

KATI YAKITLI ROKET MOTORLARINDA KULLANILAN ATILABİLİR LÜLE SİSTEMLERİNİN KAVRAMSAL FAZDA DENEYSEL VE SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ

Mehmet Safa Aysan¹
ODTÜ/Roketsan AŞ, Ankara

Özge Başkan²
ODTÜ Havacılık ve Uzay Mühendisliği, Ankara

ÖZET

Bu çalışmada amaç roket motorlarında kullanılan ve lüle geometrisini değiştiren “atılabilir lüle” konsepti ve bu konseptin tüm sistem üzerindeki etkilerinin incelenmesidir. Çalışma iki ana bölümden oluşur: lüle atılma anının modellenmesi ve soğuk akış testleri ile bu modelin doğrulanması. Lüle atılma anının öncesi ve sonrasında motor iç basıncının ve itkinin zamana bağlı değişimi temel hareket denklemleri, boyutsuz ses üstü iç akış denklemleri ve geometrik parametreler kullanılarak modellenmiştir. Soğuk akış testlerinde sistemdeki zamana bağlı itki ve basınç değişimi sırasıyla yük hücreleri ve basınç sensörü ile ölçülmektedir. Elde edilen ilk sonuçlara göre lülenin roketten ayrılma zamanını belirleyen en önemli etmenler iç basınç, atılabilir lülenin kütlesi ve roket motoru/atılabilir lüle arasındaki temas yüzeyinin sızdırmazlık mesafesidir. Lüle roketten ayrıldıktan sonra iç basınç düşerken itki önce artmakta sonra azalmaktadır.

GİRİŞ

Roket motorları faydalı yükleri, sadece kendi içinde barındırdığı yakıtı kullanarak taşıyan ya da hızlandıran sistemlerdir. Yanmanın gerçekleşmesi için atmosfere ihtiyaç duymayan bu motorlar havada, su altında ya da uzayda çalışabilmektedir. Yüksek hızlara çıkabilme, yüksek ivmeye sahip olma ve atmosfere ihtiyaç duymamaları bu motorların en büyük özelliklerindedir.

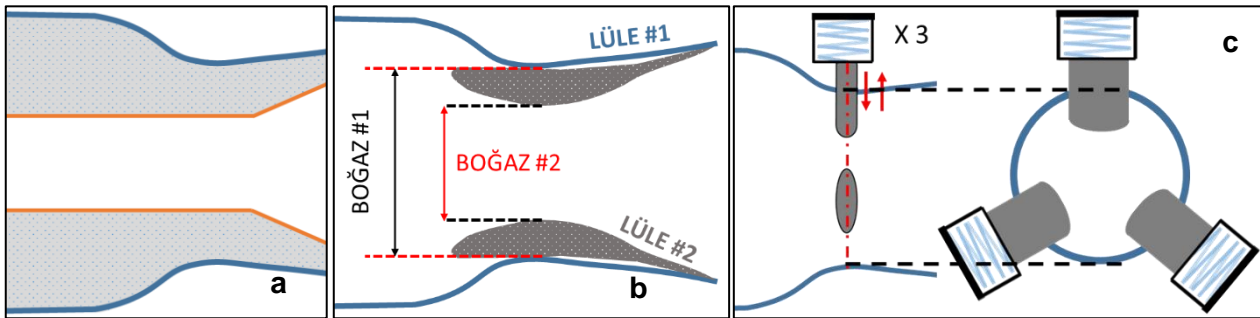
Katı yakıtlı roket motorlarında yakıt, yanma odası içinde katı halde bulunur. Sistemin oluşturması beklenen itki; yanma odası, yakıtın kimyası, zamanla değişen yanma yüzeyi profili ve motorun lülesi ile doğrudan ilgilidir. Yanma odası yakıtın tamamını içinde bulundurmakta ve motor çalışırken basınçlanmaktadır. Yakıt kimyası yanma ürünlerinin özelliklerini belirlemektedir. Yanma sürecinde yakıt yönünde ilerleyen yanma yüzeyinin zamana bağlı değişen geometrisi geriye yanma profili olarak adlandırılmaktadır. Bu profil zamanla yanan yakıt miktarını belirler. Lüle ise yanma odası içinde oluşan yanma ürünlerini hızlandırarak sistemi tahliye etmeye yarar. İç basınç, tahliye edilen debi, çıkış basıncı gibi akış özellikleri lüle geometrisi ile bağlantılıdır. Lüle geometrisinde basıncı etkileyen özelliklerden biri boğaz alanıdır. Boğaz akışın maruz kaldığı en dar alandır, akış bu alandan geçerken boğulur ve bu şekilde boğaz alan akışı büyük oranda etkiler.

¹ Mehmet Safa Aysan, İtki Sistemleri Tasarım Mühendisi, Roketsan AŞ., E-posta: safa.aysan@metu.edu.tr

² Dr. Öğr. Üy. Özge Başkan, ODTÜ Havacılık ve Uzay Müh. Böl., E-posta: obaskan@metu.edu.tr

Motorlarda çeşitli nedenlerden dolayı itki profilini değiştirmek ya da iç basıncı düşürmek istenebilir. Bu nedenler başlıca şunlardır: yanma odasında gözlemlenen istenmeyen basınç artışı, motorun ürettiği itkiyi düşürmek (örneğin, ivmelenme fazından seyir fazına geçirmek) ya da yakıt yanarken itkiyi sonlandırmak. Bu değişikliklerin yakıt geometrisi ya da kimyası ile istenilen bir biçimde yaratılamayacağı durumlarda çözüm lüle geometrisinin değiştirilmesinde aranabilir.

Lüle geometrisinin değiştirilmesi 3 farklı şekilde sağlanmaktadır. Bunlardan ilki, lüle konturunun yakıt ile verilmesi [Özer, 2015], yakıt geriye doğru yanarken lülenin alanının değiştirilmesi ve yanma bitince geriye büyük boğaza sahip bir lülenin kalmasıdır (Şekil1.a). İkinci yaklaşım ise bir adet büyük boğaza sahip lülenin içine küçük boğaza sahip başka bir lülenin yerleştirilmesidir [Harrison, 1967]. İçteki lüle istenilen bir anda sistemden atılabilecek ve geriye dıştaki lüle kalacaktır. Bu seçenekte boğaz alanı iki farklı değere sahip olabilecektir (Şekil1.b). Lüle geometrisinin değiştirilmesi konusundaki son seçenek ise değişken alanlı lüle sistemi kullanmaktır [Hughes, 1961]. Bu sistemlerde boğaz alanı istenilen şekilde manipüle edilip en büyük ve en küçük boğaz alanı arasında sürekli bir şekilde değiştirilebilir (Şekil1.c).



Şekil 1: Değişken çaplı lüle çözümleri (sırayla) a, lülesiz; b, daldırılmış lüle, c; değişken çaplı lüle

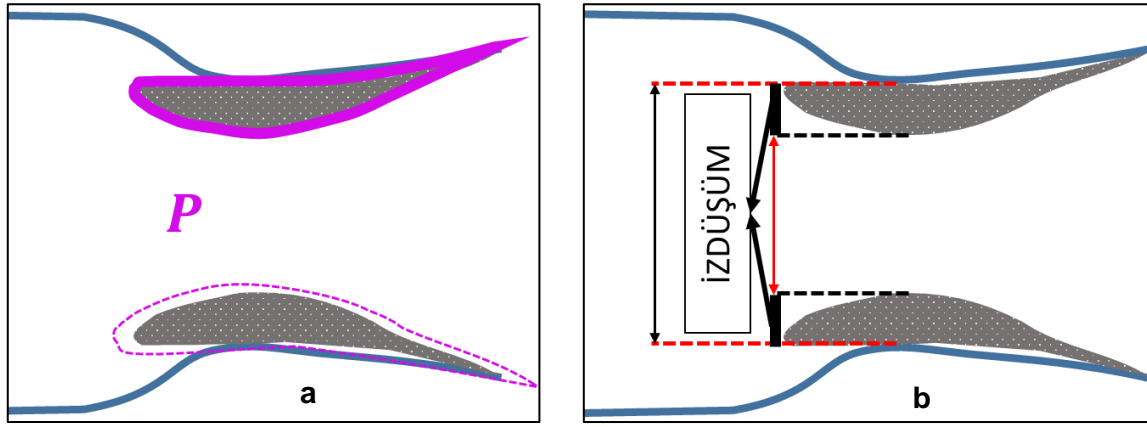
Bu çalışmada ikinci seçenekte sunulan daldırılmış, atılabilir lüle alternatifi incelenmektedir. Daldırılmış lüle yanma odasında bulunup atılabilen bir alt sistem olduğu için tüm sistemin karmaşıklığını arttırmakta ve performansını etkilemektedir. Atılabilir lüle mekanizması motor çalışma basıncına dayanabilmeli ve istenilen basınçta atılabilmelidir. Atılma anında oluşması beklenen ani darbenin doğru şekilde analiz edilmesi ve öngörülmesi, yer testleri ve uçuş sırasında karşılaşılabilecek olumsuzlukların önüne geçmek için önemlidir. Bu çalışma lüle atılma anının modellenmesi ve soğuk akış testleriyle modelin ve tasarlanan bağlantı mekanizmasının doğrulanması üzerine olacaktır.

YÖNTEM

Lüle atılma anının modellenmesi

Lüle atılma anında sistemden ani bir şekilde bir kütle ayrılmakta ve bu atılma sırasında ve sonrasında ortaya çıkan, eskiye göre daha büyük alana sahip yeni boğaz ile birlikte iç basınç hızlı bir şekilde düşmektedir. Boğazdan geçen anlık kütsel debi ve lüle iç basıncı 1 ve 2 numaralı denklemlerle bulunabilir. Lüle boğazında akış boğulduğundan kütsel debi ideal sıkıştırılabilir gaz için kullanılan izentropik akış varsayımına dayanan denklemle (1) hesaplanır. 2 numaralı denklem ise iyi bilinen ideal gaz denklemidir.

Atılma sırasında anlık yüksek bir itkinin oluşması beklenmektedir. Sistemin maruz kalacağı yükü bulabilmek için hesaplanması gereken iki önemli unsur vardır: en yüksek itki ve bu sırada geçen süre. Atılabilir lüle serbest bırakılıp hareketine başladığında iki lüle arasındaki temas yüzeyinde bulunan sızdırmazlık elemanı nedeniyle ani basınç düşüşü gerçekleşmez, yalnızca atılabilir lüle hareketine başlar ve yanma odasındaki kontrol hacmi artar. Atılabilir lüleyle etki eden kuvvet, atılabilir lüleyi çevreleyen kontrol hacimdeki basınç dağılımının yüzey integrali ile bulunur (Şekil 2a) (3a). Tüm geometri üzerindeki basınç dağılımının yüzey integralinin hesaplanması işlem yükünü arttıracığı için kavramsal fazda tercih edilmeyebilir. Bunun yerine lülenin yüksek basınç altındaki ön yüzeyinin izdüşümü lülenin üstüne binen kuvveti hesaplamada kullanılabilir (Şekil 2b) (3b). Lülenin hareketini modellemek için kullanılan denklemler ve denklemlerde kullanılan terimler Tablo 1'de verilmektedir.



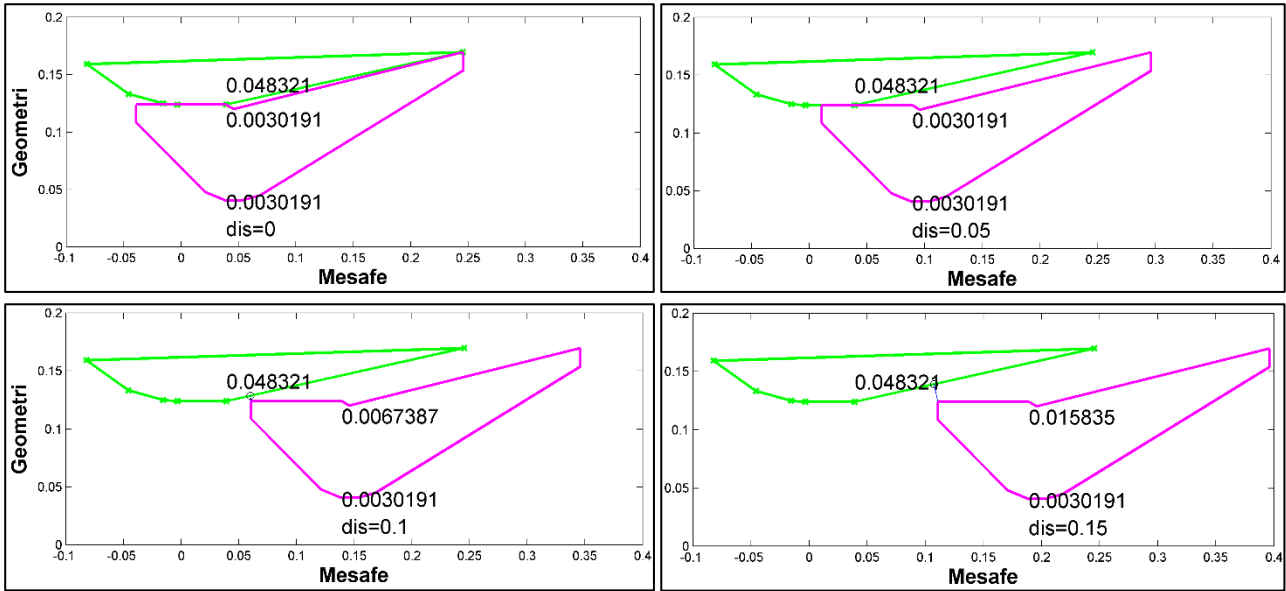
Şekil 2: Atılabilir lüle kontrol hacmi (a) ve indirgenmiş alan (b)

Tablo 1: Lülenin hareketini modellemek için kullanılan denklemler (sol) ve denklemlerde kullanılan terimler (sağ)

$\dot{m} = \frac{A^* P_0}{\sqrt{T_0}} \sqrt{\frac{\gamma}{R}} \left(\frac{\gamma + 1}{2} \right)^{-\frac{\gamma+1}{2(\gamma-1)}} \quad (1)$	\dot{m} Kütlesel debi
$P_{0,yeni} = \frac{(m - \dot{m}\Delta t)}{V} RT \quad (2)$	A^* Boğaz alanı P_0 Durağan iç basınç T_0 Durağan sıcaklık
$\sum F = \oint P ds = m \times a \quad (3a)$	γ Özgül ısı oranı R Gaz sabiti
$\sum F = P_c \times A_{izdüşüm} = m \times a \quad (3b)$	F Kuvvet Δt Zaman adımı V İç hacim

Akışın geçtiği boğaz alanının değişmesi ancak lülenin gövdeye göre belli bir mesafe kat etmesi ile mümkündür. Bu iç ve dış lüle arasındaki sızdırmazlığın biteceği mesafedir ve geometrik bir girdi olarak düşünülebilir. Açıklık oluşmaya başladığı anda efektif boğaz alanı değişmeye başlar. Bu anda sistem hem yanma odası kontrol hacmi değişimi nedeniyle hem de değişen boğaz alanı nedeniyle ani bir itkiye maruz kalır. Bu etki efektif boğaz alanı, dış lülenin boğaz alanından büyük olana kadar devam eder. Atılabilir lüle bu mesafeye ulaştıktan sonra sistemden kurtulmuş olur ve sistem üstündeki etki yalnızca dış lüle geometrisine bağlı olur.

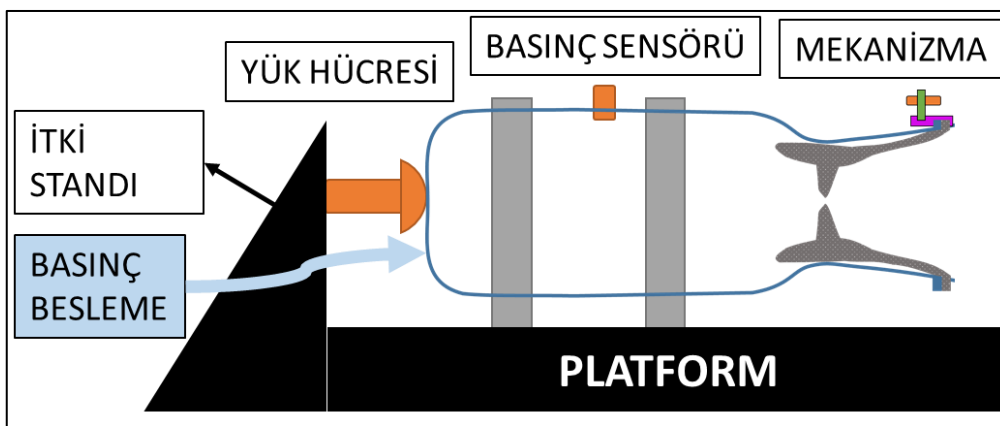
Şekil 3'te lülenin atılma anı gösterilmektedir. Lüle pembe şekil ile temsil edilirken gövde yeşil şekille temsil edilmektedir. Şekilden de görüleceği üzere lüle gövdeye göre akış yönünde hareket ediyor ve buna bağlı olarak yanma odası kontrol hacmi değişiyor olsa da t_3 anına kadar gövdeyle temas halinde olduğundan boğaz alanı değişmemektedir. t_3 anından sonra atılabilir lüle ve gövde arasında ikincil bir boğaz oluşur. Lüle boğaz alanı ve ikincil boğaz alanı toplamı dış lülenin boğaz alanına eşit olana kadar bu bölge boğaz olarak kabul edilir. Sonrasında dış lüle akış koşullarını belirler.



Şekil 3: Farklı mesafelerde lüle konumlanmaları

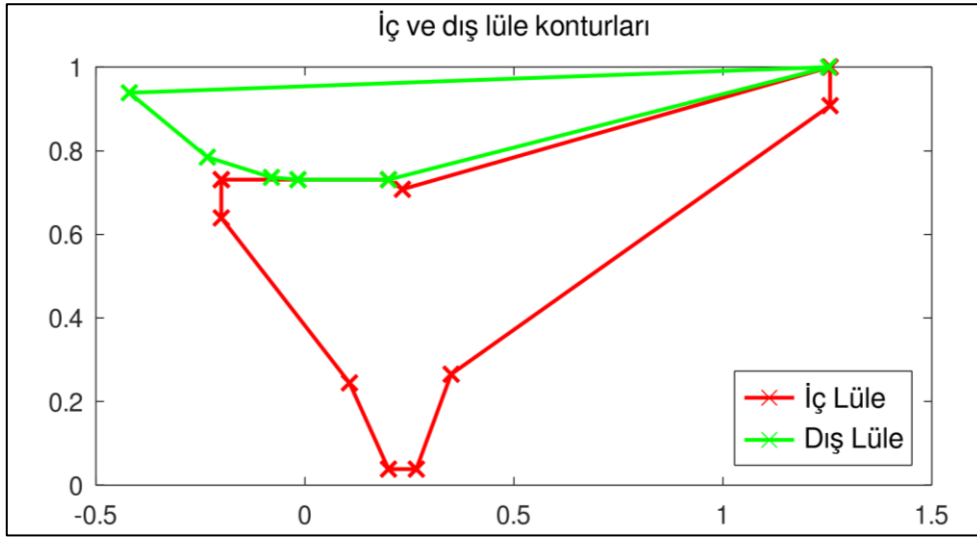
Soğuk akış testleri

Roket motorlarında kullanılan alt sistemler, yüksek basınç ve sıcaklıktaki akışlara maruz kaldıklarında, yapısal ve fonksiyonel olarak zorlanabildiklerinden bu sistemlerin fonksiyonellikleri öncelikle soğuk akış testleri ile incelenmektedir. Soğuk akış testleri, yakıtsız yanma odasının harici bir basınç kaynağı ile basınçlandırılması ile gerçekleştirilir ve canlı yakıtlı testlere kıyasla daha güvenli ve daha az maliyetlidir. Bu nedenle kavramsal tasarım aşamasında tercih edilmektedirler. Bu çalışmada kullanılmakta olan soğuk akış test düzeneği Şekil 4'te gösterilmektedir [Readey, 1977]. Test düzeneğinde yeni tasarlanmış bağlantı mekanizması ve atılabilir lüle ile donatılmış bir gövde, basınçlandırma için kullanılan bir basınçlı hava kaynağı, motor iç basıncını kontrol eden bir basınç sensörü ve motordaki zamana bağlı itki değişiminin ölçülmesini sağlayan bir yük hücresi bulunmaktadır. Basınç besleme sisteminin boyutuna göre, soğuk akış testlerinde yanma odasının istenilen basınç değerlerine ulaşabilmesi için lüle boğazının küçültülmesi gerekebilir (Şekil 5). Yapılan soğuk akış deneylerinde Şekil 5'teki konturlara sahip lüleler kullanılmıştır. Şekildeki konturlar dış lüledeki en büyük yarıçapa göre normalize edilmiştir.



Şekil 4: Atılabilir lüle mekanizması soğuk basınç testleri

Soğuk testlerde platforma bağlanan numune, üzerinde bulunan besleme açıklıklarına bağlanan kanallar ile basınçlandırılır. Numune iç hacmine beslenen kütle, daraltılmış lüleden ayrılan kütlede daha fazla olduğu için numune basınçlanmaktadır. Hava beslemesi kesildiğinde ise iç hacimdeki basınç tahliye edilmekte ve lülenin atılması istenen basınca gelindiğinde lüle atma sinyali verilmektedir. Sinyal ile birlikte iç lüle hareketine başlar.



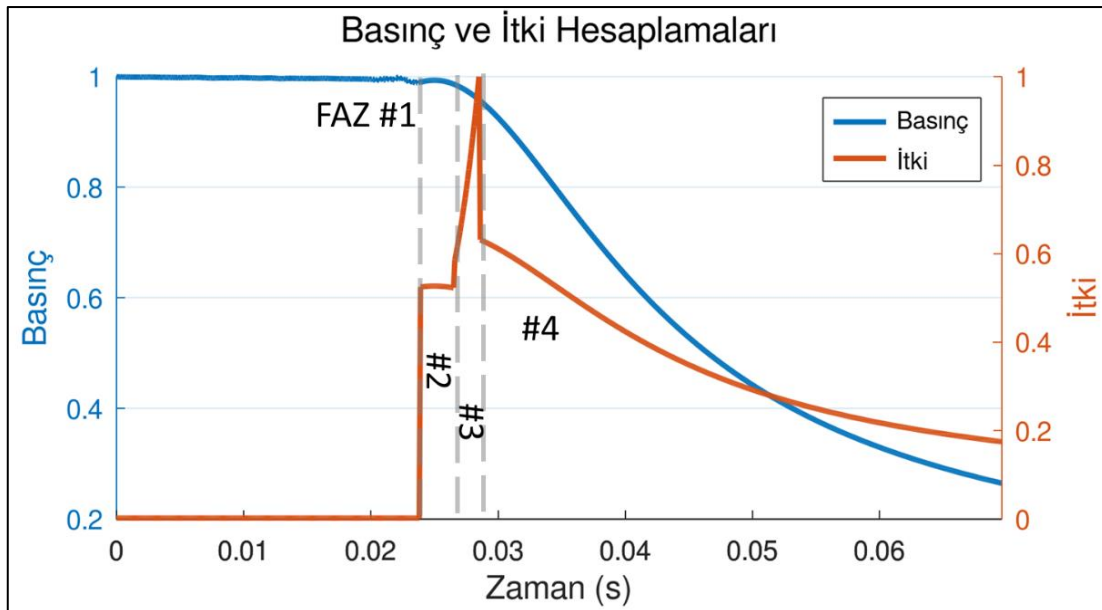
Şekil 5: Soğuk testlerde kullanılan lüle geometrisi (en büyük yarıçapa göre normalize edilmiş)

UYGULAMALAR VE DEĞERLENDİRME

Modelleme

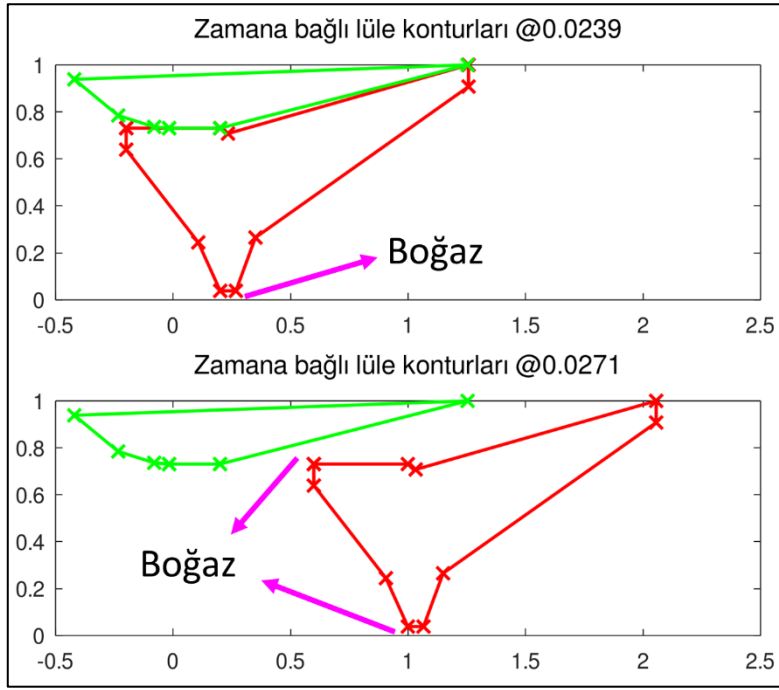
Yapılan çalışmalarda soğuk test düzeneği için algoritma geliştirilmiştir. Doğrulama amacı ile lüle atılma anına kadar test verileri ile beslenmiş bu algoritma sonunda, en yüksek basınç ve en yüksek itkiye göre normalize edilmiş, örnek çıktı Şekil 6 ile verilmiştir. Bu şekle bakıldığında toplamda 4 farklı faz dikkat çekmektedir.

- Faz #1: Atılabilir mekanizma çalışmadan önceki zamanlarda iç basınç sabittir.
- Faz #2: Lüle hareketinin başladığı, ancak sızdırmazlık koşulunun bozulmadığı bir süre vardır. Bu sırada aslında basınç azalmaktadır, bunun nedeni ise lüle hareketi ile değişen hacimdir.
- Faz #3: Lülelerin birbirlerinden ayrıldığı anda sızdırma ile birlikte basınç hızlı bir düşüşe girer. Bu fazda hem lüle hareketi hem de boğaz alanı değişimi sistemi etkiler.
- Faz #4: Lüle tamamen ayrıldığı anda sistemi sadece basınç tahliyesi etkiler.



Şekil 6: Atılabilir lüle atılma anı örnek modelleme sonucu

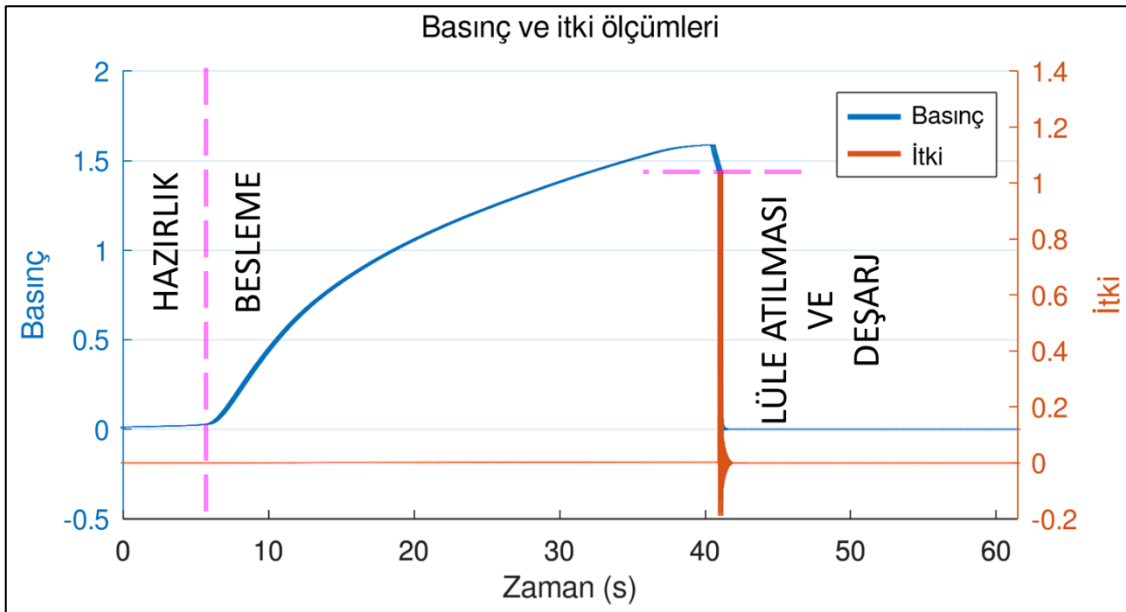
Zamana göre lülelerin konumları Şekil 7 ile paylaşılmıştır.



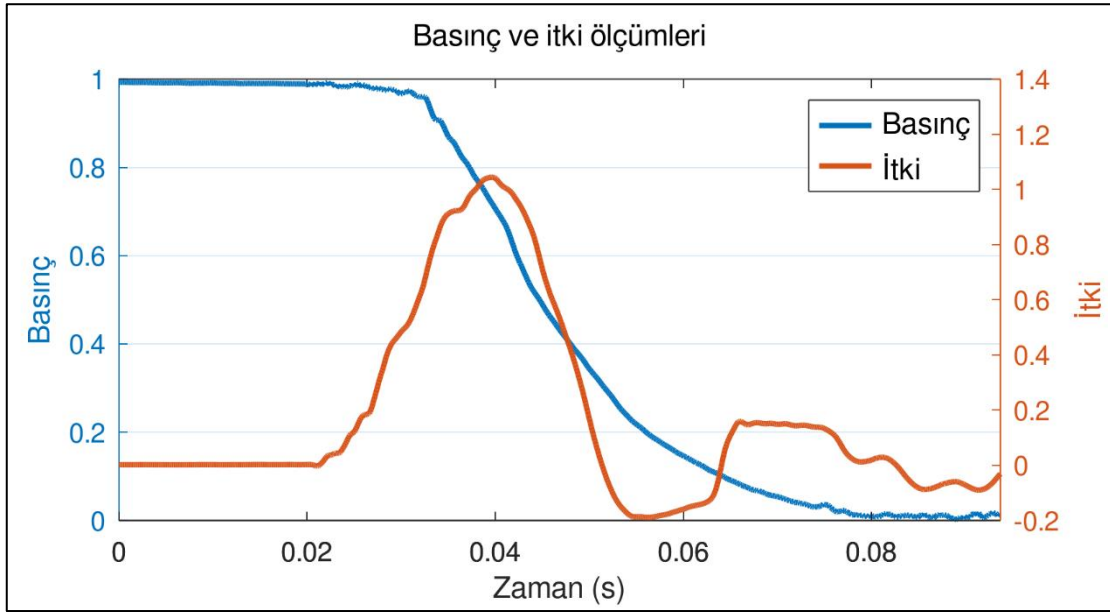
Şekil 7: Zamana Bağlı Örnek Lüle Konumları

Test

Atılabilir lüle denenmesi adına, enerjik olmayan bir test numunesi soğuk akış testinde kullanılmıştır. Test sırasında, boğaz alanı daraltılmış bir lüle kullanılmıştır (Şekil 5). Atılma anındaki basınç ve okunan en yüksek itki değerlerine göre normalize edilmiş test sonuçları Şekil 8 ve Şekil 9 ile aktarılmaktadır.



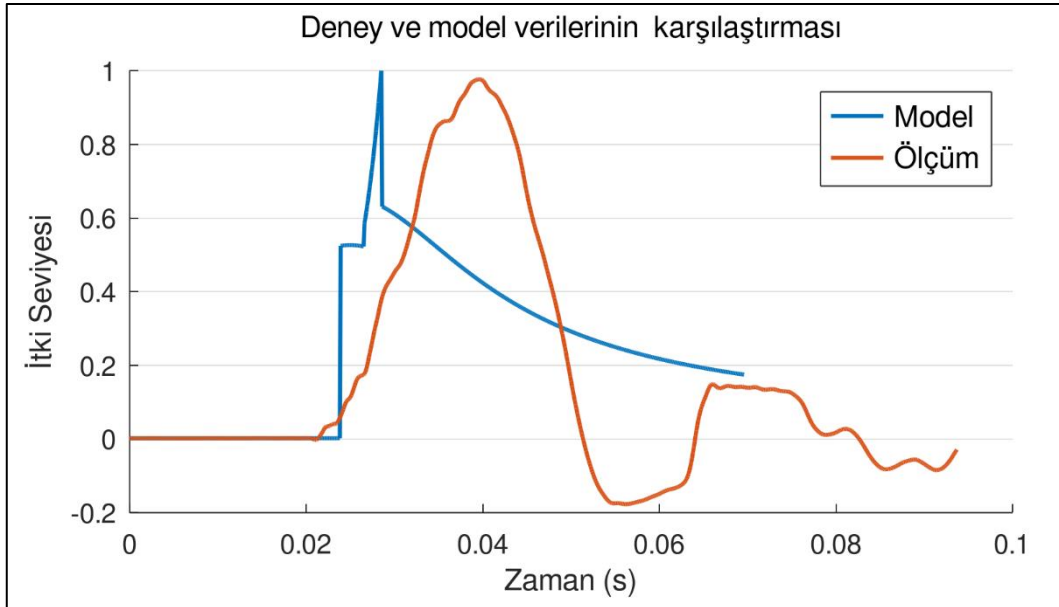
Şekil 8: Karşılaşılan normalize edilmiş itki ve basınç değerleri



Şekil 9: Atılma anı normalize edilmiş itki ve basınç eğrileri

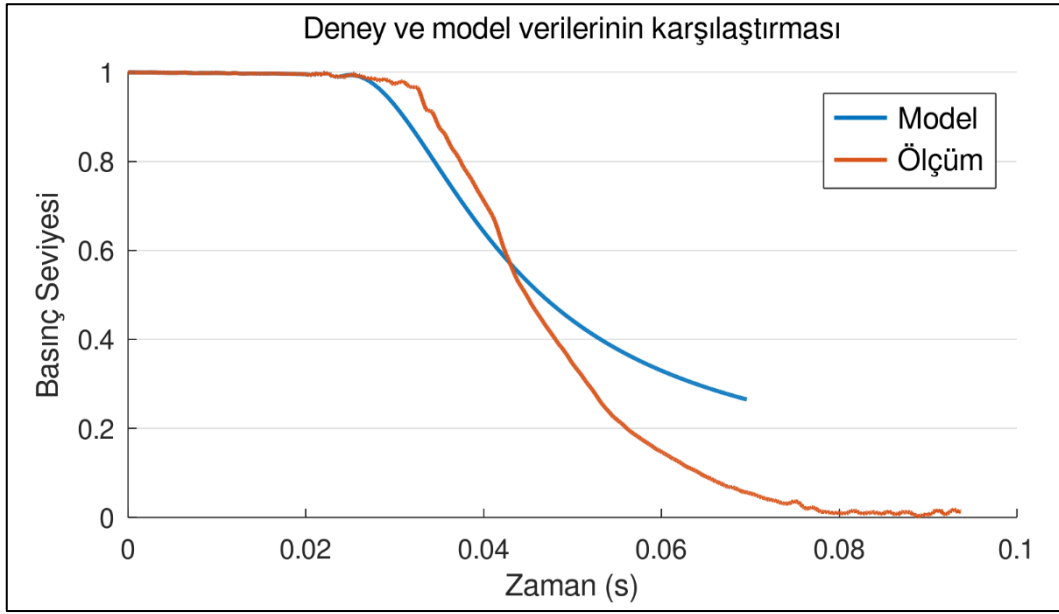
Atılma anındaki test sonuçlarının model ile normalize edilmiş karşılaştırılmaları Şekil 10 ve Şekil 11 ile sunulmuştur. Sonuçlar incelendiğinde, model ile elde edilen en yük basınca göre normalize edilmiş itki değerlerinin tepe noktalarının %98 oranında örtüştüğü görülmüştür. Bu sonuca göre itkinin temelde, iç basınç ve lüle geometrisine bağlı olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Test verilerindeki dalgalanmanın test düzeneği ve numunenin engellenemeyen hareketinden ve yapısal özelliklerinden kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 10: Karşılaştırılan ve model ile hesaplanan itki eğrileri

Basınç verilerine bakıldığında (Şekil 11), boyutsuz bir şekilde yazılan (ideal gaz, kütle korunumu ve kuvvete maruz kalan geometri denklemleri) algoritmanın basıncı tahmin etmekte yetersiz kaldığı görülebilir. Bu yetersizlik, zamana bağlı verilerin tahmin edilmesinin önüne geçse dahi gözlenen en yüksek itkiyi etkilememektedir.



Şekil 11: Karşılaştırılan ve model ile hesaplanan basınç eğrileri

SONUÇ

Bu çalışmada roket motorlarında kullanılan atılabilir lüle mekanizmasının atılma anında sistem üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu sonuçlar göz önüne alındığında, yüksek basınç altında aniden harekete başlayan bir geometrinin sisteme etkisi kabaca tahmin edilebilmektedir. Gözlenecek olan en yüksek itki ve bu itkiye ulaşma süresi güvenli bir şekilde modellenebilmektedir.

Kaynaklar

- Harrison, H. L., 1967. Retention-Release Mechanism for Reaction Motors and Rocket Interstages (Patent No. 3,329,089). In Patent (3,329,089).
- Hughes, L. E., 1961. Variable Area Nozzle (Patent No. 2,986,919). In Patent (2,986,919).
- Özer, A. C., 2015. Performance Prediction of Nozzleless Solid Propellant Rocket Motors. Middle East Technical University
- Readey, H. J., 1977. The Ramburner: A Versatile and Economical Facility Base for Thermal and Propulsion Experimental Work.