
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

ÇAPRAZ AKIŞ ETKİSİ ALTINDAKİ JETİN AKIŞ ÖZELLİKLERİNİN SAYISAL İNCELENMESİ

Özgür İMRE

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TEMMUZ 2024

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Özgür İMRE

23/07/2024

ÇAPRAZ AKIŞ ETKİSİ ALTINDAKİ JETİN AKIŞ ÖZELLİKLERİNİN SAYISAL İNCELENMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Özgür İMRE

GAZİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Temmuz 2024

ÖZET

Çapraz akış altındaki sıvı jet akışının sayısal olarak incelenmesi özellikle ramjet ve scramjet benzeri motorlarda kapsamlıca incelenen bir olay olmakla birlikte genel anlamda yakıt-hava karışım parametrelerinin belirlenmesi için yapılan bir çalışmadır. Aynı zamanda zirai ilaçlama, sıvı yakıtlı roket motorlarında ve soğutma sistemlerinde de görülmektedir. Yapılan çalışmada ise referans olarak seçilen deneysel çalışma sayısal olarak doğrulanmıştır. Doğrulanma yöntemi zamana bağlı VOF analizi olarak seçilmiş. Birimsiz parametreler olan momentum akı oranı (q=18, q=27, q=36) ve Weber sayısı (We=1,32; We=3,84; We=5,38; We=10,68; We=11,91; We=12,73; We=15,38; We=20,58; We=33,1; We=64.87 ve We=107.24) ile jet akış hızı (V_j=2,1 m/s, V_j=4,45 m/s, V_j=5,46 m/s, V_j=6,30 m/s ve V_j=10,40 m/s,), çapraz akış hızı (V_a=10 m/s, V_a=30 m/s, V_a=50 m/s, V_a=60 m/s, V_a=70 m/s ve V_a=90 m/s), çapraz akış sıcaklığı ($T_a = 18\,°C$, $T_a = 200\,°C$ ve $T_a = 300\,°C$) ve jet akışkanının çeşidi (su, aseton ve kerosen) değiştirilerek farklı değerleri için analizler yapılmış ve elde edilen sonuçlar çalışmanın ilk aşamasında referans alınan deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmış, kullanılan çift fazlı akış modeli ve türbülans modeli ile kullanılan parametreler doğrulanmıştır. Çalışmanın ikinci aşamasında ise bu doğrulanan model jet yakıtı ana maddelerinden olan kerosen için yapılmış. Analizlerden elde edilen veri setleri biriktirilmiş. Bu veriler ısıtılmamış çapraz akış ve ısıtılmış çapraz akış olmak üzere iki grupta toplanmış, eğri uydurma yöntemleri kullanılarak uygun eşitlikler belirlenmiş ve bu eşitliklerin sonuçlara uygunluğu gösterilmiştir. Bu çalışma sonucunda elde edilen eşitlikler, akış yönünde çalışmanın limit uzunluk parametresi olarak kabul edilen 10 çaplık mesafede 0,991 maksimum ve 0,973 minimum determinasyon katsayına (R^2) sahip olacak doğrulukta sonuçlar elde etmiştir.

Bilim Kodu	:	91411
Anahtar Kelimeler	:	Çift fazlı akış analizi, HAD, birincil bozulma, VOF metodu, kerosen, birincil bozulma
Sayfa Adedi	:	89
Danışman	:	Doç. Dr. Nureddin DİNLER

NUMERICAL INVESTIGATION OF FLOW CHARACTERISTICS OF JET UNDER CROSS-FLOW

(M. Sc. Thesis)

Özgür İMRE

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

JULY 2024

ABSTRACT

The numerical investigation of liquid jet in crossflow is a study that is especially done for engines like ramjets and scramjets and main purpose of the study is to decide mixture properties of the phenomenon. It is also seen in agricultural spraying, rocket engines and cooling systems. At the first stage of the study, the numerical study is validated with results gathered from chosen experimental study. The method used for this validation is transient VOF (Volume of Fluid) analysis. The analysis is done for various dimensionless parameter namely momentum flux ratio (q=18, q=27, q=36) and Weber number (We=1,32; We=3,84; We=5,38; We=10,68; We=11,91; We=12,73; We=15,38; We=20,58; We=33,1; We=64.87 and We=107.24), and also for jet velocity (V_j=2,1 m/s, V_j=4,45 m/s, V_j=5,46 m/s, V_j=6,30 m/s and V_j=10,40 m/s,), crossflow velocity (V_a=10 m/s, V_a=30 m/s, V_a=50 m/s, V_a=60 m/s, V_a=70 m/s and V_a=90 m/s), crossflow temperature ($T_a = 18\,°C$, $T_a = 200\,°C$ and $T_a = 300\,°C$) and type of fluid as (water, acetone and kerosene). At the first stage study, the results gathered from these analyses compared with chosen experimental study. And by doing this, the multiphase modeling parameters and turbulence modeling parameters are validated. At the second phase of the study, the analyses have been done for kerosene which is main component of the jet fuel. All the results are accumulated and grouped into two different sets. One for unheated crossflow and one for heated crossflow. The results for these two groups are expressed with an equation by using curve fitting techniques. The compatibility of these two techniques is also evaluated in terms of their individual R^2 values. And according to the results gathered from this study, the equations are in line with the results from validated analyses with R^2 values of minimum 0,973 and maximum 0,991 for the length of 10 jet diameter which is study constraint.

Science Code	:	91411
Key Words	:	Multiphase flow simulation, CFD, primary breakup, VOF method, kerosene, primary breakup
Page Number	:	89
Supervisor	:	Assoc. Prof. Dr. Nureddin DİNLER

TEŞEKKÜR

Çalışmamın tamamlanmasında her türlü desteği veren Babam, Annem ve Kız kardeşlerime bana sonsuz güvenlerinden ötürü teşekkürlerimi ve minnettarlığımı sunuyorum. Kendilerinin destekleri sayesinde hep bir adım ileriye atabildim.

Danışman hocam Sayın Doç. Dr. Nureddin DİNLER'e her koşulda bana sayısız desteklerinden ve tecrübelerinden ötürü teşekkürlerimi ve içten saygılarımı sunarım. Ayrıca müdürüm Evren SAKARYA'ya da bana verdiği desteklerinden ötürü teşekkürlerimi iletmek isterim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

ABSTRACT v

TEŞEKKÜR vi

ÇİZELGELERİN LİSTESİ x

ŞEKİLLERİN LİSTESİ xi

SİMGELER VE KISALTMALAR xiii

1. GİRİŞ 1

2. TEMEL BİLGİLER VE LİTERATÜR TARAMASI 3

2.1. Temel Bilgiler 3

2.1.1. Birincil bozulma rejimleri 5

2.1.2. İkincil bozulma 8

2.2. Literatür Araştırması 8

3. ÇOK FAZLI AKIŞLAR 21

3.1. Çok Fazlı Akış Rejimleri 21

3.1.1. Gaz-katı akışları 21

3.1.2. Sıvı-katı akışları 22

3.1.3. Gaz-sıvı veya sıvı-sıvı akışları 22

3.1.4. Üç fazlı akışlar 24

3.2. Çok Fazlı Model Yaklaşımları 24

3.2.1. Eulerian-lagrange yaklaşımı 25

3.2.2. Eulerian-eulerian yaklaşımı 25

3.3. VOF Modeli ve Çözüm Parametreleri 27

3.3.1. Çözücü seçimi 27

3.3.2. Formülasyon 27

Sayfa

3.3.3. Kapalı (implicit) gövde kuvveti 28
3.3.4. Arayüz modelleme türleri 28
3.3.5. Arayüzeysel anti-difüzyon 29
3.4. VOF-to-DPM 29
3.5. VOF Modeli Eşitlikleri 30
4. TÜRBÜLANS VE TÜRBÜLANS MODELLERİ 33
4.1. Kullanılan Türbülans Modelinin Eşitlikleri 36
5. GEOMETRİ VE ÇÖZÜM AĞI 39
5.1. Çözüm Ağı Parametreleri 42
5.1.1. Seyrekleştirme parametreleri 42
5.1.2. Sıklaştırma parametreleri 43
5.1.3. İfadeler 44
5.1.4. Çözüm ağı kalite parametreleri 45
5.1.5. Bağımsızlaştırma çalışmaları 47
5.2. En Uygun Analiz Parametrelerinin Belirlenmesi 47
6. REFERANS ÇALIŞMA VE HAD KARŞILAŞTIRMASI 55
6.1. Doğrulama Analizleri 56
6.1.1. Momentum akı oranının (q) etkisi 56
6.1.2. Momentum akı oranının (q) etkisi 57
6.1.3. Weber sayısının (We) etkisinin çapraz akış hızı özelinde incelenmesi 58
6.1.4. Weber sayısının (We) etkisinin çapraz akış hızı ve sıcaklığı özelinde incelenmesi 59
6.2. Akış Yönelimlerinin Belirlenmesi İçin Yapılan Analizler 62
6.2.1. Momentum akı oranının (q) etkisi (jet çıkış hızını değiştirerek) 62
6.2.2. Momentum akı oranının (q) etkisi (çapraz akış hızını değiştirerek) 63

Sayfa

6.2.3. Weber sayısının (We) etkisinin çapraz akış hızı özelinde incelenmesi..... 64

6.2.4. Weber sayısının (We) etkisinin çapraz akış hızı ve sıcaklığı özelinde incelenmesi 65

7. KEROSEN İLE YAPILAN ANALİZLER VE ELDE EDİLEN EŞİTLİKLER 67

8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 79

KAYNAKLAR 81

EKLER 83

EK-1. Türbülans yoğunluğu etkisi…….. 84

EK-2. Kerosen veri tabanı……... 85

ÖZGEÇMİŞ 89

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 2.1. Jet akışının ayrılma karakterini belirleyen temel parametreler..... 4

Çizelge 5.1. HAD analizi sınır koşulları..... 40

Çizelge 5.2. Çözüm ağı kalite parametreleri..... 46

Çizelge 5.3. İki saatlik analizler için çözüm değerleri..... 49

Çizelge 5.4. 0,9 ms'lik analizler için çözüm değerleri 51

Çizelge 6.1. İlk grup HAD girdi seti..... 56

Çizelge 7.1. Güncel çalışmaya kadar kullanılan literatürdeki eşitlikler 67

Çizelge 7.2. Kerosen analizleri HAD girdi seti 68

Çizelge 2.1. Kerosen veri tabanı..... 85

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 2.1. Çapraz hava akışı etkisi altında kalan sıvı jetinin bozulma aşamaları..... 3

Şekil 2.2. Çapraz hava akışı etkisi altındaki sıvı jetin bozulma fazları 5

Şekil 3.1. Sistem bazlı çok fazlı akışkan örnekleri 23

Şekil 3.2. Çok fazlı sistemlere örnekler 24

Şekil 3.3. Anti-difüzyonun çözüme etkisi..... 29

Şekil 3.4. VOF-to-DPM örnek çözümü 29

Şekil 5.1. Referans çalışmaya ait geometrinin boyutları 39

Şekil 5.2. HAD analizi sınır koşulları..... 40

Şekil 5.3. Sıvı fazı için VOF tabanlı seyrekleştirme parametreleri 42

Şekil 5.4. Gaz fazı için eğrilik tabanlı seyrekleştirme parametreleri..... 43

Şekil 5.5. Sıvı fazı için VOF tabanlı sıklaştırma parametreleri 43

Şekil 5.6. Sıvı fazı için eğrilik tabanlı sıklaştırma parametreleri..... 44

Şekil 5.7. Çözüm ağı seyrekleştirme ifadesi..... 44

Şekil 5.8. Çözüm ağı sıklaştırma ifadesi..... 44

Şekil 5.9. HAD analizlerinde kullanılan çözüm ağının yapısı..... 45

Şekil 5.10. Adaptif sıklaştırma sonunda çözüm ağı yapısı 46

Şekil 5.11. Farklı türbülans modellerinin karşılaştırması 48

Şekil 5.12. Realizable k-ε, Standard k-ω ve SST LES Blended k-ω ön görünüşleri..... 52

Şekil 5.13. Realizable k-ε, Standard k-ω ve SST LES Blended k-ω yan görünüşleri 53

Şekil 6.1. Referans çalışma ve HAD analizi karşılaştırması 57

Şekil 6.2. Referans çalışma ve HAD analizi karşılaştırması 58

Şekil 6.3. Referans çalışma ve HAD analizi karşılaştırması 59

Şekil 6.4. Düşük sıcaklık için referans çalışma ve HAD analizi karşılaştırması..... 60

Şekil **Sayfa**

Şekil 6.5. Yüksek sıcaklık için referans çalışma ve HAD analizi karşılaştırması 61

Şekil 6.6. Üst yüzeyde jet çıkış hızı etkisi 62

Şekil 6.7. Üst yüzeyde çapraz hızı etkisi 63

Şekil 6.8. Asetonun üst yüzeyinde Weber sayısının etkisi 64

Şekil 6.9. Üst yüzeyde sıcaklık, We ve q etkisi 66

Şekil 7.1. Set 2.1.a, Set 2.1.b ve Set 2.1.c karşılaştırması 69

Şekil 7.2. Kerosen analizi sonuçları ve Eşitlik 7.1 arasında karşılaştırma 70

Şekil 7.3. Set 2.2.c, Set 2.2.b ve Set 2.2.a karşılaştırması 71

Şekil 7.4. Kerosen analizi sonuçları ve Eşitlik 7.1 arasında karşılaştırma 72

Şekil 7.5. Set 2.3.a, Set 2.3.c ve Set 2.3.e karşılaştırması..... 73

Şekil 7.6. Kerosen analizi sonuçları ve Eşitlik 7.1 arasında karşılaştırma 74

Şekil 7.7. Kerosen analizi sonuçları ve Eşitlik 7.1 arasında karşılaştırma 75

Şekil 7.8. Set 2.4.a ve Set 2.4.b karşılaştırması 76

Şekil 7.9. Kerosen analizi sonuçları ve Eşitlik 7.2 arasında karşılaştırma 77

Şekil 7.10. Kerosen analizi sonuçları ve Eşitlik 7.2 arasında karşılaştırma 78

Şekil 1.1. Türbülans yoğunluğunun jet iz düşümü üzerine etkisi 84

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	**Açıklamalar**
x	Çapraz akış yönlü uzunluk, [m]
y	Jet akış yönlü uzunluk, [m]
σ	Sıvı jetin yüzey gerilmesi, [N/m]
μ	Dinamik viskozite, [Ns/m^2]
ρ	Yoğunluk, [kg/m^3]
d_j	Jet çıkış çapı, [m]
t	Zaman, [s]
Cou	Courant sayısı
T	Sıcaklık, [°C]
q	Momentum akı oranı
We	Weber sayısı

Kısaltmalar	**Açıklamalar**
a	Çapraz akış indisi
j	Jet akışı indisi
K-H	Kelvin-Helmholtz
R-T	Rayleigh-Taylor
Re	Reynolds sayısı
VOF	Volume of fluid metodu
Z.A.B.	Zaman adımı başına

1. GİRİŞ

Gaz türbinli motorların ortaya çıkışı ile motora giren havanın, optimum yanma durumunu sağlaması için yeterli miktarda yakıt ile karıştırılması ihtiyacı ortaya çıktı. Bu ihtiyacın sonucunda yüksek yanma performansı sağlanır iken, sıvı giriş parametrelerinin değiştirilmesi sonucunda daha düşük miktarlarda yakıt ile bu fenomen gerçekleştirilebilmekteydi. Bu ihtiyaç ve bunun sonucunda yapılan çalışmalar yeni bir araştırma dalının ortaya çıkmasına sebep oldu. Çapraz Akıştaki Jet Akışı (Jet in Crossflow) bu çalışmalar neticesinde ortaya çıktı. Çapraz akıştaki jet akışı çalışmalar aslen sadece sıvılar için çalışılmamış olup literatürde gaz jetler içinde geniş deneysel ve sayısal çalışmalar bulunmaktadır. Gaz türbinli motorların türbin bölümlerinde bulunan yüksek basınç türbin kanatçıkları (High Pressure Turbine Blades), türbin ve hatta rotor-stator içerisindeki en yüksek sıcaklık ve basınç değerlerine maruz kalıyordu. Kanatçıkların maruz kaldığı yüksek basınç ve sıcaklık değerleri de termal sünme (Thermal creep) oluşumuna sebep olmaktaydı. Bu durum film soğutma tekniğinin ortaya çıkmasına ve neticede Çapraz Akıştaki Jet Akışı çalışmalarının ortaya çıkmasına sebep oldu.

Sıvı jet üzerine yapılan çalışmalar ise turbojet, ramjet (ses altı akışa yakıt bırakılır) ve scramjet (ses üstü akışa yakıt bırakılır) motorlarında yanma odası öncesinde yakıt hava karışımının sağlanması amacıyla başladı. Bu uygulamalarda yanıcı madde yanma odası öncesinde duvarlardan ya da alev tutuculardan hemen önce konumlandırılmıştır. Yanmanın verimi de yakıt-hava karışımının verimi, bozulma (breakup) olaylarının başlama lokasyonu, zamanları ve atomizasyonun tamamlanması ile doğru orantılıdır. Bunların yanı sıra çalışmalar ve sonuçları sadece yanma verimini arttırmakla sınırlı kalmadı. Sıvı yakıtlı roketlerin motorlarında pompalardan yanma odasına aktarılan oksitleyici madde ve yakıtın karışımında, dizel motorlarda, tarımsal uygulamalarda ve hatta yangın söndürme uçaklarında bile sıvı çapraz akışının etkilerini görebilmekteyiz.

Bu konu üzerine yapılan çalışmalar 1960'ların sonlarında başlamış olup ekseriyeti deneysel çalışmalardır. Yapılan deneysel çalışmaların geneli su, etil alkol, %79 ve %84 gliserol ile yapılmıştır. Deneyler esnasında farklı nozul geometrileri, nozul çıkış yarıçapları, farklı çapraz akış hızları ve jet hızları ile çalışılmış ve her bir durumun laboratuvar ortamında sonuçları incelenmiştir. Deneylerde gözlemler Pulsed Shadowgraph ve Laser Shadowgraphy yardımıyla yapılmıştır. Bu deneyler esnasında alınan shadowgraph görüntüleri kamera ile

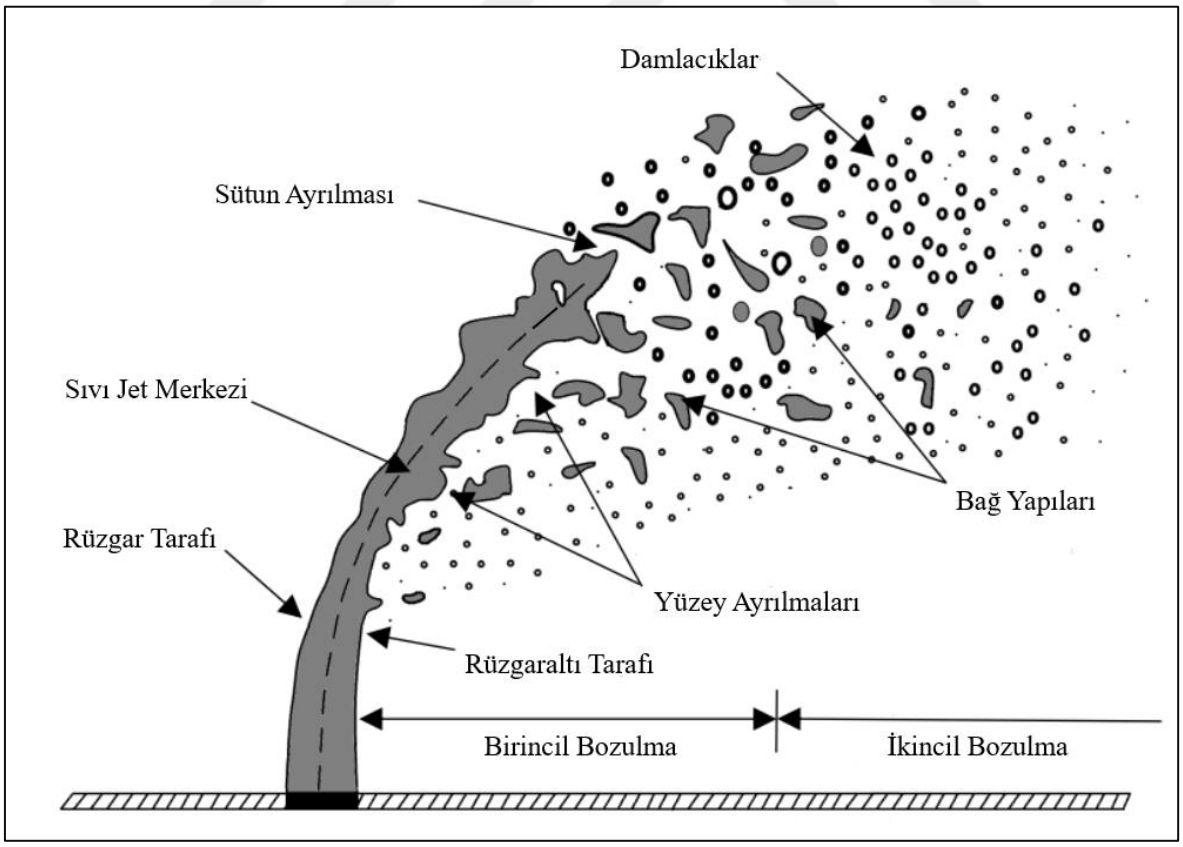
kayıt altına alınıp incelemelerde bulunulmuştur. B görüntülerden akışın birincil ve ikincil bozulmaları incelenmiş. Birincil bozulmalarda 4 farklı faz (Column Breakup, Bag Breakup, Multimode Breakup ve Shear Breakup) incelenmiş, çapraz akış ve jet akışı yönünde lokasyonları belirlenmiş ve bu özelliklerinin farklı jetlerde (yoğunluk, yüzey gerilmesi, hız vs.) değişimi belirlenmiş ve genel amaçlı kullanım için korelasyonlar belirlenmiştir.
Deneysel çalışmaların çoğunluğu, maddi imkanlar sebebiyle laboratuvar sıcaklık ve basınçlarında yapılmasına rağmen son yıllarda motor giriş koşullarını daha iyi temsil edebilmesi amacıyla yükseltilmiş sıcaklık ve basınçlarda da çalışmalar yapıldığı gözlemlenmektedir.

Uluslararası kapsamda bu çalışmalar özellikle hem ses üstü hava araçlarının geliştirilmesi ve hem de itki sistemlerinin özgün olarak tasarlanması sonucunda yaygın olarak yapılmaktayken ülkemizde son zamanlarda ilgi odağı olmaya başlamıştır. Bu çalışma ile özellikle savunma sektörü dışında çok araştırma yapılmayan kerosen gibi jet motor yakıtlarının birincil ayrımı için korelasyonlar ve eşitlikler geliştirilmeye çalıştırılacaktır.
Öncelikle literatür bölümünde bahsi geçen çalışmalardan bizim incelememizi istediğimiz duruma en uygun olan deneysel çalışmalar seçilecek, bu deney ortamının dijital ikizi oluşturulup ticari hesaplamalı akışkanlar dinamiği olan ANSYS FLUENT ile çok fazlı akış analizi yapılacak. Deney ortamı, ölçüm hataları, okuma hatalar vb. durumlar göz önüne alınıp deneysel çalışmaların korelasyonları analiz sonuçları için yeniden düzenlenecektir. Daha sonra modelde kerosen için analizler yapılıp gerçek koşullardaki bozulma durumları için bu düzenlenmiş korelasyonlar ve eşitlikler uygulanacak ve bulunan değerler mantık çerçevesinde değerlendirilecektir.

2. TEMEL BİLGİLER VE LİTERATÜR TARAMASI

2.1. Temel Bilgiler

Bir gaz türbinli motor sisteminde optimum yanmanın sağlanabilmesi için yakıt ve hava karışımının yeterli miktarlarda karışmış olması gerekir. Oluşturulan karışımın niteliği hava aracının itkisi ve dolayısıyla performansı olarak geri dönecektir. Bunun için yakıtın bırakıldığı ortamın sıcaklığı, basıncı, havanın geliş hızı, bırakılan yakıtın viskozitesi, yüzey gerilimi, yakıtın çıkış sıcaklığı, yakıtın çıkış hızı, nozul çapı, nozul 'ün uzunluğu gibi birçok etkenin hep birlikte incelenip değerlendirilmesi gerekir. Bu faktörlerin hepsi yanma verimine belirli oranlarda etki etmektedir belirli oranlarda bu değerlere sahip bir hava-yakıt karşılaşmasında yakıtta bu değerlerin miktarına bağlı olarak bazı değişimler ortaya çıkmaktadır. Yaşanan farklılaşmaların literatürdeki adı atomizasyon ya da bozulma (breakup) olarak geçmektedir ve 2 farklı fazda süreç tamamlanmaktadır. Şekil 2.1'de çapraz hava akışı etkisi altında kalan sıvı bir jetin temel bozulma süreçleri gözlemlenmektedir.



Şekil 2.1. Çapraz hava akışı etkisi altında kalan sıvı jetinin bozulma aşamaları [22]

Öncelikle jet sütununun hava akışı yönünde olan tarafına rüzgâr tarafı (windward side), hava akışına ters yöndeki tarafına da rüzgar altı tarafı (leeward side) denir.

Jet sütunu nozuldan çıktıktan sonra (akışın uniform çıktığı ve herhangi bir kavitasyon etkisi altında kalmadığı varsayımı ile) önceden de açıklandığı üzere iki farklı bozulmaya uğrar. Birincil bozulma henüz bozulan kesimin jet sütunu ile bağlantısının kopmadığı kısım iken ikincil bozulma sütun ayrılmasından (column breakup) sonra gerçekleşir ve mekanizma itibari ile birincil bozulmaya çok benzerdir. Bozulma süreçleri temelinde birkaç parametreye bağlı olarak gerçekleşmektedir.

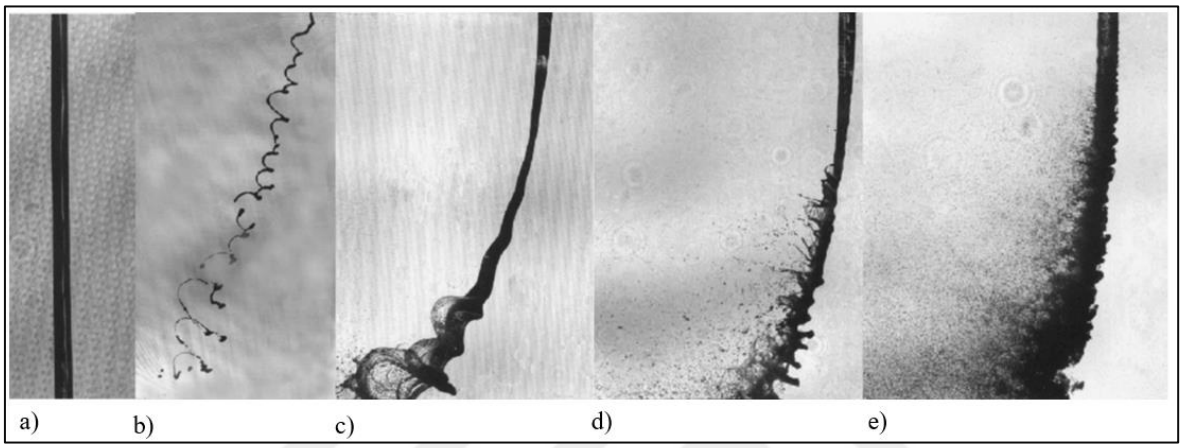
Çizelge 2.1. Jet akışının ayrılma karakterini belirleyen temel parametreler [20]

Parametrenin İsmi	Parametrenin Sembolü	Parametrenin Formülü
Momentum Akı Oranı	q	$\frac{\rho_j u_j^2}{\rho_a u_a^2}$
Gaz Weber Sayısı	We_a	$\frac{\rho_a u_a^2 d_j}{\sigma}$
Gaz Reynold Sayısı	Re_a	$\frac{\rho_a u_a d_j}{\mu_a}$

Bozulma süreçlerinin yaşanma zamanlarını, lokasyonlarını ve şiddetlerini belirleyen temel parametreler Çizelge 2.1'de gösterilmiştir. Alt indis "j" ile gösterilen jet akışını belirtirken, "a" ile gösterilenler çapraz hava akışını belirtir. Jet yörüngesinin oluşumunun arkasında temel aerodinamik bir denge vardır. Jet akışı ile karşılaşan çapraz hava akışı jetin rüzgar tarafının kesit alanı üzerinde bir durma noktası oluşturur. Bu kesit alanı etrafında hızlanan akış, dairesel kesitin yan yüzeylerinde basıncın azalmasına (Bernoulli eşitliği gereği akışın kesit alanı ile karşılaşan kısmındaki enerjinin sabit kalabilmesi için artan kinetik enerjinin azalan basınç ile dengelenmesi gerekir) sebep olur. Kesitin hızlı olduğu yan gölgelerinde basıncın azalması dairesel kesitin şekil deformasyonuna uğramasıyla sonuçlanır. Dairesel kesit deformasyon sonucu şekli eliptik hale gelir ve sütunun rüzgar tarafında düz bir yüzey oluşumuna sebep olur. Artan kesit alanı ve genişleyen sütun çapraz hava akışı ile karşılaşınca da daha fazla sürükleme kuvveti oluşturur ve jet sütununu akış boyunca sürükler. Hatta düşük basınç bölgelerinden daha da sonra anlatılacağı üzere yüzey ayrılmaları oluşumuna sebep olur. Bir sonraki kısımda ise temel ayrılma mekanizmaları anlatıldı.

2.1.1. Birincil bozulma rejimleri

Birincil bozulmayı (Primary Breakup); bozulmamış evre, sütun bozulması (column breakup), paket bozulması (bag breakup), çok modlu bozulma (multimode breakup) ve kesme bozulması (shear breakup) olarak beş farklı evreye ayırabiliriz. Şekil 2.2'de çapraz hava akışı etkisi altında kalan sıvı jetin uğrayabileceği bozulma tiplerinin görseli verilmiştir.



Şekil 2.2. Çapraz hava akışı etkisi altındaki sıvı jetin bozulma fazları [21]

Bu bozulmalar sırayla oluşmamakla birlikte gazın Weber sayısı, momentum akı oranı ve viskozitesi ile orantılıdır. Bu fazların detaylıca incelenip ilgi odağının belirlenmesi gerekir.

Bozulmamış evre

Gazın Weber sayısının sıfır olduğu ortamda gerçekleştirilen bu deneysel evrenin temel sebebi sıvı üzerinde gerçekleşecek temel ayrılma ve bozulmaların tamamen çapraz akışın özellikleri sebebiyle gerçekleştiğinin kanıtlanmasıdır. Yani jetin türbülanssız ve vortisitesiz olduğunu gözlemlemek amacımızdır. Sıvının Reynolds sayısı yüksek olmasına rağmen sütun boyunca herhangi bir bozulma ya da yüzey dalgasına rastlanmamıştır. Jetin yarıçapı arttırıldıkça daha önce gözükmeyen/uzun mesafelerde gözlemlenen yüzey dalgaları sütun yüzeyinde gözlemlenecektir. Ama çapraz hava akışı olmadığı ve jet her türlü türbülans ile vortisitenin etkisinden kurtulduğu için bu düzensizlikler yüzey gerilme kuvvetini yenecek seviyeye gelmeyecek ve damlacık oluşumu gözlemlenmeyecektir. Şekil 2.2.a'da bu olay gözlemlenmektedir.

Sütun bozulması (column breakup)

Sütun bozulması hava akış hızının (dolayısıyla çapraz akışın Weber sayısının) göreceli olarak yüksek olduğu akış durumlarında oluşur. Temel bilgiler kısmında anlatılan bilgileri hatırlayacak olursak. Aerodinamik kuvvet etkisi altında kalan sütunun kesit alanı üzerinde durma noktası ve maksimum hız noktalarının oluştuğu, bu hız ve basınç farklılaşmalarının (hıza bağlı olarak farklılaşır) kesitin şeklini deforme ettiği ve onu hava akışı yönünde sürüklediğinden bahsedilmişti. Sütunun rüzgar tarafında göreceli olarak düzleşmesi ve yanlardan düşük basınç etkisi altında kalarak genişlemesi sonucunda sürükleme kuvveti artar ve bu sürükleme kuvveti jeti sadece akış yönünde sürüklemez, aynı zamanda da akışı y ekseni üzerinde aşağıya doğruda sürükler (gaz akış yönünün x ekseni üzerinde, jet akışının y ekseni üzerinde ve jetin yukarından aşağıya bırakıldığı varsayımı ile). Jet akışının hem aşağıya hem de hava akışı yönünde sürüklendiği sütunun kalınlaşmış bölgelerinde düğüm (node) benzeri yapılar oluşur. Şekil 2.2.b'de bu yapılar gözlemlenmektedir. Jetin üst ve orta bölgelerinde rahatlıkla gözlemlenmekte olan bu düğüm benzeri yapılar jetin dahada ileriki aşamalarında damla benzeri yapılar oluşturur. Düğümlere göre daha ince ve hızlı olan bu damla benzeri yapılar jet sütununa ince bağlantılar ile bağlanmıştır. Bu ince bağlantıların kopmasıyla ise sütun ayrılması fiili olarak gerçekleşmiş olur. Sütun ayrılması karakteristik (nozulun yarıçapına bağlı) uzunluklar ile ifade edilmekle birlikte ayrılmanın gerçekleşeceği noktaları deneysel ve hesaplamalı olarak tahmin edebilmek için kapsamlı çalışmalar yapılmıştır.

Paket bozulması (bag breakup)

Paket bozulması durumu, çapraz akışın hızını (dolayısıyla Weber sayısını) daha da arttırdığımız durumda oluşur. Önceki durumda anlatıldığı gibi jet kesitinin düzleştiği ve akış yönünde deforme olduğu durumdan hemen sonra daha da yüksek olan Weber sayısının etkisi ile rüzgar altı yönünde bir paket/torba oluşumu gözlemlenir. Bu olay 2 boyutlu değildir ve iki paket arasında λ_c dalga boyluk bir mesafe vardır. Paketler y yönündeki karakteristik uzunluklar arttıkça akış yönünde hacim olarak genişlerler ve maksimumlarına ulaştıktan sonra en dış noktalarından başlayarak bozulurlar. Bunun sonucunda süreç paketi birbirine bağlayan iki sütununda kopması ve en paket bozulmasının çevresinde en büyükleri ise akışta daha ileride olmak üzere damlacık oluşumuna sebep olur. Şekil 2.2.c'de olay gözlemlenmektedir.

Çok modlu bozulma (multimode breakup)

Şekil 2.1'de de görüldüğü üzere akış jetin y ekseni üzerindeki ileri karakteristik uzunluklarında sütun üzerindeki kesmeden dolayı kopmalar yaşar ve bunlara ligamentler denir. Çapraz akış hızının dahada arttırılması sonucunda hem paket oluşumunun gözlemlendiği hem de kesme etkisi ile oluşan ligament oluşumunun gözlemlendiği bir aşamaya girilir. Bu bozulmada oluşan bu iki evrede yaklaşık olarak benzer zaman aralıklarında oluşurlar. Bu bölüm aslen birincil bozulmanın kesme bozulmasına geçişi olarak düşünülebilir. Son aşamaya göre hala deneysel olarak seçilebilir paketlere sahip olunan bu rejim de Şekil 2.2.d'de gözlemlenmektedir. Bu belirgin iki bozulmadan, paket bozulmaları jet sütununun farklılaşması ile oluşurken, ligament oluşumu ise sütunun yüzeyindeki kesmeden dolayı oluşur.

Kesme bozulması (shear breakup)

Çapraz akış hızı yeteri miktarlarda arttırılırsa artık ikincil bozulmadan önceki son aşama kesme bozulmasıdır. Bu evrede bozulmalar hem rüzgar tarafından yüzey bozulmaları olarak kopan damlacıklar ile hem de rüzgar altı tarafından kopmuş ligamentler ile olarak oluşurlar. Bu evrede diğer evreler gibi jetin çapraz akış yönündeki yönelimi ile başlar. Jetin henüz çıkışında iken her ne kadar her ne kadar yüzey dalgaları oluşsa da deneysel olarak gözlemlenen, yüzey bozulmasına sebep olmadığı ve iki dalga arasındaki dalga boyunun jetin çapından küçük olduğu (yaklaşık olarak 0,1 katı) yönündedir. Lakin bu yüzey dalgaları her ne kadar direk olarak kopma meydana getirmese de sütunun çevresinde ligament oluşumuna destek olmaktadır. Bu ligamentlerin kopması ile ilk damlacığın uçtan ayrılmasıyla tetiklenmiş olur. Şekil 2.2.e'de rüzgar tarafında oluşan yüzey dalgaları, rüzgar altı tarafında oluşan ligamentler ve damlacıklar gözlemlenmektedir. Jet akışı yönünde karakteristik mesafe arttırıldığında ise bu bozulmalar arasındaki mesafe artar ve hem ligament hem de ligamentlerin ucundan kopan damlacıkların artmasıyla karşılaşılır. Bu da tabi ki ikincil bozulmaya aktarılacak damlacıkların ve ayrık ligamentlerin sayısını arttırır. Şimdiye kadar akış üzerinde farklı bozulma durumlarını gözlemlemek için sadece gazın hızını değiştirdik. Bunu yaparken ki varsayımımız da jetin viskozite etkisinin önemsiz olduğu varsayımıydı. Ama son bozulma tipi olan kesme bozulmasında jet sütununun kenarlarından kopan ligamentlerin uzunluğunun artan viskozite oranı ile daha da uzayacağı unutulmamalıdır.

2.1.2. İkincil bozulma

İkincil bozulma ile birincil bozulma arasında mekanizmalar açısından analojik bir ilişki vardır. Birincil bozulmada karşılaşılan evreleri ikincil bozulmada da görmekteyiz. Ancak bu evrede bu bozulmaları jet sütununda değil, birincil bozulma evreleri sonrasında oluşmuş /kopmuş damlacıklar ve ligamentler üzerinde görmekteyiz. Tezin çalışma alanı kapsamında değildir.

2.2. Literatür Araştırması

Konu üzerine yapılan araştırmalar sonucunda yapılan çalışmaları deneysel ve hesaplamalı olarak ikiye ayırmak mümkündür. Literatürde, limitleri belirlenmiş fazlaca deneysel çalışma bulunmaktadır. Sayısal çalışmalar ise son 20 yıllık süre zarfında ortaya çıkıp deneysel çalışmaların sonuçları ile doğrulama çalışmalarında bulunmaktadır. Deneysel çalışmalar farklı sıvılar (viskozite etkisinin incelenmesi için), farklı momentum akı değerleri (sıvı ve gazın farklı atalet değerlerinin onların bozulmasına etkisini incelemek için) ve farklı gaz Weber sayıları (gazın ataletinin sıvının yüzey gerilmesine etkisini inceleme amacıyla) kullanarak yapılmış çalışmalardır. Bütün deneysel çalışmalar belirli miktarlarda belirsizlikler (ölçüm, kamera ve personel kaynaklı) içermekle birlikte sütun ayrılması gibi büyük ölçekli bozulmaları ve onları konumlarının incelenmesi için en uygun ortamdır. Deney ortamının ramjet veya scramjet gibi basınçlandırılıp ya da sıcaklığının artılıp çalışılması da bir limit teşkil ettiği için son zamanlarda yapılan çalışmalar hesaplamalı kısma kaymıştır.

Wu, Kirkendall, Fuller ve Nejad (1997), tarafından yapılan çalışmada su, etil alkol, %30 Alkol su karışımı, %40 gliserol su karışımlarının farklı nozul çıkış yarı çapları, jet hızı ve momentum akı oranları etkisi altındayken bozulma karakterlerini geniş bir deneysel çerçevede incelenmiştir. Yaptıkları deneysel çalışma ile sütun bozulması ile damlacık bozulması arasındaki analojiyi ortaya çıkartılmış ve hatta sütun ayrılma noktasının lokasyonunu damlacıklar üzerine yaptıkları çalışmalarla doğrulanmıştır. Belirli oranlara sahip bir nozul geometrisi (nozulun uzunluğunun çapının 4 katı olması ve kavitasyonu engellemek için keskin kenarlardan kaçınmış olması) kullanılmıştır. Farklı sıvılarla yaptıkları deneyler sonucunda kendisinden sonraki deneysel ve hesaplamalı çalışmalara temel teşkil edecek veri tabanı ve eşitlikler oluşturulmuştur. Farklı sıvı, farklı viskozite ve farklı yüzey gerilmelerinden oluşan geniş veri tabanı için, sütun bozulmasının eksenel ve

enine lokasyonlarını verecek grafikler ve eşitlikler oluşturulmuştur. Çalışmanın sonucunda momentum akı oranının ya da sıvı jet özelliklerinin bozulmanın eksenel yöndeki (x ekseni üzerindeki) konumu üzerinde bir etkisinin olmadığını bulmuş olmalarıdır. Bu durum Rouaix ve diğerlerinin çalışması haricinde diğer bütün çalışmalarda gözlemlenmiştir. Yapılan çalışmanın sonuçlarından biri de momentum akı oranını arttırdıkça (sıvının ataletinin gazın ataletine oranı) jetin deformasyona uğrayan kesit alanın uçlarındaki yüzey bozulmaları ve kopmalarının sütun ayrılmasından daha önce oluşacağıdır.

Mazallon, Dai ve Faeth (1999), tarafından yapılan çalışmada dairesel türbülanssız bir jet akışının gaz çapraz akışı etkisinde birincil bozulma evrelerini geniş sıvı/gaz Weber sayıları momentum akı oranı ve Reynolds sayısı için deneysel olarak gözlemlenmiştir. Birincil bozulma ve damlacıklarda gözüken ikincil bozulma arasındaki analojiyi momentum akı oranının düşük miktarlardaki etkisi ile fark edilmiştir. Viskozite açısından ise deney çalışma sıvılarının (su, etil alkol, %66 gliserol, %79 gliserol ve %84 gliserol) viskozite değerlerinin Ohnesorge sayısı 0,1'den küçük olduğu sürece sonuçlar üzerinde farklılık oluşturmadığını, Ohnesorge sayısının 0,1'den büyük olduğu durumlarda ise birincil bozulmada uzun bağ oluşumuna sebep olduğu fark edilmiştir. Değerler log-log grafikleri haline getirilmiş ve uygun eşitlikler oluşturulmuş. Ek olarak bozulmanın oluşma anını karakteristik zamanın bir fonksiyonu olacak şekilde ifade edecek eşitlikler oluşturulmuştur.

Stenzler, Lee ve Santavicca (2003), tarafından yapılan çalışmada su, aseton ve 4-heptanon için ses altı ve atmosfer koşullarında deneyler yapılmıştır. Bu deneyler momentum akı ve Weber sayılarını ayrı ayrı sabit tutacak biçimde farklı büyüklükteki parametreler ile gerçekleştirip ilgili sonuçlar ile bir veri tabanı oluşturmuştur. Daha sonra bu veri tabanından ısıtılmış ve ısıtılmamış çapraz akış hızları için eşitlikler çıkartılmıştır. Eşitliklerin doğruluğunu yaptıkları deneysel çalışmanın verileri üzerinden gözlemleyip uygun determinasyon katsayıları bulunmuştur. Akış parametrelerinin ilgili sonuçlarla belirgin olarak verilmesi ve kullanılan deney gözlem alanının küçük olması sebebi ile sayısal çalışmalar için uygun bir deneysel çalışma olmuştur. Bahsi geçen çalışma aynı zamanda şu an da yürütülen tez çalışmasının da referansı niteliğindedir.

Sallam, Aallburg ve Faeth (2004), tarafından yapılan çalışmada aynı oda koşulları sıcaklık ve basınç değerlerine sahip bir ortamda deneysel çalışılmıştır. Su, Etil alkol, %79 ve %84 Gliserol gibi 4 farklı sıvıyı jet olarak kullanıp 3 farklı nozul geometrisi için çalışmayı

tamamlanmıştır. Parametrelerden Weber sayısı, momentum akı oranı ve ohnesorge sayısı üzerinde değişiklikler yapıp bozulmaların lokasyonları, zamanları dalga özelliklerini gözlemleyebilmek için kamera ile çekimler yapılmıştır. Bu çekimler MATLAB ortamında düzenlenmiş ve incelemelerde bulunulmuştur. Veriler (ayrılmanın lokasyonu) için log-log grafikleri oluşturulmuş, uygun eşitlikler belirlenmiş ve korelasyonlar ile gerekli katsayılar bulunulmuştur.

Ragucci, Bellofiore ve Cavaliere (2007), tarafından yapılan çalışmada sıvı olarak doğrudan Jet A-1'i kullanırken sıcaklıkları 600 K' e basınç değeri de 2 MPa'a kadar çıkan çapraz akış koşullarında toplam 82 farklı deney yapılmıştır. Deneyler sırasında ayrılma noktası olarak uzayda jet momentum akı değerinin etkisini kaybettiği nokta referans olarak alınmış ve bu nokta baz alınarak ayrılma noktasının değerini verecek eşitlikler türetilmiştir. Yapılan deneyler ve çıkarılan eşitliklerin sonucunda referans aldıkları bu noktanın jet akışının eksenel yönündeki konumu jet momentum akı oranı ile bağlantılı iken çapraz akış yönündeki konumunun ise aerodinamik Weber sayısı ile ilişkili olduğu saptanmıştır. Yapılan çalışmaların sonucunda birincil bozulmanın sıvı sütunu üzerindeki etkisi saptanmış bu fiziksel olayı etkileyen önemli parametreler belirlenmiştir.

Brinckman, Hosangadi, Ahuja, Dash ve Feldman (2008), tarafından yapılan sayısal çalışmada jet akışının ayrılma durumu ve buna ek olarak buharlaşma yani ikincil bozulma durumu kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Arayüz lokasyonu için VOF metodu temel alınmıştır. Bu metoda ek olarak ikincil bozulma karakteristiği birincil bozulma ile inceleneceği için ve ses üstü akış çalışmanın bir parçası olduğu için yarı basınç temelli diye adlandırdıkları bir yoğunluk bazlı çözüm yolu izlenmiştir. CRAFT isimli yerel program bu kapsamda değiştirilmiş ve kullanılmıştır. Kapsamlı sayısal çalışma, basınç temelli çözüm ağı adaptasyon teknikleri kullanılmış ve hem kullandıkları programın hem de yöntemlerinin doğruluğu gösterilmeye çalışılmıştır.

Li, Lin ve Xue (2012), tarafından yapılan deneysel çalışmada yüksek basınç, ses altı çapraz akışı ve 650 K'e kadar arttırılmış çapraz akış sıcaklığı etkisi altında sıvı kerosenin dağılım durumu incelenmiş. Elde edilen sonuçlar Stenzler ve diğerleri (2003) ve Ragucci ve diğerleri (2007)'nin çalışmaları ile karşılaştırılmıştır. Çalışmanın sonucunda Weber sayısının çapraz akış yönündeki nüfuz üzerinde fazla bir etkisi olmadığı daha çok akışın eksenel dağılımı

üzerinde etkili olduğu, arttırılan hava sıcaklığı ile artan Weber sayısının akış nüfuzu üzerinde etkili olduğu sonucuna varılmış ve bu sonuçlara uygun eşitlik ifade edilmiştir.

Eslamian, Amighi ve Ashgriz (2014), tarafından yapılan deneysel çalışmada jet akışkanı olarak kullanılan suyun ses altı çapraz akışında ve kademeli olarak arttırılmış basınç ve sıcaklık altında bozulma durumu incelenmiştir. Sıcaklık limitleri 273 K'den 573 K'e kadar çıkarken basınç limitleri 2 atm'den 5 atm'ye kadar değişiklik göstermiştir. Deneysel çalışma sonucunda elde edilen verileri kullanarak diğer deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen verilerin aksine akışın hem rüzgar altı tarafındaki özelliklerini verecek hem de merkez çizgi özelliklerini ve eğimini verecek eşitlikler elde edilmiştir. Jet akışının şekli de çalışmanın inceleme alanı içerisine girmiştir ve eğimli jetin orta düzlem alanı da çalışmanın inceleme noktalarındandır. Çalışmanın sonuçları kendi deneysel veri tabanı ile benzerlik gösterirken literatürde yer alan çalışmalar ile farklılıklara sahiptir.

Zhao, Zhang, Lin ve Cheng (2016), tarafından yapılan çalışmada 2,3 atm basınç, 730 K çapraz akış giriş sıcaklığı, 160 Weber sayısı ve 10 ile 40 arası momentum akı oranı değerleri için deneysel çalışma yapılmıştır. Çalışmanın temeli sabit parametreler için değişen momentum akı oranı değerlerinde akışın dağılım parametrelerinin incelenmesidir. Yarıçapın akış yönünde belirli katlarında alınan düzlemlerde akışın dağılım durumu momentum akı oranının değişimleri ile ifade edilmeye çalışılmış ve sadece belirlenen deney ortamı koşulları için geçerli olacak, akışın belirli bir x (çapraz akış yönü) uzunluğunda dağılım özelliklerini verecek empirik eşitlikler elde edilmiştir. Çalışma sonucunda artan jet momentum akı yani bu deney koşulu için artan jet hızı ile bu eksenel dağılımların daha fazla ve görünür olacağı sonucuna varılmış, bu koşullarda geçerli olacak eşitlikler verilmiştir.

Xiao, Sun, Liu, Zhang ve Zhang (2017), tarafından yapılan sayısal çalışmada çapraz hava akışının sıkıştırılabilirliğinin (ses altı veya ses üstü olması durumunda) birincil bozulmaya etkisini yüksek hızlarda ve normal sıcaklıklarda incelenmiştir. Jet ile hava arayüzünün takibi, arayüzü iyi takip edebilen ama sıvının ağırlığının takibinde o kadar da etkili olmayan Coupled Level Set (LS) ile sıvının hacmini ilgilenilen uzayın bir fonksiyonu olarak ifade eden Volume of Fluid metodunun birleşimi olan CLSVOF metodu ile yapılmıştır. Algoritmalar ve metotlar özetlenmiş ve sonuç olarak hem ses üstü hem de ses altı çapraz akışta tahmin edilen bozulma noktaları gösterilmiştir.

Prakash, Sinha, Tomar ve Ravikrishna (2018), tarafından yapılan çalışmada nozul geometrisinin jet bozulma süreçleri üzerindeki etkisini deneysel olarak incelemiştir. Nozul geometrisini çapı üzerinden ifade etmek yerine uzunluğun çapa oranı (sıvı akışının gelişmişlik seviyesini belirtmek için) L/D olarak ifade edip bu oranın etkisini geniş momentum akı oranı ve Weber sayısı için incelenmiştir. Deneylerde 10, 50, 100 olmak üzere 3 farklı L/D değeri için çalışılmış ve artan L/D oranının daha erken türbülanslı akışa sebep olduğuna ve jetin daha erken sütun bozulmasına neden olduğu ortaya çıkartılmıştır. Bulgular arasında küçük L/D değerlerinden bırakılan jetlerin daha yüksek L/D değerlerinden bırakılan jetlere göre sütun bozulma lokasyonlarının çapraz akış yönünde daha ileride olduğu da ortaya çıkarılmıştır.

Im, Lin ve Lai (2005), tarafından yapılan sayısal çalışmada süpersonik, yüksek basınç ve yüksek sıcaklık altında su jetinin bozulma karakteristiği incelenmiştir. Jet olarak modellenen sıvı su kabul edilip 998 kg/m3 yoğunluğa, 0,072 N/m yüzey gerilmesine ve 2,67e-3 kg/ms viskoziteye sahiptir. Ramjet ve Scramjet kabulü yapılan test bölmesi 127 mm yüksekliğe 152 mm genişliğe ve 762 mm uzunluğa sahiptir. Sıvı jetin bırakıldığı nozulun çapı 0,5 mm olup M=1,94 çapraz akışında sprey modellemesi yapılmıştır. Test bölmesine çapraz hava akışı 304,1 K ve 678,13 m/s ile bırakılmakta olup K-H ve R-T hibrit modellerinden biri olan TAB (Taylor analogy breakup) modelinin kullanıldığı kendi referansları ve kendi geliştirdikleri modeli karşılaştırma çalışması yapmışlardır. Sprey etki uzunluğu, damlacık büyüklüğü dağılımı, eksenel hız ve benzeri değerler önceki deneysel çalışmalar ile karşılaştırılmıştır. Ek olarak karmaşık şok dalgalarının damlacıklar ile etkileşimi de çalışmanın inceleme alanı içerisinde olmuştur. Sonuç olarak bozulma zamanının başlamasını K-H ve R-T hibrit modellerindeki sinüzoidal fonksiyonlara bağladıkları çalışmada, elde ettikleri sonuçların daha önceden kullanılan TAB bozulma modellerine göre sprey etki uzunluğu ve damlacık dağılımı gibi parametreleri tahmin etmede daha iyi olduğunu göstermişlerdir. Damlacık bozulmasını modelleme de şok dalgasının etkisini yeteri kadar iyi gösterilmese de yapılan çalışma bu etkileşimin modellenmesinin ilk aşaması olması sebebi ile ilk aşama çalışma olarak araştırmacılar tarafından kabul edilmektedir.

Gorokhovski ve Herrmann (2008) tarafından yapılan çalışmada yakıtların birincil bozulma karakteristiğinin incelenmesi iki farklı sayısal yaklaşım ile gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada hem DNS hem de RANS metotları kullanılmıştır. Birincil bozulmanın sayısal incelenmesinde DNS kullanımı gerektirdiği maliyeti sebebi ile yaygın olamamış ve

araştırma gerektiren bir konu olarak kalmıştır. Yapılan çalışma da DNS'in her ne kadar birincil bozulmayı fiziki olarak modellemek için bir potansiyel sunsa da fazların etkileşiminden kaynaklı alt terimleri ihmal etmesi ve bu sebeple yarı-DNS olarak adlandırılması uygun görülmüştür. Hatta araştırmacılar tarafından bu alt terimlerin ihmalinin aslında büyük ölçekli etkileşimlerde bu terimlerin etkisinin gözlemlenmeyeceği yorumu yapılmış ve her ne kadar tamamen DNS sayılmasa da çalışmanın kullanımının uygun görüldüğü belirtilmiş ve daha fazla araştırmaya gerek duyulduğuna dikkat çekilmiştir. Çalışmanın ikinci kısmında gerçekleştirilen RANS yaklaşımında ise zaten yaygın olarak kullanılmakta olan Euler karışım modeli yardımı ile yapılmış olan dizel sprey çalışmaları incelenmiş bu çalışmalar ve DNS yardımı ile yapılan çalışmalar arasında karşılaştırmalar yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre RANS modelinin de tıpkı DNS yardımı ile çözülen modellerde olduğu gibi eksikliklerinin olduğu, bunların ise RANS modelinin toplamların ortalamaları üzerinden çalışması sebebi ile uzaysal küçük ölçekli gruplaşmış parametrelerin RANS modeli ile gösteriminin mümkün olmadığı ve küçük ölçekli incelemelerde eksikliklerinin olduğu belirtilmiştir.

Masuda ve McDonell (2006) tarafından yapılan deneysel çalışmada gaz türbini yakıt enjektörünü temsil edebilecek bir nozuldan bırakılan yakıt, 3,7 ile 6,4 atm arasında değişen basınç ve 350 ile 450 K arasında değişen sıcaklık aralıkları ile motor koşullarına benzer bir ortama bırakılıp deneysel olarak dağılımı incelenmiştir. Çıkarılan anlık görüntüler ortalamaları verecek şekilde düzenlenip jet iz düşümü üzerinde çalışılmıştır. Uygun jet izdüşümünü verecek eşitlikler en basit halinden başlamak üzere eklenerek, deney koşullarında tamamen izdüşümü verecek şekilde düzenlenmiş ve eşitlikleri son halleri elde edilmiştir. Eşitlikler tek bir ifadeye bağlı olmak yerine farklı Weber ve momentum akı oranı aralıkları için düzenlenmiş olup sonuçlar diğer deneysel çalışmalar yerine araştırmacılar tarafından gerçekleştirilen deneysel çalışmanın sonuçları ve eşitliklerin çıkartılan aralıkları arasında gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar araştırmacıların deneysel sonuçları ile yakınlık gösterip yüksek momentum akı oranları ($30<q<50$) için eşitliklere dahil ettikleri Weber sayısı ile sonuçların doğruluğu arttırılmıştır zaten şu an yapılan güncel çalışma da eşitlikleri verilmekte olup sonuçlar bu tez ile elde edilen eşitliklere gayet yakın bir düzeydedir. Elde edilen sonuçlar ile arttırılan Weber sayısı ile elde edilen yüksek iz düşümünün sadece akış yönünde değil akışa dik yönde de etkili olacağı ve bunu tortu oluşumu ya da emisyona sebep olmadan gerçekleştirebileceği sonucu elde edilmiştir. Bahsi geçen eşitlikler tezin ilgili bölümündeki tabloda yer almaktadır.

Xiao, Dianat ve McGuirk (2013) tarafından yapılan çalışmada atmosfer koşullarında sıvı jetin (1000 kg/m3 yoğunluğa, 8,476e-4 Pa.s viskoziteye ve 0,0728 N/m yüzey gerilmesi değerlerine sahip olan) çapraz hava (1,2 kg/m3 yoğunluğa ve 1,836 Pa.s viskozite değerlerine sahip olan) akışına bırakılması sayısal olarak incelenmiştir. Çözüm geometrileri 30 mm uzunluk; 25,4 mm yükseklik ve 25,4 mm genişliğe sahip olup kullanılan nozulun çapı 1 mm boyutundadır. Kullanılan sıvı jeti bütün analiz durumlarında 8,6 m/s ile bırakılmakta olup analizler çapraz akışın 38,95 m/s; 77,89 m/s ve 110 m/s koşullarında yapılmıştır. Bu koşullar aynı zamanda Weber sayısı karşılıkları olarak 25, 100 ve 200 değerlerine denk gelmektedirler. Analizlerde LES metodu kullanılmıştır. LES metodu aynı zamanda VOF ve coupled-level set metodu ile birleştirilip daha etkili bir arayüz takip ayarlamasının geliştirilmesi planlanmıştır. Analizin limitlerinden olan yüksek sıvı/gaz yoğunluk oranı limitini ortadan kaldırmak için bir sıvı-gaz arayüzünde hız alanı tanımlaması yapılmış ve momentum eşitliğinin ayrıştırılmasında bu alan kullanılmıştır. Elde edilen ilk grup sonuçlarında sıvı yüzeyinin dalga boyunun deneysel veriler ile uyumluluk gösterdiği belirtilmiştir. Bu ilk grup analizlerden araştırmacıların çıkarttığı sonuç ise gaz Weber sayısının artması sonucunda dalga boyunun azalmasının aslında sıvı yüzeyi dalga boyu olayının bir Rayleigh-Taylor düzensizliği olduğu yönündedir. Düzensizliğin dalga çukurlarında artması ise bozulmayı arttıracağı sonucu elde edilmiştir. İlk grup analizlerinin aksine türbülanslı sıvı jeti ile yapılan ikinci grup analizlerde ise gazın aksine sıvı jetin türbülans parametrelerinin bozulma üzerinde etkili olduğu yönünde bir sonuç elde edilmiştir ki zaten yapılan güncel tez çalışmasının ekler bölümünde de benzer sonuçları veren bir karşılaştırma yer almaktadır. Araştırmacılar tarafından yapılan çalışmada kapalı şema kullanımından ötürü zaman adımı boyutları oldukça küçük tutulmuş ve CFL değerleri 0,1'e kadar çekilmiştir. Bu değer bu tip bir analiz için gayet iyi bir değer olur değerin bu seviyelerde olması sebebi ile ayrıştırma kaynaklı hatalar minimum seviyede tutulmuştur. Çalışma LES üzerinde yapılacak çalışmalara örnek temsil edecek seviyededir.

Hashemi, Shalbaf, Jadidi ve Dolatabadi (2023) tarafından yapılan çalışma çapraz akış etkisi altındaki sıvı jetinin sayısal incelenmesinin ve bu karmaşık olay esnasında gerçekleşen damlacık oluşumunun, çapraz akış olarak kullanılan havanın viskozitesi ve sıvı-gaz yoğunluk oranı ile değişebileceği öngörüsü altında yapılmıştır. Araştırmacılar çapraz akış gazının viskozitesi ve yoğunluğunun, sıvı jeti üzerindeki düzensizlik dalgalarını etkileyeceğini ve dolayısı ile bozulmayı etkileyeceğini öngörmüşlerdir. Bunu kanıtlamak için içerisinde 4 farklı Reynold sayısı değeri barındıran 3 farklı set için farklı yoğunluk

oranları ve Weber sayıları kullanılmıştır. Analizler arayüz takibi için VOF metodu kullanılarak yapılmış ve inceleme parametreleri olarak bozulma noktası, jet iz düşümü ve yüzey düzensizlikleri, Reynold sayısı, yoğunluk oranı ve Weber sayısı özelinde incelenmiştir. Kullanılan geometri 3,125 cm3'lük kenarlara sahip bir küp olarak alınmıştır. Geometrinin sınır koşulları yazılan teze benzerlik göstermekle birlikte önceki literatür taramalarından olan Sallam ve diğerlerinin (2004) çalışmaları referans alınmış geometri inceleme alanını sınırlayacak şekilde küçültülmüştür. Doğrulama çalışmaları yine benzer deneysel çalışmalar üzerinden yürütülmüştür. Analizler ticari bir yazılımın yerine bir açık kaynak olan Basilisk çözücüsü üzerinden adaptif çözüm ağı kullanılarak yapılmıştır. Hem jet sütunu eksenel görüntüleri alınmış hem de sprey damlacık dağılımı incelenmiştir. Sonuç olarak gaz viskozitesinin arttırılmasının sıvı sütunu üzerinde ek sürükleme kuvveti yaratacağı ve bu etkinin yüksek yoğunluk oranlı setler için daha etkili olacağı bulunmuştur. Damlacık oluşumunun artan çapraz akış viskozitesi için artacağı yorumu yapılmıştır.

Cuech, Przekwas ve Singhal (1991) tarafından gaz türbini yanma odaları ve roket itki odaları için yapılan sayısal çalışmada lineer ve yaklaşık lineer olmayan dalga modelleri kullanılarak bir birincil bozulma modeli ortaya çıkartılmıştır. Her iki dalga modelinden elde edilen çözümler damlacık boyutu, frekans değerleri ve bozulma değerleri için uygun çözümler ortaya koymuştur. Düşük hızlardaki su jeti için geliştirilen model ve deneysel sonuçlara arasında yapılan karşılaştırmada birebir uyum gözlemlenirken yüksek hız durumlarında (uzay mekiği durumu için denenmiştir) uyumun yeteri kadar iyi ölçüde olduğu belirtilmiştir. Doğrulama analizleri sıvı jetinin 1,5 m/s; 2 m/s; 2,5 m/s; 3,5 m/s'lik hızları ve Weber sayısının 9,8; 17,4; 28,3 ve 53,3 değerleri için yapılmıştır. Model düşük hızlar için birebir sonuçlar verirken yüksek hızlar için geliştirmelere açık olduğu araştırmacılar tarafından belirtilmiştir. Modelin sınırlamaları araştırmacılar tarafından, dalga dağılımı eşitlikinin küçük pertürbasyon teorisi temelli olmasından ötürü türbülans kaynaklı yüksek pertürbasyon etkilerinde doğru sonuçlar vermeyeceği belirtilmiştir. Araştırmacılar tarafından model oluşturulurken kullanılan gaz profilinin düzenli olması fazla gerçekçi olmamakla birlikte gelecek çalışmaları kapsamında bırakılmıştır. Modelin son limitasyonu ise bozulma kriterinin gerekli incelemeye göre düzenlenmesinin gerekliliğidir. Modelin roket yanma odaları ve gaz türbini yanma odaları için farklı sıvı ve ortam koşullarından aynı bozulma karakteristiğini baz alması araştırmacılar tarafından incelenmesi ve gelecek çalışmalarda güncellenmesi gereken bir alan olarak bırakılmıştır.

Gopala, Lubersky ve Zinn (2008) tarafından gerçekleştirilen çalışmada çalışmanın yapıldığı zamana kadar yapılan deneysel çalışmaların hepsinin ortak kullandığı metotların aksine rodamin boyası kullanılarak yeni bir yardımcı teknik oluşturulmuştur. Araştırmacıların ve konu ile ilgili yapılan çalışmaların geneli sütun bozulma noktasını incelerken bunu anlık fotoğrafların yoğunluklar üzerinden ortalamalar alarak yaparken bozulma noktasının çevresinde bulunan damlacık yoğunluğu sebebi ile çok keskin sonuçların alınması mümkün değildir. Araştırmacıların önerisi ile rodamin boya kullanılan çalışmada ise sıvı sütunu ayrılma gerçekleşene kadar tek bir fiber halinde gözükürken ayrılma noktasında ışığı emme gücü değişeceği için bu noktanın kesin tahmini de yapılabilmiştir. Araştırmacılar denemeleri birisi keskin kenarlı (çapı 0,457 mm L/D oranı 10 olan) diğeri yuvarlak kenarlı (çapı 0,457 mm L/D oranı 1 olan) denemeler yapılmıştır. Ve elde edilen sonuçlara göre Weber sayısı değerinin 300'den büyük olduğu durumlarda sütun bozulma noktası ve bu bozulma için harcanan sürenin Weber sayısının 300'den küçük olduğu durumlara göre daha fazla olduğudur. Yeni yöntemle elde edilen sonuçlarda biri de sütunun ayrılma yaşadığı noktaların ve bu noktaların devamında dalgalanmalar yaşattığıdır.

Shaw, Holpp, Stocker, Wozniak, Coffey, Gaetano, Pritschau ve Gutmark (2020) tarafından yapılan çalışmada ses altı çapraz akışına bırakılan yüksek momentum akı oranlarına sahip sıvı jet akışı deneysel olarak incelenmeye alınmıştır. Deneyde kullanılan nozullar keskin kenarlı olup testin ortam koşulları 50 °C sıcaklık ve 9-50 arası Weber sayıları arasındadır. Kendisinde önce yapılan çalışmaların aksine anlık fotoğrafları yoğunluklarına göre renklendirip onların ortalamalarını almak yerine 400 nozul çaplık mesafede akış yönündeki jetin izdüşümü ve sütun ayrılması noktasının belirlenmesi için farklı bir metot geliştirilmiştir. Bu metodun geliştirilmesindeki motivasyon ise aslen zaman ortalamalı yöntem ile yakalanamayan düşün yoğunluklu damlacıklarında yakalanıp Weber sayısının anlık etkisinin akış üzerinde gözlemlenebilmesidir. Weber sayısı, nozul çapı ve momentum akı oranı gibi boyutsuz parametreler ile ilişkilendirilen akış güzergahı eşitliği elde edilmiştir. Bu çalışma sonucunda araştırmacılar tarafından farklı R2 değerlerine sahip 3 eşitlik öne sürülmüştür. Bu üç eşitlik çapraz akış boyunca x/d boyutsuz parametre değerleri 0-125, 0-25 ve 25-125 arasında olacak şekilde değişiklik göstermektedir. Eşitliklerden nozula yakın bölgeyi temsil edeni, ilgili tez çalışmasında elde edilmiş eşitliklere oldukça yakın değerler göstermekte ve benzer boyutsuz parametreleri kullanmaktadır. Elde edilen eşitlikler ve parametrelerinin etkileri daha sonra kendi deneysel çalışmaları ile karşılaştırılmış ve sonuçların doğruluğu üzerine yorumlar yapılmıştır. İlgili çalışmanın sonucunda Weber

sayısının akışın güzergahı üzerinde fazla etkisinin olmadığına ama dağılımı üzerinden etkili olduğu sonucuna varılmıştır.

Bravo, Kim, Ham ve Kerner (2018) tarafından yapılan sayısal çalışmada yapılandırılmamış çözüm ağı kullanılarak arayüz takibi için VOF ve buharlaşma modellemek için ise Lagrangian parçacık metodu yardımı ile nozula yakın ve birincil bozulma denilebilecek bir alanda modellemesi yapılmış. İkincil bozulma denilebilecek küçük ölçekli parçacık arayüz takibi ise Lagrangian takip modeli ile yapılmış olup stokastik ek bir model yardımı ile küçük boyutlu bozulmalarda modellenmiştir. Langmuir-Knusen buharlaşma modeli ile ikincil bozulmaya uğrayan bu küçük ölçekli parçacıkların buharlaşma karakteristikleri ve bu olayın çapraz akış üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu inceleme yapılırken damlacıkların iç hareketleri ve damlacık içi ısı etkileşimleri ihmal edilmiştir. Elde edilen sonuçlar daha önceden yapılan deneysel veriler ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar arasında bozulma karakteristiği ve uzaysal sprey dağılımı, farklı jet hızları için farklılıklar göstermekte ve uzak bölgedeki buhar yoğunluğu sprey dağılımını doğrudan etkilemekte olduğu gözlemlenmiştir.

Bunce, Lee ve Santavicca (2006) tarafından yapılan deneysel çalışmada yüksek sıcaklık ve hıza sahip çapraz akışa bırakılan jet akışının incelenmesi gerçekleştirilmiştir. İnceleme jet akışının periyodik olarak dalgalı olduğu ve dalgalanmaya sahip olmadığı durumlar için gerçekleştirilmiş olup çapraz akış sıcaklıkları gerçek bir yanma odası önünü modelleyecek şekilde 650 °C'lik sıcaklıklara kadar çıkartılmıştır. Jet yakıtı olarak Jet-A kullanılırken jetin sıcaklığı 20 °C'de tutulmuştur. Çapraz akış hız değerleri 75, 100, 150 m/s değerlerinde tutulurken momentum akı oranları 9, 18, 20, 27 ve 36 arasında değiştirilmiştir. Osilasyona sahip olmayan çapraz akışın modellenmesi ve literatür karşılaştırmalarının yapılması osilasyona sahip çapraz akışı için temel oluşturma sebepli iken osilasyona sahip bir jet akışının incelenmesinin sebebi ise akustik etkilerin ve dalgalanmanın jet akış ayrılması ve parçacık buharlaşması üzerindeki etkisinin incelenmesi olarak belirtilmiştir. Osilasyona sahip olmayan çapraz akışta sprey davranışını ifade etmek için üst yüzey baz alınmış ve önceki deneysel çalışmalarda kullanılarak karşılaştırmalar yapılmıştır. Lakin osilasyona sahip olmayan çapraz akış etkisinde bile üst yüzey ifadelerinde farklılıklar gözlemlenmiştir. Bu farklılıklar çapraz akış boyunca artmaktadır ve araştırmacılar tarafından yüksek sıcaklık etkisi olarak yorumlanmıştır. Elde edilen sonuçlar arasında artan momentum akı oranları ile artan üst yüzey iz düşümü de vardır. Çalışma osilasyona sahip olan ve olmayan akışların etki

alanlarının benzer olduğu ama sprey dağılımlarının farklılıklar gösterdiği sonucu ile sonlandırılmıştır.

Pai, Pitsch ve Desjardin (2009) tarafından yapılan sayısal çalışmada yeni bir arayüz takip tekniği geliştirilmiş ve bu tekniğin Navier-Stokes ile uyumu deneysel çalışmalar ışığında incelenmiştir. Bu teknik yardımıyla yapılan analizlerde değişken momentum akı oranlarının, sıvı Weber sayısının ve çapraz akış Weber sayısının jet güzergahı, dağılımı, yüzey dalga boyları üzerindeki etkisi ve bunların dalga dağılım etkisi incelenmiştir. Belirlenen yöntem ile elde edilen sonuçların literatürdeki deneysel verilerle karşılaştırması yapılmış ve uyumu incelenmiştir. Çalışmaların sonunda sabit bir çapraz akış Weber sayısı değeri için jet Weber sayısı artışı ile akışın rüzgar altı tarafındaki yüzey bozulmalarının azaldığı yani sabit gaz Weber sayılarında artan sıvı Weber sayısının sıvı sütununun bütünlüğünü koruyacak şekilde işlediği sonucuna varılmıştır. Bunun aksine sabit sıvı Weber sayılarında artan gaz Weber sayısının sıvı yüzeyi dalga boyu üzerinde etkili olmadığı ve bu sebeple sayısal çalışmalardan elde edilen sonuçların, sıvı sütunu düzensizliklerinin ve dalga boyunun sıvı Weber sayısı tarafından kontrol edildiği sonucu çıkarılmıştır. Elde edilen modelle herhangi bir boyutsuz parametrenin akış üzerindeki etkisinin elde edilmesinin mümkün olduğundan ve gelecek çalışmaları arasında yer aldığından da bahsedilmiştir.

Li ve Soteriou (2018) tarafından yapılan sayısal çalışmada yanma odası çalışma koşullarında farklı yoğunluk oranları ile (bu değişimi araştırmacılar momentum akı oranı ve Weber sayısını sabit tutmak için gaz yoğunluğu ve hızını aynı anda değiştirerek sağlamışlardır.) değişimi incelenmiştir. Global ölçekli izdüşüm çıktılarında farklılıklar gözlemlense de araştırmacılar tarafından en büyük farklılık yerel bozulma ve damlacık oluşumunda gözlemlenmiştir. Vortisite alanlarının incelenmesi sonucunda düşürülen yoğunluk oranları ile baskın mekanizmanın R-T düzensizliklerinden K-H düzensizliklerine geçiş yaptığı gözlemlenmiştir. Bu değişiminde eksenel dağılımın düşüşü üzerinde büyük etkisi söz konusudur. Araştırmacılar düşürülen yoğunluk oranları sonucunda elde edilen bu düzensizlik değişiminin atomizasyonun etkinliğini de düşürdüğü sonucuna ulaşmıştır ki bu sonuçların referans alınan deneysel çalışmalar ile uyumu da gösterilmiştir. Sonuç olarak araştırmacılar tarafından düşük yoğunluk oranlarında ters yönlü vorteks ikizlerinin çarpışma ihtimalinin de artması sebebi ile ortalama parçacık çapının artacağı yorumu yapılmıştır.
Grosshans, Movaghar, Cao, Oevermann, Szasz ve Fuchs (2016) tarafından yapılan sayısal çalışmada jet ayrılması için VOF simülasyonlarının hassaslığını fiziksel ve sayısal girdiler

üzerinden incelemişlerdir. Bu çalışmada VOF metodu yönlü ortalama eğri (DAC) metodu ve yönlü ortalama normal (DAN) birlikte kullanılmış ve hem arayüzün eğriliği hem de eğriliğin ilerlemesi bu parametreler yardımı ile incelenmiştir. Araştırmacıların kullandığı bu model kombinasyon ilk defa kullanılmasına rağmen, araştırmacılar değerler ve yönelimler arasında uyum gözlemlemiştir. Türbülans modeli olarak LES kullanılırken yüzey gerilmesi için tezde de kullanılan sürekli yüzey kuvveti (CSF) modeli kullanılmıştır. Dizel enjeksiyonu 0,1 mm çaplık nozuldan dikdörtgen prizması şeklindeki (x*y*z=16*16*55dnoz) bir çözüm ağına verilmiştir. Çözüm inceleme parametreleri olarak değişken sıvı-gaz yoğunluk oranları ve sıvı-gaz viskozite oranları belirlenmiştir. Yapılan analizler kelvin-helmholtz düzensizliklerini farklı zaman değerlerinde ve sıvı yüzeyinde gösterecek şekilde düzenlenmiş ve sonuçların zaman ortalamaları alınmıştır. Zaman ortalama sonuçlar özellikle nozul içi akışın gösterilmesinde kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar kullanılan üçlü modelin sıvı bozulmasını simüle etmek için uygun olduğu gösterilmiş ve limitasyon olarak VOF modelinin çözüm ağı çözünürlüğüne bağlı olarak küçük ölçekli damlacıkları modellemekte yetersiz kaldığından bahsedilmiştir. Sonuçlar dahilinde sıvı-gaz yoğunluk oranının 10 ve 30 arasında değiştirilmesinin etkisinin düşük olduğu gözlemlenirken sıvı-gaz viskozite oranının 7'den 1'e düşürülmesinin daha küçük damlacık oluşumuna ve dolayısıyla daha yüksek eksenel dağılıma sebep olacağı sonucuna varılmıştır. Bunun sebebi olarak ise sıvı-gaz ara yüzeyinde artan gaz kaynaklı türbülansın etkileri gösterilmiştir.

Rouaix, Stoukov, Bury, Joubert ve Legendre (2023), tarafından yapılan sayısal çalışmada çapraz akış içerisindeki jet akışı konusunu farklı bir perspektiften değerlendirmiştir. Çalışma literatürün üzerine oluşturulduğu yanma odası girişi için değil yangın söndürme uçaklarının daha büyük yarıçaplı (40 cm) nozul geometrileri için yapılmıştır. Çalışmada Star-ccm+ programı kullanılmış ve diğer çalışmaların aksine LES ya da DNS kullanılmamıştır. Türbülans modellemesi RANS ile yapılmıştır. Çalışma geometrinin (yangın söndürme uçağına dönüştürülen bir B747'nin alt gövdesi) bir hesaplama alanı içerisine modellenmesi ile ve uygun sınır koşullarının verilmesiyle başlamıştır. Daha sonra modele seyrek bir çözüm ağı atılarak ilk başta çözüm ağı yakınsaması incelenmiştir. Önceden belirlenen 14 durum içerisinden birisi seçilerek araştırmanın önemli gördüğü ve hesaplama maliyetlerinin el verdiği bir hacim oranında (volume fraction- VOF metodunda kullanılan ve grid içerisinde bulunan fazların oranı) çözüm ağı yakınsaması incelenmiştir. Bu çalışma 4 aşamadan oluşmakta olup bittikten sonra hesaplama alanı içerisinde 4 ayrı alanda 4 farklı boyutta polihedral hücrelerden oluşmuş bir alan ortaya çıkarılmıştır. Bu yapı oluşturulduktan sonra

ise türbülans modellerinin hacim oranlarına etkisi için ayrı bir çalışma yapılmış ve belirlenen 14 durumdan bir tanesi uygun olarak seçilip analizlere geçilmiştir. Jet sütununun maksimum uzunluklarının lokasyonları, sütun ayrılmasının başladığı lokasyonlar ve bu noktalar ile momentum akı oranı arasındaki ilişki belirlenmiş ve gerekli eşitlikler oluşturulmuştur.

Bu kısımda verilen bütün çalışmalar incelendiğinde, yapılan tez çalışmasının deneysel değil tamamen sayısal olması, kullanılan türbülans modellerinin diğer sayısal çalışmaların aksine direkt olarak seçilmeyip türbülans modeli karşılaştırması sonucunda hem hesaplama yeteneğinin hem de jet ayrılmasını temsil yeteneğinin incelenmesi, adaptif çözüm ağının RANS-LES hibrit modeli ile entegre olarak kullanılması ve çalışma sonucunda elde edilen eşitliklerin yaklaşık 10 jet çaplık bir mesafe de sıvı jet sütunun üst yüzeyini yüksek bir doğrulukla tahmin edebilmesi yönüyle farklı ve özgün bir çalışmadır. Sprey modellemesi gibi daha gelişmiş ve karmaşık çalışmalara öncü olacak niteliktedir.

3. ÇOK FAZLI AKIŞLAR

Her ne kadar gerçek hayatta maddenin fazları katı, sıvı ve gaz olarak değerlendirilse de çok fazlı sistemlerin modellenmesi daha farklı bir bakış açısıyla değerlendirilir. HAD analizleri için faz kavramı içinde bulunduğu ortama karşı spesifik olarak ataletsel bir etkileşim içerisinde olan ayırt edilebilir madde sınıfı olarak tanımlanabilir. Bu bağlamda aynı maddenin farklı boyutlardaki ve birbirleriyle makroskobik ölçüde karışmış parçacıkları da çok fazlı olarak değerlendirilir. Çok fazlı akışlarda, fazların ara yüzeyleri arasında belirgin ve makro seviyede bir karışım vardır. Moleküler karışımlar çok fazlı akışkanların çözümleme uzayında bulunmazlar.

3.1. Çok Fazlı Akış Rejimleri

Çok fazlı akış rejimleri yapısında bulundurdukları fazların sayısı ve çeşitlerine göre dört farklı grup altından toplanabilir. Bunlar gaz-sıvı ya da daha genel bir ifade ile sıvı-sıvı, gaz-katı, sıvı-katı veya 3 fazlı akışkanlardır.

3.1.1. Gaz-katı akışları

Bu tür akışlar, sürekli bir gaz fazında bulunan yoğun ya da seyrek olarak bulunan katı parçacıklar ile ilgilenir. Yoğunluk veya seyreklik asılı partikül sayısı ile belirlenmektedir ve birkaç farklı türü vardır.

- Partikül yüklü akışlar: Bu tip akışlar, sürekli bir gaz ortamında bulunan dağınık partiküller ile ilgilenir.
- Pnömotik Taşıma: Bu tipteki akışların özellikleri ve akış profilleri katı yükleme durumlarına, Reynolds sayılarına ve parçacık boyut ve özelliklerine bağlı olarak değişiklik gösterebilmektedir. Örnek olarak düne akışı, slug akışı ve homojen akış verilebilir.
- Akışkan Yatak: Bir dağıtıcı yardımıyla içerisine gazın enjekte edildiği bir sistemden oluşur. Yataktan yükselen gaz partikülleri asılı tutar. Yükselen gazın akış oranı ile arttıkça yataktaki karışım oranını arttıracak baloncukların gözlemlenmesi görülebilir.

3.1.2. Sıvı-katı akışları

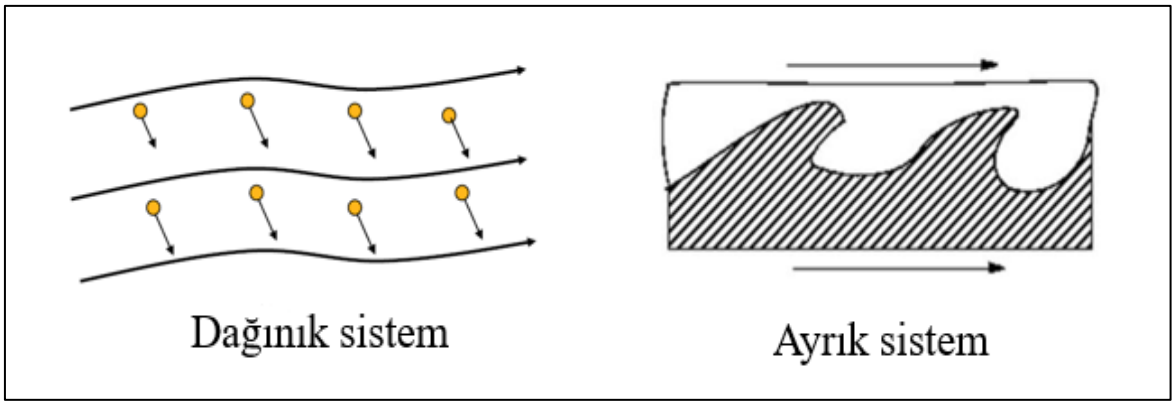
Bu tip akışlar sıvı ortam içerisinde katı parçacıkların taşınması ile ilgilenirler ve üç farklı tür altında toplanırlar. Mineral işleme, nükleer atık yönetiminde vb. alanlarda sıklıkla kullanılır.

- Çamur (slurry) akışı: Bu akış sürekli sıvı fazda katı parçacıklarının taşınımı ile ilgilenir ve bu akışın davranış biçimi içerinde bulunan katı parçacıkların sürekli sıvı faza oranı ile bağlantılıdır.
- Sıvıyla Taşıma (Hydrotransport): Bir sıvı sürekli faz içerisinde yoğun bir biçimde dağıtılmış olarak bulunan katı parçacıklarını ifade eder.
- Çökeltme (Sedimentation) Akışı: Bu tip akışta başlangıçta uzun ve homojen olarak karışmış bir sütun vardır. Belirli bir süre sonra sütunun alt tabakalarında parçacıklar yavaşlayıp çamurumsu bir tabaka oluşturmaya başlar. Üst tabakalarda temiz bir arayüz görülürken, sütunun orta kısımlarında sürekli sedimentasyon döngüsünde olan bir tabaka oluşmaktadır.

3.1.3. Gaz-sıvı veya sıvı-sıvı akışları

Bu tipteki akışlar bulundukları ortamla etkileşimleri göz önüne alınıp 3 başlık altında toplanabilir. Ama bu gruplamaları yapmadan önce değinilmesi gereken birkaç tanım bulunmaktadır [2]. Ve ilgili tanımlarla ilgili görseller Şekil 3.1'de verilmiştir.

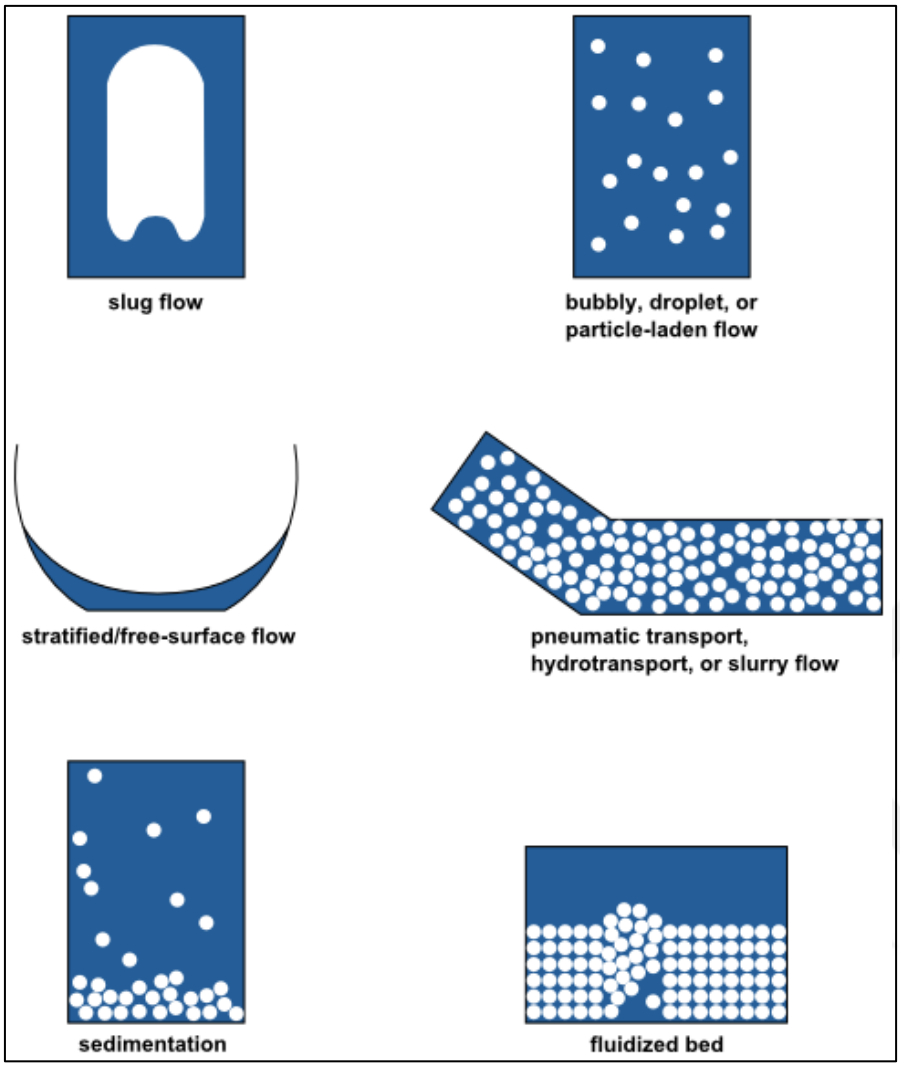
- Faz Morfolojisi: Dağınık faz bulundukları uzayda birbirinden bağımsız parçacıkların fazını ifade ederken sürekli faz bulunduğu uzayda bağlantılı olan fazı ifade eder
- Dağınık (Dispersed) Sistemler: Dağınık ve sürekli fazların akışlarının oluşturduğu sistemleri ifade eder.
- Ayrık (Separated) Sistemler: Sürekli fazların akışkanlarının oluşturduğu sistemlerdir.



Şekil 3.1. Sistem bazlı çok fazlı akışkan örnekleri [2]

Sistem bazlı bu tanımlamaların ışığında sıvı-sıvı akışları hakkında gerekli bilgilendirmeler yapılabilir. Tanımlar ve ilgili görseller Şekil 3.2'de verilmiştir.

- Dağınık (Dispersed) Akışlar: Sıvı içerisindeki baloncuk gibi bir birisinin içinde karışmaya iki veya daha fazla sıvıdan oluşan akışkanlar sistemidir. Gaz içerisinde su damlacığının hareketi ya da birbiri içerisinde karışmayan iki akışkan örnek olarak verilebilir. DPM ya da Eulerian modelleri uygundur.
- Ayrık Akışlar: Serbest yüzey akışları olarakta tanımlanır. Belirgin özellikleri bir birisi içerisinde karışmayan sıvılar arasında tanımlanmış arayüzleridir. Açık kanal akışları, metalleri kalıplama işlemleri, baraj akışları, jet ayrılması ve yakıt tankı saçılma etkisinin incelenmesi bu akışlara girer. VOF veya Multi-fluid VOF ile modellenmelidir.
- Karışık ya da değişken akışlar: Yapılarında hem dağınık hem de ayrık akışları bulundururlar. Uygun model incelenmek istenen fiziksel olaya göre belirlenmelidir.



Şekil 3.2. Çok fazlı sistemlere örnekler [2]

3.1.4. Üç fazlı akışlar

Önceki akış rejimlerinde belirtilen akışların üç fazlı kombinasyonlarıdır. Sanayide kullanım alanları çok geniş olmayıp, farklı yaklaşım ve modeller ile simüle edilebilir ve tez çalışması kapsamında değildir.

3.2. Çok Fazlı Model Yaklaşımları

Şu anda kullanımda olan iki adet çok akışlı model yaklaşımı vardır. Bunlar Euler-Lagrange ve Euler-Euler yaklaşımlarıdır. Bu yaklaşımlarım modelleme temelinde ele aldıkları kontrol hacmi değişimleri yatmaktadır [2].

3.2.1. Eulerian-lagrange yaklaşımı

Model olarak DPM (Discrete Phases Model) bu yaklaşımı kullanmaktadır. Ortam olarak modellenen akışkan sürekli varsayımı yapılarak Navier-Stokes eşitlikleri ile çözümlenirken dağınık faz partiküller, baloncuklar veya damlacıklar takip edilerek hesaplanmıştır. Bu modelle parçacıkların kendi aralarında ve kendisini çevreleyen akışkanla ağırlık, momentum ve enerji transferi yapması mümkündür. Bu yaklaşımda sürekli faz için Navier-Stokes eşitlikleri çözümlenirken, bu sürekli faz içerisinde bulunan parçacıkların ise yörüngesi izlenir. Bu parçacıkların kendi aralarında ve sürekli fazla etkileşimi mümkündür. Bu model parçacıkların kendi aralarındaki etkileşimleri ihmal edilerek önemli ölçüde basitleştirilebilir. Her bir parçacığın ya da damlacığın yörüngesi ayrı ayrı hesaplanır. Kömür ve sıvı yakıt yanmasını modellemek ve atomizasyonu gözlemlemek için uygum bir yaklaşımdır [2].

3.2.2. Eulerian-eulerian yaklaşımı

Bu yaklaşımda ise farklı fazlar, matematiksel olarak birbiri içerisine karışabilen süreçler olarak tanımlanmıştır. Ve bir fazın kapladığı hacim başka bir faz tarafından aynı anda işgal edilemeyeceği için hacim oranı (volume fraction) kavramı ortaya çıkmıştır [2]. Hacim oranı ilgilendiğimiz fazın hacminin ilgilendiğimiz hücrenin toplam hacminde kapladığı oranı ifade eder [2].

$$\alpha_p = \frac{V_p}{V} \tag{3.1}$$

Bu ifade öteki faz içinde geçerlidir [2].

$$\alpha_q = \frac{V_q}{V} \tag{3.2}$$

Ve tabii ki fazların hacim oranlarının toplamı bir’e eşittir [2].

$$\sum_i \alpha_i = 1 \tag{3.3}$$

Korunum eşitlikleri her faz için çözümlenmektedir.

Problemin çözümü için bu yaklaşım kullanılacak olup bu yaklaşımın temel parametrelerinden biri olan hacim oranı da anlatıldıktan sonra hangi modellerin bu yaklaşım ile çözüm verdiğinden bahsedip VOF modelini kullanma sebeplerimiz anlatılacaktır. Ansys FLUENT'te 3 adet Eulerian- Eulerian çok fazlı akış modeli mevcuttur.

VOF modeli

VOF modeli ile birbirine karışmaya iki veya daha fazla sıvıyı, tek bir set momentum eşitliği üzerinden çözerek ve çözüm alanı içerisindeki her bir sıvının hacim oranlarını takip ederek modeller. Bu modelde akışkanlar arasındaki arayüzün konumu ve yönelimi önemlidir. Her bir fazın, her hücredeki hacim oranı bütün hesaplama hacmi boyunca takip edilir. Jet ayrılması, doldurma (filling), saçılma (sloshing), sıvı içerisindeki baloncuklar ve baraj akışı VOF modelinin uygulama alanlarından sadece birkaçıdır [2]. VOF modelinin limitleri,

- Sadece basınç temelli çözücülerde çalışır. Yoğunluk temelli çözüm alamayız.
- Bütün kontrol hacmi hücreleri en az bir faza ait olmak zorundadır. VOF madde atanmamış hücrelere izin vermez.
- Sadece bir faz sıkıştırılabilir ideal gaz olarak tanımlanabilir.
- VOF explicit (açık) şeması, ikinci mertebeden implicit (kapalı) zaman formulasyonuna izin vermez.
- Coupled VOF Level Set modeli polyhedral hücreler ile kullanılamaz.

Karışım modeli

Akışkan ya da parçacık fark etmeksizin iki veya daha fazla fazın karışımın çözümlendiği bir modeldir karışım modeli. Eulerian modeli olmasından ötürü fazlar, birbirileri içerisine karışabilen süreçler olarak tanımlanmıştır. Karışım modelinde, momentum eşitlikleri karışımın kendisi için çözümlenir ve dağınık fazı tanımlamak için bağıl bir hız tanımlar. Partikül yüklü akışlar, kabarcıklı akışlar, çökme ve siklon ayırıcılar temel bazı kullanım alanlarıdır. Bunlara ek olarak homojen sıvılarda, karışım modeli dağınık faz için bağıl bir hız tanımlatmadan da kullanılabilir [2]. Karışım modelinin limitasyonları,

- Sadece basınç temelli çözücülerde çalışır. Yoğunluk temelli çözüm alamayız.
- Sadece bir faz sıkıştırılabilir ideal gaz olarak tanımlanabilir. Viskoz akışlara izin verir.

Eulerian model

Eulerian modeli Fluent bünyesindeki modeller içerisinden en karmaşık olanıdır ve birbirleriyle etkileşim içerisinde olan birden fazla fazın modellenmesine olanak sağlar. Eulerian-Lagrangian temelli olan DPM'in aksine maddenin birden fazla maddenin birden fazla fiziksel halini Eulerian yaklaşımı ile modeller. Eulerian modeli sistemde bulunan her faz için momentum ve süreklilik eşitliklerini çözer. Eulerian modeli coupling'i basınç ve ara yüz değişim katsayıları aracılığı ile gerçekleştirir. Coupling'in gerçekleştirilme biçimi ise karışımda olan fazlara bağlı olarak değişir. Granüllü (sıvı-katı) ve granülsüz (sıvı-sıvı) akışlarda bu hesaplamalar farklı ilerlemektedir. Bellek kapasitesince gerektiği kadar ikincil fazın tanımlanmasına ve modellenmesine imkân sağlar [2]. Eulerian modelinin limitasyonları,

- Faz bazında Reynolds Stres Türbülans modeli uygun değil.
- Partikül takibi aktifleştirildiğinde etkileşim sadece birinci faz ile gerçekleştirilir.
- Viskoz olmayan akışlara izin vermez eulerian modeli.
- Erime ve donma'ya izin verilmez.

Sonuç olarak yukarıda verilen yaklaşımlar ve bu yaklaşımlara ait modeller incelendiği zaman VOF modeli ile çözüm alınması sütun ayrılması için en uygun yöntem olacaktır.

3.3. VOF Modeli ve Çözüm Parametreleri

3.3.1. Çözücü seçimi

Sadece basınç temelli çözücüler kullanılabilir VOF modeli ile. Her ne kadar zamana bağlı çözümler aldırsa da kararlı hal (sadece çözümümüz başlangıç koşullarından bağımsız ve belirgin akış içi sınırların olduğu problemlerde kullanmak mantıklı olabilir.) çözümleri almakta mümkündür.

3.3.2. Formülasyon

- Açık Şema
  - Temiz ve keskin bir arayüz oluşturulmasına imkân sağlayan Geo-Reconstruct ayrıklaştırma şemasının kullanımına olanak sağlar.

- Zamana bağlı hesaplamalar için kullanılır.
- Zaman adım aralığı stabilite kriterlerinden ötürü Courant Sayısı ile limitlendirilmiştir.

$$CFL = \frac{\Delta t_{sub}}{x/v} \tag{3.4}$$

- Courant sayısının varsayılan değeri 0,25'tir ama 1-2 arası da artmadığı sürece kabul edilebilir.
- Kapalı şemaya göre daha kaliteli bir çözüm sunar.
- Yüksek kalitedeki yüzey modellemesinden en iyi biçimde faydalanabilmek için yüzey geriliminin önemli olduğu problemlerde kullanılmalıdır.

- Kapalı Şema
  - Courant sayısı limitasyonu yoktur ve bu sebeple minimum hücre uzunluğuna oranla daha büyük zaman adım aralığında çalışabilir.
  - Zaman bağlı ve kararlı hal analizlerinde kullanılabilir.
  - Yüzey gerilmesi çözümlemesinin önemli olduğu akışlara uygun değildir.

3.3.3. Kapalı (implicit) gövde kuvveti

Yüksek gövde kuvvetli sistemlerde yakınsamayı kolaylaştırır. Baloncuk akışı (yüksek yoğunluk farkı olan bölgelere etkiyen yerçekimi ivmesi) ve dönen akışlar örnek olarak verilebilir.

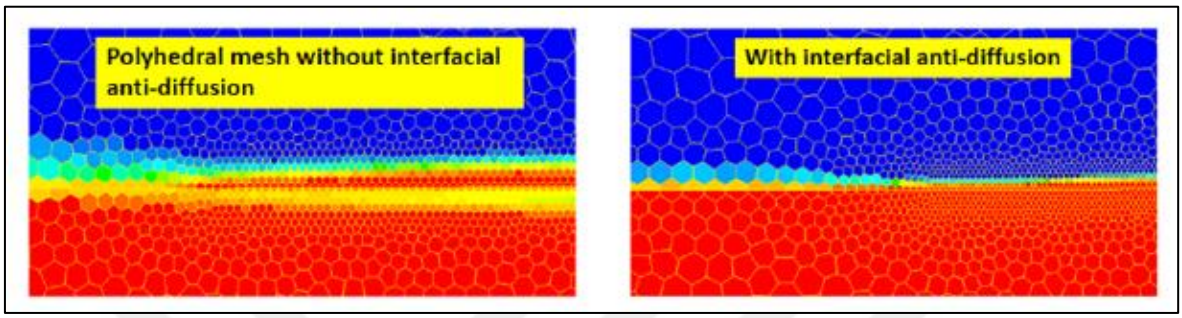
3.3.4. Arayüz modelleme türleri

VOF, Eulerian ve Multi-Fluid VOF modelleri için bir arayüz modelleme seçeneğinin seçilmesi gerekir [2].

- Keskin (Sharp): Fazlar arasında keskin bir arayüz varsa tavsiye edilir.
- Dağılmış (Dispersed): İkincil faz birincil fazın içerisinde tamamen dağılmış ise.
- Keskin/Dağılmış (Sharp/Dispersed): İkincil faz hem ayrık hem de dağılmış durumda ise.

3.3.5. Arayüzeysel anti-difüzyon

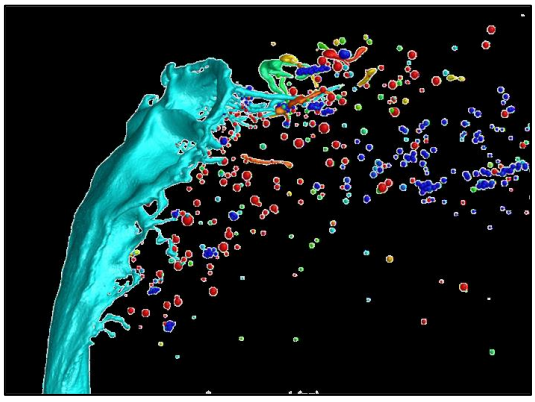
Keskin arayüzler için doğruluğu arttırmak amacıyla yüksek aspact ratio'ya sahip, seyrek, hacim zıplamaları fazla olan çözüm ağlarında, polihedral ve Cut-Cell hücre yapılarında seçilir. Arayüzsel anti-difüzyon özelliğinin görselleştirilmesi Şekil 3.3'te verilmiştir.



Şekil 3.3. Anti-difüzyonun çözüme etkisi [2]

3.4. VOF-to-DPM

Çalışma her ne kadar sütun ayrılma noktası ve üst yüzey iz düşümü üzerine yoğunlaşsa da çalışmanın tam olarak bir sprey mekanizması olması ve bütün deneysel çalışmaları doğrulamak için gelecek çalışmalarda sprey modellemesinin de yapılması planlanmaktadır. VOF-to-DPM bunun için en uygun seçenektir. Akışkan yüzeyinden kopan ve belli bir süre sonra adaptif çözüm ağının yapısından dolayı modellenmeye devam edilemeyecek parçalar (lump) belirli parametreler dahilinde damlacıklara dönüştürülmesi metodudur VOF-to-DPM ve fiziksel olay Şekil 3.4'te görselleştirilmiştir. O sebeple çalışmanın ana konusu olan sütun ayrılması ve üst yörüngenin izlenmesi, bunları etkileyen parametrelerin belirlenmesinin yanı sıra VOF-to-DPM modellemesi de değerli katkılar sunacaktır.



Şekil 3.4. VOF-to-DPM örnek çözümü [2]

3.5. VOF Modeli Eşitlikleri

VOF modelinin temel varsayımı akışkanların birbiri içerisine geçmeyeceğidir yani hesaplama hücrelerinde çoğunlukla ya 0 ya da 1 olacaktır. Ek olarak 0 < α_q <1 demek ara yüz demektir. Bu ara yüzün takibi iste hacimsel oran (volume fraction) eşitliği ile yapılmaktadır. Hacimsel oran eşitliği süreklilik eşitliklerinin [2] bir faz için çözümünden elde edilir ve herhangi bir q. faz için genel ifadesi aşağıda gösterilmiştir,

$$\frac{1}{\rho_q}\left[\frac{\partial(\alpha_q\rho_q)}{\partial t} + \nabla\left(\alpha_q\rho_q v_q\right) = S_{\alpha_q} + \sum_{p=1}^{n}\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp}\right] \quad (3.5)$$

$\dot{m}_{qp}$ ve $\dot{m}_{pq}$ ifadeleri fazlar arasındaki geçişleri ifade etmektedir. VOF eşitliği birincil faz için çözülmeyecektir.

Karışım için momentum eşitliği [2],

$$\frac{\partial(\rho\vec{u})}{\partial t} + \partial(\rho\vec{u}\vec{u}) = -\nabla p + \nabla\left(\mu(\nabla\vec{u} + \nabla\vec{u}^T)\right) + \rho\vec{g} + \vec{F} \quad (3.6)$$

Bütün sıvıların karışımı için sadece yukarıda gösterilen momentum eşitliği çözülür ve elde edilen hız değerleri fazlar arasında paylaştırılır. Momentum eşitliği tüm fazların hacimsel oranlarına ρ ve μ değerleri üzerinden bağlıdır. Bu yaklaşımın tek problemli noktası ise yüksek hız farklarının olduğu bölgelerde arayüzlerin olduğu bölgelerde farklı değerler çıkabilmektedir. Benzer bir yakınsama sorunu da viskozite oranının $1e^3$'ten büyük olduğu durumlarda oluşmaktadır. Böyle bir sorunu oluştuğu zaman CICSAM doğru sonuçların elde edilmesinde yardımcı olacaktır.

Karışım için enerji eşitliği [2] ise,

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla\left(\vec{v}(\rho E + p)\right) = \nabla\left(k_{eff}\nabla T - \sum_q\sum_j h_{j,q}\overrightarrow{J_{J,q}} + \left(\bar{\bar{\tau}}_{eff}\vec{v}\right)\right) + S_h \quad (3.7)$$

Bu eşitliklerde k_{eff} efektif iletim (k+k_t burada termal iletim katsayı, tanımlanan türbülans modeli tarafından belirlenecektir.) katsayısı iken, $\overrightarrow{J_j}$ farklı türlerin difüzyon akısıdır iken h_j

entalpi değeridir. VOF çok fazlı akışkanlar modeli enerji eşitliğine ağırlık ortalamalı değişken olarak yaklaşır.

$$E = \frac{\sum_{q=1}^{n} \alpha_q \rho_q E_q}{\sum_{q=1}^{n} \alpha_q \rho_q} \tag{3.8}$$

$$E_q = h_q - \frac{p}{\rho_q} + \frac{v^2}{2} \tag{3.9}$$

Enerji çıktıları yukarıdaki eşitlikler ile elde edilir. Dikkat edilmesi gereken nokta ise, momentum eşitlikleri için nasıl 1E3 viskozite limiti varsa burada da çok yüksek sıcaklık farklarının olduğu çözümlemelerde yakınsama problemi yaşanacaktır.

4. TÜRBÜLANS VE TÜRBÜLANS MODELLERİ

Hareket halindeki akışkanların davranış biçimleri 3'e ayrılır. Laminer akış, geçiş bölgesi akışı ve türbülanslı akış olarak adlandırılan bu akış rejimleri Reynolds sayısı adı verilen ve değeri hareket halindeki sıvının kuvvetleri ile viskoz kuvvetlerinin arasındaki orana eşit olan boyutsuz bir parametre ile belirlenir.

$$Re = \frac{\rho V L}{\mu} \tag{4.1}$$

Bu oran akışkanın rejimine karar verir ve bu rejim limitleri iç ve dış akış için aynı değildir. Bir dış akışta Reynolds sayısı yüzey üzerinde 500000'den, bir engel etrafında da yaklaşık olarak 20000'den büyükse ya da iç akış için Reynolds sayısı 2300'den büyükse bu akış türbülanslı olarak adlandırılır. Laminer akış modellenirken akışkana ait bütün düzensizlikler, girdaplar ve diğer türbülans temelli özellikler yok varsayılırken türbülanslı akışta bütün bu kaotik düzensizlikler akış üzerindeki etkilerinden ötürü modellenir. Endüstride, türbülanslı akışın doğru modellenmesi üzerine birçok model ve metot vardır. Bu modelleme faaliyetleri ise temelde, türbülansın sayısal çözümüne yaklaşımlarında farklılıklar yatan ve DNS, LES ve RANS olarak adlandırılan üzere üç farklı metot etrafında toplanmıştır. Bu metotlardan DNS akışın davranışını temsil edecek Navier-Stokes eşitliklerini doğrudan çözerken, eşitliklerin zaman (RANS'ın aksine) veya uzayda (LES'in aksine) ortalamaları ya da filtrelenmeleri işlemleri yapılmaz. Son derece maliyetlidir ve sadece akademik araştırmalarda düşük Re sayısı durumlarda kullanılır. DNS'e göre daha az maliyetli bir model olarak LES, DNS'in aksine bütün akışı çözümlemek yerine büyük ölçekli girdapları (eddy) çözümlerken, küçük ölçeklilerin etkileri de modellenir. Navier-Stokes eşitliklerinin uzayda ortalamalarının alındığı bu methot hesaplamalı güç ihtiyacı olarak DNS'e göre daha uygun olmasına rağmen endüstryel uygulamalar için pratik ve hızlı değildir. En yaygın olarak kullanılan RANS metodunda Navier-Stokes eşitliklerinin zamana bağlı ortalamaları alınır. Bu işlem zamanda dalgalanmalara uğrayan akış özelliklerinin fiziki ortalamalarını almak için yapılır lakin işlem sonucunda elde edilen Reynold's Momentum eşitliğinin doğruluğunu sağlayabilmek için yeni bir terim tanıtılmak zorunda kalınmıştır. Reynold stres tensörü olarak adlandırılan bu yeni terimin çözümlenme ihtiyacı ise farklı türbülans modellerinin ortaya çıkışını tetiklemiştir. Kapanma problemi "The Closure Problem"

olarakta adlandırılan bu problemin çözümü için farklı metodlar ve modelleme teknikleri geliştirilmiştir. Bu modeller arasında,

- Tek denklemli modeller
  - Spalart-Almaras Modeli

    Modifiye edilmiş girdap viskozitesi için RANS eşitliklerini çözen, k-ε modelinden sonra ve özellikle uçak/turbomakina sektörü için geliştirilmiş bir modeldir. Diğer modellere kıyasla ve tek denklemli olması vesilesiyle oldukça düşük maliyetlidir. Akış ayrılması ve türbülans bozulmasını düzgün modelleyemez.
- Çift denklemli modeller
  - Standard k-ε Modeli

    En yaygın kullanılan türbülans modelidir. Güvenilir ve geniş kullanım alanına sahiptir. Farklı mühendislik problemleri (yanma, kaldırma kuvveti, sıkıştırılabilirlik) için alt modellere sahiptir. Bu modelde tanıtılan epsilon katsayısı duvar kenarında hesaplanamaz ve bu sebeple duvar fonksiyonları kullanılmalıdır. Ek olarak, güçlü akış ayrılmalarının, axisimetrik jetlerin ve yüksek basınç gradyeni farklılıklarının olduğu problemlerde uygun çözümler sunamaz. Sadece tamamen türbülanslı akışlara uygundur.
  - Renormalizasyon k-ε Modeli

    k-ε modelindeki sabitlerin renormalizasyon teorisi ile çözülmesi sonucunda elde edilmiştir. Düşük reynold etkilerinin ve girdap (swirl) modellemesinde, ısı ve kütle transferi tahmininde standard k- ε modelinden daha yetkindir. Lakin yuvarlak jet (round jet) tahmini ve modellemesinde sorunlar yaşamaktadır.
  - Realizable k-ε Modeli

    Diğer k-ε modellerinin aksine türbülanslı akışa bazı kısıtlamalar koyarak fiziksel olayın matematiksel altyapısını doğrular. Kısıtlamalar disipasyon terimi üzerinde yapılmıştır. Farklı yönlenmiş akış, devir daim akış, sınır tabaka üzerinde güçlü basınç gradyeni, ayrılma ve yuvarlak jetler de dahil olmak üzere birçok akış üzerinde iyileştirilmiş bir performansa sahiptir. Diğer epsilon modellerinin birçok eksikliği bu model ile giderilmiştir.
  - k-ω Modeli

    Epsilon modellerinin aksine duvar etrafında, duvar yakınında tanımlanmamış parametre bulundurmadıkları ve duvar yaklaşım fonksiyonlarına ihtiyaç duymadan entegre edilebildikleri için tercih edilmektedirler Standard k-ω ve shear stress transport (SST) k-ω olmak üzere yaygın iki alt modeli vardır.

- Standard k-ω Modeli

  Uçak ve turbomakine sektöründe yoğun olarak kullanılmakta olan alt modeli kullanıldığı probleme göre birkaç alt modeli mevcuttur.
- Shear Stress Transport k-ω (SST k-ω) Modeli

  Bu model, duvar kenarında tanımlanmamış ve ek fonksiyona ihtiyacı olmayan k-ω modelini bir karışım fonksiyonu (blending function) yardımıyla sınır tabaka dışında tamamen türbülanslı olan bölgede rahatlıkla çözüm verebilecek k-ε modeli ile birleştirmiştir.

Daha karmaşık ve daha fazla denklemli türbülans modelleri de bulunmaktadır. Lakin çözülecek eşitlik sayısı arttıkça çözüm maliyeti de artacağından bu çalışma da diğer modellere değinilmemiştir. Daha birçok model ve yaklaşım olmasına rağmen çok fazlı akış problemlerinde genel olarak kullanılan çift denklemli modeller yukarıda özetlenmiştir ve ilgili olanların sayısal çözümlemesi ileri bölümlerde yapılacaktır. Bu modellere ek olarak daha iyi çözümlere almamızda yardımcı olacak SDES, SBES ve WMLES hibrit modellerinden bahsetmek gereklidir.

- SDES/SBES

  Hibrit RANS/LES modeli ailesindendir. Bir kalkanlama (shielding) fonksiyonu tanımlayarak LES'in etkilerinde RANS sınır tabakasını korur ve RANS'tan LES'e daha hızlı bir geçiş sağlar. Bu kalkanlama fonksiyonu, RANS üzerinde LES'e erken geçişten kaynaklı bozulmaları engeller. SBES ise kalkanlama fonksiyonunu göz önüne alarak iki model arası ayrım noktasının belirlenmesini ve RANS ile LES modellerinin genel olarak kombinasyonunu sağlar.
- WMLES

  LES modelleri ve alt modelleri sadece sınır tabakanın önemli olmadığı ya da tamamen çözümlenme ihtiyacı duyulmadığı durumlarda kullanılmalıdır. LES modelinin bir uzantısı ise WMLES'tir. Ve bu model yüksek Reynolds sayılarında grid çözünürlüğünü çok fazla arttırmadan çözümleyebilmeye imkân verir. Yani aslında bu modeli açıp, modelin çalışması için uygun parametreleri (x akış yönünde, y duvar normalinde, z ise yanal doğrultuda iken $\Delta X^+ \approx 40$, $\Delta Y^+ \approx 1$, $\Delta Z^+ \approx 20$) sağladığımız zaman WMLES kendisi sınır tabakayı modelleyecektir.

4.1. Kullanılan Türbülans Modelinin Eşitlikleri

Sonraki bölümlerde sayısal ve üst yüzey karşılaştırmaları ile birlikte verilecek olan türbülans modeli seçimi çalışması sonucunda aslen çalışmanın devamı için SST LES Blended k-ω türbülans modeli seçilmiştir. Bu modelin seçimi ve karşılaştırma maddeleri sonraki bölümlerin konusu olup bu bölümde kullanılan modelin özelliklerinden ve eşitliklerinden bahsedilecektir. Kullanılan türbülans modeli olan SST LES Blended k-ω aslen tek bir model olmayıp birden fazla modelin belirli parametreler dahilinde birleşimi ile çalışmaktadır. Bu hibrit model SBES (stress-blended eddy simulation) olarak geçebilmektedir. SBES modelinin avantajı LES ve RANS arasında geçişler yapabilmesidir. Türbülans stress tensörü,

$$\tau_{ij}^{SBES} = f_{SDES}\tau_{ij}^{RANS} + (1 - f_{SDES})\tau_{ij}^{LES} \tag{4.2}$$

Eşitlik 4.2'de verilen τ_{ij}^{RANS} terimi stres tensörünün RANS modeline ait olan tarafını gösterirken, τ_{ij}^{LES} ise stres tensörünün LES modeline ait olan tarafını gösterir. Burada f_{SDES} bir kalkanlama fonksiyonu olup DES kapsamında ve LES kaynaklı etkileri RANS duvar sınır koşulundan korumak için geliştirilmiş bir fonksiyondur. Geçiş için kullanılan RANS türbülans modeli ise SST k-ω olup eşitlikleri aşağıda verilmiştir. [2]

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j}\right) + G_k - Y_k + S_k + G_b \tag{4.3}$$

ve

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \omega u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j}\right) + G_\omega - Y_\omega + D_\omega + S_k + G_{\omega b} \tag{4.4}$$

Yukarıda verilen eşitliklerde G_k ve G_ω terimleri türbülans kinetik enerjinin ve spesifik disipasyon oranı terimlerinin üretimini ifade ederken, Γ_k ve Γ_ω terimleri ise türbülans kinetik enerji ve spesifik disipasyon oranı terimlerinin yayınırlığını (diffusivity) ifade etmektedir. Y_k ve Y_ω terimleri türbülans kinetik enerji ve spesifik disipasyon oranı terimlerinin türbülans kaynaklı disipasyonlarını ifade eder. D_ω çapraz difüzyon terimi, S_k ile S_k kullanıcı tanımlı kaynak terimleridir. Son olarak ise G_b ve $G_{\omega b}$ terimleri ise kaldırma

kuvveti kaynaklı terimlerdir. Eşitlik 4.3 ve 4.4'ü çözebilmek için efektif yayınırlık terimleri çözümlenmelidir.

$$\Gamma_k = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \tag{4.5}$$

$$\Gamma_\omega = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \tag{4.6}$$

Yayınırlık eşitlikleri yukarıda verilmiş olup k ve ω için Prandtl sayıları olan σ_k ve σ_ω aşağıda gösterilmiştir.

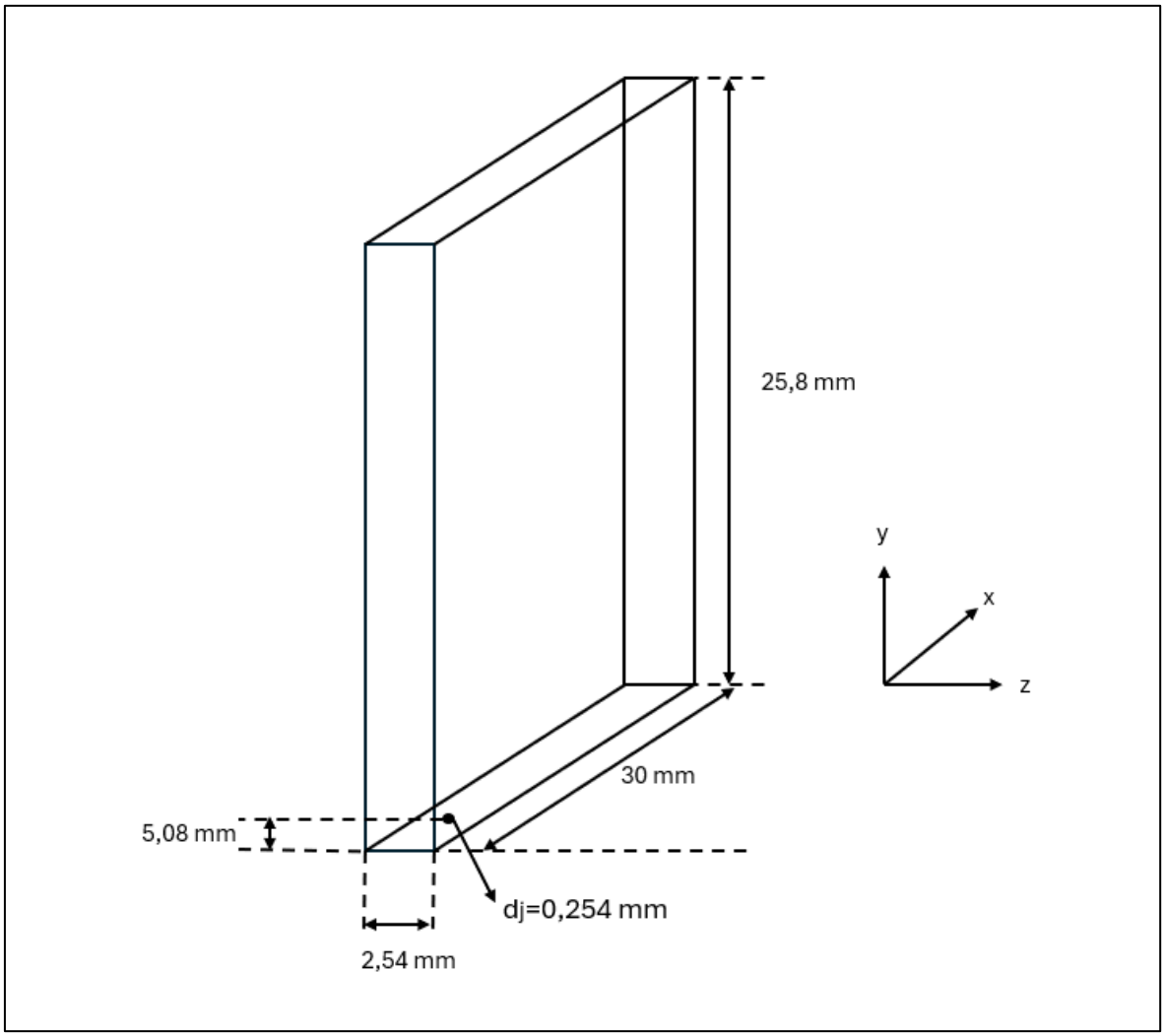
$$\sigma_k = \frac{1}{F_1/\sigma_{k,1} + (1-F_1)/\sigma_{k,2}} \tag{4.7}$$

$$\sigma_\omega = \frac{1}{F_1/\sigma_{\omega,1} + (1-F_1)/\sigma_{\omega,2}} \tag{4.8}$$

Yukarıdaki eşitlikler türbülans modelinde kullanılan temel Prandtl sayısı eşitlikleri olup içerdikleri F_1 terimi harmanlayıcı (blending) fonksiyondur.

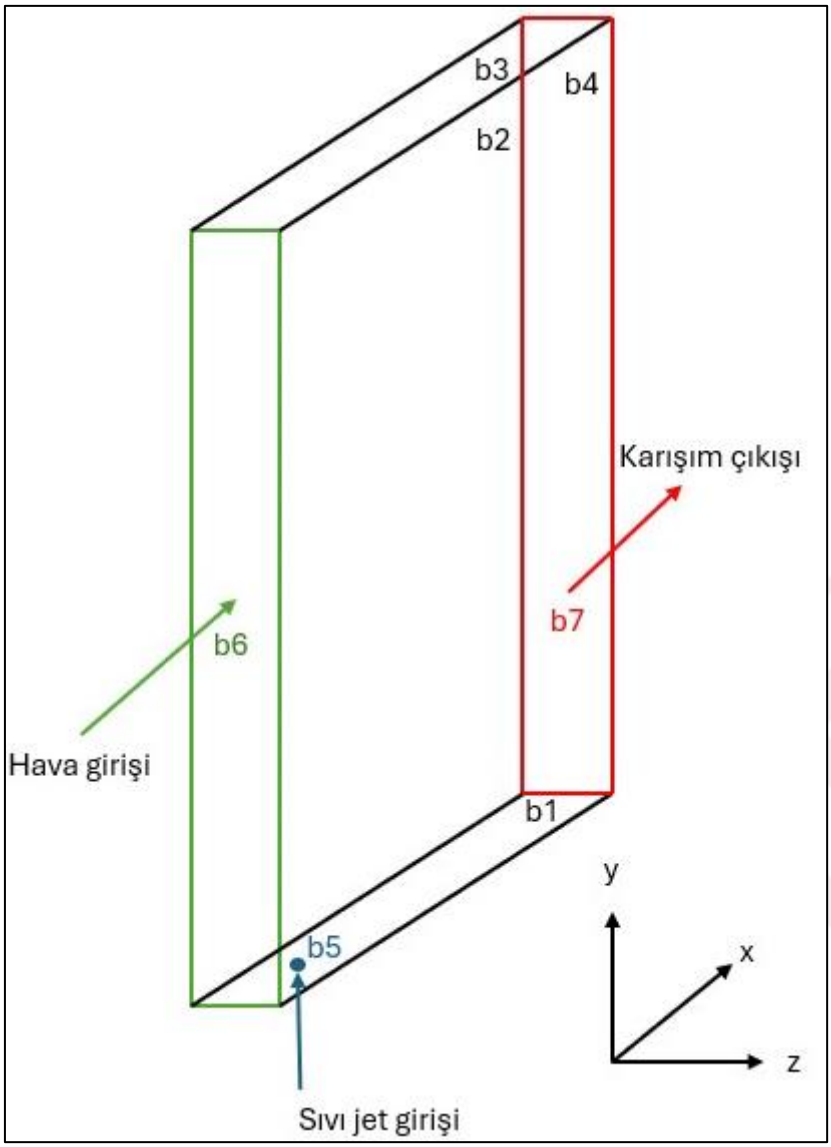
5. GEOMETRİ VE ÇÖZÜM AĞI

Referans olarak alınan deneysel çalışmanın [22] geometrisi basit bir düzenek olup jetin bırakılma ve incelemesinin yapıldığı gözlem alanı yani referans çalışmanın gözlem alanı son derece küçüktür. Bu düzeneğin seçilmesinde geometrinin bu özellikleri önemli rol oynamıştır. Düzeneğe ait gözlem odasının ve jet nozulunun konumunun geometrik boyutları Şekil 5.1'de gösterilmiştir.



Şekil 5.1. Referans çalışmaya ait geometrinin boyutları [22]

Sayısal analizde kullanılan geometrinin boyutları Şekil 5.1'de gösterilmiş olup analizde kullanılan sınır koşulları ise Şekil 5.2'de özet halinde verilmiştir.



Şekil 5.2. HAD analizi sınır koşulları

Çizelge 5.1. HAD analizi sınır koşulları

Bölge	Sınır koşulu
b1,b2,b3,b4	Kaymasızlık duvar koşulu (no-slip wall)
b5	Sıvı jet hız girişi (velocity inlet)
b6	Çapraz akış hız girişi (velocity inlet)
b7	Çıkış (outflow)

Çizelge 5.1'de sınır koşulları verilen ve referans alınan [22] deneysel çalışmaya ait geometrinin kullanıldığı tez çalışmasında hedeflenen amaç sütun bozulmasını en az maliyet ile tahmin edip üst yüzey eşitliklerini elde etmek. Bu üst yüzey eşitlikleri benzer koşullarda

çalışan motorlar ve sistemlerin ideal yakıt yanması için dağılımı hakkında ön fikir verecektir. Bu ve benzeri çalışmalar ile yakıt karışım düzeyi öngörülebilir ve ideal yanma için ihtiyaç duyulan yanma odası uzunluğu gibi parametreler belirlenebilir. Bu amaçla yapılan sayısal çalışma için referans alınan [22] deneysel çalışmanın seçim sebeplerinden biri de referans analizin küçük bir geometri içerisinde, ses altı ve nispeten dar aralıkta çalışmasıdır. Belirlenen hedefler doğrultusunda geometri oluşturulmuş ve çözüm ağı çalışmalarına başlanmıştır. Çok fazlı akışlarda çözüm ağı yapısı, kalitesi, oluşturulma parametreleri ve çözülmek istenen minimum damlacığa göre ne kadar küçük çözünürlükte olduğu çözümün kalitesini doğrudan etkileyecektir. Sadece çözümün dengesini sağlamakla kalmaz aynı zamanda sıvı sütunu üzerinde yapılacak adaptif çözüm ağı sıklaştırma çalışmalarının da ana parametrelerindendir. Özetlemek gerekirse çözüm ağının yapısının, boyutunun ve kalitesinin,

- Çözümün dengeli ilerlemesi,
- Minimum zaman adımı boyutunun seçimi,
- Çözümün iyileştirme çalışması,
- Simülasyonun toplam çalışma aralığı

Üzerinde doğrudan etkileri vardır. Adaptif olmayan sabit bir çözüm ağı yapısı için yukarıda sayılan bütün maddeleri göz önüne alınca, bütün fiziki detayları yakalayabilmek için kullanılabilecek en küçük hücre boyutlarını kullanmak mantıklı olacaktır. Lakin hücre sayısı arttıkça bir zaman adımı başına (Z.A.B.) tek bir iterasyon için gerekli gerçek zaman da katlanarak artacaktır. Deneme çalışmalarında sabit bir çözüm ağı yapısı ile kaliteli sayılabilecek çözümler almak için çözüm ağı hücre sayısının birkaç milyondan fazla olmasının gerekli olduğu görülmüştür. Fakat bu yapıdaki bir çözüm ağından sonuç alabilmek çok uzun simülasyon çözüm süreleri gerektirmektedir. Buradaki asıl problem minimum hücre boyutu ile bu boyuttaki bir hücreden çözüm almamıza olanak tanıyacak küçüklükteki zaman adım aralığının etkileşiminden kaynaklanmaktadır. Sabit çözüm ağında en küçük hücreden her zaman en yüksek hızdaki faz geçmeyeceğinden, adaptif zaman ilerlemesi metodu kullanıldığı zaman bile (en küçük kenar uzunluğu sabit olacağından) çok küçük mertebelerde zaman adımları kullanılmıştır. Bu sorunun üstesinden gelmek için adaptif çözüm ağı yapısı kullanılmıştır. Adaptif çözüm ağı kullanımının asıl faydası, toplam hücre sayını düşürerek tek bir zaman adımı içerisinde bir iterasyon için harcanacak gerçek zamanı düşürmesidir. Adaptif çözüm ağı kullanımı aracılığıyla bütün simülasyon boyunca tek bir

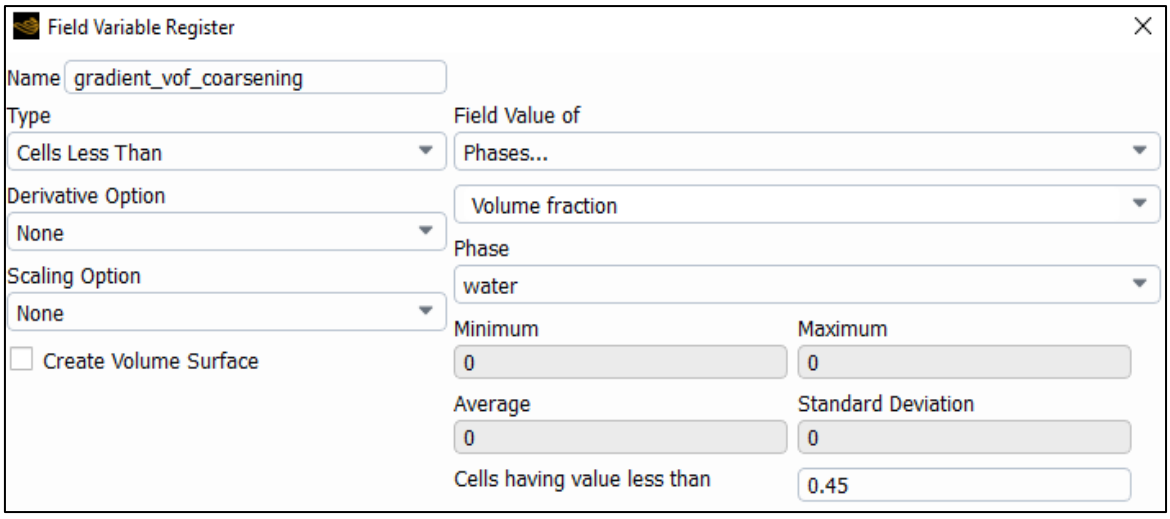
minimum zaman adımı aralığında takılmayıp, değişen minimum hücre boyutu ile bütün çözüm boyunca farklı minimum zaman aralıkları elde edilebilecektir. Çünkü adaptif çözüm ağı kullanımı ile hücre yapımızı çözüm boyunca belirlediğimiz parametreler ışığında güncelleyebileceğiz. Bu sebeple, ilgilendiğimiz alanı çözümleyecek adaptif çözüm ağı parametreleri özenle seçilmelidir. Bu düzenlemelerle birlikte çözüm ağımız ilgilendiğimiz alanlarda kendini sıklaştırma geri kalan bütün bölgelerde kendini daha iri ve işlenmemiş olacaktır. Bu sıklaştırma ve seyrekleştirme çalışmaları 4 adet 'Cell Register' ve 2 adet 'Expression' yardımı ile yapılmıştır.

5.1. Çözüm Ağı Parametreleri

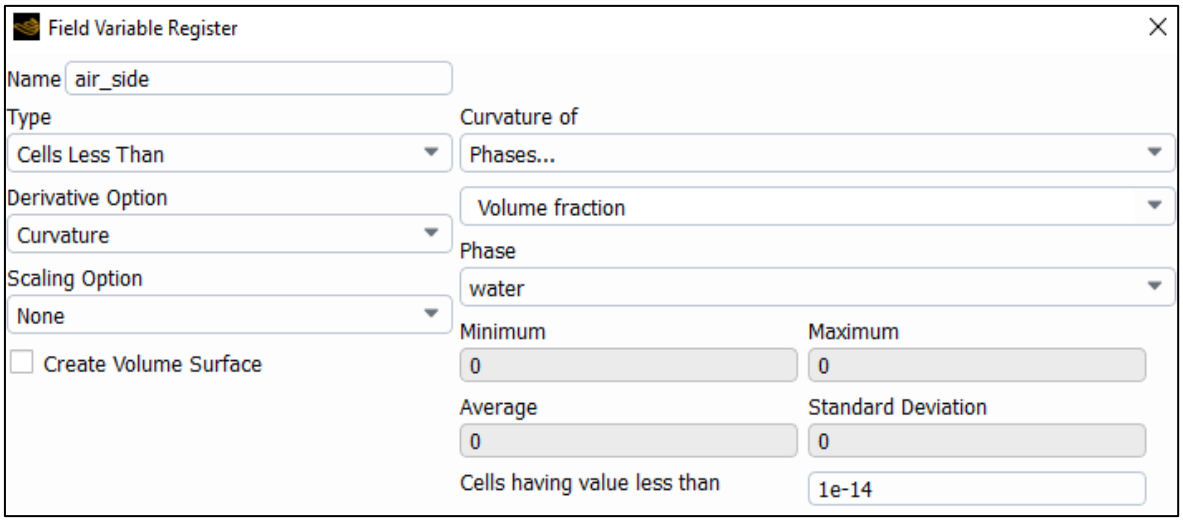
Çözüm ağı parametrelerini ihtiyacımızın olduğu sütun yüzeyinde çözümü adaptif olarak sıklaştırıp, ihtiyacımızın olmadığı damlacık veya hava akışının hakim olduğu bölgelerde seyrekleştirmek için kullanıp bu ve devam eden alt bölümlerde bu parametreler özetlenecek.

5.1.1. Seyrekleştirme parametreleri

Bu parametrelerin girdisi ile eğer bir hücre'nin VOF değeri 0,45'ten küçükse ve eğrilik değeri 1e-14'ten küçük ise bu hücrede seyrekleştirme işlemi uygulanacak ve hücre sayısı bunun sonucunda düşürülecektir. VOF ve eğrilik temelli seyrekleştirme parametreleri Şekil 5.3'te ve Şekil 5.4'te özetlenmiştir.



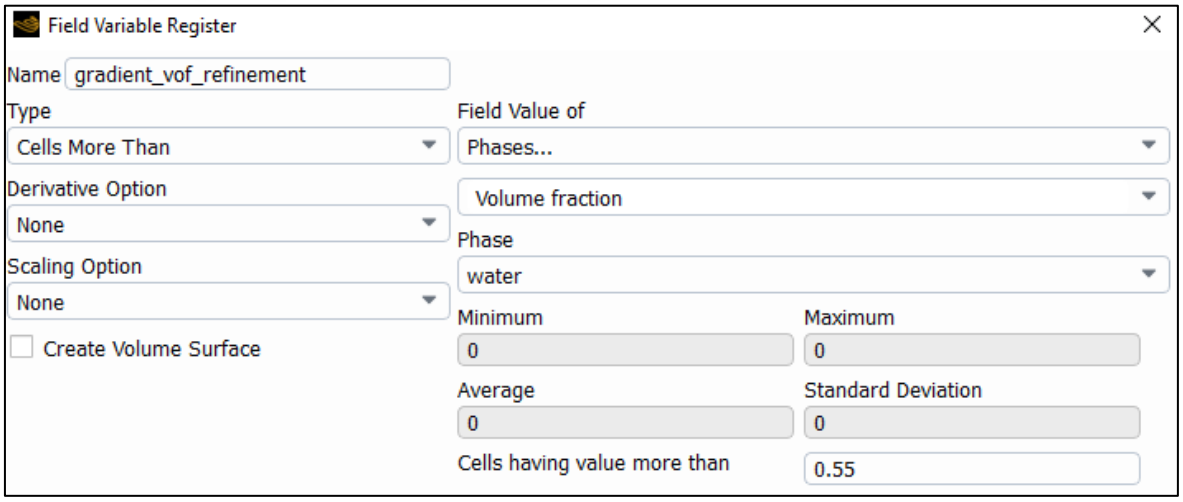
Şekil 5.3. Sıvı fazı için VOF tabanlı seyrekleştirme parametreleri



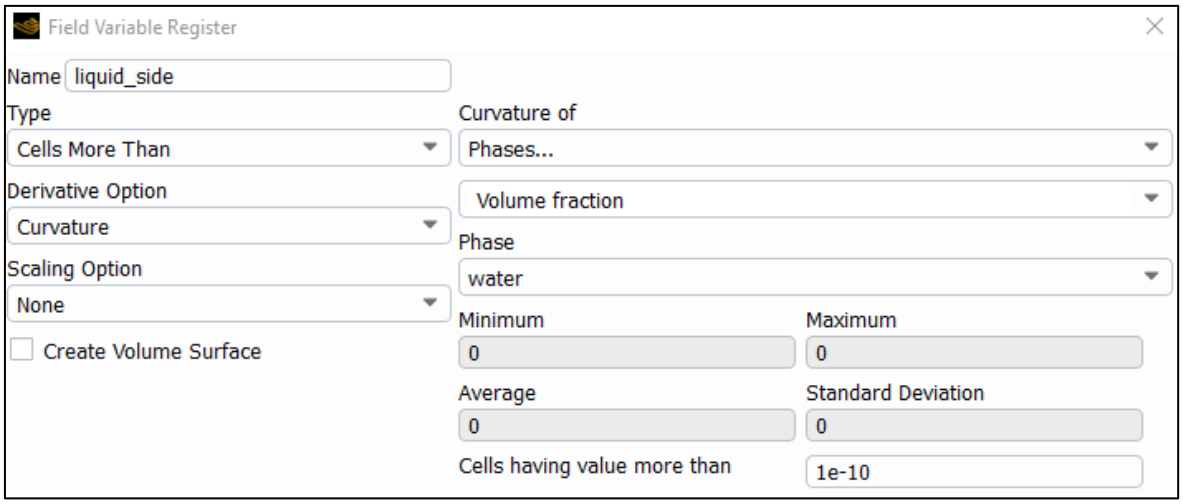
Şekil 5.4. Gaz fazı için eğrilik tabanlı seyrekleştirme parametreleri

5.1.2. Sıklaştırma parametreleri

Bu sıklaştırma parametrelerinin girdisi ile de eğer bir hücrenin VOF değeri 0,55'ten ve eğrilik değeri 1e-10'dan büyükse hücrede sıklaştırma işlemi yapılacaktır. VOF ve eğrilik temelli sıklaştırma parametreleri Şekil 5.5'te ve Şekil 5.6'da özetlenmiştir.



Şekil 5.5. Sıvı fazı için VOF tabanlı sıklaştırma parametreleri



Şekil 5.6. Sıvı fazı için eğrilik tabanlı sıklaştırma parametreleri

Çözüm ağı zaten orta sayılabilecek bir düzeyde çözünürlüğe sahip olduğu için bu kadar yoğun parametreler tanımlanmasına rağmen sadece bir seviye sıklaştırma ve seyrekleştirme izin verilmiştir. İlgili ifadeler ve ifadelerin değişkenleri Şekil 5.7 ve Şekil 5.8'de gösterilmiştir. Hücreler zaten göreceli olarak küçük olduğu için tanımlanan parametrelere bağlı olarak limit olarak konulan bir seviye sıklaştırma bize K-H ve R-T düzensizliklerine kadar iyileştirmeyi minimum sayıda hücre artışı ile verecektir. Çözüm ağımızın ilk hali Şekil 5.9'da gösterilmiştir. 336416 hücre ile başladığımız çözüm ağımız bu düzenlemelerle akışın tamamen geliştiği ve bütün fiziki olayları gözlemleyebildiğimiz evrede yaklaşık 800000 hücreyi geçmeyecektir. Benzer hücre sayısına sahip bir analiz Şekil 5.10'da gösterilmiştir.

5.1.3. İfadeler

İfadeler yardımıyla çözüm ağı, sıvının modelleneceği hücrede eğer sıvı oranı %55'ten fazla ise ve en ufakta olsa bir normal açıya sahip ise rafine etme seviyesi maksimum bir olacak şekilde kendini sıklaştıracaktır.

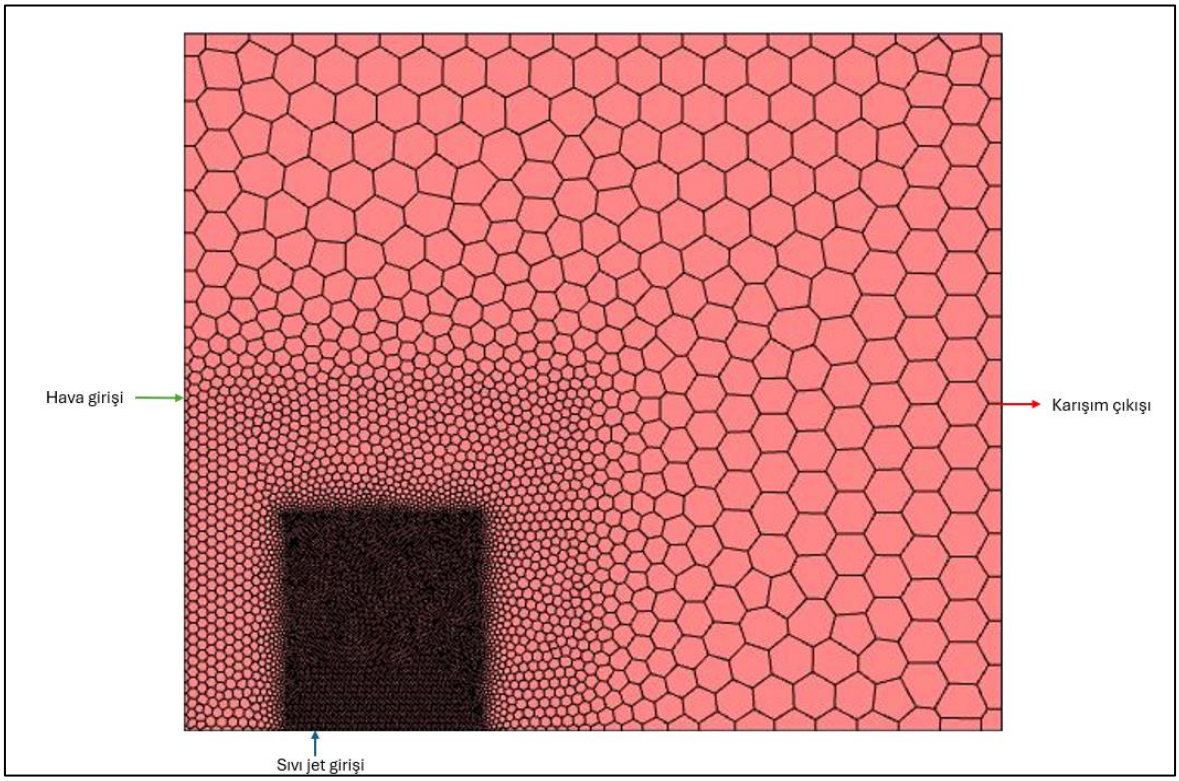
```
AND(gradient_vof_coarsening, air_side, CellRefineLevel < 1)
```

Şekil 5.7. Çözüm ağı seyrekleştirme ifadesi

```
AND(gradient_vof_refinement, liquid_side, CellRefineLevel < 1)
```

Şekil 5.8. Çözüm ağı sıklaştırma ifadesi

Bu düzenlemeler yapılmadığı takdirde hücre sayısı 3 milyon mertebelerinde olacak ve tek bir zaman adımı her bir iterasyon çok uzun zaman alacaktır. Bu düzenlemelerle hem hücre sayısı artışı kontrol altına alınacak hem de gerekli parametreler ile maliyetler minimum olacak şekilde sıklaştırma çalışması yapılmış olacaktır.



Şekil 5.9. HAD analizlerinde kullanılan çözüm ağının yapısı

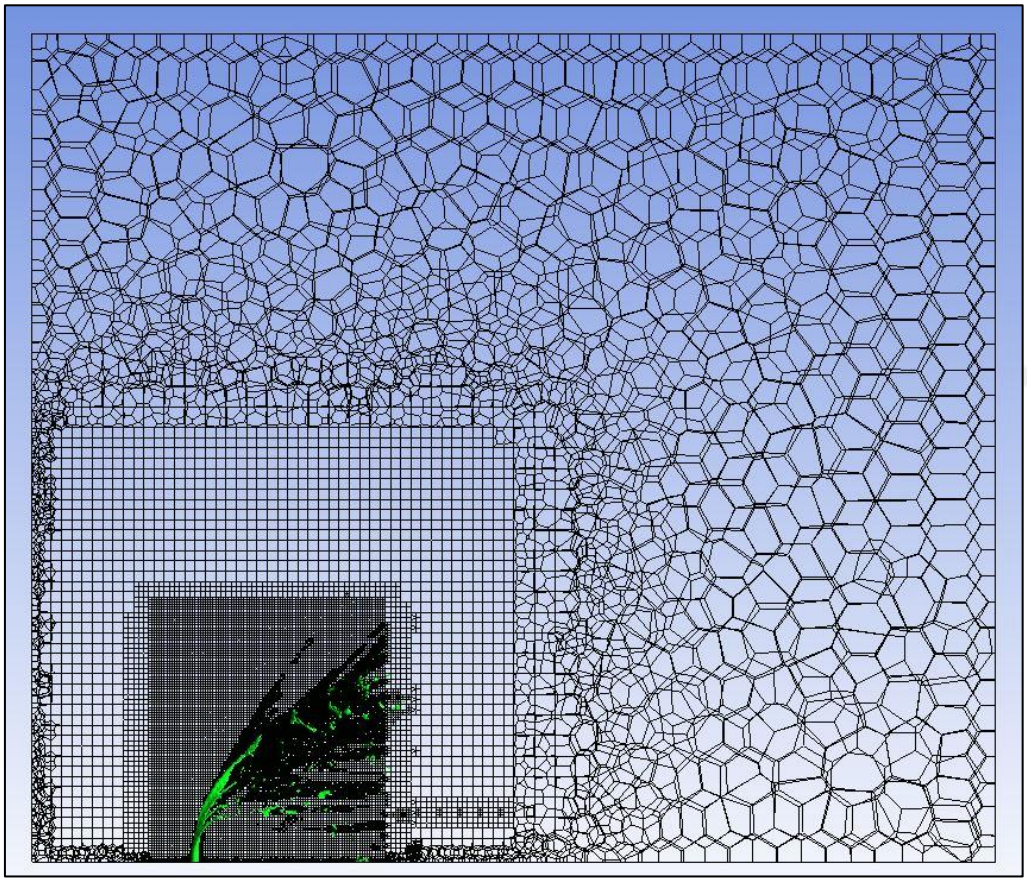
5.1.4. Çözüm ağı kalite parametreleri

Çözüm ağı toplam boyutları 0,1 mm ve 0,4 mm olmak üzere iki adet gövde boyutlandırması, 0,01 mm'lik bir adet yüz boyutlandırması ve 1,6 mm'lik çözüm ağı maksimum element boyutlandırılması ile oluşturulmuş olup tüm bu uzunlukların boyutlarına adaptif çözüm ağının hücre sayısını belirli bir seviyede tutarken jet sütununu en net biçimde modelleme kabiliyeti arasında denge analizi yapılarak karar verilmiştir. Çözüm ağına ait kalite parametreleri uygun nitelikte olup Çizelge 5.2'de özetlenmiştir.

Çizelge 5.2. Çözüm ağı kalite parametreleri

Kalite Parametresi	Değer
Ortalama skewness	0,01634
Ortalama aspect ratio	1,29510
Ortalama orthogonal quality	0,98072
Toplam hücre sayısı	336416
Toplam yüz sayısı	22286

Skewness değeri için beklenen 0,95'ten küçük olması, aspect ratio ve orthogonal quality için beklenenler ise 1'e yakın olmalarıdır. Çözüm ağı girilen parametreler eşliğinde beklenen kalite değerlerini sağlamıştır.



Şekil 5.10. Adaptif sıklaştırma sonunda çözüm ağı yapısı

Adaptif çözüm ağı kullanılmasına rağmen bütün sıklaştırma çalışmalarını adaptif çözüm ağı parametrelerine bırakmak sorunlara yol açacaktır. Sıvı sütunu üzerindeki iyi tanımlanmış çok küçük boyutlu bir hücre ile çevresinde hava tarafında bulunan çok daha seyrek bir hücre arasında basınç düzensizlikleri oluşacaktır. Bu düzensizlikler Courant sayısında ani artışlara yol açacak belirli bir seviyeden sonra da çözümü imkansızlaştıracaktır. Bu sebeple çözüm

ağı belirli bir seviyeye kadar ilgili bölgede sıklaştırılmıştır. Bu bölgenin seçimi ise deneme yanılmaya bırakılmayıp, referans alınan çalışmada sonuçları verilen analizleri ilgilenilen alanlarının belirlenmesiyle gerçekleştirilmiştir. Bu bilgiler ise referans alınan çalışmada [22] yer almıştır. Şekil 5.9.'da sıvı çevresinde sıklaştırılmış çözüm ağı yapısı ve basınç düzensizliklerini engellemek için tanımlanan ilave bölge açık ve net bir şekilde görülmektedir.

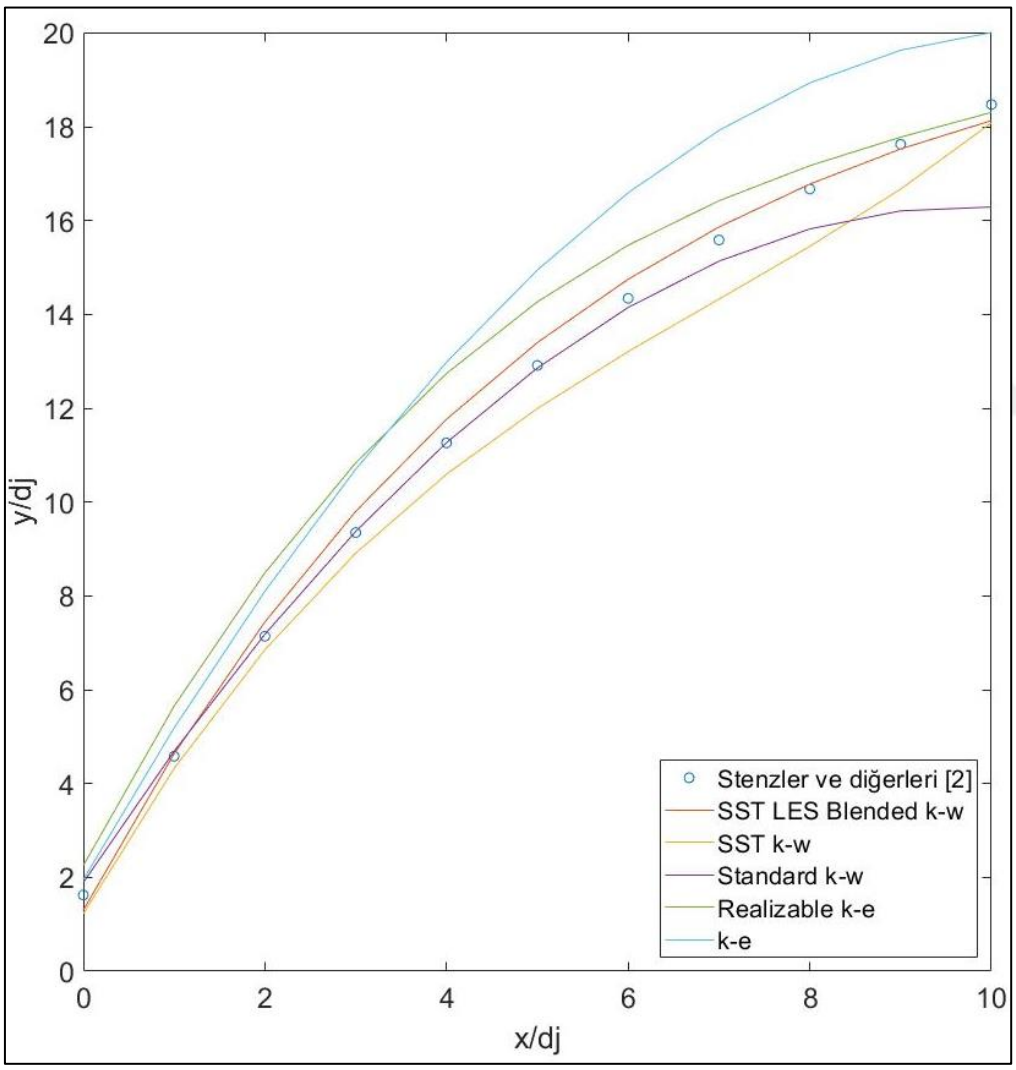
5.1.5. Bağımsızlaştırma çalışmaları

Sayısal bir analizde yapılması gereken çalışmalardan bazıları çözümün zamandan ve boyuttan bağımsızlaştığını kanıtlamaktır. Bu bağımsızlaştırma çalışmaları tamamen probleme göre değişiklik gösterebilmektedir. Kararlı hal analizlerinin aksine, zamana bağlı analizlerde özellikle jet ayrılması gibi yeri, zamanı ve boyutu kolaylıkla tahmin edilemeyen analizlerde ise bu durum farklılaşmaktadır. Maliyetin önemli olmadığı durumlarda sabit bir çözüm ağı için çözüm ağı boyutu ve analizin zaman adımı parametreleri için ayrı ayrı analizler yapılıp bağımsızlaştırma işlemleri tamamlanabilir. Lakin bu durumda özellikle jet sütunu ve tahmini kopma merkezi çevresinde son derece küçük hücreler ve bu küçük hücrelerde bulunan fazların yüksek hızlarda doğru bir modellemesini yapabilmek için aynı küçüklükte zaman adımları kullanılmak zorunda kalınacaktır. Bu ve benzeri çalışmalarla literatürde karşılaşılmaktadır. Bu yaklaşımın sorunu ise bir analizin yüksek performans hesaplama sistemleri ile bile günler alabilmesidir. Benzeri bir problem ile karşılaşmamak için çözümde kullanılan hücre sayısı minimumda tutulmak istenmiştir. Bu sebeple bir önceki bölümde kullanılan parametreler ile adaptif bir hücre yapısı belirlenmiş ve bu adaptif hücre yapısında çözüm alabilmek için FLUENT analiz programı ile limit Courant sayısı olarak belirlenen 2 değerini aşmayacak adaptif zaman adımı yöntemleri kullanılmıştır. Ön görülen amaç adaptif çözüm ağının belirlenen parametreler yönünde kendi kendisini sıklaştırması ve adaptif zaman adımı kullanımı ile de ayrılmanın zamanını, yerini ve üst yüzeyini doğru bir şekilde tahmin edebilmektir ki daha sonraki bölümlerde açıklanacağı üzere bu kullanılan parametreler gerçekten de temsil yetkinliği olan yaklaşımlar olarak öne çıkmaktadır.

5.2. En Uygun Analiz Parametrelerinin Belirlenmesi

Çok fazlı akış problemleri son derece maliyeti yüksek analizi zor problemlerdir ve uygun modelin seçilmesi için karşılaştırma çalışması tam gelişmiş akışlar için zor olacaktır. Bu

sebeple bütün modeller yaklaşık 2 saatlik bir zaman için çözdürülüp değerlendirme bu aralık üzerinden yapılmıştır. Türbülans modeli belirleme analizleri su için farklı türbülans modellerinin q=27, V_a=60m/s, We=15,38 ve V_j=10,9 m/s değerlerinde yapılmış olur modeller arasındaki farklar ise Şekil 5.11'de verilmiştir Karşılaştırma iki farklı biçimde yapılmış olup birincisinde 5 farklı türbülans modeli ile yukarıda verilen parametreler eşliğinde sayısal çözümler alınmış ve üst yüzey eşitlikleri çıkartılmıştır. Şekil 5.11 aşağıda verilmiş olup yorumlar karşılaştırmanın ikinci kısmı ile devam edecektir. Sonra bu üst yüzey eşitlikleri ile referans çalışmanın [22] aynı durumundaki sonuçlar karşılaştırılmış ve yorumlanmıştır. İlgili karşılaştırma Şekil 5.11'de gösterilmektedir.



Şekil 5.11. Farklı türbülans modellerinin karşılaştırması

Şekil 5.11 incelendiğinde belirli bir tolerans içerisinde jet akışının üst yüzeyini modelleme kabiliyeti en yüksek olan türbülans modelleri Realizable k-ε, Standard k-ω ve SST LES

Blended k-ω modelleridir. Akış zamana bağlı olduğundan ve periyodik adımın temsil kabiliyeti en yüksek akış anının seçilmesinin zorluğundan ötürü doğru kabul etme durumu belirli bir tolerans bağlanmış ve bu 3 model uygun görülmüştür. İkinci karşılaştırma çalışmasında ise bu modellerin çözümleme yetenekleri sayısal bazda incelenecek ve akış ayrılması ile damlacık oluşumu durumları görsel olarak karşılaştırılacaktır. Karşılaştırmanın ikinci kısmı için kullanılan parametreler ise, iki saatlik simülasyonda ulaşılan maksimum akış zamanı, bir zaman adımı içerindeki maksimum iterasyon sayısı, bir zaman adımı içerisinde geçirilen maksimum gerçek zaman değeri, iki saatin sonunda ulaşılan maksimum hücre sayısı, program tarafından tanımlanan ortalama fiziksel zaman ve ortalama Courant sayısı değerleridir. Simülasyonun yakınsayan her adımında değişen hücre boyutu sonucunda ortalama fiziksel zaman ve Courant sayısı değiştiği için son iki parametre karşılaştırma açısından doğrudan belirleyici olmayabilir ama kontrol etmekte fayda var. Ek olarak her türbülans modelinin farklı çalışmasından ötürü, en düşük çözüm zamanı üzerinden grafik ve değer bazlı başka bir karşılaştırma daha yapılacaktır. Bu iki karşılaştırmanın sonucunda en uygun türbülans modeli seçilecek ve referans çalışmaların doğrulanması bu istikamette ilerletilecektir.

Çizelge 5.3. İki saatlik analizler için çözüm değerleri

	Standard k-ε	Realizable k-ε	Standard k-ω	SST k-ω	SST LES Blended k-ω
Akış süresi (s)	0,001574	0,002672	0,001969	0,000953	0,001582
Z.A.B. maksimum iterasyon	6	6	8	6	7
Z.A.B. gerçek zaman (s)	6	6	8	11	9
Son çözüm ağının hücre sayısı	689439	693217	796012	644376	633775
Ortalama fiziksel zaman	2,30e-07	4,48e-07	4,63e-07	1,65e-07	3,25e-07
Ortalama global courant Sayısı	2,000	1,604	1,808	2,120	1,710

Çizelgede gösterilen verilerin ışığında k-ε modelleri içerisinden Realizable k-ε modelinin probleme maliyeti en karşılanabilir çözüm ağı hücre sayısı artışı ve en uygun aralıktaki Courant sayısı ile yaklaştığı görülmektedir. Bu model bir zaman adımı içerisinde her iterasyonda 1 sn. harcarken, çıktı olarak verdiği göreceli olarak yüksek fiziksel zaman ve düşük Courant sayısıda çok fazlı akışkan modellemelerinde arzu edilen bir durumdur. k-ε

modelleri içerisinden Realizable k-ε modeli ile daha hızlı, düşük Courant sayısından ötürü sınırları daha belli ve göreceli olarak daha yüksek fiziksel zamandan ötürü daha fazla sonuç (diğer modellerle karşılaştırıldığı zaman neredeyse iki katı verinin işlendiği durumlar mevcuttur.) alabiliriz. Çizelge ve değerler göz önüne alınınca Realizable k-ε modelinin standart modelden daha uygun bir seçim olduğu gözlemlenmektedir. k-ω modelleri arasındaki karşılaştırma, modelin yetkinliklerinin sadece eldeki veriye bakarak değerlendirilmesinin zor olmasından ötürü biraz daha karmaşıktır. Yine de Standard k-ω ve SST k-ω modellerine bakılınca, standart model her ne kadar hücre sayısını arttırsa da daha düşük Courant sayısı ve daha yüksek fiziksel zamanla daha fazla veri işlemiştir. Bu da standart modelin çok daha hızlı olduğu anlamına gelir. Standard k-ω ve SST LES Blended k-ω modelleri arasında karşılaştırma yapacak olursak, Hibrit modelin toplam hücre sayısı önemli ölçüde az olmasına rağmen, toplam akış süresi benzer mertebelerdedir. Bu iki model arasında da detaylı inceleme gereklidir. Realizable k-ε, Standard k-ω ve SST LES Blended k-ω arasındaki ayrım çok belirgin olmamakla birlikte bir akış analizinde özellikle de çok fazlı akışkanlar gibi her iki fazında türbülans eşitliklerinden etkilendiği durumlarda doğru türbülans modeli seçimi son derece önemlidir. Aynı fiziksel olayın aynı durumunu karşılaştırdığımızdan emin olmak için aynı akış süresi için bütün modelleri hem verilere dayanarak hem de görsel olarak karşılaştırmamız gerekir. Bu karşılaştırmayı sağlıklı bir şekilde yaptığımızda, aynı akış süresi için her modelin hücre sayısını ne kadar arttırdığı, bu arttırılan hücre sayısı ile yapılan iterasyonlarda ne kadar süre harcandığı, kaç iterasyonla bir zaman adımında yakınsadığı ve ortalama Courant sayısının değeri gibi önemli parametreler hakkında bilgi sahibi olunacaktır. Öyle ki Courant sayısının değeri aslında hem simülasyonun güvenilirliği hem de değerlerin doğruluğu hakkında bilgi vermektedir. Bu sayının analiz içinde izin verilen maksimum değeri 250, ideal değeri 0,5-1 arasında bu analiz için uygun görülen değeri ise 1-2 arasıdır. Bu değer gereğinden fazla hücre de atlama yapmaya engel olacakken görselleştirme açısından da ideal bir aralık olacaktır.

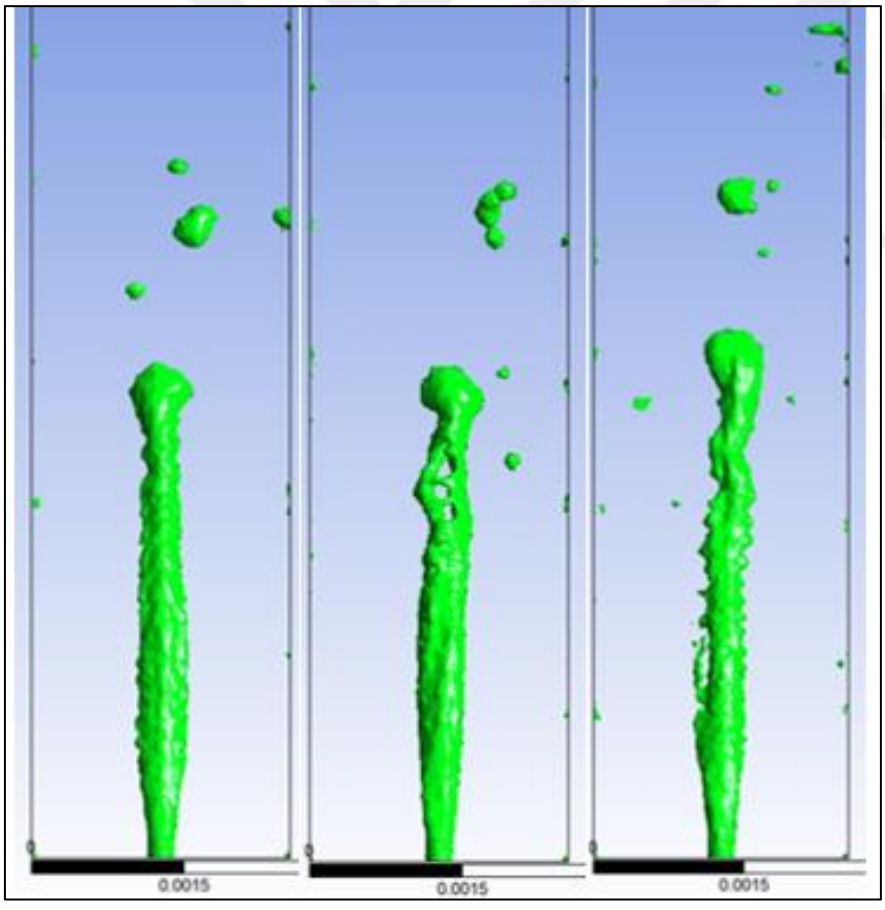
Bu sebeplerden ötürü bu ikinci karşılaştırma önceki analizlerde elde ettiğimiz en düşük akış süresi üzerinden ve aynı fiziksel durumdaki parametreler ile yapılacaktır. Bundan sonra modellerin görsel karşılaştırmasına da yer verilecektir.

Çizelge 5.4. 0,9 ms'lik analizler için çözüm değerleri

	Standard k-ε	Realizable k-ε	Standard k-ω	SST k-ω	SST LES Blended k-ω
Akış süresi (s)	0,000953	0,000953	0,000953	0.000953	0.000953
Z.A.B. maksimum iterasyon	6	7	6	6	7
Z.A.B. gerçek zaman (s)	6	7	6	11	7
Son çözüm ağının hücre sayısı	574454	567487	553420	644376	556821
Ortalama fiziksel zaman	2,47e-07	4,60e-07	3,16e-07	1,65e-07	3,22e-07
Ortalama global courant sayısı	2,006	1,598	1,902	2,120	1,731

Önceden sunulan verileri inceleyerek Standard k-ε ve SST k-ω modellerinin amacımıza uygun olmadığını belirtmiştik. Ama hem sağlıklı bir karşılaştırma hem de çifte kontrol amacıyla bu modeller de bu karşılaştırmaya dahil edilip en düşük akış süresi SST k-ω modelinden alınmıştır. Çizelge incelendiğinde görülüyor ki Standard k-ε ve SST k-ω modellerinin elenmesi işlemi gerçekten de doğru bir tercih. Bu modeller daha düşük fiziksel zamanla (öyle ki bu değerin küçüklüğü simülasyonun süresini uzatacaktır), bir zaman adımı içerisinde daha fazla zaman harcayıp yüksek Courant sayılarıyla daha fazla hücre atlamışlardır. Diğer üç türbülans modeli içinse her ne kadar görsel karşılaştırma gerekli olsa da kesin olan Standard k-ω türbülans modelinin daha üstünkörü yaklaşımı yüksek Courant sayısı değerinden kaynaklı bir sonuçtur. Durumun böyle olması adapte edilmiş bir çözüm ağında hedef Courant sayısını yakalayabilmek için daha küçük zaman adımları ile analize girmesine neden olmuştur. Bu türbülans modelinin Courant sayısı, zaman aralığı ve hücre sayısı arasındaki ilişki giderek küçük mertebelerde devam edecek ve belirli bir akış süresi sonrasında (damlacık oluşumu ile çözüm ağı sıklaştırma başladıktan sonra) bu değişimler zaman adımı içerisindeki çözüm süresini hücre sayısının fazlalığından ötürü gereksiz bir biçimde uzatacaktır. Bu da sonucunda analiz süresinin uzamasına ve yeterli veri elde edilememesine sebep olacaktır. Bir sonraki adım ise görsel karşılaştırmanın yapılmasıdır. Karşılaştırma için aynı akış sürelerine denk gelen zaman adımları baz alınmıştır. Karşılaştırma yaparken Realizable k-ε modelinin 2057. zaman adımı, Standard k-ω modelinin 2783. zaman adımı ve SST LES Blended k-ω türbülans modelinin de 2795. zaman adımları baz alınmıştır. Bu zaman adımları 0.9 ms'ye denk gelen adımlardır.

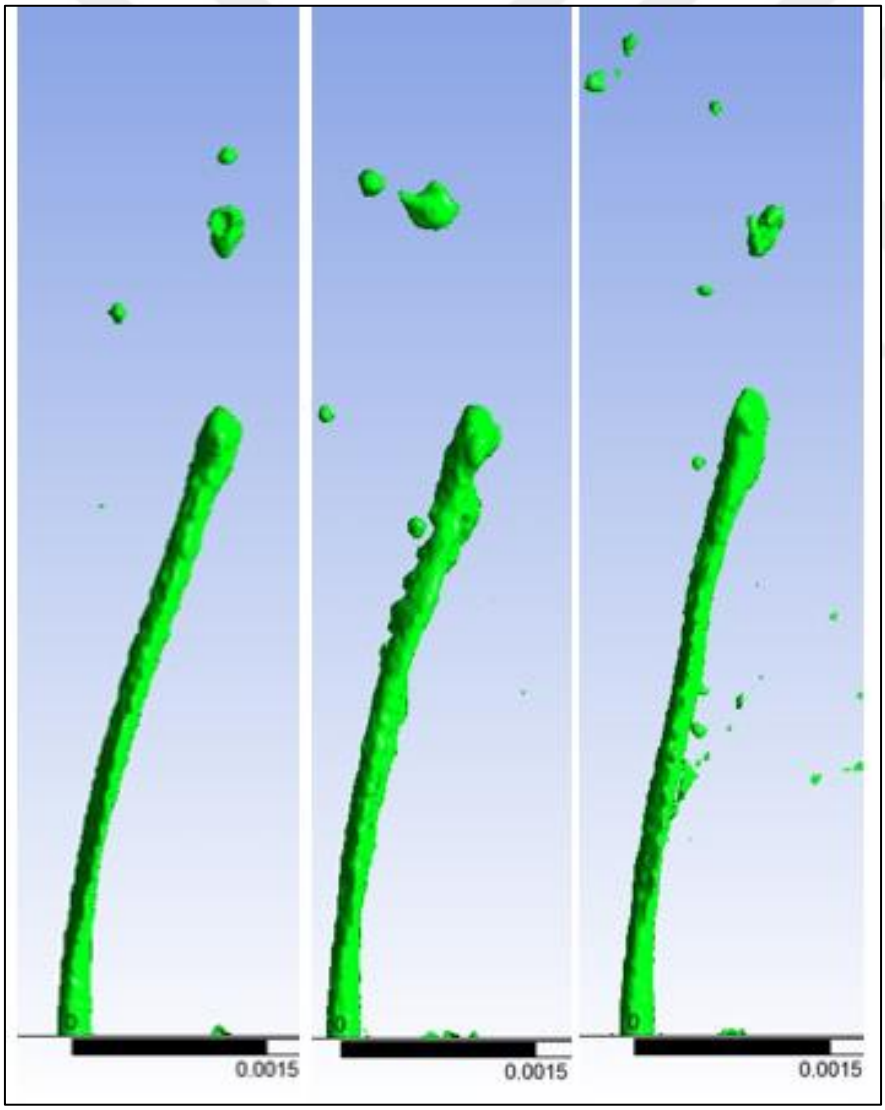
Şekil 5.12'de verilen ön görünüşlerden anlaşılacağı üzere Realizable k-ε modeli her ne kadar yüzey dalgalanmalarını ve ileride açıklanacak KH ve RT düzensizliklerini iyi bir şekilde modelleyebilse de akımın ayrılması konusunda güçlük yaşamaktadır. Jetin genel gidişatını belirlemek için uygun bir model olsa da fiziki kopmaların ve ayrılmaların yaşanacağı kısımlarda yanıltıcı sonuçlar verecektir. Damlacık modellemesi içinde uygun değildir. Az sayıda kopan parçacık modellediği için sprey özellikleri de yetersiz kalacaktır. İleride yapılabilecek VOF-to-DPM çalışmaları için yanıltıcı olacaktır. Öte yandan her iki k-ω modeli de sıvıyı daha ayrıştırılabilir bir şekilde çözmektedir ve çok daha gerçekçi sonuçlar vermektedir. Sıvı sütunu üzerindeki dalgalanmalar ve düzensizlikler de bariz bir şekilde belirli olmaktadır. Realizable k-ε modeli her ne kadar yüksek akış süresi ve düşük Courant sayısı çıktısı ile daha belirgin çözümler üretse de sıvının ayrılması konusunda yaşadığı bariz sorunlar nedeniyle seçilmemiştir.



Şekil 5.12. Realizable k-ε, Standard k-ω ve SST LES Blended k-ω ön görünüşleri

Önceden de bahsedildiği üzere Realizable k-ε modeli modeli her ne kadar sıvı sütununun genel gidişatını iyi modellese de görüleceği üzere akımın ayrılmasında bariz eksiklikleri

vardır. Bu eksiklik gelecek çalışmalar yapılacak damlacık modellemelerinin de sorunlu olmasına yol açacaktır. Çünkü damlacık modellemeleri sıvı yüzeyinden kopan yığınların (lump) belirli parametreler ile damlacığa dönüştürülmesi sonucunda elde edilir. Bu yığınların oluşumu Şekli 5.13'te yandan verilerek daha net bir şekilde gösterilmiştir. k-ω modellerinde bu sorun çözülmüş durumdadır. Bu türbülans modelleri sütun yapısını Realizable k-ε modeli modeli kadar iyi çözerken küçük elemanların ayrışması sorunu da çözülmüş durumdadır. K-ω modellerinden birinin seçimi sonucunda hem sprey oluşumu hem de kopma/ayrılma problemleri rahatlıkla çözülebilecektir. Bu modeller arasından SST LES Blended k-ω modeli hem düşük Courant sayısı hem de az sayıda hücreye sahip çözüm ağı yapısı ile çözüme en uygun modeldir.



Şekil 5.13. Realizable k-ε, Standard k-ω ve SST LES Blended k-ω yan görünüşleri

Seçilen model Şekil 5.13'te gösterilen yandan görünüşlerinde de görüleceği üzere hem sütun üzerinden kopmayı hem küçük damlacık oluşumunu hem de Şekil 5.11'de gösterildiği gibi sütun üst yüzeyini tahmin etme performansı açısından en uygun modeldir. Ve bunu da gerçekleştirirken en az sayıda hücre artışı ve ortalama miktarda Z.A.B. harcanan gerçek süre ve iterasyon ile sağlayıp nispeten daha küçük Courant sayısı ile analizleri gerçekleştirmektedir. Bu etkenler seçimde önemli rol oynamıştır.

6. REFERANS ÇALIŞMA VE HAD KARŞILAŞTIRMASI

Sayısal verilerin doğrulaması çalışması referans [22] deneysel çalışma baz alınarak ve sıvı sütunu üzerinden değerlendirmeler yapılarak ilerletilmiştir. Bu bölümde sıvı sütununun birincil kopmaya kadar incelenmesi, belirli parametreler dahilinde referanstaki sonuçlar ile karşılaştırılması çalışmaları yapılmıştır. Referans çalışma sonucunda elde edilen ve grafikleri ilgili çalışmada verilen veriler MATLAB programı üzerinden görüntü işleme teknikleri ile dışarı çıkartılmıştır. Sonra da önemli akış parametrelerini kapsayacak uygun bir eşitliği vermesi için yine aynı platform üzerinden fitting işlemine tabi tutulmuştur. Elde edilen ve grafiğinin görüntüsü işlenmiş bu değerler karşılaştırma çalışmasının referans deneysel verilerinin aktarımı kolunu oluşturur. Karşılaştırmaya katılacak HAD verilerinin seçimi ise farklı bir çalışma ile tamamlanmıştır. Analizi yapılan çalışma, periyodik kısımlarıda kapsayacak şekilde ilk başta video formatına çevrilmiştir. Sonra bu video formatı üzerinden akışın gelişimi incelenmiş ve akışın hangi zaman aralığında periyodik bir trend izlediği tespit edilmiştir. Daha sonra ise periyodik başlangıç frekanslarının tepe ve çukuru olarak karar verilen iki zaman aralığının ortasında kalan zaman aralığı HAD incelemesinin temeli olarak kabul edilmiştir. Bu zaman aralığı sütunun hareketi hakkında ortalama trendi verecektir. Sıvı jetin hareketini gözlemleyebilmek için CFD-Post programını kullanarak 0,5 değerinde eş yüzey oluşturulmuştur. Bu eş yüzey'in z=0'da kontur'u çizilip, elde edilen 2 boyutlu dış yüzeyin değerleri MATLAB ortamına aktarılmıştır. Akış güzergah çalışması ile oluşturulacak yönelimin eşitliğini bozacak damlacıklar temizlenip sütun yöneliminin eşitliği çıkartılmış ve bu iki eşitlik uygunluk durumunu belirlemek üzere karşılaştırılmıştır. Çalışmanın bu kısmı ikiye ayrılmış olup bunlar verilerin doğrulanması kısmı ve akış yöneliminin (trend) çıkartılması kısmı olmak üzere seçilmiştir. Her iki duruma ait veri setleri Çizelge 6.1'de verilmiş olup analizler bu parametreler üzerinden yapılmıştır. Bu parametrelerin değişimi sonucunda elde edilen üst yüzeyler matematiksel ifadelere dönüştürülüp referans deneysel çalışma [22] ile karşılaştırılmış ve kerosen modellemeye uygunlukları belirlenmiştir.

Çizelge 6.1. İlk grup HAD girdi seti

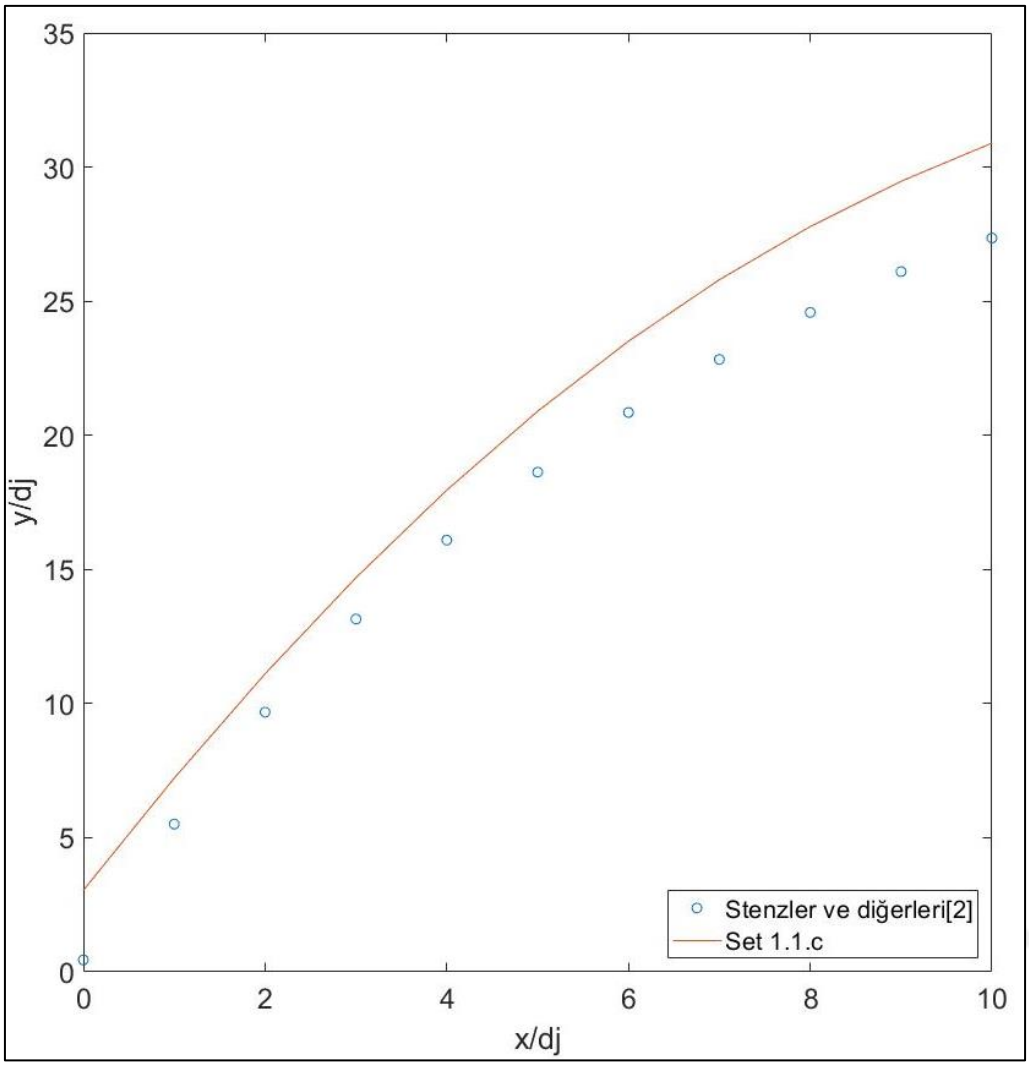
Set	ρa [kg/m3]	ρj [kg/m3]	Va [m/s]	Vj [m/s]	T [°C]	σj [N/m]	q	We	Sıvı Faz
1.1.a	1,225	998	30	4,40	18	0,0728	18,00	3,75	Su
1.1.b	1,225	998	30	5,40	18	0,0728	27,00	3,76	Su
1.1.c	1,225	998	30	6,30	18	0,0728	36,00	3,84	Su
1.2.a	1,225	998	70	10,30	18	0,0728	17,64	20,94	Su
1.2.b	1,225	998	60	10,90	18	0,0728	26,89	15,39	Su
1.2.c	1,225	998	50	10,40	18	0,0728	35,25	10,69	Su
1.3.a	1,225	790	10	2,36	18	0,0235	36,00	1,32	Aseton
1.3.b	1,225	790	30	7,09	18	0,0235	36,00	11,92	Aseton
1.3.c	1,225	790	50	11,81	18	0,0235	36,00	33,10	Aseton
1.3.d	1,225	790	70	16,54	18	0,0235	36,00	64,88	Aseton
1.3.e	1,225	790	90	21,26	18	0,0235	36,00	107,25	Aseton
1.4.a	1,225	998	50	10,51	18	0,0728	36,00	10,69	Su
1.4.b	0,62	998	50	7,48	300	0,0728	36,00	5,41	Su
1.4.c	1,225	998	70	12,74	18	0,0728	27,00	20,94	Su
1.4.d	0,74	998	70	9,90	200	0,0728	27,00	12,65	Su

6.1. Doğrulama Analizleri

Her verisetinden en fazla faklılık yaşanmasının beklendiği analizler seçilmiş ve doğrulama analizleri için koşulmuştur. Aynı setlerin diğer analizleri için ise yönelim analizleri yapılım akışkanın değişen parametrelere olan tepkisi incelenmiştir.

6.1.1. Momentum akı oranının (q) etkisi

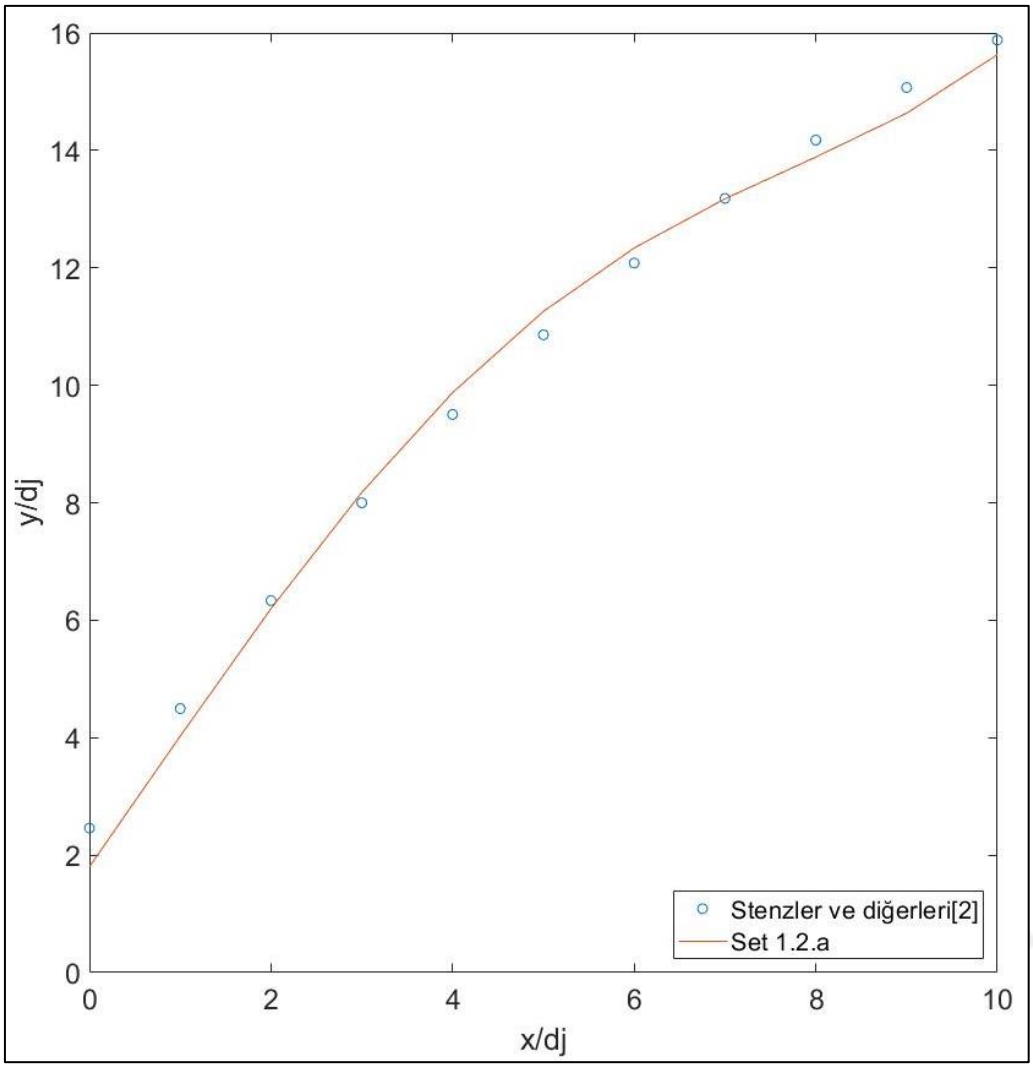
Karşılaştırma Set 1.1.c için yapılmış olup fark %8'den azdır ve Şekil 6.1'de gösterilmiştir.. Fark kabul edilebilir ölçüde olmasına rağmen altında yatan sebep ileride yapılacak doğrulama çalışmalarında da görüleceği üzere sayısal çözümün kendisinden kaynaklanmamaktadır. Asıl sebep referans çalışmada [22] verilerin incelenmesinde araştırmacıların kullandığı Mie-Scattering benzeri bir yöntemle sayısal çözümlerin zaman ortalamalarının periyodik kısmı için alınmayıp 200 zaman adımında bir alınan data dosyalarından yaklaşık ortalama değeri verilecek olan data dosyasının seçilmesidir. Çalışma geliştirilmek istenirse zaman adımı kayıt parametresi küçültülüp, periyodik bölgelerin zaman ortalamaları alınıp üst yüzeylerinin trendleri oluşturulabilir. Ek olarak referans çalışmanın grafiğinin görüntü işleme için manuel olarak çekilmesi de küçük sapmalara sebep olmuştur.



Şekil 6.1. Referans çalışma [22] ve HAD analizi karşılaştırması

6.1.2. Momentum akı oranının (q) etkisi

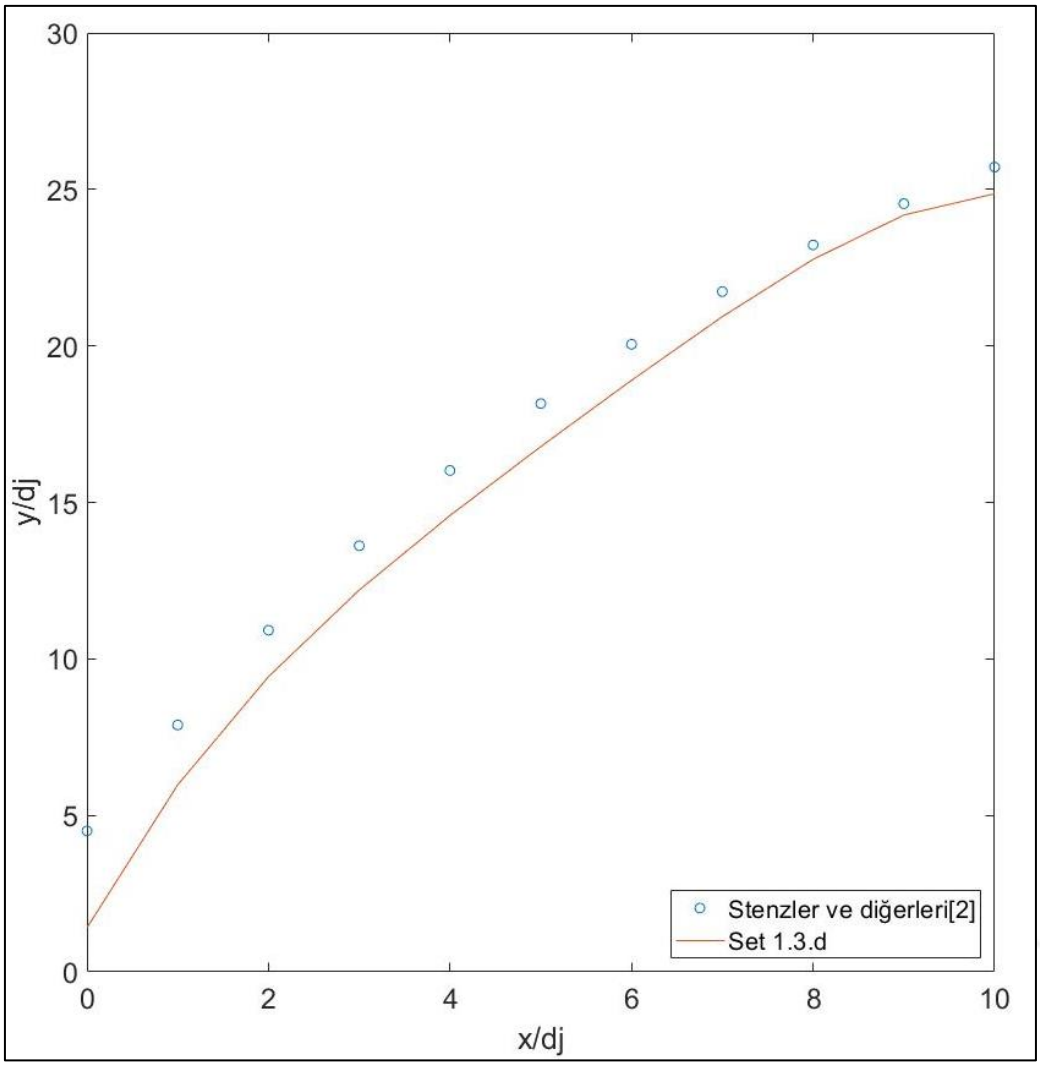
Şekil 6.2'de ise yüksek çapraz akış etkisi altında iken jet sütununun gidişatının benzer koşullardaki referans çalışmanın [22] deneysel verileri ile neredeyse birebir örtüştüğü gözlemlenmektedir. CFD sonuçlarında gözlemlenen küçük bölgesel iniş ve kalkışlar ise sütunun 2 boyutlu grafiğinin çıkartılması esnasında yaptığı bölgesel salınımlardır. Sonuçlar %2'den az bir sapma ile uyumluluk göstermektedir. Bu da kullandığımız türbülans modelinin ve girdiğimiz parametrelerin yüksek çapraz akış kaynaklı farklı momentum akı oranlarında deney ile uyumlu sonuçlar verdiğini gösteriyor.



Şekil 6.2. Referans çalışma [22] ve HAD analizi karşılaştırması

6.1.3. Weber sayısının (We) etkisinin çapraz akış hızı özelinde incelenmesi

Akışın güzergahının belirlenmesi ve etki alanının sağlıklı bir şekilde çıkartılabilmesi için bir diğer parametre ise Weber sayısıdır. Sayının formül içeriği temel bilgiler kısmında verilmiş olup fiziki olarak sayı bir akışkanın atalet parametrelerinin ara yüz stres kuvvetlerine oranı olarak ifade edilebilecek boyutsuz bir parametredir. Parametrenin artışı, incelenen sıvının atalet dağılımının yüzey kuvvetleri üzerindeki etkisinin fazla olacağına dolayısıyla dağılımın çapraz akış yönünde artacağına işaret eder. Bu boyutsuz parametrenin jet üzerindeki etkisinin incelenmesi aseton kullanarak, aynı momentum akı oranı için farklı çapraz akış koşullarında incelenerek gerçekleştirilmiş ve Şekil 6.3'te verilmiştir.



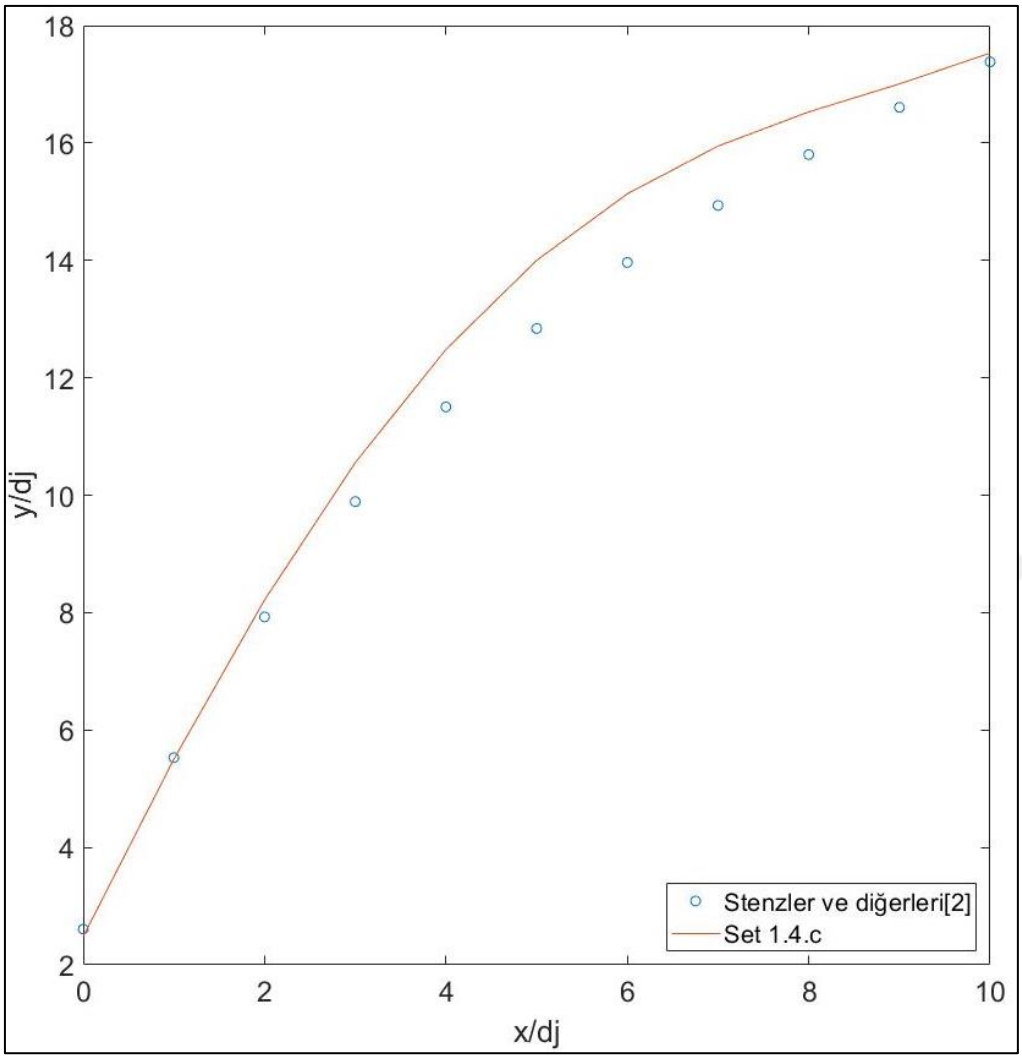
Şekil 6.3. Referans çalışma [22] ve HAD analizi karşılaştırması

Modelin doğrulaması için bu test koşulunda 70 m/s çapraz akış koşulu kullanılmış ve modelin hata oranının %3'ten az olduğu saptanmıştır. Bu değer, modelin bu parametreler için doğru ve kullanılabilir olduğunu kanıtlamak için uygundur.

6.1.4. Weber sayısının (We) etkisinin çapraz akış hızı ve sıcaklığı özelinde incelenmesi

Önceki bölümde Weber sayısını jet akışı üzerindeki etkisi çapraz akışın değiştirilerek incelenmişti. Analizler sonucunda, y ekseni üzerinde en fazla alanın düşük çapraz akış hızlarında elde edildiği öğrenilirken, x ekseni üzerindeki en fazla alanın ise yüksek çapraz akışlarda elde edildiği öğrenilmişti. Bu sonuçlar yönelimleri ve değerleri baz alınarak ile referans çalışmanın [22] deneysel sonuçlarıyla doğrulanmıştı. Weber sayısının etkisini tamamen incelemek için farklı sıcaklık değerleri ile de deneyler yapılmıştır. Enerji eşitliği,

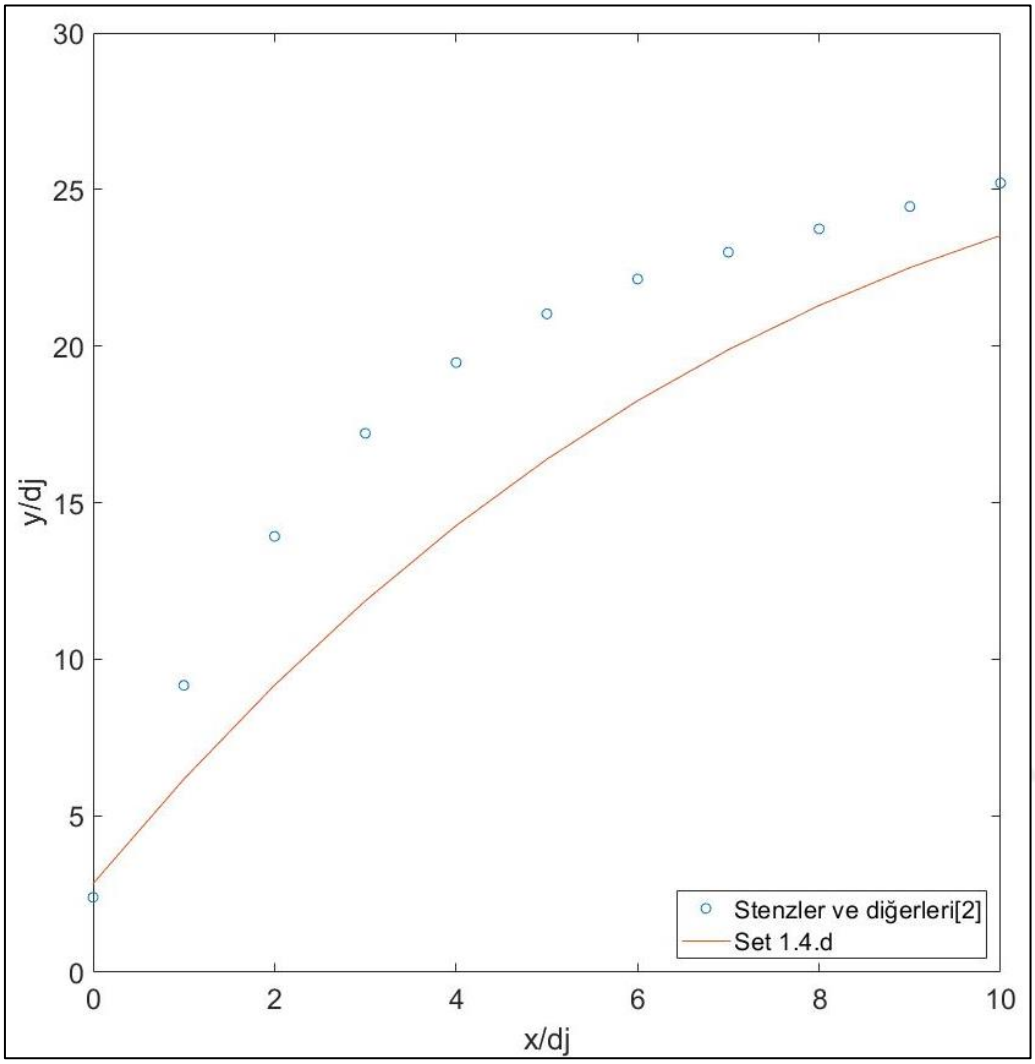
modele eklenerek yapılan analizler bu deneyler ile doğrulanması planlanmıştır. Lakin sıcaklığın etkisini gerçek anlamda görebilmek amacıyla, enerji eşitliği modele entegre edildikten sonra hem daha önceden yapıldığı gibi aynı sıcaklıklar da hem de deneyde olduğu gibi farklı sıcaklıklarda analizler yapılmıştır. Deneysel çalışma [22] her ikisi içinde doğrulama imkânı sunmuştur. Enerji eşitliğinin entegre edildiği düşük sıcaklık durumu Şekil 6.4'te gösterilmiştir.



Şekil 6.4. Düşük sıcaklık için referans çalışma [22] ve HAD analizi karşılaştırması

Aynı sıcaklıklarda yapılan karşılaştırmalı çalışmada kullanılan model ve parametrelerin, jetin gelişmiş bölgelerinde %0,88 jetin genelinde ise %2'den az ve ihmal edilebilir bir hata oranı ile yaklaştığı gözlemlenmektedir. Bu sonuçlar bize modelin sıcaklık entegrasyonunun önceki sonuçlarla karşılaştırınca hatasız olduğunu göstermektedir. Sıcaklık doğruluk değerleri içinse ayrı analiz yapılmış ve Şekil 6.5'te gösterilmiştir. Bu analizdeki amaç doğru çözümlediğini öğrendiğimiz model ile yüksek sıcaklıkta elde edeceğimiz değerleri referans

çalışmanın [22] deneysel sonuçları ile karşılaştırıp ileri aşamalarda kullanacağımız korelasyonu belirlemektir.



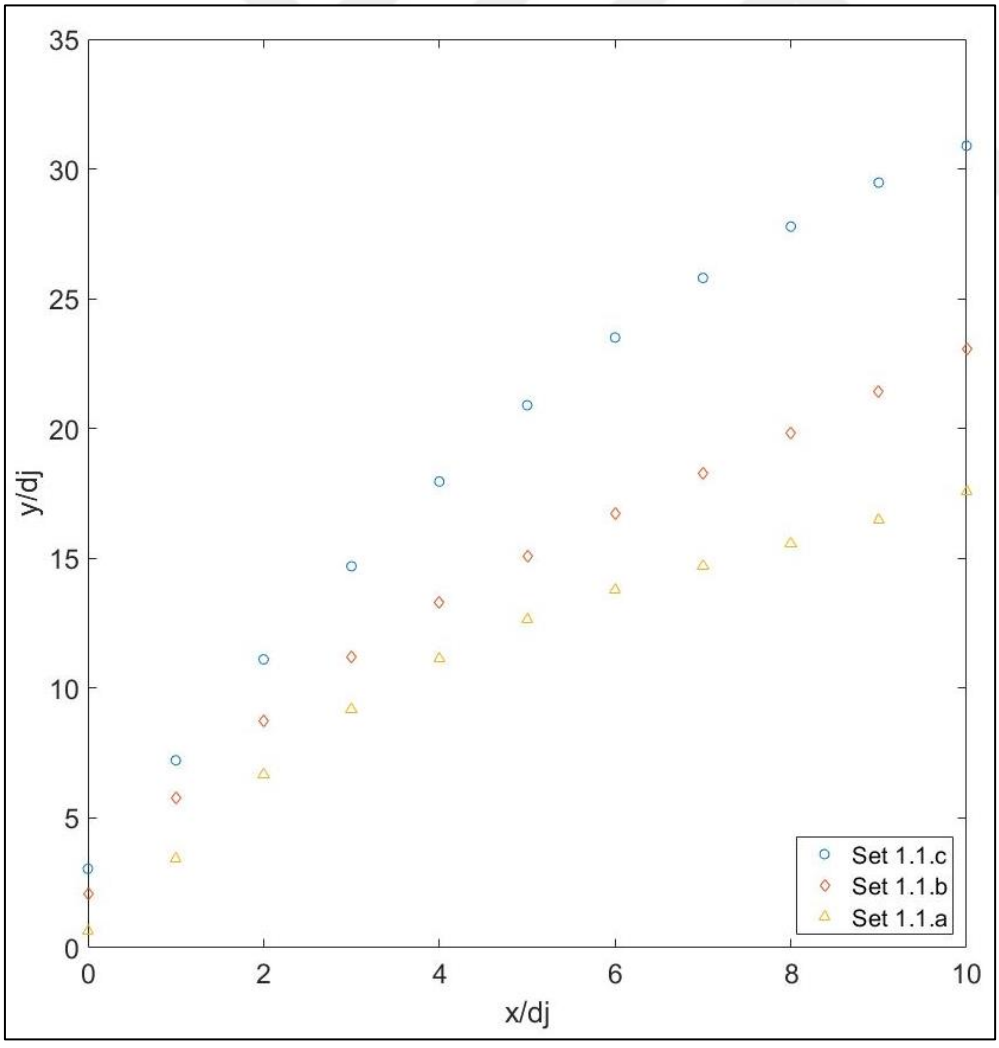
Şekil 6.5. Yüksek sıcaklık için referans çalışma [22] ve HAD analizi karşılaştırması

Daha önceki analizlerde de bahsedildiği üzere grafikler çıkartılırken z=0 ekseni üzerinde gelişmiş jetin iz düşümü alınmış sonra da bu izdüşümü noktalarının eğilim çizgileri çıkarılarak grafikler oluşturulmuştur. Bu sebeple ilk birkaç jet çaplık (genel kanı 7-8 jet çapı) mesafe dikkate alınmadığında jetin Y ekseni üzerinde yaklaşık %7'lik bir farkla deneye yaklaştığı sonucuna varılmıştır. Bu da ileri aşamalarda yapılacak sayısal çalışma sonucunda elde edilecek eşitliklere dahil edilmiştir.

6.2. Akış Yönelimlerinin Belirlenmesi İçin Yapılan Analizler

6.2.1. Momentum akı oranının (q) etkisi (jet çıkış hızını değiştirerek)

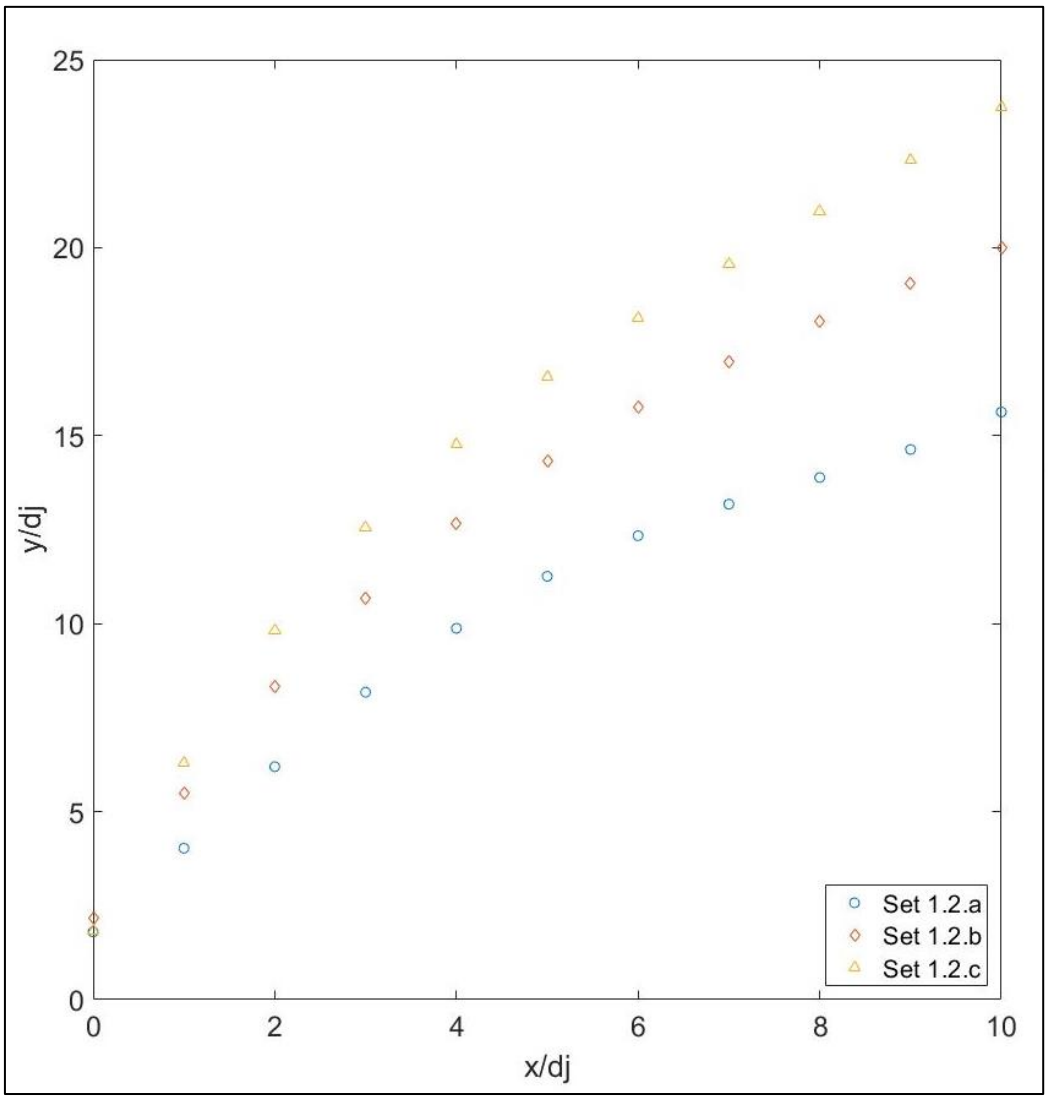
Çalışmanın ilk kısmının doğrulanması sonucunda akış yönelimini belirlemek için Şekil 6.6'da da görüldüğü üzere jet hızını arttırmak suretiyle momentum akı oranının (momentum flux ratio) arttırılmasının jet akışının nüfuz ettiği alana etkisi gözlemlenmektedir. Momentum akı oranları birbirinin neredeyse iki katı olan iki jetten "q" oranı büyük olan jet neredeyse diğer jetin y düzleminde iki katı kadar bir alanı taramıştır. Bu verilerin eldesi literatür çalışmasında da olduğu gibi üst yüzey eğrisinin eğim çizgisi ile oluşturulmuştur. Yönelimler deneysel çalışma [22] ile benzerlik göstermektedir. Bu çalışma ile türbülans modelinin ve seçilen parametrelerin, benzer sıcaklıktaki çapraz akışın modellenmesi için uygun olduğu hem doğrulama hem de yönelim sonuçları verilerek gözlemlenmiştir.



Şekil 6.6. Üst yüzeyde jet çıkış hızı etkisi

6.2.2. Momentum akı oranının (q) etkisi (çapraz akış hızını değiştirerek)

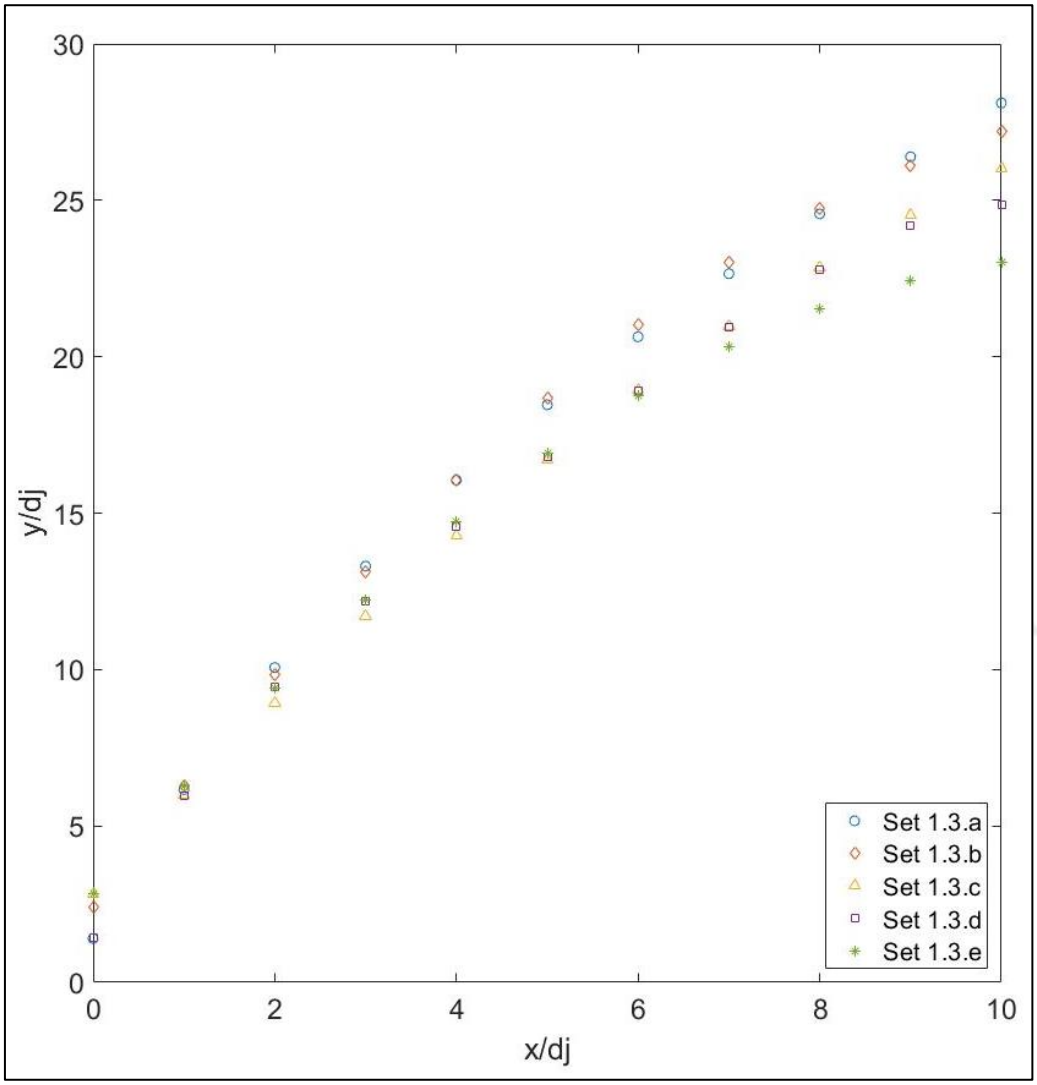
Şekil 6.7'de yapılan yönelim çalışmasından elde edilen sonuçlarda çapraz hava akış hızını düşürerek momentum akı oranını arttırdığımızda jet akışının nüfuz alanının çapraz akışa dik yönlü olarak arttığını gözlemlemekteyiz. Tam tersi durumda ise çapraz akış hızı arttırıldıkça benzer jet çıkış hızlarına sahip olmalarına rağmen azalan momentum akı oranlarına sahip jetlerin x ekseninde daha fazla etki alanına sahip olduğu gözlemlenmektedir. Bu durum yine deneysel çalışma [22] ile uyum içindedir.



Şekil 6.7. Üst yüzeyde çapraz hızı etkisi

6.2.3. Weber sayısının (We) etkisinin çapraz akış hızı özelinde incelenmesi

Doğrulaması sağlanmış deneyin birden fazla çapraz akış değerleri için karşılaştırılması yapılmış ve sabit momentum akı değerinde çapraz akış hızına bağlı olarak değişen Weber sayısının jet iz düşümü üzerindeki etkisi de incelenmiş ve Şekil 6.8'de gösterilmiştir.



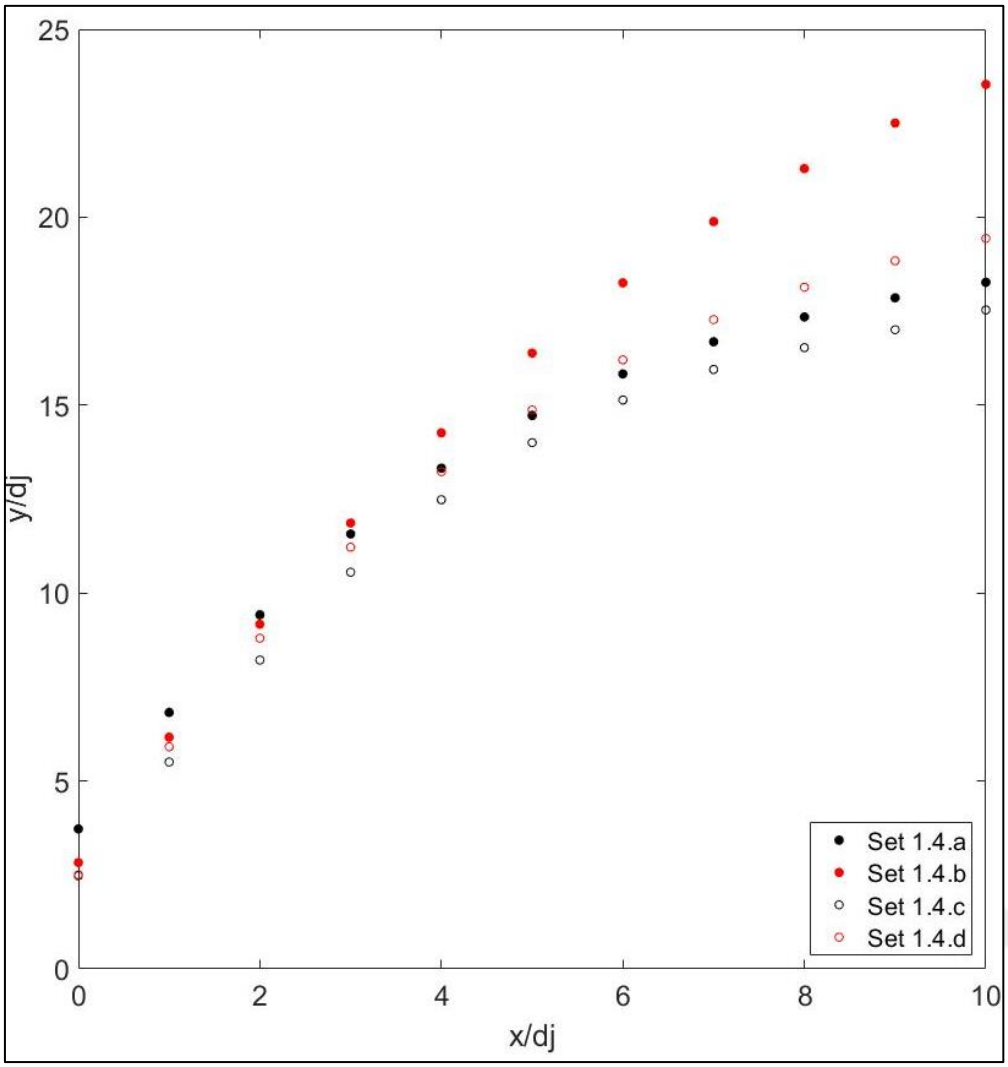
Şekil 6.8. Asetonun üst yüzeyinde Weber sayısının etkisi

Bu karşılaştırmada sabit tutulan momentum akı oranlarına karşılık arttırılan çapraz akış koşulunda analizler yapılmıştır. Şekil 6.8'de de görüldüğü üzere Weber sayılarının çapraz akış hızları üzerinden arttırılması yaklaşık 10 nozul çaplık kısa bir mesafe de bile önemli fark yaratmaktadır. Tam dağılım analizlerinde de eğilim bu şekilde olacağından sonuçlar çok daha dramatik olacaktır ki zaten referans çalışma da bu yoğun fark gözlemlenmektedir. Bu durumda arttırılan Weber sayısının sabit momentum akı oranı ve sabit sıvı özellikleri için

y ekseni üzerinde jetin dağılımını azaltırken x ekseni yani çapraz akış yönündeki dağılımı arttırdığı söylenebilir ve sonuçlar deney ile uyumludur.

6.2.4. Weber sayısının (We) etkisinin çapraz akış hızı ve sıcaklığı özelinde incelenmesi

Şekil 6.9'da ise doğrulanan enerji eşitliği kullanımı daha faydalı çıkarımlar yapabilmek için farklı çapraz akış hızlarında, farklı sıcaklıklarda ve farklı We sayılarında karşılaştırmalı sonuçlar gösterilmiştir. Şekilde farklı We değerlerine sahip çapraz akışın jet izdüşümü üzerindeki etkisi görülmektedir. Weber sayısı arttıkça artan çapraz akış hızı (bu kısım zaten önceki bölümde de doğrulanmıştı) ile jetin y ekseni üzerindeki dağılımı azalmakta iken x ekseni üzerinde aldığı mesafe artmaktadır. Çapraz akış hızından ayrı olarak sıcaklığın ve dolayısıyla değişen çapraz akış yoğunluğunun etkisinin daha iyi anlaşılabilmesi için grafik ikili olacak şekilde 4 çalışma üzerinden verilmiştir. Grafik ikili olarak incelendiğinde ise aynı momentum akı oranlarına (q) ve aynı çapraz akış hızlarına sahip akışkanların değişen sıcaklık ve onun etkisi ile değişen yoğunluğa bağlı olarak izdüşüm değişimleri net bir şekilde görülmektedir. Bu ikililerden aynı çapraz akış hızlarına ve momentum akı oranlarına sahip akışkanların arttırılan çapraz akış sıcaklıkları yani düşen gaz yoğunluğu ve Weber sayısı değerleri ile x ekseni üzerindeki izdüşümü azalacakken y ekseni üzerindeki iz düşümünün artacağı gözlemlenmektedir. Bu değişim rahat anlaşılabilmesi için grafikte içi dolu çemberler ve boş çemberler olarak verilmiştir. Çemberlerden kırmızı olanlar yüksek sıcaklık siyah olanlarda düşük sıcaklıktır.



Şekil 6.9. Üst yüzeyde sıcaklık, We ve q etkisi

Elde edilen bu grafik ve benzer koşullardaki referans çalışmanın [22] deneysel verileri benzer eğilimleri göstermekte ve uyum içindedirler. Bu son analiz seti ile de gösteriyor ki hem türbülans modeli hem çözüm ağı hem de kullanılan parametreler jet'in hareketini ilgi odağımız olan 10 çaplık mesafede benzer sıcaklıklarda gayet doğru bir şekilde tahmin edebiliyorken yüksek sıcaklık farklarında korelasyon katsayı dahil edilmesi gerekmektedir. Şimdi ise çalışmanın son aşaması olan kerosenli denemeler ile x ve y eksenleri üzerindeki jet yörüngesi eşitliklerinin çıkartılması çalışmaları yapılacaktır.

7. KEROSEN İLE YAPILAN ANALİZLER VE ELDE EDİLEN EŞİTLİKLER

Analizler kerosen içinde yapılmış ve sonuçlar çıkartılmıştır. Çalışmanın amaçlarından birisi olduğu için sonuçlar eşitlik formatında düzenlenmiştir. Buna göre kerosen ile aynı hava sıcaklığı için bir grup eşitlik elde edilir iken farklı sıcaklıklar için farklı bir grup eşitlik elde edilmiştir. Ve eşitlikler ile elde edilen sonuçlar analiz sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Isıtılmamış ve ısıtılmış hava deney setler için elde edilen eşitlikler sırasıyla,

$$(y/d)_{max} = 1{,}7536 * q^{0{,}5585} * (x/d)^{0{,}5403} * We^{-0{,}0391} * (\mu_l/\mu_{H2O})^{-1{,}1198} \quad (7.1)$$

$$(y/d)_{max} = 9{,}4296 * q^{0{,}4595} * (x/d)^{0{,}5465} * We^{-0{,}1151} * (\mu_l/\mu_{H2O})^{-3{,}4717} \quad (7.2)$$

Eşitlikler incelendiği zaman, önceki çalışmalarda elde ettiğimiz bilgilerden olan artan momentum akı oranı ile jetin y ekseni üzerindeki iz düşümünün artacağı yani eşitliklerde momentum akı oranını üssünün pozitif olacağı sonucu ve artan Weber sayısı ile jetin x ekseni üzerindeki iz düşümünün artacağı dolayısı eşitliklerde Weber sayısının üssünün negatif olacağı sonucu eğri uydurma yöntemleri kullanılmadan bile fark edilmektedir.

Çizelge 7.1. Güncel çalışmaya kadar kullanılan literatürdeki eşitlikler

Akış Güzergah Eşitlikleri	Referans Çalışma
$(y/d)_{max} = 1{,}7536 * q^{0{,}5585} * (x/d)^{0{,}5403} * We^{-0{,}0391} * (\mu_j/\mu_{H2O})^{-1{,}1198}$	Eş. 7.1
$(y/d)_{max} = 0{,}191 * q^{0{,}3} * (x/d)^{0{,}43} * {Re_{ch}}^{0{,}12} * {Re_j}^{0{,}12}$	Eslemian ve diğerleri (2014)
$(y/d)_{max} = 1{,}44 * q^{0{,}4356} * \ln[1 + 1{,}06 * (X/d)] * We^{0{,}01147} * (T/T_0)^{0{,}295}$	Li, ve diğerleri (2012)
$(y/d)_{max} = 2{,}28 * q^{0{,}422} * (x/d)^{0{,}367} * We^{-0{,}015} * (\mu_j/\mu_{hava})^{0{,}186}$	Ragucci ve diğerleri (2007)
$(y/d)_{max} = 15{,}0 * q^{0{,}5} * (x/d)^{0{,}33} * We^{-0{,}41} * (\mu_j/\mu_{H2O})^{-0{,}027}$	Masuda ve diğerleri (2006)
$(y/d)_{max} = 2{,}630 * q^{0{,}442} * (x/d)^{0{,}39} * We^{-0{,}088} * (\mu_j/\mu_{H2O})^{-0{,}027}$	Stenzler ve diğerleri (2003)
$(y/d)_{max} = 1{,}37 * \sqrt{q * (x/d)}$	Wu ve diğerleri (1997)

Çizelgeden de görüldüğü üzere günümüzde şimdiye kadar kullanılan eşitlikler belirli bir ölçüde benzerlik göstermektedir. Bağımsız değişkenler belirli bir süreden sonra benzerlik göstermekte ve eşitliklerin katsayı ve üslerinde belirlendikleri ortamın özelliklerine bağlı olarak değişimler olmaktadır. Burada Eş. 7.2 ile verilen yüksek sıcaklık eşitliği bölüm 6.1.4'teki doğrulama analizinde elde edilen fark ile genişletilmiş eşitliktir. Bu eşitliklere göre elde edilen sonuçlar verilmiştir. Sonuçlar dört ana grupta toplanacak olup bu gruplar,

- Farklı jet hızları dolayısıyla oluşan farklı momentum akı oranları için elde edilen sonuçlar, farklı çapraz akış hızları dolayısıyla oluşan farklı momentum akı oranları için elde edilen sonuçlar,
- Farklı çapraz akış hızları ve sabit momentum akı oranları için elde edilen sonuçlar
- Eşitlik 7.2 ile ifade edilecek olan farklı sıcaklıklar için elde edilen sonuçlardır.

Eşitliklerin jet üst yüzeyi ile karşılaştırılması yapılırken dikkat edilmesi gereken husus ise, eşitlikler çarpım formatında olduğu için x=0 değerinde bütün grafikler 0 değerini verecektir. Lakin bu aslen x=0'da sıvı jet sütunu bulunmadığı anlamına gelmemektedir. Bu sebeple x=0 değeri referans alınmamalıdır. HAD analizi girdi seti Çizelge 7.2'de verilmiştir.

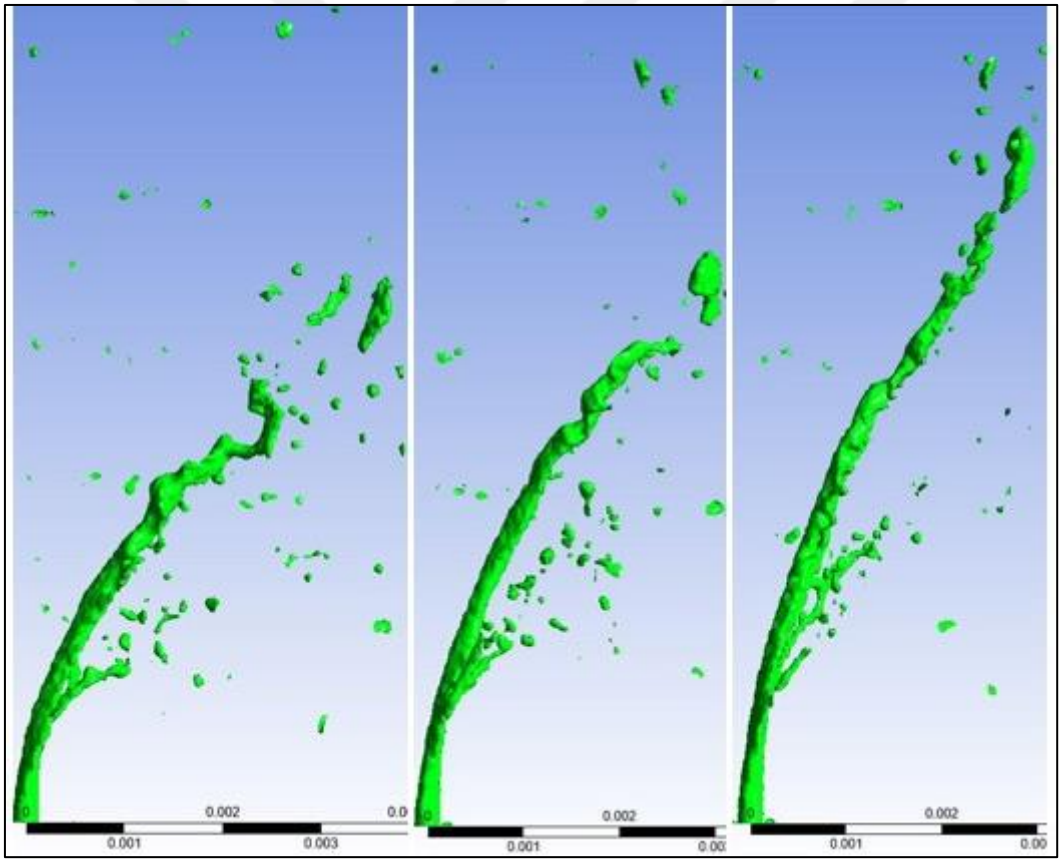
Çizelge 7.2. Kerosen analizleri HAD girdi seti

Set	ρ_a [kg/m^3]	ρ_j [kg/m^3]	V_a [m/s]	V_j [m/s]	T [°C]	σ_j [N/m]	q	We	Sıvı Faz
2.1.a	1,225	780	30	5,04	18	0,0263	18,00	10,62	Kerosen
2.1.b	1,225	780	30	6,17	18	0,0263	27,00	10,61	Kerosen
2.1.c	1,225	780	30	7,13	18	0,0263	36,00	10,63	Kerosen
2.2.a	1,225	780	70	11,76	18	0,0263	18,00	57,91	Kerosen
2.2.b	1,225	780	60	12,35	18	0,0263	27,00	42,55	Kerosen
2.2.c	1,225	780	50	11,88	18	0,0263	36,00	29,55	Kerosen
2.3.a	1,225	780	10	2,37	18	0,0263	36,00	1,18	Kerosen
2.3.b	1,225	780	30	7,13	18	0,0263	36,00	10,64	Kerosen
2.3.c	1,225	780	50	11,88	18	0,0263	36,00	29,55	Kerosen
2.3.d	1,225	780	70	16,64	18	0,0263	36,00	57,91	Kerosen
2.3.e	1,225	780	90	21,40	18	0,0263	36,00	95,73	Kerosen
2.4.a	1,225	780	50	11,78	18	0,0263	36,00	29,55	Kerosen
2.4.b	0,62	780	50	8,43	300	0,0263	36,00	14,95	Kerosen
2.4.c	1,225	780	70	14,29	18	0,0263	27,00	57,91	Kerosen
2.4.d	0,74	780	70	11,20	200	0,0263	27,00	34,98	Kerosen

İstenilen eşitlikleri elde edebilmek için akış yönelimi analizlerine benzer şekilde sabit ve değişken momentum akı ile Weber sayısı koşulları oluşturarak parametrelerin bireysel etkileri incelenecek ve uygun eşitlikler oluşturulacaktır. Bunun için ilk olarak sabit Weber

sayısı eşliğinde artan jet hızı yani dolaylı olarak momentum akı etkisi incelenmiştir. Üst yüzeyleri çıkartılan jetlerin sırasıyla 5,04; 6,17 ve 7,13 m/s jet çıkış hızları için 0,5 hacim kesri bazlı grafikleri Şekil 7.1'de verilmiştir.

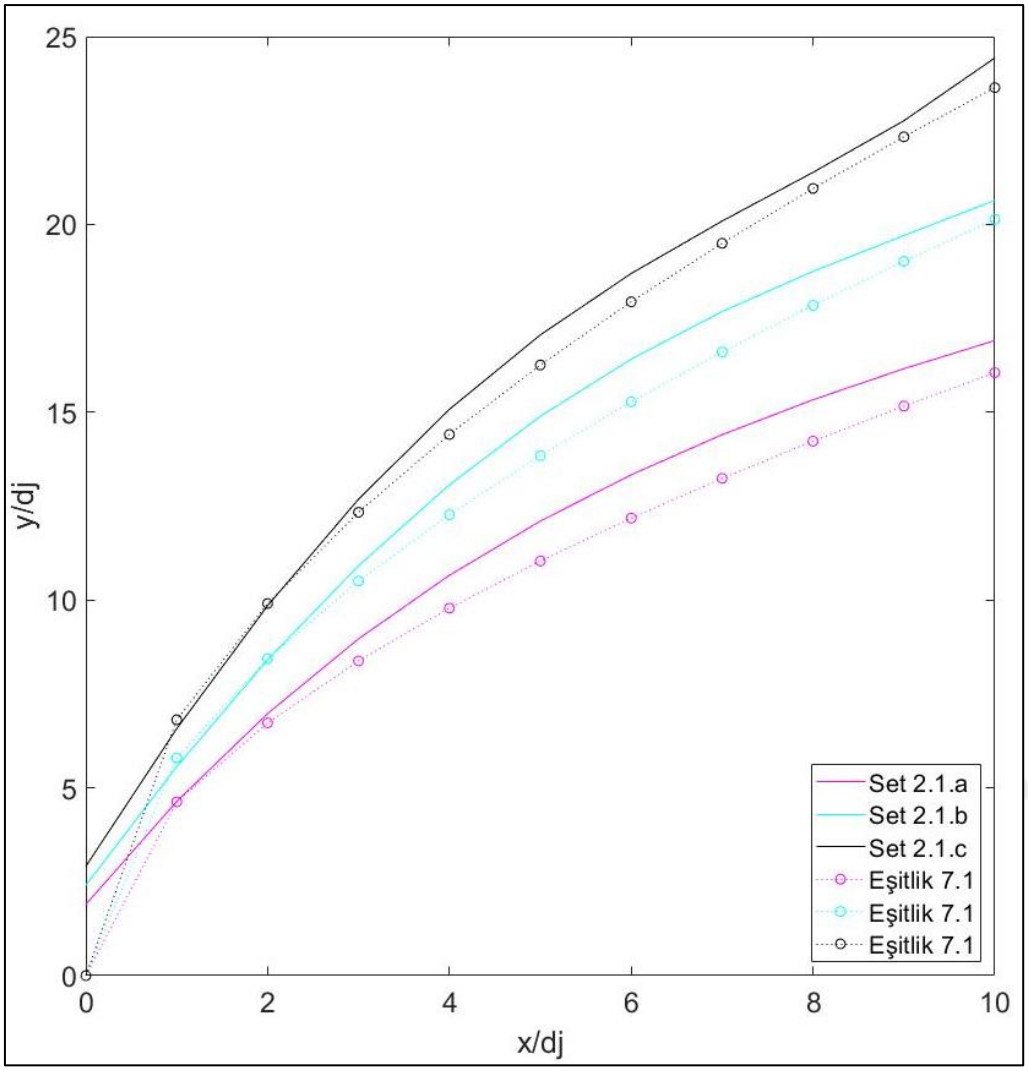
Şekil 7.1'de gözlemlenen, benzer Weber sayılarına sahip kerosen sütunlar yaklaşık olarak benzer damlacık oluşumuna sahip iken soldan sağa doğru artan çapraz akış hızları yani dolaylı olarak artan momentum akı oranları ile hem y düzlemi üzerinde aldıkları mesafe artmış hem de sıvı sütunundan ayrılan yapılar daha da ileriye taşınmıştır. Çalışmanın devamında bu sütunların üst yüzeylerinin noktasal olarak çıktıları alınmış ve elde edilen nokta kümesi grafik haline getirilerek kerosenli çalışmanın sonucunda elde edilen Eş. 7.1 ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma kısmı Şekil 7.2'deki yer almaktadır.



Şekil 7.1. Set 2.1.a, Set 2.1.b ve Set 2.1.c karşılaştırması

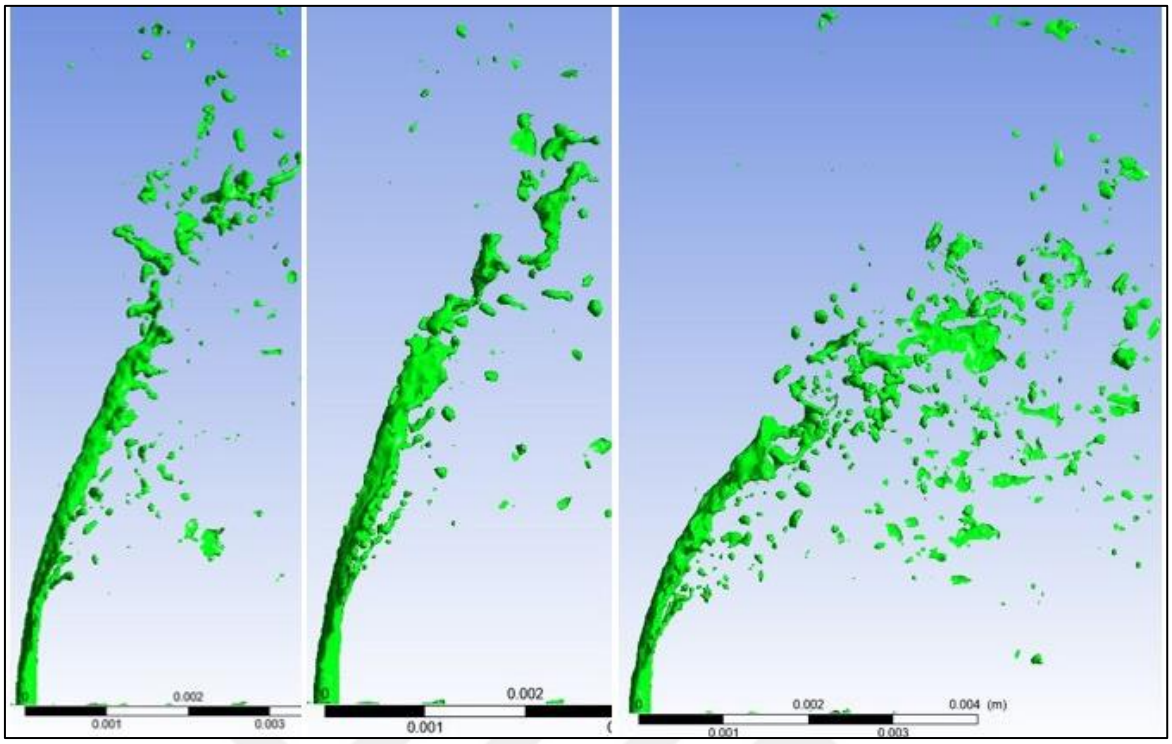
Şekil 7.2'de de görüldüğü üzere elde edilen Eş. 7.1 farklı sıvı hızları sonucunda elde edilen farklı momentum akı oranlarının jet üst yüzeyi üzerindeki etkisini doğru bir şekilde tahmin edebilmektedir. Elde edilen eşitliğin ve HAD analizlerinin karşılaştırılması yapılınca R^2 değerinin 0,989 olduğu bulunmuştur. Çalışmanın devamında ise artan çapraz akış oranları

ile üst yüzey incelemesi yapılmıştır. Sırasıyla 50, 60 ve 70 m/s çapraz akış hızlarında incelemeler yapılmıştır ve Şekil 7.3'te verilmiştir.



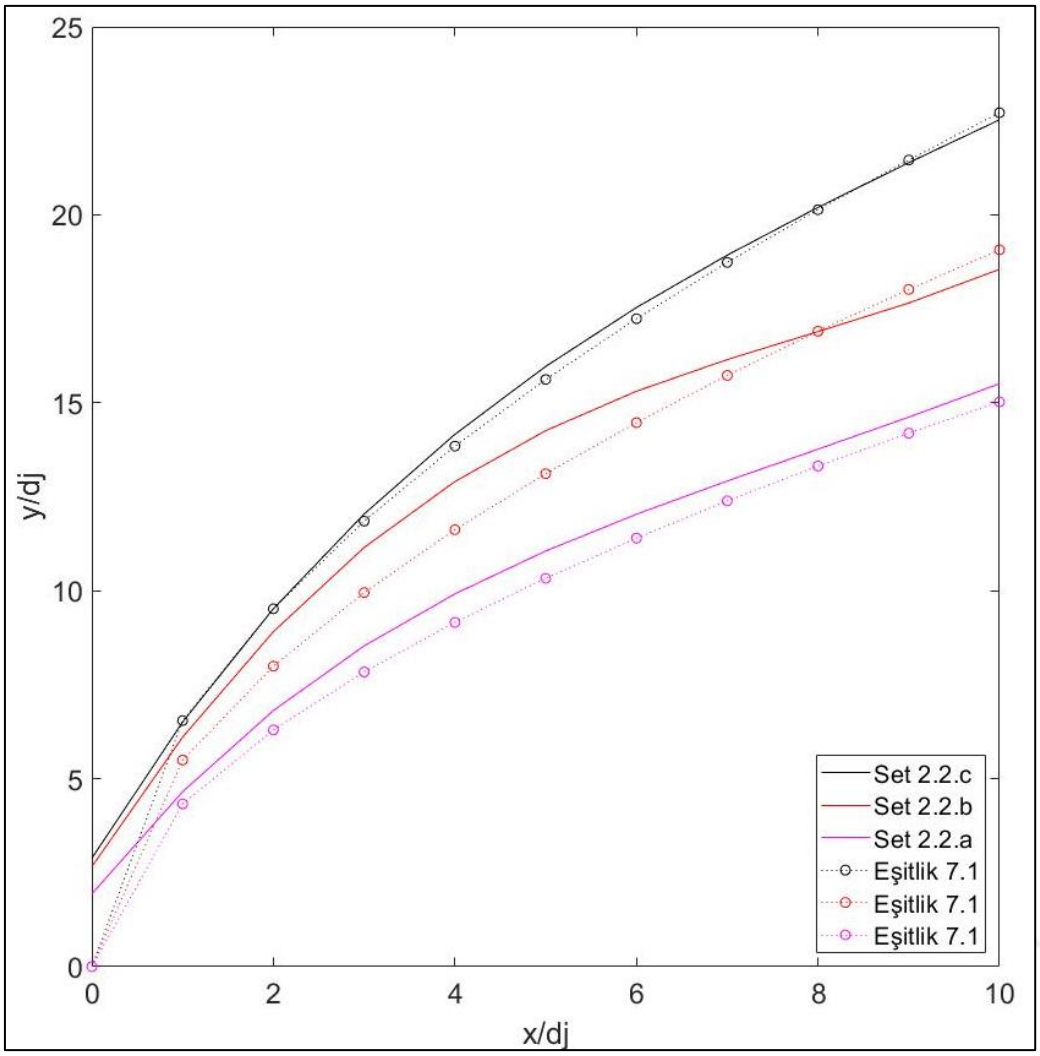
Şekil 7.2. Kerosen analizi sonuçları ve Eşitlik 7.1 arasında karşılaştırma

Şekil 7.3'te de görüldüğü üzere sırasıyla 50, 60 ve 70 m/s çapraz akış hızları ve benzer jet çıkış hızları için çapraz akış hızları arttıkça artan Weber sayısı etkisi ile x yönlü dağılım artmış, lakin azalan momentum akı oranı etkisi ile y yönlü dağılım azalmış ve sütun daha kısa mesafelerde dağılmaya başlamıştır. Kısacası azalan çapraz akış kaynaklı momentum akı oranının y yönlü dağılımı arttıracağı bilgisine ulaşılabilir. Analiz sonuçlarının görsel karşılaştırılması Şekil 7.3'te, Eş.7.1 ile karşılaştırılması ise Şekil 7.4'te verilmiştir.



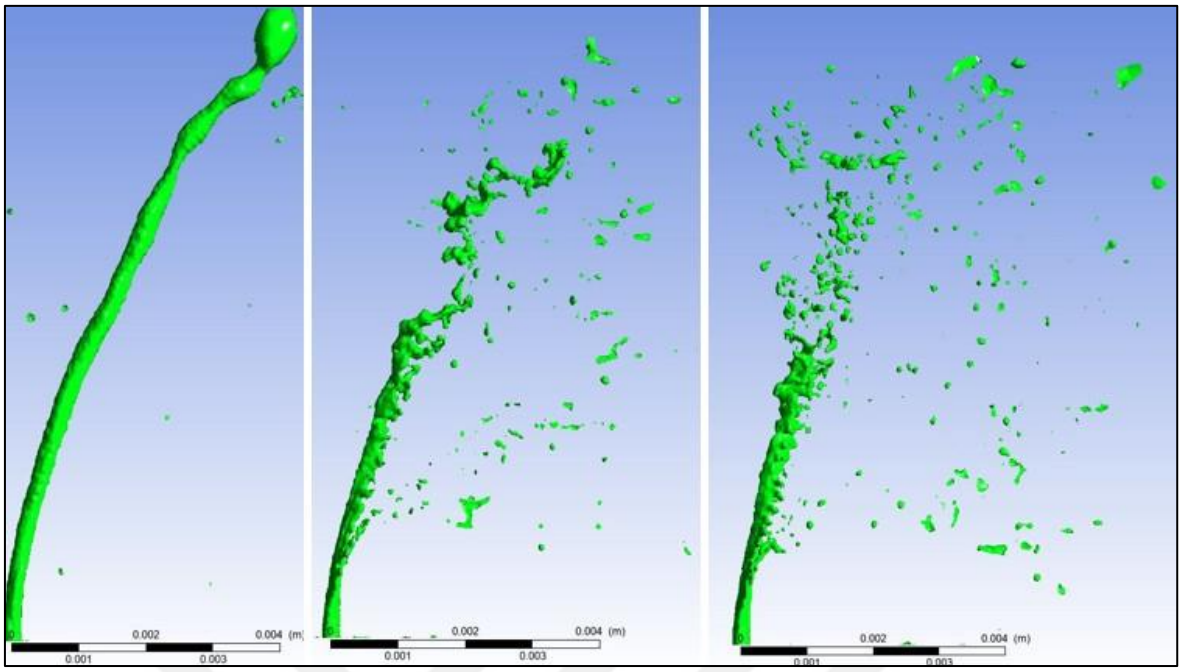
Şekil 7.3. Set 2.2.c, Set 2.2.b ve Set 2.2.a karşılaştırması

Şekil 7.4'te de farklı çapraz akış hızları için elde edilen farklı momentum akı oranları sonucunda elde edilen jet üst yüzeyleri ve bu sonuçları ifade etmesi için üretilen Eş. 7.1'in birbirlerine uyumluluğu gözükmektedir. Şekil 7.3'te görsel karşılaştırılması verilen jetlerin üst yüzeylerinin grafiksel jet merkezi düzlemli üst yüzey karşılaştırılması Şekil 7.4'te verilmiş ve Eş. 7.1 ile HAD analizinin karşılaştırılmasına göre R^2 değeri 0,991'dir. Görüldüğü üzere elde edilen eşitlik HAD analizi sonuçlarını ilk veri seti karşılaştırmasına göre çok daha keskin bir oranla yakalamaktadır. Burada keskinlikte etkili olan 2. veri setinin çapraz akış hızlarının değişimi ile elde edilmesinden kaynaklanmaktadır. Yapılan HAD analizleri sonucunda görülmüştür ki artan çapraz akış hızı kaynaklı farklı Weber sayılı analizlerin iz düşümleri, artan jet akış hızı kaynaklı farklı momentum akı oranlı analizlerden daha keskin bir yönelim seyretmektedir. Bunun sebebi ise her iki karşılaştırma durumunda benzer momentum akı oranlarını elde edebilmek için 2. analiz seti için arttırılan jet akış hızına karşılık gelen çapraz akış hızlarının akışın gelişimini olumlu etkilemesi ve yarı periyodik jet akışı salınımını hızlandırmasıdır.



Şekil 7.4. Kerosen analizi sonuçları ve Eşitlik 7.1 arasında karşılaştırma

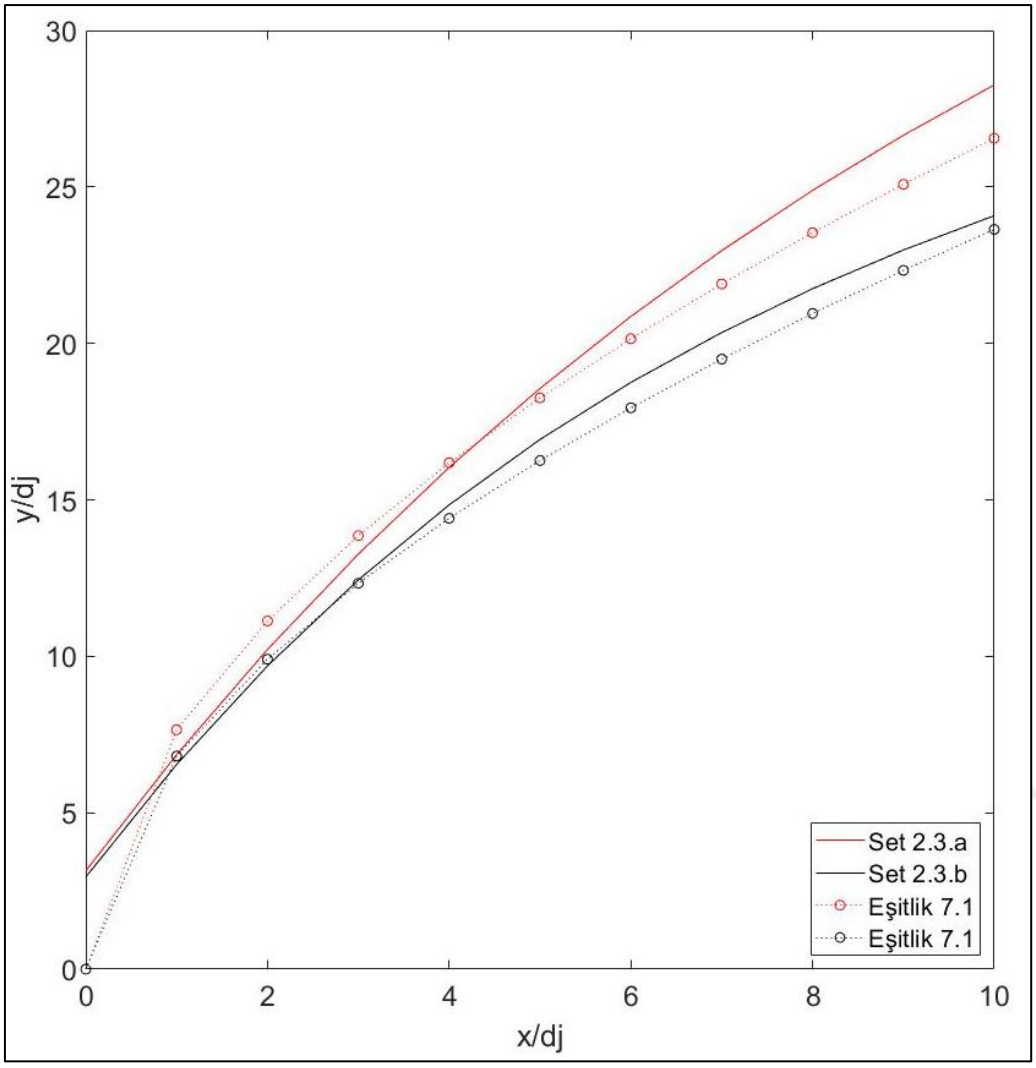
Devamında yapılan analizlerde ise aynı momentum akı oranlarına sahip sıvı jetlerin Weber sayısı kaynaklı değişimleri incelenmiştir. İncelenen durum sayısı 5 olmasına rağmen anlaşılabilirlik açısından en ilgili 3 adet örnek görselleştirme için seçilmiştir. İlgili karşılaştırma sabit momentum akı oranına sahip jetlerin değişken Weber sayısı kaynaklı çapraz akış yönlü dağılımlarının incelemesi olup sabit momentum akı için dağılmış jetin benzer jet akışı yönlü uzunluklara ulaşabildikleri lakin değişken Weber sayısı etkisi ile dağılıma uğradıkları ve çapraz akış yönünde uğradıkları dağılımın şiddetinin Weber sayısı ile orantılı olduğu Şekil 7.5'te açıkça gözlemlenmektedir. Görüldüğü üzere artan Weber sayısı etkisi ile çapraz akış yönlü dağılım ve oluşan damlacık sayısı da artmaktadır.



Şekil 7.5. Set 2.3.a, Set 2.3.c ve Set 2.3.e karşılaştırması

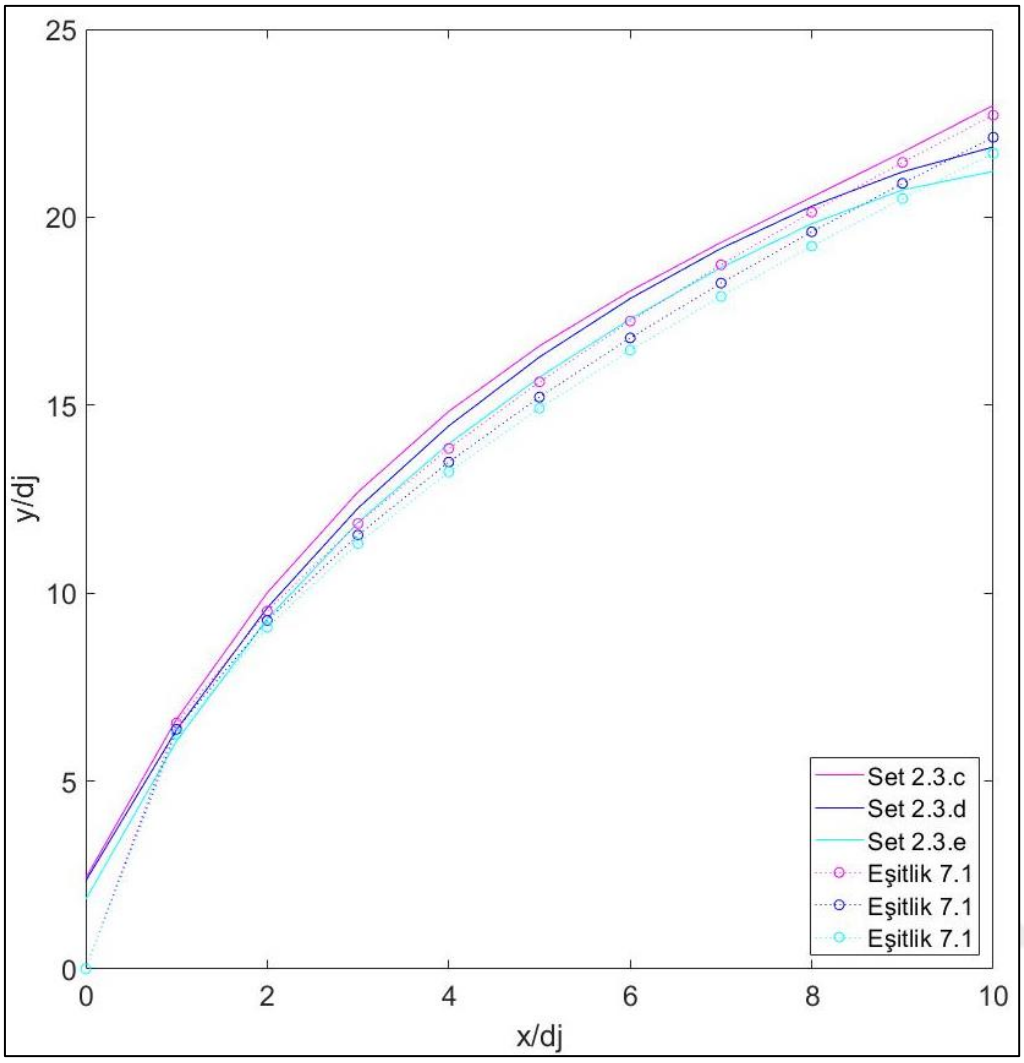
Sırasıyla 10,50 ve 90 m/s çapraz akış hızları için seçilen görsellerden de görüldüğü üzere artan Weber sayısı ile x yönlü dağılım orantılı olarak artmış sütun ise yönelimini korurken Weber sayısı artışından ötürü bozulma noktaları y üzerinde aşağıya itelenmiştir. Burada dikkat edilmesi gereken bir diğer kısım ise benzer momentum akı oranlarına sahip olan jetlerin aslen akış yönelimlerini belirli oranlarda korudukları lakin artan Weber sayılarından ötürü kopmalarında arttığıdır. Tezin konusu olmamakla birlikte artan Weber sayısı ortalama damlacık çapını da düşürecek ve kısa mesafelerde dağılımı daha da arttıracaktır. Bu durumda yanma performansına etki edecektir. Önceden de belirtildiği üzere karşılaştırma 5 durum içinde yapılmış olup bu durumların elde edilen Eş. 7.1 ile karşılaştırması Şekil 7.6 ve Şekil 7.7'de verilmiştir. Grafiksel karşılaştırmanın kolaylığı açısından bu beş durumdan düşük çapraz akış hızları olan 10 m/s ve 30 m/s çapraz akış hızlı analizler ile yüksek çapraz akış hızları olan 50 m/s, 70 m/s ve 90 m/s çapraz akış hızlı analizler ayrı şekiller ile verilmiştir. Şekil 7.6'da 10 m/s ve 30 m/s çapraz akış hızları ve sabit momentum akı oranları için üst yüzey iz düşümleri ve bu üst yüzeylerin Eş. 7.1 ile karşılaştırılmaları verilmiştir. Şekil 7.6'dan da görüldüğü üzere düşük çapraz akış hızları için Eş. 7.1'in tahmin kabiliyeti beklendiği kadar yetkin değilken çapraz akış hızlandıkça fark kapanmaktadır. Bu farkı açıklamak için yapılabilecek en uygun yorum $V_a = 10\,m/s$ durumu için analizin sonuçlarının 200 zaman aralığında bir kaydedilmesinin yönelimi yeterince iyi temsil

edememesidir. Kayıt zaman aralığı kısaltılıp daha geniş depolama alanlarında fark azaltılabilir.



Şekil 7.6. Kerosen analizi sonuçları ve Eşitlik 7.1 arasında karşılaştırma

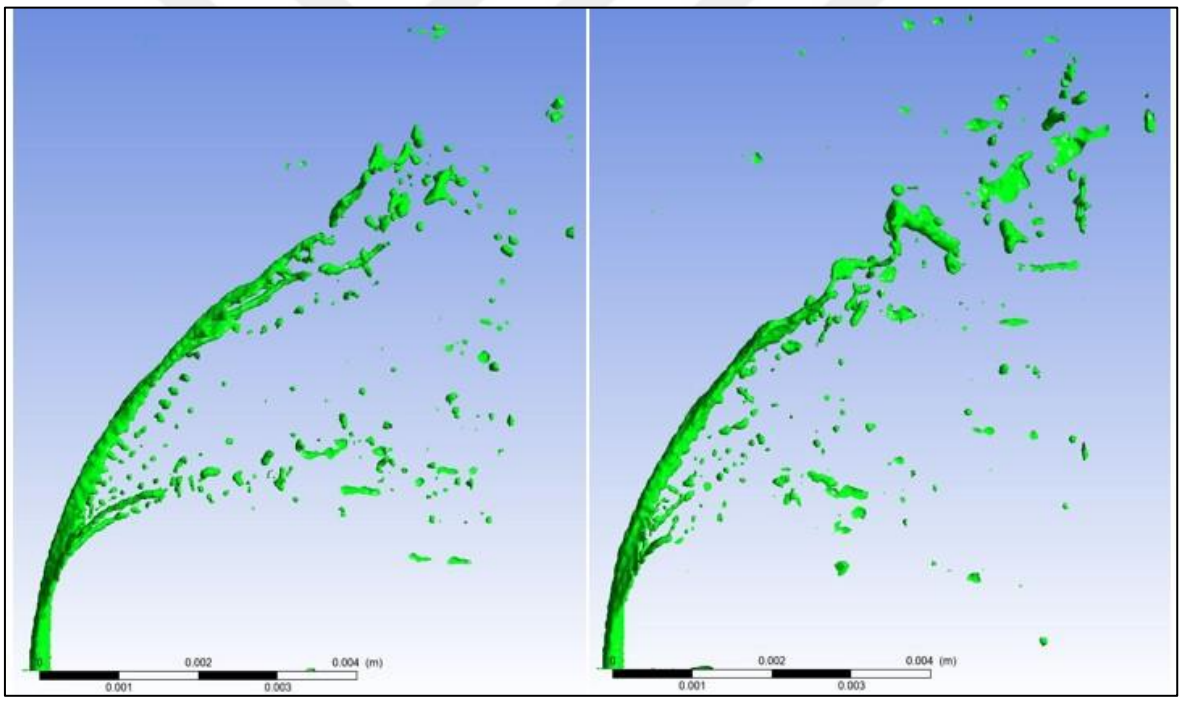
Daha yüksek çapraz akış durumlu HAD analizleri ise Şekil 7.7'de gösterilmiştir. Şekilden de anlaşılacağı üzere daha yüksek çapraz akış durumlarında analiz sonucu ve Eşitlik 7.1 paralellik göstermekte ve fark Şekil 7.6'da verilen 10 m/s durumunun aksine belirli bir mertebede ve sabit seyretmektedir. Bunun en büyük sebebi ise artan çapraz akış hızlarının, jetin periyodik hareketine olumlu yönde etkisidir. Çapraz akış hızı arttıkça jet daha kısa sürelerde salınımını tamamlayıp daha kısa sürelerde gelişecektir. Şekil 7.7 ve Şekil 7.6 beraber incelendiğinde farkın belirli bir çapraz akış hızı mertebesinden (yaklaşık olarak 30 m/s) sabitlendiği ve Eş. 7.1 ile HAD analizlerinin paralellik gösterdiği belirgin şekilde fark edilecektir.



Şekil 7.7. Kerosen analizi sonuçları ve Eşitlik 7.1 arasında karşılaştırma

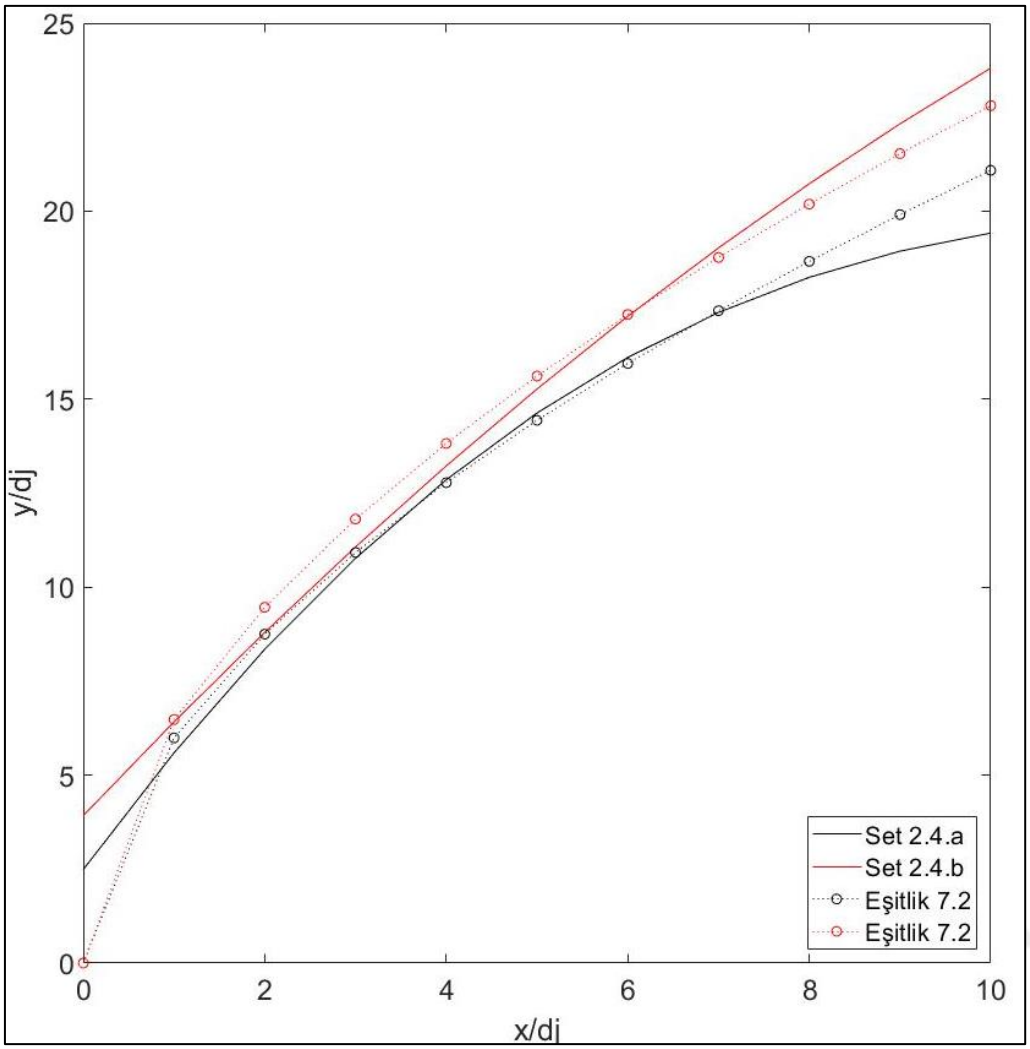
Şekil 7.6 ve Şekil 7.7'de verilen sonuçlar birlikte değerlendirildiğinde görülmektedir ki kullanılan donanım ve analiz için ayrılan maksimum alanın izin verdiği minimum zaman kayıt parametresi olan 200 adımda bir kayıt, 10 m/s HAD analizi için yeterli kalmamakta ve küçük sapmalara sebep olmaktadır. Bunun sebebi ise düşük çapraz akış hızı altındaki jetin gelişmesin daha uzun sürmesi ve periyodik salımının ise daha geniş olmasıdır. Ve bu geniş salınımdaki en uygun anın 200 adımda bir kayıt parametresi gibi geniş bir aralıkta yakalanamamasıdır. Bu farklılığın analiz ve analiz parametrelerinin eksikliği olmadığı ise aynı karşılaştırmanın daha yüksek çapraz akış hızlı durumlarının keskinliği ile kanıtlanmıştır. Bu bölümde verilen 5 karşılaştırmalı set birlikte ele alındığında R^2 değeri 0,986 iken kayıt parametresinin yetersiz kaldığı 10 m/s analizi çıkartıldığında R^2 değeri 0,991'e kadar yükselmektedir.

Farklı hava sıcaklıkları için elde edilecek eşitliğin bütün veri setinden elde edilen Eş. 7.1 ile ifade edilmesi ise doğru değildir. Bu sebeple farklı hava sıcaklıkları için eşitliği farklı sıcaklıklar için elde edilen analizlerden çıkartmak gerekir. Her halükarda Weber sayısının ve sıcaklığın jet iz düşümü üzerindeki etkisini görmek amacıyla incelemeler yapılmış ve Şekil 7.8'de gösterilmiştir. Şekil 7.8'de analiz seti 2.4.a ve 2.4.b karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar ışığında gerçekten de daha yüksek Weber sayıları ile x yönlü dağılımın daha fazla artarken, artan sıcaklık ile y yönlü uzanımın daha fazla olduğu gözlemlenmektedir. Bu durumda örnek bir yanma odası için artan sıcaklık merkeze doğru olan dağılımı arttıracaktır. Tasarımlar yapılırken bu noktalara dikkat edilmesi gerekir. Öte yandan 4 set ve sonuçlarının kerosen ısıtılmış çapraz akış eşitliği olan Eş. 7.2 ile karşılaştırmaları da çalışılmış ve Şekil 7.9 ve Şekil 7.10'da gösterilmiştir.



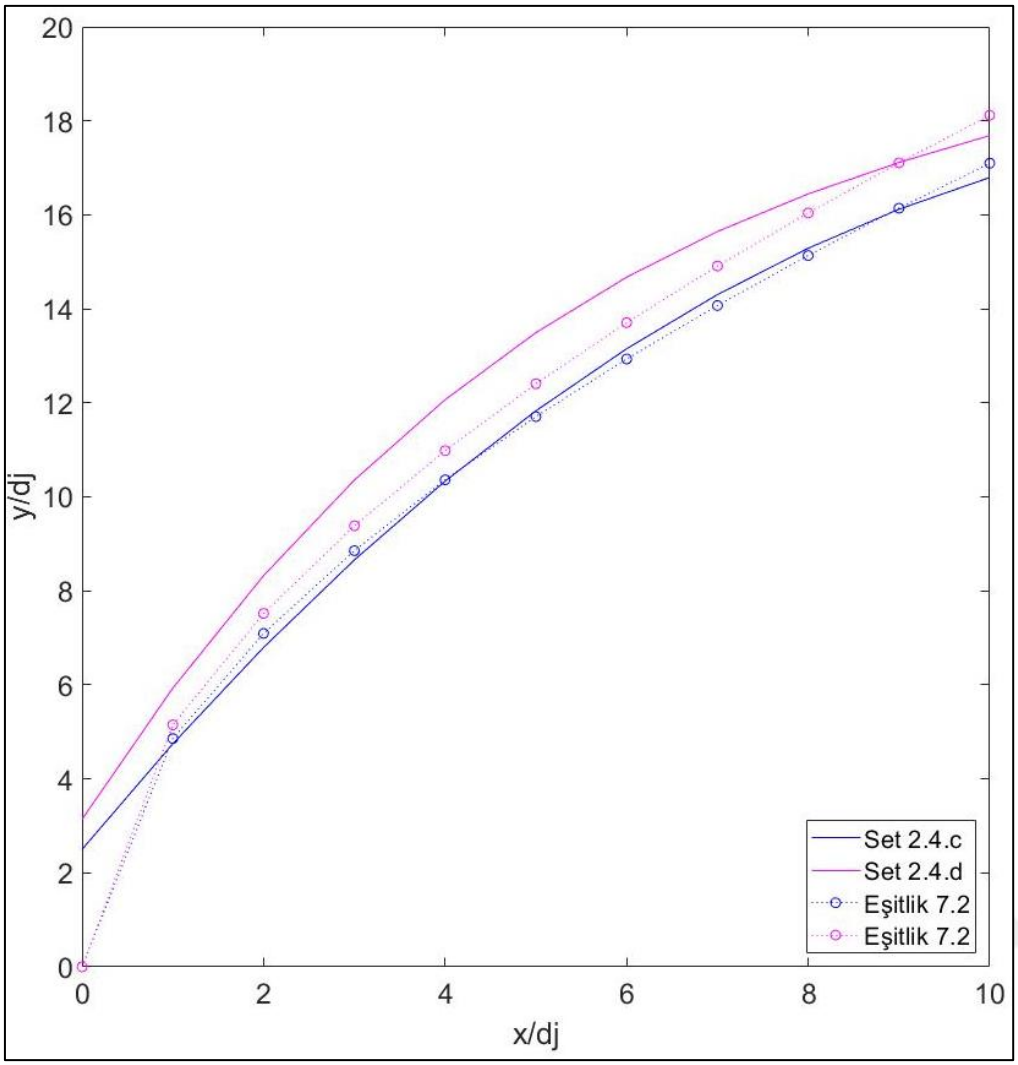
Şekil 7.8. Set 2.4.a ve Set 2.4.b karşılaştırması

Şekil 7.9'da 18 °C ve 300 °C için sabit momentum akı oranlı jetler karşılaştırılmış ve Şekil 7.8'de de görüldüğü üzere Weber sayısı daha yüksek olan Set 2.4.a çapraz akış yönünde daha sürüklenirken sıcaklığı daha fazla olan Set 2.4.b'nin ise aynı momentum akı değerine rağmen y yönünde daha fazla dağılıma uğradığı görülmektedir. Eş. 7.2'nin her iki set içinde ara değerler vermesinin sebebi az sayıdaki farklı sıcaklık analizlerinden kaynaklanmaktadır.



Şekil 7.9. Kerosen analizi sonuçları ve Eşitlik 7.2 arasında karşılaştırma

Benzer bir durum yine Şekil 7.10 için gözlemlenmektedir. Yine artan Weber sayısının etkisinin x yönlü dağılımda artan sıcaklığında y yönlü dağılımda etkili olduğu görülmektedir. Bir sıvı jet ayrılmaya uğrarken eşitliklerden de belli olacağı üzere tamamen doğrusal ya da ikinci dereceden bir yönelimle bozulmaz. Bölgesel farklılıklar ve yerel bozulmalar ve paket oluşumları vardır. Şekil 7.9'daki Set 2.4.a ve Şekil 7.10'daki Set 2.4.c görüldüğü üzere Eş. 7.2 ile tamamen uyumda iken Şekil 7.9 için Set 2.4.b'de ve Şekil 7.10 için Set 2.4.d'de bölgesel farklılıklar vardır. Eş. 7.2 farklı sıcaklıklarda maksimum ve minimumları doğru bir şekilde tahmin edebilirken bölgesel oluşumlardan ötürü ilk 6 çaplık mesafede yüksek sıcaklıklarda küçük farklılıklar bulmaktadır. Bu eksiklik analiz girdi parametreleri arttırılarak ve hatta daha detaylandırılmak istenirse akış iz düşümünü veren eşitliklere (Eş. 7.1 ve Eş. 7.2) jet akışının incelenen anki akış süresi ve tam gelişme süresinin oranı bir parametre olarak eklenirse çok daha keskin istatiksel sonuçlar alınacaktır.



Şekil 7.10. Kerosen analizi sonuçları ve Eşitlik 7.2 arasında karşılaştırma

Farklı sıcaklık değerleri ve çapraz akış hızları için yapılan analizleri temel alarak çıkartılan Eş.7.2 ve bu eşitliğe uygun olarak çıkartılan sonuçlar ilgili şekillerde gösterilmiş farklar anlatılmış ve sebepleri verilmiştir. Eş. 7.2 ve analiz sonuçları bütün olarak ele alınırsa R^2 değerinin 0,973 olduğu gözlemlenmiştir. Yapılan model doğrulama analizleri, kerosenli analizler, uygun veri tabanı oluşturulması ve sonucunda elde edilen 2 eşitlik hem sabit sıcaklıkta hem de değişken sıcaklıkta, akış yönünde 10 jet çaplık mesafede oldukça yakın sonuçlar vermektedir. Ve benzer şartların olduğu sistemlerde üst yüzey tahmini yapabilmek için uygun olduğu belirlenmiştir.

8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Yapılan analizler sonucunda, sıvı sütununun hareketinin belirlenmesi için momentum akı oranının yeterli bir parametre olduğu ve sabit sıcaklıkta artan momentum akı oranı ile çapraz akışa dik yönde daha fazla alana yayılacağı sonucuna varılmıştır. Öte yandan momentum akı oranı aynı olan iki sıvıdan sıcaklığı yüksek olanın daha fazla dik yönde yayılıma sahip olacağı, We sayısı yüksek olanın ise çapraz akış yönünde daha fazla yayılıma sahip olacağı görülmüştür. Zaten We sayısının bu etkisi de formülde negatif kuvvet olarak kendisini göstermiştir. Bu sonuç bize artan We sayısı ile çapraz akış yönünde dağılımın artacağını ve daha düşük akış yönlü (x/d_j) uzunluk parametrelerinde daha fazla çapraz akışa dik yönlü dağılım olacağını bildirmektedir. Öte yandan düşük We sayılarında çapraz akışa dik yönlü dağılımın daha fazla olacağı bulunmuş ve doğrulanmıştır. Bunlara ek olarak sabit tutulan jet hızları ve değiştirilen çapraz akış hızları vasıtasıyla değiştirilen momentum akı oranlarında, artan momentum akı değerleri ile çapraz akışa dik yönlü dağılımın daha da artacağı görülmüştür.

Atmosfer koşullarında yapılan analizlerle elde edilen Eş. 7.1 ve Eş. 7.2 ile 573 K, 90 m/s çapraz akış hızı ve 21,4 m/s sıvı jet hızına son derece doğru değerler ve yönelimler elde edilmiştir. Bu değerleri veren eşitlikler literatürdeki benzerleri ile karşılaştırılmış ve sonuçların yakınlığı gösterilmiştir. Tasarlanacak bir yanma odasında çalışılan Weber sayısı ve momentum akı oranı temelli dağılımlar kullanılarak en iyi dağılım uzunluğu belirlenebilir ve boyutlandırma bu kapsamda temellendirilebilir. Çalışmanın bilime katkısı, çalışma aralıkları içerisinde doğru sonuçlar veren eşitliklerin eldesi ve ihtiyaç halinde ilave deneysel çalışmaya olan ihtiyacın azaltılmasıdır. Sonuçlar benzer koşullarda yapılacak çalışmalar için kullanılabilir.

İleride, mevcut çalışmaya ek olarak damlacık modellemeside yapılıp literatür ve sayısal karşılaştırmalar eklenebilir. İstenilen dağılımı verecek giriş parametreleri belirlenebilir ve uygun eşitlikler çıkartılabilir. Daha doğru sonuçları elde etmek için zaman adım kayıt parametresi küçültülebilir, daha fazla kayıt alınabilir ve bu kayıtlar referans çalışmada [22] kullanılan Mie Saçılması tekniğine benzer bir şekilde işlenebilir. Bu sayede jet sütununun salınımının bilinmezliği de ortadan kaldırılmış olacaktır. Eşitliklere türbülans değişkeni de eklenip motor koşulları için daha uygun sonuçlar ortaya çıkartılabilir.

KAYNAKLAR

1. Amighi, A., Eslemian, M., ve Ashgriz, N. (2009). *Trajectory of a liquid jet in high pressure and high temperature subsonic air crossflow*, 11th International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, Colorado, USA, 1-6.

2. ANSYS. (2021). *Ansys fluent theory guide*. Canonsburg, PA,USA, 1068.

3. Bhatia, B., Johny, T., ve De, A. (2023). Understanding the liquid jet break-up in various regimes at elevated pressure using a compressible VOF-LPT coupled framework, *International Journal Of Multiphase Flow*, 159(3), 1-55.

4. Bravo, L., Kim, D., Ham, F., ve Kerner, K. (2018). *High fidelity simulations of primary breakup and vaporization of liquid jet in crossflow*, American Institute of Aeronautics and Astronautics Propulsion and Energy Forum, Ohio, USA, 1-12.

5. Brinckman, K.W., Hosangadi, A., Ahuja, V., ve Dash, S.M. (2008). *A CFD methodology for liquid jet breakup and vaporization predictions in compressible Flows*, 46th American Institute of Aeronautics and Astronautics Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Nevada, USA, 1-16.

6. Bunce K., Lee J. G., ve Santavicca D. A. (2006). *Characterization of liquid jets in crossflow under high temperature, high velocity non-oscillating and oscillating flow conditions*, 44th American Institute of Aeronautics and Astronautics Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Nevada, USA, 1-12.

7. Chuech, S. G., Przekwas, A. J., ve Singhal, A. K. (1991). Numerical modeling for primary atomization of liquid jets, *Journal of Propulsion and Power*, 7(6), 879-886.

8. Gorokhovski, M., ve Herrman, M. (2008). Modeling primary atomization, *Annual Review of Fluid Mechanics*, 40, 343-366.

9. Grosshans, H., Movaghar, A., Cao, L., Oevermann, M., Szász, R. Z., ve Fuchs, L. (2016). Sensitivity of VOF simulations of the liquid jet breakup to physical and numerical parameters, *Computers and Fluids*, 136, 312-323.

10. Hashemi, M., Shalbaf, S., ve Jadidi, M. (2023). Effects of gas viscosity and liquid to gas density ratio on liquid jet atomization in crossflow, *AIP Advances*, 13(3), 1-20.

11. Ingenito, A. (2021). *Subsonic ramjet design* (First edition), Switzerland: Springer Cham, 115.

12. Li, X., ve Soteriou, M. C. (2018). Detailed numerical simulation of liquid jet atomization in crossflow of increasing density, *International Journal of Multiphase Flow*, 104, 214-232.

13. Lin L., Lin Y., ve Xue X. (2012). *Injection of liquid kerosene into a high-pressure subsonic air crossflow from normal temperature to elevated temperature*, Proceedings of ASME Turbo Expo, Copenhagen, Denmark, 1-8.

14. Masuda, B. J., ve McDonell, V. G. (2006). *Penetration of a recessed distillate liquid jet into a crossflow at elevated pressure and temperature*, 10th International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, Kyoto, Japan, 1-7.

15. Mazallon, J., Dai, Z., ve Faeth, G. M. (1999). Primary breakup of nonturbulent round liquid jets in gas crossflows, *Atomization and Sprays*, 9(3), 291-311.

16. Mirjalili S., Jain S. S., ve Dodd M. S. (2017). Interface capturing methods for two phase flows: an overview and recent developments, *Center for Turbulence Research Annual Briefs*, 13, 117-135.

17. Pai, M. G., Pitsch, H., ve Desjardins, O. (2009). *Detailed numerical simulations of primary atomization of liquid jets in crossflow*, 47th American Institute of Aeronautics and Astronautics Aerospace Sciences Meeting Including The New Horizons Forum and Aerospace Exposition, Florida, USA, 1-19.

18. Prakash, R. S., Sinha, A., Tomar, G., ve Ravikrishna, R. V. (2018). Liquid jet in crossflow-effect of liquid entry conditions, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 93(5), 45-56.

19. Ragucci, R., Bellofiore, A., ve Cavaliere, A. (2007). Breakup and breakdown of bent kerosene jets in gas turbine conditions, *Proceedings of the Combustion Institute*, 31(2), 2231-2238.

20. Rouaix, C., Stoukov, A., Bury, Y., Joubert, D., ve Legendre, D. (2023). Liquid jet breakup in gaseous crossflow injected through a large diameter nozzle, *International Journal of Multiphase Flow*, 163, 1-21.

21. Sallam, K.A. Aalburg, C., ve Faeth, G.M. (2004). Breakup of round nonturbulent liquid jet in gaseous crossflow, *AIAA Journal*, 42(12), 2529-2540.

22. Stenzler, J. N., Lee, J. G., ve Santavicca, D. A. (2003). *Penetration of liquid jets in a crossflow*, 41st Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Nevada, USA, 1-10.

23. Wu, P. K., Kirkendall, K. A., Fuller, R. P., ve Nejad, A. S. (1997). Breakup process of liquid jets in subsonic flow, *Journal of Propulsion and Power*, 13(1), 64-73.

24. Xiao, F., Dianat, M., ve McGuirk, J.J. (2013). Large eddy simulation of liquid-jet primary breakup in air crossflow, *American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal*, 51(12), 2878-2893.

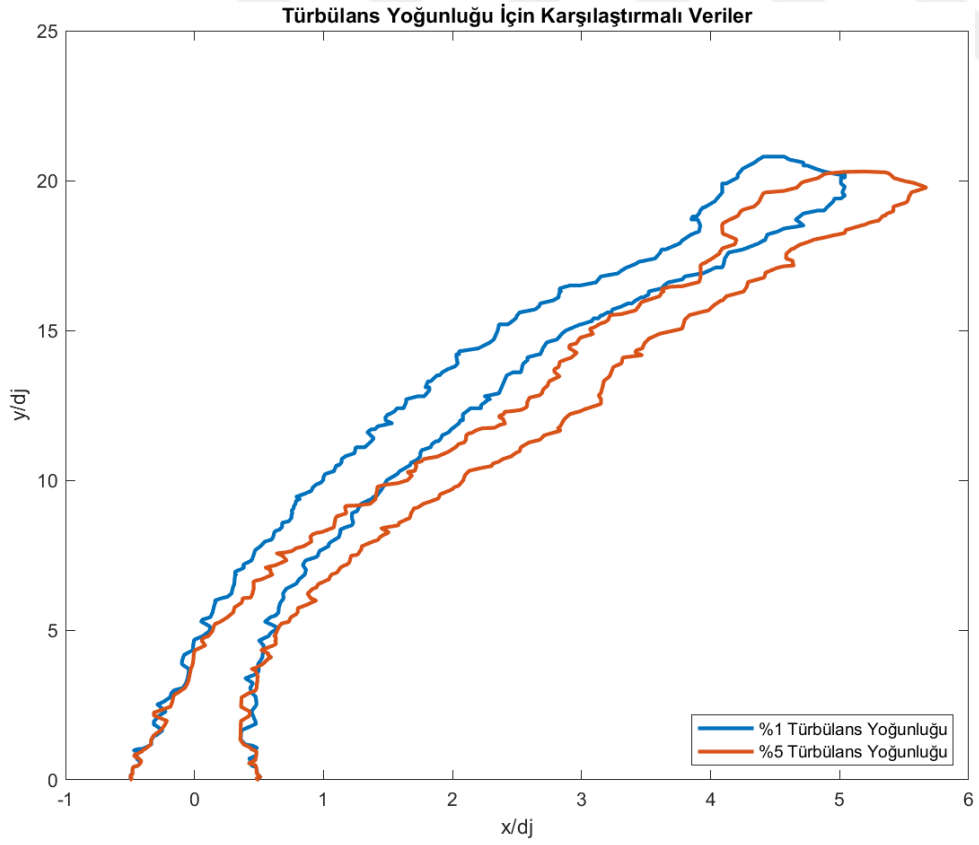
25. Xiao, F., Sun, M. B., Liu, N., Zhang, H., ve Zhang, J. R. (2017). *Effects of mach number on primary breakup of liquid jet in gas crossflow*, 21st American Institute of Aeronautics and Astronautics International Space Planes and Hypersonics Technologies Conference, Xiamen, China, 1-8.

26. Zhao, Y., Zhang, C., Lin, Y., ve Cheng, Y. (2016). *Crosswise distribution of kerosene spray in crossflow*, 52nd American Institute of Aeronautics and Astronautics Propulsion Conference, Salt Lake City, USA, 1-8.

EKLER

EK-1. Türbülans yoğunluğu etkisi

Çok fazlı akışlarda akışın gelişimi, periodik bozulmaya uğraması aşamalar aslen Rayleigh-Taylor ve Kelvin-Helmholtz bozulmaları adı verilen olaylar ile olur. Bu bozulmalardan Rayleigh-Taylor (RTI), farklı yoğunluktaki iki sıvının yoğunluk farkının arayüze olan etkisini araştırır ve bu her iki sıvıda potansiyel enerjilerini düşürecek şekilde davranırlar. Düşük olan fazın türbülans yoğunluğu ise burada önemli bir etkendir. Kelvin-Helmholtz bozulması (KHI) ise iki akışkan arasında bulunan arayüz boyunca bir hız farklılığı oluştuğu zaman gözlemlenir. Yine bu akışların türbülans yoğunluk değerleri Kelvin-Helmholtz bozulması için önemli bir parametredir. Aynı zaman için alınan çözümlerin Şekil 9.1'de görüldüğü gibi türbülans yoğunluğu (Turbulence Intensity) arttıkça, çapraz akışın sıvı jet üzerindeki etkisi de artmaktadır. Yukarıda verilen bilgiler ışığında farklı türbülans yoğunlukları ile gelen hava akışının sıvı jet üzerindeki etkisi de sayısal olarak kanıtlanmıştır. Türbülans yoğunluğu %1 ile %5 arasında değişen iki çapraz akışa bırakılan jet akışının sürüklenmesi, yüksek türbülans etkisi altında yaklaşık bir jet çapı (0,254 mm) kadar daha fazladır.



Şekil 1.1. Türbülans yoğunluğunun jet iz düşümü üzerine etkisi

EK-2. Kerosen veri tabanı

Çizelge 2.1. Kerosen veri tabanı

y	x	q	We	(μ_j/μ_{H2O})
1,8953	0	18	10,637	1,636727
4,638055	1	18	10,637	1,636727
6,976715	2	18	10,637	1,636727
8,966645	3	18	10,637	1,636727
10,65905	4	18	10,637	1,636727
12,10096	5	18	10,637	1,636727
13,33524	6	18	10,637	1,636727
14,40061	7	18	10,637	1,636727
15,33161	8	18	10,637	1,636727
16,1586	9	18	10,637	1,636727
16,9078	10	18	10,637	1,636727
2,4025	0	27	10,637	1,636727
5,565672	1	27	10,637	1,636727
8,408664	2	27	10,637	1,636727
10,91078	3	27	10,637	1,636727
13,068	4	27	10,637	1,636727
14,89291	5	27	10,637	1,636727
16,41481	6	27	10,637	1,636727
17,67961	7	27	10,637	1,636727
18,74989	8	27	10,637	1,636727
19,70489	9	27	10,637	1,636727
20,6405	10	27	10,637	1,636727
2,9098	0	36	10,637	1,636727
6,576587	1	36	10,637	1,636727
9,849426	2	36	10,637	1,636727
12,68529	3	36	10,637	1,636727
15,07805	4	36	10,637	1,636727
17,05843	5	36	10,637	1,636727
18,69403	6	36	10,637	1,636727
20,08937	7	36	10,637	1,636727
21,38579	8	36	10,637	1,636727
22,76156	9	36	10,637	1,636727
24,4318	10	36	10,637	1,636727
2,886	0	36	29,55	1,636727
6,506457	1	36	29,55	1,636727
9,522117	2	36	29,55	1,636727
12,04118	3	36	29,55	1,636727
14,16076	4	36	29,55	1,636727
15,96683	5	36	29,55	1,636727
17,5343	6	36	29,55	1,636727

EK-2. (devam) Kerosen veri tabanı

y	x	q	We	(μ_j/μ_{H2O})
18,92695	7	36	29,55	1,636727
20,19746	8	36	29,55	1,636727
21,38742	9	36	29,55	1,636727
22,5273	10	36	29,55	1,636727
2,6601	0	27	42,55	1,636727
6,104357	1	27	42,55	1,636727
8,910368	2	27	42,55	1,636727
11,15063	3	27	42,55	1,636727
12,90464	4	27	42,55	1,636727
14,25888	5	27	42,55	1,636727
15,3068	6	27	42,55	1,636727
16,14889	7	27	42,55	1,636727
16,89257	8	27	42,55	1,636727
17,6523	9	27	42,55	1,636727
18,5495	10	27	42,55	1,636727
1,9355	0	18	57,91	1,636727
4,653262	1	18	57,91	1,636727
6,813388	2	18	57,91	1,636727
8,532846	3	18	57,91	1,636727
9,916468	4	18	57,91	1,636727
11,05696	5	18	57,91	1,636727
12,03488	6	18	57,91	1,636727
12,91869	7	18	57,91	1,636727
13,76468	8	18	57,91	1,636727
14,61703	9	18	57,91	1,636727
15,5078	10	18	57,91	1,636727
3,144	0	36	1,18	1,636727
6,856605	1	36	1,18	1,636727
10,2184	2	36	1,18	1,636727
13,26738	3	36	1,18	1,636727
16,03781	4	36	1,18	1,636727
18,56023	5	36	1,18	1,636727
20,86147	6	36	1,18	1,636727
22,96465	7	36	1,18	1,636727
24,88917	8	36	1,18	1,636727
26,6507	9	36	1,18	1,636727
28,2612	10	36	1,18	1,636727
2,9466	0	36	10,63	1,636727
6,545495	1	36	10,63	1,636727
9,693815	2	36	10,63	1,636727
12,44275	3	36	10,63	1,636727
14,84005	4	36	10,63	1,636727

EK-2. (devam) Kerosen veri tabanı

y	x	q	We	(μ_j/μ_{H2O})
16,93005	5	36	10,63	1,636727
18,75367	6	36	10,63	1,636727
20,34838	7	36	10,63	1,636727
21,74823	8	36	10,63	1,636727
22,98387	9	36	10,63	1,636727
24,0825	10	36	10,63	1,636727
2,4163	0	36	29,54	1,636727
6,641169	1	36	29,54	1,636727
10,01025	2	36	29,54	1,636727
12,69063	3	36	29,54	1,636727
14,83403	4	36	29,54	1,636727
16,57681	5	36	29,54	1,636727
18,03996	6	36	29,54	1,636727
19,32911	7	36	29,54	1,636727
20,53453	8	36	29,54	1,636727
21,73111	9	36	29,54	1,636727
22,9784	10	36	29,54	1,636727
2,3437	0	36	57,91	1,636727
6,360329	1	36	57,91	1,636727
9,610506	2	36	57,91	1,636727
12,26062	3	36	57,91	1,636727
14,44793	4	36	57,91	1,636727
16,28058	5	36	57,91	1,636727
17,83756	6	36	57,91	1,636727
19,16878	7	36	57,91	1,636727
20,29497	8	36	57,91	1,636727
21,20778	9	36	57,91	1,636727
21,8697	10	36	57,91	1,636727
1,851	0	36	95,73	1,636727
6,061777	1	36	95,73	1,636727
9,31533	2	36	95,73	1,636727
11,88134	3	36	95,73	1,636727
13,97224	4	36	95,73	1,636727
15,74319	5	36	95,73	1,636727
17,29208	6	36	95,73	1,636727
18,65956	7	36	95,73	1,636727
19,82901	8	36	95,73	1,636727
20,72654	9	36	95,73	1,636727
21,221	10	36	95,73	1,636727
2,4894	0	36	10,5	1,636727
5,593244	1	36	10,5	1,636727
8,349348	2	36	10,5	1,636727

EK-2. (devam) Kerosen veri tabanı

y	x	q	We	(μ_j/μ_{H2O})
10,76677	3	36	10,5	1,636727
12,85672	4	36	10,5	1,636727
14,63254	5	36	10,5	1,636727
16,10971	6	36	10,5	1,636727
17,30586	7	36	10,5	1,636727
18,24075	8	36	10,5	1,636727
18,93629	9	36	10,5	1,636727
19,41652	10	36	10,5	1,636727
3,9206	0	36	5,3	1,636727
6,415615	1	36	5,3	1,636727
8,79806	2	36	5,3	1,636727
11,06794	3	36	5,3	1,636727
13,22524	4	36	5,3	1,636727
15,26998	5	36	5,3	1,636727
17,20214	6	36	5,3	1,636727
19,02174	7	36	5,3	1,636727
20,72876	8	36	5,3	1,636727
22,32322	9	36	5,3	1,636727
23,8051	10	36	5,3	1,636727
2,4994	0	27	20,6	1,636727
4,745424	1	27	20,6	1,636727
6,796753	2	27	20,6	1,636727
8,658085	3	27	20,6	1,636727
10,33428	4	27	20,6	1,636727
11,83033	5	27	20,6	1,636727
13,15142	6	27	20,6	1,636727
14,30285	7	27	20,6	1,636727
15,29009	8	27	20,6	1,636727
16,11878	9	27	20,6	1,636727
16,79469	10	27	20,6	1,636727
3,1394	0	27	12,7	1,636727
5,930631	1	27	12,7	1,636727
8,323794	2	27	12,7	1,636727
10,35679	3	27	12,7	1,636727
12,06753	4	27	12,7	1,636727
13,49391	5	27	12,7	1,636727
14,67384	6	27	12,7	1,636727
15,64522	7	27	12,7	1,636727
16,44595	8	27	12,7	1,636727
17,11395	9	27	12,7	1,636727
17,6871	10	27	12,7	1,636727



Gazili olmak ayrıcalıktır