Pamukkale Univ Muh Bilim Derg, 28(1), 37-50, 2022

Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi

Pamukkale University Journal of Engineering Sciences

Engelli akış ölçerlerin teorik yöntemler ve hesaplamalı akışkanlar dinamiği ile tasarımı, performanslarının deneysel incelenmesi

Experimental investigation of performance of obstruction flow-meters designed with theoretical methods and computational fluid dynamics

Hasan KÜÇÜK[1], *Murat ÜNVERDİ*[2*]

[1]Makine Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Sakarya Üniversitesi, Sakarya, Türkiye.
kucuk@sakarya.edu.tr

[2]Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Aydın Meslek Yüksekokulu, Aydın Adnan Menderes Üniversitesi, Aydın, Türkiye.
munverdi@adu.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 16.07.2020 Düzeltme Tarihi/Revision: 30.05.2021 doi: 10.5505/pajes.2021.22844
Kabul Tarihi/Accepted: 16.06.2021 Araştırma Makalesi/Research Article

Öz

Bu çalışmanın amacı, havanın hacimsel debisini ölçmek ve kontrol etmek için kullanılacak engelli akış ölçerlerin tasarımı, eklemeli imalatla (3B yazıcı) üretimi, sayısal ve deneysel performanslarının karşılaştırılmasıdır. Tasarım ve üretim kolaylıklarının yanında yaygın kullanımları nedeniyle, engelli akış ölçer olarak ASME uzun yarıçaplı düşük β oranlı akış lülesi ve keskin köşeli orifis seçilmiştir. Literatürde mevcut tasarım yöntemleri ile geometrik boyutları belirlenen ve 3-boyutlu tasarımları yapılan akış ölçerlerin sayısal performansları, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) ile kontrol edilmiştir. Ayrıca eklemeli imalat yöntemi ile üretilen akış ölçerlerin deneysel performansları, yapılan deneylerle incelenmiştir. Ölçülecek hacimsel debi (80-300 m³/h) göz önünde bulundurularak ve akış ölçerlerin girişindeki Reynolds sayısı 12,000-46,000 aralığında olacak şekilde, akış kanalının iç çapı (152 mm) belirlenmiştir. Basınç kayıplarını sınırlandırmak amacıyla, her iki akış ölçerlerin akış kesit çapının (d) kanal kesit çapına (D) oranı β~0.45 seçilmiştir. Deneysel çalışmalarda; akış ölçerlerin yukarı akımında akışın daha kısa mesafede gelişmesi ve gerekli boru uzunluğunun kısaltılması amacıyla tasarlanan, boru demeti tipi akış düzleştiricinin etkenliği ve akış ölçerin aşağı akımındaki fanlar ile akış ölçerler arasındaki mesafenin ölçümlere etkisi de incelenmiştir. Sayısal sonuçların teorik tasarım hesaplarıyla; akış lülesinde ortalama %1.6 ve orifiste ortalama %7.8 fark ile uyumlu olduğu görülmüştür. Deneysel sonuçların da teorik sonuçlarla; akış lülesinde ortalama %8 ve orifiste ortalama %14.3 fark ile uyumlu olduğu elde edilmiştir. Sayısal ve deneysel sonuçlar arasındaki ortalama fark; akış lülesinde %7.3 ve orifiste %14.8'dir. Her iki akış ölçerin deneysel sonuçları kullanılarak, basınç düşümüne bağlı hacimsel debi denklemleri türetilmiştir.

Anahtar kelimeler: Akış lülesi, Orifis, Akış düzleştirici, Debi ölçümü, Hesaplamalı akışkanlar dinamiği, Eklemeli imalat.

Abstract

The aim of this study was to design obstruction flow meters to measure and control the volumetric flow of air, to manufacture them with additive manufacturing (3D printer) and to compare numerical and experimental performance. An ASME long radius low β flow nozzle and sharp-edge orifice was the obstruction flow meter of choice due to ease of design and manufacture and common use. This study employed Computational Fluid Dynamics (CFD) to compare the numerical performance of 3D flow meters, whose geometric dimensions are determined using current design methods in the literature. Experiments were performed to calculate the performance of the obstruction flow meters produced using additive manufacturing. The inner diameter of the flow channel (152 mm) was based on the volume flow rate of 80 to 300 m³/h and the Reynolds number of 12,000 to 46,000 at the inlet of the flow meters. The ratio of the flow cross section diameter (d) of the flow meters to the channel cross section diameter (D) was β~0.45 to limit pressure losses. The effectiveness of the tube bundle-type flow straightener and the effect of the distance between the flow meters and fans downstream of the flow meter on measurements were also investigated in the experiments to develop the flow at the upstream of the flow meters at a shorter distance and to shorten the tube length. The numerical results agreed with the theoretical design calculations with an average difference of 1.6% in the flow nozzle and an average difference of 7.8% in the orifice. The experimental results also agreed with the theoretical results with an average difference of 8% in the flow nozzle and an average difference of 14.3% in the orifice. The mean difference between the numerical and experimental results was 7.3% and 14.8% in the flow nozzle and orifice, respectively. Volume flow rate equations based on pressure drops were developed using the experimental results of both flow meters.

Keywords: Flow nozzle, Orifice plate, Flow straightener (Flow conditioner), Flow rate measurement, Computational fluid dynamics, Additive manufacturing.

1 Giriş

Akış ölçerler; doğal gaz, petrol ve su gibi sıvıların veya gazların bir kanaldaki debilerini belirlemede kullanılan ölçüm cihazlarıdır. Enerji tasarrufu ve çevreyi korumaya yönelik önlemlerin uygulamada yaygınlaşması, akış ölçümünün önemini her geçen gün artırmaktadır [1].

Enerji, yakıt ve hammadde maliyetlerindeki artış, çevre kirliliğini en aza indirme ihtiyacı, sağlık ve güvenlik gereksinimleri ile ilgili yaptırımların artması, üretim süreçlerinde büyük değişikliklere neden olmuştur. Örneğin; basınçlı hava sistemlerinin etkin ve verimli çalışmasını sağlamak için akış ölçümü oldukça önemlidir. Hemen hemen tüm endüstriyel tesislerde kullanılan basınçlı hava sistemlerinin toplam maliyeti içerisinde en büyük pay elektrik enerjisine aittir. İlk yatırım ve bakım maliyetleri, elektrik enerjisi maliyetine göre daha düşüktür. Modern bir kompresörün tükettiği elektrik enerjisinin yaklaşık %90'ı ısıya dönüşürken, sadece %10'u havayı basınçlandırmada kullanılır.

*Yazışılan yazar/Corresponding author

Bu nedenle sıkıştırılmış hava, elektrikten 10 kat daha pahalıdır. Elektrik üretim ve dağıtımında %70'lere varan kayıplar da dikkate alındığında basınçlı hava, halen elektrik üretimindeki payı %50'lerde olan fosil yakıtlarla karşılaştırıldığında, yaklaşık 30 kat daha yüksek maliyetlidir. Bu nedenle birçok endüstriyel tesiste mevcut basınçlı hava sistemlerindeki yaygın uygulama, elektrik tüketimini ölçmektir. Ancak sadece birkaç şirket basınçlı hava tüketimlerini de ölçmektedir. İstatistikler, sıkıştırılmış havanın %30'unun kaçaklarla kaybolduğunu ve bu kaçakların tespit edilip giderilebileceğini göstermektedir. Tüm CO_2 salınımlarının %40'ını oluşturan endüstriyel uygulamalar, akış ölçümü ile ilgili bir başka önemli örnektir. Bu CO_2 salınımları büyük oranda, elektrik enerjisi üretmek için kullanılan kömür ve doğal gaz gibi fosil yakıtların yakılmasından kaynaklanır [1],[2].

Bilindiği gibi küresel ısınma, atmosferdeki CO_2 derişiminin (konsantrasyonunun) sürekli artmasından ileri gelmektedir. Enerji, kıt bir kaynak ve çevrenin korunması önemli bir meseleyken, akış ölçümleri, enerji dönüştüren sistemlerdeki tüketim, kaçakların tespiti ve analizinde yardımcı olur. Böylece enerji tüketimi ve dolayısıyla ekonomik ve çevresel maliyetler düşürülebilir.

Uygulamadan bir başka önemli örnek de; en genç fosil yakıt olan doğal gazın akış debisinin ölçülmesidir. Doğal gazın kaynaktan çıkarılması, taşınması, depolanması ve dağıtılması için kullanılan teknolojik süreçlerin düzenlenmesinde, akış ölçümü önemli bir işlemdir. Çünkü doğalgaz tüketiminin, tüm fosil enerji kaynakları içindeki payı %24'tür ve sürekli artmaktadır. Debi ölçme yöntemlerini geliştirmek de, bu enerji kaynağının üretim ve tüketimdeki artışla orantılı olarak önem kazanmaktadır. Bu nedenle, doğal gaz ölçüm parametreleri iyileştirilerek; taşıma, muhasebe ve kontrol süreçlerinin iyileştirilmesinin, modern gaz endüstrisinin öncelikleri arasında olduğu ifade edilmiştir. "Akış Ölçümü ve Enstrümantasyonu" (Cilt 1, no. 1, 1989) dergisinde, akış ölçerlerle kontrol edilen yıllık ekonomik büyüklüklerin 10,000 milyon ABD Doları (yaklaşık 10 milyar avro) mertebesinde olduğu vurgulanmıştır. Bu nedenle, akış ölçümlerindeki %1 belirsizlik dahi oldukça önemli bir ekonomik değeri ifade etmektedir [1],[3]-[5].

Akışkan özellikleri ve kullanılan akış ölçüm teknikleri, farklı endüstri kollarına ve uygulamaya (gıda ve içecek, tıp, madencilik, petrol ve gaz taşımacılığı, petrokimya, katıların pnömatik ve hidrolik taşınması, güç üretim tesisleri ve kağıt üretimi gibi) göre önemli ölçüde değişebilir. Dolayısıyla, akışkan özellikleri ve akış ölçüm uygulamalarındaki farklılıklar nedeniyle, belirli alanlara özgü çok çeşitli akış ölçüm teknikleri geliştirilmiştir. Bununla birlikte, bu güne kadar önerilen ve geliştirilen çok sayıda akış ölçüm tekniğinden sadece birkaçı yaygın uygulamada yer bulmuştur. Kısacası tüm uygulamalar için geçerli tek bir akış ölçme yöntemi ve akış ölçer henüz geliştirilememiştir [6].

Akış ölçümü, akmakta olan bir madde akışının niceliğini belirlemek veya bir akış debisini kontrol etmek için kullanılır. Diğer bir ifadeyle akış ölçümü, proses akışkanının ne kadar üretildiği veya ne kadar kullanıldığı ile ilgilidir. Örneğin; Romalılar, 4000 yıl önce, her aileye ait su tahsisatını, su kemerindeki akışı ölçerek kontrol etmişlerdir. Çinliler ise o dönemde çok değerli bir baharat olan tuzun üretiminde kullanılan tuzlu suyun akışını, debisini ölçerek kontrol etmişlerdir. Benzer nitelikteki çok farklı süreçlerin kontrolü, debi ölçümünün en önemli nedenlerindendir. Daha sonraki dönemlerde, günün şartlarına göre değerli akışkanların akışını kontrol etmek ve tüketimi ücretlendirmek amacıyla akış ölçümü daha da yaygınlaşmıştır. Küçük debilerin akış ölçümü, hacimsel ölçümlerle elde edilebilir (örneğin bir bardak içme suyu). Ancak debiler büyüdükçe, bir araç deposunun benzin pompasından yakıtla doldurulmasında, benzinin hacimsel debisinin ölçülmesi örneğinde olduğu gibi, bu yöntem uygulanabilir değildir [3],[6],[7].

Endüstriyel proses kontrol döngülerinin çoğunda, hedeflenen amaca ulaşması için çoğunlukla sıvıların veya gazların debileri kontrol edilmektedir. Fiziksel ölçümler yapılmadan önce, genellikle ilk aşamada ölçme yöntemi seçilir. Yöntem seçiminde; basitlik, doğruluk ve hassasiyet bakımından beklentileri sağlayan, uygulanması en kolay metot hedeflenmelidir. Örneğin; boru içerisinden uzun bir süre boyunca akan suyun ortalama debisini ölçmenin en doğru yolu, belirli bir sürede geçen su miktarını tartmak veya suyun hacmini ölçmektir (zaman ortalamalı ağırlıklı kap ölçme yöntemi). Ancak, tartı yöntemi hava gibi gazlar için uygulanamaz. Hava gibi gaz akışkanların debi ölçümlerinde, yaygın kullanılan gaz sayaçlarının temelini oluşturan hacimsel ölçüm yöntemleri tercih edilmelidir [8]-[10].

Mühendislik uygulamalarındaki hava debisi ölçümlerinin çoğunda doğrudan ölçme yöntemleri kullanılamaz. Genellikle, havanın akışından kaynaklanan bazı fiziksel etkilerin ölçülmesi gerekir. Akış ölçümünde kullanılan üç temel fiziksel etki bulunmaktadır. Bunlar; (1) akışla ilişkili basınç değişiklikleri, (2) akış içine yerleştirilen hafif kanatlı bir rotordaki dönüş hareketi ile açığa çıkan mekanik etkiler, (3) hava akışının, içinde tutulan ve elektrik akımıyla ısıtılan sıcak bir direnç telini soğutmasına benzer fiziksel değişikliklerdir. Bunlardan ilki en önemlisidir. Çünkü düzgün tasarlanan ve akış içerisine uygun şekilde yerleştirilen bir ölçüm donanımı, karakteristik bir basınç farkına neden olur. Bu basınç farkı da bir basınç göstergesi ile ölçülebilir. Basıncın ölçülmesinde kullanılan donanımlar, hava akışının içerisine girip girmemesine göre iki gruba ayrılabilir. İçerisinde akış olmayan donanımlardan olan pitot tüpleri; farklı şekillendirilmiş iki bağımsız borudan oluşan bir hız ölçme düzeneğidir. Hava akışına bakan yöndeki bir delik veya delik grubunda, ilave dinamik basınç etkisi oluşur. Bu boruların diğer uçları ise pitot tüpünde farklı yönlere bakan ikinci delik grubu arasındaki basınç farkını ölçen, bir fark basınçölçere bağlanır. Diğer debi ölçme donanımları ise içerisinde akışın olduğu debi ölçerler olup, basınç ölçümüne dayalı pitot tüpüne göre daha hassastırlar. Yaygın kullanılan örnekler; orifis (orifice plate), akış lülesi (flow nozzle) ve daha az kullanılan, ventürimetredir (venturi tube). Bu gibi debi ölçme araçları, doğru çalışmaları için sürekli kontrol altında tutulmalıdır [9].

Hacimsel veya kütlesel debinin ölçülmesinde, debisi ölçülecek akışkanın gaz veya sıvı olmasına ve diğer fiziksel, kimyasal ve toksik özelliklerine bağlı olarak, ölçüm şeklinin müdahaleli veya müdahalesiz olması istenebilir. Bu nedenle endüstride çok farklı akış ölçüm yöntemleri kullanılmaktadır. Engelli (obstruction) debimetreler, fark basınç ölçümüne dayalı ve değişken alanlı olmak üzere iki farklı tiptedir. Orifis, akış lülesi, venturimetre ve pitot tüpü birinci gruba girerken, rotametre ikinci gruptadır. Bunların tamamında akışın geçtiği bölgelerde bir engel vardır ve bu engel boyunca oluşan basınç düşümü, akışın debisiyle ilişkilendirilir. Fark basınç ölçümlü debimetreler, en yaygın tercih edilen debimetre türlerindendir. Esneklikleri, maliyetleri ve basitlikleri nedeniyle birçok uygulamada kullanılmaktadır. Basınç farkı ile çalışan

debimetreler, hemen hemen tüm düşük viskoziteli sıvı akışı ölçümlerinde ve gaz uygulamalarının çoğunda kullanılabilir [8],[11].

Sunulan çalışmanın yenilikçi ve günümüz mühendislik bilimi ve uygulamasına en önemli katkısı, engelli akış ölçer tasarım ve üretim süreçlerinde, Endüstri 4.0 işlem adımlarının ve eklemeli imalat yönteminin uygulanabileceğinin gösterilmesidir. Endüstri 4.0 süreciyle; daha az ancak nitelikli insan gücüyle, mühendislik tasarımı, planlama ve üretim süreçlerinde kalite standartlarından taviz vermeden, daha verimli, yüksek katma değerli, sıfır stoklu, düşük maliyetli, daha hızlı ve çevre dostu üretim amaçlanmaktadır. Böylece kaynak tüketimini optimize edilebilen, gerçek zamanlı, kendi kendini organize eden dinamik değer zincirlerinin oluşması sağlanacaktır. Bu nedenle; engelli akış ölçer tasarım, üretim ve tasarım doğrulama süreçleri:

- İstenilen hava debisi aralığına uygun akış ölçerlerin temel boyutlarının teorik/ampirik yöntemlerle belirlenmesi,
- Akış ölçer katı modellerinin yaygın kullanılan CAD (Bilgisayar Destekli Tasarım) yazılımı SolidWorks ile hazırlanması,
- Tasarım doğrulamasının, SolidWorks Flow Simulation HAD modülünde yapılması,
- Engelli akış ölçer prototiplerinin, eklemeli imalatla üretilmesi,
- Tasarlanan akış düzleştiricinin eklemeli imalatla üretilmesi,
- Prototip akış ölçerlerin ve akış düzleştiricinin performanslarının deneylerle doğrulanmasından oluşmaktadır.

Klasik yöntemlerle çok uzun, zahmetli ve yüksek maliyetli olan engelli akış ölçer ve akış düzleştirici tasarım/üretim süreçlerinin, çalışmada izlenen Endüstri 4.0 işlem adımlarıyla (teorik tasarım, CAD tasarımı, HAD akış analizi ve eklemeli imalat) düşük maliyetle ve kısa sürede gerçekleştirebileceği gösterilmiştir. Yapılan deneylerle, akış ölçerlerin eklemeli imalattan çıkan ham haliyle (ek yüzey işlemlerine gerek olmadan) debi ölçümlerinde kullanılabileceği kanıtlanmıştır. Ayrıca tasarlanan akış düzleştiricinin etkinliği, ölçüm için gerekli kanal uzunluğundaki azalma ile gösterilmiştir. Böylece endüstriyel uygulama ve araştırmalarda kullanılacak engelli akış ölçerler ve akış düzleştiriciler; Endüstri 4.0 süreçleriyle, geri dönüştürülebilir malzemeler, daha az işçilik ve enerjiyle, hızlı ve esnek bir şekilde, ihtiyaç duyulan hava debisi aralıkları için tasarlanıp üretilebilecektir. Ayrıca Türkçe literatürde engelli akış ölçer tasarım ve analiz süreçlerinin ayrıntılı açıklandığı ve SolidWorks Flow Simulation yazılımının HAD analizlerinde başarıyla kullanılabileceğinin gösterildiği, benzer bir çalışma bulunmamaktadır.

Bu çalışmada, 80-300 m^3/h hacimsel debi aralığında hava ile ölçüm yapmak üzere, literatürde önerilen bağıntılar kullanılarak, akış lülesi ve orifisin geometrik boyutları belirlenmiştir. Akış ölçerlerin 3-boyutlu tasarımı, SolidWorks yazılımı ile yapılmıştır. Akış ölçerlerle, tanımlanan ölçüm aralığındaki farklı debilerde ölçülmesi beklenen fark basınçları, hem literatürdeki bağıntılarla hesaplanmış hem de SolidWorks Flow Simulation yazılımıyla HAD analizlerinden elde edilmiş ve karşılaştırılmıştır. Yapılan 3-boyutlu geometrik tasarımlar için bağıntılardan elde edilen teorik fark basınçları, HAD analizleri ile elde edilen sayısal çözüm sonuçları ile doğrulandıktan sonra, akış ölçerlerin imalatı yapılmıştır. Akış ölçerlerin üretiminde, düşük maliyetli ve geri dönüştürülebilir malzemeler tercih edilmiş ve en hızlı güncel üretim yöntemi olan eklemeli imalat (additive manufacturing-3B yazıcı) kullanılmıştır. Hazırlanan deney düzeneğinde, akış ölçerlerin ölçüm aralığındaki farklı debilerde oluşturdukları fark basınçları ve ölçüm performansları deneysel incelenmiştir. Deneysel sonuçlar, literatürde önerilen bağıntılardan ve sayısal analizlerden elde edilen sonuçlarla karşılaştırılarak, akış ölçerlerin tasarımı doğrulanmıştır. Bu çalışmada aynı zamanda, akış ölçerlerin yukarı akımındaki akışı daha kısa mesafede geliştirebilmek için boru demeti tipi akış düzleştirici de tasarlanmış ve eklemeli imalatla üretilmiştir. Akış düzleştiricinin etkinliği, yukarı akımındaki akışı geliştirmek için kullanılan yeterli uzunluktaki düz boru ile karşılaştırılarak, deneysel incelenmiştir. Ayrıca, akış ölçerlerin çıkışı ile aşağı akımda emiş yapan fan arasındaki mesafenin akış ölçümlerine etkisi de deneysel incelenmiştir. Akış lülesi ve orifisin, yüzey işlemleri uygulanmış (zımparalama ve boyama) ve imalattan çıkan ham haldeki deneysel ölçüm performansları, akış düzleştiricinin etkinliği ve akış ölçerlerin çıkışı ile aşağı akımda emiş yapan fan arasındaki mesafenin debi ölçümlerine etkileri, 4 farklı akış kanalı düzenlemesiyle yapılan deneylerde incelenmiştir. Deneysel sonuçların güvenilirliği, literatürdeki bağıntılar, sayısal analizler ve farklı akış kanalı düzenlemesiyle yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak değerlendirilmiştir.

2 Akış ölçerlerin tasarımı ve hacimsel debinin belirlenmesi

Tek fazlı boru ve kanal akışlarındaki sabit akış hızlarının/debilerinin ölçülmesinde, akışkanın tamamının boru veya kanal kesitine göre daha küçük bir akış kesitinden geçirilmesi, dolayısıyla akış engellenerek oluşturulan ilave basınç düşümünün ölçülmesi, en çok kullanılan yöntemlerdendir.

Ventürimetre, akış lülesi ve orifis, bu yöntemin kullanıldığı akış ölçerlerin en bilinenleridir. Ventürimetreler, akış lüleleri ve orifislere göre daha iyi basınç geri kazanımı sağlarken, daha yüksek maliyetlidirler. Ayrıca akış boyunca uzunluklarının fazla olması, genellikle tesisat kurulumunu zorlaştırır. Geniş bir ölçüm aralığının istendiği durumlarda, farklı ölçülerde çok sayıda ventürimetreye ihtiyaç duyulması, yüksek maliyet dezavantajını daha da artırır [8],[12]-[14].

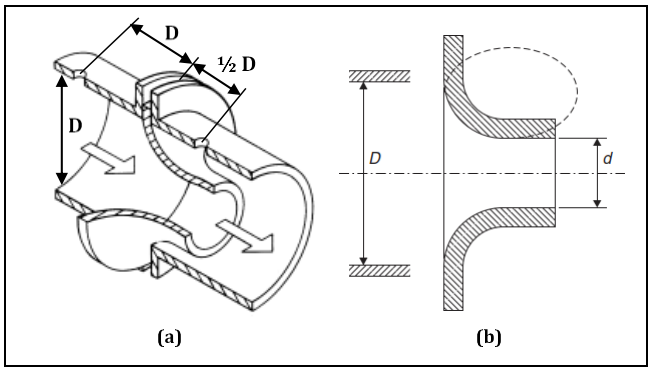
Akış lülesi, ventürimetreye göre daha kompakttır, ancak özel tasarlanmış profilleri nedeniyle üretim maliyetleri orifisten yüksektir. Akış lülesinde oluşan kalıcı basınç kaybı, orifise göre daha az olduğundan, basınç farklarının düşük tutulması gereken uygulamalarda akış lülesi daha yaygın kullanılmaktadır [8],[12]-[14].

Diğer engelli akış ölçerlere göre orifisin üretimi daha basit ve maliyeti nispeten daha düşüktür. İki borunun flanşları arasına yerleştirilebilen ve ortasında delik bulunan düz bir levhadan ibaret olduğundan, orifisin boru hattına montajı kolaydır. Orifisin en önemli dezavantajı, akışta oluşturduğu kalıcı basınç düşümünün fazla olmasıdır. Akışkanın basıncı, orifisten sonra önemli ölçüde düşer ve kesit daralması nedeniyle artan dinamik basıncın sadece bir kısmı geri kazanılabilir [8],[12]-[14]. Venturimetreler; yüksek maliyetleri, dar ölçüm aralıkları ve uzunlukları nedeniyle kurulumda karşılaşılan zorluklardan dolayı bu çalışmaya dahil edilmemiştir.

Sunulan çalışmada, ventürimetreye göre daha düşük maliyetli, üretimi ve kurulumu daha kolay engelli akış ölçerler olan akış lülesi ve orifisin tasarımı ele alınmıştır. Akış lülesi ve orifisin; akış kesiti ve geometrik boyutları, ölçülecek debi aralığı ve kalıcı basınç düşümünün çok fazla artmaması dikkate alınarak, çap oranı $\beta \cong 0.45$ seçilerek belirlenmiştir.

2.1 Akış lülesi (Flow nozzle)

Akış lülesi; akışkanı boğaz adı verilen dairesel bir kesite yönlendiren, süreksizliği olmayan, yakınsak ve yumuşak kavisle daralan bir akış kanalıdır. Diğer bir deyişle akış lülesi; akış yönünde kesiti daralan bir engelli akış ölçerdir. Bu çalışmada, ASME'nin uzun yarıçaplı, düşük β oranlı tipteki akış lülesi ele alınmış ve lülenin karakteristik boyutlarının gösterildiği bir şematik kesit resmi Şekil 1'de verilmiştir. Düşük β oranlı akış lülesinde, β oranının 0.5'den küçük olması tavsiye edilmektedir [15].



Şekil 1. Akış lülesinin. (a): Basınç ölçüm noktaları [6] ve (b): Kesit resmi [16] (şematik gösterim).

Figure 1. Flow nozzle. (a): Pressure taps [6] and (b): Cross-sectional view [16] (schematic representation).

Akış lülesiyle yapılan fark basıncı ölçümleri ile debinin hesaplanmasında kullanılan 2 farklı bağıntı şu şekildedir.

1- Hacimsel debinin, deneysel verilerle türetilen, debi katsayısı (C_d) bağıntısı (Denklem 1) kullanılarak belirlenmesi [17]:

$$C_d = 0.9975 - (6.53\,\beta^{0.5}/Re^{0.5}) \qquad \beta = d/D \tag{1}$$

Burada; β akış lülesi çıkış kesiti çapı d (m)'nin, aynı zamanda kanal iç çapı olan lüle giriş kesit çapı D (m)'ye oranıdır. Re, akış lülesi giriş kesitindeki Reynolds sayısıdır. Debi katsayısı C_d, Denklem (2)'de yerine yazılarak hacimsel debi $\dot{\forall}$ (m³/s) hesaplanır.

$$\dot{\forall} = A_2 C_d \sqrt{\frac{2\,\Delta p}{\rho\,(1-\beta^4)}} \tag{2}$$

Yukarıdaki eşitlikte; A_2 (m²) akış lülesinin çıkış kesitinin alanı, Δp (Pa) lülenin girişi ile çıkışı arasında ölçülen basınç farkı, ρ (kg/m³) akışkanın yoğunluğudur.

2- Hacimsel debinin, deneysel verilerle hazırlanan grafikten okunan boşaltma katsayısı (C) kullanılarak belirlenmesi [15]:

Boşaltma katsayısı C'nin verildiği grafik (Ek A) [15], akış lülesi çıkış kesiti çapının, giriş kesiti çapına oranı olan çap oranı (β) ile giriş kesitindeki Re sayısına göre düzenlenmiştir. Hız faktörü M ise Denklem (3) ile hesaplanır [15].

$$M = \frac{1}{\sqrt{1-(A_2/A_1)^2}} \tag{3}$$

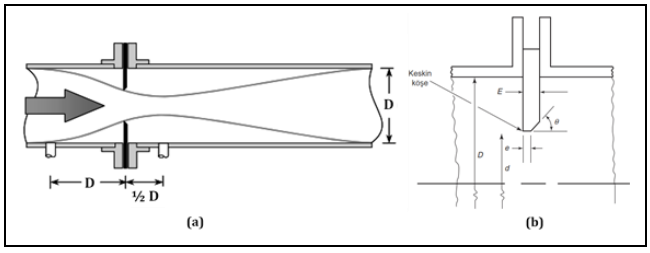
A_1 (m²) ve A_2 (m²), akış lülesinin giriş ve çıkışındaki kesit alanlarıdır. Hacimsel debi, ölçülen basınç kaybı Δp (Pa) kullanılarak Denklem (4) ile hesaplanır.

$$\dot{\forall} = C M A_2 \sqrt{2\Delta p/\rho} \tag{4}$$

Yukarıdaki eşitlikte A_2 (m²) akış lülesi çıkış kesitinin alanı, ρ (kg/m³) akışkanın yoğunluğu ve Δp (Pa) lülenin girişi ile çıkışı arasında ölçülen basınç farkıdır.

2.2 Orifis (Orifice plate)

Orifis, ortasında delik bulunan bir levhadan ibaret olduğundan çok az yer kaplayan, düşük maliyetli, tasarım ve imalatı en basit engelli akış ölçerdir. Fakat orifisten geçen akışın kesitindeki ani daralma ve genişleme, önemli miktarda girdaba neden olur. Bu da büyük yük kayıplarına ve kalıcı basınç kaybına yol açar. Keskin köşeli orifise ait karakteristik boyutların gösterildiği şematik bir kesit resmi, Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2. Orifisin. (a): Basınç ölçüm noktaları [6] ve (b): Kesit resmi [16] (şematik gösterim).

Figure 2. Orifice plate. (a): Pressure taps [6] and (b): Cross-sectional view [16] (schematic representation).

Orifislerde tavsiye edilen çap oranı β=0.25-0.75 aralığındadır. Orifis girişinde ve çıkışındaki basınç ölçüm noktalarının konumlandırılması için genellikle dört farklı yöntem önerilmektedir. Basınç ölçme noktalarının konumlandırılması; flanşlara (flange tapping), akış kesitinin en dar bölgesine (vena contracta tapping), boru üzerinde D kadar yukarı akıma ve D/2 kadar aşağı akıma (D and D/2 tapping) ve boru üzerinde 2.5D kadar yukarı akıma ve 8D kadar aşağı akıma (pipe tapping) yapılabilmektedir [17]. Ancak, sunulan çalışmada yapılacak tüm deneysel çalışmalar da dikkate alınıp, akış lülesi ile aynı basınç ölçüm noktalarının kullanılması ve kurulum basitliği göz önünde bulundurularak, orifis için de boru üzerindeki basınç ölçüm noktaları, girişten D kadar yukarı akımda ve çıkıştan D/2 kadar aşağı akımda konumlandırılmıştır. Bu nedenle hacimsel debinin deneysel belirlenmesinde, basınç ölçüm noktalarının bu konumlandırmasına (D ve D/2) uygun olarak, orifisin debi katsayısı C_d için önerilen ampirik bağıntı olan Denklem (5) kullanılmıştır [17].

$$C_d = 0.5959 - 0.0312\,\beta^{2.1} - 0.184\,\beta^8 + 0.039\,\frac{\beta^4}{1-\beta^4} - 0.01584 + \left(\frac{91.71\,\beta^{2.5}}{Re^{0.75}}\right) \tag{5}$$

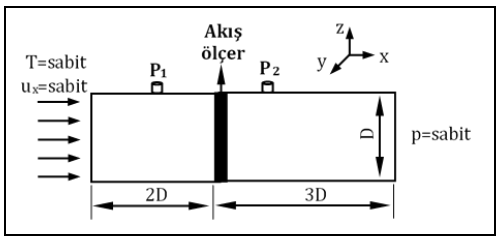
Yukarıdaki eşitlikte; β, orifis akış kesiti çapı d (m)'nin, boru kesiti çapı D (m)'ye oranı ve Re, boru kesitindeki Reynolds sayısıdır. Debi katsayısı C_d Denklem (6)'da yerine yazılarak, hacimsel debi $\dot{\forall}$ (m³/s) hesaplanır.

$$\dot{\forall} = A_2 C_d \sqrt{\frac{2\,\Delta p}{\rho\,(1-\beta^4)}} \quad (6)$$

Yukarıdaki eşitlikte; A_2 (m²) orifis akış kesitinin alanı, Δp (Pa) orifisin yukarı ve aşağı akımında boru çeperine yerleştirilen ölçüm noktalarından ölçülen statik basınçların farkı, ρ (kg/m³) akışkanın yoğunluğudur. 2. yöntemde; β'ya ve boru kesitindeki Re sayısına göre düzenlenmiş grafiklerden okunan akış katsayısı CM ile hacimsel debi elde edilebilmektedir. Ancak literatürde mevcut grafikler belli bir boru çapı aralığı (32 mm-76 mm) için elde edildiğinden ve deneysel çalışmalarda kullanılacak borunun iç çapı D=152 mm olduğundan, bu yöntem tasarlanan orifise ait hesaplarda kullanılamamıştır [15].

3 Sayısal tasarım

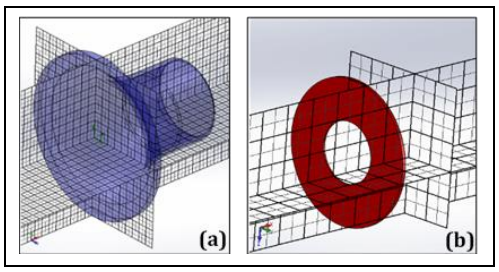
Bu bölümde, literatürde önerilen hesaplama yöntemleri kullanılarak geometrik boyutları belirlenen akış lülesi ve orifisin için ölçülecek debi aralığında yapılan parametrik sayısal çözümler ele alınmıştır. Küçük bir konutun iklimlendirme sistemindeki taze hava ihtiyacı dikkate alınarak, ölçülecek hava debisi 80-300 m³/h ve akış ölçerlerin girişindeki Re sayıları da 12,000-46,000 olacak şekilde, akış ölçerlerin yerleştirileceği borunun iç çapı 152 mm olarak belirlenmiştir. Akış ölçerlerin teorik hesaplamalar sonucunda elde edilen boyutları ve teknik resim detayları Kaynak [18]'de verilmiştir. Tasarlanan akış ölçerlerin 3-boyutlu sayısal modelleri, ölçüm doğruluğunu kontrol etmek için SolidWorks yazılımı ile oluşturulmuştur. Sayısal modellerin şematik resmi ve uygulanan sınır şartları Şekil 3'te verilmiştir.



Şekil 3. Sayısal modellerin şematik resmi ve sınır şartları.

Figure 3. Schematic representation and boundary conditions of numerical models.

Akış ölçerlerin sayısal çözümlemesinde yapısal ağ kullanılmıştır. Akış lülesi ve orifis için kullanılan ağ yapıları Şekil 4'te verilmiştir.



Şekil 4. Ağ yapıları. (a): Akış lülesi ve (b): Orifis.

Figure 4. Mesh structures. (a): Flow nozzle and (b): Orifice plate.

En yüksek hacimsel debide, 7 farklı ağ sayısıyla ve oluşturulan sayısal modeller kullanılarak yapılan ağ sayısından bağımsızlık çalışmasının sonuçları, Tablo 1'de verilmiştir. Yapılan sayısal çözümlerde; akış lülesi için 55962 ve orifis için 4452 elemanlı sayısal modeller kullanılmıştır. Bu ağ sayılarının üzerinde sonuçlar neredeyse değişmemiştir. Aynı ağ yapıları ve eleman sayıları, ölçüm aralığındaki diğer hacimsel debilerde yapılan sayısal çözümlerde de kullanılmıştır. Kullanılan sayısal modellerle (Şekil 3), adyabatik ve zamandan bağımsız yapılan sayısal çözümlerde; havanın çözüm alanı girişindeki sıcaklığının 20°C, hız profilinin düzgün (üniform) dağılımlı, yatay yönde ve sabit olduğu kabul edilmiştir. Çözüm bölgesi çıkışında, basınç sabit (p=101.325 kPa) kabul edilmiştir. Ayrıca akışkanın fiziksel özelliklerinin değişmediği ve akışın 3-boyutlu ele alındığı çözümlerde, yerçekimi etkisi de ihmal edilmiştir. Atmosfer basıncındaki havanın 20°C'deki özellikleri; ρ_{hava}=1.204 kg/m³, ν_{hava}=1.516x10⁻⁵ m²/s ve μ_{hava}=1.825x10⁻⁵ kg/ms olarak alınmıştır [19].

Tablo 1. Ağ sayısından bağımsızlık sonuçları.

Table 1. Results of independence by the number of mesh.

Akış lülesi (Δp-teorik =318.70 Pa)		
Ağ sayısı	Δp-sayısal (Pa)	Fark (%)
4810	345.74	-8.48
14330	326.71	-2.51
37740	321.74	-0.95
55962	315.54	0.99
77652	315.04	1.15
137760	313.29	1.70
168826	315.81	0.91
Orifis (Δp-teorik =830.55 Pa)		
Ağ sayısı	Δp-sayısal (Pa)	Fark (%)
2584	708.86	14.65
3184	721.89	13.08
3470	825.94	0.56
3528	829.55	0.12
4016	838.78	-0.99
4452	835.78	-0.63
10643	834.72	-0.50

Sayısal modellemeler; akış ölçerler, kanal çapının (D=152 mm) 5 katı uzunluğundaki dairesel kesitli boruda, girişten 2D ve çıkıştan 3D mesafede konumlandırılarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 3). Sayısal çözüm sonuçları kullanılarak, standartlarda tanımlanan, akış ölçerden D kadar yukarı akımda ve D/2 kadar aşağı akımda konumlandırılan ölçüm noktalarının bulunduğu akış kesitlerindeki ortalama statik basınçlar hesaplanmıştır. Bu basınçlar kullanılarak da akış ölçerlerde oluşacak basınç farkları belirlenmiştir.

Zamandan bağımsız, yer çekimi etkisinin ihmal edildiği, sıkıştırılamaz akışlar için Favre-ortalamalı Navier-Stokes ve Lam ve Bremhorst [20] tarafından önerilen sönümleme fonksiyonu ile iyileştirilmiş, k-ε türbülans modeli denklemlerinin ayrıklaştırılmasında ve çözümünde; sonlu hacimler tabanlı ticari HAD kodu olan SolidWorks Flow Simulation deneme sürümü kullanılmıştır. Sayısal çözümde kullanılan denklemler:

Kütlenin korunumu:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (7)$$

Momentumun korunumu:

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) + \frac{\partial p}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\tau_{ij} + \tau_{ij}^R\right); i = 1,2,3 \quad (8)$$

Hava, Newton tipi akışkan kabul edilmiştir ve Newton tipi akışkan için τ_{ij}:

$$\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3}\delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \quad (9)$$

Boussinesq'in Reynolds gerilme tensör varsayımı:

$$\tau_{ij}^R = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3}\delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) - \frac{2}{3}\rho k \delta_{ij} \quad (10)$$

Burada, δ_{ij}; Kronecker delta fonksiyonu, μ; dinamik viskozite, μ_t; türbülans viskozitesi ve k; özgül türbülans kinetik enerjisidir. Türbülans viskozitesi:

$$\mu_t = f_\mu \frac{C_\mu \rho k^2}{\varepsilon} \quad (11)$$

Burada, C_μ; sabit olup, f_μ; Lam ve Bremhorst'un [20] sönümleme fonksiyonu terimidir ve aşağıdaki ifadeden hesaplanır.

$$f_\mu = \left(1 - e^{-0.025 R_y}\right)^2 (1 + (20.5/R_t)) \quad (12)$$

Burada, y; yüzeyden olan uzaklık olup, R_y ve R_t aşağıdaki gibidir.

$$R_y = \rho k^{1/2} y/\mu \qquad R_t = \rho k^2/\mu\varepsilon \quad (13)$$

Laminer, türbülanslı ve geçiş akışları için tanımlı, Lam ve Bremhorst [20] tarafından önerilen sönümleme fonksiyonları ile iyileştirilmiş, sürekli rejim koşullarındaki (zamandan bağımsız) modifiye k-ε türbülans modeli:

$$\frac{\partial \rho k u_i}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i}\left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + \tau_{ij}^R \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho\varepsilon \quad (14)$$

$$\frac{\partial \rho \varepsilon u_i}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i}\left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \left(f_1 \tau_{ij}^R \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) - f_2 C_{\varepsilon 2} \frac{\rho \varepsilon^2}{k} \quad (15)$$

Modifiye k-ε türbülans modeli için f_1 ve f_2:

$$f_1 = 1 + (0.05/f_\mu)^3 \qquad f_2 = 1 - e^{R_t^2} \quad (16)$$

f_μ, f_1 ve f_2; Lam ve Bremhost'un sönümleme fonksiyonları olup bu fonksiyonlar 1 olduğunda, önerilen yaklaşım orijinal k-ε türbülans modeline dönüşmektedir. C_μ, $C_{\varepsilon 1}$, $C_{\varepsilon 2}$, σ_k ve σ_ε ampirik model sabitleri olup, C_μ=0.09, $C_{\varepsilon 1}$=1.44, $C_{\varepsilon 2}$=1.92, σ_k=1 ve σ_ε=1.3'dür.

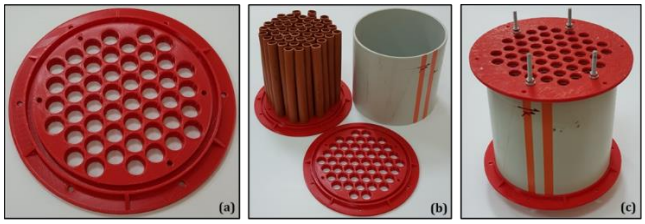
Çözülecek akış denklemlerinin ayrıklaştırılmasında, ikinci mertebeden (Second Order Upwind) ayrıklaştırmalar kullanılmıştır. Ayrıca, hız-basınç ikilisinin ayrıklaştırılmasında, SIMPLE algoritmasına (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations) benzer bir algoritma olan operator-splitting tekniği kullanılmıştır. Hız ve basınç için yakınsama ölçütü olan, deltanın (iterasyon aralığında geçerli) değeri, 0.03 seçilmiştir. Sayısal çözümler ortalama 150 iterasyonda yakınsamıştır.

4 Akış düzleştirici (Flow straightener-Flow conditioner)

Akış düzleştiriciler, akış kanallarında hız ve basınç ölçümü yapılan kesitlerin yukarı akımında, farklı nedenlerle bozulan akışı kısa mesafede düzenleyip, tekrar tam gelişmiş hız profilini elde etmek için kullanılır. Böylece, akış düzleştiricinin yukarı akımındaki, hız ve basınç ölçümlerini olumsuz etkileyecek girdaplı akış yapıları ortadan kaldırılır. Akış düzleştirici, akış ölçerin yukarı akımında gerekli kanal uzunluğunu azaltırken, akışa engel oluşturduğundan, bir miktar kalıcı basınç kaybına da neden olur.

Akıştaki bozulmalar, akış ölçerin yukarı akımında yeterli uzunlukta düz boruyla da aşılabilir, ancak bu her zaman uygulanamaz. Yeterli uzunlukta boru kullanılamayan tesisatlarda, akış düzleştiricilerin kullanılması kaçınılmazdır. Üzerinde çok sayıda küçük deliğin bulunduğu, akış yönünde belli bir kalınlığa sahip levhalardan oluşan, akış düzleştirici tasarımları olduğu gibi küçük çaplı çok sayıdaki paralel borudan oluşan düzleştirici tasarımları da mevcuttur [17], [21], [22].

Literatürdeki birçok akış düzleştirici, delikli bir plakadan veya küçük çaplı çok sayıda paralel borudan oluşmaktadır. Bu tür cihazların çoğunun yapısı, literatürde tarif edilmektedir. Zanker, katlanmış kanat (folded vane), K-lab Mark 2, Mitsubishi, laws, vortab, boru demetli (tube), bal peteği (honeycomb) ve kanatçıklı (fin) gibi farklı akış düzleştirici tasarımları bulunmaktadır [16],[21]. Ancak, üretim ve montaj kolaylığı nedeniyle, boru demetli akış düzleştiriciler daha çok tercih edilmektedir. Bu nedenle, akış ölçer performans deneylerinde kullanılmak üzere, Zanker modeline benzer boru demetli akış düzleştirici tasarlanmıştır. Düzleştiricide boru sayısını artırabilmek için üçgen diziliş tercih edilmiştir [23]. Akış düzleştiricinin aynaları eklemeli imalatla üretilmiştir. Düzleştiricinin uzunluğu, Kaynak [21]'de verilen tasarım ölçütleri de dikkate alınarak, asıl akış kanalının çapına eşit (L=D) seçilmiştir. Boru demetindeki 48 adet polietilen borunun iç çapı 14 mm'dir. Tasarlanan, üretimi ve montajı yapılan akış düzleştiricinin fotoğrafları, Şekil 5'te verilmiştir.



Şekil 5. Akış düzleştiricinin. (a): Aynaları. (b): Üçgen dizilmiş boru demeti ve dış kılıfı. (c): Montajlı fotoğrafı.

Figure 5. Flow straightener. (a): Tube sheets. (b): Tube bundle with a triangular-pitch layout and outer shell. (c): Assembled photo.

Bu çalışmada, akış ölçerlerin yukarı akımında daha kısa mesafede tam gelişmiş akış koşullarını elde edebilmek ve gerekli toplam kanal boyunu kısaltmak amacıyla tasarlanıp, üretilen akış düzleştiricinin etkenliğini değerlendirmek için de deneyler (Bölüm 5, Tablo 2) yapılmıştır.

Tablo 2. Deneysel çalışmalar ve deney koşulları.

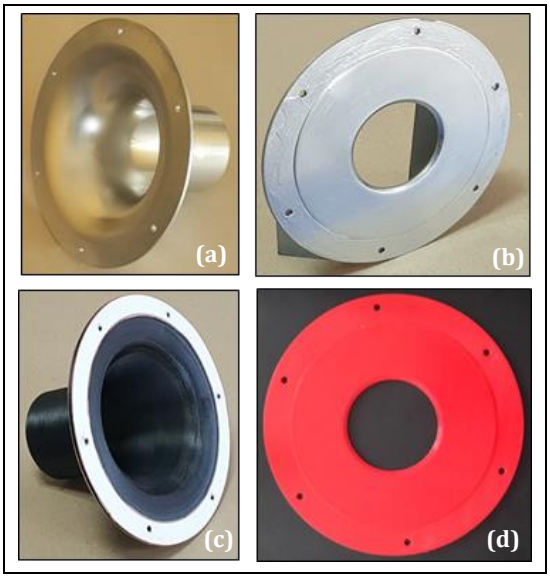
Table 2. Experiments and conditions.

	A	B	C	H
Deney-1	20D	8.3D	-	12.5D
Deney-2	20D	3.7D	-	12.5D
Deney-3	20D	2.6D	3.7D	12.5D
Deney-4	3.7D	2.6D	3.7D	-

Not: D=152 mm.

5 Deney düzeneği

Akış lülesi ve orifisin geometrik boyutları, Bölüm 2'de bahsedilen tasarım yöntemlerine göre belirlenmiştir [18]. SolidWorks yazılımı ile akış ölçerlerin katı modelleri oluşturulmuş ve sayısal çözümler Bölüm 3'de bahsedildiği gibi tamamlanmıştır. Tasarım hesapları sayısal çözümlerle doğrulandıktan sonra akış ölçerler, maliyetler de dikkate alınarak, eklemeli imalatla (3B yazıcı) üretilmiştir. Akış ölçerler, Sakarya Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünde bulunan, Zaxe marka 3B yazıcı ile 0.2 mm katman kalınlığı ve %30 doluluk oranı ile imal edilmiştir. Deneysel çalışma için hazırlanan akış ölçerlerin fotoğrafları, Şekil 6'da verilmiştir.



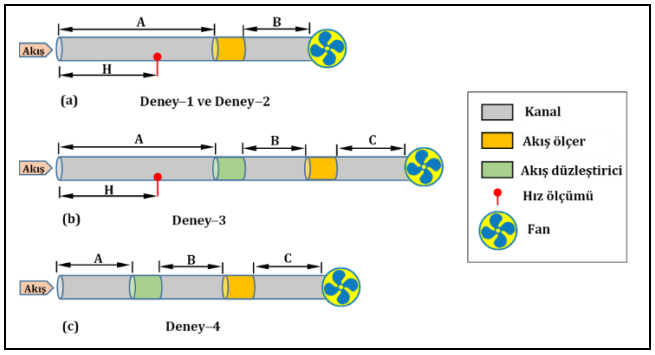
Şekil 6. Zımparalı-boyalı. (a): Akış lülesi. (b): Orifis ve ham-boyasız. (c): Akış lülesi. (d): Orifis.

Figure 6. Sanded-painted. (a): Flow nozzle. (b): Orifice plate and raw-unpainted. (c): Flow nozzle. (d): Orifice plate.

Akış ölçerlerin, kullanılan üretim yönteminden kaynaklı yüzey pürüzlülüğünü azaltmak için önce zımparalama işlemi uygulanmış ve daha sonra akış ölçerler boyanarak deneysel ölçümlere hazırlanmıştır. Ayrıca akış ölçerlerin, eklemeli imalattan çıkmış ham haliyle (zımparalama ve boyama işlemine uygulanmadan) yapılan deneylerle, yüzey pürüzlülüğünün ölçüm performansına etkisi de incelenmiştir. Akış ölçerlerin ölçüm performansını değerlendirmek üzere, Şekil 7'de şematik resmi ve Şekil 8'de fotoğrafları verilen deney düzeneği hazırlanmıştır. Deney düzeneğinde akış ölçerlerin yukarı akımında, D=152 mm iç çapında ve ~3 m uzunluğunda (20D) bir PVC (polivinil klorür) boru kullanılmıştır.

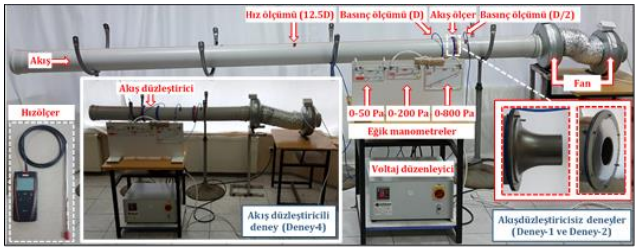
Akış ölçerlerin çıkış kesiti ile aşağı akımında emiş yapan fan arasındaki mesafenin basınç ölçümlerine etkisini değerlendirmek için 152 mm iç çapında ve 2 farklı uzunlukta (8.3D ve 3.7D) PVC borular ile deneyler (Deney-1 ve Deney-2) yapılmıştır. Ayrıca Bölüm 4'te bahsedildiği gibi tasarlanan ve üretilen akış düzleştiricisi ile de deneyler (Deney-3 ve Deney-4) yapılmıştır.

Deneysel çalışmada hava debileri, kanaldan emiş yapan fanların devir sayıları kontrol edilerek ayarlanmıştır. Ayrıca PVC borularla akış ölçerlerin bağlantısı için özel flanşlı bağlantılar tasarlanmış ve eklemeli imalat ile üretilen flanşlarla montaj ve bağlantılar yapılmıştır. Akış ölçerlerdeki basınç düşümleri, 3 farklı eğik manometreyle (ölçüm aralıkları: 0-50 Pa, 0-200 Pa ve 0-800 Pa) ölçülmüştür. Her seri deneyden önce eğik manometrelerin kollarındaki sıvı seviyeleri kontrol edilmiş ve gerekli ayarlamalar yapılmıştır. Ayrıca, şebeke gerilimindeki dalgalanmaların fanlara ve debiye olası etkileri, voltaj düzenleyici ile azaltılmıştır. Deneysel çalışmalar ve deney koşulları Tablo 2'de özetlenmiştir.



Şekil 7. Deney düzeneğinin şematik gösterimi; (a) Deney-1 ve Deney-2, (b) Deney-3 ve (c) Deney-4.

Figure 7. Experimental setup schematic representation: (a) Experiment-1 and Experiment-2, (b) Experiment-3 and (c) Experiment-4.



Şekil 8. Deney düzeneğinin ve portatif hızölçerin fotoğrafı.

Figure 8. Photo of the experimental setup and portable anemometer.

Deneysel hız ölçümleri, kalibrasyon sertifikalı portatif bir hızölçer (sıcak tel anemometresi) ve eş değer alan metoduna (Log-Tchebycheff [24]) göre yapılmıştır. Ölçümler, akış ölçerlerin yukarı akımına yerleştirilen 20D uzunluğundaki düz borunun girişinden itibaren tam gelişmiş akış koşullarının oluştuğu (12.5D=1900 mm) noktadan yapılmıştır (Şekil 7, Şekil 8 ve Tablo 2). Deneyler oda sıcaklığında yapılmış ve deneysel ölçümler bilgisayar ortamında kayıt altına alınmıştır. Deneysel ölçümlerde kullanılan eğik manometrelerin ve portatif hızölçerin ölçüm belirsizlikleri Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. Ölçüm belirsizlikleri.

Table 3. Measurement uncertainties.

Ölçüm cihazları	Ölçüm aralığı ve belirsizlikler	
Portatif hızölçer	Minimum hız (1.22m/s)	±%7.1
	Maksimum hız (4.5m/s)	±%7.4
Eğik manometreler	Manometrelerin ölçüm aralıklarında	±%2

6 Sonuçlar ve tartışmalar

Deneysel çalışmalarda havanın hacimsel debisinin (80-300 m^3/h) ölçülmesi ve kontrolü amacıyla akış lülesi ve orifis tasarlanmıştır. Literatürde, mevcut hesap yöntemleri ile engelli akış ölçerlerde farklı debilerde oluşacak basınç kayıpları hesaplanarak, akış ölçerlerin geometrik boyutları

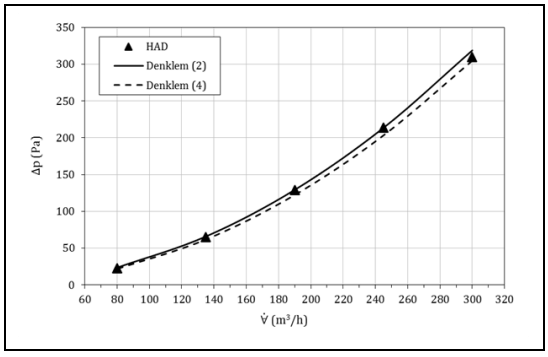
belirlenmiştir. Tasarlanan akış ölçerlerin katı ve sayısal modelleri SolidWorks yazılımında oluşturulmuştur. Akış ölçerlerin performansları; hem literatürde önerilen teorik hesaplarla hem de SolidWorks Flow Simulation yazılımının deneme sürümünde yapılan sayısal çözümlerle doğrulanmıştır. Sayısal çözümden elde edilen basınç düşümü sonuçları ile önerilen teorik hesap yöntemlerinden elde edilen basınç düşümleri karşılaştırılmıştır. Teorik ve sayısal çözüm sonuçları doğrulandıktan sonra akış ölçerlerin üretimleri, geri dönüştürülebilir malzemelerle, düşük maliyetli ve hızlı bir yöntem olan eklemeli imalatla (3B yazıcı) yapılmıştır. Akış ölçerlerin ölçüm performansının değerlendirilmesi için deney düzeneği kurulmuştur.

Deneysel çalışmalarda, akış ölçerlerin performansları; eklemeli imalatta oluşan yüzey pürüzlülüğünün etkilerini değerlendirmek için zımparalı-boyalı ve ham-boyasız olmak üzere iki farklı durumda incelenmiştir. Ayrıca, akış ölçerlerin çıkış kesiti ile aşağı akımda emiş yapan fan arasındaki mesafenin etkisini değerlendirmek için de deneyler yapılmıştır. Bunların yanı sıra, akış ölçerlerin yukarı akımında hız profilinin kısa mesafede geliştirilmesi (akıştaki girdabın ortadan kaldırılması ve bozulmuş hız profillerinin geri kazanılması) için akış düzleştirici tasarlanmıştır. Akış ölçerlerin ölçüm performansları, bu akış düzleştirici ile yapılan deneylerle de incelenmiştir. Deneysel çalışmalar ve deney koşulları Şekil 7 ve Tablo 2'de özetlenmiştir.

6.1 Teorik ve sayısal çözüm sonuçları

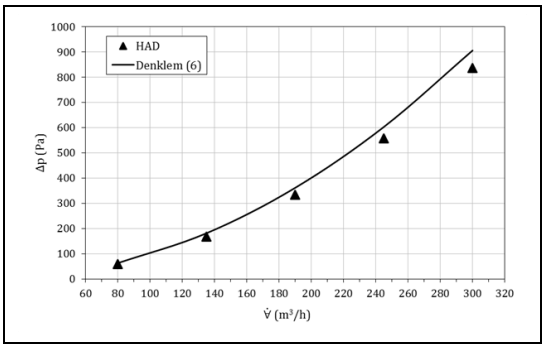
Standartlarda tanımlanan basınç ölçme noktaları arasında (D kadar yukarı akımda ve D/2 kadar aşağı akımda), kesit değişimi ve sürtünme etkileri ile oluşan kalıcı basınç kaybı sayısal çözüm ile elde edilmiştir. Şekil 9 ve 10'da akış lülesi ve orifiste, teorik hesaplamalar ve sayısal çözümden elde edilen kalıcı basınç düşümlerinin hacimsel debiye bağlı değişimleri, Şekil 11 ve Şekil 12'de; akış lülesinde ve orifiste, sayısal çözümden elde edilen akış kanalı simetri düzlemindeki basınç ve hız dağılımları verilmiştir.

80-300 m³/h hacimsel debi aralığında akış lülesi için sayısal çözüm sonuçları, Bölüm 2'de bahsedilen teorik hesap yöntemlerinden; Denklem 2'ye göre ortalama %1.6 daha düşük ve Denklem 4'e (grafik kullanılarak) göre ortalama %4.4 daha yüksektir (Şekil 9).



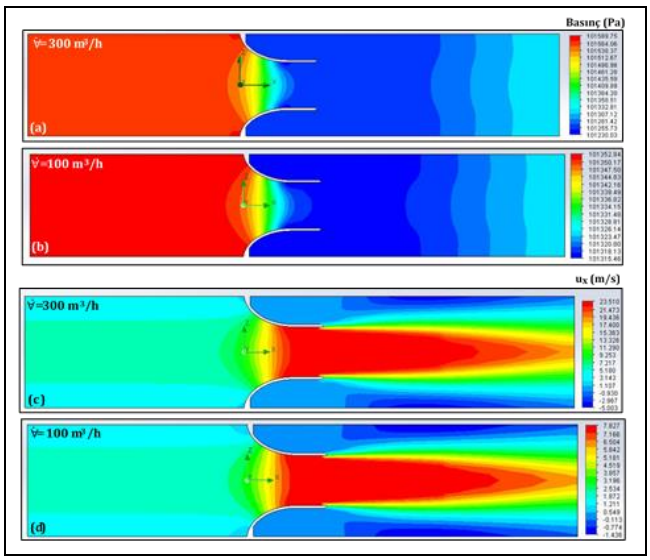
Şekil 9. Akış lülesinde kalıcı basınç düşümünün hacimsel debiye bağlı değişimleri.

Figure 9. Volume flow rate-dependent changes in permanent pressure drop in the flow nozzle.



Şekil 10. Orifiste kalıcı basınç düşümünün hacimsel debiye bağlı değişimleri.

Figure 10. Volume flow rate-dependent changes in permanent pressure drop in the orifice plate.

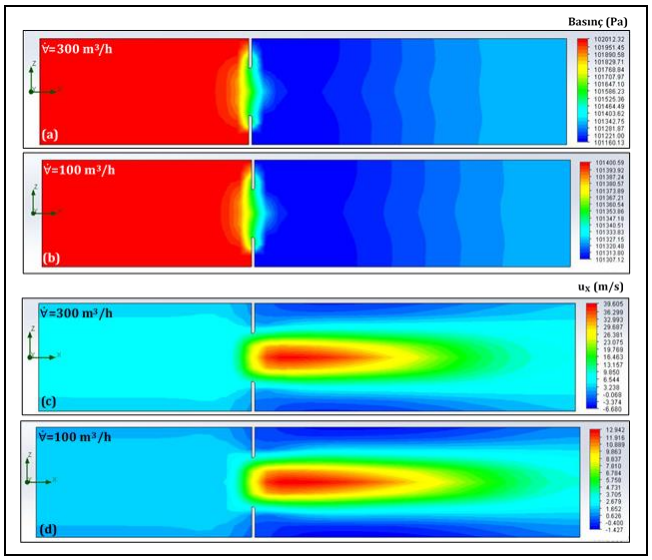


Şekil 11. 300 m³/h ve 100 m³/h debilerde akış lülesi simetri düzleminde. (a)-(b): Basınç ve (c)-(d): Hız dağılımları.

Figure 11. In the flow nozzle symmetry plane at flow rates of 300 m³/h and 100 m³/h: (a)-(b): Pressure and (c)-(d): Velocity contours.

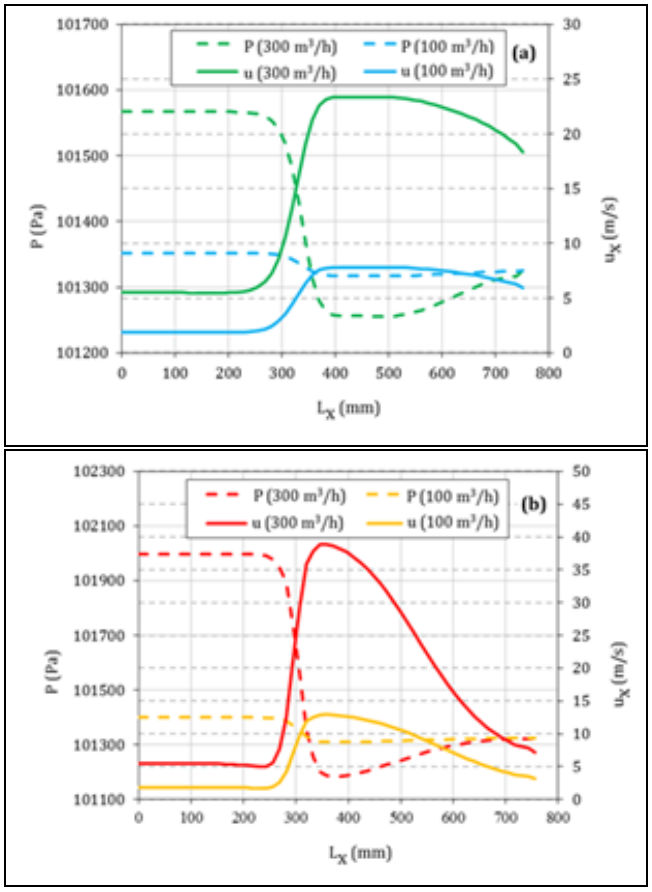
Bu sonuçlar, debi ölçümlerinde kullanılacak akış lülesinin ölçüm doğruluğunun, deneysel olarak kontrol edilip ayarlanması gerektiğini göstermektedir. Akış lülesinde; 300 m³/h ve 100 m³/h debilerde, sayısal çözümden elde edilen, akış kanalı simetri düzlemindeki basınç ve hız dağılımları Şekil 11'de görülmektedir. Ayrıca Şekil 13(a)'da kanal ekseni boyunca; statik basıncın ve x-yönündeki yerel hızın akış doğrultusundaki değişimleri verilmiştir.

Eş basınç dağılımından görüleceği üzere, akış lülesinde kesitin değişmeye başladığı bölgelerde giriş kesitinden çıkışa doğru statik basınç düşmektedir. Eş hız dağılımdan ise giriş kesitinden çıkışa doğru hızın arttığı görülmektedir. Diğer bir değişle, girişten itibaren statik basıncın azaldığı bölgelerde akış hızı artarken, kanal çıkışına doğru statik basıncın arttığı bölgelerde akış hızı azalmaktadır.



Şekil 12. 300 m³/h ve 100 m³/h debilerde orifis simetri düzleminde. (a)-(b): Basınç ve (c)-(d): Hız dağılımları.

Figure 12. In the orifice plate symmetry plane at flow rates of 300 m³/h and 100 m³/h: (a)-(b) Pressure and (c)-(d) Velocity contours.



Şekil 13. Basınç ve hızın eksenel doğrultuda değişimleri. (a): Akış lülesi ve (b): Orifis.

Figure 13. Changes in pressure and velocity in axial direction: (a): Flow nozzle and (b): Orifice plate.

Şekil 10'da orifisteki kalıcı basınç düşümlerinin, teorik hesaplamalar ve sayısal çözümden elde edilen değişimleri, hacimsel debiye bağlı olarak verilmiştir. Sayısal analiz sonuçları, Bölüm 2'de önerilen hesap yöntemine göre ortalama %7.8 daha düşüktür.

Şekil 12'de 300 m³/h ve 100 m³/h debilerde; orifisin yerleştirildiği akış kanalının simetri düzleminde, sayısal çözümden elde edilen basınç ve hız dağılımları görülmektedir. Orifis için elde edilen eş basınç ve eş hız dağılımındaki değişim, akış lülesindekine benzerdir. Basınç ve hız dağılımı arasındaki ilişki; statik basıncın arttığı bölgede akış hızında azalma, statik basıncın azaldığı bölgede akış hızında artma şeklindedir Şekil 13(b). Tasarımı yapılıp, literatürde mevcut hesap yöntemleri ve sayısal çözümlerle performansları incelenen akış lülesi ve orifisin teknik resimleri, Kaynak [18]'de verilmiştir.

6.2 Deneysel sonuçlar

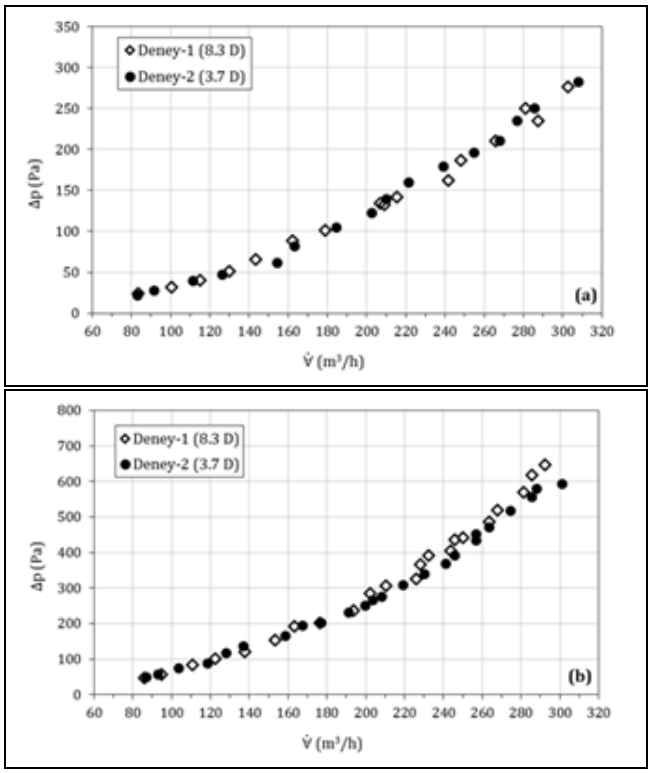
Literatürdeki mevcut tasarım yöntemleri kullanılarak, seçilen hacimsel debi aralığına (80-300 m³/h) uygun olarak akış ölçerlerin geometrik boyutları belirlenmiş ve tasarımlar sayısal çözümlerle kontrol edilerek doğrulanmıştır. Bu kontrol ve doğrulamalardan sonra akış ölçerlerin üretimleri, maliyeti düşük ve kolay bir üretim yöntemi olan eklemeli imalatla yapılmıştır. Zımparalı-boyalı ve eklemeli imalattan çıktığı haliyle ham-boyasız hazırlanan akış ölçerlerle (Şekil 6) performans deneyleri yapılmıştır. Tüm deneysel çalışmalar Tablo 2'de özetlenmiştir.

Deneysel çalışmalarda akış ölçerlerin yukarı akımında tam gelişmiş akış koşullarının (hız profilinin) elde edilmesi amacıyla 20D uzunluğunda bir PVC boru (D=152 mm) kullanılmıştır. Bu boruda, girişten itibaren 12.5D uzunluğundaki noktadan, Log-Tchebycheff [24] yöntemi kullanılarak yapılan hız ölçümleri ile akış ölçerlerden geçen havanın hacimsel debileri deneysel elde edilmiştir.

Akış ölçerlerin çıkış kesiti ile aşağı akımda emiş yapan fan arasındaki mesafenin debi ölçümüne etkisi, 8.3D (Deney-1) ve 3.7D (Deney-2) uzunluktaki iki farklı boru ile deneysel incelenmiştir. Zımparalı-boyalı akış lülesi ve orifisin çıkış kesiti ile aşağı akımda emiş yapan fan arasındaki mesafenin debi ölçümüne etkisinin incelendiği deneylerin sonuçları, Şekil 14'te verilmiştir.

Her iki akış ölçerde de daha kısa boru (Deney-2) kullanılmasının deneysel debi ölçümüne etkisinin olmadığı elde edilmiştir. Diğer bir deyişle, aşağı akımda emiş yapan fanın çıkış kesitine uzaklığının 8.3D'den 3.7D'ye düşürülmesi (%55 kısaltma), akış ölçerdeki deneysel basınç düşümünü etkilememiştir. Ayrıca daha kısa boru boyu kullanılmasıyla akış ölçerlerin aşağı akımında yaklaşık 5D'lik bir kısalma sağlanmış ve ölçme kanalındaki toplam basınç kaybı da azaltılmıştır. Bu nedenle akış ölçerlerin aşağı akımında 3.7D uzunluğunda kanal kullanmak avantajlıdır.

Bölüm 4'de bahsedildiği gibi deneysel çalışmalarda akış ölçerlerin yukarı akımında daha kısa mesafede tam gelişmiş akış koşullarının elde edilmesi amacıyla, akış düzleştirici tasarlanmıştır.



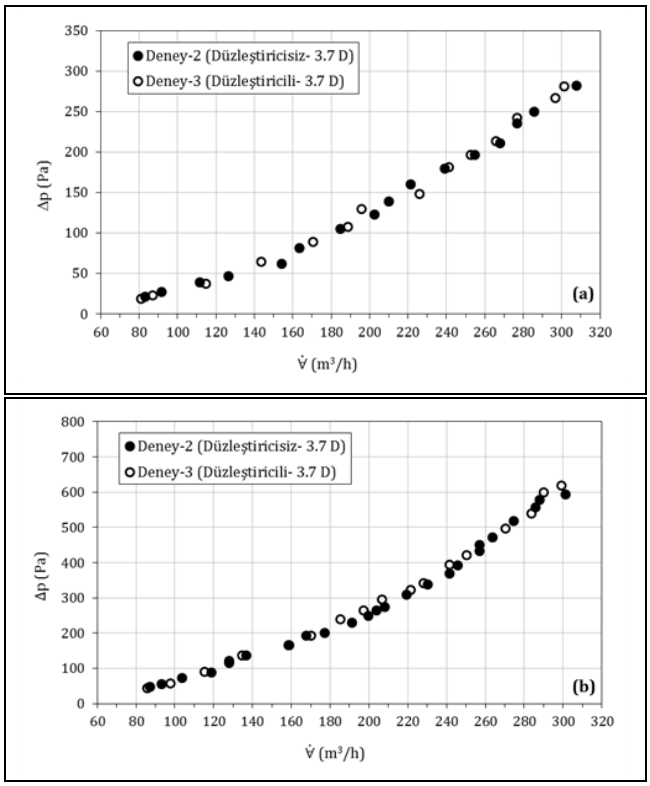
Şekil 14. Zımparalı-boyalı akış ölçerlerin çıkış kesiti ile aşağı akımda emiş yapan fan arasındaki mesafenin debi ölçümüne etkisi. (a): Akış lülesi ve (b): Orifis.

Figure 14. The effect of the distance between the outlet cross-section of the sanded-painted flow meters and the downstream suction fan on flow rate measurement. (a): Flow nozzle and (b): Orifice plate.

Akış düzleştiricinin etkinliğini ve akış ölçerlerin ölçüm performansına etkisini değerlendirmek için Deney-1 ve Deney-2'ye benzer borulama sistemi (akış düzleştiricinin yukarı akımında tam gelişmiş akış koşullarının oluşturulduğu 20D uzunluğundaki PVC boruda, girişten itibaren 12.5D mesafeden sıcak tel anemometresi ile hız ölçümlerinin yapıldığı) ile deneyler (Deney-3) de yapılmıştır. Akış düzleştiricinin aşağı akımına da (akış düzleştirici ile akış ölçerin arasına) 2.6D uzunluğunda bir boru parçası eklenmiştir.

Akış ölçerlerin aşağı akımında ise Deney-1 ve Deney-2'nin sonuçlarına göre daha avantajlı olan 3.7D uzunluğundaki kısa boru parçası kullanılmıştır. Tasarlanan akış düzleştiricinin etkinliği ve akış ölçerlerin performanslarına etkisi zımparalı-boyalı akış lülesi ve orifis için Şekil 15'te verilmiştir.

Tasarlanan akış düzleştiricinin, Şekil 15'te verilen Deney-3'ün sonuçlarına göre, akış ölçerlerin debi ölçüm performansını etkilemediği elde edilmiştir. Diğer bir deyişle akış ölçerlerin yukarı akımında akış düzleştirici kullanılarak önemli ölçüde yer ve malzeme tasarrufu sağlanırken, tam gelişmiş akış koşullarının daha kısa mesafede elde edilebileceği anlaşılmıştır. Ancak akış düzleştirici kullanılması, ölçme kanalındaki toplam basınç düşümünü bir miktar (~10-100 Pa) artırmıştır. Ayrıca Deney-3'te akış düzleştiriciden kaynaklanan basınç düşümleri de (yukarı akımda D kadar önce aşağı akımda D/2 kadar sonra) ölçülerek Şekil 16'da verilmiştir.

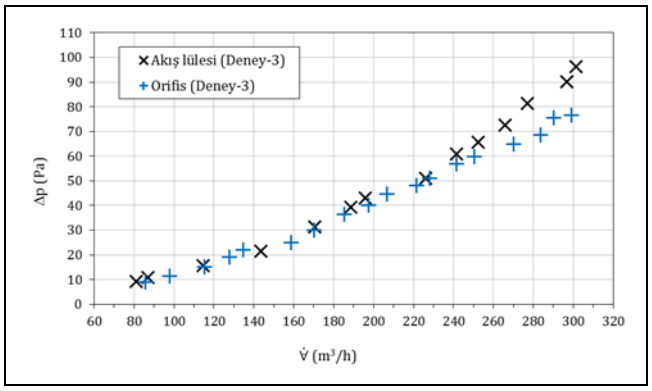


Şekil 15. Zımparalı-boyalı akış ölçerlerde akış düzleştiricinin etkinliğinin karşılaştırılması. (a): Akış lülesi ve (b): Orifis.

Figure 15. Comparison of the effectiveness of the flow straightener in the sanded-painted flow meters. (a): Flow nozzle and (b): Orifice plate.

Deney-1, Deney-2 ve Deney-3'e göre elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde, hem akış lülesinin hem de orifisin aşağı ve yukarı akımında boru boyları önemli ölçüde kısaltılmıştır. Tüm bu kontrol ve ölçümlerden sonra, Deney-3'de yapılan ölçümler dışında, akış ölçerlerin ölçüm performansı ve doğruluğu, deneysel hız ölçümleri olmaksızın yapılan deneylerle tekrar kontrol edilmiştir (Deney-4). Deney-3'ten farklı olarak Deney-4'te, akış düzleştiricinin yukarı akımında 3.7D uzunluğunda daha kısa bir kanal kullanılarak akış ölçerlerdeki debiler, elde edilmiştir. Deney-4'ün sonuçları, hem akış lülesi hem de orifis ile yapılan deneylerle karşılaştırıldığında, deneysel debi ölçümlerinde önemli bir fark oluşmadığı görülmüştür. Başka bir ifadeyle; yukarı akımda boru boyu önemli ölçüde kısalmıştır. Deney-4'ün sonuçları ve kanal girişi ile akış düzleştiricinin aşağı akımı arasındaki basınç düşümü sonuçları Şekil 17 ve 18'de verilmiştir. Elde edilen bu sonuçlar kullanılarak benzer deneyler, ham-boyasız akış lülesi ve orifisin aşağı akımında kısa boru ile (Deney-2 ve 3.7D) de yapılmıştır.

Zımparalı-boyalı ve ham-boyasız akış ölçerlerin deneysel sonuçları Şekil 19'da verilmiştir. Deney-2 için zımparalı-boyalı ve ham-boyasız akış ölçerlerin deneysel sonuçları karşılaştırıldığında, aralarında çok önemli bir farkın oluşmadığı elde edilmiştir. Deney-2'de zımparalı-boyalı ve ham-boyasız akış ölçerlerin deneysel sonuçları arasında çok önemli bir fark oluşmadığından, Deney-1, Deney-3 ve Deney-4 sadece zımparalı-boyalı akış ölçerler ile yapılmıştır.

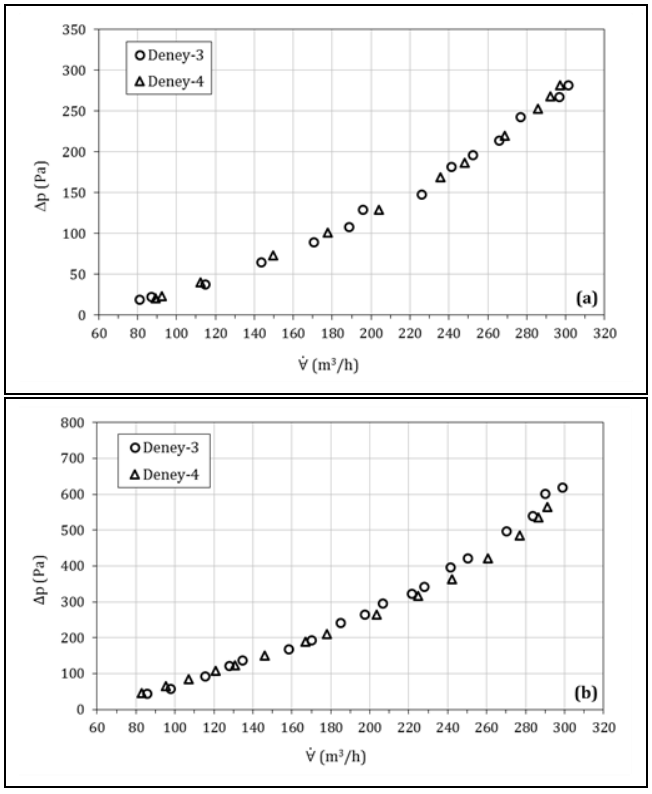


Şekil 16. Deney-3'te akış düzleştiricinin yukarı akımı ile aşağı akımı arasındaki basınç düşümünün debiye bağlı değişimleri.

Figure 16. Flow rate-dependent changes in pressure drop between the upstream and downstream of the flow straightener in Experiment-3.

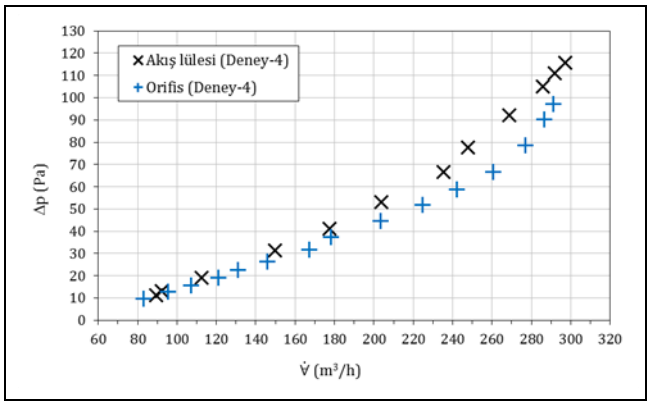
Şekil 20'de her iki akış ölçer için deneysel sonuçlar (Deney-2 ve Deney-3), tasarım denklemleri ve sayısal çözüm sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Akış lülesinde; tasarım denklemleri ve deneysel sonuçlar arasındaki fark ortalama %8 (Denklem-2) ve ortalama %5.2 (Denklem-4) iken, sayısal ve deneysel sonuçlar arasındaki fark ortalama %7.3'dir.

Bu farklar orifiste; tasarım denklemi ve deneysel sonuçlar arasında ortalama %14.3 (Denklem-6), sayısal ve deneysel sonuçlar arasında ortalama %14.8'dir.



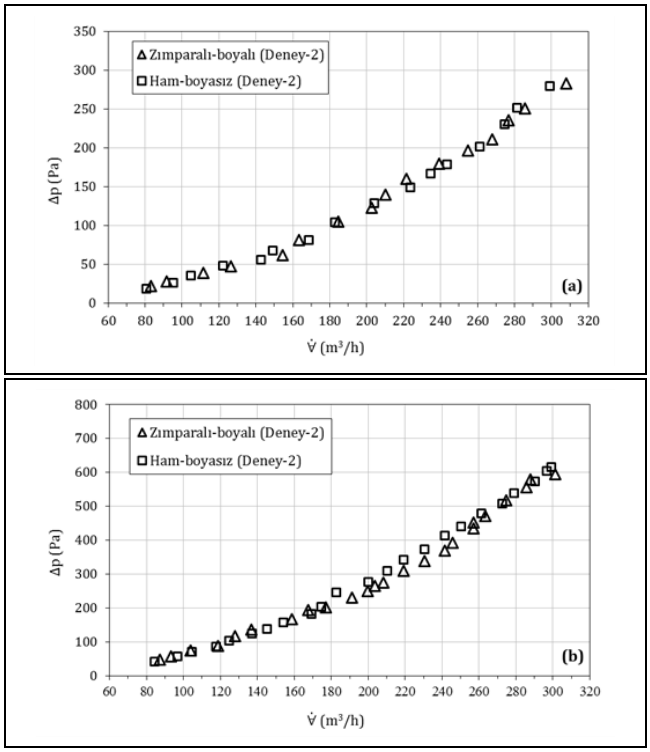
Şekil 17. Zımparalı-boyalı akış ölçerler için Deney-3 ve Deney-4'ün basınç düşümünün hacimsel debiye bağlı değişimleri. (a) Akış lülesi ve (b) Orifis.

Figure 17. Volume flow rate-dependent changes in pressure drop in Experiment-3 and Experiment-4 for the sanded-painted flow meters. (a) Flow nozzle and (b) Orifice plate.



Şekil 18. Deney-4'te atmosfer basıncı ile akış düzleştiricinin aşağı akımı arasındaki basınç düşümünün debiye bağlı değişimleri.

Figure 18. Flow rate-related changes in pressure drop between atmospheric pressure and the downstream of the flow straightener in Experiment-4.

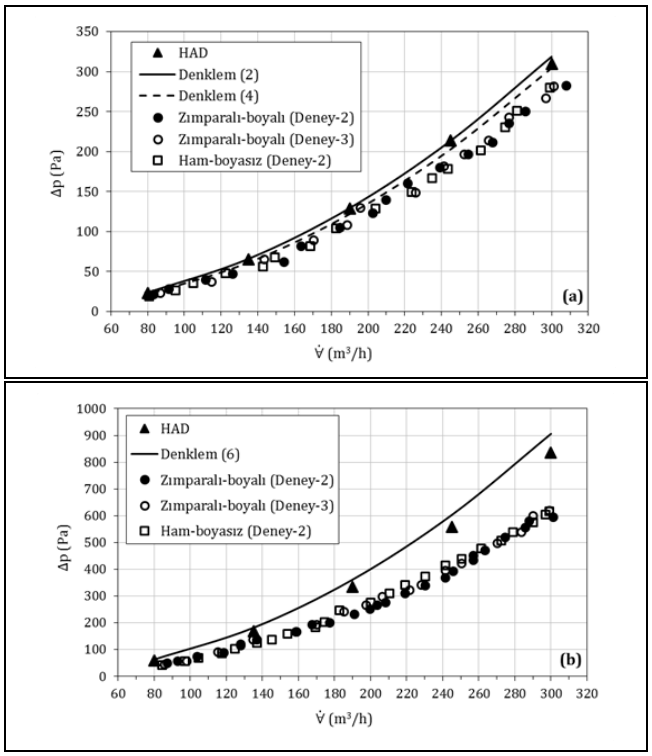


Şekil 19. Zımparalı-boyalı ve ham-boyasız akış ölçerlerin debi ölçümüne etkisi. (a): Akış lülesi ve (b): Orifis.

Figure 19. Effect of the sanded-painted and the raw-unpainted flow meters on flow rate measurement. (a): Flow nozzle and (b): Orifice plate.

Ayrıca deneysel çalışma için hazırlanan zımparalı-boyalı ve ham-boyasız akış ölçerler arasında belirgin bir fark oluşmamıştır. Bu nedenle, zımparalı-boyalı akış ölçerler yerine ham-boyasız akış ölçerlerin tercih edilebileceği anlaşılmıştır. Diğer bir ifadeyle, hava debisi ölçümünde, eklemeli imalat ile üretilen işlem görmemiş ham akış ölçerleri kullanmak, daha düşük maliyetli ve pratik bir çözümdür. Dolayısıyla, literatürdeki teorik hesaplama yöntemleri ile akış ölçerler boyutlandırılıp, tasarımların doğruluğu sayısal çözümlerle

kontrol edildikten sonra, üretimde eklemeli imalat teknolojisinin kullanılması avantajlıdır.



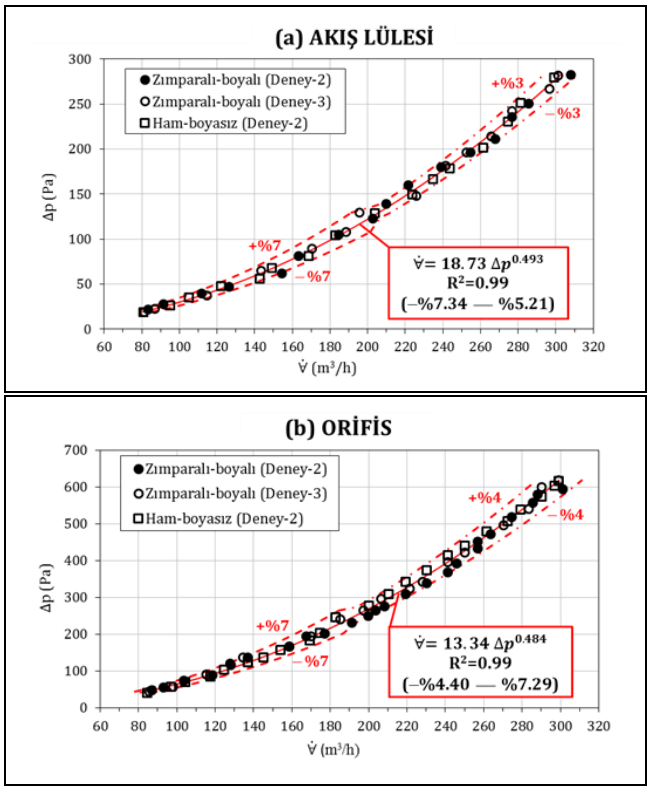
Şekil 20. Deneysel, teorik ve sayısal sonuçların karşılaştırılması. (a): Akış lülesi ve (b): Orifis.

Figure 20. Comparison of experimental, theoretical, and numerical results. (a): Flow nozzle and (b): Orifice plate.

Şekil 21'de zımparalı-boyalı (Deney-2 ve Deney-3) ve ham-boyasız (Deney-2) akış ölçerlerin, tüm deneysel ölçüm sonuçları kullanılarak, en küçük kareler yöntemiyle türetilen basınç düşümüne bağlı hacimsel debi denklemleri verilmiştir. Önerilen denklemler; akış lülesi ve orifiste 200 m³/h debiye kadar ±%7 farkla uyumlu iken, 200 m³/h debinin üzerinde bu farklar akış lülesi ve orifiste sırasıyla, ±%3 ve ±%4'tür.

7 Değerlendirme

Bu çalışmada, 80-300 m³/h aralığındaki hava debilerinin ölçülmesi ve kontrolü amacıyla, literatürdeki hesaplama yöntemleri ile akış lülesi ve orifis tasarlanmıştır. Tasarımlar, sayısal çözümlerle doğrulanmıştır. Bu kontrol ve doğrulamalardan sonra, akış ölçerler eklemeli imalatla üretilmiştir. Zımparalı-boyalı ve ham-boyasız akış lülesi ve orifis prototipleri deneyler için hazırlanmıştır. Ayrıca bu çalışmada, akış ölçerin yukarı akımında, kanal uzunluğunu azaltmak amacıyla, bozulmuş hız profillerinin daha kısa mesafede geliştirilmesinde etkili, boru demetli akış düzleştirici tasarlanmıştır. Akış ölçerlerin ölçüm performansları, hazırlanan deney düzeneği ile 4 farklı durum için incelenmiştir. Bu deneylerde, akış ölçerler ile aşağı akımda emiş yapan fan arasındaki mesafenin debi ölçümüne etkisi ve akış ölçerlerin yukarı akımında akış düzleştirici kullanılmasının debi ölçümlerindeki etkinliği de deneysel incelenmiştir. Tasarlanıp, üretimi yapılan ve deneysel performansları incelenen akış ölçerler ve akış düzleştirici için elde edilen sonuçlar şu şekildedir:



Şekil 21. Zımparalı-boyalı ve ham boyasız akış ölçerlerin, deneysel sonuçlarıyla türetilen basınç düşümüne bağlı hacimsel debi denklemleri. (a): Akış lülesi ve (b): Orifis.

Figure 21. Pressure drop-dependent volume flow rate equations derived from the experimental results of the sanded-painted and raw-unpainted flow meter. (a): Flow nozzle and (b): Orifice plate.

- Sayısal çözümlerle önerilen teorik tasarım yöntemleri arasındaki fark; akış lülesi için ortalama %1.6 (Denklem-2) iken, orifis için ortalama %7.8 (Denklem-6)'dir,
- Akış ölçerlerin çıkış kesiti ile aşağı akımda emiş yapan fan arasındaki mesafenin %55 kısaltılması (8.3D'den 3.7D'ye düşürülmesi), deneysel debi ölçümünü etkilememiş ve toplam basınç kaybını azaltmıştır,
- Akış lülesinde; tasarım denklemi ve deneysel sonuçlar arasındaki fark ortalama %5.2 (Denklem-4) iken, sayısal ve deneysel sonuçlar arasında fark ortalama %7.3'dir. Orifiste; tasarım denklemi ve deneysel sonuçlar arasında fark ortalama %14.3 iken, sayısal ve deneysel sonuçlar arasındaki ortalama fark %14.8'dir,
- Akış düzleştirici ile tam gelişmiş akış koşulları daha kısa mesafede elde edilmiş, akış düzleştirici akış ölçerlerin debi ölçüm performansını etkilememiştir. Fakat akış düzleştirici kullanılması, toplam basınç düşümünü (~10-100 Pa) arttırmıştır,
- Zımparalı-boyalı ve ham-boyasız akış ölçerlerin deneysel sonuçları arasında çok önemli bir fark oluşmamıştır. Ham-boyasız akış ölçerleri kullanmak, daha düşük maliyetli ve pratiktir,
- Hava debisinin ölçümünde akış lülesinin kullanılması, daha az kalıcı basınç kaybı (2.6 kat) ve enerji tüketimi

sağlamıştır. Ancak orifisin üretimi basit ve maliyeti akış lülesine göre daha düşüktür.

Deneysel çalışmalarda, akış ölçümü donanım maliyetinin düşük olması ve daha basit yardımcı ekipmanlarla ölçüm yapılması mümkün olacağından, akış lülelerinin kullanılması avantajlıdır. Ancak fanlarda enerji tasarrufu sağlanması amacıyla, sürekli debi ölçümünün yapıldığı durumlarda, engelli akış ölçerden kaynaklanacak kayıp hidrolik gücün de hesaplanması gereklidir.

Debi ölçüm yöntemi seçiminde, basitlik ve istenen ölçüm doğruluğu dikkate alınmalıdır. Ancak, doğrudan sonuç veren basit bir yöntem arayışı, uygulamada bazen aşırı enerji kaybı gibi istenmeyen sonuçlara neden olabilir.

8 Conclusions

The aim of this study was to design a flow nozzle and an orifice plate (using the calculation methods in the literature) to measure and control the air flow rates in the range of 80-300 m^3/h. Numerical solutions were used to verify the designs, and then flow meters were produced using the additive manufacturing method. Sanded-painted and raw-unpainted flow nozzle and orifice plate prototypes were prepared for experiments. Moreover, a tube bundle flow straightener was designed to reduce the length of the channel in the upstream of the flow meter and to develop the distorted velocity profiles at a shorter distance. An experimental setup with four different cases was used to investigate the measurement performance of the flow meters. Experiments were performed to determine the effect of the distance between the flow meters and downstream suction fan on flow rate measurement and also the effectiveness of using a flow straightener on flow rate measurements in the upstream of the flow meters. The flow meters and the flow straightener were designed and manufactured, and their performance was investigated experimentally. The results are as follows:

- The difference between the theoretical design (methods proposed in the literature) and numerical solutions is an average of 1.6% and 7.8% for the flow nozzle (Equation-2) and orifice plate (Equation-6), respectively,
- The reduction in the distance between the outlet cross-section of the flow meters and the downstream suction fan by 55% (from 8.3D to 3.7D) did not affect the experimental flow rate but resulted in a decrease in the total pressure loss,
- In the flow nozzle, the average difference between the design equation and experimental results is 5.2% (Equation-4), while that between the numerical and experimental results is 7.3%. In the orifice plate, the average difference between the design equation and experimental results is 14.3%, whereas that between the numerical and experimental results is 14.8%,
- The flow straightener yielded fully developed flow conditions at a shorter distance without affecting the flow rate measurement performance. However, the flow straightener increased the total pressure drop (~10-100 Pa),
- There was no significant difference between the experimental results of the sanded-painted and the raw-unpainted flow meters, however, the latter are more cost-effective and practical,
- Using a flow nozzle to measure air flow rate resulted in less permanent pressure loss (2.6 times) and less energy consumption than using an orifice plate. However, the latter is easier and cheaper to manufacture than the former.

It is advantageous to use flow nozzles in experiments because they have low equipment costs and allow for the use of simpler auxiliary equipment for flow rate measurements. However, losses in hydraulic power caused by the obstruction flow meter should also be calculated in cases where the flow rate is continuously measured to save energy in fans.

A flow rate measurement method should be simple and provide measurement accuracy. However, simple methods that yield the expected results directly may sometimes lead to adverse consequences in practice, such as excessive energy loss.

9 Semboller ve indisler

A	- alan (m^2)
C	- boşaltma katsayısı (-)
C_d	- debi katsayısı (-)
D	- giriş kesit çapı ya da kanal iç çapı (m)
d	- çıkış kesit çapı (m)
E	- kalınlık (m)
e	- orifis kalınlığı (m)
HAD	- Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
L_x	- girişten uzaklık (m)
M	- hız faktörü (-)
Re	- Reynolds sayısı, $\rho uD/\mu$
u	- hız (m/s)
β	- çap oranı (d/D)
ρ	- yoğunluk (kg/m^3)
θ	- açı (°)
Δp	- basınç düşümü (Pa)
$\dot{V}$	- hacimsel debi (m^3/h)
Alt indisler	
1	- giriş
2	- çıkış

10 Teşekkür

Bu çalışma, Sakarya Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri komisyonu tarafından (kısmen) desteklenmiştir. Proje Numarası: 2018-3-12-115.

Bu çalışma, TÜBİTAK 2209-A Üniversite Öğrencileri Araştırma Projeleri Destekleme Programı kapsamında (kısmen) desteklenmiştir. Başvuru numarası: 1919B011602409.

Akış ölçerlerin eklemeli imalatla üretimindeki desteklerinden dolayı, Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü öğretim üyesi Dr. Öğr. Üyesi Sedat İRİÇ'e teşekkür ederiz.

11 Yazar katkı beyanı

Sunulan çalışmada; Hasan KÜÇÜK, fikrin oluşturulması ve literatür taraması, ön tasarım hesaplarının yapılması ve tasarım boyutlarının belirlenmesi, deney düzeneğinin tasarımı ve kurulması, deneylerin yapılması, sayısal-deneysel sonuçların kontrolü ve değerlendirilmesi, yazım denetimi ve içeriğin kontrolü; Murat ÜNVERDİ, fikrin geliştirilmesi, literatür taraması, ön tasarım hesaplarının ve tasarım boyutlarının kontrolü, sayısal modellerin oluşturulması ve

çözümlerin yapılması, deney düzeneğinin kurulması ve deneylerin yapılması, sayısal-deneysel sonuçlarının derlenmesi ve değerlendirilmesi, makalenin yazımı ve içeriğin oluşturulması aşamalarında katkı sunmuşlardır. Ayrıca Makine Mühendisliği Bölümü lisans öğrencisi Emin ÇOBAN, tasarım ve bitirme dersleri kapsamında, Hasan KÜÇÜK'ün danışmanlığında ve Murat ÜNVERDİ ile birlikte, sayısal modellerin oluşturulması ve çözümlerin yapılmasında görev almıştır.

12 Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur.

Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

13 Kaynaklar

[1] Merzkirch W. *Fluid Mechanics of Flow Metering*. Berlin Heidelberg, Germany, Springer -Verlag, 2005.

[2] Basil V. R. Greatrex PTY LTD. "News". http://www.bvrg.com.au/News/Nov2010/Why-flow-measurement-important.pdf (17.04.2020).

[3] LaNasa PJ, Upp EL. *Fluid Flow Measurement: A Practical Guide to Accurate Flow Measurement*. 2nd ed. United States of America, Butterworth-Heinemann, 2014.

[4] Economides MJ, Wood DA. "The state of natural gas". *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 1(1-2), 1-13, 2009.

[5] Yorucu V, Bahramian P. "Price modelling of natural gas for the EU-12 countries: Evidence from panel cointegration". *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 24, 464-472, 2015.

[6] Crabtree MA. Industrial Flow Measurement. MSc Thesis, University of Huddersfield, England, 2009.

[7] Milli Eğitim Bakanlığı. *Endüstriyel Otomasyon Teknolojileri: Akış Ölçümü*. Ankara, MEB, 2010.

[8] Measurement Systems – NPTEL. "Module 2, Measurement Systems, Lesson 7: Flow Measurement". https://nptel.ac.in/content/storage2/courses/108105063/pdf/L-07(SS)(IA&C)%20((EE)NPTEL).pdf, (15.04.2020).

[9] Ower E, Pankhurst RC. *The Measurement of Air Flow*. 5th ed. Germany, Pergamon Press, 1977.

[10] Salazar L, Tolisano J, Crane K, Wheeler L, Kuile M, Radtke D. "Irrigation reference manual". Information Collection and Exchange, Agro Engineering, Inc., Colorado, USA, Training Manual, T0077, 1994.

[11] Dayev ZhA. "Application of artificial neural networks instead of the orifice plate discharge coefficient". *Flow Measurement and Instrumentation*, 71, 101674, 2020.

[12] Clark WJ. *Flow Measurement By Square-edged Orifice Plate Using Corner Tappings*. 1st ed. London, England, Pergamon Press Ltd. 1965.

[13] Bird OJ, Chivers PJ. *Newnes Engineering and Physical Science Pocket Book*. 1st ed. Oxford, England, Butterworth-Heinemann Ltd., 1993.

[14] Basu S, Debnath AK. *Power Plant Instrumentation and Control Handbook A Guide to Thermal Power Plants*. 2nd ed. London, Academic Press, 2015.

[15] Holman JP. *Experimental Methods for Engineers*. 8th ed. New York, USA, McGraw-Hill, 2012.

[16] Baker RC. *Flow Measurement Handbook: Industrial Designs, Operating Principles, Performance, and Applications*. New York, USA, Cambridge University Press, 2016.

[17] Miller RW. *Flow Measurement Engineering Handbook*. 3rd ed. New York, USA, McGraw-Hill, 1996.

[18] Unverdi M, Kucuk H. "Design and performance analysis of obstruction flow measurement devices for low air flow rates using CFD analysis". *Machines. Technologies. Materials, International Scientific Journal*, 4, 143-148, 2018.

[19] Çengel Y. *Introduction to Thermodynamics and Heat Transfer*. 2nd ed. USA, McGraw-Hill, 2007.

[20] Lam CKG, Bremhorst K. "A Modified Form of the k-ε Model for Predicting Wall Turbulence". *ASME Journal of Fluids Engineering*, 103(3), 456-460, 1981.

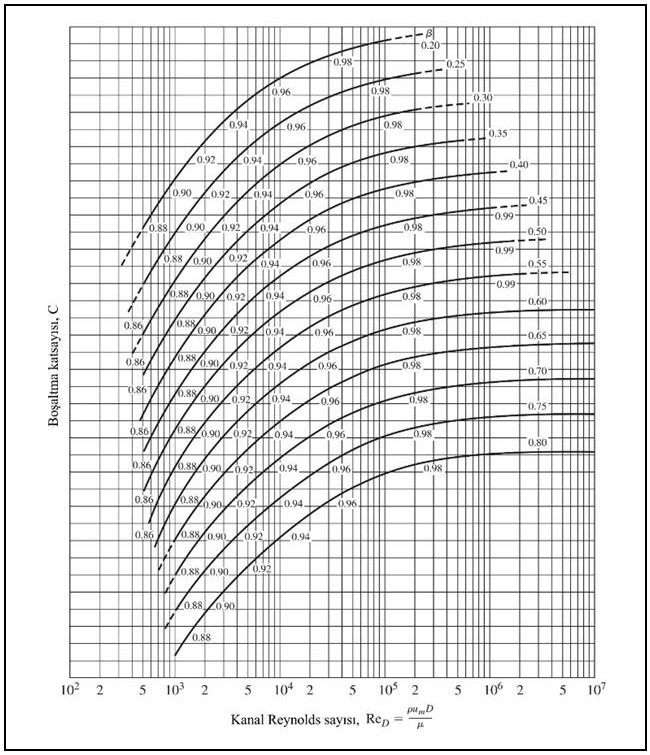
[21] An American National Standard. ASME MFC-3M-2004, Measurement of Fluid Flow in Pipes Using Orifice, Nozzle, and Venturi, New York, 2005.

[22] Learning Instrumentation And Control Engineering. "How a Flow Conditioner Works - Flow Conditioning Basics". https://www.instrumentationtoolbox.com/2016/01/how-flow-conditioner-works-flow.html (16.04.2020).

[23] Thulukkanam K. *Heat Exchanger Design Handbook*. 2nd ed. New York, USA, CRC Press, 2013.

[24] American Society of Heating Refrigerating and Air Conditioning Engineers, *ASHRAE Handbook Fundamentals*. USA, 2001.

Ek A



Şekil 1'deki ASME uzun yarıçaplı akış lüleleri için boşaltma katsayıları [15].

Discharge coefficients for ASME long-radius nozzles shown in Figure 1 [15].