



BASINÇ GİRDAPLI BİR PÜSKÜRTEÇTE DAMLACIK BOYUT DAĞILIMI VE HAVA ÇEKİRDEĞİ KARARSIZLIĞININ İNCELENMESİ

Tanju Ergen¹ ve Onur Tunçer²

^{1,2}İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul

ABSTRACT

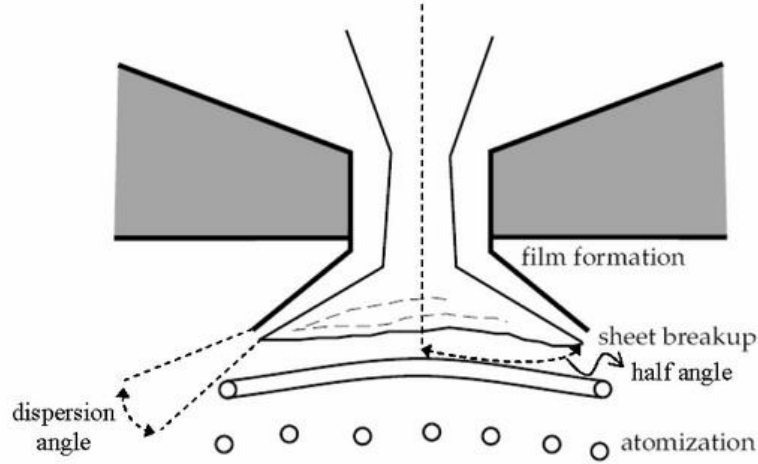
Pressure swirl atomizers are used in rocket engines with liquid propellants to spray fuel and oxidizer into the combustion chamber. In this study, flow inside the pressure swirl atomizer is investigated with computational fluid dynamics. Simulations are carried out using Volume of Fluid (VOF) method with axisymmetric boundary condition assuming flow is incompressible in two dimension. Pressure drop and half cone angle of investigated geometry found as 8 bars and 28 degrees for 5.3 g/s flow rate. Sauter Mean Diameter of the atomizer is calculated as 74.6 μm . Formation of Taylor vortices are observed near the swirl chamber walls. After flow became fully developed, pressure inside swirl chamber and air core diameter fluctuated over time. Dominant mode of pressure and air core diameter change was found 274 Hz and 47 Hz, respectively. Numerical solutions are consistent with experimental observations in literature.

ÖZET

Basınç girdaplı enjektörler sıvı yakıtlı roket motorlarında yakıt ve oksitleyicinin itki odasına püskürtülmesi için kullanılır. Bu çalışmada basınçlı girdap tipi püskürteç içindeki akış hesaplamalı akışkanlar dinamiği kullanılarak incelenmiştir. Zamana bağlı benzetimler iki fazlı laminer sıkıştırılmaz akış kabulü altında Sıvının Hacmi (VOF) metodu, iki boyutlu girdaplı eksenel simetrik çözüm ağı kullanılarak yapılmıştır. İncelenen geometri için püskürtecin basınç düşüşü 5.3 g/s için 8 bar ve yarım koni açısı 28 derece olarak bulunmuştur. Elde edilen sayısal sonuçlar işlenerek spreynin Sauter ortalama çapı 74 μm olarak elde edilmiştir. Girdap odasının duvar sınırlarına yakın bölgelerinde Taylor girdapları oluşmaktadır. Püskürteç içerisinde basınç ve hava çekirdeği çapı çalkantıları gözlenmektedir. Basınç çalkantılarının baskın modu 274 Hz civarında, hava çekirdeği çapı salınımlarının dominant modu ise 47 Hz civarındadır. Bu çalkantılar neticesinde spreynin koni açısı da modüle edilmektedir. Sayısal sonuçlar açık literatürdeki deneysel gözlemler ile uyumludur.

GİRİŞ

Enjektörler sıvı yakıtı küçük damlacıklar halinde atomize etmek için kullanılırlar. Atomizasyon bir sıvı jetinin yahut filminin bir lüleden akışı sırasında oluşan kararsızlığın büyümesi neticesinde birçok küçük damlacığa ayrışması olayıdır. Tasarımcı kendi uygulaması için uygun enjektör tipini seçmelidir. Buradaki önemli boyutsuz sayı Weber sayısıdır. Weber sayısını arttırmak daha kuvvetli bir kararsızlığı ve bunun karşılığında daha küçük damlacıkların oluşumuna yol açar. Yakıt damlacıklarının boyut dağılımı ve sprej geometrisi sıvı yakıtlı yanma odalarının performansına doğrudan etki eder. Yakıt enjektörlerinden çıkan damlacıkların boyutları birkaç mikrondan birkaç yüz mikrona kadar değişim gösterir [1].



Şekil 1. Atomizasyon Aşamaları

Basınçlı girdap tipi enjektörler üstün atomizasyon karakterleri ve basit geometrileri sayesinde ucuz ve güvenilir enjektörler olarak ileri tanınmaktadır. Basınçlı girdap tipi püskürteçlerde yakıt teğetsel olarak girdap haznesine beslenir. Geometrik olarak basit bir yapıda olmalarına karşın basınçlı girdap tipi püskürteçlerin içindeki hidrodinamik olaylar oldukça karmaşıktır. Püskürteç içinde oluşan hava çekirdeği, iç akışı bir serbest yüzey akışı haline getirir. Hava çekirdeğinden dolayı, yüksek hızla dönen ve çok kararsız bir sıvı katmanına sahip, içi boş koni şekilli sıvı oluşmuş olur [2]. Bu sıvı püskürtecin ağzından kendine özgü hidrodinamik kararsızlığından dolayı ince bir film tabakası formunda çıkar ve bağlarından ayrılarak damlalardan oluşan içi boş bir koni şeklini alır. Basınçlı girdap tipi püskürteçler oyuk koni şeklinde bir sprej oluşturmaktadırlar. Bu tip enjektörlerin aynı zamanda sıvı yakıtlı roket motorlarında oluşan alevi tutma ve enjektör plakasını sıcak yanma sonu ürünlerinden koruma gibi avantajları da bulunmaktadır [3]. Püskürteç içinde oluşan karmaşık akış fenomeni araştırmacıları basitleştirilmiş modeller kullanmaya yöneltmiştir. Erken çalışmalarda püskürteç içindeki akış ağdasız ve sıkıştırılamaz olarak modellenmiş ve analitik denklemler türetilmiştir [5]. Örneğin Taylor, girdap tipi püskürteçlerdeki potansiyel akış için en geçerli ve öncü çözümü ileri sürdü ve hava çekirdeğinin çapı ile sprej koni açısının ters fonksiyonlar (inverse functions) olduğunu, boşaltma katsayısının ise tek bir geometriye bağlı püskürteç sabiti (K_1) olarak tanımlı boyutsuz bir parametrenin fonksiyonu olduğunu tahmin etmiştir. Ancak Taylor'ın teoremi sadece basitleştirilmiş silindirik girdap odası için geçerliydi ve uygulamada karşılaşılan performans parametrelerine bağımlılığı açıklayamıyordu [6].

Çift fazlı akışları hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) metotları ile çözülebilmesi için geliştirilmiş birkaç yöntem bulunmaktadır. Bunlardan birisi de sıvının hacmi (VOF) metodudur. Sıvının hacmi yöntemi ilk defa Hirt ve Nichols tarafından geliştirilmiş olup bu yöntem çift fazlı akışların incelenmesinde oldukça sık kullanılır [7]. Büyük girdap simülasyonu (LES) gibi yöntemler atomizasyonu modellemede hesaplama yükü açısından son derece pahalı olacağından VOF yönteminin birçok endüstriyel ve akademik problem için çok daha uygun olacağı değerlendirilmektedir. VOF modellemesi için sınırlamalar aşağıda sıralanmıştır; VOF modeli boşluk bölgelere izin vermez yani bütün kontrol hacimleri ya tek bir fazdaki akışkan ile yada birden çok fazdan oluşan bir kombinasyon ile dolu olmalıdır, fazlardan sadece biri sıkıştırılabilir olabilir, VOF kullanıldığında birbiriyle karışabilen türler ve tepkimeli akışlar modellenemez.

ALAN DENKLEMLERİ ve FORMÜLASYON

Sıvının hacmi (VOF) iki veya daha fazla akışkanın birbirine karışmayacak şekilde modellenmesine dayanır. Fazlar arasındaki ara yüz (veya ara yüzler) takibi, süreklilik

denkleminin bir (veya birden çok) fazın hacim kesitleri için çözümüyle yapılır. Bu denklem q'nuncu faz için Eş.1'de ifade edilmektedir.

$$\frac{1}{\rho_q} \left[\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \rho_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) = \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp}) \right] \quad (1)$$

Hacim kesit denklemi ilk faz için çözülmez, birincil fazın hacim kesiti Eş.2'deki sınırlama ile hesaplanır. Böylece kütle korunumu garanti edilir.

$$\sum_{q=1}^n \alpha_q = 1 \quad (2)$$

Taşıma denklemleri ile ortaya çıkan özellikler, her kontrol hacmindeki bileşen fazların varlığıyla belirlenir. Örnek olarak, n fazlı bir sistemde hacim kesiti ortalama yoğunluğu şöyle bulunur;

$$\rho = \sum \alpha_q \rho_q \quad (3)$$

Tek bir momentum denklemi tüm çözüm ağı içerisinde çözülür ve sonuçta elde edilen hız alanı bütün fazlar arasında paylaşılır.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot [\mu (\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T)] + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (4)$$

Fazlar arasında paylaşılan bir diğer denklem olan enerji denklemi de aşağıda gösterilmiştir.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho E) + \nabla \cdot (\vec{v} (\rho E + p)) = \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T) \quad (5)$$

$$E = \frac{\sum_{q=1}^n \alpha_q \rho_q E_q}{\sum_{q=1}^n \alpha_q \rho_q} \quad (6)$$

Yüzey gerilimi için Brackbill'in ileri sürdüğü CSF (sürekli yüzey kuvveti) modeli kullanılmaktadır. Bu model ile, yüzey geriliminin ek olarak VOF hesaplamalarına dahil edilmesi momentum denkleminde bir kaynak teriminin eklenmesiyle sonuçlanır.

Yüzey gerilimi sabiti, σ

$$p_2 - p_1 = \sigma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (7)$$

Yüzey gerilimi hesaplarının etkileri üçgen ve dörtyüzlü çözüm ağlarında, altı ve çok yüzlü çözüm ağlarında olduğu kadar doğruluk göstermez. Bu yüzden yüzey gerilimi etkilerinin önemli olduğu bölgelerde dört ve altı yüzlü hücreler kullanılmıştır.

Yüzey geriliminin önemli olup olmadığına boyutsuz iki niceliğe bakarak karar verilir. Bunlar Reynolds numarası, Re , ile Capillary numarası, Ca , veya Reynolds sayısı ile Weber numarasıdır, We .

Re \ll 1 için diğer önemli nicelik Capillary sayısıdır;

$$Ca = \frac{\mu U}{\sigma} \quad (8)$$

Re \gg 1 için diğer önemli nicelik ise Weber sayısıdır;

$$We = \frac{\rho L U}{\sigma} \quad (9)$$

Faz q'nun hacim fraksiyonu α_q 'nın gradyanı olarak tanımlı yüzey normali \mathbf{n} ile gösterilirse;

$$\mathbf{n} = \nabla \alpha_q \quad (10)$$

Eğrilik κ ,

$$\kappa = \nabla \hat{n} \quad (11)$$

Aşağıdaki hacimsel kuvvet, momentum denklemine eklenen kaynak terimidir.

$$\mathbf{F} = \sum_{\text{pairs } ij, i < j} \sigma_{ij} \frac{\alpha_i \rho_i \kappa_j \nabla \alpha_j + \alpha_j \rho_j \kappa_i \nabla \alpha_i}{\frac{1}{2} (\rho_i + \rho_j)} \quad (12)$$

Boşaltma katsayısı,

$$C_D = \frac{\dot{m}}{\pi r_0^2 \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho_l}}} \quad (13)$$

Reynolds ve Weber sayıları,

$$Re = \frac{\rho_l V_l t \cos \alpha}{\mu_l} \quad (14)$$

$$We = \frac{\rho_g V_{rel}^2 t \cos \alpha}{\sigma} \quad (15)$$

Burada α sprej-yarı açısını, t film kalınlığını, V_L ve V_{rel} ise sırasıyla filmin toplam hızı ve hava ve suyun birbirine karşı olan göreceli hızını ifade etmektedir.

Damlacıkların ortalama boyutu Sauter Ortalama Çapı (SMD) kullanılarak belirtilir. Bu çaptaki bir damlacık bütün sprejin hacim alan oranına sahiptir. SMD boyutunun önemi damlacık buharlaşma/yanma oranının yüzey ile buharlaşan/yanan kütlenin de hacim ile orantılı olmasından ileri gelir.

$$SMD_1 \propto (Re * \sqrt{We})^a * (t \cos \alpha) \quad (16)$$

$$SMD_2 \propto (We)^b * (t \cos \alpha) \quad (17)$$

Lefebvre bu konuda geniş bir araştırma yaparak yukarıdaki ampirik sabitlerin değerine karar vermiştir[8].

$$SMD = \left\{ 4.52 * (Re * \sqrt{We})^{-0.5} + 0.39 * (We)^{-0.25} \right\} * (t \cos \alpha) \quad (18)$$

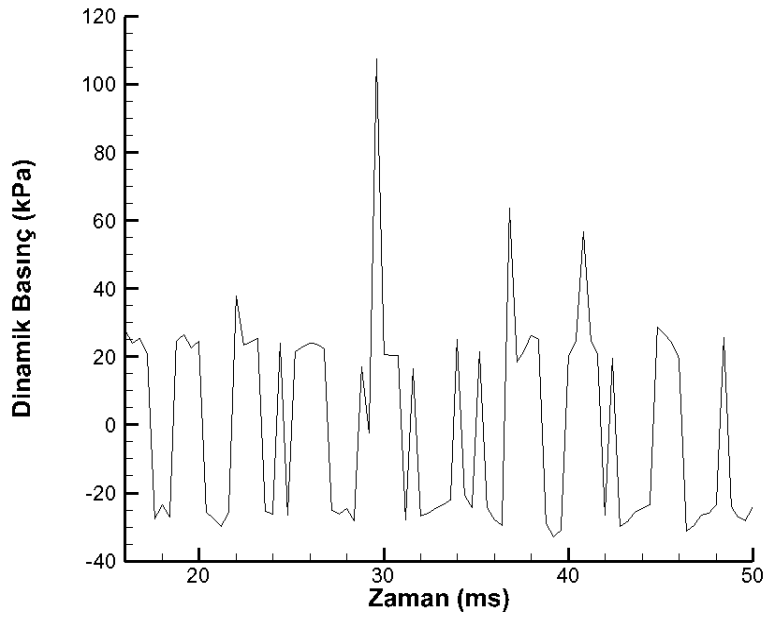
Kütle debisi sınır koşulunda başlangıç gösterge basıncı olarak 6.87 bar atanmıştır ve toplam kütle giriş debisi 0.053 kg/s olarak verilmiştir.

SAYISAL SONUÇLAR

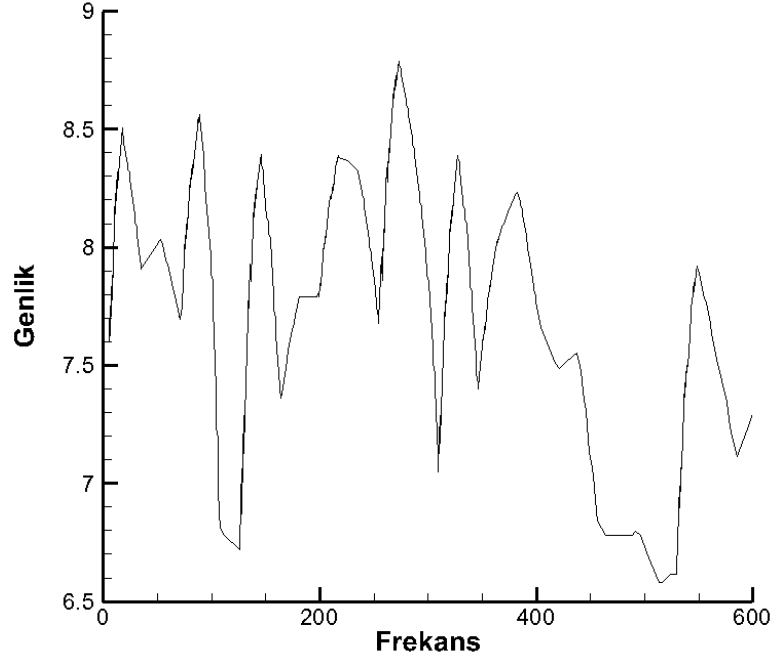
Modellediğimiz püskürtecin girdap odası çapı 8 mm, toplam uzunluğu 17.5 mm, toplamda 2 tane bulunmak üzere sıvı giriş yuvalarının çapı 2.52 mm ve son olarak ise çıkış çapı 2 mm'dir. Toplamda dört farklı grid oluşturularak, çözümün sonuçlarının hücre sayısından bağımsız olduğu teyid edilmiştir. Hücreler duvar kenarlarında ve hava çekirdeğinin oluşacağı kısımda, özellikle kararsızlığın oluşacağı girdap odasının ucunda mümkün olduğunca yoğunlaştırılmaya çalışılmıştır. Yeterli olmayan hücre sayısı, girdap odasının kenarında oluşacak kararsızlığın kendi kendini sönmemesine neden olabilir. Bu ilk iki çözüm aşısında görülmüştür.

Basınç Değişimi

Hava çekirdeğine yakın bir noktada basınç değişimi zamana bağlı olarak gözlemlenmiş ve bu değişim Hızlı Fourier dönüşümü yapılarak aşağıda gösterilmiştir. Spektral analiz sonucunda baskın mod 274.3 Hz olarak bulunmuştur.



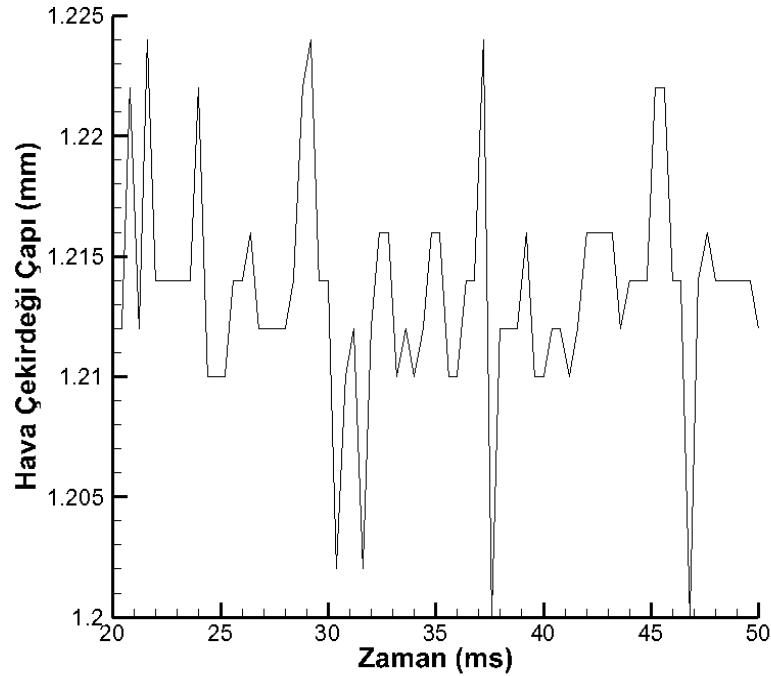
Şekil 2. Enjektör İçerisinde Bir Noktada Basıncın Zamana Bağlı Değişimi



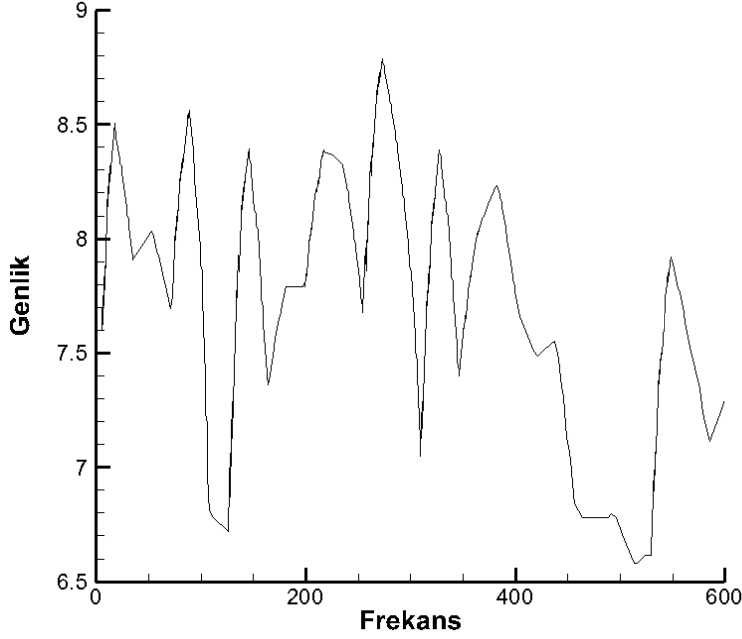
Şekil 3. Dinamik Basıncın Spektral Analizi

Hava Çekirdeği Kararsızlığı

Basıncı değişimi ile aynı şekilde hava çekirdeği çapının zamanla değişimi de gözlemlenmiş ve Hızlı Fourier dönüşümü yapılarak aşağıda gösterilmiştir. Spektral analiz sonunda baskın mod 46.8 çıkmıştır.

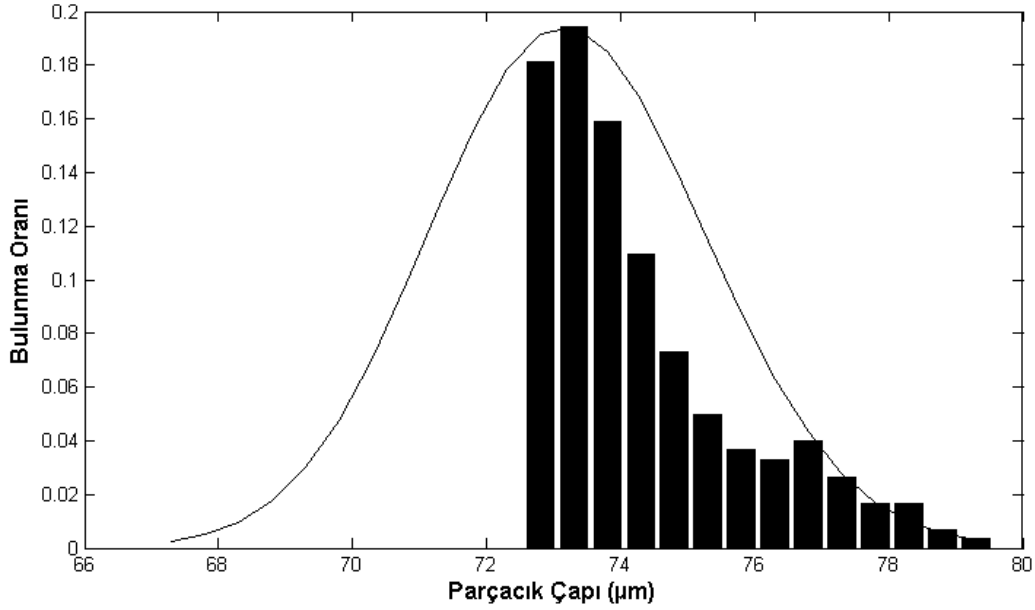


Şekil 4. Hava Çekirdeği Çapının Zamana Bağlı Değişimi



Şekil 5. Hava Çekirdeği Çapı Değerlerinin Spektral Analizi Sonucu

Damlacık Çapı



Şekil 6. Damlacık Çapı Dağılımı

Bu verilerden Ortalama Damlacık Çapı 74.6 μm olarak hesaplanmıştır ve grafik üzerinden ortalama sapması 0.028 ve standart sapması 4.2933 olan log-normal dağılım eğrisinin geçirilmiştir.

SONUÇLAR

Basıncılı girdap tipi püskürtecimizde suyun çıkış hızı yaklaşık olarak 43 m/s civarındadır. Püskürteç içerisinde ölçülen en büyük teğetsel hız değeri ise, hava çekirdeğine yakın bir bölgede, 38 m/s olarak ölçülmüştür. İncelenen geometri için püskürtecin basınç düşüşü 5,3 g/s

kütle debisi için 8 bar ve yarım koni açısı 28° derece olarak bulunmuştur. Sayısal sonuçlar açık literatürdeki deneysel gözlemler ile uyumludur. Elde edilen diğer sonuçlar, enjektörün çıkış ağzında elde edilen maksimum Reynolds sayısı 12.3×10^3 ve maksimum Weber sayısı ise 8.4 olarak bulunmuştur. İncelenen akış koşulu için boşaltma katsayımız, C_D , 0.421 olarak hesaplanmıştır.

KAYNAKLAR

- [1] Lefebvre A.H., Atomization and Sprays, CRC Press, Florida, ABD, 1989
- [2] P. Li, J. Lam, K.C. Cheung, Multi-objective control for active vehicle suspension with wheelbase preview, *Journal of Sound and Vibration*. 333 (2014) 5269–5282. doi:10.1016/j.jsv.2014.06.017.
- [3] Nouri-Borujerdi, A. ve Kebriaee, A., “Numerical Simulation of Laminar and Turbulent Two-Phase Flow in Pressure-Swirl”, AIAA JOURNAL, Cilt 50, No.10, 2012
- [4] Bazarov V., Yang V., Puri P., “Design and Dynamics of Jet and Swirl Injectors”, Liquid Rocket Thrust Chambers: Aspects of Modeling, Analysis and Design, AIAA, Cilt 200, Progress in Astronautics and Aeronautics, 2004.
- [5] Abramovich G.N., The Theory of Swirl Atomizer, Industrial Aerodynamics, BNT ZAGI, Moskova, 114-121, 1944.
- [6] Taylor G.I., “The Mechanics of Swirl Atomizers”, International Congress of Applied Mechanics, Londra, 1948.
- [7] Hirt, C.W., Nichols, B.D., “Volume of Fluid Method for the Dynamics of Free Boundaries”, J. Computational Physics, 39, 201-225, 1981.
- [8] Lefebvre A.H., “The Prediction of Sauter Mean Diameter for Simplex Pressure Swirl Atomizers”, Atomization Spray Technol., Vol. 3, No. 1, 1987.