

BASINÇLI GİRDAP TİPİ BİR PÜSKÜRTEÇ İÇİNDEKİ ZAMANA BAĞLI AKIŞIN GÖLGE GÖRÜNTÜLEME YÖNTEMİ İLE İNCELENMESİ

Bülent Sümer*
TÜBİTAK-SAGE, Ankara

Nejdet Erkan†
Tokyo Üniversitesi, Tokyo

Oğuz Uzol‡ ve İsmail H. Tuncer§
ODTÜ, Ankara

ÖZET

Basınçlı girdap tipi püskürteçlerde, sıvı yakıt, teğetsel giriş pasajlarından girdap odasına beslenir. Püskürteç içine beslenen sıvı debisinin eşik değeri geçmesiyle, püskürtecin ekseni boyunca bir hava çekirdeği oluşur. Bu çalışmada, gerçek boyutlu, basınçlı, girdap tipi bir püskürteç içindeki su akışı, yüksek hızlı gölge görüntüleme tekniği kullanılarak görüntülenmiştir. Püskürteçler, içindeki su akışının hızlı kamera ile görüntülenebilmesi amacıyla, Plexiglas malzemenen üretilmiştir. Püskürteç içindeki akış, beş farklı debi değeri için görüntülenmiştir. Elde edilen görüntüler incelenmiş ve püskürteç ekseni boyunca oluşan hava çekirdeğinin nitel özellikleri belirlenmiştir. Hava çekirdeğinin çapının zamana bağlı değişimi, geliştirilen bir görüntü işleme programı yardımıyla, püskürteç ekseni boyunca yirmi farklı eksenel lokasyonda hesaplanmıştır. Zamana bağlı hava çekirdeği verileri kullanılarak her bir istasyonda farklı debi değerleri için ortalama hava çekirdeği çapı ve standard sapma değerleri hesaplanmıştır. Zamana bağlı olarak 20 farklı istasyonda elde edilen hava çekirdeği çapı verisinin frekansa göre incelenmesi amacıyla, Fourier dönüşümü kullanılmış ve genlik spektrumları elde edilmiştir.

GİRİŞ

Sıvı yakıtların yanması, yakıtların yanma alanlarının artırılması ve böylece yüksek karışım oranı ve buharlaşmaya ulaşılması için etkin atomizasyona bağımlıdır [Bavyel,1993]. Basınçlı girdap tipi püskürteçler üstün atomizasyon karakterleri ve göreceli olarak basit geometrileri sayesinde ucuz ve güvenilir püskürteç tipleri olarak ileri çıkmaktadır. Bu tip püskürteçlerin atomizasyon karakteristikleri, gaz ayarı konusunda önemli avantaj ve püskürteç başına yüksek itki verimi sağlamaktadır [Bazarov,2004]. Basınçlı girdap tipi püskürteçler, genellikle, püskürteç ekseninde akışkan bulundurmayan, oyuk koni şeklinde sprej meydana getirmektedir. Bu sprej tipinin, sıvı yakıtlı roket motorlarında oluşan alevi stabilize etme ve enjektör plakasını sıcak yanma sonu ürünlerinden koruma gibi avantajları vardır [Lefebvre,1983].

Basınçlı girdap tipi püskürteçlerde, yakıt, teğetsel giriş pasajlarından girdap odasına beslenir. Püskürteç içinde serbest yüzeyli bir sıvı girdabı oluşur. Oluşan serbest yüzeyin çapı, girdap odası başında en düşük değerini alır ve püskürteç boyunca artarak enjektör çıkışında en yüksek değerine ulaşır. Oluşan ince sıvı tabakası püskürteçten çıkar ve ince parçacıklara ayrılarak oyuk koni şeklinde bir sprej oluşturur.

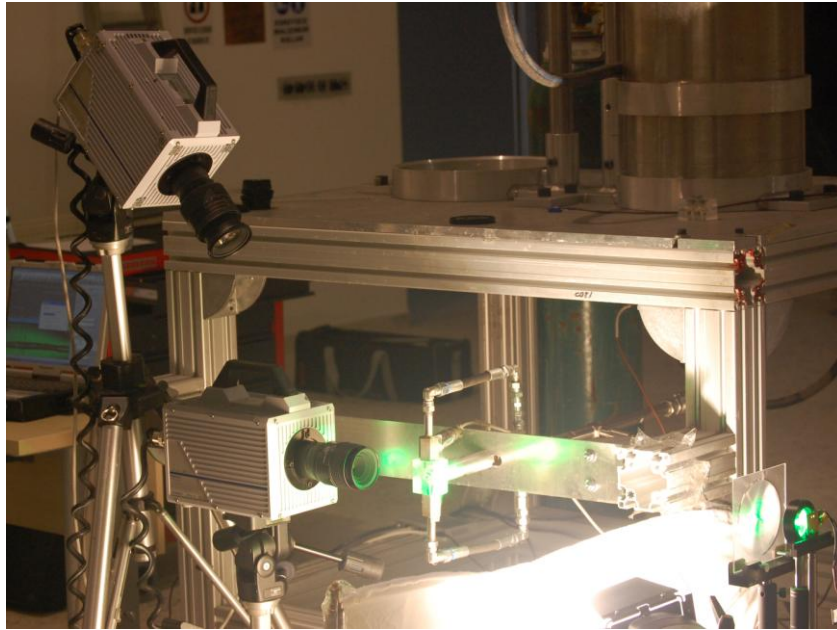
* Başuzman Araştırmacı, TÜBİTAK-SAGE, E-posta: bulent.sumer@tubitak.gov.tr
† Yrd.Doç.Dr., Tokyo Univeristesesi, E-posta: nejdetarkan@gmail.com
‡ Doç. Dr.,ODTÜ. , E-posta: uzol@metu.edu.tr
§ Prof. Dr.,ODTÜ, E-posta: tuncer@ae.metu.edu.tr

YÖNTEM

Test Düzeneği ve Test Püskürtücü

Testler TÜBİTAK-SAGE İç Balistik Tasarım Altyapısında bulunan Enjektör Test Düzeneği kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Enjektör test düzeneği 200 bar tasarım basıncına sahip 40 litre kapasiteli bir su tankı ve tank içindeki suyu basınçlandırmak amacıyla üzerine basınç regülâtörü takılı endüstriyel tip bir azot silindiri içermektedir. Püskürtece basılan su debisini kontrol etmek amacıyla iğne uçlu bir vana kullanılmakta ve türbin tip bir debi ölçer yardımıyla su debisi ölçülmektedir. Su tankından gelen ana su hattı püskürteçten önce ikiye ayrılmakta ve püskürtecin teğetsel giriş pasajlarına bağlanmaktadır. Püskürtecin teğetsel giriş pasajlarına giden her iki hat, bu hatlarda eş su debisi olup olmadığını kontrol etmek ve püskürteçteki basınç düşüşünü ölçmek amacıyla basınç duyargası ile donatılmıştır.

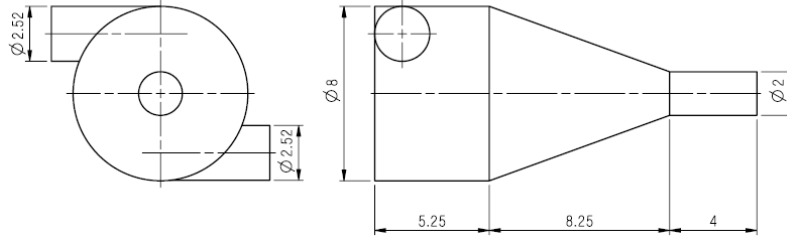
Basıncılı girdap tipi püskürteç içinde oluşan hava çekirdeğinin ve dışarıda oluşan spreyn görüntülenebilmesi için, senkronize şekilde çalışan iki hızlı kameralı, yüksek hızlı gölge görüntüleme sistemi kullanılmıştır (Şekil 1).



Şekil 1. Yüksek hızlı gölge görüntüleme sistemi.

60 mm 1:2.8 D lens ile kullanılan hızlı kamera (Kamera2) ile püskürteç içinde oluşan akış, 24-85 mm 1:2.8 4D lens ile kullanılan diğer hızlı kamerayla (Kamera1) ise oluşan oyuk koni şeklinde spreyn görüntülenmiştir. Püskürtecin arkadan aydınlatması ışık yoğunluğu ayarlanabilen ışık yayan diyot (IYD) yardımıyla yapılmıştır. IYD'den çıkan yeşil ışık bir set optik yardımıyla püskürtece yönlendirilmiştir. Spreyin arkadan aydınlatması için halojen lamba ve dağıtıcı perde kullanılmıştır. Kamera 1 ve Kamera 2 için etkin imge alanları sırasıyla 576x464 piksel (115x92 mm) ve 768x368 piksel (28x13 mm) dir. Her iki kamera için de imge örnekleme hızı 20 kHz örnekleme süresi 500 milisaniyedir.

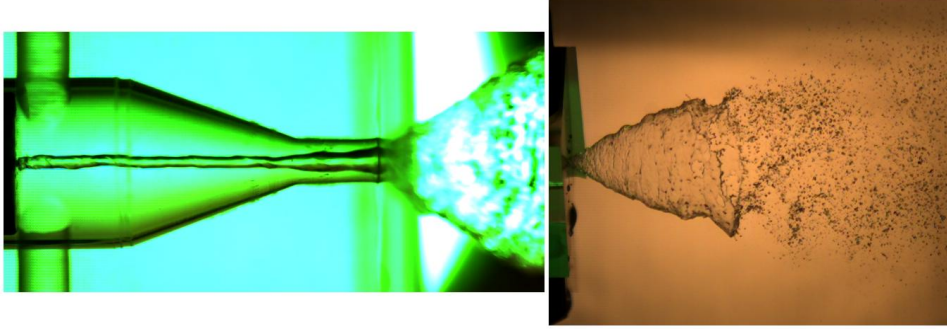
Bu çalışmada kullanılan basıncılı girdap tipi püskürtecin iç geometrik özellikleri Şekil 2'de verilmektedir.



Şekil 2. Basınçlı Girdap Tipi Püskürteç İç Geometrik Özellikleri (Bütün ölçüler milimetre (mm) cinsindedir).

İmge Yakalama ve İşleme

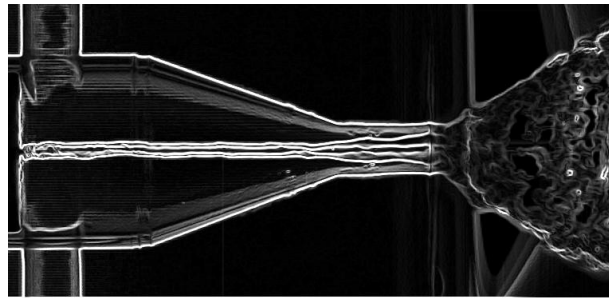
Püskürteç içindeki hava çekirdeğinin ve oluşan spreyn imgeleri Şekil 3'te verilmektedir. Şekil 3'te gösterilen imgeler incelendiğinde, imgelerdeki kenarların yüksek yoğunluk farkından farkından dolayı kolaylıkla ayırt edilebildiği gözlenmektedir. Hava ile suyun yoğunlukları arasındaki fark, hava çekirdeği kenarlarında ve spreyn kenarlarında karanlık bölgeler olarak ortaya çıkmaktadır.



Şekil 3. Püskürteç içindeki hava çekirdeği (sol) ve spreyn (sağ) imgeleri.

Püskürtecın herhangi bir aksenal lokasyonunda hava çekirdeği çapını elde edebilmek için kenar belirleme algoritmaları kullanılmıştır. Kenar belirlemenin ana amacı bir imgedeki keskin süreksizliklerin belirlenmesidir. Bu süreksizlikler piksel yoğunluğundaki ani değişimler sebebiyle oluşmaktadır ve bir imgedeki objenin kenarlarını karakterize etmektedir.

Hızlı kamera ile yakalanan imgeleri işlemek için bir imge işlemcisi geliştirilmiştir. İmge işlemcisi, RGB imgeleri siyah-beyaz imgelere dönüştürüp, Sobel kenar bulucu yardımıyla kenarları bulmakta (Şekil 4). ve iki kenar arasındaki mesafeden püskürteç boyunca herhangi bir aksenal lokasyondaki hava çekirdeği çapını hesaplayabilmektedir.



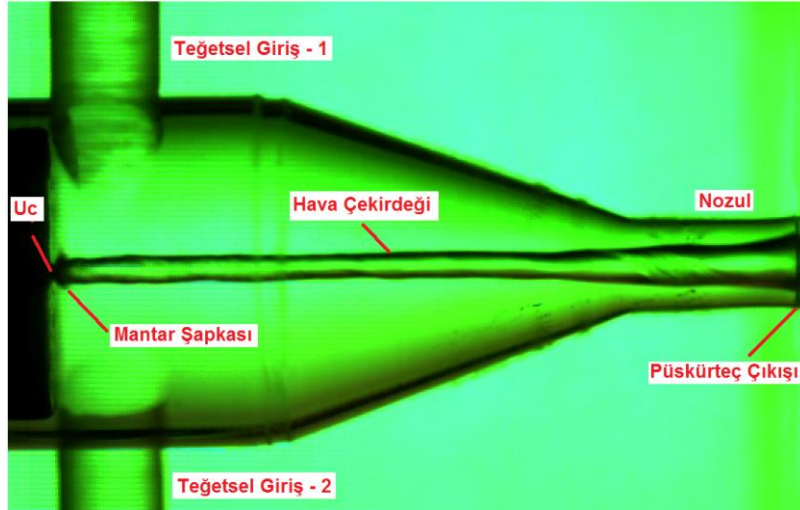
Şekil 4. -Sobel kenar bulucu uygulandıktan sonra. püskürteç içindeki hava çekirdeği imgesi.

UYGULAMA VE DEĞERLENDİRMELER

Hava Çekirdeğinin Gözlemlenmesi ve Nitel Karakterizasyon

Test püskürteci içinde hava çekirdeği oluşumu girdap kuvvetine bağlıdır. Test püskürteci içinde hava çekirdeği oluşması oldukça hızlı gerçekleşmektedir ve 1 lt/dak. altında debilerde bile püskürteç içinde hava çekirdeği gözlemlenmiştir [Sümer,2013]. Püskürtecın merkezinde ve eksenı boyunca oluşan hava çekirdeğının hareket ettiği ve üzerinde dalgalar olduğu gözlemlenmiştir. Hava çekirdeği üzerinde oluşan bu tip görüngüler daha önce birçok yazar tarafından rapor edilmiştir [Maatje,2001], [Cooper,2001], [Von Lavante,2002], [Sunghyuk,2009].

Test püskürteci içinde gözlemlenen hava çekirdeği bir matkap ucuna benzemektedir. Hava çekirdeği, püskürtecın kafa kısmında, mantar şapkasına benzer bir şekil ile sonlanmaktadır (Şekil 5). Hava çekirdeği çapı püskürtecın kafa kısmında minimumdur, kafa kısmından hemen sonra belirli bir değere artar ve girdap odası boyunca değişir. Nozul girişine doğru artmaya başlayan hava çekirdeği çapı püskürteç çıkışında en yüksek değerine ulaşır.

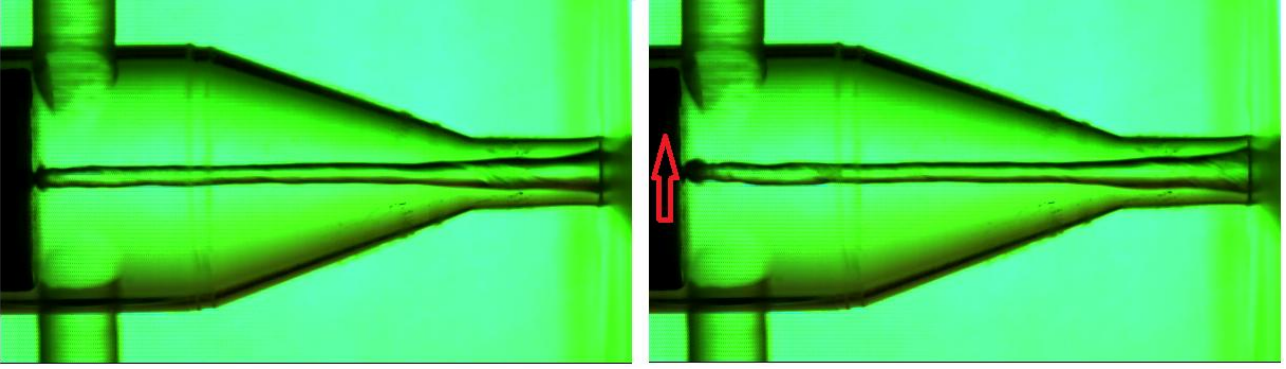


Şekil 5. -Püskürteç kafa kısmında oluşan mantar şapkası ve mantar şapkasının ucu.

Elde edilen görüntülerin incelenmesi sonucunda, hava çekirdeği üzerinde yüzey dalgaları, merkezkaç dalgaları ve kavitasyon dalgaları gözlemlenmiştir.

Eksen Sapması Hareketi

Hızlı kamera görüntülerinin incelenmesi sonucunda hava çekirdeğinin, mantar şapkası ucunu pivot noktası olarak kullanarak döndüğü gözlemlenmiştir. Dönü hareketine ek olarak mantar şapkasının püskürteç ekseninden kaydığı durumlarda gözlemlenmiştir (Şekil 6) . Şekil 6 da mantar şapkasının eksen sapması yaptığı yön kırmızı ok ile gösterilmiştir. Bazı durumlarda tam ters tarafa eksen sapmaları gözlemlense de, en fazla sapmanın yaşandığı durumda eksen sapması 1 mm değerini geçmemektedir.



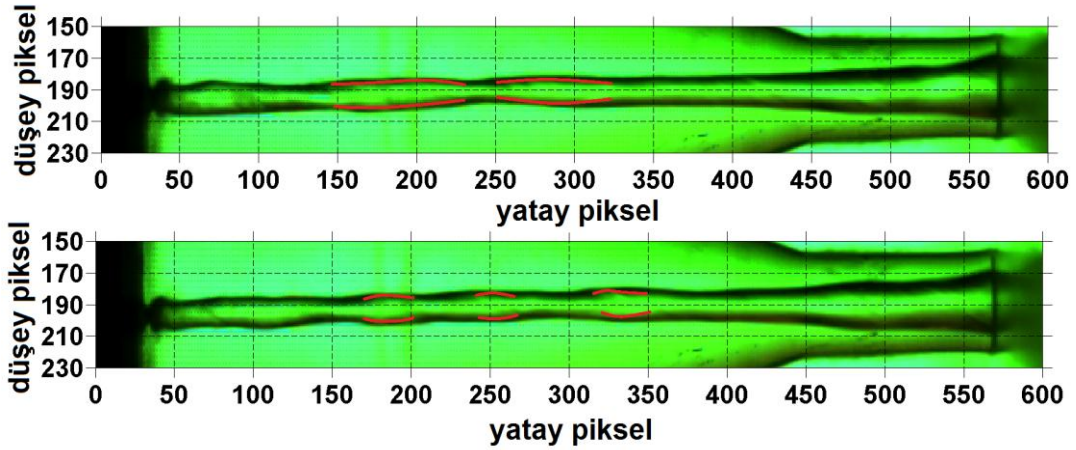
Şekil 6. Hava çekirdeği mantar şapkasının eksen sapması hareketi.

Hava Çekirdeği Üzerindeki Dalga Formları

Hızlı kamera ile yakalanan imgelerin incelenmesi sonucunda hava çekirdeği üzerinde üç farklı dalga formu tespit edilmiştir.

Serbest Yüzey Dalgaları:

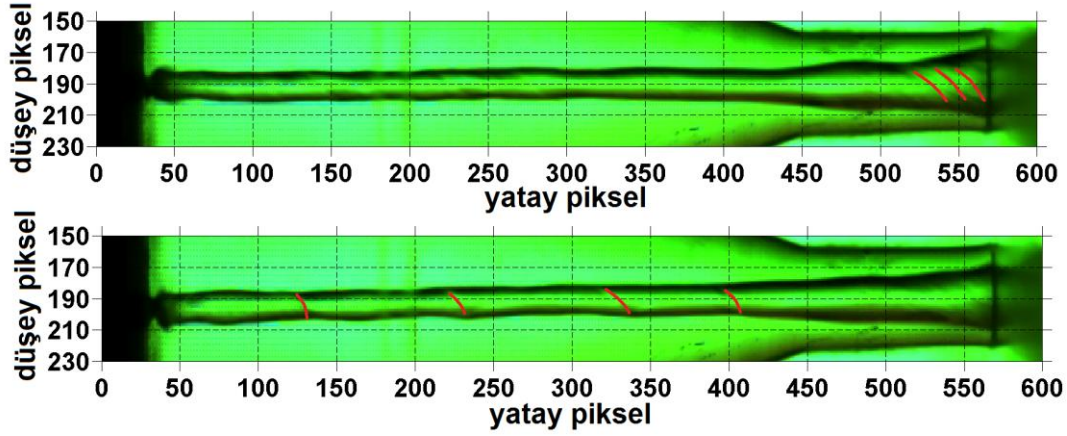
Hava çekirdeği üzerinde tespit edilen dalgalardan ilki Şekil 7'de gösterilen yüzey dalgalarıdır. Kısa ve uzun yüzey dalgaları püskürtecin girdap odası kısmında ve lüle kısmında gözlemlenmiştir.



Şekil 7. Serbest yüzey dalgaları.

Merkezkaç Dalgaları:

Hava çekirdeği üzerinde tespit edilen ikinci dalga şekli Şekil 8'de gösterilen merkezkaç dalgalarıdır. Bu tip dalgalar püskürtecin hem girdap odasında hem de nozulda gözlemlenmiştir. Nozulda gözlemlenen merkezkaç dalgaları ile girdap odasında gözlemlenen merkezkaç dalgalarının görünüşleri Şekil 8'de gösterildiği gibi farklılık göstermektedir.

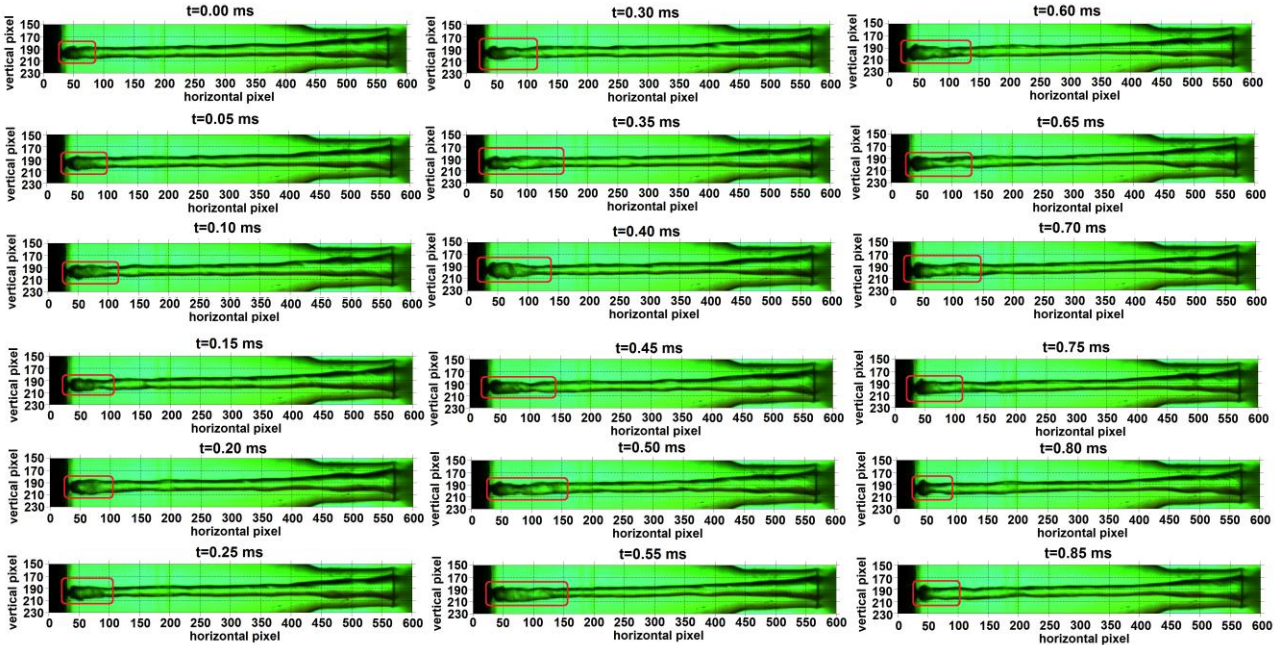


Şekil 8. Merkezkaç dalgaları.

Kavitasyon Dalgaları:

Hava çekirdeği üzerinde tespit edilen son dalga türü ise püskürtecin kafa kısmında oluşan kavitasyon dalgalarıdır. Kavitasyon dalgasının oluşumu Şekil 8'in ilk sütununda gösterilen ilk 3 imgede gösterilmiştir.

Basıncılı girdap tipi püskürtecin kafa kısmında oluşan dalgalanmaların kavitasyona sebep olabileceği değerlendirilmektedir. Başlangıçta ($t=0$) mantar kafasının şekli değişmiş ve sınırları $x=50$ piksel civarında olan bir dalga oluşmuştur. Dalganın sınırı 0.05 milisaniye (ms) içinde $X=75$ piksele 0.1 ms içinde ise $x=100$ piksele ulaşmıştır. Kavitasyon dalgası olarak adlandırılan bu dalga çoğu durumda daha fazla hareket etmemiş ve dalga sınırının ulaşabildiği en fazla aksel lokasyon $x=150$ piksel olarak gözlenmiştir.



Şekil 8. Püskürtecin kafa kısmındaki kavitasyon dalgaları.

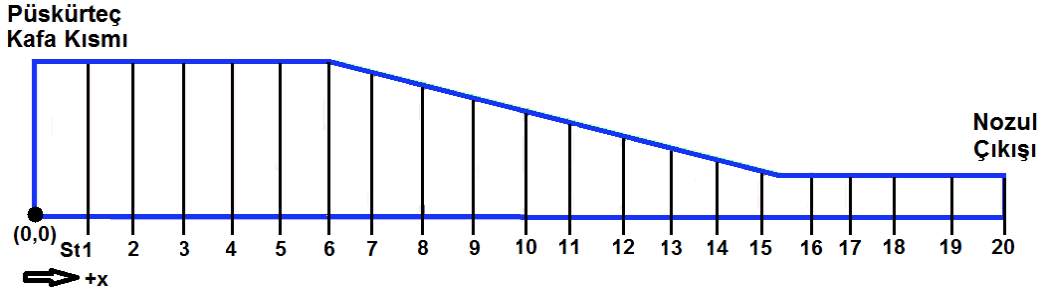
Sadece imgeleri inceleyerek periodik bir örüntü yakalanamamış, ancak püskürtecin kafa kısmına ait bir yüksek frekans dalga fenomeni belirlenmiştir.

Hava çekirdeği üzerinde belirlenen dalgaları ve bu dalgaların kombinasyonlarını hava çekirdeği üzerinde görmek mümkündür. Her üç dalganında ortak özelliği, hava çekirdeği üzerinde oluştukları

lokasyondaki hava çekirdeği çapında değişime yol açmaktadırlar. Bir sonraki bölümde hava çekirdeği çapının zamana bağlı değişimi nicel olarak incelenerek, hava çekirdeği üzerindeki dalga fenomeni daha iyi anlanmaya çalışılmıştır.

Hava Çekirdeği Çapının Nicel Karakterizasyonu

Geliştirilen imge işleme programı yardımıyla püskürteç eksenini boyunca 20 farklı istasyonda hava çekirdeği çapı zamana bağlı olarak hesaplanmıştır. Hava çekirdeği çapının hesaplandığı istasyonlar ve bu istasyonların aksenal lokasyonları Şekil 9 ve Tablo 1 'de verilmektedir.

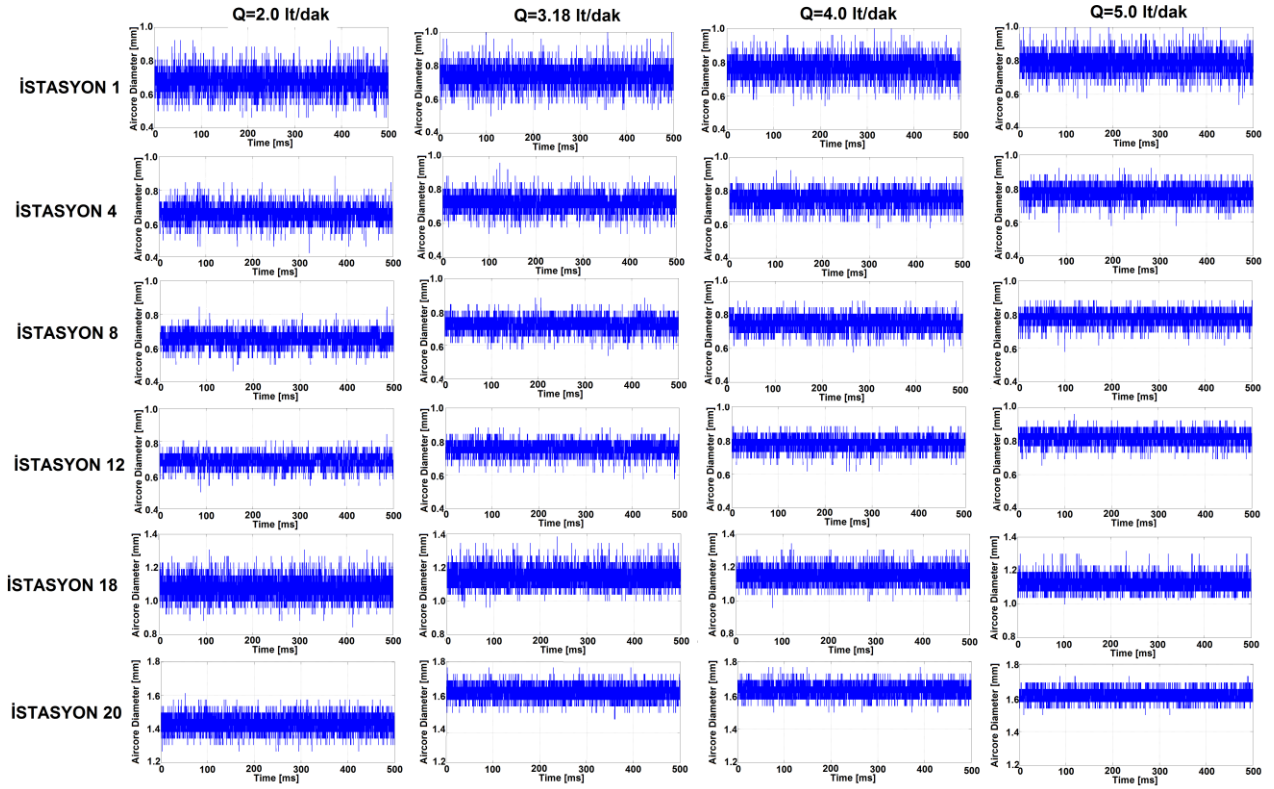


Şekil 9. Hava çekirdeği çapının hesaplandığı istasyonlar (St).

Tablo1. İstasyonların aksenal koordinatları

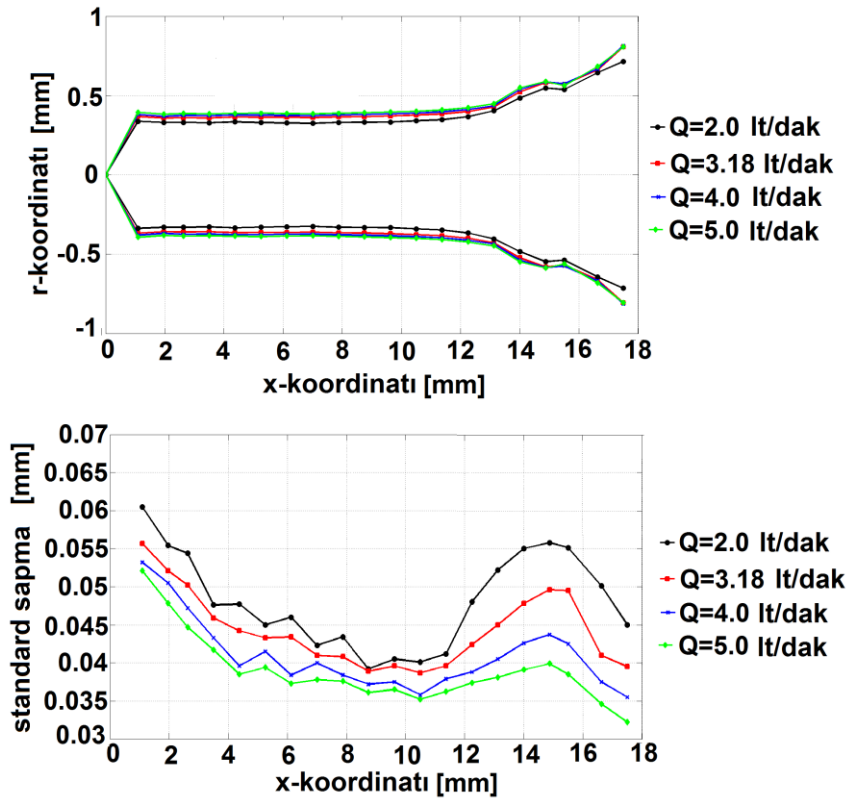
İstasyon Numarası	X - Koordinatı [mm]	İstasyon Numarası	X - Koordinatı [mm]
1	1.109	11	9.625
2	1.195	12	10.500
3	2.625	13	11.375
4	3.500	14	12.250
5	4.375	15	13.125
6	5.250	16	14.000
7	6.125	17	14.875
8	7.000	18	15.500
9	7.875	19	16.625
10	8.750	20	17.500

Hava çekirdeği çapının hesaplandığı ilk istasyon püskürtecin kafa kısmından sadece 1.109 mm uzaktadır. 3 numaralı istasyondan 18 numaralı istasyona kadar istasyonlar arası mesafe sabit ve 0.875 mm dir. 18 numaralı istasyon nozul ortasında 20 numaralı istasyon ise nozul çıkışıdır. Dört farklı su debisi değeri için altı farklı istasyondaki hava çekirdeği çapının zamana bağlı değişimi Şekil 10'da verilmiştir.



Şekil 10. Hava çekirdeği çapının zamana bağlı değişimi.

Zamana bağlı hava çekirdeği verileri kullanılarak her bir istasyonda farklı debi değerleri için ortalama hava çekirdeği çapı ve standard sapma değerleri hesaplanmıştır. Hesaplanan ortalama hava çekirdeği çapı ve standard sapma değerleri Şekil 11'de verilmiştir.

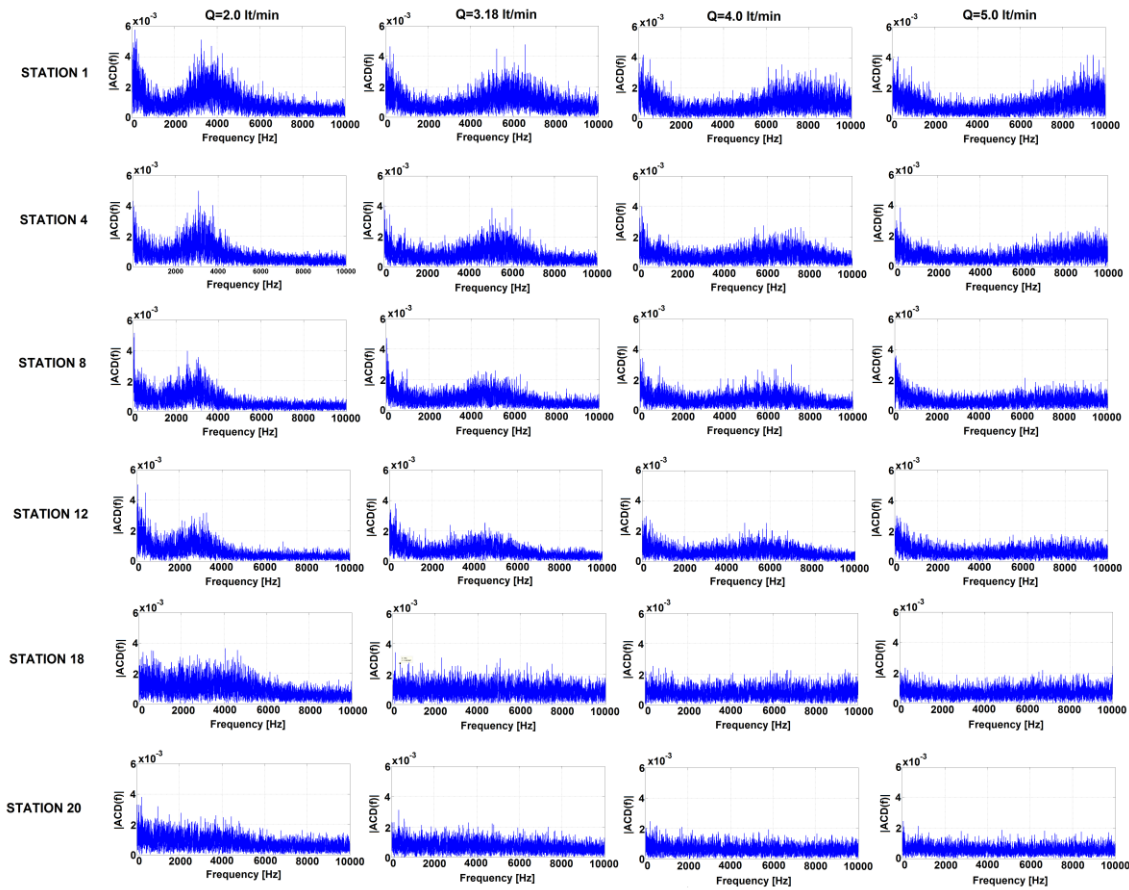


Şekil 11. Ortalama hava çekirdeği çapı ve standard sapması.

Şekil 11 incelendiğinde, püskürteç eksenı boyunca hava çekirdeği Őeklinin deđiŐik debi değerleri için neredeyse aynı olduğu görülmektedir. İstasyon 1 ile İstasyon 12 arasındaki istasyonlarda hesaplanan ortalama hava çekirdeği çapları hemen hemen sabittir ve debi değeri ile çok fazla deđiŐim göstermemektedir. 2.0 lt/dak debi değerı için hesaplanan hava çekirdeği çapı değerleri diğer debilerde hesaplanandan az olmakla beraber debinin 5.0 lt/dak değerine çıkması ortalama hava çekirdeği çapını çok fazla deđiŐtirmemiŐtir.

Hesaplanan standard sapma değerleri 2.0 lt/dak debi değerı için en fazladır. Her bir çalışma debisi için en yüksek standard sapma püskürtecın kafa kısmında (İstasyon 1) oluşmuştur. Püskürtecın kafa kısmından nozul kısmına doğru ilerledikçe standard sapma azalmıŐtır. İstasyon 12'den sonra artan standart sapma değerleri nozulun orta kısmına doğru en yüksek değerine ulaŐıp nozul çıkıŐına doğru daha düşük bir değere düŐmüŐtür.

Zamana bağlı olarak 20 farklı istasyonda elde edilen hava çekirdeği çapı verisinin frekansa göre incelenmesi amacıyla, Fourier dönüşümü kullanılmış ve genlik spektrumları elde edilmiştir. Dört farklı su debisi değerı için altı farklı istasyondaki hava çekirdeği çapının genlik spektrumları Şekil 12'de verilmiştir.



Şekil 12 Hava çekirdeği çapı genlik spektrumları.

Hava çekirdeği çapı genlik spektrumları baskın düşük ve yüksek frekans içeriğini açığa çıkarmıştır. Baskın yüksek frekans ve baskın düşük frekans tepelerinin genlikleri, püskürtecın kafa kısmına yakın istasyonlarda birbirleri ile karŐılaŐtırılabilir seviyelerdedir. Bütün debi değerleri için, yüksek frekans tepelerinin genlikleri, püskürtecın kafa kısmından nozul kısmına doğru ilerledikçe azalmaktadır ki, bu da yüksek frekans fenomeninin püskürtecın kafa kısmında oluşan akış fiziği ile alakalı olduğunu göstermektedir.

SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada basınçlı girdap tipi bir püskürteç içindeki akış alanı deneysel olarak incelenmiştir. Yüksek hızlı gölge görüntüleme sistemi kullanılarak elde edilen hava çekirdeği imgeleri incelenmiş ve püskürteç içindeki hava çekirdeğinin, püskürtecin kafa tarafında, mantar şapkası şeklini aldığı ve şapkanın uç kısmında dönme hareketinin yanı sıra radyal yönde de hareket ettiği gözlemlenmiştir. Ek olarak hava çekirdeği üzerinde serbest yüzey dalgaları, merkezkaç dalgaları ve kavitasyon dalgaları tespit edilmiştir. Geliştirilen imge işleme programı kullanılarak hava çekirdeği çapının nicel incelemesi yapılmıştır.

Bu çalışmada elde edilen başlıca sonuçlar aşağıda sıralanmaktadır;

- Test püskürteci içindeki hava çekirdeğinin, mantar şapkası ucunu pivot noktası olarak kullanarak döndüğü, dönme hareketine ek olarak radyal yönde eksenden sapma hareketi yaptığı gözlenmiştir.
- Test püskürteci içindeki hava çekirdeği üzerinde serbest yüzey dalgaları, merkezkaç dalgaları ve kavitasyon dalgalarının olduğu gözlenmiştir.
- Bütün aksenal istasyonlarda 2.0 lt/dak. debi değeri için hesaplanan ortalama hava çekirdeği çapı diğer debi değerleri için hesaplanandan küçüktür. Aynı şekilde 2.0 lt/dak debi değeri için hesaplanan standart sapmalar diğer debi değerleri için hesaplanandan daha büyüktür.
- 2.0 lt/dak debi değeri için standart sapma değerinin büyük olmasının başlıca nedeninin düşük akış hızları ve dolayısıyla suyun püskürteç içinde kalma zamanının yüksekliği olduğu değerlendirilmektedir.
- Püskürteç içinden geçen su debisi arttıkça istasyon gözetmeksizin hesaplanan hava çekirdeği çapı değerleri asimptotik davranış göstermektedir.
- Hava çekirdeği çapı genlik spektrumları baskın düşük ve yüksek frekans içeriğini açığa çıkarmıştır. Yüksek frekans içeriğinin püskürteç kafa kısmında oluşan akış fiziği ile alakalı olduğu düşünülmektedir.

Püskürtecin kafa kısmında dışarıdan içeri doğru akan hava ve teğetsel pasajlardan püskürtecin içine doğru akan su ve hava çekirdeği arayüzü bir duraklama bölgesi oluşturmaktadır. Duraklama bölgesinde atmosferden püskürtecin içine doğru gelen hava yön değiştirmekte ve hava-su arayüzünden dışarıya doğru yönlenebilmektedir. Diğer taraftan radyal olarak hava çekirdeğine doğru akmakta olan su hava çekirdeği ile karşılaştığında aksenal hız kazanmaktadır. Sonuçta püskürtecin kafa kısmında oluşan duraklama bölgesi içindeki hava-su arayüzünde yüksek frekansta salınımlar olduğu değerlendirilmektedir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma Türkiye Cumhuriyeti Kalkınma Bakanlığı tarafından fonlanan IBTA projesi kapsamında TÜBİTAK-SAGE tarafından desteklenmiştir.

Kaynakça

Bavyel L., Orzechowsk Z., Liquid Atomization, Taylor & Francis, Washington, DC, 1993, ISBN 0-89116-959-8.

Bazarov V., Yang V., Puri P., Design and Dynamics of Jet and Swirl Injectors, Book Chapter in Liquid Rocket Thrust Chambers: Aspects of Modeling, Analysis and Design, AIAA, Volume 200, Progress in Astronautics and Aeronautics, 2004, ISBN 1-56347-223-6.

Cooper A., Yule A.J., Waves on the Air Core/Liquid Interface of a Pressure Swirl Atomizer, 17th Annual Conference of ILASS-Europe, September 2001, Zurich, Switzerland.

Lefebvre A.H., Atomization and Sprays, CRC Press, Florida, 1989, ISBN 0-89116-603-3, pp 1.

Maatje, E., Von Lavante E., Albina F., Peric M., Experimental and Numerical Study of Simplex Nozzles, 17th Annual Conference of ILASS-Europe, September 2001, Zurich, Switzerland.

Sumer B., Erkan N., Uzol O., Tuncer I.H., Experimental Investigation of Flow Through a Pressure Swirl Atomizer and the Resulting Hollow Cone Spray at Different Operating Conditions., 7. Ankara International Aerospace Conference, 11-13 September 2013, Ankara, Turkey, AIAC-2013-023.

Sunghyuk K., Taeock K., Dongjun K., Youngbin Yoon E., Effect of Geometric Parameters on the Liquid Film Thickness and Air Core Formation in a Swirl Injector, Measurement Science and Technology, 20(1):015403, January, 2009.

Von Lavante E., Maatje U., Investigation of Unsteady Effects in Pressure Swirl Atomizers, 18th Annual Conference of ILASS-Europe, September 2002, Zaragosa, Spain.