özellikler	Temiz-Dış Hava	Kirli-Egzoz Havası
Sıcaklık (T-K/°C)	283/10	298/25
Yoğunluk (ρ -kg/m ³)	1.246	1.184
Özgül Isı (c_p -J/kgK)	1006	1007
Dinamik Viskozite (μ -Pas)	1.778×10^{-5}	1.849×10^{-5}
Isı İletim katsayısı (k-W/mK)	0.02439	0.02551

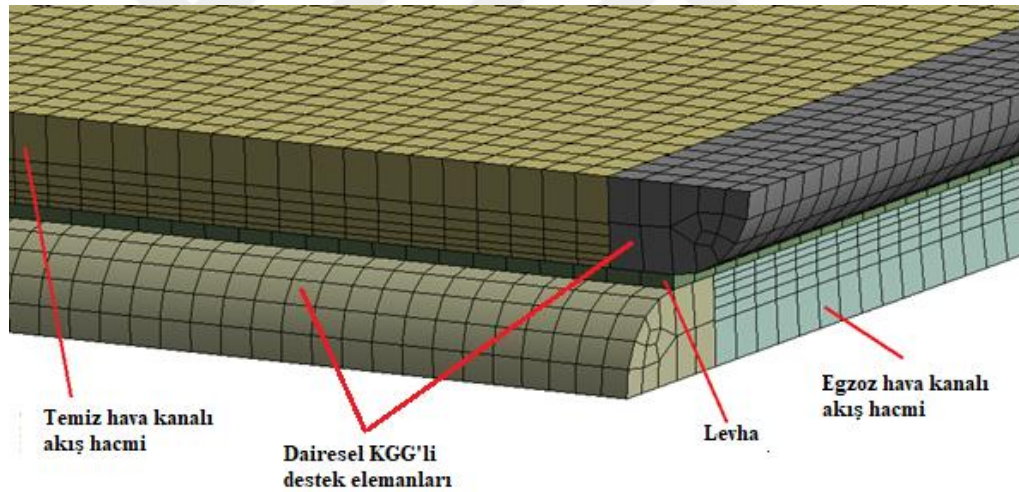
Tablo 3.3. Levhali ısı değiştiricilerin yapısal özellikleri ve akış karakteristikleri.

MN	Model Kodu	L (mm)	h (mm)	u (m/s)	D _h (mm)	L/h (-)	L/D _h (-)	L _h (mm)	L _t (mm)	Re _t (-)	Re _e (-)	y _t (mm)	y _e (mm)
1	K-20-10-100	100	1.0	2.0	1.98	100	51	28	20	280	254	0.072	0.077
2	K-24-15-120	120	1.5	2.4	2.96	80	41	74	53	500	456	0.065	0.069
3	K-28-20-190	190	2.0	2.8	3.96	95	48	154	110	780	711	0.059	0.063
4	K-32-25-240	240	2.5	3.2	4.95	96	48	276	196	1114	1016	0.054	0.057
5	U-20-15-190	190	1.5	2.0	2.98	127	64	62	44	419	382	0.076	0.081
6	U-24-10-240	240	1.0	2.4	1.99	240	121	33	24	336	307	0.062	0.066
7	U-28-25-100	100	2.5	2.8	4.88	40	20	234	166	961	876	0.060	0.064
8	U-32-20-120	120	2.0	3.2	3.93	60	31	174	124	886	808	0.052	0.056
9	D-20-20-240	240	2.0	2.0	3.97	120	60	111	79	558	509	0.079	0.084
10	D-24-25-190	190	2.5	2.4	4.93	76	39	206	146	833	760	0.069	0.074
11	D-28-10-120	120	1.0	2.8	1.98	120	61	39	28	391	356	0.054	0.058
12	D-32-15-100	100	1.5	3.2	2.95	67	34	98	70	665	607	0.050	0.054
13	C-20-25-120	120	2.5	2.0	4.90	48	24	169	120	689	628	0.081	0.086
14	C-24-20-100	100	2.0	2.4	3.92	50	26	130	92	662	604	0.067	0.072
15	C-28-15-240	240	1.5	2.8	2.98	160	81	88	62	587	536	0.057	0.061
16	C-32-10-190	190	1.0	3.2	1.99	190	95	45	32	448	409	0.048	0.051

Bu çalışmada, Taguchi L₁₆ OD'ye göre tasarlanan LID'lerde, hidrolik çaplar, L/D_h oranları ile temiz hava ve egzoz havası kanallarındaki akışlar için Re sayıları ayrı ayrı hesaplanmıştır ve sonuçlar Tablo 3.3'te gösterilmektedir. Dairesel borulardaki akışlar için Re<2300 ise akış laminardır [22]. Taguchi L₁₆ OD'ye göre tasarlanan LID'lerde temiz ve egzoz hava kanallarındaki Re sayıları sırasıyla; en düşük 280-254, en yüksek 1114-1016 olarak hesaplanmıştır. LID'lerde hesaplanan en yüksek Re sayısı 1114 olduğundan bütün LID'lerde akış laminardır. Fakat LID kanallarına girişte, akış kesitinin daraldığı bölgelerde ve kısa kanallarda (en büyük L/D_h oranı, U-24-10-240 modeli için 121), akışın gelişmekte olduğu dikkate alınarak, oluşacak türbülans etkilerinden dolayı tüm modellerin sayısal çözümde Realizable k-epsilon (k-ε) türbülans modeli seçilmiştir. Realizable k-ε türbülans modeli, karmaşık ikincil akışların gözlemlendiği, akışın yüzeyden ayrıldığı ve yeniden birleştiği durumlarda tatmin edici sonuçlar vermektedir [23; 24].

Yer çekimi etkisinin ihmal edildiği, zamandan bağımsız, sıkıştırılamaz akış için Navier-Stokes ve türbülans modeli denklemlerinin ayrıklaştırılmasında ve çözümünde ANSYS/Fluent yazılımı kullanılmıştır. Hız-basınç ilişkisinin tanımlanmasında SIMPLE algoritması (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations) seçilmiştir. Bu algoritmada ikinci mertebeden (Second Order Upwind) ayrıklaştırmalar kullanılmıştır. Çözümlerde varsayılan rahatlatma parametreleri (Under-Relaxation factors; basınç 0.3, momentum 0.7, türbülans kinetik enerji 0.8 ve türbülans yıkım oranı 0.8) seçilmiştir. Yakınsama ölçütleri için varsayılan değerler (süreklilik, hız bileşenleri, k- ϵ denklemleri: 10^{-3} , enerji denklemi: 10^{-6}) kullanılmıştır.

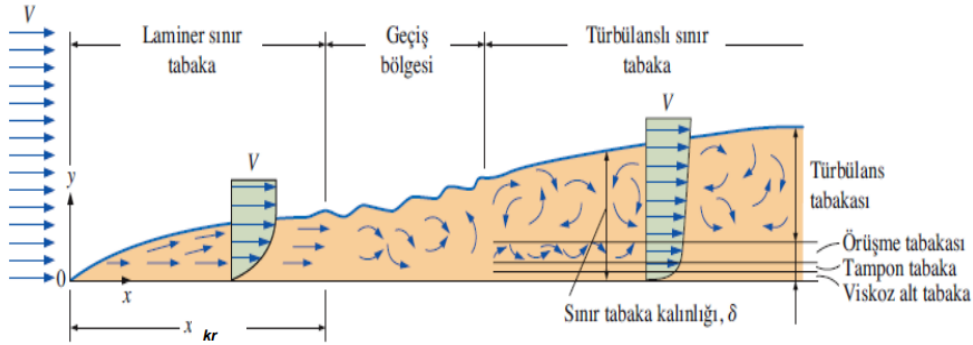
LID sayısal modellerinin çözümünde yapısal ağ kullanılmıştır. Temiz hava ve egzoz havası kanallarında kullanılan ağ yapıları levha yüzeylerine doğru sıkılaştırılmıştır. Örneğin, küt KGG'li bir LID'de temiz hava ve egzoz havası kanallarında levha yüzeylerine doğru daha ince (sıkı) oluşturulan sınır tabaka modellemesi Şekil 3.3'te gösterilmektedir.



Şekil 3.3. Dairesel KGG'li temiz ve egzoz havası kanallarında sınır tabakalı ağ yapısı örneği.

Sınır tabaka, akışkan viskozitesinden kaynaklanan, katı ve akışkan arasındaki etkileşimin baskın gözlendiği katıya yakın ince akışkan tabakasıdır. Levha üzerindeki serbest akışta hız (momentum) sınır tabakasının gelişimi Şekil 3.4'te gösterilmiştir. Akışkan hızının serbest akış hızının %99'una ulaştığı noktaların konumu, hız sınır tabakanın sınırı kabul edilir. Katı yüzey ile bu sınır arasında kalan bölgede, yüzeydeki kaymama koşulu nedeniyle, akış hızı ve türbülans şiddeti, yüzeyden itibaren sıfırdan başlayarak doğrusal olmayan bir şekilde değişir. Sınır tabaka akışının çözülmesi,

yüzey kayma gerilmesi ve yüzey basıncı gibi büyüklüklerin katı yüzey üzerindeki etkisinin doğru bir şekilde belirlenmesini sağlamaktadır [25].



Şekil 3.4. Düz levha üzerindeki akışta hız sınır tabakasının gelişimi ve akış doğrultusunda gelişen farklı akış rejimleri [22].

Katı yüzeye dik doğrultuda, $y^+ < 5$ boyutsuz duvar mesafesine kadar olan bölgedeki sınır tabakada, kaymazlık şartına yol açan viskoz kuvvetler baskındır ve bu bölge viskoz alt tabaka olarak adlandırılır. Bu bölgede kayma gerilmesi yaklaşık olarak sabit ve duvar kayma gerilmesine eşit kabul edilir [26].

Türbülanslı sınır tabakadaki viskoz alt tabakanın çözümünde, katı yüzeye bitişik ilk düğüm noktasında (ilk hücre yüksekliği) $y^+ \cong 1$ ayarlanması gerekir [26]. Taguchi L₁₆ OD'ye göre tasarlanan LID'lerde temiz hava ve egzoz havası kanallarında levha yakınındaki viskoz alt tabakayı modellemek için ilk hücre yüksekliği hesaplanırken “ $y^+ = 1$ ” kabul edilmiştir. Sayısal çözümlerde, düşük Re sayılı akışlara ve viskoz alt tabakayı ($y^+ < 5$) çözebilecek kadar ince ağ yapısı oluşturulduğundan, iyileştirilmiş duvar fonksiyonu (enhanced wall treatment) kullanılmıştır [27]. Hem temiz hava hem de egzoz havası kanallarında ağ yapıları oluşturulurken, viskoz alt tabakayı çözebilmek için 10-15 hücre kullanılması önerilmektedir [27].

Tüm LID modellerinde sınır tabaka modellemesi, y^+ parametresi kullanılarak yapılmıştır. İç akış hacimlerinin duvar (levha yüzeyi) dibi ağ yapısı, ANSYS/Mesh'de sınır tabakalı ağ yapısı (Inflation) kullanılarak ve “first layer thickness” seçeneği ile oluşturulmuştur. Bu ağ yapısının oluşturulmasında ilk adım, duvara komşu ilk tabakanın yüksekliğinin hesaplanmasıdır. Sınır tabakalı ağ yapısındaki ilk tabakanın yüksekliği y , y^+ denklemi (denklem 3.1) ile hesaplanmıştır. y^+ akışın Re sayısına bağlı olduğundan, Taguchi L₁₆ OD'ye göre tasarlanmış LID modellerinin her birinde, iki farklı sıcaklıktaki temiz hava ve egzoz havası Re sayıları hesaplanmıştır (Tablo 3.3).

Daha sonra sırasıyla; denklem 3.2 kullanılarak yüzey sürtünme katsayıları (c_f), denklem 3.3 ile duvar kayma gerilmeleri (τ_w -The wall shear stress) ve denklem 3.4 kullanılarak sürtünme hızları (U_f) hem temiz hava hem de egzoz havası için hesaplanmıştır. En son aşamada ise elde edilen sonuçlar denklem 3.1'de yerine yazılarak hem egzoz hem de temiz hava kanallarında oluşturulacak sınır tabakalı ağ yapıları için ilk hücre yükseklikleri (y) hesaplanmıştır.

$$y = \frac{y^+ \mu}{U_f \rho} \quad (3.1)$$

$$c_f = 0.079 \text{ Re}^{-0.25} \quad (3.2)$$

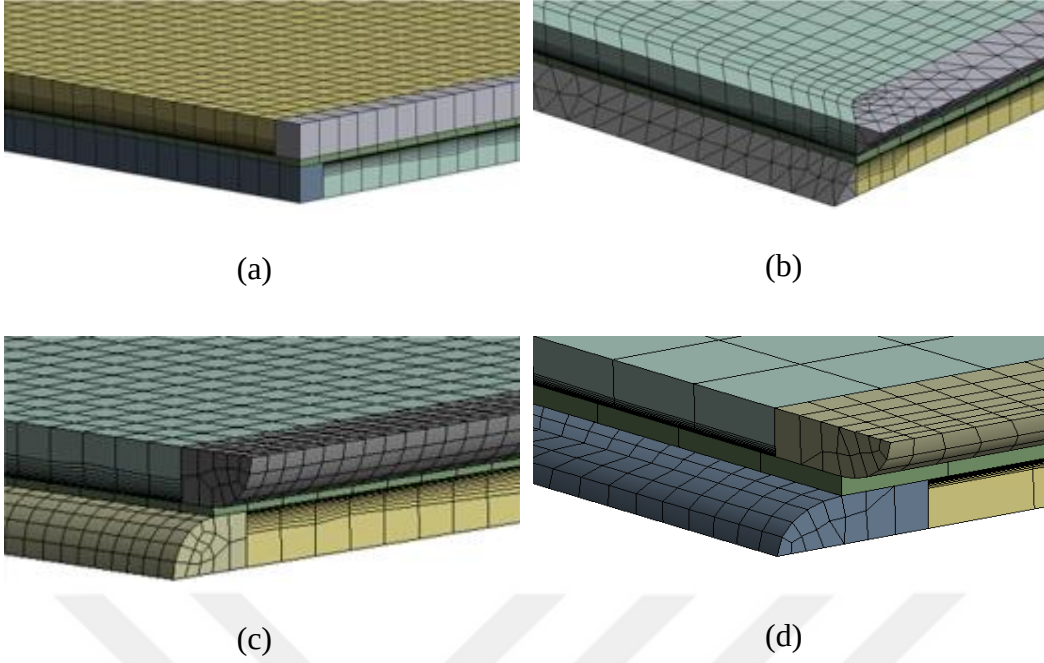
$$\tau_w = \frac{c_f \rho u^2}{2} \quad (3.3)$$

$$U_f = \left(\frac{\tau_w}{\rho} \right)^{0.5} \quad (3.4)$$

Burada τ_w duvar kayma gerilmesini (Pa), U_f sürtünme hızını (m/s), c_f yüzey sürtünme katsayısını (-), ρ akışkanın yoğunluğunu (kg/m^3), μ dinamik viskoziteyi (kg/ms), y ilk hücre yüksekliğini (m) ifade etmektedir [25].

Temiz hava ve egzoz havası için tüm modellerdeki türbülans yoğunlukları (Turbulence intensity) denklem 3.5 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$I = 0.16 \text{ Re}^{-1/8} \quad (3.5)$$



Şekil 3.5. Levhalı ısı değiştirici kanal giriş geometrileri: (a) küt-K, (b) üçgen-U, (c) dairesel-D, (d) çan ağzı-C (bell mouth).

3.2. Sayısal Çözüm Sonuçları

Bölüm 2.1’de belirlenen LID tasarım parametreleri ve alt seviyeleri ile Taguchi L₁₆ (4⁴) OD’ye uygun olarak; 4 parametrelili ve 4 seviyeli deney tasarım matrisi oluşturulmuştur. Nihai sayısal çözümlerden önce, LID’lerin ağ yapısı eleman sayısını belirlemek (ağ yapılarının eleman sayısından bağımsızlığını sağlamak) amacıyla tüm KGG’li LID’lerle bir ön çalışma yapılmıştır. Bu ön çalışmada tasarım parametrelerinden, ağ yapısı eleman sayılarını en fazla etkileyeceği düşünülen, KGG’nin alt seviyelerinin (küt, dairesel, üçgen, çan ağzı) her biri için; levha boyutları 190×190 mm, kanal yüksekliği 2 mm olan LID sayısal modelleri oluşturulmuştur. Temiz hava ve egzoz havası kanallarındaki basınç düşümleri ile temiz hava ve egzoz havası kanallarından çıkış sıcaklıkları, aynı yapısal ağ modeli ile ancak farklı yoğunluktaki eleman sayıları ile elde edilmiştir. Bu modellerde temiz hava ve egzoz havası debileri 200 m³/h alınarak sayısal çözümler yapılmıştır. Bu çalışmanın sonuçları aşağıda tablolarla verilmiştir. Taguchi L₁₆ OD’ye göre tasarlanan farklı KGG’li LID modellerinden, ANSYS/Fluent yazılımı kullanılarak elde edilen temiz hava ve egzoz havası kanallarında oluşan basınç düşümleri; Tablo 3.4’te, Tablo 3.6’da, Tablo 3.8’de ve Tablo 3.10’da verilmiştir. Temiz hava ve egzoz havası kanallarının LID’ye giriş ve çıkış sıcaklıkları ile sıcaklık farkları; Tablo 3.5’te, Tablo 3.7’de, Tablo

3.9’da ve Tablo 3.11’de verilmiştir. Tablolarda sonuçların ağ yapısının eleman sayısından bağımsız olduğu sayısal modeller, koyu yazılarak vurgulanmıştır. Buna göre asıl analizlerde küt, üçgen, dairesel ve çan ağzı KGG’li LID modellerine uygulanacak, ağ yapısı oluşturma parametrelerinin kullanılacağı ağ yapısı eleman sayıları sırasıyla; 1,254,125, 1,670,547, 1,387,582 ve 1,529,241 olarak belirlenmiştir.

Taguchi L₁₆ OD’ye göre tasarlanan 16 LID modeli ile yapılan asıl analizlerde, aynı KGG’li LID modellerin tamamında aynı ağ yapısı oluşturma parametreleri kullanılmıştır. Bununla yetinilmeyip, ayrıca her bir LID modelinin ağ yapısının eleman sayıları, bir alt ve bir üst kademeli ağ yapısı oluşturma parametreleri ile değiştirilerek, üç farklı ağ sayısı yoğunluğuyla oluşturulmuştur. Böylece ağ sayısından bağımsızlığın doğrulanması amacıyla ikinci bir kontrol daha yapılmıştır. Farklı ağ sayılarında oluşturulan her bir KGG’li LID modelleri için temiz hava ve egzoz havası tarafındaki basınç düşümlerinin (Δp) ve sıcaklık farklarının (ΔT) ortalama sonuçlardan farkları aşağıdaki eşitliklerle hesaplanmıştır.

$$\overline{\Delta p_{t,g-\zeta}} = \frac{\sum_{i=1}^n (\Delta p_{t,g-\zeta,i} - \Delta p_{t,g-\zeta,ort.})}{n \Delta p_{t,g-\zeta,ort.}} \quad (3.6)$$

$$\overline{\Delta p_{e,g-\zeta}} = \frac{\sum_{i=1}^n (\Delta p_{e,g-\zeta,i} - \Delta p_{e,g-\zeta,ort.})}{n \Delta p_{e,g-\zeta,ort.}} \quad (3.7)$$

$$\overline{\Delta T_{t,g-\zeta}} = \frac{\sum_{i=1}^n (\Delta T_{t,g-\zeta,i} - \Delta T_{t,g-\zeta,ort.})}{n \Delta T_{t,g-\zeta,ort.}} \quad (3.8)$$

$$\overline{\Delta T_{e,g-\zeta}} = \frac{\sum_{i=1}^n (\Delta T_{e,g-\zeta,i} - \Delta T_{e,g-\zeta,ort.})}{n \Delta T_{e,g-\zeta,ort.}} \quad (3.9)$$

Tablo 3.4. Küt KGG’li LID’de basınç düşümüne göre ağ yapısı ve eleman sayısından bağımsızlık ($V=200 \text{ m}^3/\text{h}$, $h=2 \text{ mm}$, $L=190 \text{ mm}$).

Eleman sayısı	$\Delta p_{t,g-\zeta}$ (Pa)	$\overline{\Delta p_{t,g-\zeta}}$ (%)	$\Delta p_{e,g-\zeta}$ (Pa)	$\overline{\Delta p_{e,g-\zeta}}$ (%)
743,408	52.4	5.1	53.8	4.5
827,438	50.6	1.4	52.2	1.4
1,111,022	49.2	-1.4	51.3	-0.3
1,254,125	48.5	-2.7	50.9	-1.1
1,603,946	47.7	-4.4	50.5	-1.9
1,949,392	50.9	2.0	50.1	-2.6
Ortalama	49.9	0.00	51.5	0.00

Tablo 3.5. Küt KGG'li LID'de sıcaklık farkına göre ağ yapısı ve eleman sayısından bağımsızlık ($\nabla=200 \text{ m}^3/\text{h}$, $h=2 \text{ mm}$, $L=190 \text{ mm}$).

Eleman sayısı	$\Delta T_{t,g-\zeta} \text{ (K)}$	$\overline{\Delta T}_{t,g-\zeta} \text{ (%)}$	$\Delta T_{e,g-\zeta} \text{ (K)}$	$\overline{\Delta T}_{e,g-\zeta} \text{ (%)}$
743,408	8.50	1.89	8.95	1.91
827,438	8.40	0.69	8.85	0.72
1,111,022	8.33	-0.10	8.77	-0.10
1,254,125	8.30	-0.45	8.74	-0.46
1,603,946	8.26	-0.96	8.70	-0.99
1,949,392	8.25	-1.07	8.69	-1.10
Ortalama	8.34	0.000	8.78	0.000

Tablo 3.6. Üçgen KGG'li LID'de basınç düşümüne göre ağ yapısı ve eleman sayısından bağımsızlık ($\nabla=200 \text{ m}^3/\text{h}$, $h=2 \text{ mm}$, $L=190 \text{ mm}$).

Eleman sayısı	$\Delta p_{t,g-\zeta} \text{ (Pa)}$	$\overline{\Delta p}_{t,g-\zeta} \text{ (%)}$	$\Delta p_{e,g-\zeta} \text{ (Pa)}$	$\overline{\Delta p}_{e,g-\zeta} \text{ (%)}$
484,183	50.9	-3.3	50.3	-3.5
728,394	54.7	4.0	54.1	3.8
1,166,733	53.4	1.5	52.8	1.4
1,670,547	53.0	0.8	52.5	0.9
1,903,662	52.5	-0.1	52.1	0.1
2,392,330	51.0	-3.1	50.7	-2.7
Ortalama	52.6	0.000	52.1	0.000

Tablo 3.7. Üçgen KGG'li LID'de sıcaklık farkına göre ağ yapısı ve eleman sayısından bağımsızlık ($\nabla=200 \text{ m}^3/\text{h}$, $h=2 \text{ mm}$, $L=190 \text{ mm}$).

Eleman sayısı	$\Delta T_{t,g-\zeta} \text{ (K)}$	$\overline{\Delta T}_{t,g-\zeta} \text{ (%)}$	$\Delta T_{e,g-\zeta} \text{ (K)}$	$\overline{\Delta T}_{e,g-\zeta} \text{ (%)}$
484,183	13.54	46.29	8.12	-6.88
728,394	8.52	-7.95	8.97	2.82
1,166,733	8.43	-8.97	8.87	1.69
1,670,547	8.40	-9.24	8.85	1.41
1,903,662	8.38	-9.52	8.82	1.09
2,392,330	8.28	-10.61	8.71	-0.13
Ortalama	9.26	0.000	8.72	0.000

Tablo 3.8. Dairesel KGG'li LID'de basınç düşümüne göre ağ yapısı ve eleman sayısından bağımsızlık ($\nabla=200 \text{ m}^3/\text{h}$, $h=2 \text{ mm}$, $L=190 \text{ mm}$).

Eleman sayısı	$\Delta p_{t,g-\zeta} \text{ (Pa)}$	$\overline{\Delta p}_{t,g-\zeta} \text{ (%)}$	$\Delta p_{e,g-\zeta} \text{ (Pa)}$	$\overline{\Delta p}_{e,g-\zeta} \text{ (%)}$
402,868	40.1	-20.77	39.2	-21.55
852,702	58.9	16.26	56.8	13.65
1,028,395	55.8	10.26	53.1	6.26
1,387,582	50.8	0.38	51.2	2.48
1,890,486	48.0	-5.13	50.1	0.34
2,246,351	50.1	-1.00	49.4	-1.17
Ortalama	50.6	0.000	50.0	0.000

Tablo 3.9. Dairesel KGG'li LID'de sıcaklık farkına göre ağ yapısı ve eleman sayısından bağımsızlık ($V=200 \text{ m}^3/\text{h}$, $h=2 \text{ mm}$, $L=190 \text{ mm}$).

Eleman sayısı	$\Delta T_{t,g-\zeta} \text{ (K)}$	$\overline{\Delta T}_{t,g-\zeta} \text{ (%)}$	$\Delta T_{e,g-\zeta} \text{ (K)}$	$\overline{\Delta T}_{e,g-\zeta} \text{ (%)}$
402,868	14.27	52.40	12.69	34.06
852,702	8.67	-7.35	9.14	-3.51
1,028,395	8.51	-9.13	8.96	-5.39
1,387,582	8.31	-11.21	8.75	-7.65
1,890,486	8.18	-12.65	8.62	-9.00
2,246,351	8.23	-12.06	8.66	-8.51
Ortalama	9.36	0.000	9.47	0.000

Tablo 3.10. Çan ağzı KGG'li LID'de basınç düşümüne göre ağ yapısı ve eleman sayısından bağımsızlık ($V=200 \text{ m}^3/\text{h}$, $h=2 \text{ mm}$, $L=190 \text{ mm}$).

Eleman sayısı	$\Delta p_{t,g-\zeta} \text{ (Pa)}$	$\overline{\Delta p}_{t,g-\zeta} \text{ (%)}$	$\Delta p_{e,g-\zeta} \text{ (Pa)}$	$\overline{\Delta p}_{e,g-\zeta} \text{ (%)}$
724,404	33.6	-33.23	33.0	-33.64
906,669	56.1	11.61	56.9	14.32
1,229,694	54.6	8.56	53.5	7.40
1,529,241	53.6	6.66	52.7	5.86
2,075,845	51.9	3.24	51.3	3.06
2,243,316	51.8	3.15	51.3	2.99
Ortalama	50.3	0.000	49.8	0.000

Tablo 3.11. Çan ağzı KGG'li LID'de sıcaklık farkına göre ağ yapısı ve eleman sayısından bağımsızlık ($V=200 \text{ m}^3/\text{h}$, $h=2 \text{ mm}$, $L=190 \text{ mm}$).

Eleman sayısı	$\Delta T_{t,g-\zeta} \text{ (K)}$	$\overline{\Delta T}_{t,g-\zeta} \text{ (%)}$	$\Delta T_{e,g-\zeta} \text{ (K)}$	$\overline{\Delta T}_{e,g-\zeta} \text{ (%)}$
724,404	13.84	47.24	0.01	-99.87
906,669	8.81	-6.20	9.28	24.25
1,229,694	8.52	-9.33	8.97	20.10
1,529,241	8.47	-9.90	8.91	19.40
2,075,845	8.37	-10.88	8.82	18.08
2,243,316	8.37	-10.92	8.81	18.03
Ortalama	9.40	-6.8×10^{-15}	7.47	0.000

3.3. Taguchi $L_{16} (4^4)$ OD'ye Göre Tasarlanan LID Modellerinin HAD Sonuçları

Bölüm 3.2'de verilen ağ yapısı eleman sayısından bağımsızlık çalışmasının sonuçlarına uygun olarak, Taguchi L_{16} OD'ye göre tasarlanan 16 LID modelinin her biri için üç farklı eleman sayısında sayısal çözümler yapılmıştır. Basınç düşümü sonuçları Tablo 3.12'de, Tablo 3.13'te, Tablo 3.14'te, Tablo 3.15'te ve sıcaklık farkı sonuçları Tablo 3.16'da, Tablo 3.17'de, Tablo 3.18'de, Tablo 3.19'da verilmiştir. Taguchi analizlerinde hedef performans parametrelerinin hesabında, bu tablolarda verilen her bir LID modelinin ortalama sonuçları (Δp ve ΔT) kullanılmıştır. Özetlemek gerekirse; ilk aşamada dört farklı KGG için yapılan ağ yapısından ve eleman sayısından bağımsızlık ön çalışmasıyla, toplam analiz sayısı azaltılmıştır. Ayrıca,

aşağıda sonuçları verilen ikinci aşamadaki ağ yapısı ve eleman sayısı bağımsızlık çalışması ile de sonuçların ağ yapısı eleman sayısından bağımsızlığı ikinci kez kontrol edilmiştir. Dolayısıyla, Taguchi analizlerindeki hedef performans parametrelerinin hesabında, ikinci aşamada yapılan analizlerin sonuçlarının (Δp ve ΔT) ortalamaları kullanılarak, çalışmada elde edilen sonuçların tekrarlanabilirliği ve hesaplanabilirliği doğrulanmıştır.

Tablo 3.12. L_{16} 'daki küt KGG'li LID'lerin basınç düşümlerinin ağ yapısı ve eleman sayısından bağımsızlığı.

MN			Eleman sayısı	$\Delta p_{t,g-\zeta}$ (Pa)	$\overline{\Delta p}_{t,g-\zeta}$ (%)	$\Delta p_{e,g-\zeta}$ (Pa)	$\overline{\Delta p}_{e,g-\zeta}$ (%)	
1	K-20-10-100	Re _t	278.6	1,198,082	43.85	-0.20	45.75	-0.25
		Re _e	254.1	1,429,220	43.95	0.04	45.89	0.04
				1,631,250	44.01	0.17	45.96	0.20
		Ortalama		43.94	-1.62×10^{-14}	45.87	-1.03×10^{-14}	
2	K-24-15-120	Re _t	500.3	1,284,261	32.40	-0.93	33.53	0.85
		Re _e	456.2	1,499,251	33.05	1.07	33.25	0.01
				1,755,062	32.66	-0.14	32.96	-0.86
		Ortalama		32.70	0.00	33.25	1.43×10^{-14}	
3	K-28-20-190	Re _t	779.9	1,222,390	41.69	2.59	42.06	5.52
		Re _e	711.2	1,432,685	40.52	-0.28	38.82	-2.61
				1,652,563	39.70	-2.31	38.70	-2.91
		Ortalama		40.64	0.00	39.86	-1.1×10^{-14}	
4	K-32-25-240	Re _t	1114.2	1,229,677	46.92	2.87	49.35	6.08
		Re _e	1016.1	1,400,000	46.22	1.34	45.99	-1.15
				1,661,734	43.69	-4.21	44.23	-4.93
		Ortalama		45.61	-1.07×10^{-14}	46.52	1.04×10^{-14}	

Tablo 3.13. L₁₆'daki üçgen KGG'li LIDlerin basınç düşümlerinin ağ yapısı ve eleman sayısından bağımsızlığı.

MN			Eleman sayısı	$\Delta p_{t,g-\zeta}$ (Pa)	$\overline{\Delta p}_{t,g-\zeta}$ (%)	$\Delta p_{e,g-\zeta}$ (Pa)	$\overline{\Delta p}_{e,g-\zeta}$ (%)	
5	U-20-15-190	Re _t	418.8	1,418,218	41.79	3.89	39.83	0.92
		Re _e	381.9	1,633,960	39.48	-1.86	39.78	0.80
				1,973,235	39.41	-2.02	38.79	-1.71
		Ortalama		40.23	-5.92×10 ⁻¹⁵	39.47	1.20×10 ⁻¹⁴	
6	U-24-10-240	Re _t	336.3	1,678,211	149.96	7.74	146.57	5.82
		Re _e	306.7	1,930,218	133.35	-4.18	135.00	-2.53
				2,059,486	134.23	-3.55	133.95	-3.29
		Ortalama		139.18	2.04×10 ⁻¹⁴	138.51	6.95×10 ⁻¹⁵	
7	U-28-25-100	Re _t	960.7	1,421,352	15.56	0.08	15.67	0.51
		Re _e	876.07	1,645,443	15.62	0.43	15.56	-0.15
				2,004,186	15.47	-0.52	15.53	-0.36
		Ortalama		15.55	-3.81×10 ⁻¹⁵	15.59	1.13×10 ⁻¹⁴	
8	U-32-20-120	Re _t	885.7	1,485,492	30.24	0.46	30.30	0.39
		Re _e	807.7	1,617,243	30.09	-0.03	30.17	-0.04
				1,758,731	29.97	-0.43	30.08	-0.35
		Ortalama		30.10	0.00	30.18	7.84×10 ⁻¹⁵	

Tablo 3.14. L₁₆'daki dairesel KGG'li LID'lerin basınç düşümlerinin ağ yapısı ve eleman sayısından bağımsızlığı.

MN			Eleman sayısı	$\Delta p_{t,g-\zeta}$ (Pa)	$\overline{\Delta p}_{t,g-\zeta}$ (%)	$\Delta p_{e,g-\zeta}$ (Pa)	$\overline{\Delta p}_{e,g-\zeta}$ (%)	
9	D-20-20-240	Re _t	558.2	1,253,476	33.23	1.95	33.85	1.75
		Re _e	509.1	1,360,743	32.38	-0.67	33.25	-0.03
				1,462,605	32.18	-1.28	32.69	-1.72
		Ortalama		32.60	0.00	33.26	0.00	
10	D-24-25-190	Re _t	833.3	1,183,585	22.73	2.15	22.83	2.21
		Re _e	759.9	1,378,643	22.18	-0.34	22.25	-0.39
				1,575,031	21.86	-1.80	21.93	-1.81
		Ortalama		22.26	0.00	22.34	0.00	
11	D-28-10-120	Re _t	390.7	1,217,506	80.40	0.69	80.90	0.27
		Re _e	356.3	1,315,047	79.97	0.17	81.62	1.15
				1,412,685	79.16	-0.86	79.54	-1.42
		Ortalama		79.84	0.00	80.69	0.00	
12	D-32-15-100	Re _t	665.3	1,230,305	39.95	0.31	40.23	-0.33
		Re _e	606.7	1,323,202	39.83	0.00	40.66	0.73
				1,420,058	39.70	-0.31	40.20	-0.39
		Ortalama		39.83	0.00	40.36	0.30	

Tablo 3.15. L₁₆'daki çan ağzı KGG'li LID'lerin basınç düşümlerinin ağ yapısı ve eleman sayısından bağımsızlığı.

MN			Eleman sayısı	$\Delta p_{t,g-\zeta}$ (Pa)	$\overline{\Delta p}_{t,g-\zeta}$ (%)	$\Delta p_{e,g-\zeta}$ (Pa)	$\overline{\Delta p}_{e,g-\zeta}$ (%)	
13	C-20-25-120	Re _t	689.1	848,800	11.10	-0.29	11.16	-0.43
		Re _e	628.4	964,051	11.10	-0.24	11.21	-0.01
				1,100,561	11.19	0.53	11.26	0.44
			Ortalama		11.13	0.00	11.21	0.00
14	C-24-20-100	Re _t	662.06	839,334	17.25	0.39	17.44	0.39
		Re _e	603.7	957,597	17.19	0.04	17.35	-0.14
				1,082,978	17.11	-0.43	17.33	-0.25
			Ortalama		17.18	0.00	17.37	0.00
15	C-28-15-240	Re _t	587.4	868,292	83.11	3.76	89.23	3.51
		Re _e	535.6	988,639	79.29	-1.02	85.97	-0.27
				1,082,813	77.91	-2.74	83.41	-3.24
			Ortalama		80.11	0.00	86.20	0.00
16	C-32-10-190	Re _t	448.0	819,347	171.22	5.48	167.07	1.70
		Re _e	408.5	937,931	160.35	-1.22	158.30	-3.64
				1,061,996	155.42	-4.26	167.45	1.94
			Ortalama		162.33	0.00	164.27	0.00

Tablo 3.16. L₁₆'daki küt KGG'li LID'lerin sıcaklık farklarının ağ yapısı ve eleman sayısından bağımsızlığı.

MN			Eleman sayısı	$\Delta T_{t,g-\zeta}$ (K)	$\overline{\Delta T}_{t,g-\zeta}$ (%)	$\Delta T_{e,g-\zeta}$ (K)	$\overline{\Delta T}_{e,g-\zeta}$ (%)	
1	K-20-10-100	Re _t	278.6	1,198,082	10.25	-0.04	10.79	-0.03
		Re _e	254.1	1,429,220	10.25	0.01	10.80	0.01
				1,631,250	10.26	0.03	10.80	0.025
			Ortalama		10.25	-5.78×10^{-15}	10.79	5.48×10^{-15}
2	K-24-15-120	Re _t	500.3	1,284,261	8.70	-0.06	9.16	-0.06
		Re _e	456.2	1,499,251	8.72	0.18	9.18	0.17
				1,755,062	8.69	-0.13	9.15	-0.12
			Ortalama		8.70	0.00	9.16	6.47×10^{-15}
3	K-28-20-190	Re _t	779.9	1,222,390	8.71	1.29	9.17	1.29
		Re _e	711.2	1,432,685	8.56	-0.46	9.01	-0.46
				1,652,563	8.52	-0.83	8.97	-0.83
			Ortalama		8.60	0.00	9.05	6.56×10^{-15}
4	K-32-25-240	Re _t	1114.3	1,229,677	8.42	1.49	8.86	1.46
		Re _e	1016.1	1,400,000	8.29	0.01	8.73	0.03
				1,661,734	8.17	-1.50	8.60	-1.50
			Ortalama		8.29	0.00	8.73	6.81×10^{-15}

Tablo 3.17. L₁₆'daki üçgen KGG'li LID'lerin sıcaklık farklarının ağ yapısı ve eleman sayısından bağımsızlığı.

MN			Eleman sayısı	$\Delta T_{t,g-\zeta}$ (K)	$\overline{\Delta T}_{t,g-\zeta}$ (%)	$\Delta T_{e,g-\zeta}$ (K)	$\overline{\Delta T}_{e,g-\zeta}$ (%)	
5	U-20-15-190	Re _t	418.8	1,418,218	10.22	0.49	10.77	0.55
		Re _e	381.9	1,633,960	10.17	-0.08	10.70	-0.12
				1,973,235	10.13	-0.42	10.67	-0.43
			Ortalama		10.17	0.00	10.71	0.00
6	U-24-10-240	Re _t	336.3	1,678,211	11.74	0.61	12.37	0.66
		Re _e	306.7	1,930,218	11.64	-0.29	12.24	-0.35
				2,059,486	11.63	-0.32	12.25	-0.31
			Ortalama		11.67	0.00	12.29	0.00
7	U-28-25-100	Re _t	960.7	1,421,352	5.30	0.13	5.58	0.14
		Re _e	876.07	1,645,443	5.30	0.12	5.58	0.11
				2,004,186	5.28	-0.25	5.56	-0.25
			Ortalama		5.30	0.00	5.58	0.00
8	U-32-20-120	Re _t	885.7	1,485,492	6.76	0.25	7.12	0.26
		Re _e	807.7	1,617,243	6.74	-0.02	7.10	-0.02
				1,758,731	6.73	-0.24	7.08	-0.24
			Ortalama		6.75	0.00	7.10	0.00

Tablo 3.18. L₁₆'daki dairesel KGG'li LID'lerin sıcaklık farklarının ağ yapısı ve eleman sayısından bağımsızlığı.

MN			Eleman sayısı	$\Delta T_{t,g-\zeta}$ (K)	$\overline{\Delta T}_{t,g-\zeta}$ (%)	$\Delta T_{e,g-\zeta}$ (K)	$\overline{\Delta T}_{e,g-\zeta}$ (%)	
9	D-20-20-240	Re _t	558.2	1,253,476	9.91	0.43	10.43	0.42
		Re _e	509.1	1,360,743	9.86	-0.13	10.38	-0.09
				1,462,605	9.84	-0.30	10.36	-0.33
				Ortalama	9.87	0.00	10.39	0.00
10	D-24-25-190	Re _t	833.3	1,183,585	7.92	0.89	8.34	0.87
		Re _e	759.9	1,378,643	7.84	-0.14	8.26	-0.12
				1,575,031	7.79	-0.76	8.20	-0.75
				Ortalama	7.85	0.00	8.26	0.00
11	D-28-10-120	Re _t	390.7	1,217,506	10.13	0.03	10.66	0.05
		Re _e	356.3	1,315,047	10.14	0.18	10.68	0.18
				1,412,685	10.10	-0.21	10.63	-0.22
				Ortalama	10.13	0.00	10.66	0.00
12	D-32-15-100	Re _t	665.3	1,230,305	7.60	0.00	8.00	0.00
		Re _e	606.7	1,323,202	7.61	0.19	8.01	0.19
				1,420,058	7.58	-0.19	7.98	-0.19
				Ortalama	7.60	0.00	8.00	0.00

Tablo 3.19. L₁₆'daki çan ağzı KGG'li LID'lerin sıcaklık farklarının ağ yapısı ve eleman sayısından bağımsızlığı.

MN			Eleman sayısı	$\Delta T_{t,g-\zeta}$ (K)	$\overline{\Delta T}_{t,g-\zeta}$ (%)	$\Delta T_{e,g-\zeta}$ (K)	$\overline{\Delta T}_{e,g-\zeta}$ (%)	
13	C-20-25-120	Re _t	689.1	848,800	6.54	-0.20	6.89	-0.20
		Re _e	628.4	964,051	6.55	-0.09	6.90	-0.09
				1,100,561	6.58	0.29	6.92	0.28
				Ortalama	6.56	0.00	6.90	0.00
14	C-24-20-100	Re _t	662.06	839,334	6.75	0.25	7.11	0.25
		Re _e	603.7	957,597	6.73	-0.02	7.09	-0.03
				1,082,978	6.72	-0.22	7.07	-0.22
				Ortalama	6.74	0.00	7.09	0.00
15	C-28-15-240	Re _t	587.4	868,292	10.46	0.59	11.02	0.63
		Re _e	535.6	988,639	10.39	-0.10	10.93	-0.13
				1,082,813	10.34	-0.49	10.89	-0.50
				Ortalama	10.40	0.00	10.95	0.00
16	C-32-10-190	Re _t	448.0	819,347	11.08	0.35	11.67	0.34
		Re _e	408.5	937,931	11.01	-0.31	11.59	-0.31
				1,061,996	11.04	-0.03	11.62	-0.03
				Ortalama	11.04	0.00	11.63	0.00

4. ARAŞTIRMA VE SONUÇLAR

4.1. Performans Parametreleri

Temiz hava ve egzoz havası tarafları için kütlenin ve enerjinin korunumu denklem 4.1’de ve denklem 4.2’de verilmiştir.

$$\dot{m}_{giren} = \dot{m}_{çıkan} \quad (4.1)$$

$$\dot{E}_{giren} = \dot{E}_{çıkan} \quad (4.2)$$

Sayısal çözümlerden elde edilen ve Bölüm 3.3’te verilen, basınç düşümü ve sıcaklık değişimi sonuçları kullanılarak aşağıda ayrıntılı açıklanan LID performans parametreleri hesaplanmıştır. Her bir performans parametresinin sonuçları Tablo 4.1-Tablo 4.20’de verilmiştir.

4.1.1. Temiz hava tarafında geri kazanılan ısı gücü- Q_{gk}

Geri kazanılan ısı gücü;

$$Q_{gk} = \dot{m} \times c_p \times (T_{t,\phi} - T_{t,g}) \quad (4.3)$$

Geri kazanılabilecek maksimum ısı gücü;

$$Q_{gk,mak} = \dot{m} \times c_p \times (T_{e,g} - T_{t,g}) \quad (4.4)$$

Farklı ağ yapılarında oluşturulan LID modellerinde geri kazanılan ısı güçlerinin her bir KGG’de ortalama sonuçlardan farkları aşağıdaki eşitlikle hesaplanmıştır.

$$\overline{\Delta Q}_{gk,t} = \frac{\sum_{i=1}^n (\Delta Q_{gk,t} - \Delta Q_{gk,t,ort.})}{n \Delta Q_{gk,t,ort.}} \quad (4.5)$$

Tablo 4.1. L₁₆'daki küt KGG'li LID'lerde geri kazanılan ısı güçlerinin ağ yapısı eleman sayısından bağımsızlığı.

MN			Eleman sayısı	Q _{gk,t} (W)	$\overline{\Delta Q}_{gk,t}$ (%)	
1	K-20-10-100	Re _t	278.6	1,198,082	105.471	-0.039
		Re _e	254.1	1,429,220	105.522	0.009
				1,631,250	105.543	0.029
				Ortalama	105.512	0.000
2	K-24-15-120	Re _t	500.3	1,284,261	164.967	-0.058
		Re _e	456.2	1,499,251	165.366	0.184
				1,755,062	164.854	-0.126
				Ortalama	165.062	-5.74×10 ⁻¹⁵
3	K-28-20-190	Re _t	779.9	1,222,390	499.691	1.290
		Re _e	711.2	1,432,685	491.060	-0.459
				1,652,563	489.226	-0.831
				Ortalama	493.326	3.81×10 ⁻¹⁵
4	K-32-25-240	Re _t	1114.3	1,229,677	891.837	1.489
		Re _e	1016.1	1,400,000	878.824	0.008
				1,661,734	865.594	-1.497
				Ortalama	878.752	-4.29×10 ⁻¹⁵

Tablo 4.2. L₁₆'daki üçgen KGG'li LID'lerde geri kazanılan ısı güçlerinin ağ yapısı eleman sayısından bağımsızlığı.

MN			Eleman sayısı	Q _{gk,t} (W)	$\overline{\Delta Q}_{gk,t}$ (%)	
5	U-20-15-190	Re _t	418.8	1,418,218	402.025	0.494
		Re _e	381.9	1,633,960	399.741	-0.077
				1,973,235	398.382	-0.417
			Ortalama		400.049	-4.72×10 ⁻¹⁵
6	U-24-10-240	Re _t	336.3	1,678,211	848.425	0.609
		Re _e	306.7	1,930,218	840.836	-0.291
				2,059,486	840.614	-0.318
			Ortalama		843.292	0.000
7	U-28-25-100	Re _t	960.7	1,421,352	83.824	0.131
		Re _e	876.07	1,645,443	83.812	0.117
				2,004,186	83.507	-0.248
			Ortalama		83.714	5.65×10 ⁻¹⁵
8	U-32-20-120	Re _t	885.7	1,485,492	175.912	0.254
		Re _e	807.7	1,617,243	175.433	-0.019
				1,758,731	175.052	-0.236
			Ortalama		175.466	-1.62×10 ⁻¹⁴

Tablo 4.3. L₁₆'daki dairesel KGG'li LID'lerde geri kazanılan ısıll güçlerin ağ yapısı eleman sayısından bağımsızlığı.

MN			Eleman sayısı	Q _{gk,t} (W)	$\overline{\Delta Q}_{gk,t}$ (%)	
9	D-20-20-240	Re _t	558.2	1,253,476	644.488	0.426
		Re _e	509.1	1,360,743	640.950	-0.125
				1,462,605	639.823	-0.301
			Ortalama		641.754	-5.92×10 ⁻¹⁵
10	D-24-25-190	Re _t	833.3	1,183,585	396.440	0.894
		Re _e	759.9	1,378,643	392.389	-0.137
				1,575,031	389.955	-0.757
			Ortalama		392.928	0.000
11	D-28-10-120	Re _t	390.7	1,217,506	213.449	0.029
		Re _e	356.3	1,315,047	213.780	0.184
				1,412,685	212.932	-0.213
			Ortalama		213.387	-4.44×10 ⁻¹⁵
12	D-32-15-100	Re _t	665.3	1,230,305	132.621	-0.004
		Re _e	606.7	1,323,202	132.877	0.189
				1,420,058	132.379	-0.186
			Ortalama		132.626	-1.42×10 ⁻¹⁴

Tablo 4.4. L₁₆'daki çan ağzı KGG'li LID'lerde geri kazanılan ısıll güçlerin ağ yapısı eleman sayısından bağımsızlığı.

MN			Eleman sayısı	Q _{gk,t} (W)	$\overline{\Delta Q}_{gk,t}$ (%)	
13	C-20-25-120	Re _t	689.1	848,800	108.354	-0.198
		Re _e	628.4	964,051	108.474	-0.087
				1,100,561	108.878	0.285
			Ortalama	108.569	0.000	
14	C-24-20-100	Re _t	662.06	839,334	89.436	0.247
		Re _e	603.7	957,597	89.194	-0.024
				1,082,978	89.016	-0.223
			Ortalama	89.216	-5.29×10 ⁻¹⁵	
15	C-28-15-240	Re _t	587.4	868,292	925.517	0.593
		Re _e	535.6	988,639	919.157	-0.099
				1,082,813	915.519	-0.494
			Ortalama	920.064	-8.23×10 ⁻¹⁵	
16	C-32-10-190	Re _t	448.0	819,347	667.651	0.349
		Re _e	408.5	937,931	663.232	-0.315
				1,061,996	665.097	-0.034
			Ortalama	665.327	-5.7×10 ⁻¹⁵	

4.1.2. Duyulur ısıl etkenlik- ε

Duyulur ısıl etkenlik; temiz hava tarafında geri kazanılan ısıl gücün, teorik olarak geri kazanılabilecek maksimum ısıl güce oranıdır. Duyulur ısıl etkenlik denklem 4.6'da tanımlanmıştır.

$$\varepsilon = \frac{Q_{gk,t}}{Q_{gk,mak.}} \quad (4.6)$$

Farklı ağ sayılarında oluşturulan LID modellerin duyulur ısıl etkenliklerinin her bir KGG için çalışılan aralıktaki ortalama sonuçlardan farkları aşağıdaki eşitlikle hesaplanmıştır.

$$\overline{\Delta\varepsilon} = \frac{\sum_{i=1}^n (\varepsilon - \varepsilon_{ort.})}{n \varepsilon_{ort.}} \quad (4.7)$$

Tablo 4.5. L₁₆'daki küt KGG'li LID'lerde duyulur ısıl etkenliğin ağ yapısı eleman sayısından bağımsızlığı.

MN			Eleman sayısı	ε (%)	$\overline{\Delta\varepsilon}$ (%)	
1	K-20-10-100	Re _t	278.6	1,198,082	68.36	-0.039
		Re _e	254.1	1,429,220	68.40	0.009
				1,631,250	68.41	0.029
			Ortalama		68.39	0.000
2	K-24-15-120	Re _t	500.3	1,284,261	57.99	-0.058
		Re _e	456.2	1,499,251	58.13	0.184
				1,755,062	57.95	-0.126
			Ortalama		58.02	6.38×10 ⁻¹⁵
3	K-28-20-190	Re _t	779.9	1,222,390	58.05	1.290
		Re _e	711.2	1,432,685	57.05	-0.459
				1,652,563	56.83	-0.831
			Ortalama		57.31	-1.29×10 ⁻¹⁴
4	K-32-25-240	Re _t	1114.3	1,229,677	56.11	1.489
		Re _e	1016.1	1,400,000	55.29	0.008
				1,661,734	54.46	-1.497
			Ortalama		55.29	-1.33×10 ⁻¹⁴

Tablo 4.6. L₁₆'daki üçgen KGG'li LID'lerde duyulur ısı etkenliğinin ağ yapısı eleman sayısından bağımsızlığı.

MN			Eleman sayısı	ε (%)	$\overline{\Delta\varepsilon}$ (%)	
5	U-20-15-190	Re _t	418.8	1,418,218	68.15	0.494
		Re _e	381.9	1,633,960	67.77	-0.077
				1,973,235	67.54	-0.417
			Ortalama	67.82	5.45×10 ⁻¹⁵	
6	U-24-10-240	Re _t	336.3	1,678,211	78.28	0.609
		Re _e	306.7	1,930,218	77.58	-0.291
				2,059,486	77.56	-0.318
			Ortalama	77.81	1.43×10 ⁻¹⁴	
7	U-28-25-100	Re _t	960.7	1,421,352	35.35	0.131
		Re _e	876.07	1,645,443	35.35	0.117
				2,004,186	35.22	-0.248
			Ortalama	35.31	-2.09×10 ⁻¹⁴	
8	U-32-20-120	Re _t	885.7	1,485,492	45.08	0.254
		Re _e	807.7	1,617,243	44.96	-0.019
				1,758,731	44.86	-0.236
			Ortalama	44.97	8.23×10 ⁻¹⁵	

Tablo 4.7. L₁₆'daki dairesel KGG'li LID'lerde duyulur ısı etkenliğinin ağ yapısı eleman sayısından bağımsızlığı.

MN			Eleman sayısı	ε (%)	$\overline{\Delta\varepsilon}$ (%)	
9	D-20-20-240	Re _t	558.2	1,253,476	66.07	0.426
		Re _e	509.1	1,360,743	65.71	-0.125
				1,462,605	65.59	-0.300
			Ortalama	65.79	5.64×10^{-15}	
10	D-24-25-190	Re _t	833.3	1,183,585	52.80	0.893
		Re _e	759.9	1,378,643	52.26	-0.137
				1,575,031	51.94	-0.756
			Ortalama	52.34	1.41×10^{-14}	
11	D-28-10-120	Re _t	390.7	1,217,506	67.52	0.029
		Re _e	356.3	1,315,047	67.63	0.184
				1,412,685	67.36	-0.213
			Ortalama	67.50	5.48×10^{-15}	
12	D-32-15-100	Re _t	665.3	1,230,305	50.63	-0.003
		Re _e	606.7	1,323,202	50.73	0.189
				1,420,058	50.54	-0.185
			Ortalama	50.63	1.46×10^{-14}	

Tablo 4.8. L₁₆'daki çan ağzı KGG'li LID'lerde duyulur ısı etkenliğinin ağ yapısı eleman sayısından bağımsızlığı.

MN			Eleman sayısı	ε (%)	$\overline{\Delta\varepsilon}$ (%)	
13	C-20-25-120	Re _t	689.1	848,800	43.62	-0.198
		Re _e	628.4	964,051	43.67	-0.087
				1,100,561	43.83	0.285
				Ortalama	43.71	-4.21×10 ⁻¹⁵
14	C-24-20-100	Re _t	662.06	839,334	45.01	0.247
		Re _e	603.7	957,597	44.89	-0.023
				1,082,978	44.80	-0.223
				Ortalama	44.90	-4.11×10 ⁻¹⁵
15	C-28-15-240	Re _t	587.4	868,292	69.71	0.592
		Re _e	535.6	988,639	69.23	-0.098
				1,082,813	68.96	-0.494
				Ortalama	69.30	-5.32×10 ⁻¹⁵
16	C-32-10-190	Re _t	448.0	819,347	73.87	0.349
		Re _e	408.5	937,931	73.38	-0.314
				1,061,996	73.59	-0.034
				Ortalama	73.62	1.00×10 ⁻¹⁴

4.1.3. Akışın sağlanması için gerekli fan gücü-P_{h,t+e}

LID'nin temiz hava ve egzoz havası kanallarında istenen debilerdeki akışın sağlanması için oluşacak sürtünme basınç kayıpları yenilmelidir. Gerekli toplam fan gücü denklem 4.8'de tanımlanmıştır.

$$P_{h,t+e} = 2 \times \left(\frac{\dot{V}}{3600} \times \Delta p \right) \quad (4.8)$$

$$\overline{\Delta P}_{h,t+e} = \frac{\sum_{i=1}^n (P_h - P_{h,ort.})}{n P_{h,ort.}} \quad (4.9)$$

Tablo 4.9. L₁₆'daki küt KGG'li LID'lerde fan güçlerinin ağ yapısı eleman sayısından bağımsızlığı.

MN			Eleman sayısı	P _{ht} (W)	$\overline{\Delta P}_{ht}$ (%)	P _{he} (W)	$\overline{\Delta P}_{he}$ (%)	P _{ht+e} (W)	$\overline{\Delta P}_{ht+e}$ (%)	
1	K-20-10-100	Re _t	278.6	1,198,082	0.360	-0.205	0.375	-0.249	0.735	-0.227
		Re _e	254.1	1,429,220	0.360	0.039	0.376	0.045	0.737	0.042
				1,631,250	0.361	0.166	0.377	0.204	0.738	0.185
				Ortalama	0.360	-2.1×10 ⁻¹⁴	0.376	-4.9×10 ⁻¹⁵	0.736	0.000
2	K-24-15-120	Re _t	500.3	1,284,261	0.490	-0.926	0.507	0.847	0.997	-0.032
		Re _e	456.2	1,499,251	0.500	1.068	0.503	0.014	1.003	0.537
				1,755,062	0.494	-0.141	0.498	-0.861	0.992	-0.504
				Ortalama	0.494	0.000	0.503	3.7×10 ⁻¹⁵	0.997	-3.7×10 ⁻¹⁵
3	K-28-20-190	Re _t	779.9	1,222,390	1.907	2.588	1.924	5.516	3.832	4.038
		Re _e	711.2	1,432,685	1.854	-0.275	1.776	-2.609	3.630	-1.431
				1,652,563	1.816	-2.313	1.771	-2.907	3.587	-2.607
				Ortalama	1.859	0.000	1.824	0.000	3.683	0.000
4	K-32-25-240	Re _t	1114.3	1,229,677	3.964	2.868	4.169	6.077	8.133	4.489
		Re _e	1016.1	1,400,000	3.905	1.340	3.885	-1.147	7.790	0.084
				1,661,734	3.691	-4.209	3.737	-4.930	7.428	-4.573
				Ortalama	3.853	3.55×10 ⁻¹⁵	3.930	-3.6×10 ⁻¹⁵	7.784	-3.8×10 ⁻¹⁵

Tablo 4.10. L₁₆'daki üçgen KGG'li LID'lerde fan güçlerinin ağ yapısı eleman sayısından bağımsızlığı.

MN			Eleman sayısı	P _{ht} (W)	$\overline{\Delta P}_{ht}$ (%)	P _{he} (W)	$\overline{\Delta P}_{he}$ (%)	P _{ht+e} (W)	$\overline{\Delta P}_{ht+e}$ (%)	
5	U-20-15-190	Re _t	418.8	1,418,218	1.310	3.890	1.248	0.919	2.558	2.418
		Re _e	381.9	1,633,960	1.237	-1.865	1.247	0.795	2.484	-0.547
				1,973,235	1.235	-2.025	1.216	-1.714	2.451	-1.871
			Ortalama		1.261	-1.2×10 ⁻¹⁴	1.237	1.79×10 ⁻¹⁴	2.498	-5.9×10 ⁻¹⁵
6	U-24-10-240	Re _t	336.3	1,678,211	8.637	7.747	8.442	5.820	17.080	6.786
		Re _e	306.7	1,930,218	7.680	-4.189	7.775	-2.534	15.456	-3.363
				2,059,486	7.731	-3.558	7.715	-3.286	15.447	-3.422
			Ortalama		8.016	2.9×10 ⁻¹⁴	7.977	1.11×10 ⁻¹⁴	15.994	2.6×10 ⁻¹⁵
7	U-28-25-100	Re _t	960.7	1,421,352	0.196	0.086	0.197	0.513	0.393	0.300
		Re _e	876.07	1,645,443	0.196	0.439	0.196	-0.154	0.392	0.142
				2,004,186	0.194	-0.526	0.195	-0.358	0.390	-0.442
			Ortalama		0.195	-9.5×10 ⁻¹⁵	0.196	1.41×10 ⁻¹⁴	0.392	9.4×10 ⁻¹⁵
8	U-32-20-120	Re _t	885.7	1,485,492	0.627	0.468	0.628	0.388	1.255	0.428
		Re _e	807.7	1,617,243	0.623	-0.033	0.625	-0.037	1.249	-0.035
				1,758,731	0.621	-0.435	0.623	-0.350	1.245	-0.392
			Ortalama		0.624	-5.9×10 ⁻¹⁵	0.625	1.18×10 ⁻¹⁴	1.249	-5.9×10 ⁻¹⁵

Tablo 4.11. L₁₆'daki dairesel KGG'li LID'lerde fan güçlerinin ağ yapısı eleman sayısından bağımsızlığı.

MN			Eleman sayısı	P _{ht} (W)	$\overline{\Delta P}_{ht}$ (%)	P _{he} (W)	$\overline{\Delta P}_{he}$ (%)	P _{ht+e} (W)	$\overline{\Delta P}_{ht+e}$ (%)	
9	D-20-20-240	Re _t	558.2	1,253,476	1.722	1.949	1.754	1.749	3.477	1.848
		Re _e	509.1	1,360,743	1.678	-0.671	1.723	-0.033	3.402	-0.349
				1,462,605	1.668	-1.277	1.694	-1.715	3.363	-1.498
				Ortalama	1.689	0.000	1.724	-4.2×10 ⁻¹⁵	3.414	-8.6×10 ⁻¹⁵
10	D-24-25-190	Re _t	833.3	1,183,585	0.907	2.146	0.910	2.205	1.818	2.175
		Re _e	759.9	1,378,643	0.885	-0.343	0.887	-0.394	1.772	-0.369
				1,575,031	0.872	-1.802	0.875	-1.811	1.747	-1.806
				Ortalama	0.888	-4×10 ⁻¹⁵	0.891	1.67×10 ⁻¹⁴	1.779	8.2×10 ⁻¹⁵
11	D-28-10-120	Re _t	390.7	1,217,506	1.350	0.692	1.359	0.269	2.709	0.480
		Re _e	356.3	1,315,047	1.343	0.165	1.371	1.153	2.714	0.662
				1,412,685	1.329	-0.858	1.336	-1.423	2.666	-1.142
				Ortalama	1.341	0.000	1.355	5.4×10 ⁻¹⁵	2.696	1.6×10 ⁻¹⁴
12	D-32-15-100	Re _t	665.3	1,230,305	0.556	0.308	0.559	-0.331	1.116	-0.013
		Re _e	606.7	1,323,202	0.554	0.002	0.565	0.725	1.120	0.366
				1,420,058	0.552	-0.311	0.559	-0.393	1.112	-0.352
				Ortalama	0.554	-2×10 ⁻¹⁴	0.561	0.000	1.116	-1.3×10 ⁻¹⁴

Tablo 4.12. L₁₆'daki çan ağzı KGG'li LID'lerde fan güçlerinin ağ yapısı eleman sayısından bağımsızlığı.

MN			Eleman sayısı	P _{h,t} (W)	$\overline{\Delta P}_{h,t}$ (%)	P _{h,e} (W)	$\overline{\Delta P}_{h,e}$ (%)	P _{h,t+e} (W)	$\overline{\Delta P}_{h,t+e}$ (%)	
13	C-20-25-120	Re _t	689.1	848,800	0.146	-0.288	0.147	-0.434	0.293	-0.361
		Re _e	628.4	964,051	0.146	-0.243	0.147	-0.006	0.2945	-0.124
				1,100,561	0.147	0.531	0.148	0.440	0.296	0.486
				Ortalama	0.146	6.3×10 ⁻¹⁵	0.147	-6.3×10 ⁻¹⁵	0.294	0.000
14	C-24-20-100	Re _t	662.06	839,334	0.182	0.385	0.184	0.386	0.366	0.386
		Re _e	603.7	957,597	0.181	0.043	0.183	-0.141	0.364	-0.049
				1,082,978	0.180	-0.429	0.182	-0.245	0.363	-0.336
				Ortalama	0.181	0.000	0.183	1×10 ⁻¹⁴	0.364	1.5×10 ⁻¹⁴
15	C-28-15-240	Re _t	587.4	868,292	5.864	3.756	6.295	3.509	12.160	3.628
		Re _e	535.6	988,639	5.594	-1.018	6.065	-0.271	11.660	-0.631
				1,082,813	5.497	-2.737	5.885	-3.237	11.382	-2.996
				Ortalama	5.652	-1.6×10 ⁻¹⁵	6.082	-9.8×10 ⁻¹⁵	11.734	-5.2×10 ⁻¹⁵
16	C-32-10-190	Re _t	448.0	819,347	8.224	5.479	8.024	1.699	16.248	3.578
		Re _e	408.5	937,931	7.701	-1.220	7.603	-3.635	15.305	-2.435
				1,061,996	7.464	-4.258	8.043	1.935	15.508	-1.142
				Ortalama	7.797	3.8×10 ⁻¹⁵	7.890	-7.4×10 ⁻¹⁵	15.687	-3.5×10 ⁻¹⁵

4.1.4. Hidrodinamik-ısıl büyütme oranı-HIBO

Hidrodinamik-ısıl büyütme oranı (HIBO) LID'nin temiz hava tarafında geri kazanılan ısıl gücün LID'de temiz hava ve egzoz havası taraflarındaki akışların devamı için harcanan toplam hidrodinamik güce oranıdır. Başka bir ifadeyle, temel amaç olan temiz hava tarafında ısıl güç geri kazanımında; harcanan akış enerjisinin oransal büyüklüğünü, yani harcanan hidrolik enerjiyi geri kazanılan ısıl enerjiye dönüştürmedeki verimliliği, göstermektedir. HIBO denklem 4.10'da tanımlanmıştır.

$$HIBO = \frac{Q_{gk,t}}{P_{h,t+e}} \quad (4.10)$$

$$\overline{\Delta HIBO} = \frac{\sum_{i=1}^n (HIBO - HIBO_{ort.})}{n HIBO_{ort.}} \quad (4.11)$$

Tablo 4.13. L₁₆'daki küt KGG'li LID'lerde HIBO'nun ağ yapısı eleman sayısından bağımsızlığı.

MN			Eleman sayısı	HIBO	$\overline{\Delta HIBO}$ (%)
1	K-20-10-100	Re,t	278.6	1,198,082	143.55
		Re,e	254.1	1,429,220	143.24
				1,631,250	143.06
		Ortalama		143.28	1.32×10^{-15}
2	K-24-15-120	Re,t	500.3	1,284,261	165.48
		Re,e	456.2	1,499,251	164.95
				1,755,062	166.16
		Ortalama		165.53	-5.7×10^{-15}
3	K-28-20-190	Re,t	779.9	1,222,390	130.41
		Re,e	711.2	1,432,685	135.26
				1,652,563	136.39
		Ortalama		134.02	-7.2×10^{-15}
4	K-32-25-240	Re,t	1114.3	1,229,677	109.65
		Re,e	1016.1	1,400,000	112.81
				1,661,734	116.53
		Ortalama		113.00	8.44×10^{-15}

Tablo 4.14. L₁₆'daki üçgen KGG'li LID'lerde HIBO'nun ağ yapısı eleman sayısından bağımsızlığı.

MN			Eleman sayısı	HIBO	$\Delta HIBO$ (%)
5	U-20-15-190	Re _t	418.8	1,418,218	157.10
		Re _e	381.9	1,633,960	160.87
				1,973,235	162.49
			Ortalama	160.15	6×10 ⁻¹⁵
6	U-24-10-240	Re _t	336.3	1,678,211	49.67
		Re _e	306.7	1,930,218	54.40
				2,059,486	54.41
			Ortalama	52.83	0.00
7	U-28-25-100	Re _t	960.7	1,421,352	213.01
		Re _e	876.07	1,645,443	213.31
				2,004,186	213.79
			Ortalama	213.37	0.00
8	U-32-20-120	Re _t	885.7	1,485,492	140.13
		Re _e	807.7	1,617,243	140.40
				1,758,731	140.60
			Ortalama	140.38	0.00

Tablo 4.15. L₁₆'daki dairesel KGG'li LID'lerde HIBO'nun ağ yapısı eleman sayısından bağımsızlığı.

MN			Eleman sayısı	HIBO	$\Delta HIBO$ (%)
9	D-20-20-240	Re _t	558.2	1,253,476	185.34
		Re _e	509.1	1,360,743	188.38
				1,462,605	190.25
			Ortalama	187.99	1×10 ⁻¹⁴
10	D-24-25-190	Re _t	833.3	1,183,585	218.05
		Re _e	759.9	1,378,643	221.34
				1,575,031	223.18
			Ortalama	220.86	0.00
11	D-28-10-120	Re _t	390.7	1,217,506	78.762
		Re _e	356.3	1,315,047	78.74
				1,412,685	79.86
			Ortalama	79.12	0.00
12	D-32-15-100	Re _t	665.3	1,230,305	118.82
		Re _e	606.7	1,323,202	118.60
				1,420,058	119.01
			Ortalama	118.81	7.9×10 ⁻¹⁵

Tablo 4.16. L₁₆'daki çan ağzı KGG'li LID'lerde HIBO'nun ağ yapısı eleman sayısından bağımsızlığı.

MN			Eleman sayısı	HIBO	$\overline{\Delta HIBO}$ (%)	
13	C-20-25-120	Re _t	689.1	848,800	368.79	0.16
		Re _e	628.4	964,051	368.33	0.03
				1,100,561	367.45	-0.20
			Ortalama	368.19	-1×10 ⁻¹⁴	
14	C-24-20-100	Re _t	662.06	839,334	244.17	-0.13
		Re _e	603.7	957,597	244.57	0.02
				1,082,978	244.79	0.11
			Ortalama	244.51	1.1×10 ⁻¹⁴	
15	C-28-15-240	Re _t	587.4	868,292	76.10	-2.98
		Re _e	535.6	988,639	78.82	0.47
				1,082,813	80.42	2.51
			Ortalama	78.45	-6.1×10 ⁻¹⁵	
16	C-32-10-190	Re _t	448.0	819,347	41.08	-3.17
		Re _e	408.5	937,931	43.33	2.11
				1,061,996	42.88	1.06
			Ortalama	42.43	0.00	

4.1.5. Isıl etkenlik ve hidrodinamik-ısıl büyütme oranı- $\epsilon \times HIBO$

Bu performans parametresiyle; temiz hava tarafında geri kazanılan ısıl gücün, teorik olarak geri kazanılabilecek maksimum ısıl güce oranı olan duyulur ısıl etkenlik ile temiz hava tarafında geri kazanılan ısıl gücün, temiz hava ve egzoz havası taraflarındaki akışların devamı için harcanan toplam hidrodinamik güce oranı olan HIBO'yu birlikte ($\epsilon \times HIBO$) maksimum yapacak bir LID tasarımı hedeflenmiştir. Böylece ele alınan tasarım parametrelerinde ve alt seviyelerinde hem ısıl hem de hidrodinamik bakımdan en uygun parametre kombinasyonunun elde edilmesi amaçlanmıştır.

Tablo 4.17. L_{16} 'daki küt KGG'li LID'lerin $\epsilon \times \text{HIBO}$ sonuçlarının ağ yapısı eleman sayısından bağımsızlığı.

MN			Eleman sayısı	$\epsilon \times \text{HIBO}$	$\Delta \epsilon \times \text{HIBO}$ (%)
1	Re_t	278.6	1,198,082	98.137	0.150
		254.1	1,429,220	97.967	-0.023
			1,631,250	97.866	-0.127
			Ortalama	97.990	0.000
2	Re_t	500.3	1,284,261	95.965	-0.085
		456.2	1,499,251	95.885	-0.168
			1,755,062	96.289	0.253
			Ortalama	96.046	0.000
3	Re_t	779.9	1,222,390	75.702	-1.423
		711.2	1,432,685	77.166	0.484
			1,652,563	77.515	0.939
			Ortalama	76.794	0.000
4	Re_t	1114.3	1,229,677	61.526	-1.485
		1016.1	1,400,000	62.373	-0.129
			1,661,734	63.462	1.615
			Ortalama	62.454	0.000

Tablo 4.18. L_{16} 'daki üçgen KGG'li LID'lerin $\epsilon \times \text{HIBO}$ sonuçlarının ağ yapısı eleman sayısından bağımsızlığı.

MN			Eleman sayısı	$\epsilon \times \text{HIBO}$	$\Delta \epsilon \times \text{HIBO}$ (%)
5	Re_t	418.8	1,418,218	107.081	-1.414
		381.9	1,633,960	109.025	0.375
			1,973,235	109.746	1.039
			Ortalama	108.617	2.6×10^{-14}
6	Re_t	336.3	1,678,211	38.888	-5.386
		306.7	1,930,218	42.207	2.689
			2,059,486	42.210	2.697
			Ortalama	41.102	0.000
7	Re_t	960.7	1,421,352	75.318	-0.038
		876.07	1,645,443	75.416	0.091
			2,004,186	75.307	-0.053
			Ortalama	75.347	0.000
8	Re_t	885.7	1,485,492	63.186	0.080
		807.7	1,617,243	63.134	-0.002
			1,758,731	63.086	-0.078
			Ortalama	63.136	0.000

Tablo 4.19. L₁₆'daki dairesel KGG'li LID'lerin $\epsilon \times \text{HIBO}$ sonuçlarının ağ yapısı eleman sayısından bağımsızlığı.

MN			Eleman sayısı	$\epsilon \times \text{HIBO}$	$\Delta \epsilon \times \text{HIBO}$ (%)
9	D-20-20-240	Re _t	558.2	1,253,476	122.467
		Re _e	509.1	1,360,743	123.797
				1,462,605	124.80
		Ortalama		123.689	1.1×10 ⁻¹⁴
10	D-24-25-190	Re _t	833.3	1,183,585	115.152
		Re _e	759.9	1,378,643	115.692
				1,575,031	115.934
		Ortalama		115.593	2.4×10 ⁻¹⁴
11	D-28-10-120	Re _t	390.7	1,217,506	53.190
		Re _e	356.3	1,315,047	53.259
				1,412,685	53.802
		Ortalama		53.417	-2.6×10 ⁻¹⁴
12	D-32-15-100	Re _t	665.3	1,230,305	60.169
		Re _e	606.7	1,323,202	60.173
				1,420,058	60.154
		Ortalama		60.165	0.000

Tablo 4.20. L₁₆'daki çan ağzı KGG'li LID'lerin $\epsilon \times \text{HIBO}$ sonuçlarının ağ yapısı eleman sayısından bağımsızlığı.

MN			Eleman sayısı	$\epsilon \times \text{HIBO}$	$\Delta \epsilon \times \text{HIBO}$ (%)
13	C-20-25-120	Re _t	689.1	848,800	160.900
		Re _e	628.4	964,051	160.875
				1,100,561	161.092
		Ortalama		160.956	-3.5×10 ⁻¹⁴
14	C-24-20-100	Re _t	662.06	839,334	109.912
		Re _e	603.7	957,597	109.795
				1,082,978	109.673
		Ortalama		109.793	5.1×10 ⁻¹⁴
15	C-28-15-240	Re _t	587.4	868,292	53.059
		Re _e	535.6	988,639	54.575
				1,082,813	55.465
		Ortalama		54.366	0.030
16	C-32-10-190	Re _t	448.0	819,347	30.356
		Re _e	408.5	937,931	31.802
				1,061,996	31.563
		Ortalama		31.240	0.018

4.2. Performans Parametrelerinin SGO'ya göre ANOM ve ANOVA Analizleri

LID tasarım parametrelerinin ve alt seviyelerinin performans parametrelerine etkisini belirleyebilmek amacıyla ANOM (Analysis of Means) analizleri yapılmıştır. Taguchi L₁₆ OD'ye uygun tasarlanan 16 LID modelinin sayısal çözüm sonuçları ile hesaplanan tüm performans parametrelerinin, SGO'ları bu bölümde verilmiştir. SGO'ların ortalaması, tüm tasarım parametrelerinin alt seviyeleri için hesaplanmıştır. ANOM sonuç tablolarında tasarım parametrelerinin alt seviyelerindeki en büyük ortalama SGO'lar, seçilen performans hedefine en uygun alt seviyeyi göstermektedir [14]. ANOM tablolarında verilen “ΔSGO sonuçları” tasarım parametreleri için hesaplanan en büyük ve en küçük ortalama SGO'lar arasındaki farktır. ΔSGO'su en büyük olan tasarım parametresi, LID tasarımında seçilen hedef performans göstergesine etki derecesi en büyük tasarım parametresidir.

Varyans analizi (ANalysis Of VAriance-ANOVA), deney sonuçlarına en çok uygulanan istatistiksel işlemlerdendir. ANOVA her bir tasarım parametresinin hedef performans parametresine yüzde etkilerini belirlemenin yanında, önemli tasarım parametrelerini önemsizlerden ayırmak için de kullanılır [28]. Bu çalışmada da seçilen tasarım parametrelerinin hedeflenen LID performans parametrelerine yüzde etkileri ANOVA ile belirlenmiştir.

ANOVA sonuçları %95 güven aralığındadır. ANOVA analizlerinde “ $p < 0.05$ ” olan tasarım parametrelerinin, hedef performans ölçütüne istatistiksel bakımdan anlamlı bir etkisi olduğu değerlendirilmektedir [2].

Bu bölümde, Taguchi L₁₆ OD'ye uygun tasarlanan 16 LID modelinin sayısal analiz sonuçları kullanılarak hesaplanan ve çalışmamızda seçtiğimiz her bir hedef performans göstergesi için ANOM ve ANOVA analizleri yapılmıştır. Bu analizlerle, hedef performans göstergelerine en uygun sonucu (en büyük veya en küçük) veren LID tasarım parametrelerinin (en uygun) alt seviyeleri ve tasarım parametrelerinin hedef performans göstergelerine yüzde etkileri belirlenmiştir. Seçilen hedef performans parametrelerinin her biri için ANOM ve ANOVA analizlerinin sonuçları aşağıdaki tablolarda verilmiştir.

4.2.1. Geri kazanılan ısıl güç- Q_{gk}

Isı geri kazanımlı havalandırmada kullanılacak LID'nin temiz hava tarafında geri kazanılan ısıl gücün (Q_{gk}) maksimum olması hedeflenir. Taguchi L_{16} OD'ye göre tasarlanan 16 LID modelinin sayısal analiz sonuçları ile temiz hava tarafında geri kazanılan ısıl güçler hesaplanmıştır. Isıl gücün hedef performans parametresi seçildiği Taguchi analizinde “en büyük en iyi” kategorisine göre SGO'lar hesaplanmıştır. 16 LID modelinde geri kazanılan ısıl güçler ve SGO'lar Tablo 4.21'de verilmiştir. Taguchi L_{16} OD'ye göre tasarlanan 16 modelde, temiz hava tarafında geri kazanılan ısıl güçlerle “en büyük en iyi” kategorisine göre yapılan analizde, en büyük SGO, **C-28-15-240** kodlu 15 numaralı LID modeline aittir. Bu LID modelinin tasarım parametrelerinin alt seviyeleri; **KGG-çan ağzı, u-2.8 m/s, h-1.5 mm ve L-240×240 mm**'dir. Bu model için $Q_{gk}=920$ W'tır.

Tablo 4.21. LID modellerinde geri kazanılan ısıl güçler ve “en büyük en iyi” kategorisine göre SGO'lar.

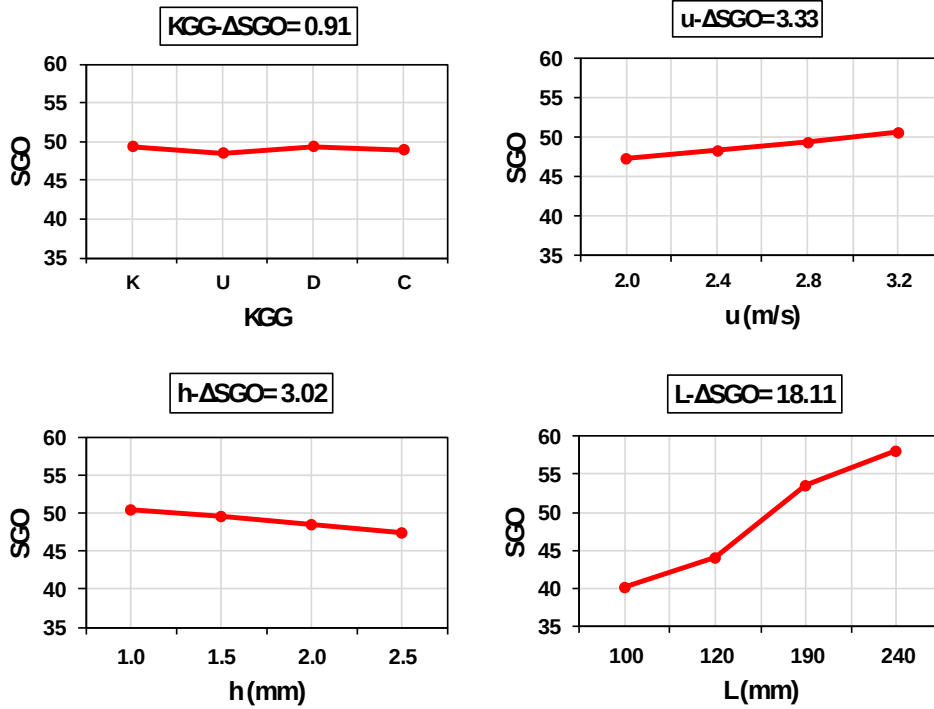
MN	Model Kodu	V (m ³ /h)	Q_{gk} (W)	SGO
1	K-20-10-100	30 (-%40)	106	40.47
2	K-24-15-120	54	165	44.35
3	K-28-20-190	165	493	53.86
4	K-32-25-240	304 (+%52)	879	58.88
5	U-20-15-190	113	400	52.04
6	U-24-10-240	207 (+%3,5)	843	58.52
7	U-28-25-100	45 (-%10)	84	38.46
8	U-32-20-120	75	175	44.88
9	D-20-20-240	187	642	56.15
10	D-24-25-190	144	393	51.89
11	D-28-10-120	60	213	46.58
12	D-32-15-100	50	133	42.45
13	C-20-25-120	48 (-%4)	109	40.71
14	C-24-20-100	38 (-%24)	89	39.01
15	C-28-15-240	254 (+%27)	920	59.28
16	C-32-10-190	173	665	56.61

Tablo 4.21'deki Q_{gk} sonuçları ile LID tasarım parametrelerinin alt seviyeleri için “en büyük en iyi” kategorisinde hesaplanan SGO'lara ANOM analizi uygulanmıştır. Sonuçlar Tablo 4.22'de ve Şekil 4.1'de verilmiştir. ANOM'a göre temiz hava tarafında geri kazanılan ısıl gücü maksimum yapacak en uygun LID modelinde tasarım parametrelerinin alt seviyelerinin kombinasyonu; **KGG-küt, u-3.2 m/s, h-1.0 mm, L-240×240 mm (K-32-10-240)** olarak belirlenmiştir ve L_{16} OD'de bu LID modeli bulunmamaktadır. Tasarım parametrelerinin, performans parametresi olan temiz hava

tarafında geri kazanılan ısıl güce Etki Dereceleri (ED'leri), Tablo 4.22'de verilen ANOM sonuçlarına göre ΔSGO 'ların büyükten küçüğe sıralanmasıyla belirlenir. Tasarım parametrelerinin etki dereceleri bakımından önem sıralaması; **levha boyutu-L**, **ortalama hava akış hızı-u**, **kanal yüksekliği-h** ve **kanal giriş geometrisi-KGG**'dir.

Tablo 4.22. Temiz hava tarafında geri kazanılan ısıl güçler için ANOM sonuçları.

Seviye	KGG	SGO	u (m/s)	SGO	h (mm)	SGO	L (mm)	SGO
1	K	49.39	2	47.34	1	50.51	100	40.10
2	U	48.48	2.4	48.44	1.5	49.53	120	44.13
3	D	49.27	2.8	49.54	2	48.48	190	53.56
4	C	48.86	3.2	50.67	2.5	47.48	240	58.21
ΔSGO		0.91		3.33		3.02		18.11
ED	4		2		3		1	



Şekil 4.1. Temiz hava tarafında geri kazanılan ısıl güçler için SGO'lar.

Tasarım parametrelerinin temiz hava tarafında geri kazanılan ısıl güce yüzde etkileri ANOVA analizi ile elde edilir. Tablo 4.23'te verilen ANOVA sonuçlarına göre; %92.85 ile en etkili tasarım parametresi **levha boyutu-L**'dir. Diğer tasarım parametrelerinin büyükten küçüğe etki sıralaması; % 3.61 ile **ortalama hava akış hızı-u**, %1.92 ile **kanal yüksekliği-h** ve %1.61 ile **kanal giriş geometrisi-KGG**'dir. Sonuç

olarak temiz hava tarafında geri kazanılan ısı güç için **en etkili ve tek tasarım parametresi levha boyutu-L**'dir. Diğer tasarım parametrelerinin etkileri ihmal edilebilecek kadar küçüktür.

Tablo 4.23. Temiz hava tarafında geri kazanılan ısı güç için ANOVA sonuçları.

Faktör	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F	P	Etki (%)	Sıralama
KGG	3	22725	7575	120.44	0.001	1.61	4
u (m/s)	3	51034	17011	270.46	0.000	3.61	2
h (mm)	3	27154	9051	143.90	0.001	1.92	3
L (mm)	3	1312366	437455	6955.03	0.000	92.85	1
Hata	3	189	63			0.01	
Toplam	15					100.00	

4.2.2. Duyulur ısıl etkenlik-ε

Isı değiştiricilerde ısı verim, ideal şartlarda gerçekleştirilecek maksimum ısı geçişine göre tanımlanan “duyulur ısıl etkenlik-ε”tir. Isı geri kazanımlı havalandırmada LID’nin duyulur ısıl etkenliğinin de maksimum olmasını hedeflenir. Taguchi analizinde “en büyük en iyi” kategorisine göre duyulur ısıl etkenliklerin SGO’ları hesaplanmıştır. Her modelin duyulur ısıl etkenlikleri ve SGO’ları Tablo 4.24’te verilmiştir. Duyulur ısıl etkenliği ve SGO’su en büyük LID modeli **U-24-10-240** kodlu 6 numaralı modeldir. Bu modelin tasarım parametrelerinin alt seviyeleri; **KGG-U, u-2.4 m/s, h-1.0 mm ve L-240×240 mm**’dir. Bu modelin duyulur ısıl etkenliği de %77.81’dir.

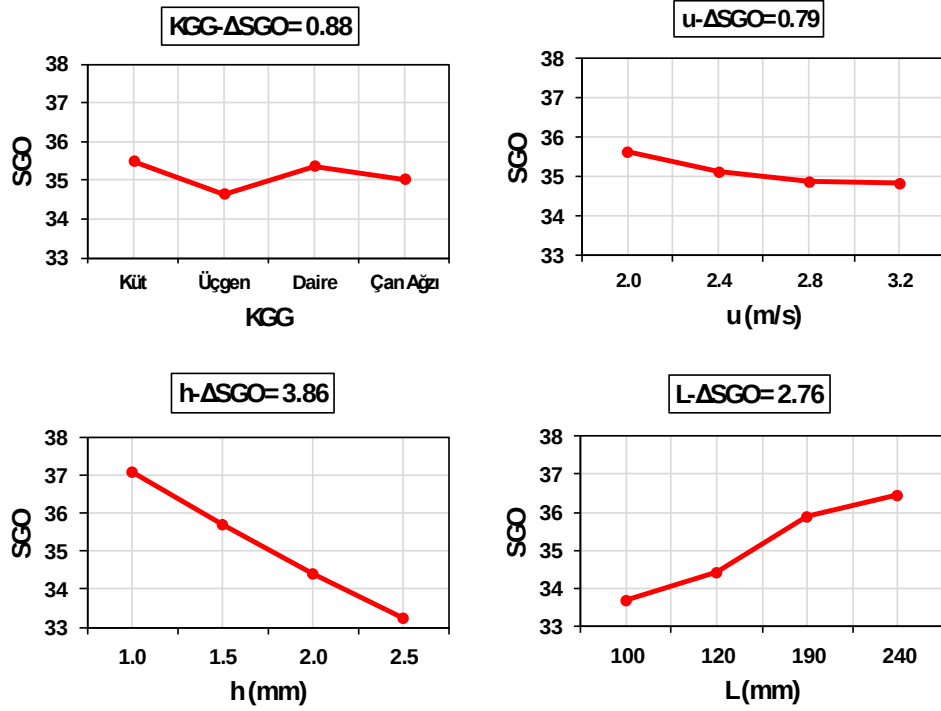
Tablo 4.24. LID modellerinin duyulur ısı etkenlikleri ve “en büyük en iyi” kategorisine göre SGO’lar.

MN	Model Kodu	$V (m^3/h)$	$\varepsilon (%)$	SGO
1	K-20-10-100	30 (-%40)	68.39	36.70
2	K-24-15-120	54	58.02	35.27
3	K-28-20-190	165	57.31	35.16
4	K-32-25-240	304 (+%52)	55.29	34.85
5	U-20-15-190	113	67.82	36.63
6	U-24-10-240	207 (+%3,5)	77.81	37.82
7	U-28-25-100	45 (-%10)	35.31	30.96
8	U-32-20-120	75	44.97	33.06
9	D-20-20-240	187	65.80	36.36
10	D-24-25-190	144	52.34	34.38
11	D-28-10-120	60	67.51	36.59
12	D-32-15-100	50	50.64	34.09
13	C-20-25-120	48 (-%4)	43.72	32.81
14	C-24-20-100	38 (-%24)	44.90	33.05
15	C-28-15-240	254 (+%27)	69.30	36.82
16	C-32-10-190	173	73.62	37.34

Tablo 4.24’teki duyulur ısı etkenliklere, LID tasarım parametreleri ve alt seviyeleri için “en büyük en iyi” kategorisinde uygulanan Taguchi analizi ile hesaplanan SGO’lara, ANOM analizi uygulanmış ve sonuçlar Tablo 4.25’te verilmiştir. Bu analizin sonuçlarına göre duyulur ısı etkenliği en yüksek yapan en uygun LID modelinde tasarım parametrelerinin alt seviyelerinin kombinasyonu; **KGG-küt, u-2.0 m/s, h-1.0 mm, L-240×240 mm (K-20-10-240)** olarak belirlenmiştir ve L₁₆ OD’de bu LID modeli bulunmamaktadır. ANOM analizi sonuçlarına göre LID tasarım parametrelerinin önem sıralaması; **kanal yüksekliği-h, levha boyutu-L, kanal giriş geometrisi-KGG ve ortalama hava akış hızı-u**’dır.

Tablo 4.25. Duyulur ısı etkenlikler için ANOM sonuçları.

Seviye	KGG	SGO	u (m/s)	SGO	h (mm)	SGO	L (mm)	SGO
1	K	35.50	2	35.63	1	37.11	100	33.70
2	U	34.62	2.4	35.13	1.5	35.70	120	34.43
3	D	35.35	2.8	34.88	2	34.41	190	35.88
4	C	35.00	3.2	34.84	2.5	33.25	240	36.46
Δ SGO		0.880		0.791		3.862		2.765
ED	3		4		1		2	



Şekil 4.2. Duyulur ısı etkenlikler için SGO'lar.

Tasarım parametrelerinin duyulur ısı etkenliğe yüzde etkileri, ANOVA analizi ile elde edilmiş ve Tablo 4.26'da verilmiştir. Bu sonuçlara göre %62.31 ile en etkili tasarım parametresi **kanal yüksekliği-h**'dir. Etki derecesi önemli diğer tasarım parametresi ise %33.64 ile **levha boyutu-L**'dur. Geriye kalan tasarım parametrelerinin duyulur ısı etkenliğe etki sıralaması; %2.71 ile **ortalama hava akış hızı-u** ve %1.09 ile **kanal giriş geometrisi-KGG**'dir. Yani, duyulur ısı etkenlikte en etkili tasarım parametreleri **kanal yüksekliği** ve **levha boyutudur**. Diğer tasarım parametrelerinin etkileri ise ihmal edilebilecek kadar küçüktür.

Tablo 4.26. Duyulur ısı etkenlik için ANOVA sonuçları.

Faktör	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F	P	Etki (%)	Sıralama
KGG	3	24.73	8.244	4.36	0.129	1.09	4
u (m/s)	3	61.59	20.530	10.85	0.041	2.71	3
h (mm)	3	1416.02	472.007	249.37	0.000	62.31	1
L (mm)	3	764.60	254.868	134.65	0.001	33.64	2
Hata	3	5.68	1.893			0.25	
Toplam	15					100.00	

4.2.3. Akışın sağlanması için gerekli fan gücü- $P_{h,t+e}$

LID’de akışın sağlanması için gerekli toplam fan gücü ($P_{h,t+e}$), ısı geri kazanımı için harcanan enerjidir ve olabildiğince az olması istenir. Taguchi analizinde toplam fan gücü için “en küçük en iyi” kategorisine göre SGO’lar hesaplanmıştır. Her modeldeki toplam fan güçleri ve bu güçlere karşılık gelen SGO’lar Tablo 4.27’de verilmiştir. Taguchi L_{16} OD’ye göre tasarlanan ve “en küçük en iyi” kategorisine göre SGO’ları hesaplanan 16 modelden toplam fan gücü en küçük ve SGO’su en büyük LID modeli, **C-20-25-120** kodlu 13 numaralı modeldir. Bu modelin tasarım parametrelerinin alt seviyeleri; **KGG-C, u-2.0 m/s, h-2.5 mm ve L-120×120 mm**’dir. Bu model için gerekli toplam fan gücü yaklaşık 0.3 W’tır.

Tablo 4.27. LID modellerinin toplam fan güçleri ve “en küçük en iyi” kategorisine göre SGO’lar.

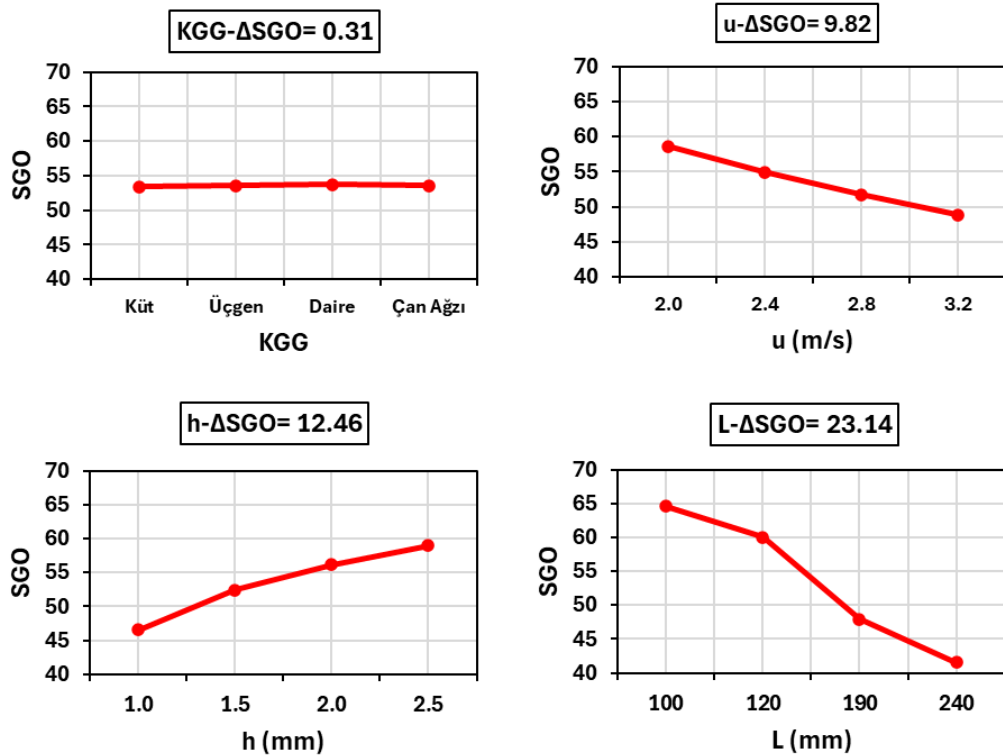
MN	Model Kodu	V (m ³ /h)	$P_{h,t+e}$ (W)	SGO
1	K-20-10-100	30 (-%40)	0.7364	62.65
2	K-24-15-120	54	0.9972	60.02
3	K-28-20-190	165	4	48.67
4	K-32-25-240	304 (+%52)	8	42.17
5	U-20-15-190	113	2	52.04
6	U-24-10-240	207 (+%3,5)	16	35.92
7	U-28-25-100	45 (-%10)	0.3923	68.12
8	U-32-20-120	75	1	58.06
9	D-20-20-240	187	3	49.33
10	D-24-25-190	144	2	54.99
11	D-28-10-120	60	3	51.38
12	D-32-15-100	50	1	59.04
13	C-20-25-120	48 (-%4)	0.2949	70.60
14	C-24-20-100	38 (-%24)	0.3649	68.75
15	C-28-15-240	254 (+%27)	12	38,61
16	C-32-10-190	173	16	36,08

Tablo 4.27’deki toplam fan güçlerine göre LID tasarım parametrelerinin alt seviyeleri için “en küçük en iyi” kategorisinde uygulanan Taguchi analizi ile hesaplanan SGOlarına, ANOM analizi uygulanmış ve sonuçlar Tablo 4.28’de verilmiştir. Bu analizin sonuçlarına göre toplam fan gücünü en küçük yapan en uygun tasarımlı LID modelinin tasarım parametrelerinin alt seviyelerinin kombinasyonu; **KGG-dairesel, u-2.0 m/s, h-2.5 mm, L-100×100 mm (D-20-25-100)** olarak belirlenmiştir ve L_{16} OD’de bu LID modeli bulunmamaktadır. Toplam fan gücünün hedef performans parametresi seçildiği bu analizde, hesaplanan SGO’ların ANOM analizi sonuçlarına

göre tasarım parametrelerinin önem sıralaması; **levha boyutu-L**, **kanal yüksekliği-h**, **ortalama hava akış hızı-u** ve **kanal girişi-geometrisi-KGG**'dir.

Tablo 4.28. Toplam fan güçleri için ANOM sonuçları.

Seviye	KGG	SGO	u (m/s)	SGO	h (mm)	SGO	L (mm)	SGO
1	K	53.38	2	58.66	1	46.51	100	64.65
2	U	53.54	2.4	54.92	1.5	52.43	120	60.02
3	D	53.69	2.8	51.70	2	56.21	190	47.95
4	C	53.52	3.2	48.84	2.5	58.98	240	41.51
ΔSGO		0.31		9.82		12.46		23.14
ED		4		3		2		1



Şekil 4.3. Toplam fan güçleri için SGO'lar.

Tasarım parametrelerinin toplam fan gücüne yüzde etkileri, ANOVA analizi ile elde edilmiş ve Tablo 4.29'da verilmiştir. Bu sonuçlara göre %49.73 ile en etkili tasarım parametresi **levha boyutu-L**'dir. Geriye kalan tasarım parametrelerinin toplam fan gücüne etki sıralaması; %25.26 ile **kanal yüksekliği-h** ve %11.99 ile **kanal giriş geometrisi-KGG** ve %10.56 ile **ortalama hava akış hızı-u**'dur. Toplam fan gücü için en etkili tasarım parametreleri **levha boyutu-L** ve **kanal yüksekliği-h**'dir. Diğer tasarım parametrelerinin etkileri ise bu iki parametreye göre daha düşüktür.

Tablo 4.29. Toplam fan gücü için ANOVA sonuçları.

Faktör	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F	P	Etki (%)	Sıralama
KGG	3	52.37	17.458	4.87	0.113	11.99	3
u (m/s)	3	46.15	15.382	4.29	0.131	10.56	4
h (mm)	3	110.34	36.781	10.25	0.044	25.26	2
L (mm)	3	217.23	72.411	20.18	0.017	49.73	1
Hata	3	10.76	3.588			2.46	
Toplam	15					100.00	

4.2.4. Hidrodinamik-ısıl büyütme oranı-HIBO

Isı geri kazanımlı havalandırmada kullanılan LID’lerde temiz hava tarafında geri kazanılan ısı güç ve toplam fan gücü ile hesaplanan HIBO’nun maksimum olması hedeflenir. HIBO, harcanan toplam fan gücünün ısı geri kazanımına dönüştürülmesi bakımından LID’nin performansını gösterir. Taguchi analizinde HIBO için “en büyük en iyi” kategorisine göre SGO’lar hesaplanmıştır. Her modelin HIBO’su ve bu HIBO’lara karşılık gelen SGO’lar Tablo 4.30’da verilmiştir. Taguchi L₁₆ OD’ye göre tasarlanan ve “en büyük en iyi” kategorisine göre SGO’ları hesaplanan 16 modeldeki HIBO’su ve SGO’su en büyük LID modeli, **C-20-25-120** kodlu 13 numaralı modeldir. Bu modelin tasarım parametrelerinin alt seviyeleri; **KGG-C, u-2.0 m/s, h-2.5 mm ve L-120×120 mm**’dir. Bu model için HIBO 368’dir.

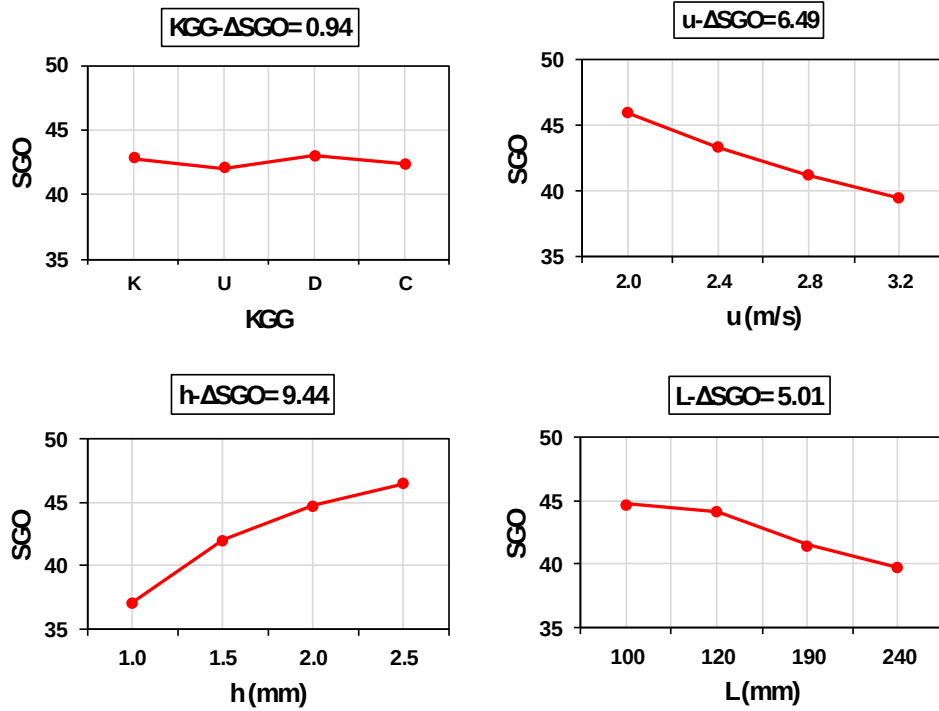
Tablo 4.30. Hidrodinamik-ısıl büyütme oranları-HIBO ve “en büyük en iyi” kategorisine göre SGO’lar.

MN	Model Kodu	V (m ³ /h)	HIBO	SGO
1	K-20-10-100	30 (−%40)	143	43,12
2	K-24-15-120	54	166	44,38
3	K-28-20-190	165	134	42,54
4	K-32-25-240	304 (+%52)	113	41,06
5	U-20-15-190	113	160	44,09
6	U-24-10-240	207 (+%3,5)	53	34,46
7	U-28-25-100	45 (−%10)	213	46,58
8	U-32-20-120	75	140	42,95
9	D-20-20-240	187	188	45,48
10	D-24-25-190	144	221	46,88
11	D-28-10-120	60	79	37,97
12	D-32-15-100	50	119	41,50
13	C-20-25-120	48 (−%4)	368	51,32
14	C-24-20-100	38 (−%24)	245	47,77
15	C-28-15-240	254 (+%27)	78	37,89
16	C-32-10-190	173	42	32,55

Tablo 4.30'daki HIBO'ya göre hesaplanan SGO'lara, ANOM analizi uygulanmış ve sonuçlar Tablo 4.31'de verilmiştir. Bu analizin sonuçlarına göre HIBO'yu en büyük yapan en uygun tasarımı LID modelinin alt seviyelerinin kombinasyonu; **KGG-dairesel, u-2.0 m/s, h-2.5 mm, L-100×100 mm (D-20-25-100)** olarak belirlenmiştir ve L₁₆ OD'de bu LID modeli bulunmamaktadır. HIBO'nun hedef performans parametresi seçildiği ANOM sonuçlarına göre tasarım parametrelerinin önem sıralaması; **kanal yüksekliği-h, ortalama hava akış hızı-u, levha boyutu-L ve kanal giriş geometrisi-KGG**'dir.

Tablo 4.31. Hidrodinamik-ısıl büyütme oranları için ANOM sonuçları.

Seviye	KGG	SGO	u (m/s)	SGO	h (mm)	SGO	L (mm)	SGO
1	K	42.78	2	46.00	1	37.03	100	44.74
2	U	42.02	2.4	43.37	1.5	41.96	120	44.15
3	D	42.96	2.8	41.25	2	44.68	190	41.52
4	C	42.38	3.2	39.52	2.5	46.46	240	39.72
ΔSGO		0.94		6.49		9.44		5.01
ED	4		2		1		3	



Şekil 4.4. Hidrodinamik-ısıl büyütme oranları için SGO'lar.

Tasarım parametrelerinin HIBO'ya yüzde etkileri, ANOVA analizi ile elde edilmiş ve Tablo 4.32'de verilmiştir. Bu sonuçlara göre %48.41 ile en etkili tasarım parametresi

kanal yüksekliği-h'dir. Etki derecesi önemli diğer tasarım parametresi ise %28.91 ile **ortalama hava akış hızı-u**'dır. Diğer tasarım parametrelerinin HIBO'ya etki sıralaması; %16.54 ile **levha boyutu-L** ve %4.94 ile **kanal giriş geometrisi-KGG**'dir. HIBO için en etkili tasarım parametreleri **kanal yüksekliği-h, ortalama hava akış hızı-u** ve **levha boyutu-L**'dir. Kanal giriş geometrisinin etkisi ise bu parametrelere göre daha düşüktür.

Tablo 4.32. Hidrodinamik-ısıl büyütme oranları için ANOVA sonuçları.

Faktör	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F	P	Etki (%)	Sıralama
KGG	3	4990	1663.3	4.11	0.138	4.94	4
u (m/s)	3	29205	9734.9	24.08	0.013	28.91	2
h (mm)	3	48894	16298.1	40.32	0.006	48.41	1
L (mm)	3	16706	5568.7	13.77	0.029	16.54	3
Hata	3	1213	404.3			1.20	
Toplam	15					100.00	

4.2.5. Isıl etkenlik ve hidrodinamik-ısıl büyütme oranı- $\epsilon \times \text{HIBO}$

Daha önce Bölüm 4.1.5'te belirtildiği gibi hem duyulur ısıl etkenliği hem de temiz hava tarafında HIBO'yu birlikte en yüksek yapacak bir LID modeli tasarlanmak istenmiştir. Bu amaçla L₁₆ OD'ye göre tasarlanmış modellerin sayısal çözümlerinden elde edilen duyulur ısıl etkenlik ve HIBO ile her model için $\epsilon \times \text{HIBO}$ hesaplanmıştır. Tablo 4.33'te $\epsilon \times \text{HIBO}$ sonuçları ve bu sonuçlarla “en büyük en iyi” kategorisinde hesaplanan SGO'lar verilmiştir. L₁₆ OD'ye göre tasarlanan ve “en büyük en iyi” kategorisine göre SGO'ları hesaplanan 16 modelin $\epsilon \times \text{HIBO}$ sonucu ve SGO'su en büyük LID modeli, **C-20-25-120** kodlu 13 numaralı modeldir. Bu modelin tasarım parametrelerinin alt seviyeleri; **KGG-C, u-2.0 m/s, h-2.5 mm ve L-120×120 mm**'dir. Bu model için $\epsilon \times \text{HIBO}$ 161'dir.

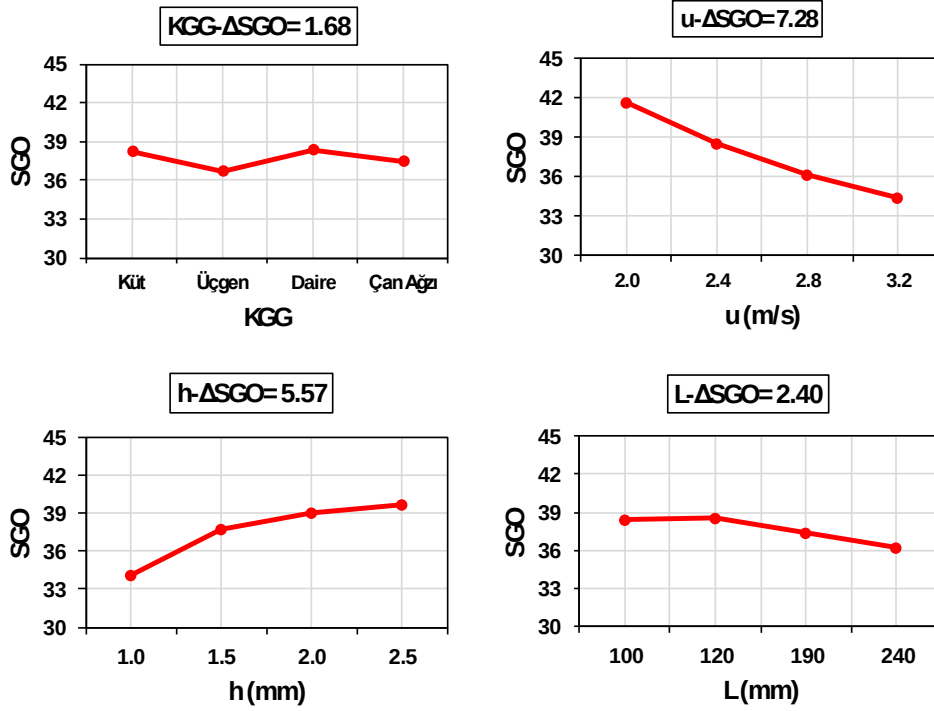
Tablo 4.33. $\varepsilon \times \text{HIBO}$ sonuçları ve “en büyük en iyi” kategorisine göre SGO’lar.

MN	Model Kodu	$V \text{ (m}^3/\text{h)}$	$\varepsilon \times \text{HIBO}$	SGO
1	K-20-10-100	30 (-%40)	98	39.82
2	K-24-15-120	54	96	39.65
3	K-28-20-190	165	77	37.71
4	K-32-25-240	304 (+%52)	62	35.91
5	U-20-15-190	113	109	40.72
6	U-24-10-240	207 (+%3,5)	41	32.28
7	U-28-25-100	45 (-%10)	75	37.54
8	U-32-20-120	75	63	36.01
9	D-20-20-240	187	124	41.85
10	D-24-25-190	144	116	41.26
11	D-28-10-120	60	53	34.55
12	D-32-15-100	50	60	35.59
13	C-20-25-120	48 (-%4)	161	44.13
14	C-24-20-100	38 (-%24)	110	40.81
15	C-28-15-240	254 (+%27)	54	34.71
16	C-32-10-190	173	31	29.89

Tablo 4.33’teki $\varepsilon \times \text{HIBO}$ sonuçlarına göre ANOM analizi uygulanmış ve sonuçlar Tablo 4.34’te verilmiştir. Bu analize göre $\varepsilon \times \text{HIBO}$ sonuçlarını en büyük yapan en uygun tasarımlı LID modelinin alt seviyelerinin kombinasyonu; **KGG-dairesel, u-2.0 m/s, h-2.5 mm, L-120×120 mm (D-20-25-120)** olarak belirlenmiştir ve L₁₆ OD’de bu LID modeli bulunmamaktadır. $\varepsilon \times \text{HIBO}$ ’nun ANOM sonuçlarına göre LID tasarım parametrelerinin önem sıralaması; **ortalama hava akış hızı-u, kanal yüksekliği-h, levha boyutu-L ve kanal giriş geometrisi-KGG**’dir.

Tablo 4.34. $\varepsilon \times \text{HIBO}$ için ANOM sonuçları.

Seviye	KGG	SGO	u (m/s)	SGO	h (mm)	SGO	L (mm)	SGO
1	K	38.27	2	41.63	1	34.14	100	38.44
2	U	36.64	2.4	38.5	1.5	37.67	120	38.59
3	D	38.31	2.8	36.13	2	39.09	190	37.39
4	C	37.39	3.2	34.35	2.5	39.71	240	36.19
ASGO		1.68		7.28		5.57		2.40
ED	4		1		2		3	



Şekil 4.5. $\varepsilon \times \text{HIBO}$ sonuçları için SGO'lar.

Tasarım parametrelerinin $\varepsilon \times \text{HIBO}$ sonuçlarına yüzde etkileri, ANOVA analizi ile elde edilmiş ve Tablo 4.35'te verilmiştir. Bu sonuçlara göre %61.66 ile en etkili tasarım parametresi **ortalama hava akış hızı-u**'dır. Etki derecesi önemli diğer tasarım parametresi ise %28.1 ile **kanal yüksekliği-h**'dir. Diğer tasarım parametrelerinin $\varepsilon \times \text{HIBO}$ sonuçları için etki sıralaması; %6.06 ile **levha boyutu-L** ve %4.06 ile **kanal giriş geometrisi-KGG**'dir. $\varepsilon \times \text{HIBO}$ sonuçlarında en etkili tasarım parametreleri **ortalama hava akış hızı-u** ve **kanal yüksekliği-h**'dir. **Levha boyutu** ve **kanal giriş geometrisinin** etkileri bu iki parametreye göre daha düşüktür.

Tablo 4.35. $\varepsilon \times \text{HIBO}$ için ANOVA sonuçları.

Faktör	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F	P	Etki (%)	Sıralama
KGG	3	736.6	245.55	34.39	0.008	4.06	4
u (m/s)	3	11178.2	3726.06	521.82	0.000	61.66	1
h (mm)	3	5094.2	1698.07	237.81	0.000	28.10	2
L (mm)	3	1097.9	365.97	51.25	0.004	6.06	3
Hata	3	21.4	7.14			0.12	
Toplam	15					100.00	

4.3. En Uygun Tasarımlı LID Modellerinin HAD Sonuçları

L₁₆ OD'de bulunan LID modelleri ile yapılan sayısal çözümlerin sonuçları ve bu sonuçlar ile beş farklı hedef performans parametresine göre belirlenen en uygun tasarım/işletme parametreleri Bölüm 4.2'de verilmişti.

Temiz hava tarafında geri kazanılan ısı güç- Q_{gk} ve duyulur ısıl etkenlik- ε için en uygun LID geometrik tasarım parametreleri; **KGG-küt, h-1.0 mm, L-240×240 mm** olarak belirlenmiştir. Ancak temiz hava tarafında geri kazanılan ısı güç- Q_{gk} için LID kanalındaki **ortalama hava akış hızı u-3.2 m/s** iken, duyulur ısıl etkenlik- ε için **u-2.0 m/s**'dir. Dolayısıyla temiz hava tarafında geri kazanılan ısı güç- Q_{gk} ve duyulur ısıl etkenlik- ε için en uygun LID tasarımı geometrik bakımdan özdeştir. Ancak en uygun işletme parametresi, kanaldaki ortalama hava akış hızları farklı olduğundan (Q_{gk} için **K-32-10-240** ve ε için **K-20-10-240**) ve bu modeller L₁₆ OD'de bulunmadığından, yeniden tasarlanarak, kanaldaki ortalama hava akış hızına göre parametrik sayısal çözümler yapılmıştır.

Diğer performans parametreleri olan LID'de akışın sağlanması için gerekli toplam fan gücü- $P_{h,t+e}$ ve hidrodinamik-ısıl büyütme oranı-HIBO için ise en uygun tasarım/işletme parametre alt seviyeleri ortaktır. Bu parametreler; **KGG-dairesel, u-2.0 m/s, h-2.5 mm, L-100×100 mm (D-20-25-100)** olarak belirlenmiştir ve bu LID modeli de L₁₆ OD'de bulunmadığından, yeniden tasarlanarak, kanaldaki ortalama hava akış hızına göre parametrik sayısal çözümler yapılmıştır.

Son olarak $\varepsilon \times \text{HIBO}$ sonuçlarının hedef performans parametresi seçildiği Taguchi analizine göre en uygun tasarım/işletme parametresi alt seviyeleri; **KGG-dairesel, u-2.0 m/s, h-2.5 mm, L-120×120 mm (D-20-25-120)** olarak belirlenmiştir. Bu LID modeli de L₁₆ OD'de bulunmadığından, yeniden tasarlanarak, kanaldaki ortalama hava akış hızına göre parametrik sayısal çözümler yapılmıştır.

Bölüm 4.2'de bahsedildiği gibi ANOM sonuçlarına göre oluşturulan üç farklı geometrik tasarımlı LID modelleriyle (L₁₆ OD'deki tüm modellere yapıldığı gibi), üç farklı eleman sayısında (ağ yoğunluğunda) ağ sayısından bağımsızlık çalışması yapılmıştır. Bu çalışmanın sıcaklık farkı ve basınç düşümü sonuçları ile ortalamalardan sapmalar aşağıdaki tablolarda verilmiştir.

Tablo 4.36. En uygun tasarımı LID modellerinde basınç düşümlerinin ağ yapısı ve eleman sayısından bağımsızlığı.

		Eleman sayısı	$\Delta p_{t,g-\zeta}$ (Pa)	$\overline{\Delta p}_{t,g-\zeta}$ (%)	$\Delta p_{e,g-\zeta}$ (Pa)	$\overline{\Delta p}_{e,g-\zeta}$ (%)	
K-20-10-240	Re _t	280.3	1,172,320	111.91	0.43	102.15	-7.93
	Re _e	255.6	1,267,577	104.29	-6.40	116.41	4.91
			1,364,475	118.08	5.97	114.31	3.02
		Ortalama		111.43	-4.44×10 ⁻¹⁵	110.96	1.28×10 ⁻¹⁴
K-32-10-240	Re _t	448.4	1,267,360	229.45	-3.91	239.04	2.29
	Re _e	408.9	1,364,025	249.13	4.32	234.04	0.15
			1,465,865	237.83	-0.40	227.98	-2.44
		Ortalama		238.80	3.89×10 ⁻¹⁵	233.69	-3.99×10 ⁻¹⁵
D-20-25-100	Re _t	686.2	1,267,771	9.55	0.09	9.71	0.14
	Re _e	625.7	1,363,165	9.54	-0.01	9.70	0.03
			1,454,834	9.53	-0.08	9.68	-0.18
		Ortalama		9.54	-1.24×10 ⁻¹⁴	9.70	0
D-20-25-120	Re _t	689.1	1,318,603	11.14	-0.18	11.27	0.34
	Re _e	628.4	1,414,825	11.18	0.14	11.21	-0.20
			1,512,121	11.17	0.03	11.22	-0.13
		Ortalama		11.16	0	11.23	-1.58×10 ⁻¹⁴

Temiz hava tarafında geri kazanılan ısı gücü- Q_{gk} en yüksek yapan K-32-10-240 modelinde en yüksek temiz hava tarafı basınç düşümü 238.8 Pa iken, toplam fan gücünü- $P_{h,t+e}$ en düşük ve hidrodinamik-ısı büyütmeye oranını-HIBO en büyük yapan D-20-25-100 modelinde temiz hava tarafı basınç düşümü 9.54 Pa'dır.

Tablo 4.37. En uygun tasarımı LID modellerinde sıcaklık farkına göre ağ yapısı ve eleman sayısından bağımsızlığı.

		Eleman sayısı	$\Delta T_{t,g-\zeta}$ (K)	$\overline{\Delta T}_{t,g-\zeta}$ (%)	$\Delta T_{e,g-\zeta}$ (K)	$\overline{\Delta T}_{e,g-\zeta}$ (%)	
K-20-10-240	Re _t	280.3	1,172,320	11.90	-0.14	12.46	-0.23
	Re _e	255.6	1,267,577	11.90	-0.21	12.47	-0.15
			1,364,475	11.96	0.36	12.54	0.39
		Ortalama		11.92	0	12.49	-4.74×10 ⁻¹⁵
K-32-10-240	Re _t	448.4	1,267,360	11.63	0.11	12.16	-0.07
	Re _e	408.9	1,364,025	11.64	0.17	12.19	0.17
			1,465,865	11.59	-0.27	12.14	-0.16
		Ortalama		11.62	0	12.16	4.87×10 ⁻¹⁵
D-20-25-100	Re _t	686.2	1,267,771	5.98	0.09	6.29	0.09
	Re _e	625.7	1,363,165	5.97	0.01	6.29	0.008
			1,454,834	5.97	-0.10	6.28	-0.10
		Ortalama		5.97	0	6.29	0
D-20-25-120	Re _t	689.1	1,318,603	6.57	0.06	6.92	0.06
	Re _e	628.4	1,414,825	6.57	-0.02	6.91	-0.02
			1,512,121	6.57	-0.04	6.91	-0.03
		Ortalama		6.57	-4.50×10 ⁻¹⁵	6.91	4.28×10 ⁻¹⁵

Benzer şekilde duyulur ısı etkenliği- ϵ en büyük yapan K-20-10-240 modelinde en yüksek temiz hava giriş-çıkış sıcaklık farkı 11.92 K iken, toplam fan gücünü- $P_{h,t+e}$ en düşük ve hidrodinamik-ısı büyütmeye oranını-HIBO en büyük yapan D-20-25-100 modelinde en düşük temiz hava giriş-çıkış sıcaklık farkı 5.97 K'dir.

4.4. En Uygun Tasarımlı LID Modellerinin Performans Sonuçları

Bölüm 4.3'te ağ yapısı eleman sayısından bağımsızlık çalışması verilen sıcaklık farkı ve basınç düşümü sonuçları kullanılarak, hesaplanan LID hedef performans göstergelerinin ağ yapısı eleman sayısından bağımsızlık çalışması, üç farklı eleman sayısında (ağ yoğunluğunda) incelenerek aşağıdaki tablolarda verilmiştir.

Tablo 4.38. En uygun tasarımı LID modellerinin temiz hava tarafında geri kazanılan ısı güçlerinin- Q_{gk} ağ yapısı eleman sayısından bağımsızlığı.

			Eleman sayısı	$Q_{gk,t}$ (W)	$\Delta Q_{gk,t}$
K-20-10-240	Re_t	280.3	1,172,320	716.68	-0.145
	Re_e	255.6	1,267,577	716.18	-0.215
	V(m³/h)	173	1,364,475	720.32	0.360
			Ortalama	717.73	5.27×10^{-15}
K-32-10-240	Re_t	448.4	1,267,360	1120.74	0.107
	Re_e	408.9	1,364,025	1121.45	0.170
	V(m³/h)	276 (+%38)	1,465,865	1116.44	-0.277
			Ortalama	1119.54	6.77×10^{-15}
D-20-25-100	Re_t	686.2	1,267,771	67.47	0.094
	Re_e	625.7	1,363,165	67.42	0.008
	V(m³/h)	32 (-%36)	1,454,834	67.34	-0.103
			Ortalama	67.41	7.03×10^{-15}
D-20-25-120	Re_t	689.1	1,318,603	108.85	0.066
	Re_e	628.4	1,414,825	108.75	-0.025
	V(m³/h)	48 (-%4)	1,512,121	108.73	-0.041
			Ortalama	108.78	-4.36×10^{-15}

Tablo 4.39. En uygun tasarımı LID modellerinin duyulur ısı etkenliklerinin- ε ağ yapısı eleman sayısından bağımsızlığı.

			Eleman sayısı	ε (%)	$\overline{\Delta\varepsilon}$ (%)
K-20-10-240	Re_t	280.3	1,172,320	79.35	-0.145
	Re_e	255.6	1,267,577	79.30	-0.215
	V(m³/h)	173	1,364,475	79.75	0.360
			Ortalama	79.47	9.30×10 ⁻¹⁵
K-32-10-240	Re_t	448.4	1,267,360	77.56	0.107
	Re_e	408.9	1,364,025	77.61	0.170
	V(m³/h)	276 (+%38)	1,465,865	77.26	-0.277
			Ortalama	77.47	9.54×10 ⁻¹⁵
D-20-25-100	Re_t	686.2	1,267,771	39.84	0.094
	Re_e	625.7	1,363,165	39.81	0.008
	V(m³/h)	32 (-%36)	1,454,834	39.77	-0.103
			Ortalama	39.81	-4.64×10 ⁻¹⁵
D-20-25-120	Re_t	689.1	1,318,603	43.82	0.066
	Re_e	628.4	1,414,825	43.78	-0.025
	V(m³/h)	48 (-%4)	1,512,121	43.78	-0.041
			Ortalama	43.80	4.22×10 ⁻¹⁵

Tablo 4.40. En uygun tasarımı LID modellerinin fan güçlerinin-P_{h,t+e} ağ yapısı eleman sayısından bağımsızlığı.

			Eleman sayısı	P _{h,t} (W)	$\overline{\Delta P}_{h,t}$ (%)	P _{h,e} (W)	$\overline{\Delta P}_{h,e}$ (%)	P _{h,t+e} (W)	$\overline{\Delta P}_{h,t+e}$ (%)
K-20-10-240	Re_t	280.3	1,172,320	5.3719	0.43394	4.9034	7.93764	10.2753	3.74303
	Re_e	255.6	1,267,577	5.006	6.40564	5.5878	4.91326	10.5939	0.75811
	V(m³/h)	173	1,364,475	5.6681	5.97170	5.4872	3.02437	11.1553	4.50114
			Ortalama	5.3486	0	5.3261	2.22×10 ⁻¹⁴	10.6748	1.66×10 ⁻¹⁴
K-32-10-240	Re_t	448.4	1,267,360	17.6218	3.91713	18.3590	2.29243	35.9809	0.84594
	Re_e	408.9	1,364,025	19.1333	4.32397	17.9748	0.15183	37.1081	2.26048
	V(m³/h)	276 (+%38)	1,465,865	18.2656	-0.40684	17.5089	2.44427	35.7745	1.41453
			Ortalama	18.3403	2.22×10 ⁻¹⁶	17.9475	-6.51×10 ⁻¹⁵	36.2879	6.51×10 ⁻¹⁵
D-20-25-100	Re_t	686.2	1,267,771	0.0859	0.09612	0.0874	0.14747	0.1734	0.12201
	Re_e	625.7	1,363,165	0.0858	0.01358	0.0873	0.03720	0.1732	0.01201
	V(m³/h)	32 (-%36)	1,454,834	0.0858	0.08253	0.0871	-0.18468	0.1729	0.13403
			Ortalama	0.0858	-1.62×10 ⁻¹⁴	0.0873	-5.29×10 ⁻¹⁵	0.1732	-1.60×10 ⁻¹⁴
D-20-25-120	Re_t	689.1	1,318,603	0.1471	0.18096	0.1488	0.34343	0.2959	0.08202
	Re_e	628.4	1,414,825	0.1476	0.14532	0.1480	0.20678	0.29563	0.03125
	V(m³/h)	48 (-%4)	1,512,121	0.1474	0.03563	0.1481	0.13665	0.2955	0.05076
			Ortalama	0.1474	-1.25×10 ⁻¹⁴	0.1483	-1.25×10 ⁻¹⁴	0.29572	-1.25×10 ⁻¹⁴

Tablo 4.41. En uygun tasarımı LID modellerinin hidrodinamik-ısı büyüme oranlarının-HIBO ağ yapısı eleman sayısından bağımsızlığı.

			Eleman sayısı	HIBO	$\Delta HIBO$ (%)
K-20-10-240	Re_t	280.3	1,172,320	69.74	3.62
	Re_e	255.6	1,267,577	67.603	0.43
	V(m³/h)	173	1,364,475	64.57	-4.06
			Ortalama	67.307	-7.4×10 ⁻¹⁵
K-32-10-240	Re_t	448.4	1,267,360	31.14	0.93
	Re_e	408.9	1,364,025	30.22	-2.06
	V(m³/h)	276 (+%38)	1,465,865	31.207	1.12
			Ortalama	30.85	-4×10 ⁻¹⁵
D-20-25-100	Re_t	686.2	1,267,771	389.07	-0.02
	Re_e	625.7	1,363,165	389.16	-0.003
	V(m³/h)	32 (-%36)	1,454,834	389.30	0.03
			Ortalama	389.18	9.74×10 ⁻¹⁵
D-20-25-120	Re_t	689.1	1,318,603	367.78	-0.015
	Re_e	628.4	1,414,825	367.86	0.006
	V(m³/h)	48 (-%4)	1,512,121	367.87	0.009
			Ortalama	367.84	-5.2×10 ⁻¹⁵

Tablo 4.42. En uygun tasarımı LID modellerinin $\epsilon \times HIBO$ sonuçlarının ağ yapısı eleman sayısından bağımsızlığı.

			Eleman sayısı	$\epsilon \times HIBO$	$\Delta \epsilon \times HIBO$ (%)
K-20-10-240	Re_t	280.3	1,172,320	55.35	3.48
	Re_e	255.6	1,267,577	53.61	0.23
	V(m³/h)	173	1,364,475	51.50	-3.71
			Ortalama	53.48	0.0
K-32-10-240	Re_t	448.4	1,267,360	24.15	1.04
	Re_e	408.9	1,364,025	23.45	-1.89
	V(m³/h)	276 (+%38)	1,465,865	24.11	0.85
			Ortalama	23.90	0.0
D-20-25-100	Re_t	686.2	1,267,771	155.04	0.06
	Re_e	625.7	1,363,165	154.94	0.004
	V(m³/h)	32 (-%36)	1,454,834	154.82	-0.072
			Ortalama	154.94	0.0
D-20-25-120	Re_t	689.1	1,318,603	161.19	0.05
	Re_e	628.4	1,414,825	161.08	-0.01
	V(m³/h)	48 (-%4)	1,512,121	161.06	-0.03
			Ortalama	161.11	0.0

En uygun tasarımı LID modellerinin hedef performans göstergeleri aşağıda yorumlanmıştır.

K-20-10-240: Duyulur ısı etkenliği- ϵ maksimum yapılması hedeflenen analiz sonuçlarına göre oluşturulan bu modelin tasarım parametre alt seviyeleri; **KGG-küt**,

u-2.0 m/s, h-1.0 mm, L-240×240 mm'dir. Bu modelin duyulur ısı etkenliği- ε **%79.47**'dir. Bu model ile temiz hava tarafında geri kazanılan ısı güç- Q_{gk} **717.73 W**, LID'de akışın sağlanması için gerekli toplam fan gücü- $P_{h,t+e}$ **10.67 W**, hidrodinamik-ısı büyüme oranı-HIBO **67.23** ve $\varepsilon \times \text{HIBO}$ ise **53.48**'dir. Modelin hacimsel debisi olan **173 m³/h** çalışmada hedeflenen debi aralığındadır.

K-32-10-240: Duyulur ısı etkenliğinin- ε maksimum yapılması hedeflenen analiz sonuçlarına göre oluşturulan LID modeli ile aynı geometrik tasarım parametreleri (**KGG-küt, h-1.0 mm, L-240×240mm**) ile oluşturulan LID modelinde, işletme parametresinin **u-3.2 m/s** uygulanması durumunda temiz hava tarafında geri kazanılan ısı gücün- Q_{gk} en büyük olacağı belirlenmiştir. Bu işletme koşulunda temiz tarafta geri kazanılan ısı güç- Q_{gk} **1119.54 W** ile en yüksek olurken, duyulur ısı etkenlik **%77.47**'ye düşmüştür. Gerekli toplam fan gücü- $P_{h,t+e}$ ise **36.3 W**'a çıkmıştır (en büyük). Ayrıca hidrodinamik-ısı büyüme oranı-HIBO **30.85**'e (en küçük) ve $\varepsilon \times \text{HIBO}$ ise **23.90**'a (en küçük) düşmüştür. Modelin hacimsel debisi olan **276 m³/h** çalışmada hedeflenen debi aralığının üst sınırından **%38** yüksektir.

D-20-25-100: LID'de gerekli toplam fan gücünü- $P_{h,t+e}$ en küçük ve hidrodinamik-ısı büyüme oranını-HIBO en büyük yapmak için yapılan analizlerin sonuçlarına göre oluşturulan LID modelinin tasarım parametre alt seviyeleri ortaktır; **KGG-D, u-2.0 m/s, h-2.5 mm, L-100×100 mm**'dir. Bu model ile elde edilen hidrodinamik-ısı büyüme oranı-HIBO **389.18** (en büyük) ve akışın sağlanması için gerekli fan gücü- $P_{h,t+e}$ **0.173 W**'tır (en küçük). Bu iki hedef performans parametresinin tersine, duyulur ısı etkenlik- ε **% 39.81** ve temiz tarafta geri kazanılan ısı güç- Q_{gk} **67.41 W** ile en düşük sonuçları vermiştir. Modelde $\varepsilon \times \text{HIBO}$ ise **154.94**'dir. Modelin hacimsel debisi olan **32 m³/h** çalışmada hedeflenen debi aralığının alt sınırından **%36** düşüktür.

D-20-25-120: Hem duyulur ısı etkenliğinin- ε hem de temiz hava tarafında hidrodinamik-ısı büyüme oranının-HIBO aynı LID modelinde olabildiğince yüksek olmasının hedeflediği analizin sonuçlarına göre en uygun tasarım parametresi alt seviyeleri; **KGG-D, u-2.0 m/s, h-2.5 mm ve L-120×120 mm**'dir. Bu model ile duyulur ısı etkenlik- ε **%43.80**, temiz hava tarafında hidrodinamik-ısı büyüme oranı-HIBO **367.84** hesaplanmıştır. Temiz tarafta geri kazanılan ısı güç- Q_{gk} **108.78 W**, LID'de akışın sağlanması için gerekli toplam fan gücü- $P_{h,t+e}$ **0.295 W** ve $\varepsilon \times \text{HIBO}$ ise **161.11** elde edilmiştir.

En uygun tasarımlı bu LID modelinde; hidrodinamik-ısıl büyütme oranı-HIBO ve $\varepsilon \times \text{HIBO}$ **K-20-10-240** ve **K-32-10-240** modellerine göre oldukça yüksek sonuçlar verirken, duyulur ısı etkenlik- ε , temiz hava tarafında geri kazanılan ısı güç- Q_{gk} ve akışın sağlanması için gerekli toplam fan güçleri daha düşüktür. Modelin hacimsel debisi olan **48 m³/h** ise **-%4** fark ile çalışmada hedeflenen debi aralığının alt sınırındadır.

4.5. En Uygun Tasarımlı LID Modellerinin Performans Sonuçları ile Taguchi Tahminlerinin Karşılaştırılması

Bölüm 4.2’de, L_{16} Taguchi OD’ye göre tasarlanan LID modellerinin sayısal çözümlerine ANOM analizi uygulanmıştır. ANOM analizi sonuçlarına göre beş farklı performans parametresi için dört farklı LID modeli oluşturulmuştur. En uygun tasarımlı dört farklı LID modeli ile sayısal çözümler yapılmış ve performans parametreleri hesaplanmıştır. Sayısal çözümlerle elde edilen performans parametreleri ile Taguchi tahmini performans parametreleri Tablo 4.43’te karşılaştırılmıştır. Taguchi tahmini performans parametreleri denklem 4.12 [29] kullanılarak hesaplanmıştır:

$$\tau = \tau_m + \sum_{i=1}^j (\tau_i - \tau_m) \quad (4.12)$$

Burada, τ en uygun kombinasyonlu LID’nin SGO’sunu, τ_m sayısal çözümlerden elde edilen SGO’ların aritmetik ortalamasını ve τ_i değişken seviyelerinin en uygun kombinasyonlu LID sayısal çözümünden elde edilen SGO’sunu göstermektedir.

Tablo 4.43’te verilen sonuçlara göre; HAD sonuçları ile Taguchi tahminleri arasındaki farklar (%2.31 ila %16.70) makul seviyededir. Dolayısıyla bu sonuçlar, hem seçilen LID tasarım/işletme parametreleri için belirlenen alt seviyelerin uygunluğunu hem de Taguchi analizlerinin LID tasarımında kullanılabileceğini göstermektedir.

Tablo 4.43. En uygun tasarımı LID modellerinin hedef performans parametreleri için HAD sonuçları ve Taguchi tahminleri.

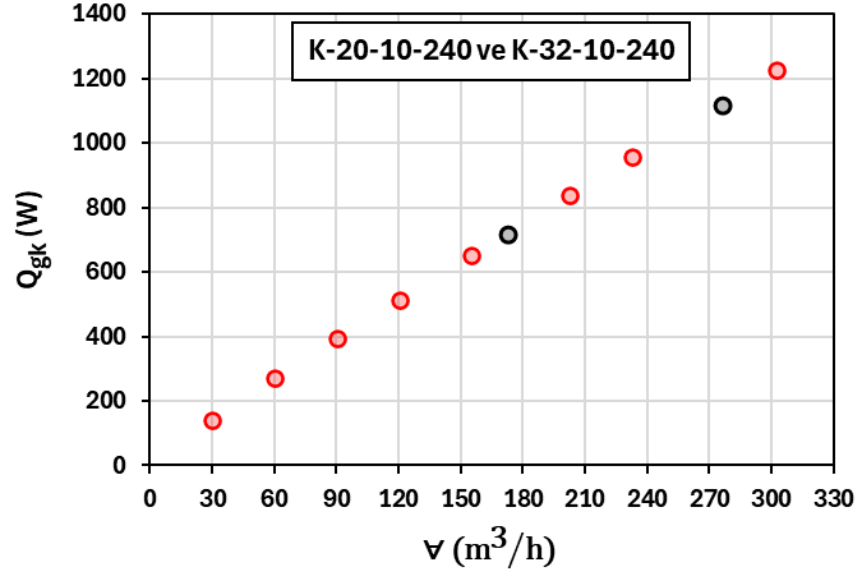
Performans Parametresi	Model Kodu	$\dot{V}$ (m ³ /h)	Re	HAD	Taguchi Tahmini	Fark (%)
Q_{gk} (W)	K-32-10-240	276 (+%38)	448.4	1119.54	1227.7	9.66
ε (%)	K-20-10-240	173	280.3	79.47	92.74	16.70
P_{h+e} (W)	D-20-25-100	32 (-%36)	686.2	0.173	0.169	2.31
HIBO (-)	D-20-25-100	32 (-%36)	686.2	389.18	424.81	9.16
$\varepsilon \times \text{HIBO}$ (-)	D-20-25-120	48 (-%4)	689.1	161.11	183.71	14.03

4.6. En Uygun Tasarımlı LID Modellerin Parametrik Performans Sonuçları

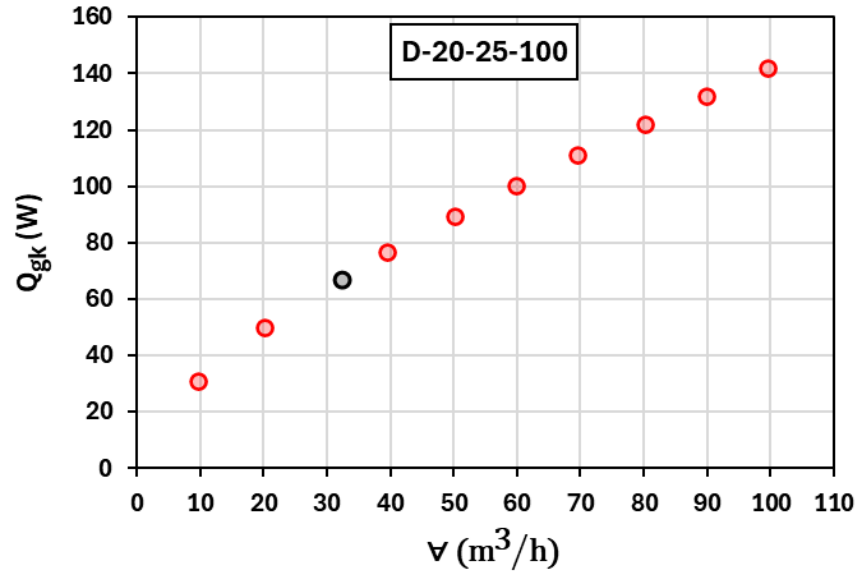
ANOM sonuçlarına göre tasarladığımız dört farklı optimum LID olsa da geometrik tasarım parametreleri (KGG, h ve L) farklı üç sayısal LID modeli bulunmaktadır. Bu sebeple ANOM sonuçlarına uygun olarak tasarladığımız üç farklı LID modelinde on farklı hacimsel debide (ortalama hava akış hızında) sayısal çözümler (HAD) yapılmış ve elde edilen sonuçlarla debideki değişimin performans parametrelerini nasıl etkilediği grafiklerle aşağıda açıklanmıştır. Grafiklerdeki siyah renkli semboller en uygun işletme koşulundaki sonuçları göstermektedir.

4.6.1. Temiz hava tarafında geri kazanılan ısı gücü- Q_{gk}

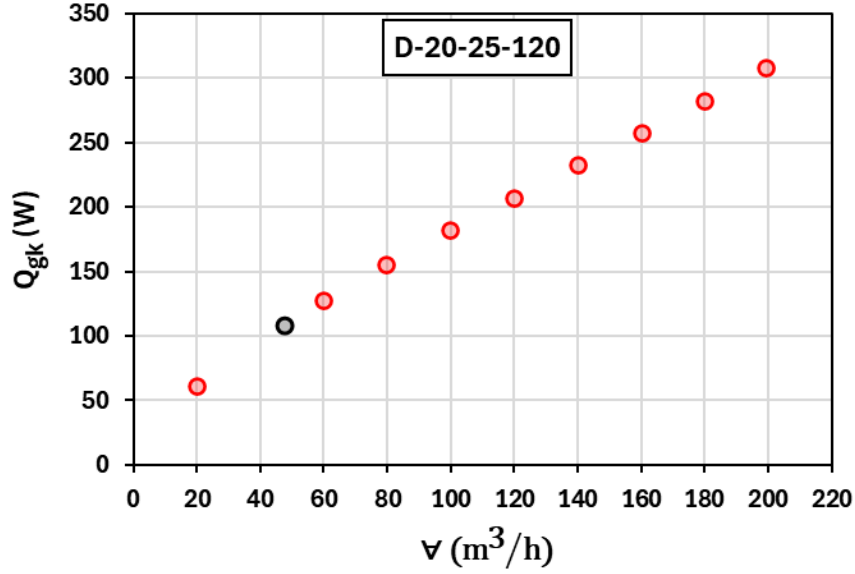
En uygun tasarımı LID modellerinde debi artışının temiz hava tarafında geri kazanılan ısı güce etkisi parametrik çalışma yapılarak on farklı debide incelenmiş ve sonuçlar Şekil 4.6'da, Şekil 4.7'de ve Şekil 4.8'de verilmiştir. En uygun tasarımı LID modellerinin tamamında debinin artması temiz hava tarafında geri kazanılan ısı gücü arttırmıştır. Temiz hava tarafında geri kazanılan ısı gücü için en yüksek sonuçlar, geometrik/yapısal özellikleri aynı olan K-20-10-240 ve K-32-10-240 modellerinde elde edilmiştir. K-32-10-240 LID modeli ANOM analizinde temiz hava tarafında geri kazanılan ısı gücü maksimum yapan parametre alt seviye kombinasyonunu vermiştir. Ancak bu kombinasyon ile elde edilen hacimsel debi, tasarımdaki hedef debi aralığı olan 200 m³/h'den büyüktür. Temiz hava tarafında geri kazanılan en düşük ısı gücü D-20-25-100 LID modelinde elde edilmiştir.



Şekil 4.6. Q_{gk} ve ε için en uygun tasarımı LID modelinde (K-20-10-240 ve K-32-10-240) geri kazanılan ısıl gücün hacimsel debiyle değişimi.



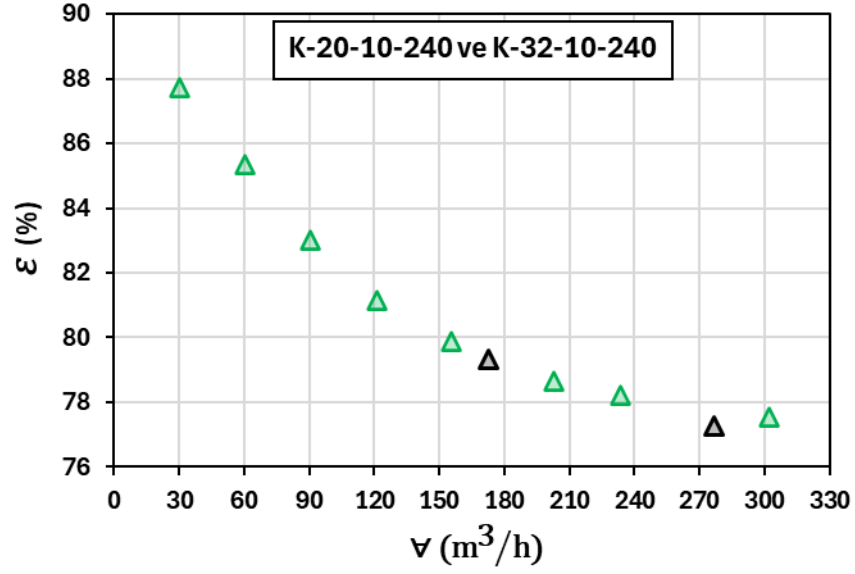
Şekil 4.7. $P_{h,t+e}$ ve HIBO için en uygun tasarımı LID modelinde (D-20-25-100) geri kazanılan ısıl gücün hacimsel debiyle değişimi.



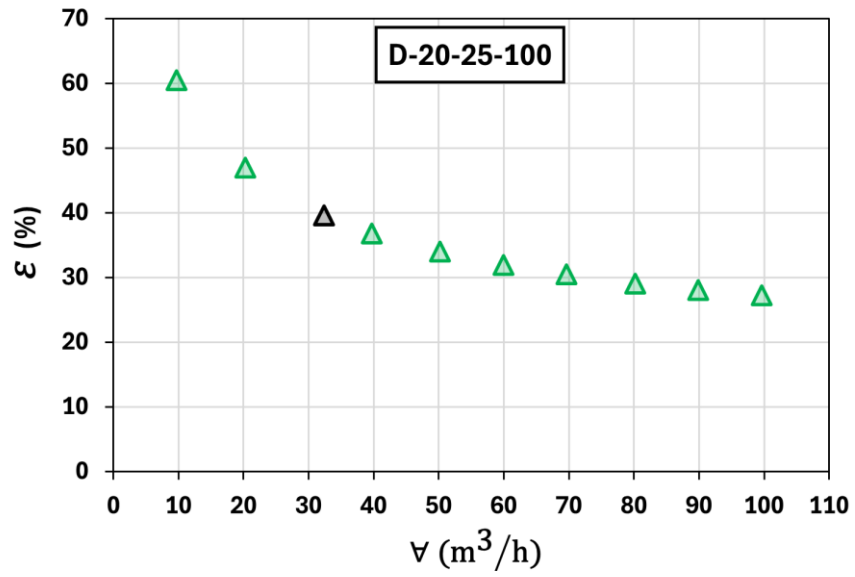
Şekil 4.8. $\varepsilon \times \text{HIBO}$ için en uygun tasarımı LID modelinde (D-20-25-120) geri kazanılan ısıl gücün hacimsel debiyle değişimi.

4.6.2. Duyulur ısıl etkenlik- ε

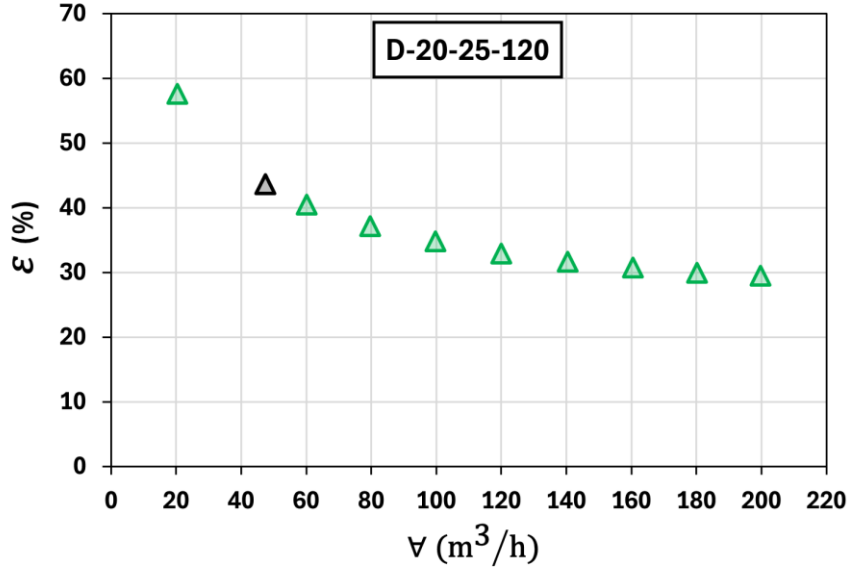
En uygun tasarımı LID modellerinde hacimsel debi artışının duyulur ısıl etkenliğe etkisi parametrik çalışılarak on farklı debide incelemiş ve sonuçlar Şekil 4.9'da, Şekil 4.10'da ve Şekil 4.11'de verilmiştir. En uygun tasarımı LID modellerinin tamamında, debinin artması duyulur ısıl etkenliği azaltmıştır. En yüksek duyulur ısıl etkenlikler geometrik özellikleri aynı olan K-20-10-240 ve K-32-10-240 modellerinde elde edilmiştir. K-20-10-240 LID modeli ANOM analizinde duyulur ısıl etkenliği en yüksek yapan parametre kombinasyonunu vermiştir. En düşük duyulur ısıl etkenlik D-20-25-100 LID modelinde elde edilmiştir.



Şekil 4.9. Q_{gk} ve ε için en uygun tasarımı LID modelinde (K-20-10-240 ve K-32-10-240) ısı etkenliğinin hacimsel debiyle değişimi.



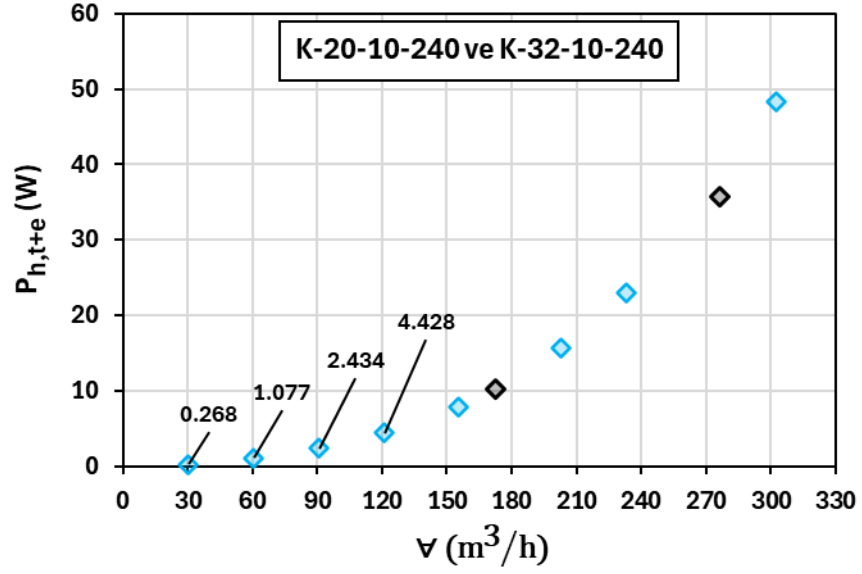
Şekil 4.10. $P_{h,t+e}$ ve HIBO için en uygun tasarımı LID modelinde (D-20-25-100) ısı etkenliğinin hacimsel debiyle değişimi.



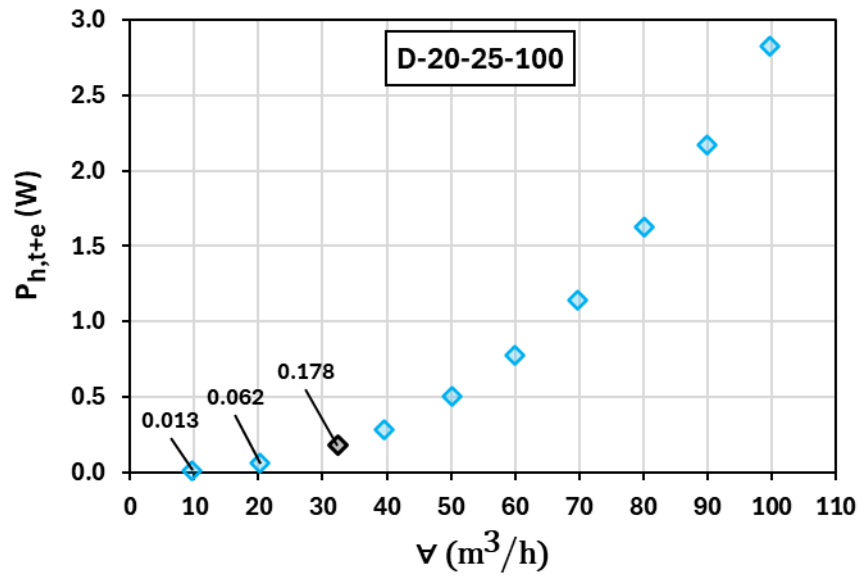
Şekil 4.11. $\varepsilon \times \text{HIBO}$ için en uygun tasarımı LID modelinde (D-20-25-120) ısıtıcı etkinliğinin hacimsel debiyle değişimi.

4.6.3. Akışın sağlanması için gerekli fan gücü- $P_{h,t+e}$

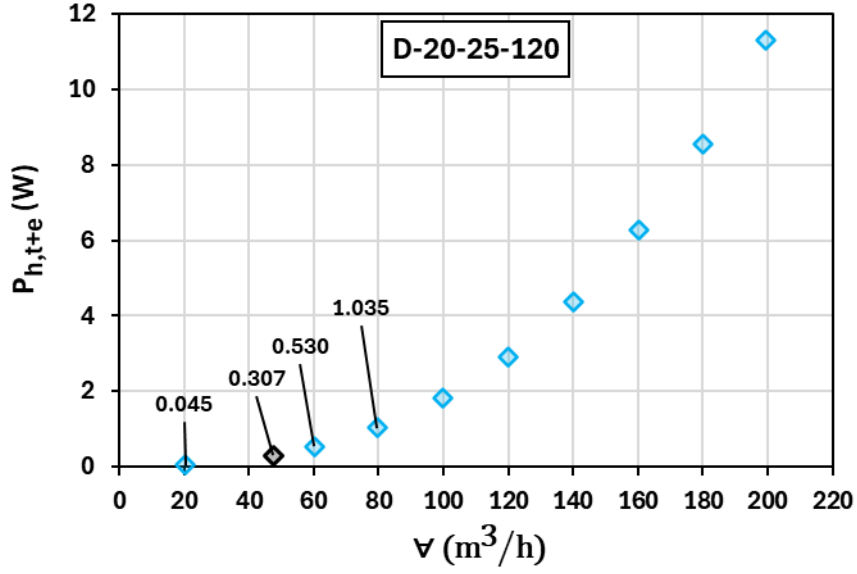
En uygun tasarımı LID modellerinde debi artışının LID’de akışın sağlanması için gerekli toplam fan gücüne etkisi parametrik çalışılarak on farklı debide incelenmiş ve sonuçlar Şekil 4.12’de, Şekil 4.13’te ve Şekil 4.14’te verilmiştir. En uygun tasarımı LID modellerinin tamamında debinin artması, LID’de akışın sağlanması için gerekli toplam fan gücünü de arttırmıştır. LID’de akışın sağlanması için gerekli toplam fan gücü D-20-25-100 LID modelinde en düşüktür. D-20-25-100 LID modeli ANOM analizinde gerekli toplam fan gücünün en düşük olması için önerilen parametre kombinasyonudur. LID’de akışın sağlanması için gerekli en yüksek toplam fan gücü geometrik özellikleri aynı olan K-20-10-240 ve K-32-10-240 modellerinde elde edilmiştir.



Şekil 4.12. Q_{gk} ve ϵ için en uygun tasarımı LID modelinde (K-20-10-240 ve K-32-10-240) akışın sağlanması için gerekli toplam fan gücünün hacimsel debiyle değişimi.



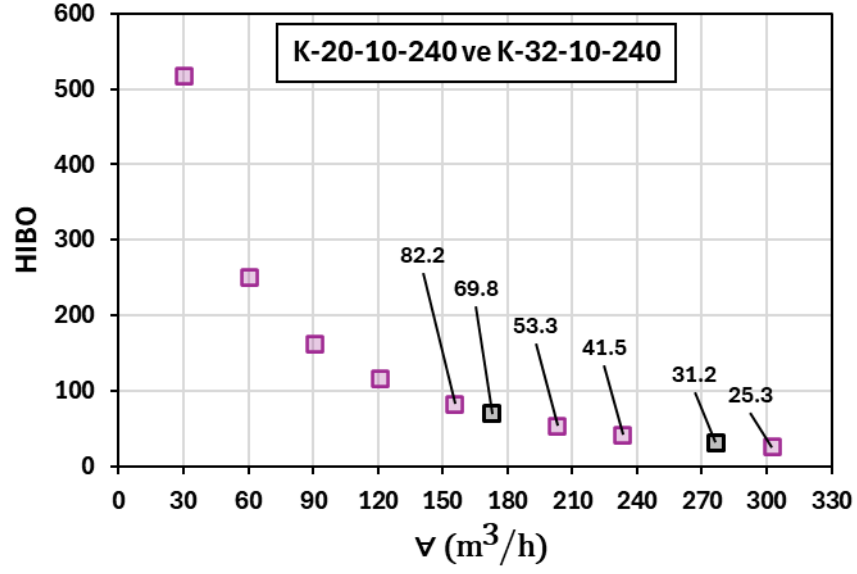
Şekil 4.13. $P_{h,t+e}$ ve HIBO için en uygun tasarımı LID modelinde (D-20-25-100) akışın sağlanması için gerekli toplam fan gücünün hacimsel debiyle değişimi.



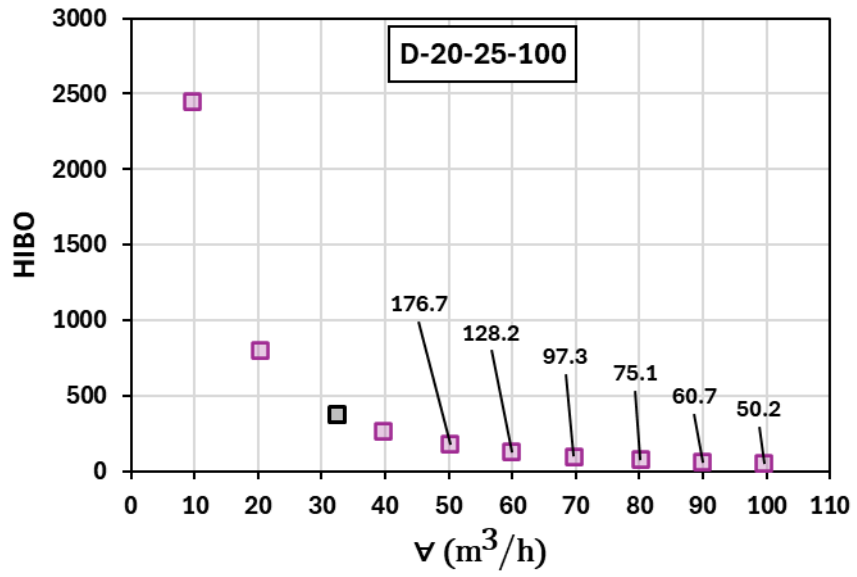
Şekil 4.14. ε×HIBO için en uygun tasarımı LID modelinde (D-20-25-120) akışın sağlanması için gerekli toplam fan gücünün hacimsel debiyle değişimi.

4.6.4. Hidrodinamik-ısıl büyütme oranı-HIBO

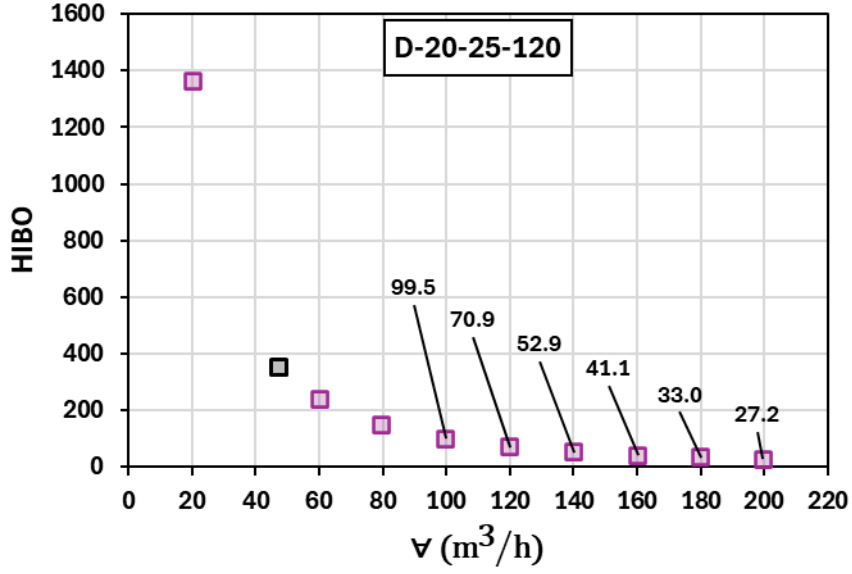
En uygun tasarımı LID modellerinde debi artışının HIBO'ya etkisi parametrik çalışılarak on farklı debide incelenmiş ve sonuçlar Şekil 4.15'te, Şekil 4.16'da ve Şekil 4.17'de verilmiştir. En uygun tasarımı LID modellerinin tamamında debinin artması, HIBO'yu düşürmüştür. En yüksek HIBO D-20-25-100 LID modelinde elde edilmiştir. D-20-25-100 modeli ANOM analizinde HIBO'yu maksimum yapmak için önerilen LID modelidir. En düşük HIBO aynı geometrik özellikli K-20-10-240 ve K-32-10-240 modellerinde elde edilmiştir.



Şekil 4.15. Q_{gk} ve ε için en uygun tasarımı LID modelinde (K-20-10-240 ve K-32-10-240) HIBO'nun hacimsel debiyle değişimi.



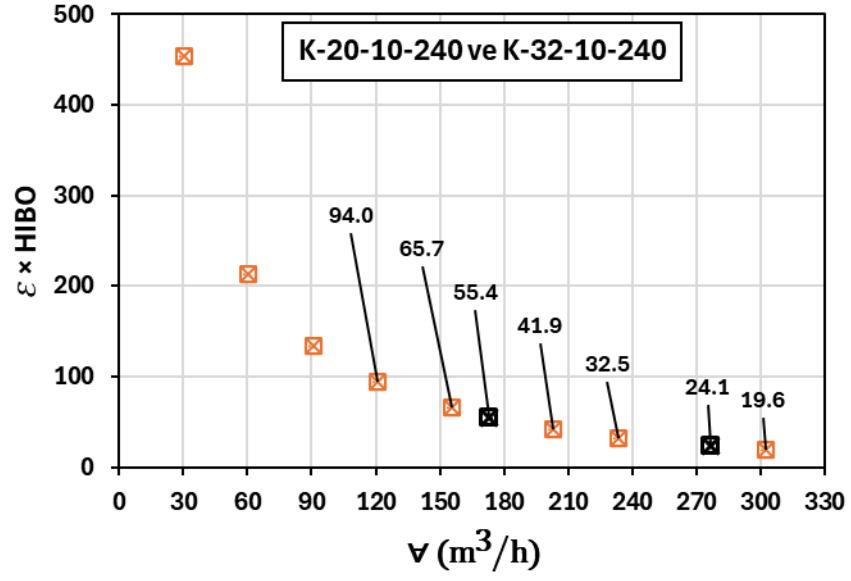
Şekil 4.16. $P_{h,t+e}$ ve HIBO için en uygun tasarımı LID modelinde (D-20-25-100) HIBO'nun hacimsel debiyle değişimi.



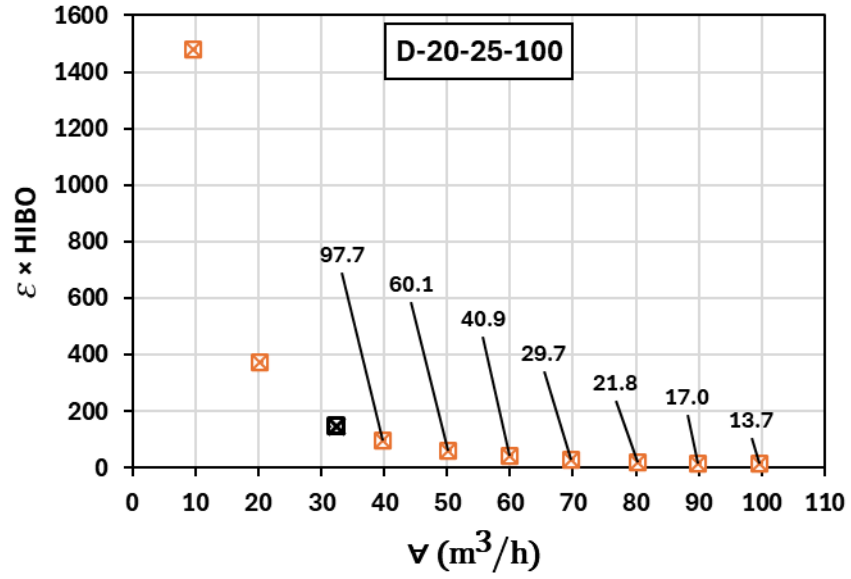
Şekil 4.17. $\epsilon \times \text{HIBO}$ için en uygun tasarımı LID modelinde (D-20-25-120) HIBO'nun hacimsel debiyle değişimi.

4.6.5. Isıl etkenlik ve hidrodinamik-ısıl büyütme oranı- $\epsilon \times \text{HIBO}$

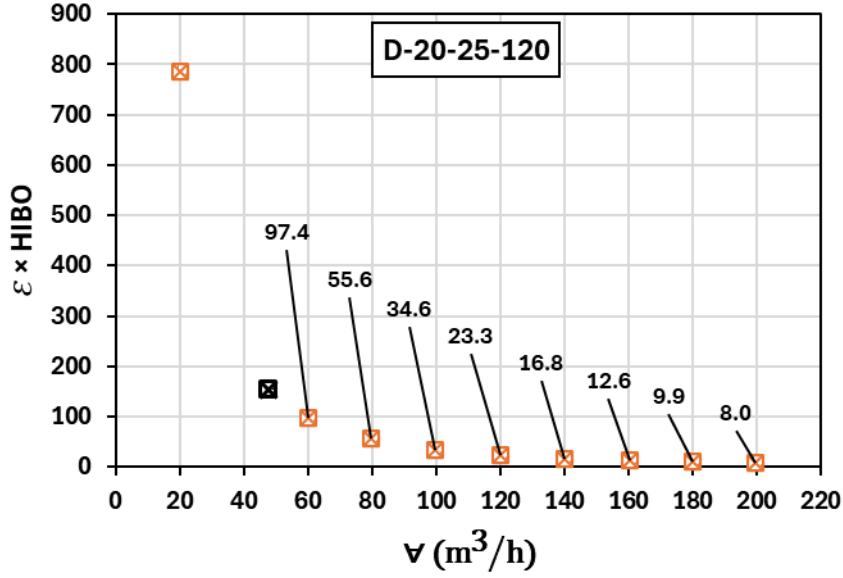
En uygun tasarımı LID modellerinde debi artışının $\epsilon \times \text{HIBO}$ 'ya etkisi parametrik çalışılarak on farklı debide incelenmiş ve sonuçlar Şekil 4.18'de, Şekil 4.19'da ve Şekil 4.20'de verilmiştir. En uygun tasarımı LID modellerinin tamamında debinin artması, $\epsilon \times \text{HIBO}$ 'yu azaltmıştır. En yüksek $\epsilon \times \text{HIBO}$, D-20-25-120 LID modelinde elde edilmiştir. D-20-25-120 LID modeli, ANOM analizinin $\epsilon \times \text{HIBO}$ 'nun maksimum olması için önerdiği modeldir.



Şekil 4.18. Q_{gk} ve ε için en uygun tasarımı LID modelinde (K-20-10-240 ve K-32-10-240) $\varepsilon \times \text{HIBO}$ 'nun hacimsel debiyle değişimi.



Şekil 4.19. $P_{h,t+e}$ ve HIBO için en uygun tasarımı LID modelinde (D-20-25-100) $\varepsilon \times \text{HIBO}$ 'nun hacimsel debiyle değişimi.



Şekil 4.20. $\varepsilon \times \text{HIBO}$ için en uygun tasarımı LID modelinde (D-20-25-120) $\varepsilon \times \text{HIBO}$ 'nun hacimsel debiyle değişimi.

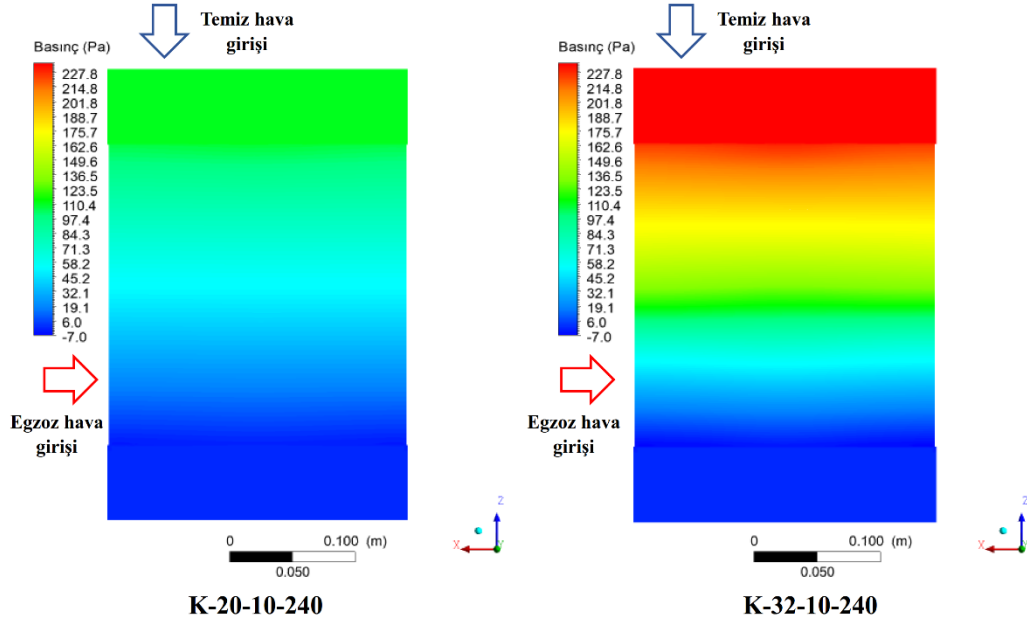
ANOM analizi ile belirlenmiş en uygun tasarımı LID'lerde hacimsel debideki değişimin performans parametrelerine etkisi; temiz hava tarafında geri kazanılan ısı güç- Q_{gk} ve LID'de akışın sağlanması için gerekli toplam fan gücü- $P_{h,t+e}$ debiyle artmaktadır. Ancak duyulur ısı etkenlik- ε , HIBO ve $\varepsilon \times \text{HIBO}$ ise debinin artışı ile azalmaktadır.

4.7. En Uygun Tasarımı LID Modellerinde Basınç, Hız ve Sıcaklık Dağılımları

Çalışmada elde edilen en uygun tasarımı LID modellerinin sayısal çözümleri sonucunda temiz hava kanalı simetri düzleminde elde edilen basınç, hız, sıcaklık dağılımları ile levha yüzeyindeki sıcaklık dağılımları bu bölümde değerlendirilecektir.

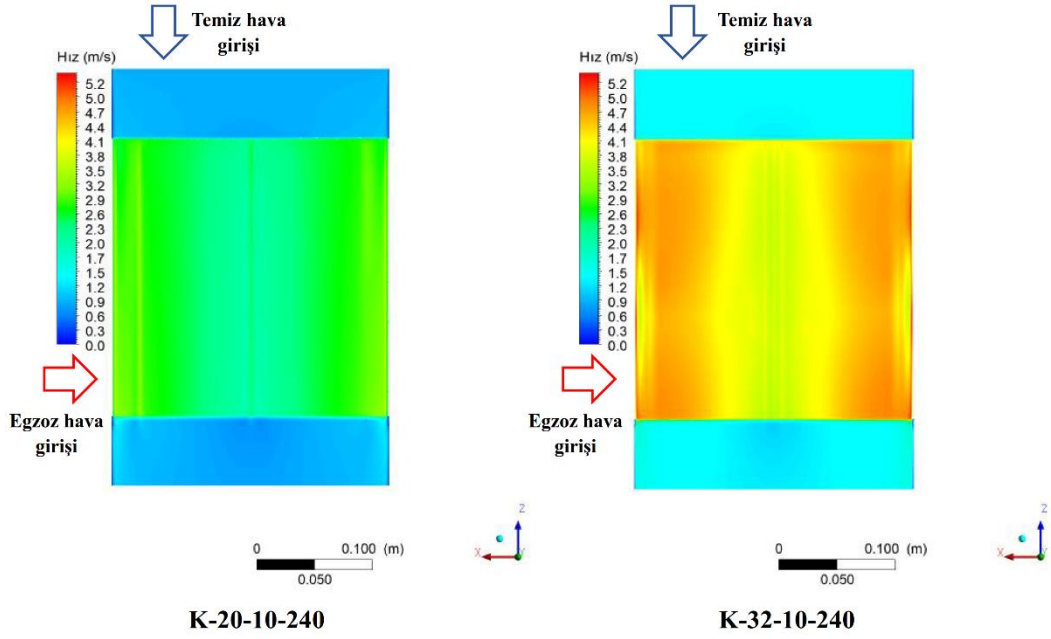
4.7.1. Geri kazanılan ısı güç- Q_{gk} ve duyulur ısı etkenlik- ε bakımından en uygun tasarımı LID modelleri

Şekil 4.21'e göre temiz hava tarafı basınç kayıplarının hem akış doğrultusunda hem de akışa dik doğrultuda dengeli dağılması akışın laminar karakteristikli olduğunu göstermektedir.



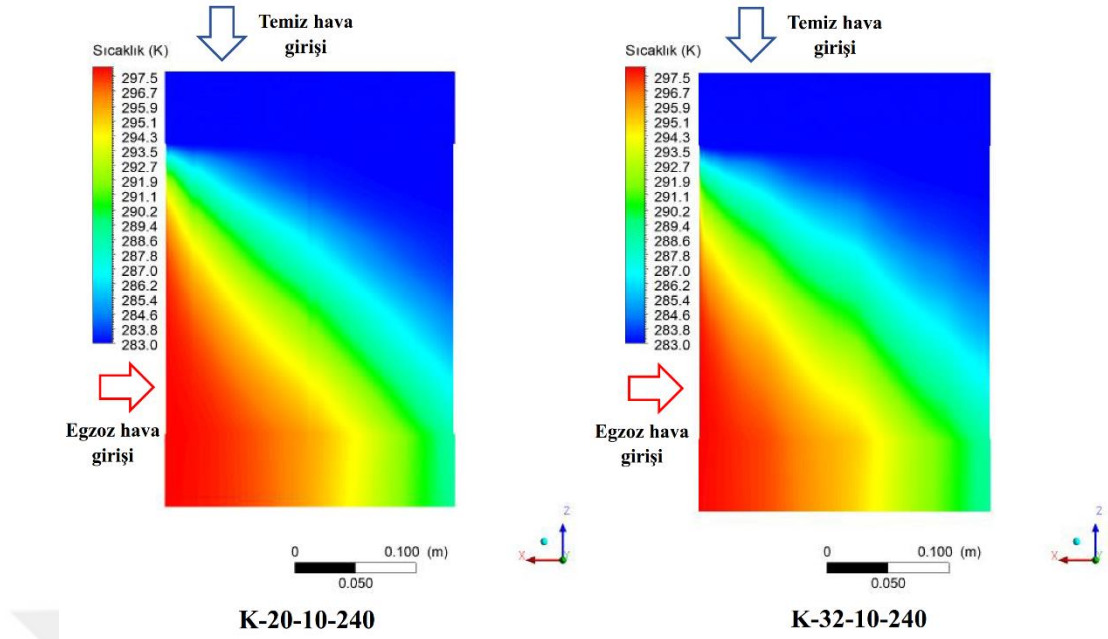
Şekil 4.21. K-20-10-240/K-32-10-240 modellerinin kanal simetri düzleminde basınç dağılımları.

LID kanallarına girişte ve çıkışta oluşan ani kesit daralması ve genişlemesinden kaynaklı yerel basınç kayıpları K-32-10-240’da daha belirgindir. Yerel basınç kayıplarına rağmen kanal girişinden itibaren statik basıncın dinamik basınca (momentum artışı) dönüşümünün düzgün olması kanal giriş geometrisi tasarımının uygunluğunu göstermektedir. Simetri düzlemindeki basınç dağılımlarından; K-32-10-240 modelinde, kanal içerisindeki ortalama akış hızının, K-20-10-240’a göre daha yüksek olduğu, renk gradyenlerindeki değişimlerin keskinliğinden de anlaşılmaktadır. Kanal içerisindeki basınç gradyenin hızla değişmesi, momentum, ısı ve kütle transferinin iyileştiğinin göstergesidir. K-32-10-240’da (~ 1120 W) K-20-10-240 (~ 718 W) modeline göre daha yüksek ($\sim 56\%$) ısı geri kazanımı sağlanmaktadır. Ancak basınç kayıpları da K-32-10-240’da (~ 239 Pa) K-20-10-240’a (~ 111 Pa) göre 2.15 kat daha yüksektir. Ayrıca K-32-10-240 (36.3 W)’daki toplam fan gücü, K-20-10-240 (10.7 W)’a göre 3.4 kat fazladır. Buna karşılık K-32-10-240’da hacimsel debi $276 \text{ m}^3/\text{h}$ iken K-20-10-240’da ise $173 \text{ m}^3/\text{h}$ ’tir (K-32-10-240’ın $\%62.7$ ’si). Ancak K-32-10-240 ($\%79.47$) ile K-20-10-240 ($\%77.47$) arasındaki duyulur ısıl etkenlik farkı ($\%2$) azdır.

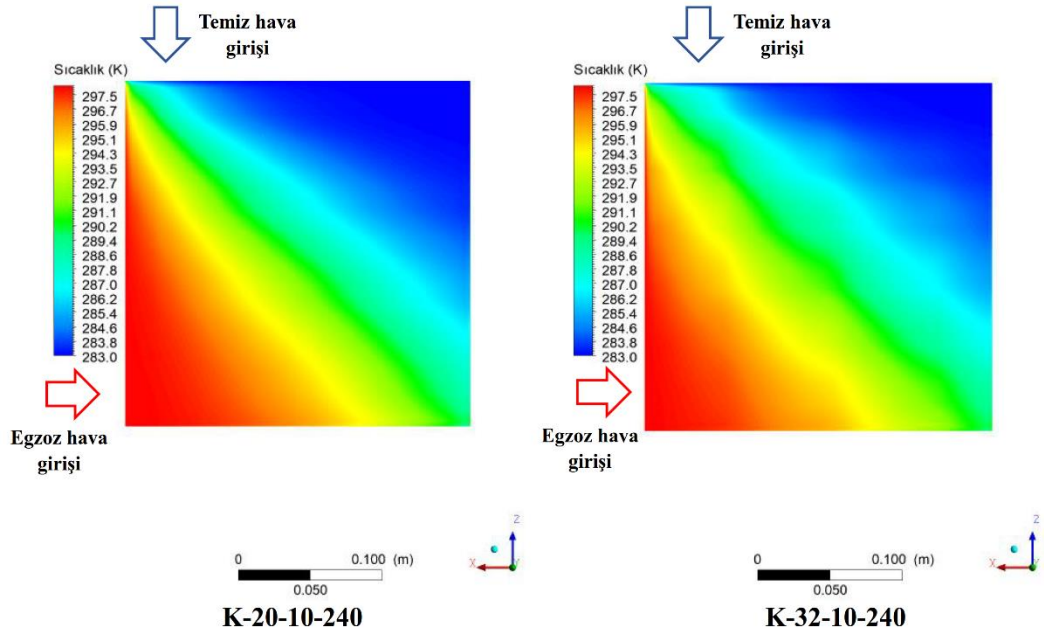


Şekil 4.22. K-20-10-240/K-32-10-240 modellerinin kanal simetri düzleminde hız dağılımları.

Şekil 4.22’de; K-20-10-240 modelinde kanal içindeki ortalama akış hızının 2.0 m/s ($Re=280$) ve K-32-10-240 modelinde de kanal içindeki ortalama akış hızının 3.2 m/s ($Re=450$) olması hedeflense de her iki modelin temiz hava kanalı simetri düzleminde akış hızının kanal en kesiti (x-ekseni) doğrultusunda da değiştiği (K-20-10-240 için ~1.7-4.0 m/s ve K-32-10-240 için ~2.9-5.0 m/s) görülmektedir. Bu durumun hem LID kanalına girişten hem de 1 mm genişliğindeki destek elemanlarının (farklı KGG’leri ve LID kanallarının yan duvarlarını oluşturan-Şekil 3.3) akış en-kesitini daraltmasından kaynaklandığı açıktır. Ayrıca üç-boyutlu hız dağılımın etkisi, z-ekseni doğrultusundaki ortalama akış hızının daha yüksek olduğu K-32-10-240 modelinde daha belirgindir. Kanal simetri düzlemindeki bu iki-boyutlu hız dağılımları, her ne kadar ortalama akış hızına göre LID kanallarındaki akış laminar kabul edilse de, sayısal çözümlerin türbülans modellemesi ile yapılmasının doğruluğunu da kanıtlamaktadır. Ayrıca LID kanalındaki ortalama akış hızlarının K-32-10-240 modelinde K-20-10-240 modeline göre daha yüksek olması nedeniyle, havanın LID kanalında kalma süresi de kısalmaktadır. Başka bir anlatımla, LID kanallarındaki akışta Re sayısını artırarak ısı taşınım katsayısını yükseltmek kadar havanın akış kanallarında kalma süresinin (çıkış sıcaklığının) azalması da dikkate alınmalıdır.



Şekil 4.23. K-20-10-240/K-32-10-240 modellerinin kanal simetri düzleminde sıcaklık dağılımları.



Şekil 4.24. K-20-10-240/K-32-10-240 modellerinin levha yüzeyinde sıcaklık dağılımları.

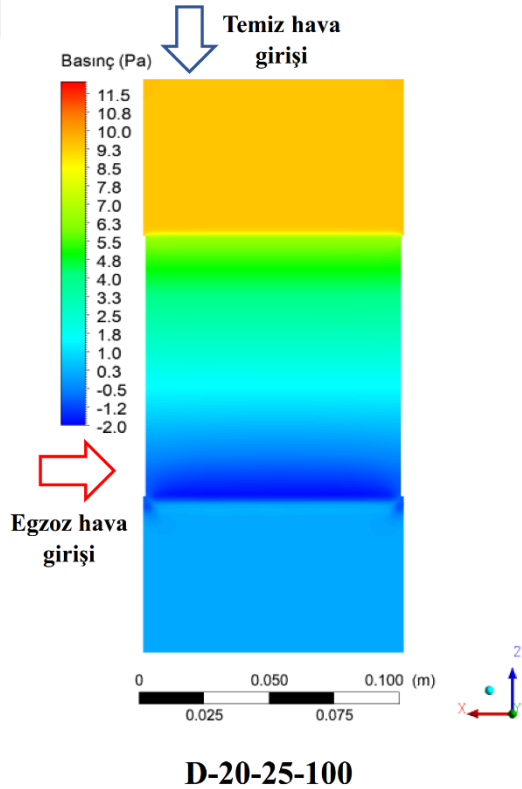
Şekil 4.23'te; K-20-10-240 modelinde kanal içindeki ortalama akış hızının ($u_z=2.0$ m/s ve $Re=280$) ve K-32-10-240 modelinde ($u_z=3.2$ m/s $Re=450$) temiz hava tarafında kanal simetri düzlemindeki sıcaklık dağılımları ve Şekil 4.24'te her iki LID modelinin levha yüzeyindeki sıcaklık dağılımları verilmiştir. Her iki şekildeki sıcaklık dağılımlarından çapraz akış etkisi ile egzoz havası kanalındaki sıcak akışkanın LID'ye

girdiği sol taraftan itibaren hem levha sıcaklığının hem de temiz hava kanalındaki sıcaklıkların çapraz doğrultuda değiştiği görülmektedir.

K-20-10-240 ($\Delta T_{t,g-\zeta}=11.62$ K) ve K-32-10-240 ($\Delta T_{t,g-\zeta}=11.92$ K) modellerinin temiz hava tarafında LID giriş-çıkışı arasındaki sıcaklık farkları oldukça yakındır. Ancak K-20-10-240 modelinde kanal simetri düzleminde hava sıcaklığının dağılımı K-32-10-240 modeline göre daha düzgündür. K-32-10-240 modeline kanal simetri düzleminde sıcaklık dağılımındaki düzensizliğin kanaldaki 3-boyutlu akış etkilerinden kaynaklandığı değerlendirilmektedir.

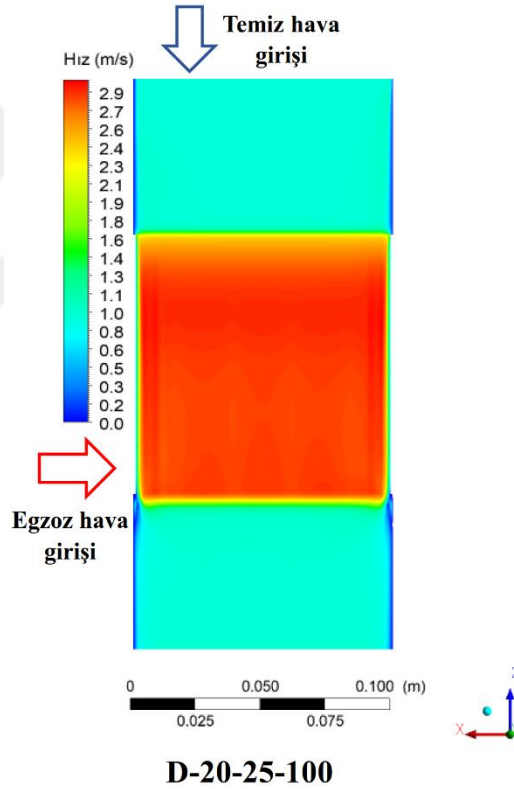
4.7.2. Toplam fan gücü- $P_{h,t+e}$ ve hidrodinamik-ısıl büyütme oranı-HIBO bakımından en uygun tasarımı LID modelleri

Şekil 4.25'e göre temiz hava tarafı basınç kayıplarının hem akış doğrultusunda hem de akışa dik doğrultuda dengeli dağılması akışın laminar karakterli olduğunu göstermektedir. Ancak LID kanalı girişindeki-çıkışındaki ani kesit daralması-genişlemesi ve kanalları oluşturan destek elemanlarının etkisi hem kanal girişinden önce hem de kanal çıkışından sonra yerel basınç dağılımlarını az da olsa etkilemiştir.

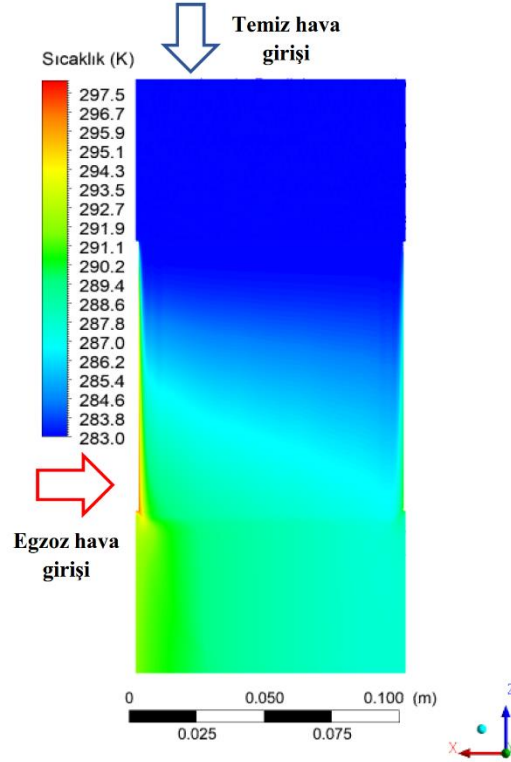


Şekil 4.25. D-20-25-100 modelinin kanal simetri düzleminde basınç dağılımı.

Şekil 4.26'daki hız dağılımında, yukarıda bahsedilen kesit daralmalarının kanal içerisindeki akışta oluşturduğu 3-boyutlu akış etkisi, K-20-10-240 ve K-32-10-240 modellerine göre D-20-25-100 modelinde ($u_z=2.0$ m/s ve $Re=686$) çok daha belirgindir. Özellikle akış doğrultusunda LID kanalının ortasına yaklaşıldıkça, 3-boyutlu akış etkisine bağlı olarak laminar akışta beklenen uniform hız dağılımı bozulmuştur. Ayrıca Şekil 4.27'de ve Şekil 4.28'de K-20-10-240 ve K-32-10-240 modellerinin hem kanal simetri düzleminde hem de levha yüzeyinde sıcaklık dağılımlarında görülen çapraz akış etkileri, D-20-25-100 modelinde levha yüzeyinde görülmüştür. Ancak kanal boyutlarının küçülmesi ve ortalama akış hızlarının düşüklüğü nedeniyle kanal simetri düzleminde sıcaklık dağılımındaki değişimler çok azdır.

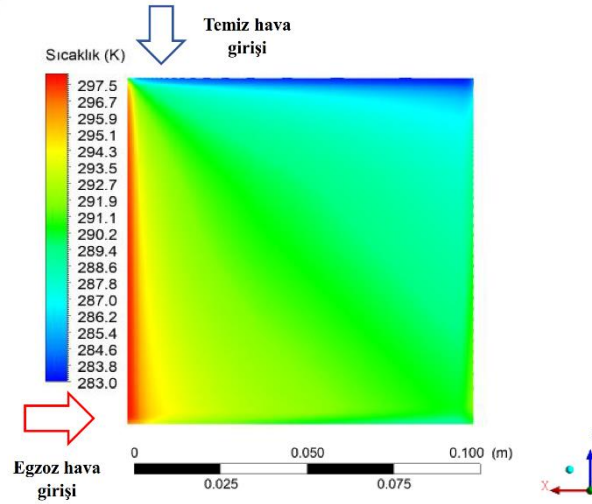


Şekil 4.26. D-20-25-100 modelinin kanal simetri düzleminde hız dağılımı.



D-20-25-100

Şekil 4.27. D-20-25-100 modelinin kanal simetri düzleminde sıcaklık dağılımı.



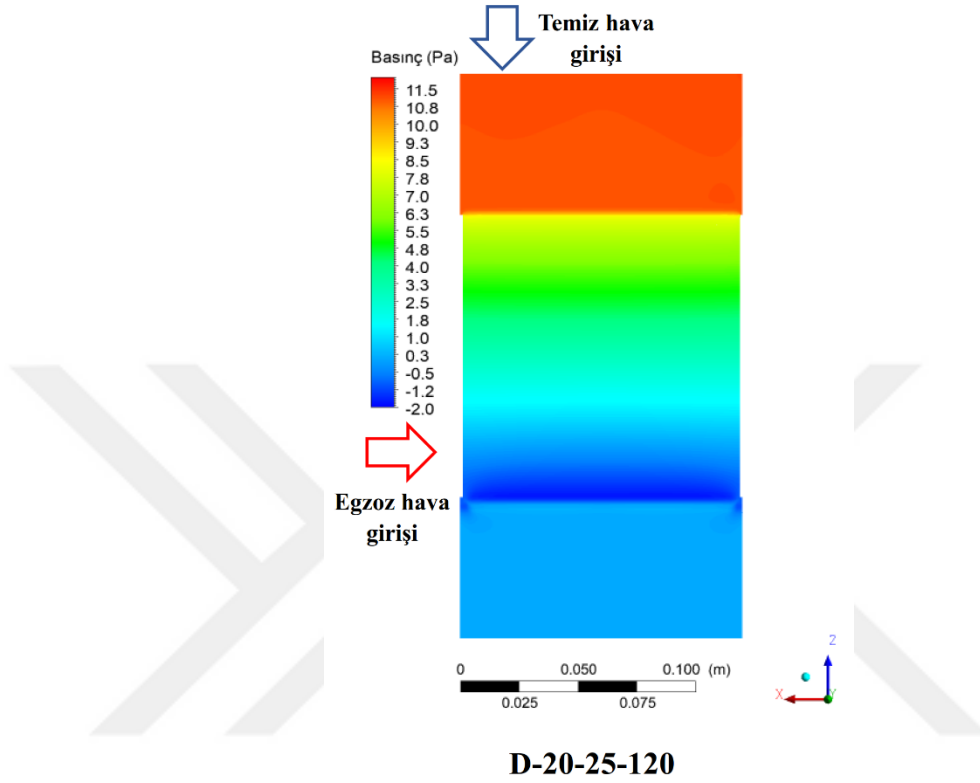
D-20-25-100

Şekil 4.28. D-20-25-100 modelinin levha yüzeyinde sıcaklık dağılımı.

4.7.3. Isıl etkenlik ve hidrodinamik-ısıl büyütme oranı- $\epsilon \times HIBO$ bakımından en uygun tasarımı LID modelleri

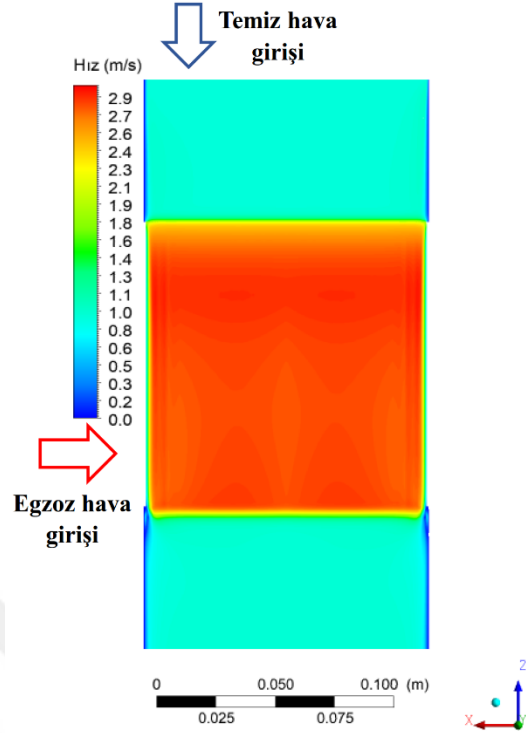
Şekil 4.29'a göre temiz hava tarafı basınç kayıplarının hem akış doğrultusunda hem de akışa dik doğrultuda dengeli dağılması diğer en uygun tasarımı LID modellerinde olduğu gibi akışın laminar karakterli olduğunu göstermektedir. Ancak LID kanalı

girişindeki-çıkışındaki ani kesit daralması-genişlemesi ve kanalları oluşturan destek elemanlarının etkisi hem kanal girişinden önce hem de kanal çıkışından sonra yerel basınç dağılımlarını az da olsa etkilemiştir. Bu etkiler D-20-25-100 modeline göre daha belirgindir.



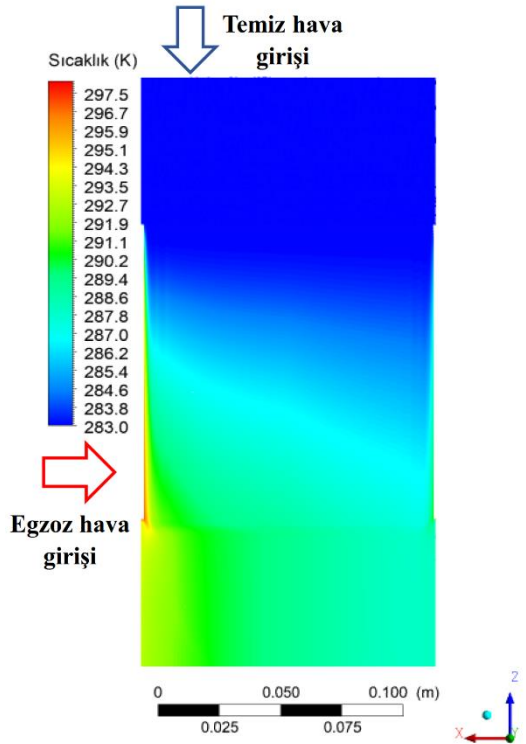
Şekil 4.29. D-20-25-120 modelinin kanal simetri düzleminde basınç dağılımı.

Şekil 4.30'daki hız dağılımında, daha önceki LID modellerinin (K-20-10-240 ve K-32-10-240) hız dağılımlarında görülen ve kesit daralmalarının LID kanalındaki akışta oluşturduğu 3-boyutlu akış etkisi, D-20-25-120 ($u_z=2.0$ m/s ve $Re=689$) modelinde de görülmektedir. Ancak bu etki D-20-25-100 modeline ($u_z=2.0$ m/s ve $Re=686$) göre daha azdır. Ayrıca levha boyutunun 100 mm'den 120 mm'ye arttırılması, akış kesitinin daralma etkisini azaltmıştır. D-20-25-100 modeline benzer şekilde, akış doğrultusunda LID kanalının ortasına doğru, 3-boyutlu akış etkisine bağlı olarak uniform hız dağılımı bozulmuştur. Ayrıca K-20-10-240, K-32-10-240 ve D-20-25-100 modellerinde olduğu gibi D-20-25-120 modelinin levha yüzeyinin sıcaklık dağılımında (Şekil 4.32) da çapraz akış etkileri görülmüştür. Ancak D-20-25-100 modelinde olduğu gibi kanal simetri düzlemi sıcaklık dağılımındaki (Şekil 4.31) değişimler de azdır.



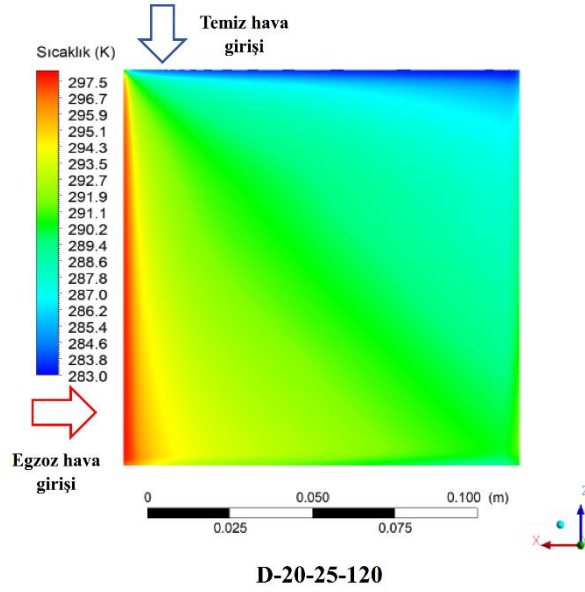
D-20-25-120

Şekil 4.30. D-20-25-120 modelinin kanal simetri düzleminde hız dağılımı.



D-20-25-120

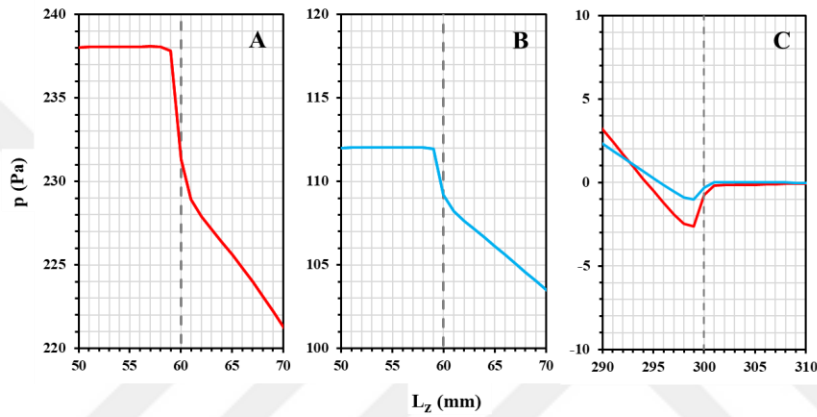
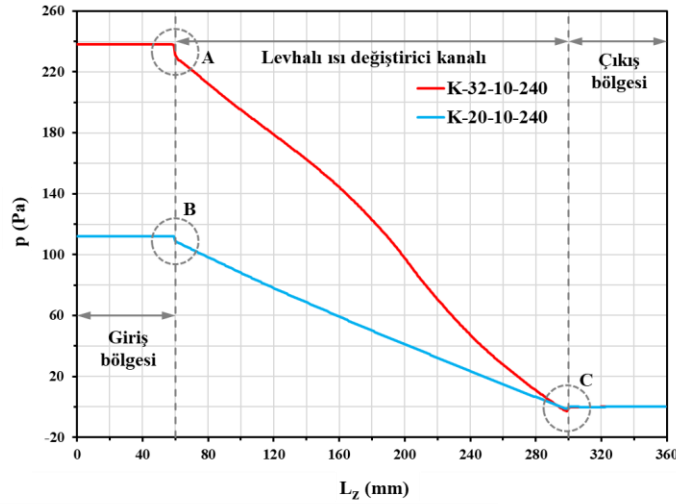
Şekil 4.31. D-20-25-120 modelinin kanal simetri düzleminde sıcaklık dağılımı.



Şekil 4.32. D-20-25-120 modelinin levha yüzeyinde sıcaklık dağılımı.

4.8. Kanal Simetri Düzleminde Kanal Orta Kesiti Boyunca Basınç ve Hız Profili Değişimleri

En uygun tasarımı LID modellerinin sayısal çözümleri sonucunda kanal simetri düzleminde, kanal orta kesiti boyunca elde edilen giriş ve çıkış etkilerinin dahil edildiği basınç değişimleri; Şekil 4.33'te, Şekil 4.34'te, Şekil 4.35'te ve kanal orta kesiti boyunca hız profillerinin değişimleri Şekil 4.36'da verilmiştir.



Şekil 4.33. K-20-10-240/K-32-10-240 modellerinin kanal simetri düzleminde kanal orta kesiti boyunca giriş ve çıkış etkilerinin dahil edildiği basınç değişimleri.

Şekil 4.33'te geri kazanılan ısı güç ve ısı etkenlik için en uygun tasarımlı ve geometrik özellikleri aynı (küt KGG, 1.0 mm h ve 240×240 mm L) olan LID'lerin farklı ortalama hava akış hızlarındaki (K-32-10-240 için 3.2 m/s ve K-20-10-240 için 2 m/s) basınç düşümleri çözüm bölgesi boyunca gösterilmiştir. Çözüm bölgesinin girişi 60 mm uzunluk ve 240 mm genişliğindedir. LID kanalı 240 mm genişlik ve 240 mm uzunluktadır. Çıkış bölgesi ise giriş bölgesinde olduğu gibi 60 mm uzunluk ve 240 mm genişliğindedir. Şekil 4.33'teki çözüm bölgesinde oluşan basınç düşümleri aşağıda değerlendirilmiştir.

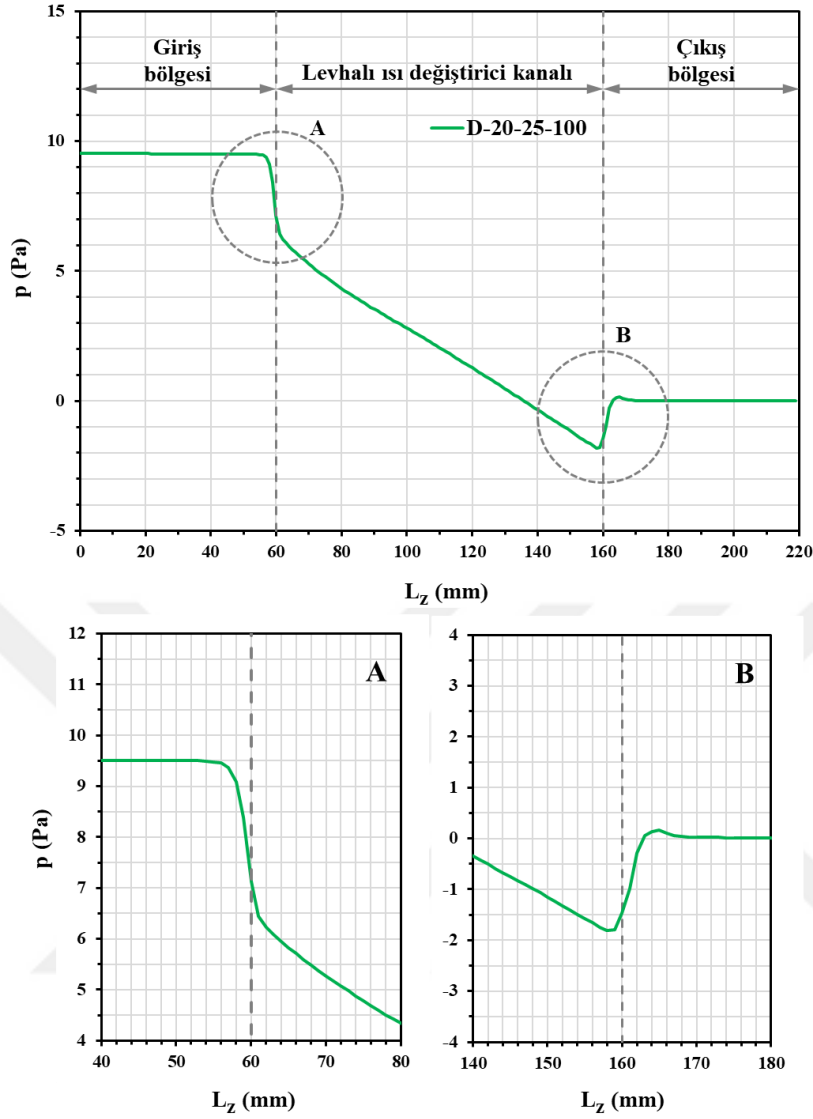
Giriş bölgesi: K-32-10-240 LID modelinin A bölgesinde yaklaşık 10 Pa'lık basınç düşümü olmuştur ve en uygun tasarımlı LID modelleri arasında en yüksektir. Buna karşılık K-20-10-240 LID modelinin B bölgesinde ise yaklaşık 4 Pa'lık basınç düşümü olmuştur.

LID kanalı girişlerinde ani kesit daralmasına bağlı olarak statik basınç, kinetik enerjiye ve yerel basınç kayıplarına dönüşmüştür.

LID kanalı: LID kanallarındaki basınç değişimi kanal boyunca doğrusaldır. Çünkü sürtünme katsayısı sabittir ve kanal boyunca statik basınç, kanal uzunluğuyla azalmaktadır. K-32-10-240 modelinde kanal ortasında statik basınçtaki yükselmenin, üç-boyutlu akış etkilerinden ve kanal en-kesitinde hız ve basınç dağılımının üniform olmamasından kaynaklandığı değerlendirilmektedir.

Çıkış bölgesi: Kanal giriş bölgesinde ani kesit daralmasından dolayı statik basınç kinetik enerjiye ve yerel basınç kayıplarına dönüşürken, kanal çıkışında ise kinetik enerji yeniden statik basınca dönüşmüştür. Ayrıca akış en-kesitinin genişlemesi nedeniyle yerel basınç kayıpları da oluşmaktadır.

Şekil 4.34'te LID'de akışın sağlanmasında gerekli toplam fan gücünü minimum ve HIBO'yu maksimum yapmak için en uygun tasarımı LID'de (D-20-25-100: dairesel KGG, 2.0 m/s u, 2.5 mm h ve 100×100 mm L) basınç düşümü çözüm bölgesi boyunca gösterilmiştir. Çözüm bölgesinin girişi 60 mm uzunluk ve 100 mm genişliğindedir. LID kanalı 100 mm genişlik ve 100 mm uzunluktadır. Çıkış bölgesi ise giriş bölgesinde olduğu gibi 60 mm uzunluk ve 100 mm genişliğindedir. Şekil 4.34'teki çözüm bölgesinde oluşan basınç düşümleri aşağıda değerlendirilmiştir.



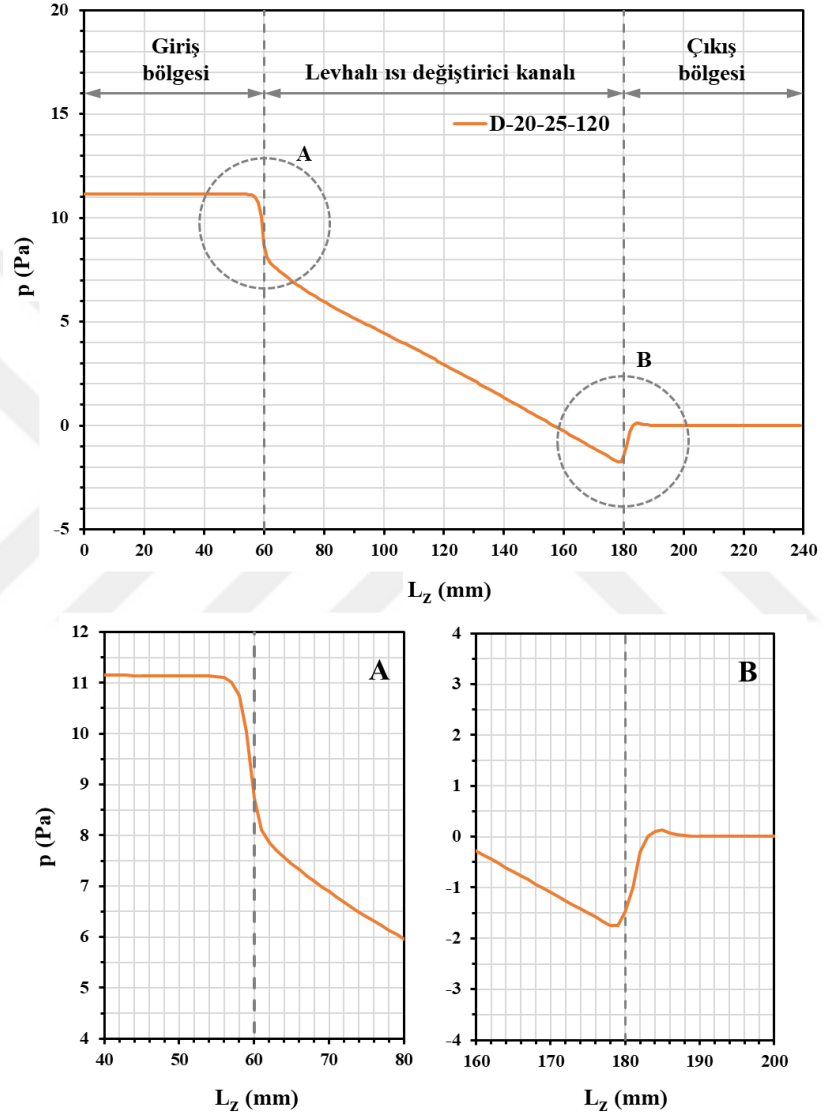
Şekil 4.34. D-20-25-100 modelinin kanal simetri düzleminde kanal orta kesiti boyunca giriş ve çıkış etkilerinin dahil edildiği basınç değişimi.

Giriş bölgesi: D-20-25-100 LID modelinin A bölgesinde yaklaşık 3.5 Pa’lık basınç düşümü oluşmuştur ve en uygun LID modelleri arasında en düşüktür. Bunun sebebi; LID modelinde ortalama hava akış hızının (2.0 m/s) en düşük, levha boyutunun (100×100 mm) en küçük, kanal yüksekliğinin (2.5 m/s) en büyük ve KGG’nin dairesel olmasıdır. LID kanalı girişlerinde ani kesit daralmasına bağlı olarak statik basınç, kinetik enerjiye ve yerel basınç kayıplarına dönüşmüştür.

LID kanalı: LID kanalında basınç değişimi doğrusaldır. Çünkü sürtünme katsayısı sabittir ve kanal boyunca statik basınç, kanal uzunluğuyla azalmaktadır.

Çıkış bölgesi: Kanal çıkışında akış kesitinin genişlemesi nedeniyle kanaldaki kinetik enerji, statik basınca ve yerel basınç kaybına dönüşmüştür.

Şekil 4.35'te $\epsilon \times \text{HIBO}$ 'yu maksimum yapmak için en uygun tasarımı LID'nin (D-20-25-120: dairesel KGG, 2.0 m/s u, 2.5 mm h ve 120×120 mm L) basınç düşümü çözüm bölgesi boyunca gösterilmiştir. Çözüm bölgesinin girişi 60 mm uzunluk ve 120 mm genişliğindedir. LID kanalı 120 mm genişlik ve 120 mm uzunluktadır. Çıkış bölgesi ise giriş bölgesinde olduğu gibi 60 mm uzunluk ve 120 mm genişliğindedir. Şekil 4.35'te çözüm bölgesinde oluşan basınç düşümleri aşağıda değerlendirilmiştir.



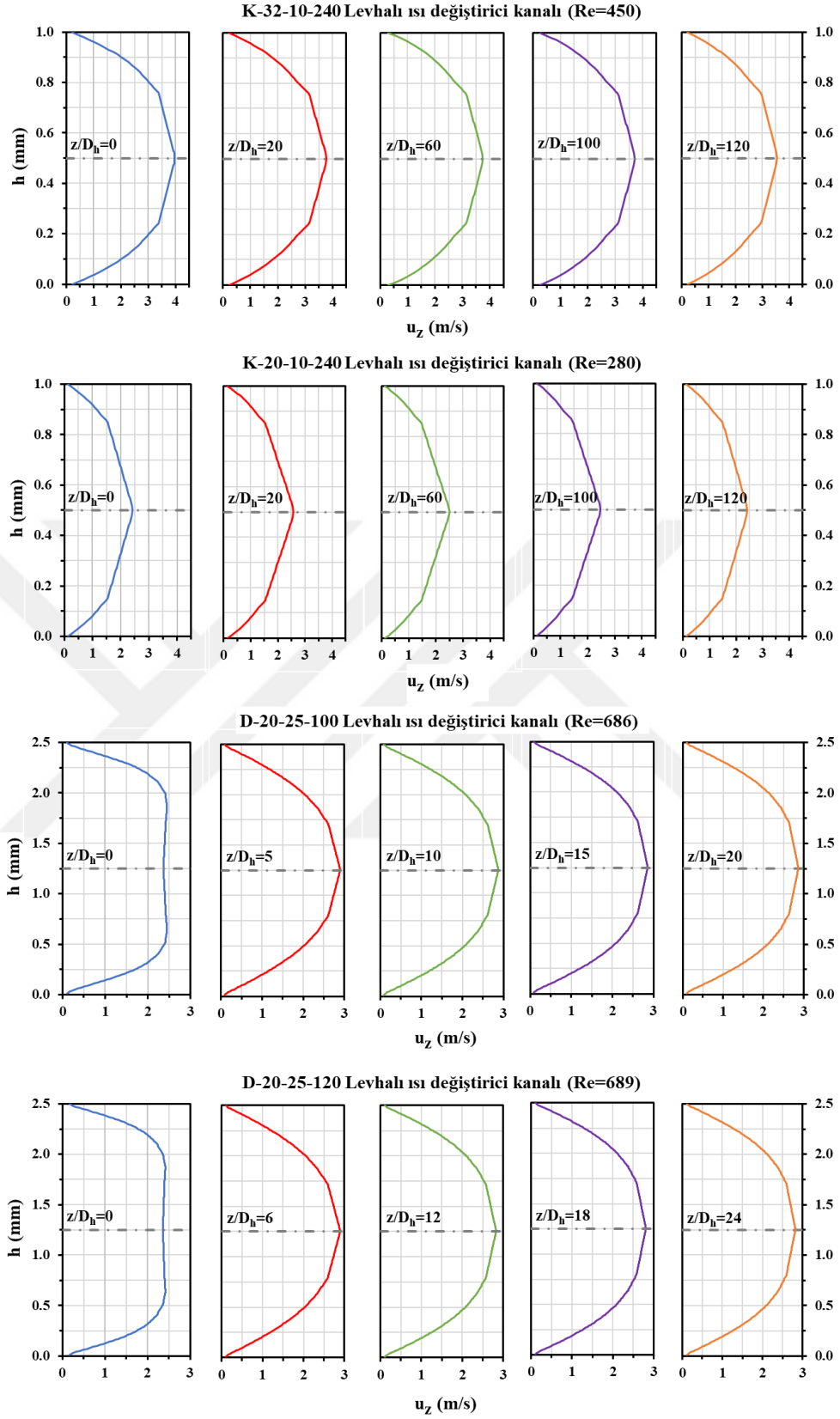
Şekil 4.35. D-20-25-120 modelinin kanal simetri düzleminde kanal orta kesiti boyunca giriş ve çıkış etkilerinin dahil edildiği basınç değişimi.

Giriş bölgesi: D-20-25-120 LID modelinin A bölgesinde yaklaşık 4 Pa'lık basınç düşümü oluşmuştur. Ayrıca A bölgesinde ani kesit daralmasından dolayı statik basınç, kinetik enerjiye ve yerel basınç kayıplarına dönüşmektedir.

LID kanalı: LID kanalında basınç değişimi diğer en uygun tasarımı modellerde olduğu gibi doğrusaldır. Çünkü sürtünme katsayısı sabittir ve kanal boyunca statik basınç, kanal uzunluğuyla azalmaktadır.

Çıkış bölgesi: Diğer en uygun tasarımı modellerde olduğu gibi kanal çıkışında akış en-kesitinin genişlemesi nedeniyle kanaldaki kinetik enerji, statik basınca ve yerel basınç kaybına dönüşmüştür.





şekil 4.36. En uygun tasarımı LID modellerinin x-z düzleminde, kanal orta eksenı boyunca, y-z düzlemindeki farklı en-kesitlerde hız profillerinin değişimleri.

Şekil 4.36'da en uygun tasarımlı LID modellerinin x-simetri düzleminde akış doğrultusunda y-z düzlemindeki farklı z/D_h en-kesitlerinde hız profillerinin değişimleri karşılaştırılmış ve değerlendirilmiştir.

K-32-10-240 kodlu LID'de ($Re=450$); kanal girişinde hız profili düzensizdir, ancak $z/D_h=60$ 'dan sonra hız profili daha düzenli hale gelmektedir. Ayrıca y-simetri düzlemine göre hız profili simetriktr. Kanal çıkışına yaklaşıldıkça, çıkış etkilerinin de görülmesine rağmen, hız profili parabolige yakındır.

En düşük Re sayılı K-20-10-240 kodlu LID'de ($Re=259$); gelişmekte olan akış etkisinden dolayı $z/D_h=100$ 'de dahi hız profili parabolik değildir. Kanal çıkış kesitinde de parabolik hız profili görülmemektedir.

D-20-25-100 kodlu LID'de ($Re=686$); K-32-10-240 ve K-20-10-240 modellerine göre daha yüksek Re sayılarındaki akış daha hızlı/erken gelişmiştir. $z/D_h=10$ 'da hız profilinin tam olarak geliştiği görülmektedir. Girişte daha düzensiz hız profili görülse de, çıkış etkilerine rağmen diğer LID modellerin aksine çıkış kesitinde parabolik hız profil görülmüştür.

D-20-25-120 LID'de ($Re=689$); D-20-25-100 LID modelinde olduğu gibi yüksek Re sayısı nedeniyle girişte hız profili düzensizdir. Akış $z/D_h=12$ 'ye ulaştığında hız profili oturmuş ve parabolik hız profili görülmüştür. D-20-25-100 LID modelinde olduğu gibi çıkış kesitinde hız profili paraboliktir.

En uygun tasarımlı LID modelleri karşılaştırıldığında; daha yüksek Re sayılı LID modellerinde akışın daha erken geliştiği, düşük Re sayılı modellerde ise akışın kanal boyunca tam olarak gelişemediği gözlemlenmiştir. Küt ve dairesel KGG'li modellerde farklı hız profilleri görülmüştür. Küt KGG'li modellerde akış kanalları dairesel KGG'li modellere göre daha uzundur ve Re sayısı daha düşüktür. Bu nedenle dairesel KGG'li LID kanallarında hız profili daha erken gelişirken, küt KGG'li modellerde hız profilinin gelişmesi gecikmektedir. Dolayısıyla KGG'nin ve Re sayısının laminar akışın gelişmesinde önemli olduğu görülmüştür. Çıkış kesitindeki hız profillerinde de aynı/benzer etkiler görülmektedir.

Sonuç olarak yüksek Re sayılı modellerde laminar akış daha erken gelişerek parabolik hız profili oluşmuş ve kanal çıkışlarında da bu hız profili görülmektedir. KGG ve Re sayısı akışın LID kanalında tam olarak gelişmesinde etkilidir. Düşük Re sayılı modellerde, akış daha uzun mesafelerde geliştiğinden, kanal çıkışında dahi parabolik

hız profili görülmemektedir. En uygun tasarımlı LID modellerinde hız profili bakımından yapılan değerlendirmelere göre Re sayısının ve KGG'nin önemi büyüktür. Dolayısıyla hız profili ile ilgili yapılan bu değerlendirmeyi, $\epsilon \times \text{HIBO}$ performans parametresine (D-20-25-120) göre yapılan Taguchi analizi ile elde edilen ANOM ve ANOVA sonuçları (kanaldaki ortalama akış hızı en önemli tasarım parametresi) da doğrulamaktadır.





5. HAD SONUÇLARININ ε -NTU YÖNTEMİ İLE KARŞILAŞTIRILMASI

Taguchi L_{16} OD'ye göre tasarlanan 16 LID modeli ile yapılan HAD analizlerinden temiz hava ve egzoz havası taraflarındaki basınç ve sıcaklık farkları elde edilmektedir. ANSYS/Fluent yazılımı kullanılarak elde edilen bu sonuçlarla, çalışmada seçilen ısı ve hidrodinamik performans parametreleri hesaplanmıştır. Performans parametrelerine göre yapılan Taguchi-ANOM analizleri ile en iyi performansı vermesi beklenen, en uygun geometrik tasarımlı üç farklı LID modeli oluşturulmuştur. Tasarlanan bu LID modellerinin parametrik HAD analizleri de yapılarak basınç ve sıcaklık farkı sonuçları elde edilmiştir. HAD ile elde edilen etkenlikler, ε -NTU yöntemi ile hesaplanan etkenliklerle karşılaştırılmıştır.

5.1. ε -NTU Yöntemi

ANSYS/Fluent yazılımı ile elde edilen HAD sonuçlarının doğruluğu; literatürden probleme uygun seçilen analitik Nu bağıntısı ve Etkenlik-Transfer Birim Sayısı (ε -NTU) yöntemi kullanarak araştırılmıştır. Çapraz akış düzenlemesi ile tasarlanan LID modellerinin; boyutları, ısı geçişi yüzey alanları, temiz havanın ve egzoz havasının LID'ye giriş hızları ve sıcaklıkları ile LID kanallarındaki ortalama akış hızları bilinmektedir. Ancak temiz havanın ve egzoz havasının LID'den çıkış sıcaklıkları bilinmediğinden, duyulur ısı etkenliklerin hesabında ε -NTU yöntemi kullanılmıştır [30]. ε -NTU yöntemiyle yapılan teorik hesaplamalarda, LID modellerinin sayısal çözümlerinde olduğu gibi temiz havanın ve egzoz havasının termofiziksel özellikleri çözüm bölgesine giriş sıcaklıklarında (temiz hava-283 K ve egzoz havası-298 K) sabit kabul edilmiştir.

Taguchi L_{16} OD'ye göre tasarlanan 16 LID modelinde, temiz hava ve egzoz havası kanallarındaki ortalama hava akış hızları, akışın laminar olması gözetilerek ve dengelenmiş havalandırmaya uygun belirlenmiştir. Bu nedenle tam gelişmiş laminar iç akışlar için analitik çözümlerle elde edilen sabit ısı akısı ve sabit yüzey sıcaklığı için Nu sayıları, denklem 5.1'de ve denklem 5.2'de verilmiştir.

Isı geçişi yüzeyinde sabit ısı akısı (q_y =sabit) kabulüyle [21];

$$Nu = \frac{hD_h}{k} = 4.36 \quad (5.1)$$

Isı geçişi yüzeyinin sabit sıcaklık ($T_y=\text{sabit}$) kabulüyle [21];

$$Nu = \frac{hD_h}{k} = 3.66 \quad (5.2)$$

Burada Nu (-) Nusselt sayısı, h (W/m^2K) ısı taşınım katsayısı, D_h (m) hidrolik çap ve k (W/m^2K) akışkanın ısı iletim katsayısıdır.

Taguchi L_{16} OD'ye göre tasarlanan çapraz akışlı 16 LID modelinin tamımında, Tablo 3.3.'te verilen L/h (en büyük 240) ve L/D_h (en büyük 121) oranları, laminar akışın ısı ($L_t=0.05RePrD_h$) ve hidrodinamik ($L_h=0.05ReD_h$) bakımdan gelişmesi için yeterli değildir [31]. Yani LID'lerdeki temiz hava ve egzoz havası kanalları tam gelişmiş laminar akış kabulünün uygulanabilmesi için kısa kanallardır. Başka bir ifadeyle; çalışılan Re ve Pr sayılarında bu kanallardaki akışlar, hem ısı hem de hidrodinamik bakımdan gelişmekte olan akış koşullarındadır. Bu nedenle LID kanallarındaki gelişmekte olan laminar akışlar için Nu sayılarının hesabında, iki levha arasında ısı ve hidrodinamik bakımdan gelişmekte olan laminar akış için Stephan'ın önerdiği aşığıdaki analitik ortalama Nu bağıntısı kullanılmıştır [32].

$$Nu = 7.55 + \frac{0.024x_*^{-1.14}}{1 + 0.0358 Pr^{0.17} x_*^{-0.64}} \quad (5.3)$$

$$x_* = \frac{L/D_h}{RePr} \quad (5.4)$$

Burada, x_* , boyutsuz uzunluk (-); L (m) akış doğırtusundaki kanal uzunluğu ve D_h (m) hidrolik aptır.

ϵ -NTU yöntemine göre duyulur ısı etkenlikler sırasıyla aşığıdaki denklemler kullanılarak elde edilmiştir.

Temiz hava ve egzoz havası akımlarının ısı kapasiteleri ve ısı kapasite oranı [21]:

$$C_{SIC.} = \dot{m}_{SIC.} c_{p,SIC.}, \quad C_{Soğ.} = \dot{m}_{Soğ.} c_{p,Soğ.}, \quad C^* = C_{min}/C_{mak} \quad (5.5)$$

Burada, C_{sic} (kW/K) sıcak akışkanın ısı kapasitesi, $\dot{m}_{sic}$ (kg/s) sıcak havanın kütleli debisi, $c_{p,sic}$ (kJ/kgK) sıcak akışkanın özgül ısı, $C_{soğ}$ (kW/K) soğuk akışkanın ısı kapasitesi, $\dot{m}_{soğ}$ (kg/s) soğuk havanın kütleli debisi, $c_{p,soğ}$ (kJ/kgK) soğuk akışkan özgül ısıdır. C^* (-) ise ısı kapasitelerin oranı, C_{min} (W/K) küçük ısı kapasite, C_{mak} (W/K) büyük ısı kapasitedir. Toplam ısı geçiş katsayısı (U) ve transfer birimi sayısı (Number of Transfer Units-NTU):

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_t} + \frac{1}{h_e} + \frac{t}{k} \quad (5.6)$$

$$NTU = \frac{UA_s}{C_{min}} \quad (5.7)$$

Burada, U (W/m²K) toplam ısı geçiş katsayısı, A_s (m²) ısı değiştiricinin toplam ısı geçişi yüzeyinin alanı, h_t (W/m²K) temiz hava kanalındaki ortalama ısı taşınım katsayısı, h_e (W/m²K) egzoz hava kanalındaki ortalama ısı taşınım katsayısı, t (m) levha kalınlığı ve k (W/mK) levha malzemesinin ısı iletim katsayısıdır.

ϵ -NTU yönteminde; ısı değiştirici akış kanallarındaki (girişten çıkışa doğru) sıcak ve soğuk akışkanların kendi içinde karışıp karışmamasına göre iki farklı duyulur ısıl etkenlik tanım bağıntısı önerilmektedir. Çapraz akışlı bir ısı değiştiricide eğer sıcak ve soğuk akışkanlar kendi içerisinde karışmıyorsa duyulur ısıl etkenlik [21];

$$\epsilon = 1 - \exp((\exp(-NTU^{0.78}C^*) - 1)NTU^{0.22}/C^*) \quad (5.8)$$

Çapraz akışlı bir ısı değiştiricide eğer sıcak ve soğuk akışkanlar kendi içerisinde karışmıyorsa duyulur ısıl etkenlik [33] ;

$$\epsilon = \frac{1}{\frac{1}{1 - \exp(-NTU)} + \frac{C^*}{1 - \exp(-NTU C^*)} - \frac{1}{NTU}} \quad (5.9)$$

Burada, ϵ (-) duyulur ısıl etkenliktir.

Isıl ve hidrodinamik bakımdan gelişmekte olan laminar akışlar için Tablo 5.1'deki. ve Tablo 5.2.'deki sonuçlara göre her iki taraftaki akışkanın kendi içerisinde karışmadığı çapraz akış düzenlemesi için Stephan bağıntısından hesaplanan etkenlikler (ϵ_{Steph}), HAD sonuçları ile hesaplanan etkenliklerle (ϵ_{HAD}) uyumludur. Başka bir ifadeyle,

denklem (5.9)'dan her iki akışkanın kendi içerisinde karıştığı durumda, sabit yüzey sıcaklığı ve sabit ısı akısı Nu sayıları ile hesaplanan etkenlikler, HAD sonuçlarıyla hesaplanan etkenliklerle uyumlu değildir. Bu karşılaştırmalı değerlendirme, ısı geri kazanımlı havalandırmada kullanılan çapraz akışlı LID'lerin, kısa akış kanallarında ısı ve hidrodinamik bakımdan gelişmekte olan akışların çözümlemesinde HAD'in kullanılmasının uygunluğunu göstermektedir. Ayrıca duyulur ısı etkenliklerle yapılan bu değerlendirme, HAD sonuçlarının analitik çözümlerle elde edilen bağıntılarla uyumunu da göstermiştir.

Tablo 5.1. HAD ve analitik yöntemlerle hesaplanan duyulur ısı etkenliklerinin karşılaştırılması.

		İki akışkan karışmıyor					İki akışkan karışıyor							
MN	Model Kodu	ϵ_{HAD} (-)	$\epsilon_{sbt,ys}$ (-)	$\epsilon_{sbt,ia}$ (-)	ϵ_{steph} (-)	$\Delta\epsilon_{sbt,ys}$ (%)	$\Delta\epsilon_{sbt,ia}$ (%)	$\Delta\epsilon_{Steph}$ (%)	$\epsilon_{sbt,ys}$ (-)	$\epsilon_{sbt,ia}$ (-)	ϵ_{steph} (-)	$\Delta\epsilon_{sbt,ys}$ (%)	$\Delta\epsilon_{sbt,ia}$ (%)	$\Delta\epsilon_{Steph}$ (%)
1	K-20-10-100	0.6866	0.6093	0.6416	0.7256	12.2	6.6	-5.8	0.5564	0.5690	0.5771	22.9	20.2	18.5
2	K-24-15-120	0.6001	0.4322	0.4714	0.5943	34.3	23.1	-2.4	0.4329	0.4659	0.5492	34.0	24.5	5.7
3	K-28-20-190	0.5731	0.3738	0.4126	0.5433	53.3	38.9	5.5	0.3801	0.4156	0.5191	50.8	37.9	10.4
4	K-32-25-240	0.5529	0.3009	0.3369	0.4708	83.7	64.1	17.4	0.3097	0.3450	0.4653	78.5	60.3	18.8
5	U-20-15-190	0.6782	0.5798	0.6147	0.7083	17.0	10.3	-4.2	0.5414	0.5588	0.5788	25.3	21.4	17.2
6	U-24-10-240	0.7781	0.7286	0.7495	0.8005	6.8	3.8	-2.8	0.5766	0.5717	0.5511	34.9	36.1	41.2
7	U-28-25-100	0.3531	0.1708	0.1958	0.3132	106.8	80.3	12.7	0.1770	0.2029	0.3219	99.6	74.0	9.7
8	U-32-20-120	0.4497	0.2502	0.2826	0.4120	79.7	59.2	9.2	0.2588	0.2915	0.4151	73.8	54.3	8.4
9	D-20-20-240	0.6580	0.5061	0.5447	0.6565	30.0	20.8	0.2	0.4929	0.5200	0.5732	33.5	26.5	14.8
10	D-24-25-190	0.5234	0.3116	0.3481	0.4820	68.0	50.4	8.6	0.3202	0.3557	0.4743	63.4	47.1	10.3
11	D-28-10-120	0.6976	0.5780	0.6124	0.7044	16.8	10.2	-4.2	0.5404	0.5578	0.5789	24.9	21.0	16.6
12	D-32-15-100	0.5375	0.3258	0.3625	0.4930	55.4	39.7	2.7	0.3342	0.3694	0.4830	51.5	37.1	4.8
13	C-20-25-120	0.4372	0.2555	0.2885	0.4195	71.1	51.6	4.2	0.2642	0.2973	0.4217	65.5	47.0	3.7
14	C-24-20-100	0.4605	0.2693	0.3030	0.4338	66.8	48.2	3.5	0.2781	0.3118	0.4342	61.5	44.0	3.4
15	C-28-15-240	0.6930	0.5581	0.5942	0.6932	24.2	16.6	0.0	0.5286	0.5491	0.5788	31.1	26.2	19.7
16	C-32-10-190	0.7362	0.6448	0.6743	0.7487	14.2	9.2	-1.7	0.5700	0.5768	0.5719	29.2	27.6	28.7

Tablo 5.2. En uygun tasarımı LID'lerin HAD ve analitik yöntemlerle hesaplanan duyulur ısı etkenliklerinin karşılaştırılması.

Model Kodu	İki akışkan karışmıyor						İki akışkan karışıyor						
	ε_{HAD} (-)	$\varepsilon_{sbt,ys}$ (-)	$\varepsilon_{sbt,ia}$ (-)	ε_{steph} (-)	$\Delta\varepsilon_{sbt,ys}$ (%)	$\Delta\varepsilon_{sbt,ia}$ (%)	$\Delta\varepsilon_{Steph}$ (%)	$\varepsilon_{sbt,ys}$ (-)	$\varepsilon_{sbt,ia}$ (-)	ε_{steph} (-)	$\Delta\varepsilon_{sbt,ys}$ (%)	$\Delta\varepsilon_{sbt,ia}$ (%)	$\Delta\varepsilon_{Steph}$ (%)
K-20-10-240	0.7940	0.7515	0.7698	0.8150	5.7	3.1	-2.6	0.5711	0.5646	0.5446	39.0	40.6	45.8
K-32-10-240	0.7740	0.6860	0.7116	0.7744	12.8	8.8	0.0	0.5783	0.5786	0.5627	33.8	33.8	37.5
D-20-25-100	0.3980	0.2226	0.2528	0.3798	78.8	57.5	4.8	0.2305	0.2614	0.3857	72.7	52.3	3.2
D-20-25-120	0.4380	0.2555	0.2885	0.4195	71.4	51.8	4.4	0.2642	0.2973	0.2747	65.8	47.3	59.4

6. DEĞERLENDİRME

Bu çalışmada, 1-4 kişilik kapalı ortamların havalandırılmasında ve iç hava kalitesinin sürdürülmesinde kullanılan iklimlendirme sistemlerinde, ısı kazanımı sağlayacak, küçük kapasiteli ($50\text{-}200\text{ m}^3/\text{h}$), havadan havaya, çapraz akışlı ve kübik LID'lerin tasarlanması hedeflenmiştir. Enerji etkin LID'lerin tasarım ve işletme parametrelerindeki değişimin, seçilen hedef performans parametrelerine etkileri, Taguchi deney tasarımı yöntemi ve HAD kullanılarak incelenmiştir.

LID'nin performansına etkili tasarım parametreleri olarak; kanal giriş geometrisi-KGG, kanal yüksekliği-h ve levha boyutu-L, işletme parametresi olarak da LID kanalındaki ortalama hava akış hızı-u seçilmiştir. Tasarım parametresi KGG için belirlenen alt seviyeler; küt-K, üçgen-U, dairesel-D ve çan ağzı-C (bell mouth)'dir. LID geometrik tasarım parametrelerinden kanal yüksekliğinin alt seviyeleri literatüre uygun olarak; 1.0 mm, 1.5 mm, 2.0 mm ve 2.5 mm seçilmiştir. LID'e girişte ve çıkışta oluşan basınç kayıplarının olabildiğince düşük tutulması ve kanal bağlantılarının kolaylığı bakımından LID'nin 3-boyutlu tasarımında kübik yapı (LID modellerinin yükseklikleri yaklaşık olarak levha boyutlarına eşit) tercih edilmiştir. Seçilen debi aralığında, kübik tasarımlı LID yapısı ve literatür dikkate alınarak levha boyutu için alt seviyeler; $100\times 100\text{ mm}$, $120\times 120\text{ mm}$, $190\times 190\text{ mm}$ ve $240\times 240\text{ mm}$ olarak belirlenmiştir. $50\text{-}200\text{ m}^3/\text{h}$ debi aralığında, hesaplanan Re sayılarında LID kanallarındaki akışın laminar koşullarda kalması gözetilerek, ön hesaplamalar yapılmıştır. Bu hesaplamalara göre tasarımda dikkate alınan tek işletme parametresi olan ortalama hava akış hızının alt seviyeleri; 2.0 m/s, 2.4 m/s, 2.8 m/s ve 3.2 m/s belirlenmiştir.

LID'lerin Taguchi yöntemine göre yapılan deney tasarımında, dörder alt seviyeli dört parametre için önerilen L_{16} (4^4) OD kullanılmıştır. L_{16} OD'ye göre tasarlanan 16 LID modeli ile yapılan HAD çözümlerinin sonuçları (sıcaklık farkları ve basınç farkları) ile seçilen hedef performans parametreleri hesaplanmıştır.

LID'lerin tasarımında dikkate alınan hedef performans parametreleri; temiz hava tarafında geri kazanılan ısı güç- Q_{gk} , duyulur ısıl etkenlik- ϵ , akışın sağlanması için

gerekli toplam fan gücü- $P_{h,t+e}$, hidrodinamik-ısıl büyütme oranı-HIBO ve $\varepsilon \times \text{HIBO}$ 'dur.

LID'lerin hedef performans parametrelerinden temiz hava tarafında geri kazanılan ısıl gücün- Q_{gk} , duyulur ısıl etkenliğin- ε , HIBO'nun ve $\varepsilon \times \text{HIBO}$ 'nun yüksek olması için "en büyük en iyi" kategorisinde yapılan Taguchi analizleri ile SGO'lar hesaplanmıştır. Ayrıca LID'lerde akışın sağlanmasında gerekli toplam fan gücünün- $P_{h,t+e}$ 'nin küçük olması için "en küçük en iyi" kategorisinde yapılan Taguchi analizi ile SGO'lar da hesaplanmıştır. Hesaplanan SGO'larla ANOM ve ANOVA analizleri yapılmıştır. Hedef performans parametresine göre seçilen LID tasarım parametrelerinin en uygun alt seviyeleri ve etki dereceleri (önem sıralaması) ANOM analizi ile belirlenmiştir. Benzer şekilde ANOVA analizi ile de tasarım parametrelerinin hedef performans parametresine yüzde etkileri hesaplanmıştır.

L₁₆ OD'ye göre tasarlanan 16 LID modeli arasında, hedef performans parametreleri için belirlenen en uygun LID tasarım parametre alt seviye kombinasyonlarının bulunmadığı görülmüştür. Bu nedenle seçilen hedef performans parametrelerine göre en uygun tasarım/işletme parametrelili LID modelleri tasarlanmıştır. Bu yeni LID modelleri ile farklı debilerde gerçekleştirilen HAD analizleri ile çalışmanın başlangıcında konulan hedeflere ulaşıp ulaşılamadığı değerlendirilmiştir. Ayrıca en uygun tasarımlı LID modellerinin temiz hava tarafında; akış doğrultusundaki basınç, hız, sıcaklık ve levha sıcaklıklarının dağılımları ile en uygun ortalama hava akış hızında kanal boyunca basıncın ve hız profillerinin değişimleri elde edilmiştir. Bunun yanı sıra tasarlanan tüm LID modellerinin HAD analizleri ile elde edilen ısıl performans sonuçları, ısı değiştiriciler için bilinen analitik/ampirik bağıntılar (Nu , Re , Pr) ve ısı değiştirici tasarım yöntemleri (ε -NTU) ile doğrulanmıştır. Çalışmada ulaşılan önemli sonuçlar aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

- LID tasarımında temiz hava tarafında geri kazanılan ısıl güç- Q_{gk} performans parametresini maksimum yapan en uygun alt seviyeler; ANOM'a göre KGG-küt, u -3.2 m/s, h -1.0 mm, L -240×240mm (K-32-10-240) olarak belirlenmiştir. ANOM'a ve ANOVA'ya göre bu seviyelerin önem sırası ve etki dereceleri; levha boyutu (%92.85), ortalama hava akış hızı (%3.61), kanal yüksekliği (%1.92) ve KGG (%1.61)'dir. Bu durumda sağlanabilecek temiz hava debisi 276 m³/h'dir ve hedeflenen maksimum debiden (200 m³/h) %38 daha fazladır.

HAD analizi sonuçlarına göre (temiz hava tarafı çıkış sıcaklığı 294.62 K=21.62°C ve giriş-çıkış sıcaklık farkı 11.62 K) geri kazanılacak ısı güç 1119.54 W hesaplanmıştır. Bu modelin duyulur ısı etkenliği- ϵ %77.47, akışın sağlanması için gerekli toplam fan gücü fan gücü- $P_{h,t+e}$ 36.29W, HIBO 30.85, $\epsilon \times \text{HIBO}$ 23.90 ve LID'ye girişteki ve çıkıştaki yerel basınç kayıpları dahil (çözüm bölgesinin tamamında) toplam basınç kayıpları temiz hava tarafı ve egzoz havası tarafı için sırasıyla, 238.8 Pa ve 233.7 Pa'dır.

- LID tasarımında duyulur ısı etkenlik- ϵ performans parametresini maksimum yapan en uygun alt seviyeler; ANOM'a göre KGG-küt, u-2.0 m/s, h-1.0 mm, L-240×240 mm (K-20-10-240) olarak belirlenmiştir. ANOM'a ve ANOVA'ya göre bu seviyelerin önem sırası ve etki dereceleri; kanal yüksekliği (%62.31), levha boyutu (%33.64), ortalama hava akış hızı (%2.71) ve KGG (%1.09)'dir. Bu durumda sağlanabilecek temiz hava debisi 173 m³/h'dir ve hedeflenen debi (50-200 m³/h) aralığındadır. HAD analizi sonuçlarına göre (temiz hava tarafı çıkış sıcaklığı 294.92 K=21.92°C ve giriş-çıkış sıcaklık farkı 11.92 K) geri kazanılacak ısı güç 717.73 W ve duyulur ısı etkenlik %79.47 hesaplanmıştır. Gerekli toplam fan gücü 10.67 W, HIBO 67.3, $\epsilon \times \text{HIBO}$ 53.48 ve LID'e girişteki ve çıkıştaki yerel basınç kayıpları dahil toplam basınç kayıpları temiz hava tarafı ve egzoz havası tarafı için sırasıyla, 111.4 Pa ve 111.0 Pa'dır.
- LID tasarımında gerekli fan gücünü- $P_{h,t+e}$ minimum yapan ve Hidrodinamik-Isıl Büyütme Oranı-HIBO performans parametresini maksimum yapan en uygun alt seviyeler; ANOM'a göre KGG-daire, u-2.0 m/s, h-2.5 mm, L-100×100 mm (D-20-25-100) olarak belirlenmiştir. Bu performans parametrelerinin önem sıralaması ANOMA'a göre aynıdır. ANOVA'ya göre gerekli fan gücünde- $P_{h,t+e}$ etki dereceleri; levha boyutu (%49.73), kanal yüksekliği (% 25.26), KGG (%11.99) ve ortalama hava akış hızı (%10.56) iken, HIBO'da etki dereceleri ise ; kanal yüksekliği (%48.41), ortalama hava akış hızı (%28.91), levha boyutu (%16.54) ve KGG (%4.94)'dir. Bu performans parametreleri için tasarlanan LID'den sağlanabilecek temiz hava debisi 32 m³/h'dir ve hedeflenen minimum debiden (50 m³/h) %36 daha düşüktür ve hedeflenen debi aralığının dışındadır. HAD analizi sonuçlarına göre (temiz hava tarafı çıkış sıcaklığı 288.98 K=15.98°C ve temiz hava tarafındaki sıcaklık artışı 5.98 K) hesaplanan HIBO 389.18, $\epsilon \times \text{HIBO}$ 154.94

ve akışın sağlanması için gerekli toplam fan gücü 0.17 W'tır. Bu modelde geri kazanılacak ısı gücü 67.41 W ve duyulur ısı etkenlik %39.81'dir. Ayrıca LID'ye girişteki ve çıkıştaki yerel basınç kayıpları dahil toplam basınç kayıpları temiz hava tarafı ve egzoz havası tarafı için sırasıyla, 9.5 Pa ve 9.7 Pa'dır.

- LID tasarımında hem duyulur ısı etkenliği- ϵ hem de HIBO'yu maksimum yapan ($\epsilon \times \text{HIBO}$) en uygun alt seviyeler; ANOM'a göre KGG-daire, $u=2.0$ m/s, $h=2.5$ mm, $L=120 \times 120$ mm (D-20-25-120) belirlenmiştir. ANOM'a ve ANOVA'ya göre bu seviyelerin önem sırası ve etki dereceleri; ortalama hava akış hızı (%61.66), kanal yüksekliği (%28.10), levha boyutu (%6.06) ve KGG (%4.06)'dir. Bu durumda sağlanabilecek temiz hava debisi $48 \text{ m}^3/\text{h}$ 'dir ve hedeflenen minimum debiden ($50 \text{ m}^3/\text{h}$) %4 daha düşüktür. HAD analizi sonuçlarına göre (temiz hava tarafı çıkış sıcaklığı $289.57 \text{ K}=16.57^\circ\text{C}$ ve temiz hava tarafındaki sıcaklık artışı 6.57 K) duyulur ısı etkenlik %43.80 ve geri kazanılacak ısı gücü 108.78 W'tır. Akışın sağlanması için gerekli toplam fan gücü 0.295 W, HIBO 367.84 ve $\epsilon \times \text{HIBO}$ 161.11 olarak hesaplanmıştır. Bu LID modelinde, diğer hedef performans parametreleri için en büyük veya en küçük sonuçlar elde edilmemiştir. LID'ye girişteki ve çıkıştaki yerel basınç kayıpları dahil toplam basınç kayıpları, temiz hava tarafı ve egzoz havası tarafı için sırasıyla, 11.2 Pa ve 11.2 Pa'dır.
- En uygun tasarım parametrelili LID'lerin HAD sonuçları ile Taguchi tahminleri arasındaki uyum (yüzde farklar %2.31 ila %16.70), hem seçilen LID tasarım parametrelerine ait alt seviyelerin uygunluğunu hem de Taguchi analizlerinin LID tasarımında kullanılabileceğini göstermiştir.

En uygun tasarım parametrelili LID modelleriyle farklı hacimsel debilerde yapılan parametrik analizlerin sonuçlarına göre hava debisindeki artışın, temiz hava tarafında geri kazanılan ısı gücü- Q_{gk} ve akışın sağlanması için gerekli toplam fan gücünü- $P_{h,t+e}$ artırırken, duyulur ısı etkenliği- ϵ , HIBO'yu ve $\epsilon \times \text{HIBO}$ 'yu azalttığı elde edilmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] Hošten, G., ve Yalbay, N. (2018). Kapalı ortam hava kalitesinin ofis ortamlarında iş sağlığı ve güvenliği açısından değerlendirilmesi. *Aydın Sağlık Dergisi* 2, 1-12.
- [2] Ünverdi, M. ve Küçük, H. (2019). Taguchi yöntemi ve hesaplamalı akışkanlar dinamiği kullanılarak tasarlanan levhalı ısı değiştiricilerin performanslarının karşılaştırılması. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 25(4), 373-386.
- [3] Ünverdi, M. ve Küçük, H. (2023). Havadan-havaya ısı geri kazanımında levhalı ısı değiştirici akış düzenlemesinin sayısal incelenmesi ve karşılaştırılması. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 12(2), 538-550.
- [4] Zhang, L.-Z., Liang, C.-H., ve Pei, L.-X. (2008). Heat and moisture transfer in application scale parallel-plates enthalpy exchangers with novel membrane materials. *Journal of Membrane Science*, 325, 672–682.
- [5] Zhang, L.-Z. (2010). Heat and mass transfer in a quasi-counter flow membrane-based total heat exchanger. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 53, 5478–5486.
- [6] Al-Waked, R., Nasif, M., Morrison, G., ve Behnia, M. (2013). CFD simulation of air to air enthalpy heat exchanger. *Energy Conversion and Management*, (74), 377–385.
- [7] AL-Waked, R., Nasif, M., Morrison, G., ve Behnia, M. (2015). CFD simulation of air to air enthalpy heat exchanger: Variable membrane moisture resistance. *Applied Thermal Engineering*, (84), 301-309.
- [8] Kocabaş, C., ve Savaş, A. (2018). Isı değiştirici performansının deney tasarımı metoduyla analizi. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 017103(18), 1174-1180.
- [9] Kocabaş, C., ve Savaş, A. (2019). Optimization of process parameters of the plate heat exchanger. *INTERNATIONAL JOURNAL of ENGINEERING TECHNOLOGIES-IJET*, 5(1), 24-30.
- [10] Ünverdi, M. ve Küçük, H. (2019,Nisan,17-20). Yerel havalandırma sistemleri için ısı etkenliği yüksek çapraz akışlı levhalı ısı değiştirici tasarımı. *14. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi*, İzmir,Türkiye.
- [11] Özüak, S. (2008). *Taguchi deney tasarımlarının excel çizelge arayüzleriyle uygulanması* [Yüksek lisans tezi]. Kırıkkale Üniversitesi.
- [12] Elkoca, C. Ş. (2020). Taguchi deney tasarımı metodolojisinin rulo kırığı kusurunun giderilmesine uygulanması. *8 th International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science*, Bursa, Türkiye, 62-73.

- [13] Düzyol, S. (2016). Taguchi Deneysel Tasarım Metodu Kullanılarak Karadon (Zonguldak) Kömürünün Yağ Aglomerasyonu Davranışının İncelenmesi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 31(2), 77-84.
- [14] Mezarcıöz, S. ve Oğulata, R. (2010). Süprem Kumaşlarda Patlama Mukavemeti Değerinin Taguchi Ortogonal Dizayna Göre Optimizasyonu. *Tekstil ve Konfeksiyon*, 4, 320-328.
- [15] Taylan, D. (2009). *Taguchi deney tasarımı uygulaması* [Yüksek lisans tezi]. Süleyman Demirel Üniversitesi.
- [16] Gökçe, B. ve Taşgetiren, S. (2009). Kalite için deney tasarımı. *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 6(1), 71-83.
- [17] Durmaz, S. (2008). *Taguchi metodunun kauçuğun vulkanizasyonu prosesine uygulanması* [Yüksek lisans tezi]. Sakarya Üniversitesi.
- [18] Cimbala, J. M. (2014). *Taguchi orthogonal arrays*. Penn State University.
- [19] Air Movement and Control Association International, Inc. and American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Inc. (1999). *AMCA 210-99: Laboratory method of testing fans for aerodynamic performance rating*.
- [20] Lavrykov, S. ve Ramarao, B. (2012). Thermal Properties of Copy Paper Sheets. *Drying Technology*, 30(3), 297-311.
- [21] Çengel, Y. A. (2008). *Introduction to Thermodynamics and Heat Transfer* (2nd ed.). McGraw-Hill.
- [22] Çengel, Y. A. ve Cimbala, J. (2014). *Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications* (3rd ed.). McGraw-Hill.
- [23] İnan, T., Başaran, T., ve Erek, A. (2017). Experimental and numerical investigation of forced convection in a double skin façade. *Energies*, 10(9), 1364.
- [24] Panchal, S., Gudlanarva, K., Tran, M.-K., Herdem, M., Panchal, K., Fraser, R., ve Fowler, M. (2022). Numerical simulation of cooling plate using K-epsilon turbulence model to cool down large-sized graphite/LiFePO4 battery at high C-rates. *World Electr. Veh. J.*, 13(8), 138.
- [25] Aksu, E. (Haziran 2023). Farklı Ağ Elemanı Boyutlarının ve Türbülans Modellerinin Düz Levha Sürtünme Direnci Üzerindeki Etkisinin Sayısal Olarak İncelenmesi. *Gemi ve Deniz Teknolojisi Dergisi*, (223), 29-46.
- [26] Tu, J., Yeoh, G.-H., ve Liu, C. (2020). *Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Temelleri ve Uygulamaları* (3 b.). (Çev.T. Engin, H. Güneş, S. Çadircı, A. Kibar, ve M. Kemerli,) Ankara: Palme Yayınevi.
- [27] Ansys, Inc. (2010, December). Introduction to Ansys Fluent, Customer training material, Lecture 6, Turbulence modeling (Release 13.0).
- [28] Bahrami, T. (2022). *Ürün Tasarımı Geliştirmesinde Taguchi Deney Tasarımın Uygulanması* [Yüksek lisans tezi]. Gazi Üniversitesi.
- [29] Phadke, M. (1989). *Quality Engineering Using Robust Design* (1st ed.). New Jersey, USA: Prentice Hall.

- [30] YAKUT, A., SELBAŞ, R., ve YAKUT, Z. (2022). *MÜHENDİSLİKTE ISI TRANSFERİ*. Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Yayınları.
- [31] INCROPERA, F., ve De WITT, D. (2001). *Isı ve Kütle Geçişinin Temelleri*. LİTERATÜR YAYINLARI.
- [32] Bejan, A. (2013). *Convection heat transfer* (4th ed.). Wiley.
- [33] Hesselgreaves, J., Law, R., ve Reay, D. (2016). *Compact Heat Exchangers Selection, Design and Operation* (2nd ed.). Butterworth-Heinemann.





ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Ali ÇELİK

ÖĞRENİM DURUMU:

- Lisans** : 2020, Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği
- Yükseklisans** : 2025, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Enerji Programı

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2019 yılında Arma Filtre Sistemleri San. ve Tic. A.Ş.'de staj yaptı.

TEZDEN TÜRETİLEN ESERLER:

- ÇELİK Ali, KÜÇÜK Hasan, ÜNVERDİ Murat., HEDEF ODAKLI LEVHALI ISI DEĞİŞTİRİCİ TASARIMINDA ETKİLİ PARAMETRELERİN BELİRLENMESİ: ISIL ETKENLİK VE GERİ KAZANILAN ISIL GÜÇ ÖRNEKLERİ., UMTEB 16. Uluslararası Bilimsel Araştırmalar Kongresi, Adana, Türkiye. 6-8 Aralık 2024.

DİĞER ESERLER:

-