

Akışkan Görüntüleme Yöntemleri

Denizaltı, otomobil, uçak, helikopter, uzay mekiği ve akışkan içinde hareket eden diğer araçların ve cisimlerin türbülans ve girdap dinamiklerinin incelenmesi, akışkan görüntüleme yöntemleriyle mümkün oldu. Bu yöntemler limaniçi ve kıyı akıntılarının Lagrange tipi sürükleyici etkilerinin anlaşılması, yeraltı sularının ve nehirlerinin haritalandırılması, canlıların kan ve sıvı dolaşım sistemlerinin görüntülenmesi, kimyevi ve biyolojik akışkanların bileşenlerinin tespit edilip tanımlanması, mikro, plazma ve manyetik akışların görüntülenmesi, boru akışlarının gözetlenmesi, gaz türbinleri ve motorlardaki yanmanın izlenmesi gibi birçok değişik amaçla da kullanılıyor. Akışkan görüntülemeye elde edilmek istenen parametreler akışın yönü, hızı, hız profilleri, debisi ve akışkanın içindeki cisme uyguladığı yüzey gerilimi ve dolayısıyla sürüklenme ve kaldırma kuvvetleridir.

Akışkana Gaz ve Sıvı Halde Yabancı Maddeler Katılması Yöntemi

Akışkanlara gaz, sıvı halde hidrojen, oksijen, boya, süt, duman, mürekkep ve radyoaktif moleküller enjekte edilerek görüntü elde edilebilir.

Hidrojen ve oksijen kabarcıklarının akışkana enjekte edilmesi çok ince (25-50 µm çapında) iletken bir telden elektrik akımı geçirilmesiyle mümkün olur. Suyun elektrolizi ile oluşan hidrojen kabarcıklarının suya karışması izlenebilir. Oksijen yerine hidrojen tercih edilmesinin nedeni suyun moleküler yapısından dolayı oksijen üretiminin hidrojen üretiminin yarı hızında olmasıdır. Ayrıca oksijen kabarcıkları, çapları hidrojen kabarcıklarının çaplarından daha büyük olduğundan, suyun kaldırma kuvvetinin etkisiyle akışkanın içinde fazla mesafe kat edmeden yüze çıkar. Bu da görüntülemeyi zorlaştırır. Hidrojen kabarcıklarıyla görüntülemenin en temel iki avantajı kolay uygulanabilir ve ucuz olmasıdır. Ancak bu yöntem sadece karmaşık olmayan, yani düşük türbülanslı akışlar için uygundur. Ayrıca hidrojen kabarcıkları hızla sönmeliği için akışkanın içinde sadece sınırlı bir bölge görüntülenebilir.

Şekil 1'de bir silindirin etrafındaki su akışının, Şekil 2'de ise şahdamardaki kan akışının hidrojen kabarcıklarıyla görüntülenmesinin örnekleri görülebilir.

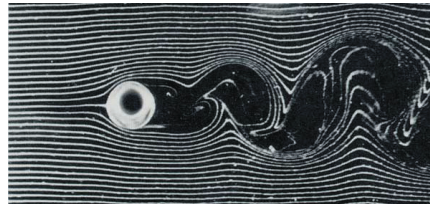
Akışkan hareketini boya ve duman ile görüntüleme fikri Leonardo da Vinci'ye kadar uzanır. Boya ile görüntüleme yönteminde boya akışkana doğrudan veya akışkan içinde kimyasal bir tepkime sonucu oluşturularak katılır. Sanayi boyaalarının büyük bir kısmının yoğunluğu sudan fazla olduğundan bu boyalar akışkanın içinde görüntüleme için gereken mesafeyi kat edemediği için batır. Görüntülemeyi zorlaştıran bu durumu önlemek için boyaya belirli miktarda alkol katılır ve boya-alkol karışımının yoğunluğu teste tabi tutulan akışkanın yoğunluğuyla eşitlenir. Bu noktada kaldırma kuvvetinin istenmeyen etkilerini önlemek için dikkat edilmesi gereken başka bir nokta da iki akışkan ara-

sındaki sıcaklık farkının çok az olmasıdır. Laminer olarak da bilinen düzgün akış rejiminden, karmaşık yani türbülanslı akışa geçiş ilk defa Osborne Reynolds tarafından 1883 yılında yapılan boya deneyiyle gözlenmiştir. Günümüzde hemen hemen her hidrolik laboratuvarında akışların türbülans seviyesini belirten Reynolds sayısı, Reynolds deney düzeneği ile ölçülebilir. Şekil 3'te Reynolds deney düzeneği görülüyor.

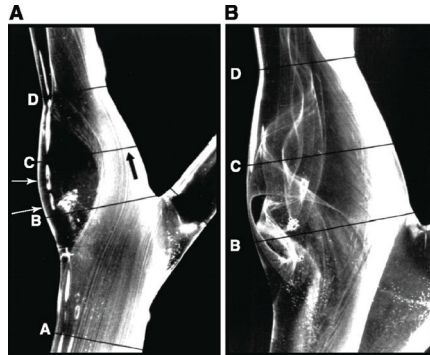
Bazı deneylerde görüntüleme akışkana süt ilavesi ile sağlanır. Yağlı yapısı nedeniyle yayınıcı boya ve mürekkep gibi maddelerinkinden düşük olan süt, rengi ve ışığı iyi yansıttığı için tercih edilir. Ancak süt kullanılarak görüntülemeye, ardışık deneyler arasında test aletinin çok iyi temizlenmesi gerekir.

Eğer test edilen akışkan hava ise en sık kullanılan madde dumandır. Duman ağaç, tütün gibi maddeler yakılarak veya hidrokarbon yağları buharlaştırılarak elde edilebilir. Görüntüleme için kullanılacak dumanın küçük parçacıklı olması ve ışık yansıtıcılığının yüksek olması istenir. Şekil 4'te kamyonetin etrafındaki hava akışının duman deneyi ile görüntülenmesi görülüyor.

Akışkana yabancı madde ekleyerek görüntüleme yönteminde sıkça kullanılan



Şekil 1. Bir silindirin etrafındaki su akışının hidrojen kabarcıklarıyla görüntülenmesi



Şekil 2. Şahdamardaki kan akışının hidrojen kabarcıklarıyla görüntülenmesi.

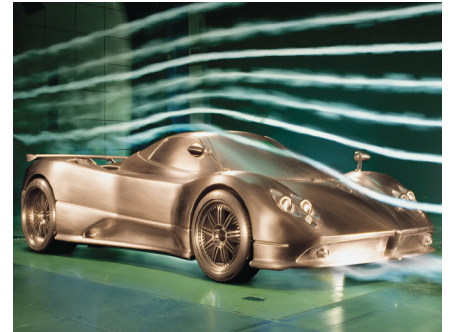


Şekil 3. Reynolds test aleti

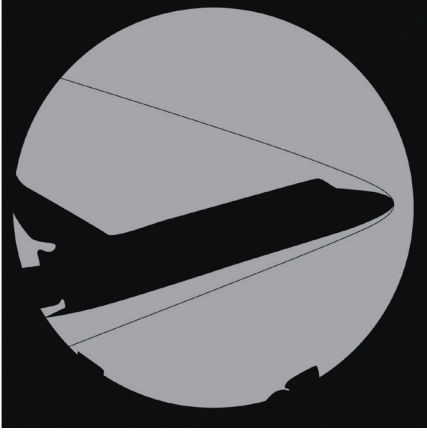
bir başka madde de $TiCl_4$ molekül formülüyle bilinen titanyum tetraklorittir. Titanyum tetraklorit su ile tepkimeye sokulduğunda TiO_2 molekül formülüyle bilinen titanyum dioksit ortaya çıkar. İlaç sanayisinde de kullanılan bu madde, ışığı yansıtır ve dolayısıyla akışkan görüntülemeye tercih edilen maddelerden biridir. Şekil 5'te yarış otomobili etrafındaki hava dinamiğinin titanyum tetraklorit dumanıyla görüntülenmesi görülüyor.



Şekil 4. Kamyonetin etrafındaki hava akışının dumanla görüntülenmesi



Şekil 5. Otomobillerin etrafındaki hava akışının $TiCl_4$ dumanıyla görüntülenmesi

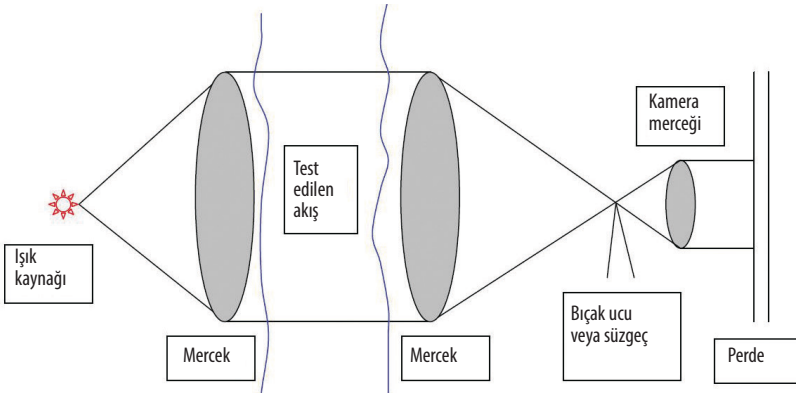


Şekil 6. Hızı ses hızının yedi katı olan uzay mekiğinin etrafındaki akışın gölge grafiği

Optik Görüntüleme Yöntemi

Bir ışık ışınının iki nokta arasında ilerlerken izlediği yol, en az zaman alan yoldur. Bu Fermat ilkesi olarak da bilinir. Bu nedenle bir akışkanın içinden geçen ışık, akışkanın yoğunluğunun ve dolayısıyla da ışığı kırma katsayısının değiştiği bölgelerden geçerken ilerleme yönünden sapar, evre değişimine uğrar. Oluşan bu farklılık kullanılarak test edilen akışkan hakkında nicel veriler elde edilebilir. Işığın kullanıldığı (optik) görüntüleme yöntemleri sıkışan, karışan, katmanlı akışlara, manyetik ve plazma akışına ve gaz türbinlerindeki ve motorlardaki yanmalı akışlara uygulanabilir.

Akışkanları optik görüntülemenin en ilkel yöntemi gölge grafiği yöntemidir. Bu yöntem bir ışık kaynağından çıkan ışığın akışkanın içinden geçerken gölgesinin kaydedilmesi fikrine dayanır. Fotoğraf filmine veya ışığın kaydedilebileceği herhangi bir maddeye kayıt yapılabilir.



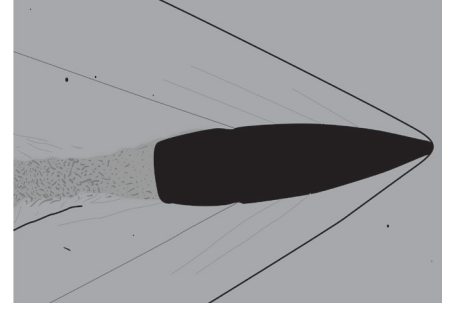
Şekil 7. İz görüntüleme yöntemi düzeneği

Kaydın yapıldığı fotoğraf filminin küçük olmasını sağlamak için kamera merceği kullanılabilir. Işık kaynağı ne kadar küçültülürse kaydedilen gölgenin çözünürlüğü o kadar artar. Gölge grafiği kolay uygulanabilir olmasına rağmen akışın niceliği hakkında detaylı sonuç vermez. Gölge grafiği yöntemi sıkışan, karışan, katmanlı ve türbülanslı akışlara uygulanabilir ve bu akışların yapısı hakkında nitel bilgi verir.

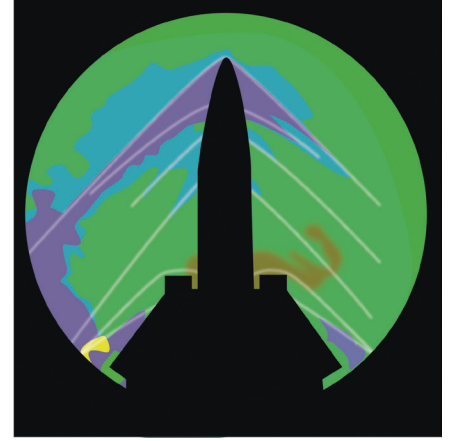
Başka bir optik görüntüleme yöntemi de literatürümüze şileren (yani Schlieren) görüntüleme yöntemi olarak geçen, iz görüntüleme diye tarif edebileceğimiz görüntüleme yöntemidir. Akışkanın yoğunluğu farklı olan bölgelerinin ışığı kırma katsayısı farklı olduğu için, her bölge ışığı farklı şekilde kırar ve görüntüler kaydedilerek aralardaki sınırlar belirlenebilir. Bu yöntem, akışkandaki yoğunluk farklarının yarattığı optik düzensizliği belirlemesinin yanı sıra ışığın güzergâhından sapsması hakkında da nicel bilgi verir. Temel olarak gölge grafiği yöntemine benzeyen bu yöntemde gölge grafiği yöntemine ilave olarak, görüntünün kaydedilmek üzere bir yüzeye düşürülmesinden hemen önce odaklandığı noktada bıçak ucu, süzgeç veya renkli süzgeç gibi bileşenler kullanılarak ışığın bir kısmının bloke edilmesi ve geri kalan kısmın odaklanarak zıtlığın artırılması sağlanır. Amaç görüntü kalitesinin iyileştirilmesidir. Şekil 7'de iz görüntüleme düzeneği görülüyor. Bu yöntem, basit düzenek yapısı ve yüksek çözünürlükte görüntü verdiği için günümüzde akışkanlar ve termodinamik laboratuvarlarında en sık kullanılan optik görüntüleme yöntemidir. Şekil 8'de bir kurşun etra-

findaki hava akışının iz görüntüleme yöntemiyle elde edilmiş görüntüsü görülüyor.

İnsan gözü renkteki değişimleri gölgelerin tonlarındaki değişimlerden daha iyi algılayabildiği için renklendirilmiş iz görüntüleme yöntemleri geliştirilmiştir. Bunu sağlamak için iz görüntüleme düzeneğinde süzgeç yerine renkli şeritli süzgeçler kullanılabilir. Bir başka seçenek ise ışık kaynağının hemen arkasına koyulacak bir prizma ile beyaz ışığın tayf bileşenlerine ayrılmasıdır. Şekil 9'da renklendirilmiş iz görüntüleme yöntemi ile görüntülenen seston hızlı bir akış görülüyor.



Şekil 8. İz fotoğrafı yöntemi ile kurşun etrafındaki akışın görüntülenmesi



Şekil 9. Renklendirilmiş iz fotoğrafı yöntemi ile seston hızlı akışın görüntülenmesi



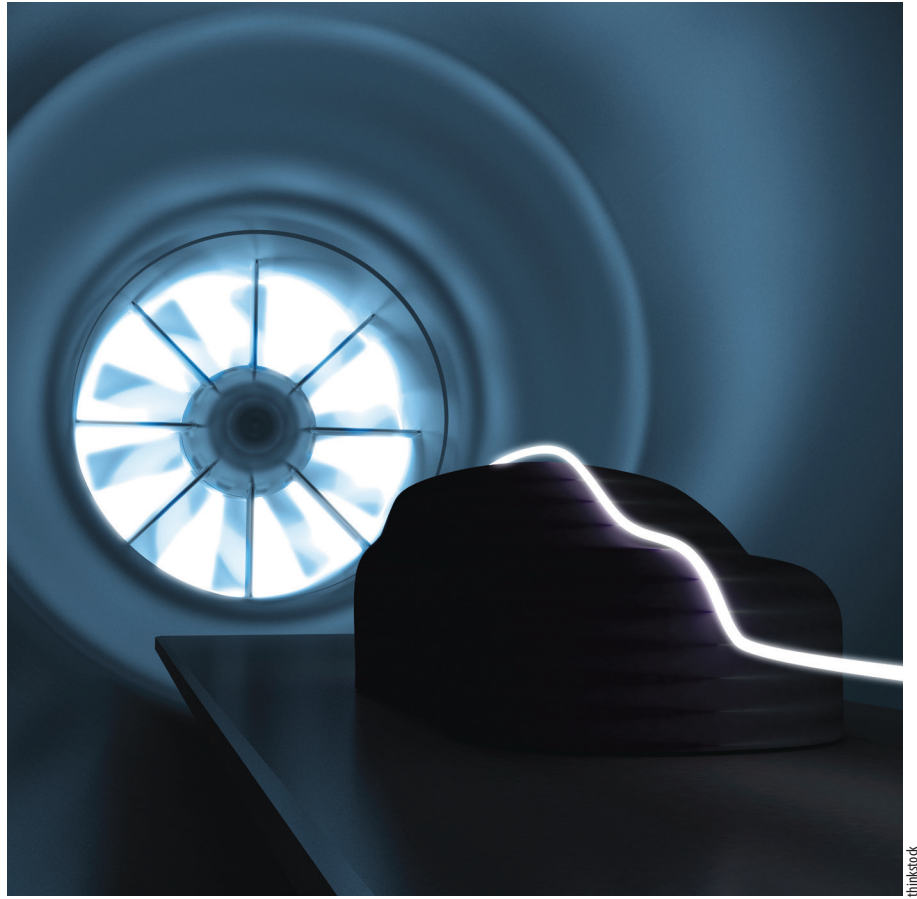
Şekil 10. Dört kameralı ayrıışık parçacık hızı görüntüleme düzeneği

Günümüzde sıkça kullanılan bir diğer optik görüntüleme türü de ayrışık parçacık hızı görüntüleme tekniğidir. Lazer görüntüleme ve benek fotoğraflama gibi türrevleri de olan bu yöntemde saydam su ve hava akışlarının gözlenebilmesi için bu akışkanlara parçacıklar katılır. Bu parçacıklar floresan, yağ, alkol veya gümüş kaplanmış, yani ışık yansıtıcılığı yüksek olan, taneciklerdir. Parçacıkların yoğunluğu akışkanın yoğunluğuna ya çok yakın ya da onun yoğunluğu ile aynı olmalıdır. Ayrıca bu parçacıkların akışı değiştirmeyecek kadar küçük olması gerekir. Bu parçacıklar ilave edildikten sonra görüntülenmek istenen akış bir ışık kaynağı vasıtasıyla ışığa maruz bırakılır. Günümüzde bu amaçla en çok kullanılan ışık kaynağı Nd:YAG lazeridir. Parçacıklardan yansıyan ışık ışınları belirli bir süre boyunca bir veya daha çok kamera tarafından kaydedilir. Şekil 10'da dört kameralı ayrışık parçacık hızı görüntüleme düzeneği görülüyor.

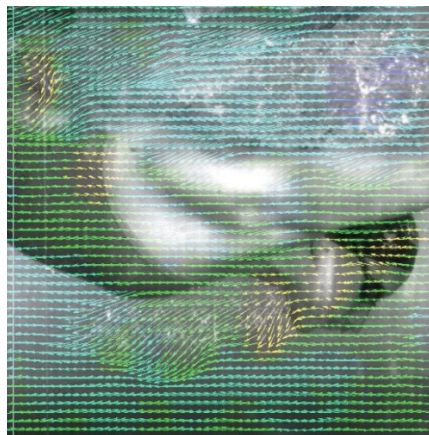
Daha sonra bu kamera görüntüleri bilgisayara kaydedilir. Bir önceki zaman basamağında çekilen görüntüler bir sonraki zaman basamağında çekilen görüntülerle çapraz ilişkilendirme yöntemine tabi tutulur ve kayıt süresi boyunca parçacıkların yani akışın nereden nereye hareket ettiği tespit edilir. Bu yöntemle akışın hızının yönü ve büyüklüğü tespit edilir. Şekil 11'de bir yüzücü ve yüzücüyü çevreleyen suyun ayrışık parçacık hızı görüntüleme tekniğiyle elde edilmiş hız vektörleri görülüyor.

Işık homojen olmayan ortamlardan, örneğin yer yer yoğunluk farklılığı gösteren akışkanlardan geçerken güzergâhının yanı sıra evre değişimine de uğrar. Bu durum, ışığın evre değişimine dayalı girişim ölçme tekniklerinin temelini oluşturur. Işık optik bileşenler (örneğin aynalar ve lensler) aracılığıyla iki bileşene ayrılması ve biri normal diğeri test ortamından geçen iki bileşen arasında evre kıyaslaması yapılarak test edilen ortam hakkında bilgi edinilmesi fikrine dayanır.

Bir başka tür girişimölçer ise ışıkya-zış (holografi) ilkesine dayanan girişimölçerdir. Bu yöntemde ışık iki bileşene ayrılmaz; önce bir ortamda ilerlemesi sağlanır, sonra da ışığı kaydedebilen bir malzeme



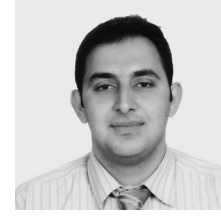
tarafından kaydedilir. Daha sonra da test edilen akışkan aynı düzende ışığın ilerleme güzergâhına konur ve kayıt tekrarlanır. En sonunda da aynı anda ışığa maruz bırakılan bu ışık yazıtlar (hologram) deneydeki ışık koşullarının aynısını oluşturur ve iki kayıt arasındaki evre farkı belirlenerek akışkanın görüntülenmesi ve değerlendirilmesi sağlanır.



Şekil 11. Yüzücünün etrafındaki su akış vektörlerinin ayrışık parçacık hızı görüntüleme tekniğiyle elde edilmiş görüntüsü

Akışkana Enerji Ekleyerek Görüntüleme Yöntemi

Akışkana enerji ekleyerek görüntüleme yöntemi, daha önce bahsettiğimiz yabancıcı madde ekleyerek çıplak gözle gözlem yapma yöntemi ve akışkandaki yoğunluk farklarından yararlanarak optik görüntüleme yönteminin bileşimi olarak nitelendirilebilir. Bu teknikte akışkana ilave edilen bir madde değil bir enerjidir. Akışkanın basıncı sabit tutulup belirli bir bölgesine enerji verildiğinde akışkan molekülleri ısınır, genişler ve yoğunlukları azalır. Böylece gözlenen akışta yer yer yoğunluk farkları oluşur. Enerji ilavesi, ısıtılmış bir telle, iki elektrot arasında uygulanan yüksek voltajla, uygun dalga boyunda ışığa maruz bırakıldığında floresan saçan maddelerle, gaz akışları için de elektron bombardımanı yapılar. Bu yöntemle oluşturulan yoğunluk farklılıkları çıplak gözle izlenebileceği gibi daha önce belirtilen optik görüntüleme yöntemleri kullanılarak da görüntülenebilir.



Cihan Bayındır 2007'de Boğaziçi Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nden mezun oldu. İlk yüksek lisans derecesini 2009'da Delaware Üniversitesi Kıyı ve Okyanus Mühendisliği Bölümü'nden matematik yan dalıyla aldı. İkinci yüksek lisans derecesini 2011'de Georgia Teknoloji Enstitüsü Elektronik & Bilgisayar Mühendisliği Bölümü'nden matematik ve makina mühendisliği yan dallarıyla aldı. Georgia Teknoloji Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Hidrolik Kürsüsü'nde doktora adayı olarak araştırmalarını sürdürüyor. Doktora yan dallarını Matematik ve Elektronik & Bilgisayar Mühendisliği bölümlerinden radar görüntüleme üzerine aldı. Araştırma alanları okyanus elektroniği, sualtı akustiği, sinyal işleme, yapay ağırlıklı radar ve sonar, eğrisel dalga mekaniği, uydulu okyanusbilim, hesaplamalı matematik, paralel programlama, okyanus enerjisi ve uydular görüntüleriyle doğal afet izlemedir.

Gamma-Rapho / Getty Türkiye

Şekil 12'de içi sıcak su dolu bir kadehin üzerindeki havayı ısıtarak yoğunluğunu değiştirmesi ve bunun renkli iz görüntüleme yöntemi ile elde edilmiş görüntüsü görülüyor.

Akışkan görüntüleme teknikleri ve cihazları günümüzde hemen hemen tüm akışkanlar mekaniği laboratuvarlarının vazgeçilmezi. Bilim ve teknolojinin gelişimiyle yenilenen bu teknikler, her geçen gün artan kesinlik ve detayda sonuçlar üretiyor, yeni soruların sorulmasına

olanak sağlıyor. Plazma ve manyetik akışkanlar deneylerinde de sıklıkla kullanılan bu yöntemler, akışkanlar mekaniğinin kuramlaştırılmasına önyak olan deneysel verilerin en temel elde edilme yöntemleridir. Evrenin neredeyse tamamına yakınının plazmadan, akışkanlar ve gazlardan oluştuğu düşünüldüğünde, nano ölçekten gezegenler arası ölçeğe uzanan akışları görüntüleme yöntemlerinin insanoğlunun anlama macerasına ne kadar büyük bir katkıda bulunabileceği anlaşılabilir.



Şekil 12. Sıcak su dolu kadehin renkli iz fotoğrafı yöntemi ile elde edilen görüntüsü

Kaynaklar

- Fomin, N. A., *Speckle Photography for Fluid Mechanics Measurements*, Springer-Verlag, DE, 1998.
 Fuller, G. G., *Optical Rheometry of Complex Fluids*, Oxford University Press, 1995.
 Goodman, J. W., *Introduction to Fourier Optics*, Roberts & Company Publishers, 2004.
 Goldstein, R. J., *Fluid Mechanics Measurement*, Taylor & Francis, 1996.
 Komerath, M. N., *Equipment For a Flow Imaging And Control Laboratory*, Georgia Institute of Technology Technical Progress Report, 1994.
 Mach, E., *The Analysis of Sensations*, Dover Publications, 1959.
 Merzkirch, W., *Flow Visualization*, Academic Press, 1987.
 Mueller, T. J., *Aeroacoustic Measurements*, Springer-Verlag, DE, 2002.
 Santiago, J. G., Wereley, S. T., Meinhart, C. D., Beebe, D. J. ve Adrian, R. J., "A particle image velocimetry system for microfluidics", *Experiments in Fluids*, Sayı 25, s. 316-319, 1998.
 Smits, A. J. ve Lim, T. T., *Flow Visualization Techniques and Examples*, Imperial College Press, 2000.
 Song, W. ve Psaltis, D., "Optofluidic membrane interferometer:



Gamma-Rapho / Getty Türkiye

An imaging method for measuring microfluidic pressure and flow rate simultaneously on a chip", *Biomechanics*, Sayı 5-044110, 2011.
 Interaktif Terimler Sözlüğü, Türk Matematik Derneği, <http://tmd2.org/sozluk/>
<http://www.sugawara-labs.co.jp/english/strobo5.html>
<http://physrevphysiology.org/content/91/1/327/F2.expansion.html>
http://en.wikipedia.org/wiki/Schlieren_photography
<http://www.explainthatstuff.com/how-schlieren-photography-works.html>
<http://ecomodder.com/forum/showthread.php/schlieren-video-testing-aerodynamics-9441.html>
<http://www.enr.rukey.edu/~fml/gallery/gallery/truckandtrailer3.jpg>
<http://www.fks.de/index.php?id=1660&L=2>
http://www.nasa.gov/centers/ames/research/humaninspace/25th_shuttle.html
<http://www.fhwa.dot.gov/research/tfhrclabs/hydraulics/tfhrclab/physmodeling.cfm>
<http://bollerandchivens.com/?p=495>
http://www.efluids.com/efluids/gallery/gallery_pages/schlieren_conv_1.jsp