

ROKET KALKIŞ RAMPALARINDA EĞİM AÇISININ VE GEOMETRİNİN ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Laila YAHYA ve Zeynep Sude SOYLU
Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara

Sinan EYİ
Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara

ÖZET

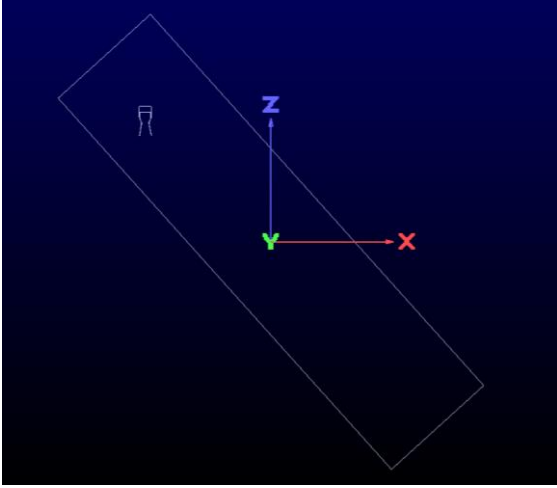
Roket kalkış rampalarının tasarımı, fırlatma sırasında ortaya çıkabilecek potansiyel riskleri azaltmak için önemlidir. Bu çalışmada, 45 derece eğimli bir roket rampasının üzerine yerleştirilen bir roketin oluşturduğu akışı incelemek amacıyla Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) analizleri yapılmıştır. Rampa eğiminin akışa olan etkisi incelenmiştir. Eğim açısı 30, 45 ve 60 derece olarak seçilmiştir. Analizler, CFL3D yazılımı kullanılarak zamana bağlı (unsteady) olarak çözülmüştür. İncelenen geometriler için çok bloklu yapısal ağ (multiblock structured grid) sistemi kullanılmış ve akış için uygun sınır koşulları sağlanmıştır. Çalışmada, akışın neden olduğu basınç, Mach sayısı ve sıcaklık değişimleri zaman bağlı olarak hesaplanmıştır. Rampa eğiminin, ve lüle çıkışının rampaya olan uzaklığının Ignition Over Pressure (IOP) dalgaları üzerindeki etkisi incelenmiştir.

GİRİŞ

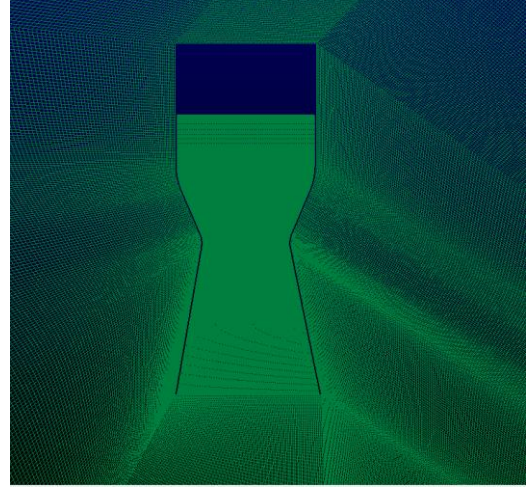
Roketlerin fırlatılması sırasında iki türlü dalga oluşmaktadır. Başlangıçta Ignition Over Pressure (IOP) olarak tanımlanan, genliği yüksek, frekansı düşük dalgalar oluşur. Bu dalgaların roket motorları ve fırlatma rampaları üzerinde zararlı etkileri olabilir. Daha sonra ise frekansı yüksek, genliği düşük akustik dalgalar oluşmaktadır. Akustik dalgalar, roket yapılarına ve faydalı yüklere (payload) zarar verebilir. Fırlatma rampalarının uygun tasarımları IOP ve akustik dalgaların zararlı etkileri azaltabilir.

IOP ve akustik dalgaların modellenmesi farklıdır. IOP dalgaları zaman bağlı Euler ve Navier Stokes denklemleri ile çözülebilmeye rağmen, akustik dalgaların modellenmesi için Large Eddy Simulation (LES) yöntemlerinin kullanılması gerekebilir. Bu çalışmada, sadece IOP dalgalarının etkisi incelenmiştir. Bu amaçla, NASA Langley Araştırma Merkezi tarafından geliştirilen ve daha sonra açık kaynak olarak sunulan CFL3D (Hesaplamalı Akışkanlar Laboratuvarı 3 Boyutlu) HAD yazılımı kullanılmıştır. [Bartels et al., 2006; Biedron, n.d.; Krist et al., 1998] Fırlatma rampalarındaki zamana bağlı akışlar Reynolds ortalama Navier-Stokes (URANS) veya viskoz olmayan Euler denklemlerini çok-bloklu yapısal ağ sisteminde (multiblock structured mesh) çözerek modellenmiştir.

YÖNTEM



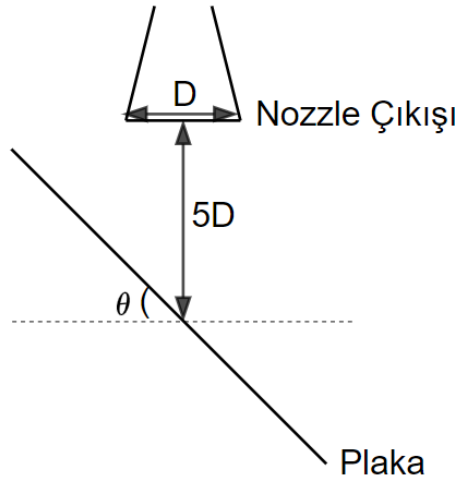
Şekil 1: Analiz yapılacak geometri.



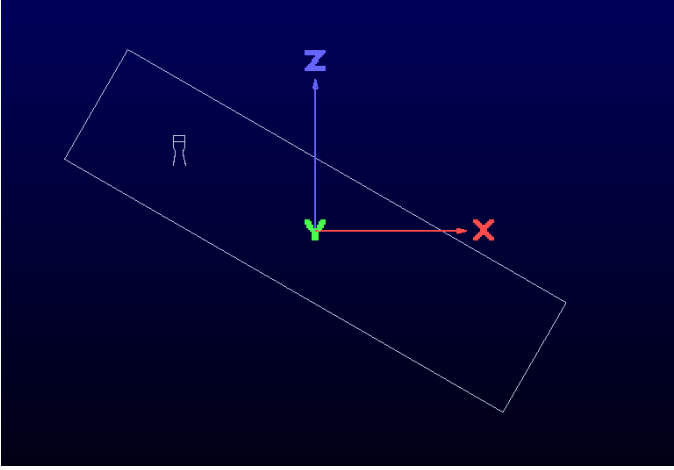
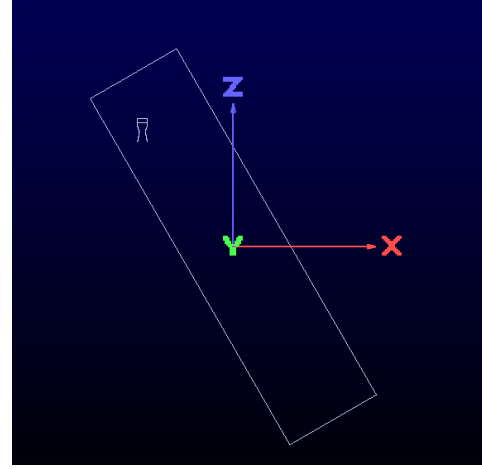
Şekil 2: Ağ şeması.

Çalışmada, 45 derece eğimli rampanın üzerine yerleştirilen bir roketin oluşturduğu akış modellenmiştir. Akış analizi için çok bloklu ve yapısal bir ağ sistemi oluşturuldu. Ağ oluşturmak için 3 boyutlu bilgisayar destekli çizim (CAD) modeli kullanılmıştır. İki boyutlu analizler için çizim X-Z düzleminde yapılmıştır.

Lüle çıkış çapı 0,1 m ve lüle çıkışı ile eğik düzlem arasındaki mesafe çapın 5 katı olarak tanımlanmıştır. Oluşturulan ağ sisteminde, rampa yüzey uzunluğu 4,2 metre ve yüzeye dik yöndeki mesafe 1,05 metredir [Housman et al., 2011; Nonomura et al., 2012]. Rampa ait uzunluk, genişlik bilgileri ile roket ölçüleri sabit tutularak yeni eğim açılarında ($\theta=30^\circ$ ve $\theta=60^\circ$) tekrar çizim yapılmıştır.



Şekil 3: Geometrik verilerin tanımlanması.

Şekil 4: $\theta = 30^\circ$ için 2 boyutlu çizim.Şekil 5: $\theta = 60^\circ$ için 2 boyutlu çizim.

Zamana Bağlı Analiz için CFL3D Girdileri:

CFL3D giriş dosyasında zamana bağlı analizler için girilmesi gereken değerler Şekil 3' de gösterilmiştir.

DT	IREST	IFLAGTS	FMAX	IUNST	CFLTAU		
0.01	1	0	0.0000	0	1.0000		
NGRID	NPLOT3D	NPRINT	NWREST	ICLK	I2D	NTSTEP	ITA
-52	52	0	0	0	1	1250	-2
		NCYC	MGLEVG	NEMGL	NITFO		
		10	1	0	0		

Şekil 6: Giriş dosyası değerleri

Yukarıdaki girdilerde, zaman adımı (DT), birimsiz olup çözülen problemin şartlarına (çözümün doğruluğu, hata alınmaması vb.) göre ayarlanmıştır. Çok büyük olması durumunda yakınsama hatası alınabilmektedir.

Toplam zaman adımı sayısı (NTSTEP), zamanda ne kadar ilerleneceğini belirler. Çözümün doğruluk derecesini belirleyen parametrenin (ITA) -2 olması, zamanda ikinci derece doğruluk derecesinde çözümlenme yapıldığını gösterir. Alt yinleme sayısı (sub-iteration) (NCYC) 10 olarak seçilmiştir. Bu durumda, her bir zaman adımında 10 kez alt yenileme yapılmıştır.

Uzak-alan (far-field) için XMACH (Mach sayısı), ALPHA (Hücum açısı), BETA (Yan kayma açısı), REUE (Reynolds sayısı), TINF (Referans sıcaklık) için aşağıdaki değerleri girilmiştir:

XMACH	ALPHA	BETA	REUE,MIL	TINF,DR
2.0000	-90.0000	0.0000	90.6500	315.0000

Mach sayısı, P_t/P_{inf} oranı, T_f/T_{inf} , α , β gibi giriş koşulları aşağıda verilmiştir:

Mach	P_t/P_{inf}	T_f/T_{inf}	α	β
2.0000	7.8250	1.0000	-90.0000	0.0000

Reynolds Sayısının Hesaplanması:

Referans parametreleri aşağıdaki gibi tanımlanmıştır [Bartels et al., 2006].

Referans parametreleri:

\tilde{L}_R → Referans uzunluğu (çözüm ağında belirlenir)

\tilde{V}_∞ → Free-stream hızı, uzunluk/zaman

$\tilde{\rho}_\infty$ → Free-stream yoğunluğu, kütle/birim küp

$\tilde{\mu}_\infty$ → Free-stream moleküler viskozitesi, kütle/uzunluk*zaman

Referans uzunluğuna (\tilde{L}_R) göre hesaplanan Reynolds sayısı:

$$Re_{\tilde{L}_R} = \frac{\tilde{\rho}_\infty |\tilde{V}_\infty| \tilde{L}_R}{\tilde{\mu}_\infty}$$

Giriş dosyasındaki ReUe değerinin hesaplanması:

$$ReUe = Re_{\tilde{L}_R} \times 10^{-6}$$

Toplam İterasyon Sayısının Hesaplanması:

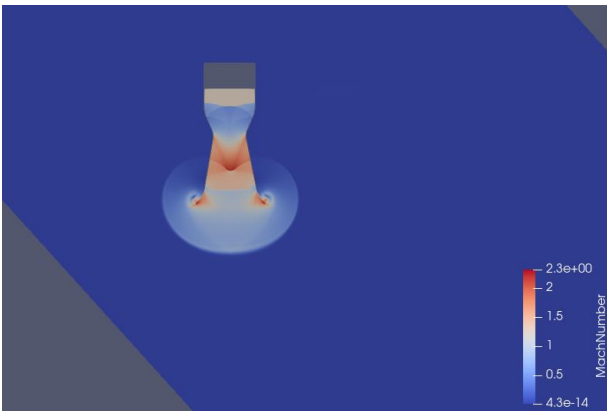
$$\text{Fiziksel zaman} = dt \times \frac{\text{nozul çıkış çapı}}{\text{ses hızı}}$$

Örneğin; akışın 0.0036. saniyedeki görüntüsüne ulaşmak için gereken yineleme sayısı aşağıdaki gibi hesaplanmıştır:

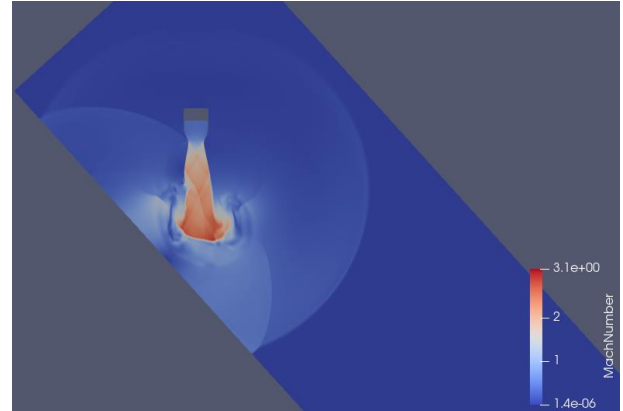
$$\text{yineleme sayısı} = (0.0036 \times 347) \div (0.1 \times 0.01) \approx 1250$$

UYGULAMALAR VE DEĞERLENDİRME

Aşağıdaki şekillerde farklı zamanlar için Mach sayısının değişimi gösterilmiştir. Gazın nozuldan çıkışında oluşan girdapların (vortex), duvara çarptıktan sonra şok dalgası oluşturup duvar boyunca ilerlediği görülmektedir. Çözüm alanının yeterince büyük olması sınırdan dönen dalgaların çözüm alanına tekrar girmemesi için önemlidir. Şekillerde nozuldan çıkan gazların oluşturduğu *diamond* tipindeki şok dalgalar açıkça görülmektedir.



Şekil 7: $t=0.0036$ için Mach sayısı verileri



Şekil 8: $t=0.0072$ için Mach sayısı verileri

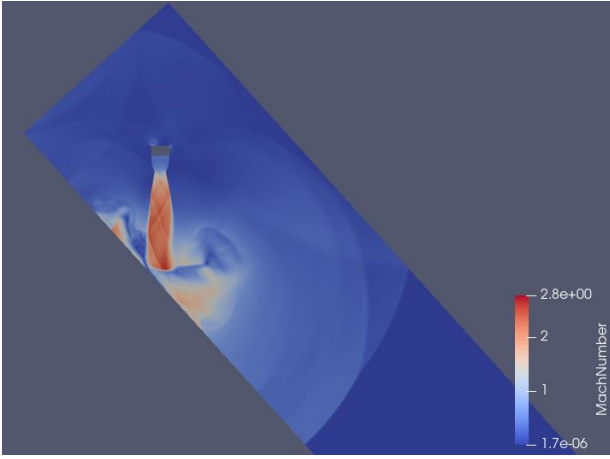
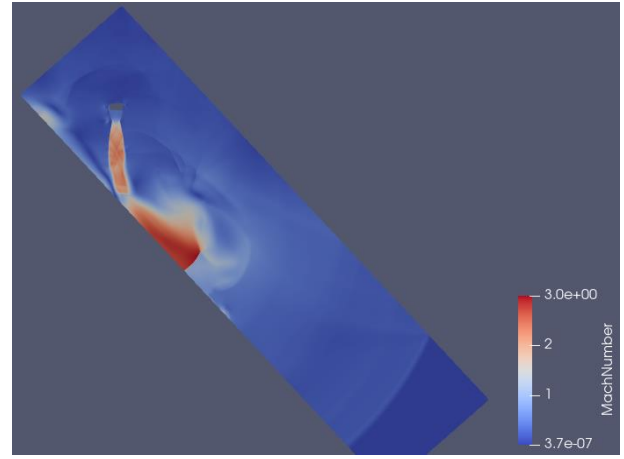
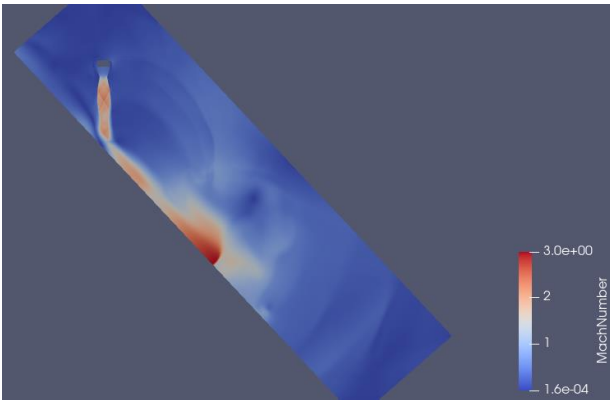
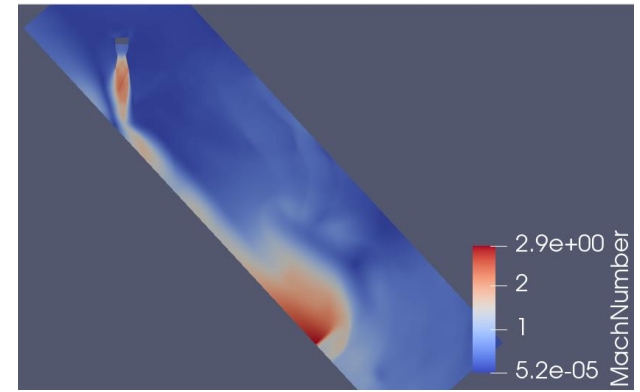
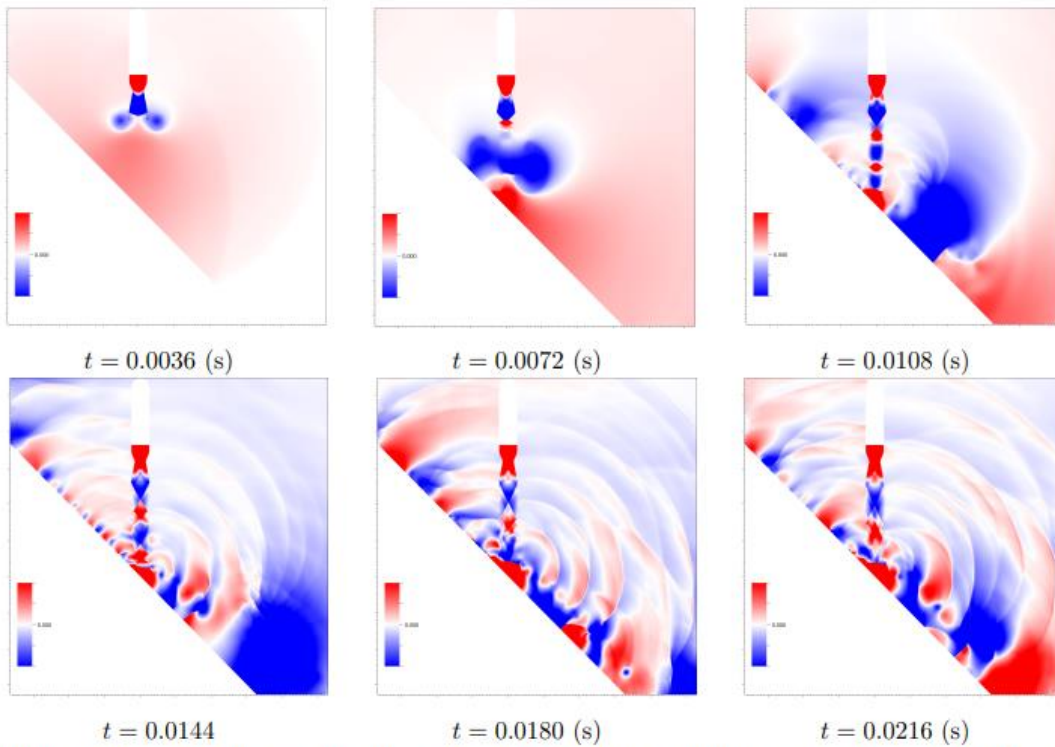
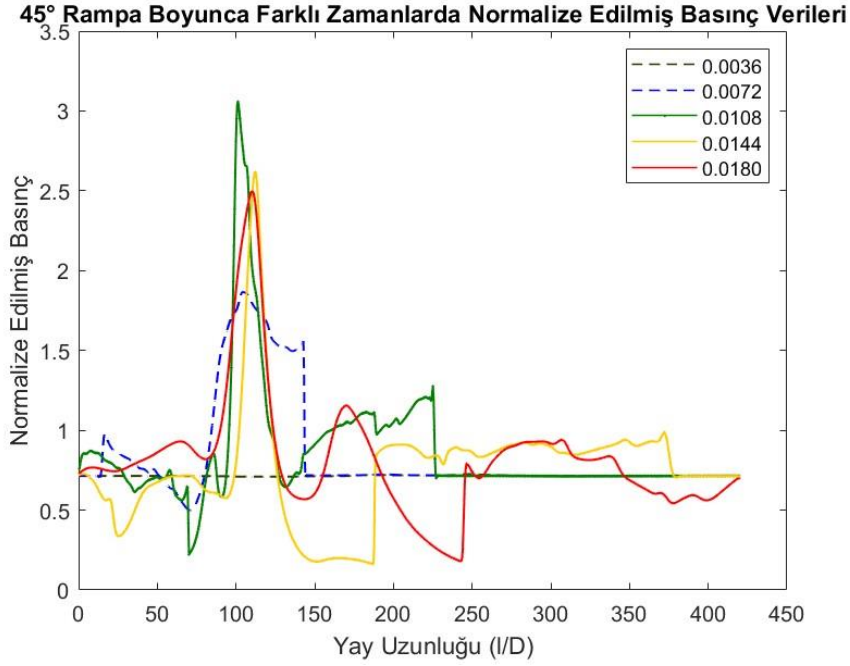
Şekil 9: $t=0.0108$ için Mach sayısı verileriŞekil 10: $t=0.0144$ için Mach sayısı verileriŞekil 11: $t=0.018$ için Mach sayısı verileriŞekil 12: $t=0.0216$ için Mach sayısı verileri

Figure 6. Time sequence of gauge pressure (psig) showing the IOP wave physics, the X- and Y-axis labels are in meters.

Şekil 13: Farklı zamanlarda alınan gauge pressure verileri. [Housman et al., 2011]

Şekil 13' de görülen 6 farklı zaman için alınan basınç verileri ile kendi sonucumuzdaki veriler karşılaştırılmıştır. Dalgaların oluşturduğu girdaplar (vortex), basınç dağılımı, şok dalgaları kendi çalışmamızla benzerlik göstermiştir.

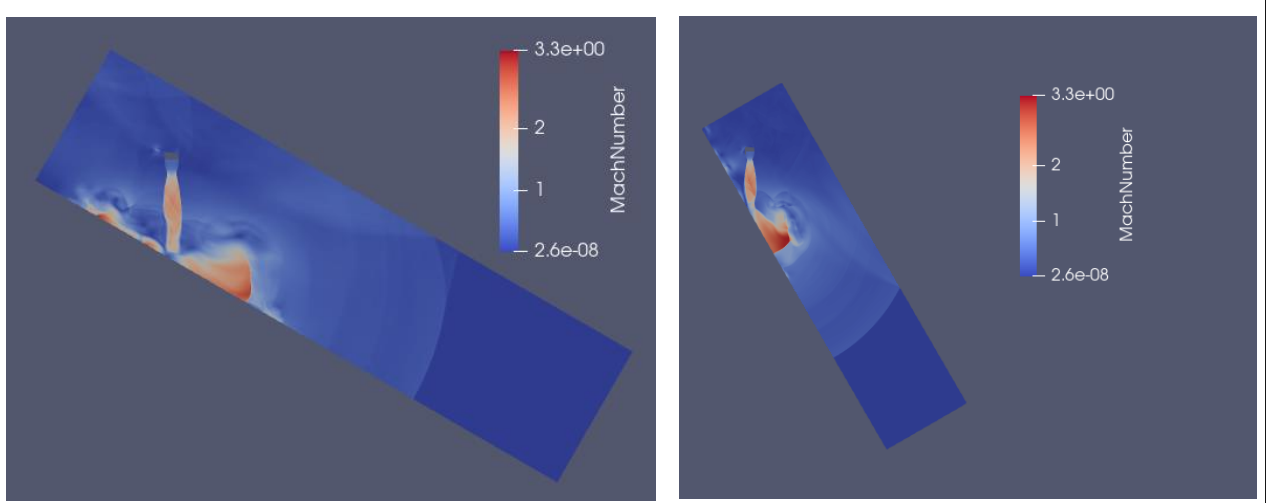


Şekil 14 de, 45° eğimli bir rampa boyunca normalize edilmiş basıncın 0.0036s ile 0.0180s arasında değişen zamansal evrimini göstermektedir. x eksenini rampa boyunca normalize edilmiş mesafeyi (I/D) temsil ederken, y eksenini normalize edilmiş basıncı göstermektedir. Grafikten elde edilen temel gözlemler şunlardır:

- 1) **Şok ve genişleme dalgaları:** Keskin basınç artışları şok dalgası oluşumunu gösterirken, bunu takip eden hızlı basınç düşüşleri genişleme dalgalarını işaret etmektedir.
- 2) **Tepe basınç konumu:** Basınç tepe noktası tutarlı bir şekilde nozül çıkışının rampa üzerindeki izdüşümüne yakın bir yerde oluşmaktadır. 0.0108s'de bu tepe noktası, incelenen diğer tüm zaman adımlarını aşarak yaklaşık 3.05 değeriyle maksimum seviyesine ulaşmaktadır.
- 3) **Uzamsal ve zamansal değişimler:**
 - Başlangıç bölgesi ($0 \leq I/D \leq 75$): Basınç dalgalanmaları hızla sönümlenmekte, bu da kararsız bir akış rejiminden daha kararlı bir akış rejimine geçişi göstermektedir.
 - Merkez bölge ($75 < I/D < 250$): En yüksek basınç gradyanları ve en önemli zamansal değişimlerle karakterize edilen bu alan, muhtemelen jet ile rampa arasındaki birincil etkileşim bölgesine karşılık gelmektedir.
 - Akış aşağı bölge ($I/D > 250$): Akış stabilize olmaya başlamakta, basınç değişimleri azalmakta ve farklı zaman adımları boyunca daha uniform bir duruma yakınsamaktadır.

Veriler, karmaşık şok-genişleme etkileşimlerini ve bunların zaman içindeki evrimini ortaya koymaktadır. En yüksek normalize edilmiş basınç (0.0108s'de ≈ 3.05), en yoğun şok oluşumuyla çakışmakta olup, muhtemelen jetin rampa yüzeyine maksimum çarpma anını göstermektedir.

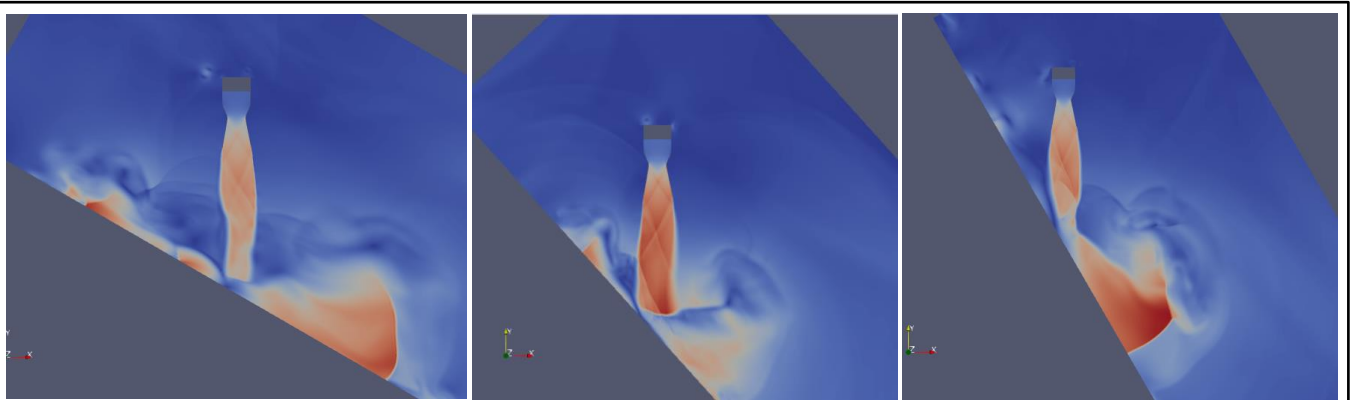
Rampa eğiminin dalgalara etkisini incelemek için eğim açılarını değiştirerek tekrar analiz yapılmıştır. $t = 0.0108$ saniye için 30, 45 ve 60 derecedeki sonuçlar aşağıda gösterilmiştir. Rampanın eğim açısı dışındaki tüm değişkenler sabit tutulmuştur.



Şekil 15: 30° eğimli plakada Mach sayısı dağılımı.

Şekil 16: 60° eğimli plakada Mach sayısı dağılımı.

İki görsel, 30° ve 60° rampa konfigürasyonlarında şok dalgası oluşumunu göstermektedir ve bu, Mach sayısındaki ani değişimlerle belirgindir. 60° rampa, rampa yüzeyine yakın daha geniş bir yüksek Mach sayısı bölgesiyle (kırmızı alan) karakterize edilen daha yoğun bir şok üretmektedir. Buna karşılık, 30° rampa daha kademeli bir sıkıştırma göstermekte ve şok dalgası daha yukarı akışa doğru uzanmaktadır. Akış ayrılması, 60° durumunda daha belirgindir ve bu, şokun arkasındaki daha geniş düşük hız bölgesiyle (mavi alan) gösterilmektedir. Önemli bir nokta, her iki konfigürasyonun da tutarlı bir Mach sayısı aralığını (2.6e-08 ile 3.3 arasında) korumasıdır, bu da iki senaryo arasında doğrudan karşılaştırma yapılmasını sağlamaktadır. Bu görselleştirmeler, rampa açısının süpersonik koşullarda şok kuvveti ve akış davranışı üzerindeki etkisini etkili bir şekilde vurgulamaktadır.



Şekil a) 30° rampa eğimi.

Şekil b) 45° rampa eğimi.

Şekil c) 60° rampa eğimi.

Şekil 17: Farklı rampa eğimlerinde oluşan Mach sayısı verileri.

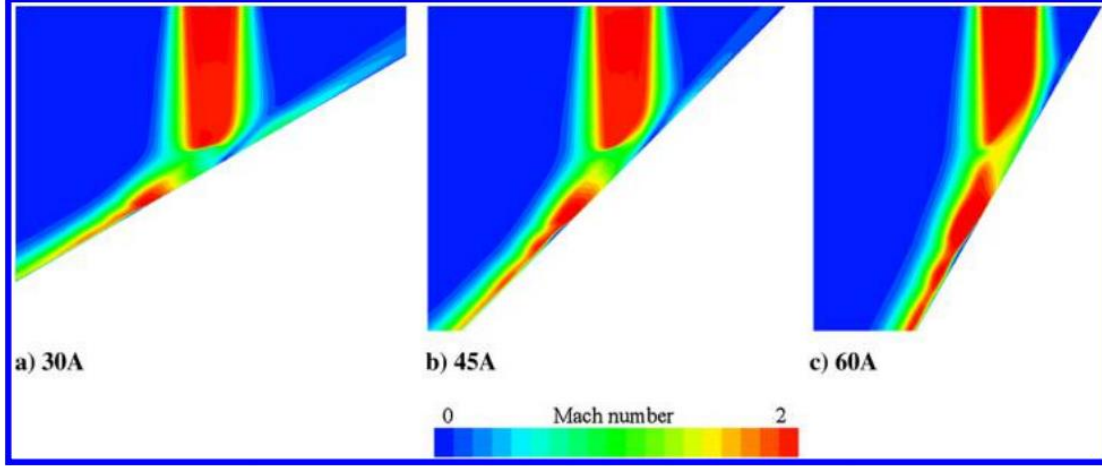
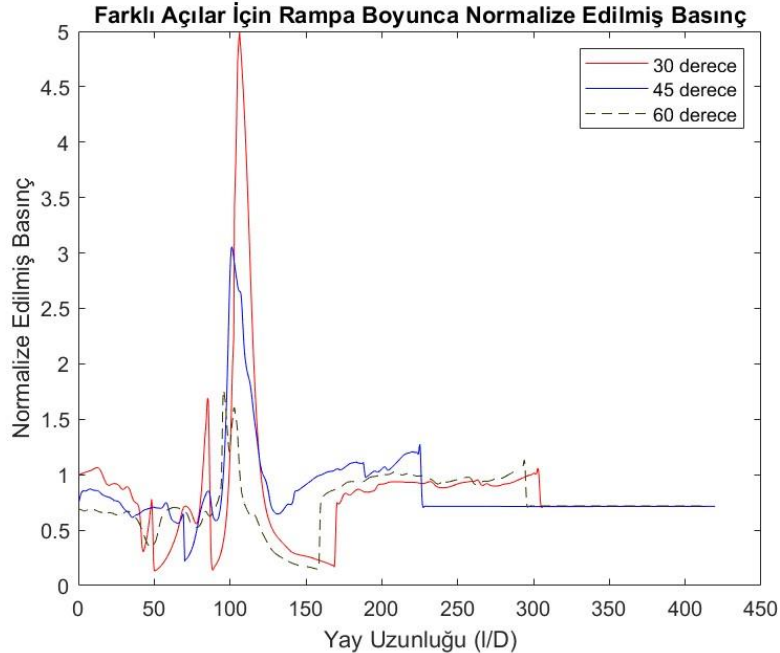


Fig. 5 Mach number distribution in the impingement region.

Şekil 18: 3 farklı eğim açısı için alınan Mach sayısı verileri. [Nonomura, 2016]

Aynı zaman dilimi için alınan sonuçlar karşılaştırıldığında, 30 ve 45 derecelik rampa eğiminde akışın üst taraflara çıktığı fakat 60 derecede bunun oluşmadığı gözlemlenmiştir. Nonomura'nın makalesinde de benzer sonuçlara rastlanmaktadır [Nonomura et al., 2016]. Ayrıca rampa eğim açısının artması, Mach sayısı verilerinin şiddetinin artmasına sebep olmuştur. Tüm durumlarda en büyük Mach verisi plakanın ortasında alınmıştır. Dalgaların oluşturduğu girdaplar 3 durumda da açık bir şekilde görünmektedir. Fakat bu girdapların konumları farklıdır. Tüm durumlarda şok dalgalarının oluştuğu görülmektedir [Honda et al., 2011; Nonomura et al., 2016].

30, 60 ve 90 derecelik rampa açıları için normalize edilmiş basınç dağılımı, rampa boyunca aşağıdaki grafikte gösterilmiştir. Bu grafik, farklı rampa açılarının basınç dağılımı üzerindeki etkisini karşılaştırmalı olarak sunmaktadır.



Şekil 19: Farklı eğim açılarında alınan normalize basınç verileri.

Grafik değerlerine bakıldığında genel olarak rampa eğim açısı arttıkça basıncın azaldığı görülmüştür. l/D oranının yaklaşık 100 yani rampanın 1000. santimetresinde alınan verileri

maksimum değerindedir. Rampada basıncın sabit kalması en geç 30 derecede görülmüştür. Yani akış diğer rampalara göre daha aşağı ilerlemiştir.

Şekil 19, üç farklı rampa açısı için (30, 45 ve 60 derece) rampa boyunca normalize edilmiş basınç dağılımını göstermektedir. Bu grafikten birkaç önemli gözlem yapılabilir. İlk olarak, her üç açı da belirgin bir basınç tepe noktası sergilemektedir; 30 derecelik rampa yaklaşık 5 ile en yüksek tepe basıncını gösterirken, bunu 45 derecelik rampa yaklaşık 3 ile takip etmekte ve 60 derecelik rampa en düşük tepe noktasını yaklaşık 1.7 ile sergilemektedir. Bu, daha sığ eğim açılarının daha güçlü şok dalgası oluşumuna ve daha yüksek tepe basınçlarına yol açtığını göstermektedir. İkincisi, eğim açısı arttıkça bu tepe noktalarının konumları akış yönünde kayar, bu da birincil etkileşim bölgesinin eğim boyunca daha dik açılarla taşındığını gösterir. Basınç dağılımı ayrıca karmaşık şok-genleşme dalgası etkileşimlerine karşılık gelen farklı salınım ve plato modlarını da gösterir; özellikle 30 ve 45 derecelik durumlarda belirgindir. Dikkat çekici bir şekilde, her üç durum da uzak akış yönündeki bölgede ($I/D > 350$) yaklaşık 0,75'lik benzer normalleştirilmiş basınç değerlerine yakınsar ve bu da başlangıç eğim açısından bağımsız olarak ortak bir uzak alan davranışına işaret eder.

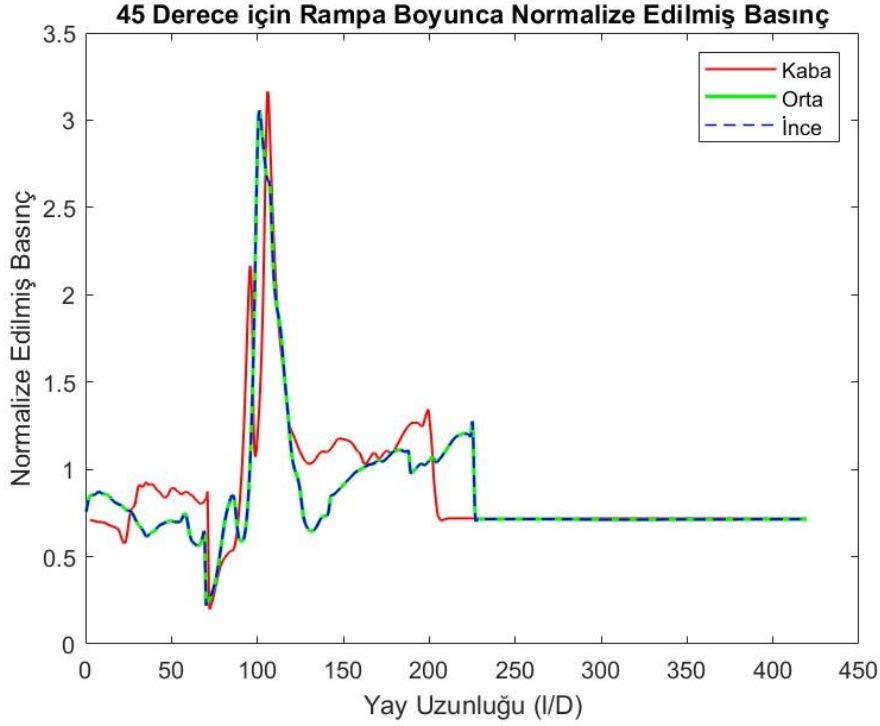
Ağ Bağımsızlığı Çalışması:

Sonuçların nicel analizi, genel basınç dağılımı eğilimlerinin tüm ağ yoğunluklarında benzer olmasına rağmen, tepe basınç değerlerinde ve akış özelliklerinin çözünürlüğünde dikkate değer farklılıklar olduğunu göstermektedir. İnce ağ, özellikle $I/D \approx 100$ civarındaki ana şok konumunda belirgin olan daha keskin basınç değişimleri ve daha yüksek tepe basınçlarını yakalamaktadır. Kaba ağ, genel eğilimi yakalarken, daha ince akış yapılarından bazılarını yumuşatma eğilimindedir. Simülasyonlar, önceki çalışmada kullanılan aynı CFD yazılımı ve ayarlar kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sınır koşulları olarak, referans çalışmada belirtilen giriş, çıkış ve duvar koşulları aynen uygulanmıştır. Bu yaklaşım, sonuçların doğrudan karşılaştırılabilir olmasını sağlamak ve çalışmanın güvenilirliğini artırmak amacıyla benimsenmiştir.

Ağ şemasının yoğunluğu değiştirilerek sonuçlar alınmıştır. Bu makalede gösterilen sonuçların hepsi ince ağ yapısı ile çalıştırılan analizlerden alınmıştır. Ağdaki toplam hücre önce yarısına düşürülmüş ve orta dereceli ağ yapısı ile analiz yapılmıştır. Hücre sayısı tekrar yarısına düşürülüp kaba dereceli ağ yapısından sonuçlar alınmış ve 3 farklı ağ yapısının karşılaştırması Şekil 20' de gösterilmiştir. Ağ boyutları aşağıdaki tabloda ayrıntılı olarak gösterilmektedir.

Tablo 1: Farklı ağ şemalarının sayısal verileri.

Hücre	Hücre sayısı	Puan sayısı	4000 yineleme için çalışma süresi (dk.)
Kaba Ağ	212.701	214.034	145.42
Orta Ağ	414.529	416.315	428.6
İnce Ağ	808.694	798.339	3624.73



Şekil 20 : Ağ yoğunluğunun değiştirilerek alınan sonuçlar.

Bu analiz, ağ yoğunluğunun simülasyon sonuçları üzerindeki etkisini kapsamlı bir şekilde ele almaktadır. Gözlemler, ince ağın özellikle ana şok bölgesi ($I/D \approx 100$) ve ikincil şok yapıları ($I/D \approx 150-200$) gibi kritik alanlarda daha keskin ve doğru sonuçlar verdiğini göstermektedir. İnce ağ en yüksek tepe basıncını (yaklaşık 3.2) gösterirken, kaba ağ belirgin şekilde daha düşük bir değer (yaklaşık 2.2) vermektedir. Ağ yoğunluğu arttıkça çözümün yakınsadığı, orta ve ince ağ arasındaki farkın azalmasıyla net bir şekilde görülmektedir. Tüm ağ yoğunlukları için $I/D > 250$ bölgesinde basınç değerlerinin yaklaşık 0.75'te sabitlenmesi, uzak akış davranışının ağ yoğunluğundan bağımsız olduğunu göstermektedir. İnce ağ en detaylı sonuçları sağlasa da, hesaplama maliyeti de en yüksektir. Orta ağ, doğruluk ve hesaplama verimliliği arasında iyi bir denge sunmaktadır. Bu nedenle, ön tasarım çalışmaları veya parametrik analizler için orta ağ yeterli olabilirken, yüksek doğruluk gerektiren nihai analizler için ince ağ kullanılması önerilmektedir. Bu gözlemler, simülasyon sonuçlarının güvenilirliği ve uygun ağ seçiminin önemi konusunda değerli veriler sağlamaktadır.

SONUÇ

Çalışmada, rampa eğiminin, geometrisinin ve nozul çıkışının rampaya olan uzaklığının Ignition Over Pressure (IOP) dalgaları üzerindeki etkisi incelenmiştir. Analizler farklı zamanlar için yapılarak referans makaleler ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar, 30° ve 60° rampa konfigürasyonlarında şok dalgası oluşumunun farklı olduğunu göstermektedir. 60° rampa, rampa yüzeyine yakın daha geniş bir yüksek Mach sayısı bölgesiyle daha yoğun bir şok üretirken, 30° rampa daha kademeli bir sıkıştırma göstermekte ve şok dalgası daha yukarı akışa doğru uzanmaktadır. Akış ayrılması, 60° durumunda daha belirgindir ve bu, şokun arkasındaki daha geniş düşük hız bölgesiyle gösterilmektedir.

Basınç dağılımı analizlerinde, üç farklı rampa açısının (30° , 45° ve 60°) her birinin belirgin basınç tepe noktaları sergilediği gözlemlenmiştir. 30° derecelik rampa en yüksek tepe basıncını gösterirken, 45° derecelik rampa orta düzeyde ve 60° derecelik rampa en düşük tepe basıncını sergilemektedir. Bu durum, daha sığ eğim açılarının daha güçlü şok dalgası oluşumuna ve daha yüksek tepe basınçlarına yol açtığını göstermektedir. Ayrıca, eğim açısı arttıkça bu tepe noktalarının

akış yönünde kaydığı ve basınç dağılımının karmaşık şok-genleşme dalgası etkileşimlerine karşılık gelen farklı salınım ve plato modları gösterdiği belirlenmiştir.

Ağ yoğunluğunun değiştirilmesiyle yapılan analizlerde, ince ağ yapısının daha detaylı ve hassas sonuçlar verdiği görülmüştür. Ağdaki toplam hücre sayısı önce yarısına düşürülmüş ve orta dereceli ağ yapısı ile analiz yapılmıştır. Hücre sayısı tekrar yarısına düşürülüp kaba dereceli ağ yapısından sonuçlar alınmış ve üç farklı ağ yapısının karşılaştırması yapılmıştır. Bu analizler, daha ince ağ yapılarının daha hassas sonuçlar verdiğini göstermiştir.

Sonuç olarak, rampa eğiminin ve geometrisinin IOP dalgaları üzerinde önemli etkileri olduğu görülmüştür. Bu bulgular, roket ve faydalı yük üzerinde oluşabilecek hasarların önlenmesi ve IOP dalgalarının daha iyi anlaşılması için önemli bilgiler sağlamaktadır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmalar, “*Fırlatma Rampaları İçin Akış Analiz ve Tasarım Optimizasyon Yazılımı Geliştirilmesi*” başlıklı ve TÜBİTAK 1001- 123M355 numaralı proje tarafından desteklenmiştir.

KAYNAKLAR

- Bartels, Robert E.; Rumsey, Christopher L; and Biedron, Robert T., 2006. CFL3D User's Manuel (Version 6.4), NASA Langley Research Center
- Biedron, R. T. (n.d.). CFL3D version 6 home page. <https://nasa.github.io/CFL3D/>
- Honda, H., Nonomura, T., Fujii, K., & Yamamoto, M. (2011). Effects of Plate Angles on Acoustic Waves from a Supersonic Jet Impinging on an Inclined Flat Plate. 41st AIAA Fluid Dynamics Conference and Exhibit. <https://doi.org/10.2514/6.2011-3260>
- Housman, J., Barad, M., & Kiris, C. (2011). *Space-time accuracy assessment of CFD simulations for the launch environment*. 29th AIAA Applied Aerodynamics Conference. <https://doi.org/10.2514/6.2011-3650>
- Krist, Sherrie L., Biedron, Robert T., Rumsey, Christopher L., 1998. *CFL3D User's Manual (Version 5.0)*, NASA Langley Research Center
- Nonomura, T., Honda, H., Nagata, Y., Yamamoto, M., Morizawa, S., Obayashi, S., & Fujii, K. (2016). Plate-Angle Effects on Acoustic Waves from Supersonic Jets Impinging on Inclined Plates. *AIAA Journal/AIAA Journal on Disc*, 54(3), 816–827. <https://doi.org/10.2514/1.j054152>
- Nonomura, T., Tsutsumi, S., Takaki, R., Shima, E., & Fujii, K. (2012, January 1). *Impact of temporal and spatial resolution on the aeroacoustic waves from a two-dimensional impinging jet*. https://iccf.org/iccf7/assets/pdf/papers/ICCFD7-3103_paper.pdf