

**ÇOKLU ÇARPAN JET SİSTEMİNİN SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ VE
GENETİK ALGORİTMA İLE ÇOK HEDEFLİ TASARIM OPTİMİZASYONU**



YÜKSEK LİSANS TEZİ

Alperen YILDIZELİ

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Isı Akışkan Programı

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Sertaç Çadircı

ARALIK 2019

**ÇOKLU ÇARPAN JET SİSTEMİNİN SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ VE
GENETİK ALGORİTMA İLE ÇOK HEDEFLİ TASARIM OPTİMİZASYONU**



YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Alperen YILDIZELİ
(503161105)**

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Isı Akışkan Programı

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Sertaç Çadircı

ARALIK 2019

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü’nün 503161105 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Alperen YILDIZELİ, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “ÇOKLU ÇARPAN JET SİSTEMİNİN SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ VE GENETİK ALGORİTMA İLE ÇOK HEDEFLİ TASARIM OPTİMİZASYONU” başlıklı tezini aşağıdaki imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Dr. Öğr. Üyesi Sertaç Çadircı**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Yakup Erhan BÖKE**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Hasan KARABAY
Kocaeli Üniversitesi

.....

Teslim Tarihi : **12 Kasım 2019**

Savunma Tarihi : **13 Aralık 2019**





Aileme ve kız arkadaşşıma

ÖNSÖZ

Başta yüksek lisans eğitimim boyunca maddi ve manevi desteğini esirgemeyen Dr. Öğr. Üyesi Sertaç ÇADIRCI'ya, tez çalışmam kapsamında yaptığı değerlendirmeler ve yorumlarla çalışmanın olgunlaşmasına katkı sağlayan Prof. Dr. İlker Murat KOÇ'a, bilgi ve birikimlerini benimle cömertçe paylaşan Araş. Gör. Umut Can Coşkun'a ve Ahmet Yasin KARABAY'a, makina mühendisliği mesleğini seçmemde önemli rol oynayan Hakan ERDOĞAN'a ve en çok da hayatım boyunca yanımda olmuş olan aileme teşekkürlerimi borç bilirim.

Bu çalışma İstanbul Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi (BAP) ve Ulusal Yüksek Başarımlı Hesaplama Merkezi'nin (UHeM) sırasıyla 41654 numaralı proje desteği ve 4006162019 numaralı destekleri ile sağlanmıştır.

Aralık 2019

Alperen YILDIZELİ
(Makina Mühendisi)



İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖNSÖZ	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR.....	xi
SEMBOLLER	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xv
ŞEKİL LİSTESİ.....	xvii
ÖZET	xix
SUMMARY	xxi
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Tezin Amacı.....	3
1.2 Literatür Araştırması	4
1.2.1 Endüstride temassız taşıma sistemleri	4
1.2.2 Çarpan jet akışı ile ilgili deneysel çalışmalar	5
1.2.3 Çarpan jet akışı ile ilgili sayısal çalışmalar	7
1.2.4 Çarpan jet akışı ile ilgili optimizasyon çalışmaları	10
1.3 Tezin Özgün Değeri.....	13
2. HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ ÇALIŞMALARI	15
2.1 Giriş	15
2.2 Yöneten Denklemler.....	16
2.3 Tekli Çarpan Jet Akışının Sayısal Modeli	20
2.3.1 Isı transferinin doğrulanması	20
2.3.1.1 Akış hacminin ve çözüm ağının oluşturulması.....	21
2.3.1.2 Sınır şartlarının belirlenmesi.....	23
2.3.1.3 Türbülans modelinin seçilmesi	24
2.3.1.4 Sayısal modelin iyileştirilmesi.....	25
2.3.1.5 Çözüm ağından bağımsızlık analizleri.....	30
2.3.1.6 Validasyon sonuçları.....	31
2.3.2 Momentum transferinin doğrulanması	32
2.3.2.1 Akış hacmini ve çözüm ağının oluşturulması.....	33
2.3.2.2 Sınır şartlarının belirlenmesi.....	33
2.3.2.3 Oluşturulan çözüm ağı.....	34
2.3.2.4 Doğrulama sonuçları.....	36
2.4 Çoklu Çarpan Jet Akışının Sayısal Modelinin Oluşturulması.....	36
2.4.1 Isı transferinin doğrulanması	37
2.4.1.1 Akış hacminin ve çözüm ağının oluşturulması.....	38
2.4.1.2 Sınır şartlarının belirlenmesi.....	39
2.4.1.3 Çözüm ağından bağımsızlık analizleri.....	39

2.4.1.4 Doğrulama sonuçları.....	41
2.4.2 Momentum transferinin doğrulanması	42
2.4.2.1 Akış hacmini ve çözüm ağının oluşturulması.....	43
2.4.2.2 Sınır şartlarının belirlenmesi.....	44
2.4.2.3 Çözüm ağından bağımsızlık analizleri.....	44
2.4.2.4 Doğrulama sonuçları.....	46
3. TASARIM ÖNERİLERİ.....	49
3.1 Pasif Akış Kontrolü Olarak Kiriş Kullanımı	51
3.1.1 Tasarım parametreleri	52
3.1.2 Tasarım uzayının tanımlanması	53
3.2 Tasarım Uzayının Boyut Analizi	54
3.2.1 Buckingham π analizi	55
3.2.2 Boyutsuz değişkenler cinsinden tasarım uzayının ifadesi	56
3.3 Tasarım Değişkenlerinin Etkilerinin İncelenmesi	56
4. OPTİMİZASYON ÇALIŞMALARI.....	61
4.1 Eş Baskın Karşılaştırmalı Elitist Genetik Algoritma.....	62
4.1.1 Optimizasyon sabitleri.....	65
4.1.2 Hedef fonksiyonları	66
4.2 Yazılan MATLAB Programının İşlem Adımları	66
4.2.1 Kullanılan yardımcı programlar	68
4.3 Optimizasyon Sonuçları	69
5. SONUÇLAR VE İLERİYE DÖNÜK ÇALIŞMALAR	79
KAYNAKLAR.....	83
ÖZGEÇMİŞ	88

KISALTMALAR

GA	: Genetic Algorithm (Genetik Algoritma)
HAD	: Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
LHS	: Latin Hypercube Sampling (Latin Hiperküp Örnekleme)
MEMS	: Micro electromechanic systems (Mikro Elektromekanik Sistemler)
NSGA-II	: Elitist Nondominated Sorting Genetic Algorithm (Eş Baskın Karşılaştırmalı Elitist Genetik Algoritma)
RANS	: Reynolds Averaged Navier Stokes (Reynolds Ortalamalı Navier Stokes)
RNG	: Re-Normalization Group (Tekrar Normalleştirme Grubu)
SST	: Shear Stress Transport (Kayma Gerilmesi Aktarımı)
SVTOL	: Short Vertical Take-off and Landing (Kısa Kalkış Dikey İniş)
UHeM	: Ulusal Yüksek Başarımli Hesaplama Merkezi



SEMBOLLER

AR_{SK}	:Silindirik kirişin en boy oranı
arg	:k- ω SST argümanı
a_1	:k- ω SST model sabiti
B	:k- ω SST model sabiti
B^*	:k- ω SST model sabiti
D_{jet}	:Jet çapı
D_h	:Hidrolik çap
E	:İç Enerji
F_x	:X yönündeki kuvvet
F_y	:Y yönündeki kuvvet
F_z	:Z yönündeki kuvvet
F_1	:Birinci hedef fonksiyonu
F_2	:İkinci hedef fonksiyonu
H	:Jet ve çarpan plaka arasındaki mesafe
h_j	:İlgili yöndeki ısı taşınım katsayısı
I	:Türbülans Şiddeti
J	:İç Enerji
K	:Harmanlama fonksiyonu
k_{eff}	:Efektif ısıl iletkenlik
L	:Çarpan plakanın kenar uzunluğu
Ma	:Mach Sayısı
n_{pop}	:Popülasyondaki birey sayısı
n_{el}	:Elitzm sayısı
n_{cross}	:Çaprazlama sayısı
n_{mut}	:Mutasyon sayısı
P_L	:Taşıma Basıncı
p	:Basınç
Re_{jet}	:Jet Reynolds sayısı
r	:Radyal konum
S_h	:Isı kaynağı
s	:Jetler arasındaki mesafe
T	:Sıcaklık
t	:Zaman
$\bar{U}$	:Ortalama Hız
u	:X yönündeki hız
u_i	:Kartezyen kordinatlarda hız bileşenleri
u^*	:Kayma hızı
v	:Y yönündeki hız
$\vec{v}$	:Hız Vektörü
w	:Z yönündeki hız
W_P	:Taşıma Gücü
x_i	:Kartezyen kordinatlarda konum bileşenleri
y^+	:Boyutsuz ilk hücre yüksekliği

γ	:k- ω SST model sabitlerinin oranı
ε	:Türbülans yitim hızı
$\eta_{P,S}$	:P parametresinin S çıktısı üzerindeki etkisi
$\eta_{toplamlam}$	:Taşıma gücü başına düşen taşıma basıncı
Θ	:Örnek Değişken
κ	:k- ω SST model sabiti
μ	:Dinamik Viskozite
ρ	:Yoğunluk
σ_{ω}	: ω için Türbülans Prandtl sayısı
σ_k	:k için Türbülans Prandtl sayısı
τ	:Kayma gerilmesi
ϕ	:Örnek değişken
ω	:Türbülans yitim frekansı

ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1: Doğrulama çalışmasında kullanılan konfigürasyonların detayları.	21
Çizelge 2.2: Türbülans modeli araştırmasında incelenen modeller.	26
Çizelge 2.3: Doğrulama çalışmasında kullanılan sınır şartları, Cooper ve diğ. [7].	34
Çizelge 2.4: Xing ve Weigand'ın [9] çalışmasında inceledikleri tasarım uzayının limitleri.	37
Çizelge 2.5: Doğrulama çalışmasında kullanılan sınır şartları [9].	39
Çizelge 2.6: Doğrulama çalışmasında kullanılan sınır şartları, Geers ve diğ. [10].	44
Çizelge 3.1: Çoklu çarpan jet akışı için işletme parametreleri.	53
Çizelge 3.2: Tasarım uzayı dışında tutulan parametreler.	54
Çizelge 3.3: Boyut analizinde incelenen parametreler ve boyutları.	55
Çizelge 3.4: Buckingham π analizinin sonuçları.	56
Çizelge 3.5: Tasarım değişkenlerinin limitleri.	56
Çizelge 3.6: Farklı tasarım noktalarında ait HAD analizi sonuçları.	57
Çizelge 3.7: AR_{SK} 'nın hedef fonksiyonları üzerindeki etkisi.	58
Çizelge 4.1: Jenerasyonlar boyunca bireylere (tasarım noktaları) ait genler (tasarım değişkenleri).	71
Çizelge 4.2: Seçilen tasarım noktalarına ait tasarım değişkenleri.	72



ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 1.1 : Düz bir yüzeye çarpan jetin şematik gösterimi [1].	2
Şekil 1.2 : Çoklu çarpan jet akışı olayının şematik gösterimi [1].	2
Şekil 1.3 : Alimohammadi ve diğ. [8] tarafından tanımlanan sabit ve değişken jet hızının zamana bağlı değişimi.	6
Şekil 1.4 : Deney düzeneği, Xing ve Weigand [9].	6
Şekil 1.5 : Matris düzenine sahip çoklu çarpan jet sisteminin sayısal yöntemlerle elde edilen akım çizgileri, Thielen ve diğ [15].	9
Şekil 1.6 : Çalışmada kullanılan akış alanı ve sınır şartlarının gösterimi, Wen ve diğ. [16].	10
Şekil 1.7 : Lam ve Parakash [18] tarafından elde edilen Pareto cephesi.	11
Şekil 2.1 : Doğrulama çalışmasına ait geometrik parametreler [8].	21
Şekil 2.2 : Oluşturulan iki boyutlu çözüm ağı.	22
Şekil 2.3 : Ayırıklaştırma mertebesinin etkisi [8].	27
Şekil 2.4 : İdeal gaz yasasının çözüme etkisi [8].	28
Şekil 2.5 : Sutherland yasasının çözüme etkisi [8].	28
Şekil 2.6 : Giriş türbülans şiddetinin çözüme etkisi [8].	30
Şekil 2.7 : Çözüm ağından bağımsızlık analizlerinin sonuçları: a) radyal yönde çözüm ağı yoğunluğunun etkisi, b) eksenel yönde çözüm ağı yoğunluğunun etkisi [8].	31
Şekil 2.8 : Farklı konfigürasyonlara ait doğrulama çalışması sonuçları: a) C1, b) C2, c) C3, d) C4. [8]	32
Şekil 2.9 : Akış hacmi ve doğrulama çalışmasına ait boyutlar ve sınır koşulları [7].	33
Şekil 2.10 : Doğrulama çalışmasında kullanılan örnek çözüm ağı: a) Tüm akış hacmi, b) jet çıkışı, c) çarpan plaka civarı, Cooper ve diğ. [7].	35
Şekil 2.11 : Doğrulama çalışmasına ait hız profilleri: a) $r/D=0$, b) $r/D=1.0$, c) $r/D=1.5$, d) $r/D=2.0$, e) $r/D=2.5$, f) $r/D=3.0$, Cooper ve diğ. [7].	36
Şekil 2.12 : Doğrulama çalışmasında kullanılan örnek çözüm ağı, Xing ve Weigand'ın [9] konfigürasyonu.	38
Şekil 2.13 : Çözüm ağından bağımsızlık analizi sonuçları ve deneysel veri ile karşılaştırma [9].	40
Şekil 2.14 : Çözüm ağından bağımsızlık analizi sonuçları ve deneysel sonuçlar ile karşılaştırma [9].	41
Şekil 2.15 : HAD analizi ve referans çalışmadaki deneysel sonuçlar.	42
Şekil 2.16 : Doğrulama çalışması için oluşturulan örnek çözüm ağı, Geers ve diğerlerinin [10] konfigürasyonu	43
Şekil 2.17 : Radyal yönde çözüm ağı yoğunluğunun sayısal sonuca etkisi.	45
Şekil 2.18 : Eksenel yönde çözüm ağı yoğunluğunun sayısal sonuca etkisi.	46

Şekil 2.19	: HAD analizi ve deneysel sonuçların karşılaştırılması [10].	47
Şekil 3.1	: Akış kontrolü yöntemlerinin sınıflandırılması [25].	49
Şekil 3.2	: Çarpan plaka üzerindeki basınç haritası.	50
Şekil 3.3	: Farklı bakış açılarından pasif akış kontrolü uygulaması örneği: a) Uzaysal bakış açısı, b) XY Düzlemi, c) YZ Düzlemi, d) ZX Düzlemi.	52
Şekil 3.4	: Temsili akış hacimi üzerinde geometrik parametrelerin gösterimi. ..	52
Şekil 3.5	: AR_{SK} 'nin taşıma basıncı ve harcanan güç üzerindeki etkisi.	58
Şekil 4.1	: Tek hedefli genetik algoritmanın akış şeması.	63
Şekil 4.2	: Pareto sıralaması ve Pareto cephesi.	65
Şekil 4.3	: Jenerasyonlar boyunca popülasyonun tasarım uzayı üzerindeki dağılımı: a) Birinci jenerasyon, b) Beşinci jenerasyon c) Onuncu jenerasyon, d) Yirminci jenerasyon.	70
Şekil 4.4	: Farklı tasarım noktalarına ait çarpan plaka üzerindeki basınç haritaları: a) Tasarım 1, b) Tasarım 2 c) Tasarım 3, d) Tasarım 4.	72
Şekil 4.5	: Farklı tasarım noktalarına ait $X=Y$ düzleminden alınan hız şiddeti haritaları: a) Tasarım 1, b) Tasarım 2 c) Tasarım 3, d) Tasarım 4.	73
Şekil 4.6	: Farklı tasarım noktalarına ait alınan çarpan plaka hız şiddeti haritaları: a) Referans tasarım, b) Tasarım 1 c) Tasarım 2.	74
Şekil 4.7	: Jenerasyonlar boyunca hedef fonksiyonlarının değişimi ve Pareto Cephesi: a) Birinci jenerasyon (LHS ile), b) Beşinci jenerasyon c) Onuncu jenerasyon, d) Yirminci jenerasyon.	75
Şekil 4.8	: Optimum bireylere ait tasarım değişkenleri ve hedef fonksiyonları.	76
Şekil 4.9	: Cebirsel yaklaşımla optimum sonuçların irdelenmesi.	77

ÇOKLU ÇARPAN JET SİSTEMİNİN SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ VE GENETİK ALGORİTMA İLE ÇOK HEDEFLİ TASARIM OPTİMİZASYONU

ÖZET

Son elli yıl içerisinde, üretimin yüksek kapasitelerde ve seri bir şekilde gerçekleştirildiği endüstriyel uygulamalarda üretim veriminin artırılması akademi ve sanayinin ortak amacı haline geçmiştir. Endüstriyel üretim tesislerinde malzeme kayıplarının, üretim maliyetlerinin ve proses sürelerinin azaltılmasının yanısıra lojistik ve depolama gibi organizasyonel maliyetlerin de azaltılması adına birçok farklı alanda çalışmalar yapılmaktadır. İş hücreleri arasında ham malzemelerin ve ürünlerin taşınması ve iletilmesi üretimin her aşamasında gerçekleşen işlemlerden biridir ve üretim maliyetini önemli ölçüde etkilemektedir. Bu tez çalışması kapsamında hassas cisimlerin temassız taşınması için kullanılan çoklu çarpan jet sisteminin kaldırma kapasitesini ve enerji sarfiyatını azaltmak amacıyla sayısal incelemeler yardımıyla tasarım iyileştirmesi yapılmıştır.

Tez çalışmasının ilk bölümünde taşıma sistemlerinin endüstrideki kullanım alanlarından, endüstride temassız taşıma sistemlerine duyulan ihtiyaçtan, çarpan jet akışından ve çoklu çarpan jet sistemlerinden bahsedilmiştir. Çoklu çarpan jet sistemi ile ilgili yapılan akademik çalışmalar ve uygulamalar incelenerek literatür taraması yapılmış ve mevcut literatürde geliştirilebilecek yönler belirtilmiştir.

İkinci kısımda çoklu çarpan jet sisteminin sayısal olarak incelenebilmesi için gereken sayısal model doğrulama çalışmaları vasıtası ile oluşturulmuştur. Sayısal inceleme sırasında akış hacminin oluşturulmasında Design Modeller programı kullanılırken çözüm ağının oluşturulması için ANSYS Meshing ve HAD analizlerinin gerçekleştirilmesi için ANSYS Fluent 17.2 programı kullanılmıştır. Bu bölümde çarpan jet akışı ile ilgili dört farklı doğrulama çalışması ile beraber sayısal modele ait detaylı inceleme yapılarak geniş çalışma şartlarında deneysel verilerle tutarlı sonuçlar verebilecek sayısal bir model elde edilmiştir. Doğrulama çalışmalarında ısı ve momentum transferi çarpan plaka üzerindeki Nusselt sayısı dağılımları ve akışa ait hız profillerinin karşılaştırılması ile doğrulanmıştır. Elde edilen sayısal ve deneysel sonuçlar arasındaki gözlemlenen en yüksek farklılıklar %10 civarındadır.

Çalışmanın üçüncü kısmında çoklu çarpan jet sisteminde taşıma kapasitesi ve enerji sarfiyatını azaltmak adına pasif akış kontrolü amacıyla jetler arasına silindirik kirişlerin yerleştirilmesi önerilmiştir. Önerilen tasarımın işletmesel ve geometrik parametreleri incelenerek boyut analizi yapılmasının ardından incelenecek parametreler seçilmiş ve tasarım uzayı oluşturulmuştur. İncelenen tasarım uzayına dahil olan farklı tasarımlar HAD analizi ile incelenerek uygulanan pasif akış kontrolünün etkileri irdelenmiştir.

Çalışmanın dördüncü kısmında önceki bölümde belirtilen tasarım uzayı içinde en yüksek taşıma kapasitesi veya en düşük enerji sarfiyatına sahip tasarımların belirlenmesi için çok hedef fonksiyonlu optimizasyon çalışması gerçekleştirilmiştir.

HAD analizi için belirlenen sayısal model ve MATLAB programında kodlanan NSGA-II optimizasyon algoritması entegre olarak çalıştırılarak tasarım uzayı içerisindeki optimum tasarım kümesi belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar detaylıca incelenerek silindirik kiriş tasarım önerisinin tasarım çıktıları üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Tez çalışmasının son bölümünde çalışmadan elde edilen sonuçlar yorumlanmış ve ileriye dönük yapılabilecek çalışmalar derlenmiştir. Silindirik kirişlerin etkilerinin incelenmesi için deneysel çalışmaların yapılması ve elastik kirişlerin incelenmesi gibi ileriye dönük çalışma önerileri sunulmuştur.



NUMERICAL INVESTIGATION OF MULTIPLE IMPINGING JET SYSTEM AND MULTI OBJECTIVE DESIGN OPTIMIZATION USING GENETIC ALGORITHM

SUMMARY

In the last fifty years, increasing production efficiency in industrial applications where production is carried out at high capacities has become a common aim of academia and industry. In industrial production facilities, studies are carried out in many different areas in order to reduce material losses, production costs and process times, as well as to reduce organizational costs such as logistics and storage.

The transport of raw materials and resultant products between work cells is one of the processes that take place at every stage of industrial production and has a significant impact on production costs. Today, contactless handling methods are especially preferred for the transportation of sensitive objects such as microprocessors, microchips and artificial tissues where human contact is not permitted. Contactless transport of sensitive objects is carried out by pneumatic, acoustic or magnetic methods. Bernoulli Gripper, Vortex Gripper and multiple impinging jet systems are among the main applications of pneumatic contactless transport. Within the scope of this thesis, design improvements have been made with the help of numerical studies and an optimization algorithm in order to increase the lifting capacity and reduce the energy consumption of the multiple impinging jet system which is used for the contactless transportation of sensitive objects.

In the first part of the thesis, the usage areas of transport systems in the industry, the need for contactless transport systems in industry, multiple impinging jet flow multiple impinging jet systems are mentioned. Academic studies and industrial applications related to multiple impinging jet system have been examined, a literature review has been made and aspects that can be developed in the existing literature have been indicated.

In the second part, the numerical model required for the investigation of the multiple impinging jet system by CFD analysis was established by means of validation tests. In order to numerically investigate the multiple impinging jet system; the Design Modeller and ANSYS Meshing program were used to generate the computational domain and the mesh and ANSYS Fluent 17.2 was used to solve governing equations.

Various validation tests have been carried out in a wide range of design parameters in order to assess the requirements for the CFD calculations in the study. To do this, four different experimental studies from the literature have been utilized. Findings of the validation tests are as follows:

- k-w SST turbulence model gives more accurate results compared to the other RANS models.

- The ideal gas and Sutherland laws should be considered to model the temperature dependency of the thermophysical properties of air.
- Second-order spatial discretization schemes of the governing equations give more precise results. Secondary Nusselt number peaks and wall jet development could be predicted more precisely when second-order discretization schemes are used.
- Turbulence properties of the inlet boundary conditions significantly affects the results and should be calculated in order to obtain accurate results.

In the validation studies, heat and momentum transfer results of the numerical model were verified by comparing the Nusselt number distributions on the impinging plate and the axial velocity profiles of the jet flow. The highest observed relative error between the numerical and experimental results is about 10%.

After intensive mesh convergence tests and validation by experiments, the appropriate mesh with correct CFD setup and boundary conditions have been determined for further studies.

In the third part of the study, placing cylindrical pillars between the jets is proposed in order to enhance the lift force and to reduce the energy consumption of the multiple impinging jet system. The operating and geometric parameters of the proposed design were examined and the design space was defined after a detailed dimensional analysis.

Through CFD calculations, effect of the selected design parameters on the objective functions are revealed at chosen design points. It's found that, in the most efficient case, cylindrical pillars can increase the lift capacity of the multiple impinging jet system by %9 with the same constant energy consumption of the reference case. In order to quantify the effect of the design parameters on the results, a new parameter (η) was defined which compares the results of a selected reference design with the design that the parameter of interest is manipulated.

Consideration of the η values with the results of the CFD analyses revealed that the effects of the jet Reynolds number on the lift pressure and power consumption are 272.44% and 462.25%, respectively. This finding means that the jet Reynolds number affects the required pumping power and the lift capacity positively, depending on the forced convection. It is found out that increasing the jet Reynolds number reduces the energy efficiency of the multiple impinging jet system since it affects the power consumption more than the lift capacity. Spacing between the jets (which also related to the plate area) influences the lift capacity and the power consumption by 254.21% and 5.34% respectively. It is found out that lowering the spacing between jets increases the lift capacity and energy efficiency of the system since the ratio of the stagnation region to the area of the impinging plate. Numerical investigations revealed that the effect of the aspect ratio of cylindrical beams on the lift capacity and the power consumption are 9.24% and 0.26%, respectively. Cylindrical beams increase the lift capacity of the multiple impinging jet system with a negligible amount of additional power requirement.

In order to determine the optimum design set with the highest lift capacity or the lowest energy consumption within the specified design space, a multi-objective optimization study was carried out. Multi-objective optimization techniques are preferred rather than single objective techniques in order to obtain design proposals that responses

to different requirements of lift capacity. The numerical model for CFD analysis was integrated with the NSGA-II optimization algorithm which is coded in MATLAB program. The integration of the CFD analyses and the NSGA-II algorithm ensures to avoid regression errors for the outputs of designs. The optimization algorithm resulted in a Pareto Front indicating of trade-off solutions.

Resultant designs were examined in order to reveal the effect of parameters on the multiple jet flow dynamics in detail. It was shown that the pressure distribution on the impinging plate became more uniform and intense with the usage of cylindrical beams with an aspect ratio of 4.2. The optimization process also revealed that lowering the spacing between jets results in higher lift pressure which is consistent with the findings of the previous chapter. It should be mentioned that the lift force per power consumption up to 0.21875 N/W could be obtained which means better efficiency compared to the Bernoulli gripper or the Vortex gripper.

In the last chapter of the thesis, the results of the optimization process and the performance comparison of different designs are concluded. The most important findings of the study were discussed and the future work which can achieve a significant contribution to the literature of contactless transportation and the multiple impinging jet systems.



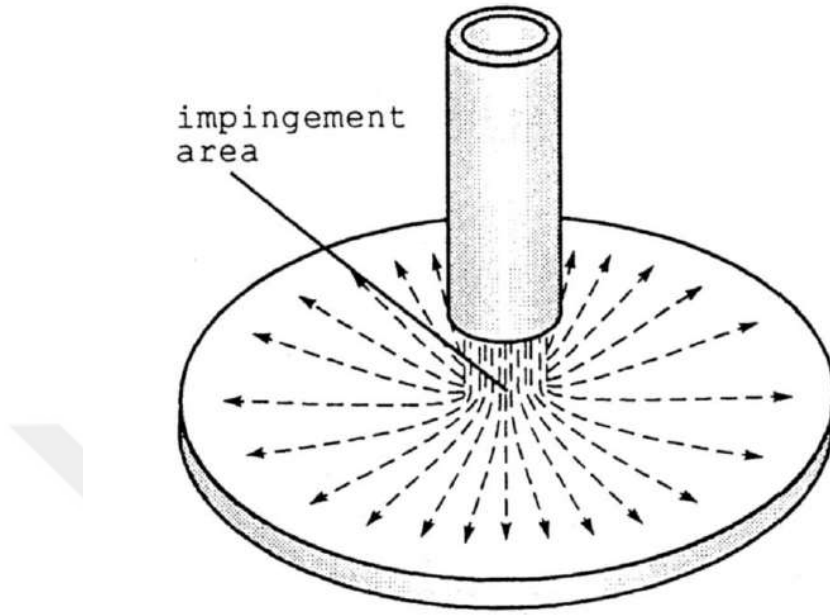
1. GİRİŞ

Endüstriyel ürünlerin üretim, montaj ve paketlenme gibi süreçlerde farklı iş hücreleri arasında taşınması ve iletilmesi, üretimin her aşamasında periyodik olarak gerçekleşen işlemlerdir. İnsanların kaldıramayacağı kadar ağır cisimlerden, çok hassas şekilde taşınması gereken cisimlere kadar birçok endüstriyel ürün farklı kapasitelerde ve çalışma mekanizmalarına sahip sistemlerce taşınmaktadır. Bu tür taşıma işlemleri, ürüne katma değer sağlamazken üretim maliyetini de ciddi şekilde arttırmaktadır. Bu taşıma sistemlerinde yapılan iyileştirmeler, tüm endüstriyel faaliyetlerde maliyetleri azaltmakta ve dolayısıyla ülke ekonomisine katkı sağlamaktadır.

Robotik kollar, vakum kapları ve konveyör bantlar gibi geleneksel taşıma sistemleri hassas cisimlerin temassız taşınmasına uygun değildir. Günümüzde elektronikte kullanılan mikro işlemciler, mikro elektromekanik sistemler (MEMS) , biyomedikal operasyonlarda kullanılan yapay dokular gibi hassas cisimlerin taşınmasında temassız taşıma yöntemleri özellikle tercih edilmektedir. Hassas cisimlerin temassız taşınması pnömatis, akustik veya manyetik yöntemlerle olur.

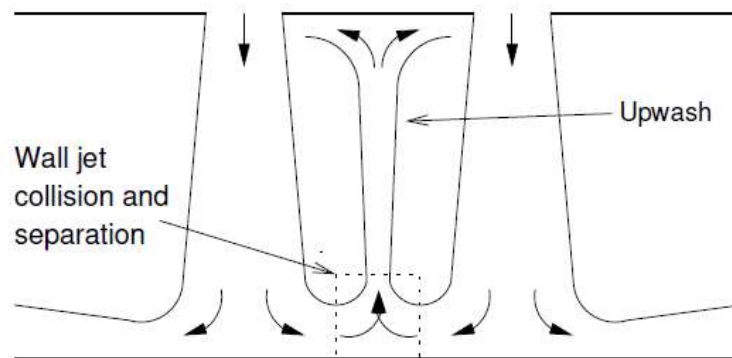
Bernoulli Gripper ve çarpan jet sistemleri pnömatis temassız taşınmanın başlıca uygulamaları arasındadır. Yüksek ısı ve mekanik verimleri nedeniyle çarpan jetler endüstrinin farklı alanlarında ısıtma, soğutma veya temassız taşıma işlemlerinde kullanılmaktadır. Çarpan jetler; taşınması hedeflenen yüzeye çarpma yolu ile taşıma işlemini yapan jetlerdir. Düz bir levhaya çarpan tekil jetin şematik gösterimi Şekil 1.1’de verilmiştir.

Çoklu çarpan jet sistemi belirli bir düzende konumlandırılan ve genellikle aynı basınçlı kaptan beslenen veya bir rüzgar tüneline fan ile üretilen jetlerin tamamına denir. Bu sistemde iki jet arasındaki bölgede birbirlerine karışan ve tekrar jete doğru yönelen türbülanslı akış yapıları görülmektedir.



Şekil 1.1 : Düz bir yüzeye çarpan jetin şematik gösterimi [1].

Çoklu çarpan jetin yüksek ısı transfer kabiliyetine sahip olmasının en önemli nedenlerinden biri durma bölgesinde sınır tabaka oluşmaması iken diğer bir neden ise besleme havasının çarpan plaka üzerinde dağıtılarak soğutma yapılmasıdır. Çoklu çarpan jet akışına ait fiziksel olayların şematik gösterimi Şekil 1.2’de verilmiştir. Eksenel yönde oluşturulan jetlerin karşısında bulunan plakaya çarpmasının ardından radyal duvar jetleri oluşur. Karşılaşan duvar jetleri akış ayrılmasına ve ters yönlü akışa sebep olur. Yukarıda bahsi geçen avantajları ile çoklu çarpan jet sistemleri, türbin kanatlarının soğutulması gibi termal amacıyla veya havalı kumaş serim makinaları gibi mekanik taşıma amacıyla çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır.



Şekil 1.2 : Çoklu çarpan jet akışı olayının şematik gösterimi [1].

Tezin birinci bölümünde taşıma sistemlerinin endüstrideki yerinden, endüstride temassız taşıma sistemlerine duyulan ihtiyaçtan, çarpan jet akışından ve çoklu çarpan jet sistemlerinden bahsedilmiştir. Çoklu çarpan jet akışı ile ilgili yapılan literatürdeki çalışmalar derlenmiş ve tezin kapsamı belirtilmiştir. İkinci bölümde literatürdeki deneysel çalışmalardan yararlanılarak tekli ve çoklu çarpan jet akışının Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) analizleri için oluşturulan sayısal modelin doğrulama çalışması yapılmıştır. Üçüncü bölümde jetler arasında konumlandırılan rijit silindirik kirişin akış ve sistem performansı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Ayrıca Bölüm 3'te sistem üzerinde baskın bir parametre olan jet çapı incelenerek sonuçlar karşılaştırılmıştır. Dördüncü bölümde çalışma kapsamında HAD programı ile bütünleşik olarak çalışan ve özgün bir kod olarak yazılmış Genetik Algoritma (GA) tanıtılmış, ayrıca sistemin taşıma kapasitesini minimum enerji sarfıyatı ile sağlanmasını amaçlayan çok hedefli optimizasyon çalışması yapılmıştır.

1.1 Tezin Amacı

Tezin amacı şöyle özetlenebilir: Birincisi, hassas cisimlerin temassız taşınmasında kullanılan çoklu çarpan jet sisteminin taşıma performansını arttıracak rijit silindirik kiriş tasarımının yapılmasıdır. Bu sayede çoklu çarpan jet akışına yapılacak pasif akış kontrolü uygulamasının sistem performansı üzerindeki etkisi incelenecektir. İkincisi ise önerilen tasarımın taşıma verimliliğini arttırmak amacıyla GA kullanılarak tasarım optimizasyonunun yapılmasıdır. Optimizasyon işlemi sırasında taşıma kuvvetinin artırılması ve bunun için gereken gücün (pompalama) azaltılması, dolayısı ile sistemin toplam taşıma veriminin artırılması hedeflenmiştir. Bunun yanısıra yapılacak olan çok hedef fonksiyonlu optimizasyon çalışması ile elde edilecek Pareto Cephesi farklı önceliklere hitap eden tasarımların seçilmesine yardımcı olacaktır. Böylece bu tez çalışması ile pnömatik temassız taşıma sistemi tasarımı ve tasarımın optimizasyonu HAD analizleri yardımı ile yapılmıştır.

1.2 Literatür Araştırması

Bu kısımda; endüstride kullanılan temassız taşıma sistemlerinden bahsedilmiş, çarpan jet akışı ve çoklu çarpan jet sistemi ile ilgili deneysel, sayısal çalışmalar ve optimizasyon çalışmalarına yer verilmiştir.

1.2.1 Endüstride temassız taşıma sistemleri

Ürünlerin hassasiyeti, hijyen gereksinimleri veya ürüne özel sebeplerden dolayı farklı alanlarda temassız taşıma sistemlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Dolayısı ile günümüzde birçok temassız taşıma sistemi bulunmaktadır. Temassız taşıma sistemleri tahrik mekanizmasına göre sınıflandırılmaktadır; Örneğin pnömatik, akustik veya manyetik yöntemlerle temassız taşıma gerçekleştirilmektedir.

Dini ve diğ. [2] Bernoulli Gripper kullanılarak kumaş yığınlarının temassız olarak taşınmasını farklı çalışma koşulları ve jet geometrileri için deneysel olarak incelemişlerdir. Jet çıkışında yayıcı kullanmanın taşıma kapasitesini artırırken kumaş üzerinde iz oluşumunu önlediğini gösterilmişlerdir. Bunun yanı sıra çok sayıda Bernoulli Gripper kullanılarak 50 N'a kadar taşıma kuvvetinin elde edildiğini belirtmişlerdir.

Ueha ve diğ. [3] yüksek frekanslarda titreşime maruz bırakılan taşıma plakasının yaydığı akustik radyasyon sayesinde 10 kilograma varan kütledeki cisimleri temassız olarak taşıyabilen akustik temassız taşıma sistemini analitik ve deneysel olarak incelemişlerdir. Farklı taşıma yüksekliklerinde ölçümler yaparak sistem karakteristiğini ortaya koymuşlar, ayrıca taşınan plakanın kesit geometrisinin sistemin taşıma performansına etkisini incelemişlerdir.

Mann ve Sims [4] manyetik temassız taşıma sistemlerinin enerji hasadı amacıyla kullanılmasını analitik modeller ve deneysel ölçümler vasıtasıyla incelemişlerdir. Bunun yanı sıra manyetik temassız taşıma sistemlerinin doğrusal olmayan davranışlarının sistem üzerindeki etkisini incelemiş ve enerji hasadının en verimli olacağı frekans aralığı için ampirik formül türetmişlerdir.

Pnömatik temassız taşıma sistemlerinde genellikle Bernoulli Gripper gibi kavrama sistemleri kullanılsa da farklı uygulamalarda çarpan jet sistemlerine rastlamak da mümkündür.

Barata [5] çoklu çarpan jet akışını deneysel ve sayısal yöntemlerle inceleyerek birbirine karışan duvar jeti akışlarının yarattığı burgaçlı akış yapılarının dikey iniş ve kalkış yapabilen, SVTOL teknolojisine sahip, hava araçlarının tasarımına etkisini yorumlamıştır. HAD analizleri ile farklı Reynolds sayıları, jet yüksekliği ve jet konumlandırmasının etkisine bakmıştır.

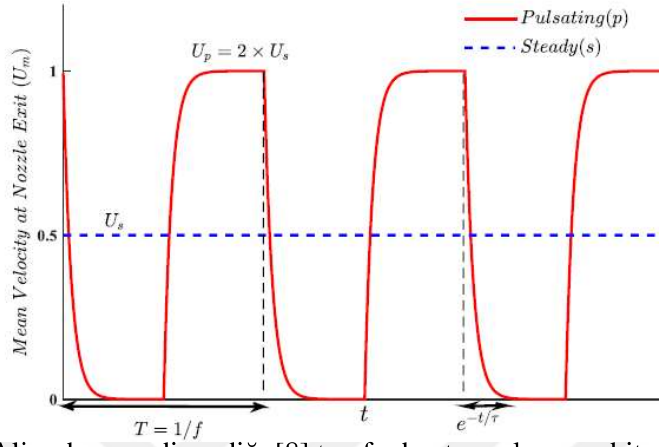
Endüstride farklı alanlarda boyanan ya da nemlendirilen plaka geometrisindeki kağıt, metal, kumaş vb. ürünlerin kurutulması gerekmektedir. Bu işlem sırasında kurutmanın temasla olması ürünler üzerinde boya izinin kalmasına ve ürün kaybına sebep olmaktadır. Bu ve benzeri kurutma ihtiyaçlarını temassız ve hızlı şekilde karşılamak amacıyla “Flotation Dryer Unit” isimli çarpan jet sistemini ürünleştirilmiştir ve patenti alınmıştır. [6]

1.2.2 Çarpan jet akışı ile ilgili deneysel çalışmalar

Cooper ve diğ. [7], tekli çarpan jet akışını farklı jet çapı, jet Reynolds sayısı ve jet-plaka mesafeleri için deneysel incelemişlerdir. Sıcak Tel Anemometresi (Hot-wire Aneometer) ile akışın hız profilleri, türbülans kinetik enerisi dağılımı ve Nusselt sayısı verilerini ölçümleyen araştırmacılar; çarpan jet ve devamında oluşan kayma akışı için deneysel veri elde etmişlerdir. Cooper ve diğ., $k-\epsilon$ türbülans modelinin özellikle jetin durma bölgesinde türbülans kinetik enerji dağılımını altı kata varan hatalarla hesapladığını göstermişlerdir. Ek olarak durma bölgesindeki hesaplama hatasının kayma akışında sınır tabakanın yanlış hesaplanmasına da yol açtığını belirtmişlerdir.

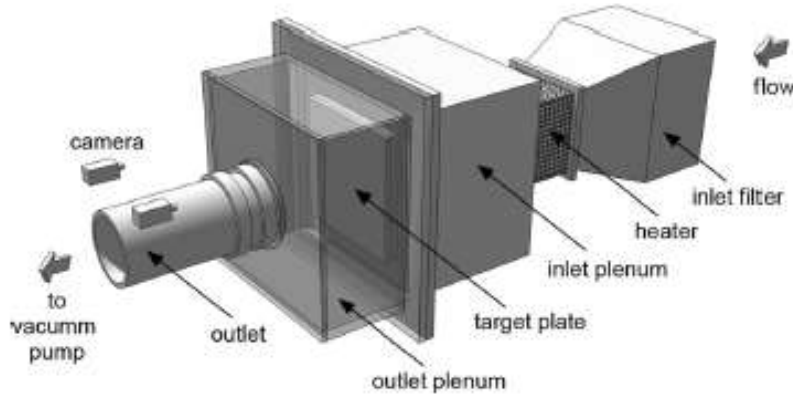
Alimohammadi ve diğ. [8], tekli çarpan jet akışını deneysel ölçümler ve sayısal modeller kullanarak jet Reynolds sayısının zamana bağlı olarak değişiminin ısı transferine olan etkisini incelemişlerdir. Jet hızını periyodik şekilde kare dalga olarak tanımlayan araştırmacılar, bu uygulamanın durma bölgesindeki yerel Nusselt sayısını azaltmasına rağmen ortalama Nusselt sayısını arttırdığını ortaya koymuşlardır. Bunun yanı sıra Alimohammadi ve diğ., uygulanan kare dalganın etkisini kolerasyonlarla belirterek bu uygulamanın ısı transferi üzerindeki etkisinin karakterizasyonunu

yapmışlardır. Çalışmada incelenen değişken jet hızının grafiksel gösterimi Şekil 1.3'te verilmiştir.



Şekil 1.3 : Alimohammadi ve diğ. [8] tarafından tanımlanan sabit ve değişken jet hızının zamana bağlı değişimi.

Xing ve Weigand [9], 81 adet jet içeren çoklu çarpan jet sistemini deneysel olarak inceleyerek plaka ve jet arasındaki mesafenin ısı transferi üzerindeki etkisini farklı çapraz akış durumlarında incelemişlerdir. Yapılan deneylerde jetlerin çarptığı yüzeyde Nusselt sayısı dağılımı Termokromik Sıvı Kristal (Thermochromic Liquid Crystal) ölçüm tekniği kullanılarak ve bir boyutlu zamana bağlı ısı transferi denklemi çözülerek elde edilmiştir. Çalışmada, üç çapraz akış şeması için de jet ve plaka arasındaki mesafenin jet çapının üç katı olduğu durumda diğer durumlara göre daha yüksek ısı performansın elde edildiği gösterilmiştir. Xing ve Weigand [9] tarafından kullanılan deney düzeneği Şekil 1.4'te verilmiştir.



Şekil 1.4 : Deney düzeneği, Xing ve Weigand [9].

Geers ve diğ. [10], altıgen ve hizalı dizilime sahip çoklu jet sistemlerini deneysel yöntemlerle inceleyerek çoklu çarpan jete dair türbülanslı akış yapılarını ve ısı transferini incelemişlerdir. Yapılan deneylerde jetler ve plaka arasında farklı düzlemlerden Parçacık ile Hız Ölçümü (Particle Image Velocimetry-PIV) metodu ile akış yapıları gözlemlenmiş, plaka üzerindeki sıcaklık dağılımı Sıvı Kristal Termografi (Liquid Crystal Thermography) ile gözlenerek ısı transferi ölçülmüştür. Geers ve diğ. [10], durma bölgesinde gözlemlenen Nusselt sayısının jetler arası etkileşimden etkilendiğini belirtmişlerdir. Çalışmada; jetler arasındaki etkileşimin jetler arasındaki mesafenin artması ile azaldığı, jet ve plaka arasındaki mesafenin artması ile arttığı gösterilmiştir. Kullanılan ölçüm teknikleri yardımı ile akış yapılarına dair eksenel ve radyal hız profilleri, türbülans kinetik enerji dağılımları ve türbülans yapıları gibi akış özellikleri detaylıca ortaya konmuştur.

Çalışkan ve diğ. [11] çoklu çarpan jet uygulamalarında eliptik ve dikdörtgen jet kesitlerinin en-boy oranının, jet Reynolds sayısının ve plaka mesafesinin ısı transferi üzerindeki etkisini deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Çalışmada jet geometrilerinin kesit alanları sabit tutulup en-boy oranı değiştirilerek farklı jet kesitleri arasında karşılaştırılabilirlik sağlanmıştır. Lazer Doppler Anemometresi (Laser Doppler Anemometer) kullanılarak hız alanları elde edilmiş ve kızılötesi kamera yardımı ile plaka yüzeyindeki sıcaklıklar ölçülmüştür. Bu çalışmada, elips kesite sahip jetlerin dikdörtgen kesitli jetlere göre daha yüksek ısı performans gösterdikleri ve jet kesitinin en-boy oranının artmasının ısı transferini iyileştirdiği gösterilmiştir.

1.2.3 Çarpan jet akışı ile ilgili sayısal çalışmalar

Deneysel çalışmalar ile (PIV dışında) çoğunlukla çarpan jet akış yapılarına etkileri tüm detaylarıyla ortaya konamamaktadır. Daha geniş bir tasarım uzayında ve ısı ve akış olaylarına ilişkin daha detaylı incelemelerin yapılabilmesi HAD analizleri ile mümkün olmaktadır.

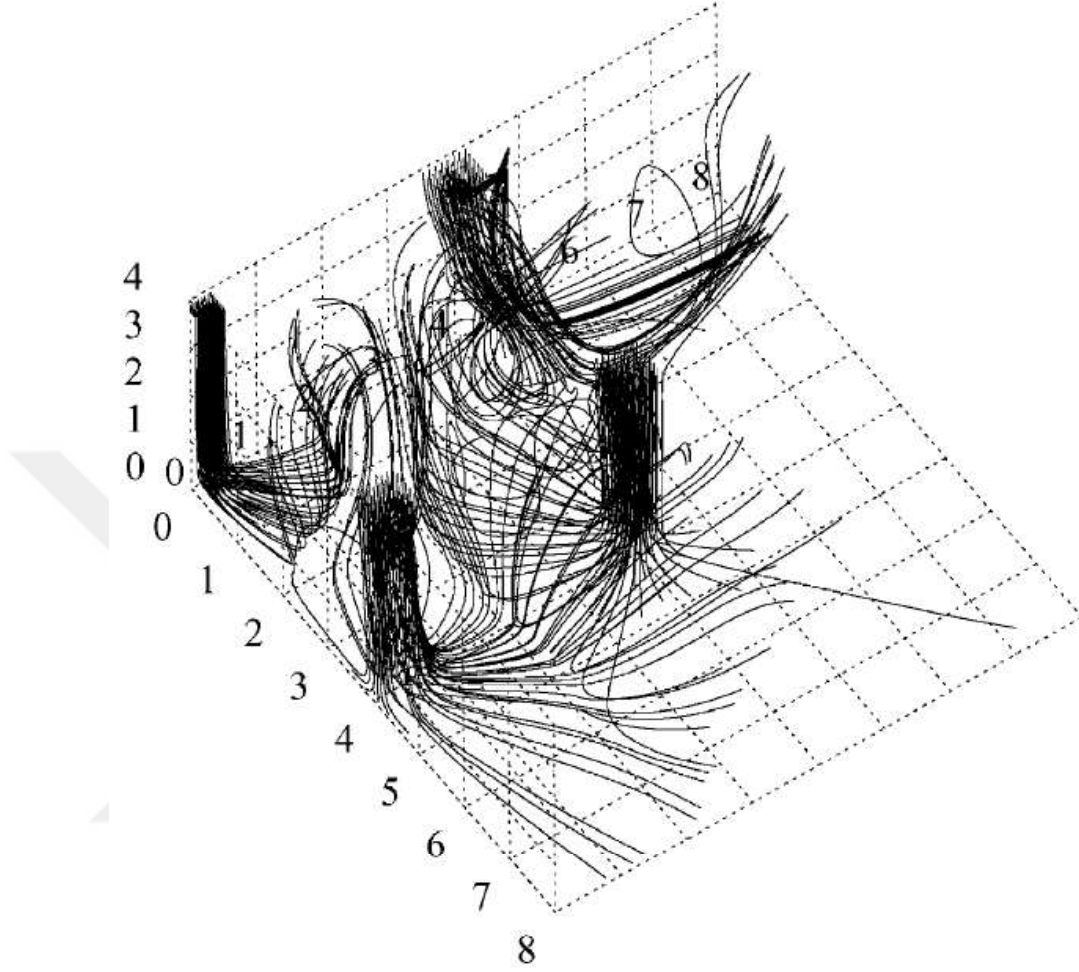
Craft ve diğ. [12] Copper ve diğerlerinin [7] yaptıkları çalışmanın devamı niteliğinde olan çalışmalarında, Cooper ve diğerlerinin [7] elde ettikleri deneysel verileri dört farklı türbülans modeli ile karşılaştırarak çarpan jet akışının modellenmesinde kullanılacak türbülans modeli ile ilgili önerilerde bulunmuşlardır. Çalışma sayesinde

Reynolds gerilmesi türbülans modelinin akışın durma bölgesinde olması gerekenden daha fazla ısı ve momentum transferi verdiği ve duvar civarında yapılan geliştirmelerin sayesinde sayısal modelin daha doğru sonuç verdiğini ortaya koyulmuştur.

Wienand ve diğ. [13], $k-\omega$ SST türbülans modeli ve Kato-Launder limitleyicisinin çarpan jet akışının modellenmesindeki performanslarını Cooper ve diğerlerinin [7] ortaya koyduğu deneysel verileri kullanarak karşılaştırmışlardır. Çalışma kapsamında, Kato-Launder limitleyicisinin kullanımının jetin plakaya olan mesafesinin jet çapına oranının ($H/D=2-6$) olduğu durumlarda, akışın durma bölgesi civarında literatürde bahsedilen [7] hataları azalttığı gösterilmiştir. Bunun aksine jet ve plaka arasındaki mesafenin artması, sayısal hataların artmasına yol açmaktadır. Bunun yanısıra çalışmada $k-\omega$ SST modelinin diğer modellere göre daha tutarlı sonuçlar verdiği ortaya konulmuştur.

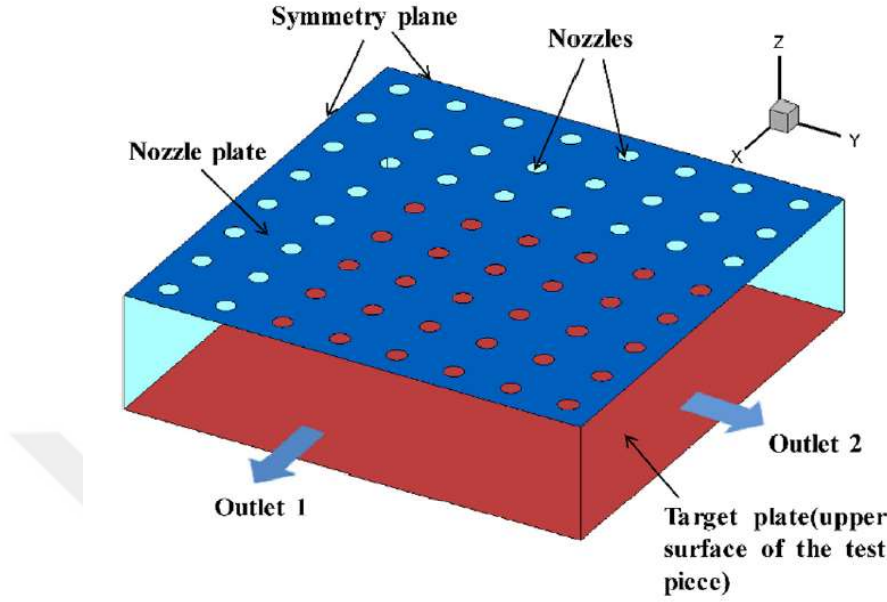
Dutta ve diğ. [14], Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes (RANS) temelli ($k-\epsilon$ ve $k-\omega$) türbülans modelinin çarpan jet akışını modellemekteki başarısını literatürdeki deneysel verileri kullanarak karşılaştırmışlardır. HAD analizlerinde jet akışının türbülans şiddeti ve jet sıcaklığı gibi sınır koşullarının önemli ölçüde etkisi olduğu ifade edilmiştir. Ayırıklaştırma yönteminin çok fazla etkisi olmadığına değinen araştırmacılar, $k-\omega$ türbülans modellerinin durma bölgesinde diğer modellere göre daha başarılı olduğunu göstermişlerdir. Çalışmada $k-\epsilon$ türbülans modellerinin jet-plaka arasındaki mesafenin artması ile deneysel verilere daha uzak sonuçlar verdiği gösterilmiştir.

Thielen ve diğ. [15], dokuz adet jet içeren çoklu çarpan jet sisteminin dairesel ve matris düzene sahip konfigürasyonlarını $k-\epsilon$ ve $\overline{v^2}$ -f türbülans modelleri ile sayısal olarak incelemişlerdir. Çalışmada sınır koşulları ve geometrinin eksenel simetriye sahip olmasına rağmen matris diziliminde akış alanının simetrik olmadığı gözlemlenmiştir. Bunun sonucu olarak matris diziliminde yüzey üzerindeki Nusselt sayısı dağılımlarında simetrinin sağlanmadığı gösterilmiştir. Matris düzenine sahip çoklu çarpan jet sisteminin sayısal yöntemlerle elde edilen akım çizgileri Şekil 1.5’da verilmiştir.



Şekil 1.5 : Matris düzenine sahip çoklu çarpan jet sisteminin sayısal yöntemlerle elde edilen akım çizgileri, Thielen ve diğ [15].

Wen ve diğ. [16], çoklu çarpan jet sistemlerinde jet kesidinin ve diziliminin ısı transferi üzerindeki etkisini HAD analizleri yardımı ile incelemişlerdir. Çalışmada yedi farklı jet profili için toplamda yirmi bir farklı dizilim oluşturulmuş ve farklı plaka mesafeleri için bu konfigürasyonlar değerlendirilmiştir. Çalışmada karşılaştırmalar eşit kesit alanına sahip jet profilleri arasında yapılmıştır. Isı transferinin karşılaştırılmasında kullanılması amacıyla ortalama ısı akısı, ısı akısının iki yönde genlikleri ve standart sapmasını barındıran değişken tanımlanmıştır. Kare ve çiçek desenli jet geometrilerinin soğutulan yüzey üzerinde düzgün olmayan ısı akılarına sebep olduklarını ve dikdörtgen kesitli jetlerin ısı performansının dairesel jetlere göre daha az olduğu belirtilmiştir. Wen ve diğerlerinin [16] kullandığı akış alanı ve sınır şartlarının gösterimi Şekil 1.6’de verilmiştir.



Şekil 1.6 : Çalışmada kullanılan akış alanı ve sınır şartlarının gösterimi, Wen ve diğ. [16].

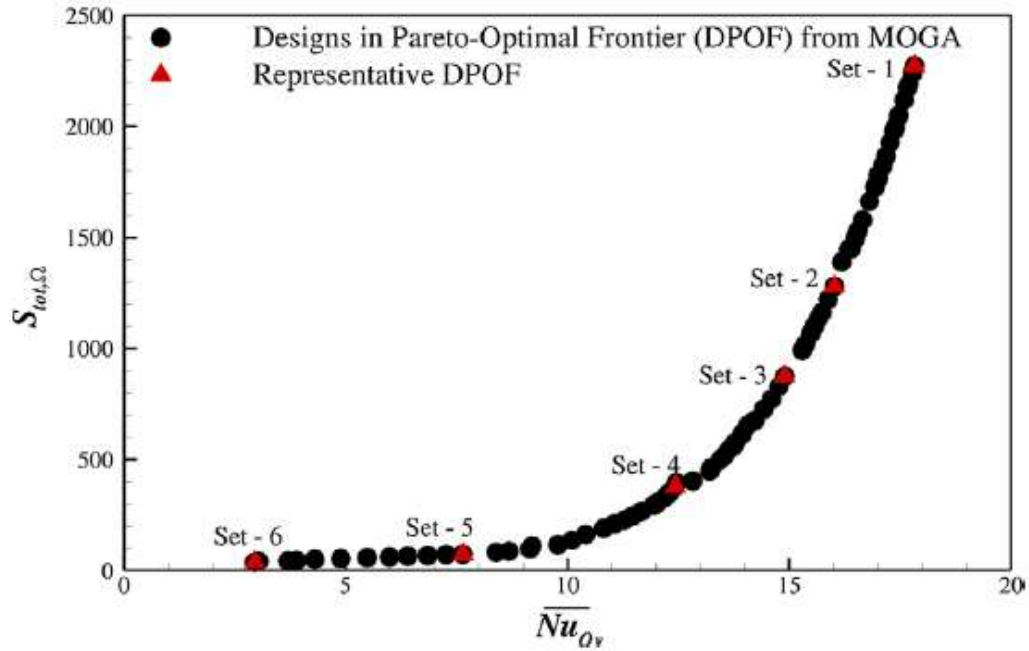
Yerancee ve diğ. [17], çoklu çarpan jet sisteminde hava beslemeli kanal kullanımının ısı transferi üzerindeki etkisini sayısal ve deneysel olarak incelemişlerdir. HAD analizlerinde kullanılan sayısal modelin doğrulama çalışması, kızılötesi kamera yardımı ile ölçümlenen Nusselt sayısı dağılımları ile karşılaştırılarak yapılmıştır. Çalışma kapsamında 30000 jet Reynolds sayısı için, üç farklı kanal çapı ve plaka yüksekliğinde analizler yapılmıştır. Jetler ve plaka arasındaki mesafenin jet çapının altı katı olduğu durumda ve hava beslemeli kanal çapının jet çapının dört katı olduğu durumda plaka üzerindeki ortalama Nusselt sayısının diğer durumlara göre daha yüksek olduğu ortaya konulmuştur.

1.2.4 Çarpan jet akışı ile ilgili optimizasyon çalışmaları

Literatürde görüldüğü üzere çarpan jet sistemleri parametrik olarak incelenmiştir. İncelenen tasarım parametresi uzayında optimum çözümlerin bulunabilmesi için ise sistematik yaklaşımlara ihtiyaç duyulmaktadır. Bu sebeple belirlenen hedef fonksiyonları için tasarım iyileştirmesi çalışmalarında optimizasyon algoritmaları kullanılmalıdır.

Lam ve Parakash [18], çoklu çarpan jet ile soğutmada tasarım optimizasyonu uygulamıştır. Çalışmada her jetin farklı debi ile beslendiği sistemde Reynolds sayısı,

jetler arasındaki hız oranı ve plaka mesafesi parametrelerini tasarım parametresi olarak belirlenmiştir. Akışın yapısının anlaşılması için akışın modları Uygun Ortogonal Ayırım (Proper Ortogonal Decomposition-POD) metodu ile ortaya konulmuştur. Çok hedef fonksiyonlu genetik algoritmanın kullanıldığı çalışmada ortalama ısı transferinin artırılması ve entropi üretiminin azaltılması hedeflenmiştir. Elde edilen Pareto cephesinde farklı isteklere cevap verebilecek birçok çözüm elde edilmiştir. Çalışma sonucunda elde edilen Pareto cephesi Şekil 1.7’de verilmiştir.



Şekil 1.7 : Lam ve Parakash [18] tarafından elde edilen Pareto cephesi.

Ndao ve diğ. [19], elektronik ürünlerin soğutulmasında kullanılan farklı teknolojileri karşılaştırmak amacıyla her bir tasarımı eşit koşullarda inceleyerek her biri için optimizasyon çalışması yapmışlardır. Mikro kanallı ısı değiştiricisi, düz ve şaşırtmalı dizilime sahip silindirik kanatlı ısı değiştiricileri, ötelenmiş şerit kanatlı ısı değiştiricisi, tekli ve çoklu çarpan jet sistemleri çalışma kapsamında karşılaştırılmıştır. Çalışmada MATLAB içerisinde bulunan optimizasyon arayüzü kullanılmıştır. Sabit basınç farkı ve ısıtma yüzeyi için yapılan optimizasyon işleminde hedef fonksiyonu olarak ısı direnç ve akışkan gücü gereksinimi seçilmiştir.

Kadiyala ve Chattopadhyay [20] laminar dikdörtgen kesitli çarpan jet akışının ısı transferi performansını iyileştirmek amacıyla optimizasyon yapılmıştır. Çalışmada HAD analizleri ile elde edilen veriler oluşturulan yapay sinir ağının eğitimi için

kullanılmıştır. Yapay sinir ağı ile elde edilen model, optimizasyon algoritmasında kullanılmıştır. Optimizasyonu yapılan tasarım parametreleri sırasıyla jetler arası mesafe, jet-plaka mesafesi ve jet Reynolds sayısıdır. Plaka üzerindeki ortalama Nusselt sayısının hedef fonksiyonu olarak seçildiği çalışmada mikro genetik algoritma ve genetik algoritma kullanılmıştır. Çalışmada mikro genetik algoritmanın genetik algoritmadan yaklaşık iki kat hızlı olduğunu belirtilmiştir.

Yang ve diğ. [21], dikdörtgen kesitli çarpan su jeti akışının ısı transferini arttırmak amacıyla optimizasyon yapmışlardır. Kanal geometrisinin tasarım parametresi olarak incelendiği çalışmada hedef fonksiyonu ortalama Nusselt sayısı olarak seçilmiştir. Çalışmada Response Surface Method (RSM) kullanılarak elde edilen ve HAD analizlerinin sonuçları ile tutarlılığı ispatlanan model genetik algoritma ile entegre edilmiştir. Yapılan optimizasyon sonucunda ortalama Nusselt sayısında %10 artış görülmüştür.

Heo ve diğ. [22], çapraz akış durumundaki elips şeklindeki çarpan jet sisteminin ısı transferinin arttırmak amacıyla geometrik optimizasyonunu yapmışlardır. Çalışmada parametrik inceleme sonucunda elde edilen verilerle, sinir ağı kullanılarak tasarım sınırları içerisinde ortalama Nusselt sayısı için geçerli interpolasyon fonksiyonu oluşturulmuştur. Çalışma neticesinde referans tasarıma göre %7.89 daha yüksek ortalama Nusselt sayısına sahip tasarımlar elde edilmiştir.

Yukarıda özetlenen literatür araştırması sonucunda aşağıdaki bulgulara ulaşılmıştır:

- Çoklu çarpan jet sistemleri, literatürde çoğunlukla bir yüzeyi soğutmada kullanılmıştır. Çoklu çarpan jet akışında kütle veya momentum transferi tüm detaylarıyla incelenmemiş bir konudur.
- Çarpan jet sistemleri ile ilgili yapılan optimizasyon çalışmaları için:
 - Literatürde çoklu çarpan jet sistemlerinin optimizasyonu güncel çalışma konuları arasındadır.
 - Çalışmalarının önemli bir çoğunluğu sistemin ısı transferini iyileştirme amaçlıdır.
 - Çalışmalarının çoğunluğu klasik mühendislik uygulamalarının yapısına aykırı olacak şekilde tek hedef fonksiyonununa sahiptir.

- Çalışmaların büyük çoğunluğunda yapay sinir ağları ve tepki yüzey metodu gibi yöntemler kullanılarak oluşturulmuş vekil modeller kullanılmıştır. Deneysel veya sayısal yöntemlerden elde edilen sonuçlar kullanılarak türetilen bu modellerde ihmal edilen hatalar mevcuttur.

1.3 Tezin Özgün Değeri

Literatürde bulunan diğer çalışmaların aksine bu tez çalışması kapsamında çoklu çarpan jet sistemi pnömatik temassız taşıma sistemi olarak ele alınmıştır. Oluşturulan HAD modelinin doğrulama çalışması literatürdeki dört farklı deneysel çalışmadan elde edilen veriler kullanılarak yapılmıştır. Sayısal modelin oluşturulması aşamasında birçok model değişkeninin etkisi incelenerek geniş bir parametre aralığı için deneysel verilerle tutarlı sonuçlar sağlayan geçerli bir HAD modeli oluşturulmuştur. MATLAB programında, ANSYS Fluent 17.2 ile bütünleşik olarak çalışan çok hedef fonksiyonlu genetik algoritma temelli optimizasyon programı kodlanmıştır. Optimizasyon algoritmasının HAD analiz programının arayüzü ile bütünleşik olması ile vekil modellerden kaynaklanabilecek hataların önüne geçilmiştir. Bu bağlamda, söz konusu tezin literatüre katkı sağlaması ve ilgili alandaki boşluğu doldurması beklenmektedir.



2. HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ ÇALIŞMALARI

2.1 Giriş

HAD analizleri, pek çok ısı-akış olayını özellikle deneysel yöntemleri uygulamanın zor olabileceği durumlarda akış olaylarını incelemek için kullanılır. Deney düzeneklerindeki ölçüm aletlerinin pahalı olması, deneyin tekrarlanamaması, deneysel ölçümlerle tüm akış alanına ait bilgi edinilememesi ve sınır şartlarının sağlanmasındaki zorluklar gibi sebeplerden dolayı günümüzde deneysel yöntemler yerine sayısal yöntemler tercih edilmektedir.

Gelişen bilgisayar kapasiteleri sebebiyle HAD analizlerine yönelim hızlanarak artmaktadır. Buna karşın, oluşturulan sayısal modellerin güvenilirliğinin kanıtlanması gerekmektedir. HAD analizi için sayısal model oluşturulurken; inceleme için yeterli büyüklükte akış alanının oluşturulduğundan, yeterli kalitede ve yoğunlukta çözüm ağının kullanıldığından, çözülen denklemlerin, sınır şartlarının doğruluğundan ve elde edilen sayısal yakınsamanın makul seviyede olduğundan emin olunması gerekmektedir. Bu amaçla HAD analizi için oluşturulan sayısal modellerden elde edilen sonuçlar aynı akış için literatürdeki farklı deneysel, sayısal veya teorik çalışmaların sonuçlarıyla karşılaştırılarak doğrulama çalışması yapılması gerekir.

Bu bölümde çarpan jet akışının sayısal olarak incenmesi için geliştirilen HAD modelinin detayları aktarılmıştır. HAD modelinin ortaya koyulması sırasında; akışkanlar dinamiğinin teorik alt yapısının incelenmesi, akış hacminin ve çözüm ağının oluşturulması, uygun türbülans modelinin belirlenmesi, model değişkenlerinin etkisi üzerine incelemeler ve doğrulama çalışmalarının sonuçlarının derlenmesi gibi farklı aşamalar alt bölümler içerisinde ifade edilmiştir. Geniş çalışma aralıklarında yüksek doğrulukta sonuçların elde edilebileceği sayısal modelin oluşturulabilmesi için literatürdeki dört farklı doğrulama çalışması kullanılarak tekli ve çoklu çarpan jet akışında ısı ve momentum transferi incelenmiştir.

2.2 Yöneten Denklemler

Mühendislik problemlerini incelerken, öncelikle ele alınan problemin matematiksel modelinin belirlenmesi gerekir. Böylece çözüme başlamadan önce probleme özgü kabuller ve yaklaşımlar belirlenerek matematiksel olarak ilgili korunum olaylarının hangi denklemlerle ifade edileceği belirlenmiş olur. Tez çalışması kapsamında çoklu çarpan jet akışı incelendiğinden bu bölümde HAD analizlerinde çözülecek olan yöneten denklemler incelenecektir.

Çarpan jet akışının sayısal yöntemlerle incelenmesi sırasında aşağıdaki kabuller yapılmıştır:

- İncelenen akış daimidir; bir başka deyişle değişkenlerin zamana bağlı değişimleri ihmal edilmiştir.
- Düşük jet Mach sayısında ($Ma_{jet} < 0.25$) inceleme yapıldığından akışın sıkıştırılmaz olduğu kabul edilmiştir.
- Çarpan jet akışı türbülanslıdır.

Türbülanslı akışlar laminar akışların aksine kararsız yapıdadırlar. Türbülanslı akışlarda gözlenen kaotik durum akış alanındaki hız ve basınç gibi skaler değişkenlerin zamana bağlı bir kararsızlığa sahip olmalarına neden olur. Bu nedenle, HAD analizlerinde türbülans modeli kullanılması gerekir. Tez çalışması kapsamında Reynolds Ortalamalı Navier Stokes (RANS) türbülans modelleri karşılaştırılmış ve incelenmiştir. RANS modellerinde değişkenlerin zaman ortalaması ve ortalama nazaran ihmal mertebesinde çalkantı değeri tanımlanır. Akış alanındaki herhangi bir skaler değişkeni (θ) RANS tabanlı türbülans modelleri denklem 2.1’de belirtildiği üzere ortalama ve çalkantı olarak değişkeni iki parçaya inceler [23].

$$\Theta = \bar{\Theta} + \Theta' \quad (2.1)$$

Denklem 2.1’de eşitliğin sağ tarafındaki ilk terim zaman ortalamasını temsil ederken ikinci terim zamana bağlı kararsızlığı (çalkantıyı) ifade eder.

Yukarıdaki belirtilen prensibe göre düzenlenen korunum denklemlerinde karışıklık olmaması açısından üst çizgisiz değişkenlerin zaman ortalaması alınmış değişkenler olduğu belirtilmelidir. Zaman ortalaması operatörünün tüm denklemler boyunca var olması denklemlerin anlaşılmasında zorluk oluşturacağından gösterimde bu şekilde bir basitleştirilmeye gidilmiştir.

Kartezyen koordinatlarda üç boyutlu süreklilik denklemi, türbülanslı akışlar için kapalı formda yazılmış momentum korunumu (Navier-Stokes denklemleri) ve enerjinin korunumu sırasıyla denklem 2.2, denklem 2.3 ve denklem 2.4'de [23] verilmiştir:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (2.2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = & -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \\ \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \right) \right] & + \frac{\partial}{\partial x_j}(-\rho \overline{u_i' u_j'}) \end{aligned} \quad (2.3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot (\vec{v}(\rho E + p)) = \nabla \cdot \left(k_{eff} \nabla T - \sum_j h_j J_j + (\bar{\tau}_{eff}) \right) + S_h \quad (2.4)$$

Doğrulama çalışmaları kapsamında türbülans modellerinin karşılaştırması yapılarak çoklu çarpan jet sisteminin modellenmesindeki başarıları kıyaslanmıştır. Yapılan karşılaştırma sonucunda literatürdeki benzer çalışmalarla uyumlu şekilde k- ω SST türbülans modeli k- ϵ türbülans modellerine göre daha iyi sonuçlar vermiştir. k- ω SST türbülans modelinin akış ayrılmalarını, durma bölgesinde ısı transferini ve ters basınç gradyenlerini diğer türbülans modeli konfigürasyonlarına göre daha başarılı şekilde hesapladığı görülmüştür.

k- ω SST türbülans modeli serbest akış bölgesinde k- ϵ tabanlı türbülans modeli çözümlerini kullanırken sınır tabakada k- ω türbülans modelini çözmektedir. Menter tarafından literatüre kazandırılmış olan k- ω SST [24] türbülans modeline ait yöneten denklemler türbülans kinetik enerjisi (k), türbülans yitim frekansı (ω) ve türbülans yitim hızı (ϵ) ile ilgili korunum denklemleridir. Elde edilen farklı çözümlerin (k- ϵ ve k- ω) harmanlanması ile k- ω SST çözümünü oluşturur. Denklem sabitlerinin harmanlama işlemi denklem 2.5'te verilmiştir.

$$\phi = K_1 \phi_1 + (1 - K_1) \phi_2 \quad (2.5)$$

Denklem 2.5'te 1 alt indisi k- ω modelini ifade ederken 2 alt indisi k- ϵ modelini ifade eder.

k- ω SST turbulence solves both k- ω and k- ϵ models and sums the weighted results with respect to F1 value. Orjinal k- ω modeli denklem 2.6 ve 2.7' de verilmiştir:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j k)}{\partial x_j} = \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \beta^* \rho \omega k + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma_{k1} \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (2.6)$$

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j \omega)}{\partial x_j} = \frac{\gamma_1}{v_t} \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \beta_1 \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma_{\omega 1} \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] \quad (2.7)$$

Dönüştürülmüş k- ϵ modeli denklem 2.8 ve 2.9'da verilmiştir:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j k)}{\partial x_j} = \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \beta^* \rho \omega k + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma_{k2} \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (2.8)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j \omega)}{\partial x_j} = & \frac{\gamma_2}{v_t} \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \beta_2 \rho \omega^2 \\ & + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma_{\omega 2} \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + 2 \frac{\rho \sigma_{\omega 2}}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \end{aligned} \quad (2.9)$$

Orjinal k- ω modeli (1 alt indisli) için denklem sabitleri denklem 2.10'da verilmiştir.

$$\sigma_{k1} = 0.85, \sigma_{w1} = 0.5, \beta_1 = 0.075, \beta^* = 0.09, a_1 = 0.31, \kappa = 0.41$$

$$\gamma_1 = \frac{\beta_1}{\beta^*} - \frac{\sigma_{w1} - \kappa^2}{\sqrt{\beta^*}} \quad (2.10)$$

Dönüştürülmüş k- ϵ modeli (2 alt indisli) için denklem sabitleri denklem 2.11'de verilmiştir.

$$\sigma_{k2} = 1.0, \sigma_{w2} = 0.856, \beta_2 = 0.0828, \beta^* = 0.09, \kappa = 0.41$$

$$\gamma_2 = \frac{\beta_2}{\beta^*} - \frac{\sigma_{w2} - \kappa^2}{\sqrt{\beta^*}} \quad (2.11)$$

k- ω SST modelinde türbülans viskozitesi denklem 2.12 gösterildiği şekilde tanımlanmıştır. Denklem 2.12 içerisinde bulunan terimler sırasıyla denklem 2.13 ve 2.14'te tanımlanmıştır.

$$\mu_t = \frac{\rho a_1 k}{\max(a_1 \omega; \Omega K_2)} \quad (2.12)$$

$$K_2 = \tanh(\arg_2^2) \quad (2.13)$$

$$\arg_2 = \max\left(2 \frac{\sqrt{k}}{\beta^* \omega d}, \frac{500\nu}{d^2 \omega}\right) \quad (2.14)$$

Denklem 2.12’de bulunan Ω mutlak vortisitedir. Reynolds kayma gerilmesi tensörü ve kayma tanımlaması sırasıyla denklem 2.15 ve 2.16’da belirtilmiştir.

$$\tau_{ij} = \mu_t \left(2S_{ij} - \frac{2}{3} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (2.15)$$

$$\delta_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (2.16)$$

İki model için türbülans değişkenleri Navier-Stokes denklemlerinden elde edilen hız alanı, yoğunluk bilgileri ve yukarıdaki model parametreleri yardımıyla hesaplanır. Harmanlama işlemi için K_1 harmanlama fonksiyonu denklem 2.17-2.19’de ifade edilmiştir.

$$K_1 = \tanh(\arg_1^4) \quad (2.17)$$

$$\arg_1 = \min \left[\max \left(\frac{\sqrt{k}}{\beta^* \omega d}, \frac{500\nu}{d^2 \omega} \right), \frac{4\rho \sigma_{\omega 2} k}{CD_{k\omega} d^2} \right] \quad (2.18)$$

$$CD_{k\omega} = \max \left(2\rho \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}, 10^{-20} \right) \quad (2.19)$$

Denklem 2.18’te yer alan d değeri duvara olan mesafedir. Denklem 2.17-2.19’dan anlaşılacağı üzere d değeri ile K_1 değeri ters orantılıdır. Bunun sonucu olarak duvardan uzak serbest akış alanında k - ω denkleminin çözüme etkisi azalmaktadır.

Tez çalışması kapsamında yapılan HAD analizlerinde yukarıda detayları bahsedilen denklemlerin çözümü için SIMPLE algoritması kullanılmıştır. Süreklilik, momentum, türbülans ve enerji denklemlerinin yakınsama kriterleri sırası ile 10^{-3} , 10^{-4} , 10^{-4} ve 10^{-6} olarak belirlenmiştir.

2.3 Tekli Çarpan Jet Akışının Sayısal Modeli

Tez kapsamında oluşturulan HAD modelinin doğrulama çalışmaları sırasında üzerinde çalışılan akış ilk aşamada basitleştirilerek tek jet içeren çarpan jet sistemleri incelenmiştir. Tek jet içeren sistemler üzerinde yapılan çalışmalar sonucunda ortaya konulan HAD modeli özellikleri çoklu jet sistemlerinde kullanılacak HAD modeli için temel teşkil etmektedir. Böylece çoklu çarpan jet sistemleri için HAD modeli oluşturulması sırasında tek jet içeren çarpan jet sistemlerinin incelenmesi ile çoklu çarpan jet sistemlerindeki her bir jetin daha doğru modellenmesi hedeflenmiştir.

Doğrulama çalışmalarının ısı ve momentum transferi olarak iki aşamada gerçekleştirilmiştir. Bu sayede oluşturulacak olan HAD modelinin genel bir geçerliliğinin olması hedeflenmiştir.

Literatür araştırmasında da belirtildiği üzere çarpan jet sistemleri genellikle ısı transferi açısından incelenmiş olup momentum transferi veya pnömatik taşıma kuvveti sonuçlarına rastlanılmamaktadır. Bu nedenle momentum transferi açısından oluşturulacak olan HAD modelinin doğrulanması için literatürdeki hız profilleri verileri ile karşılaştırma yapılmıştır. Oluşturacak olan HAD modelinin ısı transferi sonuçlarının doğrulanması için literatürdeki çalışmalarda bulunan çarpan plaka üzerindeki Nusselt sayısı dağılımları karşılaştırılmıştır.

Tek bir skaler veri yerine bir profil üzerinden yapılacak karşılaştırma akış karakteristiğinin doğru modellendiğinin ortaya koyan daha kesin bir karşılaştırmadır. Bu sebeple ısı ve momentum transferi için doğrulama çalışmaları sırasında karşılaştırılacak veriler sırasıyla plakadaki yerel Nusselt sayısı dağılımı ve hız profili olarak belirlenmiştir.

2.3.1 Isı transferinin doğrulanması

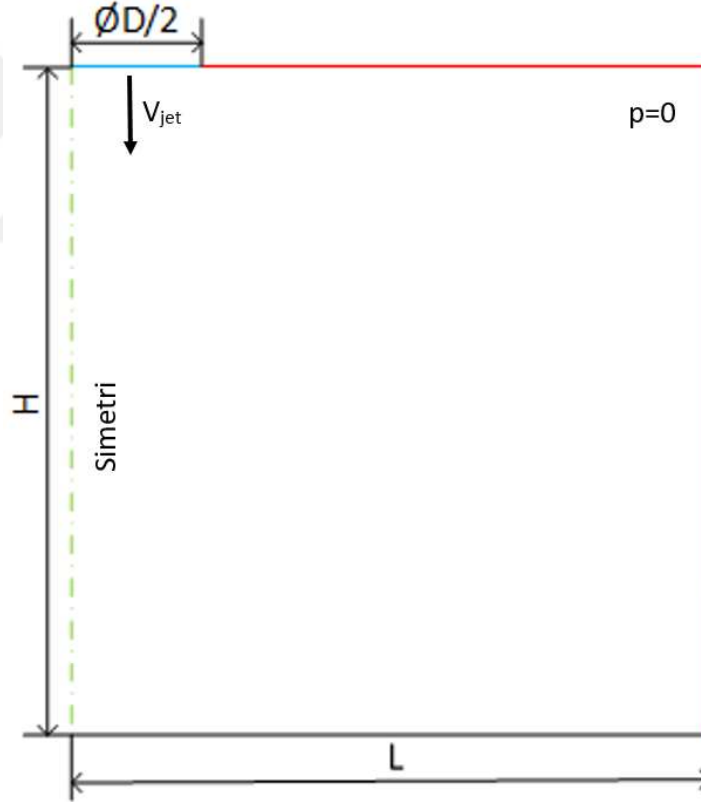
Tek jet içeren jet sisteminin ısı transferi hesaplarının doğrulanması için referans çalışma olarak Alimohammadi ve diğerlerinin [8] çalışmasında doğrulama için kullandıkları deneysel veriler kullanılmıştır. Çalışmada farklı jet Reynolds sayısı, jet ve plaka arasındaki mesafe ve jet çapı için kapsamlı deneysel ve sayısal veriler bulunmaktadır. Doğrulama çalışmalarında kullanılan konfigürasyon detayları Çizelge 2.1’de verilmiştir.

Çizelge 2.1 : Doğrulama çalışmasında kullanılan konfigürasyonların detayları.

Konfigürasyon İsmi	H/D_{jet}	D_{jet} [mm]	Re_{jet}
C1	1	13	6000
C2	2	13	6000
C3	2	5	10000
C4	2	5	14000

2.3.1.1 Akış hacminin ve çözüm ağının oluşturulması

İncelenen çalışmada geometri ve sınır şartları jet eksenine göre eksenel simetriye sahiptir. Hesaplama maliyetinin azaltılması amacıyla eksenel simetriye sahip iki boyutlu akış hacmi incelenmiştir. Akış alanının iki boyutlusu şeması Şekil 2.1’de verilmiştir.

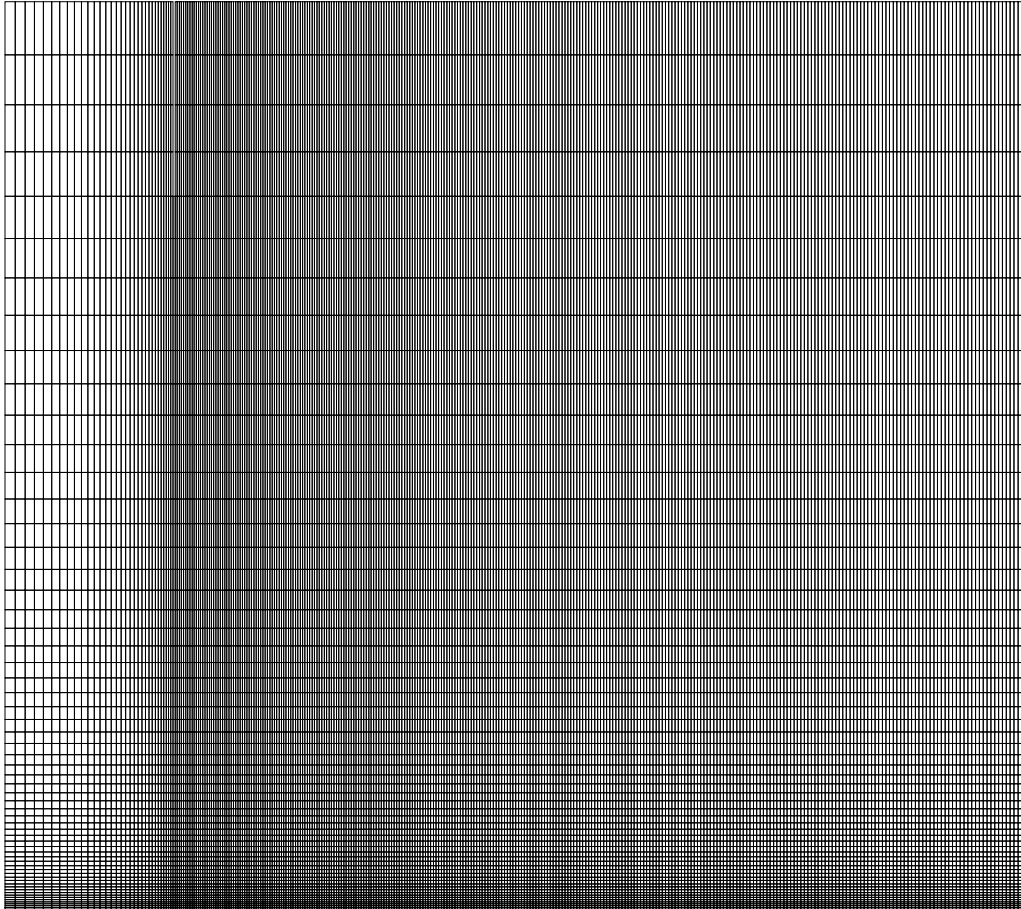


Şekil 2.1 : Doğrulama çalışmasına ait geometrik parametreler [8].

Doğrulama çalışmaları sırasında sınır koşullarının akış alanına etki etmemesi için kontrol hacmini belirleyen L uzunluğu jet çapının (D_{jet}) otuz katı olacak şekilde belirlenmiştir. Bu sayede yeterince geniş bir hesaplama alanı için inceleme yapılarak akışın sınır şartlarından etkilenmediğinden emin olunmuştur.

Çözüm ağı ANSYS Meshing programı ile oluşturulmuştur. Akış hacminin dikdörtgen yapıda olması sebebiyle aynı şekilde dikdörtgen elemanlardan oluşturulmuş yapısal çözüm ağı oluşturulmuştur. Yapısal çözüm ağının kullanımı sayesinde çözüm ağı kalitesini etkileyen önemli bir parametre olan çarpıklık açısından kaliteli bir çözüm ağı elde edilmiştir.

Sınır tabaka ve hava jetinde gözlemlenmesi beklenen hız gradyeninin daha detaylı incelenebilmesi için duvar ve hava jetinin civarında çözüm ağında sıklaştırmalar yapılmıştır. Sıklaştırma işleminde çözüm ağı kalitesinden taviz vermemek adına oluşturulan elemanların en boy oranının 100'ü geçmemesine dikkat edilmiştir. C1 konfigürasyonu için oluşturulmuş iki boyutlu çözüm ağı Şekil 2.2'de gösterilmiştir.



Şekil 2.2 : Oluşturulan iki boyutlu çözüm ağı.

2.3.1.2 Sınır şartlarının belirlenmesi

İncelenen akış hacminde; hava jeti, simetri eksen, havanın yayıldığı sınır, ve çarpan plaka olmak üzere dört adet sınır bulunmaktadır. İki boyutta yapılan incelemede bu sınırlar dikdörtgensel akış hacminin kenarlarını oluşturmaktadır.

Hava jetinin sınır şartı olarak tanımlanmasında hız giriş sınır koşulu tanımlanmıştır. Jet hızı, jet Reynolds sayısı, nozül çapı ve hava için termofiziksel özellikleri kullanılarak denklem 2.20'den bulunmuştur. Jet sıcaklığı 295.15 °K olarak belirlenmiştir.

$$V_{jet} = \frac{Re_{jet}\mu}{\rho D_{jet}} \quad (2.20)$$

Türbülanslı akışlarda kullanılan türbülans modeline bağlı olarak hız giriş sınır koşulunun tanımlanması için ilave bilgilere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu çalışma kapsamında iki denklemlilik türbülans modelleri kullanıldığından hava jetinin hız giriş sınır koşulu için türbülans şiddeti ve hidrolik çap bilgileri de tanımlanmalıdır. Tam gelişmiş iç akışlar için türbülans şiddeti ve hidrolik çapın tanımları sırasıyla denklem 2.21 ve 2.22'de verilmiştir.

$$I = 0.16xRe^{(-\frac{1}{8})} \quad (2.21)$$

$$D_h = \frac{4xAlan}{Islak \ Çevre} \quad (2.22)$$

Eksenel simetri sınır şartı herhangi bir θ değişkeni için denklem 2.23 ile tanımlanmış olup, değişkenin simetri yüzeyinde dik yönlerde (n yönü) birinci mertebe türevin sıfıra eşit olduğunu ifade eder.

$$\frac{\delta\theta}{\delta n} = 0 \quad (2.23)$$

Çarpan plaka için kaymazlık sınır şartı ile beraber ısı sınır şartı tanımlanmış olup duvar sıcaklığı sabit 333.15 °K olarak belirlenmiştir. Çarpan plaka için tanımlanan kaymazlık sınır şartı denklem 2.24'te belirtilmiştir.

$$u = v = w = 0 \quad (2.24)$$

Havanın akış hacminden ayrıldığı sınır için HAD modelinde basınç çıkış sınır koşulu verilerek bu sınır boyunca statik basınç 0 atm (etkin) basınç olarak tanımlanmıştır. Basınç çıkış sınır şartı denklem 2.25’de verilmiştir.

$$p = 0 \quad (2.25)$$

Basınç çıkış sınır şartının tanımlandığı yüzeylerden akış hacmine giren yapan akışın özellikleri de sınır koşulu dahilinde tanımlanmalıdır. Pekçok HAD analizinde basınç çıkışındaki geri akış (backflow) için sıcaklık ve türbülans özellikleri hız giriş sıcaklığındaki atmosfer göz önünde bulundurularak tanımlanmıştır.

2.3.1.3 Türbülans modelinin seçilmesi

Tekli ve çoklu çarpan jet uygulamalarına yönelik literatür araştırması sonucunda HAD analizlerinde birçok farklı türbülans modelinin kullanıldığı görülmüştür. Literatürden genelinde k- ω ve k- ϵ türbülans modelleri kullanılmış olsa da $\overline{v^2}$ -f ve Reynolds gerilme modelinin (Reynolds Stress Model) de kullanıldığı çalışmalar bulunmaktadır.

Tez çalışması kapsamında k- ω ve k- ϵ türbülans modelleri içerisinde karşılaştırma yapılmıştır. Türbülans modellerinin akışı modellemekteki başarısı, Nusselt sayısı dağılımının Çizelge 2.1’deki C1 konfigürasyonuna ait deneysel verilerle karşılaştırılması ile ölçülmüştür.

Türbülans modellerinin sınır tabakayı modellemedeki başarısı sınır tabaka ve hız gradyanlerinin olduğu bölgedeki çözüm ağı kalitesine bağlıdır. Türbülans modelleri için duvar kenarındaki boyutsuz hücre yüksekliği (hücre Reynolds sayısı) için kıstaslar bulunmaktadır. İlgili türbülans modelinin türbülans değişkenleri ve akış içerisindeki vorteksli yapılarını yüksek doğrulukta hesaplayabilmesi için bu gereksinimleri karşılayan çözüm ağlarının oluşturulması gerekir. Yapılan karşılaştırmada duvar civarında yapılan sıklaştırmada karşılaştırılan türbülans modellerinin boyutsuz hücre yüksekliği gereksinimleri gözetilerek uygun şekilde sıklaştırma yapılmıştır. Bunun yanı sıra her bir türbülans modeli için de farklı boyutsuz hücre yüksekliğinde analizler

yapılarak genel bir karşılaştırma sağlanmıştır. Duvardaki boyutsuz hücre yüksekliğinin tanımı denklem 2.26'de belirtilmiştir.

$$y^+ \equiv \frac{u^* y}{\nu} \quad (2.26)$$

Denklem 2.26'daki u^* kayma hızı, y çözüm ağında duvar sınır koşulunun tanımlandığı sınırdaki ilk hücre yüksekliği ve ν akışkanın kinematik viskozitesidir. Kayma hızı denklem 2.27'de belirtilmiştir.

$$u^* = \sqrt{\frac{\tau}{\rho}} \quad (2.27)$$

Çarpan jet akışının sayısal modelinde kullanılacak türbülans modelinin seçilmesi için yapılan karşılaştırmada kullanılan modeller Çizelge 2.2'de verilmiştir.

Yirmi dokuz farklı türbülans modeli için farklı çözüm ağları için toplam 117 adet HAD analizinin sonuçları incelenerek yapılan karşılaştırmanın sonucunda $k-\omega$ SST türbülans modelinin $k-\epsilon$ türbülans modeline göre çarpan jet akışının modellenmesinde daha başarılı olduğu görülmüştür. Yukarıda detayları bahsedilen karşılaştırmalar sonucunda $k-\omega$ SST türbülans modelinin tez çalışması kapsamındaki HAD analizlerinde kullanılmasına karar verilmiştir.

2.3.1.4 Sayısal modelin iyileştirilmesi

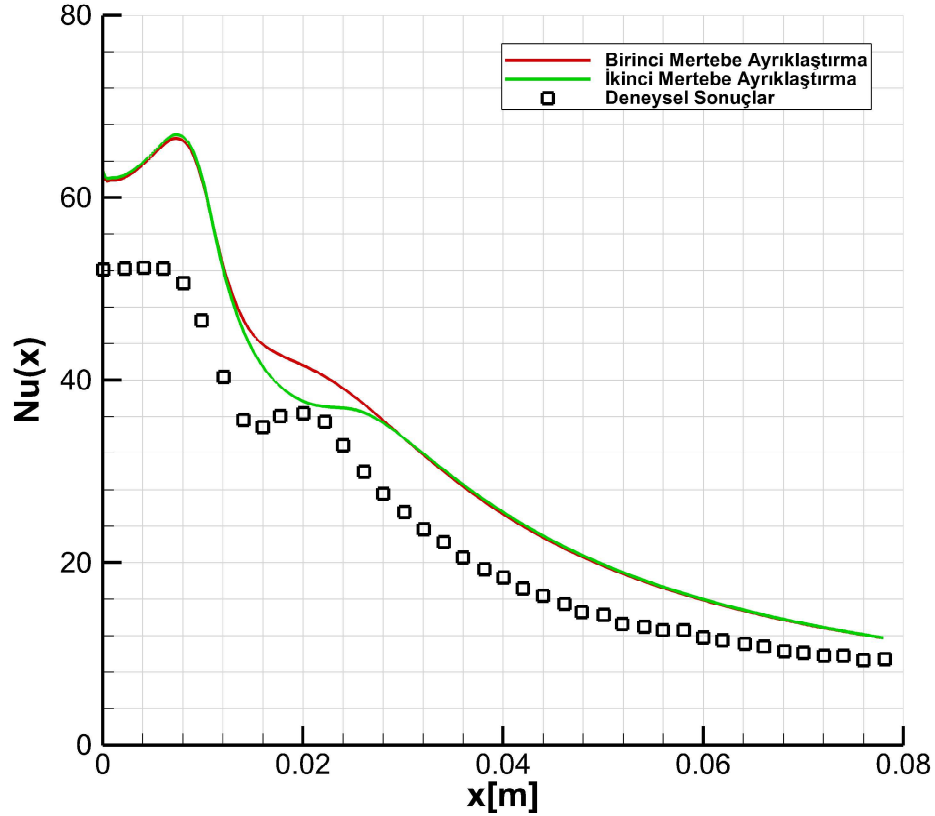
Isı ve akış olaylarının incelenmesi için yapılan HAD çalışmalarında, oluşturulan sayısal modelin akışı doğru şekilde çözebilmesi için tüm model girdilerinin doğru tanımlanması ve çözüm yöntemlerinin uygun şekilde seçilmesi gerekmektedir. Bu bölümde çarpan jet akışının sayısal olarak incelenmesi için oluşturulan HAD modelinde geometri, çözüm ağı ve türbülans modelinin dışında sayısal modelin diğer özelliklerinin etkilerine değinilmiştir.

Akış ve ısı transferinin çözümünde kullanılan kısmi diferansiyel denklemleri sayısal yöntemlerle çözmek için, kısmi türev terimleri, bilgisayarların cebirsel denklem takımları halinde çözülebilmesi için ayrıklaştırılmalıdır. Tez kapsamında sayısal modeller oluşturulmasında ve akışın çözülmesinde Sonlu Hacimler Metodu (Finite Volume Method) kullanarak ayrıklaştırma yapan ANSYS-Fluent yazılımı kullanılmıştır. Türevlerin sayısal olarak ayrıklaştırılması sırasında kullanılan yöntem

Çizelge 2.2 : Türbülans modeli araştırmasında incelenen modeller.

Model İsmi	Türbülans Modeli	Model Detayı	Duvar Fonksiyonu
Case 1	k-epsilon	Standart	Sandart Wall Function
Case 2	k-epsilon	Standart	Scalable Wall Function
Case 3	k-epsilon	Standart	Non-Equilibrium Wall Function
Case 4	k-epsilon	Standart	Enhanced Wall Treatment
Case 5	k-epsilon	Standart	Menter-Lencher
Case 6	k-epsilon	RNG	Sandart Wall Function
Case 7	k-epsilon	RNG	Scalable Wall Function
Case 8	k-epsilon	RNG	Non-Equilibrium Wall Function
Case 9	k-epsilon	RNG	Enhanced Wall Treatment
Case 10	k-epsilon	RNG	Menter-Lencher
Case 11	k-epsilon	RNG	Sandart Wall Function
Case 12	k-epsilon	RNG	Scalable Wall Function
Case 13	k-epsilon	RNG	Non-Equilibrium Wall Function
Case 14	k-epsilon	RNG	Enhanced Wall Treatment
Case 15	k-epsilon	RNG	Menter-Lencher
Case 16	k-epsilon	Realizable	Sandart Wall Function
Case 17	k-epsilon	Realizable	Scalable Wall Function
Case 18	k-epsilon	Realizable	Non-Equilibrium Wall Function
Case 19	k-epsilon	Realizable	Enhanced Wall Treatment
Case 20	k-epsilon	Realizable	Menter-Lencher
Case 21	k-kl-omega	-	-
Case 22	k-omega	Standart	-
Case 23	k-omega	Standart	Low-Re
Case 24	k-omega	BSL	-
Case 25	k-omega	BSL	Low-Re
Case 26	k-omega	SST	-
Case 27	k-omega	SST	Low-Re
Case 28	Transisiton SST	-	-
Case 29	Transisiton SST	Rougness Coleration	-

sonuca doğrudan etki ettiğinden ilk olarak birinci ve ikinci mertebe ayrıklaştırma arasındaki fark incelenmiştir. Ayrıklaştırmanın mertebesinin artması ile kesme hatası ve nümerik türev ile analitik türev arasındaki farkın azalması beklenir. Yapılan karşılaştırmanın sonucu Şekil 2.3'te gösterilmiştir.

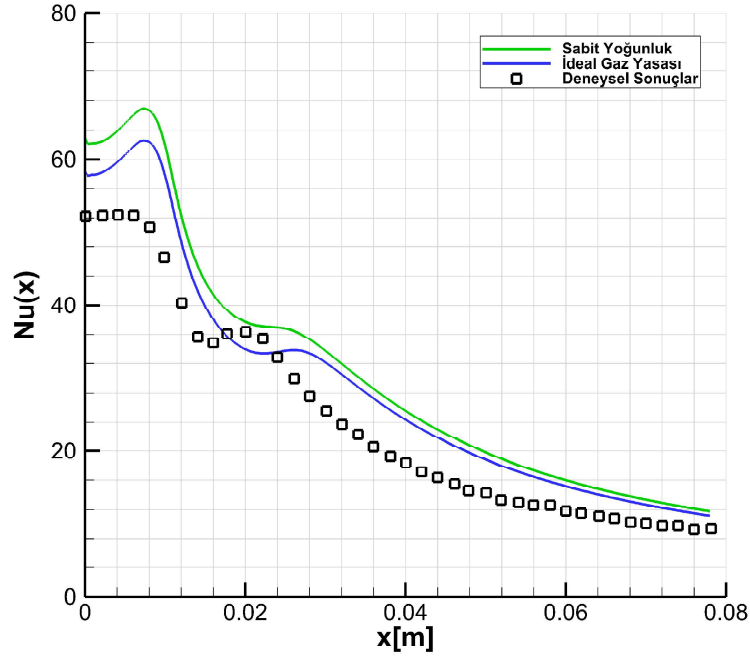


Şekil 2.3 : Ayrıklaştırma mertebesinin etkisi [8].

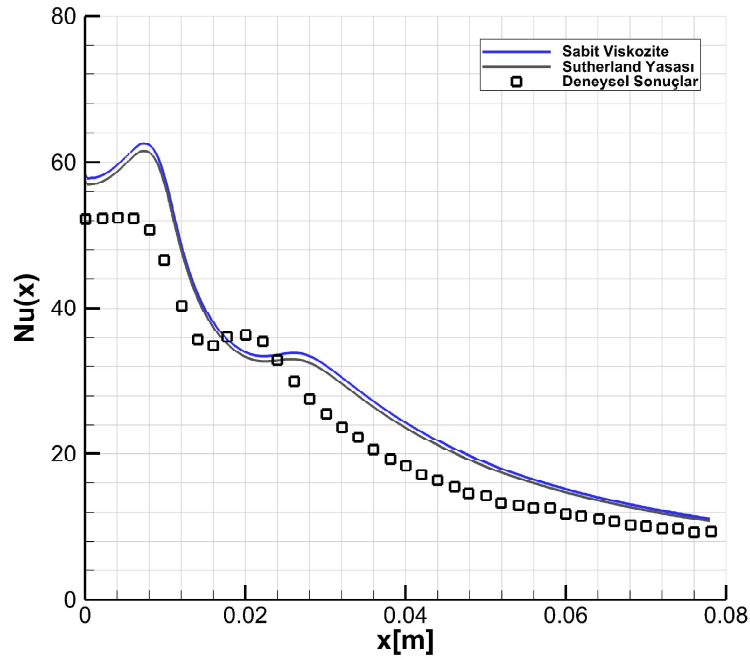
Şekil 2.3'te momentum, türbülans ve enerji denklemlerinin ikinci mertebeden upwind şeması kullanılarak ayrıklaştırması ile yapılan çözümde çarpan plaka üzerindeki Nusselt sayısı dağılımının birinci metrebeden upwind şeması kullanılarak yapılan çözüme göre daha az hata ile hesaplandığı görülmektedir.

HAD analizlerinde kullanılan akışkanların termofiziksel özellikleri sonucu önemli ölçüde etkilemektedir. Özellikle de ısı transferinin incelendiği akış olaylarında yoğunluk ve viskozite gibi termofiziksel özelliklerin sıcaklığa bağlı olarak değişimi göz önünde tutulmalıdır. Oluşturulan modelde akışkanın yoğunluk ve vizkozitesinin sıcaklığa göre değişiminin sonuca etkisi sırasıyla ideal gaz kabulü ve Sutherland yasası

ile oluşturulan modeller kullanılarak incelenmiştir. Şekil 2.4 ve 2.5'te sırasıyla İdeal Gaz ve Sutherland yasasının sayısal modelin başarısına olan etkileri gösterilmiştir.



Şekil 2.4 : İdeal gaz yasasının çözüme etkisi [8].



Şekil 2.5 : Sutherland yasasının çözüme etkisi [8].

Şekil 2.4 ve 2.5’de görüldüğü üzere yoğunluğun sıcaklığa bağlı değişiminin viskozitenin sıcaklığa bağlı değişime göre sayısal model sonucunu daha fazla etkilediği ve sabit termofiziksel özelliklerin HAD analizlerinde deneysel verilere göre daha uzak sonuçlar verdiği görülmüştür. İdeal gaz ve Sutherland yasaları denklem 2.28 ve 2.29’da verilmiştir.

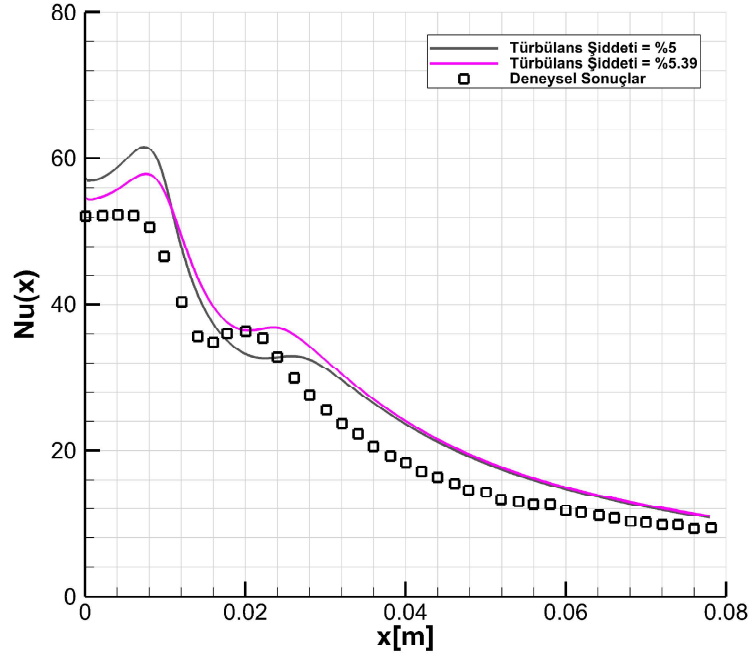
$$P = \rho RT \quad (2.28)$$

$$\mu = \mu_{ref} \left(\frac{T}{T_{ref}} \right)^{3/2} \frac{T_{ref} + S}{T + S} \quad (2.29)$$

Denklem 2.28 ve 2.29’da İdeal gaz ve Sutherland yasalarına ait model sabitleri hava için belirlenmiş değerler olan $R=287 \text{ J/kg}$, $\mu_{ref} = 1.716 \times 10^{-5} \text{ Pas}$, $T_{ref} = 273.15 \text{ K}$ ve $S = 110.4 \text{ K}$ olarak tanımlanmıştır.

Çarpan jet ile ilgili HAD analizlerinde, hız giriş sınırındaki türbülans şiddeti literatürdeki birçok çalışmada Reynolds sayısı göz önünde bulundurulmadan %5 olarak tanımlanmıştır. Jetlerin beslendiği giriş tarafındaki akışın jetin türbülans şiddetine önemli etkisi olsa da literatürdeki çalışmalarda bu detay yer almadığından tam gelişmiş borular içindeki akışlar için geçerli olan denklem 2.21 ile hesaplanan türbülans şiddeti ile karşılaştırma yapılarak sonuçlar Şekil 2.6’de gösterilmiştir.

Yapılan karşılaştırmalar ile momentum, türbülans ve enerji denklemlerinin ikinci mertebe upwind şeması kullanılarak ayrıklaştırıldığı, akışkanın yoğunluğunun ve viskozitesinin sıcaklığa bağlı değişiminin göz önüne alındığı ve uygun giriş türbülans şiddetinin tanımlandığı HAD analizinin çarpan jet akışını modellemekte daha başarılı olduğu görülmüştür. Tez çalışması kapsamında yapılan diğer HAD analizlerinde bu hususlara dikkat edilmiştir.



Şekil 2.6 : Giriş türbülans şiddetinin çözüme etkisi [8].

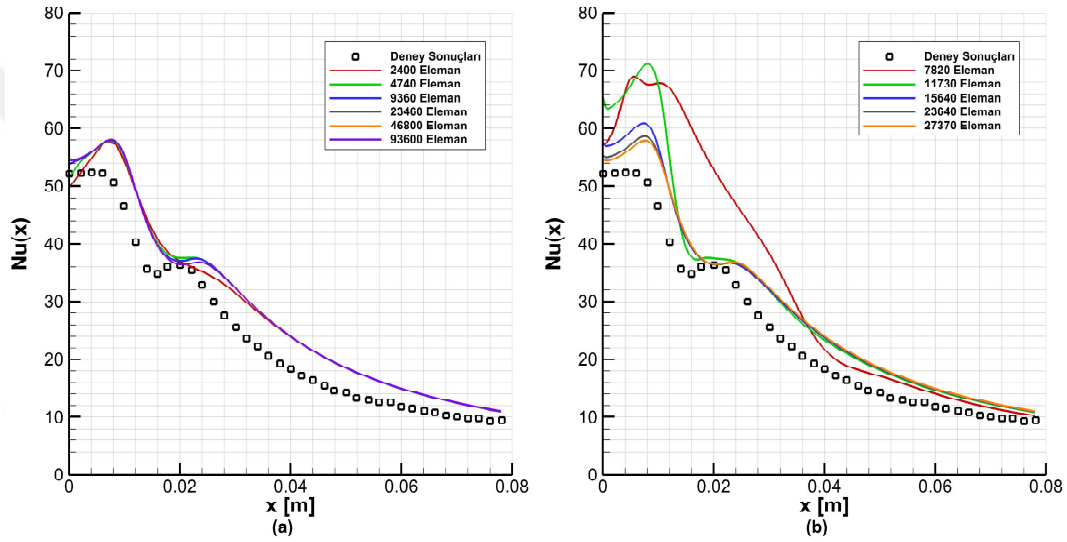
2.3.1.5 Çözüm ağından bağımsızlık analizleri

Kısmi diferansiyel denklemlerin sayısal olarak çözülmesi sırasında kısmi türevlerin ayrıklaştırıldığından önceki bölümde bahsedilmiştir. Yapılacak olan ayrıklaştırma akış hacminin bir çözüm ağı kullanılarak elemanlara ayrılmasını gerektirmektedir. Oluşturulan çözüm ağı elemanlarının tamamı akış hacmini temsil ederken her biri üzerinde çözülmesi hedeflenen değişkenler tanımlanır ve ilgili denklemler tüm elemanlar için çözülür. Oluşturulan çözüm ağının yoğunluğu ise akış alanının modellenmesi için detaylıca incelenmelidir. Yetersiz çözüm ağı yoğunluğu kullanılması halinde akış alanı ve ilgili transport değişkenleri doğru çözümlenemezken gereğinden fazla yoğun çözüm ağı kullanımı ise hesaplama maliyetinin artmasına neden olur ve bazı durumlarda biriken kesme hatalarından dolayı sayısal yakınsamanın elde edilememesine sebep olur.

Kullanılması uygun çözüm ağı yoğunluğunun tespit edilmesi için çözüm ağından bağımsızlık testi yapılmalıdır. Bu test farklı yoğunluktaki çözüm ağları ile yapılan çözümlerin karşılaştırılmasına dayanır. Böylece fiziksel sonucun çözüm ağı yoğunluğuna bağlı olmadığı yeterli sayıda eleman içeren çözüm ağı bulunur. Çözüm

ağından bağımsızlık analizleri genelde tek bir skaler sonucun karşılaştırılması ile gerçekleştirilirken dağılım verilerinin incelenmesi daha kesin bir sonuç sağlar.

Alimohammadi ve diğerlerinin [8] çalışmasında inceledikleri tekli çarpan jet akışının modellenmesi için yapılan çözüm ağından bağımsızlık testlerinde aksel ve radyal yöndeki çözüm ağı yoğunlukları ayrı ayrı incelenmiş olup çarpan plaka üzerindeki Nusselt sayısı dağılımı karşılaştırılmıştır. Şekil 2.7’de sırasıyla radyal ve aksel yönde yapılan iki aşamalı çözüm ağından bağımsızlık testlerinin sonuçları verilmiştir.

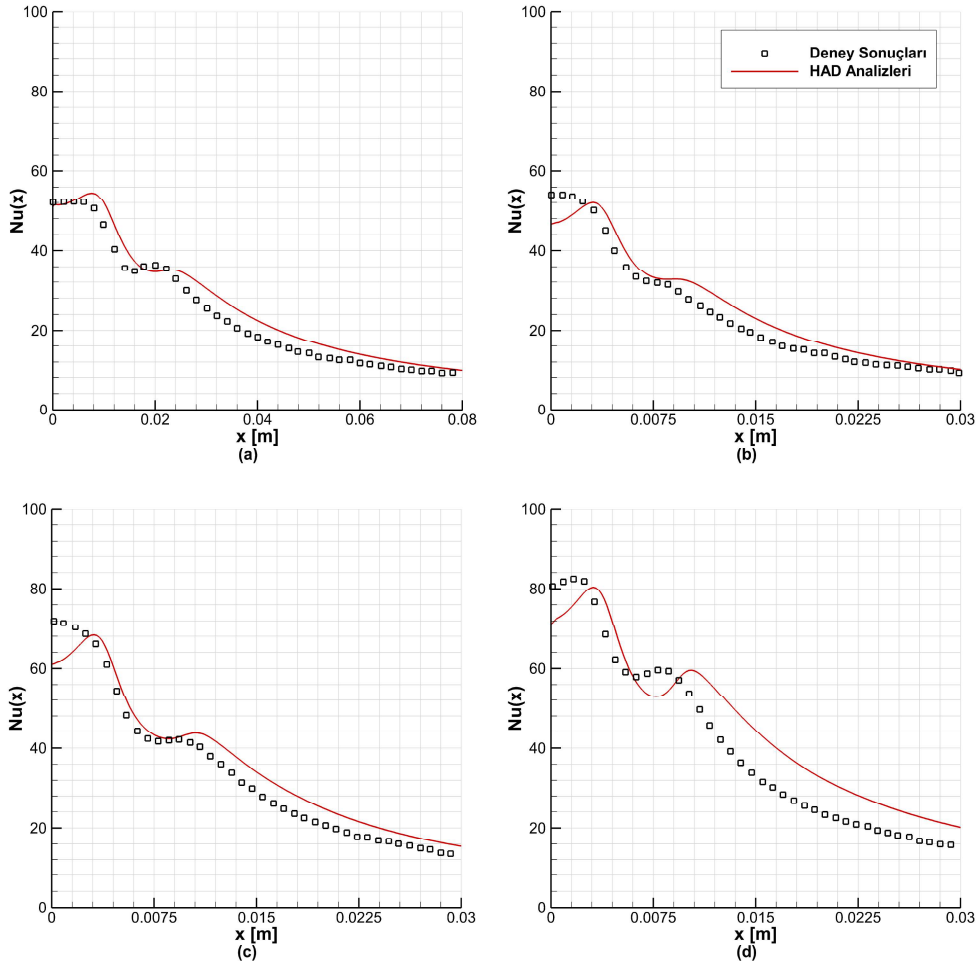


Şekil 2.7 : Çözüm ağından bağımsızlık analizlerinin sonuçları: a) radyal yönde çözüm ağı yoğunluğunun etkisi, b) aksel yönde çözüm ağı yoğunluğunun etkisi [8].

Şekil 2.7’de görüleceği üzere radyal yönde çözüm ağı yoğunluğunun değişimi sonuçları etkilemezken jet eksen yönündeki çözüm ağı yoğunluğunun sonuçları önemli ölçüde etkilemektedir. Yapılan çözüm ağı analizi sonucunda tekli çarpan jet akışının incelendiği iki boyutlu modelde 23460 elemana sahip çözüm ağının kullanılmasına karar verilmiştir.

2.3.1.6 Validasyon sonuçları

Alimohammadi ve diğerlerinin [8] çalışmasında deneysel sonuçları bulunan ve detayları Çizelge 2.1’de verilen konfirasyonlar için önceki bölümlerde belirlenen model özellikleri ile yapılan HAD analizi sonuçları deneysel sonuçlarla karşılaştırılarak oluşturulan sayısal modelin tekli çarpan jet akışını modellemedeki başarısı incelenmiştir. Doğrulama çalışmasının sonuçları Şekil 2.8’de gösterilmiştir.



Şekil 2.8 : Farklı konfigürasyonlara ait doğrulama çalışması sonuçları: a) C1, b) C2, c) C3, d) C4. [8]

Şekil 2.8’de gösterilen $Nu(x)$ sonuçları irdelendiğinde jet plaka mesafesinin artması ile sayısal modelin hatasının arttığı görülmüştür. Kullanılan türbülans modeli ($k-\omega$ SST) içerisinde bulunan $k-\epsilon$ çözümünün Kato-Launders limitleyicisinden ötürü artan jet-plaka arası mesafesi ile sonuçların hatasının artması sebebiyle karşılaşılan sonuçlar Wienand ve diğ. [13] sonuçları ile tutarlıdır.

2.3.2 Momentum transferinin doğrulanması

Çarpan jet akışının HAD analizlerinde kullanılacak sayısal modelin doğrulanması için yapılan çalışmaların ikinci bölümünde tekli çarpan jetin yarattığı momentum transferi incelenmiştir. Doğrulama çalışmasında sayısal modelin başarısı Cooper ve diğerlerinin

[7] deneysel çalışmasında ölçümlenen eksenel ve radyal hız profillerinin sayısal model çıktılarıyla karşılaştırılması ile elde edilmiştir.

2.3.2.1 Akış hacmini ve çözüm ağının oluşturulması

Cooper ve diğerlerinin [7] çalışmasında farklı geometrik özelliklerde iki adet konfigürasyon bulunmaktadır. Bu bölümde, $D=26$ mm çapına sahip borudan kendisinden $H=52$ mm ötede bulunan plakaya çarpan hava jeti incelenerek doğrulama çalışmaları yürütülmüştür. İncelenen akış olayında eksenel simetri olduğundan bir önceki doğrulama çalışmasına benzer şekilde iki boyutlu analiz yapılmıştır. Çalışmada çarpan jette tam gelişmiş akış tanımlandığından akış hacmine jet akışının tam gelişmiş olması için gerekli uzunlukta boru kullanılmış ve boru girişinde sabit jet hızı tanımlanmıştır.

Doğrulama çalışmasında kullanılan iki boyutlu akış hacmi Şekil 2.9’da verilmiştir.



Şekil 2.9 : Akış hacmi ve doğrulama çalışmasına ait boyutlar ve sınır koşulları [7].

2.3.2.2 Sınır şartlarının belirlenmesi

İncelenen akış hacminde önceki doğrulama çalışmasına benzer şekilde beş tür sınır şartı bulunmaktadır. Hız giriş sınır şartı için sabit hız kullanılmış olup, türbülans şiddeti ve hidrolik çap denklem 2.20-2.24 ile hesaplanmıştır. Çarpan plaka ve boru

yüzeylerinde boyunca kaymazlık sınır şartı geçerlidir; duvar sıcaklığı sabit 303.15 °K olarak tanımlanırken borudaki ısı geçişi ihmal edilmiştir. Hava jetinin yayıldığı yüzeyde basınç çıkışı sınır şartı tanımlanarak atmosferik basınç tanımlanmıştır.

Sınır şartları ile detaylı bilgi Çizelge 2.3'te verilmiştir.

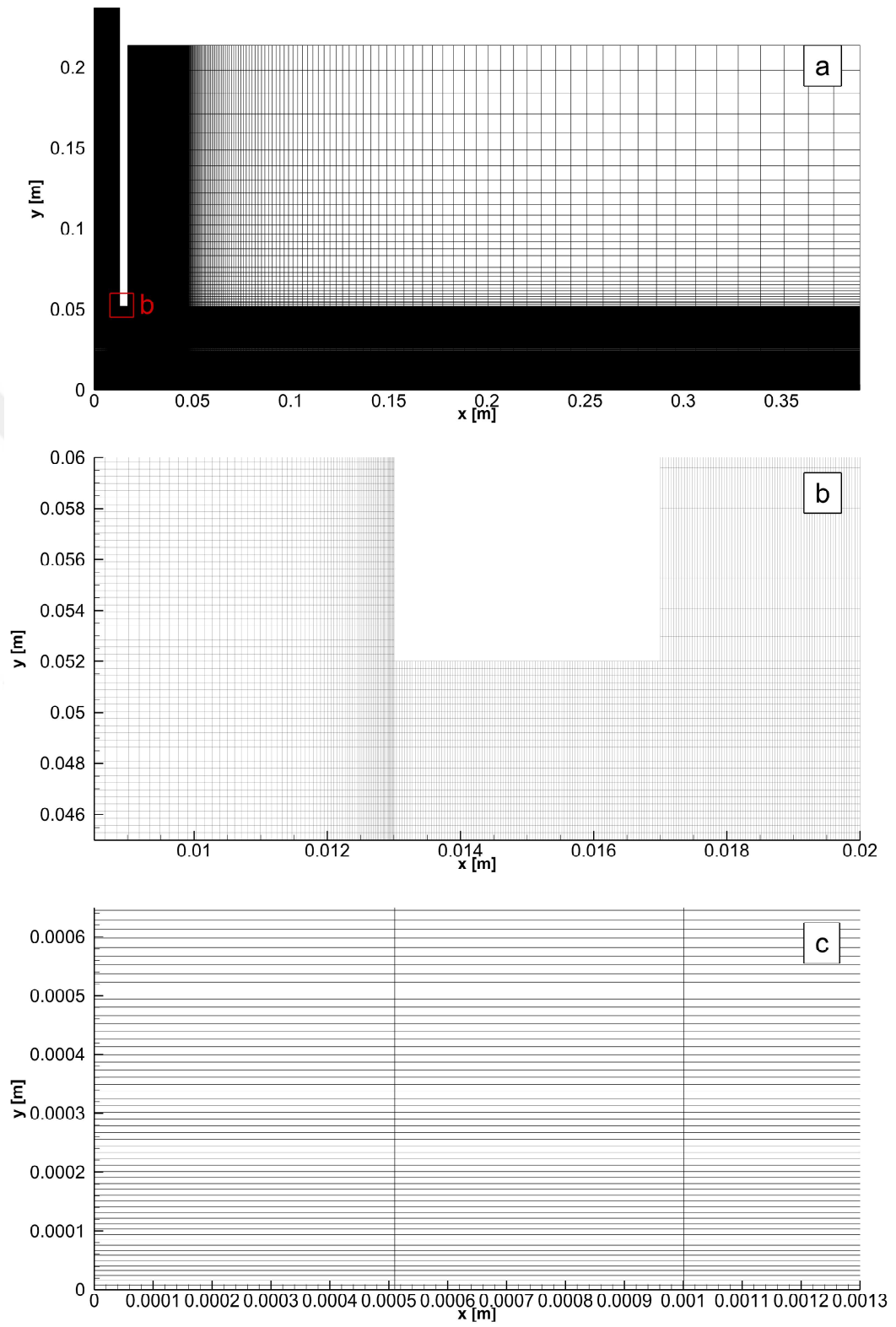
Çizelge 2.3 : Doğrulama çalışmasında kullanılan sınır şartları, Cooper ve diğ. [7].

Sınır Şartı	Hidrodinamik Sınır Şartları	Termal Sınır Şartları
Hız girişi	$u = 0, v = -12.88\text{m/s}, I = \%4.1, D_h = 0.026\text{m}$	$T=288.15\text{ }^\circ\text{K}$
Basınç Çıkışı	$p=0$	Geri yönlü akış için: $T=287.15\text{ }^\circ\text{K}$
Boru Yüzeyi	$u=v=0$	$\frac{dT}{dn} = 0$
Çarpan Plaka	$u=v=0$	$T=303.15\text{ }^\circ\text{K}$
Simetri Eksen	$\frac{du}{dx} = \frac{dv}{dx} = 0$	$\frac{dT}{dx} = 0$

2.3.2.3 Oluşturulan çözüm ağı

Çözüm ağının oluşturulması sırasında akış hacmi aksel ve radyal yönde bölünmüştür. Böylece jet eksenine ve çarpan plakaya doğru kademeli bir sıkıştırma yapılırken, çıkış sınır şartının bulunduğu yüzeyler civarında yüksek en boy oranına sahip elemanlardan kaçınılmıştır. Kullanılan çözüm ağı Şekil 2.10'da verilmiştir.

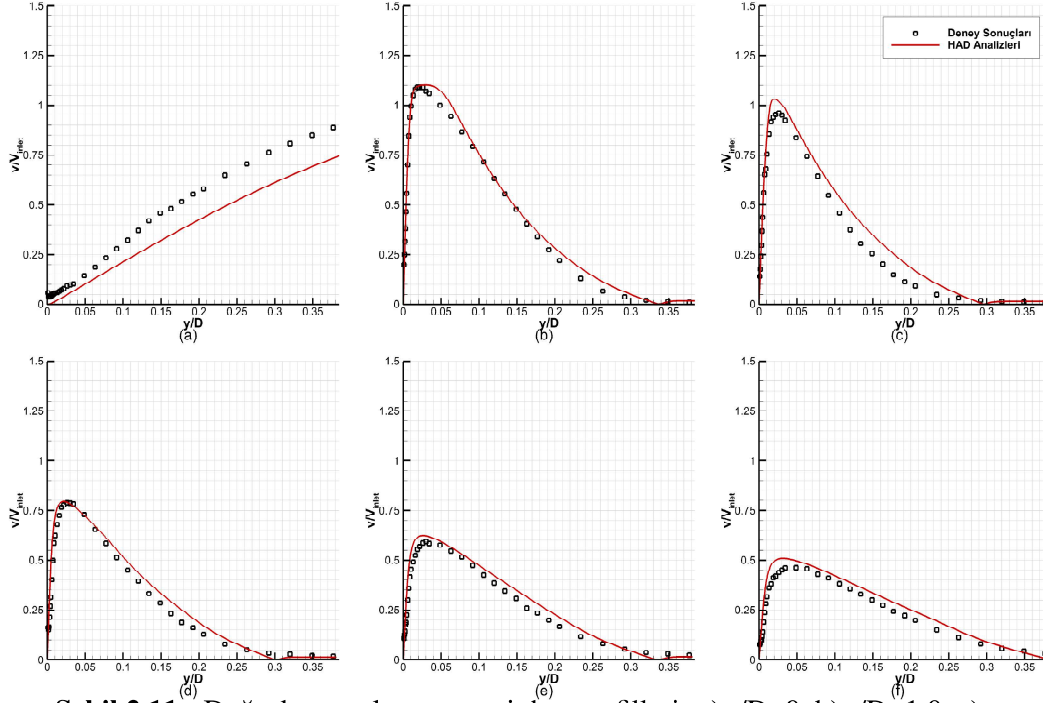
Şekil 2.10.b ve 2.10.c'de görüldüğü üzere boru yüzeyi ve çarpan plaka civarlarında türbülanslı hız profili doğru şekilde çözülebilmesi için türbülans modeli kriterine uyumlu şekilde yoğun çözüm ağı elemanı kullanılmıştır.



Şekil 2.10 : Doğrulama çalışmasında kullanılan örnek çözüm ağı: a) Tüm akış hacmi, b) jet çıkışı, c) çarpan plaka civarı, Cooper ve diğ. [7].

2.3.2.4 Doğrulama sonuçları

Cooper ve diğerleri [7] çalışmasında altı farklı radyal konumdan eksen boyunca eksenel ($r/d=0$) ve radyal hız ($r/d=1, 1.5, 2, 2.5$ ve 3) ölçümü almışlardır. Sayısal modelin hız profili sonuçları Şekil 2.11’de verilmiştir.



Şekil 2.11 : Doğrulama çalışmasına ait hız profilleri: a) $r/D=0$, b) $r/D=1.0$, c) $r/D=1.5$, d) $r/D=2.0$, e) $r/D=2.5$, f) $r/D=3.0$, Cooper ve diğ. [7].

Şekil 2.11’de HAD analizlerinin sonuçları ve deneysel sonuçlar karşılaştırıldığında, daha önce belirlenen çözüm ağı yapısı ve HAD analizi hususlarına dikkat edilirse, tekli çarpan jet akışında momentum transferinin yüksek başarıyla hesaplanabildiği görülmüştür. Sonuçlar incelendiğinde sınır tabakada hız profilinin daha başarılı şekilde tahmin edildiği görülmektedir.

2.4 Çoklu Çarpan Jet Akışının Sayısal Modelinin Oluşturulması

Tekli çarpan jet akışı ile ilgili yapılan iki adet doğrulama çalışmasında literatürdeki farklı deneysel sonuçlar referans alınarak Nusselt sayısı dağılımı ve hız profilleri karşılaştırılmıştır. Bu çalışmalar sonucunda farklı sınır şartları ve işletme koşullarındaki çarpan jet akışının sayısal modelinin gereksinimleri ortaya

konulmuştur. Doğrulama çalışmaları sırasında türbülans modeli, çözüm ağı, akışkanın termofiziksel özellikleri, ayrıklaştırma ve HAD yaklaşımı gibi birçok parametrenin HAD analizi çözümü üzerindeki etkisi incelenerek gerçekçi HAD modeli hakkında bilgi edinilmiştir.

Çoklu çarpan jet akışı için yapılacak doğrulama çalışmalarında tekli çarpan jet için oluşturulan sayısal modelin özellikleri baz alınmıştır. İki farklı akış arasındaki en önemli fark çoklu çarpan jet sistemlerinde oluşan duvar jetlerinin karşılaşarak yukarı yönlü akış (upwash) oluşturmalarıdır. Yukarı yönlü bu akışın olduğu bölgede karşılaşan duvar jetleri karmaşık akış yapılarına sebep olmaktadır. Bu nedenle oluşturulan çözüm ağında jetlerin arasında yoğun çözüm ağlarının oluşturulması gerekmektedir.

Literatürde çoklu çarpan jet akışı ile ilgili yapılan HAD analizlerinde tek jet içeren çarpan jet sistemlerinde olduğu gibi çoğunlukla iki değişkenli türbülans modelleri kullanılmıştır. Bu çalışmalarda $k-\omega$ türbülans modellerin baskın olmasından dolayı çoklu çarpan jet için tek jet için geçerli olan türbülans modeli kullanılmıştır.

2.4.1 Isı transferinin doğrulanması

Çoklu çarpan jet sisteminin HAD analizi için oluşturulan sayısal modelin ısı transferi hesaplarının doğrulanması için referans çalışma olarak Xing ve Weigand'ın [9] çalışmasından faydalanılmıştır. Çalışmada 81 adet jetten oluşan çoklu çarpan jet sisteminde farklı geometrik parametrelerini ve işletme koşullarının etkisi incelenmiştir. Jet Reynolds sayısının, akış düzeninin, jet ve plaka arasındaki ve ardışık jetler arasındaki mesafelerin çıktı parametreleri üzerindeki etkisi incelenmiştir.

Doğrulama çalışmasında kullanılan konfigürasyon detayı Çizelge 2.4'de verilmiştir.

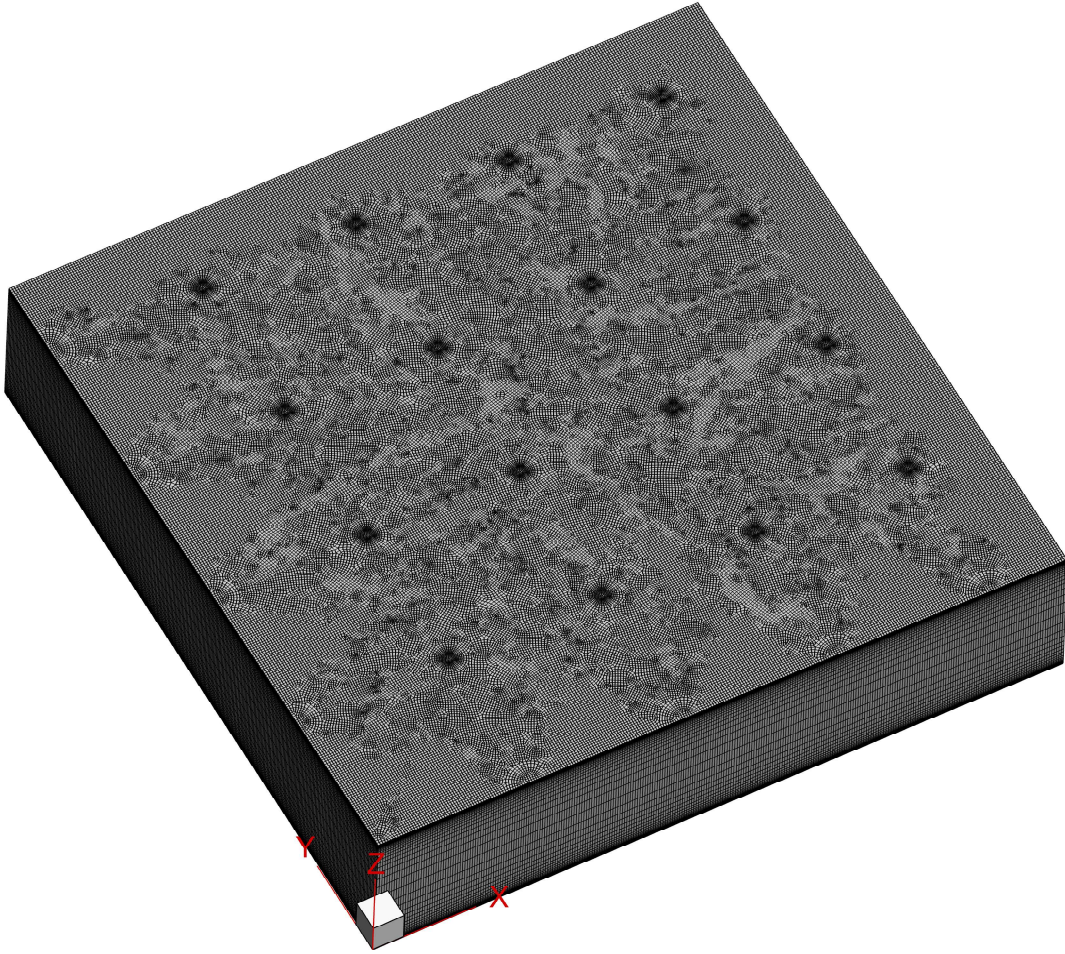
Çizelge 2.4 : Xing ve Weigand'ın [9] çalışmasında inceledikleri tasarım uzayının limitleri.

	Alt Limit	Üst Limit
Jet Reynolds Sayısı	15000	35000
H/D	1	5

Xing ve Weigand [9], çalışmasında Çizelge 2.4'te belirtilen parametre uzayını üç farklı akış düzeni için incelemişlerdir. Doğrulama çalışmasında jet Reynolds sayısının 35000, plakalar arası mesafenin jet çapına oranının 5 olduğu ve tüm yönlerden akışın atmosfere açıldığı akış düzeni için inceleme yapılmıştır.

2.4.1.1 Akış hacminin ve çözüm ağının oluşturulması

Üç boyutlu akış hacmi Çizelge 2.4’de belirtilen geometrik parametrelere uygun şekilde oluşturulup ANSYS Meshing programı kullanılarak çözüm ağı oluşturulmuştur. Üç boyutlu akış hacminin yüzeylerinde oluşturulan çözüm ağı Şekil 2.12’de verilmiştir.



Şekil 2.12 : Doğrulama çalışmasında kullanılan örnek çözüm ağı, Xing ve Weigand’ın [9] konfigürasyonu.

Şekil 2.12’de görüleceği üzere çözüm ağı oluşturulurken türbülans modelinin gereksinimleri dikkate alınmıştır. Jet akışının yayıldığı bölümlerde diğer bölgelere göre daha yoğun çözüm ağı oluşturulmuştur. İncelenen HAD problemi sınır şartları ve geometrik yapı itibari ile x ve y eksenlerine göre simetrik olduğundan dolayı akış hacminin 1/4’ü modellenerek hesaplama maliyeti %75 azaltılmıştır

2.4.1.2 Sınır şartlarının belirlenmesi

Ele alınan akış probleminin sayısal olarak çözülebilmesi için sınır şartlarının değişkenler cinsinden uygun şekilde tanımlanması gerekmektedir. Çoklu çarpan jet akışında jet kesitleri, çarpan plaka, havanın yayıldığı atmosfer, ve simetri yüzeyleri bulunmaktadır.

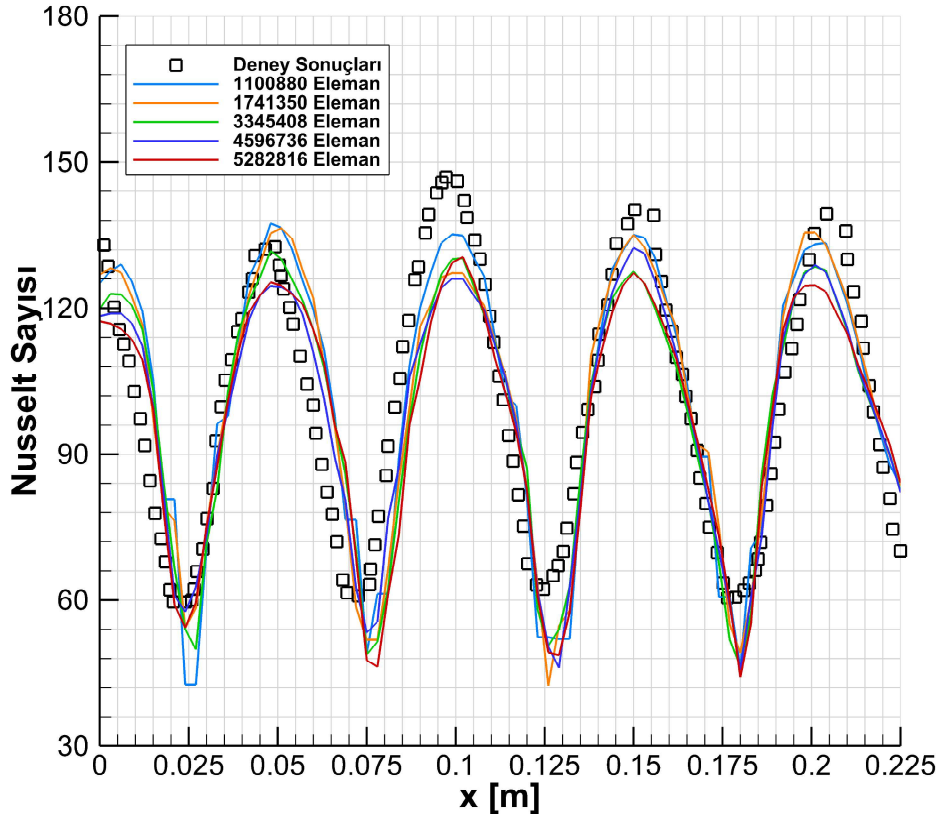
İlgili problemin çözümünde gerek duyulan sınır şartları Çizelge 2.5'te belirtilmiştir. İlgili sınır şartlarının belirlenmesinde ele alınan kıstaslara Bölüm 2.3.1.2'de değinilmiştir.

Çizelge 2.5 : Doğrulama çalışmasında kullanılan sınır şartları [9].

Sınır Şartı	Hidrodinamik Sınır Şartları	Termal Sınır Şartları
Hız girişi	$u = 0, v = -53.52\text{m/s}, I = \%4.1, D_h = 0.01\text{m}$	$T=300.15\text{ }^\circ\text{K}$
Basınç Çıkışı	$p=0$	Geri yönlü akış için: $T=300.15\text{ }^\circ\text{K}$
Jet Plakası	$u=v=w=0$	$T=300.15\text{ }^\circ\text{K}$
Çarpan Plaka	$u=v=w=0$	$T=330.15\text{ }^\circ\text{K}$
Simetri Eksen X	$\frac{du}{dx} = \frac{dv}{dx} 0$	$\frac{dT}{dx} = 0$
Simetri Eksen Y	$\frac{du}{dy} = \frac{dv}{dy} 0$	$\frac{dT}{dy} = 0$

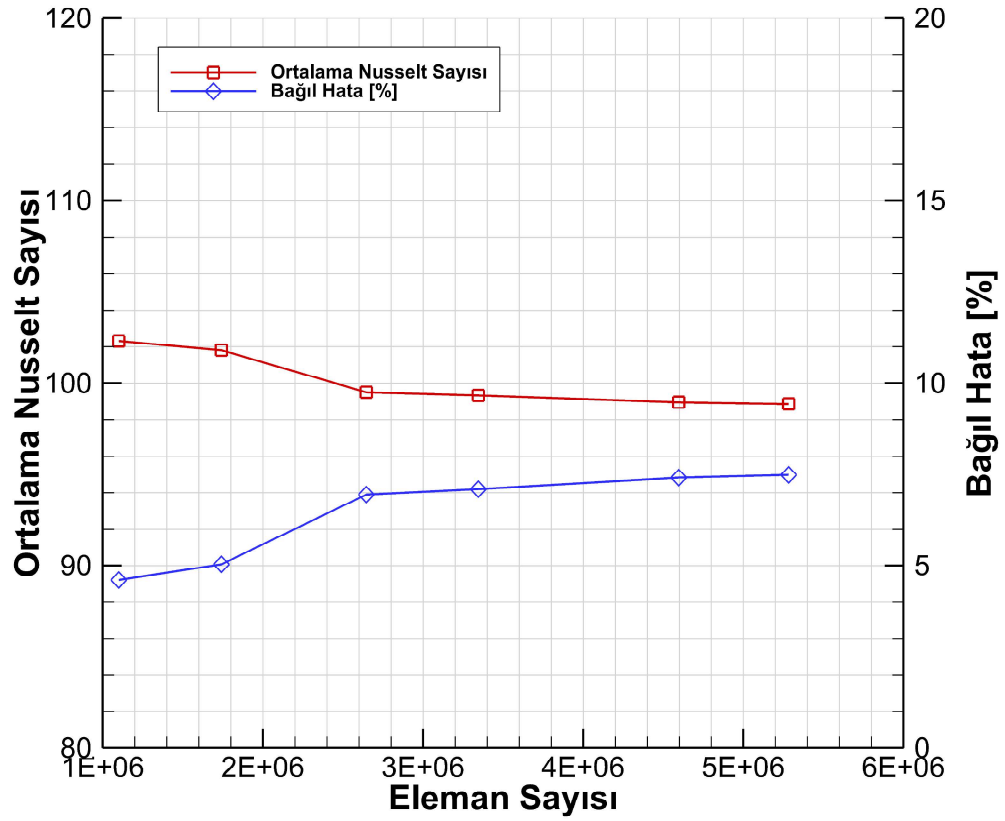
2.4.1.3 Çözüm ağından bağımsızlık analizleri

Çözüm ağı yoğunluğunun HAD analizi sonuçlarına olan etkisinin belirlenmesi adına farklı yoğunluklara sahip çözüm ağı ile analizler yapılmıştır. Elde edilen ortalama Nusselt sayısı sonuçları ve Nusselt sayısı dağılımları Xing ve Weigand'ın [9] çalışmasında belirttikleri deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Çözüm ağından bağımsızlık analizlerinin sonuçları Şekil 2.13 ve Şekil 2.14'te verilmiştir.



Şekil 2.13 : Çözüm ağından bağımsızlık analizi sonuçları ve deneysel veri ile karşılaştırma [9].

Şekil 2.13'te görüldüğü üzere HAD analizlerinden elde edilen yerel Nusselt sayısı dağılımları çözüm ağından bağımsız olarak deneysel verilerle tutarlı şekildedir. Dolayısı ile yeterli yoğunlukta çözüm ağının kullanıldığı söylenebilir. Deneysel verilerle elde edilen tutarlılık Şekil 2.14'te ortalama Nusselt sayısı üzerinde de görülebilmektedir.



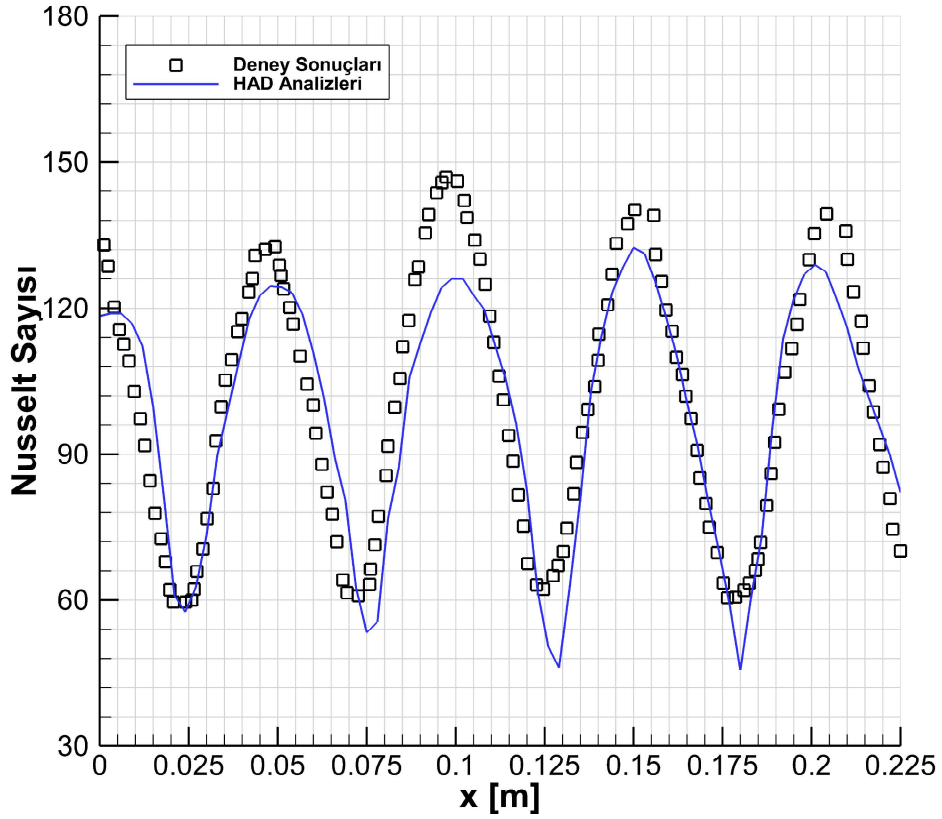
Şekil 2.14 : Çözüm ağından bağımsızlık analizi sonuçları ve deneysel sonuçlar ile karşılaştırma [9].

Şekil 2.14'te görüldüğü üzere ortalama Nusselt sayısı, çözüm ağı eleman sayısı arttıkça yakınsamaktadır. Ancak çözüm ağı eleman sayısı arttıkça deneysel veri ile HAD analizleri arasındaki bağıl hata artmaktadır. Bunun sebebinin referans çalışmada Nusselt sayısı ölçümü için güven aralığının %9 olarak verilmesi ve deneydeki sınır şartlarının sağlanmasındaki güçlük olduğu düşünülmektedir.

Çözüm ağından bağımsızlık analizlerinin sonucunda yaklaşık 4.6 milyon eleman sayısına sahip çözüm ağının kullanılmasına karar verilmiştir.

2.4.1.4 Doğrulama sonuçları

Çoklu çarpan jet sistemlerinde ısı transferi için oluşturulan sayısal modelin doğrulama çalışmaları sonucunda deneysel verilerle tutarlı sonuçlar elde edilmiştir. Oluşturulan sayısal model ile gerçekleştirilen HAD analizi sonuçları Şekil 2.15'te gösterilmiştir.



Şekil 2.15 : HAD analizi ve referans çalışmadaki deneysel sonuçlar.

Şekil 2.15'te gösterilen çarpan plaka üzerinde yerel Nusselt sayısı dağılımları üzerinden yapılan karşılaştırma neticesinde, oluşturulan modelin çoklu çarpan jet akışında ısı transferini hesaplamada başarılı olduğu görülmektedir. Bu noktalarda deneysel verilerle HAD analizi arasındaki farkların kaynağının referans alınan ölçümlerdeki belirsizliklerden ve termal sınır şartlarında homojenliği sağlayamamadan kaynaklandığı düşünülmektedir.

2.4.2 Momentum transferinin doğrulanması

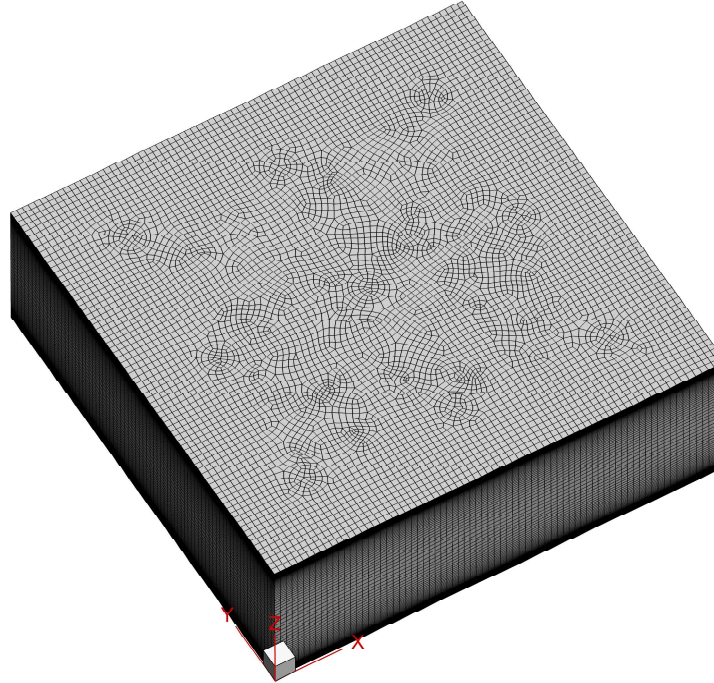
Tez kapsamında çarpan jet akışının HAD analizi için oluşturulan sayısal modelin dördüncü doğrulama çalışmasında çoklu çarpan jet akışında momentum transferinin doğrulanması hedeflenmiştir. Geers ve diğ. [10] yaptığı farklı eksenel konumlardan alınan eksenel hız ölçümleri ile HAD analizi sonuçları karşılaştırılarak sayısal modelin başarısı ölçülmüştür.

Geers ve diğ. [10] çalışmalarında farklı geometrik ve işletme parametrelerinde deneyler yapılmışlardır. Sekizgen ve matris yapıda dizilmiş jetler üzerinde çalışan araştırmacılar, jet plaka arası mesafenin jet çapının 3 ila 10 katı arasında değiştiği ve ardışık jetler arasındaki mesafenin jet çapının 2 ile 6 katı arasında değiştiği durumlar için çoklu çarpam jet sistemini incelemişlerdir.

Çoklu çarpan jet sisteminin momentum transferinin doğrulanması için yapılan çalışmada 13 mm çapında (D_{jet}) kare matris düzeninde konumlandırılmış dokuz jet için boyutsuz jet plaka mesafesinin $H/D_{jet}=4$, boyutsuz jet aralığının $s/D_{jet}=4$ ve jet Reynolds sayısının $Re_{jet}=20000$ olduğu durum incelenmiştir.

2.4.2.1 Akış hacmini ve çözüm ağının oluşturulması

Önceki bölümde belirtilen geometrik özelliklere uygun şekilde üç boyutlu akış hacmi Design Modeller programı kullanılarak oluşturulmuştur. Çözüm ağı; ANSYS Meshing programı yardımı ile türbülans modelinin gereksinimlerine, hız gradyenlerinin bulunduğu yukarı yönlü (upwash) akış ve hava jetinin yayıldığı bölümlerde diğer bölgelere göre daha yoğun olacak şekilde oluşturulmuştur. Oluşturulan örnek çözüm ağı Şekil 2.16'da gösterilmiştir.



Şekil 2.16 : Doğrulama çalışması için oluşturulan örnek çözüm ağı, Geers ve diğerlerinin [10] konfigürasyonu

HAD analizinde jet eksenî yönünde hız profili sonuçlarını etkilememesi amacıyla problemin x ve y eksenlerine göre simetriyi sağlamasına rağmen akış hacminin tamamı modellenmiştir.

2.4.2.2 Sınır şartlarının belirlenmesi

Doğrulama çalışması kapsamında incelenen çoklu çarpan jet akışında sırasıyla hava jeti, jet plakası, çarpan plaka, havanın yayıldığı atmosfer sınırları bulunmaktadır.

Doğrulama çalışmasında ele alınan akışa ait sınır şartları referans çalışmada belirtilen değerlere uygun olarak tanıtılmıştır. HAD analizinin çözümü için gerekli olan sınır şartları Çizelge 2.6’te belirtilmiştir.

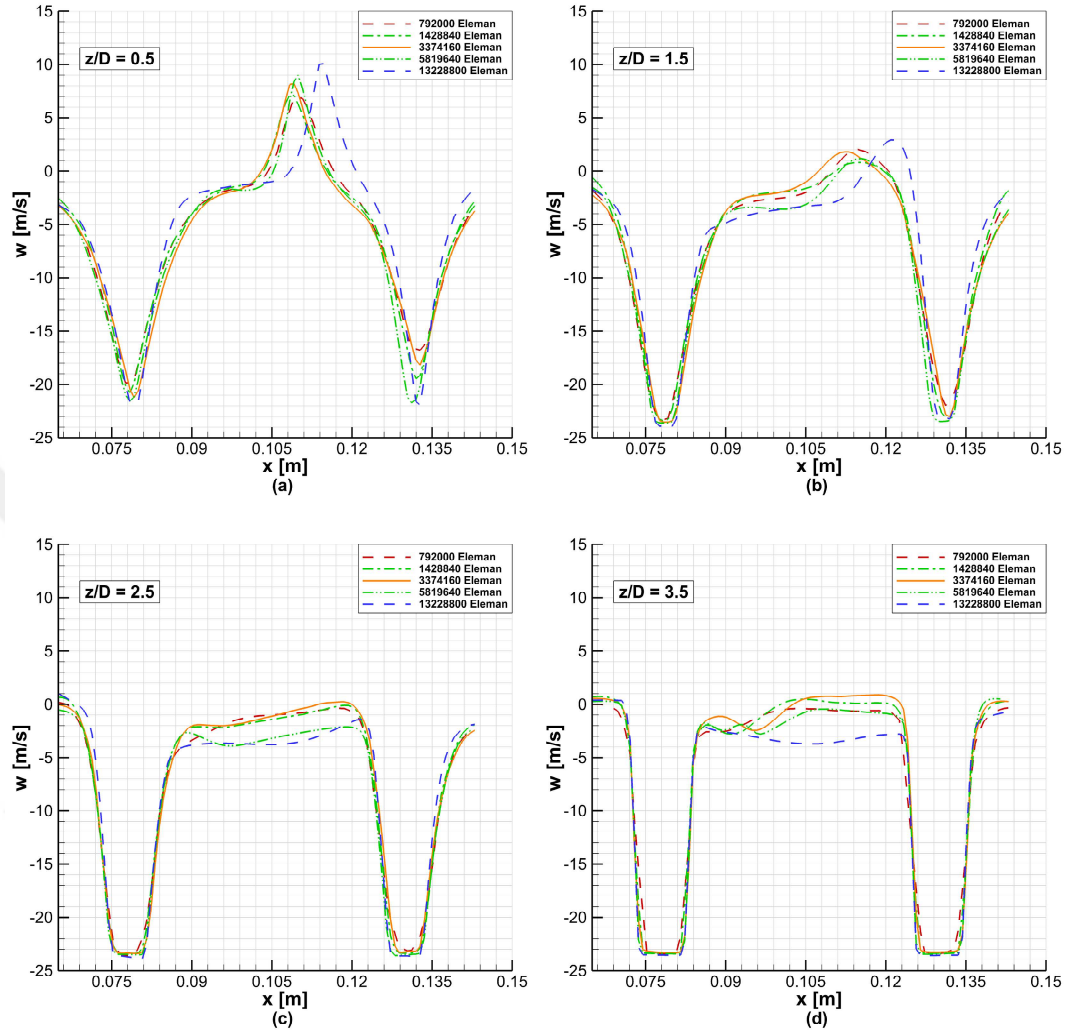
Çizelge 2.6 : Doğrulama çalışmasında kullanılan sınır şartları, Geers ve diğ. [10].

Sınır Şartı	Hidrodinamik Sınır Şartları	Termal Sınır Şartları
Hız girişi	$u = 0, w = -23.396\text{m/s}$ $I = \%4.6, D_h = 0.013\text{m}$	$T=300.15\text{ }^{\circ}\text{K}$
Basınç Çıkışı	$p=0$	Geri yönlü akış için: $T=300.15\text{ }^{\circ}\text{K}$
Jet Plakası	$u=v=w=0$	$T=300.15\text{ }^{\circ}\text{K}$
Çarpan Plaka	$u=v=w=0$	$T=330.15\text{ }^{\circ}\text{K}$

2.4.2.3 Çözüm açısından bağımsızlık analizleri

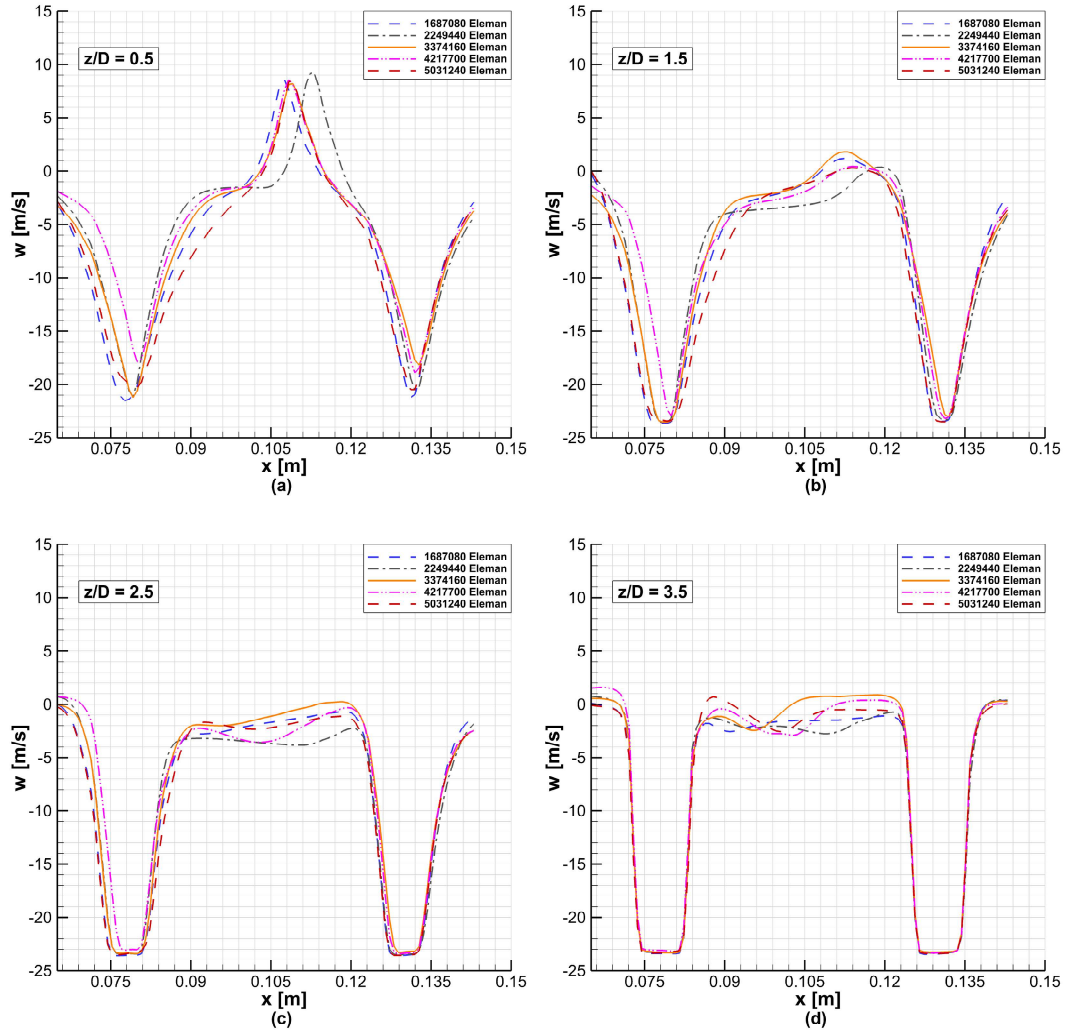
Çoklu çarpan jet akışının incelenmesi için oluşturulan sayısal modelin momentum transferi açısından incelendiği doğrulama çalışmasında kullanılan çözüm ağı yoğunluğunun sayısal sonuçlara etkisi çözüm açısından bağımsızlık analizleri ile incelenmiştir. Farklı yoğunluktaki çözüm ağları için yapılan analizlerin sonuçları karşılaştırılarak hesaplama başarısı ve hesaplama maliyeti açısından uygun çözüm ağı yoğunluğu tespit edilmiştir. Radyal (XY Düzlemi) ve eksenel yöndeki (Z eksenî) eleman sayıları ayrı ayrı incelenerek analizlerin deneyler ile tutarlılığı iki aşamada incelenmiştir.

Radyal ve eksenel yönde çözüm ağı yoğunluğunun HAD analizi sonuçlarına etkisi sırasıyla Şekil 2.17 ve Şekil 2.18’de verilmiştir.



Şekil 2.17 : Radyal yönde çözüm ağı yoğunluğunun sayısal sonuca etkisi.

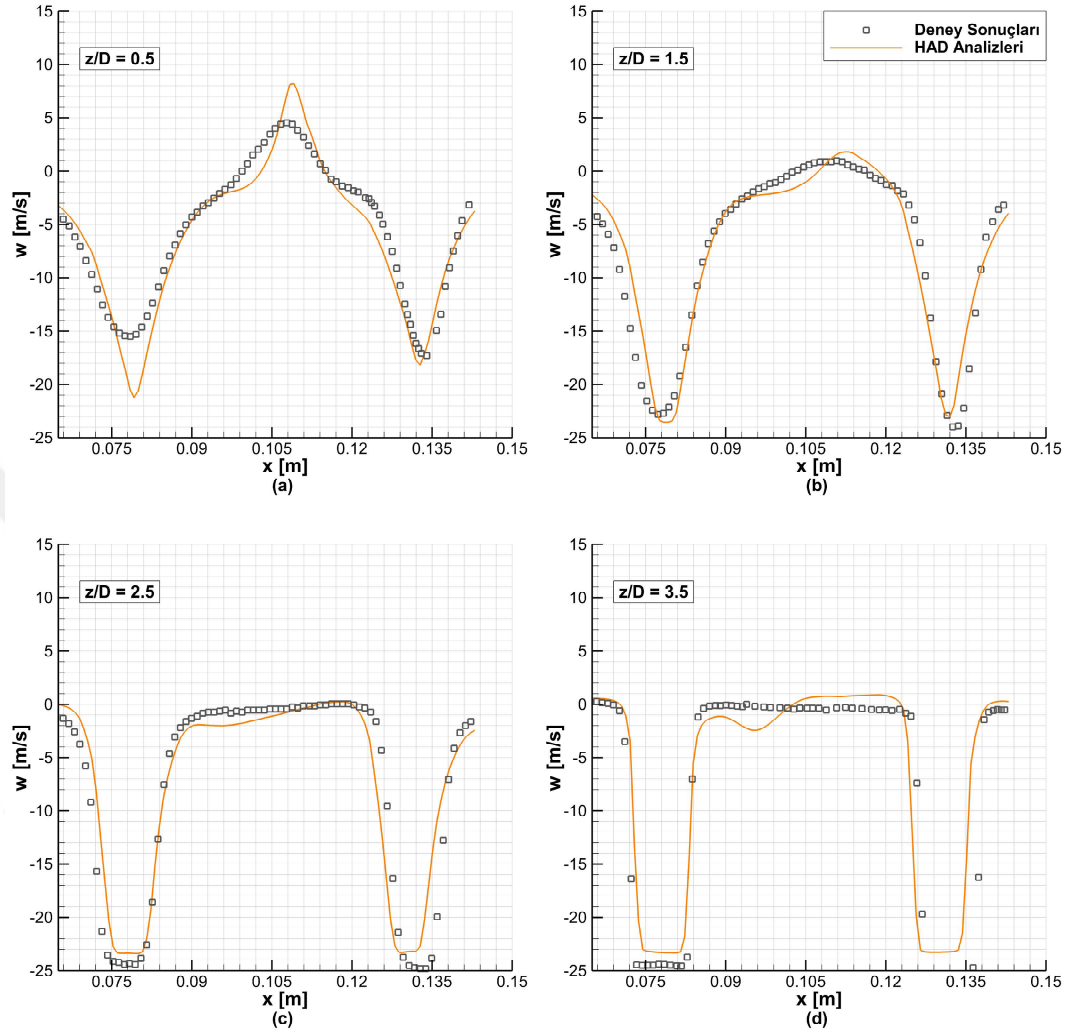
Yapılan analizler sonucunda yaklaşık 3.4 milyon elamana sahip çözüm ağının kullanılmasına HAD analizlerinin çözüm ağından bağımsız olması ve hesaplama maliyet kıstasları göz önüne alınarak karar verilmiştir.



Şekil 2.18 : Eksenel yönde çözüm ağı yoğunluğunun sayısal sonuca etkisi.

2.4.2.4 Doğrulama sonuçları

Çoklu çarpan jet sistemlerinde momentum transferi için oluşturulan sayısal modelin doğrulama çalışmaları sonucunda deneysel verilerle tutarlı sonuçlar elde edilmiştir. Eksenel yönde farklı konumlardan alınan hız profili momentum transferi için doğrulama verisi olarak belirlenmiş ve oluşturulan sayısal model ile yapılan HAD analizi sonuçları Geers ve diğ. [10]'daki deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır ve Şekil 2.19'te gösterilmiştir.



Şekil 2.19 : HAD analizi ve deneysel sonuçların karşılaştırılması [10].

Çoklu çarpan jet akışı için sayısal modelin oluşturulması sırasında öncelikle çarpan jet akışının ısı ve momentum transferi doğrulama çalışmaları yapıp ardından çok jet içeren sistemler üzerinde inceleme yapılmıştır. Literatürdeki dört farklı çalışmanın kullanılması ve karşılaştırmalarda ortalama değerler yerine dağılımsal sonuçların kullanılması sayesinde doğrulama çalışmalarının güvenilirliği artırılmıştır.

Yapılan doğrulama çalışmaları sonucunda, çoklu çarpan jet akışında ısı ve momentum transferinin deneysel çalışmalarla tutarlı sonuçlar verebilecek şekilde hesaplanması için HAD modelinde aşağıdaki hususlara dikkat edilmesi gerektiği ortaya çıkmıştır:

- Momentum, türbülans ve enerji denklemlerinin ikinci mertebe upwind şeması kullanılarak ayrıştırılması gerekmektedir.

- $k-\omega$ SST türbülans modeli kullanılmalı ve model gereksinimlerine uygun çözüm ağı oluşturulmalıdır.
- Akışkanın yoğunluğunun ve viskozitesinin sıcaklıkla değişimi sırası ile İdeal gaz ve Sutherland yasalarına uygun şekilde modellenmelidir.
- Çoklu çarpan jet sistemlerinde jetlerin türbülans şiddeti hesaplanarak tanımlanmalıdır.

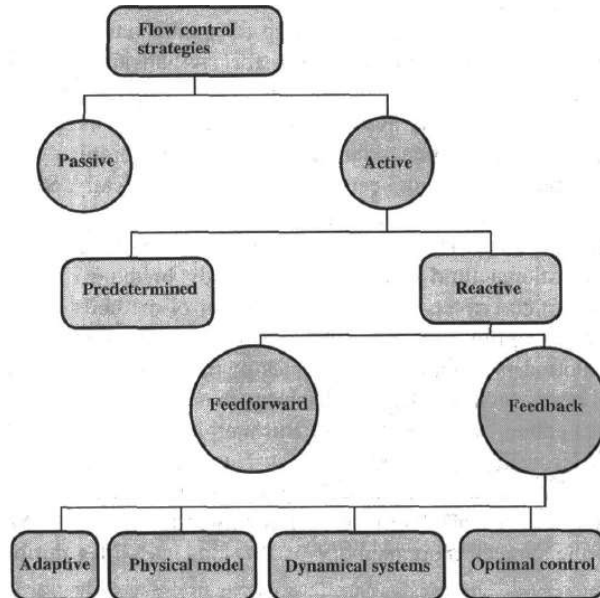


3. TASARIM ÖNERİLERİ

Bu bölümde, hassas cisimlerin temassız taşınması bağlamında ele alınan çoklu çarpan jet akışının çarpan plaka üzerinde oluşturduğu taşıma kuvvetinin artırılması ve harcanan akış gücünün azaltılması amacıyla sistemde yapılan tasarım değişikliklerinden bahsedilmiştir. Önerilen tasarımın temel hedefi çoklu çarpan jet akışında istenen sonuçları sağlayacak şekilde akış kontrolünün sağlanmasıdır.

Akış kontrolü, çeşitli istekler doğrultusunda iç ve dış akışlarda pasif (tasarımdaki değişiklikler) veya aktif olarak (momentum veya enerji transferi ile) akış yapısını ve karakteristiklerini manipüle eden yöntemlerin tümünü tarifler. Özellikle aktif akış kontrolünde dış akışlarda laminar akıştan türbülanslı akışa geçiş bölgesinin öne çekilmesi veya ötelenmesi, direnç kuvvetlerinin azaltılması, taşıma kuvvetinin artırılması ve akış ayrılmasını engellemek gibi amaçlarla uygulanır [25].

Akış kontrolü dışardan sisteme enerji aktarılmasına ihtiyaç duyuyorsa aktif akış kontrolü, ihtiyaç duymuyorsa ve sadece geometrik değişiklikler yapıyorsa pasif akış kontrolü olarak isimlendirilir. Akış kontrol yöntemlerinin sınıflandırılması Şekil 3.1’de verilmiştir.



Şekil 3.1 : Akış kontrolü yöntemlerinin sınıflandırılması [25].

Şekil 3.1’de gösterildiği üzere aktif akış kontrolü yöntemleri detaylıca sınıflandırılarak kontrol mekanizmasının akışa tepki verme durumuna göre önceden belirli (predetermined) ve tepkisel (reactive) olarak alt gruplarda incelenmiştir. Pasif akış kontrol yöntemleri genelde tasarımsal tedbirlerden oluşmaktadır ve bu sebeple literatürdeki bazı kaynaklarda "Akış Yönetimi" (Flow Management) olarak adlandırılmaktadır.

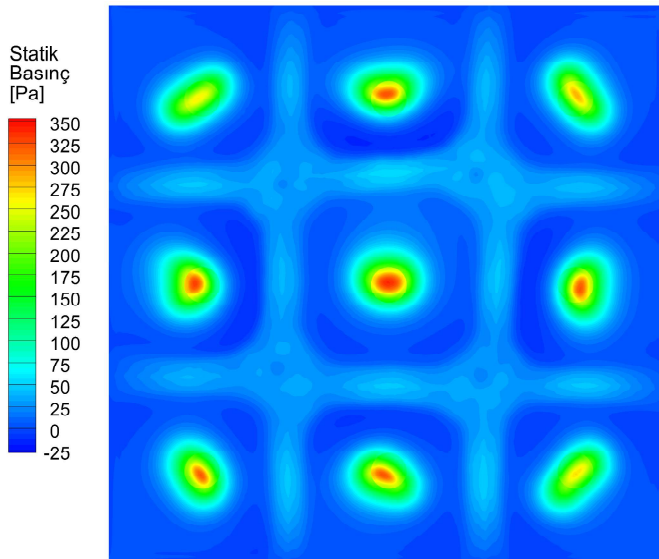
Çoklu çarpan jet akışında çarpan plakaya etki eden kuvvetler denklem 3.1, denklem 3.2 ve denklem 3.3’te belirtilmiştir.

$$\vec{F} = F_x \vec{i} + F_y \vec{j} + F_z \vec{k} \quad (3.1)$$

$$F_x \vec{i} + F_y \vec{j} = \int \vec{\tau} dA \quad (3.2)$$

$$F_z = \int p dA \quad (3.3)$$

Çarpan plakanın jet eksenine dik konumlandırılmasından ötürü taşıma kuvveti kayma gerilmesinden bağımsızdır. Önceki bölümde çoklu çarpan jet akışının momentum transferinin doğrulama çalışması sonuçlarında oluşturulan sayısal model ile yapılan HAD analizinden elde edilen çarpan plaka üzerinde basınç haritası Şekil 3.2’de gösterilmiştir.



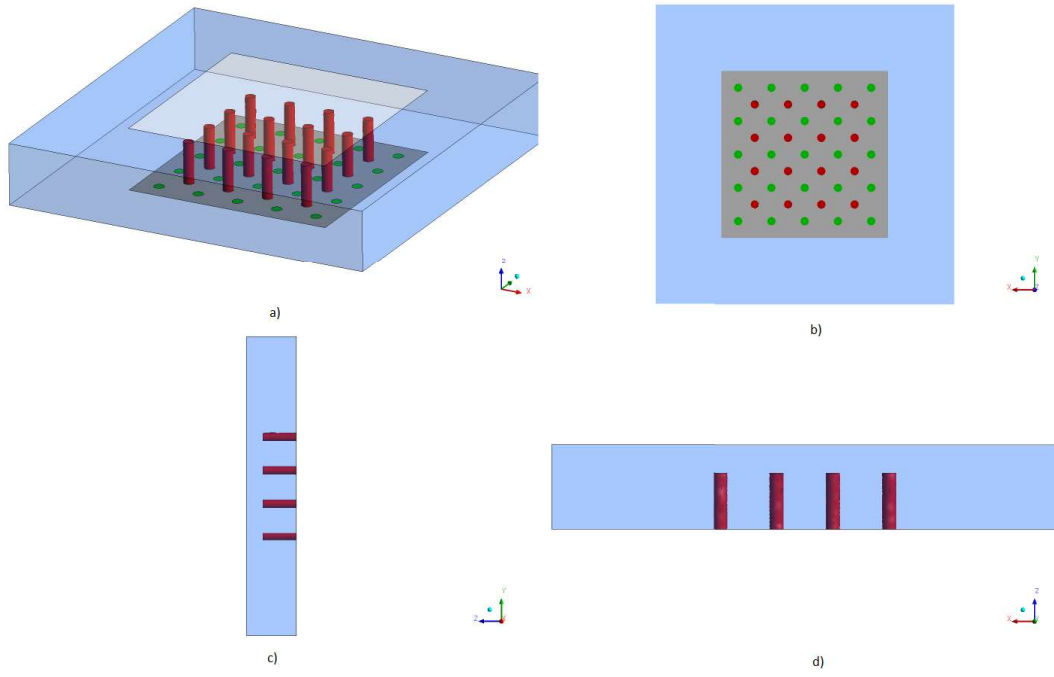
Şekil 3.2 : Çarpan plaka üzerindeki basınç haritası.

Şekil 3.2’de görüleceği üzere hava jetinin plakaya çarptığı bölgelerde durma basıncı diğer bölgelere göre daha yüksek olup duvar jeti bölgelerinde basınç azalmaktadır. Çarpan plakaya eksenel yönde uygulanan taşıma kuvvetin değerine durma basıncının değeri ve yayıldığı alan baskın şekilde etki etmektedir. Bunun yanısıra yukarı yönlü akışın basınç dağılımına etkisinin en şiddetli olduğu noktanın komşu dört jetin oluşturduğu karenin orta noktasında olduğu da Şekil 3.2’de görülmektedir.

3.1 Pasif Akış Kontrolü Olarak Kiriş Kullanımı

Tez çalışması kapsamında çoklu çarpan jet akışında çarpan plakaya uygulanan taşıma kuvvetinin arttırmak ve bu işlem için harcanan enerjinin azaltılması yoluyla sistem veriminin artırılması için pasif akış kontrolü uygulanması düşünülmüştür. Akışta birbirine komşu jetlerin oluşturduğu köşegenlere silindirik rijit kirişlerin yerleştirilmesi ile akışın pasif kontrolü hedeflenmiştir. Silindirik giriş kullanımı ile görülen yukarı yönlü akışın (upwash) etkileri azaltılarak jetlerin durma bölgelerinin kapladığı alanın artması hedeflenmiştir. Yukarı yönlü akışı oluşturan duvar jetlerinin karşılaştığı noktada hızların azalması sebebiyle çarpan plaka üzerinde basıncın artmasına rağmen bu bölgedeki basınç, durma basıncından oldukça düşüktür. Silindirik giriş uygulaması ile yukarı yönlü akışın pasif olarak kontrol edilmesi ve bu sayede çoklu çarpan jet akışındaki her bir jetin durma bölgesi alanının artırılması hedeflenmektedir. Söz konusu silindirik giriş yerleştirilmiş çarpan jet konfigürasyonu Şekil 3.3’te gösterilmiştir.

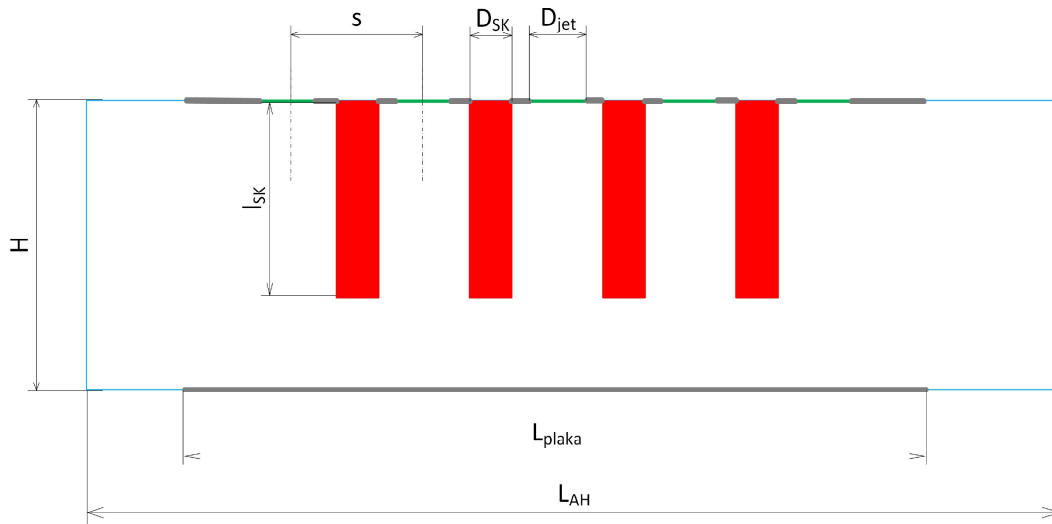
Şekil 3.3’te sırasıyla yeşil yüzeyler jet nozüllerini, kırmızı yüzeyler silindirik girişleri, gri yüzey jet plakasını, beyaz yüzey çarpan plakayı ve mavi yüzey atmosfer ortamını temsil etmektedir. Şekil 3.3’te görüleceği üzere, silindirik girişler yukarı yönlü akışın çarpan plaka üzerinde basınç haritası üzerindeki etkisinin en şiddetli olduğu bölgelere (komşu jetlerin oluşturduğu karenin orta noktasına) konumlandırılmıştır.



Şekil 3.3 : Farklı bakış açılarından pasif akış kontrolü uygulaması örneği: a) Uzaysal bakış açısı, b) XY Düzlemi, c) YZ Düzlemi, d) ZX Düzlemi.

3.1.1 Tasarım parametreleri

Silindirik kiriş içeren çoklu çarpan jet sistemindeki parametrelerin ilgilenilen tasarım çıktılarına etkilerinin incelenmesi için tasarım ve işletme parametreleri tanımlanmalıdır. Sisteme ait geometrik tasarım parametreleri Şekil 3.4'te gösterilmiştir.



Şekil 3.4 : Temsili akış hacimi üzerinde geometrik parametrelerin gösterimi.

Şekil 3.4'te belirtildiği üzere ardışık jetlerin merkezleri arasındaki (x veya y yönündeki) mesafe s , jet çapı D_{jet} , silindirik giriş çapı D_{SK} , jet düzlemi ve çarpan plaka arasındaki mesafe H , giriş uzunluğu l_{SK} , (x veya y yönündeki) çarpan plakanın kenar uzunluğu L_{plaka} ve akış hacminin (x veya y yönünde) kenar uzunluğu L_{AH} olarak isimlendirilmiştir.

Silindirik giriş içeren çoklu çarpan jet akışı için işletme parametreleri Çizelge 3.1'de ifade edilmiştir.

Çizelge 3.1 : Çoklu çarpan jet akışı için işletme parametreleri.

Parametre	Açıklama	Birim
V_{jet}	Ortalama jet hızı	m/s
ρ_{jet}	Akışkan yoğunluğu	m
μ_{jet}	Dinamik viskozite	Pa.s
T_{jet}	Jet sıcaklığı	K
T_{JP}	Jet plakası sıcaklığı	K
T_{plaka}	Çarpan Plaka Sıcaklığı	K

Çoklu çarpan jet sistemine on üç adet boyutlu tasarım parametresi bulunmaktadır ve hedef fonksiyonları sırası ile taşıma basıncı (P_L) ve taşıma gücü (W_P) olarak belirlenmiştir. Taşıma basıncı ve taşıma gücünün tanımları sırası ile denklem 3.4 ve 3.5'te verilmiştir.

$$P_L = \frac{F_L}{L^2} [Pa] \quad (3.4)$$

$$W_P = \Delta P \times Q [W] \quad (3.5)$$

Taşıma gücü aynı zamanda plaka üzerindeki basıncın alan ortalamasına eşitken, taşıma gücü toplam kontrol hacmi içerisindeki basınç kaybı ve jetlerin toplam hacimsel debisi ile hesaplanır.

3.1.2 Tasarım uzayının tanımlanması

Şekil 3.4 ve Çizelge 3.1'de görüleceği üzere incelenen probleme ait yedi adet geometrik ve altı adet işletme parametresi olmak üzere toplam on üç adet parametre bulunmaktadır. Tüm parametrelerin çoklu çarpan jet sisteminin performansı üzerinde etkilerini incelemek için fazla sayıda deneye gereksinim duyulacağından bazı parametrelerin etkisi incelenip diğerleri sabit kabul edilmiştir. Literatürle uyum sağlanabilmesi adına sabit alınan parametreler literatür mertebesinde alınmıştır.

Tez çalışması kapsamında s , V_{jet} ve l_{SK} parametrelerinin çoklu çarpan jet sisteminde taşıma kuvvetine etkisi incelenmiştir. Sabit alınan parametreler Çizelge 3.2’de verilmiştir.

Çizelge 3.2 : Tasarım uzayı dışında tutulan parametreler.

Parametre	Birim	Değer
D_{jet}	5	mm
D_{SK}	5	mm
H	28	mm
L_{plaka}	5s	mm
L_{AH}	9s	mm
ρ_{jet}	İdeal Gaz Yasası	kg/m^3
μ_{jet}	Sutherland Yasası	Pa.s
T_{jet}	K	300
T_{JP}	K	300
T_{plaka}	K	300

Çizelge 3.2’de görüldüğü üzere plaka ve akış hacmi ile ilgili geometrik parametreler olan ve L_{plaka} ve L_{AH} ile s arasında doğrusal bir ilişki kurulmuştur. Bu ilişkinin birinci sebebi birbirine yakın jetlerin incelendiği durumlarda ilgili bölgeye odaklanılmasını sağlayarak HAD analizlerinin hesaplama maliyetini düşürmek, ikinci sebebi ise taşıma performansının değerlendirilmesinde farklı jet tasarımlarına ait jet dağılımlarında karşılaştırılabilme adına denklik sağlanmasıdır. Böylece sadece jetlerin kapladığı alanın değerlendirilmesi ile küçük bir alana etki edebilecek tasarımların büyük plakalar üzerinden değerlendirilmesinin önüne geçilmiştir.

3.2 Tasarım Uzayının Boyut Analizi

Fiziksel olayların deneysel veya sayısal incelemelerinde probleme ait birçok parametreyi aynı anda incelemek karmaşık ve bazen gerekli olmayan bir işlemdir. Böyle durumlarda boyut analizi yapılarak probleme ait boyutlu parametreler daha az sayıdaki boyutsuz parametreye indirgenir. Boyut analizi sayesinde boyutlu değişkenlerle ifade edilebilecek farklı tasarımlar arasında benzerlikler tespit edilerek inceleme için gereken deney sayısı azaltılabilir.

3.2.1 Buckingham π analizi

Çoklu çarpan jet sistemine ait parametreler ve bu parametrelerin boyutları kütle, uzunluk, zaman ve sıcaklık için sırasıyla M, L, T ve θ ile ifade edilmiş ve Çizelge 3.3'te belirtilmiştir.

Tez kapsamında on üçü adet boyutlu değişkenin dokuz adet boyutsuz değişken ile ifade edilmiştir. İlgili boyutsuz parametrelerin fiziksel anlamları irdelenerek tasarım uzayı boyutsuz parametreler cinsinden ifade edilmiştir.

Çizelge 3.3 : Boyut analizinde incelenen parametreler ve boyutları.

Parametre	Boyut
s	L
D_{jet}	L
D_{SK}	L
H	L
l_{SK}	L
L_{plaka}	L
L_{AH}	L
V_{jet}	LT^{-1}
$\rho_{jet} \text{ \& } kg/m^3$	MT^{-3}
μ_{jet}	$ML^{-1}T^{-1}$
T_{jet}	θ
T_{JP}	θ
T_{plaka}	θ

Çizelge 3.3'te belirtilen parametreler içerisinde tüm boyutları ifade edebilecek sayıda "tekrarlayan parametre" seçilerek kalan boyutlu parametreler tekrarlayan parametreler kullanılarak boyutsuzlaştırılmıştır. Boyut analizinde kullanılan tekrarlayan parametreler sırasıyla D_{jet} , V_{jet} , ρ_{jet} ve T_{jet} 'dir.

Boyut analizi için literatürde tanımlanmış birçok yöntem bulunmaktadır. Bu çalışmada Buckingham'ın 1914 yılında ortaya koymuş olduğu π teoremi [26] kullanılmıştır. Buckingham π teoremi ile yapılan boyut analizi sonuçları Çizelge 3.4'te belirtilmiştir.

Çizelge 3.4'te görülebileceği üzere Buckingham π analiz sonucunda elde edilen boyutsuz sayılar içerisinde incelenecek olanlarının fiziksel anlamları irdelenmeli ve gerektiği takdirde değişikliğe gidilmelidir.

Çizelge 3.4 : Buckingham π analizinin sonuçları.

Boyutlu Parametre	Boyutsuz Parametre
s	s/D_{jet}
D_{SK}	D_{SK}/D_{jet}
H	H/D_{jet}
l_{SK}	l_{SK}/D_{jet}
L_{plaka}	L_{plaka}/D_{jet}
L_{AH}	L_{AH}/D_{jet}
μ_{jet}	$\mu_{jet}/\rho_{jet}V_{jet}D_{jet}$
T_{JP}	T_{JP}/T_{jet}
T_{plaka}	T_{plaka}/T_{jet}

3.2.2 Boyutsuz değişkenler cinsinden tasarım uzayının ifadesi

Tez çalışması kapsamında etkileri incelenecek olan s , V_{jet} ve l_{SK} değişkenlerinin Buckingham π analizi sonucu ortaya çıkan boyutsuz ifadeleri sırası ile s/D_{jet} , V_{jet} ve l_{SK}/D_{jet} 'tir. Jet akışı için Re_{jet} , boyutsuz sayısı ve silindirik kirişlerin en boy oranını ifade edebilmek için l_{SK}/D_{SK} 'nın kullanılmasına karar verilmiştir. Silindirik kirişlerin en boy oranı denklem 3.6'te belirtildiği şekilde tanımlanmıştır.

$$AR_{SK} = l_{SK}/D_{SK} \quad (3.6)$$

Tasarım uzayının ve tasarım uzayını oluşturan tasarım değişkenlerinin sınırları Çizelge 3.5'de belirtilmiştir.

Çizelge 3.5 : Tasarım değişkenlerinin limitleri.

	Alt Sınır	Üst Sınır
s/D_{jet}	2	6
Re_{jet}	3000	15000
AR_{SK}	1	5

Re_{jet} sayısal modeldeki sıkıştırılamaz akış kabulü ($Ma_{jet} < 0.25$) ile çelişmeyecek ve literatürdeki çalışmalarla tutarlılık sağlayacak şekilde belirlenmiştir.

3.3 Tasarım Değişkenlerinin Etkilerinin İncelenmesi

İncelenen tasarım değişkenlerinin meydana getirdiği kübik sınırlı (box bounded) tasarım uzayında belirli tasarım noktaları incelenerek tek bir parametrenin ve birden çok parametrenin hedef fonksiyonlarına etkileri incelenmiştir. Böylece,

optimizasyon çalışmasına başlamadan önce seçilen parametrelerin ne kadar etkin olduğu belirlenmiştir.

Çizelge 3.5'te belirtilen tasarım uzayında karşılaştırmalar için $(s/D_{jet}; Re_{jet}; AR_{SK})=(4,9000,3)$ noktası referans tasarım noktası olarak seçilmiştir. Bu referans tasarım noktası, tasarım uzayı içinde tasarım değişkenlerinin alt ve üst sınırlarına eşit uzaklıktadır.

Diğer değişkenler aynı kalmak koşulu ile herhangi bir P değişkeninin herhangi bir S tasarım çıktısı üzerindeki etkisi denklem 3.7'te verildiği şekilde irdelenmiştir.

$$\eta_{P,S} = \left| \frac{S_{P\max} - S_{P\min}}{S_{REF}} \right| \quad (3.7)$$

Tasarım değişkenlerinin etkilerinin incelenmesi için seçilen tasarım noktaları ve yapılan HAD analizi sonuçları Çizelge 3.6'te tablolatırılmıştır.

Çizelge 3.6 : Farklı tasarım noktalarında ait HAD analizi sonuçları

Tasarım Noktası	Tasarım Parametreleri			Hedef Fonksiyonları		Tasarım Parametrelerinin Etkisi	
	s/D_{jet}	Re_{jet}	AR_{SK}	$P_L [Pa]$	$W_P [W]$	$\eta_{P_L} [\%]$	$\eta_{W_P} [\%]$
REF	4	9000	3	49.79	1.49317	-	-
R1	2	9000	3	149.47	1.42514	254.21	5.34
R2	6	9000	3	22.87	1.50483		
R3	4	3000	3	5.513	0.05543	272.44	462.25
R4	4	15000	3	141.18	6.95764		
R5	4	9000	1	48.47	1.48530	9.04	0.26
R6	4	9000	5	52.97	1.48919		
R7	2	3000	1	15.44	0.05241	-	-
R8	6	3000	1	2.57	0.05561	-	-
R9	2	3000	5	17.42	0.05275	-	-
R10	6	3000	5	2.62	0.05561	-	-
R11	2	15000	1	390.91	6.56344	-	-
R12	6	15000	1	65.51	6.9927	-	-
R13	2	15000	5	438.07	6.62848	-	-
R14	6	15000	5	66.84	6.97081	-	-

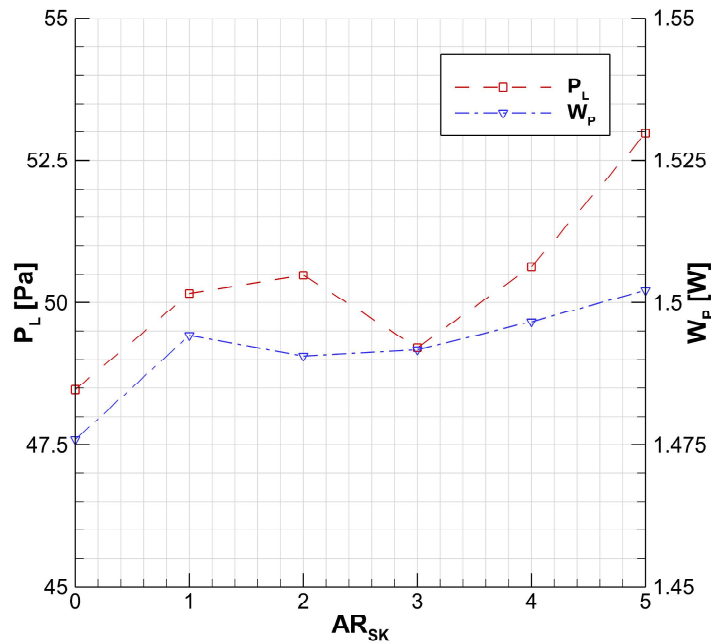
Çizelge 3.6'da görüleceği üzere REF tasarım noktasına göre R1 ve R2 s/D_{jet} parametresinin etkisini, R3 ve R4 Re_{jet} parametresinin etkisini ve R5 ve R6 ise AR_{SK} parametresinin etkisini göstermektedir. Tasarım noktaların R1-R6 için elde edilen HAD analizi sonuçlarına göre s/D_{jet} ve Re_{jet} taşıma basıncı üzerinde AR_{SK} 'ya göre daha fazla etkilidir. Ayrıca s/D_{jet} Re_{jet} 'e göre harcanan gücü çok fazla

etki etmemektedir. Her iki hedef fonksiyonu göz önüne alındığında AR_{SK} en az etkinliğe sahip olan tasarım parametresidir. Silindirik kiriş uygulamasının etkisini incelerken silindirik kirişlerin kullanılmadığı referans nokta ile yapılan karşılaştırmada ise η_{AR_{SK}, W_P} değerinin 0.26% ve η_{AR_{SK}, P_L} değerinin 9.54% olduğu görülmüştür. R7-R14 tasarım noktaları ise birçok tasarım parametresinin değişimlerinin hedef fonksiyonlar üzerindeki etkilerini göstermektedir.

Silindirik kiriş uzunluğunun sonuçlara etkilerini daha detaylı şekilde incelemek adına tasarım uzayı içerisinde farklı noktalar seçilerek HAD analizleri yapılmıştır. Seçilen tasarım noktaları ve HAD analizi sonuçları Çizelge 3.7’te ve Şekil 3.5’te verilmiştir.

Çizelge 3.7 : AR_{SK} ’nın hedef fonksiyonları üzerindeki etkisi.

Tasarım İsmi	Tasarım Parametreleri			Hedef Fonksiyonları	
	s/D_{jet}	Re_{jet}	AR_{SK}	$P_L [Pa]$	$W_P [W]$
AR0	4	9000	0	48.47	1.47592
AR1	4	9000	1	50.15	1.49428
AR2	4	9000	2	50.48	1.49063
AR3	4	9000	3	49.21	1.49176
AR4	4	9000	4	50.64	1.49663
AR6	4	9000	6	52.98	1.50215



Şekil 3.5 : AR_{SK} ’nin taşıma basıncı ve harcanan güç üzerindeki etkisi.

Çizelge 3.7’te ve Şekil 3.5’te görüleceği üzere sikindirik kiriş uygulaması kirişin en boy oranı değıştikçe farklı etkiler göstermektedir. AR_{SK} değeri 2 iken 1 olması durumuna göre daha az güç harcayarak daha fazla taşıma basıncı sağladığı, ancak 3 olması durumunda ise 2 olması durumuna göre kötü bir taşıma performansına sahip olduğu görölmüştür. Bunun yanısıra silindirik kiriş kullanılmasının bağıl olarak taşıma basıncını taşıma gücünden daha fazla arttırdığı, dolayısı ile sistemin taşıma verimini arttırdığı gözlemlenmiştir.





4. OPTİMİZASYON ÇALIŞMALARI

Tez çalışması kapsamında silindirik giriş içeren çoklu çarpan jet sisteminin çok hedefli optimizasyon çalışması yapılmıştır. Yapılan optimizasyon sonucunda belirlenen tasarım uzayı içerisinde taşıma kuvvetinin yüksek ve taşıma için harcanan pompalama gücünün düşük olduğu tasarımların belirlenmesi hedeflenmiştir. Farklı tasarımların değerlendirilmesi sırasında tasarım uzayını hedef fonksiyonları cinsinden ifade eden eğriler yerine HAD analizlerinin çıktıları kullanılarak eğri uydurma işleminden gelebilecek hataların önüne geçilmiştir. Yapılan optimizasyon çalışmasında kullanılan tasarım uzayı üçüncü bölümde HAD analizleri ile incelenmiş olan AR_{SK} , s/D_{jet} ve Re_{jet} tasarım değişkenlerinden oluşmaktadır.

Günümüzün mühendislik problemlerinde hedef fonksiyonları birden fazla tasarım değişkenine bağlı olup ve aralarındaki ilişkiyi açıklayan matematiksel modeller kısmi diferansiyel denklemler ile ifade edilmektedir. Bu nedenden, mühendislik tasarımlarını ele alan iyileştirme çalışmalarında istenilen çıktılar cinsinden en iyi tasarıma veya global optimum'a ulaşılması sürecinde sezgisel yaklaşımlar yerine optimizasyon algoritmaları tercih edilmektedir.

Literatürde bir çok optimizasyon algoritması bulunmasına karşın, Charles Darwin'in evrim teorisinden ve Gregor Mendel'in kalıtım teorisinden esinlenilerek oluşturulan Genetik Algoritma (GA) avantajları sebebiyle giderek yaygınlaşmıştır. Genetik Algoritmanın; hedef fonksiyonlarının tasarım parametrelerine göre kısmi türevler bilgilerinin gerekmemesi, birden fazla hedef fonksiyonuna sahip optimizasyon çalışmalarının yapılabilmesi ve kapalı denklemlerle ifade edilen hedef fonksiyonlarını inceleyebilmesi gibi avantajları bulunmaktadır. Buna karşın birçok tasarım noktası için hedef fonksiyonu değerlendirmesi yapılması gerekmesi ve elde edilen sonucun tasarım uzayı içerisinde en iyi olduğundan emin olunamaması gibi dezavantajları bulunmaktadır. Genetik algoritmanın döngülerle çalışmasından dolayı elde edilen sonuçlarda yakınsamanın elde edildiğinden emin olunması gerekmektedir. Bilgisayarların hesaplama kapasitesinin artması sayesinde genetik algoritmanın mevcut

dezavantajlarının etkisi azalmış, bu sayede özellikle mühendislik disiplinlerinde genetik algoritmanın kullanımı artmıştır.

Tez çalışması kapsamında, HAD modeli ile bütünleşik olarak çalışan Eş Baskın Karşılaştırmalı Elitist Genetik Algoritma (Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGA-II)) algoritması kullanılmıştır. HAD modeli ile bütünleşik olarak çalışan optimizasyon MATLAB 2017b arayüzünde programlanmıştır.

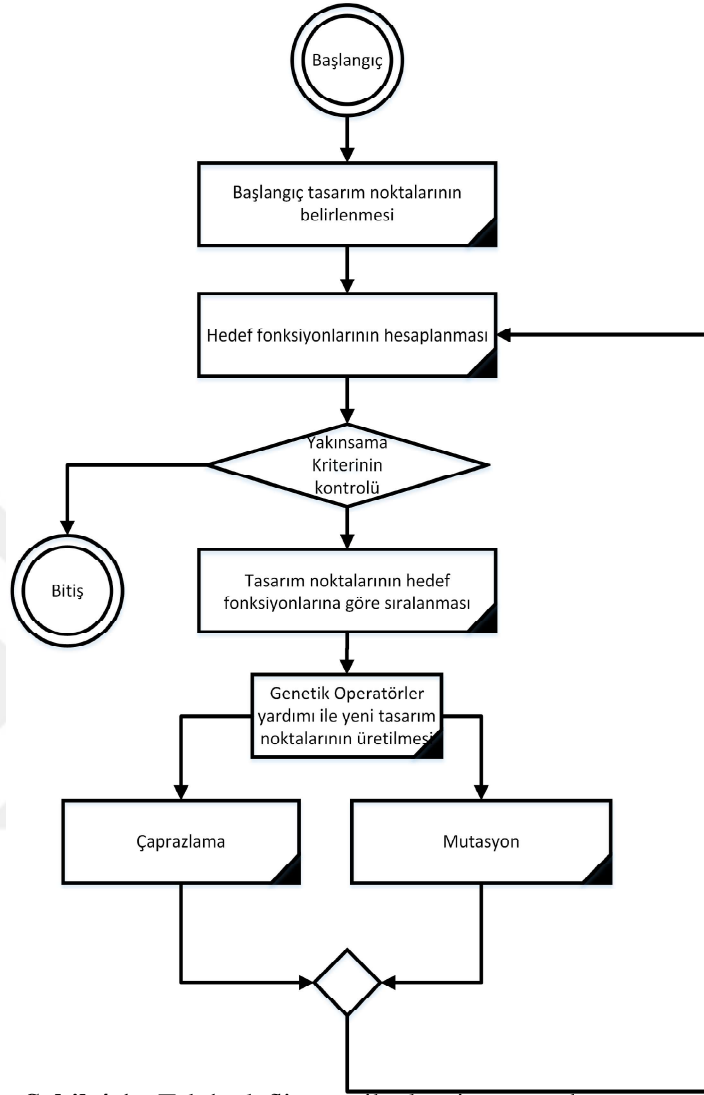
Bu bölümde optimizasyon algoritmasının çalışma şeması, algoritma içerisindeki operatörlerin sıklığını belirleyen ve çalışmanın tekrar sayısını belirten katsayılar, atanan hedef fonksiyonlarının tanımı, optimizasyon algoritmasına ait yazılan kod satırlarının çalışması sırasında gerçekleştirdiği işlemler ve optimizasyon çalışmasının sonuçları verilmiştir.

4.1 Eş Baskın Karşılaştırmalı Elitist Genetik Algoritma

Optimizasyon algoritmaları incelenilen tasarıma ait belirli girdi parametreleriyle ilişkilendirilen hedef fonksiyonlarının sınırları belirlenmiş tasarım uzayı içerisinde minimum olduğu değeri arayan algoritmalarlardır. Bu sebeple “arama algoritmaları (searching algorithm)” olarak da tanımlanmaktadırlar. N adet tasarı değişkenine ve M adet hedef fonksiyonuna sahip bir optimizasyon probleminin matematiksel ifadesi denklem 4.1’de verilmiştir:

$$\begin{aligned} x_n &\in R^N; n = 1, 2, 3, 4 \dots N \\ F_m &= f(x_1, x_2, x_3, \dots x_N); m = 1, 2, 3, 4 \dots M \\ \min &(F_1, F_2, F_3, \dots F_M) \end{aligned} \quad (4.1)$$

M ve N değerinin bire eşit olduğu durumda analitik yöntemler yardımı ile problemi çözmek mümkünken diğer durumlarda optimizasyon algoritmalarına ihtiyaç duyulmaktadır. Probleme ait hedef fonksiyonlarının doğrusallığı, hedef fonksiyonunun sayısı gibi farklı karaktere sahip problemler için birçok algoritma önerilmiştir. Sezgisel algoritmalar hedef fonksiyonun kısmi türevlerini çözmeden iteratif bir yöntemle tasarım uzayını tarayarak optimum noktayı ararlar [27]. Tek hedefli genetik algoritmanın akış şeması Şekil 4.1’de verilmiştir.



Şekil 4.1 : Tek hedefli genetik algoritmanın akış şeması.

Şekil 4.1’de verilen akış şemasında belirtile tasarım noktası sayısı iterasyonlar boyunca sabit kalmaktadır. Yapılan sıralama sonucu bazı tasarım noktaları elenirken yerine yeni tasarım noktaları genetik operatörler yardımı ile üretilmektedir. Yakınsama kriteri, tasarım noktalarının toplam sayısı, mutasyon ve çaprazlama işleminden üretilecek tasarım noktası miktarları algoritmanın girdisi olup, kullanıcı tarafından belirlenmesi gereken parametrelerdir. Genetik algoritma özelinde optimizasyon algoritmasının terminolojisi evrim teorisi ile ilişkili şekilde zamanla değişmiştir. Tasarım noktalarının oluşturduğu kümeye popülasyon, her bir tasarım noktasına birey ve her bir iterasyona nesil jenerasyon ismi verilmiştir. Bunun yanı sıra tasarım noktalarını oluşturan her bir tasarım değişkenine gen ve tasarım değişkenlerinin oluşturduğu bilgi bütününe kromozom ismi verilmektedir. İleride bu terminolojiyi içeren algoritma anlatılacaktır.

Çaprazlama işlemi (crossover) sırasında popülasyon içerisinde seçilen bireyler genlerini paylaşarak yeni bir birey oluştururlar. Çaprazlama işlemi sırasında önceden belirlenmiş kurallar ile iki kromozom belirli genleri paylaşırlar. Çaprazlama işlemi sırasında her bireyin “çiftleşme” şansı önceki adımlarda yapılan sıralama sonucuyla orantılı şekilde gerçekleşir. Bu rastgelesellik sayesinde daha önceki bireylere benzemeyen yeni bireyler oluşturulabilir. Mutasyon işlemi sırasında ise önceki bireyler referans alınmadan rastgele yeni bireyler topluma eklenir. Mutasyon operatörünün amacı algoritmanın odaklandığı bölgeler dışındaki optimum olabilecek tasarım noktalarının gözden kaçmamasını sağlamaktır.

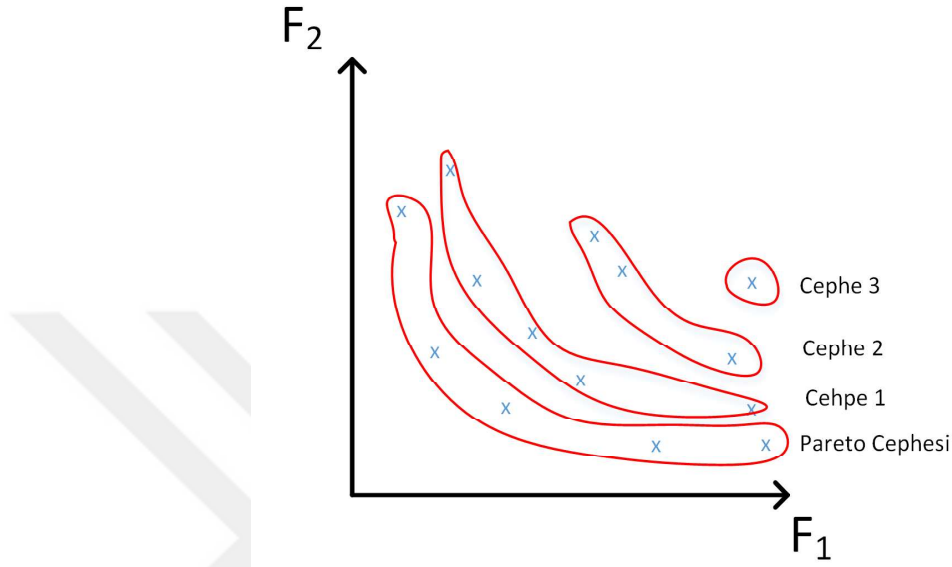
Yukarıda bahsi geçen akış şemasında kendi nesilleri içerisinde, hedef fonksiyonunun minimumuna sahip olan belirli sayıdaki birey diğer nesile kopyalanarak aktarılırsa bu durum algoritmanın elitist olduğunu ifade eder. Dolayısı ile elitizm doğal seleksiyonda olduğu gibi seçilen bireylerin genlerini bir sonraki nesile kopyalamasıdır.

Bir hedef fonksiyonu için tasarımlar arasında karşılaştırma sıralama ile yapılabilirken hedef fonksiyonu sayısı birden fazla olduğu durumlarda sıralama yapmak için bazı basitleştirmeler yapmak veya sınıflandırma yardımı ile karşılaştırmalar yapmak gerekmektedir [28]. Çok hedef fonksiyonu bulunduran optimizasyon problemlerinde uygulanan yaklaşımlar aşağıdaki şekilde sıralanabilir:

- Cebirsel Yaklaşım
- Vektör Yaklaşımı
- Pareto Sıralaması Yaklaşımı

Cebirsel yaklaşımda tasarımlar arasında sınıflandırma yapabilmek için bir uygunluk fonksiyonu türetilir. Bu uygunluk fonksiyonu her bir hedef fonksiyonunun ağırlıklı ortalaması ile ifade edilir. Böylece problem her bir hedef fonksiyonunun optimizasyonundan uygunluk fonksiyonunun optimizasyonuna indirgenmiş olur. Bu yöntemde kullanıcı her bir hedef fonksiyonunun ağırlığını belirlemelidir. Vektör yaklaşımında karşılaştırma işlemi her bir hedef fonksiyonuna göre yapılan sıralamalardan eşit şekilde faydalanarak yapılmaktadır. Vektör yaklaşımı, elitizm işlemi sırasında da her bir hedef fonksiyonu için yapılan sıralamadan eşit sayıda bireyin seçilmesini esas alır. Pareto sıralaması yaklaşımında ise aynı cepheye mensub bireyler

eşit derecede “iyi” kabul edilmektedir. Bu gruplar içerisinde en "iyi" cepheye Pareto cephesi denir. Pareto Sıralaması yaklaşımına ait şematik ifade Şekil 4.2’de verilmiştir.



Şekil 4.2 : Pareto sıralaması ve Pareto cephesi.

Şekil 4.2’de gösterildiği üzere Pareto sıralaması yaklaşımı her bireyi sıralamak yerine eşit derecede iyi bireylerin oluşturduğu grupları ortaya koymaktadır. Bu sayede hedef fonksiyonları arasında önceliklendirme yapılmadığından optimum sonuçların tamamı bulunabilmektedir. Cebirsel ve vektör yaklaşımlarının kullanıldığı algoritmalarda optimizasyon sonuçları yeterli doğrulukta çıkmamakta ve tasarım uzayındaki optimum sonuçların bazılarına ulaşamamaktadır.

Tez çalışmasında çok hedef fonksiyonlu problemleri incelemek için tasarlanmış Deb ve diğ. [29] tarafından literatüre kazandırılmış olan genetik algoritma kullanılmıştır. NSGA-II algoritmanın çalışma prensibi genetik algoritma ile oldukça benzemekle beraber elitist olması ve Pareto sıralaması yaklaşımı kullanması ile diğer genetik algoritma uyarlamalarından ayrılmaktadır.

4.1.1 Optimizasyon sabitleri

Eş Baskın Karşılaştırmalı Elitist Genetik Algoritma’da jenerasyonlar boyunca popülasyon sayısının sabit kalması esastır. Bunun için seçilim (elitizm), çaprazlama ve mutasyon miktarlarının toplamı toplumdaki birey sayısına eşit olmalıdır. Bu durum denklem 4.2’de belirtilmiştir.

$$n_{pop} = n_{elit} + n_{capraz} + n_{mutasyon} \quad (4.2)$$

Denklem 4.2’de n_{pop} , n_{elit} , n_{capraz} ve $n_{mutasyon}$ sırasıyla popülasyon, seçim, çaprazlama ve mutasyon miktarlarını belirtmektedir. Her optimizasyon probleminde yeterli sayıda popülasyon için uygun çaprazlama ve mutasyon sayısı belirlenmelidir. Optimizasyon parametreleri ile alakalı belirli bir kural olmamakla beraber bu parametrelerin sonuçlar üzerindeki etkisinin incelenmesi literatürde parametre ayarlanması (parameter tuning) olarak isimlendirilmektedir.

Tez çalışması kapsamında n_{pop} 3 boyutlu tasarım uzayını ifade edebilmesi adına ve literatürde sıkça rastlandığı üzere 50 olarak seçilmiştir, n_{capraz} ve $n_{mutasyon}$ literatürdeki diğer optimizasyon çalışmalarıyla uyumlu olacak şekilde sırasıyla 26 ve 4 olarak belirlenmiştir. Algoritma 20 jenerasyon boyunca sürdürülmüş olup yakınsama kriteri kullanılmamıştır.

4.1.2 Hedef fonksiyonları

Optimizasyon problemleri önceki bölümde bahsedildiği üzere hedef fonksiyonlarının minimuma indirgenmesini hedefleyen arama algoritmalarıdır. Tez çalışması kapsamında optimizasyon algoritmaları kullanılarak çoklu çarpan jet sisteminin taşıma kapasitesinin artırılması hedeflenirken, akışkanı pompalamak için harcanan gücünün azaltılması hedeflenmektedir. Tez kapsamında optimizasyon çalışmasında kullanılan hedef fonksiyonlar denklem 4.3 ve denklem 4.4’te verilmiştir.

$$F_1 = -P_L[Pa] \quad (4.3)$$

$$F_2 = W_P[W] \quad (4.4)$$

4.2 Yazılan MATLAB Programının İşlem Adımları

Tez kapsamında MATLAB ortamında programlanan NSGA-II optimizasyon algoritmasının işlem adımları aşağıda belirtilmiştir.

- Adım 1: Daha önce çalıştırılmış olan programlara ait çıktıların silinmesi, ekranların kapatılması ve verilerin temizlenmesi

- Adım 2: Değişken sayısının ve ayırıklaştırılmış tasarım uzayının tanımlanması
- Adım 3: NSGA-II algoritmasına ait katsayıların tanımlanması
- Adım 4: Çoklu çarpan jet sistemine ait sabit parametrelerin tanımlanması
- Adım 5: Başlangıç tasarım noktalarının Latin Hiperküp Örnekleme (Latin Hypercube Sampling) metodu ile tanımlanması
- Adım 6: Tasarım noktaları için HAD çözüm ağının oluşturulması
- Adım 7: Tasarım noktaları için ANSYS-Fluent günlük dosyasının oluşturulması
- Adım 8: Tasarım noktaları için ilgili ANSYS-Fluent HAD dosyalarının oluşturulması
- Adım 9: Tasarım noktaları için analizlerin yapılması
- Adım 10: HAD analiz sonuçlarının MATLAB ortamına aktarılması
- Adım 11: Mevcut (birinci) jenerasyona ait analiz sonuçlarının bir sonraki jenerasyona ait klasöre kopyalanması
- Adım 12: Yeni jenerasyon için çaprazlama işlemi
- Adım 13: Yeni jenerasyon için mutasyon işlemi
- Adım 14: Eski ve yeni bireylerin birleştirilmesi
- Adım 15: Yeni jenerasyona ait bireyler için HAD çözüm ağının oluşturulması
- Adım 16: Yeni jenerasyona ait bireyler için ANSYS-Fluent günlük dosyasının oluşturulması
- Adım 17: Yeni jenerasyona ait bireyler için ilgili ANSYS-Fluent HAD dosyalarının oluşturulması
- Adım 18: Yeni jenerasyona ait bireyler için analizlerin yapılması
- Adım 19: Analiz sonuçlarının MATLAB ortamına aktarılması
- Adım 20: Popülasyona ait bireylerin karşılaştırılması

- Adım 21: En iyi n_{pop} adet bireyin bir sonraki jenerasyona ait klasöre kopyalanması
- Adım 22: Jenerasyon sayacı 20'ye ulaşana kadar Adım 12 ve Adım 22 arasındaki işlemlerin tekrarlanması

Adım 2'de tanımlanan tasarım uzayına ait bilgiler Çizelge 3.5'te belirtilmekle beraber AR_{SK} , s/D_{jet} ve Re_{jet} tasarım değişkenleri için artımlar sırasıyla 0.2, 0.2 ve 500 olarak seçilmiştir. Yapılan ayırıklaştırma sonucunda tasarım uzayı 11025 (21x21x25) tasarım noktası ile ifade edilmiştir. Optimizasyon işlemi ile 620 analiz yapılması sonucu elde edilen Pareto Cephesinin tasarım uzayının yaklaşık %5.6'sının incelenmesin yeterli olduğu görülmüştür.

Adım 6-8 ve adım 15-17 arasındaki işlemler için MATLAB programının ANSYS Workbench ve Fluent arayüzü ile entegre şekilde çalışması gerekmektedir. Bunun için çözüm ağı bilgisini barındıran ANSYS-Workbench günlüğü ve HAD modeli ve sınır şartı bilgilerini barındıran Fluent günlüğü dosyaları referans dosyaların kopyalanması ve ilgili tasarım noktasına göre değiştirilmesi ile oluşturulmuştur. Komut dosyaları otomatik olarak çalıştırılmaktadır.

4.2.1 Kullanılan yardımcı programlar

Optimizasyon algoritmasının diğer programlarla entegre olması gereken işlemlerinde programın basitliği ve tekrara düşülmemesi açısından yardımcı programlar oluşturulmuştur. Adım 6-8 ve adım 15-17 arasındaki işlemlerde kullanılan yardımcı programlara ait detaylar bu başlık altında incelenmiştir.

Adım 6 ve 15'te kullanılan çözüm ağı oluşturma programı dana önceden parametrik geometri tasarımı ile oluşturulan referans ANSYS Workbench dosyasına ait parametreleri değiştirerek ANSYS Workbench dosyasını günceller ve kaydederek kapatır. Parametrelerin güncellenmesi için program önceden tasarım noktasının değişkenlerine uygun olan workbench günlüğü dosyası yazarak kaydeder ve güncelleme işlemi otomatik olarak yapılır. Referans ANSYS-Workbench dosyasının içerisindeki en güncel çözüm ağı dosyası belirlenerek ilgili tasarım noktasının bulunduğu klasöre kopyalanır. Bu aşamada oluşturulan çözüm ağında ilgili tasarım noktasına ait AR_{SK} ve s/D_{jet} gibi geometri ile ilgili tasarım değişkenleri güncellenmiş olur.

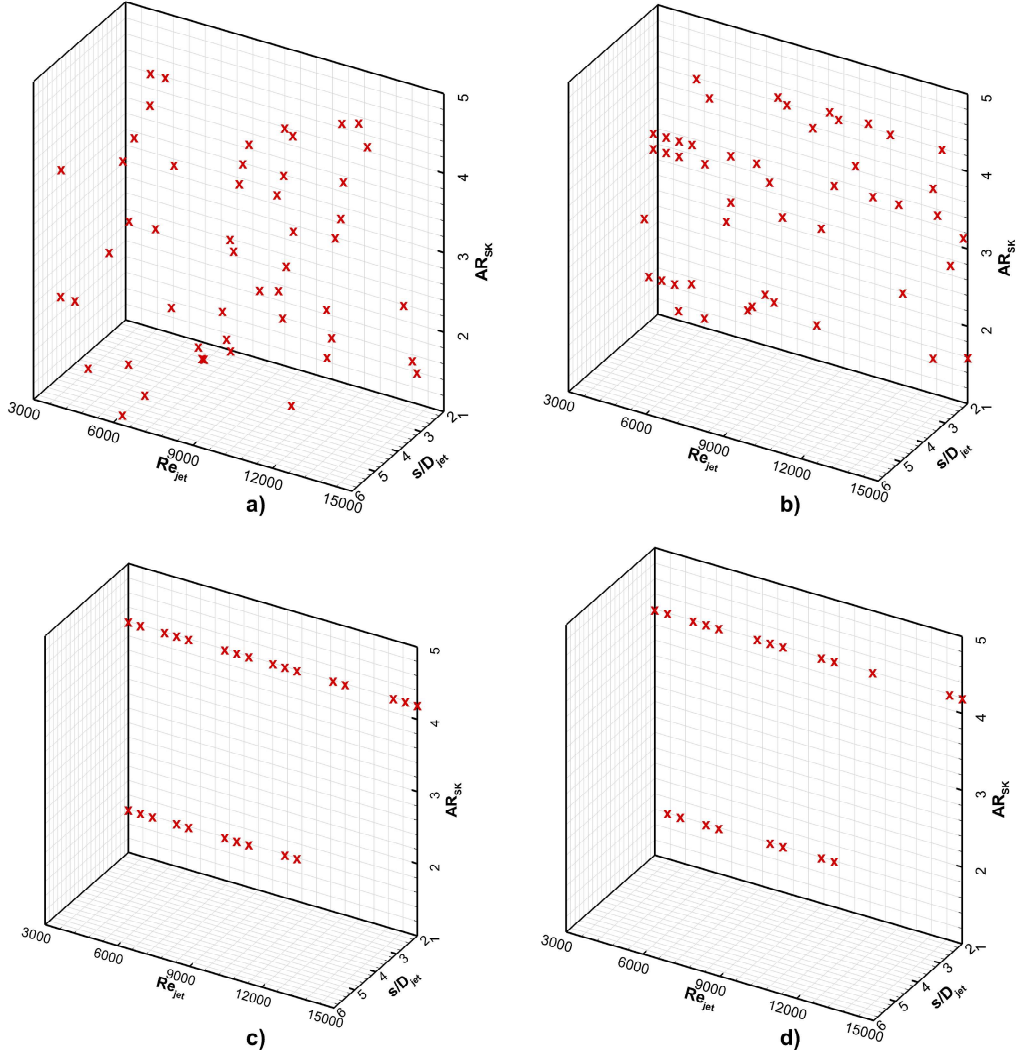
Adım 7 ve 16'da ilgili tasarım noktasına ait sınır koşulu, referans değerler gibi değişiklikleri yapabilmek adına ANSYS-Fluent günlüğü dosyası oluşturulur. Tüm analizler için bu dosya sayılı değişiklikler dışında birbirine benzediğinden referans bir dökümandan alınan satırlar içerisinde tasarım noktasına dair değişiklikler yapılır. Oluşturulan yeni dosyada Re_{jet} değerinden faydalanılarak tasarım noktasına ait jet hızı ve türbülans şiddeti gibi sınır şartları ile ilgili tanımlamalar yapılır.

Son olarak Adım 8 ve 17'de önceki yardımcı programlardan elde edilen çözüm ağı ve ANSYS-Fluent günlük dosyaları kullanılarak referans Fluent analizi dosyası üzerinde değişiklikler yapılır ve tasarım noktasına ait klasöre kaydedilir.

Optimizasyon işlemi sırasında yapılan HAD analizleri Ulusal Yüksek Başarımlı Hesaplamalar Merkezinde (UHeM) gerçekleştirilmiştir. Adım 9 ve 18'de program bir döngü içerisinde her 60 saniyede bir sonuç dosyalarının olup olmadığını kontrol eder, eğer sonuç dosyaları mevcutsa bir sonraki adıma geçer. UHeM kullanımı ile ortalama bir jenerasyon için hesaplama süresi 1/10 oranında azaltılabildiğinden kullanıcı müdahalesi yoluna gidilmiştir. Bir diğer unsur da, MATLAB ve UHeM arasında da verilmiş bir analizin otomatizasyonu yapılabilse de UHeM bünyesindeki bilgisayarlardaki trafiğin kontrol edilmesi bağlamında bu işlemin kullanıcı kontrolünde yapılmış gereğidir.

4.3 Optimizasyon Sonuçları

Optimizasyon işleminde tasarım noktaları hedef fonksiyonlarının azaltılması amacıyla genetik algoritmalar vasıtasıyla değiştirilmiştir. Jenerasyonlar boyunca tasarım noktalarının (bireylerin) tasarım uzayı üzerindeki dağılımları ve her bir tasarım noktasına ait tasarım değişkenleri sırasıyla Şekil 4.3 ve Çizelge 4.1'de verilmiştir.



Şekil 4.3 : Jenerasyonlar boyunca popülasyonun tasarım uzayı üzerindeki dağılımı:
a) Birinci jenerasyon, b) Beşinci jenerasyon c) Onuncu jenerasyon, d) Yirminci jenerasyon.

Şekil 4.3.c ve 4.3.d'de görüldüğü üzere tasarım noktalarının onuncu iterasyondan sonra önemli ölçüde değişmediğinden dolayı optimizasyon işleminin yakınsadığı söylenebilir. Optimum sonuçların dağılımına bakıldığında tüm Re_{jet} değerlerinde optimum tasarımlarına ulaşıldığı görülmektedir. Jet Reynolds sayısının artması veya azalması sonucu taşıma basıncı ve taşıma gücü arttırmış veya azaltmıştır. Dolayısı ile tüm tasarım değişkenleri birbirine denk olan fakat farklı Re_{jet} değerinin olduğu tasarımlar olarak Pareto sıralaması bakımından eşit derecede iyi tasarımlardır.

Çizelge 4.1'de ilgili jenerasyonlardaki bireylerin tasarım değişkenleri verilmiştir. Görüleceği üzere tasarım noktalarının onuncu jenerasyondan itibaren s/D_{jet} değişkenlerinin 2'ye AR_{SK} değişkenlerinin ise 4.2 veya 1.6 değerlerine yakınsamıştır. Yirminci

Çizelge 4.1 : Jenerasyonlar boyunca bireylere (tasarım noktaları) ait genler (tasarım değişkenleri).

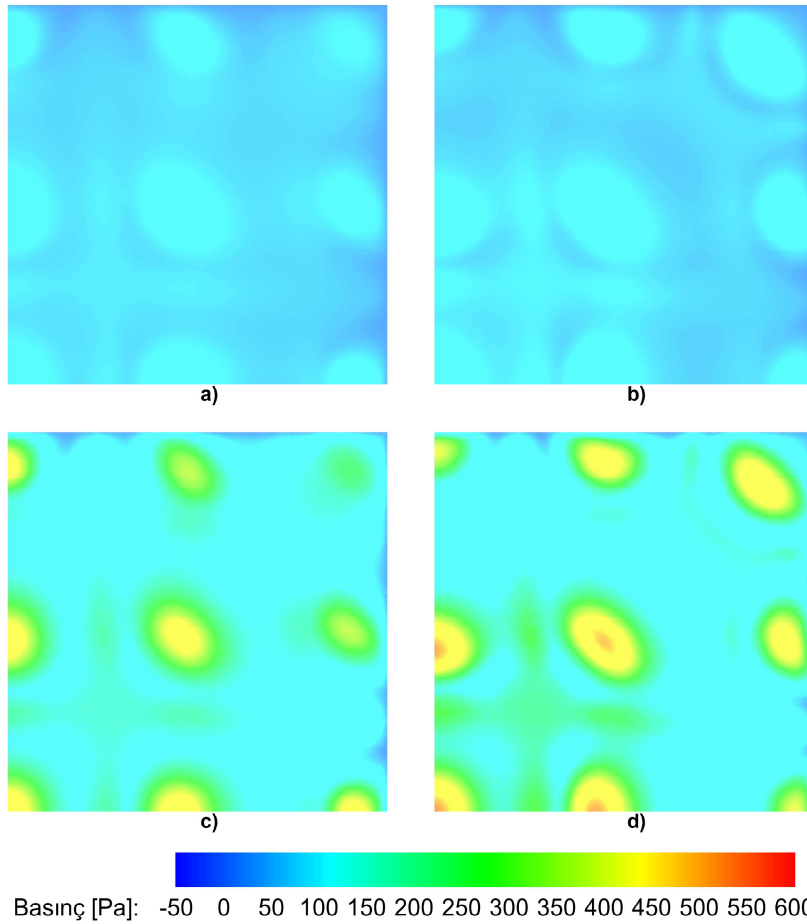
Birinci Jenerasyon			Beşinci Jenerasyon			Onuncu Jenerasyon			Yirminci Jenerasyon		
s/D_{jet}	Re_{jet}	AR_{SK}	s/D_{jet}	Re_{jet}	AR_{SK}	s/D_{jet}	Re_{jet}	AR_{SK}	s/D_{jet}	Re_{jet}	AR_{SK}
4.4	9500	4.2	2.0	9000	4.0	2.0	4500	4.2	2.0	4500	4.2
2.6	14500	1.6	2.0	4500	4.2	2.0	8000	4.2	2.0	8000	4.2
3.4	8500	3.6	2.2	3500	3.4	2.0	14000	4.2	2.0	8000	4.2
5.6	6000	1.0	2.2	6000	3.4	2.0	10000	4.2	2.0	5500	4.2
5.4	12000	3.4	2.0	12000	4.2	2.0	10000	4.2	2.0	14500	4.2
5.8	12000	4.4	2.2	3000	3.2	2.0	8000	4.2	2.0	7500	4.2
3.8	5500	4.8	2.0	8000	4.2	2.0	5500	4.2	2.0	3500	1.6
4.2	3000	1.8	2.2	11500	3.4	2.0	3500	4.2	2.0	11500	4.2
2.8	7500	1.4	2.2	3000	3.4	2.0	10000	4.2	2.0	11500	4.2
3.0	5000	2.6	2.2	4000	3.2	2.0	4000	1.6	2.0	5500	4.2
4.4	6000	4.6	2.0	15000	1.6	2.0	14500	4.2	2.0	15000	4.2
5.8	14500	4.8	2.0	7500	1.6	2.0	7500	4.2	2.0	5000	1.6
3.6	12500	3.6	2.0	5000	4.0	2.0	3500	1.6	2.0	10000	1.6
3.6	4500	1.0	2.0	14000	4.2	2.0	9500	1.6	2.0	3000	4.2
3.6	13500	4.6	2.2	4000	3.4	2.0	11500	4.2	2.0	5000	1.6
4.8	13000	2.8	2.0	10000	4.2	2.0	11500	4.2	2.0	15000	4.2
4.4	11000	2.4	2.2	7000	3.4	2.0	5500	4.2	2.0	3000	4.2
2.0	9000	4.0	2.4	7000	1.6	2.0	12000	4.2	2.0	8000	4.2
3.2	8000	1.4	2.2	5000	3.2	2.0	15000	4.2	2.0	5000	4.2
2.4	11500	4.4	2.2	7500	3.2	2.0	5000	1.6	2.0	5000	4.2
3.0	4000	2.6	2.2	10000	3.4	2.0	7000	4.2	2.0	5500	4.2
5.6	9000	2.0	2.2	14000	3.4	2.0	7000	4.2	2.0	7500	4.2
4.2	12500	2.0	2.4	11000	3.8	2.0	10000	1.6	2.0	5000	4.2
3.2	10000	3.8	2.4	11500	4.4	2.0	5500	1.6	2.0	10000	1.6
4.8	9500	3.2	2.2	8000	2.8	2.0	3500	4.2	2.0	5500	4.2
2.4	8000	3.8	2.2	9500	2.8	2.0	9000	4.2	2.0	15000	4.2
5.0	5500	4.0	2.2	12500	3.4	2.0	3000	4.2	2.0	5500	4.2
5.6	5500	3.0	2.2	6000	2.8	2.0	5000	1.6	2.0	3500	4.2
2.8	14500	1.8	2.2	15000	3.2	2.0	12000	4.2	2.0	11500	4.2
4.8	3000	3.6	2.2	3500	3.2	2.0	10000	4.2	2.0	4500	4.2
3.2	7000	1.2	2.4	4000	1.6	2.0	15000	4.2	2.0	5500	4.2
3.4	13000	4.8	2.2	4500	3.4	2.0	3000	1.6	2.0	4000	1.6
5.2	7500	2.4	2.2	14500	2.8	2.0	3000	4.2	2.0	8000	4.2
2.2	9500	2.8	2.4	3000	1.6	2.0	4000	1.6	2.0	9500	1.6
2.0	4500	4.2	2.6	3000	2.4	2.0	7500	1.6	2.0	7000	4.2
4.6	11500	1.4	2.4	3500	1.6	2.0	4000	1.6	2.0	8000	4.2
5.4	11000	3.0	2.4	3500	1.6	2.0	8000	4.2	2.0	7000	4.2
4.6	8000	1.8	2.8	4500	1.4	2.0	9500	4.2	2.0	3500	1.6
2.8	10000	4.2	2.4	10000	4.4	2.0	5500	1.6	2.0	8000	4.2
4.2	3500	1.0	2.6	7000	1.6	2.0	7000	1.6	2.0	10000	4.2
5.4	3500	2.2	2.4	7500	1.8	2.0	5000	4.2	2.0	5500	1.6
5.0	13500	3.8	2.4	6000	2.6	2.0	8000	1.6	2.0	3500	4.2
5.2	6500	1.2	2.6	13000	2.4	2.0	5000	4.2	2.0	10000	4.2
4.0	10500	2.6	2.8	5500	1.4	2.0	10000	4.2	2.0	7500	4.2
2.4	7000	1.6	2.4	14000	3.8	2.0	9000	4.2	2.0	8000	1.6
2.6	14000	2.4	2.4	8000	4.4	2.0	7000	1.6	2.0	5500	4.2
2.2	5000	3.2	2.8	5000	1.8	2.0	3500	4.2	2.0	7500	1.6
2.2	3500	3.4	2.4	9500	1.6	2.0	14000	4.2	2.0	9500	4.2
4.0	12500	2.2	2.2	14500	2.8	2.0	5500	4.2	2.0	8000	4.2
3.8	8500	3.0	2.4	14000	1.6	2.0	7500	4.2	2.0	3000	4.2

jerasyonu oluşturan bireylerden dördüne ait çarpan plaka üzerindeki basınç ve $X=Y$ düzleminde alınan hız büyüklüğü haritaları sırasıyla Şekil 4.4 ve Şekil 4.5’de verilmiştir.

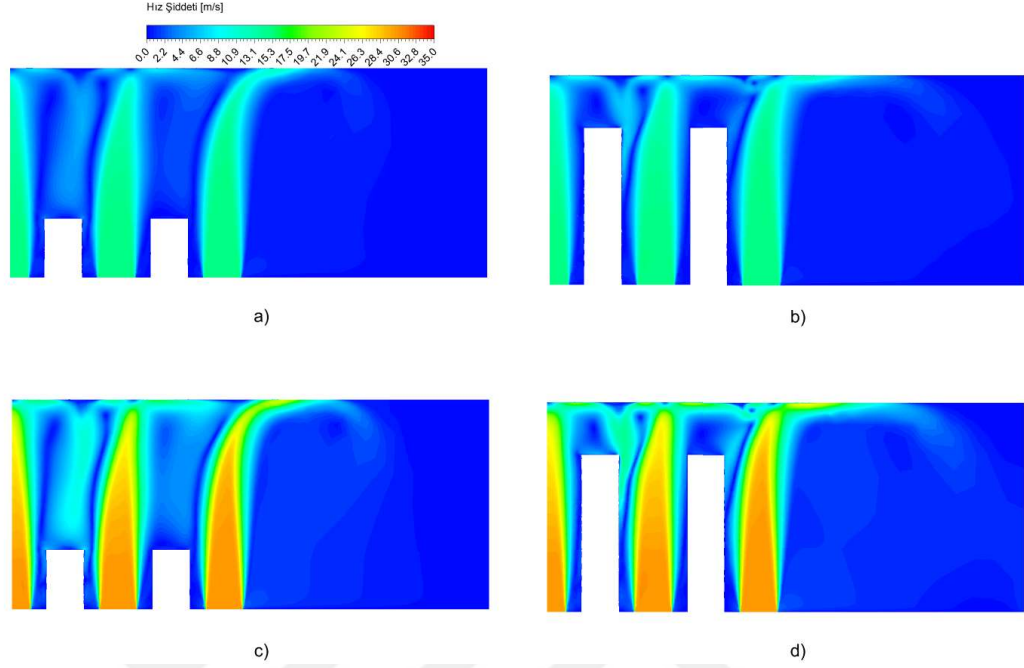
Seçilen dört adet tasarım noktası için tasarım değişkenleri Çizelge 4.2’de verilmiştir.

Çizelge 4.2 : Seçilen tasarım noktalarına ait tasarım değişkenleri.

Tasarım İsmi	s/D_{jet}	Re_{jet}	AR_{SK}
Tasarım 1	2	5000	1.6
Tasarım 2	2	5000	4.2
Tasarım 3	2	10000	1.6
Tasarım 4	2	10000	4.2



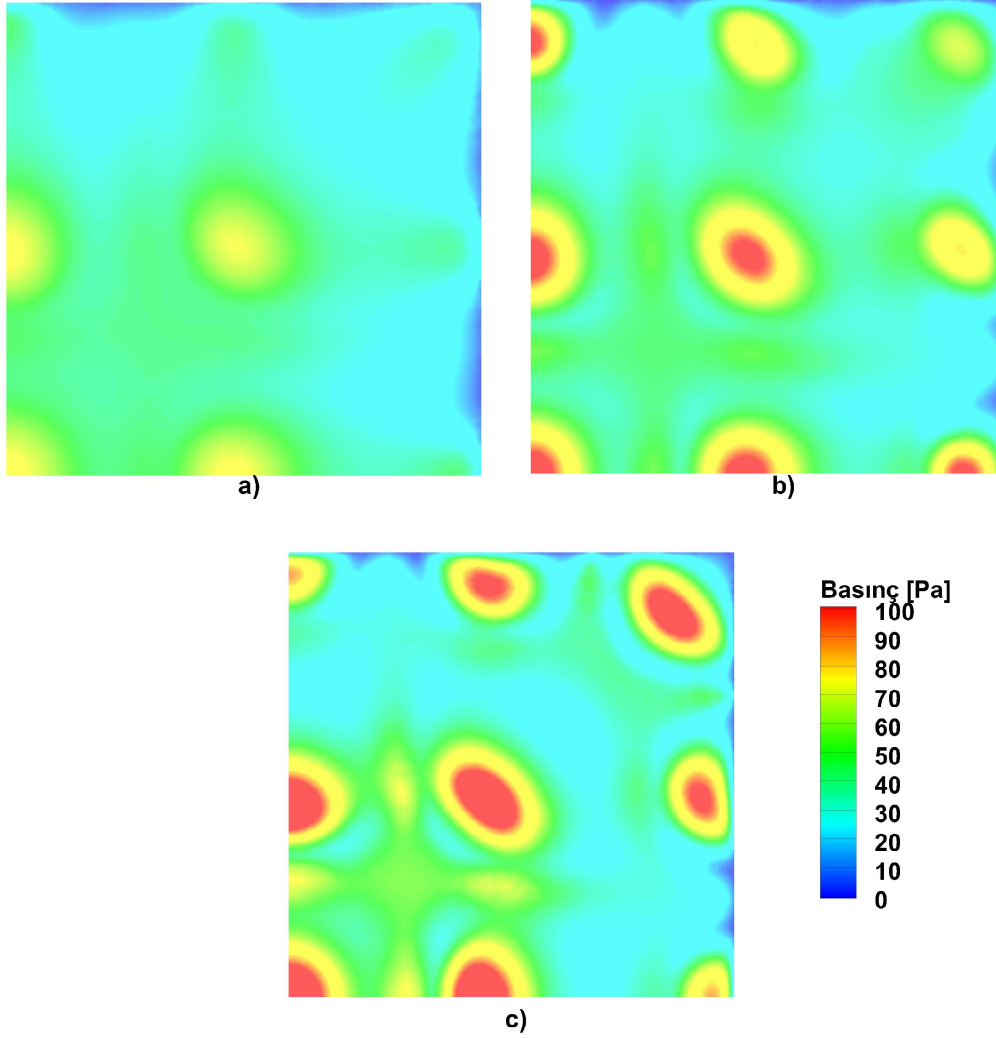
Şekil 4.4 : Farklı tasarım noktalarına ait çarpan plaka üzerindeki basınç haritaları: a) Tasarım 1, b) Tasarım 2 c) Tasarım 3, d) Tasarım 4.



Şekil 4.5 : Farklı tasarım noktalarına ait $X=Y$ düzleminde alınan hız şiddeti haritaları: a) Tasarım 1, b) Tasarım 2 c) Tasarım 3, d) Tasarım 4.

Şekil 4.4’de görüleceği üzere AR_{SK} değerinin 4.2 olduğu tasarımlarda çarpma plakası üzerindeki basınçların daha yüksek olduğu görülmüştür. Şekil 4.5’de görüleceği üzere daha uzun silindirik kirişler kullanılması jetler arası etkileşimi ertelenmesine ve yukarı yönlü akışın engellenmesine sebep olmuştur. Dolayısı ile çoklu çarpan jet sistemlerinde taşıma kuvvetinin jet etkileşimi ve yukarı yönlü akıştan olumsuz yönde etkilendiği ve silindirik kiriş kullanımı ile bu durumun önlenildiği söylenebilir.

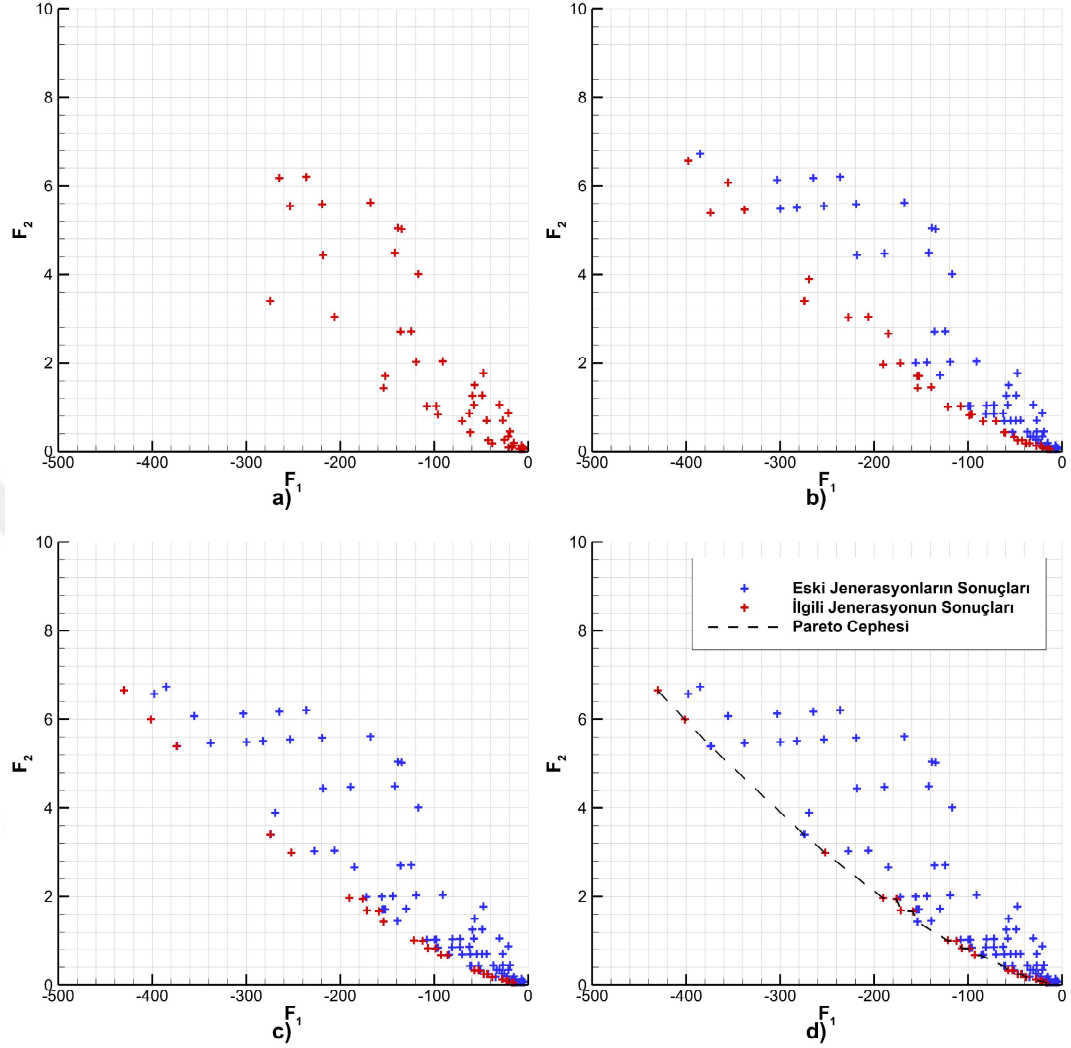
Silindirik kiriş etkisinin daha iyi gözlemlenebilmesi için Tasarım 1 ve Tasarım 2 tasarım parametreleri $(s/D_{jet}, Re_{jet}, AR_{SK})=(2,5000,0)$ olan yeni silindirik kiriş bulundurmeyen referans tasarım ile karşılaştırılmıştır. Şekil 4.6’te referans tasarım ve 1 ve 2 numaralı tasarımlara ait çarpan plaka üzerindeki basınç dağılımı verilmiştir.



Şekil 4.6 : Farklı tasarım noktalarına ait alınan çarpan plaka hız şiddeti haritaları: a) Referans tasarım, b) Tasarım 1 c) Tasarım 2.

Şekil 4.6’te görülebileceği üzere silindirik kiriş kullanımı jet etkileşimi ve yukarı yönlü akış üzerinde pasif akış kontrolü sağladığından tüm jetler için durma bölgesi civarında basınç dağılımlarının ortalamasını arttırarak çoklu çarpan jet sisteminin taşıma kabiliyetini iyileştirmektedir.

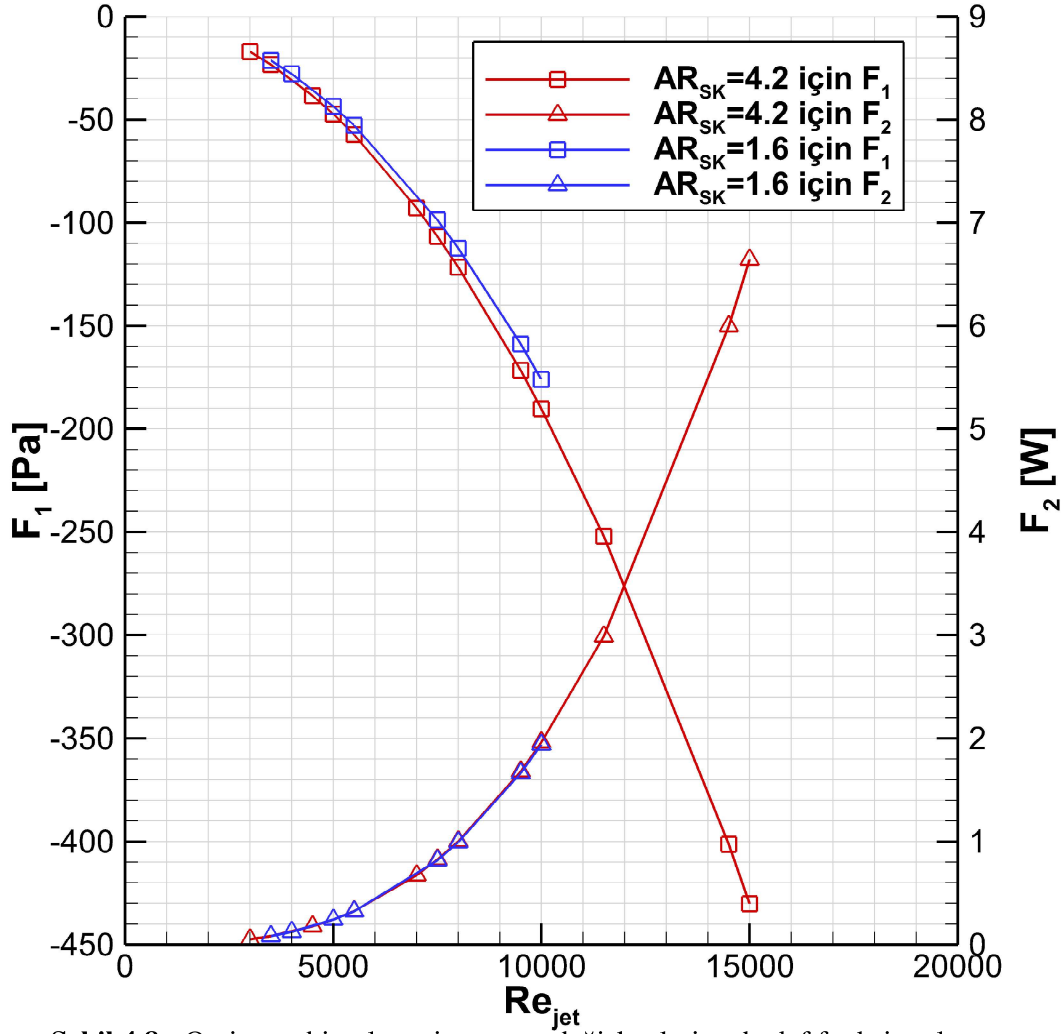
Şekil 4.7’te jenerasyonlar boyunca hedef fonksiyonunun değişimi ve elde edilen Pareto Cephesi verilmiştir.



Şekil 4.7 : Jenerasyonlar boyunca hedef fonksiyonlarının değişimi ve Pareto Cephesi:
a) Birinci jenerasyon (LHS ile), b) Beşinci jenerasyon c) Onuncu jenerasyon, d) Yirminci jenerasyon.

Şekil 4.7.a'da görüleceği üzere Latin Hiperküp Örnekleme ile elde edilen ilk jenerasyona ait sonuçlarda Pareto Cephesi eğiliminin bir kısmı elde edilmiştir. Şekil 4.7.b'den anlaşıldığı üzere yapılan iyileştirmenin büyük bir bölümünün ilk beş jenerasyonda yapıldığı, onuncu jenerasyondan sonra sonuçların önemli ölçüde değişmediği görülmektedir. Optimizasyon işlemi sonucunda farklı ihtiyaçlara cevap verecek çeşitli tasarım noktasına sahip tasarımlar elde edilebilmiştir.

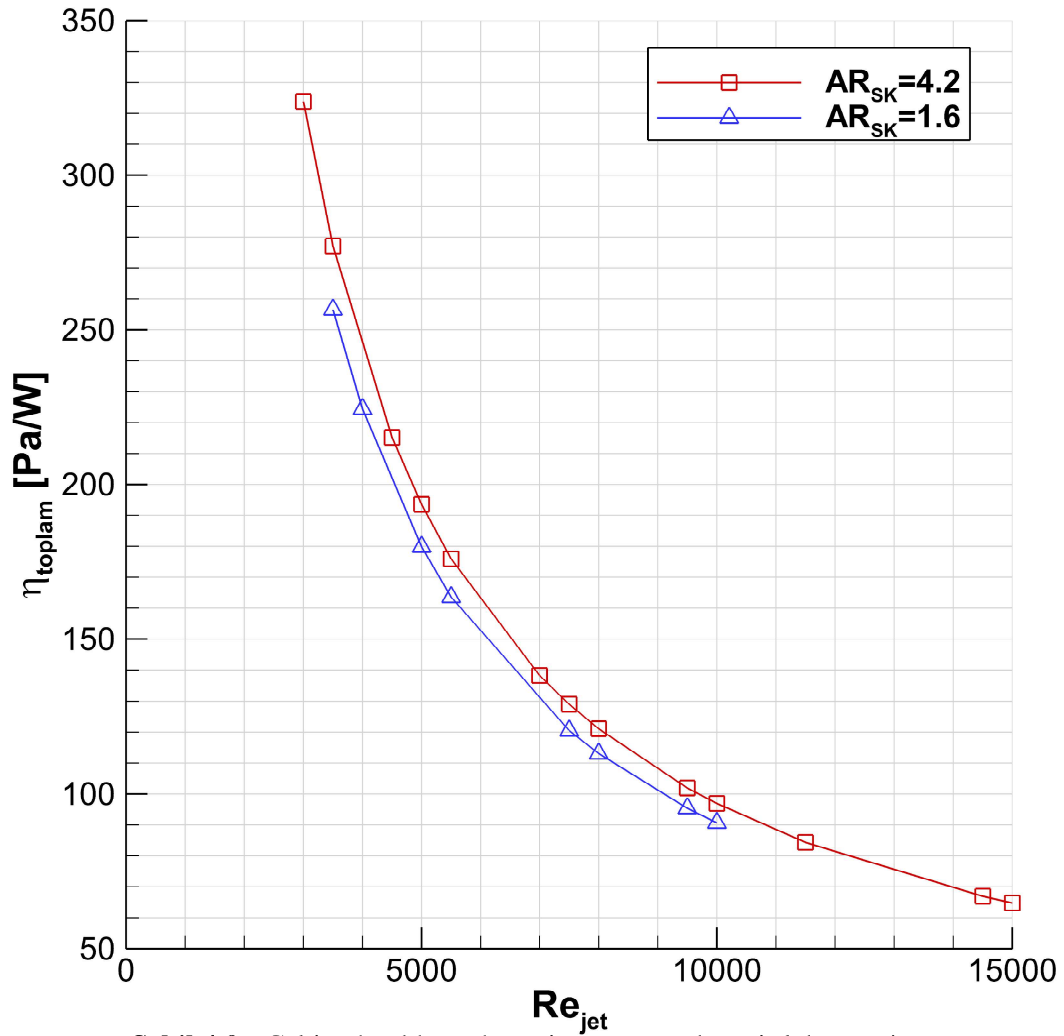
Pareto Cephesini oluşturan bireylere ait tasarım değişkenlerinin hedef fonksiyonlar üzerindeki etkisinin incelenmesi silindirik giriş içeren çoklu çarpan jet sistemi hakkında bilgi edinilebilmesi için önem teşkil etmektedir. Tasarım değişkenlerinin optimum çözümler üzerindeki etkisi Şekil 4.8'de verilmiştir.



Şekil 4.8 : Optimum bireylere ait tasarım değişkenleri ve hedef fonksiyonları

Şekil 4.8’de görüleceği üzere silindirik kirişin uzunluğunun çarpan plakaya etki eden taşıma kuvveti üzerinde etkisi olmasına rağmen taşıma gücü gereksinimine hemen hemen hiç bir etkisi bulunmamaktadır. Dolayısı ile AR_{SK} çoklu çarpan jet sisteminin enerji verimini arttırdığı söylenebilir. Bunun yanısıra Re_{jet} parametresinin AR_{SK} parametresine göre iki hedef fonksiyonu açısından daha baskın olduğu görülmektedir. Cebirsel bir yaklaşımla elde edilebilecek "Taşıma gücü başına düşen taşıma basıncı" çıktısı sistemin toplam verimine ait bir öngörü verebilir. Taşıma gücü başına düşen taşıma basıncı ($\eta_{toplaml}$) tanımı ve optimum sonuçlar için $\eta_{toplaml}$ değeri denklem 4.5 ve Şekil 4.9’da verilmiştir.

$$\eta_{toplaml} = P_L / W_P \quad (4.5)$$



Şekil 4.9 : Cebirsel yaklaşımla optimum sonuçların irdelenmesi

Şekil 4.9’da görülebileceği üzere Pareto sıralaması yaklaşımına göre eşit derecede iyi çıkan tasarımlardan bazıları, cebirsel yaklaşım kullanılarak kendi aralarında karşılaştırıldığında daha az etkili çıkmaktadır. Cebirsel yaklaşım tercih edildiğinde optimizasyon algoritması Re_{jet} değerinin alt limitlere yakın olduğu tasarımları önerecektir. Bunun sebebi artan Re_{jet} ’in W_p ’yi P_L ’ye göre daha hızlı şekilde arttırmasıdır. Optimum sonuçlar da incelendiğinde özellikle düşük jet Reynolds sayıları için 0.75 N/W’e yaklaşan değerler görülmektedir. Literatürde hassas cisimlerin taşınması için kullanılan Bernoulli tutucu ve Vortex tutucu ürünlerine kıyasla silindirik giriş içeren çoklu çarpan jet sisteminin veriminin 6 ile 11 kat arasında daha yüksek olduğu söylenebilir [30].



5. SONUÇLAR VE İLERİYE DÖNÜK ÇALIŞMALAR

Bu tez çalışması kapsamında pnömatik temassız taşıma aracı olarak ele alınan çoklu çarpan jet sistemi HAD analizleri ile incelenmiş ve tasarım optimizasyonu yapılmıştır. Çarpan jet akışına ait literatürde bulunan zorlanmış taşınım ile ısı transferini ve akış olaylarını içeren dört adet deneysel çalışmaya ait sonuçlar ile HAD analizi doğrulama çalışmaları ayrıntılı bir şekilde yapılmıştır. Doğrulama çalışmaları neticesinde çeşitli sınır koşulları altında deneyler ile uyumlu sonuçlar verebilecek HAD modeli elde edilmiştir. Yapılan doğrulama çalışmalarının sonucunda çarpan jet akışı için $k-\omega$ SST türbülans modelinin, havanın termofiziksel özelliklerinin sıcaklıkla değişimi için ideal gaz ve Sutherland yasalarının kullanımının uygun olduğu ayrıca yanında denklemlerin ikinci mertebeden ayrıklaştırılmasının HAD modelinin doğruluğunu arttırdığı görülmüştür.

Literatürdeki çalışmalar ile uyumlu olacak şekilde çoklu çarpan jet sistemi tasarımı önerilerek taşıma kapasitesi belirlenen HAD modeli kullanılarak incelenmiştir. Referans tasarımda jetler arasına farklı en-boy oranına sahip silindirik kırışler yerleştirilerek çoklu çarpan jet sisteminin taşıma kapasitesini arttıracak şekilde pasif akış kontrolü uygulanması önerilmiştir. Pasif akış kontrolü uygulanmış tasarıma ait geometrik ve işletim parametreleri ve hedef fonksiyonları belirlenip inceleme kapsamı tasarım uzayı oluşturulmuştur. Tasarım uzayı içerisinde belirli tasarımlar parametrik olarak incelenerek parametrelerin çoklu çarpan jet sisteminin taşıma basıncı ve ve bunun için harcanacak taşıma gücüne olan etkileri sayısal olarak incelenmiştir.

Silindirik kırış içeren çoklu çarpan jet sisteminde taşıma basıncının arttırılması ve taşıma gücünün azaltılması hedefini içeren çok hedef fonksiyonlu genetik algoritma tabanlı optmizasyon yapılmıştır. Optimizasyon işlemi için NSGA-II algoritması HAD analizleri ile entegre halde çalıştırılmıştır. Optimizasyon işlemi sonucunda farklı taşıma ihtiyaçlarına cevap verebilen tasarımlardan oluşan Pareto Cephesi elde edilmiştir. Uygulanan optimizayson yöntemi sayesinde tasarım uzayının sadece %5.6'sının incelenmesinin yeterli olduğu ve bu şekilde optimum

sonuçlar elde edilebileceği gösterilmiştir. Optimizasyon işleminin sonucunda çoklu çarpan jet sisteminde silindirik kiriş kullanımınnn sistemin genel verimini arttırdığı, ancak enerji sarfiyatına ihmal edilebilecek seviyelerde etki ettiği grlmştir. Bu uygulama ile taşıma kapasitesini arttırdığı ve çarpan plaka üzerindeki basınç dağılımını olumlu yönde etkilediği grlmştir. Pareto Cephesini oluşturan tasarımların endüstride benzer amaçlarla kullanılan Bernoulli tutucu gibi sistemlerden enerji verimliliği açısından da daha avantajlı olduğu literatürdeki çalışmalarla karşılaştırılarak gösterilmiştir.

Tez kapsamında çoklu çarpan jet sistemine ait yapılan parametrik HAD incelemeleri ve tasarım optimizasyonu ile elde edilen sonuçlar aşağıdaki şekilde özetlenebilir:

- Jetler arasına konumlandırılan farklı en-boy oranına sahip silindirik kirişlerin şekilsel bir değişiklik olarak hava akışına ait ıslak yüzeyi arttırmasına karşın taşıma gücü üzerinde önemli bir etkisi bulunmamaktadır.
- Silindirik kiriş kullanımının yukarı yönlü akışı engellediği, jet yayılımını geciktirdiği ve dolayısı ile jetlerin oluşturduğu durma basıncını arttırdığı görülmektedir. Bu etkiler taşınan plakanın merkezine yakın jetlerde daha baskın şekilde gözlemlenmektedir.
- Silindirik kirişlerin jetlerin birbirlerine yakın olduğu durumlarda etkili iken jetler arasındaki mesafenin yüksek olduğu tasarımlarda etkili olmadığı grlmştir.
- Ardışık jetler arasındaki mesafenin azalması ile taşıma basıncı artmakta, buna karşın taşıma gücü önemli ölçüde etkilenmemektedir.
- Jet Reynolds sayısının taşıma gücü üzerindeki etkisi taşıma basıncı üzerindeki etkisine göre daha fazladır. Dolayısı ile jet Reynolds sayısının artması ile verim (taşıma gücü başına düşen taşıma basıncı) azalmaktadır.
- Silindirik kirişlerin en boy oranının belirli bir kritik değeri aşması durumunda duvar jetlerini ve jet yapılarını taşıma performansını azaltacak şekilde etkilediği grlmştir. Yapılan parametrik incelemelerle tutarlı şekilde optimum tasarımların 4.2 en-boy oranına sahip kirişli tasarımlar olduğu grlmştir.
- Yapılan optimizasyon çalışmaları sonucunda değişen mertebelerdeki taşıma ihtiyaçlarına çözüm sunabilecek birçok optimum tasarım elde edilmiştir. Bu

tasarımlar, literatürde incelenmiş temassız taşıma için kullanılan diğer tasarımlarla karşılaştırıldığında daha yüksek verimlere sahip olduğu görülmüştür.

Tez kapsamında yapılan çalışmadan elde edilen sayısal sonuçlar ileride önerilen tasarımın incelenmesi için özgün bir deney sistemi kurularak desteklenebilir. Kurulması düşünülen deney sisteminden elde edilen verilerden faydalanılarak literatürde incelenmemiş olan jet nozüllerinin beslendiği kanal tasarımının, jet dizilimlerinin ve silindirik kirişlerin en boy oranının hedef fonksiyonları üzerindeki etkileri incelenecektir. Böylece silindirik kiriş uygulamasının etkileri daha geniş bir tasarım uzayı için incelenerek karakterizasyonu yapılacaktır. Silindirik kirişlerin elastik olması durumunda kirişin Young modülü veya narinlik metrebesinin çarpan plaka üzerindeki basınç dağılımına olan etkisi Akışkan Yapı Etkileşimi (Fluid Structure Interaction) analizleri ile incelenecektir. Dolayısı ile elastik kirişlerin etkileri ve var ise rijit kirişlere göre üstünlükleri irdelenebilir. Bu durumda elastik silindirik kirişler yardımı ile her bir jet nozülünden havanın eşit hızda geçmediği durumlarda bile temassız taşımanın homojen bir şekilde gerçekleşmesi uygulaması sağlanabilir. Son olarak FSI analizleri ile genetik algoritma tabanlı çok hedefli tasarım optimizasyonu yapılacaktır.



KAYNAKLAR

- [1] **Geers, L.** (2004). Multiple impinging jet arrays: an experimental study on flow and heat transfer, *PhD project in the Thermal and Fluids Sciences*.
- [2] **Dini, G., Fantoni, G. ve Failli, F.** (2009). Grasping leather plies by Bernoulli grippers, *CIRP Annals*, 58(1), 21 – 24, <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0007850609000298>.
- [3] **Ueha, S., Hashimoto, Y. ve Koike, Y.** (2000). Non-contact transportation using near-field acoustic levitation, *Ultrasonics*, 38(1), 26 – 32, <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0041624X99000529>.
- [4] **Mann, B. ve Sims, N.** (2009). Energy harvesting from the nonlinear oscillations of magnetic levitation, *Journal of Sound and Vibration*, 319(1), 515 – 530, <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022460X08005567>.
- [5] **Barata, J.** (1995). Fountain flows produced by multiple impinging jets in a crossflow, *33rd Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Reston, Virigina, <http://arc.aiaa.org/doi/10.2514/6.1995-190>.
- [6] **Rami AaltonenRoland, BaneckiPertti HeikkiläBertel, K.S.,** (2003), Flootation Dryer Unit EP001015691B1, <https://patents.google.com/patent/EP1015691B1/en?q=FLOTATION+DRYER+UNIT>.
- [7] **Cooper, D., Jackson, D.C., Launder, B.E. ve Liao, G.X.** (1993). Impinging jet studies for turbulence model assessment-I. Flow-field experiments, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 36(10), 2675–2684.
- [8] **Alimohammadi, S., Murray, D.B. ve Persoons, T.** (2015). On the numerical-experimental analysis and scaling of convective heat transfer to pulsating impinging jets, *International Journal of Thermal Sciences*, 98, 296 – 311, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2015.07.022>.
- [9] **Xing, Y. ve Weigand, B.** (2013). Optimum jet-to-plate spacing of inline impingement heat transfer for different crossflow schemes, *Journal of Heat Transfer*, 135(7).
- [10] **Geers, L.F., Hanjalić, K. ve Tummers, M.J.** (2006). Wall imprint of turbulent structures and heat transfer in multiple impinging jet arrays, *Journal of Fluid Mechanics*, 546(January), 255–284.

- [11] **Caliskan, S., Baskaya, S. ve Calisir, T.** (2014). Experimental and numerical investigation of geometry effects on multiple impinging air jets, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 75, 685–703, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.04.005>.
- [12] **Craft, T.J., Graham, L.J.W. ve Launder, B.E.** (1993). Impinging jet studies for turbulence model assessment-II. An examination of the performance of four turbulence models, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 36(10), 2685–2697.
- [13] **Wienand, J., Riedelsheimer, A. ve Weigand, B.** (2017). Numerical study of a turbulent impinging jet for different jet-to-plate distances using two-equation turbulence models, *European Journal of Mechanics, B/Fluids*, 61, 210–217.
- [14] **Dutta, R., Dewan, A. ve Srinivasan, B.** (2013). Comparison of various integration to wall (ITW) RANS models for predicting turbulent slot jet impingement heat transfer, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 65, 750–764, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.06.056>.
- [15] **Thielen, L., Jonker, H.J. ve Hanjalic, K.** (2003). Symmetry breaking of flow and heat transfer in multiple impinging jets, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 24(4), 444–453.
- [16] **Wen, Z.X., He, Y.L., Cao, X.W. ve Yan, C.** (2016). Numerical study of impinging jets heat transfer with different nozzle geometries and arrangements for a ground fast cooling simulation device, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 95, 321–335, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.12.022>.
- [17] **Yeranee, K., Wae-hayee, M., Rao, Y. ve Nuntadusit, C.** (2018). Effects of air-induced duct diameter on flow and heat transfer characteristics of multiple impinging jets, *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, 51(2), 247–258.
- [18] **Lam, P.A.K. ve Prakash, K.A.** (2017). A numerical investigation and design optimization of impingement cooling system with an array of air jets, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 108, 880–900, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.12.017>.
- [19] **Ndao, S., Peles, Y. ve Jensen, M.K.** (2009). Multi-objective thermal design optimization and comparative analysis of electronics cooling technologies, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 52(19-20), 4317–4326, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2009.03.069>.
- [20] **Kadiyala, P.K. ve Chattopadhyay, H.** (2014). Neuro-genetic optimization of laminar slot jets impinging on a moving surface, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 59, 143–147, <http://dx.doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2014.10.023>.

- [21] **Yang, Y.T., Wang, Y.H. ve Hsu, J.C.** (2015). Numerical thermal analysis and optimization of a water jet impingement cooling with VOF two-phase approach, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 68, 162–171, <http://dx.doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2015.08.010>.
- [22] **Heo, M.W., Lee, K.D. ve Kim, K.Y.** (2011). Optimization of an inclined elliptic impinging jet with cross flow for enhancing heat transfer, *Heat and Mass Transfer/Waerme- und Stoffuebertragung*, 47(6), 731–742.
- [23] **Inc., A.** (2017). ANSYS Fluent Theory Guide.
- [24] **Menter, F.R.** (1994). Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications, *AIAA Journal*, 32(8), 1598–1605.
- [25] **Gad-el Hak, M.** (2005). Flow control, *MEMS: Applications*, 49(October 1989), 13–1–13–51.
- [26] **Buckingham, E.** (1914). On physically similar systems; Illustrations of the use of dimensional equations, *Physical Review*, 4(4), 345–376.
- [27] **Arora, S.J.** (2004). *Introduction to Optimum Design – 2nd edition*, Elsevier.
- [28] **Thevenin, D. ve Janiga, G.** (2008). *Optimization and Computational Fluid Dynamics*, Springer.
- [29] **Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S. ve Meyarivan, T.** (2002). A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II, *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 6(2), 182–197.
- [30] **Li, X., Li, N., Tao, G., Liu, H. ve Kagawa, T.** (2015). Experimental comparison of Bernoulli gripper and vortex gripper, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 16(10), 2081–2090.



ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Alperen YILDIZELİ
Doğum Tarihi ve Yeri: İstanbul 16.01.1994
E-Posta: yildizeli@itu.edu.tr

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans:** 2016, İstanbul Teknik Üniversitesi, Makina Mühendisliği Fakültesi, Makina Mühendisliği (%30 İngilizce)

MESLEKİ DENEYİMLER VE ÖDÜLLER:

- Mitsubishi Electric TURKEY Elektrik A.Ş., Makina Mühendisi, (06/2013-09/2013).
- Mitsubishi Electric TURKEY Elektrik A.Ş., Makina Mühendisi, (06/2016-09/2016).
- İstanbul Teknik Üniversitesi, Araştırma Görevlisi, (04/2018-...)

TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- Yıldızeli, A., Karabay, A. Y., Coşkun, U. C., Çadırcı, S., Vatansever, E., Sümer, B., & Koç, İ. M. (2017). DAĞITILMIŞ HAVA JETİ KULLANARAK HASSAS CİSİMLERİN MANİPÜLASYONUNUN SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ. 8. Ulusal Hidrolik ve Pnömatik Kongresi, 193–201.

DİĞER YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- Alperen, Y., & Sertac, C. (2020). Multi objective optimization of a micro-channel heat sink through genetic algorithm. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 146, 118847. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.118847>
- Köse, H. A., Yıldızeli, A., Çadircı, S. (2019). Design Optimization of Triangular Microchannel Heat Sink Using Genetic Algorithm. *5TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCES IN MECHANICAL ENGINEERING*. Istanbul.
- Canbolat, G., Köse, H. A., Yıldızeli, A., Çadircı, S. (2019). Analytical and Numerical Solutions of the 1D Advection-Diffusion Equation. *5TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCES IN MECHANICAL ENGINEERING*. Istanbul.
- Canbolat, G., Yıldızeli, A., Köse, H. A., & Çadircı, S. (2018). Numerical Investigation of Transitional Flow over a Flat Plate under Constant Heat Fluxes. *6th International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science*, 187–195.
- Köse, H. A., Yıldızeli, A., Canbolat, G., & Çadircı, S. (2018). Numerical Investigation of Conjugate Heat Transfer in Rectangular Micro-Channel Heat Sinks under Laminar Flow Conditions. *6th International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science 09-11 November 2018 (ISITES2018 Antalya-Turkey)*, 196–205.
- Eskin, N., Gür, M., Özkaya, I., Cömert, Ç., & Yıldızeli, A. (2017). İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ MAKİNE FAKÜLTESİ BİNASI'NIN ISIL KONFOR ŞARTLARINA BAĞLI ENERJİ ANALİZİ. *13. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi*, 1185–1199.
- Eskin, N., Gür, M., Yıldızeli, A., Cömert, Ç., & Özkaya, I. (2017). TARİHİ BİNALARDA PASİF YÖNTEMLERLE ENERJİ TASARRUFU: İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ MAKİNE FAKÜLTESİ. *13. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi*, 2003–2012.