

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DAİRESEL VE DAİRESEL OLMAYAN JET AKIM ALANLARININ
DENEYSEL VE SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Yalçın YÜKSELENTÜRK**

Anabilim Dalı : Uçak ve Uzay Mühendisliği

Programı : Uçak ve Uzay Mühendisliği

OCAK 2011

**DAİRESEL VE DAİRESEL OLMAYAN JET AKIM ALANLARININ
DENEYSEL VE SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Yalçın YÜKSELENTÜRK
(511071135)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 20 Aralık 2010

Tezin Savunulduğu Tarih : 26 Ocak 2011

Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Duygu ERDEM (İTÜ)
Diğer Jüri Üyeleri : Doç. Dr. Mustafa ÖZDEMİR (İTÜ)
Yrd. Doç. Dr. Hayri ACAR (İTÜ)

OCAK 2011

Tüm dostlarıma,

ÖNSÖZ

Öncelikle, yaptığım bu çalışmada, büyük emek harcayan değerli hocam Yrd. Doç. Dr. Duygu Erdem'e teşekkür ediyorum. Çalışmanın her anında, bıkmadan gösterdiği destek ve özveri için yürekten minnetlerimi sunuyorum.

Deneylere hazırlık aşamasında, yanından ayrılmadığım, tecrübelerinden yararlandığım, Trisonik Aerodinamik Laboratuvarı'nın emektar çalışanı Aliosman Tabanlı'ya verdiği emekler için çok teşekkür ediyorum.

Deneyler sırasında karşılaştığım sorunlarda hep yanı başımda bulduğum hocalarım Yrd. Doç. Dr. Hayri Acar, Yrd. Doç. Dr. Bülent Yüceil ve Doç. Dr. N. L. Okşan Çetiner'e teşekkürlerimi sunuyorum.

Son olarak, yaptığım bu çalışma sırasında manevi desteğini benden esirgemeyen nişanlım Burçak Erdaloğlu'na sevgilerimi sunuyorum.

Aralık 2010

Yalçın Yükselentürk
Makina Mühendisi

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı.....	3
1.2 Literatür Özeti.....	3
2. DENEY DÜZENEGİ	7
2.1 Giriş	7
2.2 DeneY Düzenegini Oluşturan Elemanlar	7
2.2.1 Ölçüm sistemin genel yapısı	7
2.2.2 Sıcak tel ünitesi	8
2.2.3 55P02 Tek telli eğik prob	9
2.2.4 Prob desteği ve prob kablosu	9
2.2.5 Kalibrasyon ünitesi.....	9
2.2.6 Travers mekanizması.....	10
2.2.7 Açısal hareket mekanizması	10
2.3 Streamware Yazılımı	14
3. DENEYSEL YÖNTEM	15
3.1 Amaç.....	15
3.2 Etkin Ortalama ve Çalkantı Hızı Denklemlerinin Belirlenmesi	15
3.3 Etkin Hızdan Sabit Eksen Takımındaki Hız Vektörlerine Geçiş Denklemlerinin Çıkarılması	23
3.4 Kalibrasyon.....	26
3.5 DeneYde Kullanılan Jet Türleri	28
3.6 Diğer Deneysel Çalışma Özellikleri.....	28
4. SAYISAL YÖNTEM	31
4.1 Yönetsel Denklemler	31
4.2 Türbülans Modeli	32
4.3 Geometrik Model ve Çözüm Ağı.....	33
4.4 Sınır ve Başlangıç Koşulları	36
4.5 Diğer Çözücü Özellikleri.....	37
5. DENEYSEL VE SAYISAL SONUÇLAR.....	39
5.1 Deneysel Sonuçlar	39
5.2 Sayısal Sonuçlar	65
6. SONUÇ VE YORUMLAR	73
KAYNAKLAR.....	75
EKLER.....	77

KISALTMALAR

A/D	: Analog/Dijital
DC	: Doğru Akım (Direct Current)
HAD	: Hesaplmalı Akışkanlar Dinamiği
CFD	: Computational Fluid Dynamics
LDA	: Lazer-Doppler Anemometresi
RMS	: Karekök değerlerinin ortalaması (Root Mean Square)
STA	: Sıcak Tel Anemometresi

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 3.1 : Etkin hız denklemindeki katsayılar (Bi)	20
Çizelge 3.2 : Etkin çalkantı denklemindeki katsayılar (Ci).....	23
Çizelge 3.3 : Deneide kullanılan açısai konumlar [derece]	24
Çizelge 3.4 : Travers ağları.....	29
Çizelge 4.1 : Çözüm ağında kullanılan eleman büyüklük fonksiyonu özellikleri	35
Çizelge 4.2 : Deneide kullanılan jet çıkış hızları	36
Çizelge A.1 : Prob açısai konumuna göre katsayı değerleri	77

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Sıcak tel anemometresi sisteminin genel şeması.....	8
Şekil 2.2 : Sabit sıcaklık anemometresindeki Wheatston köprüsü ve servo yükseltici.....	8
Şekil 2.3 : Açısal hareket mekanizması.....	11
Şekil 2.4 : Yüklerin etkisi ile tasarımda oluşa yer değiştirme miktarı.....	12
Şekil 2.5 : Açısal hareket mekanizması.....	13
Şekil 3.1: Sabit ve hareketli eksen takımları	16
Şekil 3.2: Prob başlangıç konumu.....	16
Şekil 3.3: Birim vektörler bileşenlerinin probun açısal konumuna göre çıkarılışı	18
Şekil 3.4: Kalibrasyon eğrisi.....	26
Şekil 3.5: k duyarlılık katsayısının açısal değişimi	27
Şekil 3.6: Lüle çıkış kesitleri	28
Şekil 4.1: Akım alanının geometrik modeli.....	33
Şekil 4.2: Çözüm ağındaki eleman sayısına göre jet eksenindeki hız dağılımları	35
Şekil 4.3: Seçilen çözüm ağı: 437100 eleman	36
Şekil 5.1: $x=2D$ istasyonundaki boyutsuz U değerleri	40
Şekil 5.2: $x=2D$ istasyonundaki boyutsuz V değerleri	40
Şekil 5.3: $x=2D$ istasyonundaki boyutsuz W değerleri	41
Şekil 5.4: $x=2D$ istasyonundaki boyutsuz u_2 değerleri	43
Şekil 5.5: $x=2D$ istasyonundaki boyutsuz v_2 değerleri	43
Şekil 5.6: $x=2D$ istasyonundaki boyutsuz w_2 değerleri.....	44
Şekil 5.7: $x=2D$ istasyonundaki boyutsuz uv değerleri	45
Şekil 5.8: $x=2D$ istasyonundaki boyutsuz uw değerleri.....	45
Şekil 5.9: $x=2D$ istasyonundaki boyutsuz vw değerleri.....	46
Şekil 5.10: $x=5D$ istasyonundaki boyutsuz U değerleri	47
Şekil 5.11: $x=5D$ istasyonundaki boyutsuz V değerleri	48
Şekil 5.12: $x=5D$ istasyonundaki boyutsuz W değerleri	48
Şekil 5.13: $x=5D$ istasyonundaki boyutsuz u_2 değerleri	49
Şekil 5.14: $x=5D$ istasyonundaki boyutsuz v_2 değerleri.....	50
Şekil 5.15: $x=5D$ istasyonundaki boyutsuz uv değerleri	51
Şekil 5.16: $x=5D$ istasyonundaki boyutsuz uw değerleri.....	51
Şekil 5.17: $x=10D$ istasyonundaki boyutsuz U değerleri	52
Şekil 5.18: $x=10D$ istasyonundaki boyutsuz V değerleri	53
Şekil 5.19: $x=10D$ istasyonundaki boyutsuz W değerleri	53
Şekil 5.20: $x=10D$ istasyonundaki boyutsuz u_2 değerleri.....	54
Şekil 5.21: $x=10D$ istasyonundaki boyutsuz v_2 değerleri.....	55
Şekil 5.22: $x=10D$ istasyonundaki boyutsuz uv değerleri.....	56
Şekil 5.23: $x=10D$ istasyonundaki boyutsuz uw değerleri.....	56

Şekil 5.24: Jet merkez ekseninde boyutsuz Uc değerleri	57
Şekil 5.25: Jet merkez ekseninde boyutsuz $u2$ değerleri	58
Şekil 5.26: Jet merkez ekseninde boyutsuz $v2$ değerleri	59
Şekil 5.27: Jet çıkışında yatay ekseninde boyutsuz U değerleri	60
Şekil 5.28: Jet çıkışında düşey ekseninde boyutsuz U değerleri	61
Şekil 5.29: Jet çıkışında yatay ekseninde boyutsuz $u2$ değerleri	61
Şekil 5.30: Jet çıkışında dikey ekseninde boyutsuz $u2$ değerleri	62
Şekil 5.31: Yatay düzlemdeki (xz) boyutsuz jet yarı-kalınlığı.....	63
Şekil 5.32: $Re=40000$ için hız profillerinin öz benzeşliği.....	64
Şekil 5.33: $Re=60000$ için hız profillerinin öz benzeşliği.....	64
Şekil 5.34: $Re=90000$ için farklı kesitlerdeki hız profillerinin öz benzeşliği:.....	65
Şekil 5.35: İki farklı jet türü için $Re=40000$ 'de U hızının sayısal değerleri	66
Şekil 5.36: İki farklı jet türü için $Re=60000$ 'de U hızının sayısal değerleri	67
Şekil 5.37: Dairesel jet için $x=10D$ istasyonunda U hızının sayısal ve deneysel değerleri	68
Şekil 5.38: Yonca kesitli jet için $x=10D$ istasyonunda U hızının sayısal ve deneysel değerleri	69
Şekil 5.39: Dairesel jet için $Re=60000$ ve $x=10D$ istasyonunda üç eksenindeki hız değerleri	70
Şekil 5.40: Yonca kesitli jet için $Re=60000$ ve $x=10D$ istasyonunda üç eksenindeki hız değerleri.....	71

DAİRESEL VE DAİRESEL OLMAYAN JET AKIM ALANLARININ DENEYSEL VE SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ

ÖZET

Jet akımları akışkanlar mekaniğinin en temel ve can alıcı çalışma alanlarından biridir. Bununla birlikte mühendislikte önemli bir uygulama alanına sahiptir. Jetler yanma verimini arttırmak, cisimlere şekil vermek, ısı ve kütle transferini arttırmak gibi çeşitli amaçlarla birçok endüstriyel uygulamalarda kullanılmaktadır. Jet akımları, elektronik devreler, yanma odaları ve gaz türbinlerinin üretiminde; kağıt, tekstil, cam ve metal sanayinde sıkça kullanılmaktadır.

Türbülanslı akım alanının incelenmesinde, akımı oluşturan fiziksel etkenlerin zaman ve konuma göre rastgele değişimler göstermesi nedeniyle analitik ifadeler elde etmek genellikle mümkün olmamaktadır. Olayların fiziksel olarak açıklanması genellikle deneysel ve sayısal çalışmalar sonucunda sağlanmaktadır. Bu nedenle çalışmada öncelikle deneysel veriler elde edilmiştir. Daha sonra ise elde edilen bulgular Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yöntemi ile elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

Deneysel yöntem olarak Sıcak Tel Anemometresi (STA) kullanılmıştır. STA akım alanı özelliklerinin incelenmesinde, uygulama ve akademik çalışmalarda çok sık başvurulan bir yöntemdir. Birçok yeni yöntem geliştirilmesine karşın, duyarganın tepki süresi ve hassasiyeti nedeniyle halen kullanılmaktadır.

Deneylere hazırlık aşamasında, öncelikle teorik denklemlerden hareketle, probun istenilen konumlarda tutulmasını sağlayacak açısız hareket mekanizmasının tasarımı yapılmıştır. Bu tasarım mekanik yönden incelenmiş, taşıyacağı yük nedeniyle probun konumlandırma hatası hesaplanarak bu hatanın asgari düzeyde kalması sağlanmıştır.

Prob için belirli çalışma sıcaklıklarında hız ve açısız kalibrasyon yapılmıştır. Hız kalibrasyonu 0.5 m/s - 1 Mach aralığında akım sağlayan bir kalibrasyon ünitesi kullanılarak yapılmıştır. İstenilen hız aralığına ulaşabilmek için kalibrasyon ünitesinde iki farklı lüle kullanılmıştır.

Elde edilen deneysel sonuçlar MATLAB yazılımı aracılığıyla yazılan kodlar ile işlenip görselleştirilmiştir.

Sayısal yöntem olarak ise sonlu hacim yöntemi uygulanmıştır. Bu yöntemi uygularken bazı ticari kodlar kullanılmıştır. Geometrik model ve çözüm ağının oluşturulabilmesi için CATIA ve GAMBIT yazılımları, HAD çözücüsü olarak ise FLUENT yazılımı kullanılmıştır. Elde edilen sayısal sonuçlar, FLUENT yazılımının ardıl-işleyicisi ve MS Excel yazılımları ile işlenerek görselleştirilmiştir.

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL STUDY OF CIRCULAR AND NON-CIRCULAR JET FLOWS

SUMMARY

The subject of jet flow is one of the most significant and basic research areas of the fluid mechanics. In addition, it has broad range of application areas. Jet flows are used for many different purposes in industrial applications as increasing combustion efficiency, forming materials, increasing transfer rate of mass and heat, etc. Jet flows are commonly used in production stages of electronic circuits, combustion chambers, gas turbines; and also in paper, textile, glass and metal industries.

In many cases, it is not possible to obtain analytical solutions for turbulent flows due to random changes of the physical factors that create flow with time and location. Explanations for these flows are provided by experimental and numerical studies. So that, experimental results was firstly obtained for jet flow in this study. After then, experimental data was compared with data obtained by using Computational Fluid Dynamics (CFD) method.

Hot Wire Anemometer (HWA) was used as an experimental method in the study. HWA is frequently applied in the academic area and in practice to examine physical properties of the flow. Despite many methods that recently developed, HWA is still used due to its low response time and sensitivity.

In the preparation phase of the experiments, at first, an angular motion mechanism, that rotates probe by required angles come by the theoretical formulas, was designed. During this design stage, the loads that the mechanism hold is considered and a structural analysis run to determine the deformation of the mechanism. So the displacement of the probe due to loads was determined.

Velocity and angular calibrations were applied for probe at certain temperatures. Velocity calibration was performed by using a calibration unit with a range of 0.5 m/s - 1 Mach. There are two nozzle were used with calibration unit to obtain the velocity calibration at this range.

The experimental results are processed and visualized by using a commercial code MATLAB.

The finite volume method is applied as a numerical method. To apply this method, some commercial codes were used. CATIA and GAMBIT softwares are used to create the geometrical model and computational grid. FLUENT was used as a CFD solver. The numerical results were visualized by post-processor of FLUENT and MS Excel.

1. GİRİŞ

Yapılan bu tez çalışmasında, farklı çıkış kesitlerindeki jet akımlarında jet eksenine boyunca belirli istasyonlarda üç boyutlu hız profilleri deneysel olarak elde edilmiş, ulaşılan deneysel verilerin sayısal yöntemlerle elde edilen veriler yardımıyla doğrulanması sağlanmıştır.

Jet akımları akademide ve belirli sanayi alanında halen üzerinde detaylı olarak araştırma ve geliştirme yapılan bir konudur.

Deneysel çalışmada sabit sıcaklık anemometresi yöntem olarak uygulanmıştır. Bu yöntemin uygulanmasında tek telli 45° eğik sıcak tel probu kullanılmıştır. Tek telli eğik prob ile jet akım alanının incelenmesinde, üç boyutlu fiziksel büyüklüklerin (hız, türbülans ve Reynolds gerilmeleri) elde edilmesi için yöntemsel olarak probun farklı açısal durumlarda konumlandırılması gerekmektedir. Bu farklı açısal konumlandırmalardan elde edilen deneysel veriler, teorik denklemler yardımıyla işlenerek belirlenen fiziksel büyüklüklere ulaşılmıştır. Çalışmanın deneysel kısmında öncelikle probu açısal olarak konumlandıracak bir mekanizma tasarlanıp üretilmiştir.

Deney düzeneği, sabit bir nokta için üç boyutlu hız ölçümünün yapılması sağlayacak bir şekilde tasarlanmıştır. Bunun için düzeneğin üç ekseninde dönme hareketini sağlaması gerekmektedir. Farklı noktalarda ölçüm yapılabilmesi için ise üç eksenli doğrusal hareketi sağlayan bir travers mekanizması kullanılacaktır. Üretilen deney düzeneği travers mekanizmasına bağlanarak 6 eksenli hareket sağlanmış olacaktır. Deney düzeneğinin tasarım aşamasında üzerine binecek yüklerle ilgili olarak bir yapısal analiz yapılmıştır. Böylelikle düzeneğin ve dolayısıyla probun, mekanizmanın taşıdığı yükler nedeniyle ne kadar yer değiştireceği önceden belirlenmiştir.

Daha sonra ise farklı geometrilerdeki giriş ve çıkış kesit alanları olan (bununla birlikte çıkış eşdeğer çapları da aynı kalmaktadır) jet lüleleri üretilmiştir. Lüleler üretildikten sonra düşük basınç hattına (maksimum 10 bar) bağlanan bir jet ünitesi ile jet akımı sağlanmıştır.

Ölçümler sıcak tel anemometresi kullanılarak yapılmıştır. Deneylerde kullanılan sıcak tel anemometresi akım alanı içine konulan bir tel üzerinden akım geçirerek bu

telin sıcaklığının sabit tutulması ilkesine dayanmaktadır (Sabit Sıcaklık Anemometresi). Tel üzerinden geçen akışkan ne kadar hızlı ise telin sıcaklığını sabit tutmak için gereken akım, dolayısıyla tele uygulanan potansiyel fark fazla olacaktır. Bu nedenle ölçülen potansiyel fark ile akışkan hızı arasında belirli bir ilişki vardır. Bu ilişki üzerinden akışkanın hızı tanımlanabilmektedir. Burada dikkat edilmesi gereken nokta deney yapılan ortamın sıcaklığının ölçümleri doğrudan etkilediğidir. Dolayısıyla deney sırasında ortam sıcaklığı göz önünde bulundurulmuştur. Bu nedenle belirli ortam sıcaklıklarında farklı kalibrasyon eğrileri oluşturulmuş, değişen ortam sıcaklıklarına göre bu oluşturulan kalibrasyon eğrilerinden uygun olan seçilerek, deney dataları elde edilmiştir.

Deney sonuçları ticari bir Hesaplama Akışkanlar Dinamiği programı kullanılarak doğrulanacaktır. Üniversitemizin lisansına sahip olduğu CATIA, GAMBIT ve FLUENT yazılımları ile istenilen sayısal çözümler sağlanmıştır. CATIA programı ile jeti oluşturan lüle geometrik olarak modellenmiş; GAMBIT yazılımında akım alanı için çözüm ağı oluşturulmuş; daha sonra FLUENT yazılımında, oluşturulan çözüm ağı üzerinde belirlenen sayısal modeller ile belirli sınır ve başlangıç koşulları kullanılarak sayısal analizler gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, FLUENT ve MS Excel yazılımları yardımıyla işlenerek (ardıl işlem) görselleştirilmiştir.

Sayısal çalışmada üzerinde çözüm yapılan ağın içerdiği eleman sayısının yeterli olup olmadığı araştırılmıştır. Sayısal çözüm sonuçlarının doğruluğu içerdiği eleman sayısından bağımsız olmak durumundadır. Bu nedenle hem çözümün doğruluğunu sağlayacak hem de çözüm süresini en aza indirecek optimum eleman sayısı tespit edilmiştir.

Elde edilen deneysel veriler ile sayısal veriler karşılaştırılıp sonuçların tutarlılığı incelenmiştir. Tutarlılık sağlandığında farklı geometrilerdeki jet akımları birbirleriyle kıyaslanmıştır. Bu kıyaslama sonucunda akım alanındaki jet çekirdek uzunlukları türbülans düzeyleri ve Reynolds gerilmeleri incelenecek, jetlerin hangi uzaklıklarda dağıldığı ve eksenel sapma olup olmadığı hakkında yorum yapılmıştır.

1.1 Tezin Amacı

Çalışmadaki amaç farklı geometrik kesitlere sahip jet akım alanlarında (belirlenen kesitlerde ve belli çözünürlükte) üç boyutlu hız, türbülans ve normal-teğetsel Reynolds gerilme değerlerini Sıcak Tel Anemometresi yöntemini kullanarak deneysel olarak ölçmek ve bu geometrik farklılıkların akım alanını nasıl etkilediğini incelemektir. Ayrıca elde edilen bu deneysel bulguların, sayısal yöntemler içeren ticari kodlardan elde edilecek sonuçlar ile kıyaslanarak doğrulanması amaçlanmıştır.

1.2 Literatür Özeti

Miller ve arkadaşları (1995) dairesel ve dairesel olmayan jetler üzerinde yaptıkları sayısal çözümlemede jetin aksenal sapmasını, jet çekirdeğinin uzunluğunu ve jetin dağılma karakteristiğini incelemiştir. Çalışmada dairesel olmayan jet türü olarak eliptik, dikdörtgen ve eşkenar üçgen kesitli jetler kullanılmıştır. Bu jetler için eşdeğer çaplar eşit olup, en-boy oranı 1 ve 2 olan durumlar ele alınmıştır. Çalışmanın sonucu olarak, aksenal sapma, eşkenar üçgen jetle birlikte özellikle en-boy oranı eşdağılımlı olmayan jetlerde görülmüştür. Tüm dairesel olmayan jetlerdeki dağılma dairesel jete göre daha çabuk gerçekleşmiştir. En etkin dağılma ise ikizkenar üçgen jete görülmüştür.

Grinstein ve arkadaşları (1995) yaptıkları çalışmada, ses altı kare jetlerde başlangıç koşullarının ve diğer jet dinamiği özelliklerinin jet eksenindeki değişime olan katkısını deneysel ve sayısal yöntemler ile incelemiştir. Yapılan çalışmada yüksek ve düşük türbülans düzeyindeki orifis jetler ile boru tipi jetler kullanılmıştır. Çalışmada deneysel yöntem olarak sıcak tel anemometresi kullanılmıştır. Bu incelemenin sonuçlarına göre türbülans seviyesi Reynolds sayısı karakteristik momentum kalınlığının eşdeğer çapa oranı gibi başlangıç koşullarının jet yakın bölgesinde aksenal bir sapma yaratmadığı daha uzak bölgelerde ise etkilediği görülmüştür.

Zaman (1999), yayınladığı çalışmada Mach sayısının 0.3 – 2.0 olduğu sıkıştırılabilir akımda, çeşitli asimetrik lüleler ve dikdörtgen orifislerden (delik) elde edilen jetlerin yayılma-dağılma karakteristikleri üzerine eğilmiştir. Bu çalışmada, lüle çıkışındaki çıkıntı (tab) etkisi de incelenmiştir. Çalışmanın bir sonucu olarak, asimetrik jetlerin ses altı koşullarda dairesel jetlere göre çok az daha hızlı dağılmakta olup, ses üstü akım koşullarında ise çok daha hızlı bir şekilde dağıldığı

gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, en-boy oranı (aspect ratio) küçük olan orifislerdeki jet akımlarının dağılmasında önemli bir artış gözlemlenmemiş olup, en-boy oranı 10'dan fazla olan orifislerdeki jet dağılmasında kayda değer artışlar elde edilmiştir.

Buresti ve arkadaşları (1998) iç ve dış çap oranları 0.5 olan eş eksenli jet üzerinde çalışmışlardır. Bu çalışmada hız oranları (iç jet hızı/dış jet hızı) 0.30 ve 0.67 alınmış, ayrıca her iki durum için, kalınlığı 5 mm olan ve çok daha keskin bir duvar olmak üzere iki iç duvar kullanılmıştır. Deneyler LDA (Lazer-Doppler Anemometresi) ve sıcak tel anemometresi yöntemleri kullanılarak yapılmıştır. Deney sonuçları düşük hız oranlarının iç jet çekirdeğinin uzunluğunun azalmasına, dış jetin çalkantılarında artışa neden olduğunu ve iki akım arasında yüksek düzeyde bir karışmaya sebebiyet verdiğini göstermektedir. Keskin iç duvarın kullanıldığı durumların - özellikle hız oranı 0.67 olduğu durumda - yakın bölgedeki radyal yöndeki çalkantılarda ve Reynolds gerilmelerinde azalmaya neden olduğu gözlemlenmiştir. Fakat çekirdeklerin sona erdiği bölgelerin sonrasında, iç duvar kalınlığı özeliğinin akım alanına etkisinin ihmal edilebilir durumda olduğu anlaşılmıştır.

Husain ve Hussain (1999) eliptik jetler ile ilgili yayınladıkları çalışmada, kendinden uyarımlı eliptik jetlerin oluşturduğu akım alanını incelemiştir. Çalışmada en-boy oranı 2 olan geometriye sahip eliptik jetler kullanılmıştır. Elde edilen veriler uyarımlı olmayan eliptik jet ile karşılaştırılmıştır. Deney sonuçları sıcak tel anemometresi kullanılarak elde edilmiştir. Deneysel sonuçlara göre, kendiliğinden uyarımlı jet akımı aksel sapma göstermemekle birlikte, uyarımlı olmayan jet akımına göre ana jet ekseninde daha fazla dağılmaktadır. Uyarımlı jetin yakın bölgesindeki karışma, uyarımsız bölgeye göre %70 mertebelerinde daha fazladır.

Mi ve arkadaşları (2000) dokuz adet dairesel olmayan kesitlerdeki jet akımlarının jet eksenindeki dağılma karakteristiklerini incelemiştir. Bulgular dairesel jet akımı karakteristiği ile karşılaştırılmıştır. Çalışmada ölçümler sıcak tel anemometresi kullanılarak sağlanmıştır (5µm tungsten tel). Çalışmada akım Reynolds sayısı düşük türbülans şiddeti oluşturacak şekilde seçilmiş ve yaklaşık 15000 alınmıştır. Deney sonuçları aksel simetrideki bozulmaların ortalama hızdaki azalmaya ve çalkantıların etkin değerinde (RMS) artışa neden olduğunu göstermiştir.

Quinn (2005), ortaya koyduğu çalışmasında ikizkenar kesitli türbülanslı jetin yakın bölgesindeki ana akım ve türbülans karakteristiklerini incelemiştir. Yapılan bu deneysel analizde sıcak tel anemometresi ile pitot statik tüpü olmak üzere iki yöntem

kullanılmıştır. Deneyde eşdeğer çapa dayalı Reynolds sayısı sabit alınmıştır. Deneyde ortalama hız vektörünün üç bileşeni, dik ve teğetsel Reynolds gerilmeleri, bir boyutlu enerji görüngeleri ve statik basınç değerleri ölçülmüştür. Ana akım vortisitesi, jet yarı-kalınlığı, türbülans kinetik enerjisi yerel kayma gerilmesi elde edilen verilerden hesaplanmıştır. Elde edilen bulgular bir eşkenar üçgen şeklindeki ve dairesel kesitlere sahip jet akımlarındaki bulgular ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlara göre ikizkenar üçgen jetin yakın bölgesindeki dağılma eşkenar üçgen ve dairesel jettekine göre daha çabuk gerçekleşmektedir. İkizkenar jetteki ana akım vortisitesinin çabuk dağılmadan kaynaklanan ve ters yönlü iki vortisite tarafından bastırıldığı gözlemlenmiştir. Bir boyutlu enerji görüngesi sonuçları ise eşkenar üçgen jetin yakın bölgesindeki akımın enerji düzeyinin diğer iki jet türüne göre daha yüksek olduğunu göstermiştir.

Berg ve arkadaşları (2006) iki farklı türbülans modeli ($k-\varepsilon$ ve $k-\omega$) kullanarak serbest ve türbülanslı bir dikdörtgen jet akımının sayısal çözümlemesini yapmışlardır. Kullandıkları dikdörtgen profilinin en-boy oranı sabit alınmıştır. Çözümlemede akım alanı girişi için iki farklı sınır koşulu kullanılmıştır. Bu sınır koşullarından ilki eşdağılımlı hız profili, ikincisi ise deney sonuçlarından elde edilen değişken hız profili olarak alınmıştır. Çalışma sonucunda $k-\varepsilon$ türbülans modelinin değişken dağılımlı hız profili sınır koşuluyla birlikte kullanıldığında çözümlemenin, deney sonuçlarında elde edilen akım alanı ile tutarlı olduğu görülmüştür.

2. DENEY DÜZENEĞİ

2.1 Giriş

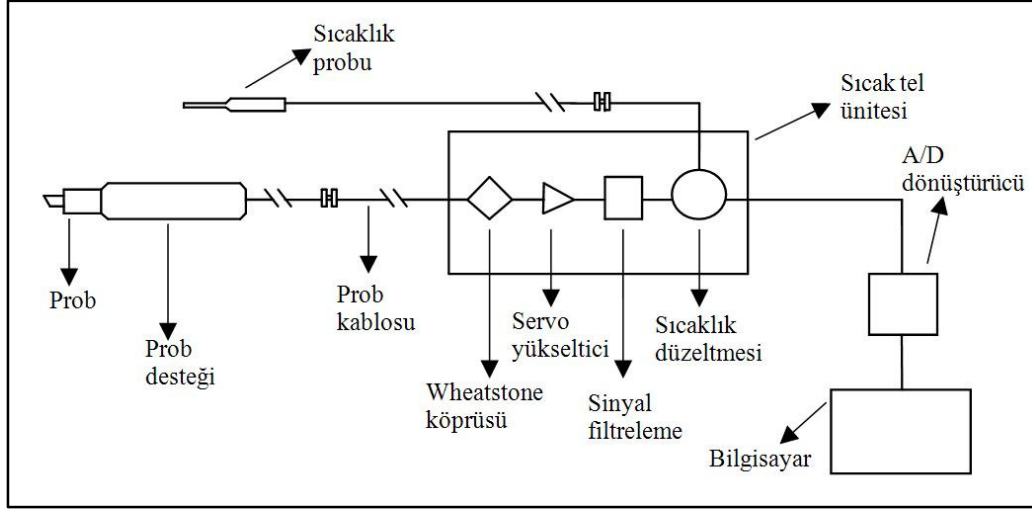
Bu bölümde sıcak tel anemometresi sisteminin yapısı ve çalışma prensipleri ile probun hareketini sağlayan mekanizma açıklanmaya çalışılmıştır. Öncelikle sıcak tel ünitesinin çalışma ilkeleri ve yapısı incelenmiş, bu ilkeler üzerinden elde edilen verilerin hangi aşamalardan geçerek işlenebilir deneysel veri haline getirilinceye kadar izlediği yol araştırılmıştır.

2.2 Deney Düzenegini Oluşturan Elemanlar

Bu kısımda öncelikle deney düzeneginin genel yapısı anlatılmış, daha sonra ise ölçüm sistemini oluşturan donanımlar tek tek ele alınıp, bu donanımların özellikleri hakkında bilgi verilmiştir.

2.2.1 Ölçüm sistemin genel yapısı

Sabit sıcaklık anemometresi ile hız ölçümü, gaz ve sıvı akışkan uygulamalarında çok yaygın ölçekte kullanılan bir ölçüm yöntemidir. Sistemin merkezinde sıcak tel ünitesi bulunmaktadır. Bu üniteye sıcak tel probu bir prob desteği ve bir prob kablosu yardımıyla sıcak tel ünitesine bağlanır. Ortam sıcaklığının değişken olduğu veya ölçüm yapılacak akışkanın sıcaklığının ortam sıcaklığına göre farklı yada değişken olduğu durumlarda bir sıcaklık probu sisteme bağlanır. Sıcak tel ünitesinden alınan veri A/D dönüştürücü ile iletişimi sağlayan bir arayüze ve daha sonra A/D kart üzerinden bilgisayara aktarılmış olur. Tüm bu bağlantılar ve verinin izlediği yol Şekil 2.1’de verilmiştir.

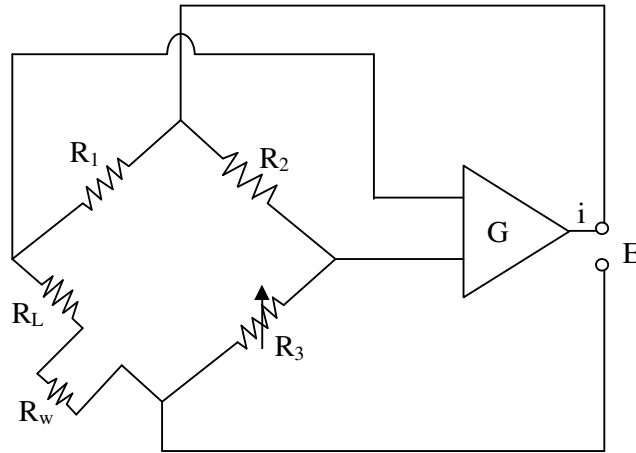


Şekil 2.1 : Sıcak tel anemometresi sisteminin genel şeması

2.2.2 Sıcak tel ünitesi

Sıcak tel ünitesi, bir Wheatstone köprüsü, servo yükseltici, filtre, kare dalga oluşturucu ve yardımcı donanımlardan oluşmaktadır [Url-1]. Bu bileşenler alt kısımlarda daha detaylı olarak açıklanmıştır.

Sıcak tel Anemometresini oluşturan yapıların en önemlisi ana kontrol ünitesidir (90N10). Bu ünite, hız ölçümünün bir karşılığı olan, köprü üzerindeki voltajı kontrol eden ve bunu sistemin çıktı olarak gönderen bir özelliğe sahiptir. Ayrıca içinde bulunan bir servo yükseltici yardımıyla köprüden gelen voltajı yükseltebilir. Ana kontrol ünitesinin bir diğer özelliği ise filtreleme özelliğidir.



Şekil 2.2 : Sabit sıcaklık anemometresindeki Wheatston köprüsü ve servo yükseltici

Gelen voltaj çevre ortamdan gelen yada sistemin ürettiği belirli frekansları istenilen düzeyde filtreleyerek daha doğru bir veri elde edilmesini sağlar.

Sıcak tel anemometresi modülünün içerdiği köprü (90C10) tüm standart prob türlerini desteklemektedir. Kullanılan köprü Şekil 2.2’de verimiştir. 90C10, köprü oranı 20:1 olan standart bir köprüdür. Bu oran prob için aşırı ısınma oranının belirlenmesini sağlayan bir parametredir. Bu köprü ile 4, 20 ve 100 metre uzunluğundaki prob kabloları kullanılabilir.

2.2.3 55P02 Tek telli eğik prob

Kullanılan prob üzerinden elektrik akımı geçirilen küçük bir metal telden oluşmaktadır. Prob, bir Wheatstone köprüsünün bir kolunu oluşturmaktadır. Diğer kollarında ise iki adet sabit bir adet değişken direnç kullanılmaktadır (Şekil 2.2). Sıcak telin, kendisini tutan ayaklarla yaptığı açı 45^0 olup, ayaklar altın kaplamadır. Telin çapı 5 μm olup, tungstenden yapılmıştır. Toplam tel uzunluğu 3 mm olup, bunun ortadaki 1.25 mm’lik kısmı algılayan kısımdır. Telin geri kalanı altın kaplama olup bu kısım akım üzerindeki sivri uç etkisini azaltmaktadır. Bu prob yüksek akım hassasiyetine sahiptir ve çok geniş bir frekans aralığında cevap verebilmektedir. Yüksek seviyede türblülanslı akımlarda kullanılabilir. Ayrıca yaklaşık 300 m/s’lik yüksek bir hız limitine sahiptir.

2.2.4 Prob desteği ve prob kablosu

Probun bağlandığı prob desteğinin uzunluğu 235 mm olup, kablo uzunluğu ise 0.8 metredir. Prob Desteği ile sıcak tel ünitesini bağlayan prob kablosunun uzunluğu ise 4 metredir.

2.2.5 Kalibrasyon ünitesi

Kalibrasyon ünitesi 6-8 bar aralığındaki basınçlı hava ile beslenen, istenilen hız aralığında hız ve açı kalibrasyonunu yapılmasına olanak sağlayan ünitedir. İleriki bölümlerde daha ayrıntılı anlatıldığı üzere, hız-voltaj eğrisi ile sıcak telin hız sabitlerinin belirlenmesine olanak sağlar. Kalibrasyon ünitesi sıcak tel ünitesine bağlanır. Bu kalibrasyon ünitesi ile, istenilen hız aralıklarına ulaşabilmek için üç farklı geometriye sahip lüle kullanılabilir.

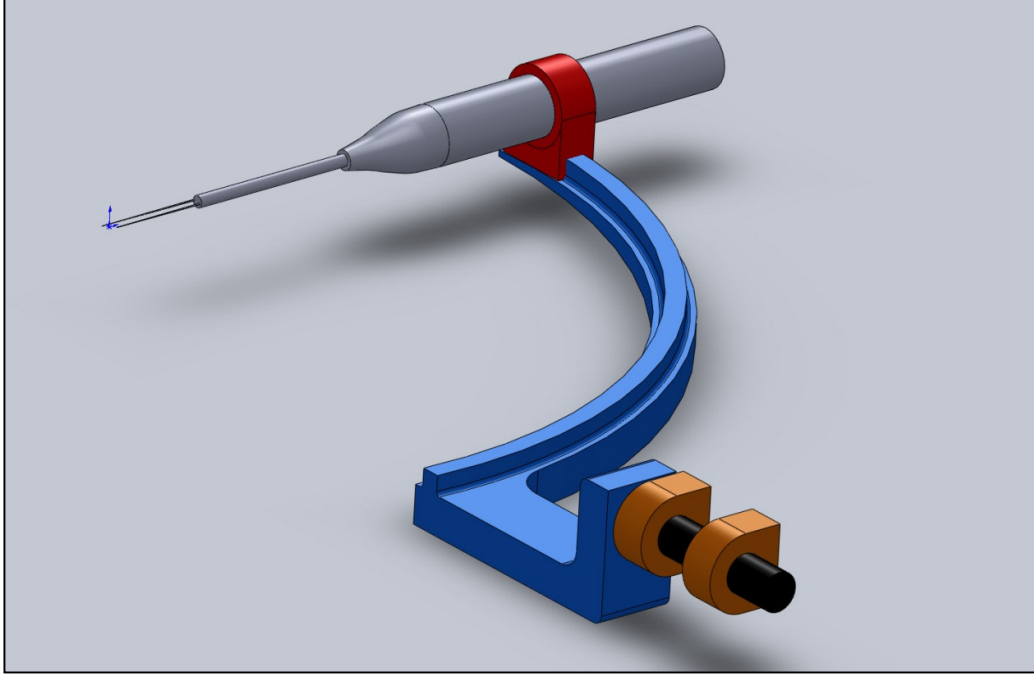
2.2.6 Travers mekanizması

Deneyde probun 3 yöndeki doğrusal ve kendi eksenini etrafındaki dönme hareketlerini sağlayacak bir travers mekanizması kullanılmıştır. Sistem 56H00, 57H10 ve 57H11 kodlu travers mekanizmaları ile bir dönme mekanizması içermektedir. 57G15 travers arayüzü, ilk üç travers mekanizmaları ile bilgisayarı birbirine bağlaması için kullanılmıştır. Probun kendi eksenini etrafında dönmesi için kullanılan motor ayrı bir kontrolör üzerinden bilgisayara bağlanmıştır. Diğer iki eksenindeki dönme hareketi ise manuel olarak, daha ileriki kısımda anlatılmış olan hareket mekanizması ile sağlanmıştır.

2.2.7 Açısal hareket mekanizması

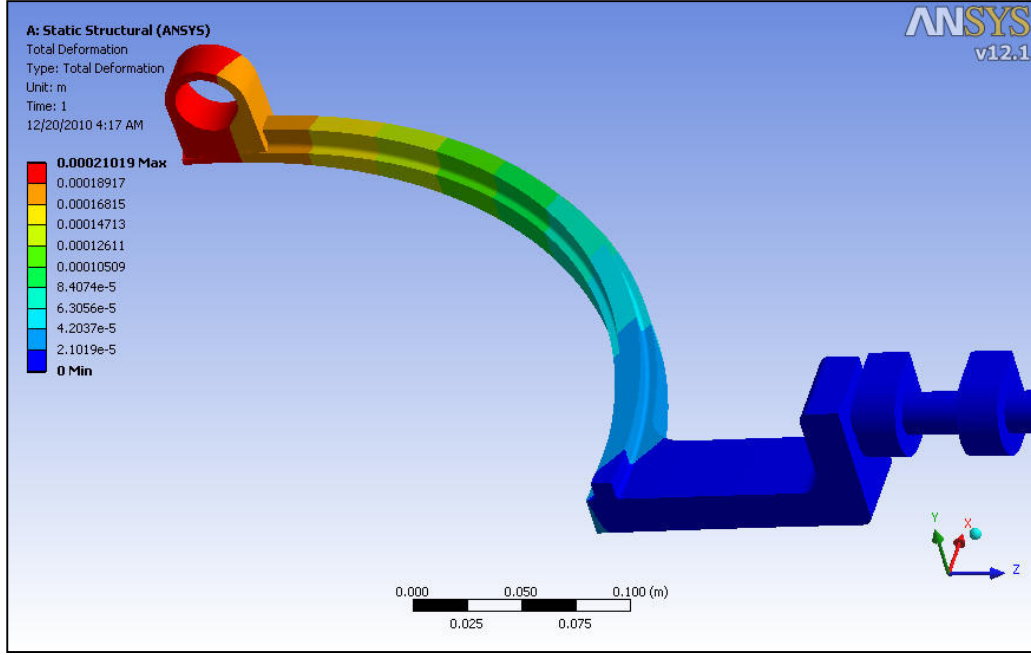
Probun üç eksenindeki dönme hareketlerini sağlayan mekanizmada, bir eksenindeki hareket motor kontrollü, diğer iki eksenindeki dönme hareketleri ise elle sağlanmak istenmiştir. Böyle bir düzeneğin, prob ile birlikte prob desteğini, prob desteğini sabitleyen ve prob desteği eksenini etrafında probun dönmesini sağlayacak motoru taşınması istenmiştir. Bununla birlikte, düzeneğin diğer iki ekseninde de dönme hareketini sağlaması düşünülmüştür. Bu dönme hareketlerini sağlarken sıcak telin sabit bir eksen takımına göre yer değiştirmemesi gerekmektedir. Tüm bu hedefler doğrultusunda tasarlanan açısal hareket mekanizması Şekil 2.3'te verilmiştir. Tasarım Solidworks 2010 yazılımı kullanılarak yapılmıştır. Bu şekilde, gri renkle gösterilmiş kısımlar prob, probun bağlandığı destek ve prob desteğini tutan motoru temsil etmektedir. Kırmızı renkli parça motoru, prob desteği ekseninde sabitleyen ve yükü raya (mavi renkle gösterilen parça) ileten parçadır. Ray, kırmızı renkli destek parçasının üzerinde hareket etmesi ile birlikte, 3.2 numaralı kısımda tarif edilen başlangıç konumuna göre z eksenini etrafındaki dönme miktarını belirten α açısının değiştirilmesine yardımcı olur. Rayın yapısı çeyrek çember şeklindedir. Kırmızı renkli destek parçasının raya oturduğu yüzeyin eğriliği ray ile aynı olduğundan, sıcak telin kartezyen koordinat sistemine göre konumu değişmezken, açısal konumu istenilen eksenlerde değiştirilebilmektedir. İkinci eksenindeki dönme hareketi ise raya eksenini bu dönme eksenini ile karşılaştırılacak şekilde monte edilmiş olan bir mil ile sağlanmıştır.

Bu mil Şekil 2.3'te siyah renkli geometri ile temsil edilmektedir. Bu mil, yine aynı şekilde turuncu renk ile gösterilen yataklar ile desteklenmiştir. Bu yataklar ise bir levha kullanılarak travers mekanizmasına bağlanmıştır. Milin, eksenine etrafında istenilen açılarda sabitlenmesi için mil üzerine boydan boya 3mm x 3mm boyutlarında 8 adet yarık açılmıştır. Bu yarıklara yataklar üzerinden saplanan civatlar yardımıyla sabitleme sağlanmıştır.



Şekil 2.3 : Açısal hareket mekanizması

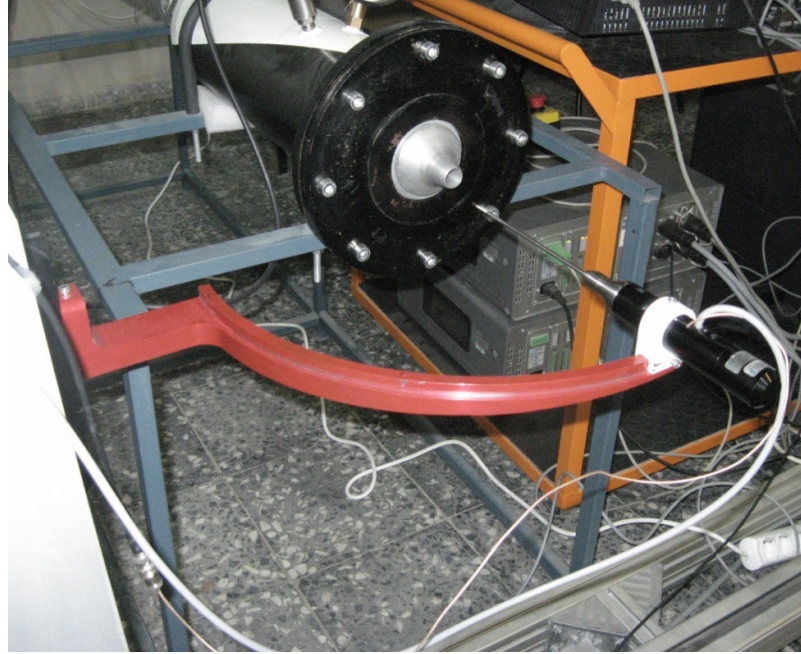
Bu tasarım boyutlandırılırken prob, prob desteği ve motorun boyutları ve düzeneğin taşıyacağı toplam ağırlık öncelikle göz önüne alınmıştır. Bu boyut ve ağırlıkların sabit kartezyen koordinat sistemine göre sıcak telin yer değiştirmesine neden olacağı düşünülmüştür. İstenilen en büyük yer değiştirme miktarı 0.2 mm olarak belirlenmiştir. Bu nedenle ANSYS yazılımı kullanılarak yapısal çözümleme yapılmıştır. Bu çözümlemede yer çekimi etkisi ile motor ağırlığı sisteme etkileyen kuvvetler olarak ele alınmıştır. Yataklardaki yer değiştirme sıfır kabul edilmiştir. Parçaların St-37 çeliğinden üretildiği kabul edilmiştir. Yapısal çözümlemenin bir sonucu olarak toplam yer değiştirmemiktari tasarım üzerinde Şekil 2.4'teki gibi gerçekleşmiştir.



Şekil 2.4 : Yüklerin etkisi ile tasarımda oluşa yer değıştirme miktarı

Şekil 2.4'te görüleceği üzere en büyük yer değitirme, motoru tutan destek elemanın bulunduğu yerde gerçekleşmiştir. Burada en fazla yerdeğıştirme miktarının yaklaşık 0.21 mm olduğu görülmektedir. Bu miktar tasarımın başında belirlenen maksimum 0.2 mm yer değıştirme miktarına yeterince yakın olduğu için yapılan tasarımın üretilmesi uygun görülmüştür.

Açısal hareket mekanizmasının travers mekanizmasına bağlanmış şekli, Şekil 2.5'te görülmektedir.



Şekil 2.5 : Açısal hareket mekanizması

2.3 Streamware Yazılımı

Streamware yazılımının öncelikli işlevi sıcak tel ünitesini kontrol etmek ve buradan gelen veriyi işlemektir. Diğer bir işlevi ise travers mekanizmasını kontrol etmektir. Streamware yazılımını kullanırken uygulanan adımlar aşağıda sıralanmıştır:

- İlk adım olarak, sıcak tel ünitesi üzerindeki donanımlar bu yazılıma tanıtılır (Sıcak tel ünitesi kontrolörü, prob türü, prob desteği, prob kablosu, A/D dönüştürücü, vb.). Ayrıca, sıcak tel ünitesi ile travers mekanizmalarının bağlandığı seri portlar yazılıma tanıtılır.
- Daha sonra bağlanılan probun direnci ölçülür ve aşırı ısınma oranı belirlenir.
- Kare dalga oluşturularak sistemin verdiği tepki süresi ve büyüklüğü incelenir.
- Kullanılacak filtrenin frekansı belirlenir ve donanım kurulumu tamamlanmış olur.
- Kalibrasyon ünitesi kullanılarak, değişken hıza karşılık sıcak tel ünitesinden elde edilen voltaj verisi alınarak, hız-voltaj eğrisi oluşturulur.
- İstenilen istasyonlar için, travers mekanizmasının hareketini belirleyen bir ağ oluşturulur.
- Oluşturulan hareket ağı kullanılarak, daha önce oluşturulmuş donanımsal ayarlar ve kalibrasyon eğrisi üzerinden bir deney çalışması hazırlanmış olur.

3. DENEYSEL YÖNTEM

3.1 Amaç

Bu bölümün amacı sıcak tel probunun akışkan hız vektörüne göre konumlanmasıyla birlikte sıcak tel ünitesinden bilgisayara iletilen ham verilerin işlenmesine yardımcı olacak denklemler elde edip, çalışmada uygulanacak deneysel yöntemin omurgasını çıkartmaktır.

Bu verilerin elde edilmesi için daha önceden de bahsedildiği üzere ortam sıcaklığı da göz önüne alınmış, belirli ortam sıcaklıklarında sıcak tel anemometresi için uygun kalibrasyon eğrileri elde edilmeye çalışılmıştır.

Ayrıca deneysel çalışma için kullanılacak farklı jet çıkış kesitlerinden bahsedilerek, deneysel çalışmanın uygulaması hakkında bilgiler (uygulanan deneysel ağ, ölçüm istasyonları vb.) verilmesi amaçlanmıştır.

3.2 Etkin Ortalama ve Çalkantı Hızı Denklemlerinin Belirlenmesi

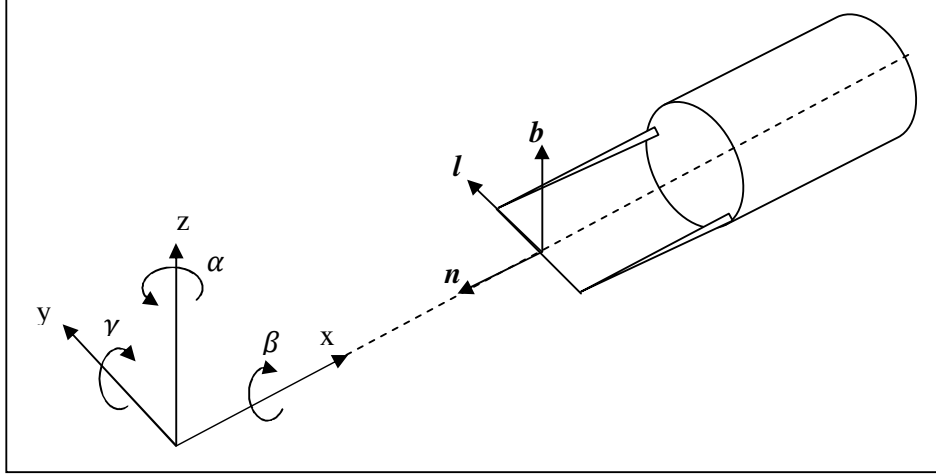
Sabit bir eksen takımına göre (x,y,z) bir noktadaki zamana bağlı akışkan hızı bileşenleri aşağıdaki gibidir:

$$v_x = U + u(t) \quad (3.1)$$

$$v_y = V + v(t) \quad (3.2)$$

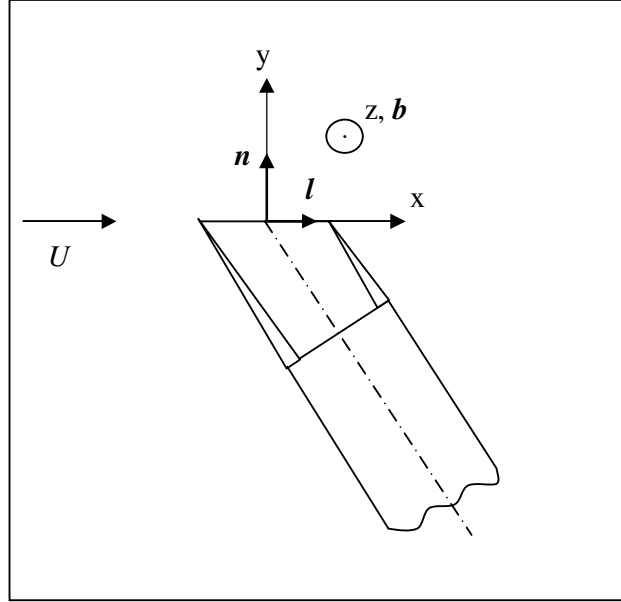
$$v_z = W + w(t) \quad (3.3)$$

(3.1), (3.2) ve (3.3) numaralı denklemlerde gösterilen U , V ve W sırasıyla x , y ve z eksenlerindeki ortalama hızlar olup, u , v ve w yine aynı sıradaki eksenler üzerindeki çalkantı hızlarını belirtmektedir. Sabit eksen takımı ve hareketli eksen takımı, sıcak tel probu ile birlikte Şekil 3.1’de gösterilmiştir.



Şekil 3.1: Sabit ve hareketli eksen takımları

Şekil 3.2’de ise, prob açılırları için başlangıç konumu gösterilmiştir ($\alpha = 0, \beta = 0, \gamma = 0$). Burada hareketli ve sabit eksen takımları çakışmıştır. Bu çakışık konum dönme eksenleri için başlangıç konumu olarak tanımlanmıştır.



Şekil 3.2: Prob başlangıç konumu

Etkin soğutma hızı V_{eff} ile ifade edilirse, etkin hızın karesi, akışkan hızının bileşenleri ile şu şekilde gösterilebilir:

$$V_{eff}^2 = V_n^2 + hV_b^2 + kV_l^2 \quad (3.4)$$

Burada h ve k , sırasıyla b ve l doğrultularındaki duyarlılık katsayılarıdır. V_n , V_b ve V_l ise akışkan hızının sırasıyla n , b ve l doğrultularındaki bileşenleri olup aşağıdaki denklemlerde gösterildiği gibi ifade edilir:

$$V_l = \mathbf{V} \mathbf{l} = v_x l_x + v_y l_y + v_z l_z \quad (3.5)$$

$$V_n = \mathbf{V} \mathbf{n} = v_x n_x + v_y n_y + v_z n_z \quad (3.6)$$

$$V_b = \mathbf{V} \mathbf{b} = v_x b_x + v_y b_y + v_z b_z \quad (3.7)$$

Buradaki x, y ve z alt indisleri, \mathbf{n} , \mathbf{b} ve \mathbf{l} vektörlerinin sabit eksen takımı bileşenlerini ifade etmektedir. Bu durumda, etkin hızın karesi aşağıdaki şekilde yazılabilir:

$$V_{eff}^2 = A_1 v_x^2 + A_2 v_y^2 + A_3 v_z^2 + A_4 v_x v_y + A_5 v_x v_z + A_6 v_y v_z \quad (3.8)$$

Denklem (3.8)'de verilen A_i katsayıları, prob açılarının (α, β ve γ) ve duyarlılık katsayılarının (h ve k) birer fonksiyonudur. Bu katsayılar aşağıda verilmiştir:

$$A_1 = n_x^2 + h^2 b_x^2 + k^2 l_x^2 \quad (3.9)$$

$$A_2 = n_y^2 + h^2 b_y^2 + k^2 l_y^2 \quad (3.10)$$

$$A_3 = n_z^2 + h^2 b_z^2 + k^2 l_z^2 \quad (3.11)$$

$$A_4 = 2(n_x n_y + h^2 b_x b_y + k^2 l_x l_y) \quad (3.12)$$

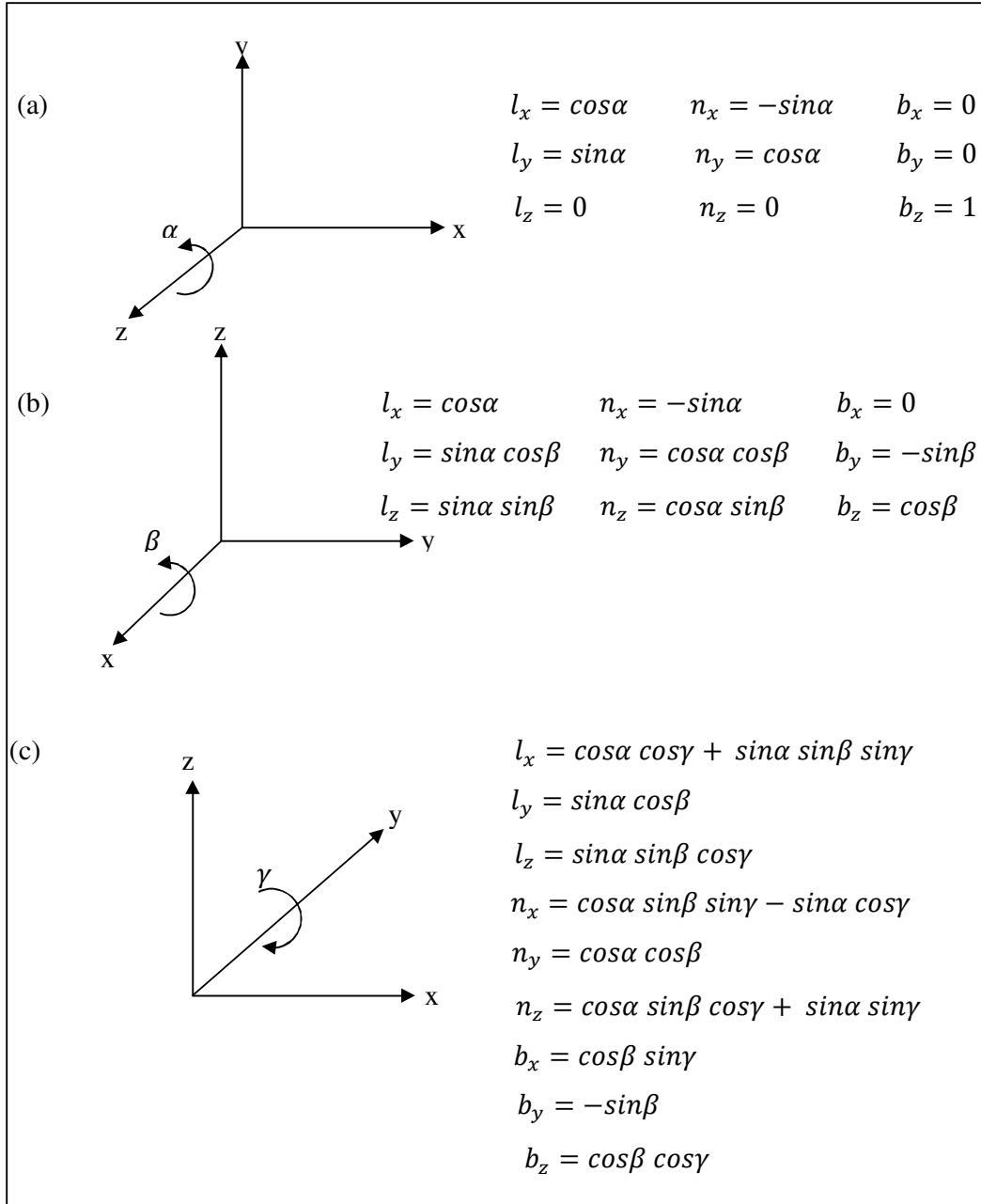
$$A_5 = 2(n_x n_z + h^2 b_x b_z + k^2 l_x l_z) \quad (3.13)$$

$$A_6 = 2(n_y n_z + h^2 b_y b_z + k^2 l_y l_z) \quad (3.14)$$

(3.1), (3.2) ve (3.3) numaralı deklemler, (3.8) numaralı denkleme uygulanıp bu denklemin zamana bağlı ortalaması alındığında, etkin hızların karelerinin ortalaması, \bar{Q} , (3.15) numaralı denklemdaki gibi elde edilir:

$$\begin{aligned} \bar{Q}^2 = & A_1(\overline{U^2} + \overline{u^2}) + A_2(\overline{V^2} + \overline{v^2}) + A_3(\overline{W^2} + \overline{w^2}) \\ & + A_4(\overline{UV} + \overline{uv}) + A_5(\overline{UW} + \overline{uw}) + A_6(\overline{VW} + \overline{vw}) \end{aligned} \quad (3.15)$$

\mathbf{n} , \mathbf{b} ve \mathbf{l} vektörlerinin sabit eksen takımı bileşenleri Şekil 3.3'te gösterildiği gibi hesaplanabilir: Öncelikle \mathbf{n} , \mathbf{b} ve \mathbf{l} birim vektörleri, sabit koordinat sisteminin eksenlerine paralel olacak şekilde ele alınır. Daha sonra sırasıyla z ekseninde α , x ekseninde β ve y ekseninde γ açısı kadar döndürülerek, bu birim vektörlerin sabit koordinat sistemi eksenlerindeki bileşenleri elde edilir.



Şekil 3.3: Birim vektörler bileşenlerinin probun açısıl konumuna göre çıkarılışı

Denklem (3.15), $A_1 U^2$ terimi parantezine alınıp, denklemin her iki tarafının kare kökü alınırsa (3.16) numaralı denklem aşağıdaki gibi elde edilir:

$$\begin{aligned}
Q = A_1^{1/2} U & \left[1 + 2 \frac{u}{U} + \left(\frac{u}{U} \right)^2 + \underbrace{\frac{A_2}{A_1} \left(\frac{V^2 + 2Vv + v^2}{U^2} \right)}_{=T_1} + \underbrace{\frac{A_3}{A_1} \left(\frac{W^2 + 2Ww + w^2}{U^2} \right)}_{=T_2} \right. \\
& + \underbrace{\frac{A_4}{A_1} \left(\frac{UV + Uv + Vu + uv}{U^2} \right)}_{=T_3} + \underbrace{\frac{A_5}{A_1} \left(\frac{UW + Uw + Wu + uw}{U^2} \right)}_{=T_4} \\
& \left. + \underbrace{\frac{A_6}{A_1} \left(\frac{VW + Vw + Wv + vw}{U^2} \right)}_{=T_5} \right]^{1/2}
\end{aligned} \tag{3.16}$$

Daha iyi anlaşılabilmesi için (3.16) numaralı denklemin oluşturan terimlerin bir bölümüne X diyelim:

$$\begin{aligned}
X = 2 \frac{u}{U} + \left(\frac{u}{U} \right)^2 + \frac{A_2}{A_1} \left(\frac{V^2 + 2Vv + v^2}{U^2} \right) + \frac{A_3}{A_1} \left(\frac{W^2 + 2Ww + w^2}{U^2} \right) \\
+ \frac{A_4}{A_1} \left(\frac{UV + Uv + Vu + uv}{U^2} \right) + \frac{A_5}{A_1} \left(\frac{UW + Uw + Wu + uw}{U^2} \right) \\
+ \frac{A_6}{A_1} \left(\frac{VW + Vw + Wv + vw}{U^2} \right)
\end{aligned} \tag{3.17}$$

Denklem (3.16), X terimi yardımıyla basitçe Denklem (3.18)'deki formda ifade edilebilir. Bu formdaki bir denklem yine (3.18) numaralı denklemde görüldüğü gibi üçüncü mertebeden binom serisine açılabilir. Dördüncü ve üstündeki mertebeler ise ihmal edilebilir.

$$\begin{aligned}
Q &= A_1^{1/2} U [1 + X]^{1/2} \\
&= A_1^{1/2} U \left[1 + \frac{1}{2} X - \frac{1}{8} X^2 + \frac{1}{16} X^3 \right] + O(u_i^4/U^3)
\end{aligned} \tag{3.18}$$

Denklem (3.17)'deki X terimi (3.18)'de yerine uygulanıp, binom serisi açık bir şekilde yazıldığında zamana bağlı etkin hız Ek-B'de gösterildiği gibi belirlenir. Yine Ek-B'de görülebileceği üzere, etkin hız değerinin zamana bağlı ortalaması alındığında, ortalama etkin hız değeri elde edilir.

Ek-B'deki bu denklemde ortak terimler B_i katsayıları kullanılarak bir araya getirilirse, etkin hızın ortama değeri, \bar{Q} , (3.19) numaralı denklemde şu şekilde ifade edilebilir:

$$\begin{aligned}
\bar{Q} = & B_1 U + B_2 V + B_3 W + B_4 \left(\frac{V^2 + \bar{v}^2}{U} \right) + B_5 \left(\frac{W^2 + \bar{w}^2}{U} \right) + B_6 \left(\frac{VW + \bar{v}\bar{w}}{U} \right) \\
& + B_7 \left(\frac{2V\bar{u}\bar{v} + \bar{u}\bar{v}^2}{U^2} \right) + B_8 \left(\frac{2W\bar{u}\bar{w} + \bar{u}\bar{w}^2}{U^2} \right) \\
& + B_9 \left(\frac{V\bar{u}\bar{w} + W\bar{u}\bar{v} + \bar{u}\bar{v}\bar{w}}{U^2} \right) + B_{10} \left(\frac{V^3 + 3V\bar{v}^2 + U\bar{v}^3}{U^2} \right) \\
& + B_{11} \left(\frac{V^2 W + 2V\bar{v}\bar{w} + W\bar{v}^2 + \bar{v}^2 \bar{w}}{U^2} \right) \\
& + B_{12} \left(\frac{VW^2 + 2W\bar{v}\bar{w} + V\bar{w}^2 + \bar{v}\bar{w}^2}{U^2} \right) + B_{13} \left(\frac{W^3 + 3W\bar{w}^2 + \bar{w}^3}{U^3} \right) \\
& + O(u_i^4/U^3)
\end{aligned} \tag{3.19}$$

Bu denklemde kullanılan B_i katsayıları Çizelge 3.1’de verilmiştir:

Çizelge 3.1 : Etkin hız denklemindeki katsayılar (B_i)

B_i	Değeri
B_1	$A_1^{1/2}$
B_2	$\frac{A_4}{2A_1^{1/2}} = A_4/2B_1$
B_3	$\frac{A_5}{2A_1^{1/2}} = A_5/2B_1$
B_4	$\frac{A_2}{2A_1^{1/2}} - \frac{A_4^2}{8A_1^{3/2}} = (A_2 - B_2^2)/2B_1$
B_5	$\frac{A_3}{2A_1^{1/2}} - \frac{A_5^2}{8A_1^{3/2}} = (A_3 - B_3^2)/2B_1$
B_6	$\frac{A_6}{2A_1^{1/2}} - \frac{2A_4A_5}{8A_1^{3/2}} = (A_6 - 2B_2B_3)/2B_1$
B_7	$-\frac{A_4^2}{4A_1^{3/2}} - \frac{A_2}{2A_1^{1/2}} + \frac{A_4^2}{8A_1^{3/2}} + \frac{A_4^2}{4A_1^{3/2}} = \frac{A_4^2}{8A_1^{3/2}} - \frac{A_2}{2A_1^{1/2}} = -B_4$
B_8	$-\frac{A_5^2}{4A_1^{3/2}} - \frac{A_3}{2A_1^{1/2}} + \frac{A_5^2}{8A_1^{3/2}} + \frac{A_5^2}{4A_1^{3/2}} = \frac{A_5^2}{8A_1^{3/2}} - \frac{A_3}{2A_1^{1/2}} = -B_5$
B_9	$-\frac{A_6}{2A_1^{1/2}} - \frac{A_4A_5}{2A_1^{3/2}} + \frac{3A_4A_5}{4A_1^{3/2}} = \frac{A_4A_5}{4A_1^{3/2}} - \frac{A_4A_5}{2A_1^{3/2}} = -B_6$
B_{10}	$-\frac{A_2A_4}{4A_1^{3/2}} + \frac{A_4^3}{16A_1^{5/2}} = -B_2B_4/B_1$

Çizelge 3.1 (Devam): Etkin hız denklemindeki katsayılar (B_i)

B_i	Değeri
B_{11}	$-\frac{A_2A_5}{4A_1^{3/2}} - \frac{A_4A_6}{4A_1^{3/2}} + \frac{3A_4^2A_5}{16A_1^{5/2}} = -(B_3B_4 + B_2B_6)/B_1$
B_{12}	$-\frac{A_3A_4}{A_1^{3/2}} - \frac{A_5A_6}{4A_1^{3/2}} + \frac{3A_4A_5^2}{16A_1^{5/2}} = -(B_2B_5 + B_3B_6)/B_1$
B_{13}	$-\frac{A_3A_5}{4A_1^{3/2}} + \frac{A_5^3}{16A_1^{5/2}} = -B_3B_5/B_1$

Etkin hızın çalkantı büyüklüğü v_{eff} ile gösterilirse, etkin hız (3.20) numaralı denklemde gösterildiği gibi yazılabilir:

$$V_{eff} = \overline{V_{eff}} + v_{eff} \quad (3.20)$$

Denklemin önce karesi, daha sonra ortalaması alınır, (3.21) numaralı denklemdeki şu ifade elde edilir:

$$\overline{V_{eff}^2} = \overline{(V_{eff})^2} + 2\overline{V_{eff}v_{eff}} + \overline{v_{eff}^2} \quad (3.21)$$

Etkin hız çalkantı değerinin ortalaması, $\overline{v_{eff}} = 0$ ve $\overline{(V_{eff})^2} = \overline{(V_{eff})^2}$ olduğuna göre, (3.21) numaralı denklem, (3.22) numaralı denklemdeki görülebileceği gibi yazılabilir:

$$\overline{V_{eff}^2} = \overline{(V_{eff})^2} + \overline{v_{eff}^2} \quad (3.22)$$

(3.22) numaralı denklemden, çalkantı değerinin karelerinin ortalaması, $\overline{v_{eff}^2}$, (3.23) numaralı denklemdeki gibi elde edilir:

$$\overline{v_{eff}^2} = \overline{V_{eff}^2} - \overline{(V_{eff})^2} \quad (3.23)$$

(3.15) ve Ek-B'deki etkin hız denklemleri, (3.17) numaralı denkleme uygulanıp, dördüncü merteye terimlerin ihmal edilmesi ile etkin çalkantı hızlarının karelerinin ortalaması, (3.24) numaralı denklemdeki gibi elde edilir:

$$\begin{aligned}
\overline{v_{eff}^2} = & U^2(A_1 - B_1^2) + V^2(A_2 - B_2^2 - 2B_1B_4) + W^2(A_3 - B_3^2 - 2B_1B_5) \\
& + UV(A_4 - 2B_1B_2) + UW(A_5 - 2B_1B_3) \\
& + VW(A_6 - 2B_1B_6 - 2B_2B_3) + \overline{u^2}A_1 + \overline{v^2}(A_2 - 2B_1B_4) \\
& + \overline{w^2}(A_3 - 2B_1B_5) + \overline{uv}A_4 + \overline{uw}A_5 + \overline{vw}(A_6 - 2B_1B_6) \\
& + \left(\frac{2V\overline{uv} + \overline{uv^2}}{U}\right)(-2B_1B_7) + \left(\frac{V\overline{uw} + W\overline{uv} + \overline{uvw}}{U}\right)(-2B_1B_9) \\
& + \left(\frac{2W\overline{uw} + \overline{uw^2}}{U}\right)(-2B_1B_8) + \frac{V^3}{U}(-2B_1B_{10} - 2B_2B_4) \\
& + \frac{V\overline{v^2}}{U}(-6B_1B_{10} - 2B_2B_4) + \frac{\overline{v^3}}{U}(-2B_1B_{10}) \\
& + \frac{V^2W}{U}(-2B_1B_{11} - 2B_2B_6 - 2B_3B_4) + \frac{V\overline{vw}}{U}(-4B_1B_{11} - 2B_2B_6) \\
& + \frac{W\overline{v^2}}{U}(-2B_1B_{11} - 2B_3B_4) + \frac{\overline{v^2}W}{U}(-2B_1B_{11}) \\
& + \frac{VW^2}{U}(-2B_1B_{12} - 2B_2B_5 - 2B_3B_6) + \frac{V\overline{w^2}}{U}(-2B_1B_{12} - 2B_2B_5) \\
& + \frac{W\overline{vw}}{U}(-4B_1B_{12} - 2B_3B_6) + \frac{\overline{vw^2}}{U}(-2B_1B_{12}) \\
& + \frac{W^3}{U}(-2B_1B_{13} - 2B_3B_5) + \frac{W\overline{w^2}}{U}(-2B_1B_{13} - 2B_3B_5) \\
& + \frac{\overline{w^3}}{U}(-2B_3B_5) \tag{3.24}
\end{aligned}$$

Sadeleştirmeler sonucu, terimler C_i katsayıları altında birleştirilirse yukarıdaki ifade, (3.25) numaralı denklemdeki gibi yazılabilir:

$$\begin{aligned}
\overline{v_{eff}^2} = & C_1\overline{u^2} + C_2\overline{v^2} + C_3\overline{w^2} + C_4\overline{uv} + C_5\overline{uw} + C_6\overline{vw} + C_7\left(\frac{2V\overline{uv} + \overline{uv^2}}{U}\right) \\
& + C_8\left(\frac{V\overline{uw} + W\overline{uv} + \overline{uvw}}{U}\right) + C_9\left(\frac{2W\overline{uw} + \overline{uw^2}}{U}\right) \\
& + C_{10}\left(\frac{2V\overline{v^2} + \overline{v^3}}{U}\right) + C_{11}\frac{V\overline{vw}}{U} + C_{12}\frac{W\overline{v^2}}{U} + C_{13}\frac{\overline{v^2}W}{U} + C_{14}\frac{V\overline{w^2}}{U} \\
& + C_{15}\frac{W\overline{vw}}{U} + C_{16}\frac{\overline{vw^2}}{U} + C_{17}\left(\frac{W\overline{w^2} + \overline{w^3}}{U}\right) \tag{3.25}
\end{aligned}$$

C_i katsayıları, Çizelge 3.2’de verilmiştir:

Çizelge 3.2 : Etkin çalkantı denklemindeki katsayılar (C_i)

C_i	Değeri
C_1	A_1
C_2	B_2^2
C_3	B_3^2
C_4	A_4
C_5	A_5
C_6	$2B_2B_3$
C_7	$2B_1B_4$
C_8	$2B_1B_6$
C_9	$2B_1B_5$
C_{10}	$2B_2B_4$
C_{11}	$2B_2B_6 + 4B_3B_4$
C_{12}	$2B_2B_6$
C_{13}	$2B_2B_6 + 2B_3B_4$
C_{14}	$2B_3B_6$
C_{15}	$2B_3B_6 + 4B_2B_5$
C_{16}	$2B_3B_6 + 2B_2B_5$
C_{17}	$2B_3B_5$

Böylelikle etkin ortalama hız ve etkin çalkantı hızı değerleri, sabit koordinat sistemine göre akışkan hızı, sıcak telin açısıl konumu ve duyarlılık katsayıları cinsinden elde edilmiş olur.

3.3 Etkin Hızdan Sabit Eksen Takımındaki Hız Vektörlerine Geçiş

Denklemlerinin Çıkarılması

Buresti ve Di Cocco (1987) yayınladıkları çalışmada tek telli sıcak tel ölçümlerinden elde edilen etkin hızların sabit bir eksen takımına göre olan hız vektörlerine nasıl dönüştürülebileceği konusu üzerinde çalışmışlardır. Bu tez çalışmasında da Buresti ve Di Cocco'nun kullandıkları yöntemler incelenerek deneylerde uygulaması yapılmıştır. Bu çalışmada prob açıları Çizelge 3.3'teki gibi tanımlanmıştır. Çizelge 3.3'te verilen oryantasyonlar, 3.2 numaralı bölümde etkin ortalama hızı veren (3.19) numaralı denklem ile etkin çalkantı hızı veren (3.25) numaralı denklemlerde, istenilen terimlerin birbirini götürmesiyle sabit eksen takımındaki üç boyutlu hız vektörlerinin lineer denklemler yardımıyla hesaplanmasını sağlamak üzere seçilmiştir.

Verilen prob açılara göre, (3.19) ve (3.25) numaralı denklemlerde kullanılan katsayıların değerleri Ek-A'da verilmiştir. Bu prob açıları ile üç eksendeki hız vektörleri, üç eksendeki türbülans değerleri ve Reynolds gerilmeleri farklı yöntemlerle hesaplanabilir.

Çizelge 3.3 : Deneyde kullanılan açısal konumlar [derece]

	α	β	γ
<i>a</i>	45	0	0
<i>b</i>	135	0	0
<i>c</i>	45	0	45
<i>d</i>	135	0	45
<i>e</i>	45	0	-45
<i>f</i>	135	0	-45
<i>g</i>	45	0	90
<i>h</i>	135	0	90
<i>m</i>	45	90	0
<i>n</i>	135	90	0
<i>o</i>	90	0	0
<i>o'</i>	45	90	-45

Bu çalışmada kullanılan prob açıları, *a*, *b*, *c*, *d*, *e*, *f* ve *o* konumlarıdır. Bu konumlar, prob ayakları, prob desteği, motor ve dönme mekanizmasının akım alanını en az düzeyde etkilemesini sağlayacak şekilde seçilmiştir. Bu konumlardaki etkin hız ve etkin çalkantı değerlerinden, sabit eksen takımına göre üç eksendeki hız, çalkantı ve Reynolds gerilmelerine geçiş denklemleri (3.26) – (3.34) numaralı denklemlerde verilmiştir.

$$\begin{aligned}
 U &= \frac{1}{B_1^c} \left(\frac{\bar{Q}_c + \bar{Q}_d + \bar{Q}_e + \bar{Q}_f}{4} + O \left(\frac{u_i^2}{U} \right) \right) \\
 O \left(\frac{u_i^2}{U} \right) &= -B_4^c \left(\frac{V^2 + \bar{v}^2}{U} \right) - B_5^c \left(\frac{W^2 + \bar{w}^2}{U} \right) - B_7^c \left(\frac{2V\bar{u}\bar{v} + \bar{u}\bar{v}^2}{U^2} \right) \\
 &\quad - B_8^c \left(\frac{2W\bar{u}\bar{w} + \bar{u}\bar{w}^2}{U^2} \right)
 \end{aligned} \tag{3.26}$$

$$\begin{aligned}
 V &= \frac{1}{B_2^c} \left(\frac{\bar{Q}_c - \bar{Q}_d + \bar{Q}_e - \bar{Q}_f}{4} + O \left(\frac{u_i^3}{U^2} \right) \right) \\
 O \left(\frac{u_i^2}{U} \right) &= -B_{10}^c \left(\frac{V^3 + 3V\bar{v}^2 + \bar{v}^3}{U^2} \right) - B_{12}^c \left(\frac{W^2V + 2W\bar{v}\bar{w} + V\bar{w}^2 + \bar{v}\bar{w}^2}{U^2} \right)
 \end{aligned} \tag{3.27}$$

$$\begin{aligned}
W &= \frac{1}{B_3^c} \left(\frac{\bar{Q}_c + \bar{Q}_d - \bar{Q}_e - \bar{Q}_f}{4} + o\left(\frac{u_i^3}{U^2}\right) \right) \\
o\left(\frac{u_i^2}{U}\right) &= -B_{11}^c \left(\frac{V^2 W + 2V\bar{v}\bar{w} + W\bar{v}^2 + \bar{v}^2 \bar{w}}{U^2} \right) \\
&\quad - B_{13}^c \left(\frac{W^3 + 3W\bar{w}^2 + \bar{w}^3}{U^2} \right)
\end{aligned} \tag{3.28}$$

$$\begin{aligned}
\bar{u}^2 &= \frac{1}{C_1^o} \left(\bar{q}_0^2 + o\left(\frac{u_i^3}{U}\right) \right) \\
o\left(\frac{u_i^3}{U}\right) &= -C_7^o \left(\frac{2V\bar{u}\bar{v} + \bar{u}\bar{v}^2}{U} \right) - C_9^o \left(\frac{2W\bar{u}\bar{w} + \bar{u}\bar{w}^2}{U} \right)
\end{aligned} \tag{3.29}$$

$$\begin{aligned}
\bar{u}\bar{v} &= \frac{1}{C_4^c} \left(\frac{\bar{q}_c^2 - \bar{q}_d^2 + \bar{q}_e^2 - \bar{q}_f^2}{4} + o\left(\frac{u_i^3}{U}\right) \right) \\
o\left(\frac{u_i^3}{U}\right) &= -C_{10}^c \left(\frac{2V\bar{v}^2 + \bar{v}^3}{U} \right) - C_{14}^c \frac{V\bar{w}^2}{U} - C_{15}^c \frac{W\bar{v}\bar{w}}{U} - C_{16}^c \frac{\bar{v}\bar{w}^2}{U}
\end{aligned} \tag{3.30}$$

$$\begin{aligned}
\bar{u}\bar{w} &= \frac{1}{C_5^c} \left(\frac{\bar{q}_c^2 + \bar{q}_d^2 - \bar{q}_e^2 - \bar{q}_f^2}{4} + o\left(\frac{u_i^3}{U}\right) \right) \\
o\left(\frac{u_i^3}{U}\right) &= -C_{11}^c \frac{V\bar{v}\bar{w}}{U} - C_{12}^c \frac{W\bar{v}^2}{U} - C_{13}^c \frac{\bar{v}^2 \bar{w}}{U} - C_{17}^c \left(\frac{2W\bar{w}^2 + \bar{w}^3}{U} \right)
\end{aligned} \tag{3.31}$$

$$\begin{aligned}
\bar{v}^2 &= \frac{1}{C_2^a} \left(\frac{\bar{q}_a^2 + \bar{q}_b^2}{2} - C_1^a \bar{u}^2 + o\left(\frac{u_i^3}{U}\right) \right) \\
o\left(\frac{u_i^3}{U}\right) &= -C_7^a \left(\frac{2V\bar{u}\bar{v} + \bar{u}\bar{v}^2}{U} \right) - C_9^a \left(\frac{2W\bar{u}\bar{w} + \bar{u}\bar{w}^2}{U} \right)
\end{aligned} \tag{3.32}$$

$$\overline{vw} = \frac{1}{C_6^c} \left(\frac{\overline{q_c^2} - \overline{q_d^2} - \overline{q_e^2} + \overline{q_f^2}}{4} + o\left(\frac{u_i^3}{U}\right) \right) \quad (3.33)$$

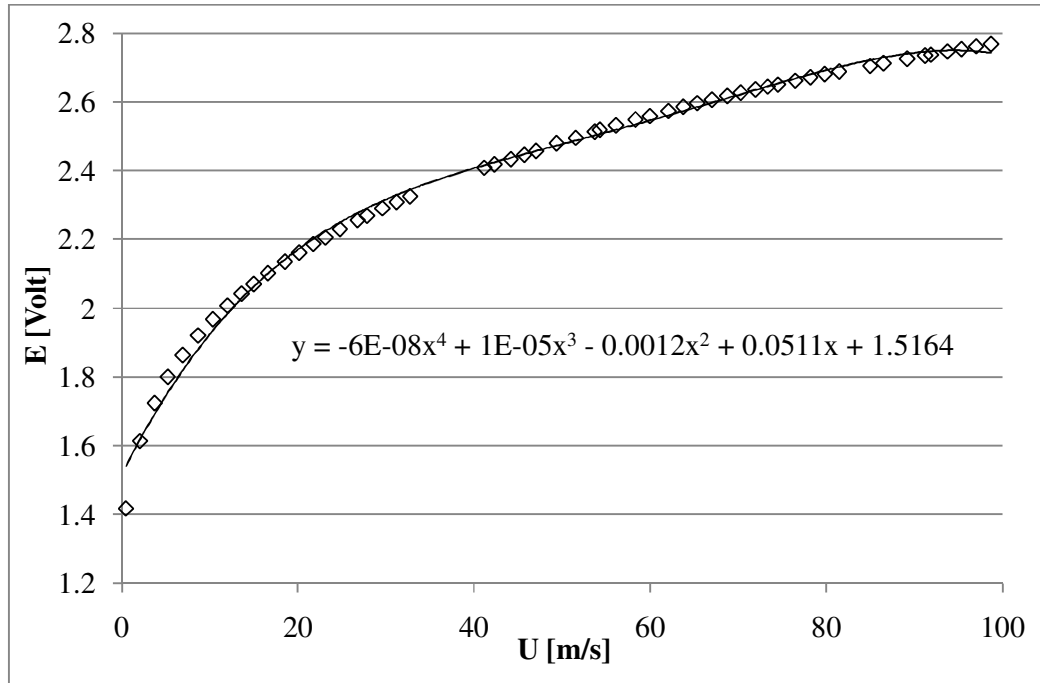
$$o\left(\frac{u_i^3}{U}\right) = -C_8^c \left(\frac{V\overline{uw} - W\overline{uv} + \overline{uvw}}{U} \right)$$

$$\overline{w^2} = \frac{1}{C_3^c} \left(\frac{\overline{q_c^2} + \overline{q_d^2} + \overline{q_e^2} + \overline{q_f^2}}{4} - C_1^c \overline{u^2} - C_2^c \overline{v^2} + o\left(\frac{u_i^3}{U}\right) \right) \quad (3.34)$$

$$o\left(\frac{u_i^3}{U}\right) = -C_7^c \left(\frac{2V\overline{uv} + \overline{uv^2}}{U} \right) - C_9^c \left(\frac{2W\overline{uw} + \overline{uw^2}}{U} \right)$$

3.4 Kalibrasyon

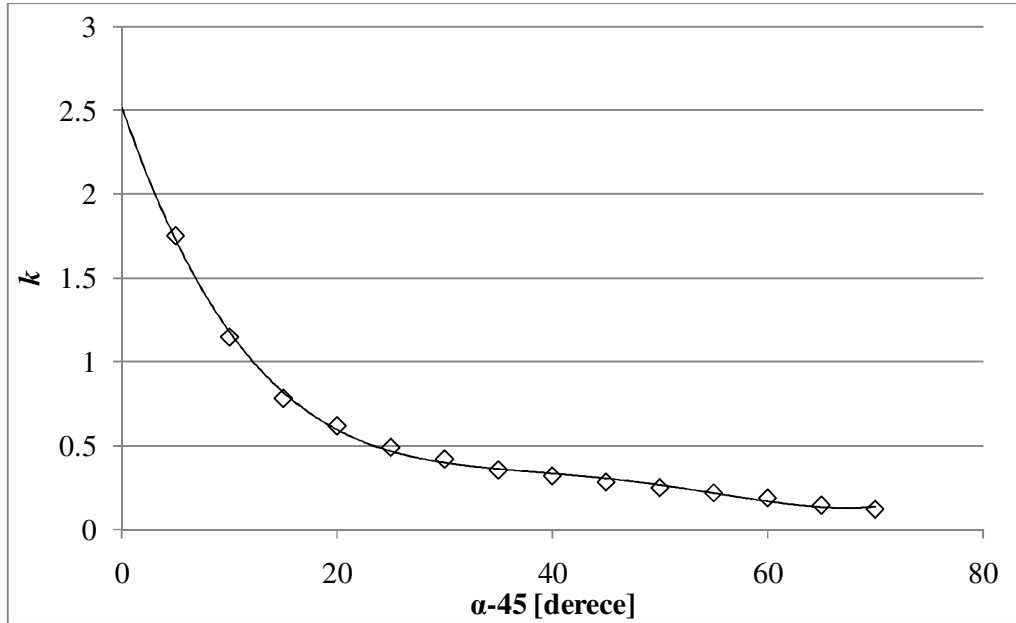
Kalibrasyon ünitesi ile sıcak tel ünitesinden elde edilen voltaj verisi ile etki hız büyüklüğü arasında bir fonksiyon oluşturulmuştur. Kalibrasyon ünitesi ile belirli bir hız aralığında istenilen aralıklarla jet çıkış hızı değiştirilerek sıcak tel ünitesinden elde edilen veri kaydedilir.



Şekil 3.4: Kalibrasyon eğrisi

Kalibrasyon yapılırken ortam sıcaklığına dikkat edilir. Elde edilen veri ortam sıcaklığına doğrudan bağlıdır. Bu kalibrasyon işlemi öncelikle hız vektörünün büyüklüğünün belirlenmesi için yapılmıştır. Kalibrasyon iki aşamada yapılmıştır. İlki 0.5-50 m/s hız aralığında, ikincisi ise 50-100 m/s hız aralığında yapılmıştır. Daha sonra bu iki kalibrasyon verisi birleştirilerek, elde edilen veriye dördüncü mertebeden polinom denklemi uydurulmuştur. Bu şekilde ortam sıcaklığının 20°C olduğu durumda elde edilen kalibrasyon eğrisi Şekil 3.4'te verilmiştir. Kalibrasyon eğrisi ile deneysel veriler arasındaki en büyük sapma oranı %0.8'dir.

Sıcak tele ait duyarlılık katsayıları h ve k 'nın belirlenmesi için kalibrasyon yapılmıştır. Duyarlılık katsayıları için yapılan kalibrasyonda jet hızı sabit tutularak, bu katsayıların açısız konuma göre değişimleri incelenmiştir. Teğetsel doğrultudaki k duyarlılık katsayısının açısız konuma göre (α değişkenine göre) değişimi belirlenirken $\gamma = 0$, prob ayaklarına dik doğrultudaki duyarlılık katsayısı olan h 'ın açısız konuma göre (γ değişkenine göre) değişimi belirlenirken ise $\gamma = 0$ alınmıştır. Dolayısıyla bu iki yöndeki katsayının birbirini etkilemesinin önüne geçilmiştir. Teğetsel doğrultudaki k duyarlılık katsayısının α açısı ile değişimi Şekil 3.5'te verilmiştir.

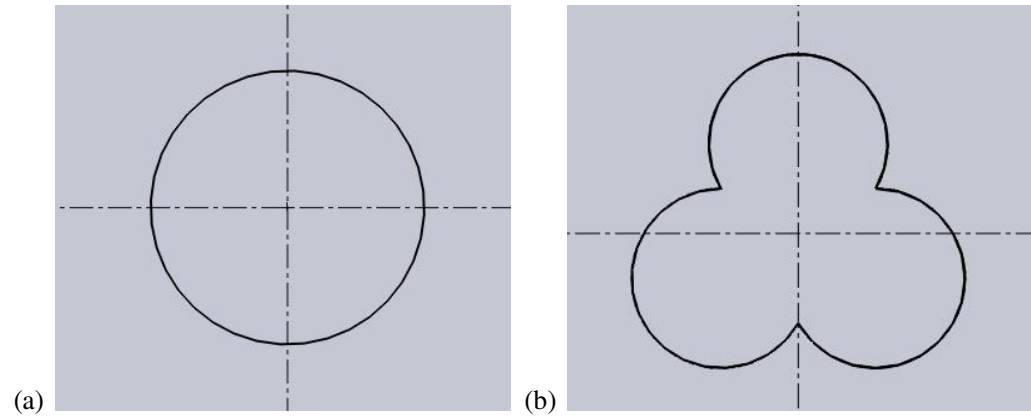


Şekil 3.5: k duyarlılık katsayısının açısız değişimi

Prob ayaklarına dik soğurtudaki duyarlılık katsayısı olan h 'ın γ açısına göre değişimi incelenmesi sonucu, h değerinin γ açısının değişimi ile birlikte önemli bir değişim göstermediği gözlemlenmiştir. Bunun sonucu olarak çalışmada $h=1.05$ olarak alınmıştır.

3.5 Deneyde Kullanılan Jet Türleri

Deneyde iki farklı çıkış kesitine sahip lüle, jet oluşturmak için kullanılmıştır. Bunlardan ilki dairesel çıkış kesitine sahip lüledir. İkincisi ise, merkezleri bir eşkenar üçgenin köşelerine yerleştirilmiş dairelerin kesişimi ile oluşturulmuş, şekli itibarıyla “yonca”ya benzeyen çıkış kesitine sahip lüledir (Bu lüle ileriki bölümlerde yonca kesitli lüle olarak adlandırılacaktır.). Bu iki farklı geometrik yapıya sahip lülelerin çıkış kesitleri Şekil 3.6’da verilmiştir. Her iki lüleninde giriş ve çıkış kesit alanları birbirlerine eşittir. Lülelerin çıkıştaki eşdeğer çapları, D_e , 20 mm’dir.



Şekil 3.6: Lüle çıkış kesitleri (a)Dairesel (b)Yonca

3.6 Diğer Deneysel Çalışma Özellikleri

Deneysel çalışmada, konumu boyutsuzlaştırmak için jet çıkış kesitinin eşdeğer çapı, D_e , kullanılmıştır. Örneğin çalışmada, ölçüm yapılacak istasyonlar D_e cinsinden ifade edilmiştir.

Deneysel veriler jet önünde üç istasyonda alınmıştır. Bu istasyonlar, yapılan ön sayısal çalışmalardan elde edilen sonuçlara göre seçilmiştir: jet çıkışından itibaren $2D_e$, $5D_e$ ve $10D_e$ uzaklıklarda ölçümler yapılmıştır.

Bu istasyonlarda kullanılan travers ağlarının boyutları ve noktasal aralıkları birbirinden farklıdır. Ağ alanı jet yakın bölgesinde küçük iken, uzak bölgede daha büyük alınmıştır. Bu ağların özellikleri Çizelge 3.4'te verilmiştir.

Çizelge 3.4 : Travers ağları

Jet türü	İstasyon	noktasal aralık [mm]	ağ büyüklüğü [adet x adet]	Taranan Alan [mm ²]
Dairesel	2D _e	2	19 x 19	1296
	5D _e	3	17 x 17	2304
	10D _e	5	15 x 15	4900
Yonca	2D _e	2	21 x 21	1600
	5D _e	3	19 x 19	2916
	10D _e	5	17 x 17	6400

4. SAYISAL YÖNTEM

Bu bölümde akım alanının, hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemleriyle modellenmesi amaçlanmıştır. Akım alanı öncelikle geometrik olarak modellenmiş, daha sonra bu akım alanı üzerinde sayısal çözüm ağı oluşturulmuştur. Oluşturulan çözüm ağına, fiziksel sınır ve başlangıç koşullarıyla birlikte istenilen yönetsel denklemler uygulanıp sayısal verilere ulaşılmıştır.

Geometrik model CATIA V5R20 programında oluşturulmuştur. Geometrik model IGES formatı kullanılarak, çözüm ağı oluşturulacak program olan GAMBIT V2.3.16 programına aktarılmıştır. Burada istenilen özelliklerdeki çözüm ağı oluşturulup, FLUENT V6.3 yazılımına aktarılmıştır. Burada fiziksel akım özellikleri, sınır ve başlangıç koşulları tanımlanmış, bununla birlikte çözücü yapılandırılmıştır.

4.1 Yönetsel Denklemler

Çalışmada, sayısal çözüm için kullanılan yönetsel denklemler süreklilik ve momentum denklemleridir. Bu iki denklemin genel halleri diferansiyel formda, sırasıyla (4.1) ve (4.2) numaralı denklemlerde verilmiştir.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j) = s_m \quad (4.1)$$

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j u_i - \tau_{ij}) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + F + s_i \quad (4.2)$$

Bu denklemlerde ρ yoğunluğu, x_i eksenini, u_i bu eksenindeki hızı, p basıncı, s_m ise kaynak terimi ifade etmektedir. Süreklilik denklemini ifade eden (4.1) numaralı denkleminde, akım alanına herhangi bir kütle geçişi olmadığından kaynak terim sıfırdır. Momentum denkleminde ise yerçekimi ivmesi bünye kuvveti olarak etkilediğinden bu terim $-F$ eklenmiştir.

Sayısal çalışmada akışkan hızları akım alanının tamamında 0.3 Mach'ın altında kaldığından dolayı problem sıkıştırılmaz akım problemine indirgenmiştir. Dolayısıyla yoğunluk zamandan ve mekandan bağımsız kabul edilmiştir. Akım alanına herhangi bir ısı geçişi olmadığı için, ayrıca herhangi bir sıcaklık değişiminin gerçekleşmediği varsayımına dayanarak problemin sayısal çözümüne enerji denklemi dahil edilmemiştir.

4.2 Türbülans Modeli

Çalışmada türbülansı modellemek için Realizable k - ε türbülans modeli kullanılmıştır. Bu türbülans modeli ilk kez Launder ve Palding (1972) tarafından ortaya konmuş olan standart k - ε türbülans modelinin geliştirilmiş şeklidir. Bu türbülans modeli Shih ve arkadaşları (1995) tarafından oluşturulmuştur. Bu model iki adet denklemin çözümünü gerektirmektedir. Bunlardan ilki türbülans kinetik enerjisi k 'yı veren (4.3) numaralı denklemdir. İkincisi ise bu enerjinin yayılma (dissipation) hızını veren (4.4) numaralı denklemdir.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (4.3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \varepsilon u_j) \\ = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_{1\varepsilon} S_\varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} \\ + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b + S_\varepsilon \end{aligned} \quad (4.4)$$

Bu denklemlerde, μ dinamik viskoziteyi, μ_t türbülans (eddy) viskozitesini, G_k ortalama hız gradyanları tarafından üretilen türbülans kinetik enerjisini, G_m kaldırma kuvveti nedeniyle oluşan türbülans kinetik enerjisini, Y_M sıkıştırılabilir türbülanstaki çalkantı genişmesinin türbülans kinetik enerjisi dağılma hızına katkısını, $C_{1\varepsilon}$ ve C_2 deneysel sabitleri, σ_k ve σ_ε sırasıyla k ve ε için Prandtl sayılarını, S_ε ve S_k kaynak terimleri ifade etmektedir. k için transport denklemini veren (4.3) numaralı denklemden Y_M terimi akım sıkıştırılabilir olduğu için sıfırdır.

Türbülans viskozitesi (4.5) numaralı denklemden tanımlanır:

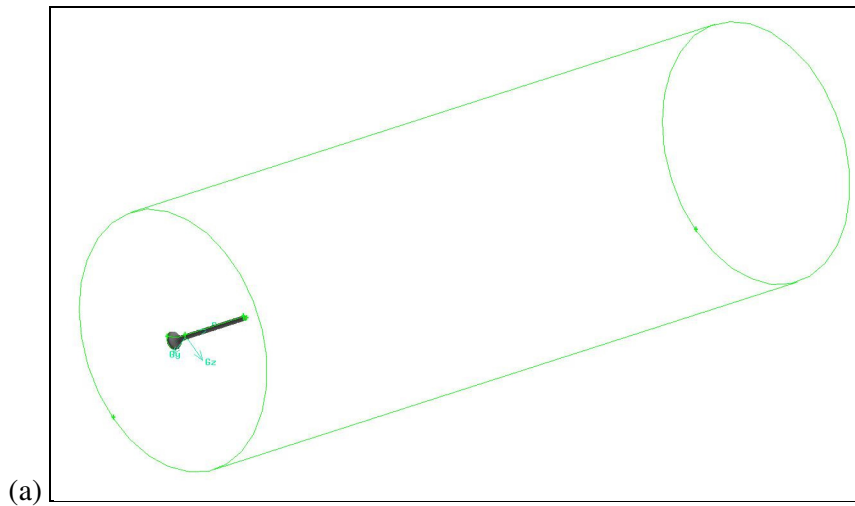
$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (4.5)$$

Standart $k-\varepsilon$ türbülans modelinde bir sabit olan C_μ , Realizable $k-\varepsilon$ türbülans modelinde ise değişkendir (Shih vd., 1995).

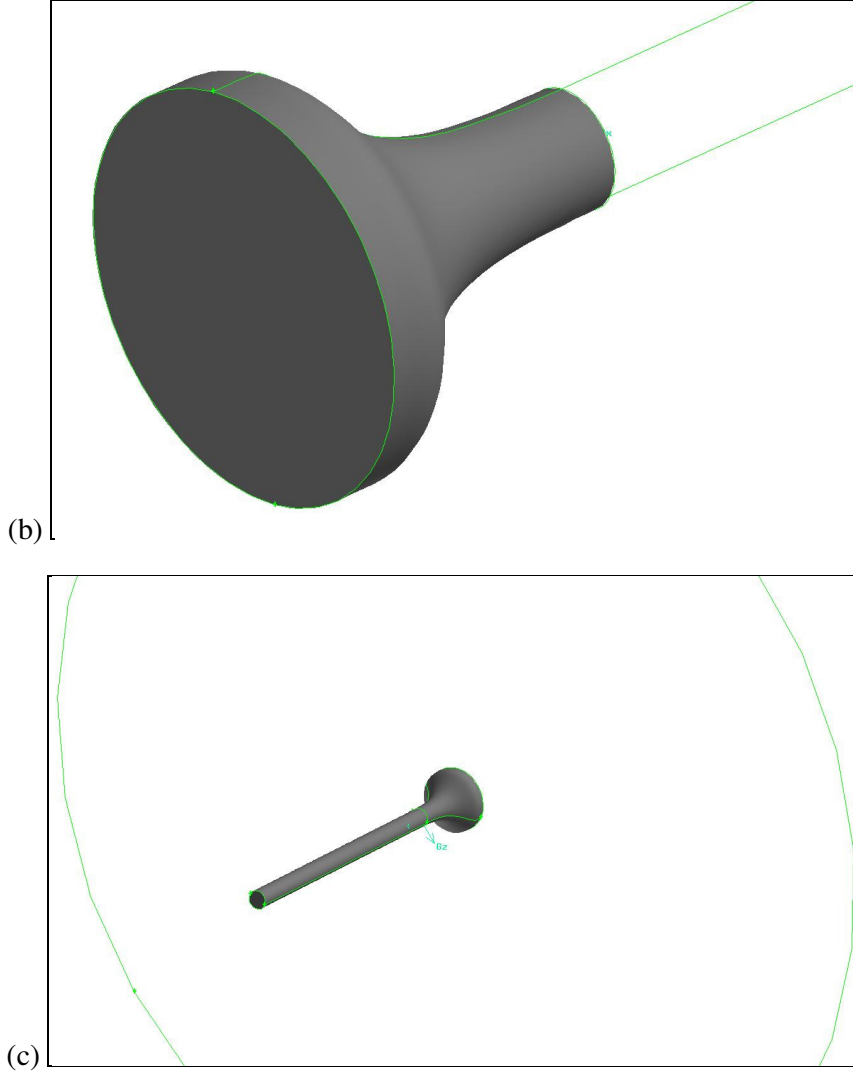
Kullanılan bu türbülans modeli bir çok çalışmada, jet akışları için doğrulanmıştır (Shih vd., 1995, Kim vd., 1997).

4.3 Geometrik Model ve özüm Ağı

Akım alanının özelliklerinde en büyük etkiyi oluşturan lüle geometrisi CATIA V5R20 programında çizilmiştir. Çizilen lüle geometrisi IGES formatında GAMBIT yazılımına aktarılmıştır. Burada lüle etrafına akım alanını temsil edecek 1 m çapında ve 3 m uzunluğunda bir silindir oluşturulmuştur. Lüle geometrisi ile jet çıkışından itibaren $20D_e$ uzaklığında kalan bölge daha yoğun bir çözüm ağı oluşturmaya üzere bu silindirden ayrılaştırılmıştır. Bu ayrık bölge, jet etkisinin akım alanının diğer bölgelerine göre daha fazla olduğu bölgeyi ifade etmektedir. Geometrik model oluşturulurken, deneysel çalışmada kullanılan travers mekanizması, prob ve prob desteğinin akım alanına etkisi ihmal edildiğinden geometrik olarak modellenmemiştir. Akım alanını temsil eden geometrik model şekil 4.1'de verilmiştir. şekil 4.1.b'de görülen gri renkli geometri lüleyi temsil etmektedir. Lüle giriş kesiti dairesel olup bu dairenin çapı 70 mm'dir. ıkış kesidinin eşdeğer çapı ise 20 mm'dir. Lülenin önündeki çıkış kesitinin uzatılması ile oluşturulmuş kısım ise çözüm ağının yoğun olarak oluştulacağı jet eksenini doğrultusundaki bölgeyi ifade etmektedir (şekil 4.1.c).



şekil 4.1: Akım alanının geometrik modeli.



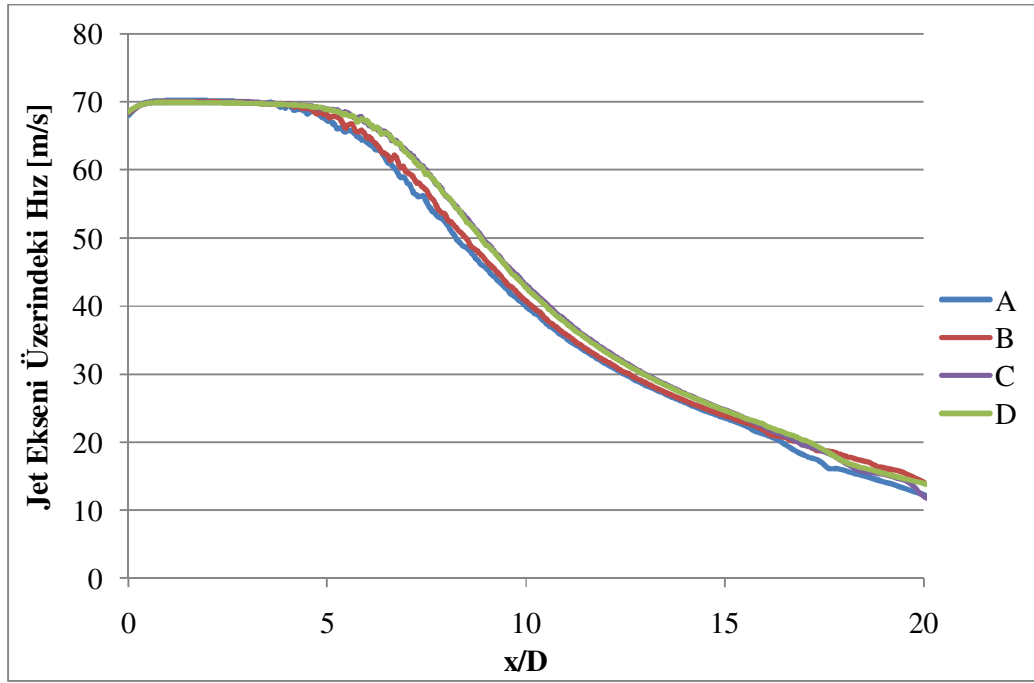
Şekil 4.1 (Devam): Akım alanının geometrik modeli

Geometrik model üzerinde farklı eleman sayısına sahip çözüm ağları oluşturulmuştur. Bu çözüm ağları Çizelge 4.1'de verilmiştir. Bu çizelgede, farklı yoğunluktaki çözüm ağlarının oluşturulmasında kullanılan, eleman büyüklüğünü belirleyen fonksiyonlar için, başlangıç büyüklüğü, büyüme oranı ve maksimum eleman büyüklüğü verilmiştir. Bu fonksiyonun başlangıç yüzeyleri lüle duvarları ile jet çıkışı önünde $20D_e$ uzunluğundaki bölgeyi sınırlandıran yüzeylerdir. Bu yüzeylerden iç hacime doğru verilen büyüme oranı ile çözüm ağı seyrekleşir. Ayrıca tüm çözüm ağları için, dış hacime doğru da başlangıç büyüklükleri Çizelge 4.1'deki ile aynı olan fakat, büyüme oranı 2 maksimum eleman büyüklüğü 100 mm olan fonksiyonlar kullanılmıştır. Çözüm ağlarındaki eleman sayısı giderek artırılarak sayısal sonuçların çözüm ağından bağımsız olduğu eleman sayısı belirlenmiştir. Bu belirleme jet eksenindeki hız vektörü büyüklüğünün farklı eleman sayısındaki

çözüm ağlarına göre değişimine bakılarak yapılmıştır. Bu incelemenin sonucu Şekil 4.2’de verilmiştir. Oluşturulan çözüm ağlarının hepsinde, lüle geometrisinin karmaşık yapısı nedeniyle altı yüzlü elemanlar kullanılamamıştır; bu nedenle çözüm ağları, dört-yüzlü (tetrahedral) elemanlardan oluşmaktadır.

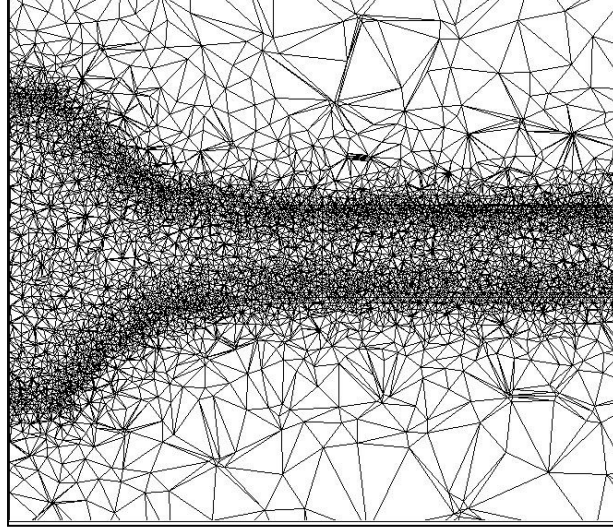
Çizelge 4.1 : Çözüm ağında kullanılan eleman büyüklük fonksiyonu özellikleri

Çözüm Ağı	Başlangıç büyüklüğü	Büyüme oranı	Maksimum büyüklük	Eleman sayısı
A	3	1.2	5	107431
B	2	1.2	4	270739
C	1.5	1.2	3	437100
D	1	1.2	2	811175



Şekil 4.2: Çözüm ağındaki eleman sayısına göre jet eksenindeki hız dağılımları Şekil 4.2’de görüldüğü üzere C ve D durumlarında, jet eksenindeki hız vektörü büyüklüklerinde önemli bir farklılık oluşmamıştır. Bu nedenle 437100 elemana sahip C çözüm ağı tüm farklı durumlar için kullanılmak üzere seçilmiştir.

Seçilen bu çözüm ağı, jet yakın bölgesinin daha iyi görülebileceği yakınlıkta ve jet eksenindeki bir kesit alınarak Şekil 4.3’te verilmiştir.



Şekil 4.3: Seçilen çözüm ağı: 437100 eleman

4.4 Sınır ve Başlangıç Koşulları

Lüle girişinde “basınç giriş” sınır koşulu verilmiştir. Farklı jet çıkış hızlarına ulaşmak ve farklı Reynolds sayılarını elde etmek için bu sınır şartı değiştirilmiş, lüle girişine değişik basınçlar uygulanmıştır. Farklı durumlar için uygulanan basınçlar, bunun sonucu jet çıkışında elde edilen hızın büyüklüğü Çizelge 4.2’de verilmiştir. Lüle duvarlarında ise hareketsiz duvar ve hızın sıfır olduğunu ifade eden “no-slip” sınır koşulu tanımlanmıştır. Lüle çıkışı, lüle önünde yoğun çözüm ağı için ayrılan bölgenin yüzeyleri için iç-yüzey sınır koşulu vererek, lüle ve önündeki bölge ile dış hacim arasında bağlantı kurulmuştur. Dış hacmin yüzeyleri ise standart atmosferik koşullar olarak tanımlanmıştır (basınç: 1 atm, sıcaklık: 20°C).

Başlangıç koşulları için, tüm akım alanına yine standart atmosferik koşullar uygulanmıştır.

Çizelge 4.2 : Denede kullanılan jet çıkış hızları

Durum	Lüle girişindeki basınç	Elde edilen çıkış hızı
1	551	30
2	1531	45
3	3001	65

4.5 Diğer Çözücü Özellikleri

Çözücüde hız-basınç eşleştirmesi için SIMPLEC (Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations - Consistent) algoritması kullanılmıştır (Vandormaal ve Raithby, 1984). Yönelimsel diferansiyel denklemler ikinci mertebeden terimleri içerecek şekilde ayrıştırılmıştır. Sayısal çözümler çift hassasiyetli olarak elde edilmiştir. Çözümün yakınsamasını gözlemek için iki pencere tanımlanmıştır. Bunlardan ilki, süreklilik, momentum ve türbülans denklemlerinin artık değerlerini (residuals) gösteren penceredir. Bununla birlikte, jet ekseninde hız vektör büyüklüğünün noktasal ortalamasını her iterasyon için gösterecek bir pencere hazırlanmıştır. Bu iki pencere birlikte gözlemlenerek, çözümün yakınsaması incelenmiştir.

5. DENEYSEL VE SAYISAL SONUÇLAR

Hem sayısal çalışmada hem de deneysel çalışmada üç eksenindeki ortalama hız, hız çalkantı değerleri ve Reynolds gerilme değerleri elde edilmiştir. Bu bölümde önce deneysel sonuçlar irdelenmiş, daha sonra ise sayısal sonuçlar incelenmiştir. Son aşamada bu iki yöntemle elde edilen veriler karşılaştırmalı olarak irdelenmiştir.

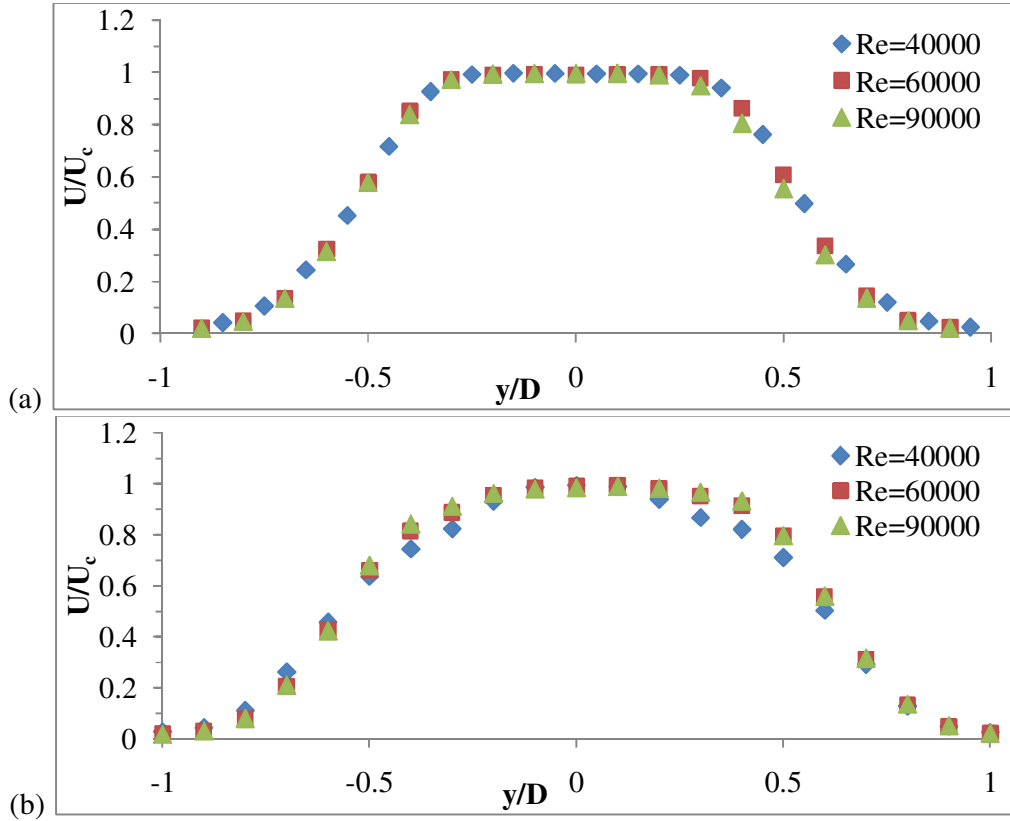
5.1 Deneysel Sonuçlar

Bölüm 3'te bahsedilen istasyonlarda yapılan ölçümler sonucu elde edilen veriler MS Excel ve MATLAB programları kullanılarak görselleştirilmiştir.

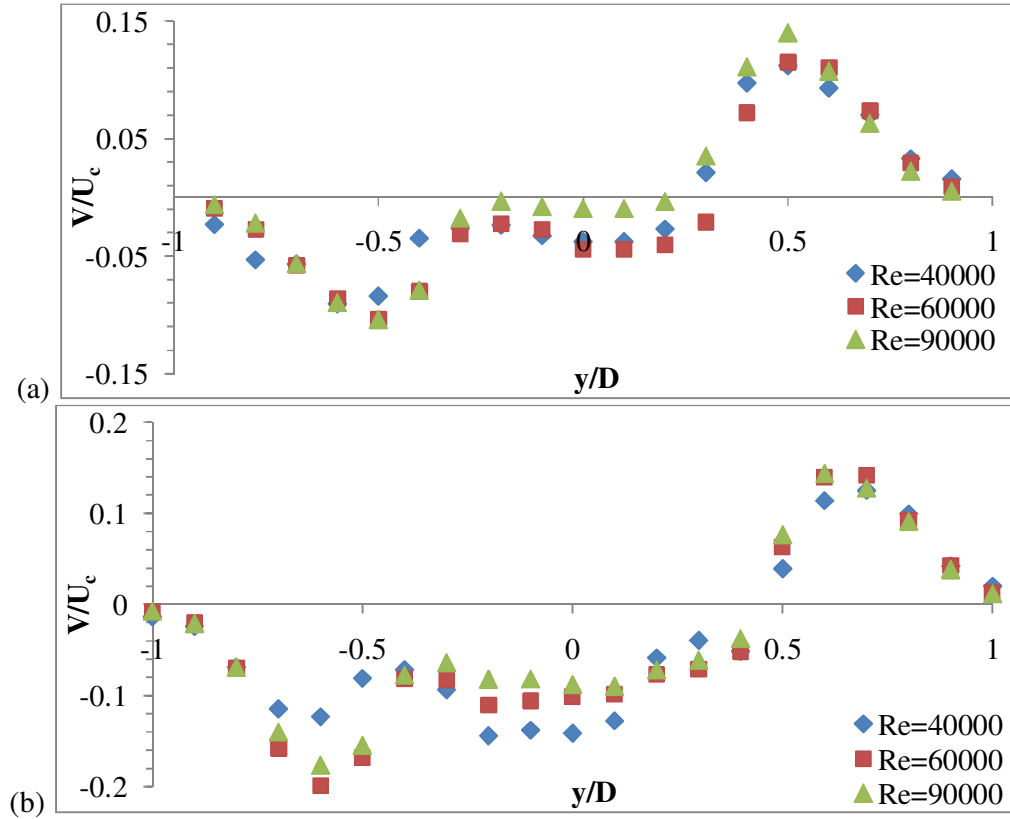
5.1-5.3 numaralı şekillerde, her iki çıkış kesitine sahip jet akım alanlarında $x=2D_e$ istasyonunda, hız vektörünün kartezyen koordinatlardaki bileşenlerinin ortalama değerlerinin Re sayısı ile değişimi verilmiştir. Bu şekillerde hız vektörü bileşenleri şeklin verildiği kesitte jet eksenindeki hız değeri ile, konum ise eşdeğer çap kullanılarak boyutsuzlaştırılmıştır.

Şekil 5.1-a'da dairesel jet için $x=2D_e$ istasyonunda hız vektörünün x eksenindeki bileşeni olan U 'nin Re sayısı ile değişmediği görülmektedir. Şekil 5.1-b'de ise yonca kesitli jet akımında Re=40000 için U hız bileşeninin Re=60000 ve Re=90000 durumlarına göre farklılık gösterdiği görülmektedir. U hız bileşeni Re=40000 için özellikle $0.2D_e-0.5D_e$ aralığında diğer Re sayılarına göre daha düşük değerlere ulaşmaktadır. 5.1-a ile 5.1-b'deki U hız bileşenleri birbirleri ile karşılaştırıldığında, dairesel kesitli jet için $x=2D_e$ istasyonunda hız profilinin, yonca kesitli jet akım alanındaki göre daha az yayıldığı görülmektedir.

Şekil 5.2-a'da dairesel jet için $x=2D_e$ istasyonunda hız vektörünün y eksenindeki bileşeni olan V 'nin Re sayısı ile değişmediği görülmektedir. V değerinin yatay eksenindeki (y eksenini) $\pm 0.5D_e$ konumlarında maksimum değere ulaştığı, $-0.3D_e$ ile $+0.3D_e$ arasında ise sifıra yakın değerlerde kaldığı görülmektedir.



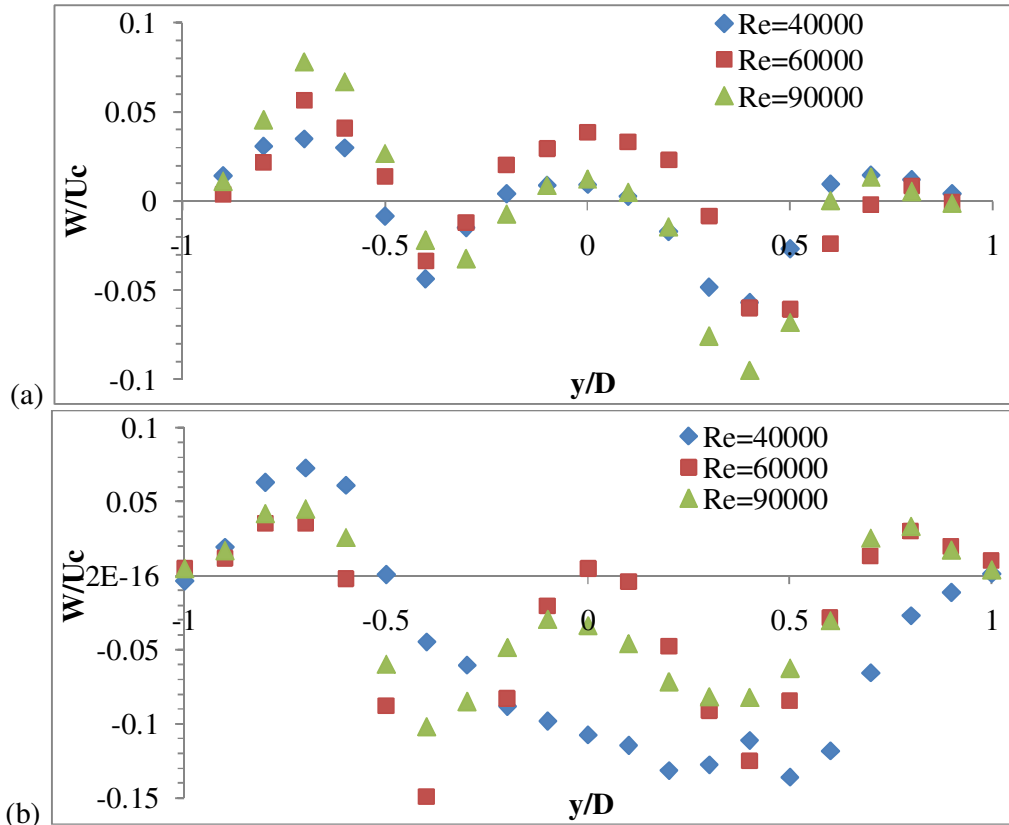
Şekil 5.1: $x=2D$ istasyonundaki boyutsuz U değerleri: (a) dairesel, (b) yonca



Şekil 5.2: $x=2D$ istasyonundaki boyutsuz V değerleri: (a) dairesel, (b) yonca

Şekil 5.2-b’de ise yonca kesitli jet akımında $Re=40000$ için V hız bileşeninin dağılımının $Re=60000$ ve $Re=90000$ durumlarına göre farklı olduğu (U hız bileşeni için olduğu gibi) görülmektedir. Her üç Re sayısı için V hız bileşeni $x=0.6D_e$ konumunda maksimum değerine ulaşırken, $Re=40000$ için maksimum değer diğer Re sayılarına göre daha düşük olduğu görülmektedir. V hız bileşeni için yatay eksendeki profilin diğer Re sayılarına göre daha farklı oluştuğu gözlemlenmektedir.

Şekil 5.3-a’da dairesel jet için $x=2D_e$ istasyonunda hız vektörünün z eksenindeki bileşeni olan W ’nin Re sayısı ile değişmediği görülmektedir. Şekil 5.3-b’de ise yonca kesitli jet akımında $Re=40000$ için W hız bileşeninin dağılımının $Re=60000$ ve $Re=90000$ durumlarına göre farklı olduğu anlaşılmaktadır. Her iki çıkış kesiti için W hız bileşenleri yatay ekseninde “dalgalı” bir profil oluşturmaktadır. W hız bileşeni değerlerinin yatay eksenindeki değerlerine bakıldığında daha önce incelenen V hız bileşenine göre daha düşük değerler aldığı görülmektedir. Bu durum dikey ekseninde incelendiğinde, ileriki bölümde (Bölüm 5.2) bahsedileceği üzere, tam tersinin gerçekleştiği, V hız bileşeninin daha düşük değerler aldığı görülmektedir.



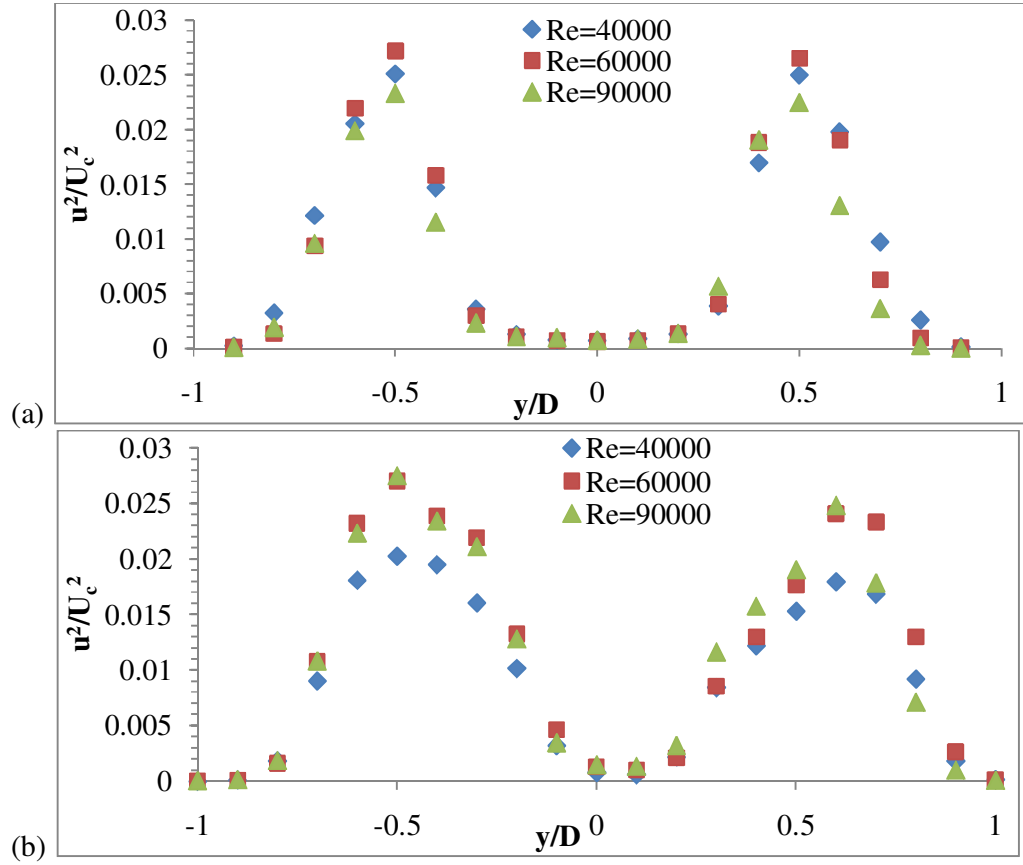
Şekil 5.3: $x=2D$ istasyonundaki boyutsuz W değerleri: (a) dairesel, (b) yonca

5.4-5.6 numaralı şekillerde $x=2D_e$ istasyonunda, üç eksenindeki hız için boyutsuz ortalama çalkantı değerleri verilmiştir. Çalkantı değerleri, bu istasyondaki jet eksenindeki hızın karesi ile (U_c^2) , konum ise eşdeğer çap kullanılarak boyutsuzlaştırılmıştır.

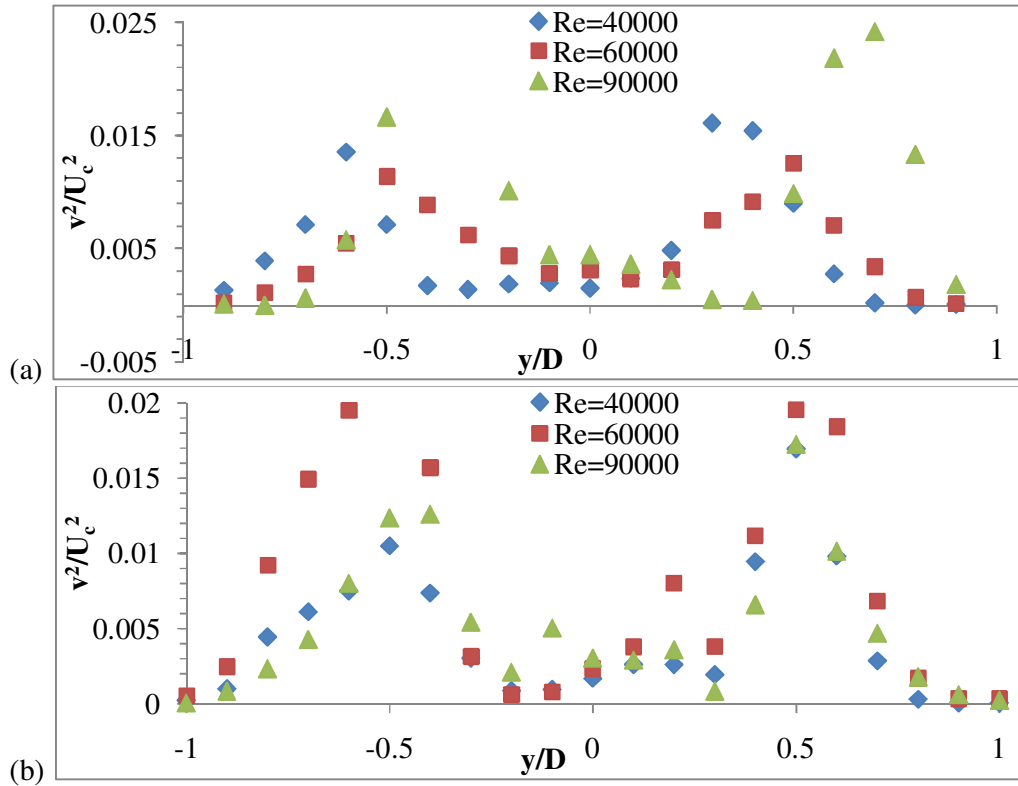
Şekil 5.4-a'da dairesel jet için $x=2D_e$ istasyonunda x eksenindeki hızın çalkantı değeri, $\overline{u^2}$, verilmiştir. Burada dairesel jet için yatay ekseninde $\overline{u^2}$ değerinin Re sayısı ile değişmediği görülmektedir. Şekil 5.4-b'de ise yonca kesitli jet akımında $Re=40000$ için $\overline{u^2}$ değerinin dağılımının $Re=60000$ ve $Re=90000$ durumlarına göre farklı olduğu anlaşılmaktadır. Her iki çıkış kesiti $\overline{u^2}$ değerinin $\pm 0.5D_e$ konumlarında maksimum değere ulaştığı görülmektedir. Ayrıca iki jet türünde de $\overline{u^2}$ değerinin merteye olarak birbirine çok yakın olduğu gözlemlenmektedir.

Şekil 5.5-a Şekil 5.5-b'de dairesel ve yonca kesitli jet için $x=2D_e$ istasyonunda y eksenindeki hızın çalkantı değeri, $\overline{v^2}$, verilmiştir. Burada her iki jet türü için yatay ekseninde $\overline{v^2}$ değerinin Re sayısı ile değiştiği görülmektedir. Her iki çıkış kesiti $\overline{v^2}$ değerinin yaklaşık olarak $\pm 0.5D_e$ konumlarında maksimum değere ulaştığı görülmektedir. Fakat $\overline{v^2}$ çalkantı değerlerinin Re sayısı ile değişimiyle birlikte, oluşan profillerin farklı olduğu görülmektedir. Bununla birlikte $\overline{v^2}$ çalkantı değerinin maksimum değerlerinin iki farklı jet türü açısından birbirine yakın olduğu anlaşılmaktadır.

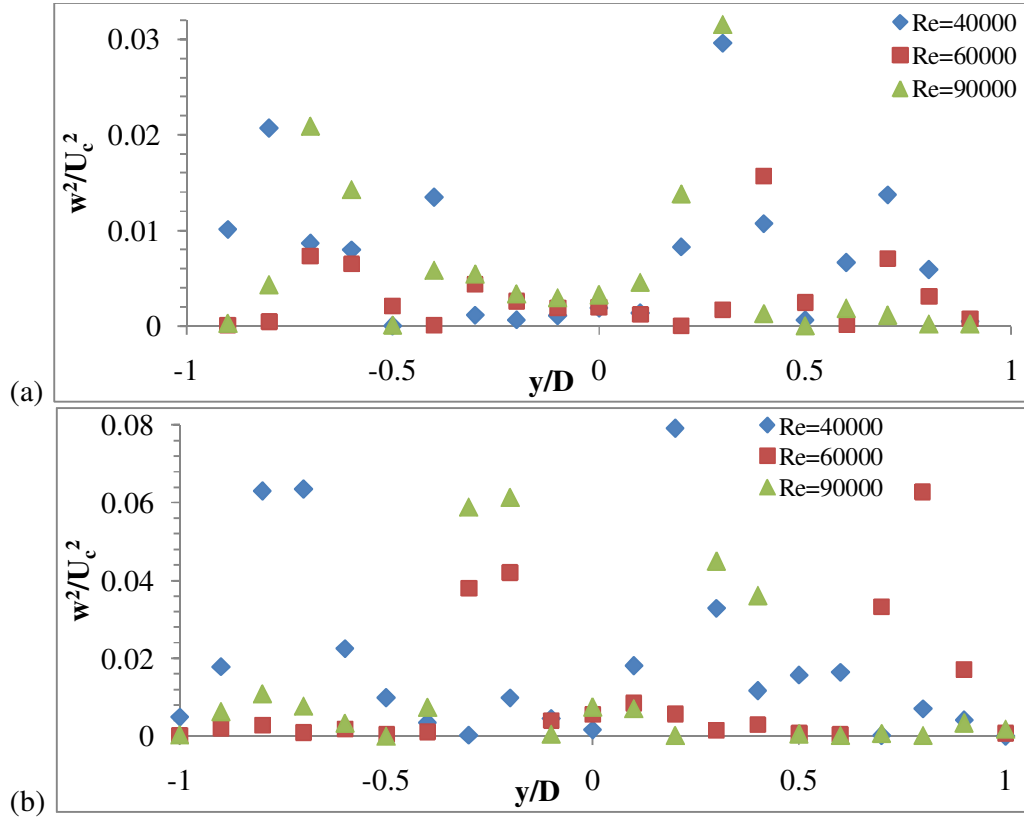
Şekil 5.6'da dairesel ve yonca kesitli jet için $x=2D_e$ istasyonunda w eksenindeki hızın çalkantı değeri, $\overline{w^2}$, verilmiştir. Burada her iki jet türü için yatay ekseninde $\overline{w^2}$ değerinin oluşturduğu profillerin dağınık olduğu görülmektedir. Bunun nedeni yöntemle ilgilidir. Denklem (3.34)'te verildiği üzere $\overline{w^2}$ çalkantı değeri, toplamda yedi açısal konumda yapılan ölçümlerin tamamı kullanılarak hesaplanmaktadır. Her bir açısal konumlarda yapılan konumlandırma hataları birleşerek hata oranının artmasına neden olmuş bu nedenle $\overline{w^2}$ çalkantı değeri için doğru deneysel veriler elde edilememiştir. Bu nedenle diğer kesitler için elde edilen $\overline{w^2}$ çalkantı değerleri verilmemiştir.



Şekil 5.4: $x=2D$ istasyonundaki boyutsuz $\overline{u^2}$ değerleri: (a) dairesel, (b) yonca



Şekil 5.5: $x=2D$ istasyonundaki boyutsuz $\overline{v^2}$ değerleri: (a) dairesel, (b) yonca

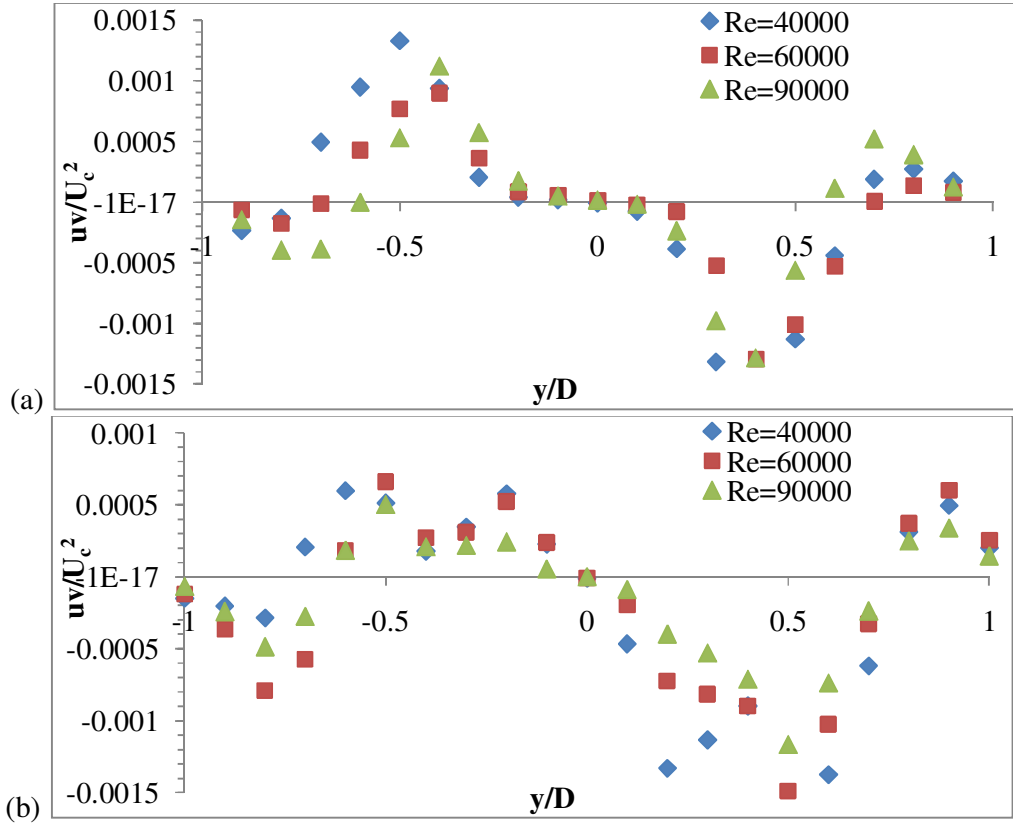


Şekil 5.6: $x=2D$ istasyonundaki boyutsuz w^2 değerleri: (a) dairesel, (b) yonca

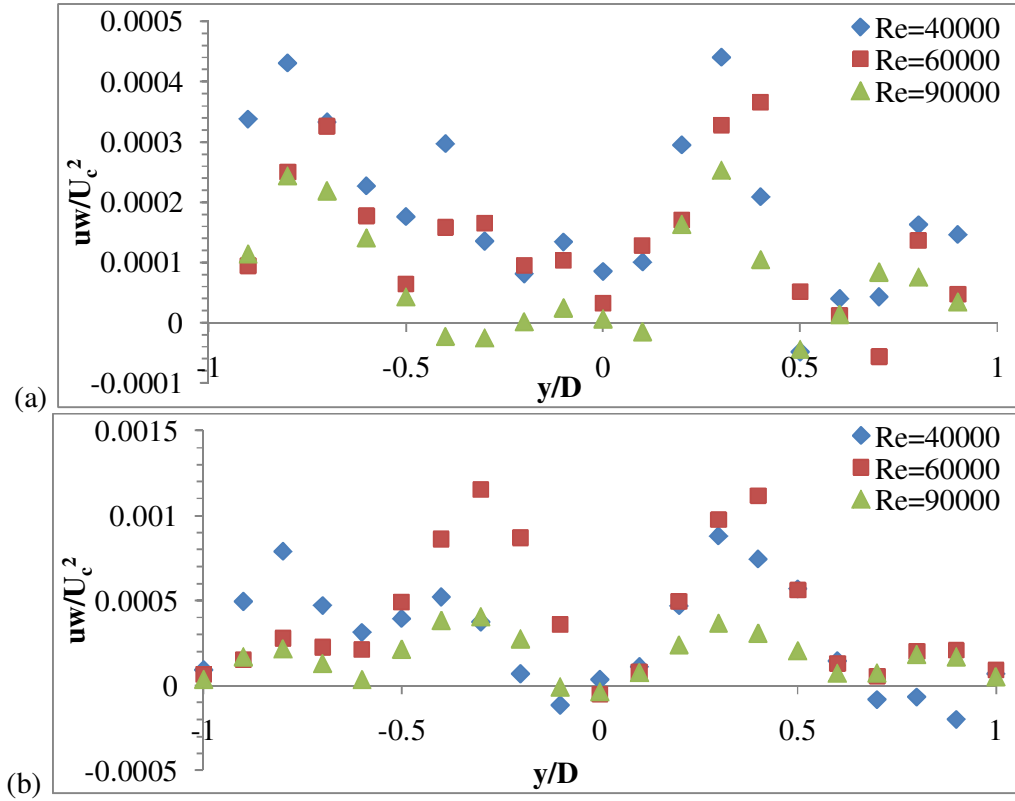
5.7-5.9 numaralı şekillerde $x=2D_c$ istasyonunda farklı Re sayılarında üç düzlemdeki (xy , xz ve yz) Reynolds gerilmeleri, $\overline{u\overline{v}}$, $\overline{u\overline{w}}$ ve $\overline{v\overline{w}}$ verilmiştir.

Şekil 5.7’de xy düzlemindeki Reynolds gerilmesi ($\overline{u\overline{v}}$) değerinin her iki jet türü için Re sayısı ile belirgin şekilde değişmediği görülmektedir. Fakat Şekil 5.7-a&b ile birlikte iki farklı jet türü kendi aralarında karşılaştırıldığında gerilme büyüklüğünün dairesel kesit için daha fazla olduğu anlaşılmaktadır. Ayrıca yonca kesitli jet için $\pm 0.8D_c$ konumlarında oransal olarak gerilme değerlerinin daha yüksek olduğu anlaşılmaktadır.

Şekil 5.8’de xz düzlemindeki Reynolds gerilmesi ($\overline{u\overline{w}}$) değerinin her iki jet türü için Re sayısı ile önemli bir ölçüde değişmediği gözlemlenmektedir. Fakat Şekil 5.8-a&b ile birlikte iki farklı jet türü kendi aralarında karşılaştırıldığında $\overline{u\overline{w}}$ gerilme büyüklüğünün yonca kesit için daha fazla olduğu anlaşılmaktadır. Dairesel jet için bu gerilmenin oluşturduğu profilin görece dağınıklığı görülmektedir. Fakat buradaki değerlerin on binde birler mertebesinde olduğuna dikkat edilmelidir.

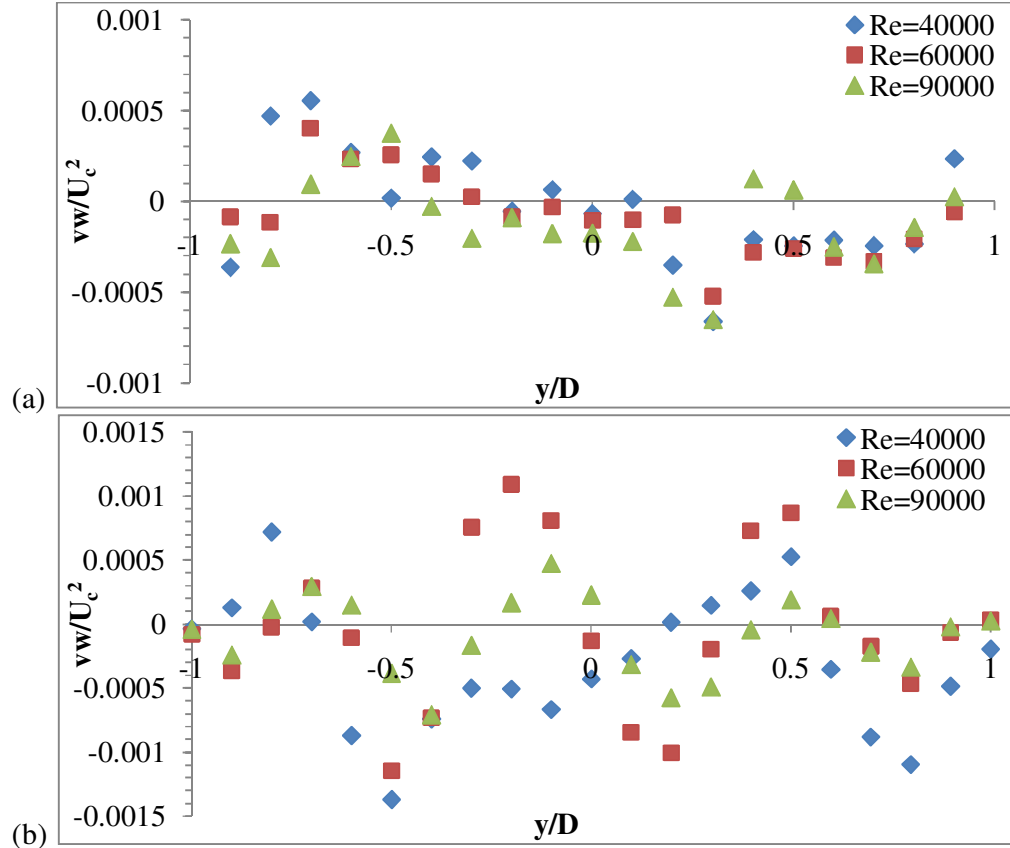


Şekil 5.7: $x=2D$ istasyonundaki boyutsuz \overline{uv} değerleri: (a) dairesel, (b) yonca



Şekil 5.8: $x=2D$ istasyonundaki boyutsuz \overline{uw} değerleri: (a) dairesel, (b) yonca

Şekil 5.9’da yz düzlemindeki Reynolds gerilmesi (\overline{vw}) değerinin dairesel jet için Re sayısı ile önemli derecede değişmediği gözlemlenmektedir. Ancak yonca kesit için $Re=40000$ ’de bu gerilmenin oluşturduğu profilin farklılık gösterdiği görülmektedir. Şekil 5.9-a&b’de iki farklı jet türü karşılaştırıldığında \overline{vw} gerilme büyüklüğünün yonca kesit için daha fazla olduğu anlaşılmaktadır.

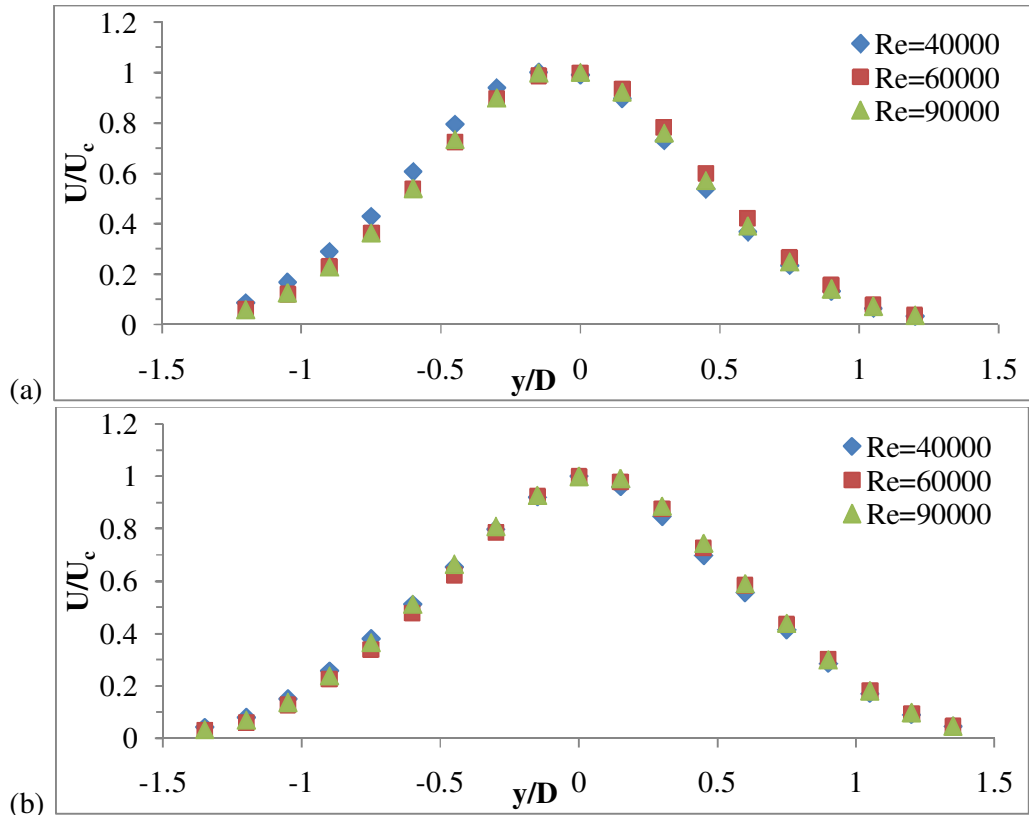


Şekil 5.9: $x=2D$ istasyonundaki boyutsuz \overline{vw} değerleri: (a) dairesel, (b) yonca
5.10-5.12 numaralı şekillerde $x=5D_c$ istasyonunda, üç eksendeki boyutsuz hız değerleri verilmiştir.

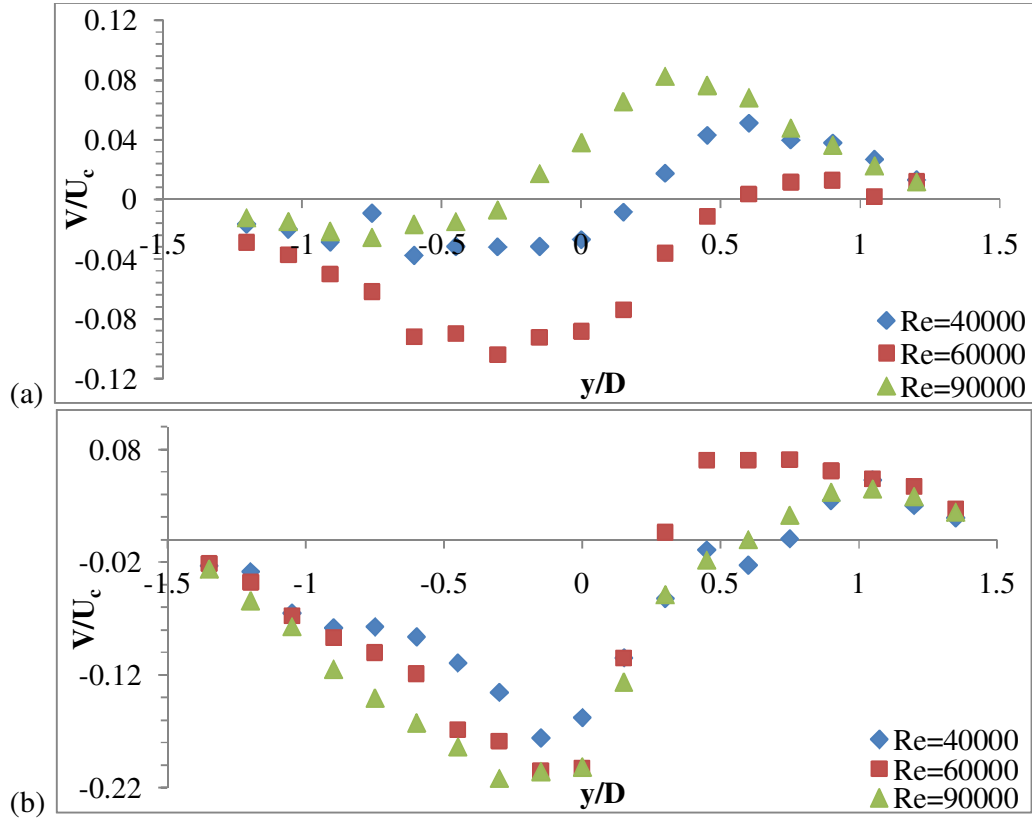
Şekil 5.10’da iki farklı jet türü için x yönündeki hız değerleri gösterilmiştir. Bu şekillere göre her iki jet türü için x yönündeki hızın bu istasyonda Re sayısına göre değişmediği görülmektedir. Bununla birlikte yonca kesitli jet akımı için hız profilinin dairesel jet akım alanındaki göre daha hızlı yayıldığı açıkça görülmektedir.

Şekil 5.11’de y yönündeki hız değerleri gösterilmiştir. Bu şekillere göre her iki jet türü için y yönündeki hızın bu istasyonda Re sayısına göre değiştiği görülmektedir. Bu değişim özellikle dairesel jet akımı için çok daha belirgin olup yonca kesitli jet için çok küçük mertebededir. Bununla birlikte yonca kesitli jet akımı için y yönündeki hız değerlerinin mertebe olarak dairesel kesitli jete göre daha fazla olduğu görülmektedir. Bu durum yonca kesitli jetteki yayılmanın/dağılmanın daha hızlı gerçekleştiğinin bir diğer göstergesidir.

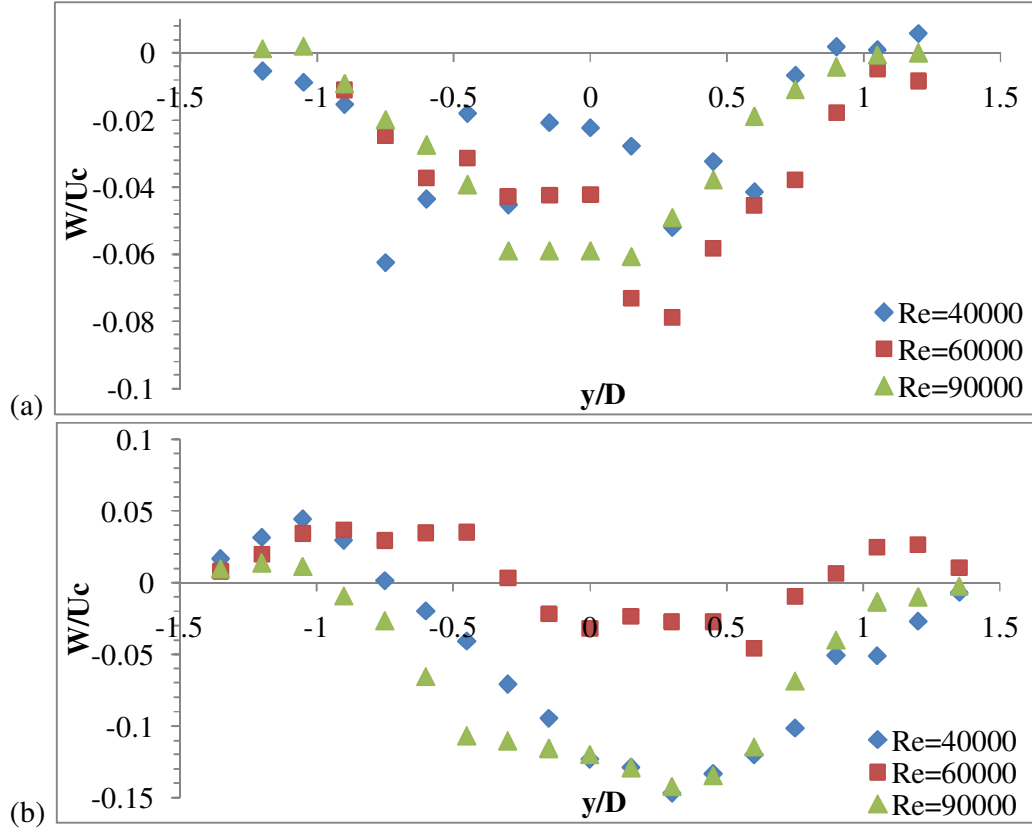
Şekil 5.12’de z yönündeki hız değerleri verilmiştir. Şekil 5.12-a’da dairesel jet için elde edilen z eksenindeki hız değerlerinin yonca kesit için Şekil 5.12-b’de verilen değerlere göre çok daha düşük olduğu anlaşılmaktadır. Dairesel kesit için z eksenindeki hız Re sayısı ile belirgin biçimde değişmemektedir. Ancak yonca kesitli jet akımı için $Re=60000$ için elde edilen W hız bileşeni profilinin mertebe olarak daha düşük olduğu görülmektedir.



Şekil 5.10: $x=5D$ istasyonundaki boyutsuz U değerleri: (a) dairesel, (b) yonca



Şekil 5.11: $x=5D$ istasyonundaki boyutsuz V değerleri: (a) dairesel, (b) yonca

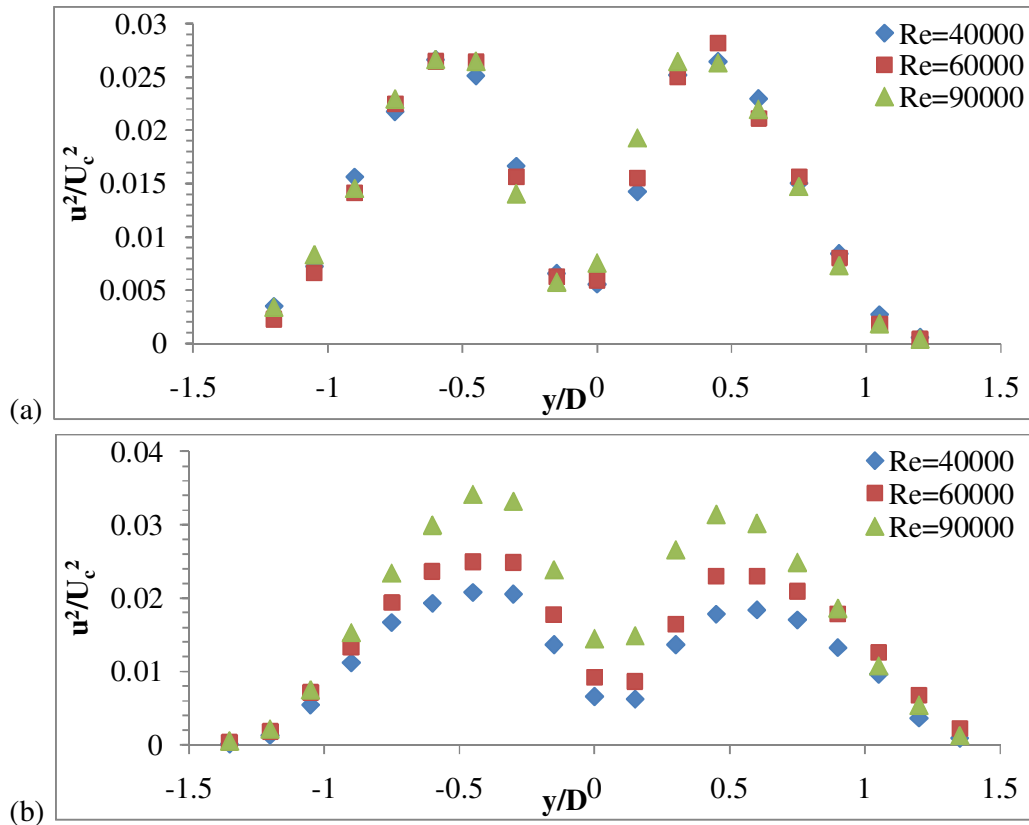


Şekil 5.12: $x=5D$ istasyonundaki boyutsuz W değerleri: (a) dairesel, (b) yonca

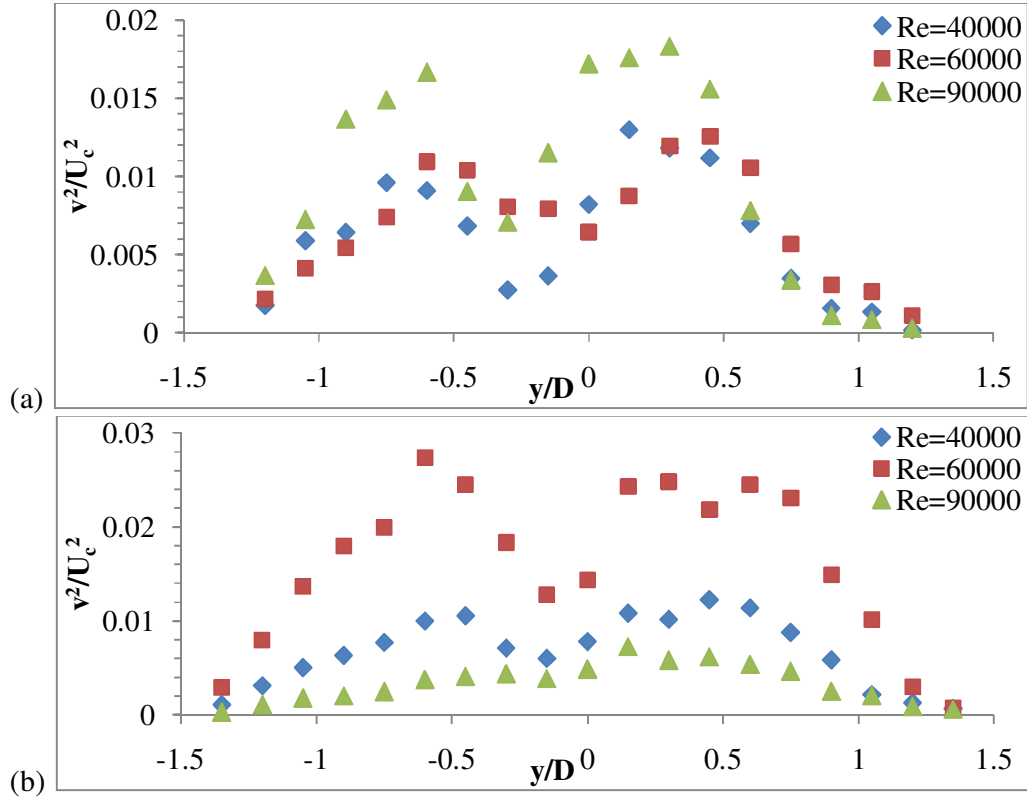
5.13 ve 5.14 numaralı şekillerde $x=5D_e$ istasyonunda, x ve y eksenlerindeki hız için boyutsuz ortalama çalkantı değerleri verilmiştir.

Şekil 5.13-a'da dairesel jet için x eksenindeki hızın çalkantı değeri, $\overline{u^2}$, verilmiştir. Burada dairesel jet için yatay ekseninde $\overline{u^2}$ değerinin Re sayısı ile değişmediği görülmektedir. Şekil 5.13-b'de ise yonca kesitli jet akımında $Re=40000$ için $\overline{u^2}$ değerinin dağılımının $Re=60000$ ve $Re=90000$ durumlarına göre farklı olduğu anlaşılmaktadır. Her iki çıkış kesiti $\overline{u^2}$ değerinin $\pm 0.5D_e$ konumlarında maksimum değere ulaştığı görülmektedir. Bununla birlikte, yonca kesitli jet için $\overline{u^2}$ değerinin merkeze olarak dairesel kesittekinden daha fazla olduğu gözlemlenmektedir.

Şekil 5.14-a Şekil 5.14-b'de dairesel ve yonca kesitli jet için y eksenindeki hızın çalkantı değeri, $\overline{v^2}$, verilmiştir. Burada her iki jet türü için yatay ekseninde $\overline{v^2}$ değerinin Re sayısı ile büyük ölçüde değiştiği görülmektedir. Her iki çıkış kesiti $\overline{v^2}$ değerinin yaklaşık olarak $\pm 0.5D_e$ konumlarında maksimum değere ulaştığı görülmektedir. Fakat $\overline{v^2}$ çalkantı değerlerinin Re sayısı ile değişimiyle birlikte, oluşan profillerin farklı olduğu görülmektedir.



Şekil 5.13: $x=5D$ istasyonundaki boyutsuz $\overline{u^2}$ değerleri: (a) dairesel, (b) yonca

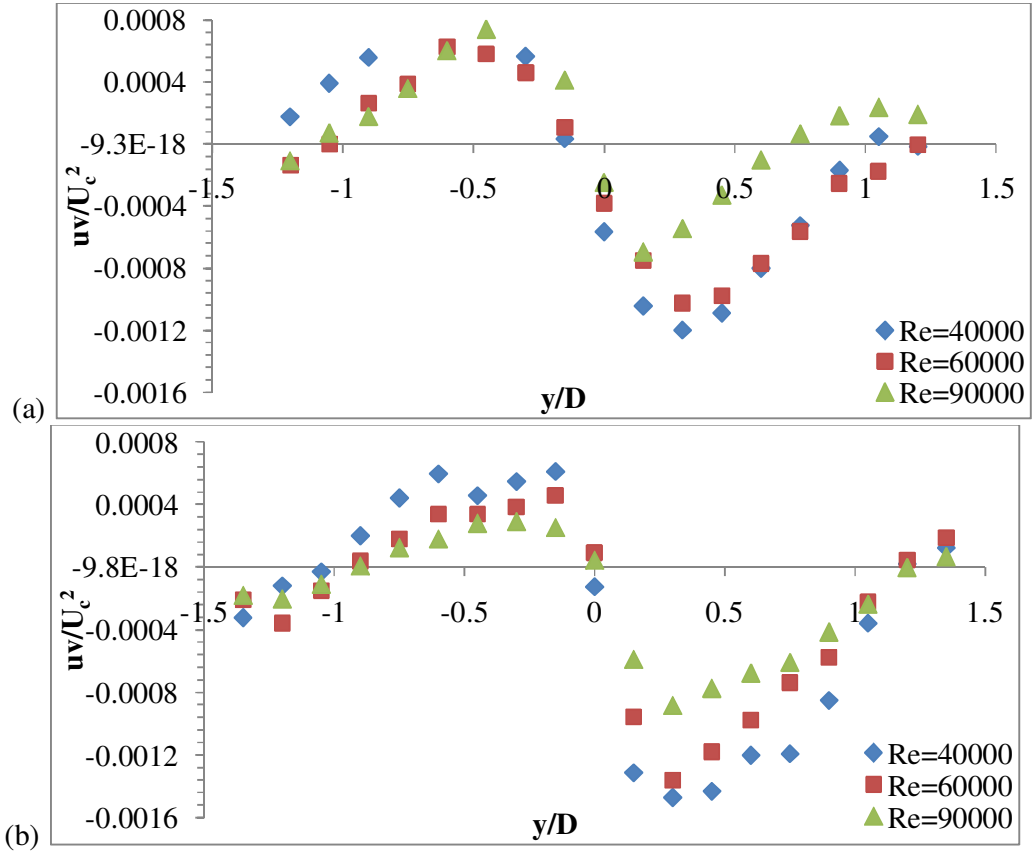


Şekil 5.14: $x=5D$ istasyonundaki boyutsuz $\overline{v^2}$ değerleri: (a) dairesel, (b) yonca

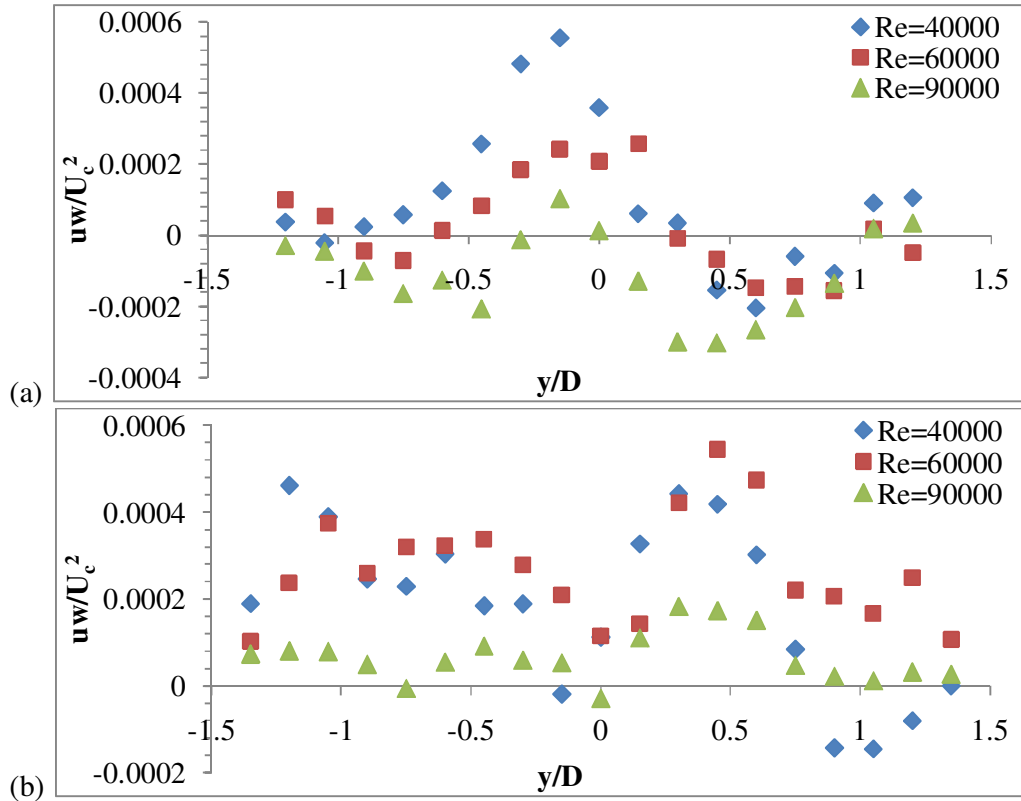
5.15 ve 5.16 numaralı şekillerde $x=5D_e$ istasyonunda farklı Re sayılarında iki düzlemdeki (xy , xz) Reynolds gerilmeleri, \overline{uv} ve \overline{uw} verilmiştir. yz düzlemindeki gerilme değerleri çok küçük olması ve bununla birlikte belirgin bir profil oluşturmaması nedeniyle burada verilmemiştir.

Şekil 5.15'te xy düzlemindeki Reynolds gerilmesi (\overline{uv}) değerinin her iki jet türü için Re sayısı ile belirgin şekilde değişmediği görülmektedir. Fakat Şekil 5.15-a&b ile birlikte iki farklı jet türü kendi aralarında karşılaştırıldığında gerilme büyüklüğünün tepe noktasının yonca kesitli kesit için, dairesel jete göre $x=2D_e$ kesitinde olduğu gibi, jet eksenine çok yakın bir konumda oluştuğu görülmektedir.

Şekil 5.16'da xz düzlemindeki Reynolds gerilmesi (\overline{uw}) değerinin her iki jet türü için Re sayısı ile değiştiği gözlemlenmektedir. Şekil 5.16-a'da dairesel jet için elde edilen gerilme profillerinin daha düzgün olduğu görülmektedir. Jet eksenine yakın konumlarda gerilme değerinin pozitif olduğu, uzaklaştıkça ise bu değer negatif olduğu görülmektedir. Ancak yonca kesit için \overline{uw} gerilmesinin, yatay eksen üzerinde çok küçük değerler alması ile birlikte genelde pozitif değer aldığı görülmektedir.



Şekil 5.15: $x=5D$ istasyonundaki boyutsuz \overline{uv} değerleri: (a) dairesel, (b) yonca

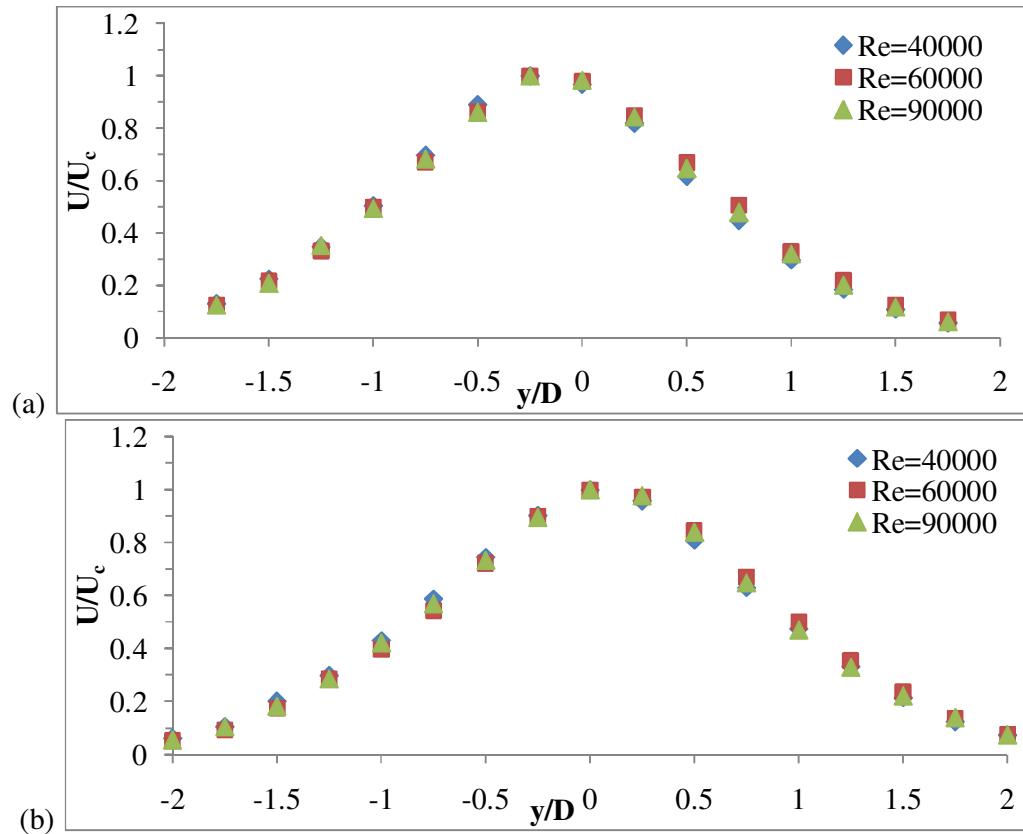


Şekil 5.16: $x=5D$ istasyonundaki boyutsuz \overline{uw} değerleri: (a) dairesel, (b) yonca

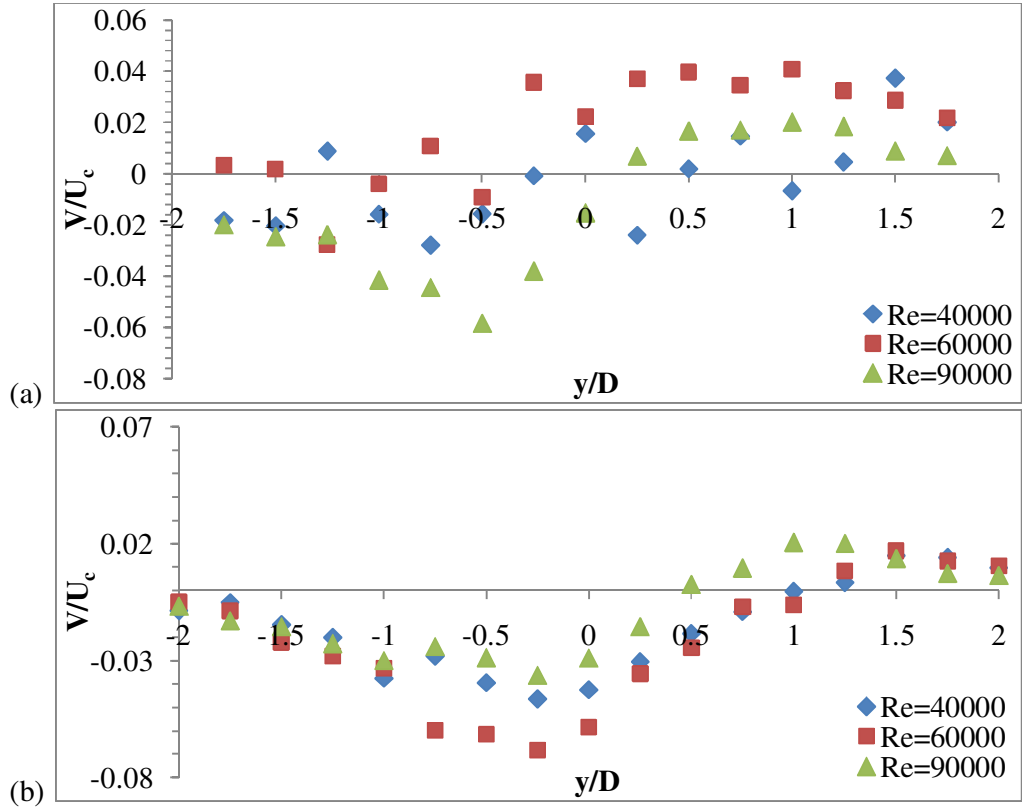
5.17-5.19 numaralı şekillerde $x=10D_e$ istasyonunda, üç eksendeki boyutsuz hız değerleri verilmiştir. Şekil 5.17’de iki farklı jet türü için x yönündeki hız değerleri gösterilmiştir. Bu şekillere göre her iki jet türü için x yönündeki hızın bu istasyonda Re sayısına göre değişmediği görülmektedir. Bununla birlikte yonca kesitli jet akımı için hız profilinin, daha önceki kesitlerde gösterildiği gibi, dairesel jet akım alanındaki gibi daha hızlı yayıldığı görülmektedir.

Şekil 5.18’de y yönündeki hız değerleri gösterilmiştir. Bu şekillere göre her iki jet türü için y yönündeki hızın bu istasyonda Re sayısına göre değiştiği görülmektedir. Bu değişim özellikle dairesel jet akımı için çok daha belirgin olup yonca kesitli jet için daha düşük mertebededir. Ayrıca yonca kesitli jet akımı için y yönündeki hız değerlerinin merkeze olarak dairesel kesitli jete göre daha fazla olduğu görülmektedir. Bu durum $x=5D_e$ kesitinde olduğu gibi, yonca kesitli jetteki yayılmanın/dağılmanın daha hızlı gerçekleştiğinin bir göstergesidir.

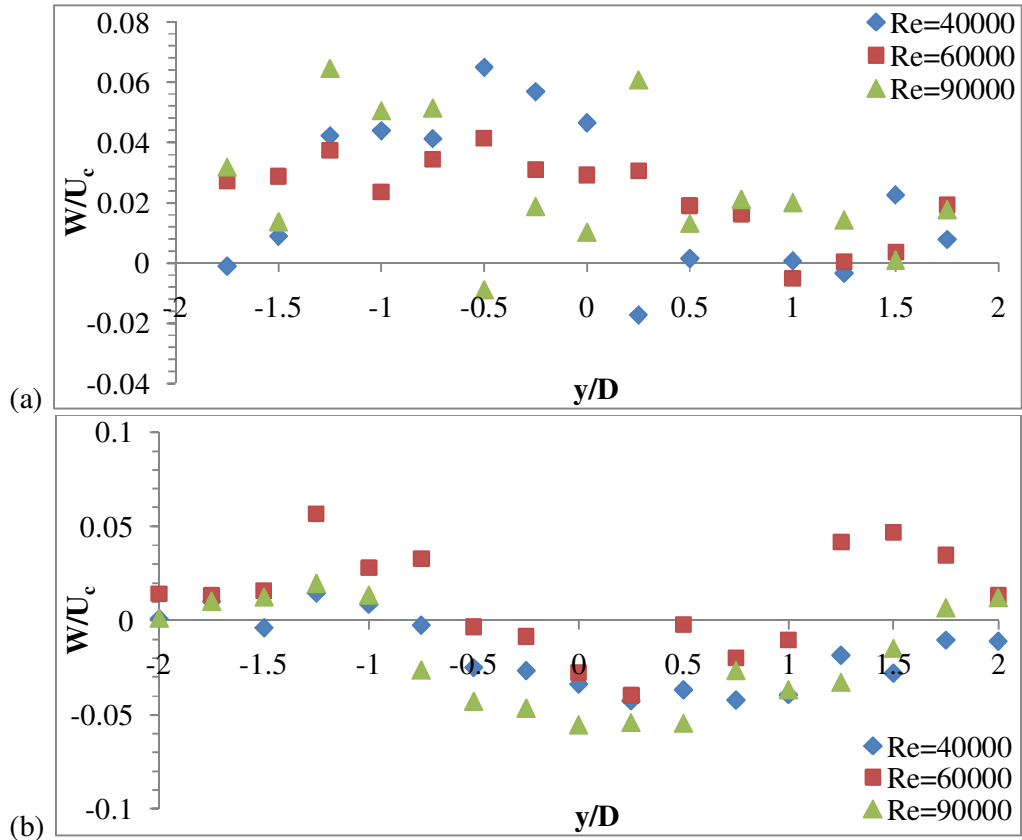
Şekil 5.19’da z yönündeki hız değerleri verilmiştir. Şekil 5.19-a’da dairesel jet için elde edilen z eksenindeki hız değerlerinin yonca kesit için verilen değerlere göre daha düşük olduğu ve daha dağınık bir profil oluşturduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 5.17: $x=10D_e$ istasyonundaki boyutsuz U değerleri: (a) dairesel, (b) yonca



Şekil 5.18: $x=10D$ istasyonundaki boyutsuz V değerleri: (a) dairesel, (b) yonca

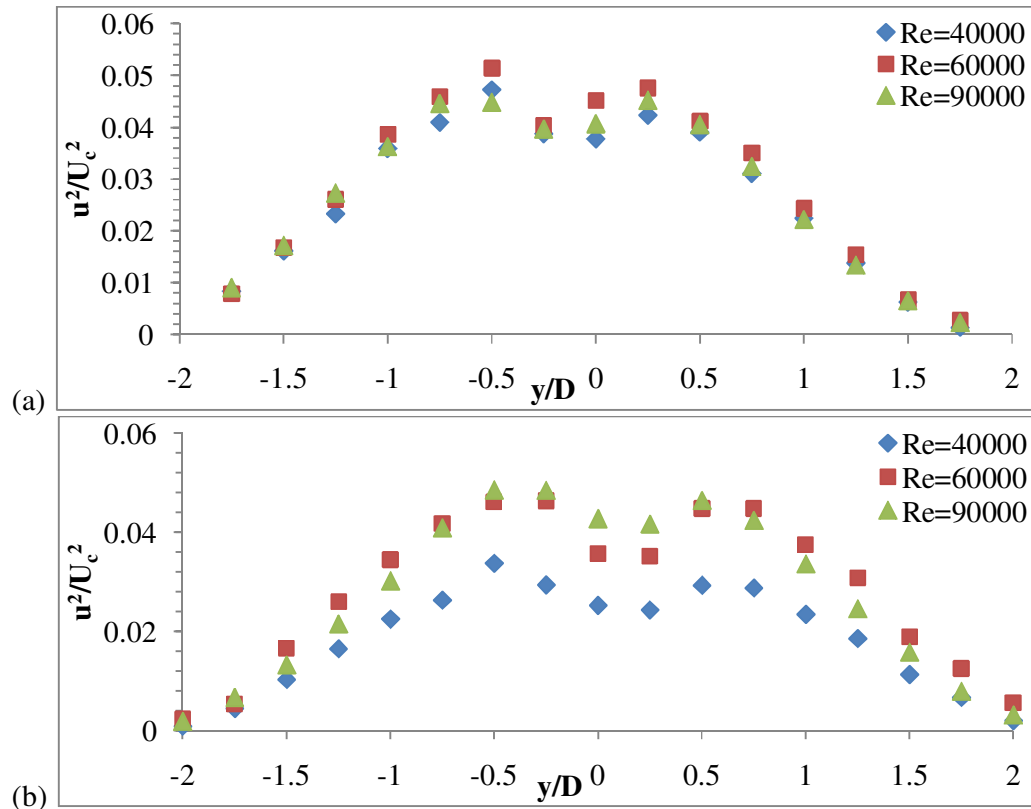


Şekil 5.19: $x=10D$ istasyonundaki boyutsuz W değerleri: (a) dairesel, (b) yonca

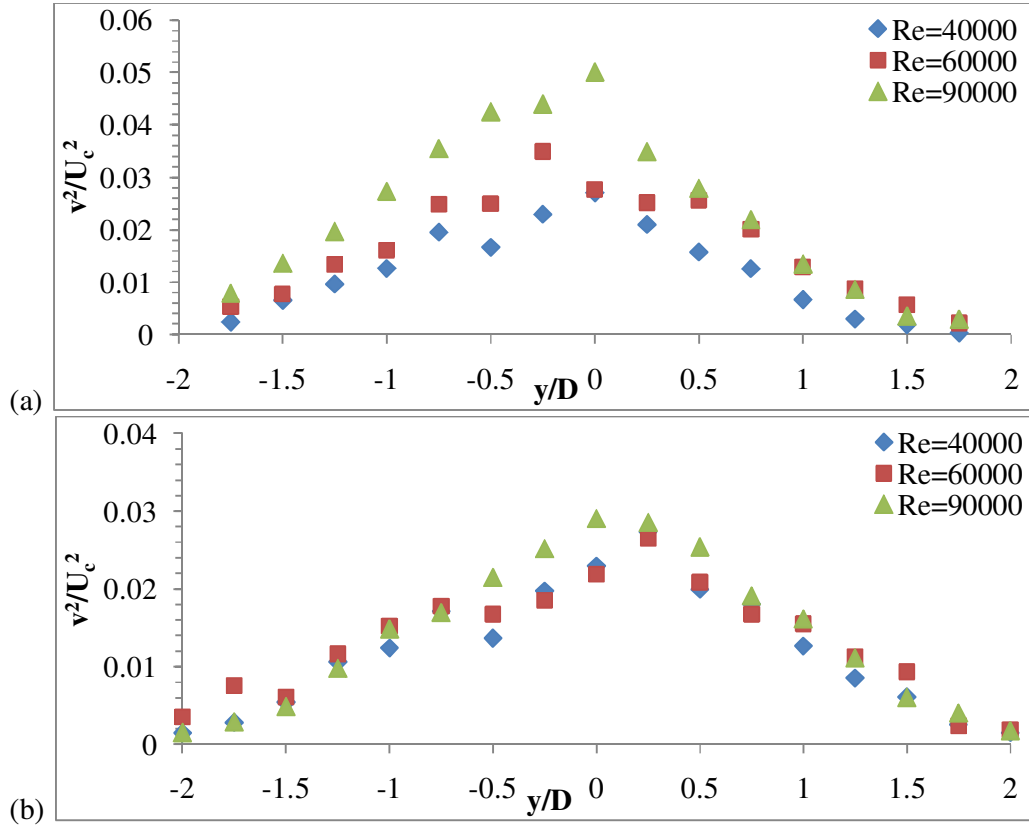
5.20 ve 5.21 numaralı şekillerde $x=10D_e$ istasyonunda, x ve y eksenlerindeki hız için boyutsuz ortalama çalkantı değerleri verilmiştir.

Şekil 5.20-a'da dairesel jet için x eksenindeki hızın çalkantı değeri, $\overline{u^2}$, verilmiştir. Burada dairesel jet için yatay eksende $\overline{u^2}$ değerinin Re sayısı ile değişmediği görülmektedir. Şekil 5.20-b'de ise yonca kesitli jet akımında $Re=40000$ için $\overline{u^2}$ değerinin dağılımının $Re=60000$ ve $Re=90000$ durumlarına göre farklı olduğu anlaşılmaktadır. Bununla birlikte, yonca kesitli jet için $\overline{u^2}$ çalkantı değeri profillerinin her iki jet türü açısından benzerlik taşıdığı görülmektedir.

Şekil 5.21-a Şekil 5.21-b'de dairesel ve yonca kesitli jet için y eksenindeki hızın çalkantı değeri, $\overline{v^2}$, verilmiştir. Burada dairesel için yatay eksende $\overline{v^2}$ değerinin Re sayısı ile belirgin şekilde değiştiği görülmektedir. Yonca kesitli jet için bu değişimin çok düşük ölçekte gerçekleştiği anlaşılmaktadır. Her iki çıkış kesiti $\overline{v^2}$ değerinin yaklaşık olarak jet eksenini civarında maksimum değere ulaştığı görülmektedir. Jet ekseninden uzaklaştıkça her iki jet türü için tüm Re sayılarında $\overline{v^2}$ çalkantı değerinin azaldığı gözlemlenmiştir.



Şekil 5.20: $x=10D$ istasyonundaki boyutsuz $\overline{u^2}$ değerleri: (a) dairesel, (b) yonca

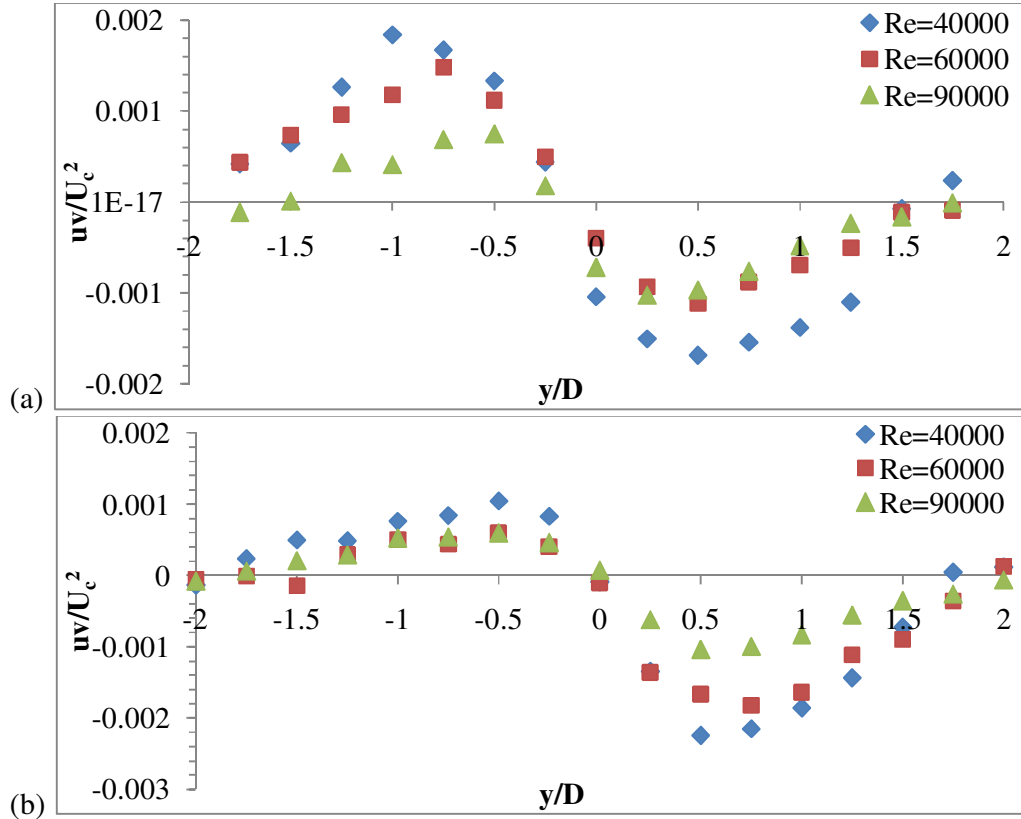


Şekil 5.21: $x=10D$ istasyonundaki boyutsuz $\overline{v^2}$ değerleri: (a) dairesel, (b) yonca

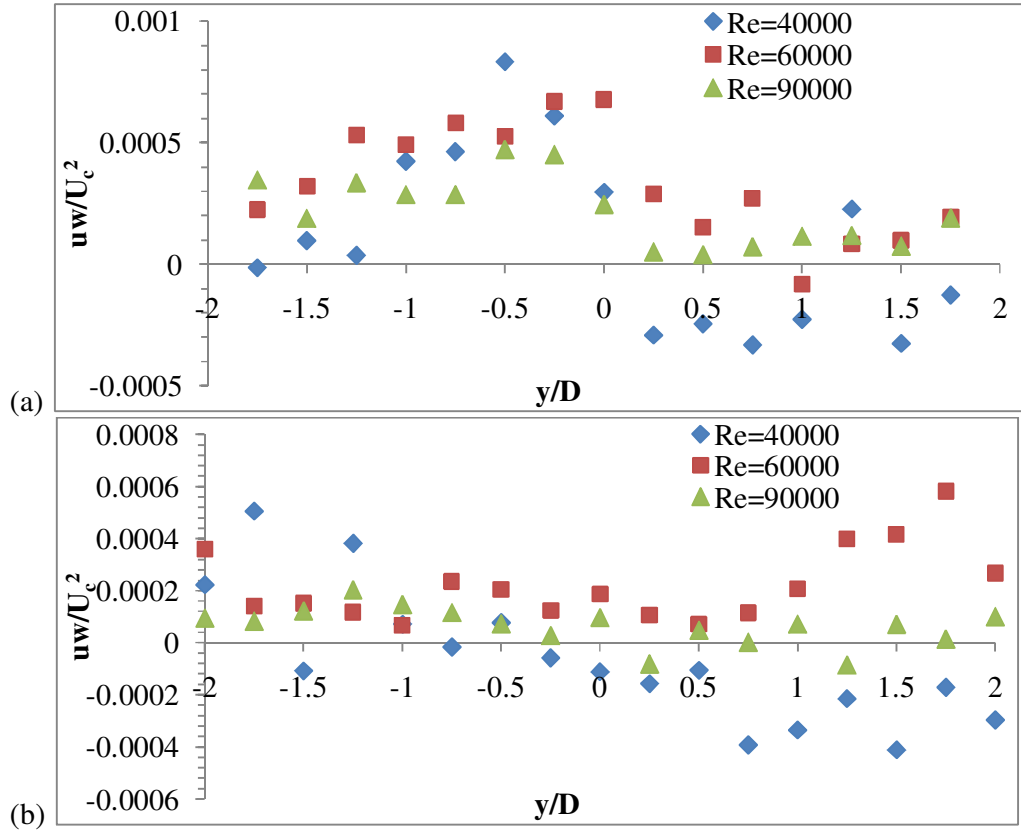
5.22 ve 5.23 numaralı şekillerde $x=10D_e$ istasyonunda farklı Re sayılarında iki düzlemdeki (xy, xz) Reynolds gerilmeleri, \overline{uv} ve \overline{uw} verilmiştir. yz düzlemindeki gerilme değerleri $x=5D_e$ istasyonunda olduğu gibi çok küçük olması ve belirgin bir profil oluşturmaması nedeniyle burada verilmemiştir.

Şekil 5.22’de xy düzlemindeki Reynolds gerilmesi (\overline{uv}) değerinin özellikle dairesel jet için Re sayısı ile değiştiği görülmektedir. Buna rağmen gerilme profillerinin benzer eğilimli olduğu görülmektedir. Ancak, yonca kesitli jet için \overline{uv} gerilme değerinin Re sayısı ile değişiminin çok daha az olduğu görülmektedir. İki jet türü karşılaştırıldığında gerilme profillerinin farklı olduğu gözlemlenmiştir.

Şekil 5.23’te xz düzlemindeki Reynolds gerilmesi (\overline{uw}) değerinin her iki jet türü için merite olarak aynı olduğu görülmektedir. gözlemlenmektedir. Bununla birlikte her iki jet türü için - özellikle dairesel jet için - $x=10D_e$ istasyonunda dağınık bir gerilme profili elde edilmiştir.

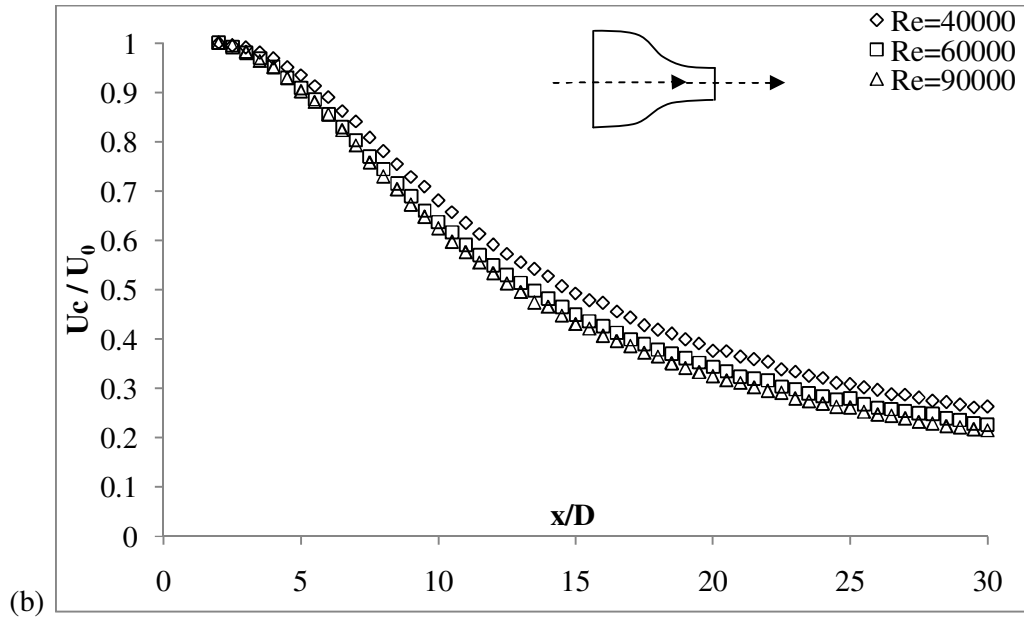
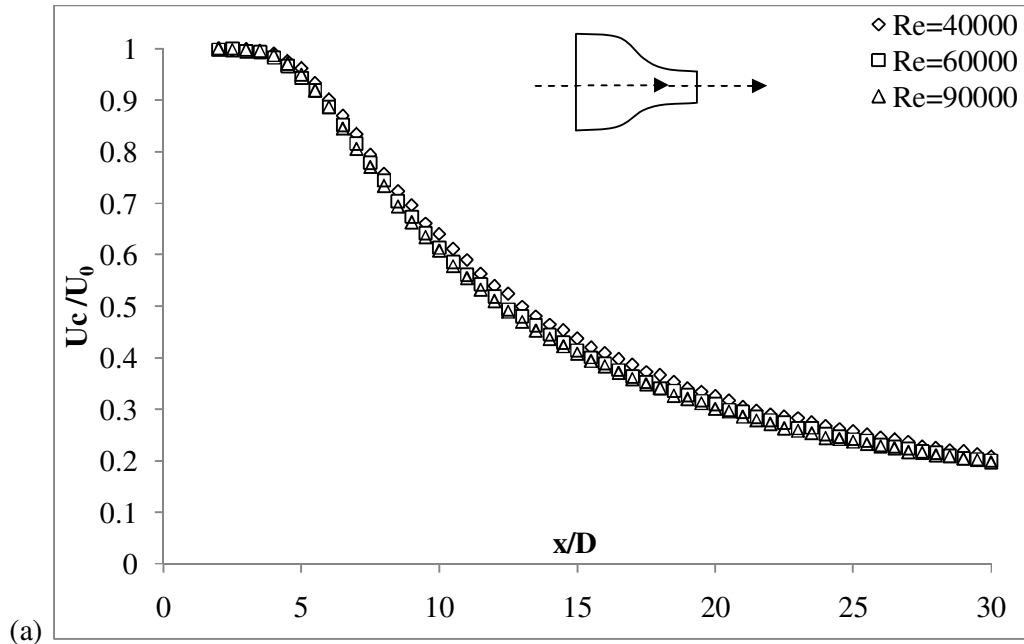


Şekil 5.22: $x=10D$ istasyonundaki boyutsuz \overline{uv} değerleri: (a) dairesel, (b) yonca



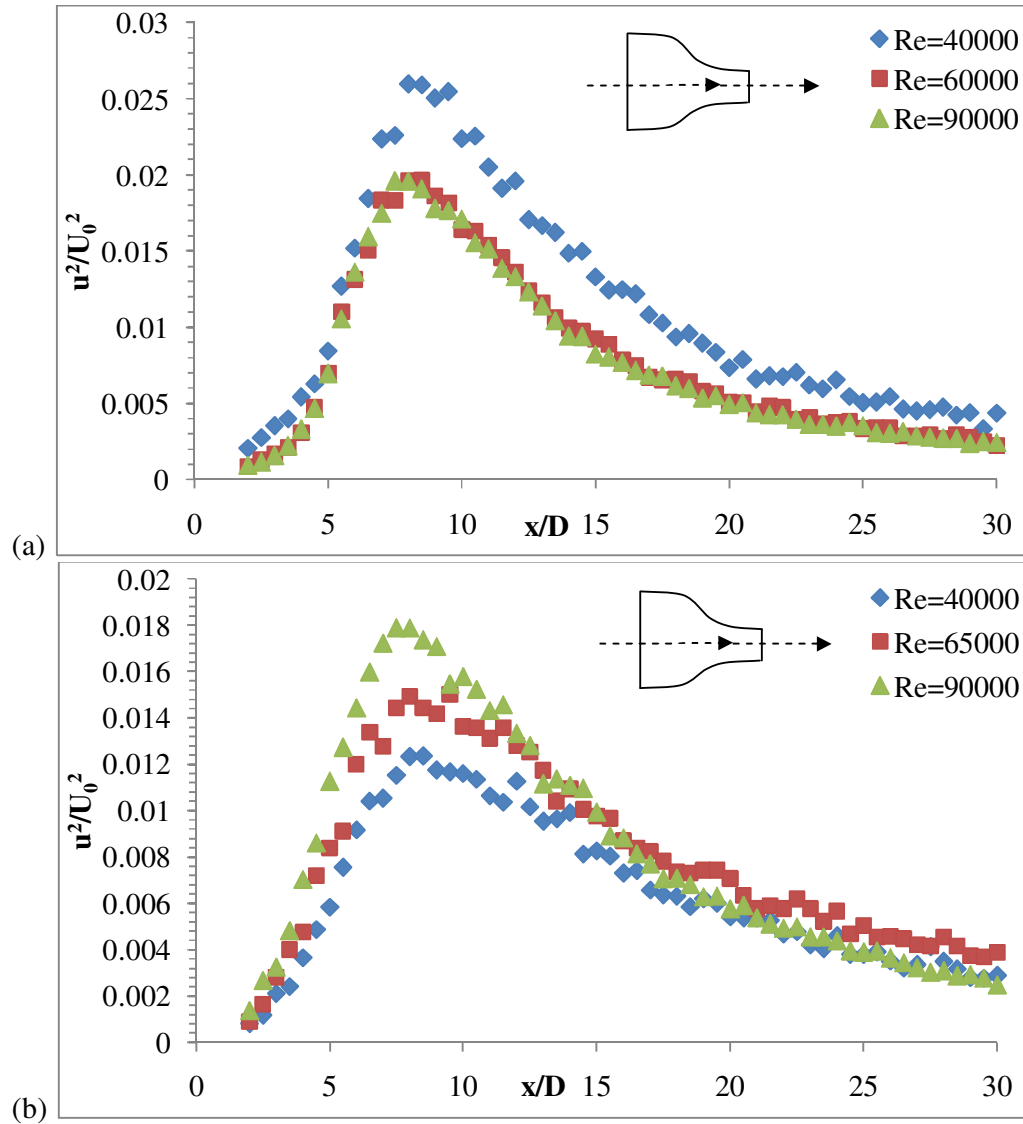
Şekil 5.23: $x=10D$ istasyonundaki boyutsuz \overline{uw} değerleri: (a) dairesel, (b) yonca

Şekil 5.24'te, dairesel ve yonca kesitli jet için, jet eksenindeki hızın konumla değişimi verilmiştir. Eksenel hız, U_c , jet çıkış hızıyla (U_0), konum ise eşdeğer çap ile boyutsuzlaştırılmıştır. Şekil 5.24-a'da dairesel jet için boyutsuz eksenel hız Re sayısı ile değişmez iken, Şekil 5.24-b'de görüldüğü üzere $Re=40000$ için boyutsuz eksenel hız değerinin, diğer Re sayılarına göre daha farklı bir eğilimde olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca Şekil 5.24'a'da dairesel jet için jet çekirdeğinin $4D_e$ 'ye kadar uzandığı görülmektedir. Şekil 5.24-b'de ise yonca kesitli jet için jet çekirdeğinin ölçümlerin başladığı nokta olan $2D_e$ civarında sonlandığı görülmektedir.



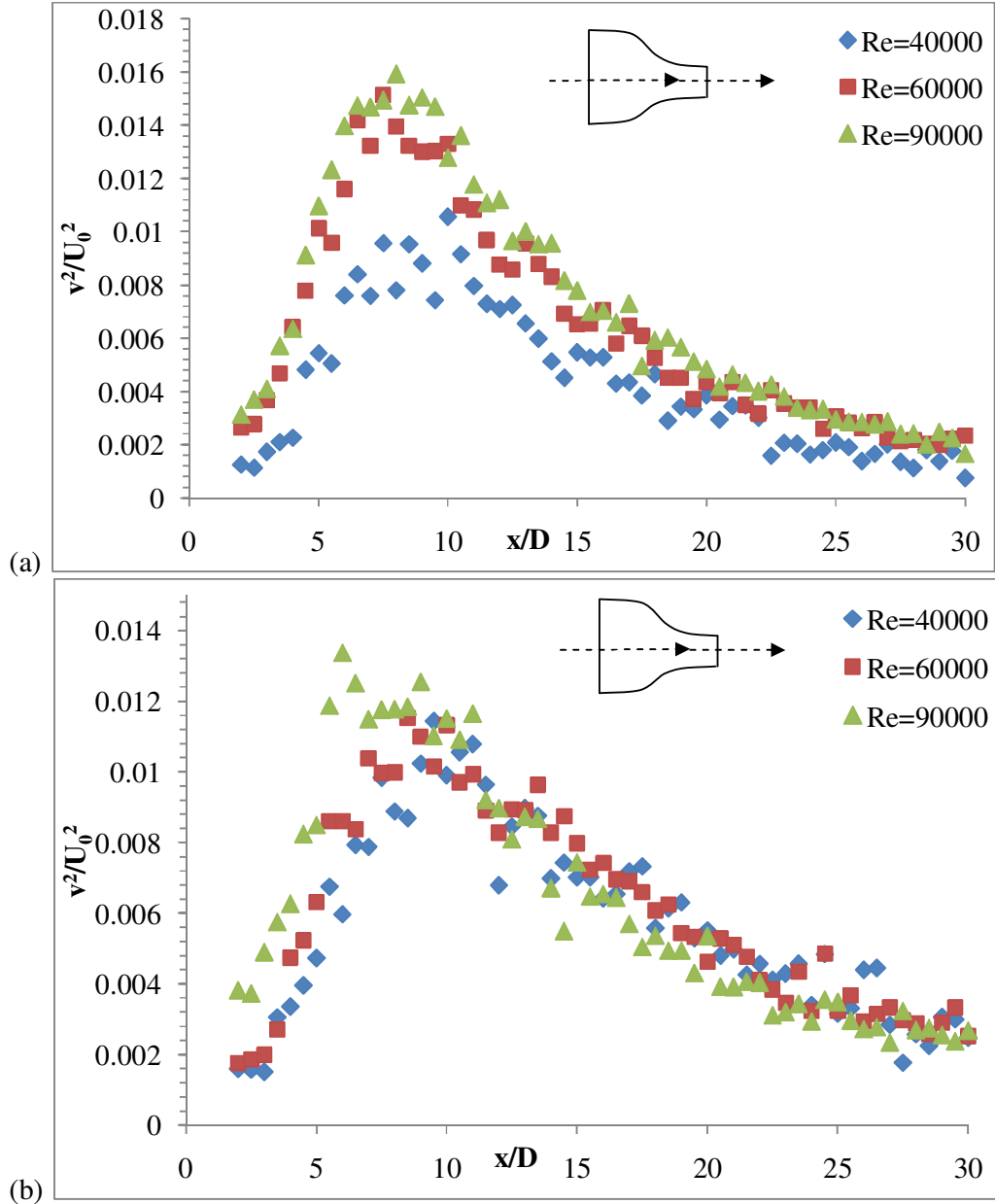
Şekil 5.24: Jet merkez ekseninde boyutsuz U_c/U_0 değerleri: (a) dairesel, (b) yonca

Şekil 5.25'te, dairesel ve yonca kesitli jet için, jet eksenindeki hızın çalkantı değerinin, u^2/U_0^2 , konumla değişimi verilmiştir. Aksenal hızın çalkantı değeri, u^2/U_0^2 , jet çıkış hızının karesi ile, konum ise eşdeğer çap ile boyutsuzlaştırılmıştır. Şekil 5.25-a'da dairesel jet için $Re=40000$ de farklılık göstermektedir. Bu farklılık özellikle jet çıkışından itibaren $7D_e$ büyüklüğünde bir mesafeden sonra gözlemlenmektedir. Diğer iki Re sayısı için bu çalkantı değerlerinin benzer olduğu anlaşılmaktadır. Şekil 5.25-b'de görüldüğü üzere yonca kesitli jet için çalkantı değeri farklı Re sayılarında özellikle $5D_e$ - $15D_e$ konum aralığında farklılık göstermektedir. Bunun dışındaki konumlarda, özellikle uzak bölgede, farklı Re sayıları için benzer değerler aldığı görülmektedir.



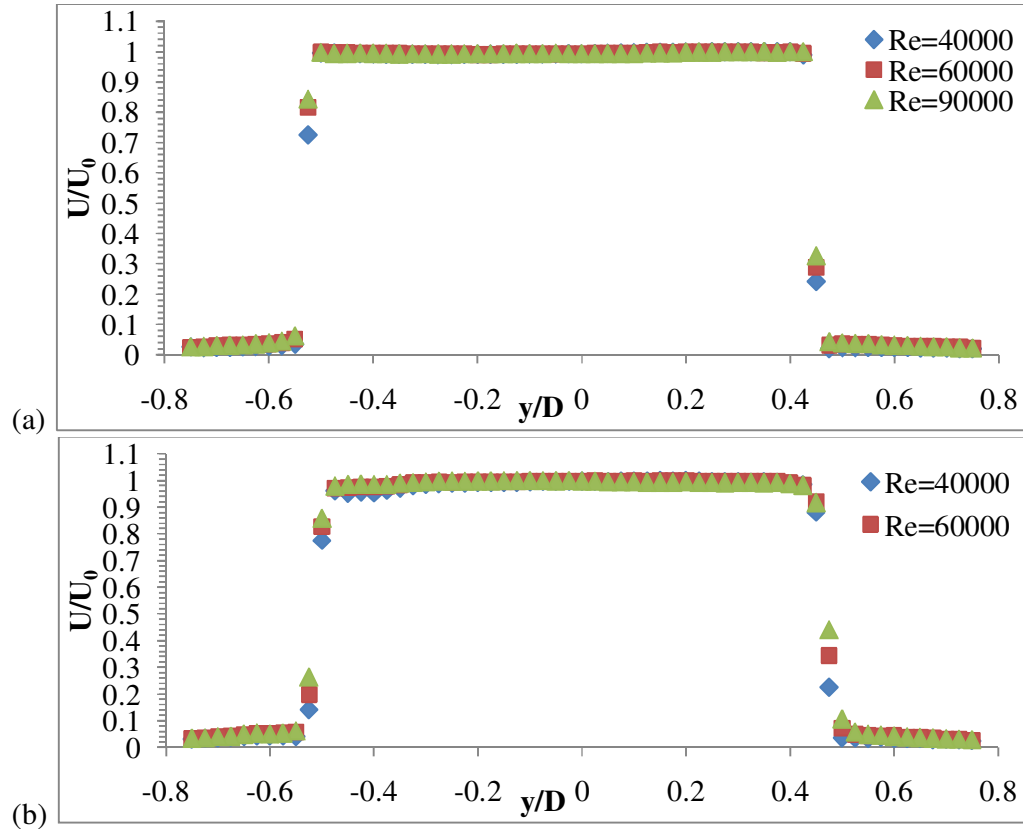
Şekil 5.25: Jet merkez ekseninde boyutsuz u^2/U_0^2 değerleri: (a) dairesel, (b) yonca

Şekil 5.26'da, dairesel ve yonca kesitli jet için, jet eksenindeki hızın çalkantı değerinin, v^2/U_0^2 , konumla değişimi verilmiştir. Şekil 5.26-a'da dairesel jet için çalkantı değeri $Re=40000$ de farklılık göstermektedir. $Re=40000$ için bu çalkantının diğer Re sayılarına göre daha düşük bir değerde olduğu görülmektedir. Diğer iki Re sayısı için bu boyutsuz çalkantı değerlerinin benzer olduğu anlaşılmaktadır. Şekil 5.25-b'de görüldüğü üzere yonca kesitli jet için çalkantı değeri farklı Re sayılarında benzer değerler aldığı görülmektedir.



Şekil 5.26: Jet merkez ekseninde boyutsuz v^2/U_0^2 değerleri: (a) dairesel, (b) yonca

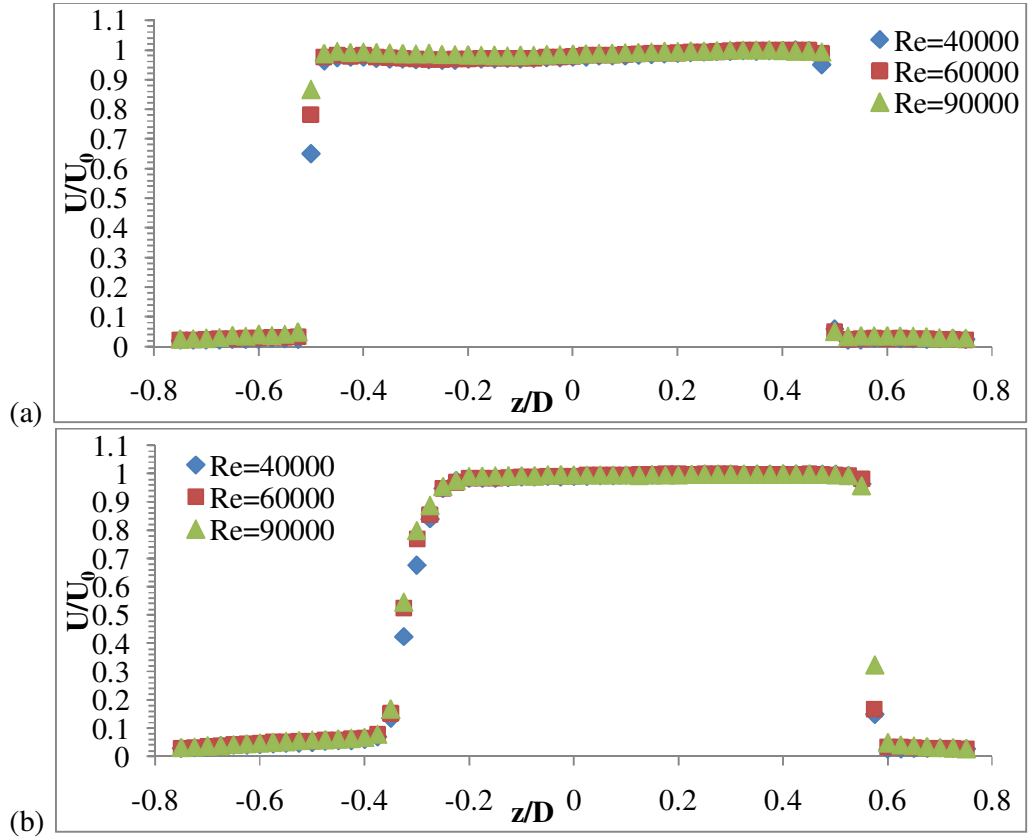
Şekil 5.27 ve Şekil 5.28’de jet çıkışında ($x=0.1D_e$) yatay ve düşey eksendeki boyutsuz hız değerleri verilmiştir. Burada durgun havadan jet çekirdeğine geçiş bölgelerinde yonca kesitli jet için daha fazla nokta yakalandığı görülmektedir. Bunun en önemli nedeni sıcak telin, jet çıkış geometrisinin sınırları ile yaptığı açıdır. Bu açı ne kadar sıfıra yakın ise bu bölgede o kadar az veri alınır. Bu şekillere göre her iki jet türü için çıkıştaki hız profilleri Re sayısı ile değişmemektedir. İki jet türü karşılaştırıldığında ise yatay eksendeki çıkış hız profilleri benzer olup düşey eksen Şekil 5.28’de görüldüğü gibi belirgin şekilde farklılık göstermektedir.



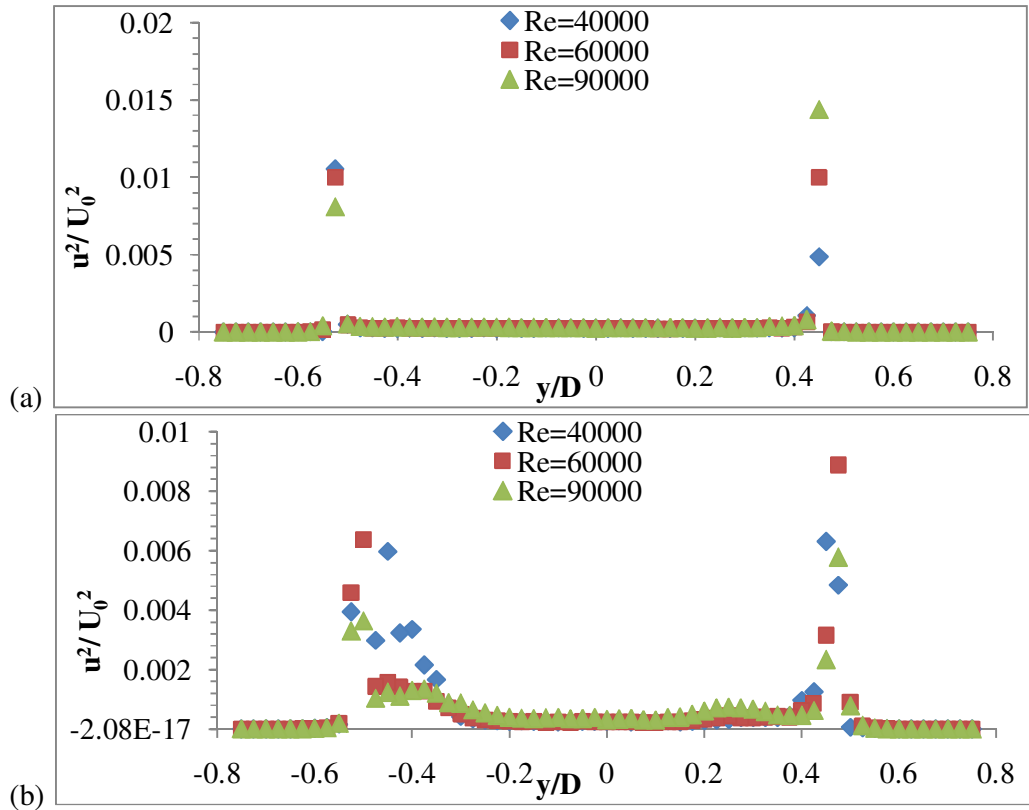
Şekil 5.27: Jet çıkışında yatay eksende boyutsuz U değerleri: (a) dairesel, (b) yonca

Şekil 5.29 ve Şekil 5.30’da jet çıkışında yatay ve düşey eksendeki boyutsuz çalkantı değerleri verilmiştir.

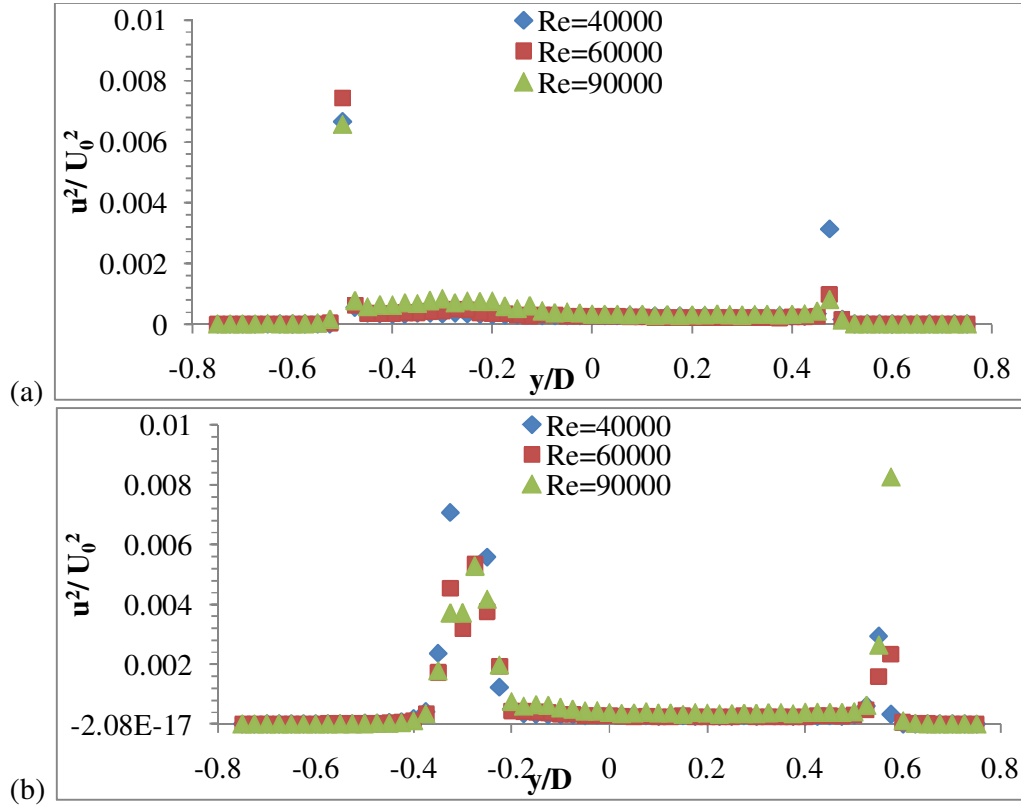
Her iki şekilde de yonca kesitli jet için hem yatay eksen de hem de düşey eksen de çıkıştaki çalkantı etkisinin daha geniş bir alana yayıldığı gözlemlenmektedir. Bununla birlikte çıkıştaki çalkantı değeri dairesel kesit için, yonca kesitli jet akımına göre daha fazladır.



Şekil 5.28: Jet çıkışında düşey ekseninde boyutsuz U değerleri: (a) dairesel, (b) yonca



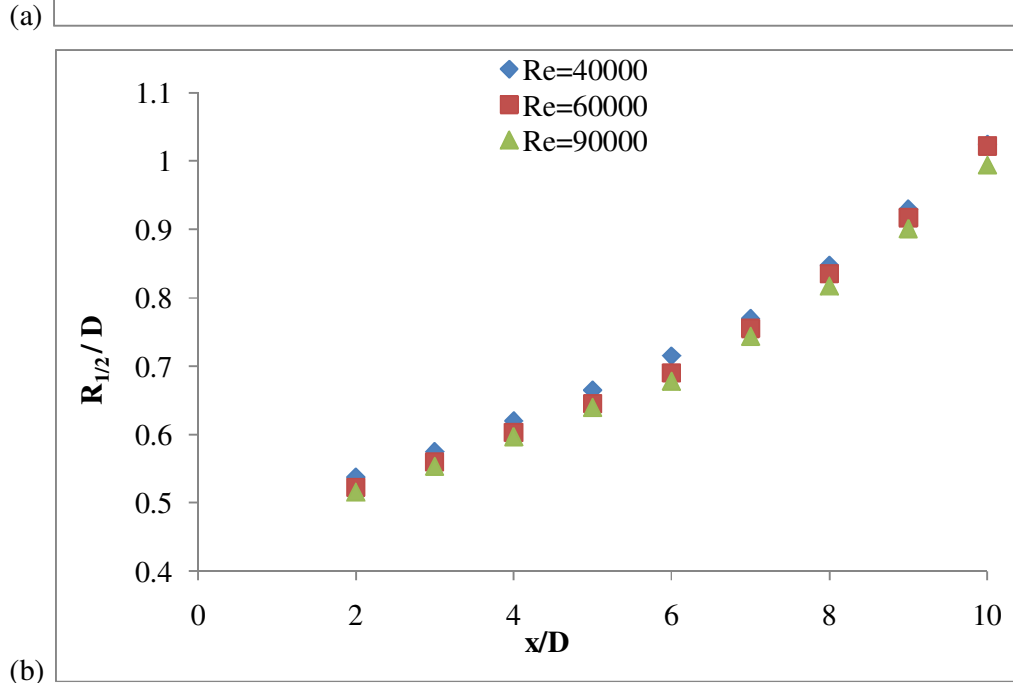
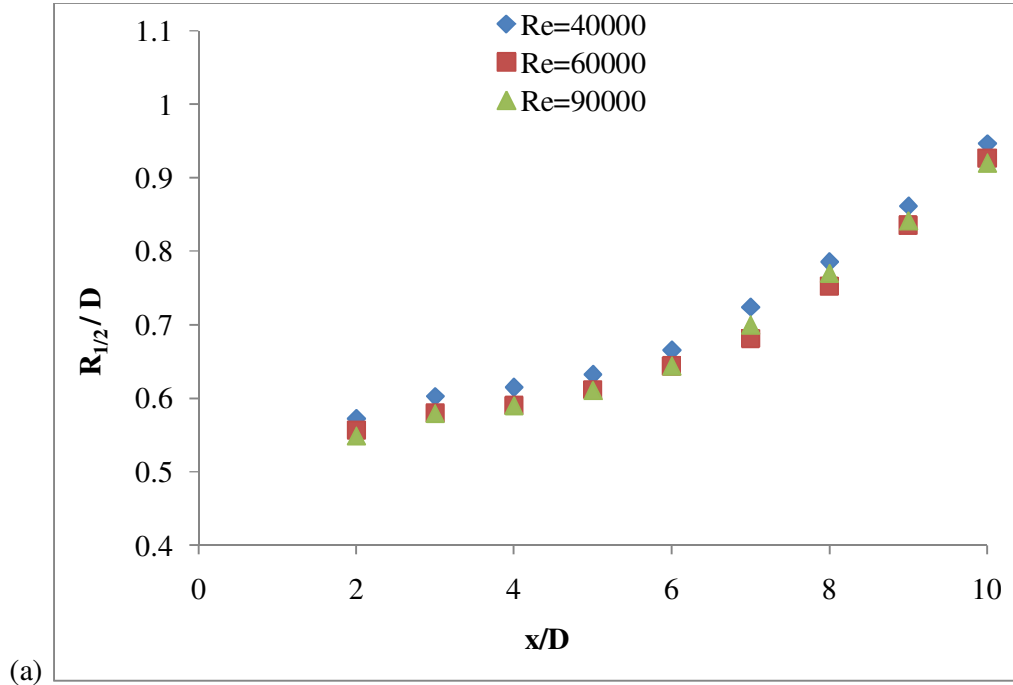
Şekil 5.29: Jet çıkışında yatay ekseninde boyutsuz $\overline{u^2}$ değerleri: (a) dairesel, (b) yonca



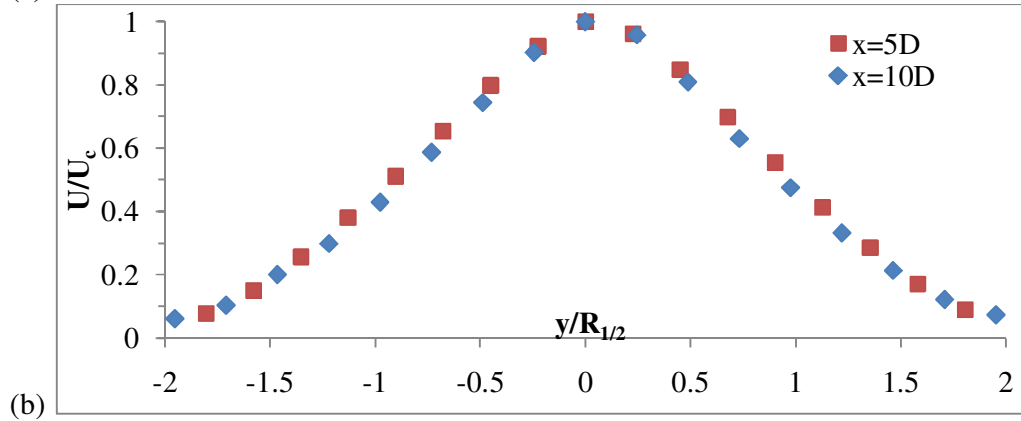
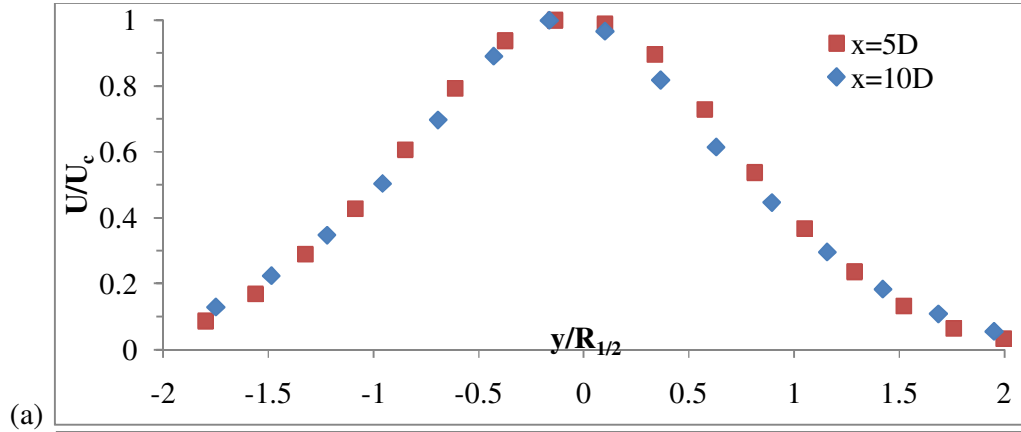
Şekil 5.30: Jet çıkışında dikey eksende boyutsuz $\overline{u^2}$ değerleri: (a) dairesel, (b) yonca Şekil 5.31’de iki farklı jet türü için farklı Re sayılarındaki boyutsuz jet yarı kalınlığı değerleri verilmiştir. Burada jet yarı kalınlığı $R_{1/2}$, ile jet eksenini üzerindeki konum eşdeğer çap ile boyutsuzlaştırılmıştır.

Şekil 5.31-a’da görüldüğü üzere $2D_e$ - $5D_e$ aralığında jet yarı kalınlığı verilerinin oluşturduğu sanal çizginin eğiminin $5D_e$ - $10D_e$ arasındaki verilerin oluşturduğu çizginin eğimine göre daha az olduğu görülmektedir. Buradan dairesel kesitli jetin sahip olduğu potansiyel çekirdeğin $5D_e$ civarında sonlandığı anlaşılmaktadır. Bu bulgu 5.24-a numaralı şekilde elde edilen verilerle doğrulanmaktadır.

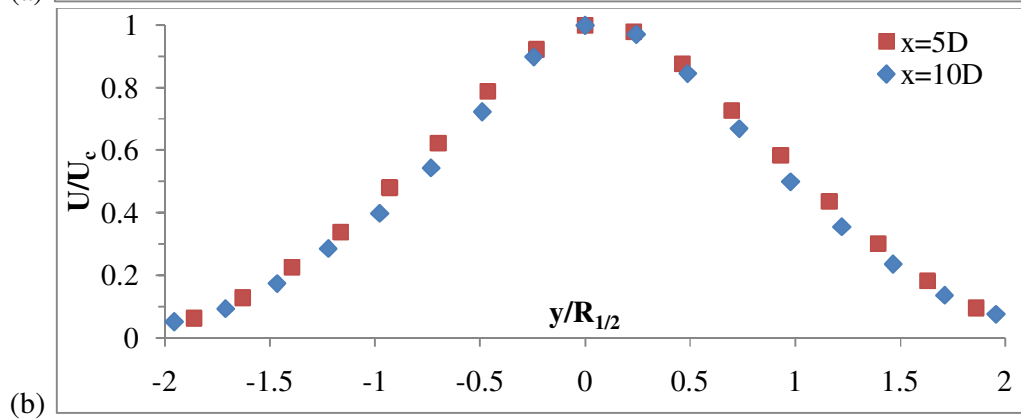
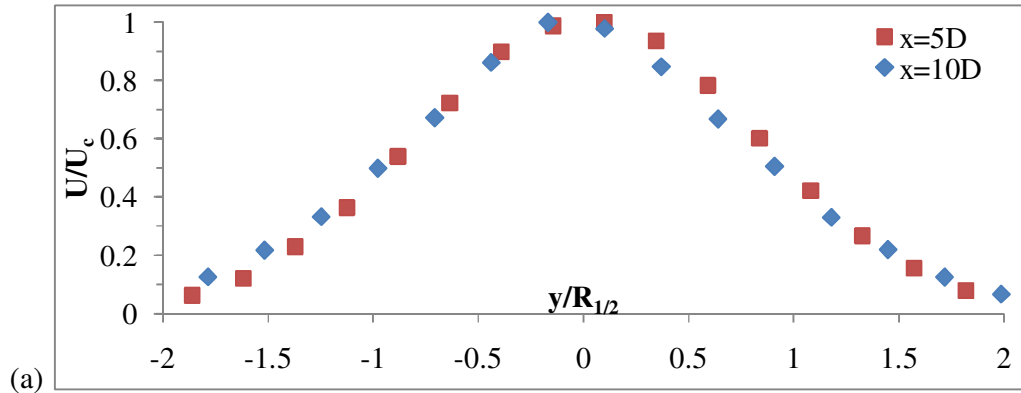
Şekil 5.31-b’de yonca kesitli jet akımı için elde edilen jet yarı kalınlığı verilerinin oluşturduğu sanal çizginin eğiminin $2D_e$ - $10D_e$ arasında yaklaşık olarak sabit kaldığı, herhangi bir kırılma noktasının olmadığı gözlemlenmiştir. Bu durum, yonca kesitli jet akımına ait jet potansiyel çekirdeğinin jet çıkışından itibaren $2D_e$ mesafesine kadar yada $2D_e$ civarında sonlandığını göstermektedir. Bu bulgu da benzer biçimde, 5.24-b numaralı şekilde elde edilen verilerle uyumaktadır.



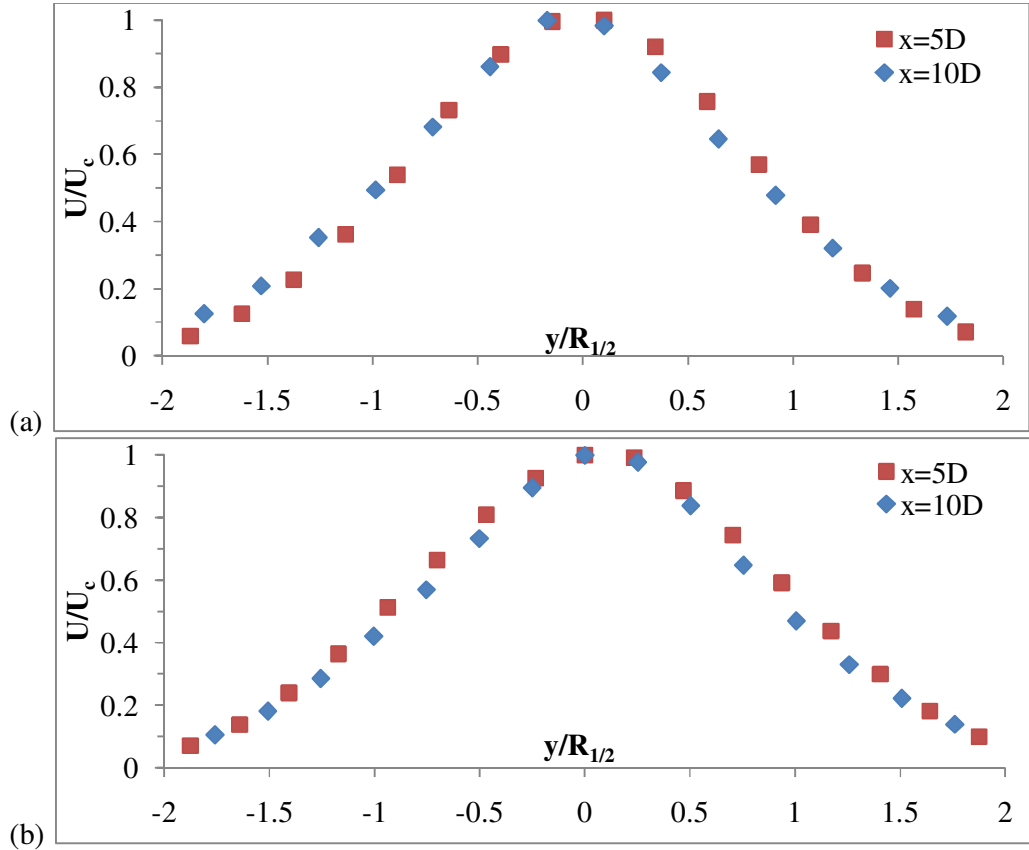
Şekil 5.31: Yatay düzlemdeki (xz) boyutsuz jet yarı-kalınlığı: (a) dairesel, (b) yonca 5.32-5.34 numaralı şekillerde dairesel ve yonca kesitli jetler için farklı Re sayılarında, $x=2D_e$ ve $x=5D_e$ istasyonları için hız profillerinin özbenzeşliği verilmiştir. Tüm Reynolds sayıları için elde edilen verilerde bu istasyonlar için herhangi bir dağılma gözlemlenmemiştir.



Şekil 5.32: $Re=40000$ için hız profillerinin öz benzeşliği: (a) dairesel, (b) yonca



Şekil 5.33: $Re=60000$ için hız profillerinin öz benzeşliği: (a) dairesel, (b) yonca

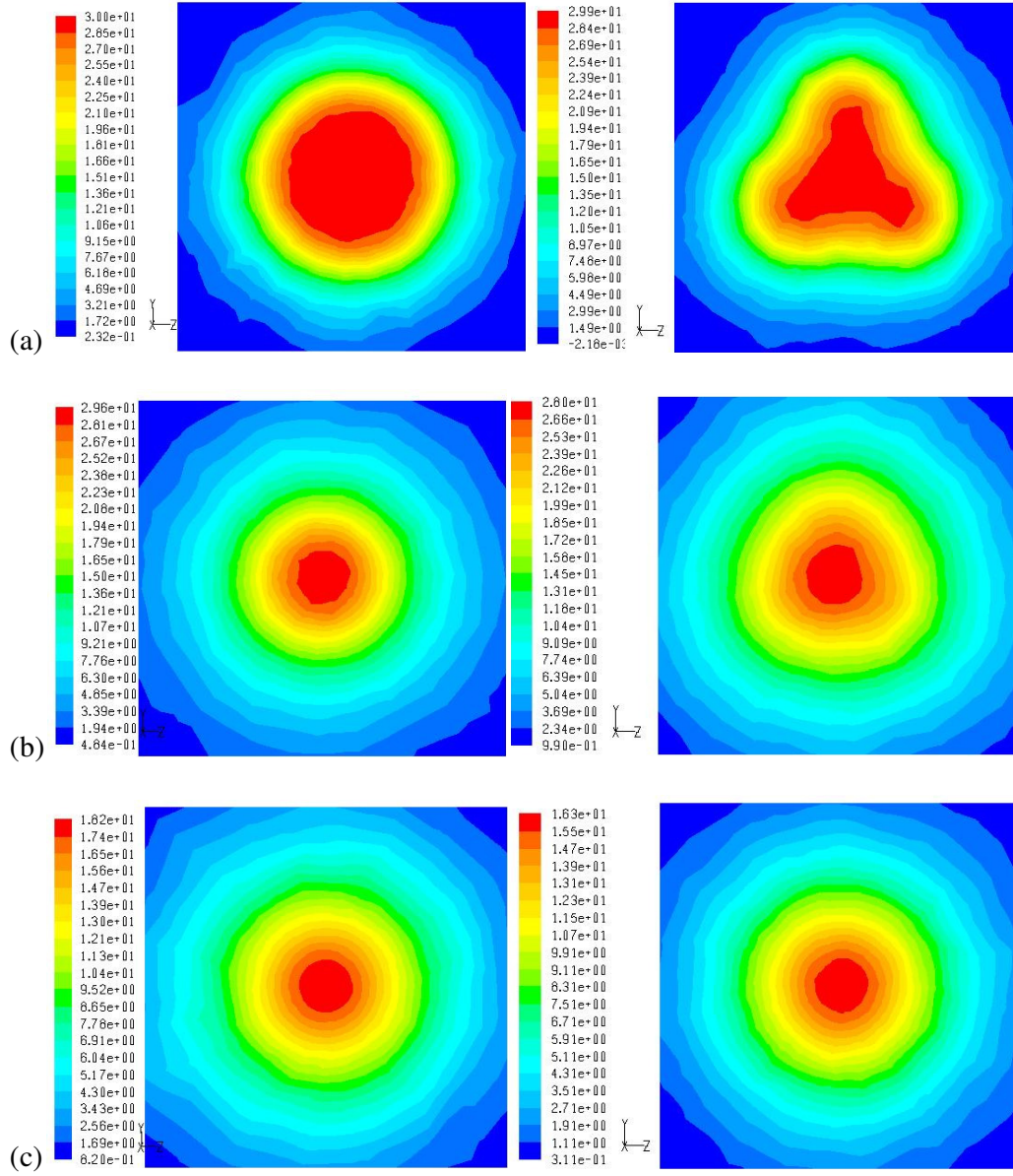


Şekil 5.34: $Re=90000$ için farklı kesitlerdeki hız profillerinin öz benzeşliği:
(a) dairesel, (b) yonca

5.2 Sayısal Sonuçlar

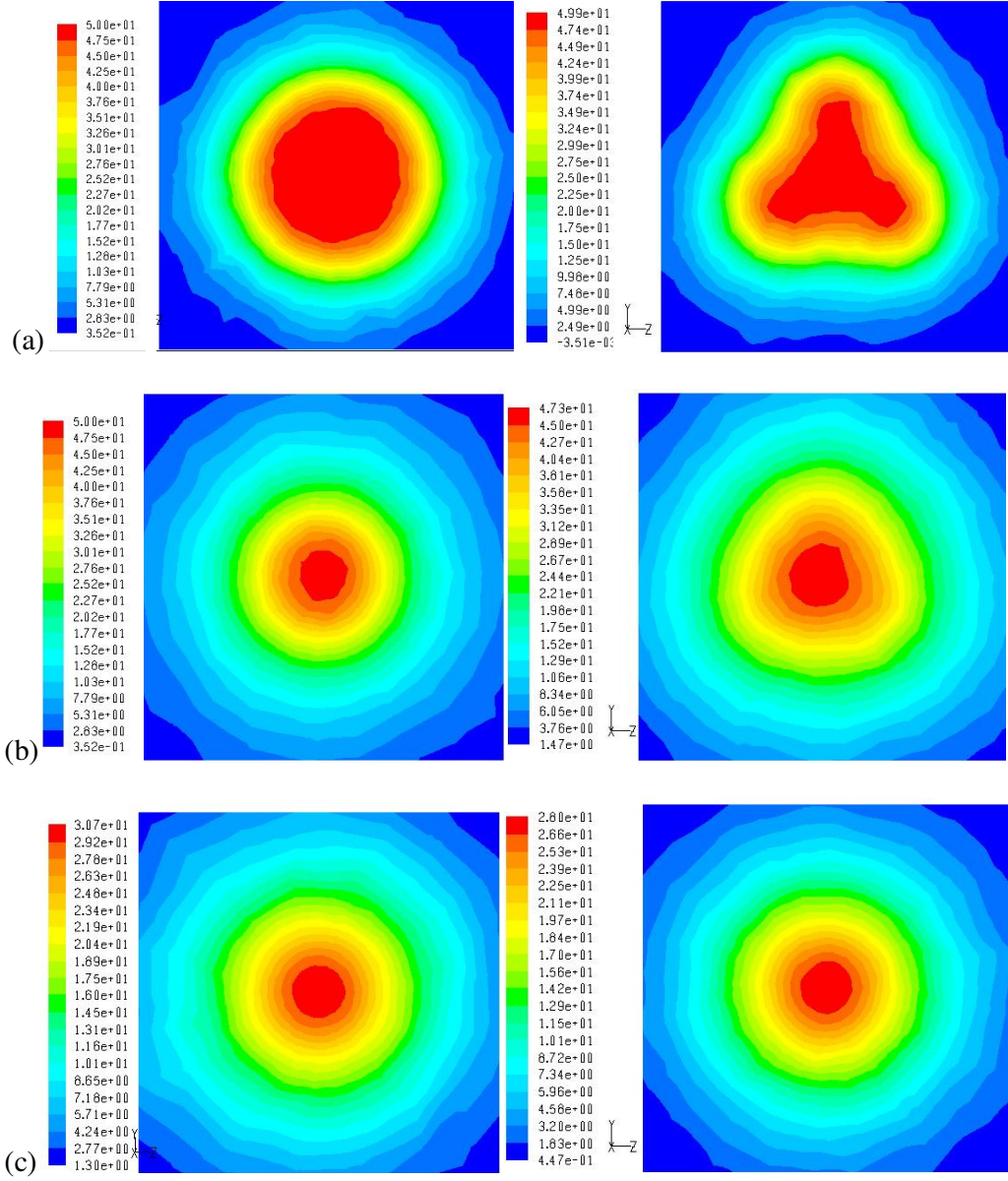
FLUENT ticari yazılımı kullanılarak elde edilen sayısal sonuçlar, bu kısımda karşılaştırmalı olarak incelenecektir.

Öncelikle iki farklı jet türü sadece sayısal sonuçlar açısından karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Şekil 5.35'te $Re=40000$ için farklı istasyonlardaki U hız bileşeni değerleri verilmiştir. Şekil 5.35-a'da 2D istasyonunda her iki jet türünün de çıkış kesit geometrisini koruduğu görülmektedir. Burada maksimum hızlar jet ekseninde aynıdır. Fakat 5D istasyonu yonca kesitli jet için dairesel forma geçiş istasyonu sayılabilir (Şekil 5.35-b). Şekil 5.35-c'de görüldüğü üzere, yonca kesitli jet akım alanında 10D istasyonundaki hız konturları dairesel form almıştır. 10D istasyonunda jet eksenindeki üzerindeki hızların dairesel jet için daha yüksek olduğu açıkça görülmektedir.



Şekil 5.35: İki farklı jet türü için $Re=40000$ 'de U hızının sayısal değerleri [m/s]: (a) $x=2D$, (b) $x=5D$, (c) $x=10D$ (solda dairesel, sağda yonca)

Şekil 5.36'da $Re=60000$ için farklı istasyonlardaki U hız bileşeni değerleri verilmiştir. Şekil 5.36-a'da 2D istasyonunda her iki jet türü de çıkış kesit geometrisini korumuştur. Burada maksimum hızlar jet ekseninde aynıdır. Şekil 5.36-b'de 5D istasyonunda yonca kesitli jet için dairesel forma geçiş istasyonu sayılabilir. Şekil 5.36-c'de görüldüğü gibi, yonca kesitli jet akım alanında 10D istasyonundaki hız konturları dairesel form almıştır.

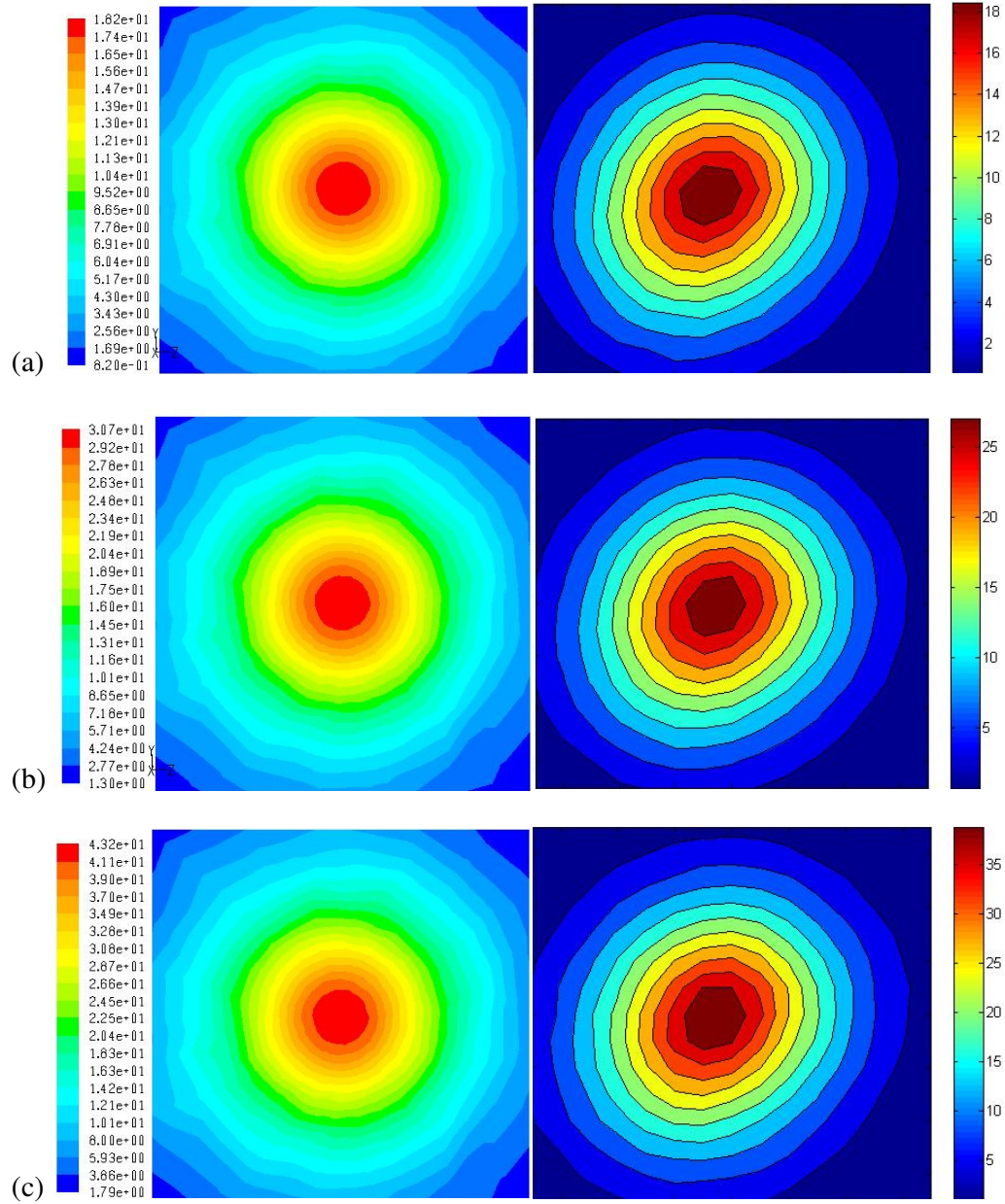


Şekil 5.36: İki farklı jet türü için $Re=60000$ 'de U hızının sayısal değerleri [m/s]: (a) $x=2D$, (b) $x=5D$, (c) $x=10D$ (solda dairesel, sağda yonca)

$Re=90000$ için elde edilen sonuçlar, diğer Re sayılarında ($Re=40000$ ve $Re=60000$) elde edilen bulgularla benzer eğilimler gösterdiğinden burada verilmemiştir.

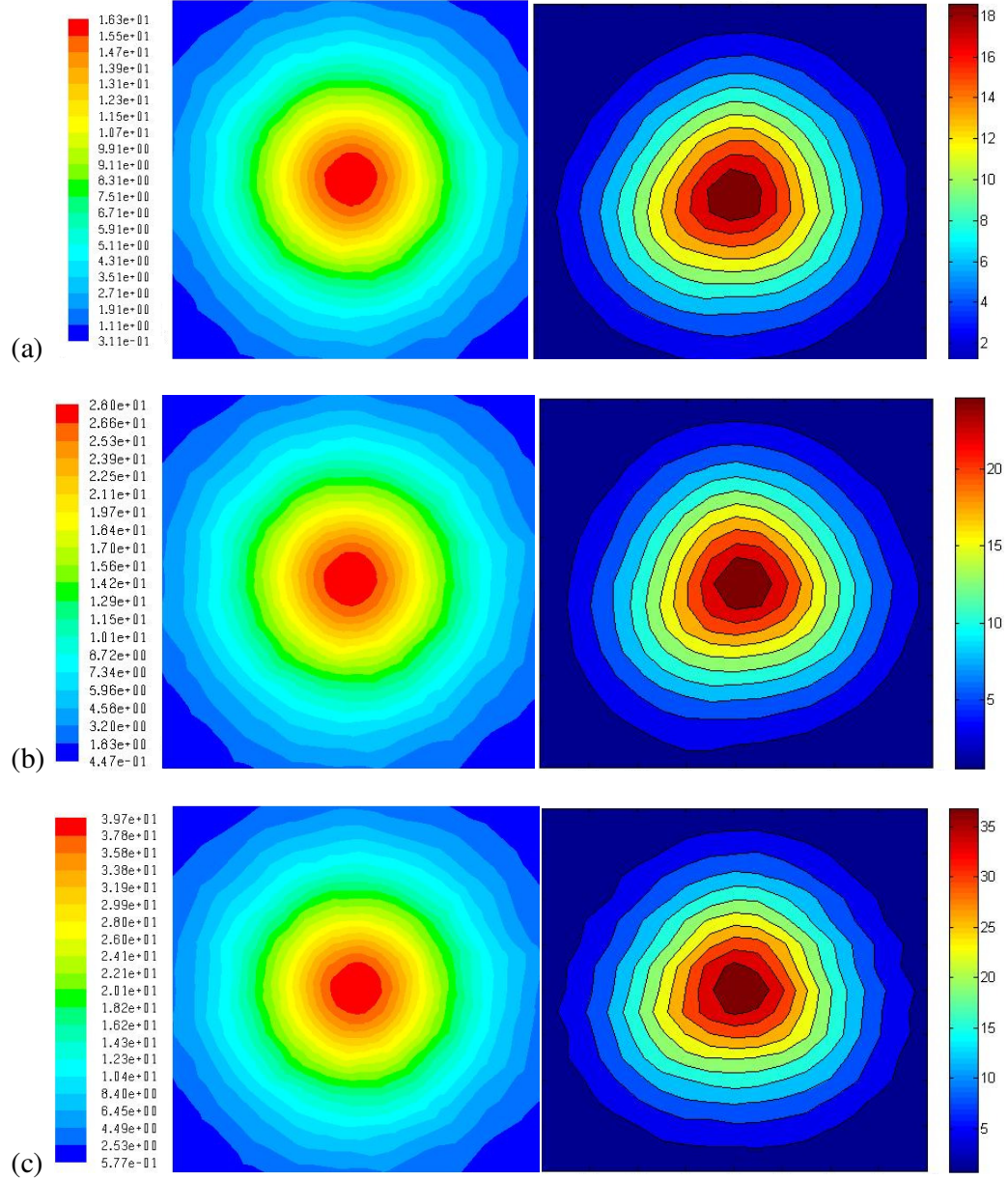
5.37-5.40 numaralı şekillerde deneysel sonuçlar ile sayısal sonuçlar karşılaştırmalı olarak elde verilmiştir.

Şekil 5.37’de dairesel jet akım alanında $x=10D_e$ istasyonundaki U hız bileşeninin sayısal ve deneysel değerleri farklı Re sayıları için verilmiştir. Bu şekillerde sayısal ve deneysel sonuçların büyük ölçüde örtüştüğü görülmektedir. Örneğin Şekil 5.37-a’da $Re=40000$ için jet eksenindeki hızın değeri sayısal sonuçlara göre 18.2 m/s iken, deneyse sonuçlara göre 18.1 m/s dir.



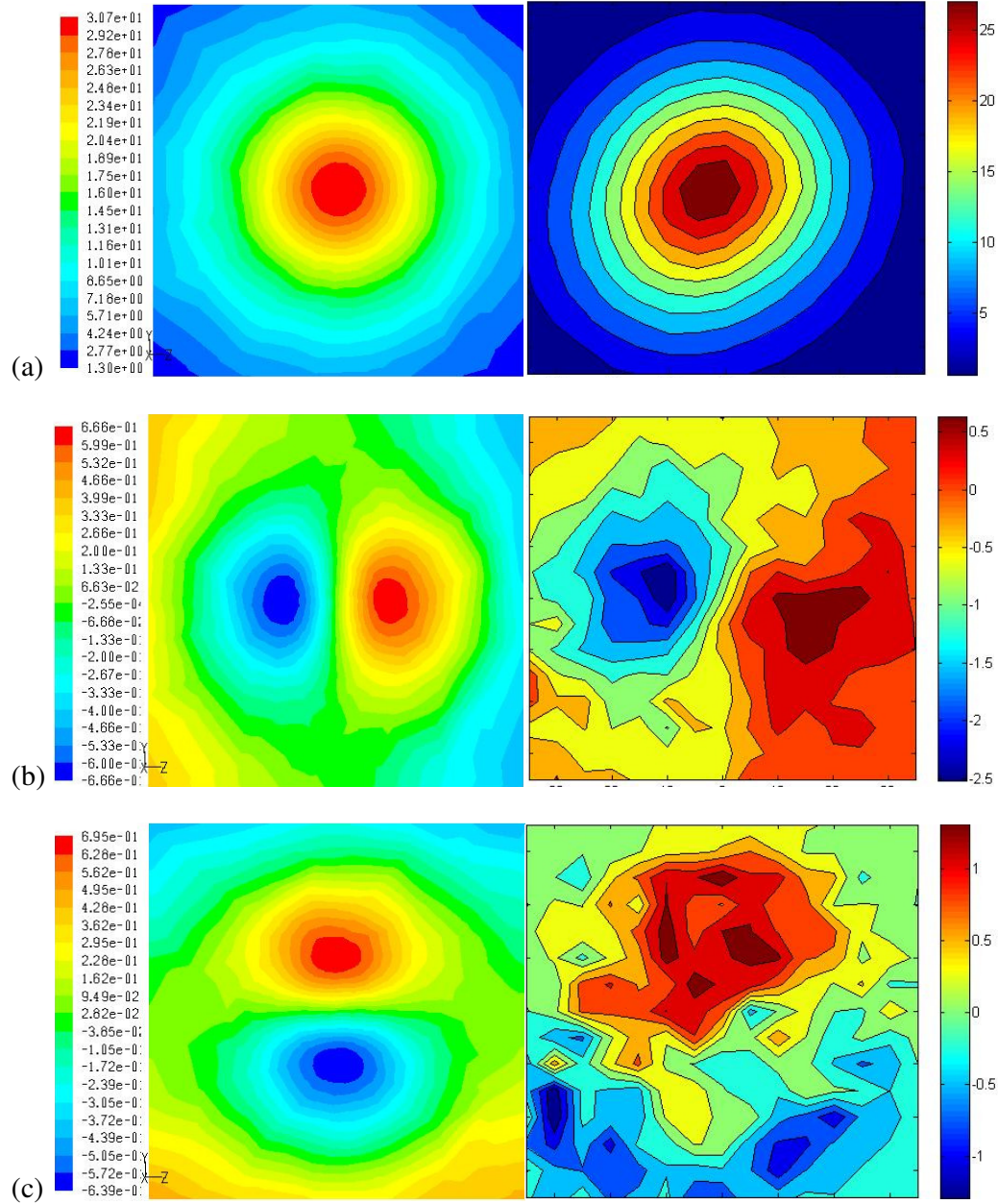
Şekil 5.37: Dairesel jet için $x=10D$ istasyonunda U hızının sayısal ve deneysel değerleri [m/s]: (a) $Re=40000$, (b) $x= Re=60000$, (c) $Re=90000$ (solda sayısal, sağda deneysel)

Şekil 5.38'de yonca kesitli jet akım alanında $x=10D_e$ istasyonundaki U hız bileşeninin sayısal ve deneysel değerleri farklı Re sayıları için verilmiştir. Bu şekillerde sayısal ve deneysel sonuçlar ile tutarlı olduğu görülmektedir.



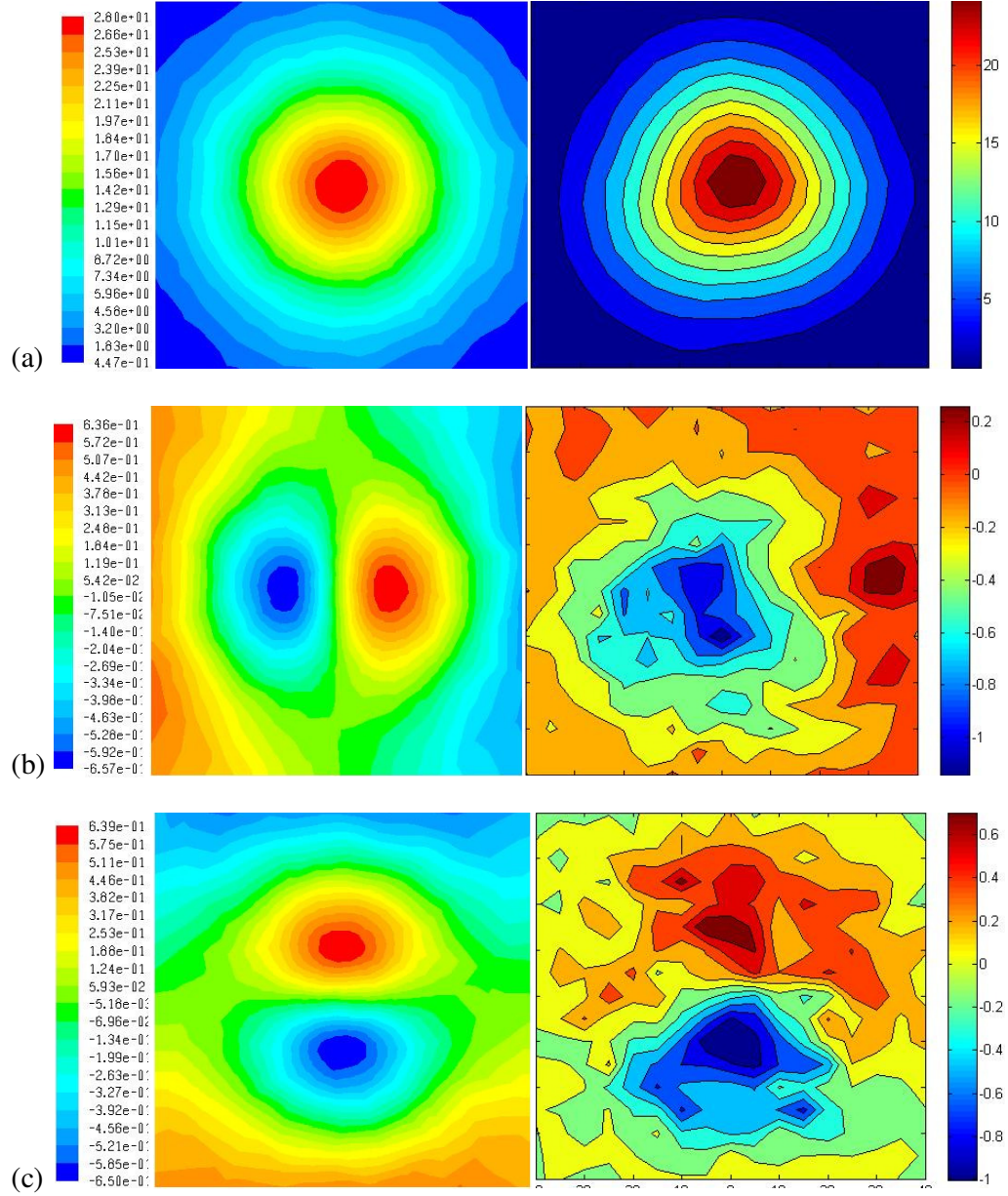
Şekil 5.38: Yonca kesitli jet için $x=10D$ istasyonunda U hızının sayısal ve deneysel değerleri [m/s]: (a) $Re=40000$, (b) $Re=60000$, (c) $Re=90000$ (solda sayısal, sağda deneysel)

Şekil 5.39'da dairesel jet akım alanında $Re=60000$ için $x=10D_e$ istasyonunda, üç eksendeki hız bileşenlerinin sayısal ve deneysel değerleri verilmiştir. Şekil 5.39-a'da U hız bileşeninin jet eksenini üzerindeki sayısal ve deneysel değerlerinin birbirine yakın olduğu görülmüştür. Şekil 5.39-b'de V hız bileşeni hem sayısal hem de deneysel sonuçlarda jet ekseninin solunda negatif sağında ise pozitif değer almaktadır. Benzer biçimde Şekil 5.39-c'de W hız bileşeni sayısal ve deneysel sonuçlarda jet ekseninin altında negatif, üstünde ise pozitif değer almaktadır.



Şekil 5.39: Dairesel jet için $Re=60000$ ve $x=10D$ istasyonunda üç eksendeki hız değerleri [m/s]: (a) U , (b) V , (c) W (solda sayısal, sağda deneysel)

V ve W hız bileşenlerinin değerleri için elde edilen sayısal ve deneysel sonuçlardaki meriteye yönünden fark konumlandırma hatalarından kaynaklanmaktadır.



Şekil 5.40: Yonca kesitli jet için $Re=60000$ ve $x=10D$ istasyonunda üç eksendeki hız değerleri [m/s]: (a) U , (b) V , (c) W (solda sayısal, sağda deneysel)

Şekil 5.40'ta yonca kesitli jet akım alanında $Re=60000$ için $x=10D_e$ istasyonunda, üç eksendeki hız bileşenlerinin sayısal ve deneysel değerleri verilmiştir. Şekil 5.49-a'da U hız bileşeninin jet eksenini üzerindeki sayısal ve deneysel değerlerinin birbirine benzer olduğu anlaşılmıştır. Şekil 5.40-b'de V hız bileşeni hem sayısal hem de deneysel sonuçlarda jet ekseninin solunda negatif sağında ise pozitif değer almaktadır. Ancak V hız bileşeni için elde edilen deneysel sonuca göre, bir konumlandırma hatası nedeni ile jet eksenini olması gereken konumun solunda kalmıştır. Şekil 5.40-c'de W hız bileşeni sayısal ve deneysel sonuçlarda jet ekseninin altında negatif, üstünde ise pozitif değer almaktadır.

6. SONUÇ VE YORUMLAR

Yapılan tez çalışmasında farklı lüleler kullanılarak oluşturulan ve değişken Re sayılarındaki jet akım alanları deneysel ve sayısal yöntemler kullanılarak incelenmiştir. Elde edilen sayısal ve deneysel veriler karşılaştırmalı olarak irdelenerek, verilerin doğruluğu araştırılmıştır.

Özellikle, x ve y yönündeki hız ve çalkantı değerleri ile xy, xz ve yz düzlemlerindeki Reynolds gerilmeleri için tutarlı deneysel sonuçlar elde edilmiştir. Bunun dışında z yönündeki hızın çalkantı değerinin belirlenmesi için ise daha az açısız konum kombinasyonuna ihtiyaç duyan bir yöntem geliştirilmelidir.

İncelenen iki jet türünden, dairesel jet için akım alanındaki boyutsuz hız bileşenlerinin incelenen hız aralıklarında genel olarak Reynolds sayısından bağımsız olduğu anlaşılmıştır. Yonca kesitli jet akım alanında ise boyutsuz hız değerlerinde özellikle $Re=40000$ için diğer Reynolds sayılarında elde edilen verilere göre belirgin farklılıklar görülmüştür.

Deneysel ve sayısal sonuçlar yonca kesitli jet türünün dairesel jete göre çok daha hızlı dağıldığını göstermiştir. Dairesel jet için potansiyel çekirdek uzunluğu $4D_e$ iken, yonca kesitli jet için bu uzunluğun $2D_e$ olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Elde edilen deneysel sonuçlar, her iki jet türü için ölçüm yapılan istasyonlar üzerindeki türbülans profillerinin farklı olduğunu göstermiştir. Bununla birlikte bu iki jet türü için elde edilen türbülans profillerinin mertebelerinin birbirine yakın olduğu gözlemlenmiştir.

Çalışmanın deneysel kısmında karşılaşılan ve sonuçlara olumsuz etkisi olan etken, üretimden kaynaklanan prob konumlandırma sorunudur. Deneysel yöntemin birden çok açısız konumlandırma durumlarından elde edilecek verilerin bir kombinasyonuna ihtiyaç duyması daha hassas bir hareket mekanizmasının gerekliliğini ortaya koymuştur.

KAYNAKLAR

- Berg, J. R., Ormiston, S. J. ve Soliman, H. M.,** 2006: Prediction of the flow structure in a turbulent rectangular free jet, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Cilt **33**, s. 552–563.
- Buresti, G., Di Cocco, N. R.,** 1987: Hot-wire measurement procedures and their appraisal through a simulation technique, *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, Cilt **20**, s. 88-99.
- Buresti, G., Petagna, P. ve Talamelli, A.,** 1998: Experimental investigation on the turbulent near-field of coaxial jets, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Cilt **17**, s. 18-36.
- Grinsteina, F. F., Gutmark, E. ve Parr, T.,** 1995: Near field dynamics of subsonic free square jets. A computational and experimental study, *Physics of Fluids*, Cilt **7**, s. 1483-1497.
- Husain, H. S. ve Hussain, F.,** 1999: The elliptic whistler jet, *J. Fluid Mechanics*, Cilt **397**, s. 23-44.
- Kim, S.E., Choudhury, D. ve Patel, B.,** 1997: Computations of Complex Turbulent Flows Using the Commercial Code FLUENT, *In Proceedings of the ICASE/LaRC/AFOSR Symposium on Modeling Complex Turbulent Flows*, Hampton, Virginia.
- Lauder, B. E. ve Spalding, D. B.,** 1972. Lectures in Mathematical Models of Turbulence, *Academic Press*, London, England.
- Mi, J., Nathan, G. J. ve Luxton, R. E.,** 2000: “Centreline mixing characteristics of jets from nine differently shaped nozzles”, *Experiments in Fluids*, Cilt **28**, s. 93-94.
- Miller, R. S., Madnia, C. K. ve Givi, P.,** 1995: Numerical Simulation of Non-Circular Jets, *Computers & Fluids*, Cilt **24**, s. 1-25.
- Quinn, W. R.,** 2005: Measurements in the near flow field of an isosceles triangular turbulent free jet, *Experiments in Fluids*, Cilt **39**, s. 111–126.
- Shih, T.H., Liou, W. W., Shabbir, A., Yang, Z. ve Zhu, J.,** 1995: A New $k-\varepsilon$ Eddy-Viscosity Model for High Reynolds Number Turbulent Flows - Model Development and Validation, *Computers and Fluids*, Cilt **24**, s.227-238.

Url-1 < <http://www.dantecdynamics.com/>>, alındığı tarih 29.11.2010.

Vandoormaal, J. P. ve Raithby, G. D., 1984: Enhancements of the SIMPLE Method for Predicting Incompressible Fluid Flows, *Numerical Heat Transfer*, Cilt 7, s. 147-163.

Zaman, K. B. Q. M., 1999: Spreading characteristics of compressible jets from nozzles of various geometries, *J. Fluid Mechanics*, Cilt 383, S. 197-228. 0

EKLER

EK A: Katsayı değerleri

Prob oryantasyonuna göre etkin hız denklemlerindeki katsayıların aldıkları değerler, Çizelge A.1’de verilmiştir.

Çizelge A.1 : Prob açısıl konumuna göre katsayı değerleri.

	a	b	c	d	e	f	g	h	m	n	o	o'
B1	0.71	0.71	0.81	0.81	0.81	0.81	0.90	0.90	0.71	0.71	1.00	1.00
B2	-0.70	0.70	-0.43	0.43	-0.43	0.43	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
B3	0.00	0.00	0.19	0.19	-0.19	-0.19	0.00	0.00	-0.71	0.71	0.00	0.00
B4	0.01	0.01	0.20	0.20	0.20	0.20	0.28	0.28	0.57	0.57	0.01	0.41
B5	0.57	0.57	0.38	0.38	0.38	0.38	0.28	0.28	0.00	0.00	0.41	0.00
B6	0.00	0.00	0.53	-0.53	-0.53	0.53	0.55	-0.55	0.00	0.00	0.00	0.00
B7	-0.01	-0.01	-0.20	-0.20	-0.20	-0.20	-0.28	-0.28	-0.57	-0.57	-0.01	-0.41
B8	-0.57	-0.57	-0.38	-0.38	-0.38	-0.38	-0.28	-0.28	0.00	0.00	-0.41	0.00
B9	0.00	0.00	-0.53	0.53	0.53	-0.53	-0.55	0.55	0.00	0.00	0.00	0.00
B10	0.01	-0.01	0.10	-0.10	0.10	-0.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
B11	0.00	0.00	0.24	0.24	-0.24	-0.24	0.00	0.00	0.57	-0.57	0.00	0.00
B12	0.56	-0.56	0.08	-0.08	0.08	-0.08	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
B13	0.00	0.00	-0.09	-0.09	0.09	0.09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
C1	0.51	0.51	0.66	0.66	0.66	0.66	0.81	0.81	0.51	0.51	1.00	1.00
C2	0.49	0.49	0.19	0.19	0.19	0.19	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
C3	0.00	0.00	0.04	0.04	0.04	0.04	0.00	0.00	0.51	0.51	0.00	0.00
C4	-0.99	0.99	-0.70	0.70	-0.70	0.70	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
C5	0.00	0.00	0.31	0.31	-0.31	-0.31	0.00	0.00	-1.01	1.01	0.00	0.00
C6	0.00	0.00	-0.16	0.16	0.16	-0.16	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
C7	0.02	0.02	0.32	0.32	0.32	0.32	0.51	0.51	0.81	0.81	0.01	0.81
C8	0.00	0.00	0.86	-0.86	-0.86	0.86	0.99	-0.99	0.00	0.00	0.00	0.00
C9	0.81	0.81	0.62	0.62	0.62	0.62	0.51	0.51	0.00	0.00	0.81	0.00
C10	-0.02	0.02	-0.17	0.17	-0.17	0.17	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
C11	0.00	0.00	-0.31	-0.31	0.31	0.31	0.00	0.00	-1.62	1.62	0.00	0.00
C12	0.00	0.00	-0.46	-0.46	0.46	0.46	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
C13	0.00	0.00	-0.39	-0.39	0.39	0.39	0.00	0.00	-0.81	0.81	0.00	0.00
C14	0.00	0.00	0.20	-0.20	0.20	-0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
C15	-1.59	1.59	-0.46	0.46	-0.46	0.46	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
C16	-0.79	0.79	-0.13	0.13	-0.13	0.13	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
C17	0.00	0.00	0.14	0.14	-0.14	-0.14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

EK B: Ortalama Etkin Hızın Hesaplanması

Bölüm 3.2’de, (3.17) numaralı denklemdeki deki X terimi, (3.18)’de yerine uygulanıp, binom serisi açık bir şekilde yazıldığında zamana bağlı etkin hız aşağıdaki gibi elde edilir:

$$\begin{aligned}
 Q &= A_1^{1/2} U \left\{ 1 + \frac{1}{2} \left[2 \frac{u}{U} + \left(\frac{u}{U} \right)^2 + \frac{A_2}{A_1} \left(\frac{V^2 + 2Vv + v^2}{U^2} \right) + \frac{A_3}{A_1} \left(\frac{W^2 + 2Ww + w^2}{U^2} \right) \right. \right. \\
 &\quad + \frac{A_4}{A_1} \left(\frac{UV + Uv + Vu + uv}{U^2} \right) + \frac{A_5}{A_1} \left(\frac{UW + Uw + Wu + uw}{U^2} \right) \\
 &\quad \left. \left. + \frac{A_6}{A_1} \left(\frac{VW + Vw + Wv + vw}{U^2} \right) \right] \right\} \\
 &- \frac{1}{8} \left[4 \frac{u^2}{U^2} + \frac{u^4}{U^4} + \underbrace{\frac{A_2^2}{A_1^2} \left(\frac{V^4 + 4V^2v^2 + v^4 + 4V^3v + 2V^2v^2 + 4Vv^3}{U^4} \right)}_{=T_6} \right. \\
 &\quad \left. + \underbrace{\frac{A_3^2}{A_1^2} \left(\frac{W^4 + 4W^2w^2 + w^4 + 4W^3w + 2W^2w^2 + 4Ww^3}{U^4} \right)}_{=T_7} \right. \\
 &\quad \left. + \underbrace{\frac{A_4^2}{A_1^2} \left(\frac{U^2V^2 + U^2v^2 + V^2u^2 + u^2v^2 + 2U^2Vv}{+2UV^2u + 4UVuv + 2Uuv^2 + 2Vu^2v} \right)}_{=T_8} \right. \\
 &\quad \left. + \underbrace{\frac{A_5^2}{A_1^2} \left(\frac{U^2W^2 + U^2w^2 + W^2u^2 + u^2w^2 + 2U^2Ww}{+2UW^2u + 4UWuw + 2Uuw^2 + 2Wu^2w} \right)}_{=T_9} \right. \\
 &\quad \left. + \underbrace{\frac{A_6^2}{A_1^2} \left(\frac{V^2W^2 + V^2w^2 + W^2v^2 + v^2w^2 + 2V^2Ww}{+2VW^2v + 4UWvw + 2Vvw^2 + 2Wv^2w} \right)}_{=T_{10}} \right] + 4 \frac{u^3}{U^3} \\
 &+ 4 \underbrace{\frac{A_2}{A_1} \left(\frac{V^2u + 2Vuv + uv^2}{U^3} \right)}_{=T_{11}} + 4 \underbrace{\frac{A_3}{A_1} \left(\frac{W^2u + 2Wuw + uw^2}{U^3} \right)}_{=T_{12}} \\
 &\quad + 4 \underbrace{\frac{A_4}{A_1} \left(\frac{UVu + Uuv + Vu^2 + u^2v}{U^3} \right)}_{=T_{13}}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + 4 \underbrace{\frac{A_5}{A_1} \left(\frac{UWu + Uw + Wu^2 + u^2w}{U^3} \right)}_{=T_{14}} + 4 \underbrace{\frac{A_6}{A_1} \left(\frac{VWu + Vuw + Wuv + uvw}{U^3} \right)}_{=T_{15}} \\
& \quad + 2 \underbrace{\frac{A_2}{A_1} \left(\frac{V^2u^2 + 2Vu^2v + u^2v^2}{U^4} \right)}_{=T_{16}} \\
& + 2 \underbrace{\frac{A_3}{A_1} \left(\frac{W^2u^2 + 2Wu^2w + u^2w^2}{U^4} \right)}_{=T_{17}} + 2 \underbrace{\frac{A_4}{A_1} \left(\frac{UVu^2 + Uu^2v + Vu^3 + u^3v}{U^4} \right)}_{=T_{18}} \\
& \quad + 2 \underbrace{\frac{A_5}{A_1} \left(\frac{UWu^2 + Uu^2w + Wu^3 + u^3w}{U^4} \right)}_{=T_{19}} \\
& + 2 \underbrace{\frac{A_6}{A_1} \left(\frac{VWu^2 + Vu^2w + Wu^2v + u^2vw}{U^4} \right)}_{=T_{20}} \\
& + 2 \underbrace{\frac{A_2A_3}{A_1^2} \left(\frac{V^2W^2 + 2V^2Ww + V^2w^2 + 2VW^2w + 4VWvw}{+2Vvw^2 + W^2v^2 + 2Wv^2w + v^2w^2} \right)}_{=T_{21}} \\
& + 2 \underbrace{\frac{A_2A_4}{A_1^2} \left(\frac{UV^3 + UV^2v + V^3u + 3V^2uv + 3UV^2v}{+3UVv^2 + 3Vuv^2 + Uv^3 + uv^3} \right)}_{=T_{22}} \\
& + 2 \underbrace{\frac{A_2A_5}{A_1^2} \left(\frac{UV^2W + UV^2w + V^2Wu + V^2uw + 2UVWv + 2UVvw}{+2VWuv + 2Vuvw + UWv^2 + Uv^2w + Wuv^2 + uv^2w} \right)}_{=T_{23}} \\
& + 2 \underbrace{\frac{A_2A_6}{A_1^2} \left(\frac{V^3W + V^3w + 3V^2Wv + 3V^2vw + 3VWv^2 + 3Vv^2w + Wv^3 + v^3w}{U^4} \right)}_{=T_{24}} \\
& + 2 \underbrace{\frac{A_3A_4}{A_1^2} \left(\frac{UVW^2 + UW^2v + VW^2u + W^2uv + 2UVWw + 2UWvw}{+2VWuw + 2Wuvw + UVw^2 + Uvw^2 + Vuw^2 + uvw^2} \right)}_{=T_{25}} \\
& + 2 \underbrace{\frac{A_3A_5}{A_1^2} \left(\frac{UW^3 + W^3u + 3UW^2w + 3W^2uw}{+3UWw^2 + 3Wuw^2 + Uw^3 + uw^3} \right)}_{=T_{26}}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \times \left(\frac{u^4}{U^4} + T_6 + T_7 + T_{10} + 4 \frac{u^3}{U^3} + T_{11} + T_{12} + T_{15} + T_{16} + T_{17} + T_{18} \right. \\
& \quad \left. + T_{19} + T_{20} + T_{21} + T_{22} + T_{23} + T_{24} + T_{25} + T_{26} + T_{28} + T_{29} + T_{30} \right) \\
& + 4 \frac{A_4}{A_1} \left(\frac{UVu^2 + Uu^2v + Vu^3 + u^3v}{U^4} \right) \\
& \quad + \frac{A_4^3}{A_1^3} \left(\frac{U^3V^3 + 3U^3V^2v + 3U^3Vv^2 + U^3v^3}{U^6} + O(u_i^4/U^4) \right) \\
& + 4 \frac{A_4A_5^2}{A_1^3} \left(\frac{U^3VW^2 + U^3Vw^2 + 2U^3VWw + U^3vw^2 + U^3W^2v + 2U^3Wvw}{U^6} \right) \\
& + 4 \frac{A_4^2}{A_1^2} \left(\frac{U^2V^2u + U^2uv^2 + V^2u^3 + u^3v^2 + 2U^2Vuv}{U^5} \right) \\
& + 4 \frac{A_4A_5}{A_1^2} \left(\frac{U^2VWu + U^2Vuw + 2UVWu^2 + 2UVu^2w + U^2Wuv + U^2uvw}{U^5} \right. \\
& \quad \left. + 2UWu^2v + 2Uu^2vw + VWu^3 + Vu^3w + Wu^3v + u^3vw \right) \\
& + 2 \frac{A_4^2A_5}{A_1^3} \left(\frac{U^3V^2W + U^3V^2w + 2U^3VWv + 2U^3Vvw + U^3Wv^2 + U^3v^2w}{U^6} \right. \\
& \quad \left. + O(u_i^4/U^4) \right) \\
& + \frac{A_5}{A_1} \left(\frac{UW + Uw + Wu + uw}{U^2} \right) \\
& \times \left(\frac{u^4}{U^4} + T_6 + T_7 + T_{10} + 4 \frac{u^3}{U^3} + T_{11} + T_{12} + T_{15} + T_{16} + T_{17} + T_{18} \right) \\
& \quad \left. + T_{19} + T_{20} + T_{21} + T_{22} + T_{23} + T_{24} + T_{25} + T_{26} + T_{28} + T_{29} + T_{30} \right) \\
& + 4 \frac{A_5}{A_1} \left(\frac{UWu^2 + Uu^2w + Wu^3 + u^3w}{U^4} \right) \\
& + \frac{A_4^2A_5}{A_1^3} \left(\frac{U^3V^2W + U^3V^2w + 2U^3VWv + 2U^3Vvw + U^3Wv^2 + U^3v^2w}{U^6} \right. \\
& \quad \left. + O(u_i^4/U^4) \right) \\
& + \frac{A_5^3}{A_1^3} \left(\frac{U^3W^3 + 3U^3Ww^2 + 3U^3W^2w + U^3w^3}{U^6} + O(u_i^4/U^4) \right)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& +4 \frac{A_4 A_5}{A_1^2} \left(\frac{U^2 V W u + U^2 V u w + 2 U V W u^2 + 2 U V u^2 w + U^2 W u v + U^2 u v w}{U^5} \right) \\
& +4 \frac{A_5^2}{A_1^2} \left(\frac{U^2 W^2 u + U^2 u w^2 + W^2 u^3 + u^3 w^2 + 2 U^2 W u w}{U^5} \right) \\
& +2 \frac{A_4 A_5^2}{A_1^3} \left(\frac{U^3 V W^2 + U^3 V w^2 + 2 U^3 V W w + U^3 v w^2 + U^3 W^2 v + 2 U^3 W v w}{U^6} \right) \\
& + \frac{A_6}{A_1} \left(\frac{V W + V w + W v + v w}{U^2} \right) X^2 \Big] \Big\} + O(u_i^4 / U^3)
\end{aligned}$$

Yukarıda elde edilen etkin hız değerinin zamana bağlı ortalaması alındığında, ortalama etkin hız aşağıdaki gibi elde edilir:

$$\begin{aligned}
\bar{Q} = & A_1^{1/2} U \left\{ 1 + \frac{1}{2} \left[\frac{A_2}{A_1} \left(\frac{V^2 + \bar{v}^2}{U^2} \right) + \frac{A_3}{A_1} \left(\frac{W^2 + \bar{w}^2}{U^2} \right) + \frac{A_4}{A_1} \left(\frac{U V + \bar{u} \bar{v}}{U^2} \right) \right. \right. \\
& \left. \left. + \frac{A_5}{A_1} \left(\frac{U W + \bar{u} \bar{w}}{U^2} \right) + \frac{A_6}{A_1} \left(\frac{V W + \bar{v} \bar{w}}{U^2} \right) \right] \right. \\
& - \frac{1}{8} \left[\frac{A_4^2}{A_1^2} \left(\frac{U^2 V^2 + U^2 \bar{v}^2 + 4 U V \bar{u} \bar{v} + 2 U \bar{u} \bar{v}^2}{U^4} \right) \right. \\
& \left. + \frac{A_5^2}{A_1^2} \left(\frac{U^2 W^2 + U^2 \bar{w}^2 + 4 U W \bar{u} \bar{w} + 2 U \bar{u} \bar{w}^2}{U^4} \right) + 4 \frac{\bar{u}^3}{U^3} \right. \\
& \left. + 4 \frac{A_2}{A_1} \left(\frac{2 V \bar{u} \bar{v} + \bar{u} \bar{v}^2}{U^3} \right) \right. \\
& + 4 \frac{A_3}{A_1} \left(\frac{2 W \bar{u} \bar{w} + \bar{u} \bar{w}^2}{U^3} \right) + 4 \frac{A_4}{A_1} \left(\frac{U \bar{u} \bar{v} + V \bar{u}^2 + \bar{u}^2 \bar{v}}{U^3} \right) \\
& \left. + 4 \frac{A_5}{A_1} \left(\frac{U \bar{u} \bar{w} + W \bar{u}^2 + \bar{u}^2 \bar{w}}{U^3} \right) + 4 \frac{A_6}{A_1} \left(\frac{V \bar{u} \bar{w} + W \bar{u} \bar{v} + \bar{u} \bar{v} \bar{w}}{U^3} \right) \right. \\
& + 2 \frac{A_4}{A_1} \left(\frac{U V \bar{u}^2 + U \bar{u}^2 \bar{v}}{U^4} \right) + 2 \frac{A_5}{A_1} \left(\frac{U W \bar{u}^2 + U \bar{u}^2 \bar{w}}{U^4} \right) \\
& \left. + 2 \frac{A_2 A_4}{A_1^2} \left(\frac{U V^3 + 3 U V \bar{v}^2 + U \bar{v}^3}{U^4} \right) \right. \\
& + 2 \frac{A_2 A_5}{A_1^2} \left(\frac{U V^2 W + 2 U V \bar{v} \bar{w} + U W \bar{v}^2 + U \bar{v}^2 \bar{w}}{U^4} \right) \\
& \left. + 2 \frac{A_3 A_4}{A_1^2} \left(\frac{U V W^2 + 2 U W \bar{v} \bar{w} + U V \bar{w}^2 + U \bar{v} \bar{w}^2}{U^4} \right) \right\}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& +2 \frac{A_3 A_5}{A_1^2} \left(\frac{UW^3 + 3UW\bar{w}^2 + U\bar{w}^3}{U^4} \right) \\
& \quad + 2 \frac{A_4 A_5}{A_1^2} \left(\frac{U^2 VW + 2UV\bar{u}\bar{w} + U^2 \bar{v}\bar{w} + 2UW\bar{u}\bar{v} + 2U\bar{u}\bar{v}\bar{w}}{U^4} \right) \\
& +2 \frac{A_4 A_6}{A_1^2} \left(\frac{UV^2 W + 2UV\bar{v}\bar{w} + UW\bar{v}^2 + U\bar{v}^2 \bar{w}}{U^4} \right) \\
& +2 \frac{A_5 A_6}{A_1^2} \left(\frac{UVW^2 + 2UW\bar{v}\bar{w} + UV\bar{w}^2 + U\bar{v}\bar{w}^2}{U^4} \right) \Big] \\
& + \frac{1}{16} \left[2 \frac{A_4^2}{A_1^2} \left(\frac{U^2 \bar{u}\bar{v}^2 + 2U^2 V\bar{u}\bar{v}}{U^5} \right) + 2 \frac{A_5^2}{A_1^2} \left(\frac{U^2 \bar{u}\bar{w}^2 + 2U^2 W\bar{u}\bar{w}}{U^5} \right) \right. \\
& \quad \left. + 8 \frac{A_4}{A_1} \left(\frac{UV\bar{u}^2 + U\bar{u}^2 \bar{v}}{U^4} \right) + 8 \frac{A_5}{A_1} \left(\frac{UW\bar{u}^2 + U\bar{u}^2 \bar{w}}{U^4} \right) \right. \\
& +4 \frac{A_4 A_5}{A_1^2} \left(\frac{U^2 V\bar{u}\bar{w} + U^2 W\bar{u}\bar{v} + U^2 \bar{u}\bar{v}\bar{w}}{U^5} \right) + 4 \frac{A_4}{A_1} \left(\frac{UV\bar{u}^2 + U\bar{u}^2 \bar{v}}{U^4} \right) \\
& \quad \left. + \frac{A_4^3}{A_1^3} \left(\frac{U^3 V^3 + 3U^3 V\bar{v}^2 + U^3 \bar{v}^3}{U^6} \right) \right. \\
& + \frac{A_4 A_5^2}{A_1^3} \left(\frac{U^3 VW^2 + U^3 V\bar{w}^2 + U^3 \bar{v}\bar{w}^2 + 2U^3 W\bar{v}\bar{w}}{U^6} \right) + 4 \frac{A_4^2}{A_1^2} \left(\frac{U^2 \bar{u}\bar{v}^2 + 2U^2 V\bar{u}\bar{v}}{U^5} \right) \\
& \quad \left. + 4 \frac{A_4 A_5}{A_1^2} \left(\frac{U^2 V\bar{u}\bar{w} + U^2 W\bar{u}\bar{v} + U^2 \bar{u}\bar{v}\bar{w}}{U^5} \right) \right. \\
& +2 \frac{A_4^2 A_5}{A_1^3} \left(\frac{U^3 V^2 W + 2U^3 V\bar{v}\bar{w} + U^3 W\bar{v}^2 + U^3 \bar{v}^2 \bar{w}}{U^6} \right) + 4 \frac{A_5}{A_1} \left(\frac{UW\bar{u}^2 + U\bar{u}^2 \bar{w}}{U^4} \right) \\
& + \frac{A_4^2 A_5}{A_1^3} \left(\frac{U^3 V^2 W + 2U^3 V\bar{v}\bar{w} + U^3 W\bar{v}^2 + U^3 \bar{v}^2 \bar{w}}{U^6} \right) \\
& \quad \left. + \frac{A_5^3}{A_1^3} \left(\frac{U^3 W^3 + 3U^3 W\bar{w}^2 + U^3 \bar{w}^3}{U^6} \right) \right. \\
& +4 \frac{A_4 A_5}{A_1^2} \left(\frac{U^2 V\bar{u}\bar{w} + U^2 W\bar{u}\bar{v} + U^2 \bar{u}\bar{v}\bar{w}}{U^5} \right) + 4 \frac{A_5^2}{A_1^2} \left(\frac{U^2 \bar{u}\bar{w}^2 + 2U^2 W\bar{u}\bar{w}}{U^5} \right) \\
& +2 \frac{A_4 A_5^2}{A_1^3} \left(\frac{U^3 VW^2 + U^3 V\bar{w}^2 + U^3 \bar{v}\bar{w}^2 + 2U^3 W\bar{v}\bar{w}}{U^6} \right) \Big] \Big] \\
& \quad + O(u_i^4/U^3)
\end{aligned}$$

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Yalçın Yükselentürk

Doğum Yeri ve Tarihi: Eskişehir - 23.10.1983

Lisans Üniversitesi: İstanbul Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü

Yayın Listesi:

- Yılmaz, M., Gül, M. Z., **Yükselentürk, Y.**, Akay, B., Köten, H., 2009: Effects of the Injection Parameters on the Emissions of a Heavy Duty Diesel Engine, *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, Cilt **3**, 351-360.