

SCRAMJET MOTORLARININ YANMA ODASINDA KAVİTE BAZLI AKIŞIN SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ

Eda Nur Ulutürk¹, Kevser Narkuz², Ahmet Selim Durna³
Samsun Üniversitesi, Samsun

ÖZET

Kavite bazlı akışlar son yıllarda scramjet çalışmalarında karşılaşılan yanma problemlerine alternatif bir çözüm olarak araştırılmaktadır. Dikdörtgen bir kavite için, kavitenin yukarı köşesinde oluşan iki güçlü şok dalgası akışın hızını düşürür. Şok dalgalarının etkisiyle kavitenin alt duvarına yakın bir yerde hız en durgun halini alır. Kavitenin kullanılması, akışın içerisinde girdaplar oluşmasına ve amaçlandığı gibi bir süre daha yanma odasında kalmasına izin vermektedir. Bu çalışmada bir scramjet motoru için ses üstü hızlarda $U/D=1$, $U/D=3$ ve $U/D=5$ uzunluk/derinlik oranlarına sahip açık kavite akışının sayısal olarak incelenmesi yapılmıştır. Tüm kavite modelleri için, kavitenin içerisinde Mach sayısının 1'in altına düştüğü sonucuna varıldı. Kavitenin uzunluk/derinlik oranı arttıkça birincil girdabın daha büyük bir alanı kapladığı, akışın sürüklenme oranının arttığı ve buna bağlı olarak kalma süresinin azaldığı analiz edildi. Kavitenin arka rampa açısı azaldıkça, daha yüksek sürtünme katsayıları ve daha kısa kalma süreleri elde edildi.

GİRİŞ

Scramjet, hipersonik hızlarda çalışabilen dönen bir parça barındırmadan hava soluyan bir motordur. Bir scramjet için, yanma yoluyla ısı eklenmeden önce karıştırma yapılmalıdır. Tüm süreçlerin (örneğin, yakıt eklenmesi, moleküler düzeyde karıştırma, moleküler çarpışmalar, kimyasal tepkimeler, ısı salınımı, itki üretimi) gerçekleşmesi için gereken süre birkaç milisaniye mertebesinde. [Seleznov vd., 2019] Bir scramjet motorda en önemli unsur, kullanılan yakıt enjeksiyon yönteminin minimum toplam basınç kaybı ile hızlı bir yakıt-hava karışımı sağlamasıdır. Farklı çalışma koşullarında, yüksek hızlı yanmayı sürdürmek için kararlı bir alev tutma sistemi kritik öneme sahiptir. Bir boğazdaki sürtünmesiz akışa ısı eklenirken hem ses altı hem de ses üstü durumlar için boğazda $M=1$ 'e yaklaşır. Mach sayısı 1'e yaklaştıkça, eklenebilecek ısı miktarını sınırlayan bir termal boğaz gelişir. Bu sınırı genişletmek için duvarlı veya basamaklı bir yakıcı tasarlanmalıdır. İdeal olarak reaksiyon süresi ve karıştırma süresi birbirine yakın olmalıdır. [Segal, 2009]

Son zamanlarda scramjet üzerine yapılan çalışmalarda, kavite bazlı alev tutma sistemleri, karıştırma konusundaki yeterlilikleri açısından büyük ilgi görmüştür. Uygun koşullar altında, kavitede sıkışan girdaplar, sıvının kalma süresini büyük ölçüde artırır. Kavite akışları, açık ve kapalı kavite akışı olmak üzere iki kategoride incelenir. Kayma tabakası tanım olarak bir hız gradyanının mevcut olduğu akış tabakasıdır. Açık kavite akışlarında, ayrılma köşesinde oluşan kayma tabakası tüm kavite uzunluğunu kaplar ve kavite arka yüzü boyunca bir yere yeniden bağlanır. Bu kavite genellikle düşük sürtünme değerlerine sahiptir, ancak aynı zamanda ana akıştan nispeten küçük sürüklenme seviyelerine de sahiptir. Kapalı kavite akışları, kayma tabakası kavitenin tüm uzunluğunu kaplayamadığında ve kavite tabanına yeniden bağlandığında meydana gelir. Kapalı kavite, açık kavitelere kıyasla daha büyük sürüklenme katsayıları ile karakterize edilir. Bu nedenle, bir scramjet yakıcıda açık kavite daha çok arzu edilir. [Gruber vd., 2001] Gruber vd. [2001] Mach 3'ten 9'a kadar hidrokarbon yakıtları kullanması beklenen çift modlu bir scramjet konsepti üzerinde çalışmıştır. Çalışmalar sırasında, $5 < U/D < 8$ en/boy oranına sahip farklı enjeksiyon şemaları test edilmiştir. Kararsız kavite akışlarının sayısal simülasyonu Baurle vd. [2001] tarafından yapılmıştır. Sonuçlar, kavite konseptinin, scramjet motorlu yanma odası için bir alev tutucu olma potansiyeline sahip olduğunu göstermiştir.

¹ Lisans Öğrencisi, Havacılık ve Uzay Müh. Böl., E-posta: 17960048@samsun.edu.tr

² Lisans Öğrencisi, Havacılık ve Uzay Müh. Böl., E-posta: 17960003@samsun.edu.tr

³ Dr. Öğretim Üyesi, Havacılık ve Uzay Müh. Böl., E-posta: ahmetselim.durna@samsun.edu.tr

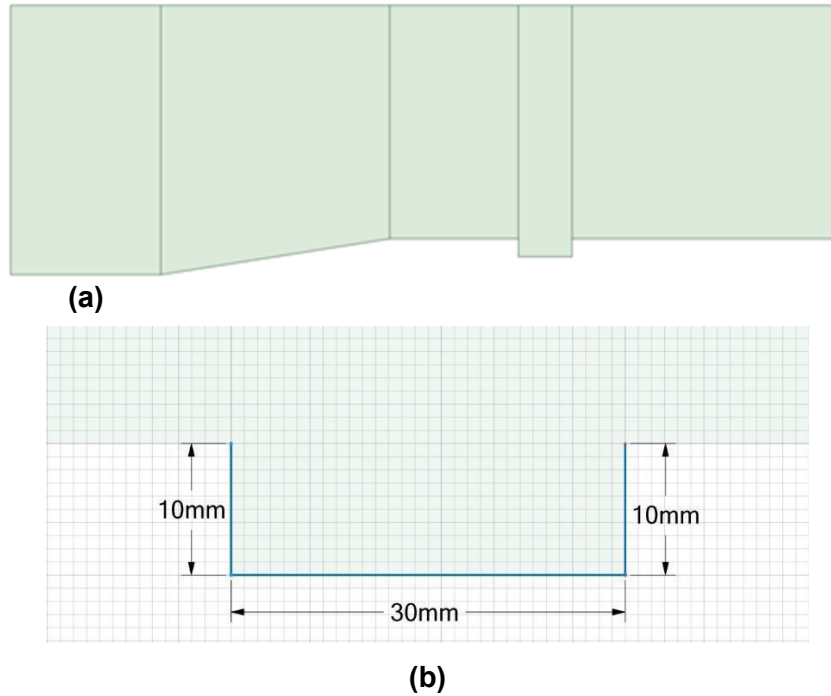
Kavitelerin akış alanı özellikleri ve düşük ve yüksek hızlı akışlarda kullanılan kavitelerle ilgili araştırma çalışmaları Ben-Yakar ve Hanson [2001] tarafından özetlenmiştir. Açık kaviteler üzerinde süpersonik reaksiyona giren akışın alev tutma ve karıştırma geliştirme özelliklerini değerlendirmek için Yu vd. [2001] tarafından deneysel bir çalışma yapılmıştır. Alev karakteristiği ve yanma özelliklerinde ortaya çıkan değişiklikler, akışın Schlieren görselleştirilmesi ve akışın duvar basıncı ölçümleri kullanılarak değerlendirilmiştir. Bir parçacığın yeniden ana akışa dönmeden kavitenin içerisinde kalması beklenen süre kalma süresi (*residence time*) olarak tanımlanmaktadır ve kavite derinliğinin bir fonksiyonudur. Kalma süresinin alt limiti, kavitenin yanmayı sağlayabilmesi için gereken minimum süredir. Eğer kalma süresi bunu sağlayamıyorsa, kavitenin uzunluğu arttırılmalıdır. Sürüklenme oranı (*entrainment rate*), kavite uzunluğunun bir fonksiyonudur. Sürüklenme oranı akış kütlelerinin ne kadar sürüklendiği ile ilişkilendirilebilir. [Baurle vd., 2001]

Bu çalışmada bir scramjet tasarımının yanma odasına yerleştirilen kavitenin $M=3$ 'deki etkisi sayısal olarak incelenecektir. Öncelikle bu çalışmada deneyi gerçekleştirilen bir çalışmayla karşılaştırılacak ve ardından farklı kavite ölçüleri için değerlendirmeler yapılacaktır.

YÖNTEM

Model

Şekil 1'de Gruber vd. [2001] deneyini gerçekleştirmiş olduğu açık kavite modeli ve ölçülendirmeleri gösterilmiştir. Modelin U/D oranı 3 olarak alınmıştır. Bu gösterilen açık kavite modeli için doğrulama çalışması yapılacaktır. Ardından Tablo 1'de verilen dört farklı U/D ve rampa açısında çözümler karşılaştırılacaktır.



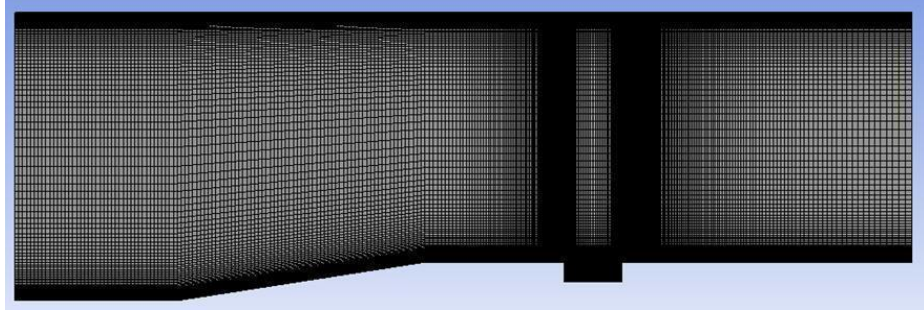
Şekil 1: Açık kavite modeli

Tablo 1: Açık kavite modeli özellikleri.

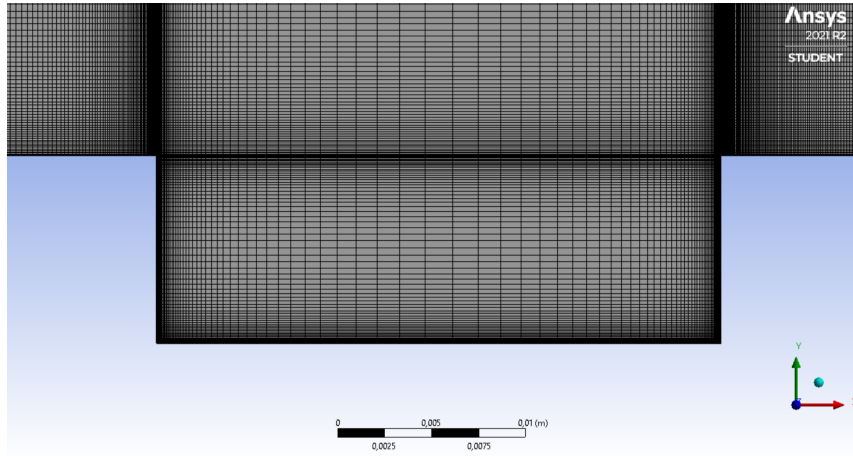
Ad	U/D	Rampa açısı (θ)
UD1-90	1	90
UD3-90	3	90
UD5-90	5	90
UD3-30	3	30

Çözüm Ağı ve Serbest Akım Koşulları

Şekil 2’de rampa üzerindeki (a) ve kavite içerisindeki (b) çözüm ağı sıklığı gösterilmiştir. Kavite içerisi ve yakınlarında en sık çözüm ağı oluşturulmuştur. Oluşturulan çözüm ağında toplam 120348 hücre bulunup azami açıklık oranı 170’dir. Farklı sıklıklarda çözüm ağları oluşturularak çözüm ağından bağımsızlık çalışması yapılmıştır.



(a)



(b)

Şekil 2: Rampa üzeri ve kavite içerisindeki çözüm ağı sıklığı.

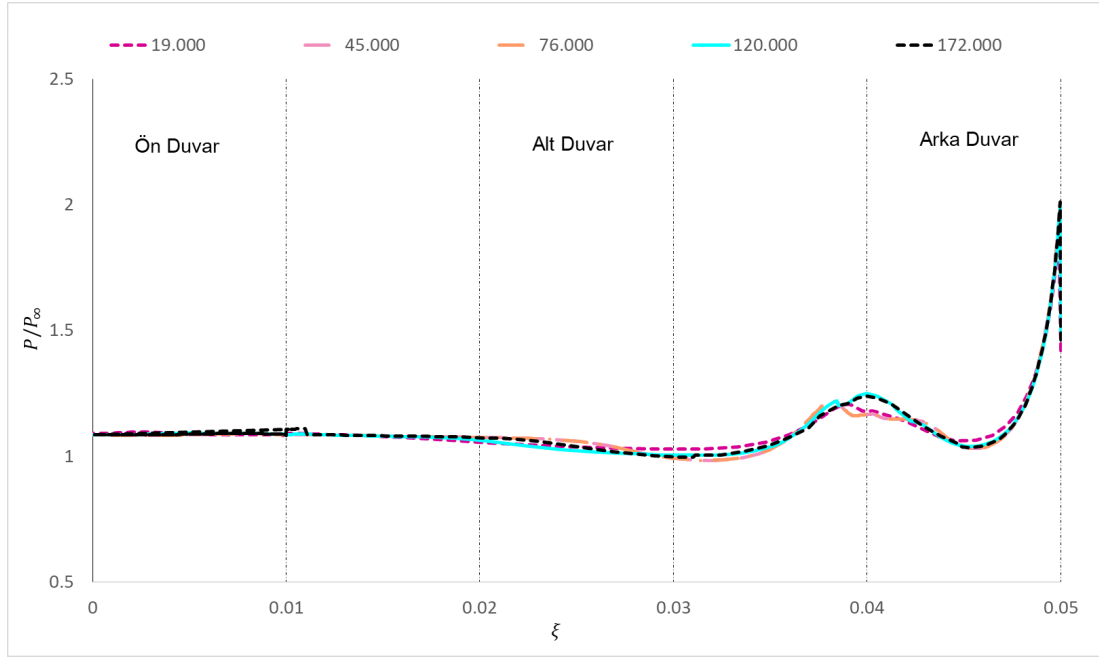
Gruber vd. [2001]’in çalışmasında serbest akım koşulları Tablo 2’de verilmiştir. Çözüm ağının sol duvarına tablodaki serbest akım koşulları uygulanmıştır.

Tablo 2: Serbest akım koşulları [Gruber vd., 2001]

Basınç	18,784 Pa
Hız	622 m/s
Toplam sıcaklık	300 K
Toplam basınç	690,000 kPa

Çözüm Ağından Bağımsızlık Çalışması

Sırasıyla 19.000, 45.000, 76.000, 120.000 ve 172.000 hücre sayısına sahip beş farklı çözüm ile çözüm ağından bağımsızlık çalışması yapılmıştır. Şekil 3'te farklı hücre sayısı içeren her bir çözüm için normalize edilmiş statik basınç dağılımları gösterilmiştir. Hücre sayısı, hücrelerin köşelere doğru belirlenen sıklaşma oranları değiştirilmeden kavitenin içerisinde en yoğun olacak şekilde artırılmıştır. Her bir çözüm ağı için azami açıklık oranı 160-185 arasında kalmıştır. Kavitenin ön, alt ve arka duvardaki statik basınçları, serbest akım statik basıncına göre normalize edilmiş ve sonuçlar etkin uzaklığın bir fonksiyonu olarak aşağıdaki grafikte verilmiştir. Etkin uzaklık, kavitenin ön ayrılma köşesinden kavitenin genişliği boyunca olan uzaklık olarak tanımlanır. Çalışmada $\frac{P}{P_\infty}$ boyutsuz statik basıncı, ξ ise etkin uzaklığı ifade etmektedir.



Şekil 3: Farklı hücre sayıları içeren her bir çözüm için duvar statik basıncı dağılımı.

Şekil 3'de verilen grafiğe bakıldığında 19.000, 45.000 ve 76.000 eğrilerinin diğer eğrilerden sapsmış olduğu ve 120.000 ve 172.000 eğrilerinin birebir üst üste olduğu görülmektedir. Bu sonuçlar neticesinde 120.000 hücre sayısına sahip çözüm ağdan bağımsızdır. Çalışmanın devamında 120.000 hücre sayısına sahip çözüm kullanılacaktır.

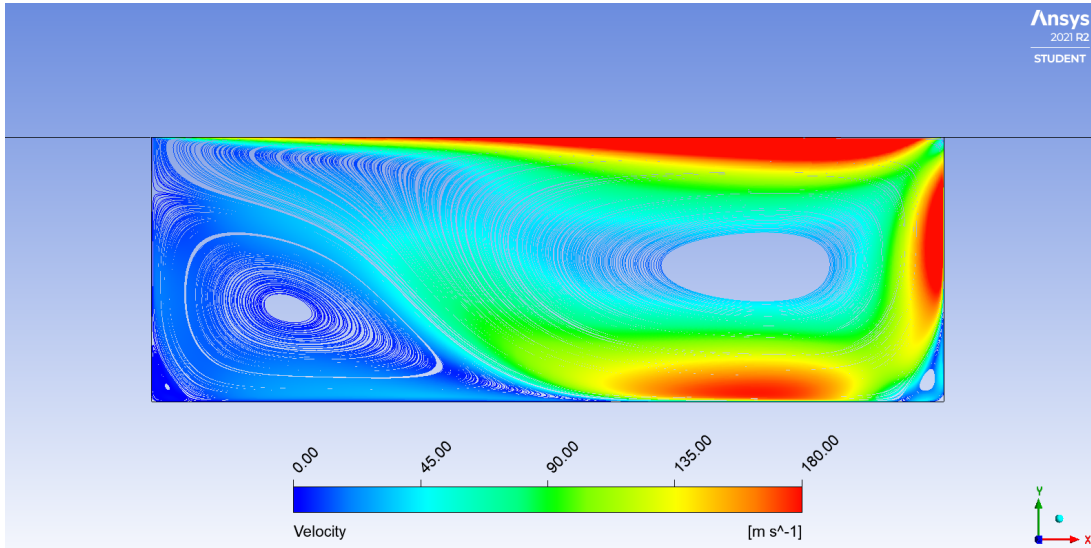
Sayısal Model

Sayısal çözümler ticari bir Navier-Stokes çözücüsü olan ANSYS Fluent yazılımıyla yapılmıştır. Daimi, sıkıştırılabilir, iki boyuttaki akış koşulunda yoğunluk temelli çözülmüştür. Türbülans modeli Wilcox (Standart) $k-\omega$ ile çözümler alınmıştır. Sayısal model olarak kapalı formülasyon ile gradyanları hesaplamada en küçük kareler hücre tabanlı metodu kullanılmıştır. Courant sayısı (CFL) 0,5 değerinden başlayacak şekilde seçilmiştir.

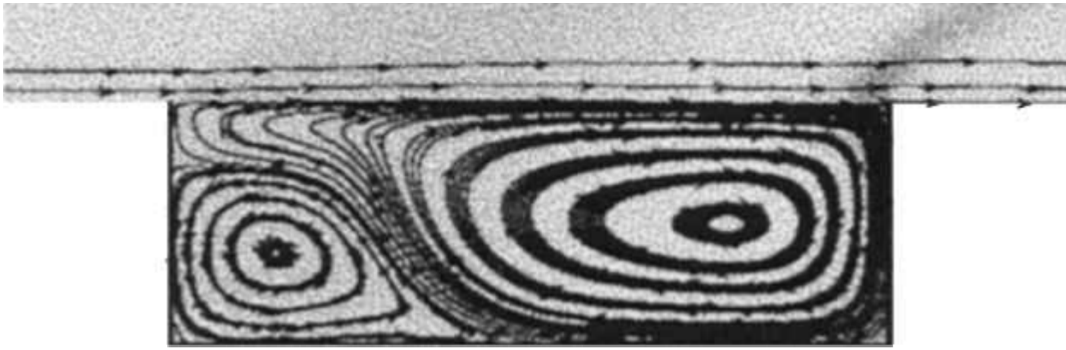
UYGULAMALAR VE DEĞERLENDİRME

Doğrulama Çalışması

Şekil 4 (a)'da bu çalışmadan elde edilen Standart k- ω modeli ile alınan kavite içerisindeki akım çizgileri, (b)'de Gruber vd. [2001]'in çalışmasından alınan akım çizgisi görüntüsü verilmiştir. Akım çizgileri üzerinde hız renklendirmesi yapılmıştır. Kavite içerisinde arka duvar etrafında saat yönünde dönen büyük bir birincil girdap, ön duvarda ise saat yönünün tersinde daha küçük bir ikincil girdap görülmektedir.



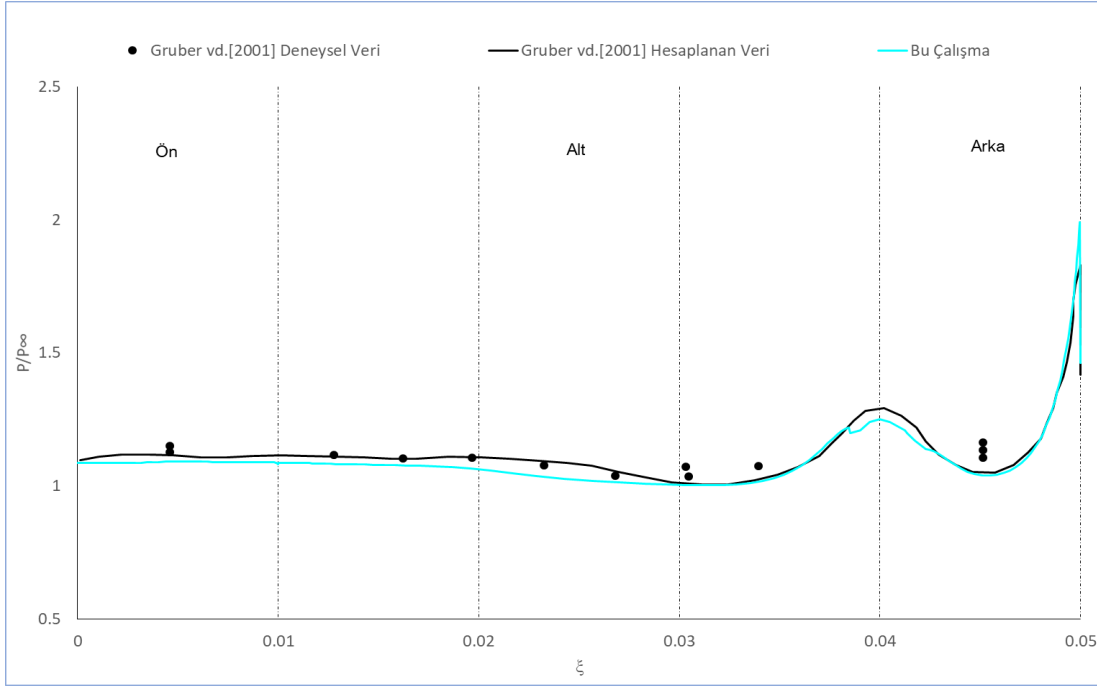
(a)



(b)

Şekil 4: (a) Standart k- ω modeli ile kavite içerisinde alınan akım çizgileri görüntüsü (b) Gruber vd. [2001]'in çalışmasından alınan akım çizgisi görüntüleri

Bu çalışma ve Gruber vd. [2001]'in çalışması karşılaştırıldığında; iki sonucun neredeyse aynı olduğu görülmektedir. Bu çalışmadaki birincil ve ikincil girdaplar Gruber vd. [2001]'in çalışmasındaki ile tamamen uyumludur. Ek olarak, Gruber vd. [2001]'in çalışmasında alt duvarın köşelerinde görülmeyen üçüncül girdaplar da bu çalışmada görülmüştür.



Şekil 5: Bu çalışma ile Gruber vd. [2001]'in deneysel ve hesaplamalı sonuçlarının kavitedeki boyutsuz statik basınç değerlerine göre karşılaştırması.

Statik basınç, ön ve alt duvar boyunca büyük ölçüde değişim göstermemiştir. Akış alt duvardan arka duvara geçerken basınçta ani bir artış görülmektedir. Akış arka duvardan ayrılırken yeniden bir basınç artışı meydana gelmektedir, bunun sebebi olarak oluşan şok dalgası gösterilebilir. Şekil 5'te verilen grafikte görüldüğü üzere bu çalışma, Gruber vd. [2001]'in çalışmasını doğrulamıştır. Deneysel verilerinin sayısal çalışma ile tutarlı olduğu görülmektedir. Buna ek olarak, bu çalışmada basıncın en yüksek olduğu bölgeler, basınç konturları ile çok daha uyumludur.

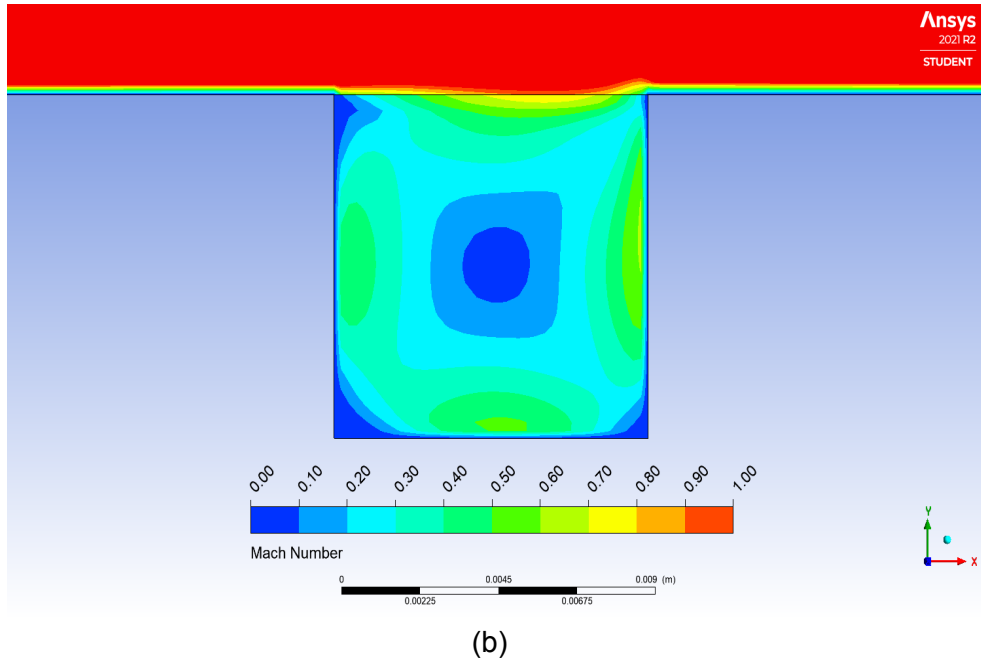
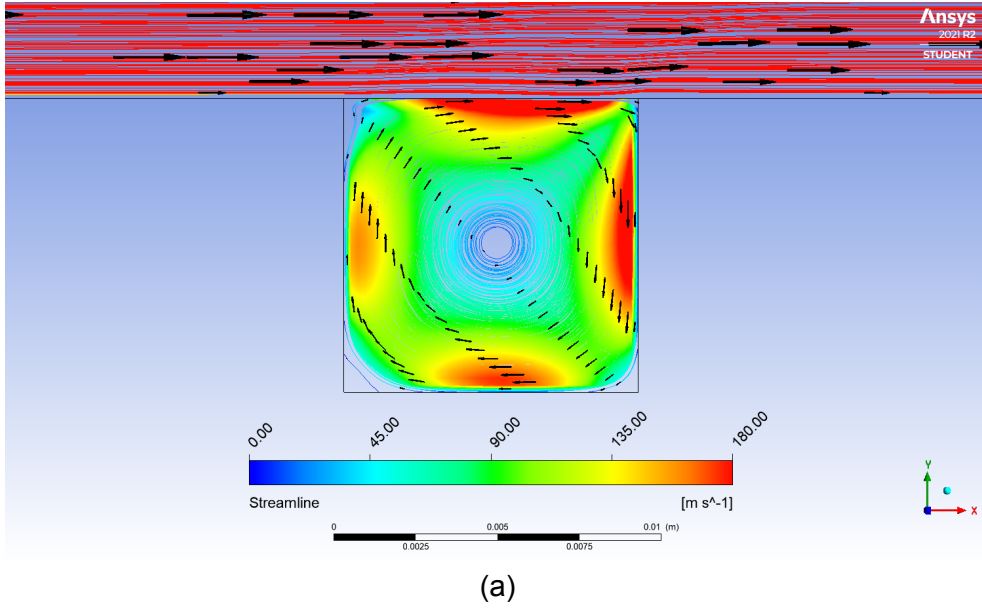
Kavite Uzunluğu ve Derinliğinin Etkisi

Bu bölümde kavitede hızın azalması ve buna bağlı olarak scramjet yanma odasına çok hızlı gelen akışın yakıtı yakmak için bir süre kavitede kalmasının sağlanmasıdır. Bu amaca yönelik Tablo 1'de verilen dört farklı U/D oranına sahip kavite ölçülerinin akışa etkileri incelenmektedir.

a) U/D=1 Oranına Sahip Kavite Modeli

Şekil 6'da U/D=1 oranına sahip kavite için elde edilen akım çizgileri, hız vektörleri ve Mach sayısı konturları verilmiştir. Tek bir büyük girdap tarafından doldurulmuş kısa bir kavitede, salınım enine bir mekanizma tarafından kontrol edilir [Ben-Yakar vd., 2001]. Kavite bölgesinin tam ortasında oluşan birincil girdap akım yönünde hareket etmekte ve kavitenin duvarına çarptığı anda şiddetli bir şekilde kavite dışına atılmaktadır. Bundan yola çıkarak, incelenecek diğer kavite modelleri arasında en az sürüklemeye sahip olan kavite modeli, U/D=1 oranlı kavite modelidir.

Gruber vd. [2001] yaptığı çalışmada daha büyük kavitelerdeki kalma süresinin, daha küçük kavitelere göre daha az olduğunu ve kavite uzunluğu arttıkça, akışın sürüklenme oranı da arttığını vurgulamaktadır. Buna bağlı olarak U/D=1 oranlı kavite modeli için analiz edilen diğer kavite modellerine göre daha fazla kalma süresi ve daha az sürüklenme oranı vaat ettiği değerlendirilmektedir.



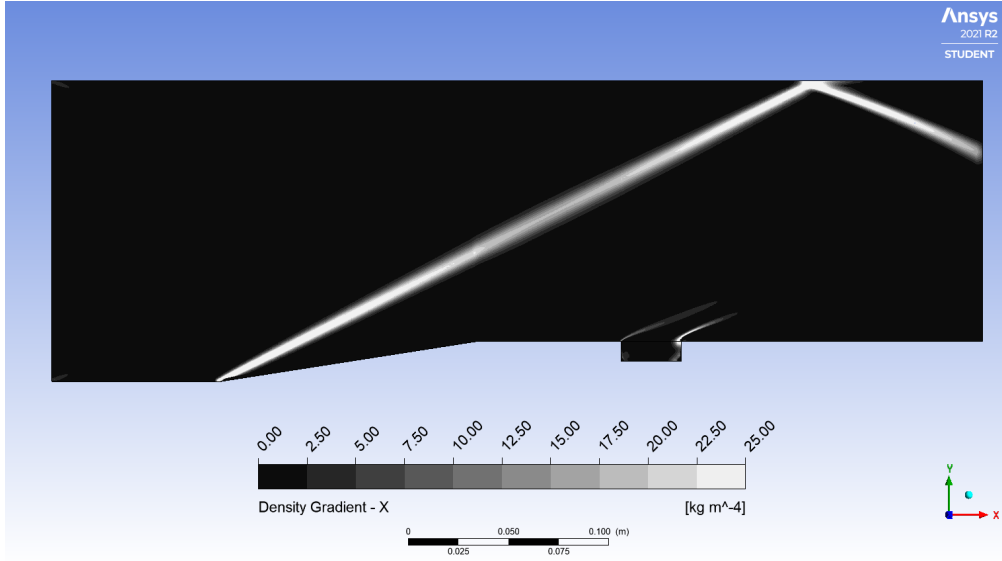
Şekil 6: $U/D=1$ modeli için kavite etrafındaki (a) akım çizgileri ve hız vektörü (b) Mach sayısı konturu.

Şekil 6'da kavite içerisindeki her yerde Mach sayısının 1'in altına düştüğü ve ses altı olduğu görülmektedir. Bu durum akışın kaviteye gelene kadar uğradığı şok dalgalarının bir sonucudur. Kavitenin U/D oranı arttıkça, kayma tabakası, akıştaki salınımları sönmüleyerek ve aynı anda kavitenin arka duvarı üzerindeki basıncı artırarak yeniden bağlanma noktasında kalınlaşmaktadır.

b) $U/D=3$ Oranına Sahip Kavite Modeli

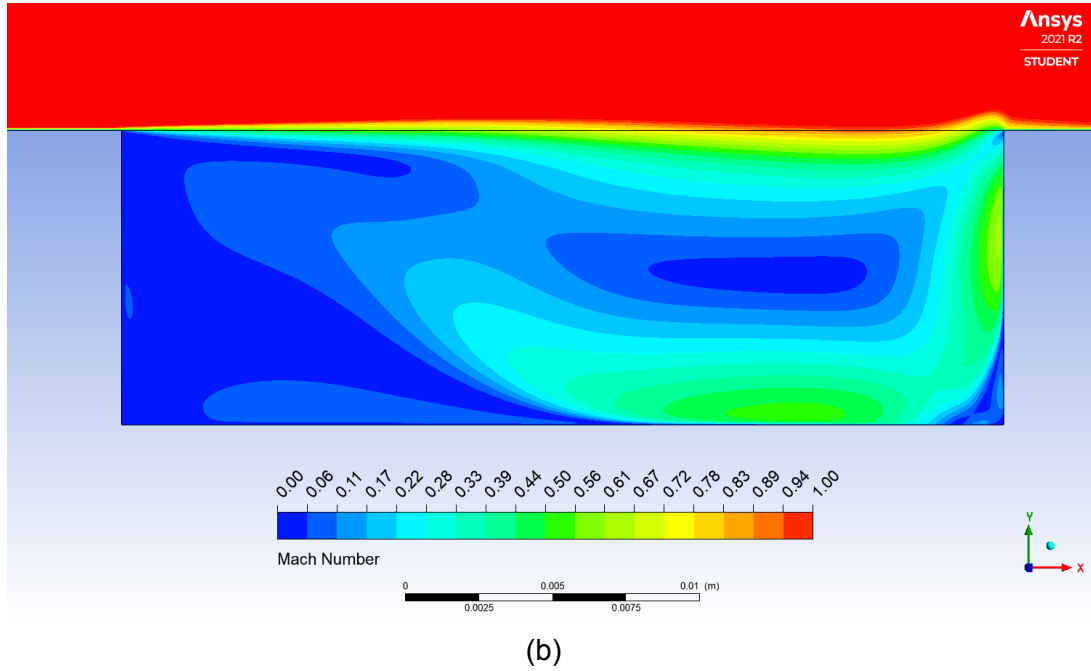
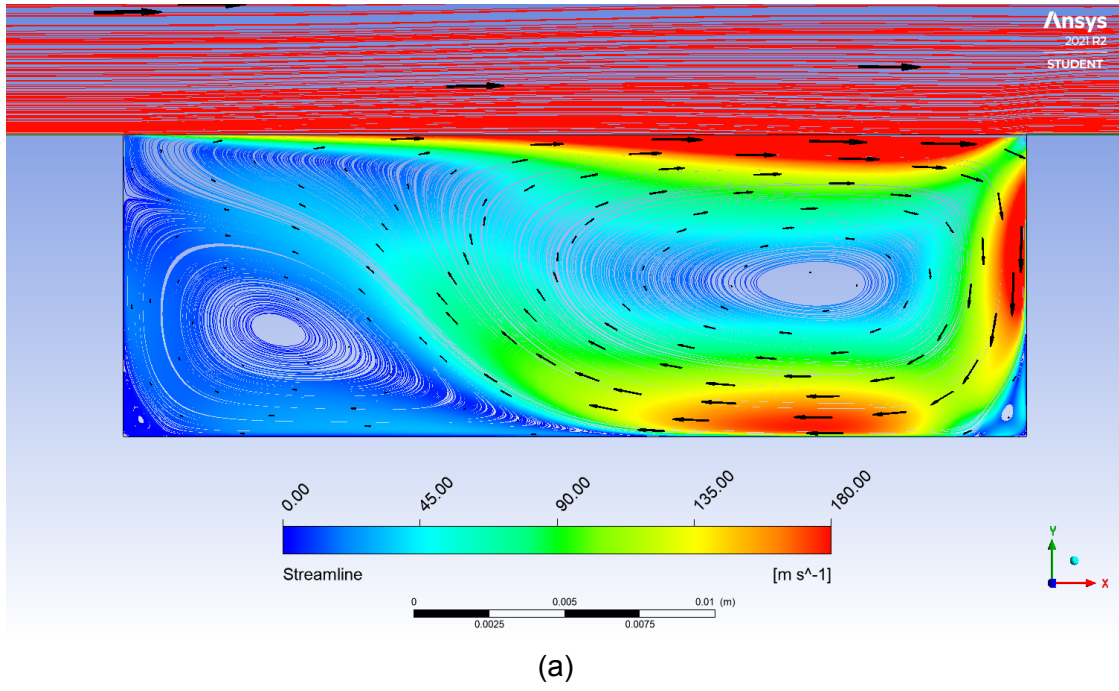
Şekil 7'de verilen yoğunluk gradyanı kontüründe görüldüğü üzere ana akış rampaya geldiğinde beklendiği gibi bir şok dalgası oluşmaktadır. Oluşan şok dalgası, modelin üst duvarına ulaşmakta ve ardından yansımaktadır. Bir genişleme dalgası akışın hızlanması ve buna karşın yoğunluktaki azalma nedeniyle ana akıştan daha hafif görünmelidir. Yoğunluk gradyanının ani artışından ve belirgin görünümünden anlaşılacağı üzere, akış kavitenin ayrılma köşesine geldiğinde, burada bir eğik şok dalgası daha oluşmaktadır. Ancak görülebildiği gibi bu şok dalgası güçlü bir şok dalgası değildir. Gruber vd. [2001] kendi çalışmasında bunu bir "sıkıştırma dalgası" olarak nitelendirmiştir. Akış kavitenin arka duvarın üst kısmına ulaştığında, burada bir yay (*bow*) şok dalgası görülmektedir. Yoğunluk gradyanının artışına bakılarak, kavitenin arka köşesinde oluşan yay şok dalgasının, kavitenin ön köşesinde oluşan şok dalgasına göre daha güçlü olduğu söylenilebilir.

Şoka bağlı sınır tabaka kalınlığında oluşan artış göze çarpmaktadır. Şok dalgası meydana gelince akışta yön değiştirmeler meydana gelmiş ve hız düşmüştür. Kavitenin arka duvarında oluşan ikinci şok dalgası nedeniyle hız düşmektedir. Ancak kaviteden uzaklaştıkça şok dalgası etkisini kaybetmekte ve yok olmaktadır. Oluşan şok dalgaları amaçlandığı gibi ana akışı ses hızının altına düşürmeden yavaşlatmaktadır.



Şekil 7: Ana akışta x yönündeki yoğunluk gradyanı.

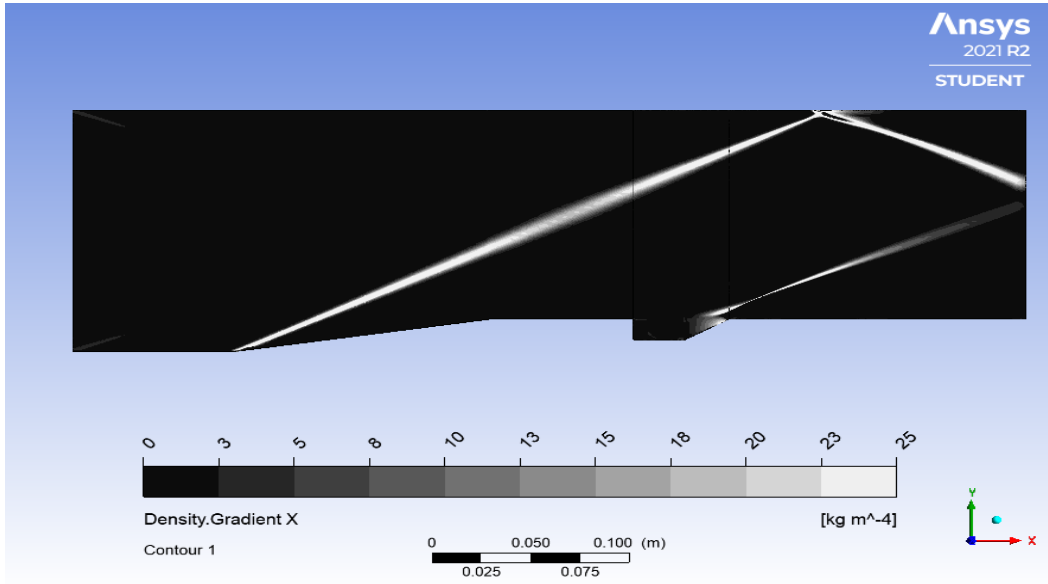
Şekil 8'de görüldüğü gibi Mach sayısı kavitenin her yerinde 1'in altında kalmaktadır. Buna dayanarak kavitenin her yeri için hızın ses altında olduğu söylenebilir. Bu durum, kavitenin ön köşesinde görülen şok dalgalarının bir sonucudur. Hız, istenildiği gibi kavitenin içerisinde en düşük halini almaktadır. Bu durum yakıtın daha uzun bir süre boyunca yanma odasında kalmasını sağlamaktadır. Kavitenin ön köşesi ve arka köşesi arasındaki basınç farkı, kavite içerisinde sirkülasyon bölgesi oluşturmaktadır. Ön köşede görülen şok dalgası, basıncın artmasıyla sonuçlanmaktadır. Basınç kavitenin alt duvarı boyunca azalmakta ve kavitenin tabanı durma noktası gibi davranmaktadır. Kayma tabakası, arka köşede yeniden bir şok dalgasına maruz kaldığından basıncın artmasına neden olmaktadır. Bu durum arka duvar köşesinde kavitenin form sürüklenmesinde artış ile sonuçlanmaktadır. $U/D=3$ oranına sahip kavite modeli için hız vektörleri takip edildiğinde, birincil girdabın saatin tersi yönünde ve ikincil girdabın saat yönünde döndüğü görülmektedir. Akışın kayma tabakasını takip ederek kavitenin içerisinde girdiği görülmektedir.



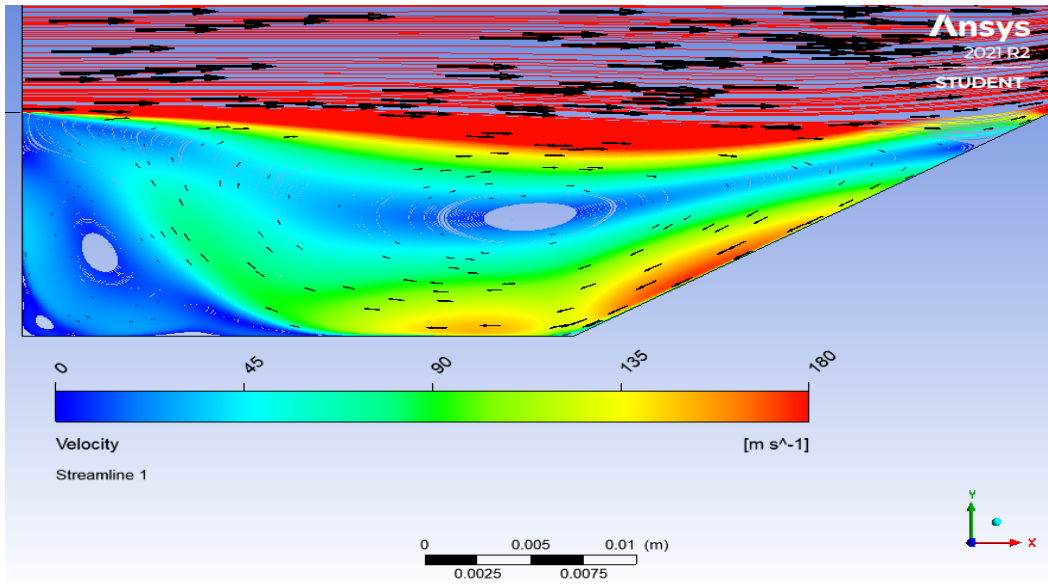
Şekil 8: $U/D=3$ modeli için kavite etrafındaki (a) akım çizgileri ve hız vektörü (b) Mach sayısı konturu.

c) $U/D=3$ Oranına 30° ve Arka Rampa Açısına Sahip Kavite Modeli

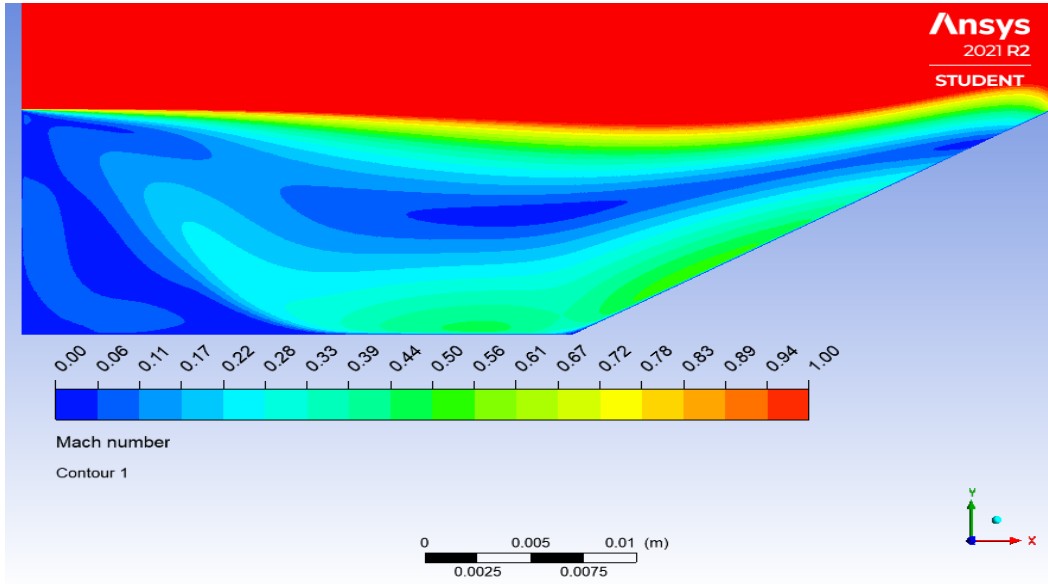
Bu bölümde $U/D=3$ oranı ve 30° arka rampa açısına sahip açık bir kavite modeli incelenmektedir. $U/D=3$ oranında arka rampa açısının 30 dereceye düşürülmesinin etkileri Şekil 9'da görülmektedir. Ses üstü hızlarda gelen akışın maruz kaldığı şok duvardan yansıyarak başka bir şoka sebep olmuştur. Kavitenin önünde ve arkasında da şoklar meydana gelmiştir. Kavitenin önünde oluşan şok akışı yavaşlatmış ve kavitenin içinde statik basınç artışına sebep olmuştur. Aynı zamanda yoğunluk gradyanının da şok dalgalarının etkisiyle arttığı görülmektedir. Kavitenin arka köşesinde bir yay şok oluşmuştur. Yoğunluk gradyanından da anlaşılacağı üzere kavitenin arka tarafında oluşan yay şok dalgasının, ön tarafında oluşan eğik şok dalgasından daha güçlü olduğu söylenebilir.



Şekil 9: Ana akışta x yönündeki yoğunluk gradyanı.



(a)



(b)

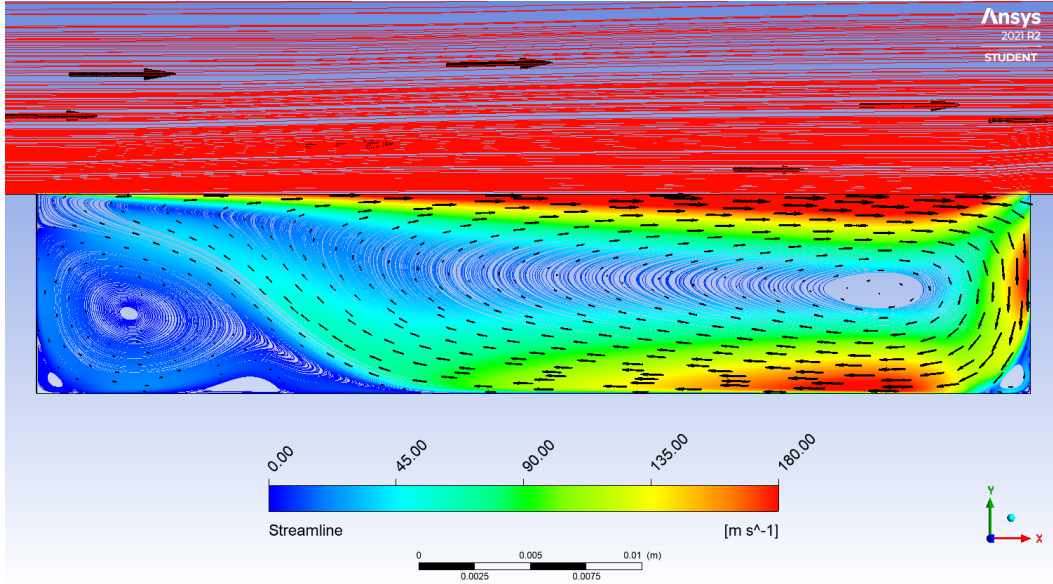
Şekil 10: $U/D=3$ ve $\theta = 30^\circ$ kavite akışında (a) akım çizgileri ve hız vektörü görüntüsü.

(b) Mach sayısı konturu

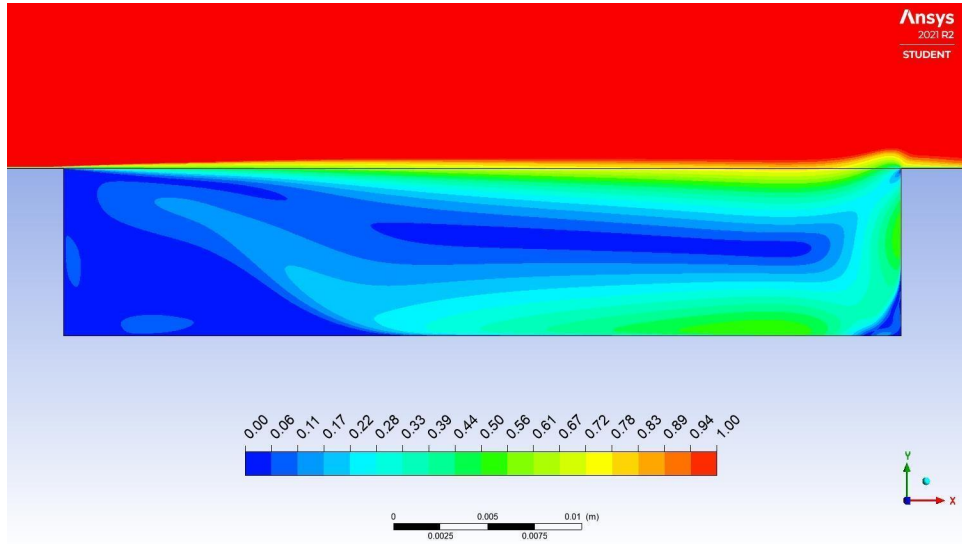
$U/D=3$ ve rampa açısını 30 derece olacak şekilde değiştirmenin Mach konturuna etkileri yukarıdaki şekilde görülmektedir. Kavite içindeki Mach sayısı kontürü incelendiğinde kavitenin her yerinde 1'den düşük olduğu görülmektedir. Rampa açısının azaltılması sonucunda kavitenin alt ve arka duvarında daha zayıf bir basınç artışı ve arka rampada kayma tabakasının birleştiği görülmektedir. Kavitenin önünde ve arkasında oluşan basınç farklarından dolayı birincil, ikincil ve üçüncül girdaplar oluşmuştur. Sağ tarafta görülen birincil girdap rampa açısı sıfır iken olan birincil girdaba göre daha büyüktür. Buna sebep olarak kavitenin önünde oluşan şok dalgasının gücünün daha az olması gösterilebilir. Hız vektörlerinin yönlerine bakıldığında birincil girdapta saat yönünde, ikincil girdapta ise saatin tersi yönünde olduğu gözlemlenmektedir.

d) $U/D=5$ Oranına Sahip Kavite Modeli

Şekil 11'de U/D oranı 5 olan dikdörtgen açık kavite modeli gösterilmektedir. Akım çizgisi görüntüsüne bakıldığında birincil, ikincil ve üçüncül girdaplar görülmektedir. İkincil girdap yapısı, U/D oranı 3 olan açık kavite modeline oranla daha küçük bir bölgeyi kapsamaktadır. Bunun nedeni kavitenin ön köşesinde oluşan şok dalgasının, sıkıştırma etkisinin daha fazla olmasıdır. Benzeri şekilde üçüncül girdaplardan ortadaki girdap için, daha güçlü sıkıştırmaya maruz kalması sebep gösterilebilir. Basınç değerinin kavitenin ön ve alt duvarı boyunca, basıncı sürekli değişen arka duvara göre nispeten sabit olduğu gözlemlenmektedir. $U/D=5$ oranına sahip kavite için, akışın sürüklenme oranı daha fazladır denilebilir. Fakat artan uzunlukla birlikte kavitenin hacmi artsa da kütle değişim oranı daha da artmakta ve bu da kalma süresinin azalmasına neden olmaktadır.



(a)



(b)

Şekil 11 : $U/D=5$ kavite modeli için (a) akım çizgileri görüntüsü (b) Mach sayısı konturu.

Şekil 11 (b)'de verilen Mach sayısı kontur görüntüsüne bakıldığında $U/D=3$ oranlı kavite ile benzer özellikler gösterdiği ve kavite içerisinde Mach sayısının 1'den küçük olduğu görülmektedir. Kavitenin genişliğine bağlı olarak, Mach sayısı değer dağılımının $U/D=3$ oranlı kavite modeline göre daha geniş bir alana yayıldığı gözlemlenmektedir.

SONUÇ

Bu çalışmada Mach sayısı 3 akış koşullarında, üç farklı U/D oranı ve iki farklı arka rampa açısına sahip kavitelerin akış alanı özellikleri değerlendirilmiştir. Akış analizleri ticari bir çözücü olan ANSYS Fluent ile yapılmıştır. Analiz edilen tüm geometriler için, kavitenin ön köşesinde ayrılan kayma tabakasının kavitenin arka duvarına yakın bir yerde yeniden birleştiği görüldü. Gruber vd.[2001]'in çalışmasına göre, herhangi bir alev tutucu tasarımında istenen performans parametreleri arasında yüksek basınç dağılımı, yüksek sıcaklık dağılımı, büyük girdaplar ve devridaim bölgeleri ve kavitenin içerisinde düşük sürtünme kuvveti yer almaktadır. Bu çalışmada istenilen bu parametreler büyük ölçüde sağlanmıştır. Bu çalışma ile Gruber vd.[2001]'in çalışmasında elde edilen sonuçların birbiriyle uyumlu olduğu görülmektedir.

Bütün geometrilerde kavite boyunca yüzey statik basınç dağılımları incelendi ve arka rampa açısının 90° altına düşürülmesinin, daha kararlı ve iki boyutlu akış alanları sağlayacağı saptanmıştır.

Arka rampa açısı azaldıkça, kavitenin ön köşesinde oluşan ayrılma dalgasının karakteristiğinin sıkıştırmadan genişlemeye eğilim gösterdiği görülmüştür. Arka rampa açısı azaldıkça, kavitenin ön duvarındaki basıncın sürekli olarak azaldığı gözlemlendi. Kavitenin ön ve arkasında oluşan şoklar akışın yavaşlamasına sebep olur. Meydana gelen bu yavaşlama, akışın kavitede daha uzun süre kalmasını ve yakıtın yanması için gereken sürenin elde edilmesini sağlar. Bu çalışma sonucunda kavitenin akışın kalma süresini arttırdığı sonucuna varılmaktadır. Bu çalışmaya ek olarak birden fazla kavite kullanımı gibi farklı geometrilerin etkileri de incelenebilir.

Kaynaklar

- A. Ben-Yakar ve R. K. Hanson, "Cavity flame-holders for ignition and flame stabilization in scramjets: An overview," J. Propuls. Power, cilt. 17, sıra. 4, sayfa. 869–877, 2001
- C. Segal, "The Scramjet Engine," The Scramjet Engine, 2009
- K. H. Yu, K. J. Wilson, ve K. C. Schadow, "Effect of flame-holding cavities on supersonic-combustion performance," J. Propuls. Power, cilt. 17, sıra. 6, sayfa. 1287–1295, 2001
- R. K. Seleznev, S. T. Surzhikov, ve J. S. Shang, "A review of the scramjet experimental data base," cilt. 106, sayfa. 43-70, 2019
- M. R. Gruber, R. A. Baurle, T. Mathur, ve K. Y. Hsu, "Fundamental studies of cavity based flameholder concepts for supersonic combustors," J. Propuls. Power, cilt. 17, sayfa. 146–153, 2001
- Zhenguo Wang, Hongbo Wang ve Mingbo Sun, "Review of cavity-stabilized combustion for scramjet applications," Journal of Aerospace Engineering, cilt 228, sıra. 14, sayfa. 2718-2735, 2014