

HİPERSONİK HIZLARDA İKİ AÇILI KONİ GEOMETRİSİ ETRAFINDAKİ AKIŞIN HESAPLAMALI YÖNTEMLERLE İNCELENMESİ

Eren TÜCAR¹
İstanbul Teknik Üniversitesi,
İstanbul

Ahmet Selim DURNA²
Samsun Üniversitesi,
Samsun

Bayram Çelik³
İstanbul Teknik Üniversitesi,
İstanbul

ÖZET

2000 yılında Wright ve diğerleri [Wright, Sinha, Olejniczak ve diğ., 2000] eksenel simetrik iki açılı koni etrafındaki hipersonik akışta ortaya çıkan şok etkileşimlerini incelemek için bir dizi deneysel çalışma gerçekleştirmişlerdir. Araştırmacılar bu çalışmada, iki farklı ikinci açı değeri için elde ettikleri deneysel sonuçları, yine kendi elde ettikleri HAD sonuçları ile karşılaştırmışlardır. Bu çalışma, deneysel çalışmadaki modeli temel alarak ikinci koni açısının genel akışa etkisini sistematik bir biçimde hesaplamalı olarak incelemeyi hedeflemektedir. Değişen ikinci rampa açısına bağlı olarak, hem şok-şok hem de şok-sınır tabaka etkileşiminin iki açılı rampa etrafında, daimi, periyodik veya daimi olmayan akışa neden olabileceği bilinmektedir [Durna ve Çelik, 2018]. Benzer etkileşimlerin koni etrafında da gerçekleşip gerçekleşmeyeceğinin belirlenmesi bu çalışmanın ana hedefidir. Üzerinde çalışılacak koni geometrisi, 30° sabit ilk açiya ve sırasıyla 45, 50, 55 ve 60° değişen ikinci açiya sahiptir. Bu çalışmada, 2.1 MJ/kg durma noktası entalpisine sahip M=7 akışı modellenmiştir. Modellenen akışkan azot olup modelleme sonucunda elde edilen şok yapıları ve akış alanları karşılaştırılmalı olarak değerlendirilmiş, akışın daimi veya periyodik olup olmadığı araştırılmıştır. Çalışmada, ilgilenilen akışın yapısına uygun olan yoğunluk bazlı sonlu-hacim Navier-Stokes çözücüsü kullanılmıştır. Çalışma sonucunda, artan arka açı değeri ile birlikte daimi duruma ulaşma süresinin arttığı gözlenmiştir. $\theta_2=45^\circ$, 50° , 55° durumları için daimi duruma ulaşma süreleri sırasıyla 120 μs , 700 μs ve 2500 μs 'dir. $\theta_2=60^\circ$ durumu, 3500 μs çözüm süresinde daimi duruma ulaşmamaktadır. Bu durum, daimi duruma ulaşma koşulu için 55° ve 60° aralığında bir üst arka açı sınırının olduğunu göstermektedir. Belli bir arka açı değerinden sonra akış daimi duruma ulaşmamaktadır. Buna ek olarak sıkışma köşesindeki ayrılma bölgesi ve ikinci koni yüzeyindeki, transmitted şokun çarpması sonucu oluşan ayrılma bölgesinin boyutu, artan arka açı değeri ile birlikte artış göstermektedir. Bu durum, transmitted şokun gücünün de arka açı değerinin artmasıyla birlikte arttığını göstermektedir. Arka açı değeri, daha karmaşık akış ve etkileşim yapılarına neden olmaktadır. Artan arka açı değerlerinde, sıkışma köşesindeki ayrılma bölgesinin boyutunun arttığı ve bu ayrılma bölgesindeki karmaşık akış fiziğinin, şok etkileşimi ve akış yapısı üzerinde baskın bir rol oynadığı düşünülmektedir.

¹ Lisans Öğrencisi, Uçak Müh. Böl., E-posta: tucar16@itu.edu.tr

² Dr. Öğr. Üyesi, Uçak ve Uzay Müh. Böl., E-posta: ahmetselim.durna@samsun.edu.tr

³ Doç. Dr. , Uzay Müh. Böl., E-posta: celikbay@itu.edu.tr

GİRİŞ

Hipersonik hava araçlarının tasarım ve geliştirilmesinde şok etkileşim mekanizması ve şok-sınır tabaka etkileşimi büyük bir öneme sahiptir. Hipersonik akışlarda bu şok etkileşimleri karmaşık bir davranış sergileyebilmekte ve etkileşim bölgelerinde ciddi hasarlara neden olabilecek seviyede yerel yüksek ısı transfer oranları ve yüksek basınç yükleri görülebilmektedir [Bertin ve Cummings, 2003]. Hipersonik akış, ismini bazı fiziksel fenomenlerin çok daha yüksek seviyeye çıkması sebebiyle almıştır. Çok yüksek hızlar söz konusu olduğunda, eğik şok dalgasının sapma açısı çok küçük olacak ve şok dalgası sınır tabakaya oldukça yakın olacaktır. Bu durum aşırı sürüklenme ve çok yüksek ısı transferine yol açmaktadır. Bu nedenle akışın fiziğini anlamak ve şok etkileşimlerini doğru bir şekilde modellemek ve sonuçları doğru yorumlamak, aracın güvenilirlik ve performansının artırılması için önemli bir rol oynamaktadır. Geçmişte bu amaca yönelik çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Birçok çalışmaya temel oluşturan ve bu konuda yapılan en eski çalışmalardan biri Edney [Edney, 1968] tarafından gerçekleştirilmiştir. Bir silindirin önünde oluşan ayrık yay şok (detached bow shock) dalgası ile bu şoka çarpan bir eğik (oblique) şokun etkileşim mekanizmasını analitik ve deneysel olarak inceleyen Edney, çalışma sonucunda etkileşimleri 6 farklı tipe ayırarak Tip I-VI olarak isimlendirmiştir [Edney, 1968]. Edney'in bu sınıflandırması, daha sonraki çalışmalarda görülen etkileşimlerin sınıflara ayrılmasında bir temel oluşturmıştır.

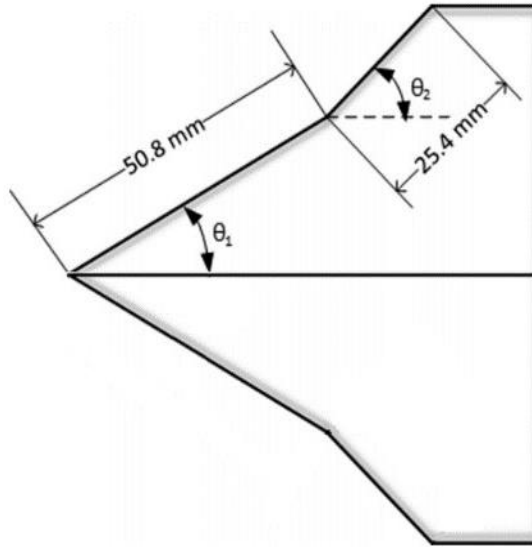
Olejniczak ve ark. hipersonik hızlarda iki boyutlu iki açılı rampa geometrisi üzerinde viskoz olmayan akışta şok-şok etkileşim mekanizmasını incelemek için yaptıkları çalışmada, Edney'in sınıflandırmasına uymayan yeni bir tip etkileşim mekanizması olan Tip IVr'yi elde ettiler [Olejniczak, Wright ve Candler, 1997]. Yaptıkları çalışma kapsamında farklı etkileşim tipleri arasındaki geçişleri de araştırmışlardır. Marini ise iki boyutlu sıkışma rampası etrafındaki akışı $M=6-14.1$ aralığında ve 1.0 'dan 3.6 MJ/kg durma entalpisine kadar değişecek şekilde mükemmel gaz kabulü ile inceledi ve yüzey basıncı, yüzey sürtünme katsayısı ve ısı transferi değerlerinin deney verileri ile uyumlu olduğunu gösterdi [Marini, 2001]. Swantek ve Austin $30-55^\circ$ açılarında bir rampa geometrisi üzerinde $4-7$ Mach aralığında hem düşük hem yüksek entalpiye sahip akışı deneysel olarak incelediler. $327 \mu s$ olan deney süreleri boyunca şok oluşumu ve etkileşim mekanizmalarını inceleyerek şok yapılarının Schlieren görüntülerini, rampa yüzeyindeki ısı akısı dağılımını elde ettiler [Swantek ve Austin, 2012]. Gaitonde ve ark. $25-55^\circ$ rampa açılına sahip koni geometrisi üzerinde $M=9.5$ 'da 4.2 MJ/kg durma entalpisine sahip azot akışını mükemmel gaz kabulü ile incelediler. Çalışma sonucunda elde edilen yüzey basıncı ve ısı transferi deneysel verilerle iyi bir uyum göstermiştir [Gaitonde, Canupp ve Holden, 2002]. Druguet ve ark. $25-55^\circ$ açılı koni geometrisi üzerinde $M=11.3$ 'te 3.7 MJ/kg durma entalpisine sahip hava akışını, 5 farklı viskoz olmayan akı algoritması ve 4 farklı akı sınırlayıcısının etkisini anlamak amacı ile mükemmel gaz kabulü altında incelediler. Çalışma sonucunda elde edilen yüzey basıncı ve ısı transferi verilerinin, deney verileri ile uyduğu görülmüştür. [Druguet, Candler ve Nompelis, 2005].

Bu çalışmada, ilk olarak deney verisi [Wright, Sinha, Olejniczak ve diğ., 2000] bulunan $25-50^\circ$ açılına sahip bir koni geometrisi etrafındaki akış hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) yöntemleriyle çözülerek deney verileriyle doğrulaması yapılacaktır. Ardından 30° sabit ön açılı ve $45, 50, 55$ ve 60° değişen arka açılı eksenel simetrik bir koni geometrisi etrafındaki akış yapısı, $M=7$ 'de incelenecektir. Koni geometrisinin arka açısının değişiminin, akış alanına ve şok etkileşimlerine etkisi araştırılacaktır. Analiz sonucunda elde edilecek şok yapıları ve akış alanları karşılaştırılmalı olarak değerlendirilecek, akışın daimi veya periyodik olup olmadığı araştırılacaktır.

YÖNTEM

Geometri

Şekil 1'de boyutları milimetre cinsinden olan, iki açılı koni geometrisinin şematik görüntüsü verilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere, ilk koni yüzeyi 50.8 mm, ikinci koni yüzeyi 25.4 mm uzunluğa sahiptir. Koni geometrisinin ilk açısı (θ_1) sabit olup 30° 'dir ve ikinci koni açısı (θ_2) $45, 50, 55$ ve 60° olarak değiştirilecektir. Geometri hakkında ayrıntılı bilgi, Durna ve ark. [Durna, Barada ve Çelik, 2016]'da bulunabilir.

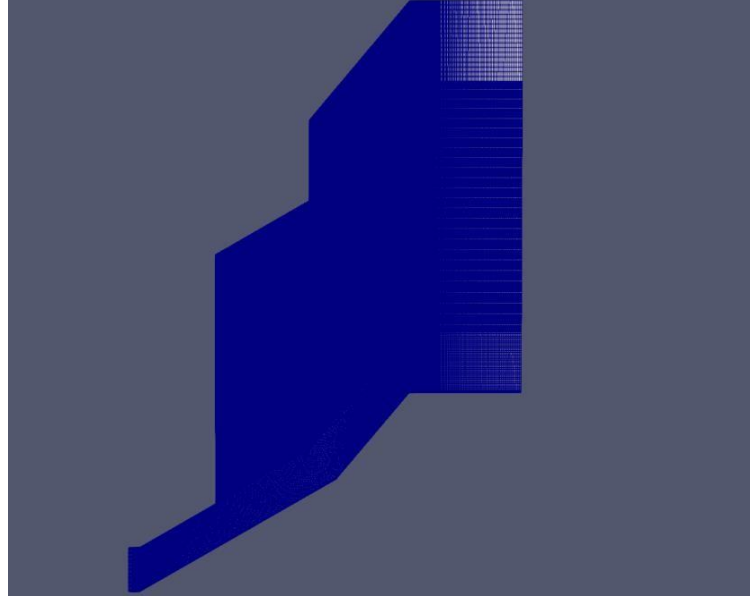


Şekil 1: İki açılı koni geometrisi

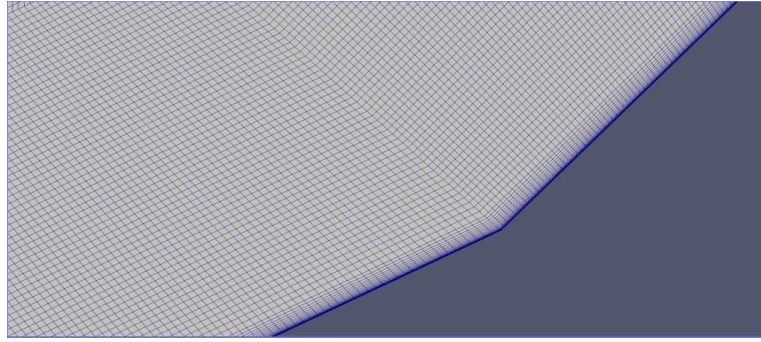
Çözüm Ağı

Yüksek hızlı akışlar söz konusu olduğunda, etkileşim mekanizmalarının yakalanabilmesi ve akışın doğasının anlaşılabilmesi için sınırlar etrafında kaliteli bir ağ sahip olmak gerekmektedir. Hesaplama ağının oluşturulmasında dikkat edilmesi gereken temel kural, çözüm için gerekli olmayan hesaplama alanı kısımlarının elimine edilerek hesaplama süresinin azaltılması ve akış yapısının uygun şekilde oluşabileceği kadar bir hesaplama alanının sağlanmasına dikkat edilmesidir. Akışın ve etkileşimlerin yoğun olduğu yerlerde sık bir ağ kullanılmasına özen gösterilmelidir. Akışın ve etkileşimin yoğun olmadığı, değişimin az görüldüğü yerlerde ise zaman ve maliyetten tasarruf amacı ile sık olmayan ağ kullanılmalıdır. Bu çalışmanın ağ örgüsü, rampa ucu, sıkışma ve genişleme köşeleri gibi geometri yüzeylerinin değişim gösterdiği yerlerde şok ve genişleme fanları oluşumu gözlenebileceği düşüncesi ile, meshlerin bu bölgelerde sıklaştırılması ile dikkatlice oluşturulmuştur. Bunun yanında, çalışma kapsamında viskoz bir akış ile ilgilenildiğinden, hesaplama alanının yüzeye yakın kısımlarında sınır tabaka oluşumu gözlenecektir ve sınır tabakanın doğru bir şekilde çözülmesi önem arz etmektedir. Bu amaca yönelik olarak, yüzeye yakın bloklarda sınır tabakayı içeren ağlar çok yoğun olmalıdır.

Bu çalışmada hesaplama alanı yukarıda bahsedilen kriterlere dikkat edilerek oluşturulmuştur. Akışın yön değiştirdiği sıkışma ve genişleme bölgeleri ile etkileşim olması beklenen yerlerde ağ örgüsü sıklaştırılıp, koni yüzeyine yakın bölgelerdeki sınır tabakayı içeren ağlar önemli ölçüde sık tutulmuştur. Şekil 2 (a)'da yapısal çözüm ağının genel görünümü verilmiştir. Şekil 2 (b)'de ise muhtemel etkileşim bölgelerinden biri olan sıkışma köşesinin yakından görüntüsü verilmiştir. Bu görüntüden sınır tabakayı içeren bloklardaki ağ örgüsü de görülebilmektedir. Hesaplama alanında 0.296 M hücre içeren çoklu bloklara sahip yapısal ağ kullanılmıştır. Akışa paralel ve duvar normal yönlerindeki maksimum hücre sayıları sırasıyla 781 ve 502'dir. Sınır tabakayı barındıran bloklardaki ağ örgüsünde y+ 1 seviyesinde tutularak, sınır tabakanın düzgün bir şekilde çözülebilmesi sağlanmıştır.



(a)



(b)

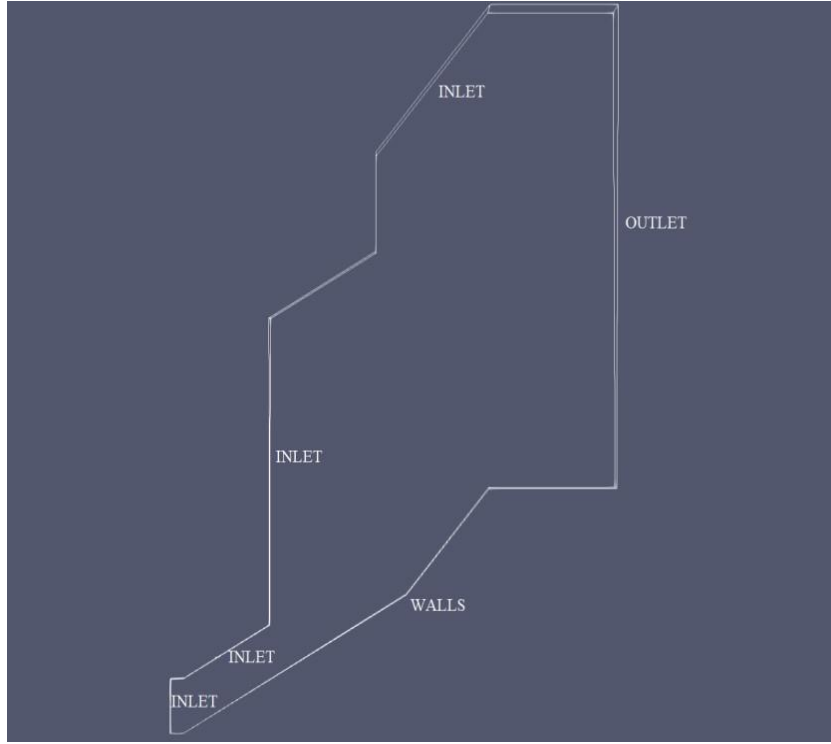
Şekil 2: (a) Çözüm ağının genel görünümü (b) Sıkışma köşesi civarındaki ağ sıklığının yakından görünümü

Çözücü Ayarları

Bu çalışmada, yoğunluk bazlı, zamana bağlı, sıkıştırılabilir bir Navier-Stokes çözücüsü olan rhoCentralFoam kullanılmıştır. Bu çözücü OpenFOAM tarafından sunulan açık kaynak hücre merkezli sonlu hacim çözücüsüdür. Akış alanındaki temas süreksizlikleri ve şok dalgaları gibi güçlü süreksizlikleri salınımsız yakalamak için merkezi şemalar kullanır. Çözücü, zamanda birinci derece ve uzayda ikinci derece doğruluğa sahiptir. İki açılı rampa geometrisi etrafında $M=7$ 'deki akış ile ilgilenilen geçmiş çalışmalarda da rhoCentralFoam çözücüsü kullanılmıştır [Durna, Barada ve Çelik, 2016; Durna ve Çelik, 2018; Durna ve Çelik, 2020].

Tablo 1: Sınır koşulları

	Basınç [Pa]	Sıcaklık [K]	Hız [m/s]
Giriş	391	191	1972
Çıkış	zeroGradient	zeroGradient	zeroGradient
Duvar	zeroGradient	300	0



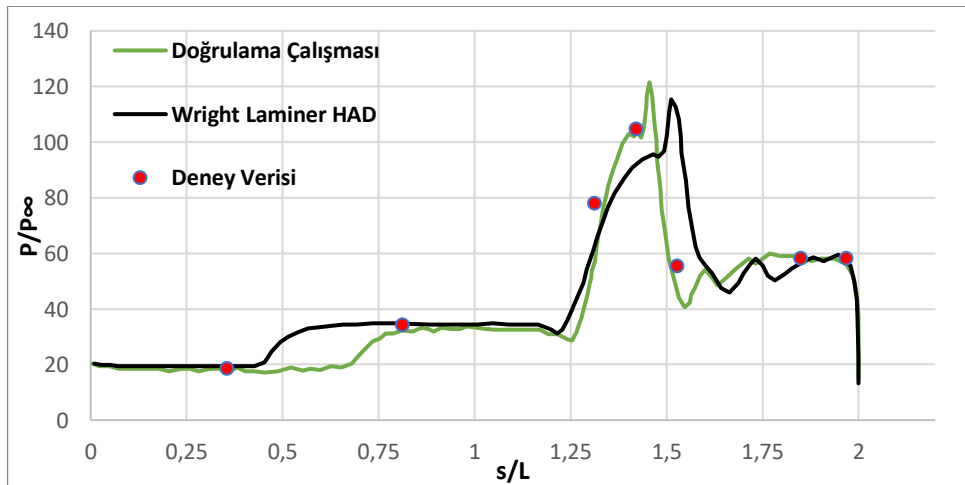
Şekil 3: Çözüm ağı üzerinde sınır koşulları

Çözüm ağı için seçilen sınır koşulları Şekil 3'te gösterilmiştir. Alanın sol sınırı giriş ve sağ sınırı çıkış sınır koşulu olarak belirlenmiştir. Koni geometrisi yüzeyi hareketsiz, viskoz olarak 300 K sabit sıcaklıkta olacak şekilde modellenmiştir. Şekil 3'te gösterilen sınır koşullarında verilen basınç, sıcaklık ve hız değerleri Tablo 1'de verilmiştir. Analiz serbest akım koşullarında başlatılmıştır.

SONUÇLAR

Doğrulama Çalışması

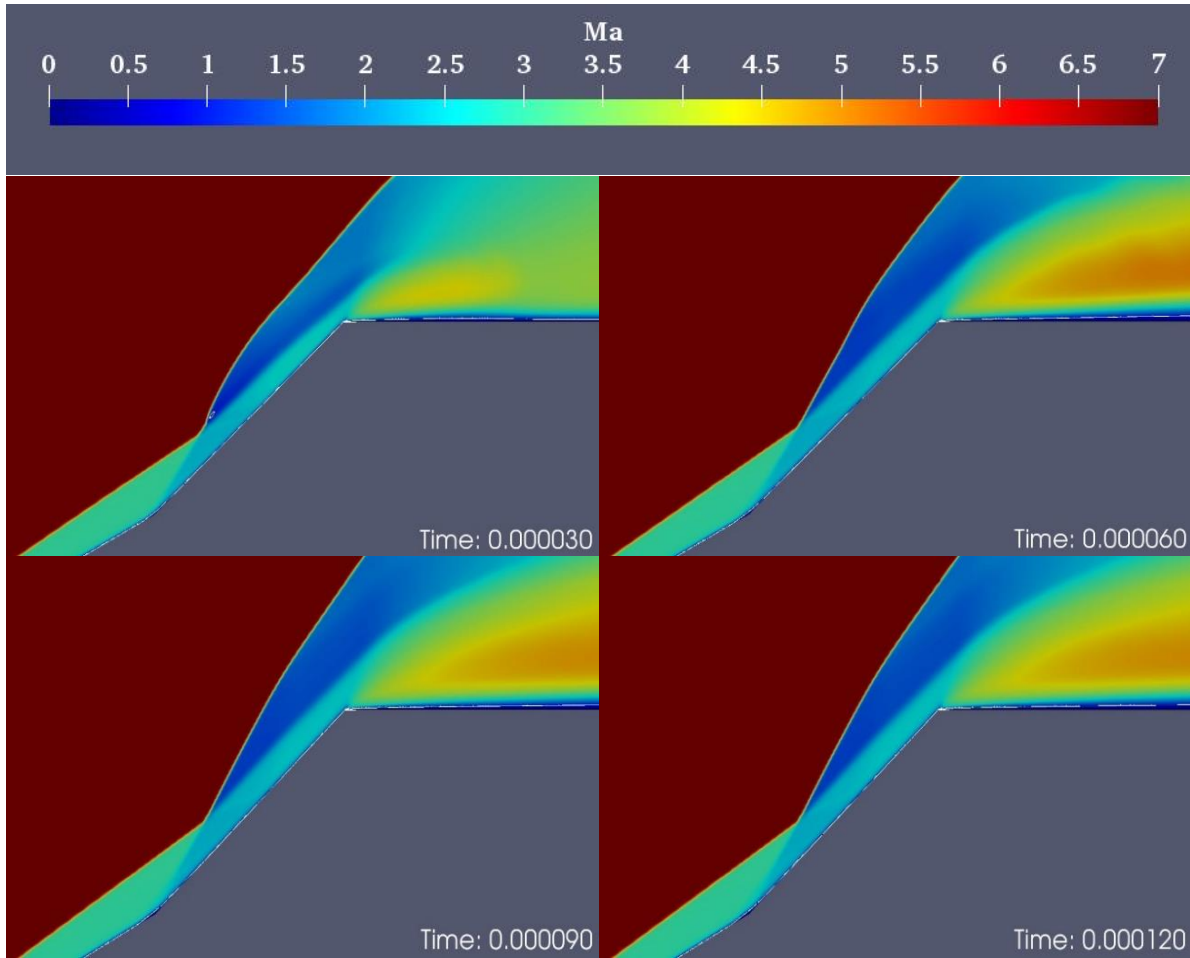
Gerçekleştirilen sayısal çalışmanın doğruluğunun kontrol edilmesi için, Wright ve diğerlerinin [Wright, Sinha, Olejniczak ve diğ., 2000] yaptığı deneysel çalışma temel alınarak bir analiz gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar, deneysel sonuçlar ve deneysel çalışmanın laminar HAD sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Wright ve diğerlerinin çalışmasında yer verilen yüzey üzerindeki boyutsuz basınç - boyutsuz uzunluk grafiği kullanılmıştır. Doğrulama çalışmasından elde edilen basınç-uzunluk grafiği boyutsuz hale getirilmiş ve Wright ve diğerlerinin çalışmasında yer verilen grafik ile birleştirilmiştir. Elde edilen grafik Şekil 4'te verilmiştir.



Şekil 4: Wright ve diğerlerinin çalışmasından elde edilen verilerin doğrulama çalışması ile karşılaştırılması

Şekil 4'ten görüldüğü üzere, Wright ve diğerlerinin laminar HAD sonuçları, ufak sapmalar haricinde deneysel verilerle uyum göstermektedir. Doğrulama çalışması sonucunda elde edilen grafik, Wright ve diğerlerinin sonuçları ile genel davranış itibarı ile uyum içindedir. Hücum kenarı şokunun arkasındaki bölgede 0-0.45 arasındaki değerler hem deneyle hem de diğer sayısal çalışmayla tamamen uyuşmaktadır. Boyutsuz basıncın tepe noktası değeri de deney verileriyle uyum içindedir yorumu yapılabilir. Genişleme köşesine denk gelen kısımdaki basınçtaki ani düşüş davranışı da hem deneysel hem de diğer sayısal çalışmayla tamamen uyuşmaktadır. Basıncın ufak bir düşüşün ardından ani bir artış gösterdiği lokasyon da ($s/L = 1.25$) Wright ve diğerlerinin sonuçlarına benzerlik göstermektedir. Basınçtaki artış ve azalış davranışları genel olarak uyumlu olmakla birlikte, $s/L = 0.5-0.75$ arasındaki basınç değerleri Wright ve diğerlerinin çalışmasına göre daha düşüktür. Bunun yanında basıncın tepe noktasına ulaştığı değer, Wright ve diğerlerinin çalışmasında daha büyük bir s/L değerine denk gelmektedir. Doğrulama vakasında, Wright ve diğerlerinin çalışmasına kıyasla ayrılma bölgesinin bir miktar küçük olduğu anlaşılmıştır. Grafikler arasındaki farklılığın nedeninin bu olduğu düşünülmektedir. Ayrılma bölgesinin büyümesinin ve ayrılma şokunun gücünün artmasının akış ve etkileşimler üzerindeki etkisi, genel yapıyı genişleme köşesine doğru hareket ettirecek şekilde olmaktadır. Doğrulama çalışmasında ayrılma bölgesinin küçük olması, etkileşimlerin sıkışma köşesine daha yakın bir yerde gerçekleşmesine sebep olmaktadır. Tüm bunların yanında, Wright ve diğerlerinin laminar HAD sonuçları ile ufak farklılıklar olmasına rağmen, deneysel sonuçlarla mükemmel bir uyum gözlenmektedir.

$\theta_2=45^\circ$ için Etkileşim Mekanizması

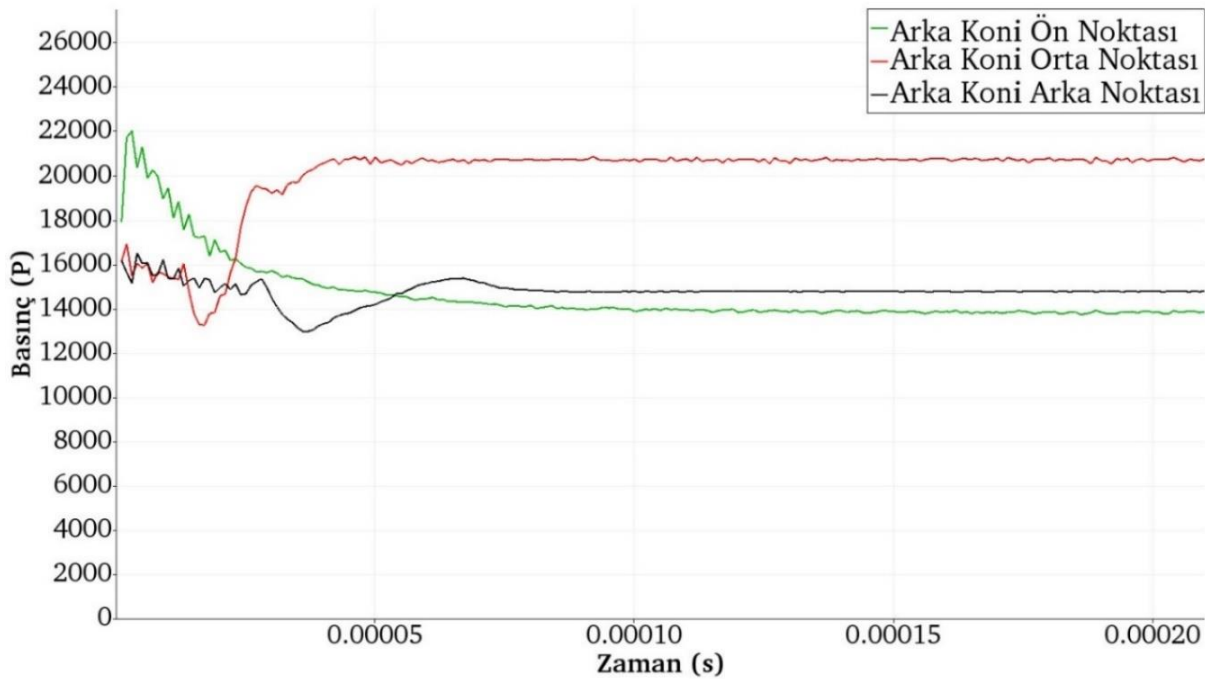


Şekil 5: $\theta_2=45^\circ$ durumu için Mach konturu görüntüleri

Akış ilk olarak ön koninin hücum kenarı ile karşılaşmakta ve akışın hız doğrultusu, koni yüzeyine paralel olacak doğrultuda değişmektedir. Hız doğrultusunun değişimi sonucunda birinci koni yüzeyi boyunca hücum kenarı şoku (LES, leading edge shock) oluşumu gözlenmektedir. Akış ikinci koni yüzeyine geldiğinde yine hız doğrultusu değişmekte ve sıkışma köşesinden kaynaklanan şok dalgası (RS, reattachment shock) oluşumu gözlenmektedir. RS, LES ve eğik şok, üçlü nokta (TP,

triple point) adı verilen noktada etkileşirler. 0-30 μ s zaman dilimi aralığında ses altı ve ses üstü bölgeleri birbirinden ayıran temas süreksizliğinin, yukarı yönde genişleme bölgesine kadar uzandığı görülmektedir. İkinci koni yüzeyinin sonunda oluşan genişleme bölgesinin, akışın hızını artırdığı Mach konturlarından anlaşılmaktadır. 30 μ s'den 90 μ s'ye kadar geçen sürede genel akış yapısında önemli bir değişiklik gözlenmemektedir. Bu zaman aralığında, LES ve RS'nin boylarının uzadığı, eğik şokun kavisli yapısının düzleştiği ve bu nedenle TP'nin bir miktar daha yukarı doğru hareket ettiği gözlenmektedir. Temas süreksizliğinin boyunun uzadığı ve genişleme bölgesinin arka bölgesine doğru uzandığı gözlenmektedir. 120 μ s anında eğik şok en düz haline ulaşmaktadır. 120 μ s'den itibaren akış daimi duruma ulaşmıştır ve bu zamandan sonra akış ve etkileşim yapısında herhangi bir değişiklik görülmemektedir.

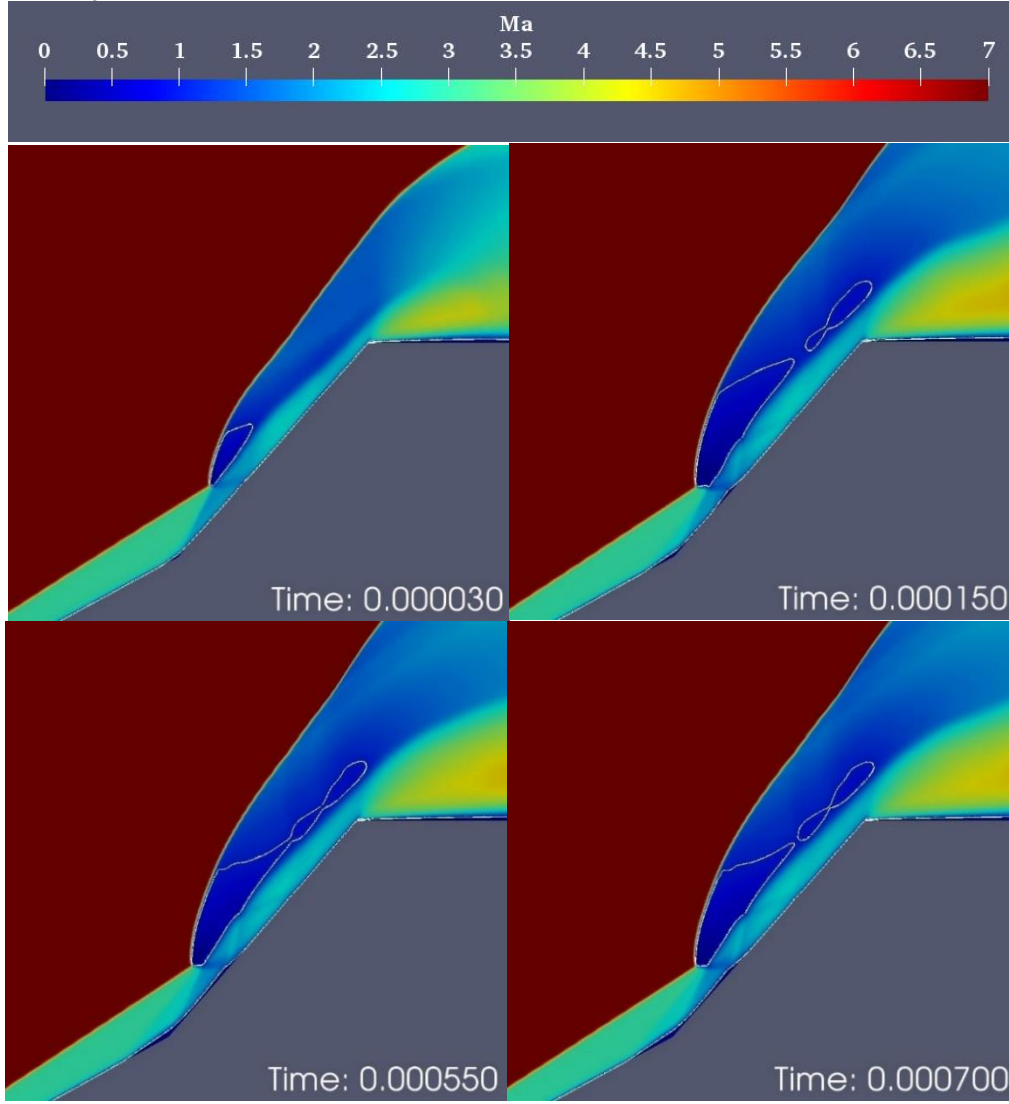
Şekil 6, arka koni üzerinde seçilen 3 nokta için basıncın zamana göre değişimini göstermektedir. Seçilen 3 nokta, arka koninin önünde bir nokta (0.0470407, 0.0284466, 0), arka koninin orta noktasında (0.0553182, 0.0367241, 0) ve arka koninin genişleme köşesi civarında (0.063908, 0.0453139, 0) olacak şekilde seçilmiştir. Grafikten görüldüğü üzere, 75 μ s civarına kadar hareketli bir basınç dağılımı gözlenirken, 75 μ s'den sonra değişimler yavaşlamakta, yaklaşık olarak 120 μ s civarında kararlı duruma ulaşmakta ve bu andan sonra basınçta bir değişim görülmemektedir. Zamana göre basınç dağılımları üzerinde yapılan bu yorumlar, Mach konturları üzerinde yapılan yorumları da destekler niteliktedir.



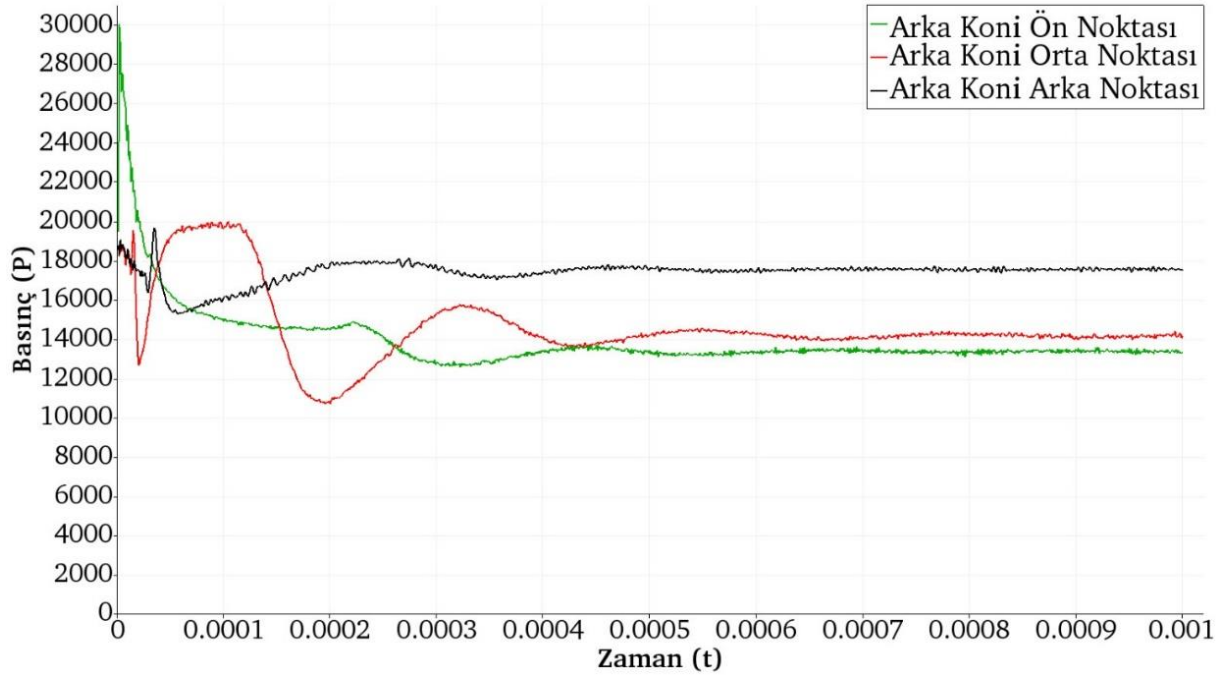
Şekil 6: $\theta_2=45^\circ$ durumu için basınç-zaman grafiği

$\theta_2=50^\circ$ İçin Etkileşim Mekanizması

$\theta_2=50^\circ$ durumunda da LES ve RS oluşumu gözlenir. Bunun yanında $\theta_2=45^\circ$ durumundan farklı olarak yay şoku (BS, bow shock) oluşumu gözlenmektedir. Sıkışma köşesindeki ayrılma bölgesinin, $\theta_2=45^\circ$ durumuna göre hafifçe büyük olduğu gözlenmektedir. BS'nin, $\theta_2=45^\circ$ durumundaki eğik şoka göre daha kavisli olduğu görülmektedir. TP'den yayılan şok (TS, transmitted shock), Mach konturlarında görülecek şekilde belirgindir. İkinci koni üzerinde TS'nin çarpma noktasında bir ayrılma bölgesi oluşur. Zaman ilerledikçe ayrılma bölgelerinin boyutları artar, BS ardındaki ses altı bölgenin alanı büyür, TS'nin gücü artar. Yaklaşık 90 μ s anında, bir indüklenmiş ayrılma şoku (ISS, induced separation shock) oluşumu görülür.

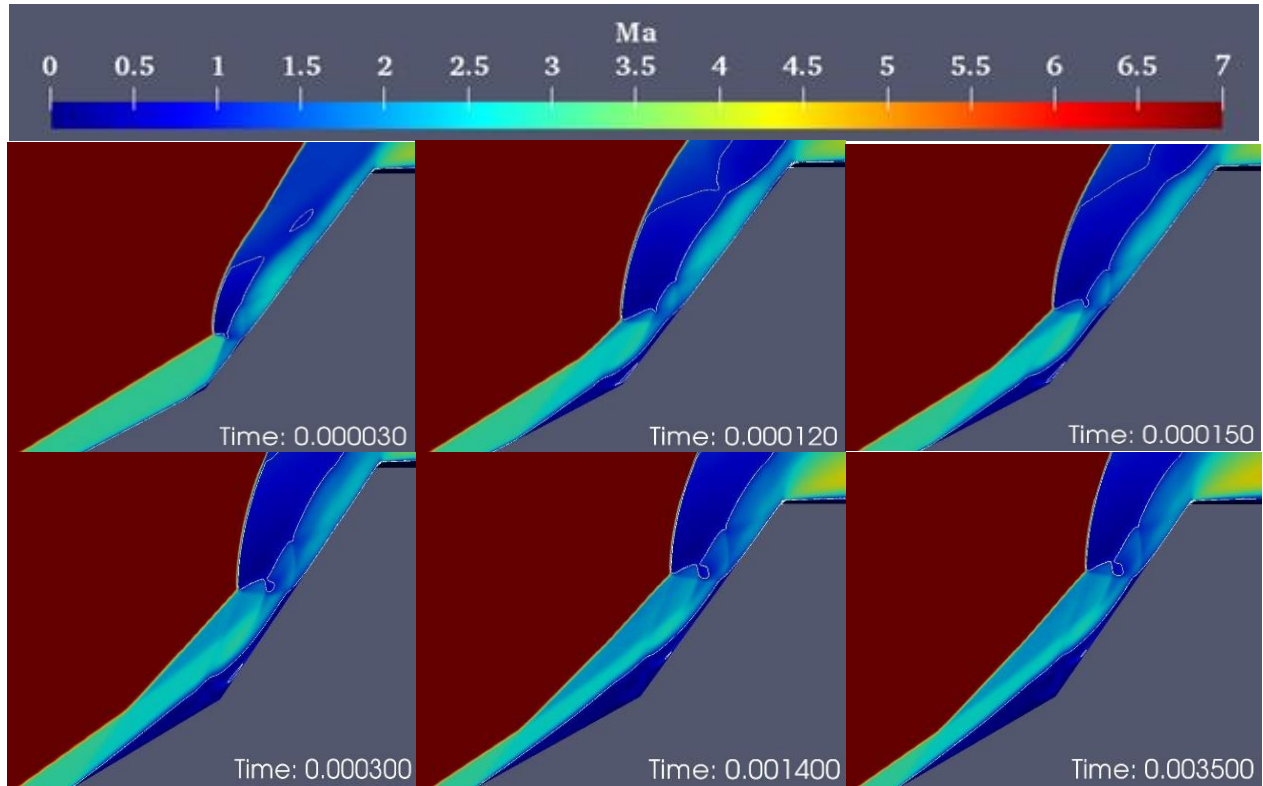
Şekil 7: $\theta_2=50^\circ$ durumu için Mach konturu görüntüleri

150 μ s'ye kadar BS büyümeye ve güçlenmeye devam eder ve TP sıkışma köşesine doğru hareket eder. Bunun yanında ayrılma bölgelerinin boyutlarının da büyüdüğü görülmektedir. Yaklaşık 150 μ s'de IRS (induced reattachment shock) oluşumu gözlenir. Oluşan IRS, temas süreksizliği ile temas ettiği noktada temas süreksizliğini deforme edebilecek kadar güçlüdür (Şekil 7, 150 μ s anı). 550 μ s anına kadar üçlü nokta hareketlerinin devam ettiği ve ayrılma bölgelerinin boyutunun arttığı gözlenmektedir. 550 μ s anından sonra üçlü nokta hareketleri son derece yavaş ve az miktarda gerçekleşmektedir. 550 μ s'den 700 μ s'ye kadarki sürede üçlü nokta son defa sıkışma köşesine doğru hareket eder ve 700 μ s'den sonra tamamen hareketsiz kalır. 700 μ s anında $\theta_2=50^\circ$ durumu daimi duruma ulaşmıştır yorumu yapılabilir.

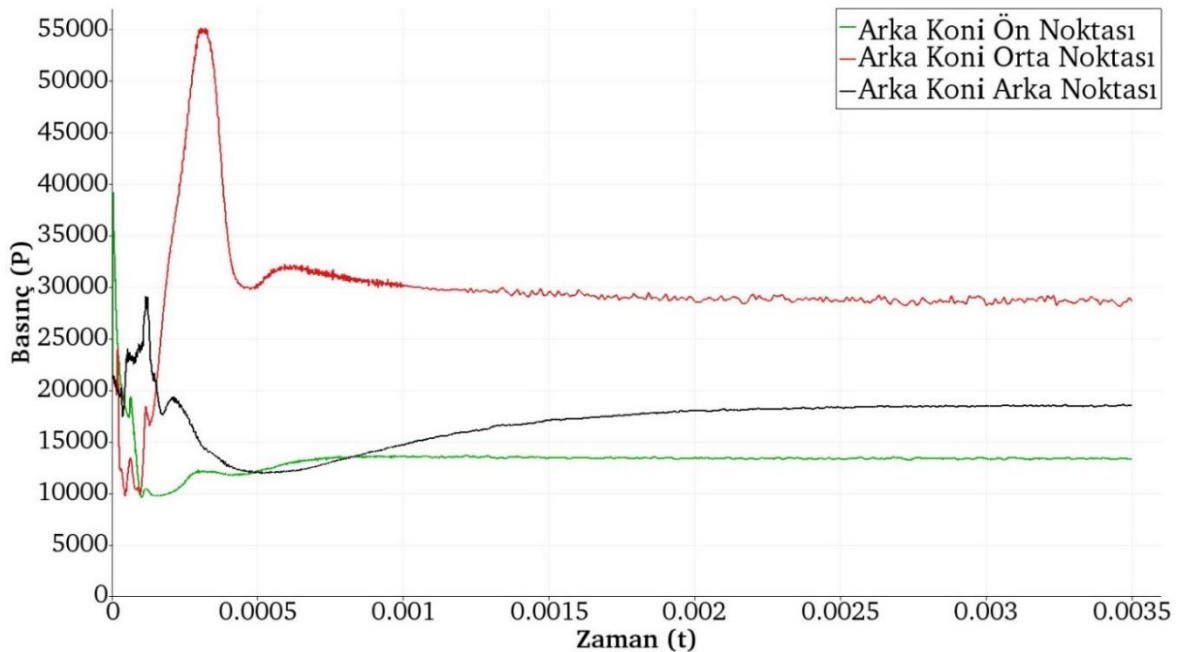
Şekil 8: $\theta_2=50^\circ$ durumu için basınç-zaman grafiği

Şekil 8, 45° durumunda olduğu gibi arka koni üzerinde seçilen 3 nokta için basıncın zamana göre değişimini göstermektedir. $450 \mu s$ 'ye kadar hareketli bir dağılım gözlenirken, bu andan sonra değişimler yavaşlamakta, yaklaşık olarak $700 \mu s$ civarında daimi duruma ulaşmakta ve sonrasında bir değişim görülmemektedir. Basınç dağılımında görülen değişimler, Mach konturları üzerinde yapılan yorumları da destekler niteliktedir.

$\theta_2=55^\circ$ için Etkileşim Mekanizması

Şekil 9: $\theta_2=55^\circ$ durumu için Mach konturu görüntüleri

Simülasyonun erken adımlarında LES, RS ve BS oluşumu gözlenmektedir. Ayrılma bölgelerinin boyutlarının daha büyük olduğu görülmektedir. BS'nin gücünün artması, oluşan RS'nin gücünün artmasına neden olmaktadır. $\theta_2=45^\circ$ ve $\theta_2=50^\circ$ durumlarında simülasyonun erken adımlarında Mach konturlarında gözlenemeyen IRS, Mach konturlarında görülebilir hale gelmektedir. $\theta_2=45^\circ$ ve $\theta_2=50^\circ$ 'den farklı olarak, $\theta_2=55^\circ$ durumunda tek bir üçlü nokta oluşumu yerine bir Mach Stem (MS) oluşumu gözlenmektedir. RS, LES ve BS'nin kesişim noktası doğrultusunda uzanmamakta ve bunun sonucunda MS yapısı oluşmaktadır. MS'nin her iki ucunda TP'ler meydana gelmekte ve TS ve RS, bu MS aracılığı ile birbirine bağlanmaktadır. 60 μs 'de, ayrılma bölgeleri birleşmekte ve 65 μs 'de ayrılma bölgesinin boyutu aniden artmaya başlamaktadır. Ayrılma bölgesinin ani büyümesi sonucunda bir SS oluşumu görülmekte ve koni yüzeyine yakın olan TP'ye doğru uzanmaktadır. Ayrılma bölgesinin boyutunun artmaya devam etmesiyle birlikte doğrultusu koni yüzeyine yakın TP'den diğer TP'ye doğru hareket etmektedir. Yaklaşık olarak 93 μs anında bu SS, LES ve BS'nin kesiştiği nokta ile etkileşmektedir. SS'in bu konuma gelmesine kadarki geçen sürede, ayrılma bölgesinin büyüüp düzleşmesi sonucunda RS'in ikinci rampa ile yaptığı açı azalmakta ve ikinci koniye paralel bir duruma gelmektedir. SS ve RS'nin bu hareketi sonucunda kesme tabakası boyu uzamakta ve ikinci koniye paralel bir konuma gelmektedir. Bununla birlikte, kesme tabakasının altındaki ses üstü bölge de uzamakta ve ikinci koni orta noktasına doğru uzanmaktadır. 93 μs anında LES ve BS'nin kesiştiği noktaya temas eden SS, ayrılma bölgesindeki büyümenin devam etmesi nedeniyle, önce LES ile etkileşime girmektedir. Etkileşen LES ve SS, daha sonra BS ile etkileşime girmektedirler. Bunun sonucunda TP'nin ikinci koni ortasına doğru hareket etmesine neden olmaktadır. Bu hareket esnasında, uzayan kesme tabakası kısalmaya başlamaktadır. Oluşan bu etkileşim yapısı, anlatılan şekilde gelişmeye devam ederek 300 μs anına kadar genişleme köşesine doğru hareket etmektedir. Bu hareket esnasında ayrılma bölgesi büyümesini sürdürmektedir. 300 μs anında, ayrılma bölgesinin sürekli büyümeye devam etmesi nedeniyle, ayrılma bölgesinin sıkışma köşesinin üstüne denk gelen kısmında bir SS oluşumu daha gözlenir. Oluşan yeni SS, koni yüzeyine uzak olan TP'ye doğru uzanır. Oluşan bu yapı, 300 μs anından itibaren değişmeden genişleme köşesine doğru hareket etmeye devam eder. Bu hareket 300 μs anlarında hızlıdır fakat 1400 μs civarında iyice yavaşlar. Gittikçe yavaşlayan bu ilerleme, yaklaşık 2500 μs anında tamamen durur ve 3500 μs anına kadar bir değişim gözlenmemektedir. $\theta_2=55^\circ$ durumu için, 2500 μs 'de daimi duruma ulaşmaktadır yorumu yapılabilir.

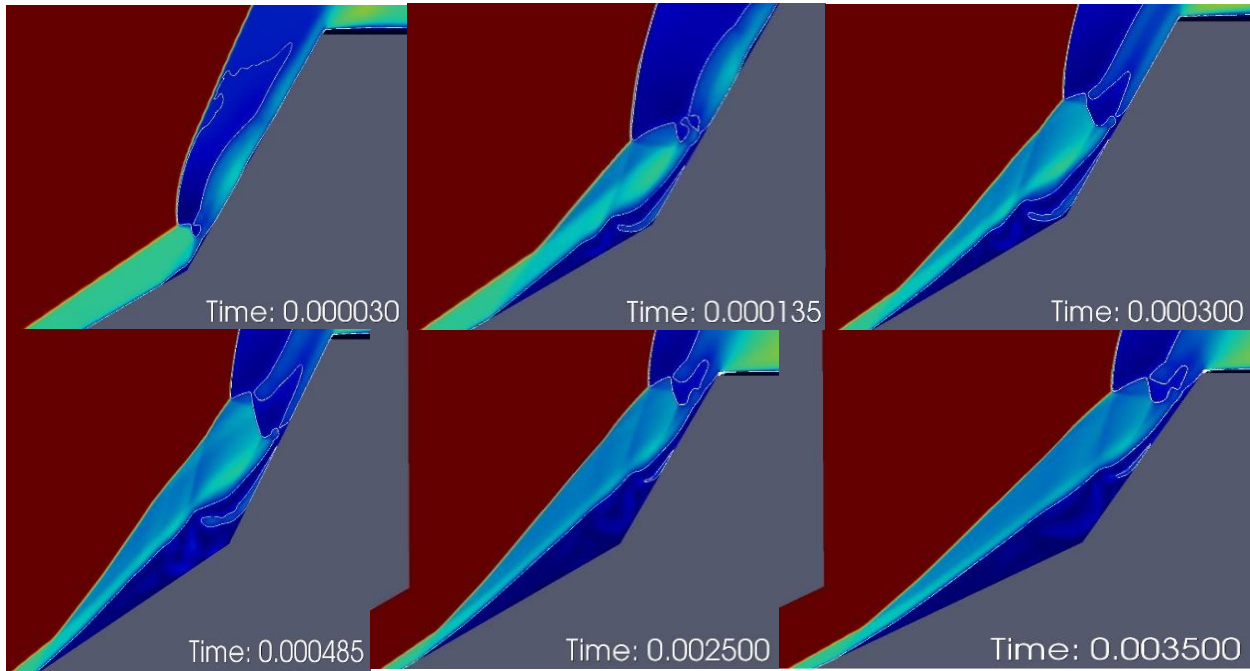


Şekil 10: $\theta_2=55^\circ$ durumu için basınç-zaman grafiği

Şekil 10, arka koni üzerinde seçilen 3 nokta için basıncın zamana göre değişimini göstermektedir. Grafikten görüldüğü üzere 750 μs 'ye kadar hareketli bir dağılım gözlenirken, bu andan sonra değişimler yavaşlamakta, yaklaşık olarak 2250-2500 μs civarında değişimler yok

denecek kadar azalmaktadır. $\theta_2=55^\circ$ durumu için 2500 μs civarında daimi duruma ulaşmaktadır yorumu yapılabilir. Bu grafiklerden çıkarılan sonuçlar, Mach konturları üzerinde yapılan yorumları da destekler niteliktedir.

$\theta_2=60^\circ$ İçin Etkileşim Mekanizması

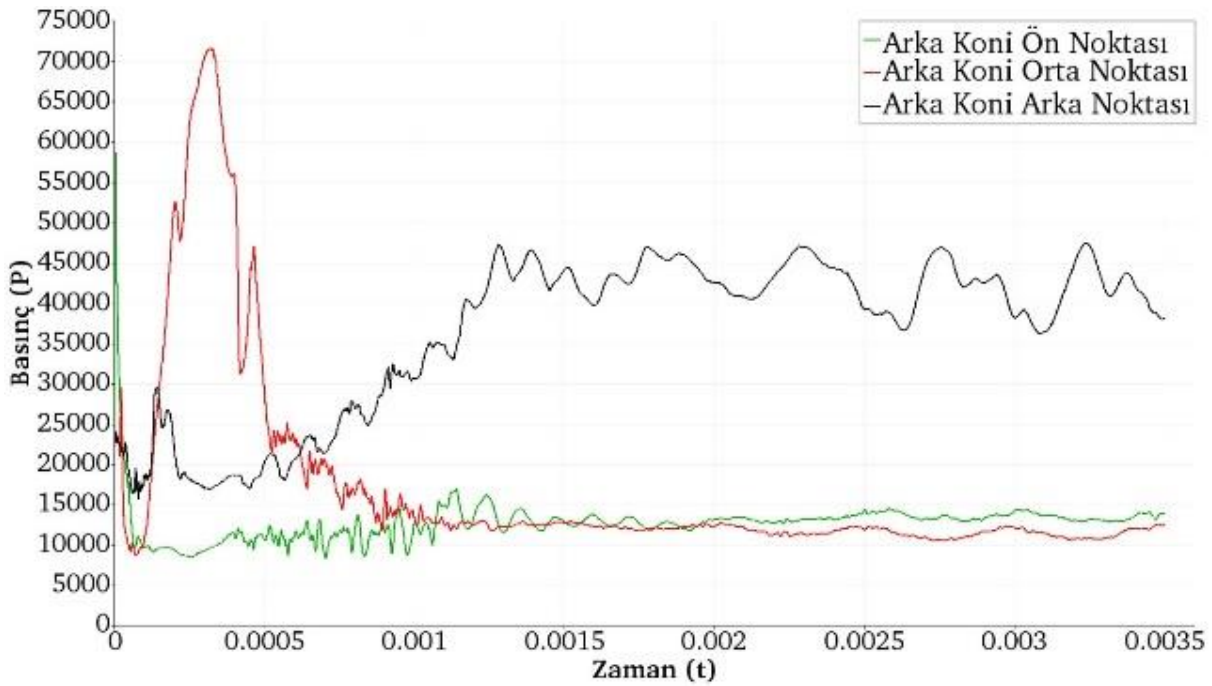


Şekil 11: $\theta_2=60^\circ$ durumu için Mach konturu görüntüleri

Akışın genel fiziği ve etkileşim mekanizması simülasyonun başlarında $\theta_2 = 55^\circ$ durumu ile benzerdir ve LES, RS ve BS oluşumu $\theta_2=60^\circ$ durumu için de gözlenmektedir. Bu durumda, diğer durumlara göre, ayrılma bölgelerinin boyutlarının daha büyük olduğu görülmektedir. RS'in gücünün de arttığı görülmektedir. Buna ek olarak $\theta_2=55^\circ$ durumunda olduğu gibi MS oluşumu gözlenmektedir. MS'nin her iki ucunda TP'ler meydana gelmektedir ve TS ile RS, MS aracılığı ile birbirine bağlanmaktadır. Bu durumda $\theta_2=55^\circ$ durumundan farklı olarak, iki ayrılma bölgesi sonradan birleşmemekte, simülasyon başından itibaren iki ayrılma bölgesinin uçlarının birleşik olduğu Mach konturlarından gözlenebilmektedir. Ayrılma bölgesinin boyutu büyürken, ayrılma bölgesinin içinde bir ses üstü balonu oluşumu gözlenmekte boyutu zamanla büyümektedir. Ayrılma bölgesinin büyümesi sonucunda bir SS oluşumu görülmekte ve koni yüzeyine yakın olan TP'den diğer TP'ye doğru hareket edip LES ve BS'nin kesiştiği nokta ile etkileşmektedir. SS, ayrılma bölgesindeki büyümenin devam etmesi nedeniyle önce LES ile etkileşime girmekte ve bu şok yapısı BS ile etkileşime girmektedirler. Bunun sonucunda TP ikinci koni orta noktasına doğru hareket etmektedir. Ayrıca ayrılma bölgesinden kaynaklanan ikinci bir SS oluşmakta ve ilk SS'in hareket ettiği gibi hareket ederek yaklaşık 135 μs anında BS'nin başladığı nokta ile etkileşmektedir. Bu etkileşimden sonra, yukarı hareketine devam ederek, önce kesişen LES ve SS ile kesişir ve bu şok yapısı, BS ile etkileşime girer. Bu durum koni yüzeyine uzak olan TP'nin ve akış yapısının genişleme köşesine doğru hareketine neden olur. 375 μs 'den sonra, ayrılma bölgesinin büyümesine bağlı olarak, ikinci oluşan SS, BS'ye doğru hareket eder ve 420 μs anında hareketi neticesinde BS'nin başlangıç noktası ile temas eder. Bu temastan sonra, önce MS'ye ve sonrasında ikinci koni yüzeyine doğru bir hareket yapar. Yaklaşık 440 μs anında, ayrılma bölgesinden kaynaklanan üçüncü bir SS oluşumu gözlenmektedir. İkinci SS, tekrardan koni yüzeyinden BS'ye doğru hareket edip 470 μs anında BS ile etkileşir ve ilerlemeye devam eder. Bu hareket sonucunda üçüncü SS'e yaklaşır ve yaklaşık 485 μs anında üçüncü SS ile birleşerek tek bir SS oluşur. 375 μs -485 μs aralığında gerçekleşen bu patern, 1000 μs anına kadar 7-8 defa tekrarlanmaktadır. 1000 μs 'den sonra ise, ikinci ve üçüncü oluşan SS'ler birleşmek yerine, birbirlerine yaklaşıp uzaklaşacak şekilde bir patern izlemektedirler. 1000 μs anından sonrası için ikinci SS'in katettiği mesafe ilk paterne göre daha azdır. $\theta_2=60^\circ$ durumunun etkileşim ve akış yapısı üzerinde, ayrılma bölgesinin içindeki akış yapısı ve bu akış yapısının hareketlerinin baskın olduğu düşünülmektedir. Oluşan şoklar ve bu şokların

hareketi, ayrılma bölgesinin şekil değişimleri neticesinde olmaktadır. $\theta_2=60^\circ$ durumu için daimi duruma ulaştırmıştır yorumu yapılamamaktadır. Simülasyon sonlarında ayrılma şokları ve koni yüzeyine uzak olan TP, ikinci koni yüzeyi boyunca aşağı ve yukarı hareket etmektedirler. Fakat periyodik bir yapıya ulaşmıştır yorumu yapılamamaktadır. Simülasyon süresi uzatılırsa, periyodik bir yapı elde edilebileceği düşünülmektedir. Bunu kanıtlamak için daha uzun bir süre ile çözüm gerekmektedir.

Şekil 12, arka koni üzerinde seçilen 3 nokta için basıncın zamana göre değişimini göstermektedir. Grafikte arka koni ön noktası için değişimin yaklaşık olarak 2000 μs 'de yavaşladığı ve bu andan sonra hafif salınımlı bir yapı sergilediği gözlenmektedir. Arka koni orta noktası için değişimin yaklaşık olarak 1250 μs 'de yavaşladığı ve bu andan sonra hafif salınımlı bir yapı sergilediği gözlenmektedir. Fakat arka koni arka noktası için bu durum diğer noktalardan farklılık göstermektedir. Arka koni arka noktasında değişim azalma göstermemektedir. Fakat son 2 tepe noktasına bakıldığında, ilerleyen zamanlar için periyodikliğe ulaşabilir yorumu yapılabilir.



Şekil 12: $\theta_2=60^\circ$ durumu için basınç-zaman grafiği

SONUÇ

Mevcut çalışmada, sabit ön açılı ve değişen arka açılı koni geometrisi etrafında 7 Mach'ta azot akışı için etkileşim ve akış yapısı araştırılmıştır. Çalışma kapsamında öncelikle literatürdeki bir deneysel çalışma temel alınmış ve elde edilen sonuçların doğrulaması yapılmıştır. Doğrulama çalışmasında elde edilen boyutsuzlaştırılmış basınç-uzunluk grafiği genel davranış olarak deneysel sonuçlarla benzerlik gösterse de, ayrılma şokundan dolayı farklılıklar gözlenmektedir. Genel akış yapısı, basınç değişimleri ve tepe noktası değeri bakımından uyumlu gözükse de ayrılma şokunun doğrulama vakasında neden gözlenemediğine dair bir çalışmaya ihtiyaç duyulmaktadır. Doğrulama çalışması sonrasında, koni arka açısının değişiminin akış alanı ve şok etkileşimleri üzerindeki etkisi ve şok-şok/şok-sınır tabaka etkileşimlerinin daimi, periyodik veya daimi olmayan akışa neden olup olmadığı sistematik bir biçimde hesaplamalı olarak araştırılmıştır.

Çalışma sonucunda ilk dikkat çeken, artan arka açısı değeri ile birlikte daimi duruma ulaşma süresinin artması olmuştur. Daimi duruma en erken ulaşan durum $\theta_2=45^\circ$ olmuştur. Bunu $\theta_2=50^\circ$ ve sonrasında $\theta_2=55^\circ$ durumu takip etmektedir. $\theta_2=45^\circ$, $\theta_2=50^\circ$ ve $\theta_2=55^\circ$ durumları için daimi duruma ulaşma süreleri sırasıyla yaklaşık olarak 120 μs , 700 μs ve 2500 μs 'dir. $\theta_2=60^\circ$ 3500 μs çözüm süresinde daimi duruma ulaşamamaktadır. Bu durum daimi duruma ulaşma koşulu için 55° ve 60° aralığında bir üst arka açısı sınırının olduğunu göstermektedir. Belli bir arka açısı değerinden sonra

akış daimi duruma ulaşamamaktadır. Diğer bir sonuç ise, sıkışma köşesindeki ayrılma bölgesi ve ikinci koni yüzeyindeki, TS'nin çarpması sonucu oluşan ayrılma bölgesinin boyutunun artan arka açısı ile birlikte artış göstermesidir. TS'nin çarpması sonucu oluşan ayrılma bölgesinin boyutunun arka açısı ile birlikte artış göstermesi, TS'nin gücünün de artan arka açısı ile birlikte arttığını göstermektedir. Oluşan BS'nin gücü de artan arka açısı ile birlikte artış göstermektedir. Küçük arka açısı değerlerinde bir adet TP oluşumu gözlenirken, arka açısının artışı ile TP sayısı ikiye çıkmaktadır. Tüm durumlar için simülasyonun başlangıcında şok oluşumlarının aynı şekilde olduğu gözlenmiştir. Simülasyonun ilerleyen zamanlarında, arka açısı değerlerine göre farklı akış yapıları oluşmaktadır. Artan arka açısı değerlerinde sıkışma köşesindeki ayrılma bölgesinin boyutunun arttığı ve bu ayrılma bölgesindeki karmaşık akış fiziğinin, şok etkileşimi ve akış yapısı üzerinde baskın bir rol oynadığı düşünülmektedir. $\theta_2=60^\circ$ durumu için ayrılma bölgesindeki hareketliliğin son derece fazla olduğu ve ayrılma bölgesinin hareketleri sonucu oluşan ayrılma şoklarının akış fiziğini önemli derecede etkilediği gözlenmiştir.

Kaynaklar

- Bertin, J., & Cummings, R. (2003). *Fifty years of hypersonics: where we've been, where we're going*. Progress In Aerospace Sciences, 39(6-7), 511-536. doi: 10.1016/s0376-0421(03)00079-4
- Druguët, M., Candler, G., & Nompelis, I. (2005). *Effects of Numerics on Navier-Stokes Computations of Hypersonic Double-Cone Flows*. AIAA Journal, 43(3), 616-623. doi: 10.2514/1.6190
- Durna, A., & Celik, B. (2018). *Time-periodic shock interaction mechanisms over double wedges at Mach 7*. Shock Waves, 29(3), 381-399. doi: 10.1007/s00193-018-0864-7
- Durna, A., & Celik, B. (2020). *Effects of Double-Wedge Aft Angle on Hypersonic Laminar Flows*. AIAA Journal, 58(4), 1689-1703. doi: 10.2514/1.j058754
- Durna, A., El Hajj Ali Barada, M., & Celik, B. (2016). *Shock interaction mechanisms on a double wedge at Mach 7*. Physics Of Fluids, 28(9), 096101. doi: 10.1063/1.4961571
- Edney, B. (1968). *Anomalous heat transfer and pressure distributions on blunt bodies at hypersonic speeds in the presence of an impinging shock*. Stockholm.
- Gaitonde, D., Canupp, P., & Holden, M. (2002). *Heat Transfer Predictions in a Laminar Hypersonic Viscous/Inviscid Interaction*. Journal Of Thermophysics And Heat Transfer, 16(4), 481-489. doi: 10.2514/2.6714
- Marini, M. (2001). *Analysis of hypersonic compression ramp laminar flows under sharp leading edge conditions*. Aerospace Science And Technology, 5(4), 257-271. doi: 10.1016/s1270-9638(01)01109-9
- Olejniczak, J., Wright, M., & Candler, G. (1997). *Numerical study of inviscid shock interactions on double-wedge geometries*. Journal Of Fluid Mechanics, 352, 1-25. doi: 10.1017/s0022112097007131
- Swantek, A., & Austin, J. (2012). *Heat Transfer on a Double Wedge Geometry in Hypervelocity Air and Nitrogen Flows*. 50Th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including The New Horizons Forum And Aerospace Exposition. doi: 10.2514/6.2012-284
- Wright, M., Sinha, K., Olejniczak, J., Candler, G., Magruder, T., & Smits, A. (2000). *Numerical and Experimental Investigation of Double-Cone Shock Interactions*. AIAA Journal, 38(12), 2268-2276. doi: 10.2514/2.918