

Daralan Lüle Geometrisinde Pah Kırmanın Akım Yapısına Olan Etkisi

Araz Jabbarli¹ Yavuzer Karakuş²
İstanbul Teknik Üniversitesi/İstanbul

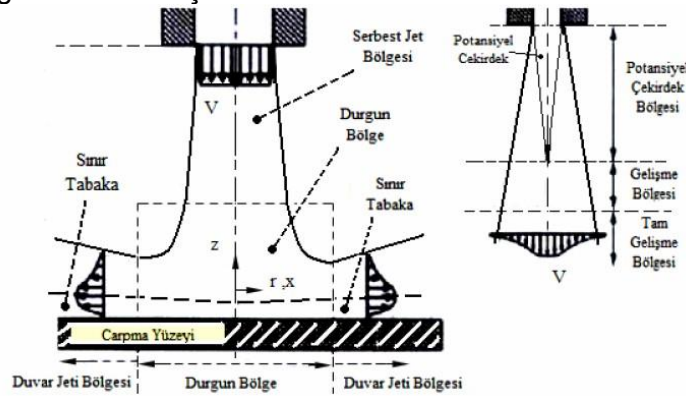
Duygu Erdem³
İstanbul Teknik Üniversitesi/İstanbul

ÖZET

Bu çalışmada gaz türbinlerinde kullanılan ileri soğutma yöntemlerinden biri olan çarpma soğutması yönteminin incelenmesi için kurulmuş test düzeneğinde çarpan jet akış karakteristikleri incelenmiştir. Çalışmanın amacı daralan lüle geometrilerinin akış yapısına olan etkisini incelemektir. Daralma açıları 0° , 30° ve 45° olarak belirlenmiştir. Deneyler belirli Reynolds sayıları ve jet ile hedef arası mesafelerde yapılmaktadır. Reynolds sayısı 10000 – 50000 arasında, jet ile hedef arası mesafe $H/D = 4, 6, 10$ olarak alınmıştır. Jet çıkış çapı sabit ve 10 mm olarak seçilmiştir. Akış yapılarının incelenmesi amacıyla jet çıkış bölgesinde sıcak tel anemometresi ölçümleri ve çarpma yüzeyinde basınç ölçümleri yapılmıştır.

GİRİŞ

Günümüz dünyasında, gaz türbinleri birçok yerde enerji kaynağı olarak kullanılmaktadır. Bunlar genel olarak; havacılık, elektrik üretim santralleri ve çeşitli endüstriyel uygulamalardır. Bu uygulamalarda gaz türbinleri aşırı sıcaklıklara maruz kalmaktadırlar ve doğru soğutulmadıkları zaman farklı yönlerde verim düşüşüne veya arızaya sebebiyet vermektedirler. Genel olarak bilindiği gibi, gaz türbinlerin ısı verimini ve çıkış gücünü iki faktör belirlemektedir[1]. Bunlar, kompresör basınç oranı ve türbin giriş sıcaklığıdır. Bundan dolayı, yapılan bilimsel çalışmalar zamanla geliştirilen teknikleri iyileştirmeye ve geliştirmeye yoğunlaşmaktadır. Zamanla geliştirilen soğutma teknikleri iki gruba ayrılır; açık ve kapalı sistem soğutmaları[1]. Bu makalede kapalı sistem soğutmanın bir dalı olan, çarpma soğutmasına değinilecektir. Şimdiye kadar yapılan çeşitli çalışmalarda çarpma soğutmasında ısı transferi verimini artırmak için farklı parametreler göz önüne alınmıştır. Bunlar genel olarak; çarpma hızı, Reynolds sayısı, jet çıkışıyla hedef arası mesafe, jet delikleri arası mesafe ve jet geometrileridir. Bunun yanı sıra, deneysel çalışmaları tekli jet ve çoklu jet olarak da ikiye ayırmak mümkündür. Genel hatlarıyla jet akış yapıları ve çeşitli literatür taramaları aşağıda özetlenmiştir.



¹Lisansüstü öğrencisi E-posta: jabbarli15@itu.edu.tr

²Araştırma görevlisi E-posta: karakusy@itu.edu.tr

³Dr. Öğr. Üyesi E-posta: erdem@itu.edu.tr

Şekil 1. Çarpma jeti aerodinamiği

Jennerjohn ve arkadaşları [2] tarafından yapılan çalışmada incelenen parametreler genel olarak, jet delikleri arası mesafe, jet ile hedef arası mesafe ve Reynolds sayısı değişiminin ısı transferine etkisidir. Çapraz akış sadece dikdörtgen kesitli bir kanala çıkmaktadır. Deneysel çalışmada seçilen Reynolds sayısı aralığı 8000-50000 arasındadır. Buna ek olarak, jet çıkışı ve hedef arası mesafe için seçilen aralıklar 1.5D, 3.0D, 5.0D, ve 8.0D'dir ve son olarak, jet delikleri dağılımı akış yönünde ve akışa dik olarak 5D, 8D, ve 12D olarak alınmıştır. Deney sonuçlarına göre, bütün yönlerde, yani akış yönünde ve akışa dik yönde, Reynolds sayısının artımının ısı transferini pozitif yönde etkilediği yönündedir. Spesifik olarak, maksimum Nusselt sayısı, jetle hedef arası mesafenin 3D ve Reynolds sayılarının 8200, 20000 ve 30000 değerlerinde gözlemlenmiştir. Bu değişimlerden yapılan çıkarımlara göre, bu değişimler iki olaydan kaynaklı olabilir; tekli jetlerin birbirine tutunması ve komşu olan kayma katmanlarının mukavemetine aynı zamanda Kelvin-Helmholtz düzensizliğinin yarattığı vorteks taşınımı olgusu. Sonuç olarak, bu parametrelerle yerel Nusselt sayısı arasında karmaşık bir bağıllık çıkarımı yapılmıştır.

Weihong Li ve arkadaşları [3] tarafından yapılan diğer bir çalışmada, önceki çalışmada olan parametrelere ek olarak, eğimli deliğin ısı transferine etkisi ve soğutma performansının optimizasyonu üzerine odaklanılmıştır. Çalışmada, genel hatlarıyla, 5000'den 25000'e kadar olan Reynolds sayısı aralığı, akış yönünde ve ona dik olarak jetler arası mesafenin 4D ve 8D, jetle hedef arası mesafenin 0.75D-3D arası olma durumu ve son olarak delik eğimi 0-40° olma durumu incelenmiştir. Ek olarak, Florschuetz 'un çalışmasına [4] göre, Reynolds değeri ile geometri arasında yeni korelasyon katsayısı elde edilmiştir. Çalışma sonuçları göstermiştir ki, beklendiği gibi Reynolds sayısının artımı Nusselt sayısını pozitif yönde etkilemektedir. Jetler arası mesafe parametresi göz önünde bulundurulursa görülecektir ki deneylerde, jetler arası mesafelerin büyük değerlerinde, ısı transferi performansında düşüş yaşanmaktadır ve bu da doğrudan delik yoğunluğu veya soğutma alanı yoğunluğuyla ilgilidir. Delik eğimi etkisine gelince, genel gözlem, eğim arttıkça ısı transferi yapısı daireselden elips şekline geçer ve 0 ile 20° lik açı arasında ısı transferi 20° eğilimde en üst seviyeye çıkmıştır, ancak eğilim artarak 40° ye geldiğinde ısı transferi düşüşe geçmektedir.

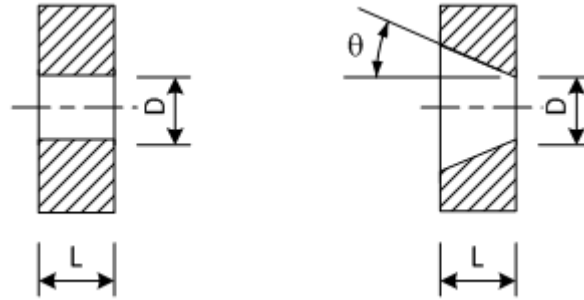
Tu ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada [5], Reynolds sayısının ve jetle hedef arası mesafenin yüzey basınç dağılımına ve yüzey kayma gerilmesi dağılımına olan etkisi incelenmiştir. Çalışma geniş yelpazede Reynolds sayısı ve jetle hedef arası mesafeye yer vermiştir. Yapılan çalışma sonucunda yüzeydeki basıncın Gauss dağılımına yakın bir dağılım gösterdiği görülmüştür. Duvar kayma gerilmesi durma noktasına olan mesafeye oranlıdır ki bu oran Hiemenz çözümünün gereksinimidir, ancak, deney sonucu elde edilmiş eğimin teorik çözüme göre daha küçük olduğu görülmüştür. Oluşmuş tutarsızlık yüksek türbülans seviyesine atfedilmiştir.

Diğer bir çalışmada Levy ve arkadaşları [6], literatürde az rastlanan, çok düşük Reynolds sayısında çoklu jet akışlarda basınç düşüşünü teorik ve deneysel olarak incelemişlerdir. İncelenen Reynolds sayısı aralığı; $200 < Re < 3000$ 'dir. Deneysel çalışma, kare şeklinde 29 tane çoklu jetten ve dört farklı jet çıkış çapından oluşmaktadır. Bunlar; 0.2, 0.4, 0.6 ve 0.8 mm'dir. Bununla beraber, sayısal analiz, mevcut olan ticari yazılımla yapılmıştır. Çalışma iki taraflı çapraz akış olacak şekilde tasarlanmıştır. İlk olarak jetle hedef arası mesafe 5D ve 7.5D olacak şekilde sabit tutulmuş ve jet çıkış çapı değiştirilmiştir. Bu durumda basınç düşüşünün debiyle olan değişimi gözlemlenmiştir. Gözlem sonuçları, değişimin parabolik olduğu yönündedir. Buna ek olarak; normalizasyon prosedürü sonucu, 0.2 mm'lik lüle çapında ortaya çıkan basınç düşüşünün diğer büyük çaplara göre yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Bu durumun lüle çıkış çapındaki artım ve çapraz akış hızındaki azalmadan kaynaklı olarak sürtünme kayıplarının azalmasından kaynaklı olduğu düşünülmektedir [7].

Baydar [7] tarafından yapılan deneysel çalışmada, düşük Reynolds sayılarında çarpan jet akışları incelenmiştir. Deney tekli ve ikili jet çıkışları için yapılmıştır. Deneyin odak noktası çarpma bölgesindeki hız ve basınç dağılımı olmuştur. İncelenen Reynolds sayısı aralığı 300–10000 ve jetle hedef arası mesafe aralığı 0.5 – 4 arasında olmuştur. Tekli jet için jet çapı 5 mm, ikili jet çıkışı için 4 mm olarak alınmıştır. Tekli jetler için olan çalışma sonuçları genel olarak basınç dağılımının Reynolds sayısından nerdeyse bağımsız olduğunu göstermiştir. Etken parametrenin jetle hedef arası mesafe olduğu görülmüştür. Jetle hedef arası mesafenin atmosfer altı basınç bölgesine olan etkisi kapsamında; jetle hedef arası mesafenin artması, jet akışının mesafeden kaynaklı olarak

hızının azalmasına ve bundan dolayı atmosfer altı basınç alanının azalmasına neden olduğu gözlemlenmiştir. Reynolds değerlerinin 2700, 5000 ve 10000 değerlerinde basınç dağılımı katsayısı için aynı trend gözlemlenmiştir[8]. Aynı yazar ve arkadaşları tarafından yapılan benzer bir deneysel ve sayısal çalışmada [7], aynı deney yüksek Reynolds sayıları için yapılmıştır. Deneyde ortalama hız, türbülans yoğunluğu ve basınç dağılımı, farklı Reynolds sayıları (30 000'den 50000'e) ve jet ile hedef arası mesafeler için elde edilmiştir. Yapılan çalışmadan tekli dairesel jetin özelliklerinin jetle hedef arası mesafenin değişimine hassas olduğu gözlemlenmiştir. Aynı zamanda, atmosfer altı bölgenin, jetle hedef arası mesafenin azalmasıyla güçlendiği ve mesafenin artmasıyla durma noktasından dışa doğru radyal olarak kaymakta olduğu görülmüştür. Bu bölgelerde türbülans yoğunluğunda iki tane maksimum olduğu görülmüştür. Numerik sonuçlarla karşılaştırıldığı zaman, numerik yöntemin ortalama jetle hedef arası mesafe için akış özelliklerini öngörebildiği görülmüştür[9]. Aynı çalışma bu sefer Reynolds sayısı 30000'le 70000 arasında, jetle hedef arası mesafeyi 1 – 10 arasında olarak seçilerek yapılmıştır. Sıcak tel anemometresi ile türbülans yoğunluğu ölçülmüştür. Yapılan çalışmada; jetle hedef arası mesafenin 3'e kadarki aralıkta duvar yakınındaki türbülans yoğunluğunda ve yerel Nusselt sayısında ikincil tepe noktası olduğu gözlemlenmiştir. İkincil tepe noktası Reynolds sayısı artımı ve jetle hedef arası mesafenin azalmasıyla daha da belirginleşmektedir. Bu bağlamda, bu parametreler arasında korelasyon olduğu görülmüştür [10].

Bu çalışmada farklı delik geometrilerinin akış alanına etkisi incelenmiştir (Şekil 2). Bugüne kadar gerçekleştirilen çoklu jet çalışmalarında genellikle basınçlı dinlenme odasının önüne yerleştirilen delikli yüzey ile elde edilen orifis tipi jetler kullanılmıştır. Jetlerin çıkışında pah kırma etkisinin jet çıkış şartlarını etkileyeceği açıktır. Burada pah açısının soğutmaya etkisinin ayrıntılı olarak incelenmeye ihtiyacı bulunmaktadır.

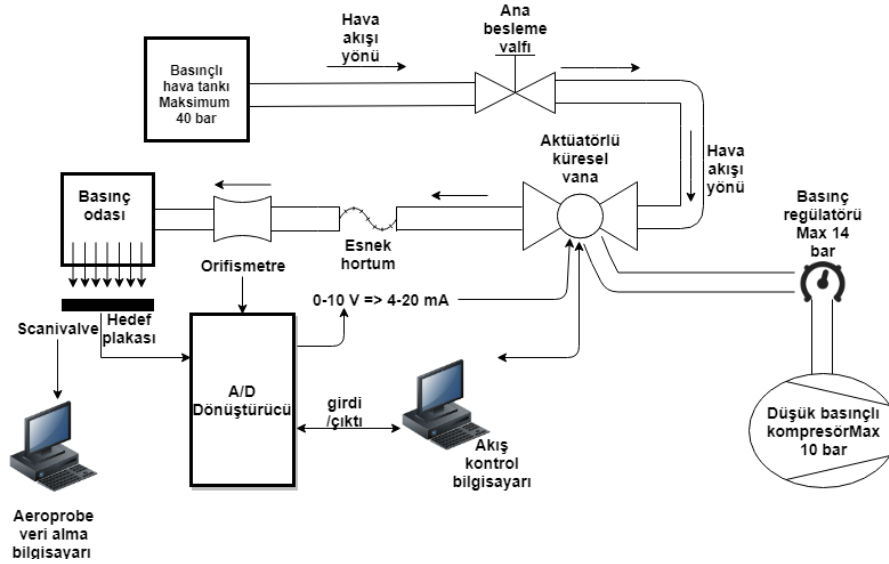


Şekil 2. Jet deliklerindeki pah kırma

Bu çalışmada 0° , 30° ve 45° açılı delik geometri incelenmiştir. Ölçümlerde kullanılan diğer değişken parametreler Reynolds sayısı ve jet-hedef arası mesafedir. Deneysel çalışma akış yapılarına ve keskin kenar etkilerine yoğunlaşmıştır. Jet çıkışında hız profillerinin ölçümü ve jet çıkış şartlarının belirlenmesi için sıcak tel anemometresi kullanılmıştır. Çarpma yüzeyi üzerinde oluşan basınç dağılımı ise 32 kanallı bir basınç tarayıcı yardımıyla ölçülmüştür.

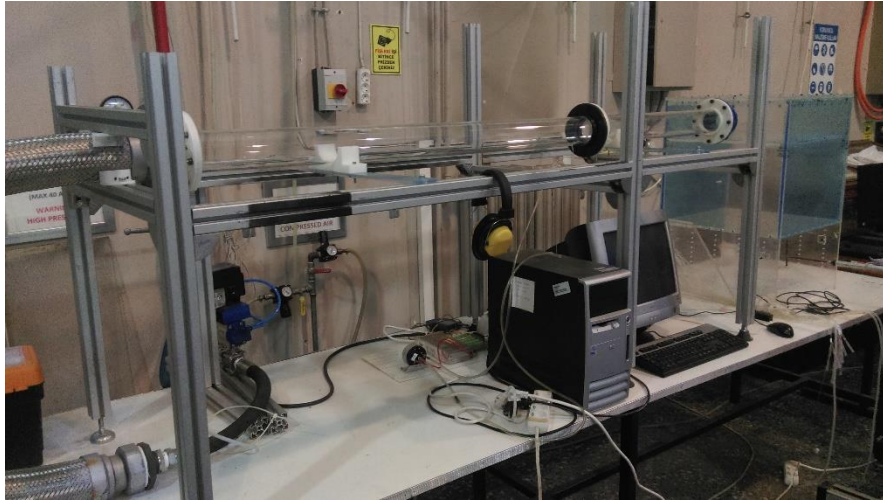
Deney Düzeneği

Deney düzeneği, hava kaynağı, besleme valfi, regülatör, orifis metre ve dinlenme odasından oluşmaktadır. Hava, önceden harici kompresör vasıtasıyla doldurulmuş hava tankından sağlanmaktadır. Ana hatta gelen havanın basıncı regülatör vasıtasıyla düzenlenmektedir. Manuel ve elektro-pnömatik küresel vana, ana hatta giden hava akışını kontrol etmektedir. Elektro-pnömatik vana akışı kontrol etmek için komutları GNT-205 analog giriş ve çıkışlı vericiden almaktadır. Bu sayede NI LabVIEW vasıtasıyla dinlenme odasına gelen debi kontrol edilmektedir. Bu çalışma kapsamında dinlenme odası hariç, diğer tüm düzenek yeniden ölçülandırılıp, tasarlanıp üretilmiştir. Deney düzeneğinin genel şemasını Şekil 3'de gösterilmiştir.



Şekil 3. Deney düzeneği şeması

Deney düzeneğinin tam kurulu hali Şekil 4'de gösterilmiştir.

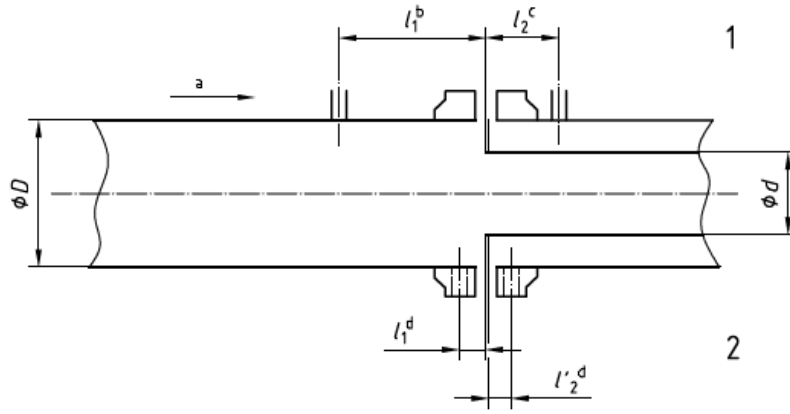


Şekil 4. Deney düzeneğinin tam kurulumu

Orifismetre Tasarımı

Orifismetre ileride farklı boru çapı kullanımına uygun ve kolay taşınabilir olabilmesi hususları göz önünde bulundurularak tasarlanmış ve ölçülendirilmesi, ISO5167-2:2003 standardına göre yapılmıştır. Tasarım prosedürü daralma çapı veya beta değeri seçimiyle başlar. Beta değeri daralma çapının boru çapına olan oranını temsil eder. Çoğunlukla literatürde karşılaşılan aralık 0.1'le 0.7'dir. Beta değerinin küçük olması basınç düşüşünün fazla olmasına yol açar ve bu da ölçümlerde daha fazla belirsizliğe yol açar. Aynı durum yüksek beta değerlerinde de geçerlidir. Bundan dolayı, optimum beta değeri seçilmesi gerekmektedir. Bu gereksinimler göz önünde bulundurularak ve Miller'in [11] Akış ölçümleri el kitabı referans alınarak, Reynolds sayısının 10,000'den büyük olacak durumu için beta değerinin 0.5 olması öngörülmüştür. Bununla birlikte orifis plakası kalınlığı 1.5 mm olarak seçilmiştir. ISO5167-2:2003 standardına göre, β değerinin 0.1'le 0.75 arası için basınç alım noktaları konfigürasyonu Şeki 5'deki gibi D ve D/2 şeklinde seçilmiştir. β değeri seçiminden sonra, deşarj katsayısı için ISO5167-2:2003 standardında verilmiş Reader-Harris/Gallagher (1998) denklemi seçilmiştir.

(1)



Şekil 5. ISO5167-2:2003 standardına göre basınç farkı alım konfigürasyonu

Buna ek olarak, debi denklemi de ISO5167-2:2003 standardından Denklem 2'deki gibi seçilmiştir.

$$q_m = \frac{C \cdot \varepsilon}{\sqrt{1 - \beta^4}} \frac{\pi \cdot d^2}{4} \sqrt{2 \cdot \Delta p \cdot \rho_1} \quad (2)$$

C : deşarj katsayısı

ε : genişleme katsayısı

β : daralma oranı $\beta = \frac{d}{D}$

d : orifis çapı

D : boru çapı

Δp : orifisten dolayı basınç farkı

ρ_1 : orifis girişindeki yoğunluk

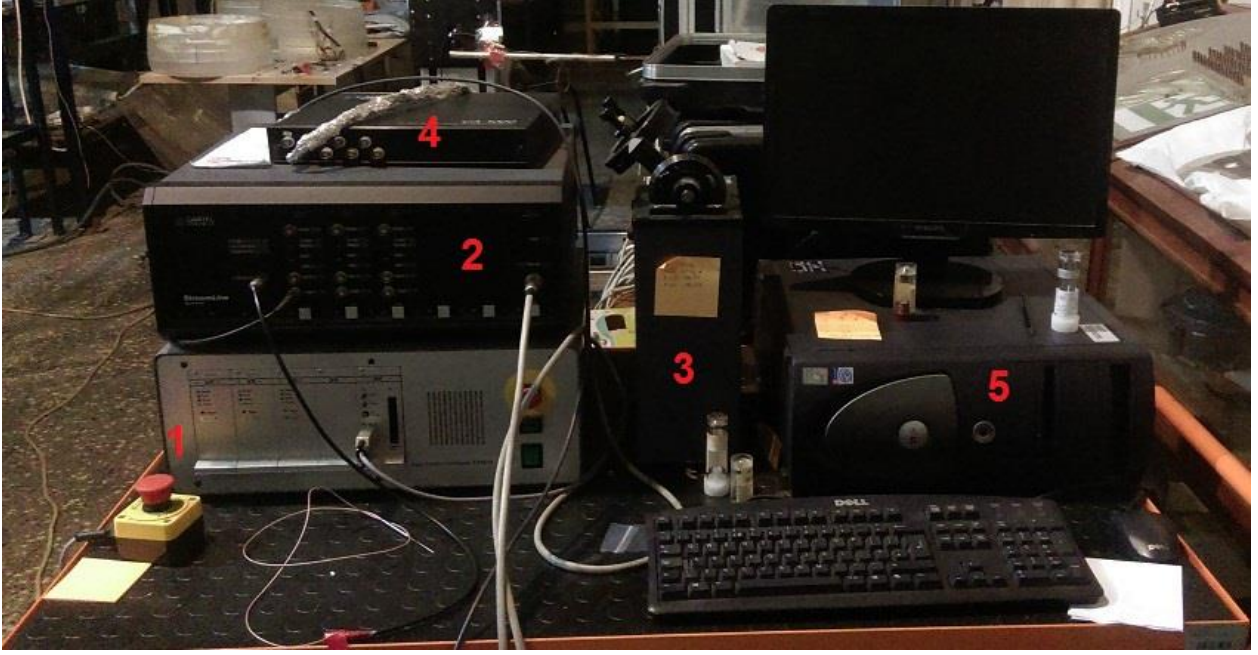
Deneylerin sıkıştırılabilirlik sınırını aşmamasından dolayı, genişleme faktörü sabit 0.975 olarak alınmıştır. Orifis metre'de boruların giriş ve çıkış uzunlukları da standarda uygun olarak seçilmiştir. Seçimde orifis metre girişine gelmeden ki 90°'lik dönmeler göz önünde bulundurularak ve bunun için standartta verilmiş tablodan (ISO5167-2:2003, Tablo – 3) 22D olarak belirlenmiştir, deney düzeneğine uyarlanarak giriş uzunluğu 1310 mm olarak ve çıkış uzunluğu 700 mm olarak belirlenmiş ve üretilmiştir.



Şekil 6. Kurulmuş Orifis metre

Sıcak Tel Anemometresi

Dantec Dynamics Sıcak Tel Anemometresi ve sınır tabaka tipi sıcak tel probu kullanılmıştır. Genel sistem beş parçadan oluşmaktadır. Bunlar, traverse sistemi, CTA ana ünitesi, kalibrasyon ünitesi, NI CA-1000 ara yüzü ve son olarak da veri alma ve kontrol bilgisayarıdır. Kullanılan 55P15 tipi sınır tabaka probu Şekil 8'de gösterilmiştir.



Şekil 7. Sıcak tel anemometresi sistemi

- 1) Travers sistem kontrol cihazı
- 2) Sıcak tel anemometresi
- 3) Sıcak tel kalibrasyon ünitesi
- 4) NI CA-1000
- 5) Veri alma, kontrol ve görüntüleme bilgisayarı



Şekil 8. Dantec Dynamics 55P15 tipi sınır tabaka probu

Aeroprobe Basınç Tarama Sistemi

Aeroprobe sistemi (Şekil 9) basınç farkı taraması için kullanılmıştır. Sistemin ana amacı, Trisonic laboratuvarında üretilmiş olan 324 basınç prizinden oluşan akrilik basınç tarama plakasından gelen basınçları fark şeklinde ölçüp kaydetmesidir. Genel sistem üç parçadan oluşmaktadır: Aeroprobe veri alma sistemi, veri görüntüleme için bilgisayar ve 32 kanallı basınç tarayıcı (Şekil 10).



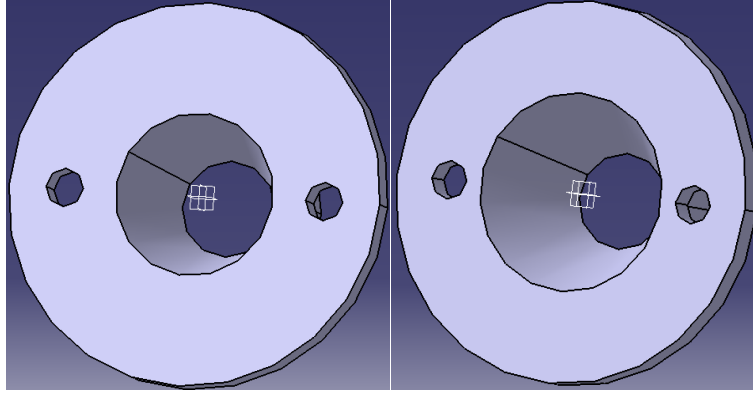
Şekil 9. Aeroprobe basınç tarama sistemi



Şekil 10. Pressure Systems 32 kanallı basınç tarayıcısı

Jet Çıkış Lülesi

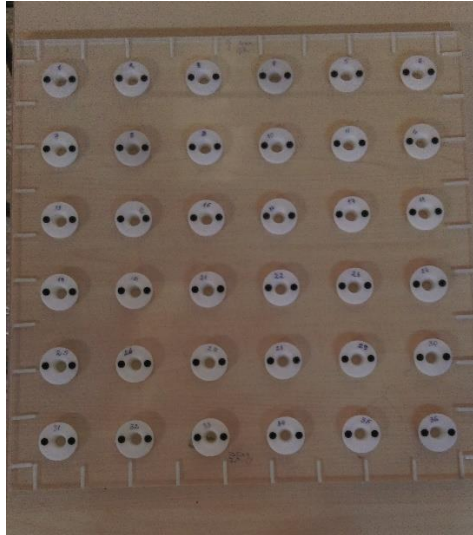
Bu deneysel çalışma için Şekil 11’de görülen yakınsayan 30° lik ve 45° lik jet çıkışları kullanılmıştır. Sonuçlar, geleneksel dairesel jet çıkış sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Jet çıkışların tasarımında kolaylıkla takılabilir ve çıkarılabilir olması göz önünde bulundurulmuştur. Üretim esnasında oluşan fazlalıklar belirsizlikler göz önünde bulundurularak alınmış, jet akış yönünde engelsiz bir geçiş olması sağlanmıştır. Delik tasarımlarının CATIA çizimlerini ve üretilmiş jet çıkışlarının resimlerini Şekil 11 ve 12’de görülebilir. Deneyler Şekil 13’te görülen 36 adet çoklu jet levhasına yerleştirilerek yapılmıştır.



Şekil 11. 30° ve 45° jet lüle çizimleri



Şekil 12. Üretilmiş 30° ve 45° jet lüleleri

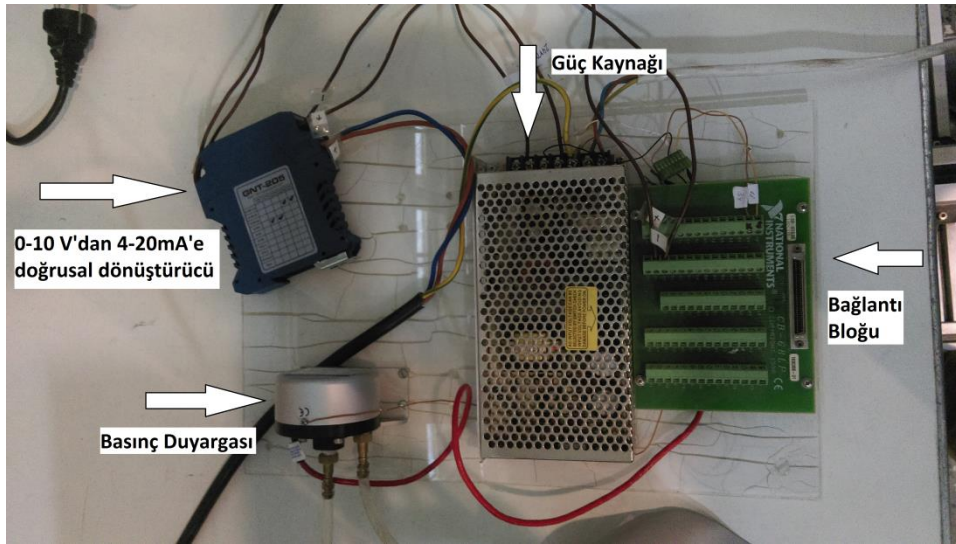


Şekil 13. Jet delik yastığı

UYGULAMALAR

Kontrol ve veri toplama

Ölçümlerin yapıldığı süre içerisinde Reynolds sayısının sabit tutulması amaçlanmıştır. Bundan dolayı debi kontrolü yapılmıştır. Debi kontrolü ve veri alma için Şekil 14'deki pano kullanılmıştır. Küresel vana aktüatörüyle iletişim kurulması için ve debi kontrolü sağlanması için NI LabVIEW programında PID toolkit vasıtasıyla bir VI oluşturulmuştur.



Şekil 14. Veri toplama ve kontrol sistemi

Basınç duyargası orifis giriş ve çıkışı arasındaki basınç farklarını ölçer. Program duyarga kalibrasyon denklemi yardımıyla alınan değerlerin basınç farkına dönüştürür. Basınç farkları debi denklemine yönlendirilerek debi hesaplanır. Reynolds sayısına bağlı olarak deşarj katsayısı değiştiği için, program başında rasgele değer verilerek her debi hesabında itere edilmiş ve uygun deşarj katsayısı ve ona uygun debi hesabı yapılmıştır. Elde edilen son debi PID kontrole gönderilerek istenen debi için iterasyon başlatılmıştır.

DENEYSEL SONUÇLAR

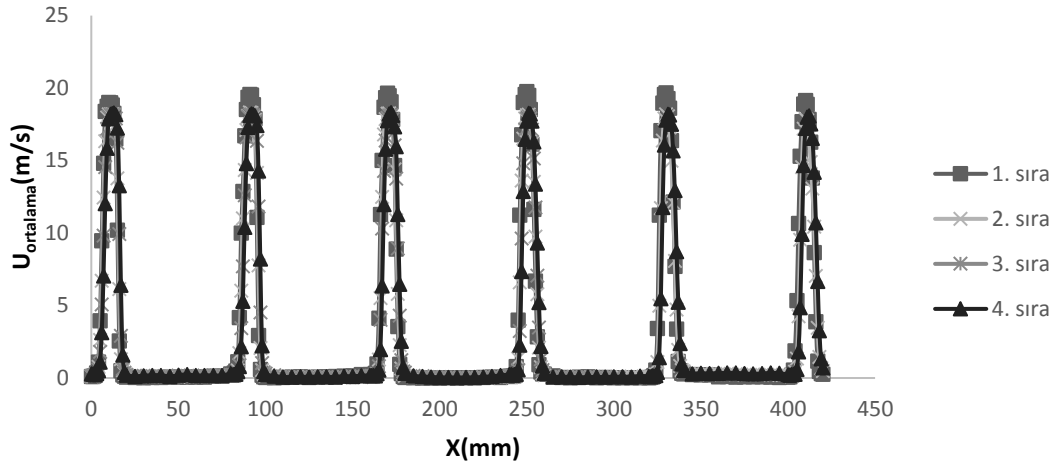
Sıcak – tel Deney Sonuçları

Sıcak tel anemometresi deneyi basınç deneyinden farklı olarak sabit jet-hedef arası mesafede yapılmıştır. Karşılaştırma amaçlı hedef levhanın bulunmadığı serbest jet durumu için de deney yapılmıştır. Deney sırasındaki değişkenler Jet çıkış geometrisi, Reynolds sayısı, ölçüm istasyonudur (Z/d_n). Sıcak tel deneyleri için değişken parametreleri Tablo 1’de görülebilir.

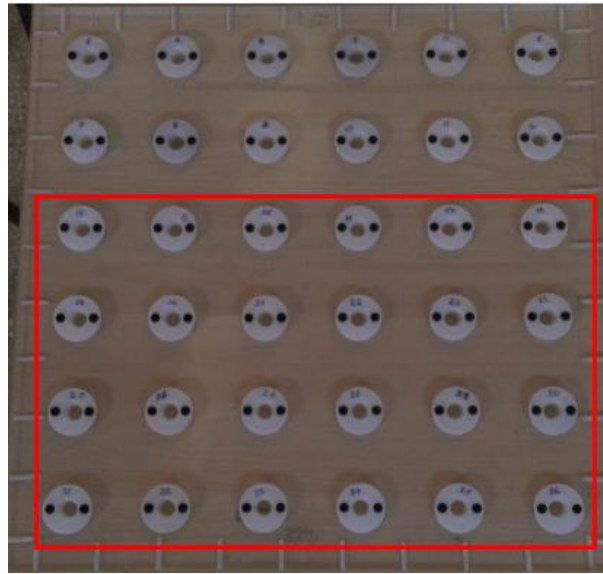
Tablo 1. Sıcak tel deneyinde incelenen konfigürasyonlar

Jet Geometrisi	Reynolds Sayısı	Sınırlama Konfigürasyonu (H/d_n)	Ölçüm istasyonları (Z/d_n)
Dairesel	9600, 19200	6	0.5, 1.5, 2.5, 3.5, 4.5
30°	9600, 19200	6	0.5, 1.5, 2.5, 3.5, 4.5
45°	9600, 19200	6	0.5, 1.5, 2.5, 3.5, 4.5
Serbest jet (dairese, 30°, 45°)	9600, 19200	0	0.5

Tablodaki farklı konfigürasyonlarda hız verileri almadan önce, tüm deliklerde hız dağılımının aynı olup olmadığı test edilmiştir. Bundan dolayı dört sıradaki altı jet çıkışından ortalama hız verisi alınmıştır. Alınan veriler dört sıranın da simetrik olduğunu göstermiştir. Sonuçlar Şekil 15’te gözlemlenebilir. Deneyin yapıldığı Reynolds sayısı 9600 ve Mach sayısı 0.05’dir. Kontrolü yapılan jet çıkışları Şekil 16’da gösterilmiştir.

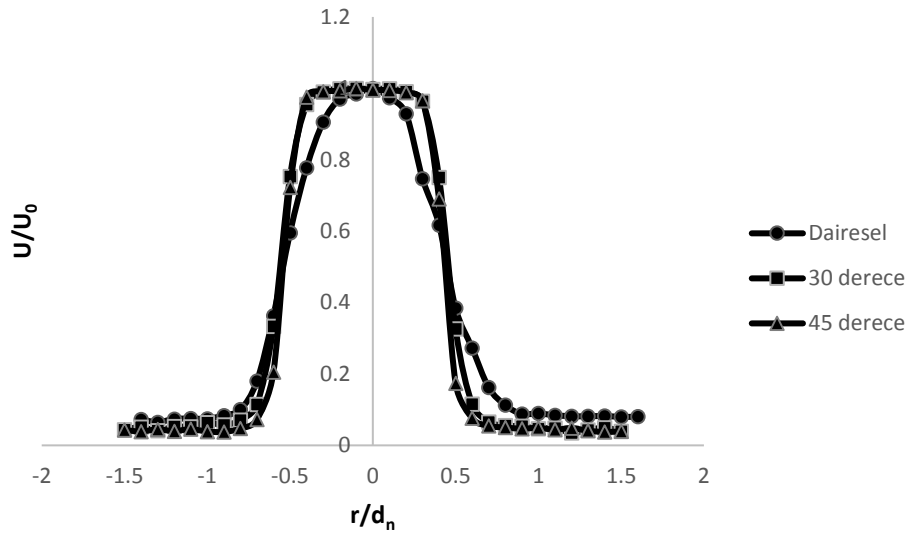


Şekil 15 Jet plakasında dört çizelgede jet çıkışları ortalama hız dağılımı $Re = 9600$



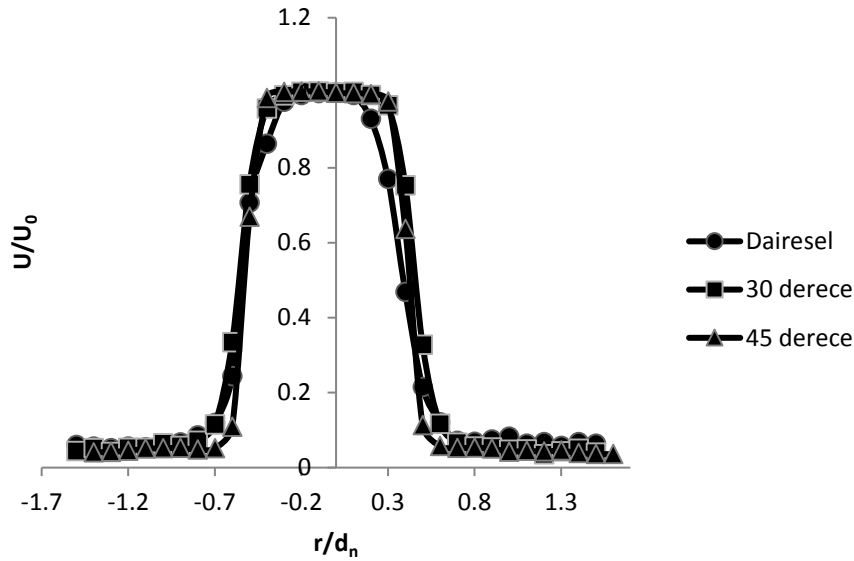
Şekil 16 Simetri kontrolü yapılmış jet çıkışları

Jet çıkışlarında ortalama hız dağılımının aynı olduğu teyit edildikten sonra, Tablo 1'deki konfigürasyonlar uygulanarak deneyler yapılmıştır. İlk konfigürasyonda $Z/d_n = 0.5$ durumu için serbest jet ortalama hız verileri alınmıştır. Deney üç farklı lüle geometrisinde yapılarak karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma Şekil 17'de gösterilmiştir.



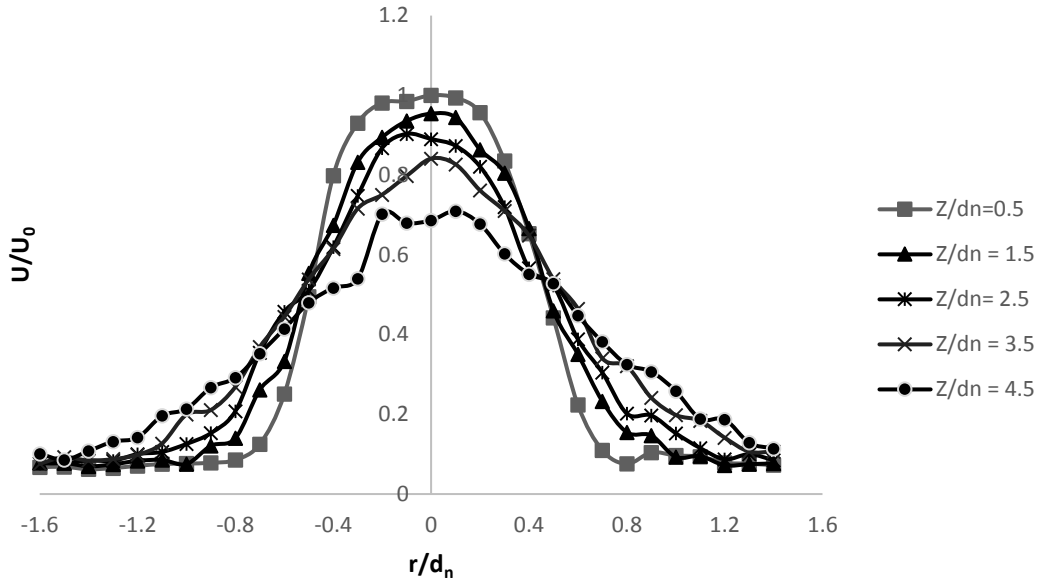
Şekil 17 Serbest jet ortalama hız dağılımı Re = 9600

Grafik boyutsuz hızın radyal yöndeki dağılımını göstermektedir. Deney, Reynolds sayısı 9600 ve Mach sayısı 0.05 olarak sabit tutularak yapılmıştır. Üç farklı pah kırma açısında gerçekleştirilen ölçümlere göre, maksimum hız 30° lülede diğer açılara göre bir az daha yüksektir. Aynı zamanda 30° ve 45°'lik lülede dairesel lüleye göre düzgün dağılımlı (uniform) bir profil gözlenmektedir. Aynı deney Reynolds sayısının 19200 değeri için de yapılmıştır. Deney sonucu Şekil 18'de gösterilmiştir. Re sayısının iki katına çıkarılması $Z/d_n=0.5$ istasyonundaki profil yapılarında bir değişikliğe sebep olmamıştır. Pah kırma çıkış hız profillerini düzleştirmektedir.



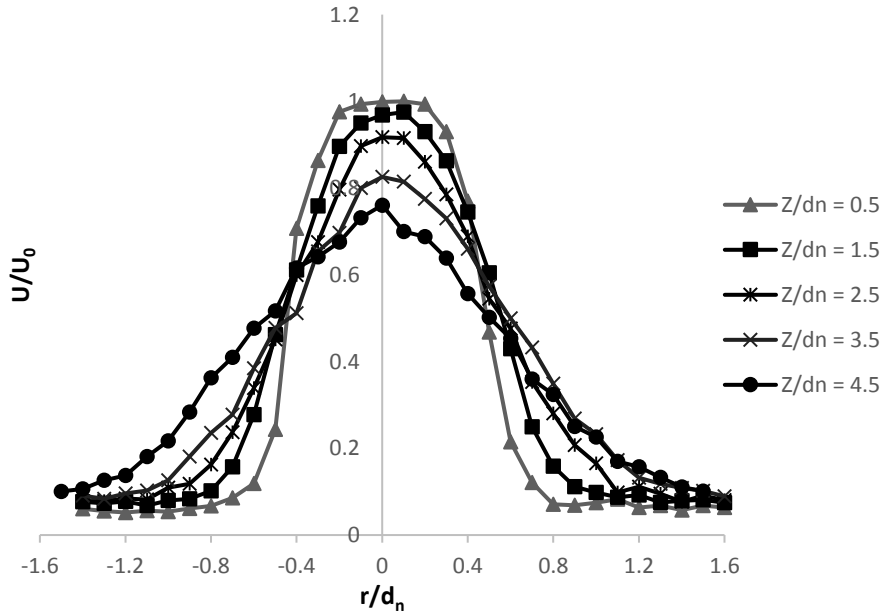
Şekil 18 Serbest jet ortalama hız dağılımı Re = 19200

DeneySEL çalışmanın ikinci adımında hedef plaka $H/d_n = 6$ konumuna yerleştirilmiş ve travers sistemi yardımıyla seçilen bir jet çıkışından $Z/d_n = 0.5, 1.5, 2.5, 3.5$ ve 4.5 uzaklıklarda radyal yönde ise $-1.5D$ $-1.5D$ arasında tarama yapılmıştır. Böylece, jet çıkışında uzaklaştıkça hız değerlerindeki azalmanın jet akım yapısında oluşan değişimlerin gözlemlenmesi amaçlanmıştır. Deneyler yine iki farklı Reynolds sayısında her lüle geometrisi için yapılmıştır. İlk olarak dairesel geometri için deney sonuçları Şekil 19'da görülebilir.



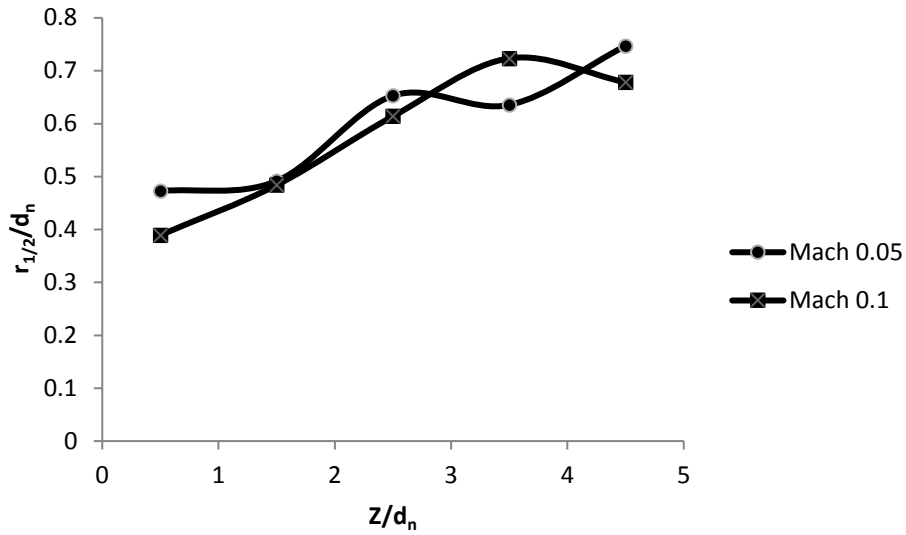
Şekil 19 Değişken sıcak tel pozisyonu için ortalama hız dağılımı, dairesel geometri, $Re = 9600$, $H/d_n = 6$

Grafiğe ilk bakıldığında azalan trend göze çarpmaktadır. Çıkıştan uzaklaştıkça potansiyel çekirdek bölgesinden uzaklaşmakta ve serbest jet için maksimum hızın düşüş rejimine ulaşılmaktadır. Aynı zamanda jet hedef levhasına yaklaşıldıkça akış yavaşlamaktadır. Hedef levhasına yaklaştıkça akışın bozulduğu görülmektedir ve bu akışın çıkıştan uzaklaştıkça etraftaki durgun havayla karışması sonucu akış daha türbülanslı ve düzensiz olmasına neden olmaktadır. Aynı deney $Re=19200$ için de yapılmıştır (Şekil 20). Deney sonuçlarına göre hızlarda aynı azalan trend gözlemlenmiştir ancak, akış bozulmasının daha geç $Z/d_n = 3.5$ 'ten başladığı gözlemlenir..



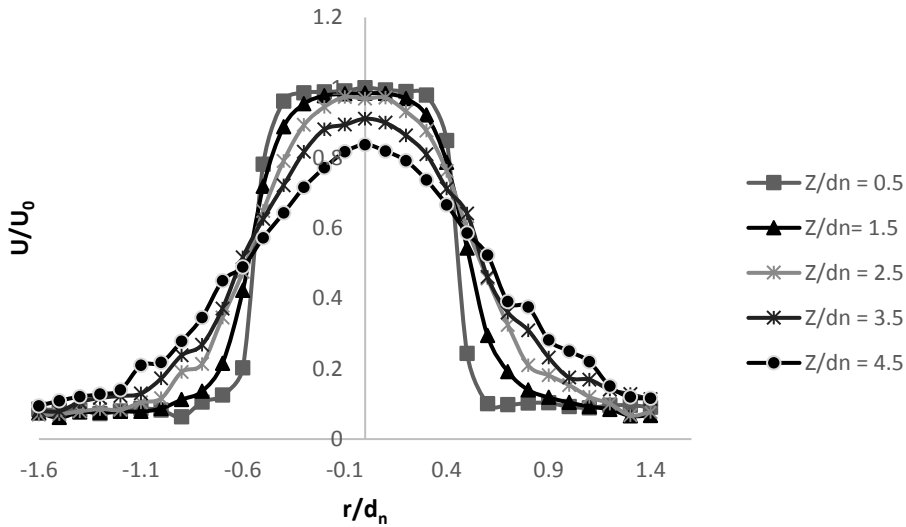
Şekil 20 Değişken sıcak tel pozisyonu için ortalama hız dağılımı, dairesel geometri, $Re = 19200$, $H/d_n = 6$

İki hız için de yayılma oranı Şekil – 21’de incelenmiştir ve sonuç olarak düşük hızda yayılma daha erken başladığı görülmektedir.

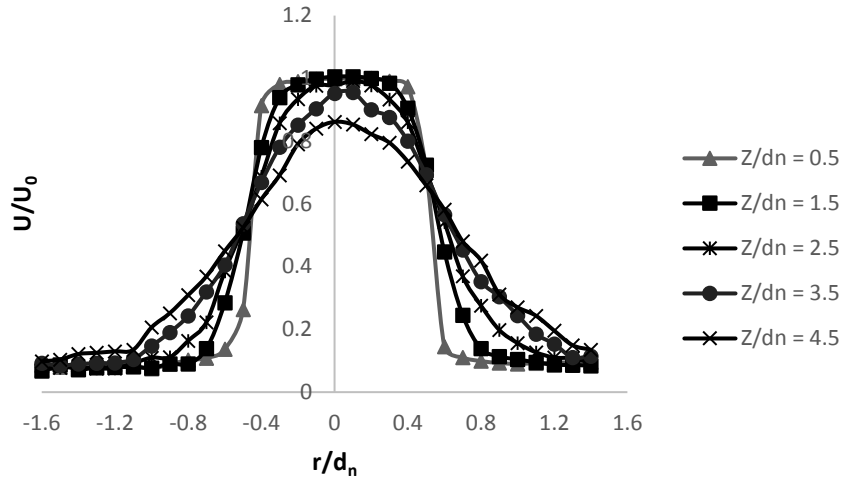


Şekil 21 Dairesel geometride iki farklı hızda yayılma oranı

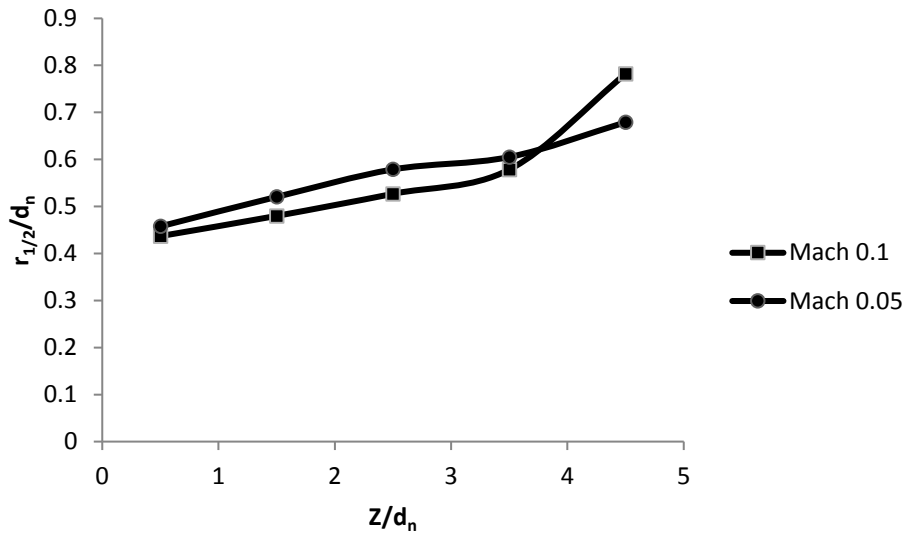
Aynı şekilde 30° lüle geometrisi için sonuçlar Şekil 22’de görülebilir. Dairesel geometrinin aksine 30°’lik geometride daireysel geometriye göre çıkıştan hemen sonra daha geniş bir sabit hız bölgesi olduğu görülmektedir. Ek olarak, hedef levhaya yaklaştıkça bozulmanın da azaldığı görülebilir. Bu geometrideki keskin kenardan dolayı akışta oluşan küçük ölçekli türbülans yapılarının bir sonucu olabileceği düşünülmektedir. Yayılma oranı 30°’li geometri için iki farklı hızda karşılaştırılmıştır ve serbest jet bölgesinde yüksek hızda yayılma daha az iken çarpma yüzeyine yaklaşırken aniden arttığı ve daha büyük değerlere ulaştığı gözlemlenmiştir.



Şekil 22 Değişken sıcak tel pozisyonu için ortalama hız dağılımı, 30° geometri, Re = 9600, H/d_n = 6

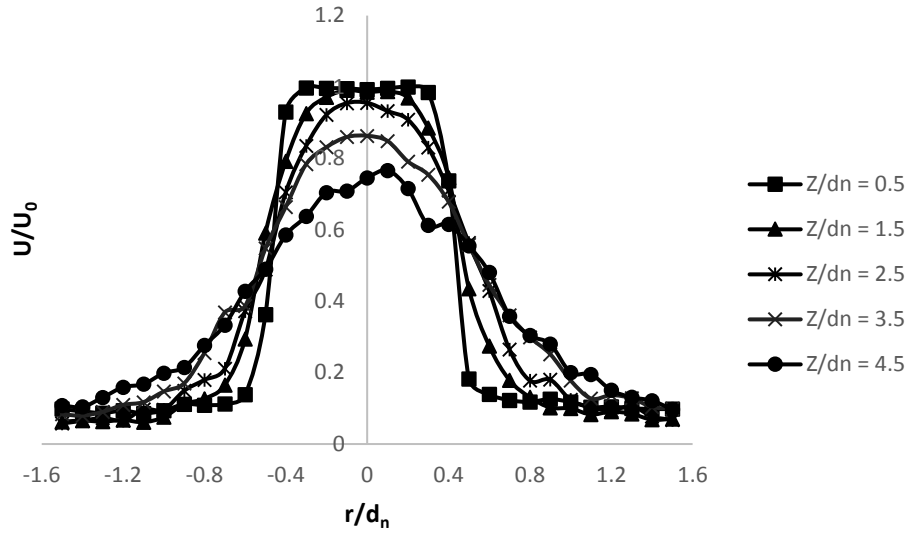


Şekil 23 Değişken sıcak tel pozisyonu için ortalama hız dağılımı, 30° geometri, $Re = 19200$, $H/d_n = 6$

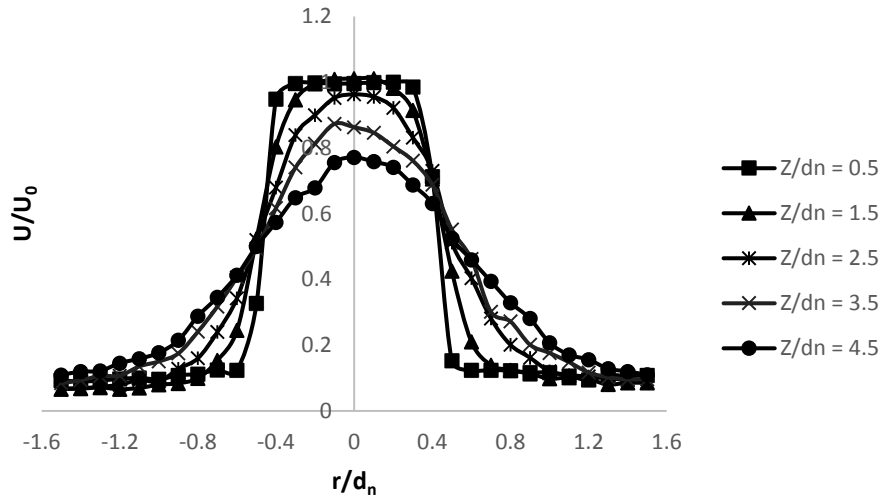


Şekil 24 30°'li geometride iki farklı hızda yayılma oranı

45°'lik geometri için yapılan deney sonuçları da Şekil 25 ve 26'da görülebilir. Grafiklerden görüldüğü kadarıyla 45°'lik lüle geometrisinde 30°'liğe göre duvara yakın bölgede bozulmalar daha fazla olmaktadır. Aynı sonuç ters 45°'li lüle geometrisinde de olduğu görülmüştür [12].

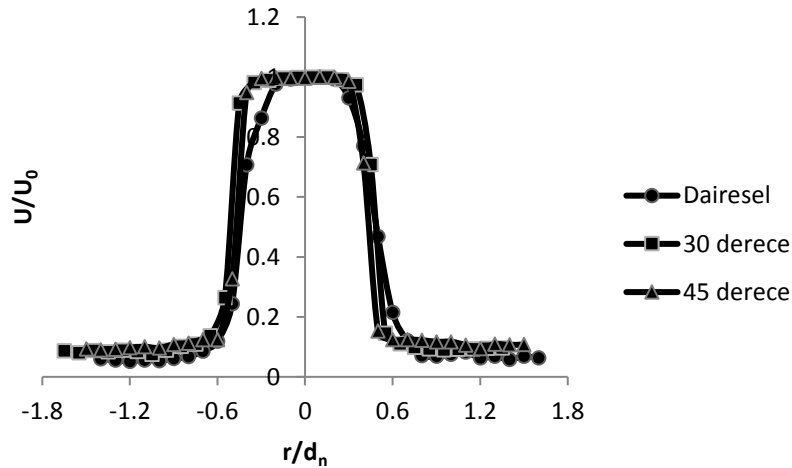


Şekil 25 Değişken sıcak tel pozisyonu için ortalama hız dağılımı, 45° geometri, $Re = 9600$, $H/d_n = 6$

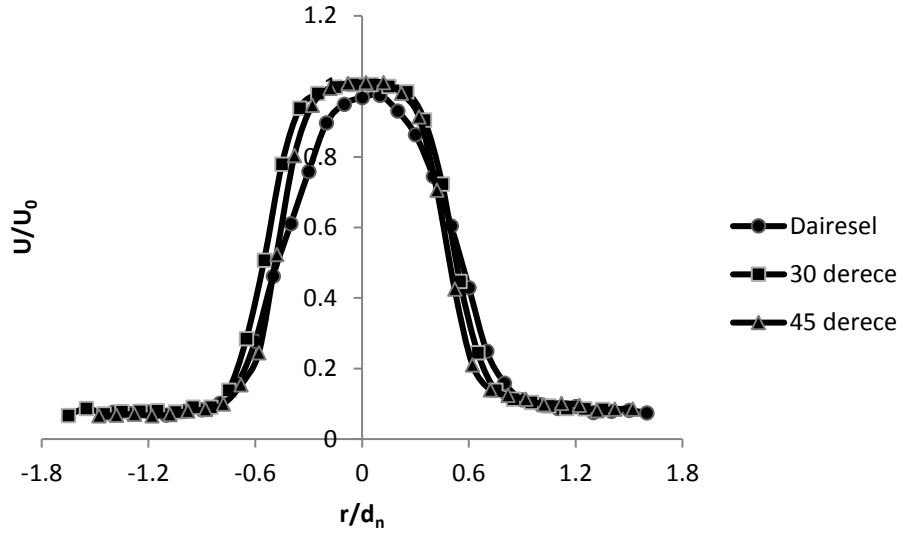
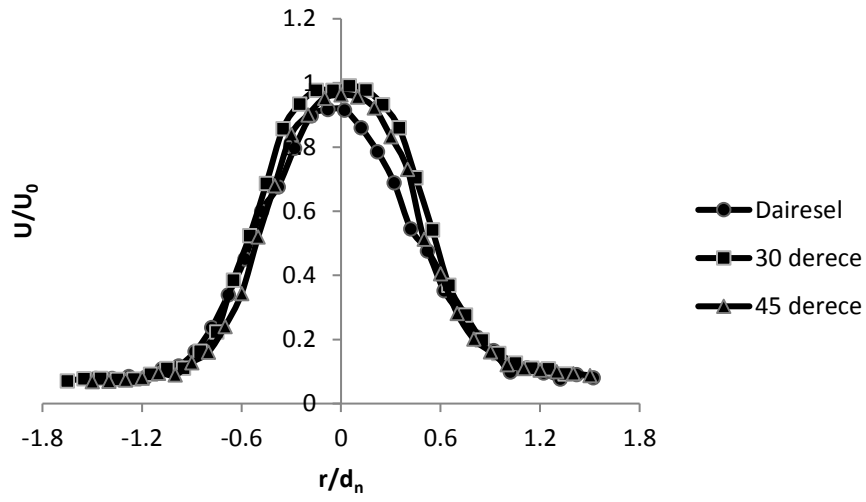
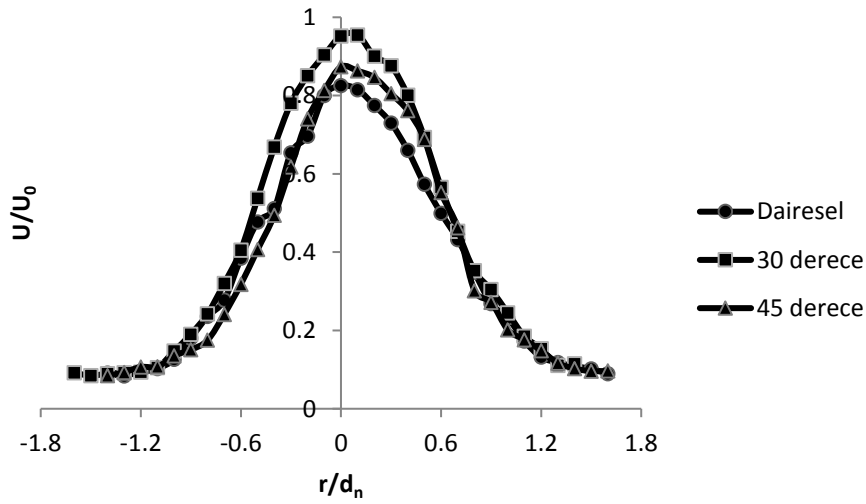


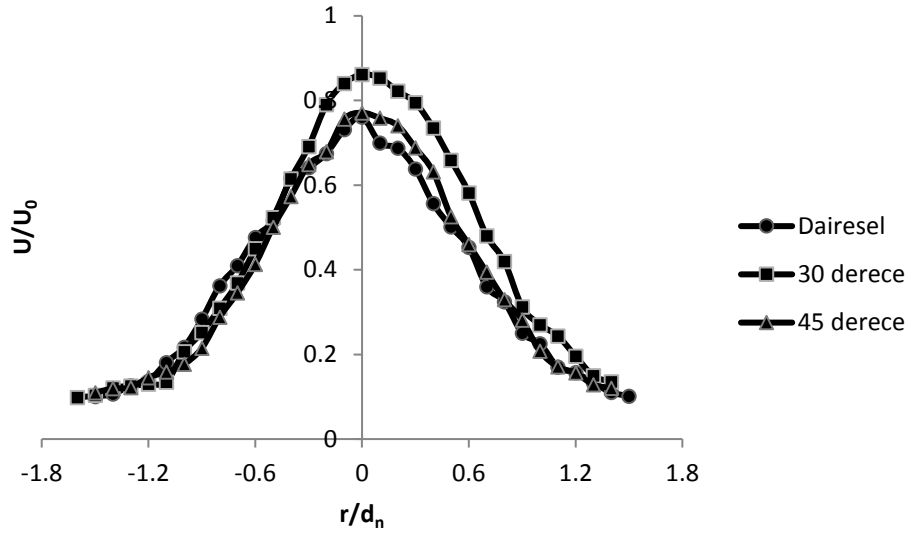
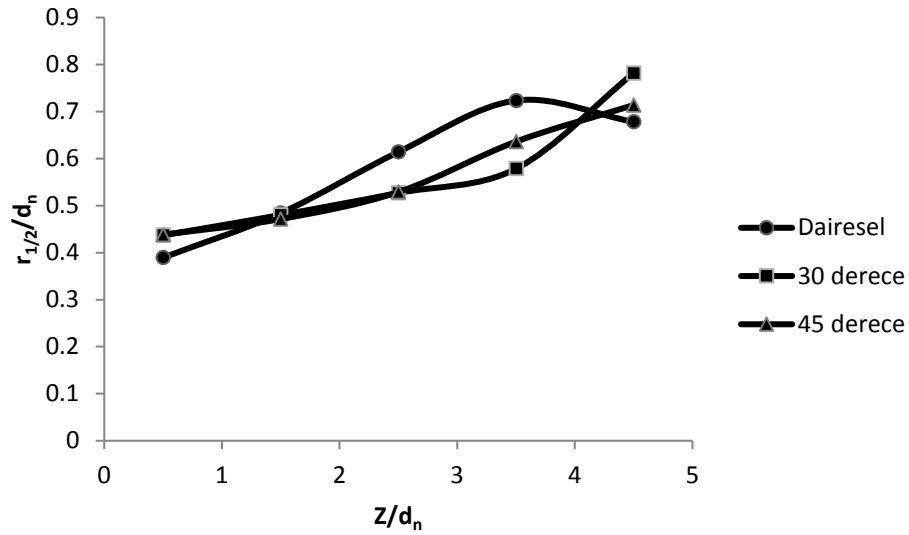
Şekil 26 Değişken sıcak tel pozisyonu için ortalama hız dağılımı, 45° geometri, $Re = 19200$, $H/d_n = 6$

Şekil 27'den 31'e kadar aynı Z/d_n değerinde, $Re = 19200$ 'de farklı açılar karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmalar sonucu 30° lik lülede yüzeye yaklaşırken ortalama hızın daha yüksek olduğu görülebilir. Bu fark yüksek Z/d_n değerlerinde daha açık bir şekilde görülmektedir.



Şekil 27 $Z/d_n = 0.5$, $H/d_n = 6$ ve $Re = 19200$

Şekil 28 $Z/d_n = 1.5$, $H/d_n = 6$ ve $Re = 19200$ Şekil 29 $Z/d_n = 2.5$, $H/d_n = 6$ ve $Re = 19200$ Şekil 30 $Z/d_n = 3.5$, $H/d_n = 6$ ve $Re = 19200$

Şekil 31 $Z/d_n = 4.5$, $H/d_n = 6$ ve $Re = 19200$ 

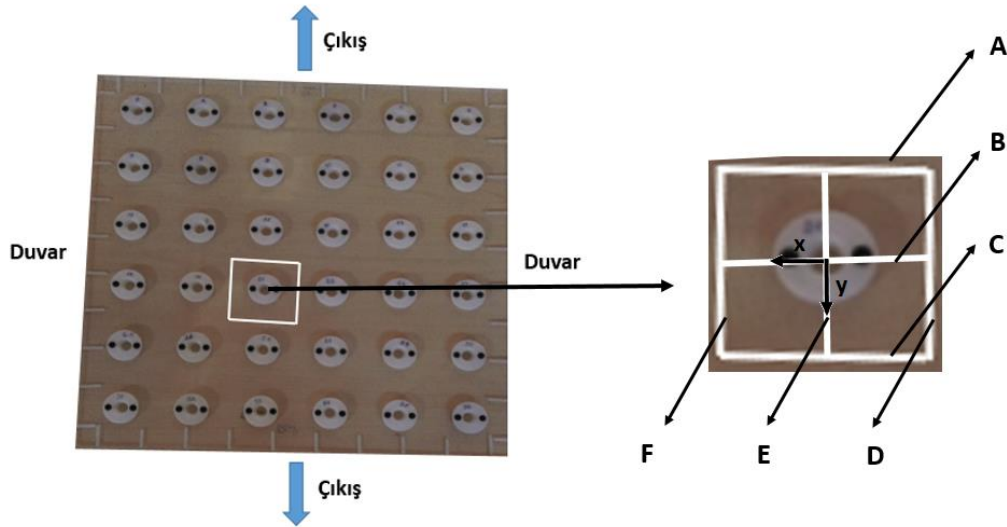
Şekil 32 Reynolds sayısı 19200'de farklı açılar için yayılma oranı

Basınç Taraması Deney Sonuçları

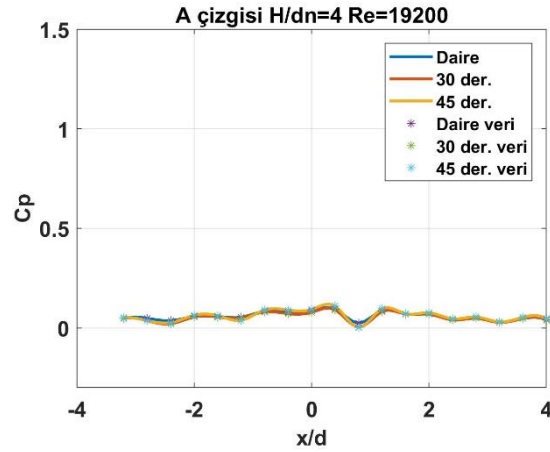
Basınç taraması üç farklı geometride ve iki farklı Reynolds sayısı ve üç farklı jet-le-hedef arası mesafede yapılmıştır. Deneyde 32 kanallı basınç sensörü kullanılmıştır. Ortalama olarak saniyede 128 veri almaktadır. Deneyde değişen parametrelerin tablosu Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2 Basınç taraması deneyinde incelenen konfigürasyonlar

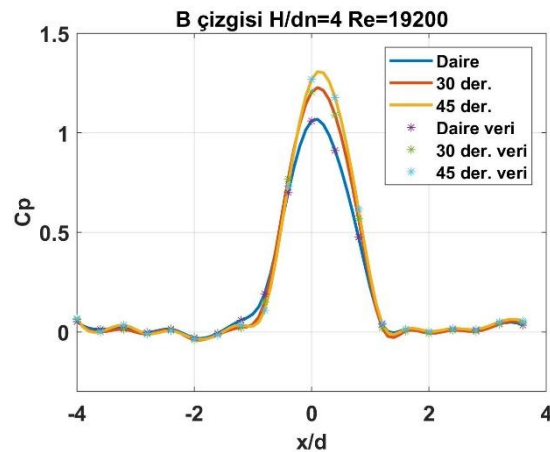
Jet Geometrisi	Reynolds Sayısı	Sınırlama Konfigürasyonu (H/d_n)
Dairesel	9600, 19200	4, 6
30°		
45°		



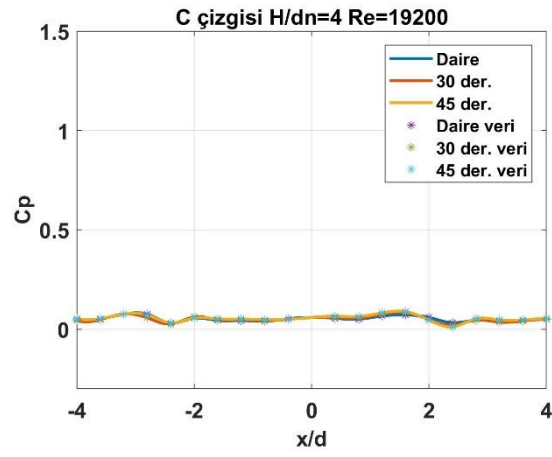
Şekil 33 Yüzey basınç ölçümlerinin değerlendirilmesinde kullanılan basınç prizi hatları. Elde edilen sonuçlar ve grafikleri Şekil 34 – 46'ya kadarki grafiklerde gösterilmiştir.



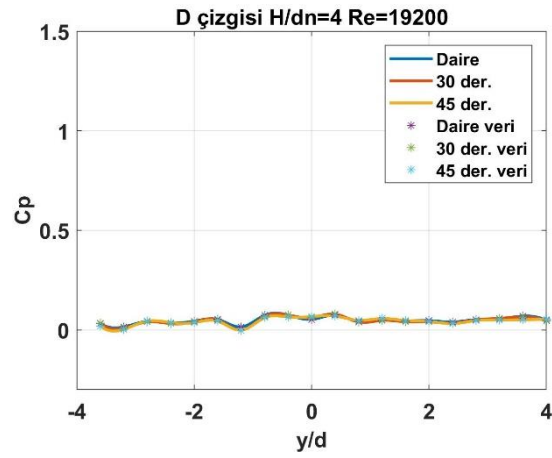
Şekil 34 $H/d_n=4$ $Re=19200$ - A çizgisi üzerinde yüzey basınç dağılımı



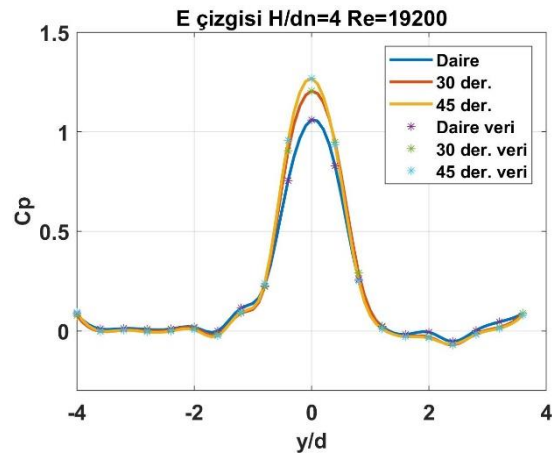
Şekil 35 $H/d_n=4$ $Re=19200$ - B çizgisi üzerinde yüzey basınç dağılımı



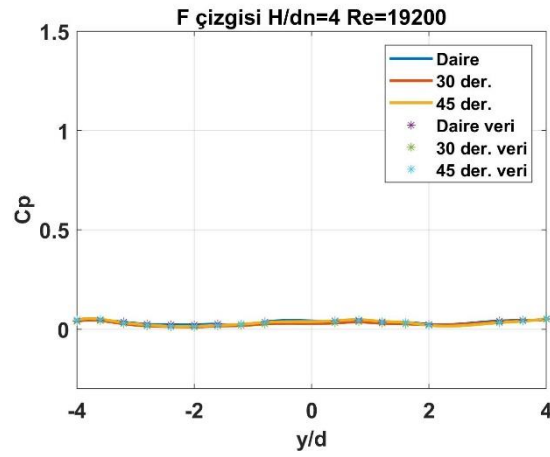
Şekil 36 H/dn=4 Re=19200 - C çizgisi üzerinde yüzey basınç dağılımı



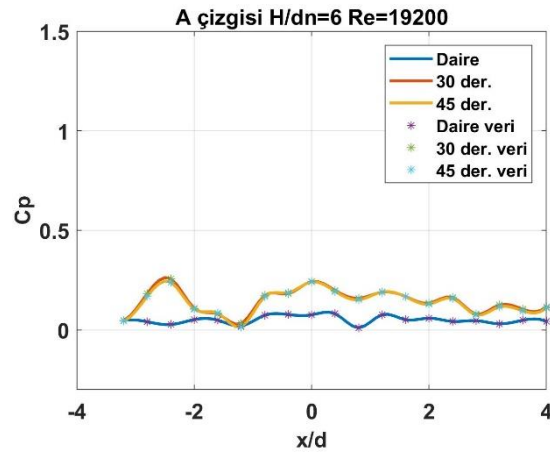
Şekil 37 H/dn=4 Re=19200 - D çizgisi üzerinde yüzey basınç dağılımı



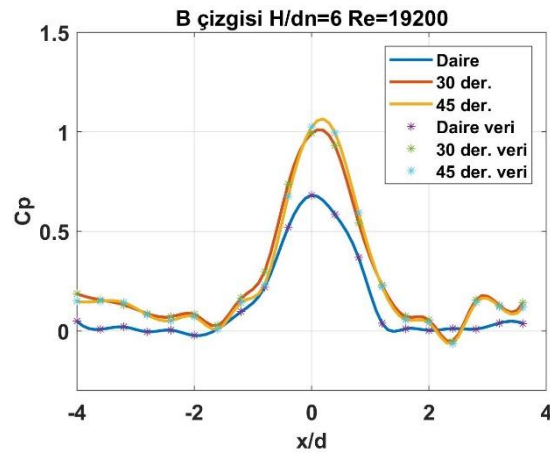
Şekil 38 H/dn=4 Re=19200 - E çizgisi üzerinde yüzey basınç dağılımı



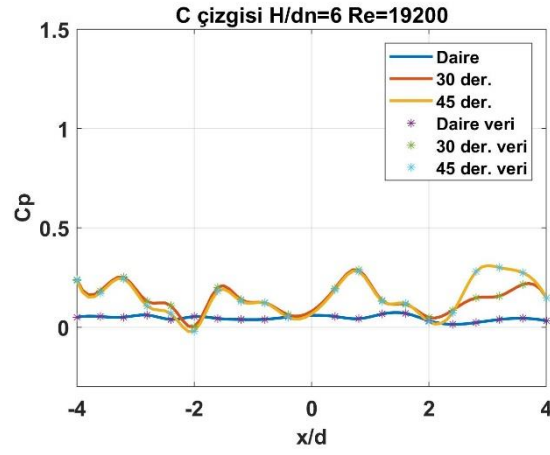
Şekil 39 H/dn=4 Re=19200 - F çizgisi üzerinde yüzey basınç dağılımı



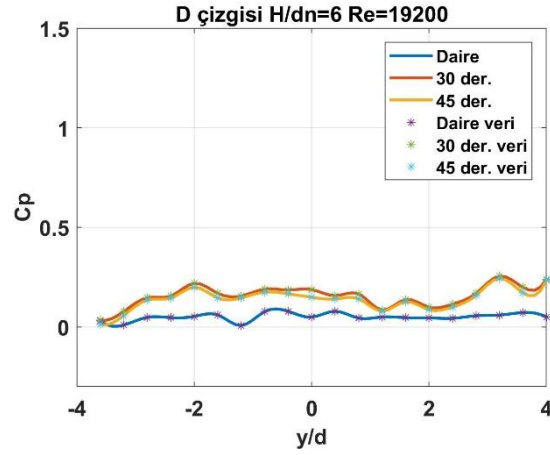
Şekil 40 H/dn=6 Re=19200 - A çizgisi üzerinde yüzey basınç dağılımı



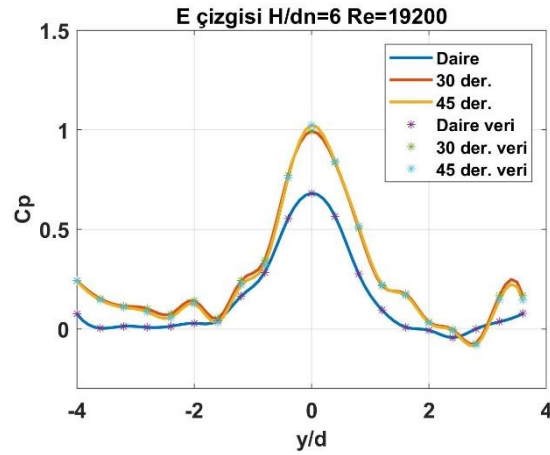
Şekil 41 H/dn=6 Re=19200 - B çizgisi üzerinde yüzey basınç dağılımı



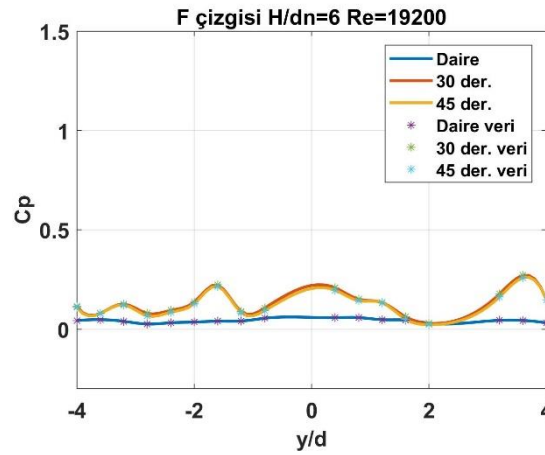
Şekil 42 H/dn=6 Re=19200 - C çizgisi üzerinde yüzey basınç dağılımı



Şekil 43 H/dn=6 Re=19200 - D çizgisi üzerinde yüzey basınç dağılımı



Şekil 44 H/dn=6 Re=19200 - E çizgisi üzerinde yüzey basınç dağılımı



Şekil 45 H/dn=6 Re=19200 - F çizgisi üzerinde yüzey basınç dağılımı

H/dn=4 ve Re=19200 için alt tabladaki basınç dağılımı çizgi A, B, C, D, E ve F üzerinde Şekil 34 - 39 arasında gösterilmiştir. Akış yönünde ve akış yönüne dik yönde iki delik orta çizgisinde (A,C,D ve F) tüm açı değerleri için basınç dağılımı benzerdir. B ve E çizgilerinde ise çarpma alanı aynı iken maksimum basınç değerleri açı değeri ile doğru orantılı olarak artmıştır. Akış yönünde ve akışa dik yönde maksimum basıncın olduğu bölge de aynıdır. Fakat akış yönünde basınç değerlerinin üç durum için daha çabuk bir birine yakınsadığı görülmektedir. Delik geometrisindeki pah kırma etkisinin değerlendirme yapılan bölgede sadece maksimum basınç değerlerini etkilediği ancak çarpma alanına bir etkisi olmadığı görülmektedir. H/dn=6 ve Re=19200 için alt tabladaki basınç dağılımı çizgi A, B, C, D, E ve F üzerinde Şekil 39'la 45 arasında gösterilmiştir. A,C,D ve F çizgisi üzerinde 30 derece ve 45 dereceli deliklerin basınç dağılımları benzer olup düz deliğin daha düşük değerler oluşturduğu görülmektedir. B çizgisi üzerinde oluşan basınç dağılımı incelendiğinde 30 ve 45 derecelik deliklerin oluşturduğu basınç değerleri ve dağılımı bir birine yakındır ve maksimum basınç değerinin olduğu noktanın kanal merkez çizgisinden dışa doğru saptığı görülmektedir. Düz delikteki basınç dağılımı daha düşüktür ve maksimum basıncın olduğu yer deliğin akışa dik yöndeki geometrik merkezine ($x/d=0$) denk gelmektedir. Çarpma alanı kanal merkezi tarafında aynı noktada biter iken duvar yönünde ise 30 ve 45 dereceli deliklerin çarpma alanı daha geniştir. E çizgisinde ise maksimum basınç değerleri açı değerlerine göre değişmekte ve maksimum basıncın olduğu yer deliğin geometrik merkezine denk gelmektedir. Akış üstü yönde tüm delik geometrileri için aynı noktada başlayan çarpma bölgesi akış yönünde ise 30 ve 45 derecelik deliklerde benzer noktada, düz deliğe göre daha ileri bir noktada bitmektedir.

Sonuç

Yapılan çalışma sonucunda belirtilen konfigürasyonlarda ortalama hız değerleri sıcak tel anemometresi vasıtasıyla iki farklı Reynolds sayısında ve sabit jetle hedef arası mesafede alınarak karşılaştırılmıştır. Grafiklerden ve verilerden alınan sonuçlara göre 30° ve 45° lik geometri çıkış kesitinde daha düz (üniform) bir hız profili sağlamaktadır. Bu oluşan Potansiyel çekirdeğin daha uzun olması sebebiyle çarpma yüzeyine yaklaşan akışın maksimum hızları diğer konfigürasyonlardan daha yüksek iken yayılma hızı da daha yüksektir. Bu durumun ısı transferini pozitif yönde etkileyeceği düşünülmektedir. Bu durum Lee et al. tarafından yapılan deneysel çalışmada da ters 45°'lik geometri için de çıkış bölgesinde aynı düz dağılım elde edilmiştir. Bu düz dağılımın Zuckerman ve diğerleri tarafından yapılan çalışmada da ortaya çıktığı görülmüştür. Buna ek olarak 30° jet geometrisinde çıkış hız dağılımı diğer geometrilere göre mesafe artımından dolayı bozulmaya uğramamaktadır. Sıcak-tel sonuçlarının aksine basınç verilerinde 30° ve 45° geometrilere çıkışta oluşan düz dağılım gözlemlenememektedir. Dağılımlarda her iki yönde akışa dik ve akış yönünde oluşan maksimum basınçların tüm geometriler için aynı bölgede olduğu görülmektedir. Bununla birlikte optimum bir lüle geometrisi bulabilmek için iki açı arasındaki değerlerden bazılarıyla da deney yapılarak karşılaştırma yapılması gerekmektedir. Aynı zamanda gelecek çalışmalarda harcanan debi ile açı arasındaki korelasyon incelenerek az havayla optimum soğutma sağlanması yapılabilir. Yapılan deneysel çalışmalar sayısal yöntemlerle desteklenebilir.

Kaynaklar

- [1] Uysal, Ü., Korkmaz, Y., Sözbir, N., & Hirca, A. H. (2014). Gaz türbini kanatları kanallarında soğutma performansının araştırılması. *Journal of Aeronautics and Space Technologies (Havacılık ve Uzay Teknolojileri Dergisi)*, 2(7), 1-8.
- [2] Jennerjohn, M., Lee, J., Ren, Z., Ligrani, P., McQuilling, M., Fox, M. D., & Moon, H.-K. (2016). JET ARRAY IMPINGEMENT COOLING LOCAL NUSSELT NUMBER VARIATIONS: EFFECTS OF HOLE ARRAY SPACING, JET-TO-TARGET PLATE DISTANCE, AND REYNOLDS NUMBER. 47(2), 119-140. doi:10.1615/HeatTransRes.2015011198
- [3] Li W, Li X, Yang L, Ren J, Jiang H, Ligrani P. Effect of Reynolds Number, Hole Patterns, and Hole Inclination on Cooling Performance of an Impinging Jet Array—Part I: Convective Heat Transfer Results and Optimization. *ASME. J. Turbomach.* 2017;139(4):041002-041002-11. doi:10.1115/1.4035045.
- [4] Florschuetz, L. W., Truman, C. R., & Metzger, D. E. (1981, March). Streamwise flow and heat transfer distributions for jet array impingement with crossflow. In *ASME 1981 International Gas Turbine Conference and Products Show* (pp. V003T09A005-V003T09A005). American Society of Mechanical Engineers.
- [5] Sin, V. K., & Tong, T. Y. (2009). Stagnation-point pressure distribution and wall shear stress: numerical simulation and similarity solution. In *Proceedings of the World Congress on Engineering* (Vol. 2).
- [6] Tu, C. V., & Wood, D. H. (1996). Wall pressure and shear stress measurements beneath an impinging jet. *Experimental thermal and fluid science*, 13(4), 364-373.
- [7] Levy, Y., Rao, A. G., Erenburg, V., Sherbaum, V., Gaissinski, I., & Krapp, V. (2012, June). Pressure losses for jet array impingement with crossflow. In *ASME Turbo Expo 2012: Turbine Technical Conference and Exposition* (pp. 139-149). American Society of Mechanical Engineers.
- [8] Baydar, E. (1999). Confined impinging air jet at low Reynolds numbers. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 19(1), 27-33.
- [9] Baydar, E., & Ozmen, Y. (2005). An experimental and numerical investigation on a confined impinging air jet at high Reynolds numbers. *Applied thermal engineering*, 25(2-3), 409-421.
- [10] Ozmen, Y., & Baydar, E. (2008). Flow structure and heat transfer characteristics of an unconfined impinging air jet at high jet Reynolds numbers. *Heat and Mass Transfer*, 44(11), 1315-1322.
- [11] Miller, R. W. (1983). *Flow measurement engineering handbook*.
- [12] Lee, J., & Lee, S. J. (2000). The effect of nozzle aspect ratio on stagnation region heat transfer characteristics of elliptic impinging jet. *International journal of heat and mass transfer*, 43(4), 555-575

- [13] Zuckerman, N., & Lior, N. (2006). Jet impingement heat transfer: physics, correlations, and numerical modeling. *Advances in heat transfer*, 39, 565-631.