

ATIMLI GİRİŞ AKIŞI ÜRETİMİ VE İLGİLİ BÜYÜKLÜKLERİN DENEYSEL İNCELENMESİ

Cemalettin AYGÜN
Orhan AYDIN*

KARADENİZ TEKNİKÜNİVERSİTESİ Makine Mühendisliği Bölümü
61080 TRABZON
Tel: 0462 377 30 00
E-Mail*: oyaydin@ktu.edu.tr

ÖZET

Atımlı akış, ana bileşen ve zamanla periyodik olarak değişen bileşenden oluşan özel bir zaman bağımlı akış türüdür. Mühendisliğin bir çok alanında, uzay ve havacılıkta, modern güç üretim sistemlerinde, metalürjide, kimyasal ve gıda teknolojisinde atımlı akışlar önem kazanmıştır. Biyolojik akışlar, içten yanmalı motorlar, pistonlu motorlar, elektronik soğutucular, bazı özel ısı değiştiricileri ve atık su boruları gibi uygulama alanlarında da atımlı akışla sıklıkla karşılaşmaktadır. Bu çalışmada, öncelikle literatürde var olan atımlı akış çalışmalarında kullanılan atımlı akış üreteçleri tanıtılmıştır. Daha sonra, geliştirilen bir piston silindir atımlı akış üreteci tanıtılmıştır. Bir boru akışı için atımlı akış durumunda hangi ölçümlerin nasıl yapıldığı ayrıntılı bir şekilde verilmiştir. Elde edilen ölçüm sonuçları literatürle iyi bir uyum içinde olduğu görülmüştür..

Anahtar kelimeler: Atımlı akış, Salımlı akış, İç akış, Frekans, Genlik, Veri okuma sistemi, Kalibrasyon.

1. Giriş

Doğada ve uygulamada karşımıza çıkan akış ve ısı transferi olayları çoğunlukla zaman bağımlıdır. Ancak, genelde incelemeyi basitleştirmek ve kolaylaştırmak amacıyla bu tür uygulamaların çoğu daimi akış durumu için incelenir. Bu da tasarım ve işletme hatalarına yol açabilir.

Atımlı akış, ana bileşen ve zamanla periyodik olarak değişen bileşenden oluşan özel bir zaman bağımlı akış türüdür. Mühendisliğin bir çok alanında, uzay ve havacılıkta, modern güç üretim sistemlerinde, metalürjide, kimyasal ve gıda teknolojisinde atımlı akışlar önem kazanmıştır. Biyolojik akışlar, içten yanmalı motorlar, pistonlu motorlar, elektronik soğutucular, bazı özel ısı değiştiricileri ve atık su boruları gibi uygulama alanlarında da atımlı akışla sıklıkla karşılaşmaktadır. Atımlı ya da salımlı akışın oluşturulmasında temel olarak üç yöntem kullanılabilir:

- **Basınç kaynaklı akış (*Pressure-driven flow*):** Boru girişinde veya çıkışında periyodik salımlı basınç değişimleri ile oluşturulmaktadır.
- **Piston kaynaklı akış (*Piston-driven flow*):** Bir piston aracılığı ile akışkanın ileri ve geri hareket ettirilmesi ile oluşturulmaktadır.
- **Sınır kaynaklı akış (*Boundary-driven flow*):** Cidarın ileri geri hareket ettirilmesi ile sağlanır. Cidarların hareket etmesiyle akışkanın meydana gelen kayma salınım hareketine sebep olacaktır.

Bu çalışmada, bir doktora tezi kapsamında atımlı akışın akış geçişi üzerindeki etkisinin incelenmesi amacıyla tasarlanan atımlı akış üreteci tanıtılmıştır. Ayrıca, bir boru akışı için atımlı akış durumunda hangi ölçümlerin nasıl yapıldığı ayrıntılı bir şekilde verilmiştir.

Atımlı akış çalışmalarında en önemli adımlardan biri atımlı akış mekanizmasının oluşturulmasıdır. Yapılan çalışmalarda kullanılmış olan atımlı akış üreteçleri ile ilgili kapsamlı bilgi, Tablo 1.1'de sunulmuştur.

Tablo 1. Atımlı akışın oluşturulmasında literatürde kullanılan yöntemler

Yazar	Yıl	Yöntem
Miller ve Fejer	1964	Akışkan akışını kesip açabilen bir kelebek valf kullanılmıştır.
Atabek ve ark.	1964	Krank-silindir mekanizması yardımı ile salınım bileşeni üretilmiştir. Sistem kısıtlı frekans ve genlik aralığında çalışmakta ve akışkan olarak gaz yağı kullanılmaktadır.
Brown ve ark.	1969	Sıvı ortamda hava titreşimi kullanarak salınım oluşturulmuştur.
Baird ve ark.	1971	Su ortamında hava titreşimi kullanarak salınım oluşturulmuştur.
Keil ve Baird	1971	Akışkan olarak su kullanılan deney sisteminde, mayno (helisel mil) pompası yardımıyla atımlı giriş akışı sağlanmıştır.
Niida ve ark.	1974	Sinüzoidal giriş profilini oluşturabilmek için körüklü pompa kullanmışlardır.
Ohmi ve Iguchi	1976	Test bölgesinin sonuna yerleştirilen pistonlu bir salınım mekanizması yardımı ile atımlı akış oluşturulmuştur.
Karamercan ve Gainer	1979	Akışkan olarak su kullanılan, vites kutulu bir elektrik motoru ile tahrik edilen pistonlu pompa kullanılarak atımlı akış meydana getirilmiştir.
Kirmse	1979	Akışkana salınım hareketi piston-silindir mekanizması ile sağlamıştır.
Ohmi ve Iguchi	1980	Akışkan hareketini aralıklı olarak durduran servo valf kullanılmıştır.
Fallen	1982	Atımlı akış, değişken hızlı kavite pompası ile oluşturulan daimi akış üzerine sinüzoidal tahrikli piston ile salınım eklenerek üretilmiştir.
Tu ve Ramaprian	1983	Test bölgesine, bir tank vasıtası ile sabit debi sağlanmış ve bu test bölgesi çıkışına bir DC motor yardımı ile çevrilen kola bağlı dişli mekanizma ile farklı frekans ve genlikler oluşturulmuştur.
Sarpkaya	1986	Bir U-borusu ve piston silindir mekanizması kullanılarak salınımlı sinüzoidal bir akış elde edilmiştir.
Eckmann ve Grotberg	1991	İskoç mekanizması (Scotch-yoke) kullanılmıştır.
Lee ve Budwig	1991	Rüzgar tüneline küresel bir fan motoru kontrolörü kullanarak sabit hız azaltma ve artırma yöntemi ile düşük frekanslı akış oluşturulmuştur.
Mackley ve Stonestreet	1995	Dönel bir disk yardımı ile tahrik edilen salınımlı bir piston mekanizması tasarlanmış ve sinüzoidal giriş profili elde etmişlerdir.
Sailor ve Patil	1996	Solenoid bir valf kullanılarak atımlı akış oluşturmuşlardır. Zamanlayıcı bir devre kullanarak 10Hz frekansa kadar; zamanlayıcı devre yerine, bilgisayar kontrollü bir röle kullanarak da 30Hz frekansa kadar ulaşmayı başarmışlardır.
Zhao ve Cheng	1996	Krank-şaft ve İskoç mekanizmanın birleşiminden oluşan bir salınım sistemi kullanmışlardır.
Hwang ve ark.	1998	Bir sinyal üretici vasıtası ile (sinüzoidal dalga profili) hoparlör kullanılarak atımlı akış oluşturulmuştur.
Lodahl ve ark.	1998	Elektronik olarak kontrol edilen pnömatik sistem kullanarak atımlı akışın salınımlı bileşeni oluşturulmuştur.

Yazar	Yıl	Yöntem
Peacock ve ark.	1998	Atımlı akışın salınımlı bileşeni Scotch-yoke mekanizması vasıtası ile oluşturulmuştur.
Aninola ve ark.	1999	Bilgisayar kontrollü bir selenoid valf kullanarak atımlı akış elde edilmiştir.
Higashiyama ve Iwamoto	1999	Sıkıştırılmış hava dönel valften geçirilerek atımlı akış oluşturulmuştur.
Paek ve ark.	1999	Rüzgâr tüneline bir piston-silindir mekanizması yerleştirilerek atımlı akış oluşturulmuştur.
Sailor ve ark.	1999	Mekanik bir valf kullanılmıştır. Bu valfin mili AC motor vasıtası ile kayış kasnak mekanizmasıyla tahrik edilmiştir.
Yamanaka ve ark.	1999, 2002	Sabit hızlı elektrik motoruna bağlı, krank-dişli sistemi tarafından tahrik edilen bir salınımlı piston yardımı ile salınımlı akış üretilmiştir.
Barker ve Williams	2000	Elektrik motoru ile tahrik edilen iki silindirden oluşan dönel bir pompa mekanizması ile salınım oluşturulmaktadır. Genlik ise biri sisteme bağlanmış diğeri atmosfere açık olan iki adet valf ile kontrol edilmektedir.
Carlander ve Delsing	2000	Döner bir valf kullanarak atımlı akış oluşturulmuştur.
Kearney ve ark.	2001	Bir rüzgâr tüneline içerisine yerleştirilmiş olan dört adet dönel pervane, bir DC motoruna bağlanarak tünel girişindeki akışı değiştirerek (tam açılma ve kapanma arasında) atımlı akış oluşturulmuştur.
Çarpınlioğlu ve Gündoğdu	2001	Test bölgesinin sonuna eklenmiş olan piston-silindir düzeneği kullanılmıştır.
Habib ve ark.	2002	Küresel bir valf, kayış kasnak mekanizması ile farklı hızlarda döndürülerek atımlı akış oluşturulmuştur.
Balaras ve ark.	2003	Genlik kontrollü programlanabilir çubuklu döner makara(<i>spool</i>) valf kullanılmıştır.
Cheesewright ve ark.	2004	Pistonlu bir atımlı akış üretici kullanılmıştır. Üreteç servo-motor vasıtası ile çalıştırılan Scotch-yoke mekanizmasını içermektedir.
Danling ve ark.	2004	Özel olarak su için tasarlanmış, giriş ve çıkış lülelerinden oluşan kendinden uyarımlı salınım mekanizması (<i>oscillator</i>) kullanılmıştır.
Morris ve Foster	2004	Mikro kanalda atımlı akış, mikro pompa ve piezoelektrik aktüatör üzerine monte edilmiş bir polikarbonat membran yardımıyla üretilmiştir.
Arslan ve ark.	2005	Bilgisayar kontrollü bir vana ve pompadan oluşan salınımlı akış ünitesi kullanılmıştır.
Moon ve ark.	2005	Fonksiyon üretici, sinyal yükseltici ve hoparlörden oluşan sistem yardımı ile atımlı akış oluşturulmuştur.
Ünsal ve ark.	2005	Özel bir debi kontrolör sayesinde atımlı akış oluşturulmuştur.
Li ve ark.	2007	Biri tahrik mili vasıtası ile dönebilen diğeri sabit iki pervaneye sahip olan bir atımlı akış sistemi kullanılmıştır.
Elshafei ve ark.	2008	Test bölgesinin çıkış kısmına yerleştirilmiş kelebek bir valf, kayış kasnak mekanizması ile farklı hızlarda döndürülerek çeşitli atım frekansı elde etmişlerdir.
Fan ve ark.	2008	Salınımlı akış tüpü içeren özel bir sistem kullanılmıştır. Bu sistem bir motor, bir volan, bir biyel mekanizması ve iki metalik körükten oluşmaktadır.
Zulkifli ve ark.	2008, 2009	Kontrol ünitesine bağlı bir elektrik motor yardımı ile eksen etrafında dönebilen bir silindirik valf ile atımlı akış üretilmiştir.

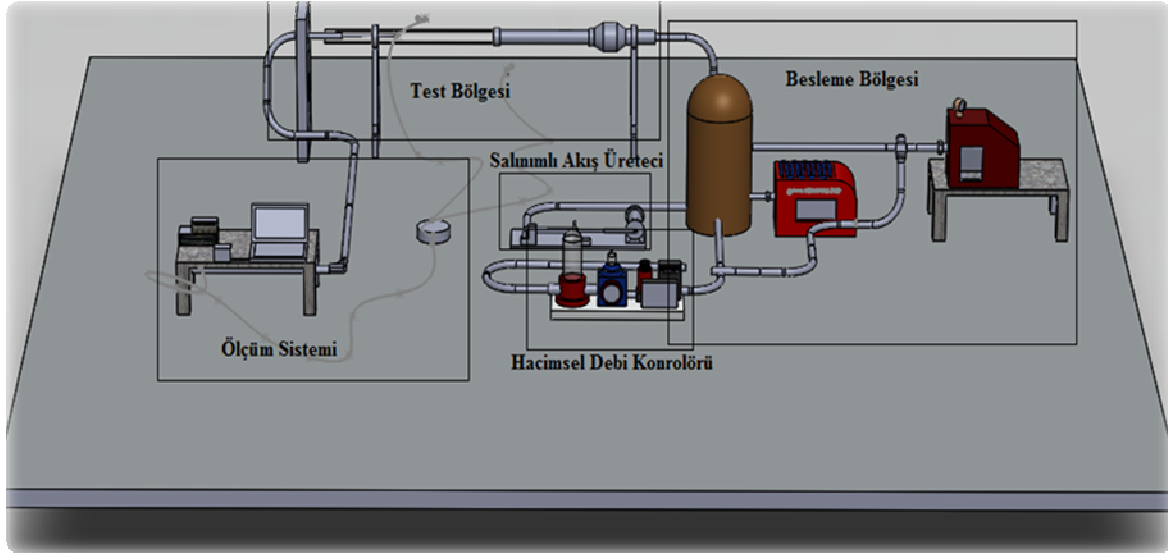
Zohir 2011 Test bölgesinin sonuna eklenmiş olan vites kutulu pistonlu bir sistem kullanılmıştır. Sistem AC-motor vasıtası ile çalıştırılan Scotch-yoke mekanizması içermektedir.
2012

2. Deneysel İnceleme

Bu çalışmada atımlı akış bir piston-silindir sistemi ile üretilmiştir. Sistem ile ilgili ayrıntılar Aygün (2013) tarafından yapılan doktora tezinde verilmiştir. Üniform ve sinüzoidal hız profili girişine sahip bir boru akışı, hidrodinamik ve ısı açıdan deneysel olarak incelenmiştir. Hidrodinamik deneylerde 26 mm iç çapında ve 4000 mm boyunda pleksi glass boru ve ısı transferi çalışmalarında ise 16 mm iç çapa sahip ve 2000 mm boyunda bakır boru kullanılmıştır. Deneyler laminar akış rejiminde ($Re=1000$) gerçekleştirilmiş ve akışkan olarak şartlandırılmış hava kullanılmıştır. Ölçümler, basınç farkı ve hacimsel debi ölçümlerini kapsamakta olup, hem sürekli hem de atımlı akış rejimlerinde yapılmıştır.

2.1. Deney Düzeneği ve Çalışma Prensibi

Çalışmada kullanılan deney düzeneğinin ve ölçüm sisteminin şematik resmi Şekil 1'de verilmiştir. Deney düzeneği; besleme bölgesi, karışım bölgesi, gelişme bölgesi ve test bölgesi olarak dört ana bölümden oluşmaktadır.



Şekil 1. Deney düzeneği ve ölçüm sistem

Besleme Bölgesi:

Besleme bölgesi, daimi akış ünitesi ve salımlı akış ünitesi olarak iki bölümden oluşmaktadır.

Şekil 2'de gösterilen daimi akış ünitesi; vidalı kompresör, hava tankı, makro-filtre, kurutucu, basınç düzenleyici, mikro-filtre, mikro-valf, hacimsel debi kontrolörü ve ayar modülünden meydana gelmektedir.

Daimi akış için gerekli olan akışkan debisi bir vidalı kompresör tarafından sağlanmakta (500 LPM) ve hava tankına basılmaktadır. Hava tankından çıkan akışkan, içerisinde bulunabilecek olası kirletici veya partiküllere karşı (yağ, su ve toz vs.) $1\mu m$ gözenek boyutuna sahip partikülleri tutabilecek bir makro-filtre içerisinden geçirilerek kurutucu ünitesine yollanmaktadır.



Şekil 2. Daimi akış ünitesi



Şekil 3. Salınlı akış ünitesi

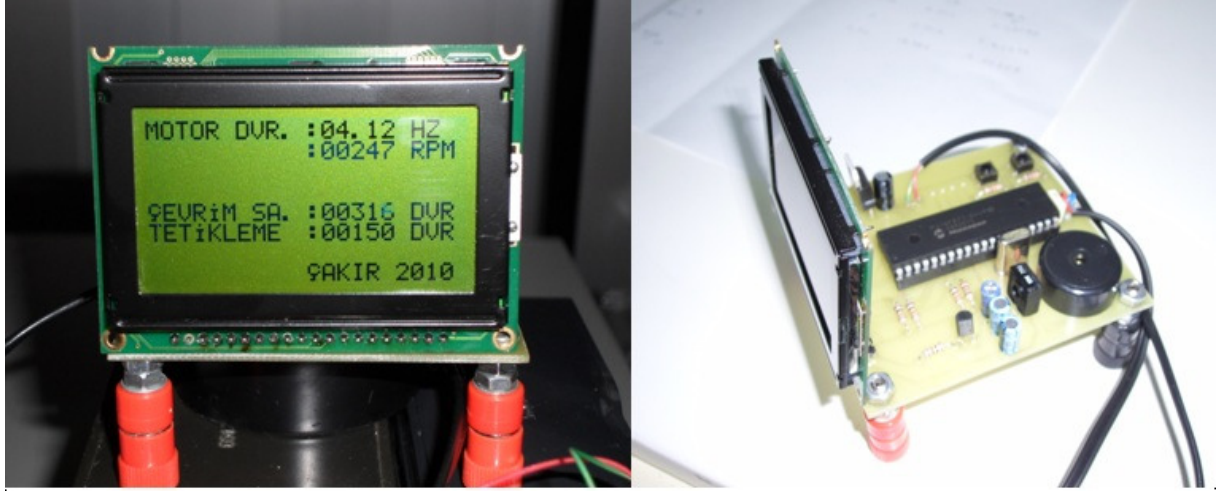
Burada bağıl nem düzeyi düşürülen akışkan, hassas bir mikro-filtreden geçirilerek ($0.1\mu m$ partikül) devre üzerinde yer alan hacimsel debi kontrolörü ve sıcak film probuna zarar verebilecek partiküllerin tutulumu sağlamaktadır. Daha sonra, basınçlandırılmış hava bir mikro-valf'tan geçerek hacimsel debi kontrolörüne ulaşmaktadır. Mikro-valf, sistemde oluşabilecek ani basınç artışlarına karşı hacimsel debi kontrolörünün (çalışma basıncı 0-125 psig) korunması için sigorta vazifesi görmektedir. Hacimsel debi kontrolörü üzerinde bir ayar modülü bulundurmaktadır (CZ-32907-25). Modül vasıtası ile istenilen hava debisi ayarlanarak giriş bölgesine gönderilmektedir.

Salınlı akış ünitesi; pnömatik bir pompa, disk ve bu disk tahrik edecek DC bir elektrik motoru ve sürücünden oluşmaktadır. Bu üniteye ait resim Şekil 3'te verilmiştir.

Pnömatik pompa 16mm çap ve 150 mm maksimum strok boyuna sahip olup çalışma frekans aralığı (0 – 50 Hz) arasında değişmektedir. Bu pompanın, farklı hız ve genliklerde tahrik edilmesini sağlamak amacı ile alaşım alüminyumdan imal edilmiş bir disk kullanılmaktadır. Bu disk üzerine farklı genlikte salınımlar oluşturulması amacıyla radyal doğrultuda 12.5 mm aralıklarla beş adet delik açılmıştır. Bu disk DC motor miline, tasarlanan ve imal edilen bir flanş vasıtası ile bağlanmıştır. Sistemde kullanılmış olan bu DC motor Femsan firmasına ait 180 V, 1 kW gücünde ve 3000 dev/dak lık sabit mıknatıslı fırçalı tip elektrik motorudur. Bu motoru 0-3000 dev/dak hızlarında kontrol etmek için Eas marka DC sürücü kullanılmıştır. Bu sürücü, 0.1 volt adım aralığı ile kademeli olarak hızı artırabilmekte ve motor için beslemeyi sağlamaktadır. Atımlı akış mekanizmasına ait kinematik analiz Ek 3'te detaylı olarak verilmiştir. Deney düzeneğinden elde edilen verilerin (hız, basınç ve sıcaklık) eşzamanlı kaydedilmesi ve salınlı akış ünitesiyle senkronize bir şekilde tetiklenmesi için kızıl ötesi optik okuyuculu bir devre sistemi yer almaktadır. Bu devreyi oluşturan kızıl ötesi optik sensor (a) ve işlemci devre (b) Şekil 4'de gösterilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 4. Optik kodlayıcı sistem sensor (a) ve işlemci devre (b)

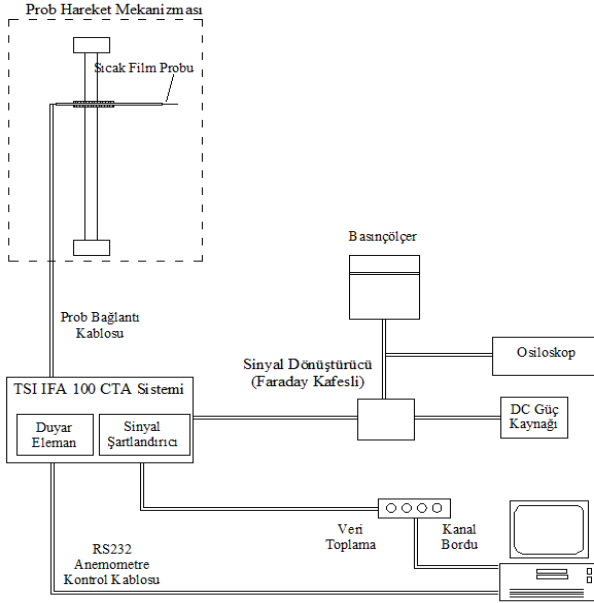
3. Ölçüm İşlemi ve Veri Analizi

Basınç ve hız ölçüm sistemlerinin şematik resmi Şekil 5'de verilmiştir. Hız ölçümlerinde, probun akış ortamında farklı istasyonlarda konumlandırılması için Plint&Partner firması tarafından yapılmış olan TR500 model hareket mekanizması kullanılmıştır. Bu mekanizma sayesinde prob dikey ve yatay doğrultuda hareket edebilmektedir. Dikey doğrultuda mekanizma milinin 10° lik bir dönüşü ile prob tutucu 0.05 mm'lik bir yol almaktadır. Yatay doğrultuda ise prob tutucunun ölçekli cetvel üzerinde kaydırılması ile ayarlanmaktadır. Mekanizma yatay ve dikey doğrultuda 500 mm hareket etme kabiliyetine sahiptir. Probu konumlandırılmasında deneysel hata miktarı 0.001 mm kadar olmaktadır. Ancak, çalışmada kullanılan boru çapı göz önüne alındığında bu miktar daha da azalmaktadır.

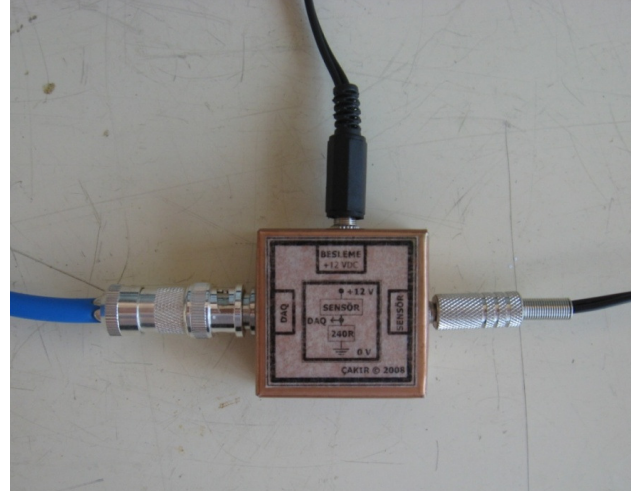
3.1. Hız ve Frekansın Ölçülmesi

Hız ve frekansın ölçülmesinde TSI firması tarafından üretilmiş IFA100 sıcak tel sabit sıcaklık anemometresi ve sıcak film probu kullanılmıştır. Bu prob yine aynı firmaya ait olan Model 1125 kalibrasyon cihazı kullanılarak kalibre edilmiştir. Sıcak tel sabit sıcaklıklı anemometreden elde edilen sinyal ve basınç algılayıcıdan gelen sinyaller eş zamanlı olarak sinyal şartlandırıcı yardımıyla UEA firmasına ait saniyede 10000 veri örnekleyebilecek özellikte 12-bit hassasiyete sahip DAS20 A/D veri kartına yollanarak bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Elde edilen ham verilerin bilgisayar ortamında

işlenmesi ise TSI firması tarafından geliştirilmiş olan IFA100 ThermalPro paket programı yardımı ile yapılmıştır.



Şekil 5. Ölçüm sistemi ve hareket mekanizması (Akansu 2004)



Şekil 6. Sinyal dönüştürücü devre ve Faraday kafesi

3.2. Basınç Ölçümü

Deneylerde boru üzerine açılmış olan iki adet basınç prizi arasındaki statik basınç farkı ölçülmüştür. Basınç prizlerinin konumu hidrodinamik gelişme uzunluğu ve çıkış etkileri göz önüne alınarak belirlenmiştir. Bu işlem, karşılaşılan basınç farkı aralığına göre Druck firmasına ait $-0.1 - +0.1$ mbar çift yönlü ve 0.1 mbar skalalara sahip iki adet LPX9481B ve LPX9481 düşük fark basınç sensörü ile gerçekleştirilmiştir. Bu cihazlara $10-30$ V DC akım uygulanmakta olup $4-20$ mA aralığında analog sinyal alınmaktadır. Bu algılayıcılar yüksek doğruluk ve hassasiyete sahiptir (0.1% FS BLS). Deneysel çalışmada frekans aralığının geniş tutulabilmesi için basınç algılayıcılarının bu duruma uygun seçilmeleri gerekmektedir. Bu nedenle algılayıcıların seçiminde en önemli kriterlerden biri de tepki sürelerinin çok iyi olmasıdır. Deneylerde kullanılan algılayıcıların tepki süreleri 10 ms olup saniyede 100 değişimi fark edebilecek kabiliyettedir. Ayrıca, doğal frekansları da 2 kHz'e kadar ulaşmaktadır. Algılayıcı sinyal çıkışları mA olduğu için gerilime çevrilerek sinyal şartlandırıcıya bağlanmıştır. Burada gerekli işlemler uygulanmış ve veri kartı vasıtası ile ThermalPro yazılımı ile ölçümler bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Ayrıca, çalışmalarda kontrol amaçlı kullanılan iki adet Druck firmasına ait $0-100$ mbar aralıklı $4-20$ mA çıkış sinyaline sahip PTX7500 gösterge basınç transmitteri kullanılmıştır. Bu algılayıcılar da yüksek doğruluk ve hassasiyet derecelerine (0.1% FS BLS) sahip olup, tepki süreleri 1 ms'dir.

Test bölgesine giren akışkan debisi hacimsel debi kontrolörü vasıtası ile sağlanmıştır. Basınç düşümü ölçümü için kalibrasyon işlemi yukarıda anlatılan LPX9481B ve LPX9481 çift yönlü fark basınç algılayıcıları ile gerçekleştirilmiştir.

Basınçölçer önce 16 V'luk doğru akım kaynağına bağlanmıştır. Besleme kaynağından gürültü ve parazit kapmaması için 220 V şebeke geriliminden beslenen DC güç kaynağı yerine özel olarak tasarlanmış 16 V'luk batarya düzeneğine bağlanmıştır. Sensor çıkış sinyali $4-20$ mA ve bu sinyalin veri aktarma kartına bağlanması için ± 5 V gerilime dönüştürülmesi gerekmektedir. Bu nedenle Şekil 6'da gösterilen küçük bir elektronik devre tasarlanarak ölçüm sistemine eklenmiştir. Bu devre üzerinde 240 Ω luk film tip bir direnç kullanılmıştır. Ayrıca bu dönüştürücü devre, gürültü ve parazit (Radyo dalgaları, cep telefonu sinyalleri ve mikrodalgalar vs) için 1mm kalınlığında bakır plakayla Faraday kafesi oluşturularak ekranlanmıştır. Basınç ölçüm sisteminde kullanılan tüm kablolar ekranlı kablo olarak seçilmiştir. Ölçüm sistemi üzerinden sızan gürültü ve parazitler dönüştürücüden yollanan sinyal TSI

Model 157 sinyal şartlandırıcıda ofset ve kazanç değerleri ayarlanarak Lowpass filtrelemeye tabi tutulmuşlardır. Böylece çevre ortamdan gelen tüm parazit ve gürültüler ortadan kaldırılmıştır. Frekans farklılığına bağlı olarak basınç düşümlerinin oldukça geniş bir aralıkta seyretmesi, farklı ölçüm aralıklarına sahip basınç algılayıcıları kullanımını zorunlu hale getirmiştir. Ölçüm cihazlarına ait karakteristikler Tablo 2'de verilmektedir.

Tablo 2. Ölçüm cihazlarına ait karakteristikler

Ölçüm cihazı	Cihaz Kodu	Ölçüm aralığı	Hassasiyeti
Hacimsel debi kontrolörü	CZ-32907-25	0 – 100 l/dk	$\pm 0.8\%^*$
	LPX9481 B	0 - ± 0.1 mbar	$\pm 0.1\%^*$
Basınç Sensörü	LPX9481	0 - 0.1 mbar	$\pm 0.1\%^*$
	LPX5481	0 - 20 mbar	$\pm 0.1\%^*$
Yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı	Marsurf Profilometre M2	0 – 150 μ m	$\pm 0.015\mu$ m

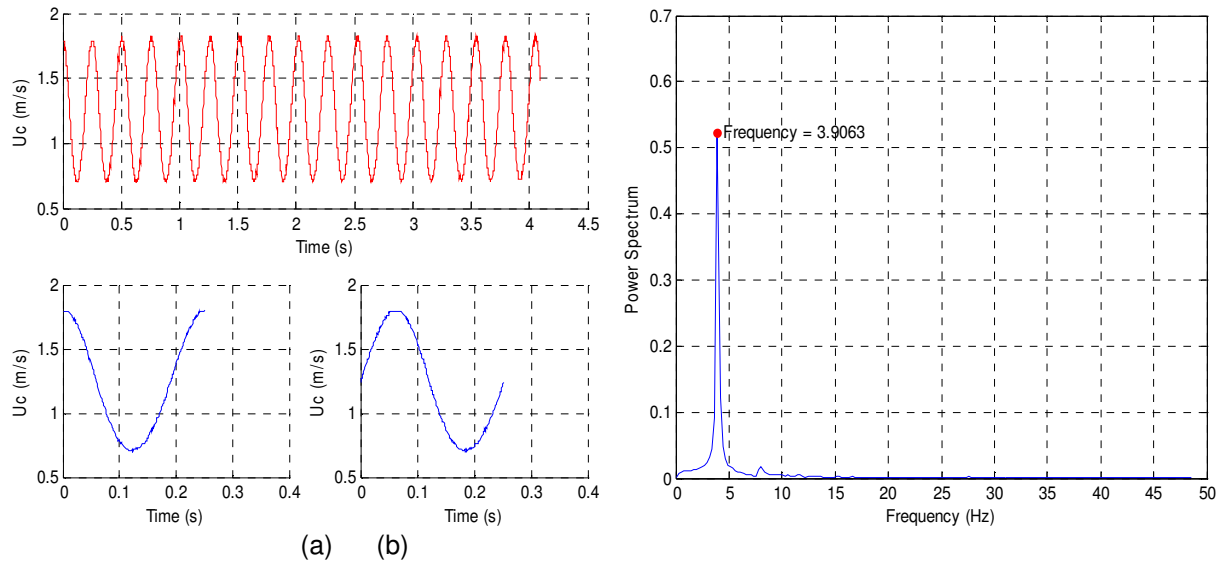
* Tüm skalada

4. Sonuçlar ve Tartışma

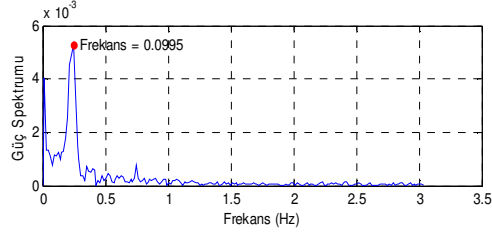
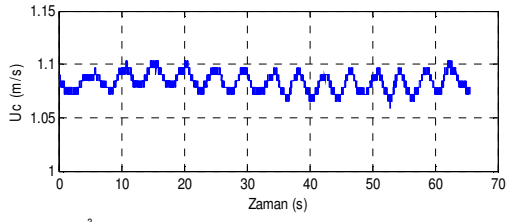
Piston kaynaklı akış için akışın hidrodinamik olarak tam gelişmiş olduğu bölgede kapsamlı ve karşılaştırmalı analitik, sayısal ve deneysel çalışmalar yapılmıştır. Aşağıda elde edilen sonuçlar sunulmaktadır.

u_m ve Δp 'nin *bileşik-ortalamalı* (ensemble-averaged, EA) değerleri 150 çevrim verisi ve T 'nin *bileşik-ortalamalı* değeri ise 500 çevrim verisi kullanılarak hesaplanmıştır. Ayrıca, veri toplama salınımlarının sekiz farklı faz açısı için gerçekleştirilmiştir. Yapılan bu işleme ait bir örnek Şekil 7 (a) ve (b)' de verilmiştir. Öncelikle, meydana gelen akış fiziğini daha iyi anlayabilmek adına boru merkezindeki hız için güç spektrumu Şekil 8'de verilmiştir. Görüldüğü üzere, çalışılan akış koşullarının her türlü dış etkilerden (gürültü, şebeke ve benzeri kaynaklı dış sinyal, v.b.) arındırıldığı görülmektedir. Bu da deneysel sonuçların güvenilirliği açısından önemlidir. Görüldüğü gibi çalışılan bütün değerlerde, akışın sadece tek bir frekans bileşeni vardır ve ikincil bir frekans gözlenmemiştir.

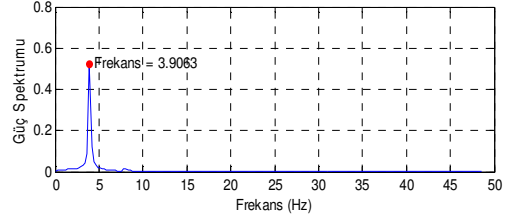
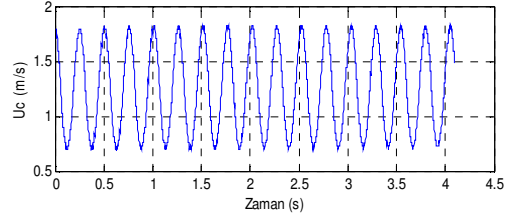
Şekil 9'da $Re=1002$, $F=44$ ve $A=0.48$ parametrik değerleri için tam gelişmiş bölgede boru merkezindeki boyutsuz hızın faz açısıyla değişimi tam bir çevrim (periyot) için verilmektedir. Görüldüğü gibi analitik, deneysel ve sayısal sonuçlar arasında mükemmel bir uyum vardır. Benzer şekilde, basınç gradyanının zamanla değişimi tam bir çevrim (periyot) Şekil 10'da gösterilmiştir. Yine, bu şekilden de analitik, deneysel ve sayısal sonuçların uyumlu olduğu görülmektedir. Ayrıca, her iki şekil bir biriyle kıyaslanacak olursa aralarında 90° 'lik ($\pi/2$) bir faz farkının olduğu görülmektedir. Frekansın yüksek olduğu durumlarda, hız basınca göre gecikmeye uğrayacaktır. Bu durum ilerleyen bölümlerde daha net bir şekilde gösterilecektir.



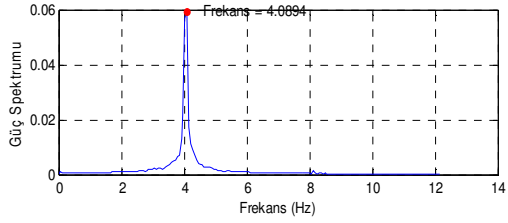
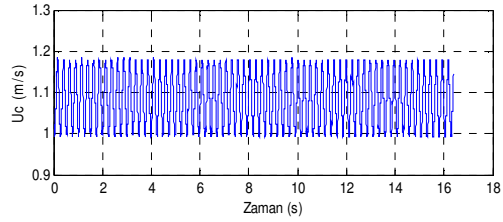
Şekil 7. Bileşik-ortalamalı hesap örneği (a) ve ona ait güç spektrumu (b)



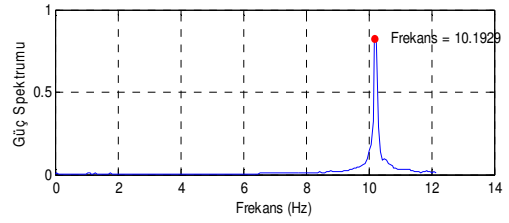
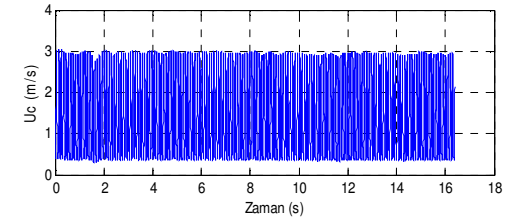
(a)



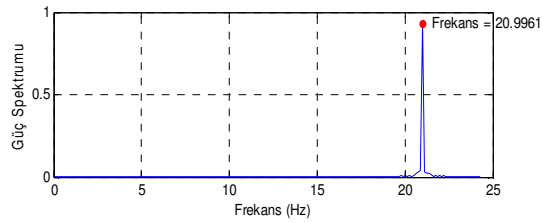
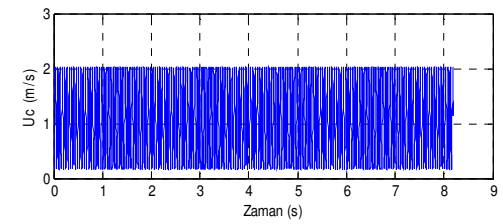
(b)



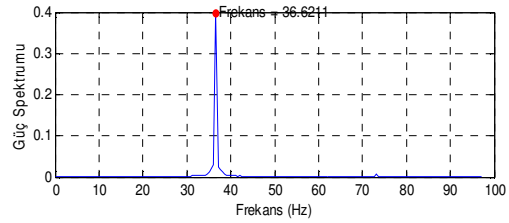
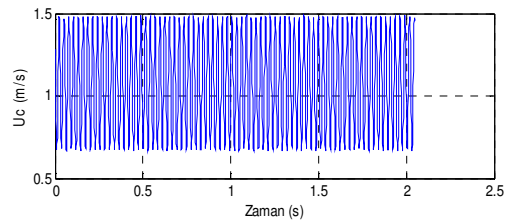
(c)



(d)

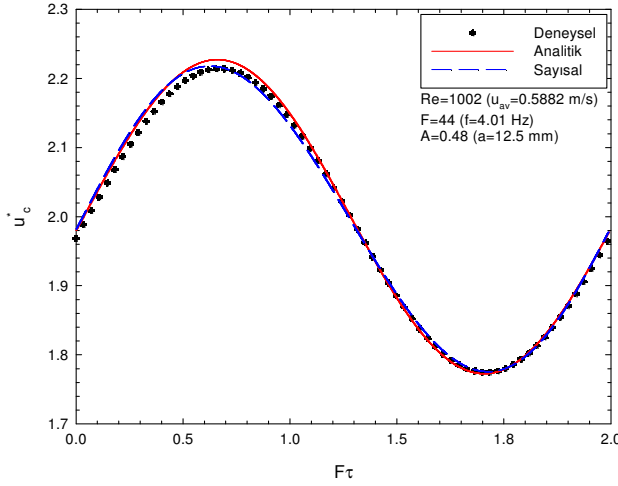


(e)

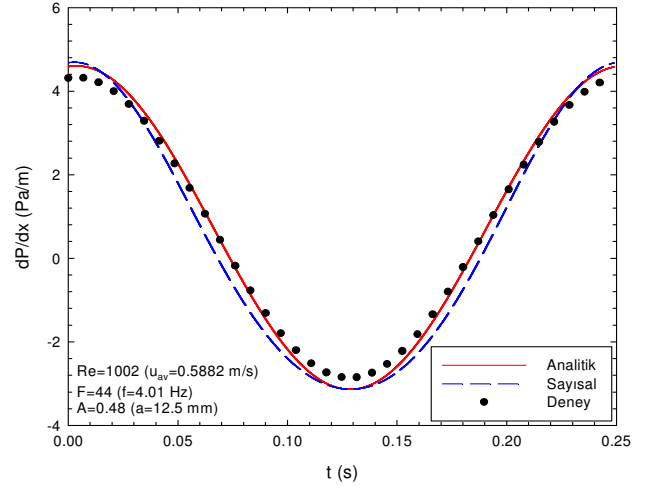


(f)

Şekil 8. Güç spektrumu



Şekil 9. Boyutsuz hız boyutsuz zamana göre değişimi



Şekil 10. Basınç farkının zamana göre değişimi

5. Kaynaklar

- Akansu, Y., E., 2004. Ardışık Olarak Yerleştirilen Farklı Geometrilere Sahip Küt Cisimlerin Aerodinamik Karakteristiklerinin İncelenmesi, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Anilola, L., Koppel, T. ve Lahdeniemi, M., 1999. Heat Transfer in the Thermally Developing Region for Pulsating tube flow, *Proc. Estonian Acad. Sci. Engng*, 5 (1), 41-52.
- Arslan, N., Loth, F., Bertram, C., D. ve Bassiouny, H., S., 2005. Transitional Flow Field Characterization Inside an Arteriovenous Graft-to-vein Anastomosis Under Pulsatile Flow Conditions, *European Journal of Mechanics B: Fluids*, 24(3), 353-365.
- Atabek, H., B. ve Chang, C., C., 1961. Oscillatory Flows near the Entry of a Circular Tube, *Zamp Angew. Math. Phys.*, 12, 185-201.
- Atabek, H., B., Chang, C., C. ve Fingerson, L., M., 1964. Measurement of Laminar Oscillatory Flow in the Inlet Length of a Circular Tube, *Physics Medicine Biology*, 9, 219-227.
- Aygün, C., 2013. Atımlı Giriş Akışının Akış ve Isı Transferi Üzerindeki Etkisi, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Baird, M., H., I., Round, G., F. ve Cardenas, J., N., 1971. Friction Factors in Pulsed Turbulent Flow, *Can. J. Chem. Eng.*, 49, 220-223.
- Barker, A., R. ve Williams, J., E., F., 2000. Transient Measurements of the Heat Transfer in Unsteady Turbulent Pipe Flow *Int. J. Heat Mass Transfer*, 43, 3197-3207.
- Brown, F., T., Margolis, D., L. ve Shah, R., P., 1969. Small Amplitude Frequency Behavior of Fluid Lines with Turbulent Flow, *J. Basic Eng. T. ASME*, 91 (4), 678-693.
- Carlander, C. ve Delsing, J., 2000. Installation Effects on an Ultrasonic Flow Meter with Implications for Self Diagnostics, *Flow Measurement and Inst.*, 11 (2), 109-122.
- Carpinioglu, M., O. ve Gundogdu, M., Y., 2001. A Critical Review on Pulsatile Pipe Flow Studies Directing Towards Future Research Topics, *Flow Measurement and Inst.*, 12, 163-174.
- Danling, Z., J., Z., Ping, W. ve Hong, G., 2004. An Experimental Study of Heat Transfer Enhancement

- with a Pulsating Flow, Heat Transfer-Asian Research, 33 (5), 279-286.
- Eckmann, D., M. ve Grotberg, J., B., 1991. Experiments on Transition to Turbulence in Oscillatory Pipe Flow, J. Fluid Mechanics, 222, 329-350.
- Elshafei, E., A., M., Mohamed, M., S., Mansour, H. ve Sakr, M., 2008. Experimental Study of Heat Transfer in Pulsating Turbulent Flow in a Pipe, Int. J. Heat and Fluid Flow, 29, (4), 1029-1038.
- Fallen, M., 1982. Heat Transfer in a Pipe with Superimposed Pulsating Flow, Warme Und Stoffübertragung, 16, 89-99.
- Fan, A., Fulmer, D. ve Hartenstine, J., 2008. Experimental Study of Oscillating Flow Heat Transfer, Micro/Nanoscale Heat Transfer International Conference, Tainan, Taiwan, Bildiri Kitabı.
- Habib, M., A., Attya, A., M., Eid, A., I. ve Aly, A., Z., 2002. Convective Heat Transfer Characteristics of Laminar Pulsating Pipe Air Flow, Heat and Mass Transfer, 38, 221-232.
- Hanake, H., Laschefske, H., Grosse-Gorgemann, A. ve Mitra, N., K., 1992. Navier-Stokes Simulation of Pulsating Flow in a Channel, Fundamentals of Forced Convection Heat Transfer, ASME, HTD-Bildiri Kitabı 210: 115-121.
- Hapke, J., 1974. Wärmeübergang bei Pulsierender Laminarer Strömung, Brennst-Wärme-Kraft, Brennst. Wärme-Kraft, 26(2), 55-63.
- Hwang, M., F. ve Dybbs, A., 1983. Heat Transfer in a Tube with Oscillatory Flow, ASME Paper 83-WA/HT-90, 1-12.
- Karamercan, O., E., ve Gainer, J., L., 1979. The Effect of Pulsations on Heat Transfer, Ind. Eng. Chem. Fundam., 18, 1, 11-15.
- Keil, R., H., Baird, M., H., I., 1971. Enhancement of Heat Transfer by Flow Pulsation, Ind. Eng. Chem. Proc. Dd, 10, 473-478.
- Kirmse, R., E., 1979. Investigations of Pulsating Turbulent Pipe Flow, J. Fluids Eng. T. ASME, 101, 436-442.
- Kline, S., J. ve McClintock, F., A., 1953. Describing Uncertainties in Single-Sample Experiments, Mech. Eng., 3.
- Lee, T. ve Budwig, R., 1991. The Onset and Development of Circular-Cylinder Vortex Wakes in Uniformly Accelerating Flows, J. Fluid Mechanics, 232, 611-627.
- Lees, R., S. ve C. F. Dewey, 1970. Phonoangiography: a New Noninvasive Diagnostic Method for Studying Arterial Disease, Proc. of the Nat. Ac. of Sci., 67(2), 935-942.
- Li, H., Zhong, Y., J., Zhang, X., M., Deng, K., Lin, H., H. ve Cai, L., Y., 2007. Experimental Study of Convective Heat Transfer in Pulsating Air Flow Inside Circular Pipe, Chal. Pow. Eng. Env., 1(2), 880-885.
- Mackley, M. R., Stonestreet, P., 1995. Heat-Transfer and Associated Energy-Dissipation for Oscillatory Flow in Baffled Tubes, Chem. Engng. Science, 50, 14, 2211-2224.
- Miller, J., A. ve Fejer, A., A., 1964. Transition Phenomena in Oscillating Boundary-Layer Flows, J. Fluid Mech., 18, 438-448.
- Moon, J., W., Kim, S., Y. ve Cho, H., H., 2005. Frequency-Dependent Heat Transfer Enhancement from Rectangular Heated Block Array in a Pulsating Channel Flow, Int. J. Heat Mass Transfer, 48, 4904-4913.

- Morris, C., J. ve Forster, F., K., 2004. Oscillatory Flow in Microchannels, Experiments in Fluids, 36(6), 928-937.
- Niida, T., Yoshida, T., Yamashita, R. ve Nakayama, S., 1974. The Influence of Pulsation on Laminar Heat Transfer in Pipes, Heat Transfer-Japanese Research, 38, 47-53.
- Ohmi, M. ve Iguchi, M., 1980. Flow Pattern and Frictional Losses in Pulsating Pipe Flow, Bull. JSME, 23, 186, 2029-2036.
- Ohmi, M. ve Iguchi, M., 1981a. Flow Pattern and Frictional Losses in Pulsating Pipe Flow. Part 5: Wall Shear Stress and Flow Pattern in a Laminar Flow, Bull. JSME, 24, 196, 1756-1767.
- Paek, J., W., Kang, B., H. ve Hyun, J., M., 1999. Transient Cool-Down of a Porous Medium in Pulsating Flow, Int. J. Heat Mass Transfer, 42 (18), 3523-3527.
- Peacock, J., A. ve Stairmand, J., W., 1983. Film Gauge Calibration in Oscillatory Pipe Flow, J. Physics, E: Scientific Instruments, 16, 571-576.
- Runstadler, P., W., Francis, J., R. ve Dolan, X., 1975. Diffuser Data Book, Creare Inc, Technical Note, 186, Netherland, Hannover.
- Sailor, D., J. ve Patil, B., K., 1996. Variable Duty Cycle Experiments in Pulsed-Impingement Heat Transfer, Proc. of the National Heat Transfer Conference, HTD-Bildiri Kitabı 8: 37-42.
- Sailor, D., J., Rohli, D., J. ve Fu, Q., 1999. Effect of Variable Duty Cycle Flow Pulsations on Heat Transfer Enhancement for an Impinging Air Jet, Int. J. Heat and Fluid Flow, 20, 574-580.
- Sarpkaya, T., 1986. Force on a Circular Cylinder in Viscous Oscillatory Flow at Low Keulegan-Carpenter Numbers, J. Fluid Mechanics, 165, 61-71.
- Tu, S., W. ve Ramaprian, B., R., 1983. Fully Developed Periodic Turbulent Pipe Flow (Part 1), J. Fluid Mechanics, 137, 31-58.
- Ünsal, B., 2008. Time-Dependent Laminar, Transitional and Turbulent Pipe Flows, Doktora Tezi, Der Technischen Fakultät Der Universität Erlangen, Nürnberg.
- Yamanaka, G., Kikura, H. ve Aritomi, M., 2002. Flow Measurement on An Oscillating Pipe Flow Near the Entrance Using the UVP Method, Experiments in Fluids, 32, 212-220.
- Yamanaka, G., Kikura, H., Takeda, Y. ve Aritomi, M., 1999. Flow Measurement on Oscillating Pipe Flow near the Entry Using UVP Method, 2nd Int. Sym. Ultrasonic Dopp. Met. Fluid Mechanics and Fluid Engng., Switzerland, Bildiri Kitabı: 21-24.
- Zhao, T.S., Cheng, P., 1996. The Friction Coefficient of a Fully Developed Laminar Reciprocating Flow in a Circular Pipe, Int. J. Heat Fluid Flow, 17, 167-172.
- Zohir, A. E. 2011. The Influence of Pulsation on Heat Transfer in a Heat Exchanger for Parallel and Counter Water Flows, New York Science Journal, 4(6), 61-71.
- Zohir, A., E., 2012. Heat Transfer Characteristics in a Heat Exchanger for Turbulent Pulsating Water Flow with Different Amplitudes, Journal of American Science, 8(2), 241-250.
- Zohir, A., E., Habbi, M., M., A., Attya, A., M. ve Eid, A., 2006. An Experimental Investigation of Heat Transfer to Pulsating Pipe Air Flow with Different Amplitudes, J. Heat Mass Transfer, 42(7), 625-635.
- Zulkifli, R., Sopian, K., Abdullah, S. ve Takriff, M.S., 2008. Effect of Pulsating Circular Hot Air Jet Frequencies on Local and Average Nusselt Number, American J. Eng. App. Sci., 1(1), 57-61.
- Zulkifli, R., Sopian, K., Abdullah, S. ve Takriff, M.S., 2009. Experimental Study of Flow Structures of Circular Pulsating Air Jet, American J. Eng. App. Sci., 2(1), 171-175.