TRANSONİK HIZDA KAVİTE AKIŞINA MARUZ KALAN MÜHİMMAT AYRILMASININ HAD ANALİZİ

Seyfettin TÜRK

Doktora Tezi

Uçak Gövde Motor Bakım Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Kürşad Melih GÜLEREN

Eskişehir

Eskişehir Teknik Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Ocak 2021

ÖZET

TRANSONİK HIZDA KAVİTE AKIŞINA MARUZ KALAN MÜHİMMAT AYRILMASININ HAD ANALİZİ

Seyfettin TÜRK

Uçak Gövde Motor Bakım Anabilim Dalı

Eskişehir Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Ocak 2021

Danışman: Prof. Dr. Kürşad Melih GÜLEREN

Bu tez çalışmasında, yeni nesil avcı uçaklarında kullanılan içeriden mühimmat ayrılması Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) ve altı serbestlik dereceli hareket denklemlerinin birlikte kullanılması ile çözülmüştür. Öncelikle, hareket denklemlerinin çözümünün doğrulanması amacı ile deneysel sonuçları literatürde yer alan dışarıdan mühimmat ayrılmasına örnek olan EGLIN çalışması sayısal olarak tekrar edilmiştir. Daha sonra, literatürde M219 adıyla anılan deneysel çalışması sayısal yöntem ile doğrulanmıştır. Doğrulama çalışmalarından sonra temiz ve pasif kontrol yöntemlerin uygulandığı kaviteden mühimmat ayrılması benzetimleri gerçekleştirilmiştir.

EGLIN doğrulanmasında öncelikle deney düzeneğinde kullanılan tutucunun mühimmat yörüngesine olan etkisi incelenmiştir. Bunun için farklı ağ yoğunlukları için viskoz olmayan akış yaklaşımı ile mühimmat tutuculu ve tutucusuz kanat altından olan ayrılmanın sayısal benzetimi gerçekleştirilip sonuçlar karşılaştırılmıştır. Deney setinde kullanılan tutucunun, yörüngeye etki etmediği ortaya konmuş olup sonraki çalışmalarda tutucu kullanılmamıştır. Ağ yoğunluğunun etkilerinin incelenmesi için 600 bin, 1 milyon, 1,7 milyon, 3,8 milyon ve 5,4 milyon hücreye sahip ağlar için viskoz olmayan sayısal çözümler gerçekleştirilmiştir. 3,8 milyon hücreli ağın ağ yoğunluğu bakımından sınır değer olduğu, bu yoğunluktan sonra sonucun ağdan bağımsız hale geldiği bulunmuştur. Viskoz etkilerin incelenebilmesi için 2,8 milyon ve 5,9 milyon hücreli ağlar için SST k-ω türbülans modeli ile mühimmat ayrılması sayısal çözümü tekrar edilmiştir. Çalışmanın bu bölümünde dışarıdan mühimmat ayrılmasında her ne kadar viskoz olmayan akış yaklaşımın kullanılabileceği ortaya konulmuş olsa da, türbülanslı akış modeli çözümlerinin deneysel sonuçlar ile daha uyumlu olduğu gösterilmiştir. EGLIN doğrulama çalışmasında son olarak çözücü algoritmasının etkileri incelenmiştir. Bu kapsamda 5,8

milyon hücreli ağ yoğunluk tabanlı ve basınç tabanlı SST k-ω türbülans modeli çözümleri gerçekleştirilmiştir. Basınç tabanlı algoritma aynı ağ yapısı için deneysel sonuçlarla daha fazla uyumlu olmuştur. Sonuç olarak; sayısal çözüme ait sonuçların EGLIN deneysel çalışmasına ait sonuçlar ile hem öteleme hem de dönme değerleri bakımından uyum içinde olması neticesinde sayısal çözüm doğrulanmıştır.

Kavite akışı doğrulama çalışması için literatürde M219 adıyla anılan uzunluk-derinlik (L/D) oranı 5 olan 0,85 Mach serbest akış hızındaki deneysel çalışma kullanılmıştır. Kavite akışı doğrulama çalışmasında kapaksız ve 90 derece kapak açısına sahip kapaklı iki temiz kavite çalışması gerçekleştirilmiştir. Her iki sayısal çalışmada Detached Eddy Simulation (DES) türbülans modeli kullanılmıştır. Sayısal çözümden elde edilen ortalama hız, türbülans kinetik enerji ve Reynolds gerilmesi gibi akış parametreleri referans Large Eddy Simulation (LES) değerleri ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca kavite tabanınından elde edilen ortalama ses basınç düzeyi deneysel değerler ile karşılaştırılmıştır. Sayısal çözümden elde edilen değerlerin deneysel ve referans LES çalışması ile uyum içinde olduğu ortaya konulmuştur.

İçeriden mühimmat ayrılması çalışmasında, M219 deneysel çalışmasındaki L/D oranı 5 olan ve serbest akış hızı 0,85 Mach olan kavite ile EGLIN deneysel çalışmasındaki jenerik mühimmat kullanılmıştır. Bu kapsamda gerçekleştirilen hem harektli hem de hareketsiz tüm sayısal çözümlerde DES türbülans modeli kullanılmıştır. Kapak açısı 90 derece olan temiz kaviteye yerleştirilen jenerik mühimmat önce yerçekimi yönündeki kuvvetin maksimum ve minimum olduğu iki farklı fırlatma zamanında aynı fırlatma kuvvetleri ile bırakılmıştır. L/D oranı 5 olan temiz kaviteden 0,85 Mach hızında jenerik mühimmatın izlediği yörüngenin nicel olarak fırlatma zamanına bağlı olduğu görülse de temel olarak iki farklı fırlatma zamanında aynı yörünge elde edilmiştir. Kapak açısı 90 derece ve L/D oranı 5 olan temiz kaviteye sıkıca yerleştirilen jenerik mühimmat, iki farklı fırlatma zamanında da kaviteyi terk edecek iken mühimmatın arkasında bulunan aynı kanatçığın kavite kapağına aynı noktada çarptığı görülmüştür. Mühimmatın kavite kapağına çarpmaması için kavite kapağı dışa doğru 30 derece açılandırılarak kapak açısı 60 derece olacak şekilde temiz kaviteden mühimmat ayrılması benzetimi gerçekleştirilmiştir. Mühimmat kapak açısı 60 derece olan temiz kaviteden her hangi bir yere temas etmeden kaviteyi terk etmeyi başarmıştır. Fakat hücum açısı 20 dereceye kadar, açısal hızı ise 80 derece/saniye kadar çıkmasından ötürü kabul edilemez bir

yörünge elde edilmiştir. Üç farklı pasif akış kontrol yöntemi uygulanarak mühimmatın izlediği bu yörünge iyileştirilmek istenmiştir. M219 deneysel çalışmasında arka duvarın eğimli hale getirilmesi ve kavite önüne dikdörtgen biçiminde spoyler yerleştirilmesi kavite içerisindeki ses basınç düzeyini düşürdüğü deneysel ve sayısal çalışmalar ile ortaya konulmuştur. Bu çalışmada da bu iki pasif yöntem ile birlikte kullanıldığı üçüncü pasif kontrol yöntemi içeriden mühimmat ayrılmasında denenmiştir. Sadece kavitenin firar kenarının kavite tabanı ile 45 derece açı yapacak şekilde eğilmesinin mühimmat üzerindeki maksimum ses basınç düzeyini iyileştirmek yerine 2 dB kadar artırdığı, fakat mühimmatın izlediği yörüngeyi hücum açısı ve açısal hız bakımından bir miktar iyileştirdiği tespit edilmiştir. Kavite önüne yerleştirilen dikdörtgen biçimindeki spoyler mühimmat üzerindeki maksimum ses basınç düzeyini 4 dB kadar düşürmüş ve mühimmatın izlediği yörüngede tüm açılarda ve açısal hızlarda en iyi iyileştirmeyi ortaya koymuştur. Kavite önüne spoyler yerleştirlmesi ve kavite firar kenarının eğimli hale getirildiği birleşik pasif kontrol yöntemi ise mühimmat üzerinde oluşan maksimum ses basınç düzeyini 7 dB kadar düşürerek akustik anlamda en iyi iyileştirmeyi yapan yöntem olmuştur. Bu pasif yöntem mühimmatın izlediği yörünge bakımından sadece önünde spoyler olan pasif kontrol yönteminden daha etkili olamamıştır. Son olarak genişlik-derinlik (W/D) oranı 1,25 ve kapak açısı 90 derece olan temiz kaviteden bırakma işlemi gerçekleştirilerek kavite genişliğinin mühimmat ayrılmasına etkisi incelenmiştir. Kavite genişliğinin artırılması hem mühimmat üzerinde oluşan ses basınç düzeyini artırmakta hem de mühimmatın izlediği yörüngeyi istenilenden uzaklaştırmaktadır. Kavite genişliğini artırmanın yerine kavite kapaklarını dışarı doğru açılandırmanın hem akustik açıdan hem de mühimmatın izlediği yörünge bakımından daha iyi sonuç verdiği ortaya konulmuştur.

Anahtar Sözcükler: HAD, Hareketli Ağ, Mühimmat Ayrılması, Kavite Akışı, Pasif Akış Kontrol Yöntemleri

ABSTRACT

THE CFD ANALYSIS OF THE STORE SEPARATION SUBJECTED TO THE CAVITY FLOW AT TRANSONIC SPEED

Seyfettin TÜRK

Department of Airframe and Powerplant Maintenance

Eskişehir Technical University, Institute of Graduate Programs, January 2021

Supervisor: Prof. Dr. Kürşad Melih GÜLEREN

In this thesis, numerical simulations of the internal store separation used in new generation fighter aircraft by solving the Computational Fluid Dynamics (CFD) and six-degree of freedom equations together. First of all, in order to verify the solution of the equations of motion, an example of external store separation called EGLIN, experimental study has been repeated numerically. Later, the experimental cavity flow known as M219 in the literature was verified by numerical method. After the verification studies, simulations of store separation from the clean cavity and from the cavity which passive control methods were applied were carried out.

Firstly the effect of the store holder used in the experimental setup on the store trajectory was examined in the verification of the store separation from the outside named EGLIN. For this purpose, numerical simulations of store separation from under the wing with and without store holder with a inviscid flow approach for different mesh densities was performed and the results were compared. It was revealed that the store holder used in the experimental setup does not affect the store trajectory in the store separation, and the store holder was not used in subsequent studies. In order to examine the effects of mesh density, inviscid numerical solutions with 600 thousand, 1 million, 1.7 million, 3.8 million and 5.4 million mesh densities were performed and compared. . It was found that 5.4 million mesh density is the limit value in terms of mesh density, the result becomes independent of the mesh density after this value. In order to examine the viscous effects, the numerical simulation of the store separation was repeated with the SST k-ω turbulence model for 2.8 million and 5.9 million mesh densities. In this part of the study, although it has been demonstrated that the inviscid flow approach can be used in external store separation, the turbulent flow model has been shown to be more compatible with the experimental results. Finally, the effects of the solver algorithm were examined in the

EGLIN validation study. In this context, two numerical simulations which are density-based and pressure-based were performed with SST k-ω turbulence model for 5.8 million mesh density. Density-based solution algorithm does not allow high-order discretization due to its mesh sensitivity. Based on high-order discretization can be performed in the pressure-based solver for the same mesh structure, the pressure-based solution algorithm more compatible with the experimental results. As a result, the consistence of the results of the numerical solution with the results of the EGLIN experimental study in terms of both translation and rotation values validated the solution of the six-degree of freedom equations of motion of the numerical solution.

The experimental study called M219 in the literature at 0.85 Mach free-stream flow with a length-to-depth (L / D) ratio of 5 was validated by CFD for the cavity flow verification study. In the cavity flow verification study, two clean cavity studies which are without a door and with a door with 90 degrees door angle were performed. Detached Eddy Simulation (DES) turbulence model was used in both numerical studies. Flow parameters such as mean longitudinal velocity, mean transverse velocity, turbulent kinetic energy and Reynolds stress obtained from the numerical solution were compared with the reference Large Eddy Simulation (LES) values and the Overall Sound Pressure Level (OASPL) values obtained from the cavity floor were compared with the experimental values. Both the flow parameters and the OASPL obtained from the numerical solution have been shown to be in agreement with the experimental and reference LES study.

In the study of internal store separation, the cavity defined in the M219 experimental study was used as cavity and the generic store used in the EGLIN experimental study was used as store. DES turbulence model has been used in all numerical simulations, both with and without motion. The generic store, which was placed in the clean cavity with a door with 90 degree door angle, was first released with the same launch forces in two different launch times when the gravity force was maximum and minimum. Although it is seen that the store trajectory at 0.85 Mach speed from the clean cavity with an L / D ratio of 5 is quantitatively dependent on the launch time, basically the same trajectory was obtained in two different launch times. It was observed that the same flap on the back of the generic store hit the cavity door at the same point while the generic store which is tightly placed in the clean cavity with a door with 90 degree door angle and an L / D ratio of 5 leave the cavity in two different launch times.

The cavity door was bent 30 degrees outward in order to prevent the store from hitting the cavity door, and the store separation from the clean cavity with a door with 60 degree door angle was simulated. The store was able to leave the cavity from the clean cavity with a door with 60 degree door angle without touching any part of cavity, but an unacceptable trajectory was achieved due to the angle of attack increased up to 20 degrees and the angular speed increased up to 80 degrees / second. This trajectory followed by the store was aimed to be improved by applying three different passive flow control methods. It has been demonstrated by experimental and several numerical studies that the inclination of the rear wall and the placement of a rectangular spoiler in front of the cavity decreases the OASPL inside the cavity in the M219 experimental study. In this study, together with these two passive methods the third passive control method which uses these two methods together were used in internal store separation. It has been determined that only tilting the trailing edge of the cavity at an angle of 45 degrees increases the maximum OASPL on the store by 2 dB, but improves the trajectory of store slightly in terms of angle of attack and angular velocity. The rectangular spoiler placed in front of the cavity reduced the maximum OASPL on the store by 4 dB and showed the best improvement in the trajectory of store at all angles and angular velocities. The combined passive control method, which a spoiler is placed in front of the cavity and tilting the trailing edge of the cavity, has been the best method in terms of acoustics by reducing the maximum OASPL on the store by 7 dB. This passive method was not more effective in terms of the trajectory of store than the passive control method which only has a spoiler in front. Finally, the effect of cavity width on store separation was investigated by performing a clean cavity with a width-depth (W / D) ratio of 1.25 and a door angle of 90 degrees. Increasing the cavity width both increases the OASPL created on the store and distract the trajectory of store from the desired one. It has been shown that bending the cavity doors outwards instead of increasing the cavity width gives better results both in terms of acoustics and the trajectory of store.

Keywords: CFD, Dynamic Mesh, Store Separation, Kavity Flow, Passive Flow Control Methods

TEŞEKKÜR

Tez çalışmalarım süresince, akademik deneyimi ve bilgi birikimi ile yol haritamın oluşmasını sağlayan, fikirleri ve yol göstericiliği ile çalışmamın gelişmesine imkan tanıyan tez danışmanım sayın Prof. Dr. Kürşad Melih GÜLEREN'e teşekkürü borç sayıyorum.

Tez İzleme Komitesi üyeleri Doç. Dr. Tolga BAKLACIOĞLU ve Doç. Dr. Tolga YASA'ya her bir TİK döneminde yapmış oldukları değerlendirmeler ile tezin gelişimine yapmış oldukları katkıdan dolayı teşekkürlerimi sunuyorum.

Öğr. Gör. Osman KOCAASLAN'a UheM üzerinden sağlamış olduğu CPU-saat çözüm süreleri kaynağından ötürü teşekkürü bir borç bilirim. Sağlanan bu kaynak olmasaydı bu çalışma eksik kalırdı. Ayrıca Eskişehir Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'ne hazırlamış olduğu tez yazım şablonundan ötürü teşekkür ediyorum. Bu şablon tez yazım sürecini oldukça kolaylaştırmıştır.

Bu tez çalışmamı, yoğun ve stres dolu uğraşların yaşandığı bu süreçte sevgisini ve desteğini hiçbir zaman esirgemeyen sevgili eşim Gizem'e ve hayatımın her evresinde sevgilerini ve desteklerini esirgemeyen anneme ve babama adıyorum.

Seyfettin TÜRK

15/01/2021

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Bu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ve kurallara uygun davrandığımı; bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi; bu çalışmanın Eskişehir Teknik Üniversitesi tarafından kullanılan "bilimsel intihal tespit programı"yla tarandığını ve hiçbir şekilde "intihal içermediğini" beyan ederim. Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

Seyfettin TÜRK

İÇİNDEKİLER

Sayfa

BAŞLIK SAYFASI ..... **İ**

JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI ..... **İİ**

ÖZET ..... **İİİ**

ABSTRACT ..... **Vİ**

TEŞEKKÜR ..... **İX**

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ ..... **X**

İÇİNDEKİLER ..... **Xİ**

TABLOLAR DİZİNİ ..... **XİV**

ŞEKİLLER DİZİNİ ..... **XV**

GÖRSELLER DİZİNİ ..... **XXX**

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ ..... **XXXİ**

1. GİRİŞ **1**

1.1. Literatür Özeti **4**

1.2. Tezin Amacı ve Önemi **24**

2. HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ **26**

2.1. Sonlu Hacimler Yöntemi **29**

2.1.1. Uzaysal ayrıklaştırma **30**

2.1.1.1. İkinci dereceden akışın geldiği yön doğrultulu şema ***31***

2.1.1.2. Merkezi farklar şeması ***31***

2.1.1.3. Sınırlandırılmış merkezi farklar şeması ***32***

2.1.1.4. Üçüncü dereceden MUSCL şeması ***32***

2.1.2. Zamansal ayrıklaştırma **32**

2.1.3. Gradyan ve türevlerin hesaplanması **34**

2.1.3.1. Hücre temelli en küçük karaler yöntemi ***34***

2.1.4. Basınç temelli çözücü **35**

2.1.4.1. Momentum denkleminin ayrıklaştırılması ***36***

2.1.4.2. Süreklilik denkleminin ayrıklaştırılması ***36***

2.1.4.3. Hız-basınç birleşmesi *37*
2.2. Türbülans Modellenmesi **39**
2.2.1. Standart k-ω model **42**
2.2.2. Shear-Stress Transport (SST) k-ω model **45**
2.2.3. SST k-ω ile Detached Eddy Simulation (DES) Model **48**
2.3. Altı Serbestlik Dereceli Hareket **49**
3. DOĞRULAMA ÇALIŞMALARI **55**
3.1. Altı Serbestlik Dereceli Hareketli Çözüm Doğrulama Çalışması **55**
3.1.1. Çubuk etkilerinin incelenmesi **57**
3.1.2. Ağ yoğunluğunun etkisi **64**
3.1.3. Türbülans etkilerinin incelenmesi **69**
3.1.4. Çözücü etkilerinin incelenmesi **73**
3.2. Kavite Akışı Doğrulama Çalışması **78**
3.2.1. Kapaksız temiz kavite akışı **78**
3.2.2. Kapaklı temiz kavite akışı **89**
4. KAVİTE İÇİNDEN MÜHİMMAT AYRILMASI **95**
4.1. Mühimmat ve 90 Derece Açıya Sahip Kapaklı Temiz Kavite (S CC D 90) **97**
4.1.1. Hareketsiz sayısal çözüm **98**
4.1.2. Hareketli sayısal çözüm **108**
4.2. Mühimmat ve 60 Derece Açıya Sahip Kapaklı Temiz Kavite (S CC D 60) **125**
4.2.1. Hareketsiz sayısal çözüm **125**
4.2.2. Hareketli sayısal çözüm **131**
4.3. Mühimmat ve 60 Derece Açıya Sahip Kapaklı Arka Duvarı Eğimli Kavite (S SW D 60) **143**
4.3.1. Hareketsiz sayısal çözüm **143**
4.3.2. Hareketli sayısal çözüm **148**
4.4. Mühimmat ve 90 Derece Açıya Sahip Kapaklı Önünde Spoyler Olan Kavite (S FTS D 60) **160**
4.4.1. Hareketsiz sayısal çözüm **160**
4.4.2. Hareketli sayısal çözüm **165**

4.5. Mühimmat ve 60 Derece Açıya Sahip Kapaklı Önünde Spoyler Olan Arka Duvarı Eğimli Kavite (S FTS SW D 60) 177
4.5.1. Hareketsiz sayısal çözüm 177
4.5.2. Hareketli sayısal çözüm 182
4.6. Mühimmat ve 90 Derece Açıya Sahip Kapaklı Genişlik Derinlik Oranı 1,25 Olan Temiz Kavite (S CC D 90 W 1.25) 194
4.6.1. Hareketsiz sayısal çözüm 194
4.6.2. Hareketli sayısal çözüm 200
5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA 213
KAYNAKÇA 217
EKLER 221
ÖZGEÇMİŞ

TABLOLAR DİZİNİ

Sayfa

Tablo 1.1. Mühimmat ayrılmasının puanlandırılması (Jamison, Rossouw ve Miles, 2017) 23
Tablo 1.2. Mühimmat ayrılmasının puanlandırılmasında kullanılan kriterler (Jamison, Rossouw ve Miles, 2017) 24
Tablo 3.1. Tam ölçekli mühimmat değerleri (Fox, 2000) 55
Tablo 3.2. Kanat, mühimmat tutucu ve mühimmat geometrisine ait detaylar (Fox, 2000) 56
Tablo 3.3. EGLIN çözüm alanı sınır şartları 58
Tablo 3.4. ANSYS Fluent ağ kalitesi 60
Tablo 3.5. M219 temiz kavite sınır şartları 81
Tablo 4.1. İçeriden mühimmat ayrılması ağ özellikleri 97

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 1.1. Rainey rüzgar tüneli düşme testine ait görüntüler (Rainey, 1954) 5
Şekil 1.2. Stallings rüzgar tüneli CTS sonuçları (Stallings Jr., 1983) 6
Şekil 1.3. Blair Jr. ve Stallings Jr. rüzgar tüneli CTS sonuçları (Blair Jr. ve Stallings Jr., 1988) 7
Şekil 1.4. Wilcox Jr. rüzgar tüneli CTS kapak etkisi sonucu (Wilcox Jr., 1991) 9
Şekil 1.5. Wilcox Jr. rüzgar tüneli CTS kavite tabanı havalandırma sistemi modeli (Wilcox Jr., 1991) 9
Şekil 1.6. Wilcox Jr. rüzgar tüneli CTS kavite tabanı havalandırma sistemi etkisi sonucu (Wilcox Jr., 1991) 9
Şekil 1.7. Wilcox Jr. rüzgar tüneli CTS kanallı kavite tabanı gösterimi (Wilcox Jr., 1991) 10
Şekil 1.8. Wilcox Jr. rüzgar tüneli CTS kanallı kavite tabanı etkisi sonucu (Wilcox Jr., 1991) 11
Şekil 1.9. Shipman ve arkadaşlarının gerçekleştirdiği aktif kontrol yöntemli mühimmat ayrılması gösterimi (Shipman, vd., 2007) 12
Şekil 1.10. Johnson ve arkadaşlarının rüzgar tüneli düşme testine ait görüntüleri (Johnson, Stanek ve Grove, 2008) 13
Şekil 1.11. Cenko ve arkadaşlarının kavite önünde kullanılan spoyler örnekleri (Cenko vd., 2008) 14
Şekil 1.12. Cenko ve arkadaşlarının kavite içerisinde mühimmata etki eden kuvvetlerin gösterimi (Cenko vd., 2008) 14
Şekil 1.13. Westmoreland çalışmasında uygulanan geometriler (Westmoreland, 2009) 15
Şekil 1.14. Westmoreland çalışması sonucu elde ettiği yörüngeler (Westmoreland, 2009) 16
Şekil 1.15. Flora ve arkadaşların küresel modeli için deneysel ve HAD sonuçları (Flora vd., 2014) 18
Şekil 1.16. Flora ve arkadaşların MK-82 modeli için deneysel sonuçları (Flora vd., 2014) 18
Şekil 1.17. Merrick ve Reeder'a ait deneysel ve sayısal çözüm sonuçlarının karşılaştırılması (Merrick ve Reeder, 2015) 19

Şekil 1.18. Barone ve Arunajatesan'ın oluşturdukları deney seti ve sayısal çözüm alanı gösterimi (Barone ve Arunajatesan, 2016) 20
Şekil 1.19. Loupy ve arkadaşlarının yapmış olduğu sayısal analiz sonuçları (Loupy, Barakos ve Taylor, 2017) 21
Şekil 1.20. Mühimmat yörünge örnekleri (Carter, 2012) 24
Şekil 2.1. HAD uygulamalarında çözüm alanının modellenmesi 27
Şekil 2.2. HAD uygulamalarında çözüm alanının ayrıklaştırılması (ağ oluşturma) 27
Şekil 2.3. HAD uygulamalarında denklemlerin ayrıklaştırılması 28
Şekil 2.4. HAD uygulamalarında çözüm methodunun uygulanması 28
Şekil 2.5. Genel skaler yer değiştirme denkleminin ayrıklaştırılması uygulanan hücrenin gösterimi 30
Şekil 2.6. Zamansal ayrıklaştırma gösterimi 33
Şekil 2.7. Hücre merkezlerinin gösterimi 34
Şekil 2.8. Jet akış gösterimi 39
Şekil 2.9. Silindir etrafındaki akış gösterimi 40
Şekil 2.10. Türbülas sinyali (Pope, 2000) 40
Şekil 2.11. Boya ile işaretlenmiş bir hacmin türbülas yayılımı etkisi altında gelişimi (Schiestel, 2008) 41
Şekil 2.12. Euler açıları gösterimi 50
Şekil 2.13. Altı serbestlik dereceli harekete ait hızların gösterimi 51
Şekil 2.14. Mühimmat ve referans koordinat sistemleri 52
Şekil 2.15. Altı serbestlik dereceli harekette eksen takımı hareketi 53
Şekil 3.1. Rüzgâr tüneli deneyine ait 1/20 ölçeklendirilmiş geometri a) mühimmat geometrisi, b) CTS yapısı, c) kanat, mühimmat tutucu ve mühimmat geometrisi (a ve c'deki boyutlar cm, b'deki boyutlar ise inç cinsinden verilmiştir) (Fox, 2000) 56
Şekil 3.2. *EGLIN testine ait kanat, mühimmat tutucu ve mühimmat geometrisi a) yandan görünüş, b) önden görünüş, c) üç boyutlu görünüş* 57
Şekil 3.3. EGLIN sayısal çözüm alanı 58
Şekil 3.4. EGLIN çubuklu ağ yapısı, a) önden tüm ağ görüntüsü, b) yandan tüm ağ görüntüsü, c) önden yakın görüntü, d) yandan yakın görüntü 59
Şekil 3.5. EGLIN çubuksuz ağ yapısı, a) önden tüm ağ görüntüsü, b) yandan tüm ağ görüntüsü, c) önden yakın görüntü, d) yandan yakın görüntü 60

Şekil 3.6. Çubuklu ve çubuksuz 5 ve 185 derece basınç katsayısı dağılımı..... 61
Şekil 3.7. Çubuklu ve çubuksuz 95 ve 275 derece basınç katsayısı dağılımı..... 62
Şekil 3.8. Çubuklu ve çubuksuz öteleme değerleri 63
Şekil 3.9. Çubuklu ve çubuksuz dönme değerleri 64
Şekil 3.10. Viskoz olmayan 5 ve 185 derece basınç katsayısı dağılımı 66
Şekil 3.11. Viskoz olmayan 95 ve 275 derece basınç katsayısı dağılımı 66
Şekil 3.12. Viskoz olmayan çözüme ait öteleme değerleri..... 68
Şekil 3.13. Viskoz olmayan çözüme ait dönme değerleri 68
Şekil 3.14. Türbülanslı çözümün ağ yapısı a) önden tüm ağ görüntüsü, b) yandan tüm ağ görüntüsü, c) önden yakın görüntü, d) yandan yakın görüntü 69
Şekil 3.15. SST k-ω türbülans modeli 5-185 derece basınç katsayısı dağılımı..... 70
Şekil 3.16. SST k-ω türbülans modeli 95-275 derece basınç katsayısı dağılımı..... 71
Şekil 3.17. SST k-ωtürbülans modelli çözüme ait öteleme değerleri..... 72
Şekil 3.18. SST k-ω türbülans modelli çözüme ait dönme değerleri 72
Şekil 3.19. Türbülanslı çözümün yeni ağ yapısı 5.8 m a) önden tüm ağ görüntüsü, b) yandan tüm ağ görüntüsü, c) önden yakın görüntü, d) yandan yakın görüntü 73
Şekil 3.20. SST k-ω türbülans modeli 5.8 m 5-185 derece basınç katsayısı dağılımı 74
Şekil 3.21. SST k-ω türbülans modeli 5.8 m 95-275 derece basınç katsayısı dağılımı 75
Şekil 3.22. SST k-ω türbülans modelli 5.8 m çözüme ait öteleme değerleri..... 76
Şekil 3.23. SST k-ω türbülans modelli 5.8 m çözüme ait dönme değerleri 77
Şekil 3.24. Zamana bağlı mühimmat hareketi önden görünüş 77
Şekil 3.25. Zamana bağlı mühimmat hareketi yandan görünüş 78
Şekil 3.26. Kavite akışı genel gösterimi 79
Şekil 3.27. Deneysel M219 temiz kavite geometrisi (Nightingale, Ross ve Foster, 2005) 79
Şekil 3.28. M219 Temiz kavite geometrisi..... 80
Şekil 3.29. M219 Temiz kavite çözüm alanı 80
Şekil 3.30. M219 temiz kavite sayısal çözüm alanı ağı a) önden tüm ağ görüntüsü, b) yandan tüm ağ görüntüsü, c) önden yakın görüntü, d) yandan yakın görüntü 82

Şekil 3.31. M219 Temiz kavite sayısal çözüme (DES) ait akım çizgileri 83
Şekil 3.32. M219 Temiz kavite sayısal çözüme (DES) ait konturlar a) ortalama Mach sayısı, b) türbülans yoğunluğu, c) basınç katsayısı, d) OASPL..... 83
Şekil 3.33. M219 Temiz kavite sayısal çözüme (DES) ait girdap konturları a) x ekseni etrafında oluşan girdaplar, b) y ekseni etrafında oluşan girdaplar 85
Şekil 3.34. M219 Temiz kavite sayısal çözüme (DES) ait eş yüzey Q-kriteri yapıları a) girdap-x ile renklendirme, b) girdap-y ile renklendirme 85
Şekil 3.35. M219 Temiz kavite DES çözümüne ait sonuçların referans LES çalışması ile yatay hız profili karşılaştırılması..... 86
Şekil 3.36. M219 Temiz kavite DES çözümüne ait sonuçların referans LES çalışması ile dikey hız profili karşılaştırılması 87
Şekil 3.37. M219 Temiz kavite DES çözümüne ait sonuçların referans LES çalışması ile türbülans kinetik enerji profili karşılaştırılması 87
Şekil 3.38. M219 Temiz kavite DES çözümüne ait sonuçların referans LES çalışması ile Reynolds gerilme profili karşılaştırılması..... 88
Şekil 3.39. M219 Temiz kavite tabanı OASPL karşılaştırması..... 89
Şekil 3.40. M219 Kapaklı temiz kavite geometrisi 89
Şekil 3.41. M219 Kapaklı temiz kavite çözüm alanı..... 90
Şekil 3.42. M219 Kapaklı temiz kavite sayısal çözüm alanı ağı a) önden tüm ağ görüntüsü, b) yandan tüm ağ görüntüsü, c) önden yakın görüntü, d) yandan yakın görüntü..... 90
Şekil 3.43. M219 Kapaklı temiz kavite sayısal çözüme (DES) ait akım çizgileri 91
Şekil 3.44. M219 Kapaklı temiz kavite sayısal çözüme (DES) ait konturlar a) ortalama Mach sayısı, b) türbülans yoğunluğu, c) basınç katsayısı, d) OASPL..... 92
Şekil 3.45. M219 Kapaklı temiz kavite sayısal çözüme (DES) ait girdap konturları a) x ekseni etrafında oluşan girdaplar, b) y ekseni etrafında oluşan girdaplar 92
Şekil 3.46. M219 Kapaklı temiz kavite sayısal çözüme (DES) ait eş yüzey Q-kriteri yapıları a) girdap-x ile renklendirme, b) girdap-y ile renklendirme 93
Şekil 3.47. M219 Kapaklı temiz kavite tabanı OASPL karşılaştırması 94

Şekil 4.1. Mühimmatlı ve mühimmatsız sayısal çözümlerin isimlendirme gösterimi 96
Şekil 4.2. Mühimmata uygulanan fırlatma kuvvetleri gösterimi 97
Şekil 4.3. S CC D 90 sayısal çözüm geometrisi 98
Şekil 4.4. S CC D 90 sayısal çözüm alanı 99
Şekil 4.5. S CC D 90 sayısal çözüm alanı ağı a) önden tüm ağ görüntüsü, b) yandan tüm ağ görüntüsü, c) önden yakın görüntü, d) yandan yakın görüntü 99
Şekil 4.6. S CC D 90 sayısal çözüme (DES) ait akım çizgileri 100
Şekil 4.7. S CC D 90 sayısal çözüme (DES) ait konturlar a) ortalama Mach sayısı, b) türbülans yoğunluğu, c) basınç katsayısı, d) OASPL 100
Şekil 4.8. Mühimmat üzerindeki kesitlerin gösterimi 101
Şekil 4.9. S CC D 90 sayısal çözüme (DES) ait mühimmat OASPL değerleri 102
Şekil 4.10. S CC D 90 sayısal çözüme (DES) ait kavite tabanı OASPL karşılaştırması 102
Şekil 4.11. S CC D 90 sayısal çözüme (DES) ait girdap konturları a) x ekseni etrafında oluşan girdaplar, b) y ekseni etrafında oluşan girdaplar 103
Şekil 4.12. S CC D 90 sayısal çözüme (DES) ait eş yüzey Q-kriteri yapıları a) girdap-x ile renklendirme, b) girdap-y ile renklendirme 104
Şekil 4.13. S CC D 90 A sayısal çözüme (DES) ait akım çizgileri 105
Şekil 4.14. S CC D 90 A sayısal çözüme (DES) ait konturlar a) ortalama Mach sayısı, b) türbülans yoğunluğu, c) basınç katsayısı, d) OASPL 105
Şekil 4.15. S CC D 90 A sayısal çözüme (DES) ait mühimmat OASPL değerleri 106
Şekil 4.16. S CC D 90 A sayısal çözüme (DES) ait kavite tabanı OASPL karşılaştırması 107
Şekil 4.17. S CC D 90 A sayısal çözüme (DES) ait girdap konturları a) x ekseni etrafında oluşan girdaplar, b) y ekseni etrafında oluşan girdaplar 107
Şekil 4.18. S CC D 90 A sayısal çözüme (DES) ait eş yüzey Q-kriteri yapıları a) girdap-x ile renklendirme, b) girdap-y ile renklendirme 108
Şekil 4.19. Mühimmat üzerine etki eden kuvvet ve momentlerin gösterimi 109
Şekil 4.20. S CC D 90 A sayısal çözüme (DES) ait mühimmat üzerine etki eden kuvvet ve moment katsayıları a) y ekseni boyunca etki eden kuvvet katsayısı ve x ekseni etrafında etki eden moment katsayısı b) z ekseni

boyunca etki eden kuvvet katsayısı ve y ekseni etrafında etki eden moment katsayısı c) x ekseni boyunca etki eden kuvvet katsayısı ve z ekseni etrafında etki eden moment katsayısı d) tüm katsayılar 109
Şekil 4.21. S CC D 90 A için hareketli sayısal çözüme (DES) ait Fz min için Mach Sayısı konturu a) t = 0 s, b) t = 0,098 s, c) t = 0,148 s, d) t = 0,198 s 111
Şekil 4.22. S CC D 90 A için hareketli sayısal çözüme (DES) ait Fz min için Basınç Katsayısı konturu a) t = 0 s, b) t = 0,098 s, c) t = 0,148 s, d) t = 0,198 s 112
Şekil 4.23. S CC D 90 A için hareketli sayısal çözüme (DES) ait Fz min için Girdap-x konturu a) t = 0 s, b) t = 0,098 s, c) t = 0,148 s, d) t = 0,198 s ... 113
Şekil 4.24. S CC D 90 A için hareketli sayısal çözüme (DES) ait Fz min için Girdap-y konturu a) t = 0 s, b) t = 0,098 s, c) t = 0,148 s, d) t = 0,198 s ... 114
Şekil 4.25. S CC D 90 A için hareketli sayısal çözüme (DES) ait Fz max için Mach Sayısı konturu a) t = 0 s, b) t = 0,099 s, c) t = 0,149 s, d) t = 0,199 s 116
Şekil 4.26. S CC D 90 A için hareketli sayısal çözüme (DES) ait Fz max için Basınç Katsayısı konturu a) t = 0 s, b) t = 0,099 s, c) t = 0,149 s, d) t = 0,199 s 117
Şekil 4.27. S CC D 90 A için hareketli sayısal çözüme (DES) ait Fz max için Girdap-x konturu a) t = 0 s, b) t = 0,099 s, c) t = 0,149 s, d) t = 0,199 s ... 118
Şekil 4.28. S CC D 90 A için hareketli sayısal çözüme (DES) ait Fz max için Girdap-y konturu a) t = 0 s, b) t = 0,099 s, c) t = 0,149 s, d) t = 0,199 s ... 119
Şekil 4.29. S CC D 90 A için hareketli sayısal çözüme (DES) ait Fz min ve Fz max için mühimmat üzerine etki eden kuvvet ve moment katsayıların değişimi a) x ekseni boyunca etki eden kuvvet katsayısı, b) z ekseni etrafında etki eden moment katsayısı, c) y ekseni boyunca etki eden kuvvet katsayısı, d) x ekseni etrafında etki eden moment katsayısı, e) z ekseni boyunca etki eden kuvvet katsayısı, f) y ekseni etrafında etki eden moment katsayısı 120
Şekil 4.30. S CC D 90 A hareketli sayısal çözüme (DES) ait Fz min ve Fz max için mühimmat hızları a) x ekseni doğrusal hız bileşeni, b) z ekseni açısal hız bileşeni, c) y ekseni doğrusal hız bileşeni, d) x ekseni açısal

hız bileşeni, e) z ekseni doğrusal hız bileşeni, f) y ekseni açısal hız bileşeni 122
Şekil 4.31. S CC D 90 A hareketli sayısal çözüme (DES) ait Fz min ve Fz max için mühimmat hareketi değerleri a) x ekseni boyunca öteleme, b) z ekseni etrafında dönme, c) y ekseni boyunca ötleme, d) x ekseni etrafında dönme, e) z ekseni boyunca öteleme, f) y ekseni etrafında dönme..... 123
Şekil 4.32. S CC D 90 A için hareketli sayısal çözüme (DES) ait Fz min için mühimmat hareketi gösterimi a) önden görünüş, b) yandan görünüş..... 124
Şekil 4.33. S CC D 90 A için hareketli sayısal çözüme (DES) ait Fz max için mühimmat hareketi gösterimi a) önden görünüş, b) yandan görünüş..... 124
Şekil 4.34. S CC D 60 A sayısal çözüm geometrisi 125
Şekil 4.35. S CC D 60 A sayısal çözüm alanı 125
Şekil 4.36. S CC D 60 A sayısal çözüm alanı ağı a) önden tüm ağ görüntüsü, b) yandan tüm ağ görüntüsü, c) önden yakın görüntü, d) yandan yakın görüntü 126
Şekil 4.37. S CC D 60 A sayısal çözüme (DES) ait akım çizgileri 126
Şekil 4.38. S CC D 60 A sayısal çözüme (DES) ait konturlar a) ortalama Mach sayısı, b) türbülans yoğunluğu, c) basınç katsayısı, d) OASPL..... 127
Şekil 4.39. S CC D 60 A ve S CC D 90 A sayısal çözümlerine (DES) ait mühimmat OASPL değerleri 128
Şekil 4.40. S CC D 60 A ve S CC D 90 A sayısal çözümlerine (DES) ait kavite tabanı OASPL karşılaştırması..... 129
Şekil 4.41. S CC D 60 A sayısal çözümüne (DES) ait girdap konturları a) x ekseni etrafında oluşan girdaplar, b) y ekseni etrafında oluşan girdaplar..... 130
Şekil 4.42. S CC D 60 A sayısal çözümüne (DES) ait eş yüzey Q-kriteri yapıları a) girdap-x ile renklendirme, b) girdap-y ile renklendirme 130
Şekil 4.43. S CC D 60 A ve S CC D 90 A sayısal çözümlerine (DES) ait mühimmat üzerine etki eden kuvvet ve moment katsayıları a) y ekseni boyunca etki eden kuvvet katsayısı ve x ekseni etrafında etki eden moment katsayısı b) z ekseni boyunca etki eden kuvvet katsayısı ve y ekseni etrafında etki eden moment katsayısı c) x ekseni boyunca etki

eden kuvvet katsayısı ve z ekseni etrafında etki eden moment katsayısı d) tüm katsayılar 131
Şekil 4.44. S CC D 60 A için hareketli sayısal çözüme (DES) ait Fz max için Mach Sayısı konturu a) t = 0 s, b) t = 0,091 s, c) t = 0,141 s, d) t = 0,191 s, e) t = 0,241 s, f) 0,291 s 133
Şekil 4.45. S CC D 60 A için hareketli sayısal çözüme (DES) ait Fz max için Basınç Katsayısı konturu a) t = 0 s, b) t = 0,091 s, c) t = 0,141 s, d) t = 0,191 s, e) t = 0,241 s, f) 0,291 s 134
Şekil 4.46. S CC D 60 A için hareketli sayısal çözüme (DES) ait Fz max için Girdap-x konturu a) t = 0 s, b) t = 0,091 s, c) t = 0,141 s, d) t = 0,191 s, e) t = 0,241 s, f) 0,291 s 135
Şekil 4.47. S CC D 60 A için hareketli sayısal çözüme (DES) ait Fz max için Girdap-y konturu a) t = 0 s, b) t = 0,091 s, c) t = 0,141 s, d) t = 0,191 s, e) t = 0,241 s, f) 0,291 s 136
Şekil 4.48. S CC D 60 A ve S CC D 90 A hareketli sayısal çözümlere (DES) ait Fz max için mühimmat üzerine etki eden katsayıların değişimi a) x ekseni boyunca etki eden kuvvet katsayısı, b) z ekseni etrafında etki eden moment katsayısı, c) y ekseni boyunca etki eden kuvvet katsayısı, d) x ekseni etrafında etki eden moment katsayısı, e) z ekseni boyunca etki eden kuvvet katsayısı, f) y ekseni etrafında etki eden moment katsayısı 138
Şekil 4.49. S CC D 60 A ve S CC D 90 A hareketli sayısal çözümlere (DES) ait Fz max için mühimmat hareket hızları a) x ekseni doğrusal hız bileşeni, b) z ekseni açısal hız bileşeni, c) y ekseni doğrusal hız bileşeni, d) x ekseni açısal hız bileşeni, e) z ekseni doğrusal hız bileşeni, f) y ekseni açısal hız bileşeni 140
Şekil 4.50. S CC D 60 A ve S CC D 90 A hareketli sayısal çözümlere (DES) ait Fz max için mühimmat hareketi a) x ekseni boyunca öteleme, b) z ekseni etrafında dönme, c) y ekseni boyunca ötleme, d) x ekseni etrafında dönme, e) z ekseni boyunca öteleme, f) y ekseni etrafında dönme 141
Şekil 4.51. S CC D 60 A hareketli sayısal çözümlere (DES) ait Fz max için mühimmat hareketi gösterimi a) önden görünüş, b) yandan görünüş 142

Şekil 4.52. S SW D 60 A sayısal çözüm geometrisi 143
Şekil 4.53. Mühimmatlı 60 derece açıya sahip kapaklı arka duvarı eğimli kavite çözüm alanı 143
Şekil 4.54. S SW D 60 A sayısal çözüm alanı ağı a) önden tüm ağ görüntüsü, b) yandan tüm ağ görüntüsü, c) önden yakın görüntü, d) yandan yakın görüntü 144
Şekil 4.55. S SW D 60 A sayısal çözüme (DES) ait akım çizgileri 144
Şekil 4.56. S SW D 60 A sayısal çözüme (DES) ait konturlar a) ortalama Mach sayısı, b) türbülans yoğunluğu, c) basınç katsayısı, d) OASPL 145
Şekil 4.57. S SW D 60 A ve S CC D 60 A sayısal çözümlerine (DES) ait mühimmat OASPL değerleri 146
Şekil 4.58. S SW D 60 A ve S CC D 60 A sayısal çözümlerine (DES) ait kavite tabanı OASPL karşılaştırması 147
Şekil 4.59. S SW D 60 A sayısal çözüme (DES) ait girdap konturları a) x ekseni etrafında oluşan girdaplar, b) y ekseni etrafında oluşan girdaplar 147
Şekil 4.60. S SW D 60 A sayısal çözüme (DES) ait eş yüzey Q-kriteri yapıları a) girdap-x ile renklendirme, b) girdap-y ile renklendirme 148
Şekil 4.61. S SW D 60 A ve S CC D 60 A sayısal çözümlerine (DES) ait mühimmat üzerine etki eden kuvvet ve moment katsayıları a) y ekseni boyunca etki eden kuvvet katsayısı ve x ekseni etrafında etki eden moment katsayısı b) z ekseni boyunca etki eden kuvvet katsayısı ve y ekseni etrafında etki eden moment katsayısı c) x ekseni boyunca etki eden kuvvet katsayısı ve z ekseni etrafında etki eden moment katsayısı d) tüm katsayılar 149
Şekil 4.62. S SW D 60 A hareketli sayısal çözüme (DES) ait Fz max için Mach Sayısı konturu a) t = 0 s, b) t = 0,095 s, c) t = 0,145 s, d) t = 0,195 s, e) t = 0,245 s, f) 0,295 s 150
Şekil 4.63. S SW D 60 A hareketli sayısal çözüme (DES) ait Fz max için Basınç Katsayısı konturu a) t = 0 s, b) t = 0,095 s, c) t = 0,145 s, d) t = 0,195 s, e) t = 0,245 s, f) 0,295 s 151
Şekil 4.64. S SW D 60 A hareketli sayısal çözüme (DES) ait Fz max için Girdap-x konturu a) t = 0 s, b) t = 0,095 s, c) t = 0,145 s, d) t = 0,195 s, e) t = 0,245 s, f) 0,295 s 152

Şekil 4.65. S SW D 60 A hareketli sayısal çözüme (DES) ait Fz max için Girdap-y konturu a) t = 0 s, b) t = 0,095 s, c) t = 0,145 s, d) t = 0,195 s, e) t = 0,245 s, f) 0,295 s 153
Şekil 4.66. S SW D 60 A ve S CC D 60 A haraketli sayısal çözümlerine (DES) ait Fz max için mühimmat üzerine etki eden kuvvet ve moment katsayıların değişimi a) x ekseni boyunca etki eden kuvvet katsayısı, b) z ekseni etrafında etki eden moment katsayısı, c) y ekseni boyunca etki eden kuvvet katsayısı, d) x ekseni etrafında etki eden moment katsayısı, e) z ekseni boyunca etki eden kuvvet katsayısı, f) y ekseni etrafında etki eden moment katsayısı 155
Şekil 4.67. S SW D 60 A ve S CC D 60 A haraketli sayısal çözümlerine (DES) ait Fz max için mühimmat hareket hızları a) x ekseni doğrusal hız bileşeni, b) z ekseni açısal hız bileşeni, c) y ekseni doğrusal hız bileşeni, d) x ekseni açısal hız bileşeni, e) z ekseni doğrusal hız bileşeni, f) y ekseni açısal hız bileşeni 157
Şekil 4.68. S SW D 60 A ve S CC D 60 A haraketli sayısal çözümlerine (DES) ait Fz max için mühimmat hareketi a) x ekseni boyunca öteleme, b) z ekseni etrafında dönme, c) y ekseni boyunca ötleme, d) x ekseni etrafında dönme, e) z ekseni boyunca öteleme, f) y ekseni etrafında dönme 158
Şekil 4.69. S SW D 60 A haraketli sayısal çözümüne (DES) ait mühimmat hareketi gösterimi a) önden görünüş, b) yandan görünüş 159
Şekil 4.70. S FTS D 60 A sayısal çözüm geometrisi 160
Şekil 4.71. S FTS D 60 A sayısal çözüm alanı 160
Şekil 4.72. S FTS D 60 A sayısal çözüm alanı ağı a) önden tüm ağ görüntüsü, b) yandan tüm ağ görüntüsü, c) önden yakın görüntü, d) yandan yakın görüntü 161
Şekil 4.73. S FTS D 60 A sayısal çözüme (DES) ait akım çizgileri 161
Şekil 4.74. S FTS D 60 A sayısal çözüme (DES) ait konturlar a) ortalama Mach sayısı, b) türbülans yoğunluğu, c) basınç katsayısı, d) OASPL 162
Şekil 4.75. S FTS D 60 A ve S CC D 60 A sayısal çözümlerine (DES) ait mühimmat OASPL değerleri 163

Şekil 4.76. S FTS D 60 A ve S CC D 60 A sayısal çözümlerine (DES) ait kavite tabanı OASPL karşılaştırması 164
Şekil 4.77. S FTS D 60 A sayısal çözümlerine (DES) ait girdap konturları a) x ekseni etrafında oluşan girdaplar, b) y ekseni etrafında oluşan girdaplar 164
Şekil 4.78. S FTS D 60 A sayısal çözümlerine (DES) ait eş yüzey Q-kriteri yapıları a) girdap-x ile renklendirme, b) girdap-y ile renklendirme 165
Şekil 4.79. S FTS D 60 A ve S CC D 60 A sayısal çözümlere (DES) ait mühimmat üzerine etki eden kuvvet ve moment katsayıları karşılaştırması a) y ekseni boyunca etki eden kuvvet katsayısı ve x ekseni etrafında etki eden moment katsayısı b) z ekseni boyunca etki eden kuvvet katsayısı ve y ekseni etrafında etki eden moment katsayısı c) x ekseni boyunca etki eden kuvvet katsayısı ve z ekseni etrafında etki eden moment katsayısı d) tüm katsayılar 166
Şekil 4.80. S FTS D 60 A hareketli sayısal çözüme (DES) ait Fz max için Mach Sayısı konturu a) t = 0 s, b) t = 0,097 s, c) t = 0,147 s, d) t = 0,197 s, e) t = 0,247 s, f) 0,297 s 167
Şekil 4.81. S FTS D 60 A hareketli sayısal çözüme (DES) ait Fz max için Basınç Katsayısı konturu a) t = 0 s, b) t = 0,097 s, c) t = 0,147 s, d) t = 0,197 s, e) t = 0,247 s, f) 0,297 s 168
Şekil 4.82. S FTS D 60 A hareketli sayısal çözüme (DES) ait Fz max için Girdap-x konturu a) t = 0 s, b) t = 0,097 s, c) t = 0,147 s, d) t = 0,197 s, e) t = 0,247 s, f) 0,297 s 169
Şekil 4.83. S FTS D 60 A hareketli sayısal çözüme (DES) ait Fz max için Girdap-y konturu a) t = 0 s, b) t = 0,097 s, c) t = 0,147 s, d) t = 0,197 s, e) t = 0,247 s, f) 0,297 s 170
Şekil 4.84. S FTS D 60 A ve S CC D 60 A hareketli sayısal çözümlere (DES) ait Fz max için mühimmat üzerine etki eden kuvvet ve moment katsayıların değişimi a) x ekseni boyunca etki eden kuvvet katsayısı, b) z ekseni etrafında etki eden moment katsayısı, c) y ekseni boyunca etki eden kuvvet katsayısı, d) x ekseni etrafında etki eden moment katsayısı, e) z ekseni boyunca etki eden kuvvet katsayısı, f) y ekseni etrafında etki eden moment katsayısı 172

Şekil 4.85. S FTS D 60 A ve S CC D 60 A hareketli sayısal çözümlere (DES) ait Fz max için mühimmat hareket hızları a) x ekseni doğrusal hız bileşeni, b) z ekseni açısal hız bileşeni, c) y ekseni doğrusal hız bileşeni, d) x ekseni açısal hız bileşeni, e) z ekseni doğrusal hız bileşeni, f) y ekseni açısal hız bileşeni 174
Şekil 4.86. S FTS D 60 A ve S CC D 60 A hareketli sayısal çözümlere (DES) ait Fz max için mühimmat hareketi a) x ekseni boyunca öteleme, b) z ekseni etrafında dönme, c) y ekseni boyunca ötleme, d) x ekseni etrafında dönme, e) z ekseni boyunca öteleme, f) y ekseni etrafında dönme 175
Şekil 4.87. S FTS D 60 A ve S CC D 60 A hareketli sayısal çözümlere (DES) ait Fz max için mühimmat hareketi gösterimi a) önden görünüş, b) yandan görünüş 176
Şekil 4.88. S FTS SW D 60 A sayısal çözüm geometrisi 177
Şekil 4.89. S FTS SW D 60 A sayısal çözüm alanı 178
Şekil 4.90. S FTS SW D 60 A sayısal çöüzüm alanı ağı a) önden tüm ağ görüntüsü, b) yandan tüm ağ görüntüsü, c) önden yakın görüntü, d) yandan yakın görüntü 178
Şekil 4.91. S FTS SW D 60 A sayısal çözüme (DES) ait akım çizgileri 179
Şekil 4.92. S FTS SW D 60 A sayısal çözüme (DES) ait konturlar a) ortalama Mach sayısı, b) türbülans yoğunluğu, c) basınç katsayısı, d) OASPL 179
Şekil 4.93. S FTS SW D 60 A ve S CC D 60 A sayısal çözümlerine (DES) ait mühimmat OASPL değerleri 180
Şekil 4.94. S FTS SW D 60 A ve S CC D 60 A sayısal çözümlerine (DES) ait kavite tabanı OASPL karşılaştırması 181
Şekil 4.95. S FTS SW D 60 A sayısal çözümüne (DES) ait girdap konturları a) x ekseni etrafında oluşan girdaplar, b) y ekseni etrafında oluşan girdaplar 181
Şekil 4.96. S FTS SW D 60 A sayısal çözümüne (DES) ait eş yüzey Q-kriteri yapıları a) girdap-x ile renklendirme, b) girdap-y ile renklendirme 182
Şekil 4.97. S FTS SW D 60 A ve S CC D 60 A sayısal çözümlere (DES) ait mühimmat üzerine etki eden kuvvet ve moment katsayıları a) y ekseni boyunca etki eden kuvvet katsayısı ve x ekseni etrafında etki eden

moment katsayısı b) z ekseni boyunca etki eden kuvvet katsayısı ve y ekseni etrafında etki eden moment katsayısı c) x ekseni boyunca etki eden kuvvet katsayısı ve z ekseni etrafında etki eden moment katsayısı d) tüm katsayılar 183
Şekil 4.98. S FTS SW D 60 A hareketli sayısal çözüme (DES) ait Fz max için Mach Sayısı konturu a) t = 0 s, b) t = 0,095 s, c) t = 0,145 s, d) t = 0,195 s, e) t = 0,245 s, f) 0,295 s 184
Şekil 4.99. S FTS SW D 60 A hareketli sayısal çözüme (DES) ait Fz max için Basınç Katsayısı konturu a) t = 0 s, b) t = 0,095 s, c) t = 0,145 s, d) t = 0,195 s, e) t = 0,245 s, f) 0,295 s 185
Şekil 4.100. S FTS SW D 60 A hareketli sayısal çözüme (DES) ait Fz max için Girdap-x konturu a) t = 0 s, b) t = 0,095 s, c) t = 0,145 s, d) t = 0,195 s, e) t = 0,245 s, f) 0,295 s 186
Şekil 4.101. S FTS SW D 60 A hareketli sayısal çözüme (DES) ait Fz max için Girdap-y konturu a) t = 0 s, b) t = 0,095 s, c) t = 0,145 s, d) t = 0,195 s, e) t = 0,245 s, f) 0,295 s 187
Şekil 4.102. S FTS SW D 60 A ve S CC D 60 A hareketli sayısal çözümlere (DES) ait Fz max için mühimmat üzerine etki eden kuvvet ve moment katsayıların değişimi a) x ekseni boyunca etki eden kuvvet katsayısı, b) z ekseni etrafında etki eden moment katsayısı, c) y ekseni boyunca etki eden kuvvet katsayısı, d) x ekseni etrafında etki eden moment katsayısı, e) z ekseni boyunca etki eden kuvvet katsayısı, f) y ekseni etrafında etki eden moment katsayısı 189
Şekil 4.103. S FTS SW D 60 A ve S CC D 60 A hareketli sayısal çözümlere (DES) ait Fz max için mühimmat hareket hızları a) x ekseni doğrusal hız bileşeni, b) z ekseni açısal hız bileşeni, c) y ekseni doğrusal hız bileşeni, d) x ekseni açısal hız bileşeni, e) z ekseni doğrusal hız bileşeni, f) y ekseni açısal hız bileşeni 191
Şekil 4.104. S FTS SW D 60 A ve S CC D 60 A hareketli sayısal çözümlere (DES) ait Fz max için mühimmat hareketi a) x ekseni boyunca öteleme, b) z ekseni etrafında dönme, c) y ekseni boyunca ötleme, d) x ekseni etrafında dönme, e) z ekseni boyunca öteleme, f) y ekseni etrafında dönme 192

Şekil 4.105. S FTS SW D 60 A hareketli sayısal çözümüne (DES) ait Fz max için mühimmat hareketi gösterimi a) önden görünüş, b) yandan görünüş 193
Şekil 4.106. S CC D 90 W 1.25 sayısal çözüm geometrisi 194
Şekil 4.107. S CC D 90 W 1.25 A sayısal çözüm alanı 195
Şekil 4.108. S CC D 90 W 1.25 A sayısal çözüm alanı ağı a) önden tüm ağ görüntüsü, b) yandan tüm ağ görüntüsü, c) önden yakın görüntü, d) yandan yakın görüntü 195
Şekil 4.109. S CC D 90 W 1.25 A sayısal çözüme (DES) ait akım çizgileri 196
Şekil 4.110. S CC D 90 W 1.25 A sayısal çözüme (DES) ait konturlar a) ortalama Mach sayısı, b) türbülans yoğunluğu, c) basınç katsayısı, d) OASPL 196
Şekil 4.111. S CC D 90 W 1.25 A, S CC D 90 A ve S CC D 60 A sayısal çözümlerine (DES) ait mühimmat OASPL değerleri 197
Şekil 4.112. S CC D 90 W 1.25 A, S CC D 90 A ve S CC D 60 A sayısal çözümlerine (DES) ait kavite tabanı OASPL karşılaştırması 198
Şekil 4.113. S CC D 90 W 1.25 A sayısal çözümüne (DES) ait girdap konturları a) x ekseni etrafında oluşan girdaplar, b) y ekseni etrafında oluşan girdaplar 199
Şekil 4.114. S CC D 90 W 1.25 A sayısal çözümüne (DES) ait eş yüzey Q-kriteri yapıları a) girdap-x ile renklendirme, b) girdap-y ile renklendirme 199
Şekil 4.115. S CC D 90 W 1.25 A ve S CC D 60 A sayısal çözümlere (DES) ait mühimmat üzerine etki eden kuvvet ve moment katsayıları a) y ekseni boyunca etki eden kuvvet katsayısı ve x ekseni etrafında etki eden moment katsayısı b) z ekseni boyunca etki eden kuvvet katsayısı ve y ekseni etrafında etki eden moment katsayısı c) x ekseni boyunca etki eden kuvvet katsayısı ve z ekseni etrafında etki eden moment 200
Şekil 4.116. S CC D 90 W 1.25 A hareketli sayısal çözüme (DES) ait Fz max için Mach Sayısı konturu a) t = 0 s, b) t = 0,094 s, c) t = 0,144 s, d) t = 0,194 s, e) t = 0,244 s, f) 0,294 s 202
Şekil 4.117. S CC D 90 W 1.25 A hareketli sayısal çözüme (DES) ait Fz max için Basınç Katsayısı konturu a) t = 0 s, b) t = 0,094 s, c) t = 0,144 s, d) t = 0,194 s, e) t = 0,244 s, f) 0,294 s 203

Şekil 4.118. S CC D 90 W 1.25 A hareketli sayısal çözüme (DES) ait Fz max için Girdap-x konturu a) t = 0 s, b) t = 0,094 s, c) t = 0,144 s, d) t = 0,194 s, e) t = 0,244 s, f) 0,294 s 204
Şekil 4.119. S CC D 90 W 1.25 A hareketli sayısal çözüme (DES) ait Fz max için Girdap-y konturu a) t = 0 s, b) t = 0,094 s, c) t = 0,144 s, d) t = 0,194 s, e) t = 0,244 s, f) 0,294 s 205
Şekil 4.120. S CC D 90 W 1.25 A, S CC D 90 A ve S CC D 60 A hareketli sayısal çözümlere (DES) ait Fz max için mühimmat üzerine etki eden kuvvet ve moment katsayıların değişimi a) x ekseni boyunca etki eden kuvvet katsayısı, b) z ekseni etrafında etki eden moment katsayısı, c) y ekseni boyunca etki eden kuvvet katsayısı, d) x ekseni etrafında etki eden moment katsayısı, e) z ekseni boyunca etki eden kuvvet katsayısı, f) y ekseni etrafında etki eden moment katsayısı 207
Şekil 4.121. S CC D 90 W 1.25 A, S CC D 90 A ve S CC D 60 A hareketli sayısal çözümlere (DES) ait Fz max için mühimmat hareket hızları a) x ekseni doğrusal hız bileşeni, b) z ekseni açısal hız bileşeni, c) y ekseni doğrusal hız bileşeni, d) x ekseni açısal hız bileşeni, e) z ekseni doğrusal hız bileşeni, f) y ekseni açısal hız bileşeni 210
Şekil 4.122. S CC D 90 W 1.25 A, S CC D 90 A ve S CC D 60 A hareketli sayısal çözümlere (DES) ait Fz max için mühimmat hareketi a) x ekseni boyunca öteleme, b) z ekseni etrafında dönme, c) y ekseni boyunca ötleme, d) x ekseni etrafında dönme, e) z ekseni boyunca öteleme, f) y ekseni etrafında dönme 211
Şekil 4.123. S CC D 90 W 1.25 A hareketli sayısal çözümüne (DES) ait Fz max için mühimmat hareketi gösterimi a) önden görünüş, b) yandan görünüş 212

GÖRSELLER DİZİNİ

Sayfa

Görsel 1.1. F-16 silahları (Savunma Sanayi, 2018) 1
Görsel 1.2. Rockwell B-1 bombardıman uçağından içeriden mühimmat ayrılması (Crew Daily, 2019) 2
Görsel 1.3. Rockwell B-1 bombardıman uçağının silah kavitesi (Crew Daily, 2019) 2
Görsel 1.4. F-35 savaş uçağı silah kavitesi (Lockheed Martin, 2012) 3

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

$\vec{A}$	:	Yüzey alanı vektörü
$\overrightarrow{A_f}$	:	f yüzeyinin alanı
$\vec{F}$	:	Kuvvet vektörü
$\emptyset$	:	Akış parametresi
$\emptyset_f$	:	$\emptyset$ parametresinin f yüzeyi ile taşınım değeri
$\nabla\emptyset$	:	$\emptyset$ parametresinin gradyanı
$\nabla\emptyset_f$	:	f yüzeyinde $\emptyset$ parametresinin gradyanı
G_k	:	Ortalama hız gradayanından ötürü türbülans kinetik enerji üretimi
G_ω	:	Türbülans yitim oranı olan ω'nın üretimi
$\Gamma_\emptyset$	:	$\emptyset$ parametresi için yayılım katsayısı
Γ_k	:	k'nın efektif yayılımı
Γ_ω	:	ω'nın efektif yayılımı
I	:	Birim matrisi
$I_{xx, yy, zz, xy, yz, xz}$	:	Atalet momentleri
L	:	Atalet momenti tensörü
$\vec{M}$	:	Moment vektörü
$N_{yüzey}$	:	Hücreyi çevreleyen yüzeylerin sayısı
R	:	Koordinat dönüşüm matrisi
Re	:	Reynolds sayısı
$S_\emptyset$	:	Her bir birim hacim için $\emptyset$ parametresinin kaynağı
V	:	Hacim
Y_k	:	k'nın türbülans nedeniyle yok oluşu
Y_ω	:	ω'nın türbülans nedeniyle yok oluşu
a_{nb}	:	$\emptyset_{nb}$ parametresi için doğrusallaştırma katsayısı
a_p	:	$\emptyset$ parametresi için doğrusallaştırma katsayısı
ϕ	:	Yalpalama açısı
m	:	Kütle
μ	:	Akışkanın viskozitesi
μ_t	:	Türbülans viskozitesi

p	:	Basınç
p, q, r	:	x, y ve z eksenlerinde açısal hızlar
ψ	:	Sapma açısı
$\vec{r}$	:	akışın geldiği yöndeki hücrenin merkezinden yüzeye olan uzaklık vektörü
ρ	:	Yoğunluk
$\rho_f \vec{v}_f . \overrightarrow{A_f}$	:	f yüzeyinden geçen kütle akısı
σ_k	:	k için türbülans Prandtl sayısı
σ_ω	:	ω için türbülans Prandtl sayısı
$\bar{\bar{\tau}}$	:	Gerilim tensörü
θ	:	Yunuslama açısı
u, v, w	:	x, y ve z eksenlerinde çizgisel hızlar
$\vec{v}$	:	Hız vektörü
CBC	:	Convection Boundedness Criterion (Taşınım Sınırlılık Kriteri)
CC	:	CleanCavity (temiz kavite)
CC D 90	:	CleanCavity Door 90 (90 derece kapak açılı temiz kavite)
CFD	:	Computational Fluid Dynamics (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği)
CFL	:	Courant-Friedrichs-Lewy
CPU	:	Central Processing Unit (Merkezi İşlem Birimi)
CTS	:	Captive Trajectory System (Yörünge Belirleme Sistemi)
DDES	:	Delayed Detached Eddy Simulation
DES	:	Detached Eddy Simulation
DNS	:	Direct Numerical Simulation (Direk Sayısal Benzetim)
HAD	:	Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
L/D	:	Uzunluk derinlik oranı
L/W	:	Uzunluk genişlik oranı
LES	:	Large Eddy Simulation
NVD	:	Normilized Variable Diagram (Normalleştirilmiş Değişken Diyagramı)
OASPL	:	Overall Sound Pressure Level (Ortalama Ses Basınç Düzeyi)

PISO	:	Pressure Implicit Split Operator (Örtülü Basınç Ayırma Operatörü)
RANS	:	Reynolds Averaged Navier Stokes
S CC D 60	:	Store CleanCavity Door 60 (60 derece kapak açılı mühimmatlı temiz kavite)
S CC D 90	:	Store CleanCavity Door 90 (90 derece kapak açılı mühimmatlı temiz kavite)
S CC D 90 W 1.25	:	Store CleanCavity Door 90 Width 1.25 (90 derece kapak açılı mühimmatlı genişlik-derinlik oranı 1,25 olan temiz kavite)
S FTS D 60	:	Store Flat-TopSpoiler Door 60 (60 derece kapak açılı mühimmatlı önünde spoyler olan kavite)
S FTS-SW D 60	:	Store Flat-TopSpoiler-SlantedWall Door 60 (60 derece kapak açılı mühimmatlı önünde spoyler olan arka duvarı eğimli kavite)
S SW D 60	:	Store SlantedWall Door 60 (60 derece kapak açılı mühimmatlı arka duvarı eğimli kavite)
SHY	:	Sonlu Hacimler Yöntemi
SIMPLE	:	Semi Implicit Method of Pressure Linked Equations (Yarı-Örtülü Basınç Bağlantılı Denklemler Yöntemi)
SIMPLEC	:	Semi Implicit Method of Pressure Linked Equations-Consistent (Sürekli-Yarı-Örtülü Basınç Bağlantılı Denklemler Yöntemi)
SST	:	Shear-Stress Transport (Kayma Gerilmesi Nakli)
UHeM	:	Ulusal Yüksek Başarımlı Hesaplama Merkezi
W/D	:	Genişlik derinlik oranı
exp	:	Experimental (Deneysel)

1. GİRİŞ

Savaş uçaklarında silahlar içeriden ve dışarıdan olmak üzere iki farklı şekilde taşınmaktadır. **Görsel *1.1***'de gösterildiği gibi dışarıda taşınan silahlar genellikle kanatlarda ve gövde üstünde olmaktadır. Avcı uçaklarda, radar teknolojisinin hızla gelişmesi ve performans gerekçelerinden ötürü silahların içeride taşınması zorunlu hal almıştır.



Görsel 1.1. *F-16 silahları (Savunma Sanayi, 2018)*

Mühimmatların içeride taşındığı iki tip uçak bulunmaktadır. Bu uçaklar kargo tipinde büyük bombardıman uçakları ve bunlara göre daha küçük avcı uçaklarıdır. Bu uçak tipleri, taşıdıkları silahları ve taşıma bölgesi olan kavitelerinin boyutlarını belirlemede çok büyük öneme sahiptir. Bombardıman uçakları genellikle L/D oranı büyük olan literatürde kapalı tip kavite olarak adlandırılan kavitelere sahipleridr. Bu kaviteler bir bölgeyi bombardıman altına almak için genellikle akıllı olmayan mühimmatları aynı anda bırakmayı sağlayacak şekilde tasarlanmışlardır. Art arda birden çok mühimmatı bırakmak için uzun kavitelere ihtiyaç duyulmaktadır (**Görsel *1.2***, **Görsel *1.3***).



Görsel 1.2. *Rockwell B-1 bombardıman uçağından içeriden mühimmat ayrılması (Crew Daily, 2019)*



Görsel 1.3. *Rockwell B-1 bombardıman uçağının silah kavitesi (Crew Daily, 2019)*

Modern avcı uçaklarının silahlarını taşımak için sahip oldukları kaviteler kendi boyutlarından ötürü bombardıman uçaklarına göre daha küçük boyutlardadır ve bu kavitelerede genellikle akıllı mühimmatlar kullanılmaktadır.



Görsel 1.4. *F-35 savaş uçağı silah kavitesi (Lockheed Martin, 2012)*

Her ne kadar yapılan çalışmalar L/D oranını düşürerek kapalı tip kavite akıştan açık tip kavite akışa geçmenin mühimmat ayrılmasında pozitif etkiye sahip olduğunu göstermiş olsa da L/D oranı düşük açık tip kavitelerde de mühimmat ayrılması oldukça karmaşık olabilmektedir. Kavite akışların doğası gereği sahip oldukları karasız kayma tabakalarından ötürü kavite içerisinden mühimmat ayrılmasında güvenlik oldukça hasssas bir konudur. Yeni bir mühimmatın belirli bir kaviteden güvenli bir şekilde bırakılabileceğini göstermek için onlarca farklı şartlar altında mühimmat ayrılma testleri gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Bu testler zaman zaman tehlikeli olmaktadır. Geliştirilen yeni bir mühimmat kavite içerisinden bırakıldığında belirli koşullar altında istenmeyen yörüngeler izleyerek uçağa temas ederek kırıma uğrayabilmektedir. Bütün şartları kapsayan olay uzayında tüm testleri gerçekleştirerek mühimmat için güvenilik kleransı sağlamak hem zaman açısından hem de maddi açıdan oldukça zor bir süreçtir. Bu süreci kolaylaştırmak adına olay uzayını kritik noktalara çekebilmek oldukça önemlidir. Bu yüzden mühimmat bırakma testlerinden önce rüzgar tüneli testleri ve HAD çalışmaları oldukça büyük öneme sahiptir. HAD çalışmaları hem yeni bir uçak kavitesi

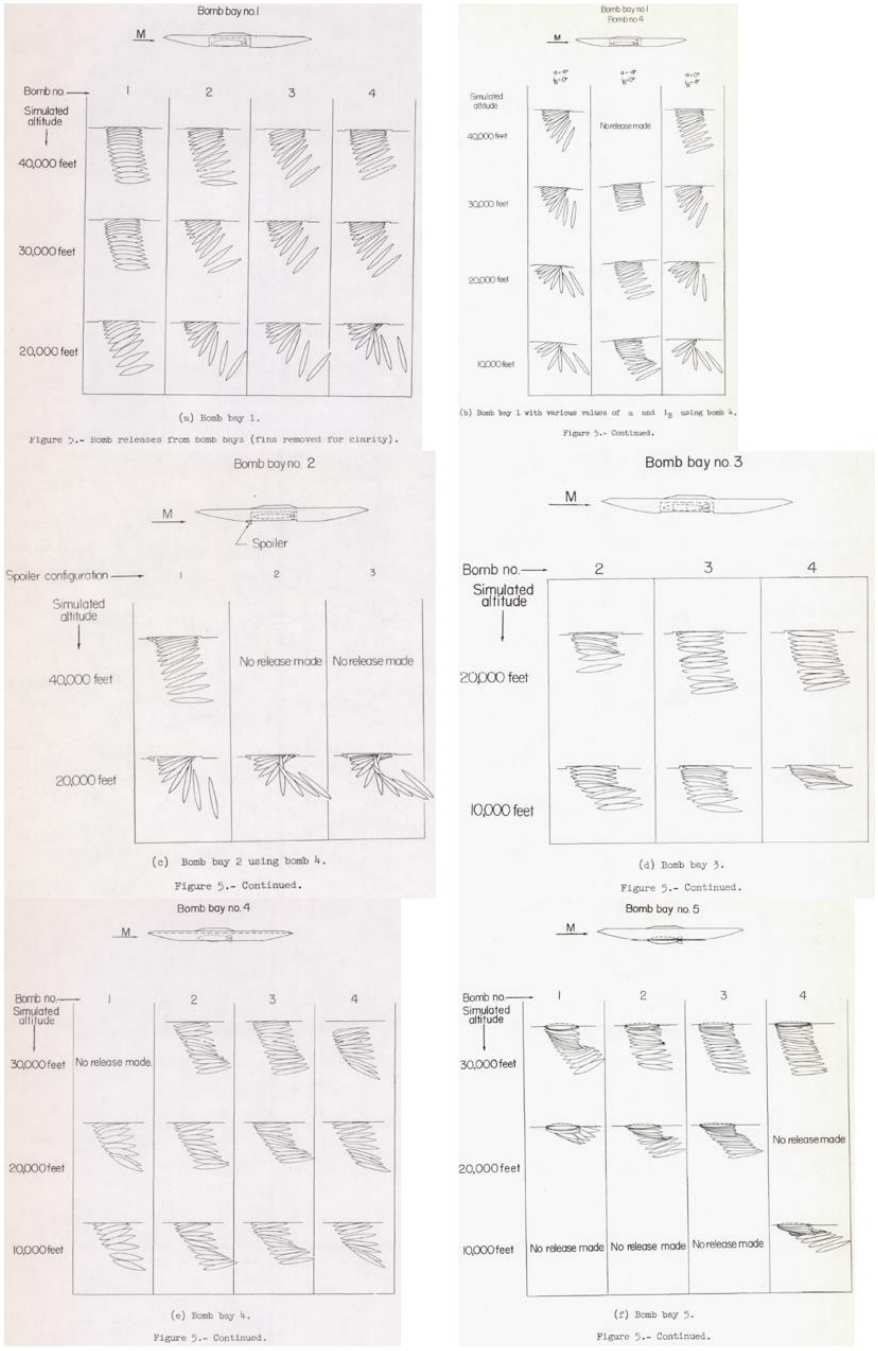
tasarlanırken hem de var olan uçak kavitesinde yeni bir silah denendiğinde ihtiyaç duyulmaktadır. Bu çalışmada avcı uçaklarının sahip olduğu kaviteler göz önünde tutularak L/D oranı 5 olan kaviteye sıkıca yerleştirilmiş bir jenerik mühimmatın temiz kaviteden ve çeşitli pasif kontrol yöntemleri uygulanan kaviteden bırakılması hareketli olarak sayısal benzetim ile modellenmiştir. Bu kapsamda ANSYS Fluent yazılımı kullanılarak altı serbestlik dereceli hareket denklemlerini HAD ile bütünleşik bir şekilde DES türbülans modeli kullanarak çözümler gerçekleştirilmiştir.

1.1. Literatür Özeti

Mühimmat ayrılması dışarıdan ve içeriden olmak üzere iki ana başlık altında toplanmaktadır. Her iki başlık altındaki bu çalışmalar deneysel çalışmalar ve sayısal çalışmalar olacak şekilde toplanmışlardır. Deneysel çalışmalar ise rüzgar tünelinde gerçekleştirilen CTS (Captive Trajectory System) adıyla anılan yarı gerçek zamanlı mühimmat ayrılması ile "Drop Test" adıyla anılan düşme deneyleridir. Bunların dışında ayrıca literatürde verileri tam olarak paylaşılmayan gerçek zamanlı uçaktan bırakılan uçuş testlerine ait mühimmatla ilgili bazı çalışmalarda mevcuttur. Açık literatürde dışarıdan mühimmat ayrılmasına dair çalışmalar içeriden mühimmat ayrılmasına göre daha fazladır. Bunun nedeni içeriden mühimmat ayrılması konusunun görece daha yeni olmasıdır. İçeriden mühimmat ayrılması konusunda dışarıdan mühimmat ayrılma konusu gibi II. Dünya Savaşından sonra çalışılmaya başlanmış olsa da uzun yıllar boyunca savunma sanayinde dışarıdan mühimmat ayrılması konusu baskınlığını korumuştur. Teknolojinin ilerlemesi ile akıllı mühimmatların geliştirilmesi, radar sistemlerinin gelişmesi gibi nedenlerle son yıllarda mühimmatların içeriye alınması zorunlu bir hal almıştır. Bu nedenledir ki son yıllarda içeriden mühimmat ayrılması ile ilgili çalışmalar hız kazanmıştır.

Açık litaratürde mühimmat ayrılmasına dair çalışmalar II. Dünya Savaşından sonralarına gitmektedir. Bu konuda ilk çalışma R. W. Rainey tarafından 1954 yılında NASA Langley araştırma merkezinde gerçekleştirilmiş olup uzun yıllar bu konuda çalışma ortaya konulmamıştır. Bu çalışmada 1,62 Mach sayısında farklı irtifalarda farklı geometriler ile içeriden, dışarıda ve yarı dışarıdan olacak şekilde rüzgar tüneli düşme testleri gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmanın içeriden düşme testi sonuçlarından biri irtifanın artırılması çoğunlukla mühimmat ayrılmasında yararlı olduğudur. İkincisi ise kavitenin içerisine enine yerleştirilen perdelerin kavite içerisindeki açıklığı azaltarak mühimmat

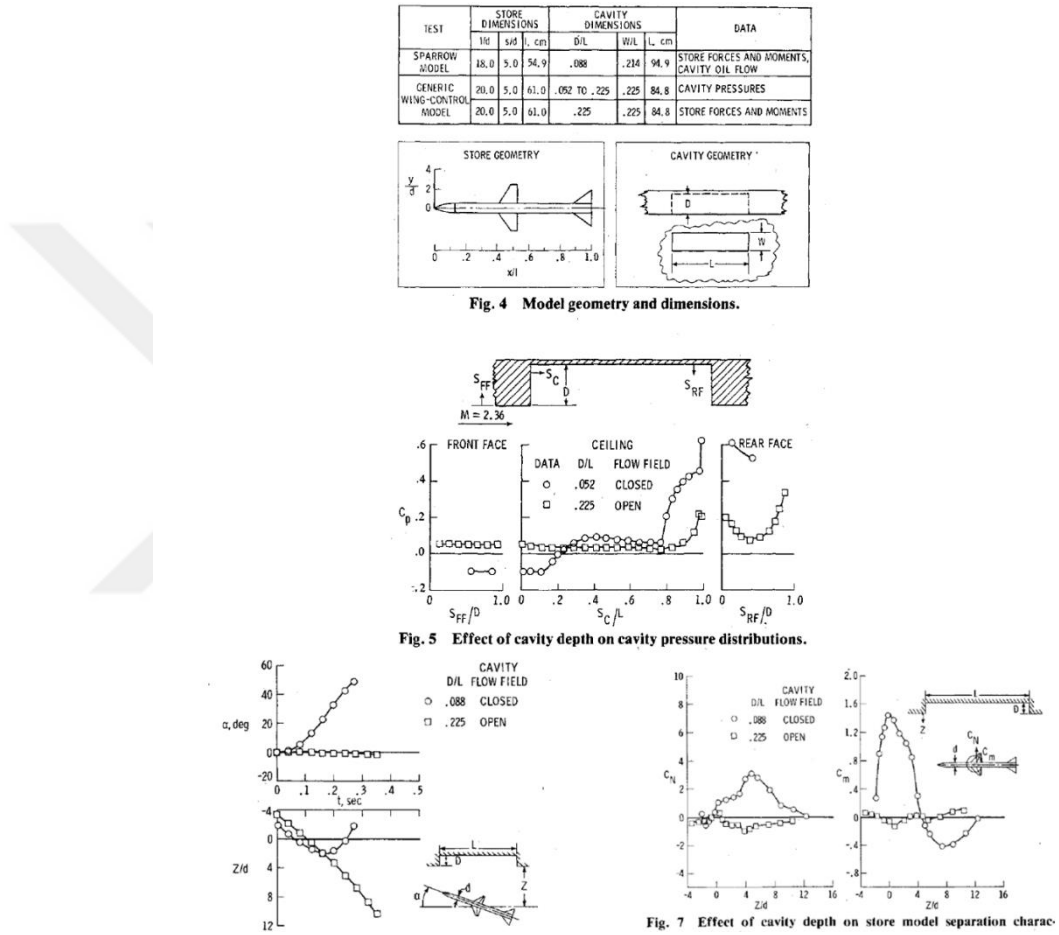
etrafındaki akış dönmelerini düşürdüğü bu sayede mühimmat ayrılmasında faydalı olduğudur. Bu sonuçlar mühimmatın düşme testi boyunca farklı zamanlarda alınmış yanal görüntülerinin verildiği **Şekil *1.1*** ile gösterilmiştir (Rainey, 1954).



Şekil 1.1. *Rainey rüzgar tüneli düşme testine ait görüntüler (Rainey, 1954)*

İçeriden mühimmat ayrılması konusunda açık literatürde Rainey'e ait 1954'teki deneysel çalışmadan sonra 1983 yılında yine NASA Langley Araştırma Merkezi'nden Stallings Jr. tarafından rüzgar tüneli CTS deneysel çalışması ile karşılaşılmıştır. Bu

çalışmada 2,36 Mach'ta farklı derinlik-uzunluk (D/L) oranına sahip kavitelerden mühimmat ayrılması deneyleri gerçekleştirmiştir. Bu çalışma ile açık kavite olarak adlandırılan D/L oranı 0,225 olan kaviteden bırakılan mühimmat kapalı kavite olarak adlandırılan D/L oranı 0,088 olan kaviteden bırakılan mühimmata göre izlediği yörünge bakımından daha çok istenilen sonuç verdiği ortaya konulmuştur. Elde edilen bu sonuçlara ait şekiller **Şekil *1.2*** ile gösterilmiştir (Stallings Jr., 1983).



Şekil 1.2. *Stallings rüzgar tüneli CTS sonuçları (Stallings Jr., 1983)*

1988 yılına gelindiğinde benzer şekilde aynı araştırma merkezinden bir önceki çalışmayı gerçekleştiren Stallings Jr. ile Blair Jr. farklı Mach sayıları (1,70, 2,00 ve 2,65) için kavite kapağının mühimmat ayrılmasına olan etkilerini incelemişlerdir. Bu çalışma ile kavite kapağının mühimmat ayrılmasında mühimmat aerodinamiğine büyük etkisinin olduğu ortaya konulmuştur. Kavite kapağının dikey uzunluğunu azaltmanın kavite çevresinde mühimmata etkiyen aerodinamik kuvvetleri azalttığı bulunmuştur. Mach sayısını 2,00 dan 1,70'e idirme yunuslama moment katsayısının tepe değerini azalttığı, buna karşın Mach sayısı azaltıldığında kavite akışının mühimmat üzerine olan etkilerinin

daha uzak noktalara kadar sürdüğünü görmüşlerdir. Ayrıca kavite kapak açısı 90 derece olduğunda kavite akışı bölgesinde mühimmatın maksimum yunuslama moment katsayısına eriştiğini göstermişlerdir. Bu çalışma ile elde ettikleri kuvvet ve moment katsayılarının değişimi **Şekil *1.3*** ile verilmiştir (Blair Jr. ve Stallings Jr., 1988).

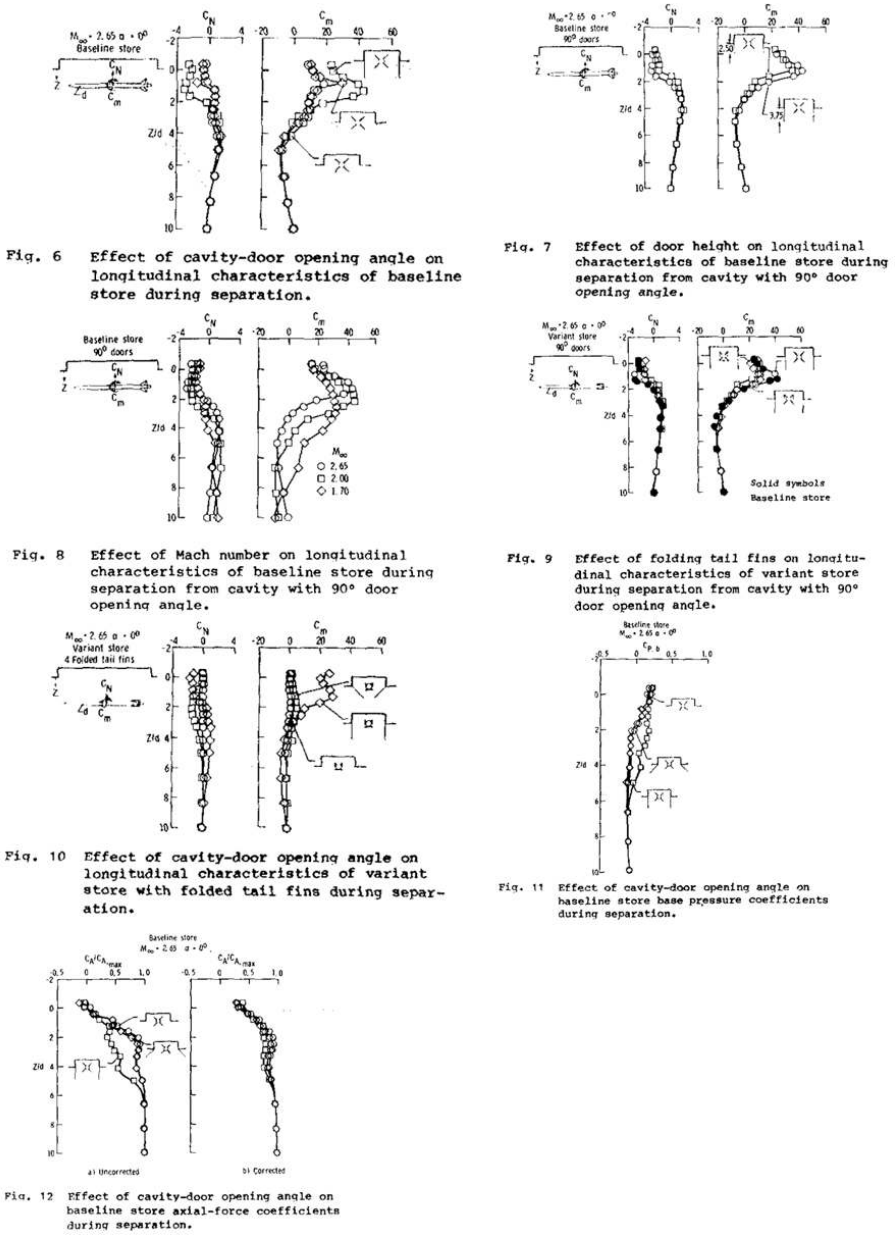


Fig. 6 Effect of cavity-door opening angle on longitudinal characteristics of baseline store during separation.

Fig. 7 Effect of door height on longitudinal characteristics of baseline store during separation from cavity with 90° door opening angle.

Fig. 8 Effect of Mach number on longitudinal characteristics of baseline store during separation from cavity with 90° door opening angle.

Fig. 9 Effect of folding tail fins on longitudinal characteristics of variant store during separation from cavity with 90° door opening angle.

Fig. 10 Effect of cavity-door opening angle on longitudinal characteristics of variant store with folded tail fins during separation.

Fig. 11 Effect of cavity-door opening angle on baseline store base pressure coefficients during separation.

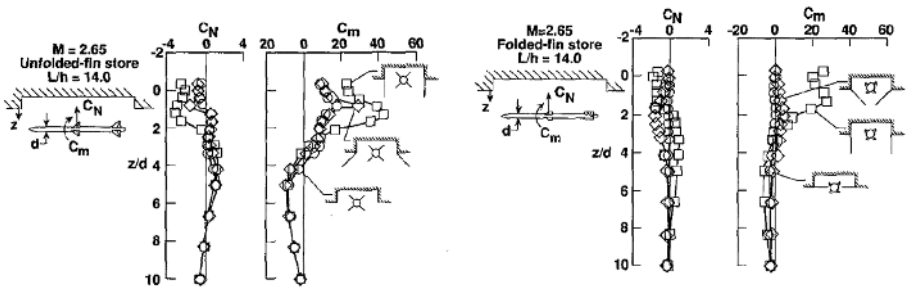
Fig. 12 Effect of cavity-door opening angle on baseline store axial-force coefficients during separation.

Şekil 1.3. *Blair Jr. ve Stallings Jr. rüzgar tüneli CTS sonuçları (Blair Jr. ve Stallings Jr., 1988)*

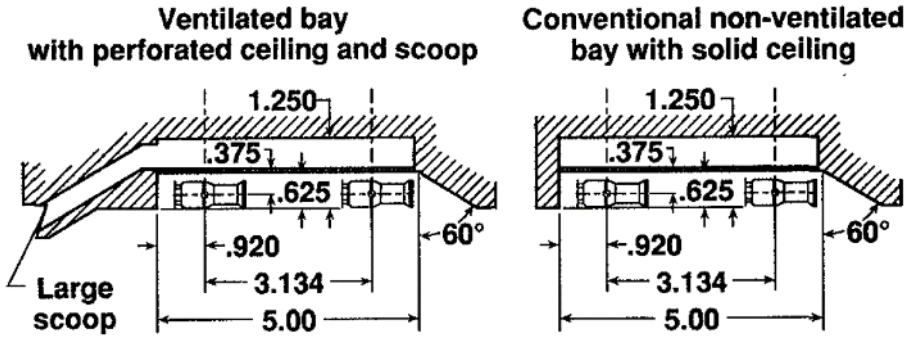
Chen tarafından 1990 yılında yine deneysel CTS yöntemi ile L/D oranı 5,38 olan açık tip jenerik bir kaviteden 0,85 ve 1,20 Mach sayılarında mühimmat ayrılması çalışması yürütülmüştür. Bu çalışma mühimmat ayrılma karakteristiğinin mühimmat yörüngesi bakımından 1,2 ve 0,85 Mach sayılarında benzer eğilimde olduğunu

göstermiştir. Ayrıca kavite içerisine sıkı bir şekilde yerleştirilmiş mühimmat ayrılmasında 1,5 derecelik sapma (yaw) açısı bile mühimmat ayrılmasında tehlike oluşturduğunu ortaya koymuştur (Chen, 1990).

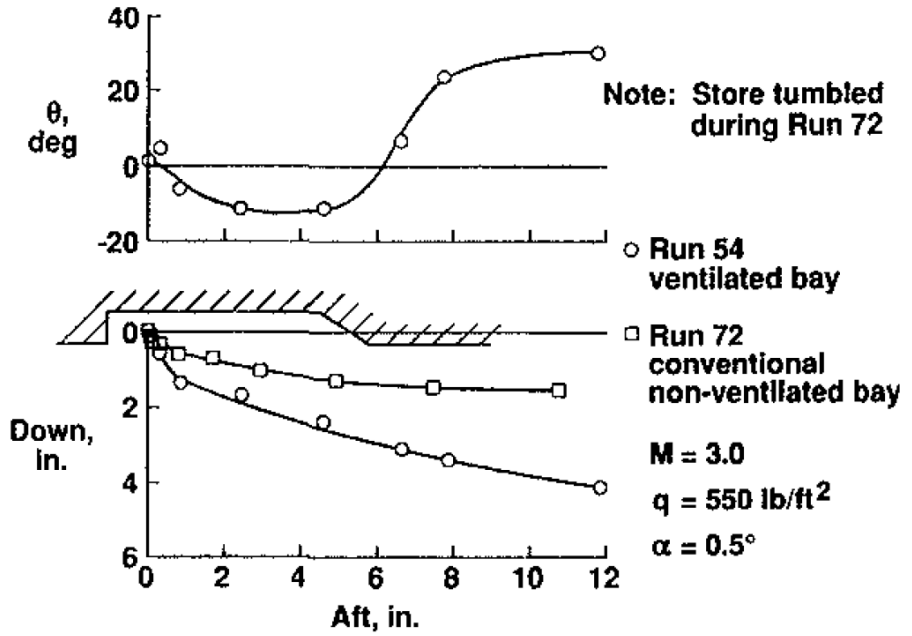
1991 yılında NASA Langley araştırma merkezinden Wilcox Jr. farklı kavite geometrileri ve farklı süpersonik hızlar için CTS yöntemi ile rüzgar tüneli deneysel çalışmaları yürütmüştür. Bu çalışmada öncelikle kavite kapak açısının mühimmat üzerinde oluşan yunuslama momenti ve normal kuvvetine olan etkisi incelenmiştir. Kavite kapağını hem dışarı hem de içeri doğru 45 derece eğimli hale getirmenin mühimmat üzerine etkiyen moment ve kuvvet katsayılarını düşürdüğünü ortaya koymuştur. Elde ettiklerini **Şekil *1.4*** ile göstermiştir. Çalışmanın diğer bölümünde 1957 yılında Kamraas tarafından tanımlanmış **Şekil *1.5***'te gösterilen ve B-68 uçağının ilk versiyonlarında kullanılan kavite tabanında oluşturulan pasif havalandırma sisteminin etkileri incelenmiştir. **Şekil *1.6***'da gösterildiği gibi kavite tabanında pasif havalandırma sistemi uygulamanın mühimmatı hem uçaktan aşağı doğru daha fazla uzaklaştırdığını hem de temiz kaviten bırakılan mühimmata göre bu uygulamada mühimmatın takla atmadığını göstermişlerdir. Çalışmanın son bölümünde kavite tabanın **Şekil *1.7***'de gösterildiği gibi kavite tabanı boyunca ince kanallı hale getirilerek havalandırma sağlanmasının etkileri incelenmiştir. **Şekil *1.8***'de sunulduğu üzere mühimmat kavite ortasında iken 1,70 Mach hızında kavite tabanında kanallar açarak havalandırma sağlamanın kapalı tip kaviteyi açık tip kaviteye çevirdiğinden mühimmata etkiyen kuvvet ve moment değerlerini düşürdüğü ortaya konulmuştur. 2,65 Mach hızında bu kanalların kaviteyi kapalı tipten açık tipe getirecek genişlikte olmadığından mühimmat üzerine etki eden kuvvet ve momentte iyileşme olmadığını düşünmüştür. Mühimmat kavitenin yanında iken hem 1,70 hem de 2,65 Mach hızlarında kavite tabanında açılan kanalların mühimmat yörüngesinde iyileştirme yaptığı ortaya çıkarılmıştır. Ayrıca kavite tabanına kanallar açmanın mühimmat üzerine etkiyen yanal kuvvet ve momente de iyileştrme yaptığı söylenmiştir (Wilcox Jr., 1991).



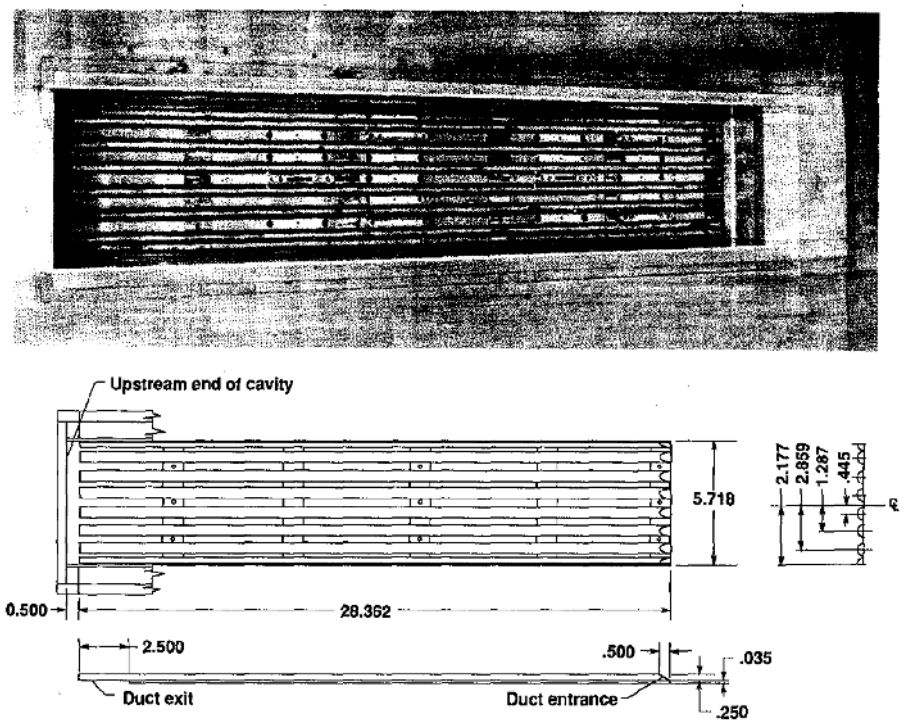
Şekil 1.4. *Wilcox Jr. rüzgar tüneli CTS kapak etkisi sonucu (Wilcox Jr., 1991)*



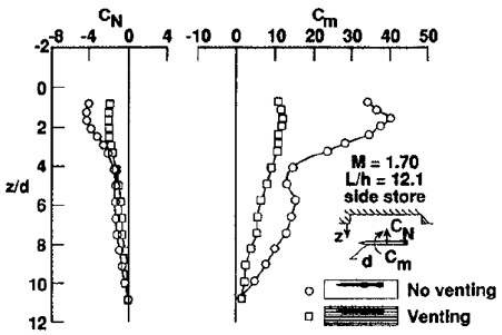
Şekil 1.5. *Wilcox Jr. rüzgar tüneli CTS kavite tabanı havalandırma sistemi modeli (Wilcox Jr., 1991)*



Şekil 1.6. *Wilcox Jr. rüzgar tüneli CTS kavite tabanı havalandırma sistemi etkisi sonucu (Wilcox Jr., 1991)*



Şekil 1.7. *Wilcox Jr. rüzgar tüneli CTS kanallı kavite tabanı gösterimi (Wilcox Jr., 1991)*



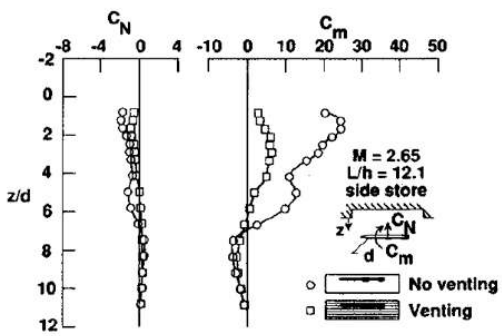
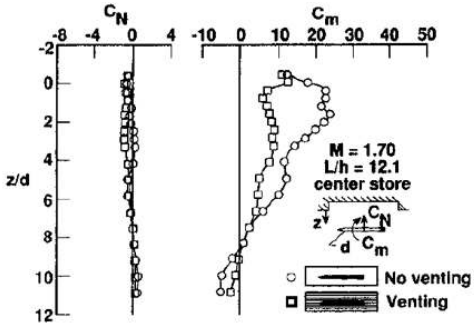


Fig. 34 Effect of vent pipes on side store separation characteristics (Ref. 49).



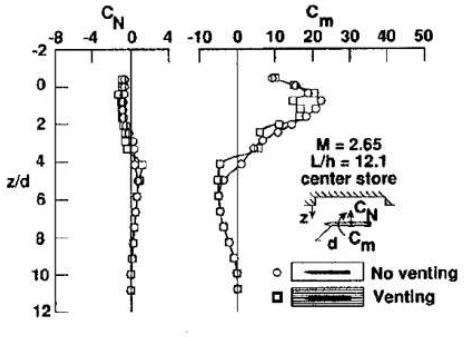


Fig. 33 Effect of vent pipes on center store separation characteristics (Ref. 49).

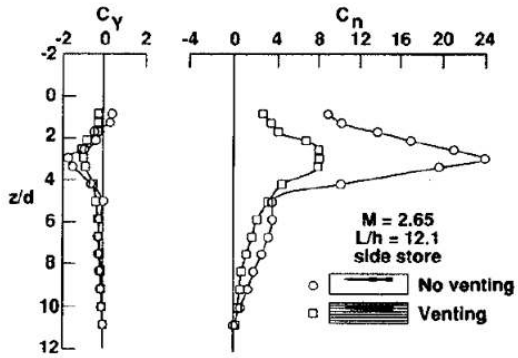
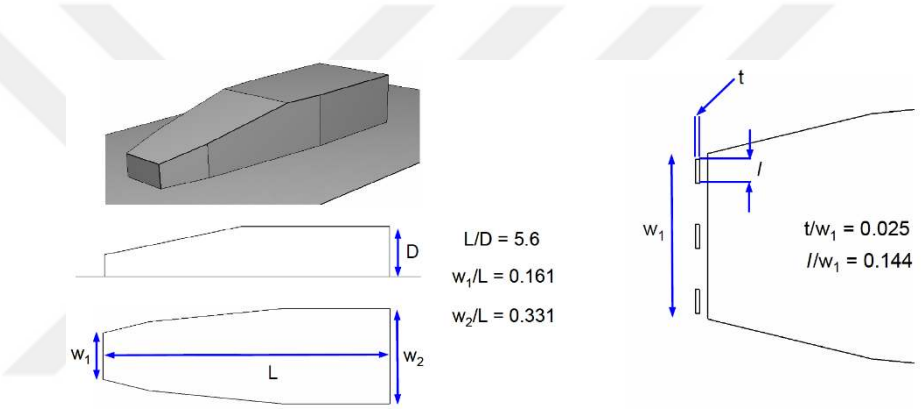


Fig. 35 Effect of vent pipes on side store lateral aerodynamic separation characteristics (Ref. 49).

Şekil 1.8. *Wilcox Jr. rüzgar tüneli CTS kanallı kavite tabanı etkisi sonucu (Wilcox Jr., 1991)*

Yüksek hesap yapabilme kapasitesine sahip bilgisayar teknolojisinin gelişmesi ile 2000'li yıllardan sonra mühimmat ayrılması konusunda deneysel çalışmaların yanında sayısal çalışmalar da literatürde yer almaya başlamıştır. 2007 yılında Shipman ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilen hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) kullanılarak altı serbestlik dereceli sayısal benzetim bu alandaki açık literatürde yer alan ilk çalışmalardandır. Shipman ve arkadaşları **Şekil *1.9*** ile gösterildiği gibi kavite önüne açılan üç dikdörtgen şeklindeki boşluktan hava üflemek suretiyle aktif kontrol yöntemi

kullanarak mühimmat ayrılması hareketsiz ve hareketli sayısal çözümünü gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışma ile kavite önünde açılan deliklerden hava üfleyerek oluşturulan aktif kontrol yönteminin kavitede akustik yükleri düşürdüğü ve kayma tabasında mühimmat üzerine etki eden kuvvet ve moment değerlerini iyileştirdiğini göstermişlerdir. Hareketli çözümde ise yüksek fırlatma hızları için kavite önünden üflemeli aktif kontrol yönteminin mühimmat yörgüngesinde çok az etkilendiğini ve düşük fırlatma hızları ile yeni çalışmalar yürüteceklerini kaydetmişlerdir. Son olarak akış kontrol yöntemleri ile mühimmat üzerine etkiyen dalgalı kuvvet moment değerleri düşürülebilirse mühimmatın daha düşük hızlarda fırlatılabileceğini ve bu sayede daha hafif fırlatma sistemlerine ihtiyaç duyulacağı iddasında bulunmuşlardır (Shipman, vd., 2007).

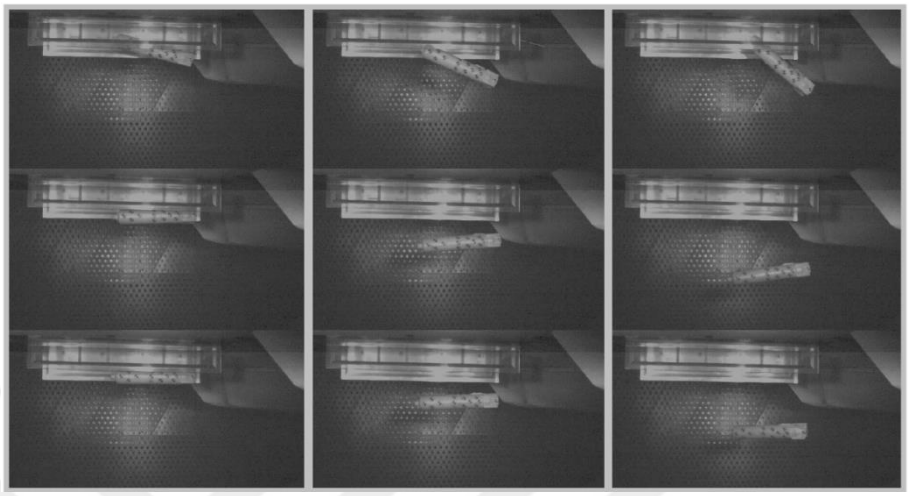


Şekil 1.9. *Shipman ve arkadaşlarının gerçekleştirdiği aktif kontrol yöntemli mühimmat ayrılması gösterimi (Shipman, vd., 2007)*

Spinetti ve Jolly 2008 yılında yayınladıkları çalışmada B-1B uçağından küçük ve hafif olan GBU-38 isimli mühimmatın farklı fırlatma kuvveti, mühimmat parametreleri ve ekipmanlar için çakışık ağ yapısı kullanarak HAD benzetimi gerçekleştirmiş olup telemetre ve IDAPS uçuş test verileri ile karşılaştırmışlardır. Sonuç olarak mühimmat parametrelerinin ve fırlatma verilerinin doğru olması sayısal benzetim için kritik öneme sahip olduğu ve telemetre ve IDAPS uçuş test verilerinin birbirinden farklı olmasından ötürü sayısal HAD benzetimi doğralamasında dikkatli olunması gerektiğini ortaya koymuşlardır (Spinetti ve Jolly, 2008).

Yine 2008 yılında Johnson ve arkadaşları kavite akışta oluşan kayma tabakasının düzensiz salınım hareketi yapmasından kaynaklandığını ve bu zamana bağlı etkilerin klasik deneysel yöntem olan yarı zamana bağlı CTS yöntemi ile gözlemlenemeyeceğini bu yüzden içeriden mühimmat ayrılmasında CTS yöntemi yerine deneysel düşme testi veya HAD kullanılarak altı serbestlik derceli sayısal yöntemlerin daha doğru sonuçlar

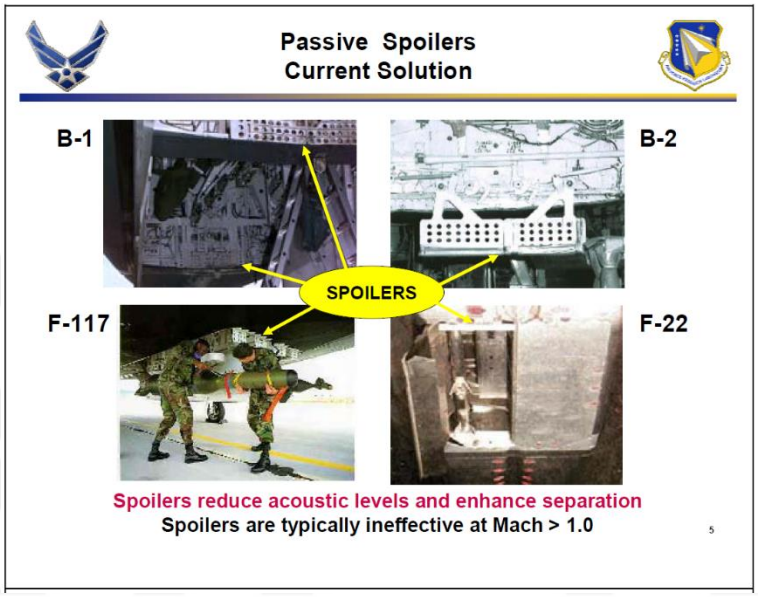
verdiği belirtmişlerdir. Ayrıca rüzgar tünelinde gerçekleştirdikleri düşme testiyle mühimmatın bırakma zamanın mühimmatın yörüngesini etkilediğini göstermişlerdir (Johnson, Stanek ve Grove, 2008).



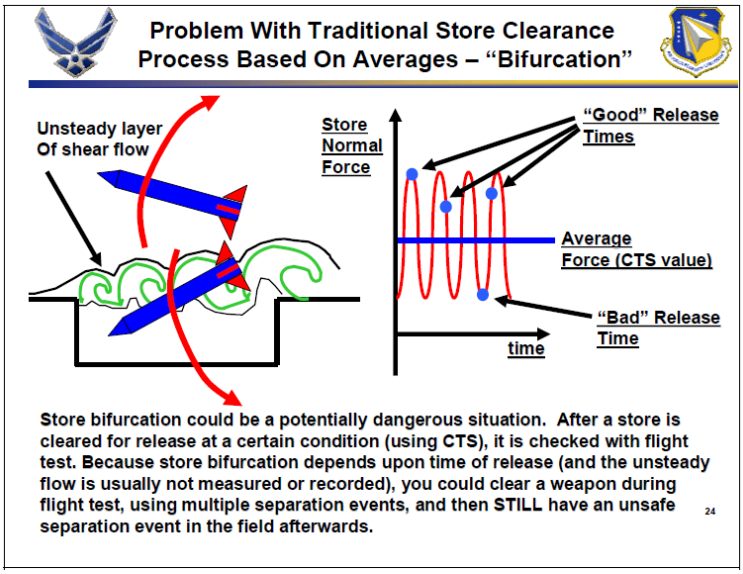
Şekil 1.10. *Johnson ve arkadaşlarının rüzgar tüneli düşme testine ait görüntüleri (Johnson, Stanek ve Grove, 2008)*

A. Cenko ve arkadaşları 2008 yılında yaptıkları değerlendirme çalışmasında bir çalışmanın kavite akışın zamana bağlı salınım yapmasından ötürü kavite içerisinde ve mühimmat üzerinde 160-180 dB arasında yüksek akustik etkilere sahip olduğunu bulmuşlardır. Bu yüksek aeroakustik düzey kavite ekipmanlarına ve mühimmata zarar vermek için yeterli düzeyde olduğunu söylemişlerdir. Bunun için örnek olarak F-111'in mühimmat taşıma kavitesinde taşınan B43 nükleer bombasının kuyruk konisi akustik zarardan dolayı yıkıma uğramış olduğunu belirtmişlerdir. Bu aeroakustik yıkıcı etkilerden korunmak için kavitelerinin önüne spoyler yerleştirmemin yararlı olduğunu söylemişler ve örnek olarak **Şekil *1.11***'i vermişlerdir. İkinci olarak kavite içerisinden mühimmat bırakmada mühimmatın izleyeceği yörüngenin bırakma zamanına bağlı olduğu konusunun tartışmalı olduğunu belirtmişlerdir. Johnson ve arkadaşları yaptıkları rüzgar tüneli düşme testiyle kavite akışın doğası gereği düzensiz kayma tabakasına sahip olduğundan kavite içerisinden bırakılan mühimmatlarda bırakma zamanının mühimmatın izleyeceği yörüngede etkili olduğunu savunmuştur (**Şekil *1.12***). Atkins, Lee ve Cenko, Stickles ve Spinetti'nin yapmış olduğu 4 farklı çalışma olan uçuş testi ve yarı zamana bağlı sayısal yöntemler ile B1-B uçağının mühimmat kavitesinden bırakılan GBU-38 mühimmatının izlediği yörüngede bırakma zamanın belirleyici parametre olmadığını göstermişlerdir. Sonuç olarak uçuş test verilerinin yetersiz olduğuna, sadece Johnson ve

arkadaşlarının F-111/akıllı küçük mühimmatın düşme testi ile kavite içerisinden bırakılan mühimmatın izlediği yörüngenin tekrar edilemez olduğunu savunduğunu ortaya koymuşlardır. Bir çok rüzgar tüneli düşme testine dayanan deneysel sonucun kütle ve aerodinamik özellikleri yüksek hızlarda modelleyemediğini düşünmüşlerdir (Cenko vd., 2008). Bu nedenle bu çalışmanın bir bölümünde mühimmatın izleyeceği yörüngenin bırakma zamanına bağlı olup olmadığı da incelenmiştir.

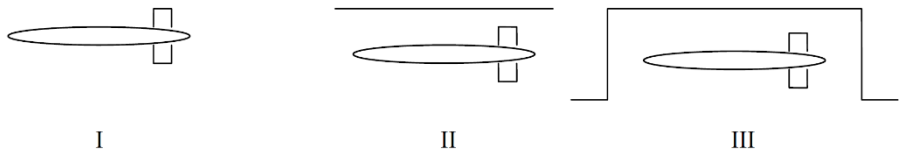


Şekil 1.11. *Cenko ve arkadaşlarının kavite önünde kullanılan spoyler örnekleri (Cenko vd., 2008)*

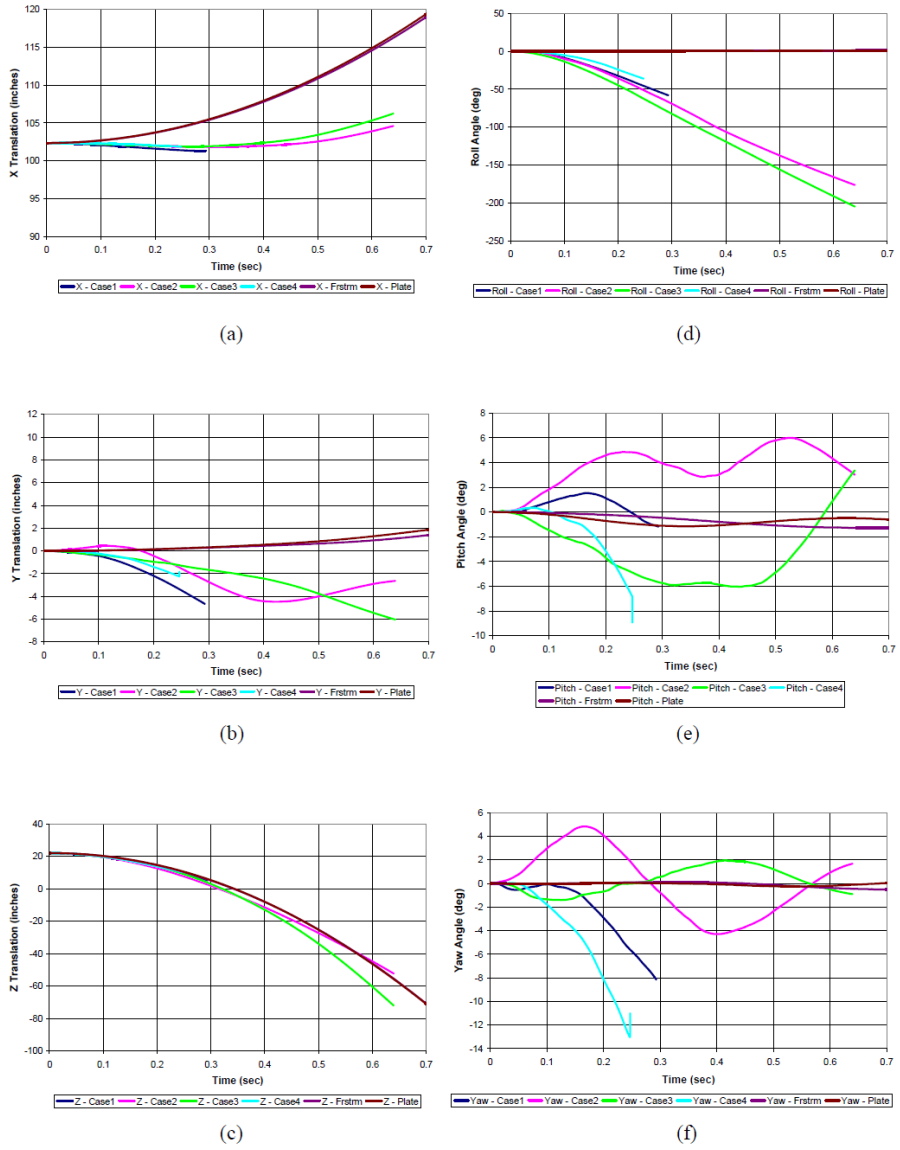


Şekil 1.12. *Cenko ve arkadaşlarının kavite içerisinde mühimmata etki eden kuvvetlerin gösterimi (Cenko vd., 2008)*

Westmoreland 2009 yılında NASA'nın geliştirmiş olduğu HAD çözücüsü olan OVERFLOW'u kullanarak 0,95 Mach hızında, L/D oranı 4,5 olan kaviteden 500 pound ağırlığında klasik bir mühimmata ilk fırlatma kuvveti uygulamadan farklı zamanlar için sayısal benzetim gerçekleştirmiştir. **Şekil *1.13***'te gösterildiği gibi 4 farklı zamanda kavite içerisinden bıraktığı mühimmat yörüngesini serbest akışa ve üzerinde sonsuz plaka bulunan geometriden elde ettiği yörüngeler ile karşılaştırmıştır. Bu karşılaştırma **Şekil *1.14*** ile gösterilmiştir. Bu çalışmada mühimmatın yörüngesinin kavite içerisindeki karasız akış rejiminden etkilendiği ve faklı zamanlarda bırakılan mühimmatın farklı yörüngeler izleyebileceği sayısal benzetim ile ortaya konulmuştur. İkinci olarak mühimmat üzerine etki eden kuvvet geçimişine bakarak dışarıdan uygulanacak ilk fırlatma kuvvetinin mühimmat yörüngesini büyük oranda iyileştireceği sonucuna varmıştır. Ayrıca iyi tasarlanmış kavite, fırlatma sistemi, parazit giderme aleti ve aerodinamik olarak kararlı mühimmatın yumuşak ve tekrar edilebilir bir yörünge izleyebileceği söylenmiştir. Son olarak HAD benzetiminin mühimmat ayrılması probleminde yararlı olduğunu, fakat hala hesaplama açısından pahalı olduğunu ortaya koymuştur (Westmoreland, 2009).



Şekil 1.13. *Westmoreland çalışmasında uygulanan geometriler (Westmoreland, 2009)*



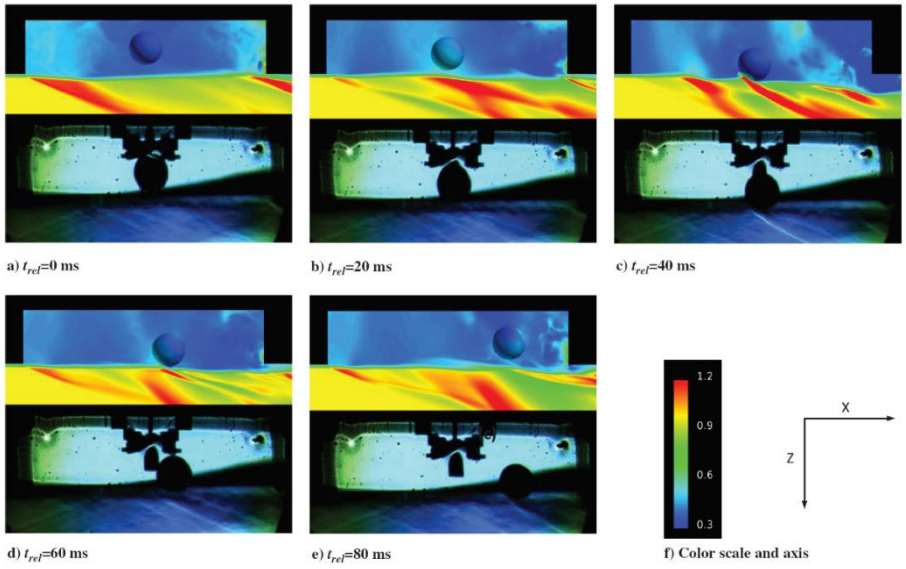
Şekil 1.14. *Westmoreland çalışması sonucu elde ettiği yörüngeler (Westmoreland, 2009)*

Davis ve arkadaşları 2009 yılında içeriden mühimmat ayrılması için farklı kavite derinliği, fırlatma hızı, mühimmat ağırlığı, mühimmat kararlığı ve akış hızı için parametrik sayısal benzetim gerçekleştirmişlerdir. Mühimmat yörüngesinin mühimmat ağırlığına, fırlatma hızına ve mühimmat kararlılığına beklenilenin aksine çok bağlı olmadığını fakat hala yüksek yunuslama ve sapma açılarında bu değerlere bağlı olduğunu düşündüklerini söylemişlerdir. Mühimmat yörüngesinin süpersonik gibi yüksek hızlarda beklenildiği gibi akış hızına bağlı olduğu ve şaşırtıcı bir şekilde mühimmat yörüngesinin en fazla kavite derinliğine bağlı olduğunu göstermişlerdir. Bunun nedeni olarak derin kaviteden mühimmat çıkarken daha fazla zaman harcadığı için kayma tabakasına gelene kadar ilk verilen fırlatma momenti ile daha fazla açıyla kayma tabakasına girdiği ve

böylece kayma tabasında ve sonrasında çok daha fazla açıya sahip olduğunu göstermişlerdir (Davis vd., 2009).

Murray ve arkadaşları 2009 yılında 1/15 ölçekli GBU-38 mühimmatıyla 1,5 Mach hızında L/D oranı 6 olan kaviteden iki farklı fırlatma kuvveti ile deneysel bir çalışma olan rüzgar tüneli düşme testini gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmanın asıl amacı mühimmat ayrılması ile kavite içerisindeki basınç dalgalanması arasındaki ilişkiyi incelemektir. Yüksek fırlatma hızında mühimmat kayma tabakası içerisinde yaklaşık 2 ms kadar kalmış ve 2 basınç salınımı, düşük fırlatma hızı ile atılan mühimmat kayma tabakası içerisinde yaklaşık 5 ms kalarak 5 basınç salınımı ile karşılaşmıştır. Her iki durumda da kayma tabakası salınımı ortalaması alınmasında bir kabul yapılamadığından mühimmat üzerine etki eden aerodinamik kuvvetler hesaplanamamıştır. Ayrıca iki fırlatma kuvveti için elde edilen yunuslama açısının biribirinden çok farklı olduğunu ve mühimmat ayrılması ile basınç dalagalanması arasındaki ilişkinin bu iki durum için de farklılık gösterdiğini ortaya koymuşlardır. Kavite içerisinde oluşan basınç salınımı ile mühimmat ayrılması arasındaki ilişki mühimmat yörüngesi için kilit ön koşul olabileceği ve basınç dalgalanmalarından elde edilecek olan sinyaller mühimmat bırakmada kontrol mekanizması için girdi oluşturabileceği öne sürülmüştür (Murray vd., 2009).

2014 yılına gelindiğinde Flora ve arkadaşlarının içeriden mühimmat ayrılması konusunda denysel ve sayısal çalışmayı bir arada literatüre kazandırmışlardır. Süpersonik hız olan 2,94 Mach hızında L/D oranı 4,5 olan kaviteden mühimmatın küre şeklinde buz-modelini (ice-model) rüzgar tünnelinden düşme testine tabi tutmuş ayrıca NASA'nın geliştirmiş olduğu OVERFLOW HAD yazılımı ile sayısal benzetimini gerçekleştirmişlerdir. Son olarak mühimmatın MK-82 buz modeli ile düşme testini tekrar etmişlerdir. Deneysel sonuçlar ile HAD sonuçlarının uyumlu olduğunu (**Şekil *1.15***) kavite önünde spoyler kullanmanın kavite içerisindeki Rossiter modunu ortadan kaldırdığını, kayma tabakasını kalınlaştırdığını ve mühimmat ayrılmasını iyileştirdiğini (**Şekil *1.16***) ortaya koymuşlardır (Flora vd., 2014).



Şekil 1.15. *Flora ve arkadaşların küresel modeli için deneysel ve HAD sonuçları (Flora vd., 2014)*

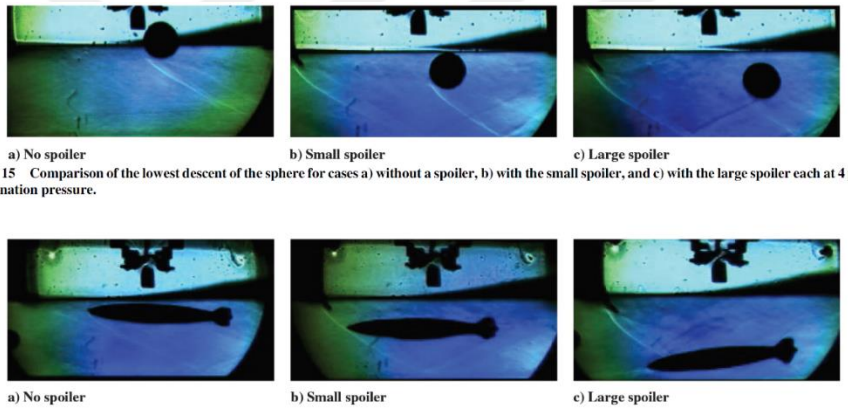


Fig. 15 Comparison of the lowest descent of the sphere for cases a) without a spoiler, b) with the small spoiler, and c) with the large spoiler each at 4 psia stagnation pressure.

Şekil 1.16. *Flora ve arkadaşların MK-82 modeli için deneysel sonuçları (Flora vd., 2014)*

2015 yılında benzer şekilde Merrick ve Reeder L/D oranı 4,5 olan kaviteden farklı süpersonik hızlarda ve farklı durma basıncı için küresel buz-model için düşme testi ve OVERFLOW adındaki HAD yazılımı ile sayısal benzetim gerçekleştirmişlerdir. 1 psia durma basıncında deneysel değerler ile sayısal değerlerin uyumlu olduğunu fakat 3,5 psia durma basıncında rüzgar tüneli düşme testi buz-model kürenin kavite içerisinden serbest düşmesinde önce öne doğru hareket ettiği daha sonra kavitenin arkasına yöneldiğini, sayısal benzetimde bu öne doğru hareketin görülmediğini ortaya koymuşlardır. Bu farklılığa rağmen kürenin kavite boyunca toplam haretinin benzer olduğunu söylemişlerdir. Ayrıca bu farklılığın kavite akışının kararsızlığından dolayı bırakma zamanının farklı olmasının olabileceğini dile getirmişlerdir (Merrick ve Reeder, 2015).

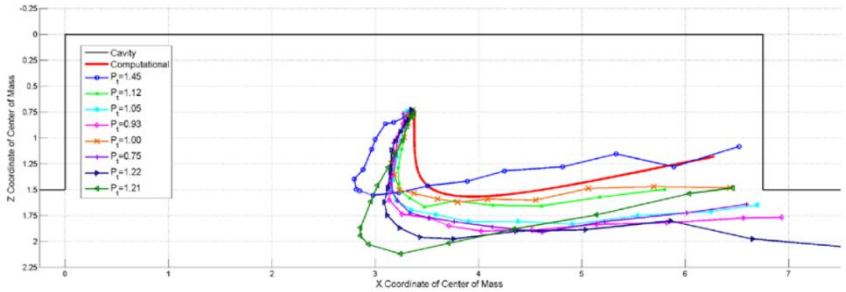


Figure 9. Comparison of computed trajectory with multiple experimental runs near stagnation pressures of 1.00 psia (as noted in the legend) for a Mach 2.22 freestream.

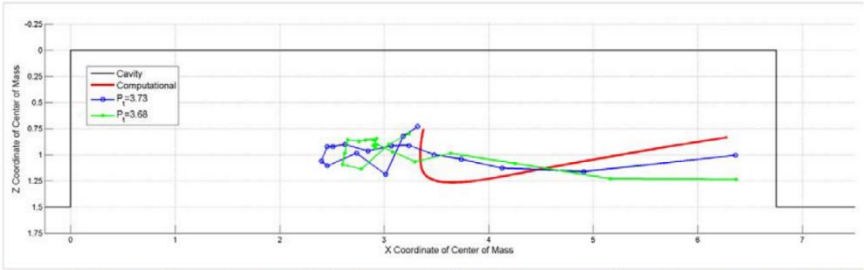


Figure 10. Comparison of computed trajectory (red) with two experimental runs near stagnation pressures of 3.5 psia (as noted in the legend) for a Mach 2.22 freestream.

Şekil 1.17. *Merrick ve Reeder'a ait deneysel ve sayısal çözüm sonuçlarının karşılaştırılması (Merrick ve Reeder, 2015)*

2016 yılında ise Barone ve Arunajatesan **Şekil *1.18***'de gösterildiği gibi kavite içerisine yerleştirikleri silindir şeklindeki mühimmat üzerine etki eden kuvvet, moment ve ses basınç dağılımı etkilerini hareketsiz olarak farklı Mach sayıları için subsonik ve transonik hızlarda rüzgar tünelinde deneysel olarak incelemiş sayısal sonuçlar ile karşılaştırmışlardır. Bu çalışma ile RANS/LES (Reynolds Averaged Navier Stokes / Large Eddy Simulation) hibrit modelinin hem subsonik hem de transonik hızlarda kavite duvarında belirli bir noktada oluşan basınç spektrumunu en fazla genlik için 2-3 dB ve frekans için ise % 5 farkla doğru bir şekilde simüle ettiğini göstermişlerdir. Sayısal çözümün ayrıca kavite içerisine mühimmat yerleştirildiğinde basınç spektrumundaki değişimi de doğru bir şekilde yakaladığını ortaya koymuşlardır. Silindir şeklindeki model mühimmat üzerinde oluşan kuvvet ve moment değerleri ile kavitede oluşan rezonans modları arasında kompleks bir ilişki olduğunu söylemişlerdir. Bu kompleks ilişkinin mühimmatın kavite kayma tabası ile etkileşiminden ötürü olduğunu düşünmüşlerdir ve bu konuda daha fazla çalışma yapılması gerektiğini dile getirmişlerdir (Barone ve Arunajatesan, 2016).

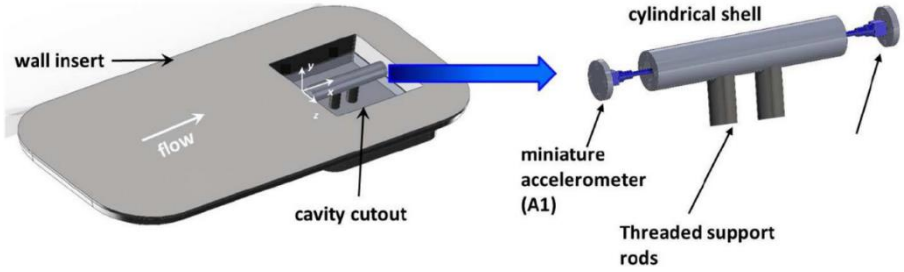


Fig. 4 Schematic of the cavity-with-store wind-tunnel experiment.

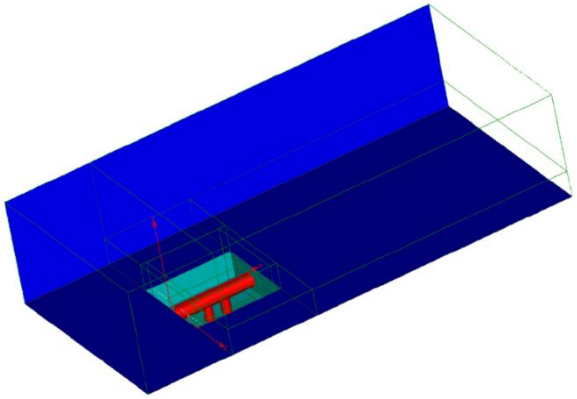
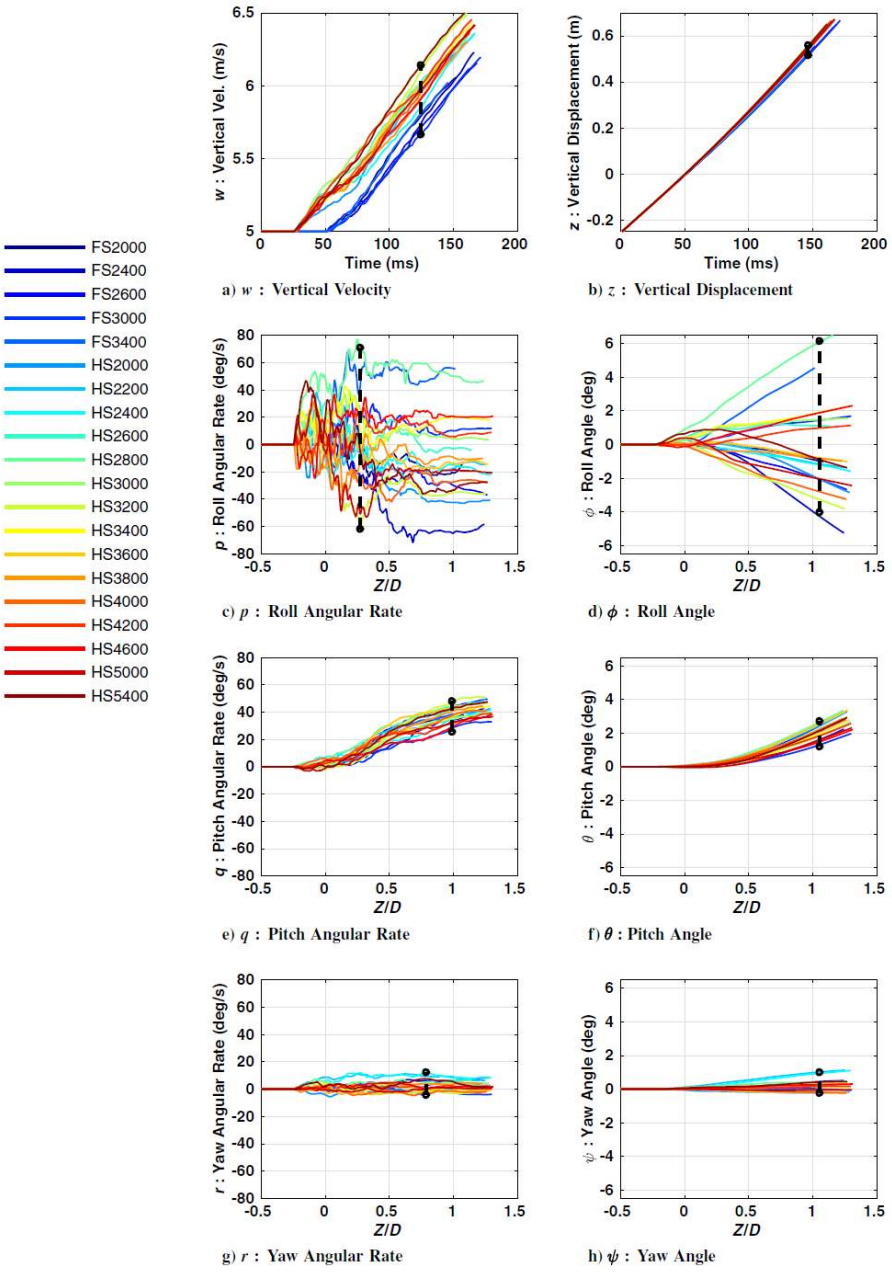


Fig. 5 Computational domain with multiblock grid topology for cavity-with-store simulations.

Şekil 1.18. *Barone ve Arunajatesan'ın oluşturdukları deney seti ve sayısal çözüm alanı gösterimi (Barone ve Arunajatesan, 2016)*

Kavite akışında hem deneysel hem de sayısal çalışmaları ile tanınan Barakos ve Taylor, Loupy ile birlikte 2017 yılında içeriden mühimmat ayrılması konusunda HMB3 HAD çözücüsü ile farklı fırlatma kuvveti ve fırlatma zamanları için 20 farklı hareketli sayısal çözüm gerçekleştirmişlerdir (**Şekil *1.19***). Yapmış oldukları bu çalışma ile kaviteden bırakılan mühimmatın ölçek-adaptif simülasyonu (scale-adaptive simulation) yörüngesindeki değişkenliği sayısal olarak öngerebildiğini göstermiştir. Yörünge değişkenliğinin ortalama ve standart sapmasın yakalanabilmesi için gerekli olan minimum simülasyon için istatistik metrik önermişlerdir. Akış verilerinin ortalamalarını kullanarak kavite içerisindeki basıncın mühimmat yörüngesine olan etkisini açıklamışlardır. Elde ettikleri sonuçların filtrelenmesi yuvarlanma açısının akış bölgesindeki salınımları tarafından değiştirildiğini, dikey hareketin ise fırlatma kuvveti ve yerçekiminden etkilendiğini göstermiştir. Yapmış oldukları bu çalışmada öne sürdükleri ölçek-adaptif simülasyonun uçuş testlerinden önce başlangıç araştırmasında kullanılabileceğini ve etkili bir yöntem olduğunu iddia etmişlerdir (Loupy, Barakos ve Taylor, 2017).



Şekil 1.19. *Loupy ve arkadaşlarının yapmış olduğu sayısal analiz sonuçları (Loupy, Barakos ve Taylor, 2017)*

2018 yılında yine Loupy, Barakos ve Taylor içeriden mühimmat ayrılması ile ilgili yeni bir çalışma yayınlamışlardır. Bu çalışmada ise kavite kapağının açılmasını, kavite akış gelişmesini, mühimmat ayrılmasını ve mühimmat üzerinde oluşan aeroelastik etkileri incelemişlerdir. Mühimmat üzerinde oluşan ses basınç dalgalanmasından en çok etkilenen bölgenin mühimmat kanatçıklarının olduğunu ve katı-akışkan etkileşimli model ile yapmış oldukları simülasyonda mühimmat üzerinde oluşan maksimum deformasyon miktarının mühimmat çapının %2'si kadar olduğunu ortaya koymuşlardır. Bu çalışma ile multifizik simülasyonların mühimmat kavite deneylerinin tamamlayıcı olarak ve

mühimmat tasarımında kullanılabileceğini ortaya koymuşlardır (Loupy, Barakos ve Taylor, 2018).

2019 yılında Chin ve arkadaşları L/D oranı 4,5 olan kaviteden küresel buz-modelli mühimmat ile 2,22 Mach sayısında süpersonik hızda farklı başlangıç hücum açısı ile düşme testi gerçekleştirmişlerdir. Mühimmat yörüngesini yunuslama ve sapma düzlemine yerleştirdikleri yüksek hızlı kameralar ile görüntüleyerek dört serbestlik dereceli hareket verileri elde etmişlerdir. Farklı başlangıç hücum açısı ile bırakılan mühimmatların kavite içerisinde benzer davrandığını fakat kayma tabakasından sonra büyük farklılık olduğunu göstermişlerdir. Ayrıca kararsız aerodinamiğin mühimmat yörüngesinde önemli etkilere sahip olduğunu ortaya koymuşlardır (Chin vd., 2019).

Literatürde emniyetli mühimmat ayrılmasına dair birkaç çalışma bulunmaktadır. Bunlardan K. Jamison ve arkadaşları 2017 yılında yapmış oldukları çalışmada mühimmat ayrılmasını ifade eden numaralandırma sistemi oluşturmuşlardır (Jamison, Rossouw ve Miles, 2017). Bu numaralandırma **Tablo *1.1***'de sunulmaktadır. Bu çalışmada mühimatın uçaktan ayrılması sırasında izlediği yörüngeyi belirledikleri kriterlere göre 0 ile 4 arasında numaralandırmışlardır. Belirledikleri bu kriterler ise **Tablo *1.2***'te sunulmaktadır. Mühimmatın uçağın herhangi bir parçası ile temas etmesi halinde 0 ile numaralandırılmakta ve bu da mühimmatın uçağa çarptığını göstermektedir. Mühimmat ayrıldıktan 0,07 s sonra uçağa 2 cm den daha yakın ise veya 0,25 s sonra uçaktan mühimmatın yarıçapından daha az uzaklaşmış ise veya 0,06 s den önce negatif hıza sahipse 1 ile numaralandırılır ve bu da mühimmatın uçak marjinalinin dışına çıktığını gösterir. Mühimmat 0,06 s den sonra negatif hıza geçerse 2 kodu ile numaralandırılır ve bu da mühimmatın uçağa yöneldiği anlamına gelir. Eğer mühimmatın hızı 0,07 s den sonra fırlatılma hızının yüzde 30'undan daha aşağı inerse 3 ile numaralandırılır ki bu da mühimmatın uçak yakınlarında asılı kaldığını gösterir. Son olarak bunların hiç biri gerçekleşmemiş ise 4 ile numaralandırılır ve bu da mühimmatın uçağı temiz şekilde terk ettiğini gösterir. Yapılan bu numaralandırma genel olarak mühimmatın öteleme hareketini kapsayacak şekilde ve fırlatma hızının yeterli olup olmadığını göstermek için oluşturulmuştur. Mühimmatın kaviteden çıkmasını sağlayan numaralandırmadır. Mühimmatın yapmış olduğu açıların tehlikeli olup olmadığı değerlendirilmemiştir. Mühimmatın yaptığı açılar yani dönme hareketi numaralandırılmamıştır. Mühimmat bırakmada daha önce yaşanan kazalarda mühimmat yeterince büyük fırlatma kuvvetiyle

kavite dışarısına atılmış olmasına rağmen yapmış olduğu açılardan dolayı tehlike yaratmışlardır. R. E. Carter tarafından 2012 yılında yazılan doktora tezinde mühimmatın ayrılma sırasında tehlike arz etmese bile kabul edilemez yörünge izleyebildiğini göstermiştir (Carter, 2012). Buna örnek **Şekil *1.20***-c'de gösterilen tehlikeli olmayan fakat kabul edilemez yörünge gösterilebilir. Ayrıca bu çalışmada mühimmat ayrılmasında yönlendirilebilir mühimmatın izleyeceği yörüngede kabul edilebilirlik nitel olarak değerlendirilmiştir. Bu kriterler aşağıdaki gibidir.

- Mühimmatın toplam aerodinamik hücum açısı, mühimmat otopilotunda tanımlanmış olan doğru çalışabildiği aralığın dışına çıkmamalıdır.
- Mühimmatın açısal ve doğrusal hız büyüklükleri mühimmat üzerine yerleştirilen ölçüm cihazlarının tanımlanmış ölçüm aralığını geçmemelidir.
- Kontrol girdileri belirlenmiş kontrol aktüatör kabiliyetlerini geçmemelidir.
- Aerodinamik kuvvetlerin toplamı mühimmat ve kanatçıkların yapısal bütünselliğinin emniyet marjinini geçmemelidir.

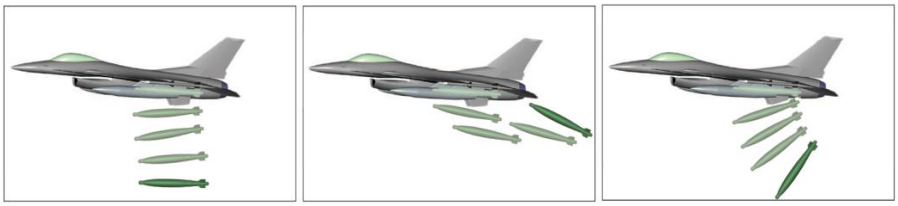
Tam olarak güvenli ve kabuledilebilir bir mühimmat ayrılması için K. Jamison ve arkadaşlarının 2017 yılında oluşturdukları puanlandırma sisteminin yanısıra bu kriterlerinde sağlanması gerektiği sonucuna varılmıştır.

Tablo 1.1. *Mühimmat ayrılmasının puanlandırılması (Jamison, Rossouw ve Miles, 2017)*

Code	Definition
0	Store strikes some part of the aircraft
1	Store misses the aircraft marginally
2	Store moves towards the aircraft
3	Store "hovers" near the aircraft
4	Store separates cleanly from the aircraft

Tablo 1.2. *Mühimmat ayrılmasının puanlandırılmasında kullanılan kriterler (Jamison, Rossouw ve Miles, 2017)*

Code	Absolute Separation Distance	Separation Velocity	Separation Velocity Relative to Ejection Velocity
0	< 0		
1	< 0.02 m after 0.07 s < store radius after 0.25 s	< 0 before 0.06 s	
2		< 0	
3			< 0.3 V_{eject} after 0.07 s
4			



Şekil 1.20. *Mühimmat yörünge örnekleri (Carter, 2012)*

1.2. Tezin Amacı ve Önemi

Bu tez çalışmasında süreklilik, mometum, enerji ve altı serbestlik dereceli hareket denklemlerini sayısal olarak bir arada çözerek kavite akışı durumundaki mühimmat ayrılmasındaki ana dinamiklerinin ortaya konması amaçlanmıştır. Bu amacı gerçekleştirebilmek için öncelikle altı serbestlik dereceli hareket denklemlerinin doğrulanması hedeflenmiştir. Daha sonra kavite akışta kullanılan pasif kontrol yöntemlerin içeriden mühimmat ayrılmasında ne gibi etkilere sahip olduğu incelenmek istenmiştir. Ayrıca içeriden mühimmat ayrılmasında mühimmatın bırakılma zamanının mühimmatın izlediği yörüngeye olan etkisinin de ortaya çıkarılması amaçlanmıştır.

Literatür özetinde değinildiği üzere açık literatürde içeriden mühimmat ayrılmasına dair çok fazla çalışma bulunmamaktadır. Bu nedenle içeriden mühimmat ayrılmasında kavite akışın zamana bağlı kararsız kayma tabakasının mühimmatın izlediği yörüngeye etkisini incelemek büyük öneme sahiptir. Hareketli ağ yöntemi kullanılarak gerçek zamanlı olarak mühimmatın kayma tabakasına girmeden içindeyken ve çıktıktan sonra kayma tabakasının mühimmat ile olan etkileşimini incelemek oldukça önemlidir. Bu çalışma gerek süreklilik, momentum ve enerji denklemleri ile altı serbestlik dereceli hareket denklemlerinin hareketli ağ kullanarak bütünleşik şekilde zamana bağlı çözümünün oldukça zor olmasından gerekse çözüm sürelerinin çok uzun ve pahalı

olmasından ötürü hareketsiz HAD çalışmalarına göre daha fazla emek ve zaman gerektirmektedir.

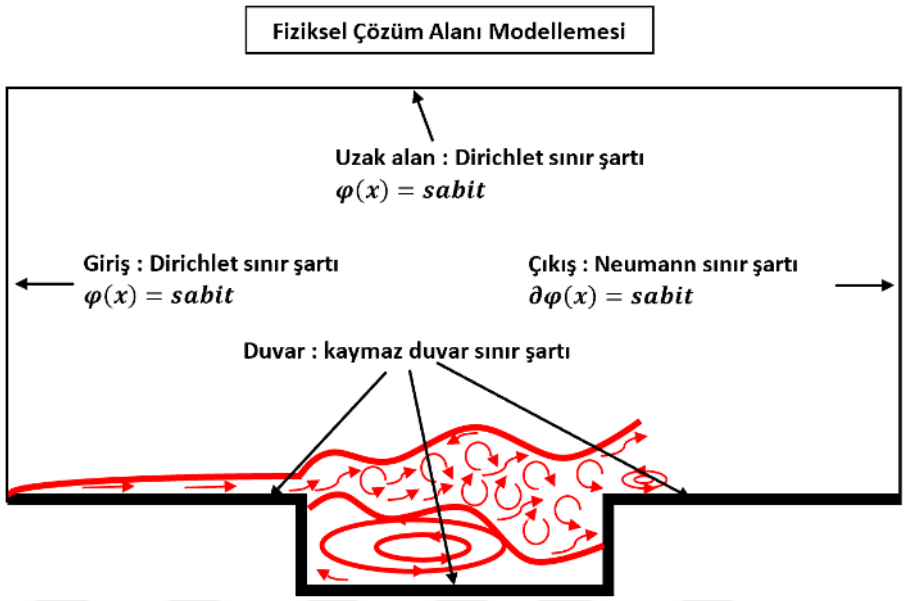
Bu çalışmada literatürde kavite akışın kontrolünde kullanılan üç farklı pasif akış kontrol yönteminin kullanılarak mühimmatın izlediği yörüngedeki değişikliği, mühimmat üzerinde oluşan kuvvet ve moment değerlerinin nasıl değiştiği ve mühimmat üzerinde oluşan ses basınç düzeyinin nasıl değiştiği incelenmiştir. Açık literatürde yer almayan zamana bağlı DES türbülans modeli kulanılarak hareketli bir şekilde pasif akış kontrol yöntemlerinin mühimmat üzerindeki etkilerinin incelenerek literatüre kazandırılması bu çalışmanın asıl önemini ortaya koymaktadır.

2. HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ

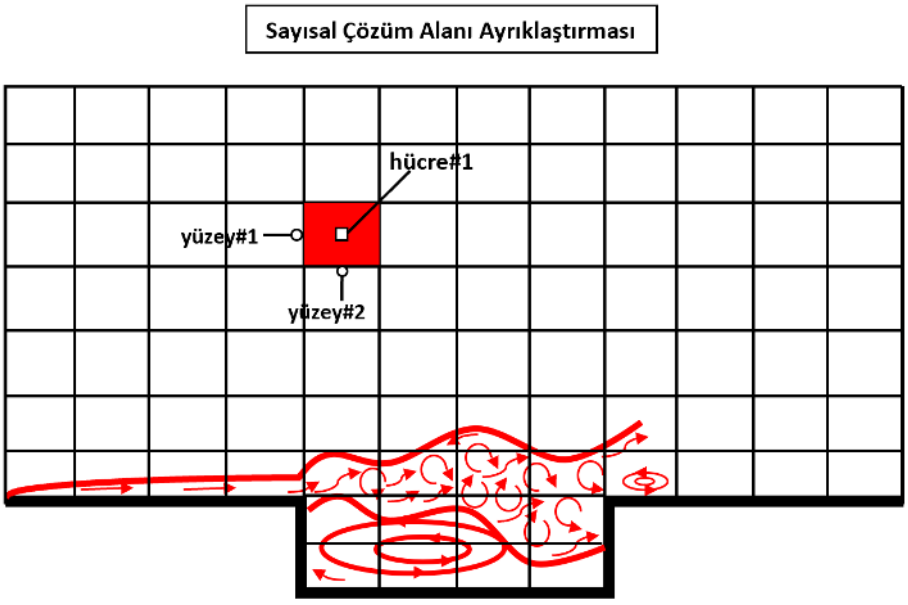
"The purpose of computing is insight, not numbers" C. Hastings tarafından sayısal hesaplama hakkında kurulan bu cümle hasaplamalı sayısal yöntemlerin amacını açık bir şekilde ortaya koymaktadır (Versteeg ve Malalasekera, 2007). Heseplamalı Akışkanlar Dinamiğinin (HAD) amacıda çeşitli sayısal yöntemleri kullanarak akış fiziğini anlamaya çalışmaktır. HAD temelde; analitik çözümü henüz bulunamamış, doğrusal olmayan, ikinci dereceden, kısmi diferansiyel denklemleri bilgisayarın çözüm gücünü kullarak sayısal yöntemler yardımıyla iteratif işlemler ile doğru sonuca yakınsama ilkesine dayanır. HAD çalışmalarının 70'lerden önce fazla görülmemesinin ve yakın geçmişte ivmelenerek mühendislik uygulamalarında ve bilimsel çalışmalarda daha fazla yer bulmasındaki neden bilgisayar teknolojisinin her geçen gün ilerliyor olmasındandır. Günümüzde kullandığımız modern hesaplama aracı olan bilgisayar teknolojisinin omurgasını oluşturan ikili (binary) sistemin temelleri Sümerliler zamanında atılmış olsa da II. dünya savaşı sırasında ve sonrasında bu alanda yapılan muazzam çalışmalar şu anda kullanılan süperbilgisayarların ortaya çıkmasını sağlamıştır. Bu çalışmalara öncülüğü büyük matematik dehası Alan Turing yapmıştır. 60'lardan sonra Moore Yasasına göre transistör teknolojisi ve dolayısı ile hesaplama gücündeki hızlı artış HAD çalışmalarının günümüzde devasa boyutlara gelmesindeki ikinci ana faktör olmuştur. Hem yazılım hem de donanım alanında yaşanan bu devrimler analitik çözümü olamayan ve deneysel çalışmaları hem pahalı hem de zaman alan mühendislik problemleri için sayısal yöntemlerin ortaya çıkmasına olanak tanımıştır. Günümüz teknolojisiden faydalanarak süper bilgisayarlar ile çok karmaşık geometri ve akış yapıları için sayısal çözümler yapılabilmektedir. Kuantum hesaplaması ve kuantum bilgisayarları konusunda son yıllarda yapılan çalışmalar sayısal hesaplama çalışmaları için günümüz hesaplama güçünün milyonlarca katını sağlayacağı yönünde umut vadetmektedir. Yakın gelecekte bu hesaplama gücüne sahip olunması durumunda HAD çalışmaları hem daha fazla önem kazanacak hem de daha fazla hız kazanacaktır.

HAD çalışması temel anlamda üç ana işlem adımından oluşmaktadır. Bunlardan ilki çözüm öncesi işlemdir (pre-processing). Bu işlem adımında fiziksel akış alanın olduğu bölge **Şekil *2.1***'de gösterildiği gibi belirlenerek bu alan çözüm yapılmak için küçük hücrelere bölünmek suretiyle **Şekil *2.2***'deki gibi çözüm alanı ağı oluşturulur. Çözüm alanını oluşturan bu küçük hücreler yapılı dörtgensel ve çokgen yapılarından oluşabileceği gibi yapısal olmayan üçgensel yapılardan da oluşabilir. Ağ oluşturma

işleminden sonra sınır bölgelerinin isimlendirmesi ve sınır şartalrının belirlenmesi gerçekleştrilir. Bu ağ oluşturma işleminin gerçekleştirilebileceği birçok lisanslı yazılım bulunmakla birlikte birkaç tane açık kaynak kodlu yazılım da mevcuttur. Bu çalışmada ANSYS lisanslı yazılımı içeriside bulunan ağ oluşturma modülü kullanılmıştır.



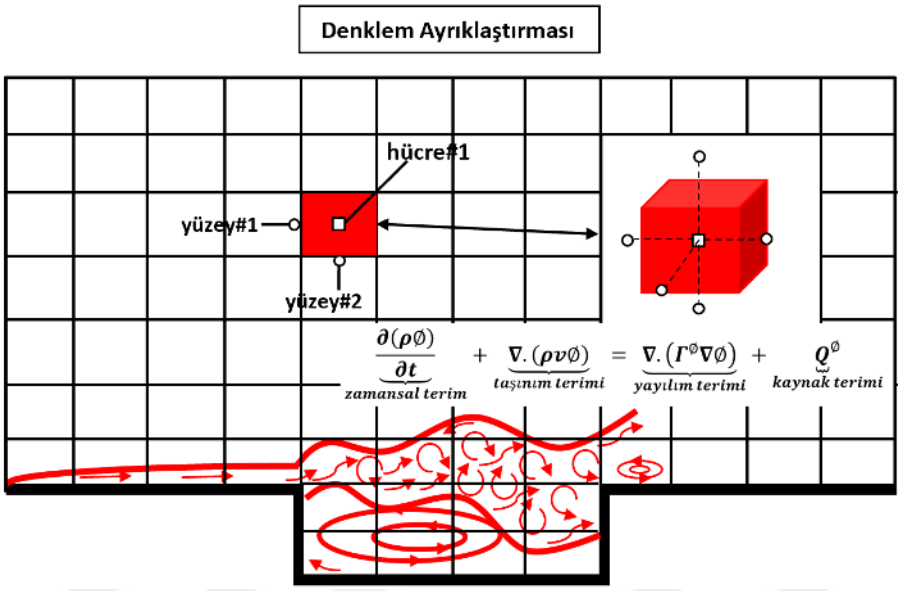
Şekil 2.1. *HAD uygulamalarında çözüm alanının modellenmesi*



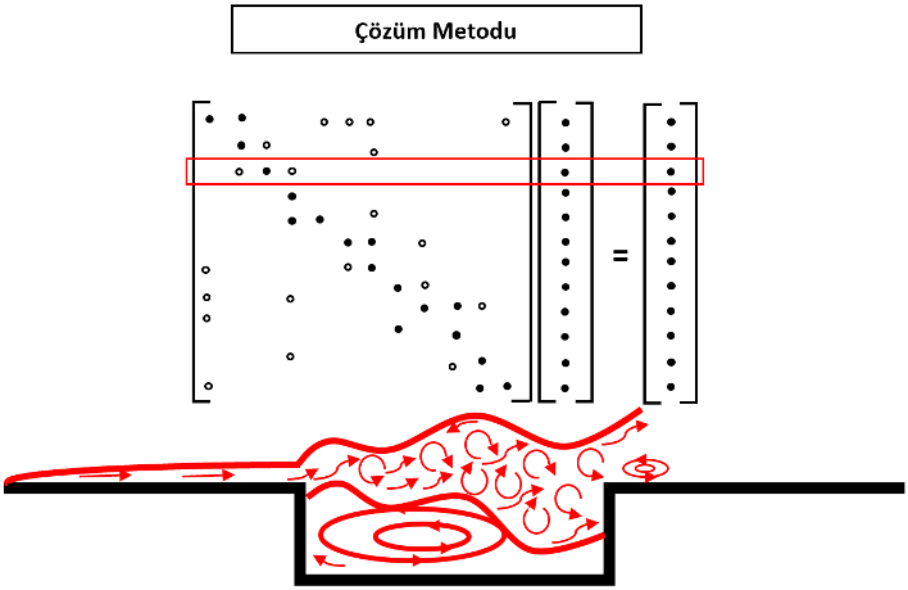
Şekil 2.2. *HAD uygulamalarında çözüm alanının ayrıklaştırılması (ağ oluşturma)*

HAD çalışmalarında çözüm alanı küçük hücrelere ayrılarak ağ oluşturulduktan sonra sayısal yöntemler yardımıyla bu çözüm alanı için akış fiziğine uygun kısmi diferansiyel denklemler her bir hücre için ayrıklaştırılarak cebirsel olarak iteratif

yöntemle çözülür (**Şekil *2.3*** ve **Şekil *2.4***). Bu işlem adımı çözüm (solving) adımı olarak adlandırılmaktadır ve HAD çalışmalarının ikinci adımını oluşturmaktadır. Bu işlem adımını gerçekleştiren bir çok lisanslı yazılım olmakla birlikte OpenFOAM gibi açık kaynak kodlu sonlu hacimler yöntemi kullanan HAD yazılımları son yıllarda popüler olmaya başlamıştır. Bu çalışmada çözüm adımı için sonlu hacimler yöntemi kullanan ve sonraki bölümlerde detayları anlatılan ANSYS Fluent yazılımı kullanılmıştır.



Şekil 2.3. *HAD uygulamalarında denklemlerin ayrıklaştırılması*



Şekil 2.4. *HAD uygulamalarında çözüm methodunun uygulanması*

HAD analizleri akış parametrelerinin görselleştrildiği, grafiklerinin çıkarıldığı ve çeşitli parametreler arası işlemlerin yapılabildiği çözüm sonrası (post-processing) olarak

denilen son işlem adımından oluşur. Bu çalışmada çözüm sonrası işlemler ParaView açık kaynak kodlu yazılım ile gerçekleştirilmiştir.

Uygulanan HAD'nin işleyişini kullanılan sayısal yöntem belirlemektedir. HAD için sonlu farklar, sonlu elemanlar ve sonlu hacimler yöntemleri kullanılmaktadır. Temelde bu üç yöntem doğrusal olmayan kısmi diferansiyel denklemleri doğrusal cebirsel denklem takımlarına dönüştürüyor olsada Sonlu Hacimler Yöntemi (SHY) ayrıklaştırma metodunda sağladığı esneklik ile diğer iki yönteme göre HAD kodlarında daha fazla tercih edilmektedir. Bu esneklik, fiziksel uzayda direk ayrıklaştırma yapabilmeyi sağladığı için fiziksel ve sayısal çözüm koordinatları arasında dönüşüm yapma zorunluluğunu ortadan kaldırmaktadır (Moukalled, Mangani ve Darwish, 2016).

2.1. Sonlu Hacimler Yöntemi

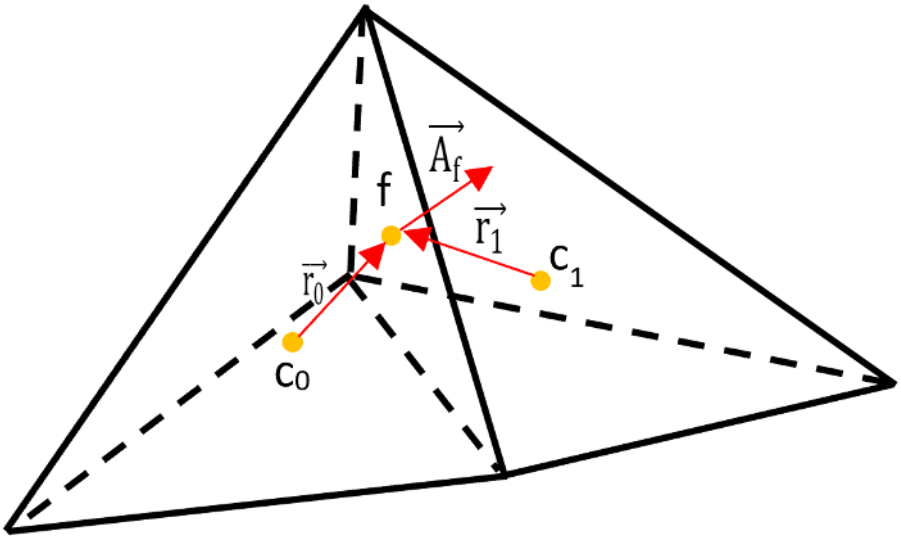
Sonlu hacimler yöntemi denklem 2.1'de verilen genel skaler yer değiştirme denkleminin integral formunu ayrıklaştırarak doğrusal cebirsel denklemlere dönüştürüp sayısal yöntemler ile bu cebirsel denklemelerden oluşan matris sistemini çözmekten oluşur. Bu denklemin ilk terimi zamansal değişimi, ikincisi taşınımı, üçüncüsü yayılımı ve sonuncusu kaynağı temsil etmketedir.

$$\int_V \frac{\partial \rho \emptyset}{\partial t} dV + \oint \rho \emptyset \vec{v} \cdot d\vec{A} = \oint \Gamma_\emptyset \nabla \emptyset \cdot d\vec{A} + \int_V S_\emptyset dV \tag{2.1}$$

Bu denklemde ρ = yoğunluk, $\vec{v}$ = hız vektörü ($u\hat{\imath} + v\hat{\jmath} + w\hat{k}$), $\vec{A}$ = yüzey alanı vektörü, $\Gamma_\emptyset$ = $\emptyset$ parametresi için yayılım katsayısı, $\nabla\emptyset$ = $\emptyset$ parametresinin gradyanı ($(\partial\emptyset/\partial x)\hat{\imath} + (\partial\emptyset/\partial y)\hat{\jmath} + (\partial\emptyset/\partial z)\hat{k}$), $S_\emptyset$ ise her bir birim hacim için $\emptyset$ parametresinin kaynağını temsil etmektedir. Bu denklem çözüm alanındaki **Şekil *2.5***'te bir örneği gösterilen tüm hücrelere uygulanmaktadır. Bu denklemin ayrıklaştırılmış hali aşağıdaki gibidir.

$$\frac{\partial \rho \emptyset}{\partial t} V + \sum_f^{N_{yüzey}} \rho_f \vec{v}_f \emptyset_f \cdot \overrightarrow{A_f} = \sum_f^{N_{yüzey}} \Gamma_\emptyset \nabla \emptyset_f \cdot \overrightarrow{A_f} + S_\emptyset V \tag{2.2}$$

Buradaki $N_{yüzey}$ = hücreyi çevreleyen yüzeylerin sayısını, $\emptyset_f$ = $\emptyset$ parametresinin f yüzeyi ile taşınım değerini, $\rho_f \vec{v}_f . \overrightarrow{A_f}$ = f yüzeyinden geçen kütle akısını, $\overrightarrow{A_f}$ = f yüzeyinin alanını, $\nabla\emptyset_f$ = f yüzeyinde $\emptyset$ parametresinin gradyanını, V = hücrenin hacmini temsil etmektedir. $\frac{\partial \rho \emptyset}{\partial t} V$ terimi ise zamansal terim ayrıklaştırması olarak adlandırılmakta ve uzaysal ayrıklaştırmadan farklı bir şekilde ayrıklaştırmaya tabi tutulmaktadır.



Şekil 2.5. *Genel skaler yer değiştirme denkleminin ayrıklaştırılması uygulanan hücrenin gösterimi*

Denklem 2.2'de ayrıklaştırılmış genel skaler yer değiştirme denklemi bilinmeyen $\emptyset$ parametresini hücre merkezlerinde içermektedir ve bu denklem doğrusal olmayan bir denklemdir. Bu denklem aşağıdaki gibi doğrusal hale getirilir.

$$a_p \emptyset = \sum_{nb} a_{nb} \emptyset_{nb} + b \tag{2.3}$$

Burada nb alt indisi komşu hücreyi ve a_p ve a_{nb} $\emptyset$ parametresi ve $\emptyset_{nb}$ parametreleri için doğrusallaştırma katsayılarını ifade etkmektedir.

2.1.1. Uzaysal ayrıklaştırma

Ayrıklaştırılmış denklemlerden elde edilen skaler parametere olan $\emptyset$ değerleri hücre merkezleri için mevcut iken denklem 2.2'de yer alan taşınım ve yayılım terimlerinin hesaplanabilmesi için hücre merkezlerindeki değerlerin yerine hücre yüzeylerindeki değerlere ihtiyaç vardır. Bu değerlerde interpolasyon yöntemi ile hücre merkezlerinden hücre yüzeylerine taşınmış olur. Bu interpolasyon işlemi için çeşitli şemalar oluşturulmuştur. ANSYS Fluent yazılımında taşınım terimininin interpolasyonunda birinci dereceden akışın geldiği yön doğrultulu şema (first order upwind scheme), ikinci dereceden akışın geldiği yön doğrultulu şema (second order upwind scheme), QUICK ve üçüncü dereceden MUSCL gibi yüksek mertebeden şemalar kullanılabilmektedir (ANSYS Inc., 2013). Yayılım teriminin interpolasyonunda ise merkezi farklar şeması (central-differenced scheme) kullanılmaktadır ve bu herzaman ikinci dereceden doğruluğa sahiptir. Bu çalışmada momentum dışında yoğunluk,

türbülans kinetik enerji, türbülans özgül yitim oranı gibi parametrelerin uzaysal ayrıklaştırmalarında interpolasyon şeması olarak üçnücü dereceden MUSCL kullanılmıştır. Momentum parametresi için DES çözümü için sınırlandırılmış merkezi farklar (bounded central differencing) şeması kullanılmıştır. Bu şemalar aşağıda açıklanmaya çalışılmıştır.

2.1.1.1. İkinci dereceden akışın geldiği yön doğrultulu şema

Yüksek mertebeden doğruluk elde edilmek istendiğinde hücre merkezli çözümün Taylor serisi açılımından yararlanarak hücre yüzeylerinde interpolsonu gerçekleştirilir. İkinci dereceden akışın geldiği yön doğrultulu şemada $\emptyset_f$ yüzey parametresi aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\emptyset_{f,SOU} = \emptyset + \nabla\emptyset \cdot \vec{r} \tag{2.4}$$

Burada $\emptyset$ hücre merkezindeki değeri, $\nabla\emptyset$ akışın geldiği yöndeki hücrenin gradyanı, $\vec{r}$ ise akışın geldiği yöndeki hücrenin merkezinden yüzeye olan uzaklık vektörünü göstermektedir. Buradaki $\nabla\emptyset$ tanımı ilerleyen bölümde ayrıca tanımlanmıştır.

2.1.1.2. Merkezi farklar şeması

Yüzey parametresi olan $\emptyset_f$ değeri merkezi farklar şeması ile aşağıdaki gibi interpole edilmektedir.

$$\emptyset_{f,CD} = \frac{1}{2}(\emptyset_0 + \emptyset_1) + \frac{1}{2}(\nabla\emptyset_0 \cdot \overrightarrow{r_0} + \nabla\emptyset_1 \cdot \overrightarrow{r_1}) \tag{2.5}$$

0 ve 1 alt indisleri f yüzeyinin etrafındaki iki hücre için kullanılmaktadır. $\nabla\emptyset_0$ ve $\nabla\emptyset_1$ 0 ve 1 hücrelerinin gradyanları olmakla birlikte $\vec{r}$ hücre merkezlerinden yüzeye yönelmiş vektördür.

Merkezi farklar şeması sınırsız ve fiziksel olmayan çalkantılara yol açarak sayısal olarak kararlılık problemlerine yol açmaktadır. Bu karasızlık problemleri ertelenmiş doğrulamalar kullanılarak aşılabilmektedir. Bu yaklaşım aşağıda gösterilmektedir.

$$\emptyset_f = \underbrace{\emptyset_{f,UP}}_{dahili\ bölüm} + \underbrace{\left(\emptyset_{f,CD} - \emptyset_{f,UP}\right)}_{harici\ bölüm} \tag{2.6}$$

Burada UP alt indisi akışın geldiği yön doğrultulu şemayı, CD ise merkezi farklar şemasını temsil etmektedir. Bu yöntem ile hem saf ikinci dereceden merkezi farklar doğruluğu sağlanırken sayısal çözümde de yakınsama sağlanarak sayısal ıraksamaların önüne geçmiş olur.

2.1.1.3. Sınırlandırılmış merkezi farklar şeması

LES model için sayısal olarak düşük yayılıma sahip olmasından ötürü merkezi farklar şeması en ideal seçimdir. Fakat bu yöntem genellikle çözüm alanında fiziksel olmayan salınımlara yol açmaktadır. Bu yüzden LES modelleri için normalleştirilmiş değişken diyagramı (NVD) ile taşınım sınırlılık kriterine (CBC) dayanan yeni bir yaklaşım ortaya konulmuştur. Sınırlandırılmış merkezi farklar şeması saf merkezi farklar ve merkezi farklar ile ikinci dereceden akışın geldiği yön doğrultulu şemaların harmanlanmasından oluşan kompozit NVD şeması ve birinci dereceden akışın geldiği yön doğrultulu CBC şemasından oluşmaktadır. Birinci dereceden akışın geldiği yön doğrultulu şema sadece CBC aşıldığı zaman kullanılmaktadır, onun dışındaki durumlarda ikinci dereceden şemalar kullanılmaktadır. Bu çalışmada DES türbülans modelinin kullanıldığı bölümlerde momentum taşınım ayrıklaştırmalarında bu şemalar kullanılmıştır.

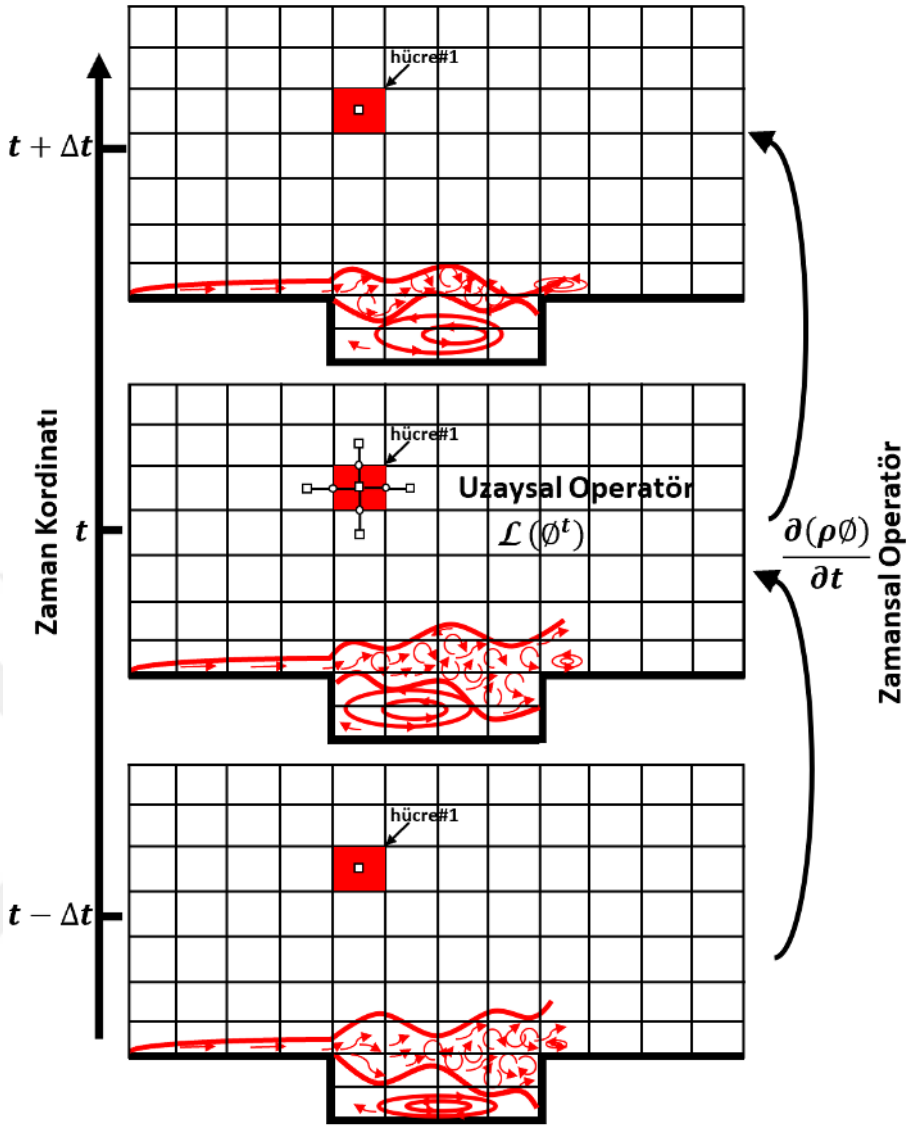
2.1.1.4. Üçüncü dereceden MUSCL şeması

Üçüncü dereceden taşınım şeması merkezi farklar ve ikinci dereceden akışın geldiği yön doğrultulu şemaların harmanlanması ile orijinal MUSCL'den (Monotone Upstream-Centered Schemes for Conservation Laws) aşağıdaki gibi türetilmiştir.

$$\emptyset_f = \theta \emptyset_{f,CD} + (1-\theta)\emptyset_{f,SOU} \tag{2.7}$$

2.1.2. Zamansal ayrıklaştırma

Daimi olmayan akışlarda denklem 2.2'deki birinci terim olan zamana bağlı terimde uzaysal ayrıklaştırma gibi ayrıklaştırılmalıdır. Daimi olmayan akışlarda da uzaysal çözüm daimi akışlardakinin aynısıdır ve ek olarak zamana bağlı terim ayrıklaştırılır (**Şekil *2.6***).



Şekil 2.6. *Zamansal ayrıklaştırma gösterimi*

Zamansal ayrıklaştırma diferansiyel denklemde bulunan bütün değişkenlerin belirli bir zaman adımı olan Δt için integrasyonunu içerir. Bu integrasyon genel olarak aşağıdaki gibidir.

$$\frac{\partial \emptyset}{\partial t} = F(\emptyset) \tag{2.8}$$

Birinci dereceden doğrulukta zamansal ayrıklaştırma;

$$\frac{\emptyset^{n+1} - \emptyset^n}{\Delta t} = F(\emptyset) \tag{2.9}$$

İkinci dereceden doğrulukta zamansal ayrıklaştırma ise aşağıdaki gibidir.

$$\frac{3\emptyset^{n+1} - 4\emptyset^{n} + \emptyset^{n-1}}{2\Delta t} = F(\emptyset) \tag{2.10}$$

Bu denklemlerde ∅ skaler değişkeni, n+1 bir sonraki zaman adımını, n şimdiki zamanı, n-1 ise bir önceki zaman adımını temsil etmektedir. Bu çalışmada ikinci dereceden örtülü zamansal ayrıklaştırma kullanılmıştır.

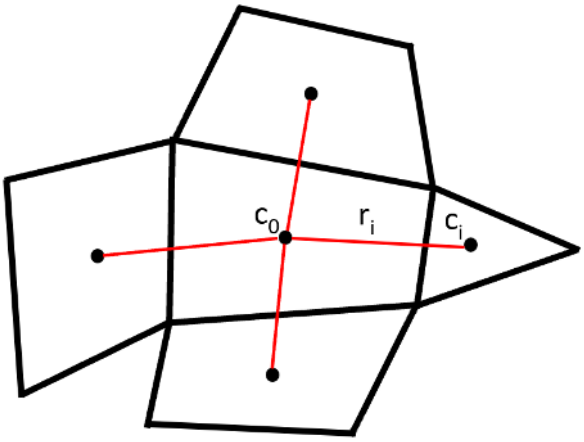
2.1.3. Gradyan ve türevlerin hesaplanması

Gradyanlara hücre yüzeylerindeki değişken değerlerinin interpolasyonunun dışında hız türevlerinin ve ikincil yayılım teriminin hesaplanmasında ihtiyaç duyulmaktadır. ∅ değikeninin gradyanı ($\nabla\emptyset$) korunum denklemlerindeki taşınım ve yayılım terimlerinin ayrıklaştırılmasında kullanılmaktadır. Bu çalışmada gradyan hesaplamasında kullanılan yöntemlerden biri olan hücre temelli en küçük kareler yöntemi kullanılmıştır.

2.1.3.1. Hücre temelli en küçük karaler yöntemi

Bu metotta çözümün doğrusal bir şekilde değiştiği kabul edilmektedir. **Şekil *2.7***'de gösterilen c_0 ve c_i hücreleri arasında r_i vektörü boyunca hücresel değerlerin değişimi aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$(\nabla\emptyset)_{c0} \cdot \Delta r_i = (\emptyset_{ci} - \emptyset_{c0}) \tag{2.11}$$



Şekil 2.7. *Hücre merkezlerinin gösterimi*

Bu denklemi c_0 hücresinin etrafındaki tüm hücreler için yazacak olursak aşağıdaki genel denklemi elde ederiz.

$$[J](\nabla\emptyset)_{c0} = \Delta\emptyset \tag{2.12}$$

Buradaki $[J]$ tamamen geometri fonksiyonu olan katsayılar matrisidir. Buradaki amaç en küçük kareler anlamında kare olmayan katsayılar matrisi sistemi için hücre gradyanını

$\left(\nabla\emptyset_0 = \emptyset_x\hat{\imath} + \emptyset_y\hat{\jmath} + \emptyset_z\hat{k}\right)$ belirlemektir. Yukarıdaki doğrusal denklem sistemi Gram-Schmidt işlem adımları kullanmak suretiyle katsayılar matrisi bileşenlerine ayrılarak çözülebilir. Bu bileşenlerine ayırma her bir hücre için ağırlık matrisini ortaya çıkarır. Hücre merkezli yöntemde c_0 hücresinin her bir yüzü için üç ağırlık bileşeni $\left(W_{i0}^x, W_{i0}^y, W_{i0}^z\right)$ üretilir. Bu sayede hücre merkezlerindeki gradyanler ağırlık faktörleri ile değişim vektörünün $\Delta\emptyset = (\emptyset_{c1} - \emptyset_{c0})$ çarpımından aşağıdaki gibi elde edilir.

$$(\emptyset_x)_{c0} = \sum_{i=1}^{n} W_{i0}^x \cdot (\emptyset_{ci} - \emptyset_{c0}) \tag{2.13}$$

$$\left(\emptyset_y\right)_{c0} = \sum_{i=1}^{n} W_{i0}^y \cdot (\emptyset_{ci} - \emptyset_{c0}) \tag{2.14}$$

$$(\emptyset_z)_{c0} = \sum_{i=1}^{n} W_{i0}^z \cdot (\emptyset_{ci} - \emptyset_{c0}) \tag{2.15}$$

2.1.4. Basınç temelli çözücü

SHY'de ayrıklaştırma işleminin uygulanarak sayısal çözümün gerçekleştirildiği iki temel algoritma vardır. Bunlar yoğunluk temelli ve basınç temelli çözücü algoritmalarıdır. Her ne kadar yoğunluk temelli çözücüler genel itibari ile sıkıştırılabilir akışlar için basınç temelli çözücülerde sıkıştırılamaz akışlar için tasarlanmış olsa da basınç temelli çözücüler de yoğunluk temelli çözücüler gibi sıkıştırılabilir akışlarda kullanılabilmektedir. Basınç temelli çözücüde hız-basınç birleşiminde son zamanlarda geliştirilen birleşik algoritmalar sıkıştırılabilir akışlar için ayrık algoritmalara nazaran yoğunluk temelli çözücüler kadar kullanılabilmektedir. Yoğunluk temelli çözücülerin ağ hassasiyetinden ve yakınsama güçlüklerinden ötürü bu çalışmada da basınç temelli çözücü algoritması kullanılmıştır.

Basınç temelli çözücüler temel olarak öncelikle momentum denklemini çözerler buradan elde ettikleri hız değerlerini süreklilik denkleminde kullanarak hız değerini elde ederler ve elde ettikleri bu hız değeri ile momentum denkleminde basınç değerini doğrularlar. Basınç temelli çözücülerin temelde nasıl çalıştığını göstermek için basit olması açısından daimi akış için süreklilik ve momentum denklemleri aşağıdaki gibidir. Buradaki I birim matrisi, $\overline{\overline{\tau}}$ gerilim tensörü ve $\vec{F}$ kuvvet vektörüdür.

$$\oint \rho\vec{v} \cdot d\vec{A} = 0 \tag{2.16}$$

$$\oint \rho\vec{v}\,\vec{v} \cdot d\vec{A} = -\oint pI \cdot d\vec{A} + \oint \bar{\bar{\tau}} \cdot d\vec{A} + \int_V \vec{F} dV \tag{2.17}$$

2.1.4.1. Momentum denkleminin ayrıklaştırılması

Önceki bölümde genel skaler yer değiştirme denklemi üzerinde yapılan ayrıklaştırma momentum denkleminde kullanılmıştır. Bunun için örnek olarak x-momentumu denklemi için ∅ değişkeni u hız bileşeni olarak aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$a_p u = \sum_{nb} a_{nb} u_{nb} + \sum p_f A \cdot \hat{\imath} + S \tag{2.18}$$

Bu denklemdeki basınç alanı ve yüzey kütle akısı biliniyor olsaydı hız alanı elde edilebilirdi. Bu değerler başlangıçta bilinmediğinden çözümün bir parçası olarak bu değerlerde elde edilmelidir. ANSYS Fluent yazılımı basınç ve hız değerlerini her bir hücre için hücre merkezi değerleri olarak depolamaktadır (ANSYS Inc., 2013). Fakat yukarıdaki denklemde **Şekil *2.5***'de gösterilen c_0 ve c_1 hücreleri arasında bulunan yüzey değerine ihtiyaç vardır. Bunun yüzden hücre merkezli basınç değerlerinin yüzeye interpolasyonu için bir metoda ihtiyaç vardır. Yüzeydeki basınç değerlerini elde etmek için merkezi farklar şeması kullanılarak aşağıdaki gibi ikinci dereceden basınç şeması elde edilir. Bu çalışmada da yüzeydeki basınç değerlerini elde etmek için ikinci dereceden basınç şeması kullanılmıştır.

$$p_f = \frac{1}{2}(p_{c0} + p_{c1}) + \frac{1}{2}(\nabla p_{c0} \cdot \overrightarrow{r_{c0}} + \nabla p_{c1} \cdot \overrightarrow{r_{c1}}) \tag{2.19}$$

2.1.4.2. Süreklilik denkleminin ayrıklaştırılması

Denklem 2.16'da verilen süreklilik denkleminin integral formunun kontrol hacmi çevresinde integre edilmesi ile aşağıdaki gibi ayrıklaştırılabilir.

$$\sum_{f}^{N_{yüzeyler}} J_f A_f = 0 \tag{2.20}$$

Buradaki J_f f yüzeyinden geçen kütle akısıdır (ρv_n). Yüzeydeki hız değeri olan v_n değerinin hücre merkezindeki değerinin doğrusal interpolasyonu momentum

denkleminde basınç değerlerinin fiziksel olmayan sıçramalarına neden olmaktadır. Bu sıçramaların önüne gçmek için ANSYS Fluent Rhie ve Chow tarafından geliştirilen bir mrthod uygulamaktadır (ANSYS Inc., 2013). Yüzeydeki hız değerlerinin interpolasyonunda doğrusal ortalama yerine denklem 2.18'deki a_p katsayısına bağlı ağırlık faktörü kullanan momentum ağırlıklı ortalama kullanılmaktadır. Bu metod kullanılarak yüzeydeki akı değeri aşağıdaki gibi elde edilir.

$$J_f = \rho_f \frac{a_{p,c0} v_{n,c0} + a_{p,c1} v_{n,c1}}{a_{p,c0} + a_{p,c1}} \tag{2.21}$$

$$+ d_f \left((p_{c0} + (\nabla p)_{c0} \cdot \overrightarrow{r_0}) - (p_{c1} + (\nabla p)_{c1} \cdot \overrightarrow{r_1}) \right)$$

$$J_f = \widehat{J_f} + d_f (p_{c0} - p_{c1}) \tag{2.22}$$

Buradaki p_{c0}, p_{c1}, $v_{n,c0}$ ve $v_{n,c1}$f yüzeyinin iki tarafındaki hücre merkezlerindeki basınç ve hız değerleri ve d_f ise momentum denklemindeki a_p katasayısının ortalamasının bir fonksiyonudur.

2.1.4.3. Hız-basınç birleşmesi

Hız-basınç birleşmesi denklem 2.21 gibi süreklilik denkleminden yeni bir basınç değeri elde edilirken gerçekleşmiş olur. Burada oluşan bu hız-basınç birleşmesi denkleminin çözülmesi için ANSYS Fluent hem ayrıklaştırılmış hem de birleşik (Coupled) algoritmalar oluşturmuştur (ANSYS Inc., 2013). Ayrıklaştırılmış algoritmalar Yarı-Örtülü Basınç Bağlantılı Denklemler Yöntemi (Semi Implicit Method of Pressure Linked Equations (SIMPLE)) , Sürekli-Yarı-Örtülü Basınç Bağlantılı Denklemler Yöntemi (Semi Implicit Method of Pressure Linked Equations-Consistent (SIMPLEC)) ve Örtülü Basınç Ayırma Operatörü (Pressure Implicit Split Operator (PISO)) algoritmalarıdır. Bu ayrıklaştırılmış algoritmalar başlangıç tahminli düzeltici kullanıyor iken birleşik algoritma birlikte çözdüğü için böyle bir değer kullanmamaktadır. Ayrık algoritmalar momentum ve basınç doğrulama denklemelerini ayrı ayrı çözdüklerinden yarı-örtülü çözüm metoduna sahiptirler, bu yüzden yakınsamaları daha yavaştır. Ayrıca ağ kalitesinin düşük olduğu ve daimi olmayan akışlarda zaman adımının büyük olduğu durumlarda birleşik algoritmanın ayrık algoritmalara üstünlüğü bulunmaktadır. Bu çalışmada da hız-basınç birleşmesinde birleşik (Coupled) algoritma kullanılmıştır ve bu algoritmanın temel çalışma prensibi aşağıda anlatılmıştır.

Denklem 2.18'deki basınç gradyanı k bileşeni için aşağıdaki gibi yazılır.

$$\sum_f p_f A_k = \sum_j a^{u_k p} p_j \tag{2.23}$$

Buradaki $a^{u_k p}$ Gauss diverjans teoreminden çıkarılan katsayıyı ve p_j denklem 2.19'daki basınç interpolasyon katsayılarıdır. Son olarak i'inci hücre için momentum denkleminin u_k bileşenin ayrıklaştırılmış hali aşağıdaki gibidir.

$$\sum_j a_{ij}^{u_k u_k} u_{kj} + \sum_j a_{ij}^{u_k p} p_j = b_i^{u_k} \tag{2.24}$$

Denklem 2.20 ile verilen süreklilik denklemindeki akı dengsi denklem 2.21'de verilen akı değeri ile değiştirildiğinde sonuç olarak aşağıdaki ayrıklaştırılmış denklem elde edilir.

$$\sum_k \sum_j a_{ij}^{p u_k} u_{kj} + \sum_j a_{ij}^{pp} p_j = b_i^p \tag{2.25}$$

Sonuç olarak toplam sistem denklemleri olan denklem 2.24 ve denklem 2.25 aşağıdaki forma dönüştürülmüştür.

$$\sum_j [A]_{ij} \vec{X}_j = \vec{B}_i \tag{2.26}$$

Burada $[A]_{ij}$ matrisi i hücresinin j hücresine olan etkisidir ve aşağıdaki gibidir.

$$[A]_{ij} = \begin{bmatrix} a_{ij}^{pp} & a_{ij}^{pu} & a_{ij}^{pv} & a_{ij}^{pw} \\ a_{ij}^{up} & a_{ij}^{uu} & a_{ij}^{uv} & a_{ij}^{uw} \\ a_{ij}^{vp} & a_{ij}^{vu} & a_{ij}^{vv} & a_{ij}^{vw} \\ a_{ij}^{wp} & a_{ij}^{wu} & a_{ij}^{wv} & a_{ij}^{ww} \end{bmatrix} \tag{2.27}$$

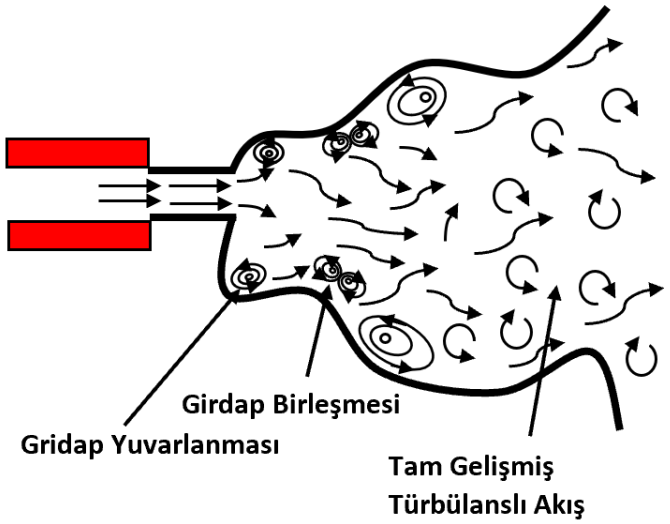
Bilinmeyen ve kalan vektörleri aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

$$\vec{X}_j = \begin{bmatrix} p_i' \\ u_i' \\ v_i' \\ w_i' \end{bmatrix} \tag{2.28}$$

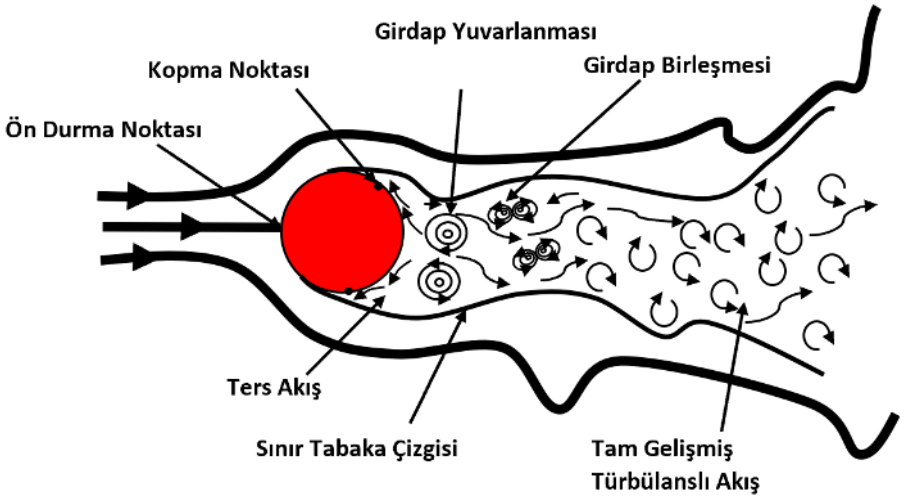
$$\vec{B}_i = \begin{bmatrix} -r_i^p \\ -r_i^u \\ -r_i^v \\ -r_i^w \end{bmatrix} \tag{2.29}$$

2.2. Türbülans Modellenmesi

19. yy'da Sir Horace Lamb'ın şu cümlelerinde bahsettiği gibi "I am an old man now, and when I die and go heaven, there are two matters on which I hope for enlightement. One quantum electrodynamics and the other is the turbulent motion of fluids. About the former, I am really rather optimistic'' (Yaşlı bir adamım şimdi ve ölüdüğümde cennete gidersem aydınlanacağımı ümit ettiğim iki konu var. Biri quantum elektrodinamiği, diğeri türbülanslı akışlar. Birincisi konusunda daha iyimserim) türbülans hala bilim dünyasının en az bilinen konularından biridir (L'vov ve Procaccia, 1998). Türbülansın literatürde tam olarak ne bir tanımı ne de genel bir teoremi olmamakla birlikte türbülans akışkan özelliğinden çok bir akış özelliği olarak tanımlanmaktadır. Atalet kuvvetlerin viskoz kuvvetlere oranını temsil eden Reynolds sayısının ($Re=\rho UL/\mu$) artması ile akış tabakalı akıştan türbülanslı akışa doğru geçiş yapar (Schiestel, 2008). Aşağıda türbülanslı akışa örnek olarak jet akış ve silindir etrafındaki akış gösterimi verilmiştir.



Şekil 2.8. *Jet akış gösterimi*

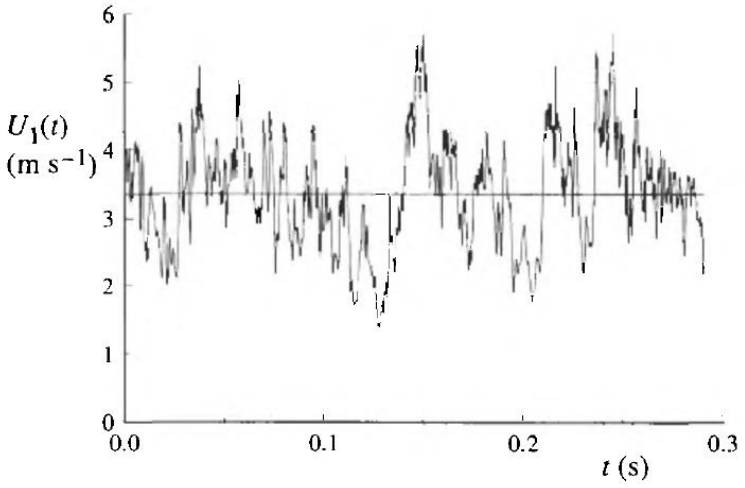


Şekil 2.9. *Silindir etrafındaki akış gösterimi*

Türbülansın genel geçer bir tanımı olmamakla birlikte temel özellikleri üzerinden türbülanslı akış karakterize edilmektedir. Bu özellikler aşağıdaki gibidir (Schiestel, 2008).

- Zaman ve uzayda düzensizlik

Şekil *2.10*'da gösterildiği gibi türbülanslı akışa ait hız sinyali rastgele davranış göstermektedir.



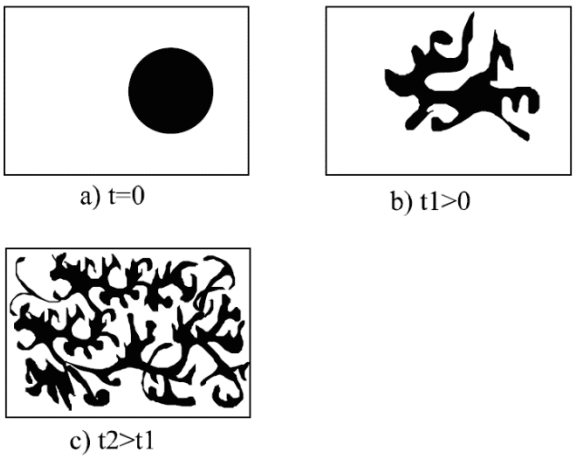
Şekil 2.10. *Türbülas sinyali (Pope, 2000)*

- Dönel akış

Sayısız dönen girdapları (eddy) barındırıyor olması türbülanslı akışı yüksek düzeyde dönel akış yapmaktadır.

- Yüksek yayınım

Türbülans alanı akışa ait sıcaklık, boya ve momentum gibi taşınabilir birçok özelliği çok hızlı birşekilde yayabilmektedir. Bu hızlı yayılımı sağlayan da türbülanslı akışın dalgalı (fluctuating) harekete sahip olmasıdır. Bu yayılıma örnek olarak aşağıdaki şekil verilmiştir.



Şekil 2.11. *Boya ile işaretlenmiş bir hacmin türbülas yayılımı etkisi altında gelişimi (Schiestel, 2008)*

- Üç boyutlu olması

Dalgalı türbülans hareketi herzaman üç boyutlu ve karasızdır.

- Yörüngelerinin karakteri tahmin edilememesi

Türbülans akışı çok yüksek düzeyde sınır şartlarına ve başlangıç koşullarına bağlıdır. Başlangıç koşulunda yapılacak küçük değişiklik akışın anlık değerlerinde çok farklı sonuçlara yol açmaktadır. Bu da türbülanslı akışta akışkan parçacığının izleyeceği yörünge karakterinin tahmin edilemez olduğunu göstermektedir. Fakat ortalama değerler ve spektral dağılım gibi türbülansa ait istatistiki özellikler tekrar edilebilirler.

- Çok farklı ölçekteki girdapların aynı anda varlığı

Hareket denklemindeki atalet teriminden ötürü doğrusal olmayan işlemler tarafından üretilen çok küçük ölçeklerdeki girdapların tüm kaskadı vardır.

- Yok olma

Türbülans kendi kendine varlığını sürüdremez, bir enerji kaynağına ihtiyaç duyar. Bu enerji kaynağı genellikle ana akışın kayma gerilmesi veya gerinimi olabileceği gibi Archimedsel kuvvetler gibi dışsal kuvvetler de olabilir. Türbülans eğer bu kaynaklardan mahrum kalırsa hızlı bir şekilde yok olur. Türbülansın viskoz yitim mekanizması ani hız alanın güçlü gradyanının varlığı ile ilişkilidir. Buna bağlı olarak gerinim oranı en küçük

girdap içinde yüksek seviyelere çıkar ve türbülans kinetik enerjisini ısıya dönüştürecek şekilde bozulmasına yol açar.

Yukarıda sıralanan türbülans özellikleri ile tanımlanan türbülanslı akış temel anlamda iki sayısal yöntem ile matematiksel olarak çözülebilmektedir. Bunlardan ilki Direct Numerical Simulation (DNS) olarak bilinen direk sayısal yöntemdir. Bu sayısal yöntem hem zamansal hem de uzaysal tüm ölçekte çözünürlüğü gerekli kılmaktadır. Uzaysal anlamda yok olan en küçük girdap yapısından en büyük girdap yapısına kadar tüm uzunluk ölçeği çözünürlüğüne sahip olması gerekmektedir. Bu da şu anki bilgisayar teknolojisi ile DNS'i sadece basit geometriler ve düşük Reynolds sayıları için uygulanbilir kılmaktadır. Yakın gelcekte kuantum bilgisayarlarının kullanılmaya başlaması ile DNS çözümlerinin çok daha yaygın hale gelmesi beklenmektedir. DNS yönteminin yüksek Reynolds sayıları ve karmaşık geometriler için kullanılamıyor olmasından ötürü türbülans fenomeni günümüzde ikinci sayısal yöntem olan istatistiksel yöntem ile modellenmektedir. Bu çalışmada da istatistiksel yöntemlerden biri olan Reynolds-averaged Navier-Stokes (RANS) ve Large Eddy Simulation (LES) birlikte kullanıldığı Detached Eddy Simulation (DES) türbülans modelleri kullanılmıştır. DES türbülans modeli zamana bağlı çözümlerden önce zamana bağlı olmayan daimi çözümlerde RANS türbülans modeli ile akış alanı çözülerek türbülanslı akışın gelişim göstermesi sağlanmıştır.

Bu çalışmada kullanılan türbülans modellerine ait ayrıntılar aşağıda sunulmuştur.

2.2.1. Standart k-ω model

ANSYS Fluent yazılımındaki standart k-ω türbülans modeli, Wilkox k-ω modeline dayanan düşük Reynolds sayısı etkileri, sıkıştırılabilirlik ve kayma akımı yayılımı düzeltmelerini içeren bir türbülans modelidir (ANSYS Inc., 2013). Kayma tabakası dışında k ve ω değerleri için çözümün hassasiyet gösteriyor olması bu modelin zayıflıklarından biridir.

Standart k-ω türbülans modeli türbülans kinetik enerji ve türbülans özgül yitim oranına bağlı 2 taşınım denkleminden oluşan ampirik bir modeldir. Bu iki taşınım denklemleri aşağıdaki gibidir.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j}\right) + G_k - Y_k + S_k \tag{2.30}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\omega) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho\omega u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j}\right) + G_\omega - Y_\omega + S_\omega \tag{2.31}$$

Burada G_k ortalama hız gradayanından ötürü türbülans kinetik enerji üretimini temsil etmektedir. G_ω ise türbülans yitim oranı olan ω'nın üretimini temsil etmektedir. Γ_k ve Γ_ω sırasıyla k ve ω'nın efektif yayılımını temsil etmektedir. Y_k ve Y_ω k ve ω'nın türbülans nedeniyle yok oluşunu temsil etmektedir. Bu değerlerin formülleri aşağıda verilmiştir. S_k ve S_ω dışarıdan girilen kaynak terimler olarak tanımlanmıştır.

$$\Gamma_k = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}, \qquad \Gamma_\omega = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \tag{2.32}$$

Burada σ_k ve σ_ω k ve ω için türbülans Prandtl sayılarıdır. Türbülans viskozitesi μ_t k ve ω ile aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$\mu_t = \alpha^* \frac{\rho k}{\omega} \tag{2.33}$$

Buradaki α^* düşük Reynolds sayısı düzeltme faktörüdür aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\alpha^* = \alpha_\infty^* \left(\frac{\alpha_0^* + Re_t/R_k}{1 + Re_t/R_k}\right) \tag{2.34}$$

$$Re_t = \frac{\rho k}{\mu \omega} \tag{2.35}$$

$$R_k = 6 \tag{2.36}$$

$$\alpha_0^* = \frac{\beta_i}{3} \tag{2.37}$$

$$\beta_i = 0.072 \tag{2.38}$$

Yüksek Reynolds sayılarında k-ω modelinin formu $\alpha^* = \alpha_\infty^* = 1$'e dönüşür.

$$G_k = -\rho\overline{u_i' u_j'} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \tag{2.39}$$

$$G_\omega = \alpha \frac{\omega}{k} G_k \tag{2.40}$$

$$\alpha = \frac{\alpha_\infty}{\alpha^*} \left(\frac{\alpha_0 + Re_t/R_\omega}{1 + Re_t/R_\omega}\right) \tag{2.41}$$

Buradaki $R_\omega = 2{,}95$, α^* ve Re_t denkem 2.34 ve 2.35 ile verilmiştir.

Standart k-ω modelinde k ve ω'nın yok oluşunu temsil eden Y_k ve Y_ω değerleri aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$Y_k = \rho\beta^* f_{\beta^*} k\omega \tag{2.42}$$

Bu denklemdeki f_{β^*} aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır.

$$f_{\beta^*} = \begin{cases} 1 & \chi_k \leq 0 \\ \dfrac{1 + 680{x_k}^2}{1 + 400{x_k}^2} & \chi_k > 0 \end{cases} \tag{2.43}$$

$$\chi_k \equiv \frac{1}{\omega^3}\frac{\partial k}{\partial x_j}\frac{\partial \omega}{\partial x_j} \tag{2.44}$$

$$\beta^* = \beta_i^*[1 + \zeta^* F(M_t)] \tag{2.45}$$

$$\beta_i^* = \beta_\infty^* \left(\frac{\frac{4}{15} + (\frac{Re_t}{R_\beta})^4}{1 + (\frac{Re_t}{R_\beta})^4} \right) \tag{2.46}$$

$$\zeta^* = 1{,}5 \tag{2.47}$$

$$R_\beta = 8 \tag{2.48}$$

$$\beta_\infty^* = 0{,}09 \tag{2.49}$$

Buradaki Re_t denklem 2.35 ile verilmiştir.

$$Y_\omega = \rho\beta f_\beta \omega^2 \tag{2.50}$$

Bu denklmedeki f_β ise aşağıdaki verilmektedir.

$$f_\beta = \frac{1 + 70\chi_\omega}{1 + 80\chi_\omega} \tag{2.51}$$

$$\chi_\omega = \left| \frac{\Omega_{ij}\Omega_{jk}S_{ki}}{(\beta_\infty^*\omega)^3} \right| \tag{2.52}$$

$$\Omega_{ij} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \tag{2.53}$$

Buradaki gerinim oranı tensörü aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

$$S_{ij} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \tag{2.54}$$

$$\beta = \beta_i \left[1 - \frac{\beta_i^*}{\beta_i}\zeta^* F(M_t) \right] \tag{2.55}$$

Buradaki β_i denklem 2.38'de, β_i^* denklem 2.46'da ve ζ^* denklem 2.47'de verilmiştir. Sıkıştırılabilirlik düzeltmesi olan $F(M_t)$ fonksiyonu aşağıda verilmiştir.

$$F(M_t) = \begin{cases} 0 & M_t \leq M_{t0} \\ M_t^2 - M_{t0}^2 & M_t > M_{t0} \end{cases} \tag{2.56}$$

$$M_t^2 \equiv \frac{2k}{a^2} \tag{2.57}$$

$$M_{t0} = 0{,}25 \tag{2.58}$$

$$a = \sqrt{\gamma RT} \tag{2.59}$$

Yüksek Reynolds sayılarındaki k-ω modelinin formuda $\beta_i^* = \beta_\infty^*$ olur. Sıkıştırılamaz formunda ise $\beta^* = \beta_i^*$ olur.

Bu modelin sabitleri aşağıdaki gibi bir araya toplanmıştır.

$\alpha_\infty^* = 1, \alpha_\infty = 0{,}52, \alpha_0 = \frac{1}{9}, \beta_\infty^* = 0{,}09, \beta_i = 0{,}072, R_\beta = 8, R_k = 6, R_\omega = 2{,}95,\ \zeta^* = 1{,}5, M_{t0} = 0{,}25, \sigma_k = 2{,}0, \sigma_\omega = 2{,}0$

2.2.2. Shear-Stress Transport (SST) k-ω model

Menter tarafından geliştirilen SST k-ω modeli standart k-ω ve k-ε modellerinin harmanlanmasıyla oluşturulmuş yeni bir iki denklemli türbülans modelidir (ANSYS Inc., 2013). SST k-ω modelinde standart k-ω ve dönüştürülmüş k-ε türbülans modelleri harmanlama fonksiyonu ile çarpılarak birleştirilmiştir. Bu harmanlama fonksiyonu duvar bölgesinde 1 değerini alarak standart k-ω modelini aktif hale getirirken duvardan uzak bölgelerde 0 değerini alarak dönüştürülmüş k-ε modelini aktif hale getirmektedir. SST k-ω modeli standart k-ω modelinin ω denkleminde olmayan sönümlü çapraz-yayılım terimi içermektedir. Türbülans kayma gerilmeleri taşınımını hesaba katmak için türbülans viskozite tanımıda değiştirilmiştir ve modele ait sabitler standart k-ω modele göre farklılık göstermektedir. SST k-ω model ile yapılan bu iyilşetirme değişiklikleri ters basınç grdayanlı akış, kanat etrafı akışı ve transonik şok dalgaları gibi geniş bir akış sınıfı için standart k-ω modelden daha doğru ve güvenilir sonuç vermektedir (ANSYS Inc., 2013). SST k-ω model için taşınım denklemleri standart k-ω modelde olduğu gibi türbülans kinetik enerji (k) ve türbülans özgül yitim oranı (ω) içeren iki denklemden oluşmaktadır. Bu denklemeler aşığadaki gibidir.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\rho k u_j\right) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j}\right) + G_k - Y_k + S_k \tag{2.60}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\rho \omega u_j\right) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j}\right) + G_\omega - Y_\omega + D_\omega + S_\omega \tag{2.61}$$

Burada G_k türbülans kinetik enerji üretimini temsil etmektedir ve standart modelde tanımlandığı gibi tanımlanmıştır (Denklem 2.39). G_ω benzer şekilde türbülans özgül yitim

oranının üretimini temsil etmektedir ve standart modelden farklı hesaplanmaktadır. Γ_k ve Γ_ω sırasıyla k ve ω'nın efektif yayılımını temsil etmektedir ve standart k-ω modelden farklı olarak aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır. Y_k ve Y_ω k ve ω'nın türbülans nedeniyle yok oluşunu temsil etmektedir ve denklem 2.42 ve 2.50 ile hesaplanmaktadır. Standart k-ω modelden farklı olarak SST k-ω modelinin ω taşınım denkleminde yer alan D_ω terimi çapraz yayılım terimidir ve aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır. Standart k-ω türbülans modelinde olduğu gibi S_k ve S_ω dışarıdan girilen kaynak terimler olarak tanımlanmıştır.

SST k-ω modelinde de standart k-ω modelinde olduğu gibi efektif yayılım aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$\Gamma_k = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \tag{2.62}$$

$$\Gamma_k = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \tag{2.63}$$

Benzer şekilde burada σ_k ve σ_ω k ve ω için türbülans Prandtl sayılarıdır. Türbülans viskozitesi μ_t k ve ω ile standart modelden farklı olarak aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$\mu_t = \frac{\rho k}{\omega} \frac{1}{max\left[\frac{1}{\alpha^*}, \frac{SF_2}{a_1 \omega}\right]} \tag{2.64}$$

Buarada S gerinim oranı büyüklüğüdür ve α^* katsayısı denlem 2.34 ile hesaplnamaktadır.

$$\sigma_k = \frac{1}{\frac{F_1}{\sigma_{k,1}} + \frac{1 - F_1}{\sigma_{k,2}}} \tag{2.65}$$

$$\sigma_\omega = \frac{1}{\frac{F_1}{\sigma_{\omega,1}} + \frac{1 - F_1}{\sigma_{\omega,2}}} \tag{2.66}$$

Denklem 2.64 deki F_2 ve buradaki F_1 harmanlama fonksiyonu katsayıları aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

$$F_1 = tanh(\emptyset_1^4) \tag{2.67}$$

$$\emptyset_1 = min\left[max\left(\frac{\sqrt{k}}{0{,}09\omega y}, \frac{500\mu}{\rho y^2 \omega}\right), \frac{4\rho k}{\sigma_{\omega,2} D_\omega^+ y^2}\right] \tag{2.68}$$

$$D_\omega^+ = max\left[2\rho \frac{1}{\sigma_{\omega,2}} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}, 10^{-10}\right] \tag{2.69}$$

$$F_2 = tanh(\emptyset_2^2) \tag{2.70}$$

$$\emptyset_2 = max\left[2\frac{\sqrt{k}}{0{,}09\omega y}, \frac{500\mu}{\rho y^2 \omega}\right] \tag{2.71}$$

Burada y duvara olan uzaklık iken D_ω^+ çapraz yayılım teriminin pozitif parçasıdır.

ω'nın üretimini temsil eden G_ω standart k-ω modelden farklı olarak aşağıdaki gibi verilmektedir.

$$G_\omega = \frac{\alpha}{\nu_t} G_k \tag{2.72}$$

Bunun dışında Standart k-ω model ile SST k-ω model arasında denklem 2.41 de α'nın hesaplanmasında kullanılan α_∞ katsayısında da farklılık görülmektedir. Standart k-ω modelinde α_∞ 0,52 sabit katsayısı olarak kullanılırken SST k-ω modelinde bu değer aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır.

$$\alpha_\infty = F_1 \alpha_{\infty,1} + (1 - F_1)\alpha_{\infty,2} \tag{2.73}$$

Burada $\alpha_{\infty,1}$ ve $\alpha_{\infty,2}$ aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır.

$$\alpha_{\infty,1} = \frac{\beta_{i,1}}{\beta_\infty^*} - \frac{\kappa^2}{\sigma_{\omega,1}\sqrt{\beta_\infty^*}} \tag{2.74}$$

$$\alpha_{\infty,2} = \frac{\beta_{i,2}}{\beta_\infty^*} - \frac{\kappa^2}{\sigma_{\omega,2}\sqrt{\beta_\infty^*}} \tag{2.75}$$

Burada κ 0,41 dir.

SST k-ω modelinde k'nın yok oluşunu temsil eden Y_k değeri standart k-ω modelinde olduğu gibi denklem 2.42 ile hesaplnamaktadır. Standart k-ω modelde f_{β^*} bir fonksiyon olarak tanımlanmış iken SST k-ω modelde ise bu terim 1 olarak sabit sayıya dönüştürülmüştür.

ω'nın yok oluşunu temsil eden Y_ω terimi de standart k-ω modeldeki gibi denklem 2.50'deki gibi hesaplanmaktadır. Standart k-ω modelde 0,072 sabit katsayı olarak tanımlanan β_i SST k-ω modelde ise aşağıda verildiği gibi harmanlama fonksiyonuna bağlı bir terim olarak değiştirilmiştir. Ayrıca standart k-ω modelde bir fonksiyon olarak tanımlanan f_β değeri ise SST k-ω modelde bu terim 1 olarak sabit katsayıya dönüştürülmüştür.

$$\beta_i = F_1 \beta_{i,1} + (1 - F_1)\beta_{i,2} \tag{2.76}$$

Buradaki F_1 harmanlama fonksiyonu denklem 2.67 ile tanımlanmıştır.

Denklem 2.61'de yer alan D_ω standart k-ε modeli k-ω modele dönüştüren çapraz yayılım terimi aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

$$D_\omega = 2(1-F_1)\rho\frac{1}{\omega\sigma_{\omega,2}}\frac{\partial k}{\partial x_j}\frac{\partial \omega}{\partial x_j} \tag{2.77}$$

SST k-ω modelde kullanılan sabit katsayılar aşağıdaki gibidir.

$\sigma_{k,1} = 1{,}176, \sigma_{\omega,1} = 2{,}0, \sigma_{k,2} = 1{,}0, \sigma_{\omega,2} = 1{,}168,$

$a_1 = 0{,}31, \beta_{i,1} = 0{,}075, \beta_{i,2} = 0{,}0828$

Tüm diğer katsayılar ($\alpha_\infty^*, \alpha_\infty, \alpha_0, \beta_\infty^*, R_\beta, R_k, R_\omega,\ \zeta^*\ ve\ M_{t0}$) standart k-ω modeldekinin aynısıdır.

2.2.3. SST k-ω ile Detached Eddy Simulation (DES) Model

DES temelde Reynolds-averaged Navier-Stokes (RANS) ve Large Eddy Simulation'un (LES) birleştirilmesiyle oluşturulmuş yeni bir çözüm tekniğidir. Bu çözüm tekniğinde duvara yakın sınır tabaka bölgelerinde zamana bağlı RANS kullanılıyorken ayrılmış bölgelerde LES kullanılmaktadır. Normalde kararsız büyük türbülans ölçeğinin baskın olduğu ana türbülans bölgesi LES ile ilişkilendirilir. Bu bölgelerde DES, LES benzeri ağ-altı modeller kullanmaktadır. Duvara yakın bölgede ise RANS kullanılmaktadır. DES özellikle yüksek Reynolds sayısına sahip duvar etkileşimli akışlar için tasarlanmıştır. Duvar bölgesindeki eddy yapılarını LES ile yakalamak için oluşturulacak ağ yapısıyla yapılan çözümün çok pahalı olmasından ötürü duvar bölgesinde RANS modelleri uygulanarak bundan kurtulmakla birlikte sınır tabaka dışında da LES uygulanarak bu modelin doğruluğundan faydalanılmaktadır. DES'de her ne kadar sınır tabaka içerisinde RANS model kullanılıyor olsa da sınır tabaka dışında LES'in kullanılıyor olmasından ötürü hesaplama süreleri fazla olmaktadır.

ANSYS Fluent yazılımında DES türbülans modeli bir-denklemli Spalart-Allmaras, iki-denklemli gerçeklenir k-ε, SST k-ω ve geçiş SST'den oluşan 4 RANS modeli ile oluşturulmuştur (ANSYS Inc., 2013). Bu çalışmada ters basınç gradyanlarının ve akış ayrılmalarının olduğu akışlarda diğer türbülans modellerine göre daha başarılı olan SST k-ω RANS türbülans modelini kullanan DES tercih edilmiştir. Bu DES türbülans modelinin klasik RANS türbülans modellerine göre daha doğru sonuçlar vermesine karşın çözüm süresi anlamında daha pahalıdırlar.

Denklem 2.42 ile verilen türbülans kinetik enerji yok oluşu (Y_k) SST k-ω ile DES türbülans modelinde aşağıdaki gibi değiştirilmiştir.

$$Y_k = \rho\beta^* k\omega F_{DES} \tag{2.78}$$

Buradaki F_{DES} aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

$$F_{DES} = max\left(\frac{L_t}{C_{des}\Delta_{max}}, 1\right) \tag{2.79}$$

Buradaki C_{des} 0,61 değerine sahip DES modelde kullanılan kalibre edilmiş sabiti, Δ_{max} ise maksimum yerel ağ aralığını ($\Delta x, \Delta y, \Delta z$) ifade etmektedir.Türbülans uzunluk ölçeği olan L_t bu RANS modelini tanımlayan parametredir ve aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$L_t = \frac{\sqrt{k}}{\beta^*\omega} \tag{2.80}$$

ANSYS Fluent ayrıca sınır tabaka içrisinde yüksek boy-en oranına sahip ağ yapıları için Delayed DES (DDES) opsiyonuda sunmaktadır. Bu opsiyon sınır tabaka boyunca RANS modelin uygulanmasını sağlamaktadır. Bu seçenek SST modelin bölgesel formülasyonu yardımı ile gerçekleşmektedir ve aşağıdaki değişiklik ile gösterilmektedir.

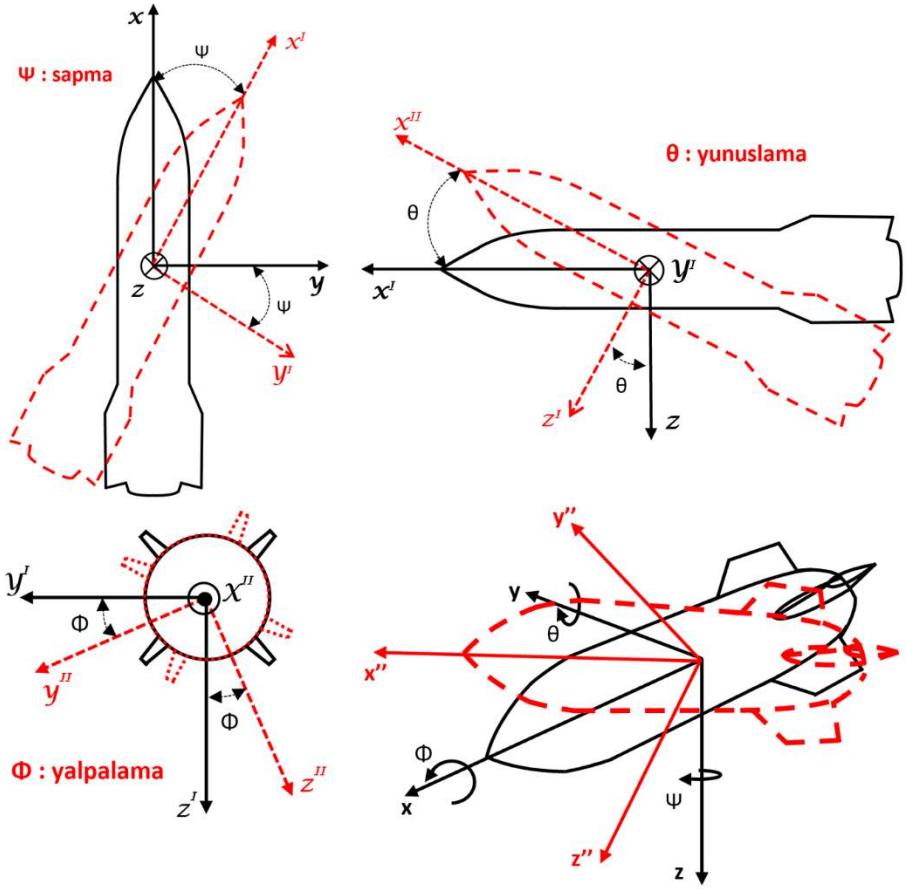
$$F_{DES} = max\left(\frac{L_t}{C_{des}\Delta_{max}}(1 - F_{SST}, 1\right) \tag{2.81}$$

F_{SST} 0, F_1 ve F_2 değerlerini alabilmektedir. Buradaki F_1 ve F_2 SST k-ω modeldeki harmanlama fonksiyonu katsayılarıdır.

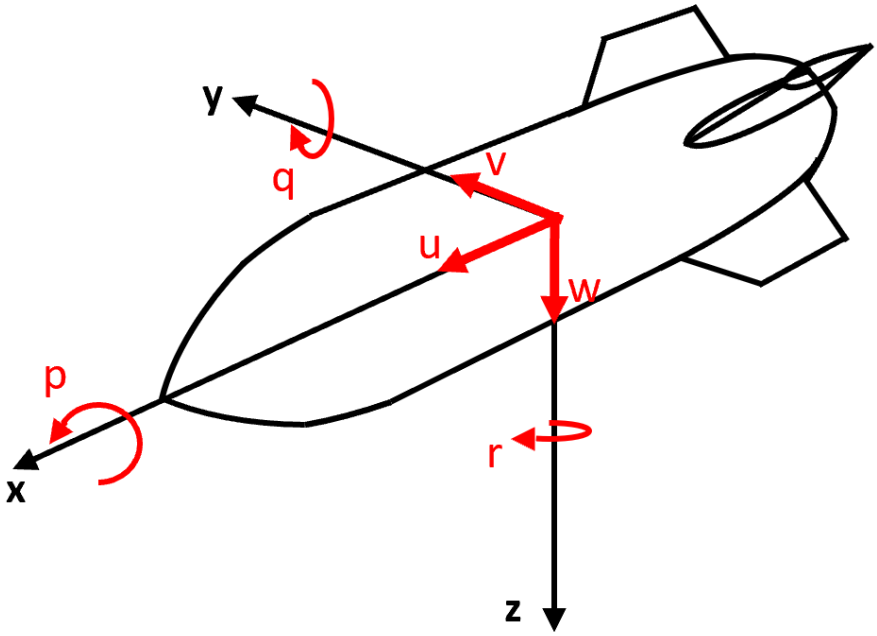
2.3. Altı Serbestlik Dereceli Hareket

Altı serbestlik dereceli hareket denklemleri katı bir cisme uygulanan kuvvet ve moment sonucunda cismin üç eksende yeni konum ve açılarını bulmak için kullanılan doğrusal olmayan hareket denklemleridir . Katı cisme etki eden kuvvet ve moment sonucunda katı cismin referans eksen takımına göre üç eksende yapmış olduğu açılara Euler açıları adı verilmektedir. Mühimmat ayrılması sayısal çözümünde akışkanlar dinamiğine ait süreklilik, momentum ve enerji denklemlerinden oluşan doğrusal olmayan kısmi diferansiyel denklemlerinin yanında mühimmat hareketini modelleyen doğrusal olmayan adi diferansiyel denklemlerde çözülmektedir. Bu hareket çözümü mühimmat üzerine etki eden kuvvet momentler sonucunda mühimmatın üç eksendeki çizgisel ve açısal hızlarını elde ederek bu hızlardan yeni konum ve Euler açılarına ulaşmayı içerir. **Şekil *2.12***'de mühimmat üzerinde oluşan Euler açıları gösterilmektedir. x-ekseni

etrafında dönme sonucu oluşan açıya yalpalama (roll) açısı, y-ekseni etrafında dönme sonucu oluşan açıya yunuslama (pitch) açısı ve z-ekseni etrafında dönme sonucu oluşan açıya sapma (yaw) açısı adı verilmiştir. Altı serbestlik dereceli harekette **Şekil *2.13***'te gösterildiği gibi üç eksendeki çizgisel hızlar sırası ile u,v ve w olarak, açısal hızlar ise p,q ve r olarak adlandırılmaktadır.



Şekil 2.12. *Euler açıları gösterimi*



Şekil 2.13. *Altı serbestlik dereceli harekete ait hızların gösterimi*

Doğrusal olmayan altı serbestlik dereceli hareket denklmeleri denklem 2.82-2.87 arasında verilmiştir (Hopkin, 1970). Burada m cismin kütlesi olmakla birlikte F_x, F_y ve F_z değerleri sırasıyla x,y ve z eksenlerinde cisme etki eden toplam kuvvetleri; M_x, M_y, M_z değerleride aynı şekilde x, y ve z eksenlerinde cisme etki eden toplam moment değerlerini göstermektedir. u, v ve w sırasıyla x, y ve z eksenlerindeki çizgisel hızları, p, q ve r ise aynı şekilde x, y ve z eksenlerindeki açısal hızları temsil etmektedir. Üzerinde nokta olan değerler ise bu hız değerlerinin zaman bağlı türevini ifade etmektedir. I_x, I_y, I_z, I_{xy}, I_{zx} ve I_{yz} ifadeleri ise cismin x, y ve z eksenlerindeki atalet momentlerini temsil etmektedir.

$$F_x = m(\dot{u} + qw - rv) \tag{2.82}$$

$$F_y = m(\dot{v} + ru - pw) \tag{2.83}$$

$$F_z = m(\dot{w} + pv - qu) \tag{2.84}$$

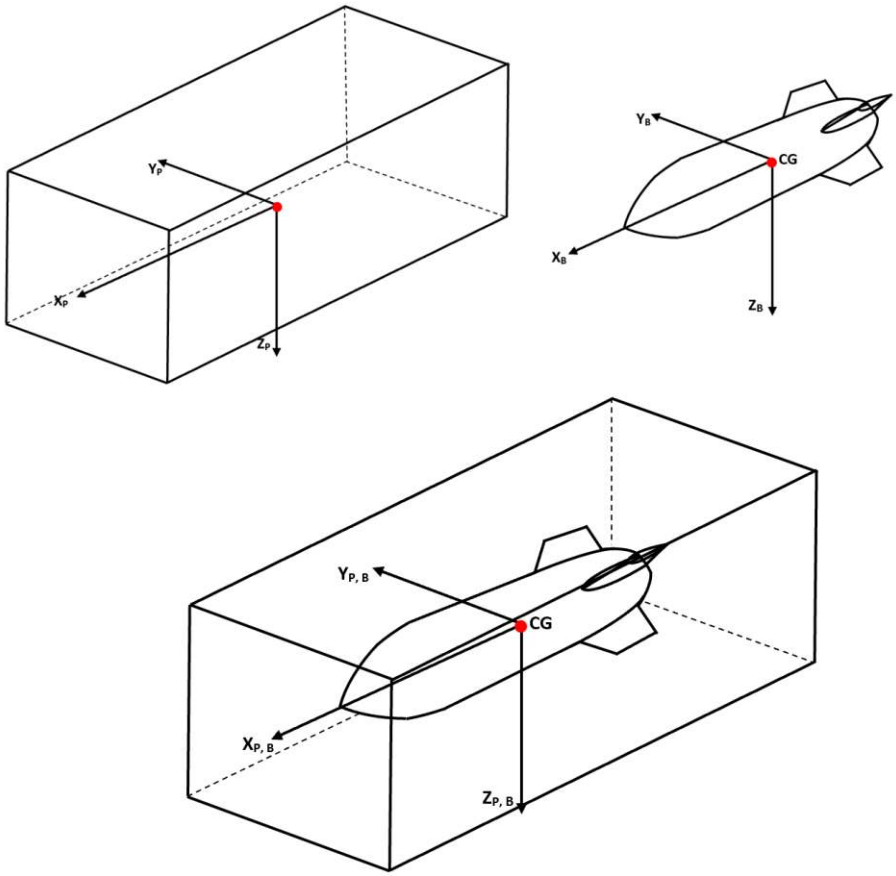
$$M_x = I_x\dot{p} - I_{yz}(q^2 - r^2) - I_{zx}(\dot{r} + pq) - I_{xy}(\dot{q} - rp) - (I_y - I_z)qr \tag{2.85}$$

$$M_y = I_y\dot{q} - I_{zx}(r^2 - p^2) - I_{xy}(\dot{p} + qr) - I_{yz}(\dot{r} - pq) - (I_z - I_x)rp \tag{2.86}$$

$$M_z = I_z\dot{r} - I_{xy}(p^2 - q^2) - I_{yz}(\dot{q} + rp) - I_{zx}(\dot{p} - qr) - (I_x - I_y)pq \tag{2.87}$$

Altı serbestlik dereceli hareket çözümünde hareket eden cisimin hareketi boyunca orjini cismin ağırlık merkezinde olan cisim koordinat sistemi ile tanımlanmış olan referans koordinat sistemi bulunur. Bu çalışmada da mühimmat ve referans koordinat

sistemleri **Şekil *2.14***'te gösterilmektedir. Mühimmat harekete başlamadan önce referans koordinat sistemi ile mühimmat koordinat sistemi çakışıktır.



Şekil 2.14. *Mühimmat ve referans koordinat sistemleri*

Şekil *2.15*'te mühimmatın altı serbestlik dereceli hareket denklemleri çözüldükten sonra yeni konumu, Euler açıları ve mühimmat koordinat sistemi temsili olarak gösterilmektedir. Bu çalışmada kullanılan yazılım olan ANSYS Fluent altı serbestlik dereceli mühimmat hareketinde üç eksende öteleme değerlerini aşağıdaki gibi referans koordinat sistemindeki denklem ile elde etmektedir. Burada $\dot{\overrightarrow{v_G}}$ mühimmatın ağırlık merkezinin referans koordinat sistemine göre ötelenmesinde etkili olan ivme vektörünü, m mühimmatın kütlesini ve $\overrightarrow{f_G}$ ise mühimmata referans koordinat sisteminde etki eden kuvvet vektörünü göstermektedir.

$$\dot{\overrightarrow{v_G}} = \frac{1}{m}\sum \overrightarrow{f_G} \tag{2.88}$$

Açısal hız vektörü olan $\dot{\overrightarrow{\omega_B}}$ ise aşağıdaki gibi mühimmat koordinat sistemine göre hesaplanmaktadır. Burada L atalet momenti tensörü, $\overrightarrow{M_B}$ mühimmat koordinat sisteminde

moment vektörü, $\overrightarrow{\omega_B}$ ise mühimmat koordinat sisteminde mühimmat açısal hız vektörüdür.

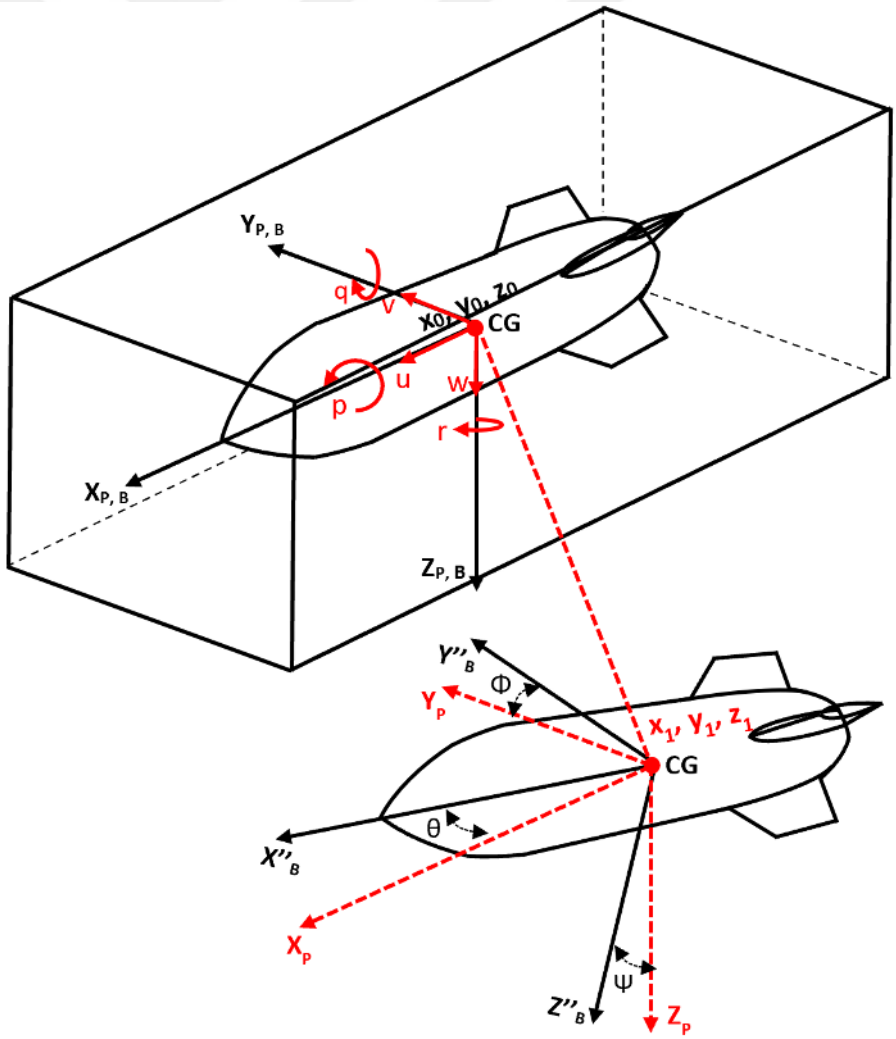
$$\dot{\overrightarrow{\omega_B}} = L^{-1}\left(\sum \overrightarrow{M_B} - \overrightarrow{\omega_B} x L \overrightarrow{\omega_B}\right) \tag{2.89}$$

Moment değerleri referans koordinat sisteminden mühimmat koordinat sistemine aşağıdaki dönüşüm yapılarak gerçekleştirilir. Burada R dönüşüm matrisi iken $\overrightarrow{M_G}$ ise referans koordinat sisteminde mühimmata etki eden moment vektörüdür.

$$\overrightarrow{M_B} = R\overrightarrow{M_G} \tag{2.90}$$

Buradaki R dönüşüm matrisi aşağıdaki gibidir.

$$R = \begin{vmatrix} cos_\theta cos_\varphi & cos_\theta sin_\varphi & -sin_\theta \\ sin_\emptyset sin_\theta cos_\varphi - cos_\emptyset sin_\varphi & sin_\emptyset sin_\theta sin_\varphi + cos_\emptyset cos_\varphi & sin_\emptyset cos_\theta \\ cos_\emptyset sin_\theta cos_\varphi + sin_\emptyset sin_\varphi & cos_\emptyset sin_\theta sin_\varphi - sin_\emptyset cos_\varphi & cos_\emptyset cos_\theta \end{vmatrix}$$



Şekil 2.15. *Altı serbestlik dereceli harekette eksen takımı hareketi*

Genel olarak hareketli ağlı HAD çözümünü özetlemek gerekirse, öncelikle mühimmat üzerine etki eden aerodnamik kuvvet ve momentler akışkanlar dinamiğine ait denklemler ile çözülerek elde edilir. Bu elde edilenlere ek olarak, mühimmat üzerine etkiyen harici kuvvet ve moment var ise bunlar aerodinamik kuvvet ve momentlere eklenir. Son olarak yerçekiminden kaynaklanan ağırlık kuvveti eklenerek mühimmata etkiyen toplam kuvvet ve moment değerli bulunmuş olur. Bu toplam kuvvet ve moment değerleri uygulanarak sayısal çözümde kullanılan zaman adımı için doğrusal olmayan adi diferansiyel denklemler kullanılarak mühimmatın yeni konumu ve Euler açıları hesaplanır. Mühimmat hesaplanan bu yeni konum ve açı değerlerine taşınarak aynı işlemler tekrar edilir.

3. DOĞRULAMA ÇALIŞMALARI

Doğrulama çalışması kapsamında öncelikle altı serbestlik dereceli hareket denklemlerinin sayısal çözümü doğrulanmıştır. Daha sonra kavite akışı doğrulanarak doğrulama çalışması sonlandırılmıştır.

3.1. Altı Serbestlik Dereceli Hareketli Çözüm Doğrulama Çalışması

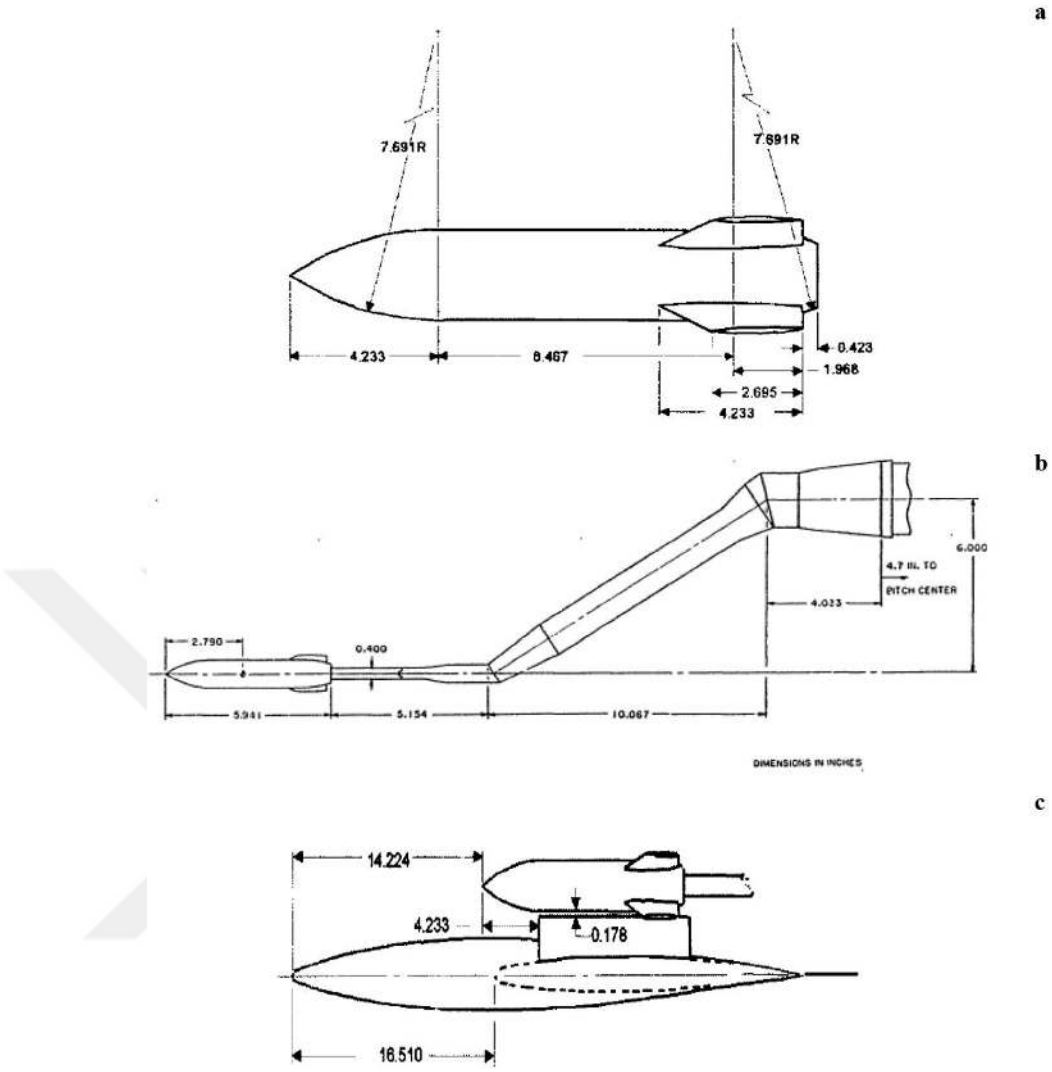
Literatürde EGLIN testi olarak geçen jenerik bir mühimmatın kanat altından bırakılmasına ait ölçeklendirilmiş modelin rüzgâr tünelinde, CTS (Captive Trajectory System) olarak bilinen gerçek zamanlı olmayan deneysel verileri bulunmaktadır. CTS yönteminde rüzgâr tüneline yerleştirilen ölçeklendirilmiş mühimmat üzerine gelen akıştan sensörler yardımıyla basınç değerleri ölçülmekte ve bu değerlere göre bilgisayar yardımıyla kuvvetler hesaplanarak uygulanacak zaman adımına göre mühimmatın yeni konumu belirlenmektedir. Bu rüzgâr tüneli deneyine ait geometri, gerçek mühimmatın 1/20 ölçeğindedir. Deneyde kullanılan modele ait geometrik detaylar ve bilgiler **Şekil *3.1*** ve **Tablo *3.2***'de sunulmaktadır (Fox, 2000).

Rüzgâr tünelinde 1/20 ölçekli modelin kullanılarak yapılan deneylerdeki mühimmata ait veriler **Tablo *3.1***'de görülmektedir. Bu değerler tam ölçekli mühimmatın bırakılma testine ait verilerdir. EGLIN deneyinin doğrulanması çalışmasında **Tablo *3.1***'de sunulan mühimmata ait değerler ANSYS Fluent yazılımına kullanıcı tarafından tanımlanmış fonksiyon (UDF) olarak eklentilenmiştir. Bu eklentiye ait yazılmış küçük kod parçası EK-1'de sunulmuştur.

Geometrik değerleri verilen mühimmat, kanat ve mühimmat tutucu CAD programı olan CATIA yardımıyla modellenmiştir. Bu modele ait görüntüler **Şekil 3.2**'de sunulmaktadır.

Tablo 3.1. *Tam ölçekli mühimmat değerleri (Fox, 2000)*

Tam ölçekli mühimmat	Ağırlık	8896.4 N
	Ağırlık merkezi	Mühimmat burnundan 1,416 m
	Atalet momenti Ixx	27,12 kg-m^2
	Atalet momenti Iyy	488,1 kg-m^2
	Atalet momenti Izz	488,1 kg-m^2
	Önden itme kuvveti konumu	Mühimmat burnundan 1,24 m
	Arkadan itme kuvveti konumu	Mühimmat burnundan 1,75 m
	Önden itme kuvveti	10675,7 N
	Arkadan itme kuvveti	42702,9 N

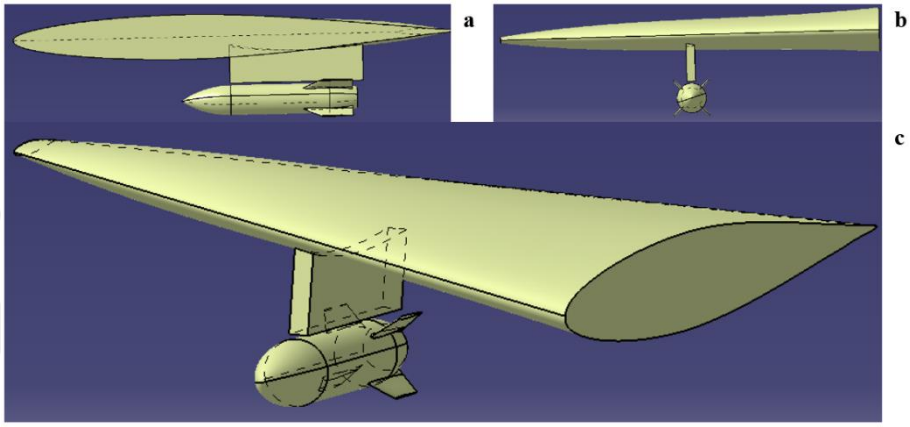


Şekil 3.1. *Rüzgâr tüneli deneyine ait 1/20 ölçeklendirilmiş geometri a) mühimmat geometrisi, b) CTS yapısı, c) kanat, mühimmat tutucu ve mühimmat geometrisi (a ve c'deki boyutlar cm, b'deki boyutlar ise inç cinsinden verilmiştir) (Fox, 2000)*

Tablo 3.2. *Kanat, mühimmat tutucu ve mühimmat geometrisine ait detaylar (Fox, 2000)*

Kanat	Kanat yapısı	45-derece hücum kenarı, kırpılmış delta kanat
	Kanat açıklık oranı	1,73 (38,1 cm kanat orta veter; 66,04 cm tüm kanat genişliği)
	Hücum kenarı kıvrım	45 derece
	Firar kenarı kıvrım	0 derece
	Sivrilme oranı	0,133
	Kök veteri	38,1 cm
	Kanat genişliği	66,4
	Kanat alanı	1425,8 cm^2
	Kanat profili ve konumu	NACA 64A010 airfoil kesiti tüm kanat boyunca
	Kanat ucu formu	NACA 64A010 airfoil kesiti
Mühimmat tutucu	Mühimmat tutucu cephe görünüşü	Dikdörtgen prizma: 11,43 cm uzunluk, 3,05 cm kanat referans yüzeyine olan dikey uzaklık
	Mühimmat tutucu profil şekli	Firar ve hücum kenarı birebir aynı, keskin kenarı hücum ve firar kenarına 1,47 cm uzaklıkta, kalınlık 0,75 cm

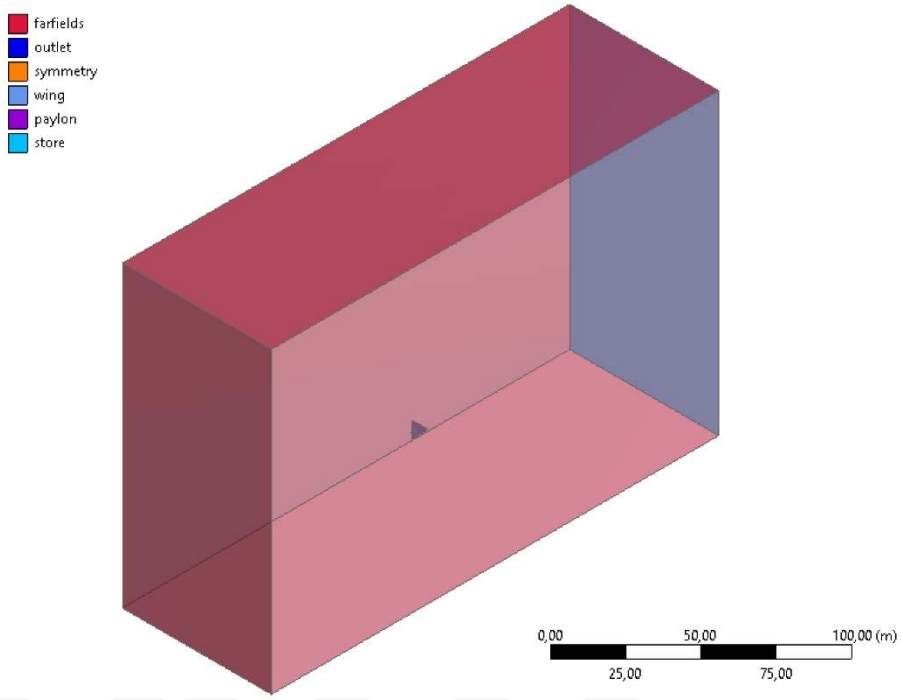
	Mühimmat tutucu konumu	Orta çizgisi kanat orta çizgisine hem sağdan hem de soldan 16,51 cm uzaklıkta, tutucu hücum kenarı kanat hücum kenarına 1,95 cm uzaklıkta
Mühimmat	Mühimmat çapı	2,54 cm
	Mühimmat kanatçığı hücum kenarı kıvrımı	60 derece
	Mühimmat kanatçığı uzunluğu	Maksimum mühimmat çapında 0,89 cm
	Mühimmat kanatçığı kök kordu	4,23 cm orta çizgi
	Mühimmat kanatçığı airfoil profili	NACA 008 airfoil kesiti



Şekil 3.2. *EGLIN testine ait kanat, mühimmat tutucu ve mühimmat geometrisi a) yandan görünüş, b) önden görünüş, c) üç boyutlu görünüş*

3.1.1. Çubuk etkilerinin incelenmesi

Şekil *3.1*'de gösterilen rüzgâr tüneli deneyinde mühimmatı tutan bir çubuk kullanılmıştır. İlerleyen çalışmalarda çok fazla analiz gerçekleştirileceği için bu çubuğun çözüme nasıl bir etkisinin olduğu araştırılmak istenmiş olup ve eğer çözümde herhangi bir etkisi olmadığı gözlenmesi durumunda ağ sayısını artırmamak adına bu çubuğun kullanılmaması öngörülmüştür. Bu bölümde eşit ağ sayısına ve eşit ağ kalitesinde hem çubuklu hem çubuksuz dört farklı analiz gerçekleştirilmiştir. Bu analizler viskoz etkilerin ihmal edildiği yoğunluk tabanlı çözücü ile gerçekleştirilmiştir. Çözüm alanı oluşturulurken uzak alan için önünden, aşağıdan ve yukarıdan kanat genişliğinin 10 katı kadar uzaklık seçilmiş iken arkadan ise kanat genişliğinin 20 katı uzaklık seçilmiştir. Tüm çözüm alanı **Şekil *3.3***'te gösterildiği gibidir.



Şekil 3.3. *EGLIN sayısal çözüm alanı*

Çözüm alanı için uygulanan sınır şartları **Tablo *3.3***'te sunulmuştur.

Tablo 3.3. *EGLIN çözüm alanı sınır şartları*

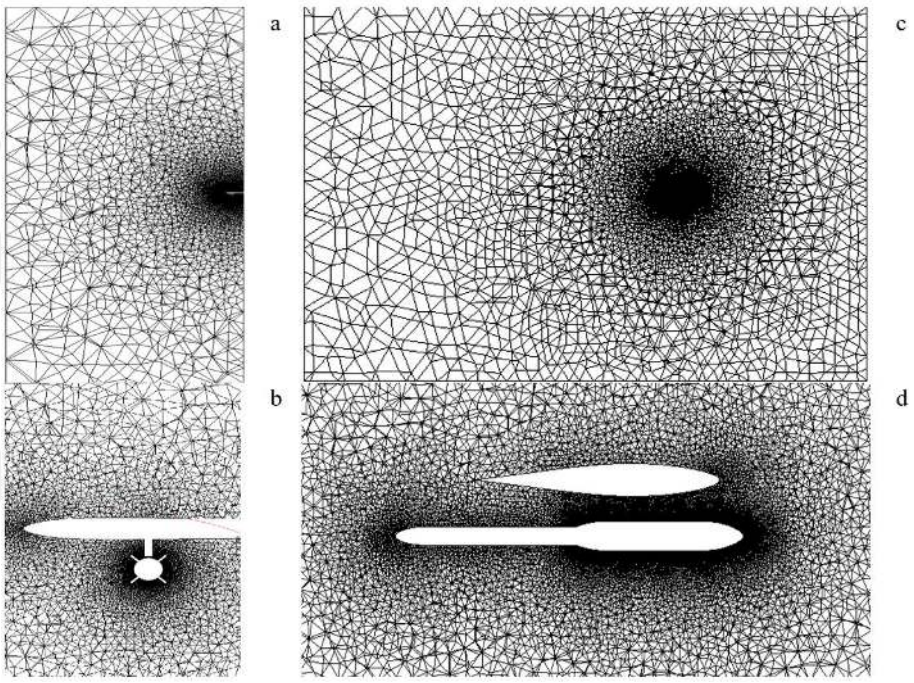
Sınırlar	Uygulanan sınır şartları	Sınır şartları girdileri
farfields	Dirichlet sınır şartı Φ(x) = sabit	Mach number: 0.95 flow direction x − component: − 1 flow direction y − component: 0 flow direction z − component: 0 turbulence intensity: 2% turbulence viscosity ratio: 2
outlet	Neumann sınır şartı $\partial\varphi(x) = sabit$	outflow turbulence intensity: 5% outflow turbulence viscosity ratio: 10
symmetry	simetri	symmetry
wing, paylon, store	Kaymaz adyabatik duvar	wall motion: stationary slip boundary condition: no − slip heat boundary condition: heat flux constant heat flux: 0.0 W/m^2

Basınç ve sıcaklık için 20000 ft irtifa için basınç değeri olan 35990 pascal ve 236.65 K değerleri çalışma şartları (operation condition) olarak girilmiştir.

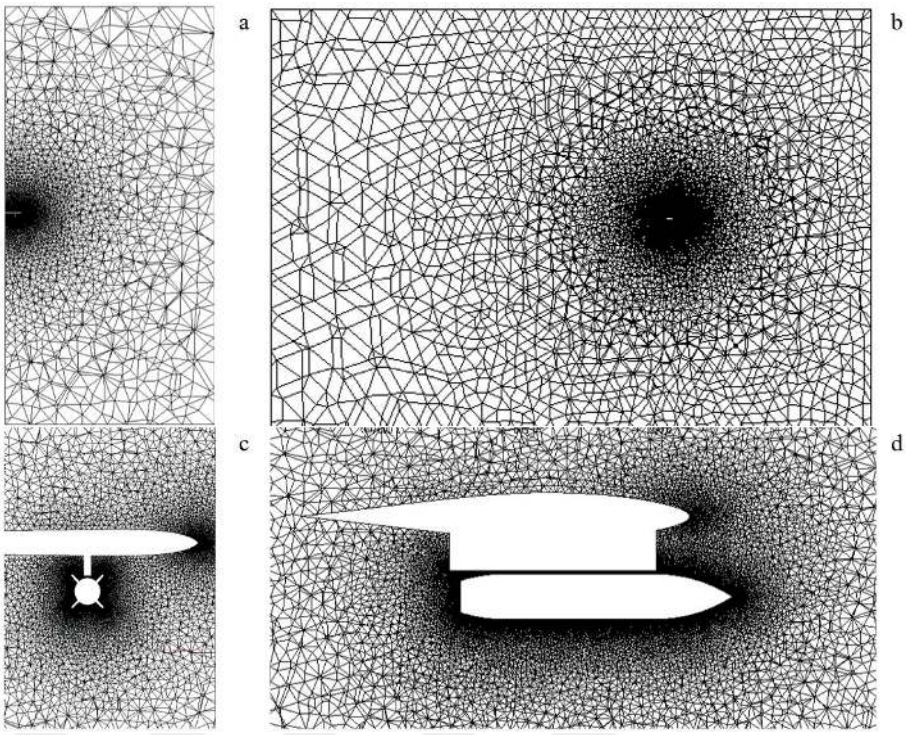
Çubuklu ve çubuksuz ağ yapıları **Şekil *3.4*** ve **Şekil *3.5***'te gösterildiği gibidir. Çubuklu ve çubuksuz olmak üzere 600 bin, 1 milyon, 1,7 milyon ve 3,5 milyon ağ

yoğunluğuna sahip dört farklı ağ kullanılmıştır. Bu ağ yapılarının minimum dikliği (orthogonality) 0,18 ile 0,23 arasında değişmektedir. Maksimum çarpıklık (skewness) değerleri ise 0,8'in altında tutulmuştur.

ANSYS Fluent çözücüsünün ağ kalitesi sınıflandırması **Tablo *3.4***'de verilmiştir (Ozen, 2014). Bu sınıflandırmaya göre çözümü gerçekleştirilen tüm ağlar diklik kalitesi bakımından kabul edilebilir ile iyi ağ arasında, çarpıklık değerleri açısından iyi ağ sınıfında yer almaktadır.



Şekil 3.4. *EGLIN çubuklu ağ yapısı, a) önden tüm ağ görüntüsü, b) yandan tüm ağ görüntüsü, c) önden yakın görüntü, d) yandan yakın görüntü*



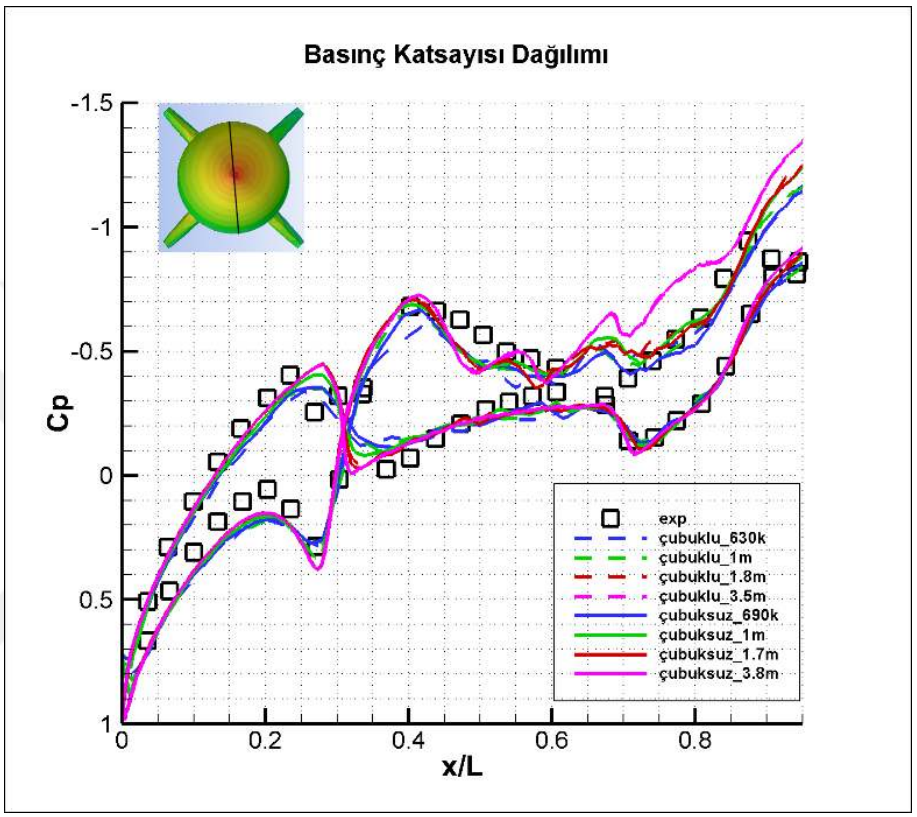
Şekil 3.5. *EGLIN çubuksuz ağ yapısı, a) önden tüm ağ görüntüsü, b) yandan tüm ağ görüntüsü, c) önden yakın görüntü, d) yandan yakın görüntü*

Tablo 3.4. *ANSYS Fluent ağ kalitesi*

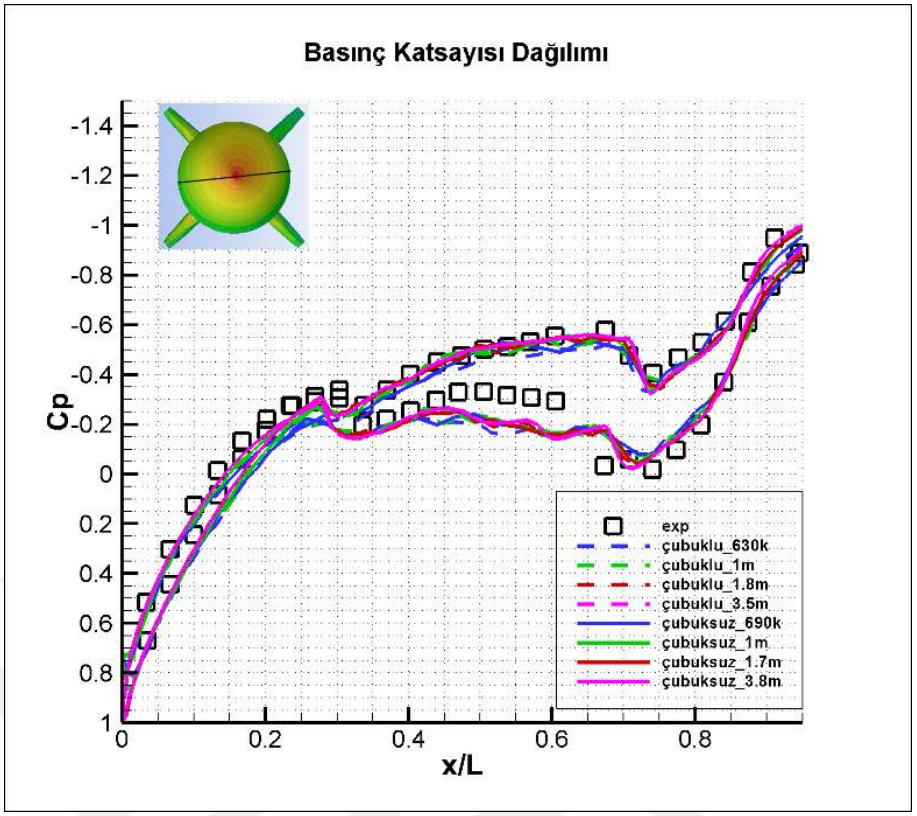
Çarpıklık (skewness)					
Mükemmel	Çok iyi	İyi	Kabul edilebilir	Kötü	Kabul edilemez
0 – 0,25	0,25 – 0,50	0,50 – 0,80	0,80 – 0,94	0,95 -0,97	0,98 - 1
Diklik (orthogonality)					
Kabul edilemez	Kötü	Kabul edilebilir	İyi	Çok iyi	Mükemmel
0 – 0,001	0,001 – 0,14	0,15 – 0,20	0,20– 0,69	0,70– 0,95	0,95 - 1

Bu ağ yapıları ile önce zamana bağlı olmayan daimi (steady-state) çözüm yapılarak yakınsama sağlandıktan sonra zamana bağlı sürekli olmayan (transient) çözüm ile altı serbestlik dereceli hareketli çözüm elde edilmiştir. Yapılan sürekli çözümler sonucunda elde edilen basınç katsayısı dağılımı deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Deneysel olarak mühimmat yüzeyinden önden arkaya doğru 5, 95, 185 ve 275 derece açılarında basınç katsayıları bulunmaktadır (Fox, 2000). Bu değerler sayısal sonuçlar ile birlikte **Şekil *3.6*** ve **Şekil *3.7***'de sunulmaktadır.

Şekil *3.6* ve **Şekil *3.7*** incelendiğinde aynı ağ yoğunluğuna sahip çubuklu ve çubuksuz çözümlerden elde edilen basınç katsayısı değerleri örtüşmektedir. Zamana bağlı altı serbestlik dereceli hareketli çözüm ile mühimmatın hem konumu hem de dönme açıları elde edilmiştir. Bu elde edilen sonuçlar deneysel değerler (Fox, 2000) ile birlikte **Şekil *3.8*** ve **Şekil *3.9***'da sunulmaktadır.



Şekil 3.6. *Çubuklu ve çubuksuz 5 ve 185 derece basınç katsayısı dağılımı*



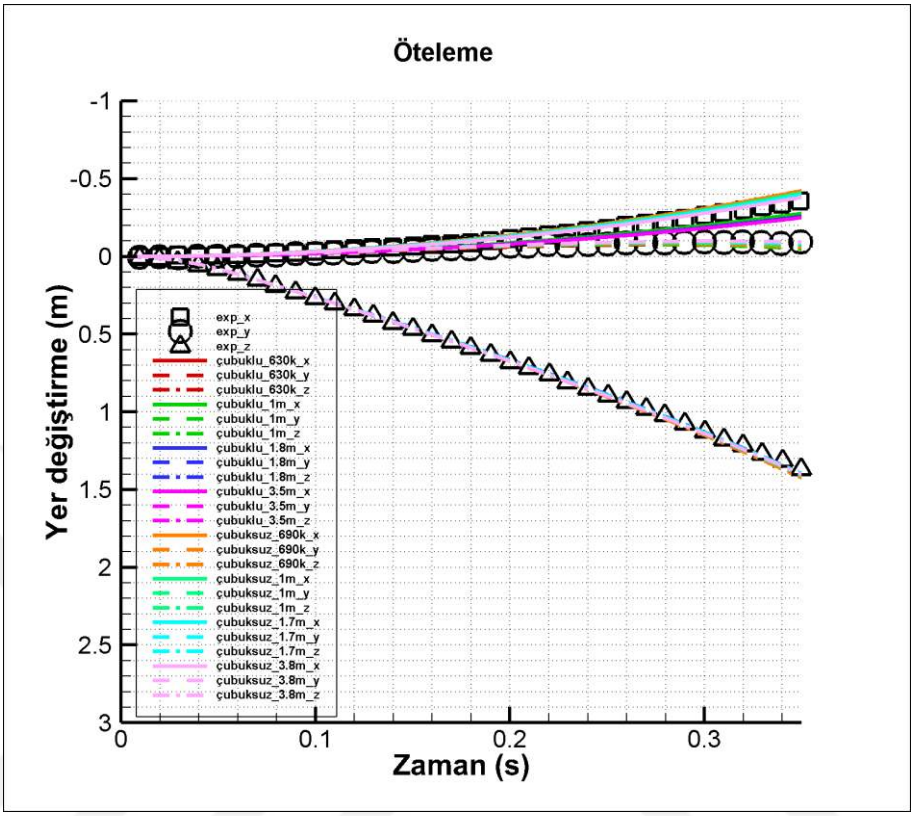
Şekil 3.7. *Çubuklu ve çubuksuz 95 ve 275 derece basınç katsayısı dağılımı*

Şekil *3.8*'e göre eşit ağ yoğunluğuna sahip çubuklu ve çubuksuz çözümler benzer sonuçlar vermektedir. Altı serbestlik dereceli çözümlerin öteleme hareketinde deneysel sonuçlarla bire bir örtüşmektedir. **Şekil *3.9*** incelendiğinde ise yine eşit ağ yoğunluğuna sahip çubuklu ve çubuksuz çözümlerin benzer davranışlar gösterdiği görülmektedir. Sadece 600 bin ağ yoğunluğuna sahip çözümlerde x ekseninde dönme (yalpalama) açılarda farklılıklar bulunmaktadır. Ağ yoğunluğu arttıkça çubuklu ve çubuksuz çözümlerin bire bir aynı olduğu görülmektedir.

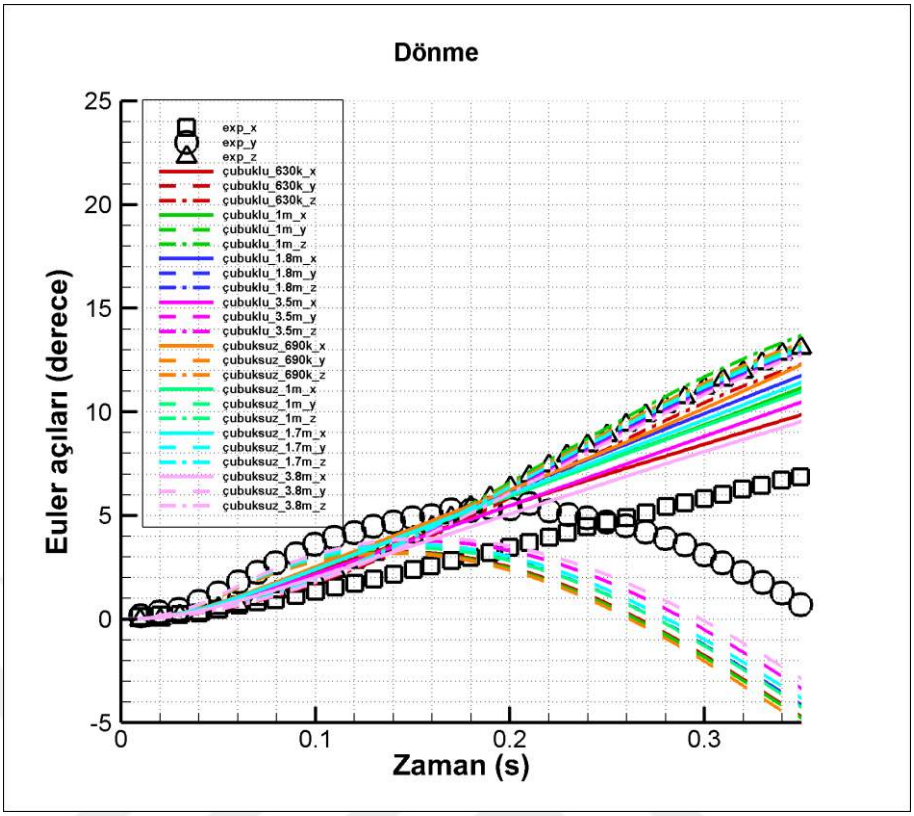
Çubuklu ve çubuksuz çözümler genel olarak değerlendirildiğinde basınç katsayısında, öteleme ve dönme hareketinde eşit ağ yoğunluklarında aynı sonuçlar elde edilmiştir. Ağ yoğunluğu artırıldıkça öteleme ve dönme hareketinde deneysel değerlere yaklaşıldığı bu bölüm sonunda elde edilen bir diğer sonuçtur.

Deneysel çalışmada yer alan mühimmatı tutan çubuğun mühimmat hareketinde oldukça düşük düzeyde bir etkiye sahip olduğunun tespitinden sonra, bu çalışma kapsamında yürütülen diğer bölümlerdeki tüm analizlerde çubuksuz çözümler yürütülmüştür. Bu sonuç, çubuk etrafındaki yoğun ağ ve ilerleyen viskoz çözümlerde çubuk etrafına sınır tabaka ağının atılması zorunluluğunun önüne geçilerek zaman ve

hesaplama kaynağından tasarruf edilmiştir. Çubuğun çıkarılması ile ayı ağ sayısında mühimmat etrafında daha yoğun ağlar kullanılabilmiştir.



Şekil 3.8. *Çubuklu ve çubuksuz öteleme değerleri*



Şekil 3.9. *Çubuklu ve çubuksuz dönme değerleri*

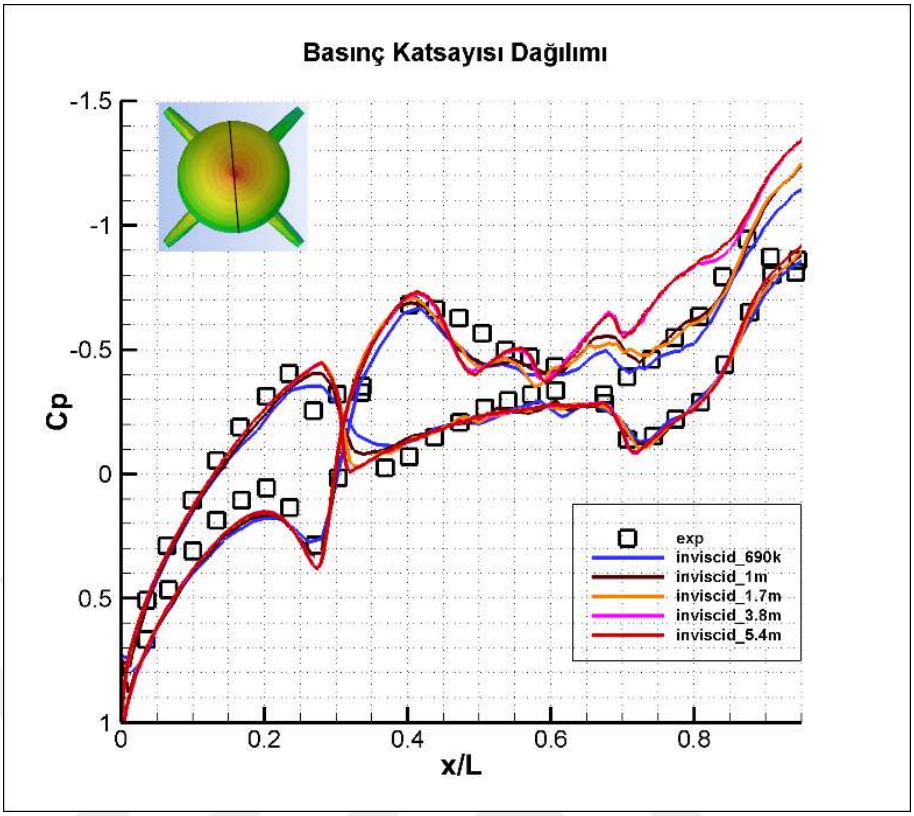
3.1.2. Ağ yoğunluğunun etkisi

Literatürdeki sayısal çalışmalarda, dışarıdan mühimmat bırakma analizlerinde viskoz olmayan çözümün, analiz süresini kısaltması bakımından kötü bir yaklaşım olmadığı görülmektedir (Demir ve Alemdaroğlu, 2017). Bu çalışmanın bu bölümünde bir önceki bölümün devamı olarak çubuksuz ağ yapısı (**Şekil *3.5***) kullanılarak ağ yoğunluğunun etkisi ve viskoz olmayan akış yaklaşımı incelenmiştir. Bu kapsamda bir önceki bölümde 600 bin, 1 milyon, 1,7 milyon ve 3,8 milyon ağ yoğunluğuna ek olarak çarpıklık ve diklik kalitesi olarak aynı değerlere sahip 5,4 milyon ağ yoğunluğuna sahip bir ağ yapısının sonuçları karşılaştırılmıştır. Yine bir önceki bölümde olduğu gibi yoğunluk tabanlı çözücü ile önce zamana bağlı olmayan sürekli çözüm yapılarak çözümün yakınsaması sağlanmış daha sonra altı serbestlik dereceli zamana bağlı sürekli olmayan hareketli çözüm gerçekleştirilerek analizler tamamlanmıştır. Bu 5,4 milyon ağ sayısına sahip çözüme ait sonuçlar daha önce gerçekleştirilen dört farklı ağ sayısına sahip çözümlere ait sonuçlar ve deneysel değerler birlikte sunulmuştur.

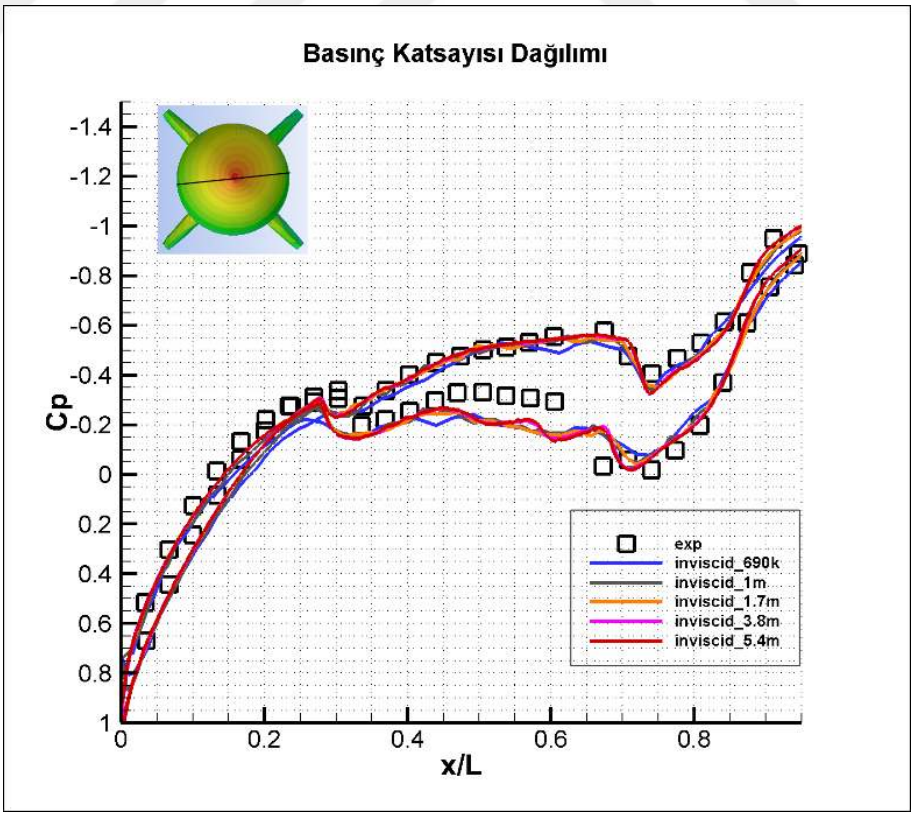
Viskoz olmayan sürekli çözümlerden elde edilen basınç katsayısı dağılımı **Şekil *3.10*** ve **Şekil *3.11*** ile gösterilmektedir. **Şekil *3.10*** ve **Şekil *3.11*** incelendiğinde viskoz

olmayan çözümün deneysel veriler ile genel olarak uyumlu olduğu görülmektedir. Mühimmat üzerinde 5 derecedeki yani mühimmat ve mühimmat tutucu arasında kalan bölgeden elde edilen basınç katsayısı, mühimmat arkasına doğru ağ yoğunluğu artırıldıkça deneysel verilerden bir miktar uzaklaştığı görülmektedir. Mühimmat yanlarından ve altından elde edilen basınç katsayılarının deneysel verilerle uyumlu olduğu görülmektedir.

Ayrıca mühimmat ve mühimmat tutucu arasından elde edilen basınç katsayı değerlerinde, deneysel değerlere daha uzak görünen örneğin 3 milyon ağa sahip çözümün daha yakın görünen 600 bin ağa sahip çözüme göre öteleme ve dönme hareketi değerlerinde deneysel değerler ile daha uyumlu olduğu görülmektedir. Öteleme ve dönme hareketi değerleri açısından dışardan bırakma problemi için mühimmat bırakma öncesi basınç katsayısı değerlerinin çok belirleyici olmadığı görülmektedir. Bunun nedeni ise ilk 0,05 s boyunca uygulanan itme kuvvetinin bırakma analizinin ilk bölümde aerodinamik kuvvetlere göre çok baskın olmasıdır. Bu süre boyunca öteleme ve dönme hareketini asıl belirleyen aerodinamik kuvvetler değil itme kuvvetidir. Bu yüzden bırakma öncesine ait deneysel basınç katsayılarında küçük farklılık görülen daha yoğun ağın, hareketli çözümünde daha iyi sonuç verdiği görülmüştür. Sonuç olarak sürekli çözüm ile elde edilen basınç katsayısı için deneysel değerlerden küçük sapmalar, hareketli çözümde çok belirleyici özelliğe sahip olmadığı anlaşılmıştır.



Şekil 3.10. *Viskoz olmayan 5 ve 185 derece basınç katsayısı dağılımı*



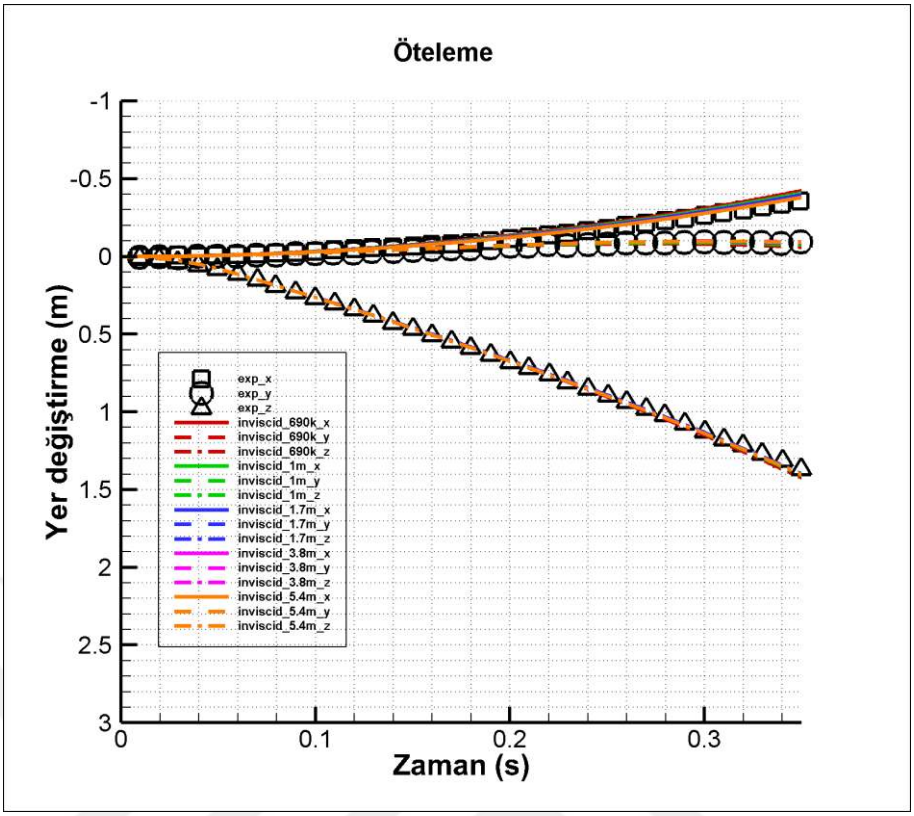
Şekil 3.11. *Viskoz olmayan 95 ve 275 derece basınç katsayısı dağılımı*

Farklı ağ yoğunlukları için gerçekleştirilen viskoz olmayan çözüme ait öteleme ve dönme hareketi açıları **Şekil *3.12*** ve **Şekil *3.13*** ile gösterilmektedir. **Şekil *3.12*** incelendiğinde öteleme değerleri için sayısal çözümler ile deneysel çözümlerin tam olarak uyumlu olduğu görülmektedir.

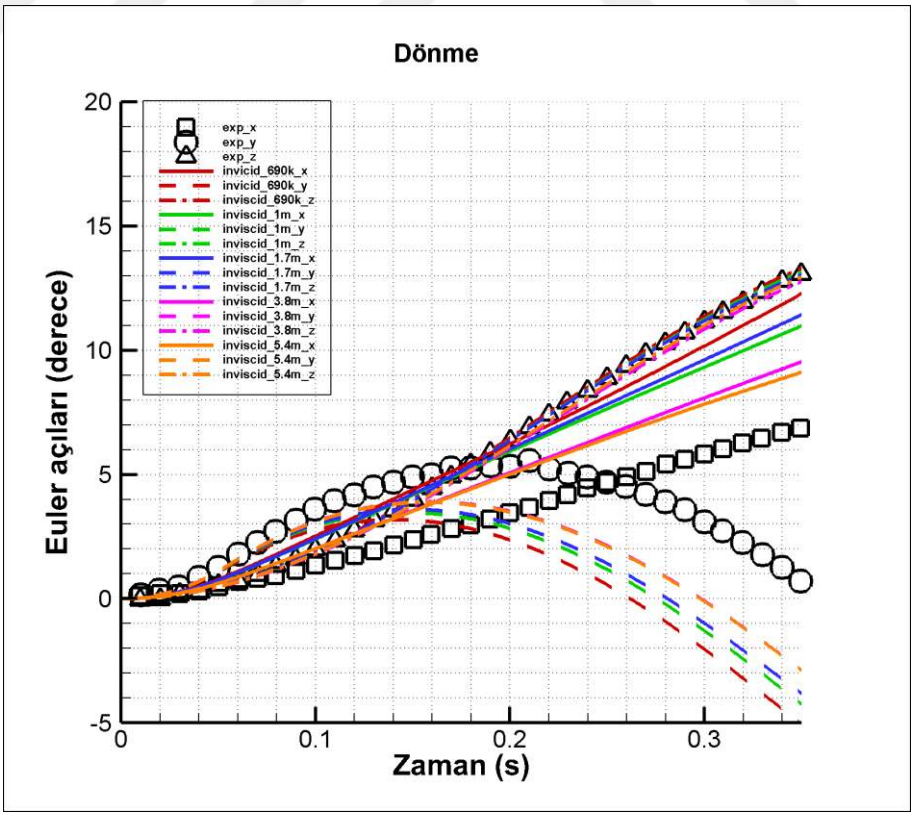
Bu çözümlerden elde edilen dönme açılarının deneysel değerler ile kıyaslanması durumunda (**Şekil *3.13***), her ne kadar ağ yoğunluğu artırıldıkça deneysel değerlere yaklaşılmakta ve x ekseni etrafında dönme (yalpalama) değerlerinde eğilim yakalanmış olsa da genel olarak yaklaşık 1,5 derece sapma görülmüştür. Y ekseni etrafında dönme (yunuslama) değerlerinde, deneysel maksimum değer 5,3 derece iken sayısal çözümlerde bu değer 3,7 olarak elde edilmiştir. Yunuslama değerlerinde ayrıca eğilim tam anlamıyla yakalanamamıştır. Deneysel değerlere göre yunuslama hareketinde mühimmat 0,19 s ye kadar burun yukarı yaparak maksimum değere ulaşıp daha sonra burun aşağı yapmaktadır. Sayısal çözümlerde ise mühimmat 0,15 s ye kadar burun yukarı yapıp deneysel verilere göre daha erken bir sürede maksimum değere ulaşıp burun aşağı yapmaktadır. Z ekseni etrafında dönme (sapma) değerleri deneysel değerler ile kıyaslandığında diğer iki dönme açılarına göre deneysel verileri yakaladığı görülmektedir.

Ayrıca ağ sayısını sürekli artırmanın iyi sonuç elde etmek için yeterli olmadığı görülmüştür. 3,8 milyon ile 5,4 milyon yoğunluklu ağların benzer sonuçlar verdiği ve mühimmat bırakma analizleri için çözümün ağ yoğunluğundan bağımsız hale gelebilmesi için ağ yoğunluğun bu değerlere yakın olması gerektiği görülmüştür.

Mühimmat ayrılması probleminde en kritik parametre yunuslama açısıdır. Yalpalama ve sapma açısı bu açıya göre gerece daha az öneme sahiptir. Yunuslama açısı burun yukarı burun aşağı hareketini göstermektedir. Elde edilen viskoz olmayan çözümlerde yunuslama açısında hem eğilim hem de maksimum değerin yakalanamaması ile ilerleyen bölümlerde farklı yaklaşımlar ile bu sapmaların nedeni araştırılmıştır.



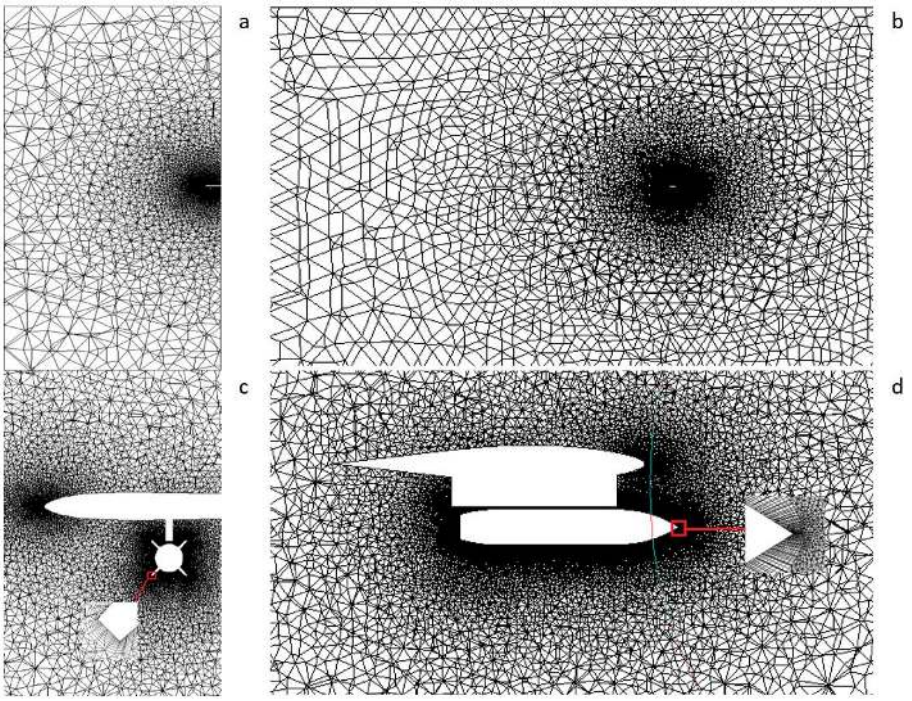
Şekil 3.12. *Viskoz olmayan çözüme ait öteleme değerleri*



Şekil 3.13. *Viskoz olmayan çözüme ait dönme değerleri*

3.1.3. Türbülans etkilerinin incelenmesi

Viskoz olmayan hareketli çözümlerin deneysel veriler ile yeterince uyumlu olmadığından ötürü ve ilerleyen bölümlerde kavite içerisinden mühimmat ayrılması inceleneceğinden türbülans etkileri incelenmiştir. Bir önceki bölümden elde edilen deneyim ile aynı akış alanına 2,8 ve 5,9 milyon ağ yoğunluğuna sahip y^+ değeri 100 olan sınır tabaka ağına sahip iki farklı ağ yapısı oluşturulmuştur. Bu ağ yapıları sınır tabakada oluşturulan üçgensel prizma ağlarından ötürü minimum dikliği 0,1 civarında ve maksimum çarpıklık değerleri ise 0,8 in biraz üstünde oluşmuştur.

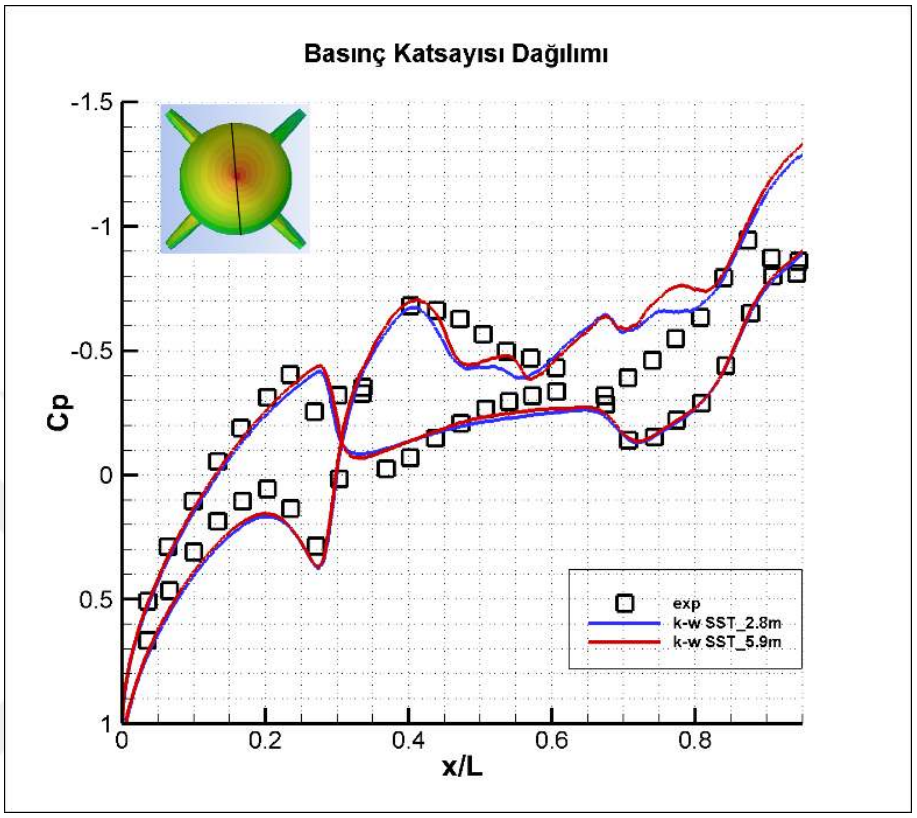


Şekil 3.14. *Türbülanslı çözümün ağ yapısı a) önden tüm ağ görüntüsü, b) yandan tüm ağ görüntüsü, c) önden yakın görüntü, d) yandan yakın görüntü*

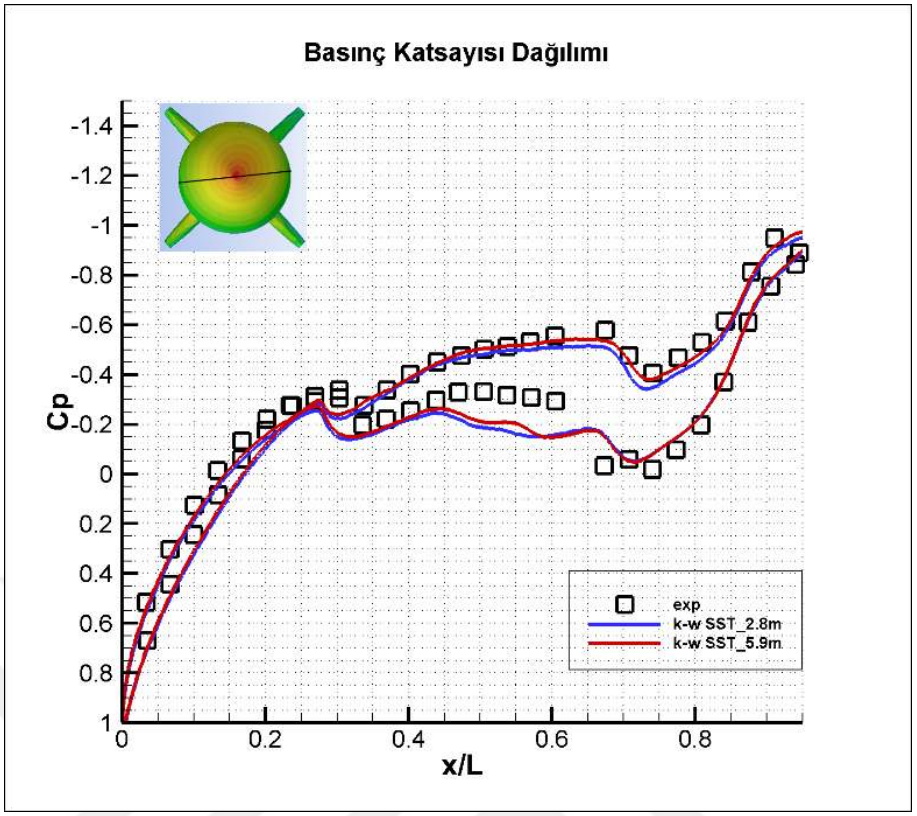
Şekil *3.14*'de gösterilen ağ yapısı için daha önceki çalışmalarda olduğu gibi yoğunluk tabanlı çözücü ile önce zamana bağlı olmayan sürekli çözüm yapılarak çözümün yakınsaması sağlanmış, daha sonra altı serbestlik dereceli zamana bağlı daimi olmayan hareketli çözüm gerçekleştirilerek analizler tamamlanmıştır. Türbülans modeli olarak akış ayırılmaları için iyi sonuç veren SST k-ω (The Shear Stress Transport (SST) k-ω) modeli uygulanıştır.

Türbülanslı çözümden elde edilen basınç katsayısı dağılımı deneysel veriler ile birlikte **Şekil *3.15*** ve **Şekil *3.16*** ile gösterilmektedir. Basınç katsayısı dağılımı incelendiğinde viskoz olmayan çözüme benzer şekilde deneysel verilerle uyumlu bir

çözüm elde edildiği görülmüştür. Türbülanslı çözümün yine mühimmat ve mühimmat tutucu arasında kalan bölgenin mühimmat arkasına doğru olan alanda viskoz olmayan çözümde olduğu gibi deneysel değerlerden küçük bir miktar sapmaktadır.

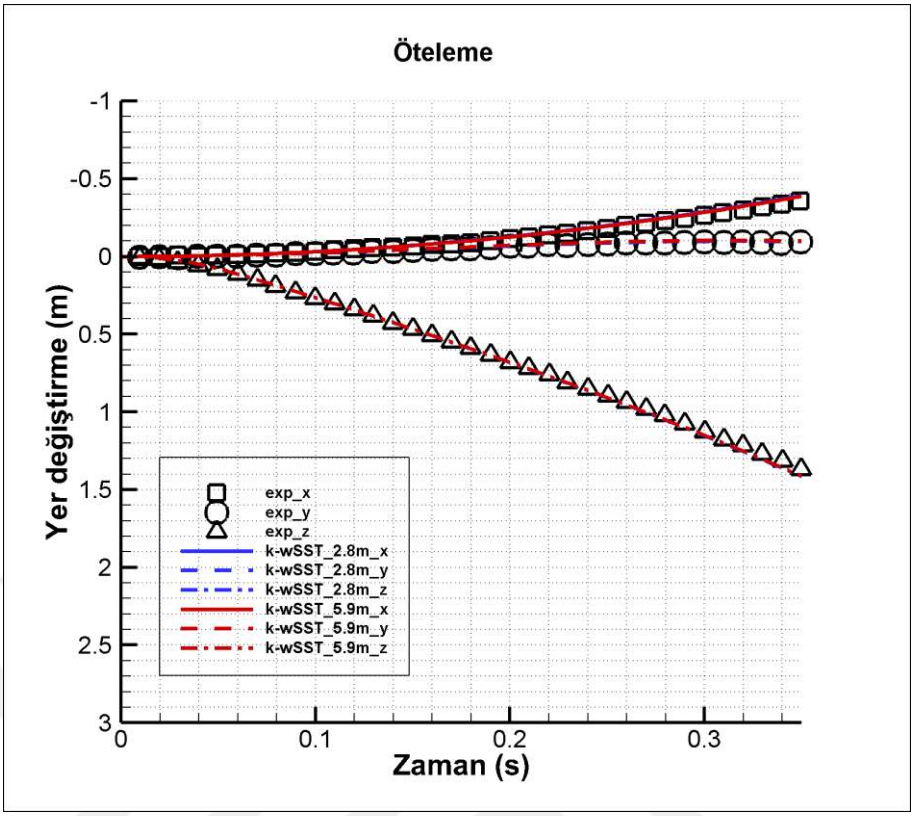


Şekil 3.15. *SST k-ω türbülans modeli 5-185 derece basınç katsayısı dağılımı*

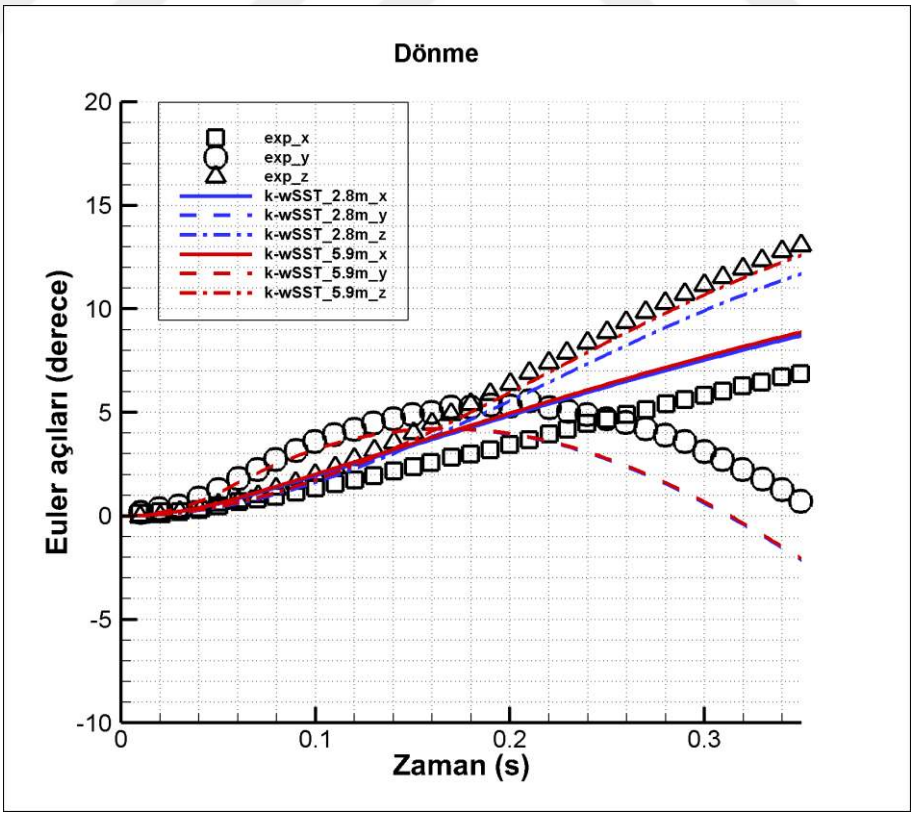


Şekil 3.16. *SST k-ω türbülans modeli 95-275 derece basınç katsayısı dağılımı*

2,8 milyon ve 5,9 milyon yoğunlukları için gerçekleştirilen türbülanslı çözüme ait öteleme ve dönme hareketi açıları **Şekil *3.17*** ve **Şekil *3.18*** ile gösterilmektedir. **Şekil *3.17*** ve **Şekil *3.18*** incelendiğinde viskoz olmayan çözümde olduğu gibi öteleme hareketi deneysel verilerle uyumlu olmakla birlikte dönme hareketinde viskoz olmayan çözüme göre daha iyi sonuç elde edilmiştir. Viskoz olmayan çözümde yalpalama açısında deneysel veriler ile olan fark 1,5 derece iken türbülanslı çözümde bu fark 1 dereceye düşmüştür. Yine aynı şekilde viskoz olmayan çözümde maksimum yunuslama açısında deneysel verilerle olan fark 1,6 derece iken türbülanslı çözümde bu değer 1,1 derece düşmüştür. Aynı şekilde viskoz olmayan çözümde maksimum yunuslama açısına 0,15 s sonra ulaşılmış iken türbülanslı çözümde 0,17 s sonra ulaşılarak deneysel değer olan 0,19 s'ye daha yaklaşılmıştır. Sapma açısında ise viskoz olmayan çözümde olduğu gibi türbülanslı çözümde de deneysel değerler yakalanmıştır.



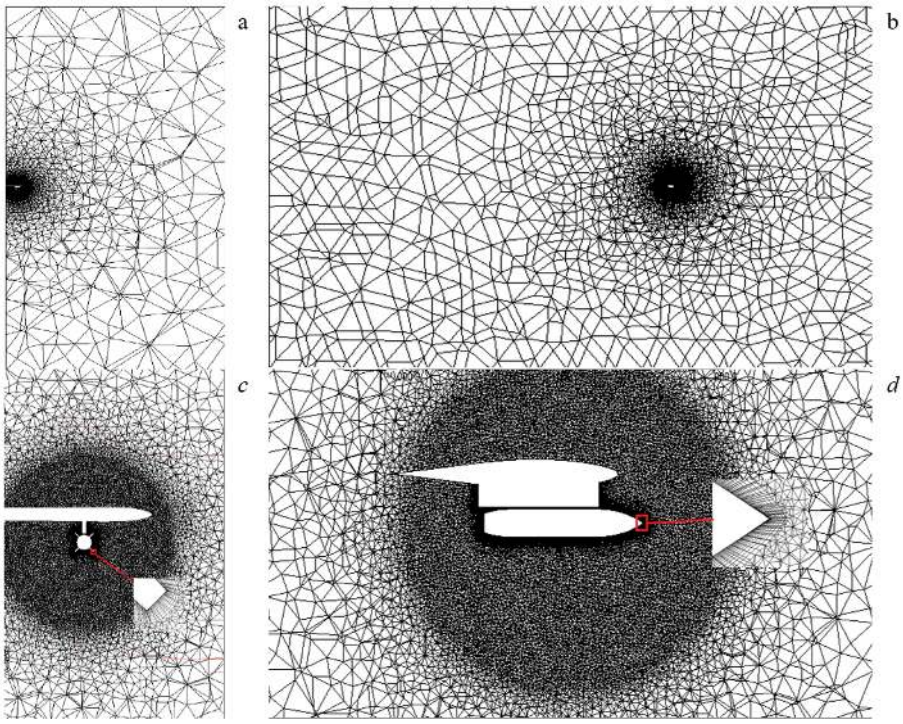
Şekil 3.17. *SST k-ωtürbülans modelli çözüme ait öteleme değerleri*



Şekil 3.18. *SST k-ω türbülans modelli çözüme ait dönme değerleri*

3.1.4. Çözücü etkilerinin incelenmesi

Çalışmanın bu bölümünde yoğunluk tabanlı çözücü ile basınç tabanlı çözücü karşılaştırması gerçekleştirilmiştir. Yoğunluk tabanlı çözücünün ağ hassasiyetinden dolayı ikinci dereceden ayrıklaştırma yöntemleri kullanılmaya çalışıldığında çözüm ıraksamıştır. Bu nedenle ağ hassasiyeti daha az olan ikinci dereceden ayrıklaştırma yöntemlerinin kullanılabileceği basınç tabanlı çözücü denenmiştir. Bu kapsamda önceki bölümlerde kullanılan çözüm alanı ve sınır şartları kullanılarak türbülanslı çözümde olduğu gibi sınır tabaka ağına sahip minimum dikliği 0,16, maksimum çarpıklık değeri ise 0,8'in altında ve y^+ değeri 50'nin altında mühimmat etrafında yoğunlaşmış 5,8 milyon ağ yoğunluğuna sahip yeni bir ağ oluşturulmuştur. Bu ağa ait görüntüler **Şekil *3.19***'da sunulmuştur.

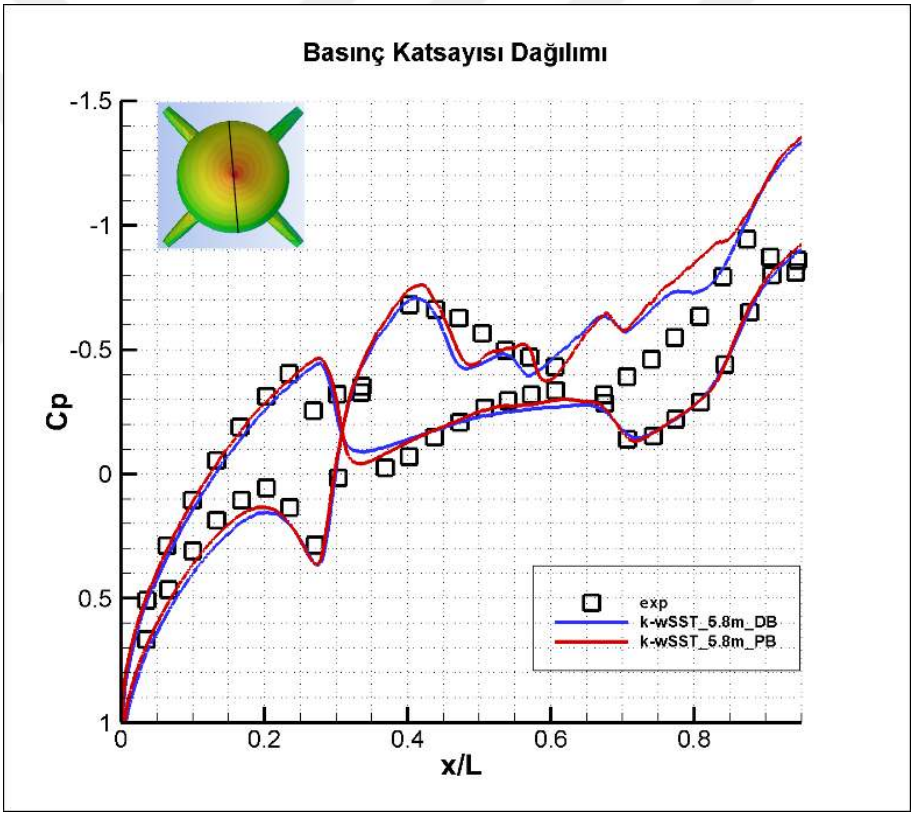


Şekil 3.19. *Türbülanslı çözümün yeni ağ yapısı 5.8 m a) önden tüm ağ görüntüsü, b) yandan tüm ağ görüntüsü, c) önden yakın görüntü, d) yandan yakın görüntü*

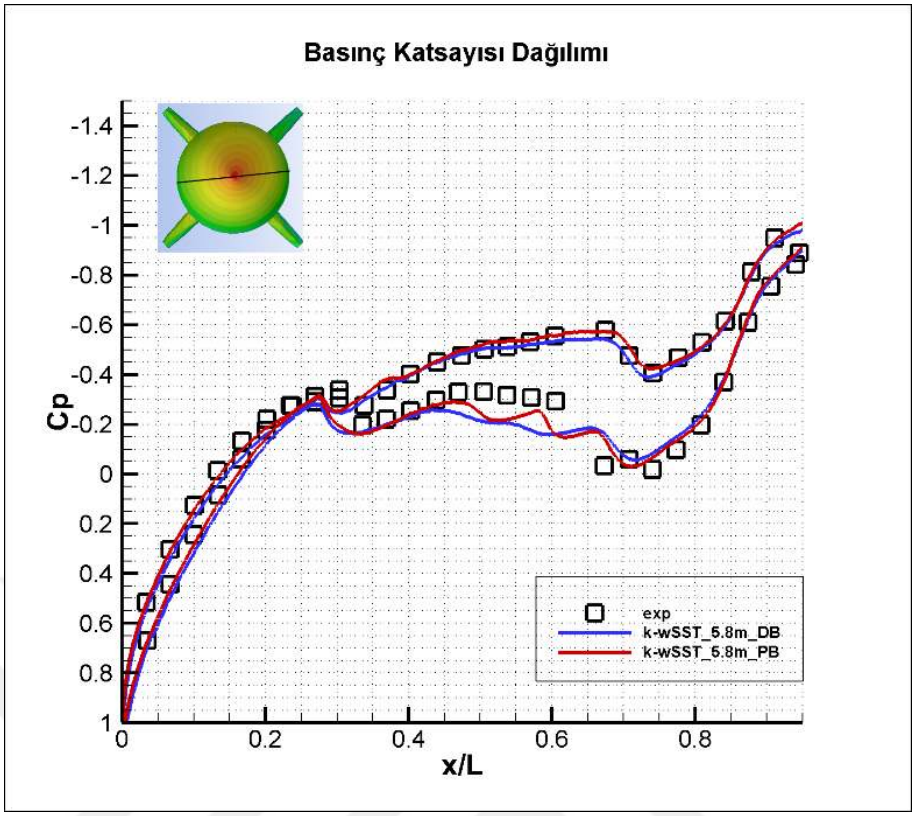
Şekil *3.19*'da gösterilen ağ yapısı yoğunluk ve basınç tabanlı iki ayrı çözücü ile sınır şartları aynı olacak şekilde SST k-ω türbülans modeli ile analiz edilmiştir. Yoğunluk tabanlı çözücüsünün ağ hassasiyetinden ötürü birinci dereceden ayrıklaştırma yöntemi kullanılırken basınç tabanlı çözücüde ikinci derecen ayrıklaştırma yöntemi kullanılmıştır. Daha önceki bölümlerde olduğu gibi önce zamana bağlı olmayan sürekli akış çözümü gerçekleştirilmiştir. Daha sonra zamana bağlı sürekli olmayan altı serbestlik dereceli

hareketli çözüm elde edilmiştir. Zamana bağlı olmayan çözümden elde edilen basınç katsayısı dağılımı ve deneysel veriler aşağıda sunulmuştur.

Şekil *3.20* ve **Şekil *3.21*** incelendiğinde daha önceki analizlerde olduğu gibi deneysel veriler ile sayısal verilerin uyum içinde olduğu söylenebilir. Yine mühimmat ve mühimmat tutucu arasında kalan bölgede mühimmat arkasına doğru gidildikçe sayısal sonuçların deneysel verilerle eğilim anlamında uyumlu olmasına karşılık değer anlamında deneysel verilerin biraz üstünde yer almıştır. Daha önce bahsedildiği gibi mühimmat ayrılmasının ilk saniyesi içerisinde itme kuvvetinin aerodinamik kuvvetlere göre çok baskın olmasından dolayı bu farklılık hareketli çözümde öteleme ve dönme değerlerine etki etmemektedir.



Şekil 3.20. *SST k-ω türbülans modeli 5.8 m 5-185 derece basınç katsayısı dağılımı*



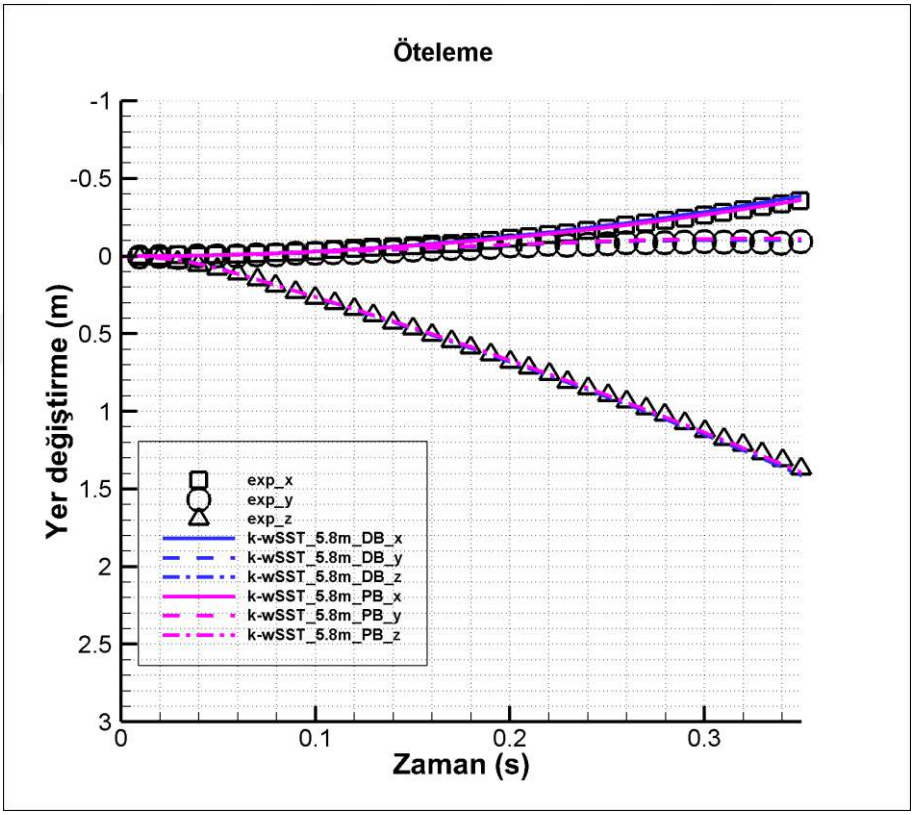
Şekil 3.21. *SST k-ω türbülans modeli 5.8 m 95-275 derece basınç katsayısı dağılımı*

5,8 milyon yoğunluklu ağ için gerçekleştirilen yoğunluk ve basınç tabanlı türbülanslı çözüme ait öteleme ve dönme hareketi açıları **Şekil *3.22*** ve **Şekil *3.23*** ile gösterilmektedir.

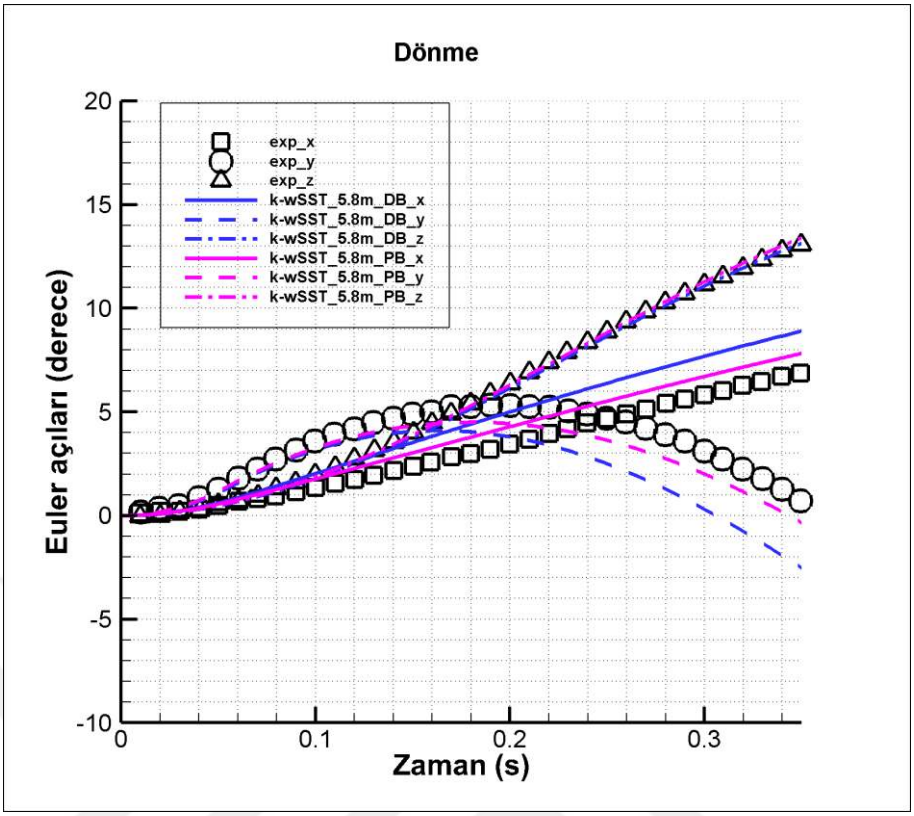
5,8 milyon ağ yoğunluğuna sahip yoğunluk tabanlı ve basınç tabanlı çözümlere ait öteleme ve dönme hareketi değerleri karşılaştırıldığında basınç tabanlı çözümün hem öteleme hem de dönme hareketinde deneysel veriler ile tam uyum içinde olduğu söylenebilir. Her ne kadar yoğunluk tabanlı çözücüler basınç tabanlı çözücülere göre sıkıştırılabilir yüksek hızlı akışlarda daha doğru bir yaklaşım olsa da burada ikinci dereceden doğruluğa sahip basınç tabanlı çözücü birinci dereceden doğruluğa sahip yoğunluk tabanlı çözücüye göre daha iyi sonuç vermiştir. Öteleme hareketinde hem yoğunluk tabanlı çözücü hem de basınç tabanlı çözücü deneysel veriler ile birebir uyum içindedir. Dönme hareketinde ise basınç tabanlı çözücü yoğunluk tabanlı çözücüye göre üç eksende de deneysel veriler ile çok daha fazla uyum içindedir.

Sonuç olarak basınç tabanlı çözücü ile daha önceki analizlerde olduğu gibi sapma açısı birebir yakalanmıştır. Yunuslama açısında ise deneysel veriler ile eğilim açısından birebir uyum söz konusu iken deneysel verilerde maksimum değer 5,3 derece iken basınç

tabanlı sayısal çözümde bu değer 4,8 derece olarak elde edilmiştir. Yine aynı şeklide yalpalama açısında eğilim birebir yakalanarak deneysel veriler ile 0,5 derecenin altında bir fark oluşmuştur. Deneysel veriler ile sayısal sonuçlar arasında çıkan bu küçük fark uygulanan yöntem farkından kaynaklanmaktadır. Her ne kadar mühimmat ayrılması problemi zamana bağlı bir problem olsa da rüzgâr tüneli deneyinde kullanılan CTS yöntemi her bir zaman adım için mühimmat üzerindeki kuvvetleri hesaplar iken zamana bağlı olmayan daimi akış üzerinden hesap yapmaktadır. Sayısal çözümde ise gerçek problemde olduğu gibi zamana bağlı çözüm elde edilmiştir. Sayısal çözüm ile CTS arasındaki bu küçük nicel farklılık yukarıda bahsedilen yöntem farklılığından kaynaklanmaktadır.

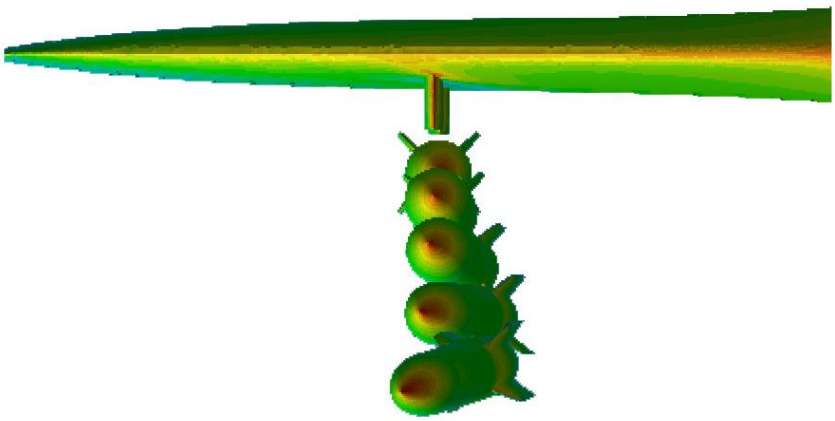


Şekil 3.22. *SST k-ω türbülans modelli 5.8 m çözüme ait öteleme değerleri*

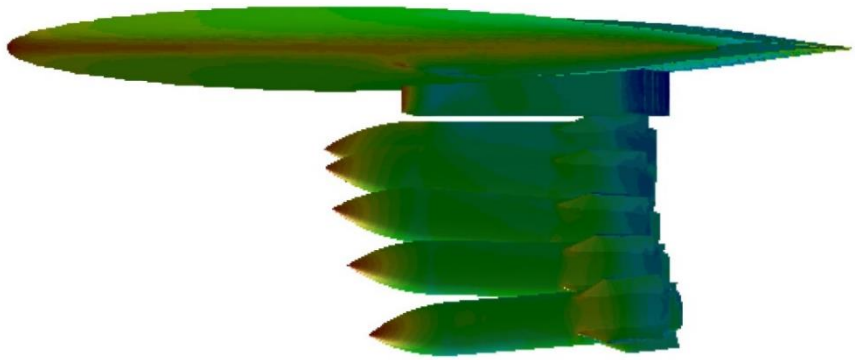


Şekil 3.23. *SST k-ω türbülans modelli 5.8 m çözüme ait dönme değerleri*

Şekil *3.24* ve **Şekil *3.25***'te mühimmatın zamana bağlı hareketi önden ve yandan gösterilmiştir.



Şekil 3.24. *Zamana bağlı mühimmat hareketi önden görünüş*



Şekil 3.25. *Zamana bağlı mühimmat hareketi yandan görünüş*

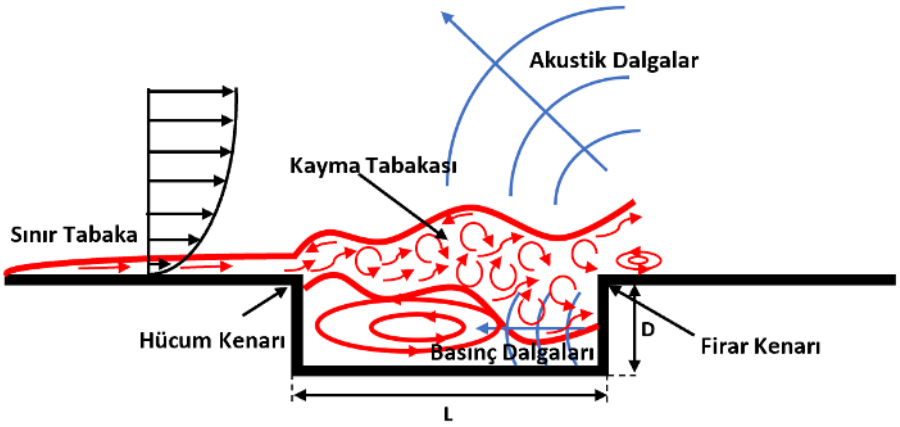
3.2. Kavite Akışı Doğrulama Çalışması

EGLIN deneysel çalışması sayısal olarak tekrar edilerek sayısal çözümün altı serbestlik dereceli hareket denklemleri çözümü doğrulanmıştır. İçeriden ayrılma dışarıdan ayrılmaya göre akış fiziği açısandan fakrlılık gösterdiği için kavite akışında doğrulanması gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Bu kapsamda denysel ve referans LES çalışması bulunan M219 kavite akışı kapaklı ve kapaksız olarak doğrulanmıştır.

3.2.1. Kapaksız temiz kavite akışı

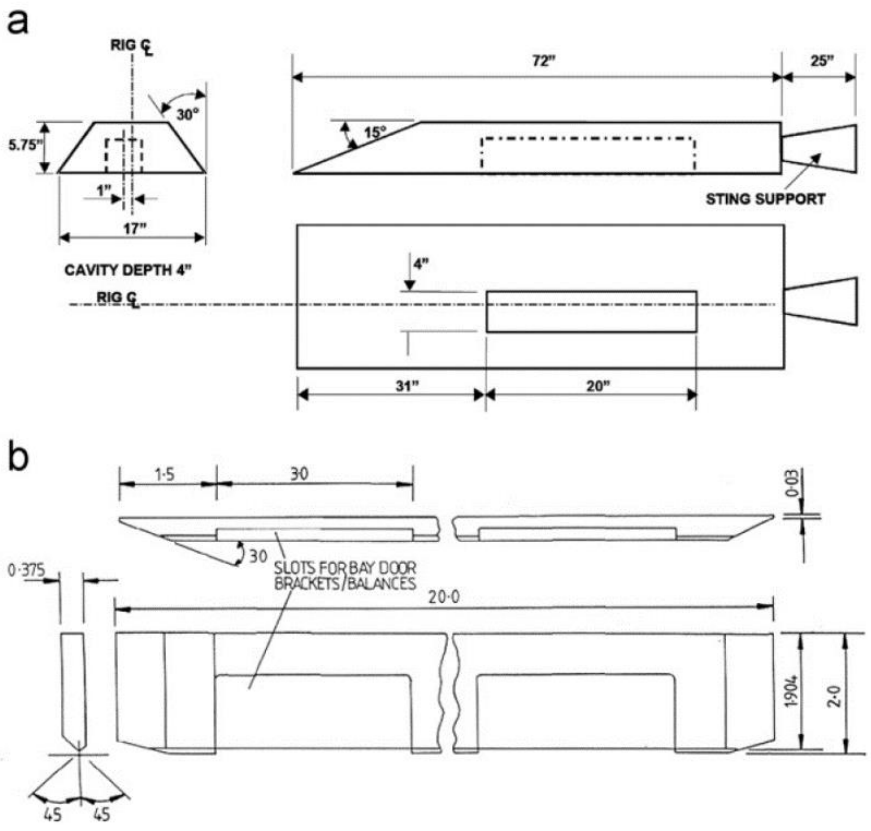
İçeriden bırakma çalışmalarına geçmeden önce mühimmatın ayrılacağı kavite akışını doğrulama çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Kavite akışı **Şekil *3.26***'da gösterildiği duvar üzerinde ilerleyen serbest akımın boşluk ile karşılaşması durumunda ortaya çıkan akış tipidir. Kavite akışta hücum kenarından kopan kayma tabakası kavite içerisinde karasız bir yapıya sahiptir. Yüksek enerjili karasız kayma tabakası firar kenarında ses basınç dalgaları oluşturmaktadır. Buda kavite akışı hem akış fiziği anlamında hem de aeroakustik anlmada oldukça karmaşık hale getirmektedir.

Literatürde M219 adıyla anılan deneysel kavite çalışması ile sayısal çözüm doğrulanmaya çalışılmıştır. M219 çalışması L/D ve L/W oranı 5 olan 0,85 Mach hızında temiz kavite ve pasif kontrol yöntemlerinin kullanıldığı bir deneysel çalışmadır (Nightingale, Ross ve Foster, 2005). Bu kapsamda **Şekil *3.27***'de gösterilen deney düzeneğindeki kavite geometrisi kullanılmıştır.

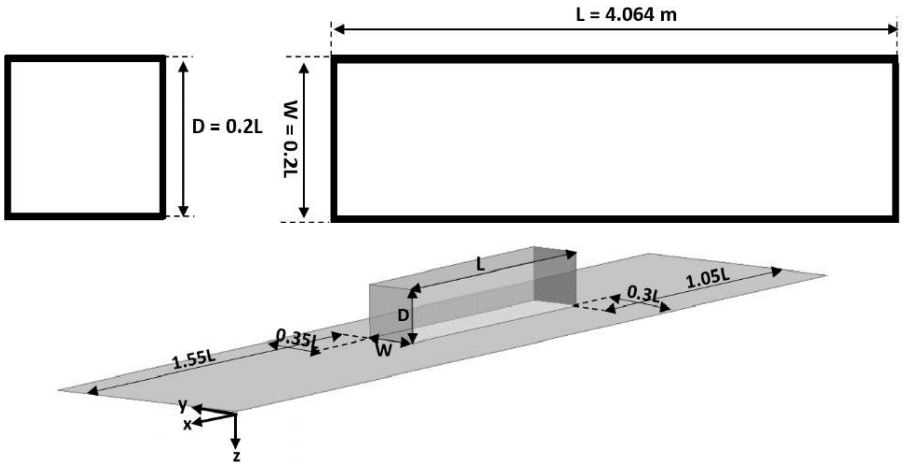


Şekil 3.26. *Kavite akışı genel gösterimi*

Rüzgâr tüneli deneyinde kullanılan **Şekil *3.27***'de gösterilen geometrinin tutacak ve alt kısımları çıkarılarak kavite ve kavite üstünde yer alan yüzey sadeleştirilerek sayısal geometri **Şekil *3.28***'de gösterildiği halde kullanılmıştır.

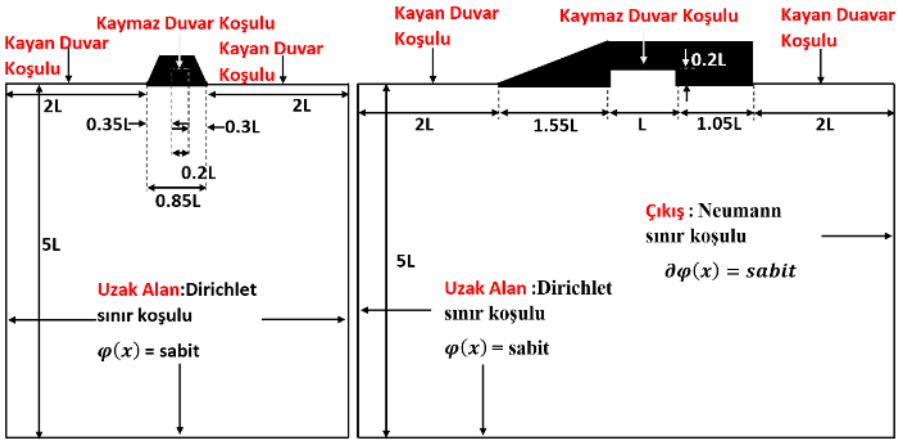


Şekil 3.27. *Deneysel M219 temiz kavite geometrisi (Nightingale, Ross ve Foster, 2005)*



Şekil 3.28. *M219 Temiz kavite geometrisi*

Şekil *3.28*'de gösterilen sadeleştirilmiş temiz kavite geometrisi dışarıdan bırakılan mühimmatın sığacağı şekilde L = 4,064 m olarak 8 kat ölçeklendirilmiştir. Ağ kalitesini ve kavite bölgesinde ağ yoğunluğunu artırmak için çözüm alanı literatürde de yer aldığı gibi daraltılmıştır. Lawson ve Barakos M219 kavite akışında sayısal çözüm için uzak alanın önden, arkadan ve yanlardan 2L üstten 5L kadar uzak olması doğru çözüm için yeterli olduğunu göstermişlerdir (Lawson ve Barakos, 2010). Bu doğrultuda oluşturulan çözüm alanı **Şekil *3.29***'de gösterilmektedir.



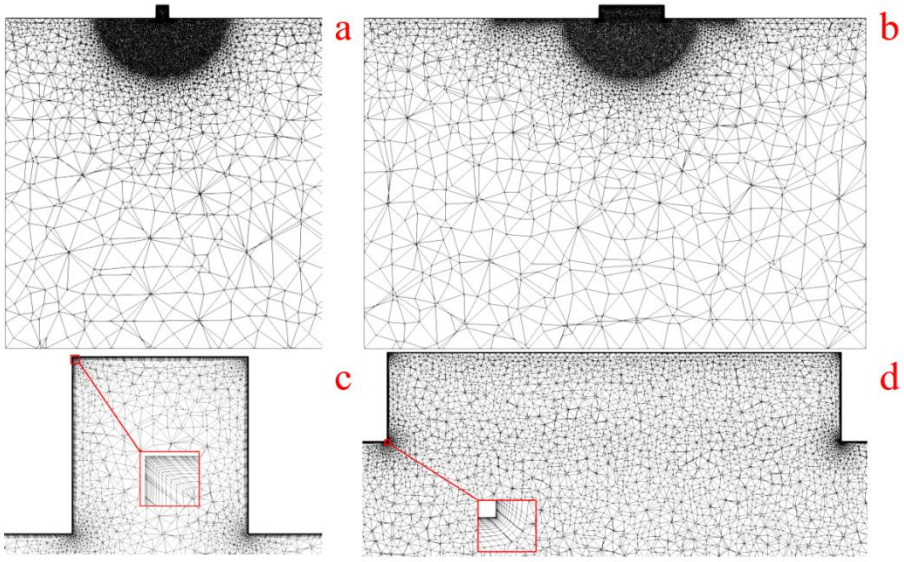
Şekil 3.29. *M219 Temiz kavite çözüm alanı*

Şekil *3.29*'de gösterilen çözüm alanı için uygulanan sınır şartları **Tablo *3.5***'de verilmiştir. Basınç ve sıcaklık için deneysel ortam koşulları olan 101325 Pa ve 288,15 K değerleri uygulanmıştır. Bu çözüm alanı için 5,3 milyon üçgensel hücreden oluşan minimum dikliği 0,1, maksimum çarpıklık değeri ise 0,87 civarında, y^+ değeri ise 100'ün altında gerçekleşmiştir. Bu ağ yapısına ait görüntüler **Şekil *3.30***'da verilmiştir. Bu ağ yapısı ile önce zamana bağlı olmayan daimi (steady state) SST k-ω türbülans modeli ile

çözüm yapılarak yakınsama sağlandıktan sonra zamana bağlı sürekli olmayan (transient) DES (detached eddy simulation) türbülans modeli ile çözüm gerçekleştirilmiştir. Zaman adımı Courant-Friedrichs-Lewy (CFL) değeri 5'in altında olacak şekilde $5x10^{-6}$ s olarak ayarlanmıştır. Bu çözümde basınç için PRESTO, momentum için ikinci dereceden Sınırlandırılmış Merkezi Farklar , yoğunluk, türbülans ve enerji denklemlerinde üçüncü dereceden MUSCL ayrıklaştırma şeması kullanılmıştır. Zaman türevinin ayrıklaştırılmasında ise Sınırlandırılmış İkinci Dereceden Örtülü ayrıklaştırma şeması kullanılmıştır.

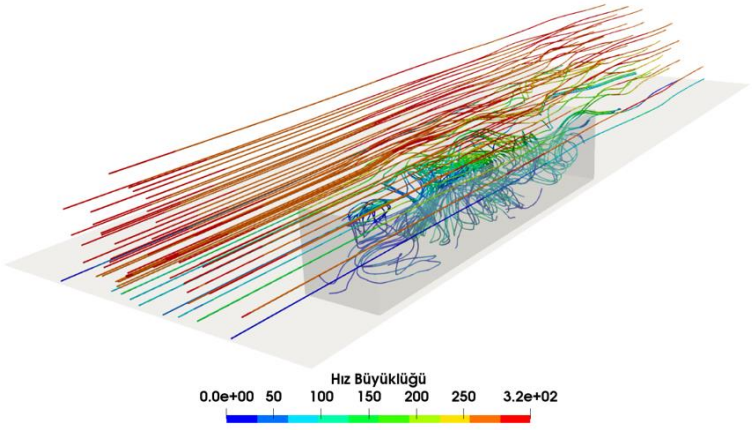
Tablo 3.5. *M219 temiz kavite sınır şartları*

Sınırlar	Uygulanan sınır şartları	Sınır şartları girdileri
farfields	Dirichlet sınır şartı Φ(x) = sabit	Mach number: 0.85 flow direction x − component: − 1 flow direction y − component: 0 flow direction z − component: 0 turbulence intensity: 2% turbulence viscosity ratio: 2
outlet	Neumann sınır şartı $\partial\varphi(x) = sabit$	outflow turbulence intensity: 5% outflow turbulence viscosity ratio: 10
slip	Kayan duvar (Specified shear)	Shear stress x component: 0 y component: 0 z component: 0
wall, cavity	Kaymaz adyabatik duvar	wall motion: stationary slip boundary condition: no − slip heat boundary condition: heat flux constant heat flux: 0.0 W/m^2

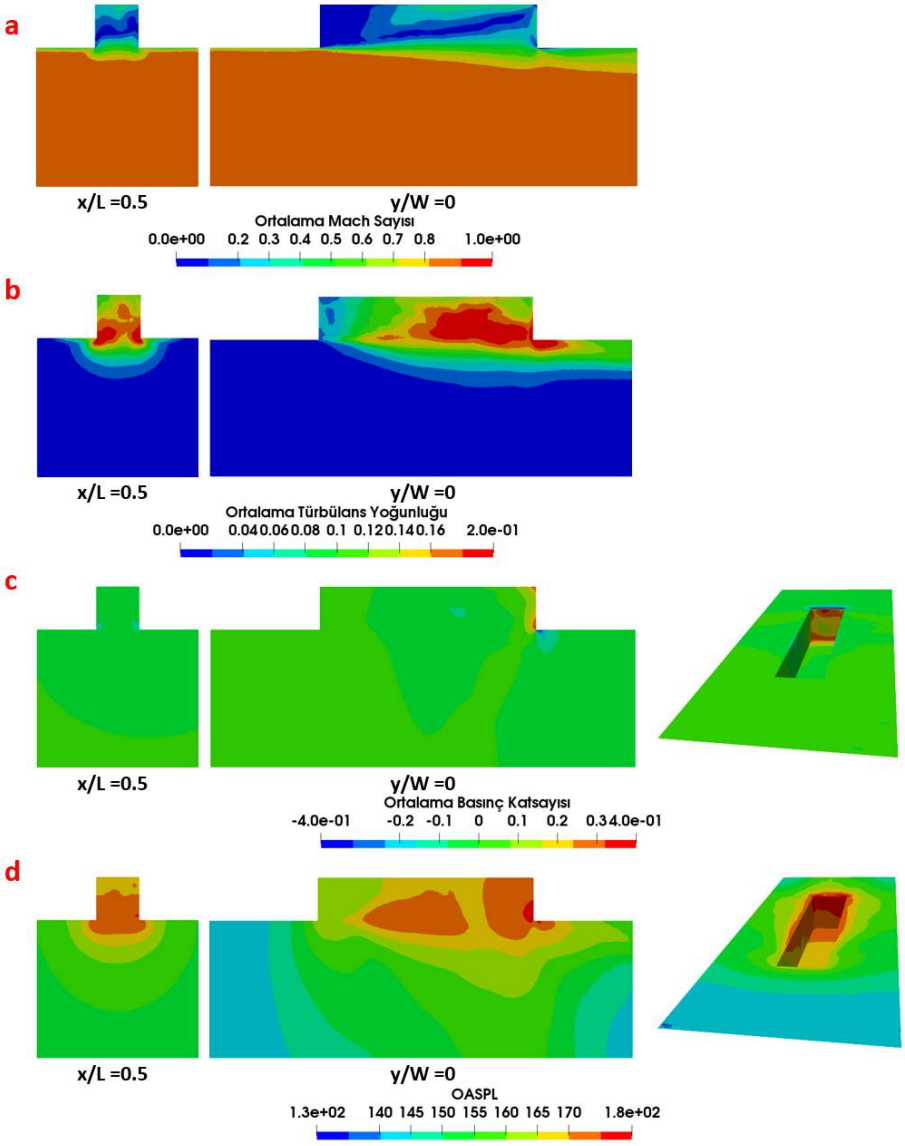


Şekil 3.30. *M219 temiz kavite sayısal çözüm alanı ağı a) önden tüm ağ görüntüsü, b) yandan tüm ağ görüntüsü, c) önden yakın görüntü, d) yandan yakın görüntü*

Sayısal çözümden elde edilen anlık akım çizgileri **Şekil *3.31***'de ve ortalama değerlere ait konturlar **Şekil *3.32***'de gösterilmektedir. Anlık akım çizgilerine bakıldığında kavite üzerinde akışın hızlanarak akım çizgilerinin bir birine yaklaştığı, kavite içerisinde ise akışın serbest akış hızının altına inerek akım çizgilerinin bir birinden uzaklaştığı görülmektedir. Hücum kenarından kopan kayma tabakasının kavite firar kenarına çarparak kavite içerisinde özellikle kavite arka bölgesinde oldukça yoğun türbülanslı ve kararsız bir akış oluşturduğu **Şekil *3.32***'de açıkça görülmektedir. Ayrıca kavite içerisindeki türbülanslı akış hız vektörünün her noktada anlık teğeti olarak tanımlanan akım çizgilerinden de görülmektedir. Maksimum ortalama türbülans yoğunluğu kavite firar kenarı etrafında % 25'in üstünde oluştuğu görülmektedir. Yine aynı şekilde maksimum ortalama basınç katsayısı ve ortalama ses basınç düzeyi olan OASPL (overall sound pressure level) değerleri firar kenarında oluşmakta olup bu değer 179,657 dB'dir.



Şekil 3.31. *M219 Temiz kavite sayısal çözüme (DES) ait akım çizgileri*

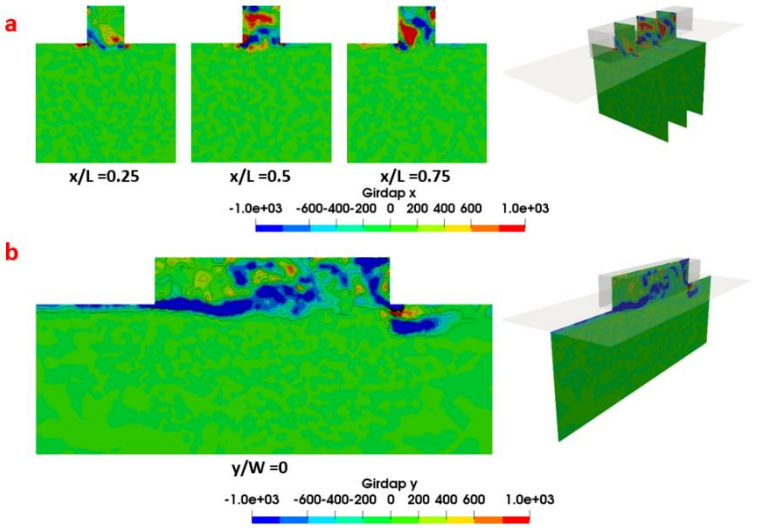


Şekil 3.32. *M219 Temiz kavite sayısal çözüme (DES) ait konturlar a) ortalama Mach sayısı, b) türbülans yoğunluğu, c) basınç katsayısı, d) OASPL*

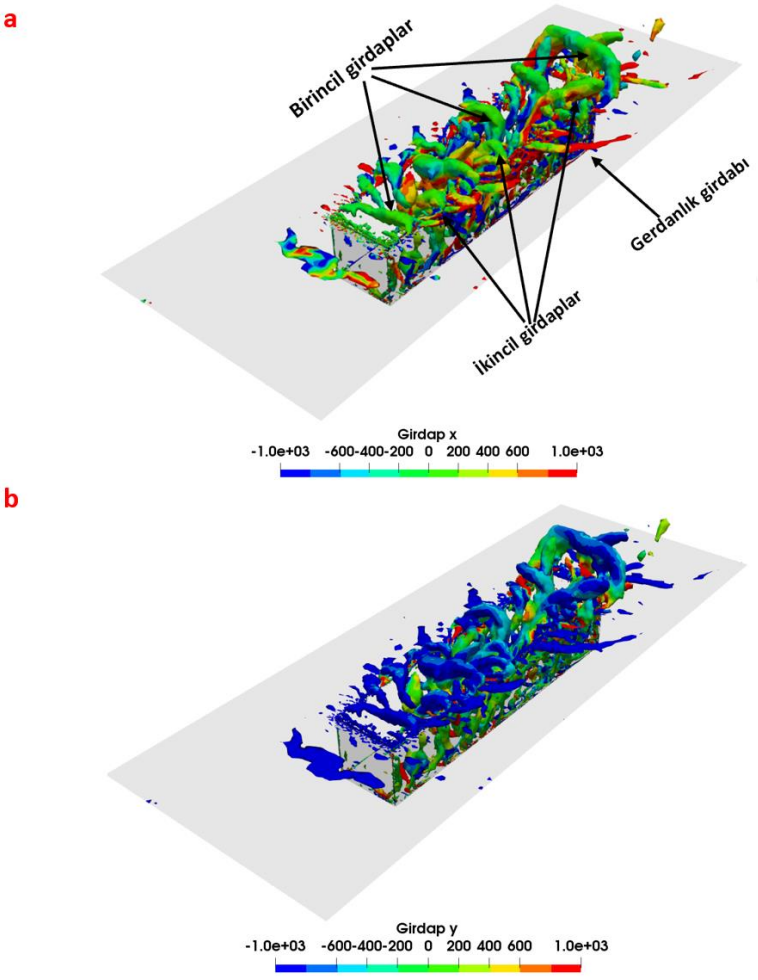
Şekil *3.33* ve **Şekil *3.34***'de sayısal çözümden elde edilen girdap yapıları görselleştirilmiştir. **Şekil *3.33***'de kavite boyunca hücum kenarından firar kenarına kadar 3 farklı noktadan kesit alınarak x-ekseni girdapları ve kavite genişliği boyunca kavite orta noktasından kesit alınarak y-ekseni girdapları görselleştrilmiştir. **Şekil *3.34***'de ise girdap yapılarını üç boyutlu göstermek adına Q-kriteri x-ekseni girdapları ve y-ekseni girdapları ile renklendirilmiştir. Bu iki şekilden açıkça görüleceği gibi kavite hücum kenarından ayrılan kayma tabakası kavite boyunca kavite ortasında sarmal tipte birincil girdap yapılarını oluşturmaktadır. Birincil sarmal tip girdaplar **Şekil *3.33***'ün b şıkında koyu mavi olarak kavite hücum kenarından saat yönünün tersi istikamette **Şekil *3.34***'ün b şıkkında saat yönünde kavite içerisine doğru dönerek geliştiği açık bir şekilde görülmektedir. Bununla birlikte birincil girdap yapılarının yanında ikincil girdap yapıları ve gerdanlık şekilli girdaplar oluşmaktadır. **Şekil *3.33***'in a şıkkında kavite arka bölgesinde x ekseni etrafında bir birine ters yönde dönen girdapların oluştuğuda görülmektedir.

Q-kriteri hız gradyantı olan ∇u'nun pozitif ikinci sabiti olarak tanımlanır ve denklem 3.1'ile gösterilir (Kolar, 2007). Girdap büyüklüğünün gerinim oranı büyüklüğünden büyük olduğu bölgeyi temsil etmektedir. Bu çalışmada ANSYS Flunent yazılımnından elde edilen hız değerleri kullanılarak ParaView son işleme programı yardımıyla Q-kriterleri hesaplatılmıştır. Girdap yapılarını üç-boyutlu olarak görselleştirmede kullanılan Q-kriterleri için pozitif değer olan $2x10^5$ sınır değer olarak alınmıştır. Ana yapıların görülebilmesi amacıyla bu değerin üstündeki yapılar gösterilmiş altında kalan girdap yapıları gösterilmemiştir.

$$Q \equiv \frac{1}{2}(\|\bar{\Omega}\|^2 - \|\bar{S}\|^2) > 0 \tag{3.1}$$

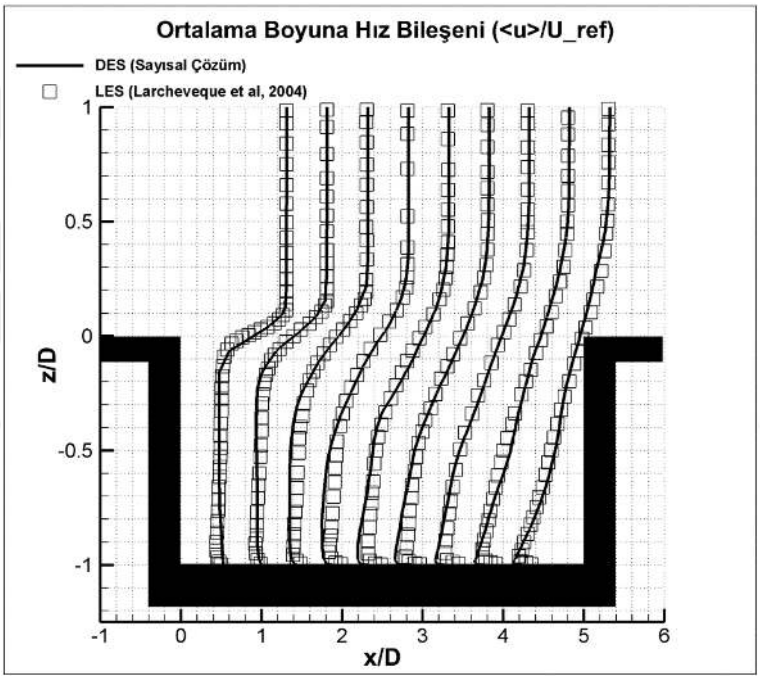


Şekil 3.33. *M219 Temiz kavite sayısal çözüme (DES) ait girdap konturları a) x ekseni etrafında oluşan girdaplar, b) y ekseni etrafında oluşan girdaplar*

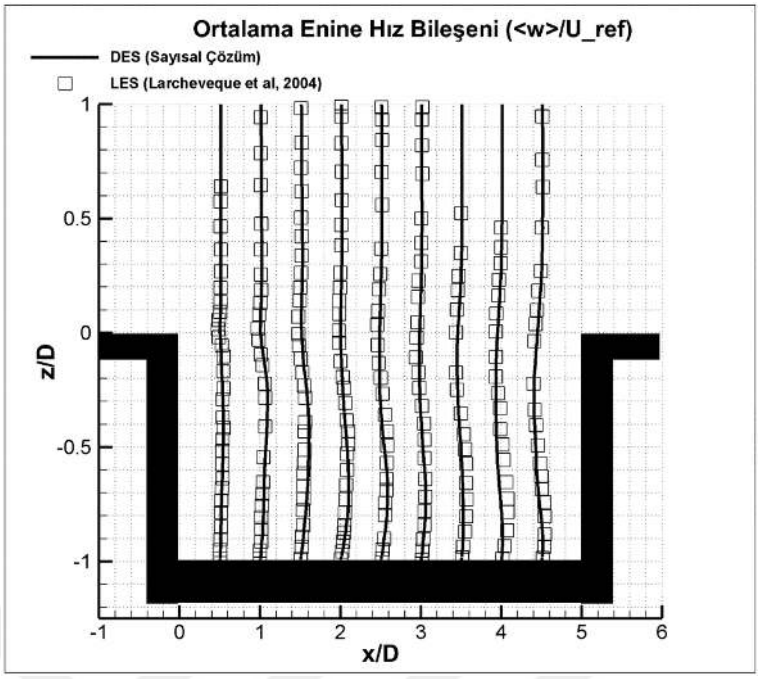


Şekil 3.34. *M219 Temiz kavite sayısal çözüme (DES) ait eş yüzey Q-kriteri yapıları a) girdap-x ile renklendirme, b) girdap-y ile renklendirme*

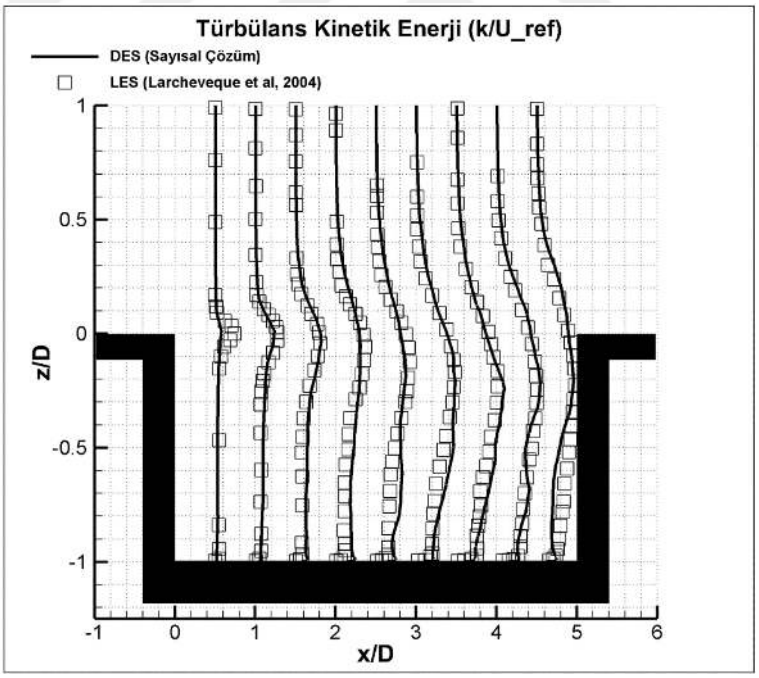
M219 temiz kavite geometrisi sayısal çözümünden elde edilen hız, türbülans kinetik enerji ve Reynolds gerilme profilleri deneysel veriler olmadığı için referans sayısal LES çalışması (Larcheveque vd., 2004) ile karşılaştırılmıştır. **Şekil *3.35***'te yatay **Şekil *3.36***'te ise düşey hız profilleri kavite boyunca referans değerler ile birlikte sunulmaktadır. Görüldüğü gibi bu çalışmadan elde edilen sayısal sonuçlar referans sayısal sonuçlar ile örtüşmektedir. **Şekil *3.37*** ve **Şekil *3.38***'de ise türbülans değerleri karşılaştırılmıştır. Türbülans kinetik enerji değerleri referans değerler ile uyum içerisinde olmasına karşın Reynolds gerilme değerleri kavite ortasında referans değerlerden sapmaktadır. Nitel olarak eğilimler benzer olsa da nicel olarak küçük bir farklılık görülmektedir.



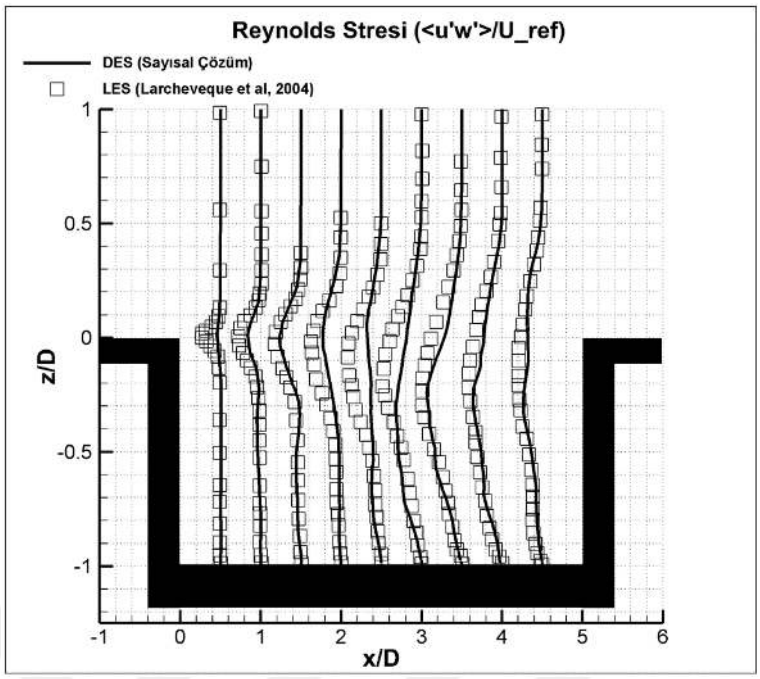
Şekil 3.35. *M219 Temiz kavite DES çözümüne ait sonuçların referans LES çalışması ile yatay hız profili karşılaştırılması*



Şekil 3.36. *M219 Temiz kavite DES çözümüne ait sonuçların referans LES çalışması ile dikey hız profili karşılaştırılması*



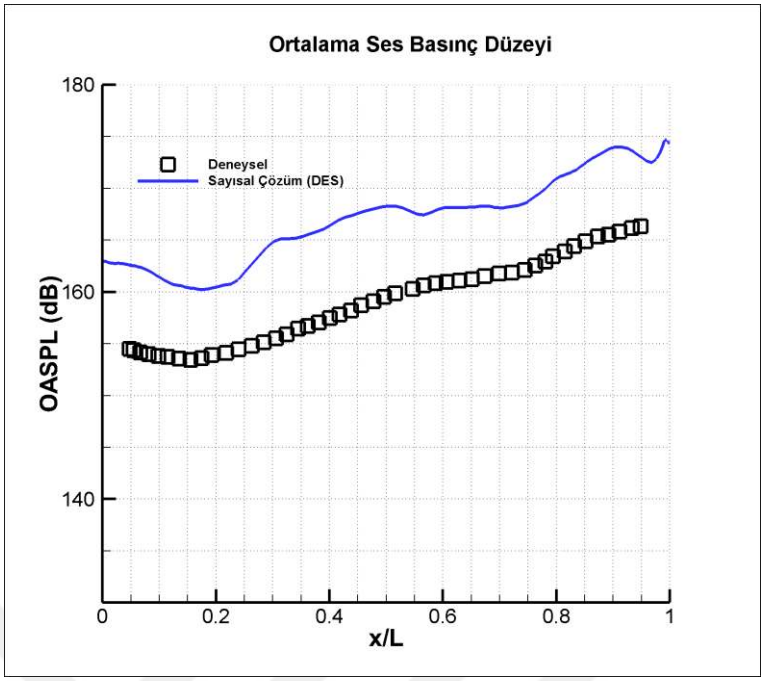
Şekil 3.37. *M219 Temiz kavite DES çözümüne ait sonuçların referans LES çalışması ile türbülans kinetik enerji profili karşılaştırılması*



Şekil 3.38. *M219 Temiz kavite DES çözümüne ait sonuçların referans LES çalışması ile Reynolds gerilme profili karşılaştırılması*

Bu sayısal çözümde kavite tabanından elde edilen ses basınç düzeyleri (OASPL) deneysel veriler ile **Şekil *3.39***'teki gibi karşılaştırılmıştır. Ses basınç düzeyi hesaplaması denklem 3.2 ile verilmiştir (Lawson ve Barakos, 2010). Bu değerler kavite tabanı boyunca deneysel verilerden ortalama 5 dB kadar daha büyük bulunmuştur. Literatürde daha önce gerçekleştirilen birçok temiz kavite sayısal çalışmalarda (Lawson ve Barakos, 2010; Nayyar, Barakos ve Badcock, 2007; Barakos vd., 2009a; 2009b; Demircan vd., 2018; Güleren vd., 2018) ses basınç düzeyleri deneysel verilerden daha büyük çıkmıştır.

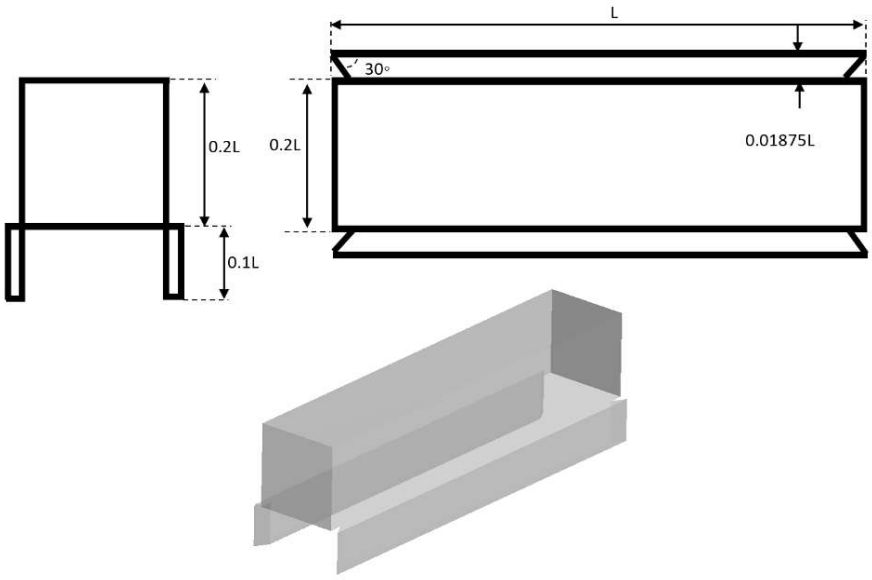
$$OASPL = 20log\left|\frac{p'_{rms}}{p_{ref}}\right| \tag{3.2}$$



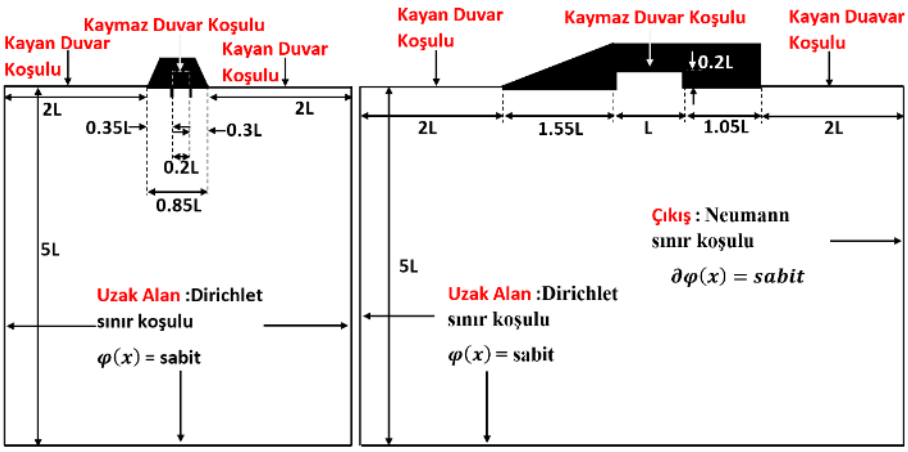
Şekil 3.39. *M219 Temiz kavite tabanı OASPL karşılaştırması*

3.2.2. Kapaklı temiz kavite akışı

Kavite içerisinden mühimmat bırakma analizleri kapaklı kaviteden gerçekleştirileceği için kapaklı M219 geometrisi için de kapaksız temiz kavite çözümünün aynısı gerçekleştirilmiştir. **Şekil *3.40***'da temiz kaviteye eklenen kapak geometrisi gösterilmektedir. Bu geometri için oluşturulan sayısal çözüm alanı **Şekil *3.41***'daki gibidir.

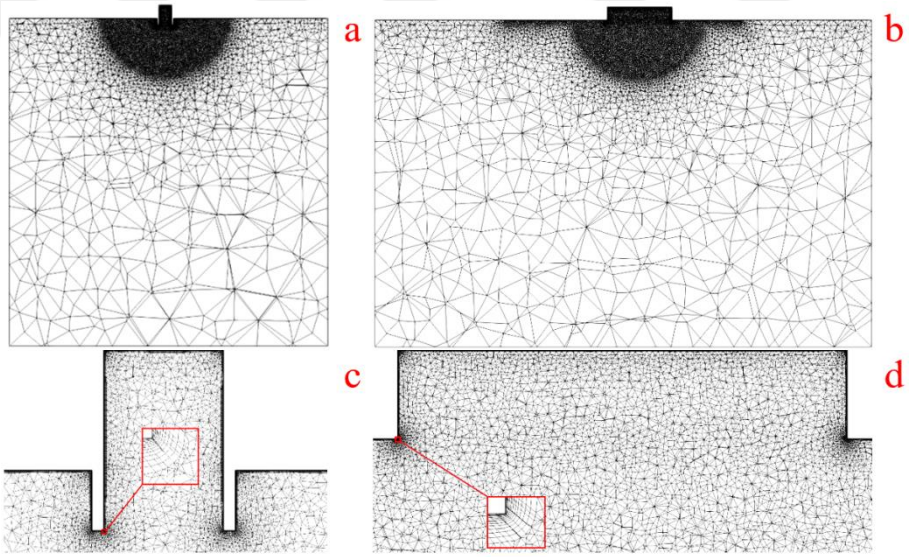


Şekil 3.40. *M219 Kapaklı temiz kavite geometrisi*



Şekil 3.41. *M219 Kapaklı temiz kavite çözüm alanı*

Oluşturulan bu çözüm alanı için kullanılan sınır şartları kapaksız temiz kavite için kullanılan ile aynı olup (**Tablo *3.5***) kapaklar için kaymaz duvar sınır şartı eklenmiştir. Kapaksız temiz kavite geometrisinde olduğu gibi 6,4 milyon üçgensel hücreden oluşan minimum dikliği 0,1, maksimum çarpıklık değeri 0,89 civarında, y^+ değeri ise 100'ün altında olan bir ağ yapısı oluşturulmuştur. Bu ağ yapısı **Şekil *3.42*** ile gösterilmektedir.

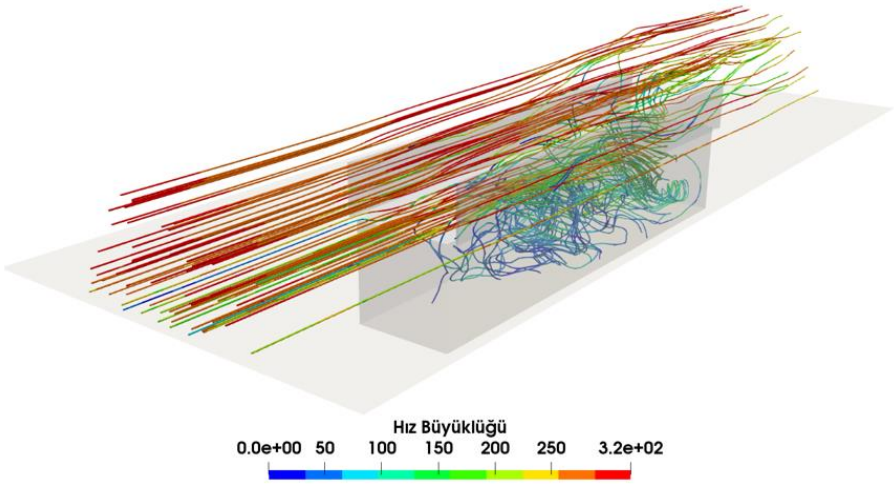


Şekil 3.42. *M219 Kapaklı temiz kavite sayısal çözüm alanı ağı a) önden tüm ağ görüntüsü, b) yandan tüm ağ görüntüsü, c) önden yakın görüntü, d) yandan yakın görüntü*

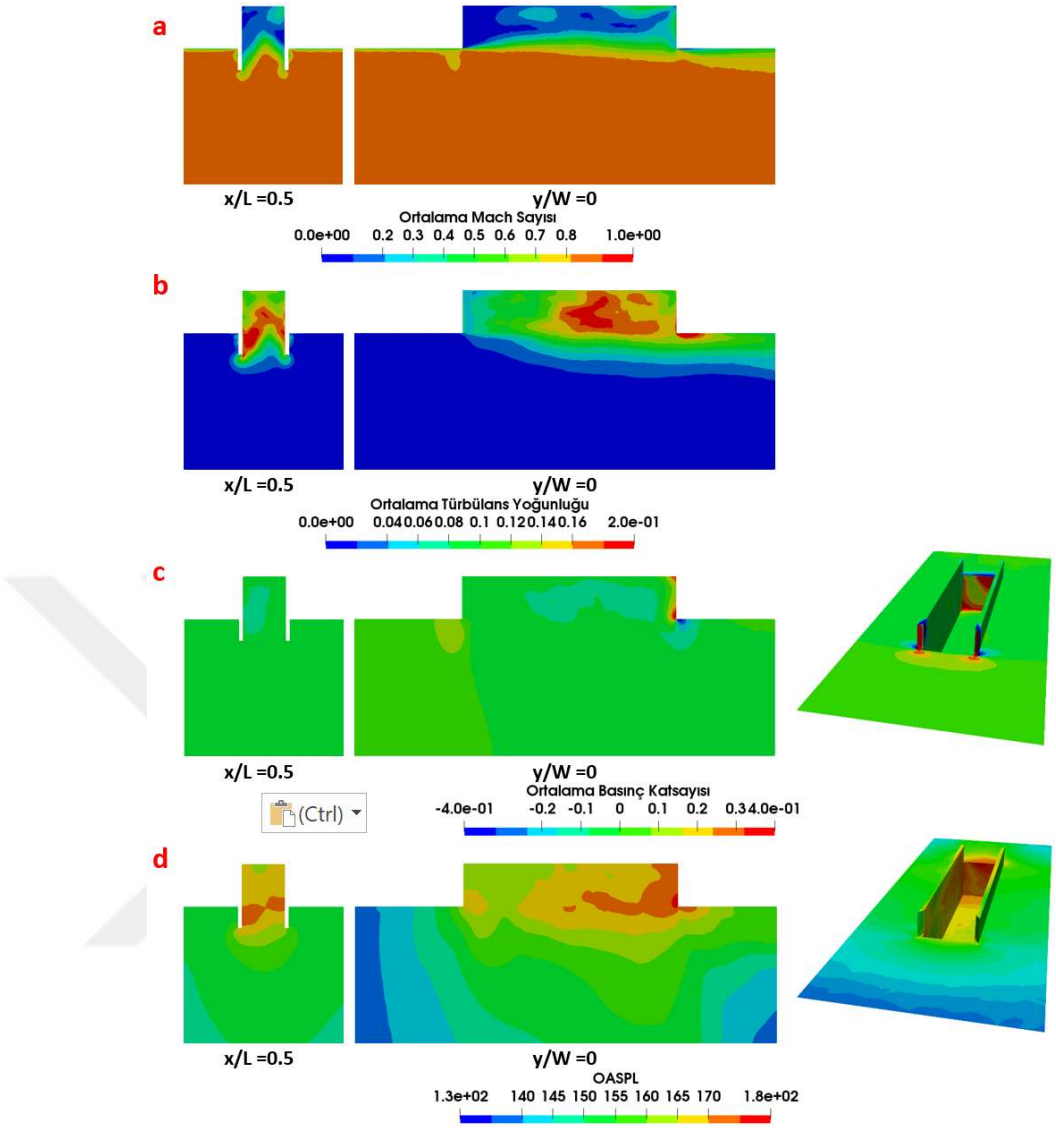
Bu çözüm alanı içinde aynı ayrıklaştırma yöntemi kullanılarak sayısal çözüm elde edilmiştir. Sayısal çözümden elde edilen anlık akım çizgileri **Şekil *3.43***'de ve ortalama değerlere ait konturlar **Şekil *3.44***'te gösterilmektedir. Kavite içerisindeki düzensiz türbülanslı akış, kapaksız geometride olduğu gibi akım çizgilerinden ve türbülans

yoğunluğundan açıkça görülmektedir. Kapaksız geometride olduğu gibi maksimum ortalama türbülans yoğunluğu kavite firar kenarı etrafında % 25'in üstünde oluşmasına rağmen kapaksız geometriye göre bir miktar düşmektedir. Yine aynı şekilde maksimum OASPL değerleri firar kenarında oluşmakta olup bu değer 179,646 dB'dir. Maksimum ortalama basınç katsayısı ise serbest akıma dik konumda olan kapakların ön tarafında oluşmuştur.

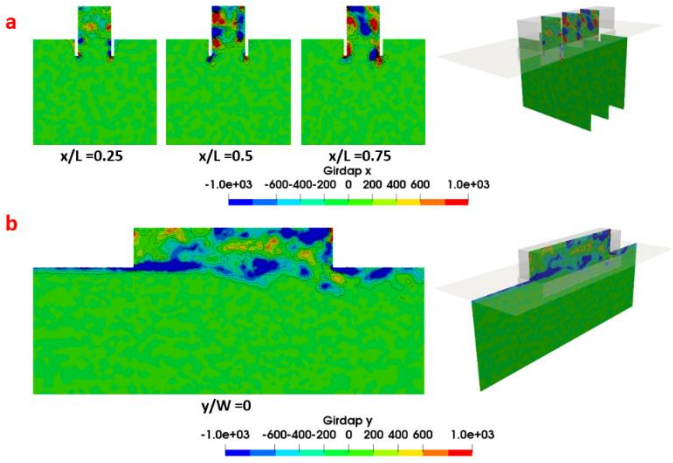
Şekil *3.45* ve **Şekil *3.46***'de M219 kapaklı temiz kavite sayısal çözümden elde edilen girdap yapıları görselleştirlmiştir. **Şekil *3.45***'de kavite boyunca hücum kenarından firar kenarına kadar 3 farklı noktadan kesit alınarak x-ekseni girdapları ve kavite genişliği boyunca kavite orta noktasından kesit alınarak y-ekseni girdapları görselleştrilmiştir. **Şekil *3.46***'de ise girdap yapılarını üç boyutlu göstermek adına Q-kriteri x-ekseni girdapları ve y-ekseni girdapları ile renklendirilmiştir. Kapaksız temiz kavite geometrisinde olduğu gibi kavite içerisinde kavite hücum kenarından firar kenarında doğru sarmal birincil ve ikincil girdap yapıları oluşmuştur. Kapaklı geometride ayrıca kapakların ön kısımlarında at nalı girdabı ile kapakların üst kenralarında uç girdapları görülmektedir. Ayrıca kapakların uç kısımlarında sarmal tip girdap yapılarının dışında baloncuk tipi girdaplar da görülmektedir.



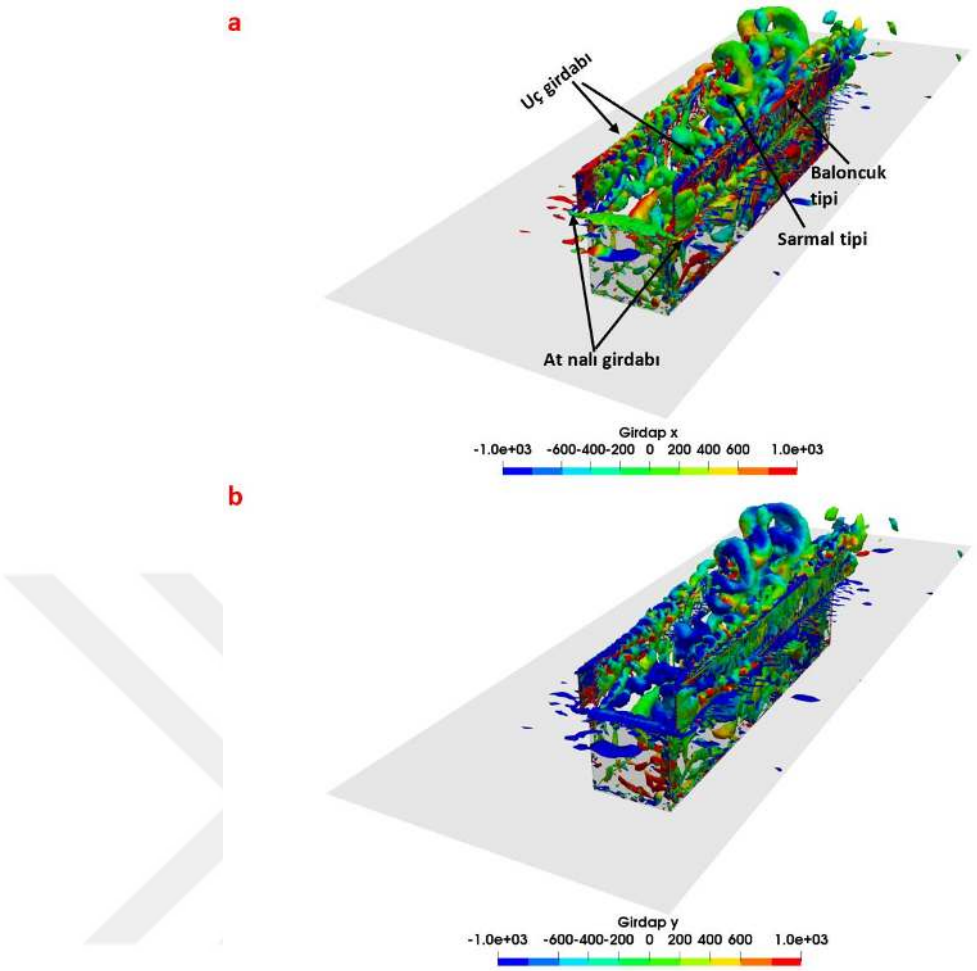
Şekil 3.43. *M219 Kapaklı temiz kavite sayısal çözüme (DES) ait akım çizgileri*



Şekil 3.44. *M219 Kapaklı temiz kavite sayısal çözüme (DES) ait konturlar a) ortalama Mach sayısı, b) türbülans yoğunluğu, c) basınç katsayısı, d) OASPL*

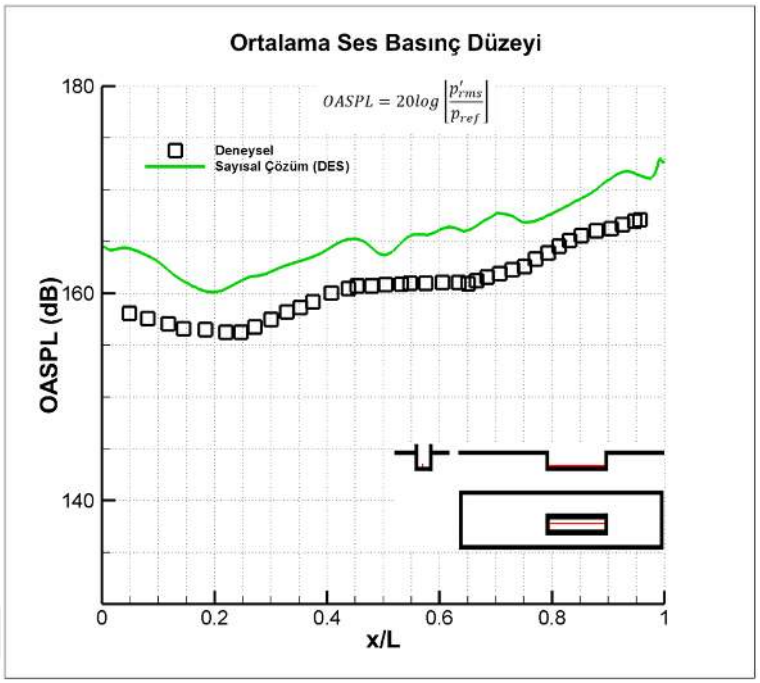


Şekil 3.45. *M219 Kapaklı temiz kavite sayısal çözüme (DES) ait girdap konturları a) x ekseni etrafında oluşan girdaplar, b) y ekseni etrafında oluşan girdaplar*



Şekil 3.46. *M219 Kapaklı temiz kavite sayısal çözüme (DES) ait eş yüzey Q-kriteri yapıları a) girdap-x ile renklendirme, b) girdap-y ile renklendirme*

Kapaksız temiz kavitede olduğu gibi kapaklı geometri çözümünden elde edilen OASPL değerleri deneysel değerler ile **Şekil *3.47***'daki gibi karşılaştırılmıştır. Kapaksız çözümde olduğu gibi sayısal DES çözümü deneysel veriler ile aynı eğilimde olmakla birlikte ortalama 3 dB daha büyük hesaplamıştır.



Şekil 3.47. *M219 Kapaklı temiz kavite tabanı OASPL karşılaştırması*

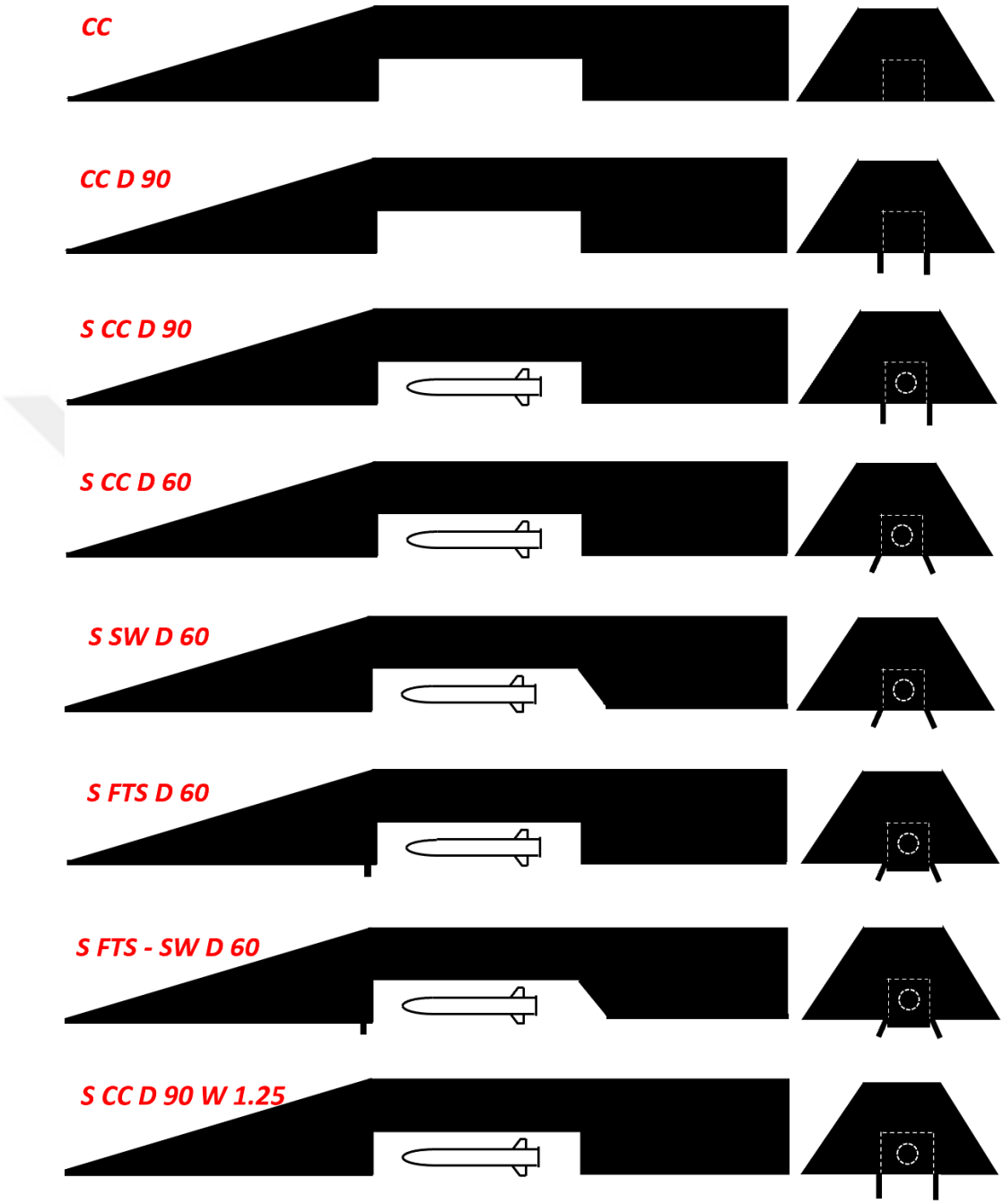
Hem **Şekil *3.35*-Şekil *3.38*** referans LES çalışması ile akış parametrelinin uyumu hem de **Şekil *3.39*** ve **Şekil *3.47***'daki ses basınç düzeylerinin deneysel veriler ile olan uyumu kavite içi doğrulama çalışmaları için yeterli görülmüştür. Bu bölümde kavite içi akış çözümü doğrulanmakla birlikte mühimmatsız boş kavite sayısal çözümü için referans oluşturulmuştur. Çalışmanın ilerleyen bölümlerinde mühimmatlı ve akış kontrol yöntemli kavite akışları temiz kavite akış ile karşılaştırılarak kavite akışa etkileri de gözlemlenmiştir.

4. KAVİTE İÇİNDEN MÜHİMMAT AYRILMASI

Dışarıdan mühimmat ayrılması çalışmaları sonrasında kavite akışın doğrulanması ile hem altı serbestlik dereceli hareket denklemleri ve kavite içerisindeki akış çözümü doğrulanmıştır. Doğrulama sonrası kavite içerisinden mühimmat ayrılması çalışmalarına geçilmiştir. Yapılan tüm analizlerde önce 0,2 s boyunca hareketsiz olarak çözüm gerçekleştirilmiş daha sonra 0,5 s kadar hereketli çözüm gerçekleştirilmiştir. Bu bölümde öncelikle hiçbir akış kontrol yönteminin uygulanmadığı (temiz kavite) mühimmat için M219 deney şartlarında hareketsiz çözüm gerçekleştirilmiştir. Bu çözümünün sonucu kapaklı temiz kavite sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Daha sonra bu çözüm 10.000 feet irtifa şartları için tekrarlanarak hareketli şekilde akış kontrol yöntemin uygulanmadığı temiz kaviteden mühimmat ayrılması çözümü gerçekleştirilmiştir. Literatürde R. W. Rainey tarafından gerçekleştirilen çalışmada mühimmat ayrılmasında 10.000 feet irtifa koşullarının daha yüksek irtifa koşullarına göre daha karasız yörüngeler oluşturduğu ortaya konmuştur (Rainey, 1954). Bu nedenden ötürü 10.000 feet irtifa koşulları olan 69681,66 Pa ve 268,3 K değerleri kavite içerisinden mühimmat ayrılma ortam şartları olarak belirlenmiştir. Akış kontrolü olmadan kavite içi mühimmat ayrılma analizinden sonra pasif kontrol yöntemlerinin kullanıldığı analizler gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda yürütülen tüm sayısal analizlerde DES türbülans modeli kullanılmıştır. Bu çalışmalarda M219 kavite çalışmasında olduğu gibi CFL değeri 5'in altnda tutmak için zaman adımı $5x10^{-6}$ s olarak ayarlanmış ve ikinci ve üçüncü dereceden ayrıklaştırma yöntemleri kullanılmıştır. Kullanılan ağ yoğunluklarının fazla ve zaman adımının küçük olması çalışmaların çözüm sürelerini oldukça pahalı hale getirmiştir. Bu bölümdeki ortalama 8 milyon ağ yoğunluğuna sahip bir çözümün önce hareketsiz daha sonra hareketli olacak şekilde çözüm süresi 40 çekirdekten oluşan 5 adet makine ile 15 gün sürmüştür. Bu bölümdeki bir benzetimin yaklaşık çözüm maliyeti 72.000 işlemci-saattir. Bu sayısal benzetimler Ulusal Yüksek Başarımlı Hesap Merkezinde (UheM) bulunan High Performance Computing (HPC) sistemi ile gerçekleştirilmiştir.

Bu bölümde yürütülen çalışmalar için kısaltılmış isimler kullanılmıştır. Bu isimlerin ilk bileşeni mühimmatı, ikinci bileşeni kavite yapısını, üçüncü bileşeni kapağı, dördüncü bileşeni kapak açısını, beşinci bileşen genişlik derinlik oranını ve son bileşen ise irtifayı temsil etmektedir. Genişlik derinlik oranı belirtilmeyen isimlendirmelerde bu oran 1'dir. Örneğin S-SW-D-60-A adıyla anılan çalışma; 10000 feet'te mühimmatlı

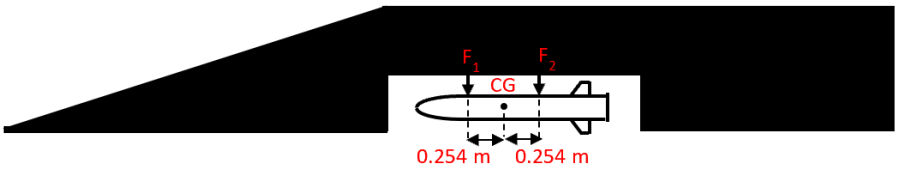
eğimli arka duvar, genişlik-derinlik oranı 1 olan ve 60 derece açıya sahip kapaklı kavite çalışmasına işaret etmektedir. Bu isimlendirmelerin şekilsel gösterimi aşağıdaki gibidir.



Şekil 4.1. *Mühimmatlı ve mühimmatsız sayısal çözümlerin isimlendirme gösterimi*

Bu bölümde gerçekleştirilen tüm sayısal çözümlerde **Şekil *4.2***'de gösterildiği gibi mühimmatın ağırlık merkezine iki taraftan eşit uzaklıkta başlangıç momenti oluşturmayacak ve 40 kN büyüklüğünde olacak şekilde eşit kuvvetler uygulanarak bırakılmıştır. Uygulanan bu başlangıç fırlatma kuvvetleri kanat altından bırakma

çalışmasında olduğu gibi 0,05s kadar uygulanmıştır. EGLIN deneysel çalışmasında uygulanan kuvvetler mühimmatın başlangıçta burun yukarı yaptıracak bir şekilde ağırlık merkezine eşit uzaklıklarda uygulanmamıştır. İçeriden mühimmat ayrılmasında mühimmatın izleyeceği yörüngenin başlangıç momentinden bağımsız olması için kuvvetler ağırlık merkezinden eşit uzaklıkta ve eşit büyüklükte uygulanmıştır. EGLIN deneysel doğrulama çalışmasında olduğu gibi mühimmata ve fırlatma kuvvetine ait değerler EK-2'de sunulan bir kod parçası ile ANSYS Fluent yazılımına eklentilenmiştir.



Şekil 4.2. *Mühimmata uygulanan fırlatma kuvvetleri gösterimi*

İçeriden mühimmat ayrılması kapsamında yütütülen çalışmada kullanılan ağ özellikleri **Tablo *4.1***'de sunulmuştur. Sınır tabaka bölgesinde y+ değeri 100'ün altında olacak şekilde üçgen prizma sınır tabaka dışında üçgensel dört yüzlü hücrelerden oluşmaktadır. Oluşturulan ağlar için kullanılan sınır şartları kapaklı ve kapaksız temiz kavite için kullanılan ile aynı olup (**Tablo *3.5***) kapaklar ve mühimmat için kaymaz duvar sınır şartı eklenmiştir.

Tablo 4.1. *İçeriden mühimmat ayrılması ağ özellikleri*

	Hücre sayısı	Çarpıklık	Diklik
S CC D 90	8,2 milyon	0,87	0,14
S CC D 60	8,2 milyon	0,89	0,12
S SW D 60	8,6 milyon	0,89	0,12
S FTS D 60	8,4 milyon	0,89	0,12
S FTS SW 60	8,9 milyon	0,89	0,12
S CC D 90 W 1.25	8,9 milyon	0,87	0,14

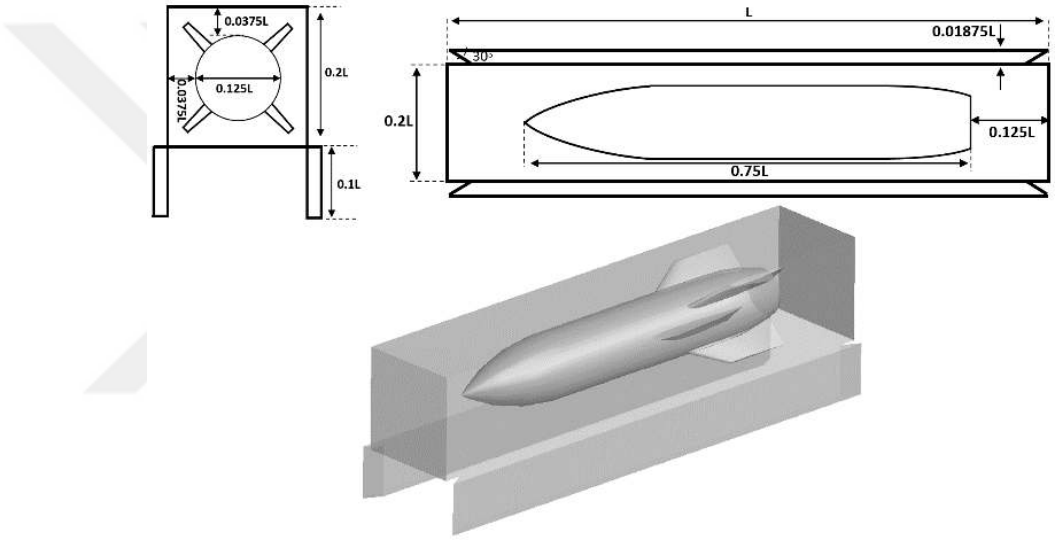
4.1. Mühimmat ve 90 Derece Açıya Sahip Kapaklı Temiz Kavite (S CC D 90)

Çalışmanın bu bölümünde S CC D 90 için sayısal çözüm gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda hareketsiz ve hareketli olmak üzere iki başlık oluşturulmuştur. Hareketsiz sayısal çözümde daha önce gerçekleştirilen kavite doğrulama çalışmasında olduğu gibi geometri ve ağ oluşturulup aynı sayısal çözüm metodu kullanılarak hareketsiz çözüm gerçekleştirilmiş ve mühimmatsız çözüm ile kıyaslanmıştır. Kıyaslamanın yapılması için

hareketsiz sayısal çözüm önce mühimmatsız çözümde olduğu gibi M219 denysel çalışması ortam şartlarında gerçekleştirilmiş daha sonra mühimmat ayrılmasının gerçekleştirileceği irtifa şartlarında tekrar edilmiştir.

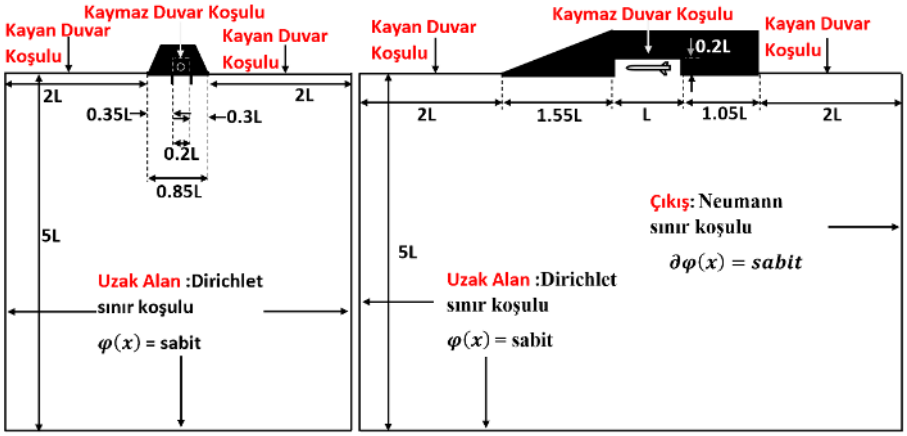
4.1.1. Hareketsiz sayısal çözüm

Bu bölümde kanat altı dışarıdan mühimmat bırakma analizlerinde kullanılan jenerik mühimmat kavite içerisine yerleştirilmiş olup, M219 deneysel çalışması ortam şartlarında hareketsiz sayısal çözüm gerçekleştirilmiştir. Jenerik mühimmata ait geometrik şekil ve özellikler **Şekil *3.1***, **Tablo *3.2*** ve **Tablo *3.1***'de verilmiştir. Tam ölçekli mühimmat ve kapaklı temiz kavite geometrisi ise **Şekil *4.3***'de verilmiştir.

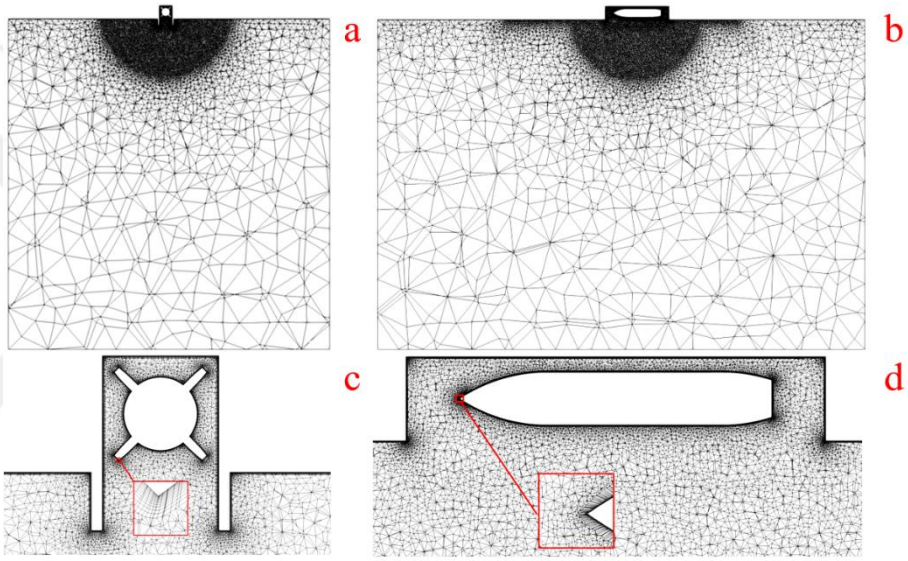


Şekil 4.3. *S CC D 90 sayısal çözüm geometrisi*

Şekil *4.3*'de gösterilen kapaklı temiz kavite içerisine yerleştirilen mühimmatlı geometri için oluşturulan çözüm alanı **Şekil *4.4*** ve bu çözüm alnına ait ağ yapısı **Şekil *4.5***'te verilmiştir.

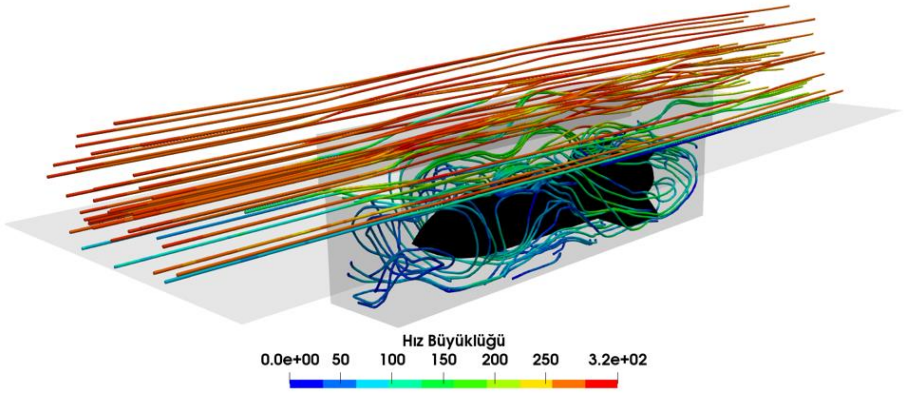


Şekil 4.4. *S CC D 90 sayısal çözüm alanı*

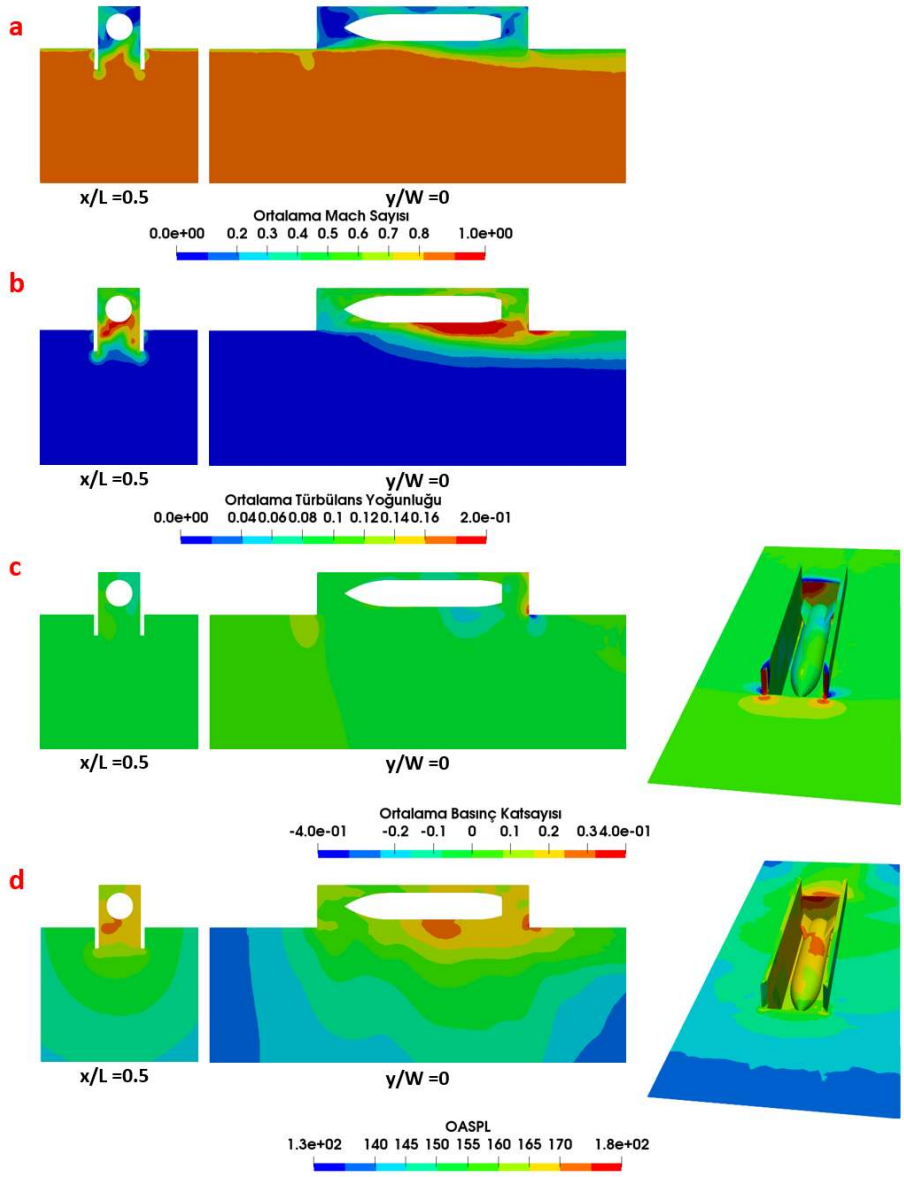


Şekil 4.5. *S CC D 90 sayısal çözüm alanı ağı a) önden tüm ağ görüntüsü, b) yandan tüm ağ görüntüsü, c) önden yakın görüntü, d) yandan yakın görüntü*

Sayısal çözümden elde edilen anlık akım çizgileri **Şekil *4.6***'te ve ortalama değerlere ait konturlar **Şekil *4.7***'da gösterilmektedir. Mühimmatsız kapaklı temiz kavitede olduğu gibi akım çizgilerinin kavite üzerinde bir birlerine yaklaştığı kavite içerisinde ise uzaklaştığı görülmektedir. Türbülansın benzer şekilde kavite arka bölgesinde yoğunlaştığı görülmektedir. Mühimmatsız kapaklı temiz kaviteye göre mühimmatlı çözümde maksimum OASPL değeri kavite firar kenarı üzerinde değilde mühimmat üzerinde gerçekleşmiştir. S CC D 90 çözümde kavite üzerinde oluşan maksimum OASPL değeri 177,603 dB iken mühimmat üzerinde oluşan maksimum OASPL değeri 179,379 dB olmuştur.

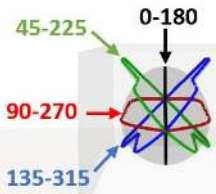


Şekil 4.6. *S CC D 90 sayısal çözüme (DES) ait akım çizgileri*



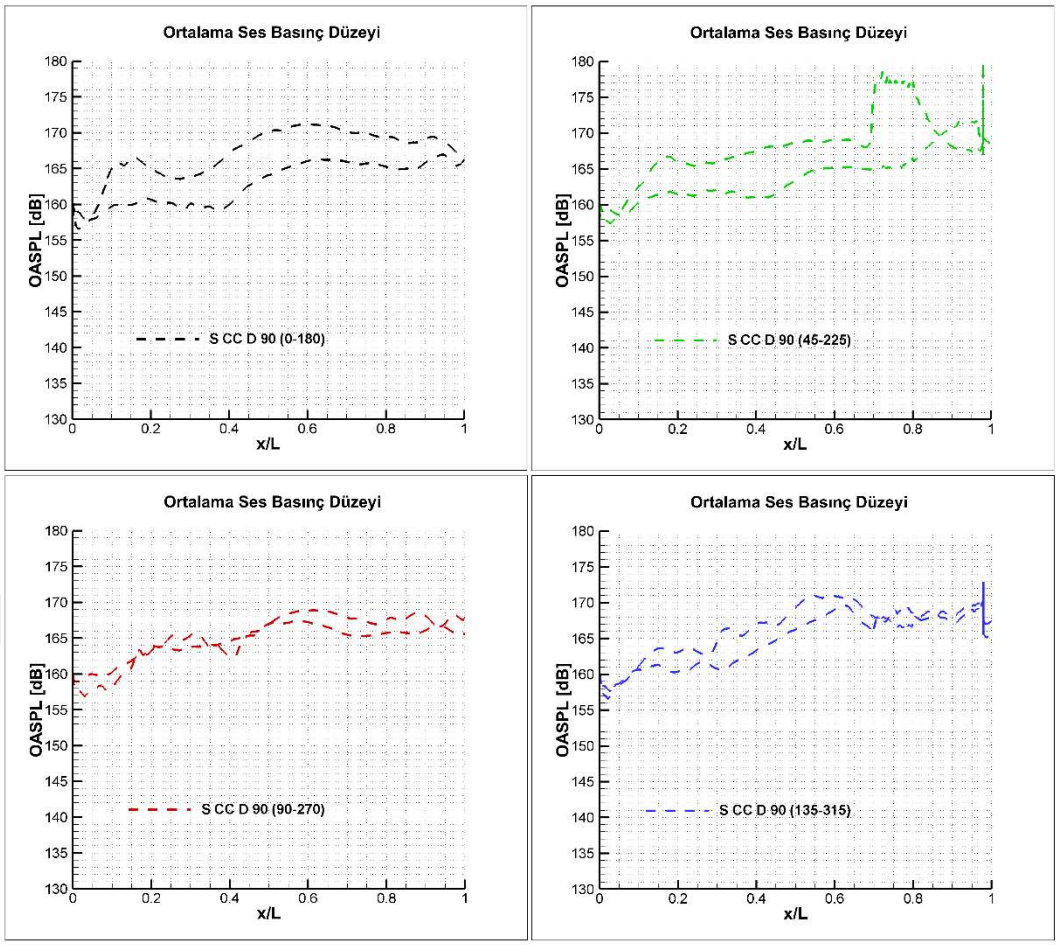
Şekil 4.7. *S CC D 90 sayısal çözüme (DES) ait konturlar a) ortalama Mach sayısı, b) türbülans yoğunluğu, c) basınç katsayısı, d) OASPL*

Şekil *4.8*'de mühimmat üzerinde hangi kesitlerde OASPL değerleri alındığı gösterilmektir. **Şekil *4.9***'de ise **Şekil *4.8***'de gösterilen kesitlerden mühimmat boyunca alınmış OASPL değerleri grafiksel olarak gösterilmektedir. Maksimum OASPL değerleri 225 dereceye denk gelen kesitte mühimmat arkasında bulunan kanatçık üzerinde 179,379 dB düzeyinde oluşmuştur. Bu yüksek ses düzeyi akıllı bombalarda yönlendirmeyi sağlayan kanatçıklarda bulunan elektronik sensörler üzerinde olumsuz etkiler oluşturabilir. Uygulanacak akış kontrol yöntemleriyle bu ses düzeyi düşürülebilir. Bu çalışmada da çeşitli pasif akış kontrol yöntemleri uygulanarak bu ses düzeyinin düzüşürülüp düşürelemediği incelenmiştir.

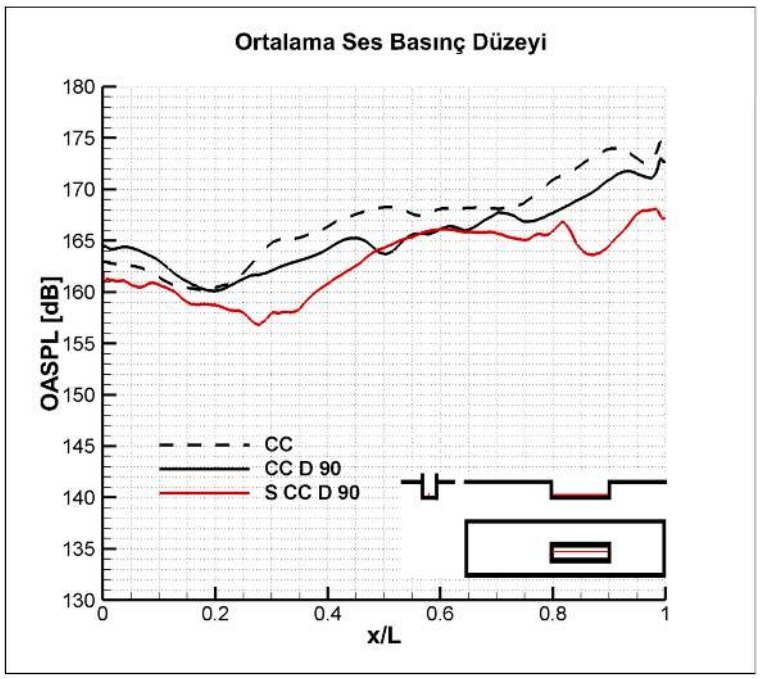


Şekil 4.8. *Mühimmat üzerindeki kesitlerin gösterimi*

Mühimmatlı 90 derece açıya sahip kapaklı temiz kavite çözümünden ayrca kavite tabanı ortasından OASPL değerleri elde edilerek mühimmatsız geometri ile **Şekil *4.10***'daki gibi karşılaştırılmıştır. Grafik incelendiğinde görüleceği gibi içerisine mühimmat yerleştirilen kavite tabanında ses düzeyi düşmektedir. Ayrıca mühimmatsız kavitede oluşan maksimum OASPL değeri 179,646 dB iken mühimmatlı geometride bu değer 177,6032 dB'e düşmektedir. Kavite içerisine mühimmat eklemek hem kavite duvarlarında oluşan maksimum OASPL değerini hem de kavite tabanındaki OASPL dağılımını düşürmektedir.

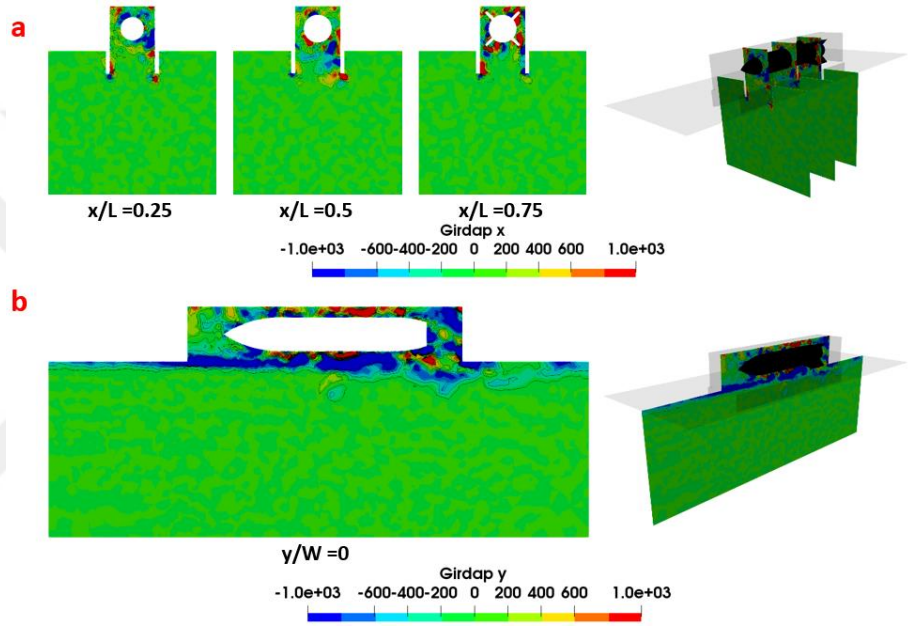


Şekil 4.9. *S CC D 90 sayısal çözüme (DES) ait mühimmat OASPL değerleri*

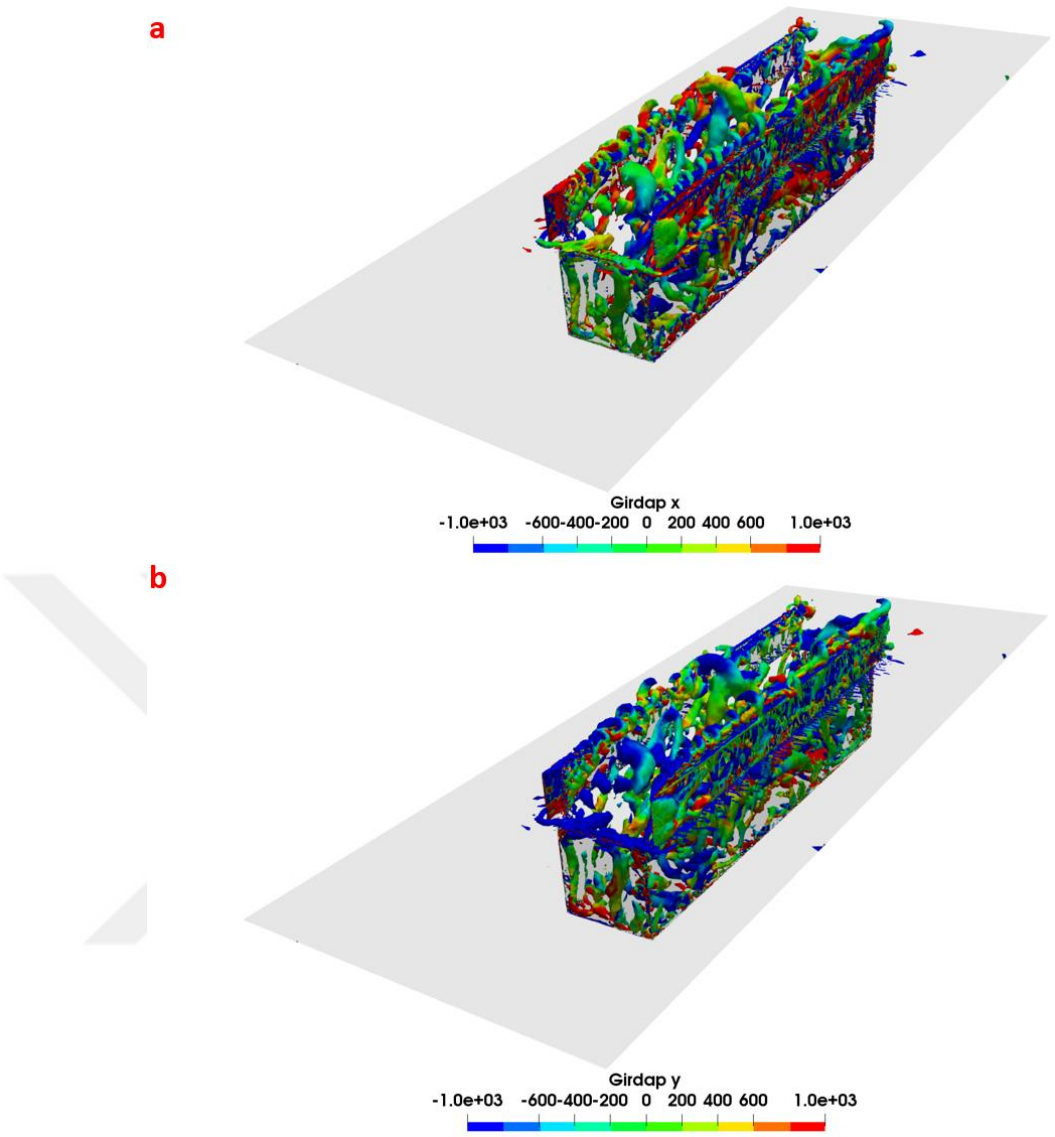


Şekil 4.10. *S CC D 90 sayısal çözüme (DES) ait kavite tabanı OASPL karşılaştırması*

Şekil *4.11* ve **Şekil *4.12***'de mühimmatlı 90 derece açıya sahip kapaklı temiz kaviteye ait girdap yapıları görülmektedir. Mühimmatsız çözümde olduğu gibi sarmal ve baloncuk tipi, uç ve at nalı girdap yapıları görülmektedir. Fakat mühimmatsız kapaklı temiz kavitede birincil girdap yapısı kavite içerisinde gelişiyor iken burada mühimmat üzerinde gelişmektedir. Kavite firar kenarından kopan kayma tabakası kavite içerisinde bulunan mühimmat nedeniyle kavite içerisine girememektedir. Firar kenarından kopan kayma tabakası mühimmatın ön bölgesinde mühimmat yüzeyine tutunmuş ve mühimmatın arka bölgesinde tekrar mühimmattan kopmuştur.

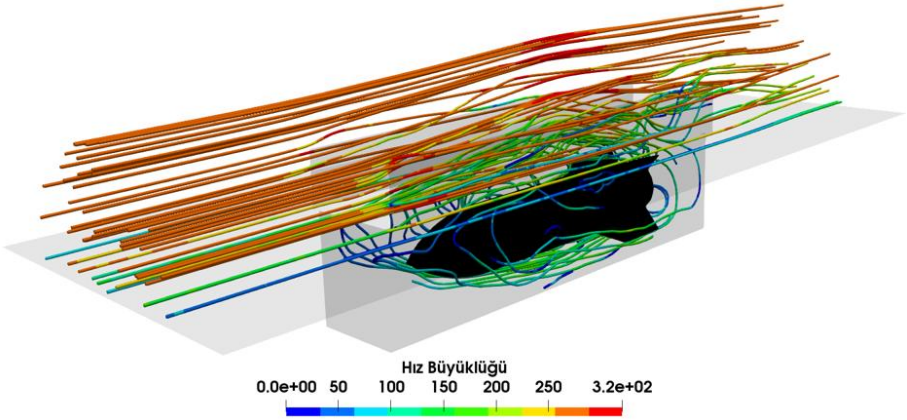


Şekil 4.11. *S CC D 90 sayısal çözüme (DES) ait girdap konturları a) x ekseni etrafında oluşan girdaplar, b) y ekseni etrafında oluşan girdaplar*

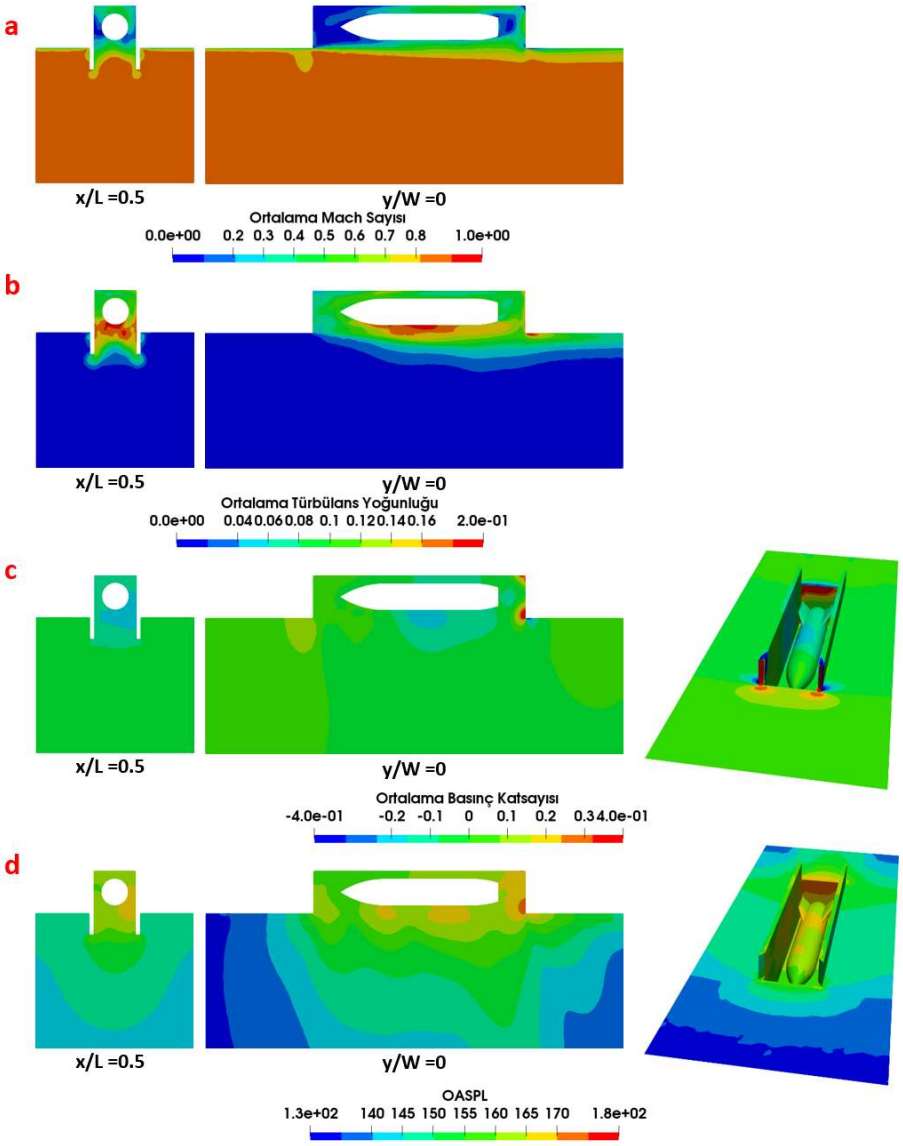


Şekil 4.12. *S CC D 90 sayısal çözüme (DES) ait eş yüzey Q-kriteri yapıları a) girdap-x ile renklendirme, b) girdap-y ile renklendirme*

10.000 feet irtifa koşulları için aynı çözüm tekrar edilmiştir. Bu sayısal çözümden elde edilen anlık akım çizgileri **Şekil *4.13***'de ve ortalama değerlere ait konturlar **Şekil *4.14***'de gösterilmektedir. Bu iki şekil incelendiğinde irtifayı artırmanın akışın genel yapısını değiştirmediği görülmektedir. 10.000 feet irtifada kavit üzerinde oluşan maksimum OASPL değeri 174,367 dB iken mühimmat üzerinde oluşan maksimum OASPL değeri 176,351 dB olmuştur.

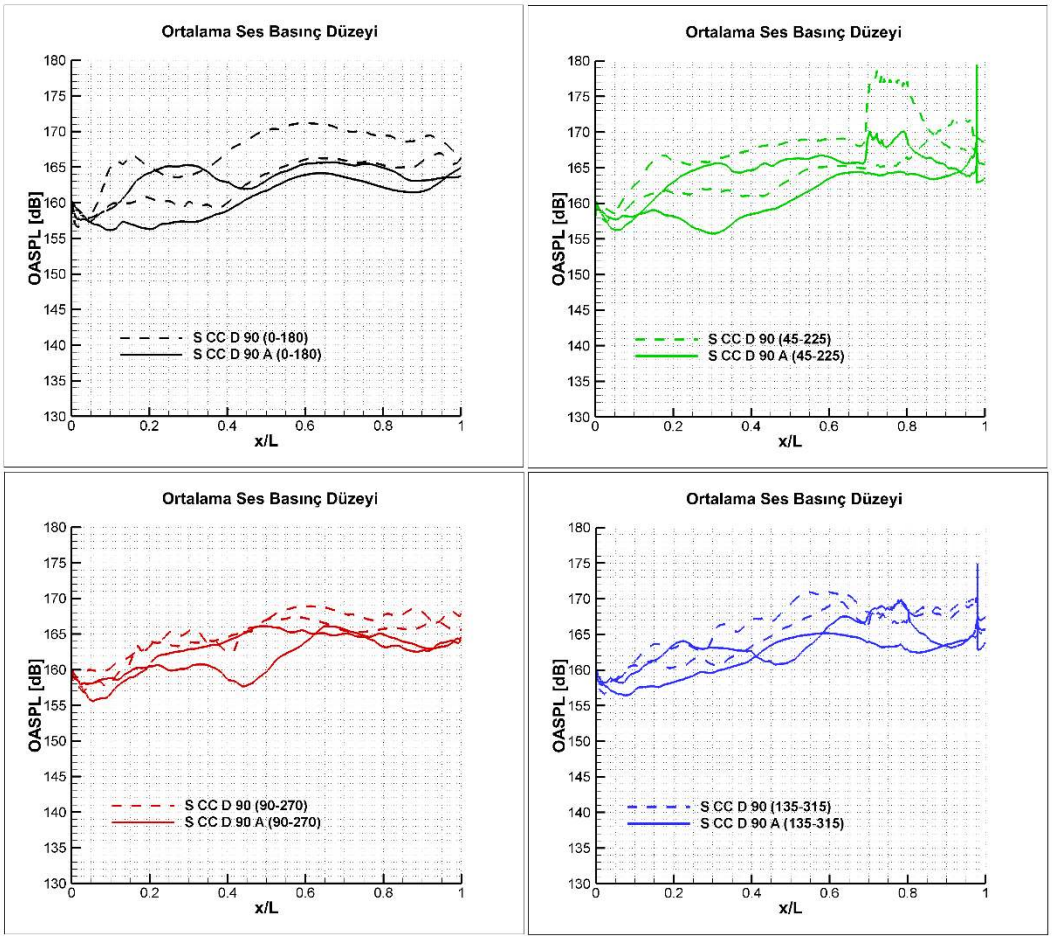


Şekil 4.13. *S CC D 90 A sayısal çözüme (DES) ait akım çizgileri*



Şekil 4.14. *S CC D 90 A sayısal çözüme (DES) ait konturlar a) ortalama Mach sayısı, b) türbülans yoğunluğu, c) basınç katsayısı, d) OASPL*

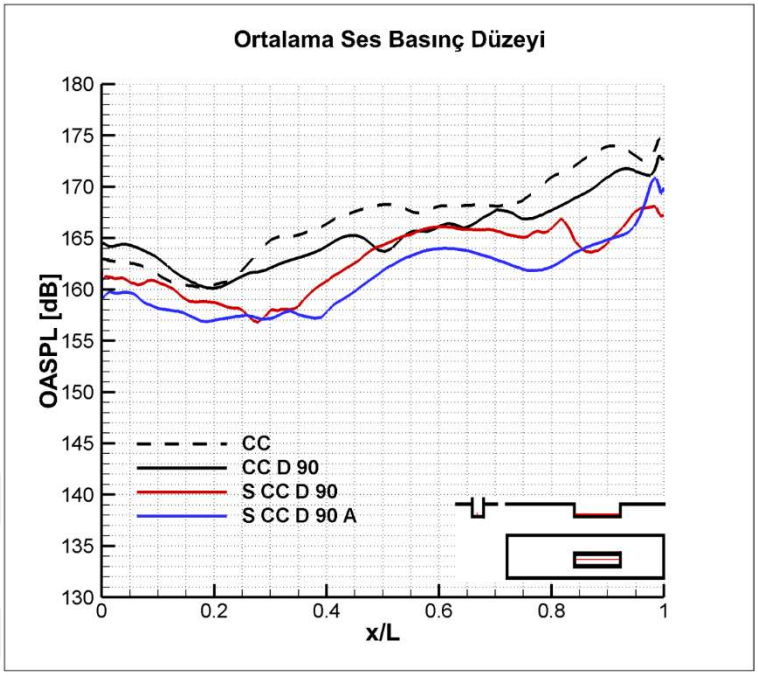
Şekil *4.15*'te mühimmat boyunca farklı açılarda alınmış OASPL değerleri grafiksel olarak gösterilmektedir. Maksimum OASPL değerleri yine aynı şekilde 225 dereceye denk gelen kesitte mühimmat arkasında bulunan kanatçık üzerinde oluşmuştur fakat M219 deney ortamında gerçekleştirilen çözümde mühimmat üzerinde oluşan maksimum OASPL değeri 179,379 dB iken 10.000 feet irtifada bu değer 176,351 dB'e düşmüştür. **Şekil *4.15*** incelendiğinde görüleceği gibi irtifa artıkkça mühimmat üzerinde oluşan ses düzeyi azalmaktadır.



Şekil 4.15. *S CC D 90 A sayısal çözüme (DES) ait mühimmat OASPL değerleri*

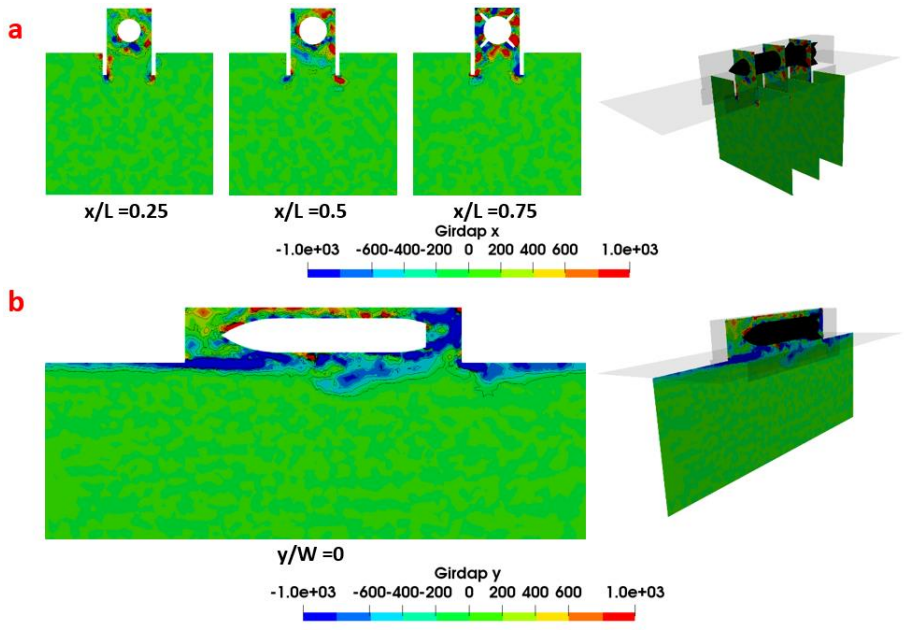
Şekil *4.16*'de 10000 feet irtifada ve deneysel ortamda gerçekleştirilen mühimmatlı 90 derece acıya sahip kapaklı temiz kavite çözümlerinin kavite tabanından elde edilen OASPL değerleri karşılaştırılmıştır. Bu grafik incelendiğinde görüleceği gibi irtifayı arttırmak sadece mühimmat üzerinde değil kavite tabanında da ses düzeyini düşürmektedir. Ayrıca deney ortamında gerçekleştirilen çözümde kavite duvarlarında oluşan maksimum OASPL değeri 177,6032 dB iken 10.000 feet'te bu değer 174,367 dB'e

düşmektedir. Böylece, irtifayı arttırmak hem kavite duvarlarında oluşan maksimum OASPL değerini hem de kavite tabanındaki OASPL dağımını düşürmektedir.

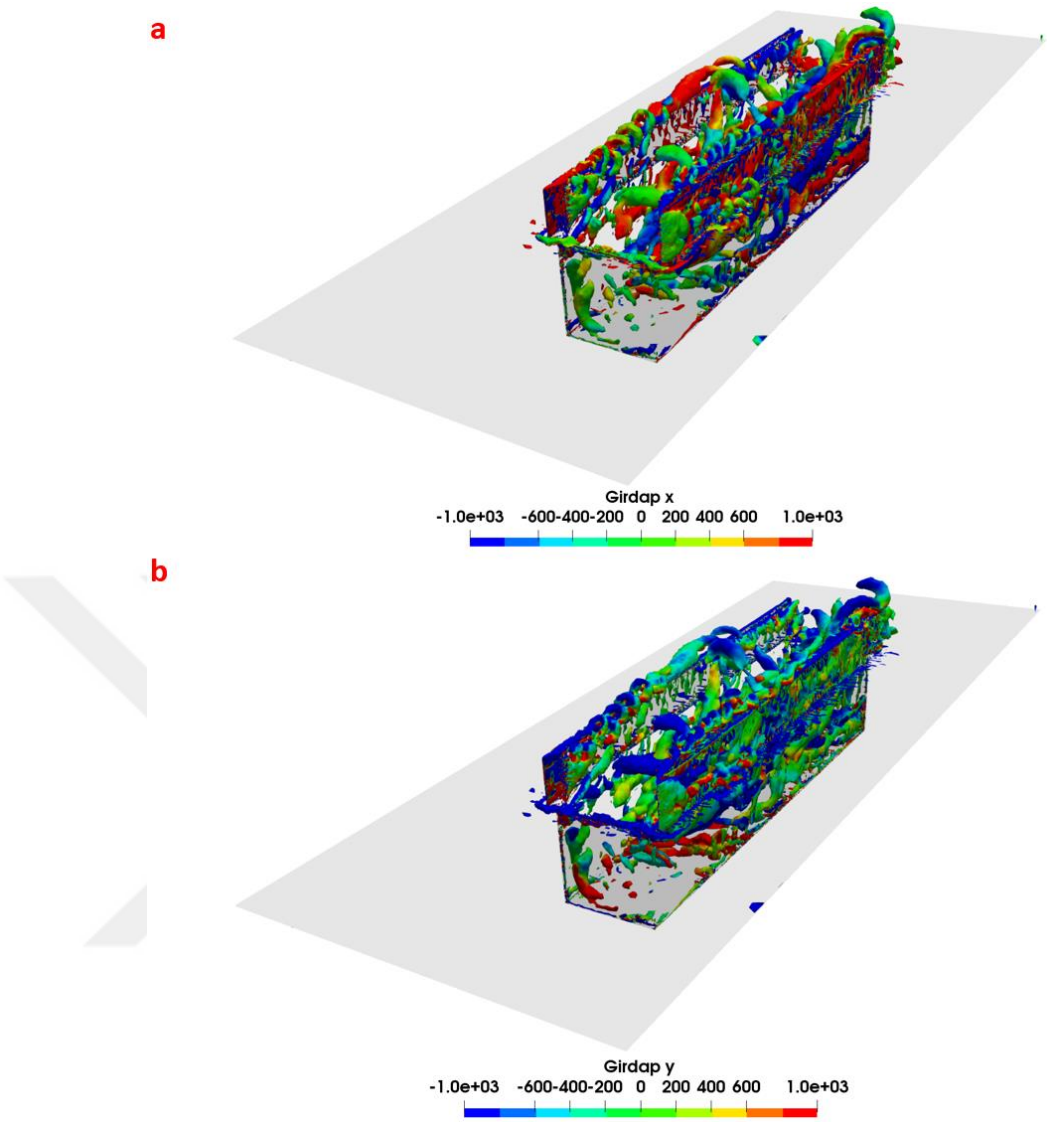


Şekil 4.16. *S CC D 90 A sayısal çözüme (DES) ait kavite tabanı OASPL karşılaştırması*

Şekil *4.17* ve **Şekil *4.18***'de 10000 feet irtifada mühimmatlı 90 derece açıya sahip kapaklı temiz kaviteye ait girdap yapıları görülmektedir. Deney ortamında gerçekleştirilen çözümden elde edilen girdap yapıları ile aynı yapılar elde edilmiştir.



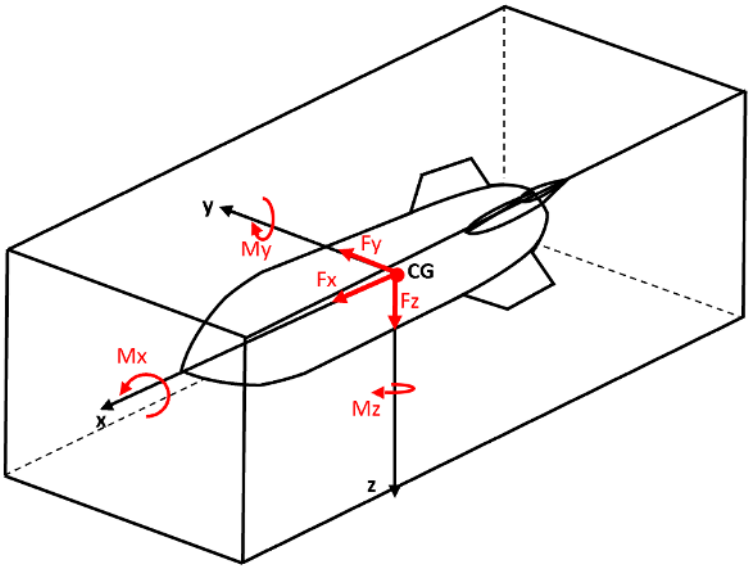
Şekil 4.17. *S CC D 90 A sayısal çözüme (DES) ait girdap konturları a) x ekseni etrafında oluşan girdaplar, b) y ekseni etrafında oluşan girdaplar*



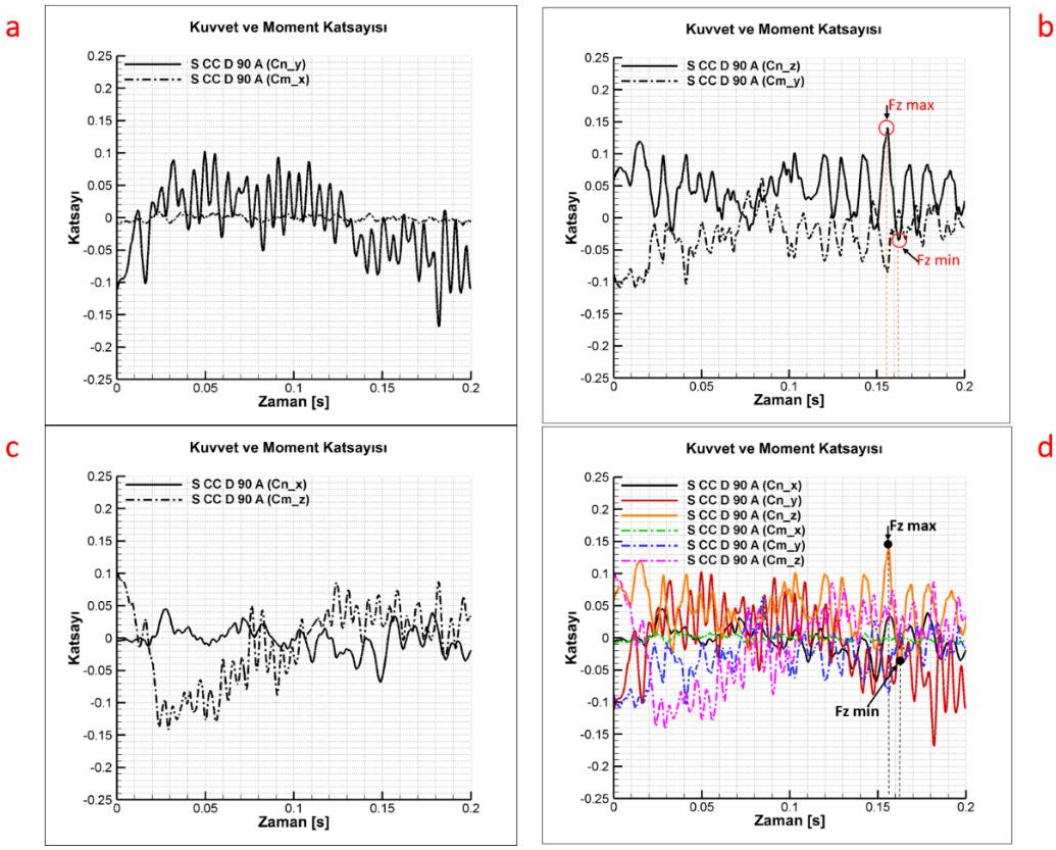
Şekil 4.18. *S CC D 90 A sayısal çözüme (DES) ait eş yüzey Q-kriteri yapıları a) girdap-x ile renklendirme, b) girdap-y ile renklendirme*

4.1.2. Hareketli sayısal çözüm

Mühimmat üzerine etki eden kuvvet ve momentler **Şekil *4.19***'de gösterilmiştir. Hareketsiz ağlı sayısal çözümden elde edilen mühimmat üzerine etki eden kuvvet ve moment katsayıları **Şekil *4.20*** ile gösterilmektedir. Kavite içerisindeki zamana bağlı karasız akış etkileri kuvvet ve moment katsayılarının değişiminden görülmektedir. **Şekil *1.12***'de gösterildiği gibi mühimmat üzerine etki eden normal kuvvetin maksimum ve minumum olduğu noktalardan bırakma işlemi gerçekleştirilmiştir.



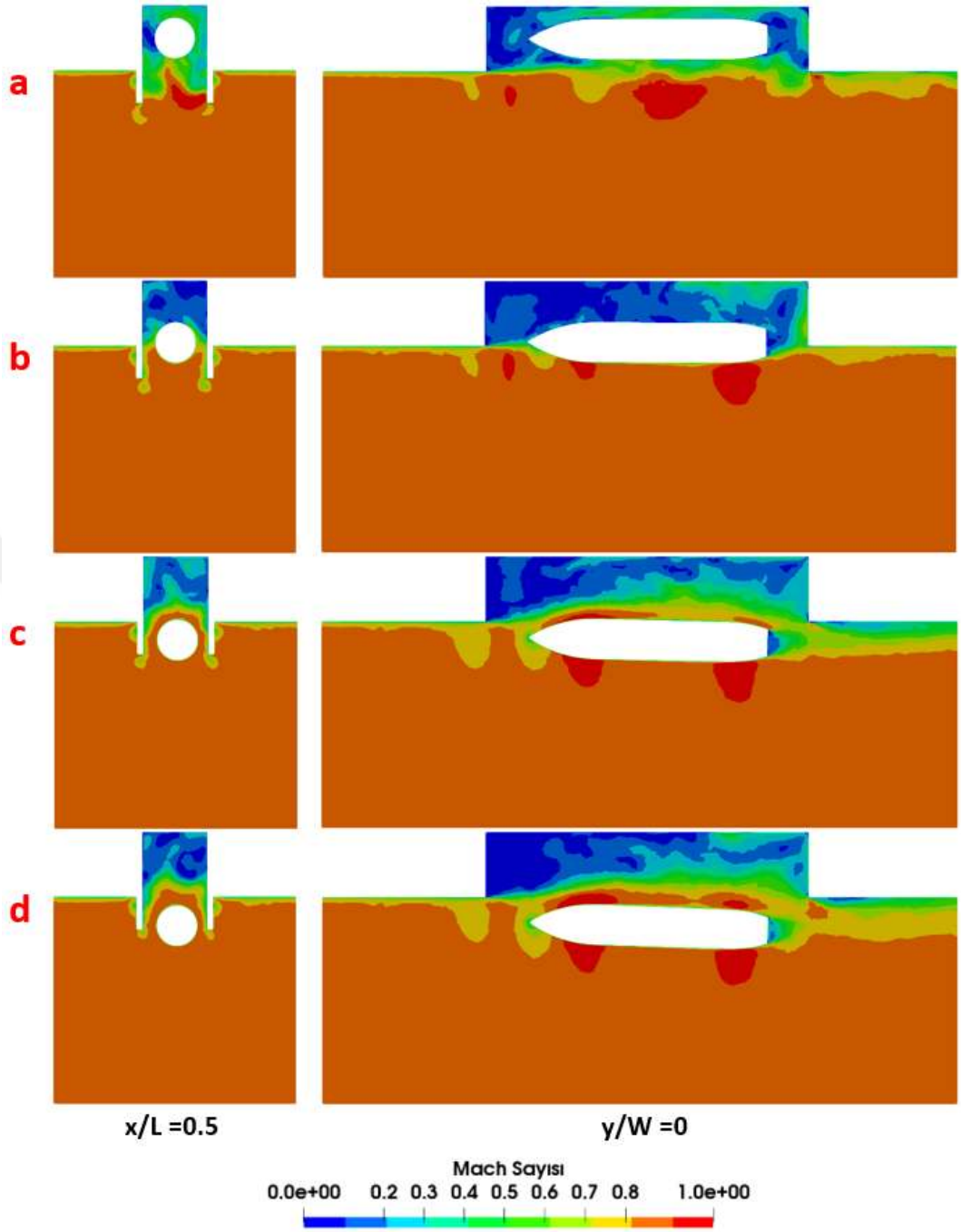
Şekil 4.19. *Mühimmat üzerine etki eden kuvvet ve momentlerin gösterimi*



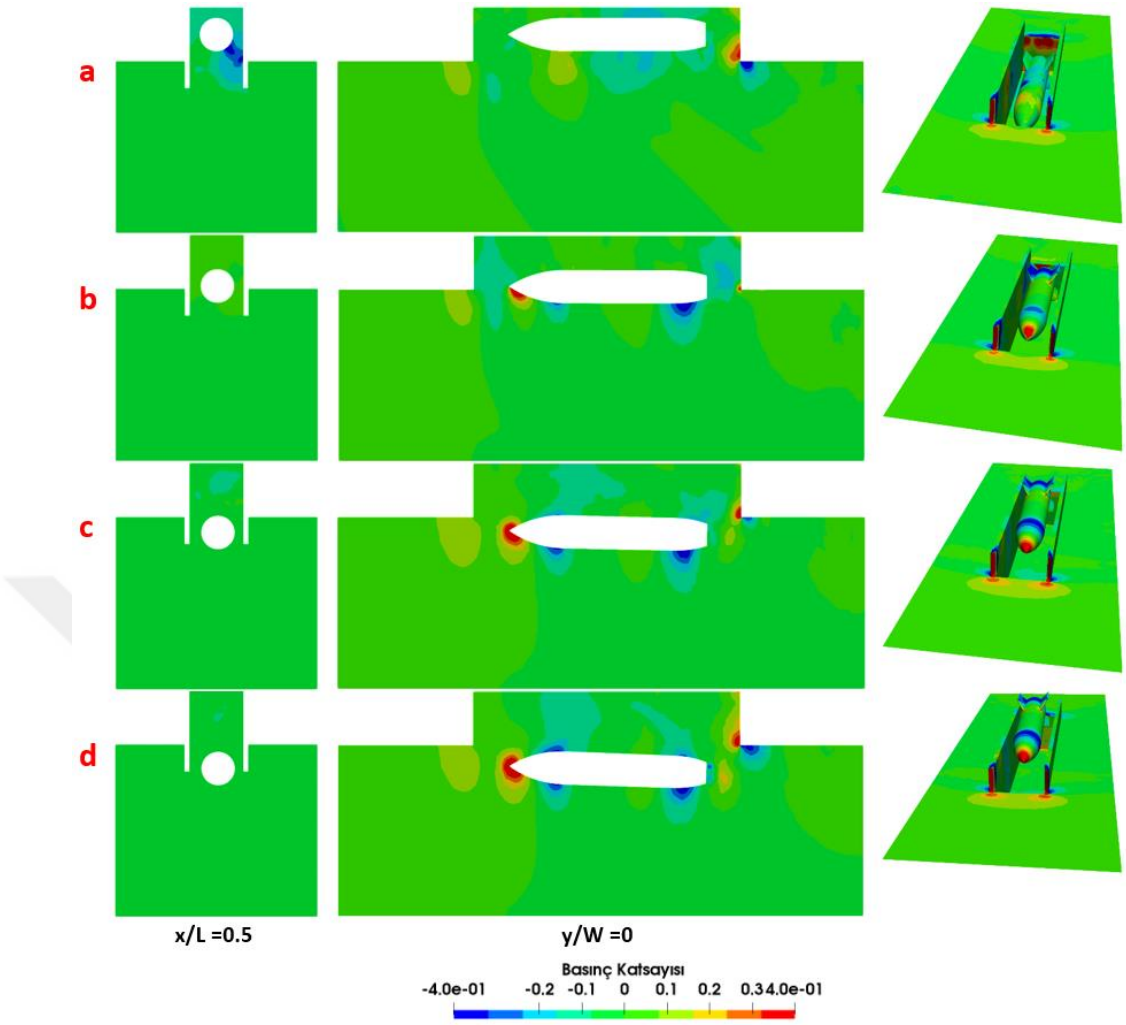
Şekil 4.20. *S CC D 90 A sayısal çözüme (DES) ait mühimmat üzerine etki eden kuvvet ve moment katsayıları a) y ekseni boyunca etki eden kuvvet katsayısı ve x ekseni etrafında etki eden moment katsayısı b) z ekseni boyunca etki eden kuvvet katsayısı ve y ekseni etrafında etki eden moment katsayısı c) x ekseni boyunca etki eden kuvvet katsayısı ve z ekseni etrafında etki eden moment katsayısı d) tüm katsayılar*

Başlangıç itici kuvvetleri ile S CC D 90 A ismiyle oluşturulan 90 derece açıya sahip kapaklı temiz kaviteden **Şekil *4.20***'da gösterildiği gibi z ekseni boyunca normal kuvvetin

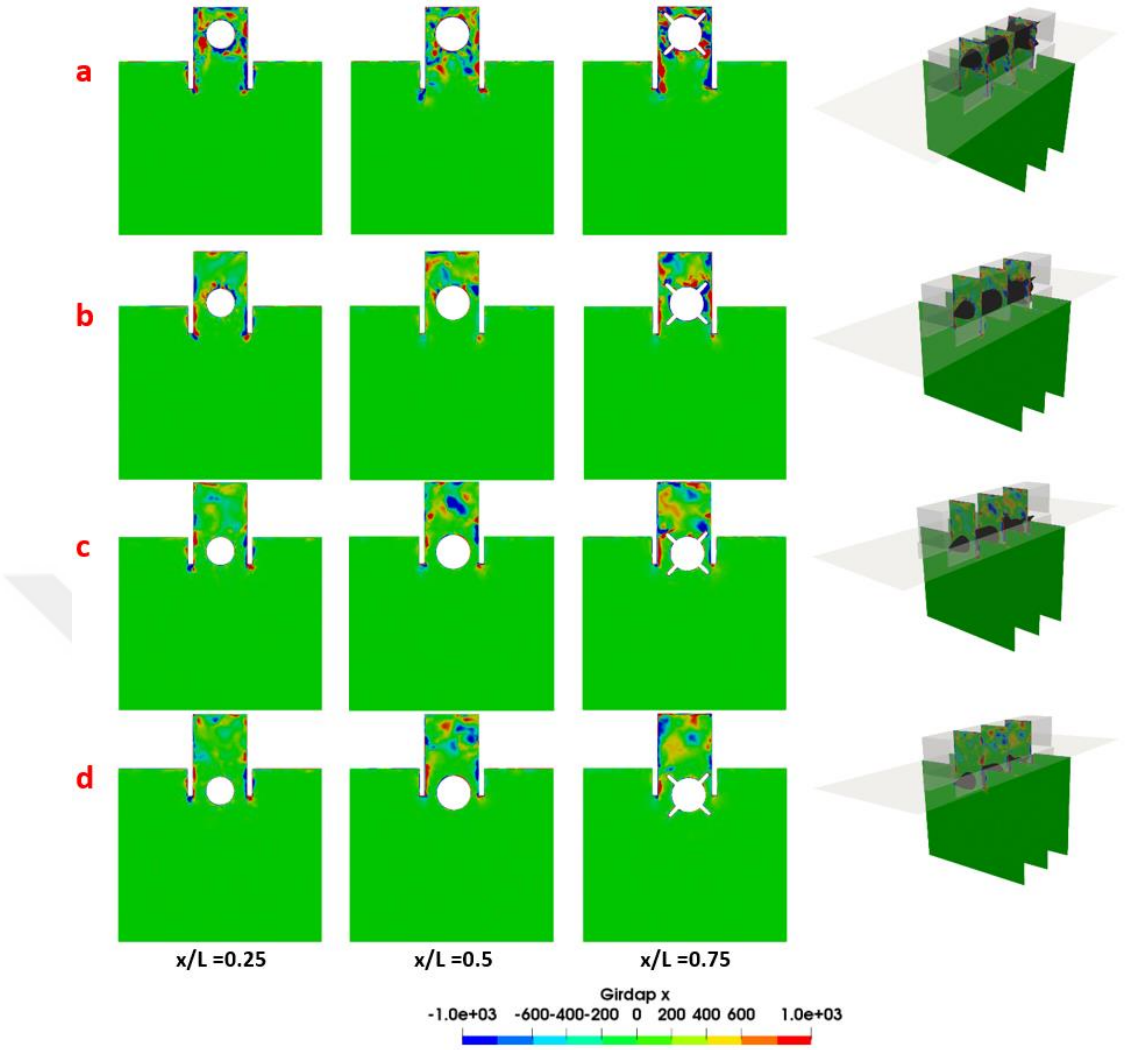
maksimum (Fz max) ve minimum (Fz min) olduğu iki farklı zamanda hareketli çözüm gerçekleştirilmiştir. Z ekseni boyunca mühimmata etkiyen kuvvetin minimum olduğu anda bırakılması ile elde edilen hareketli çözüme ait farklı zamanlardan elde edilen akış parameterleri konturları **Şekil *4.21***, **Şekil *4.22***, **Şekil *4.23*** ve **Şekil *4.24***'te sunulmuştur. **Şekil *4.21***'de anlık Mach sayısı, **Şekil *4.22***'de anlık basınç katsayısı, **Şekil *4.23***'te x ekseni etrafında oluşan girdap ve **Şekil *4.24***'te ise y ekseni etrafında oluşan girdap konturlarının zamanla değişimleri gösterilmektedir. Bu şekiller incelendiğinde mühimmatın kavite içerisinden yüksek enerjiye sahip kayma tabakasına girmeye başlaması ile akışın mühimmat etrafında hızlandığı ve mühimmatın burun alt bölgesinde basınç değerinin yükselmeye başladığı alt arka bölgesinde ise düştüğü görülmektedir. Bunun sonucunda mühimmat buran yukarı hareketi yaptığı görülmektedir. Kayma tabasının içinde ve çıktıktan hemen sonra da bu eğilim devam etmiştir. Ayrıca mühimmat kayma tabakasını geçtikten sonra serbest akım ile karşılaşınca mühimmat altında ve üstünde mühimmat boyunca ters yönlü girdapların oluştuğu görülmektedir.



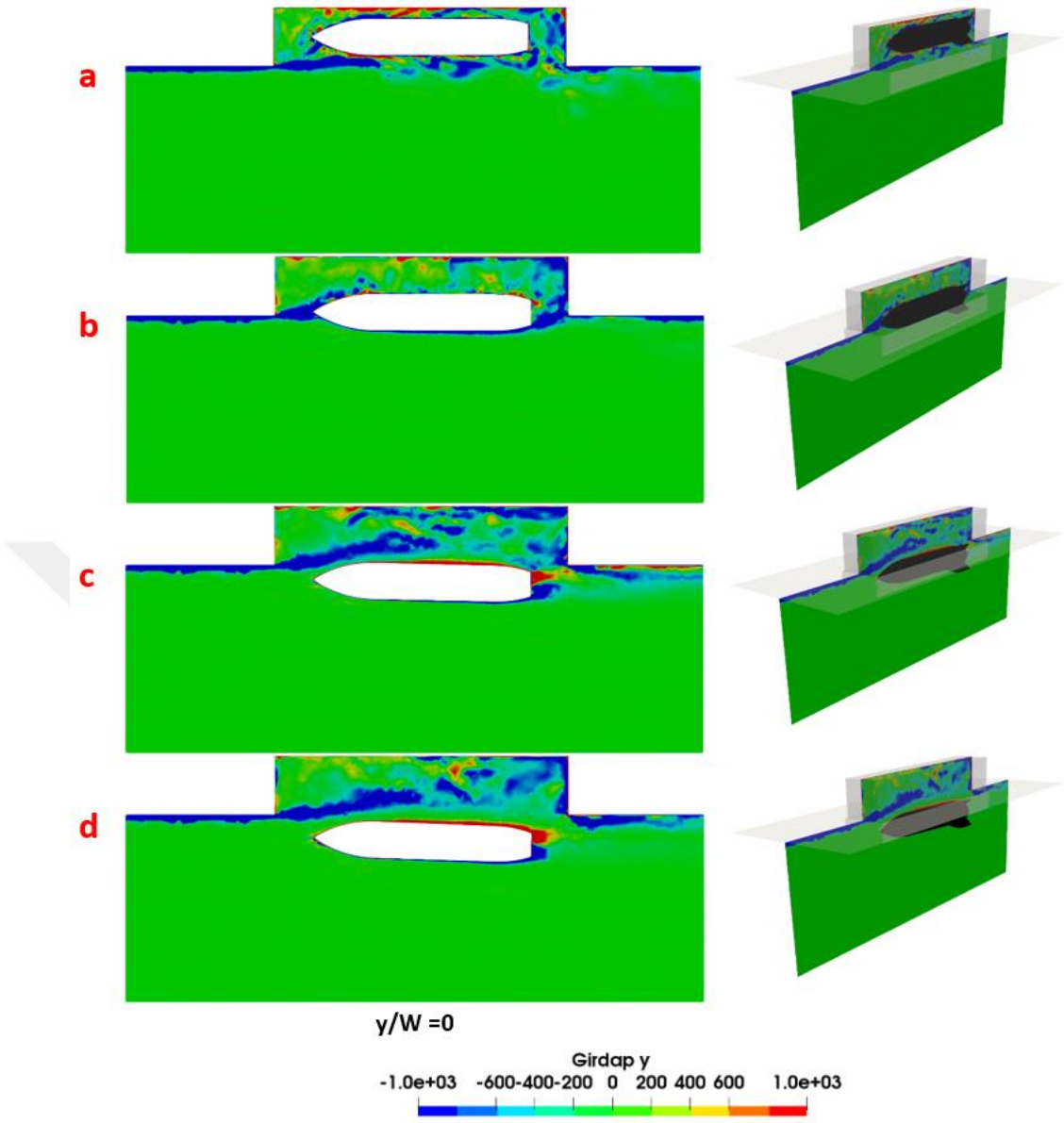
Şekil 4.21. *S CC D 90 A için hareketli sayısal çözüme (DES) ait Fz min için Mach Sayısı konturu a) t = 0 s, b) t = 0,098 s, c) t = 0,148 s, d) t = 0,198 s*



Şekil 4.22. *S CC D 90 A için hareketli sayısal çözüme (DES) ait Fz min için Basınç Katsayısı konturu a) t = 0 s, b) t = 0,098 s, c) t = 0,148 s, d) t = 0,198 s*



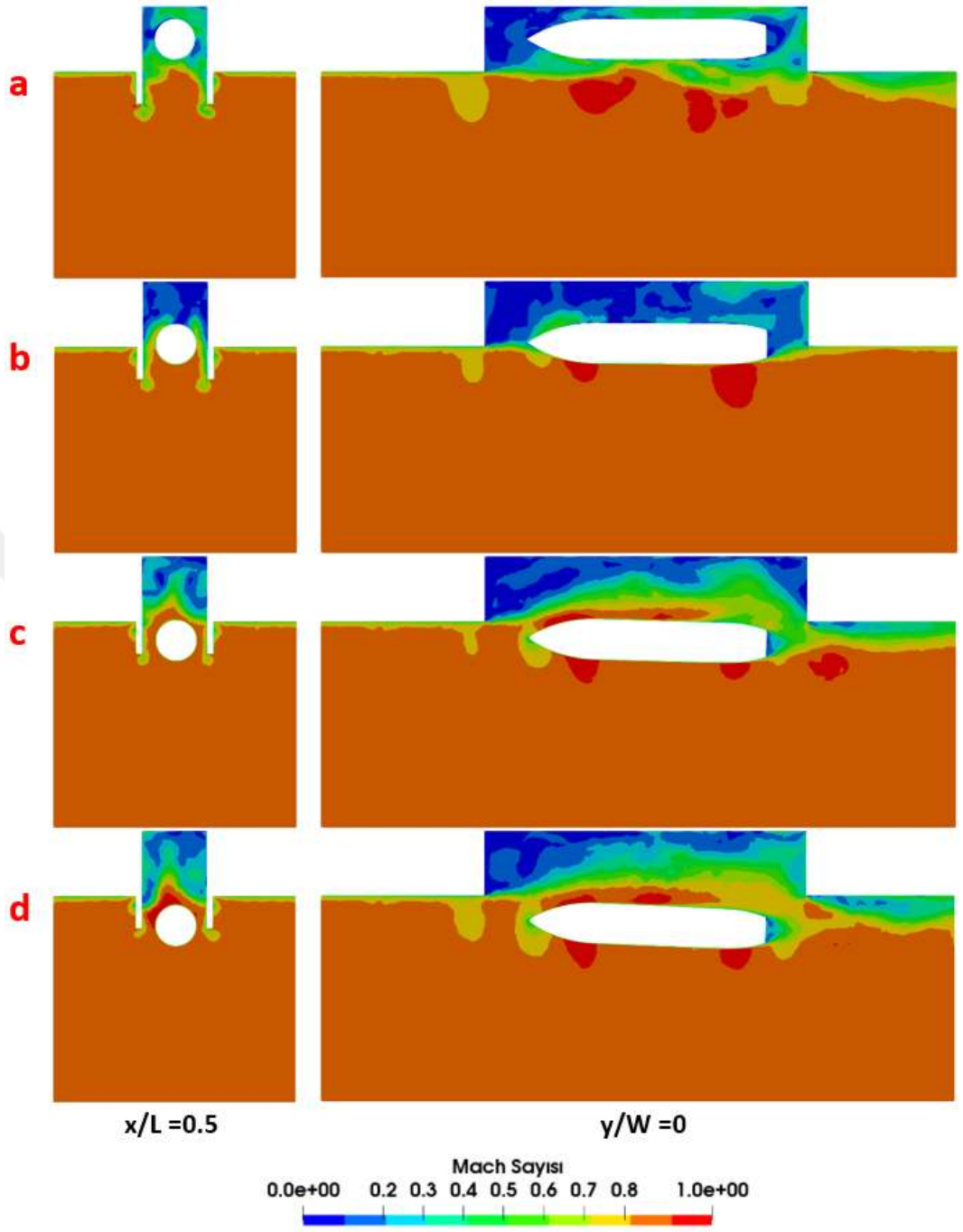
Şekil 4.23. *S CC D 90 A için hareketli sayısal çözüme (DES) ait Fz min için Girdap-x konturu a) t = 0 s, b) t = 0,098 s, c) t = 0,148 s, d) t = 0,198 s*



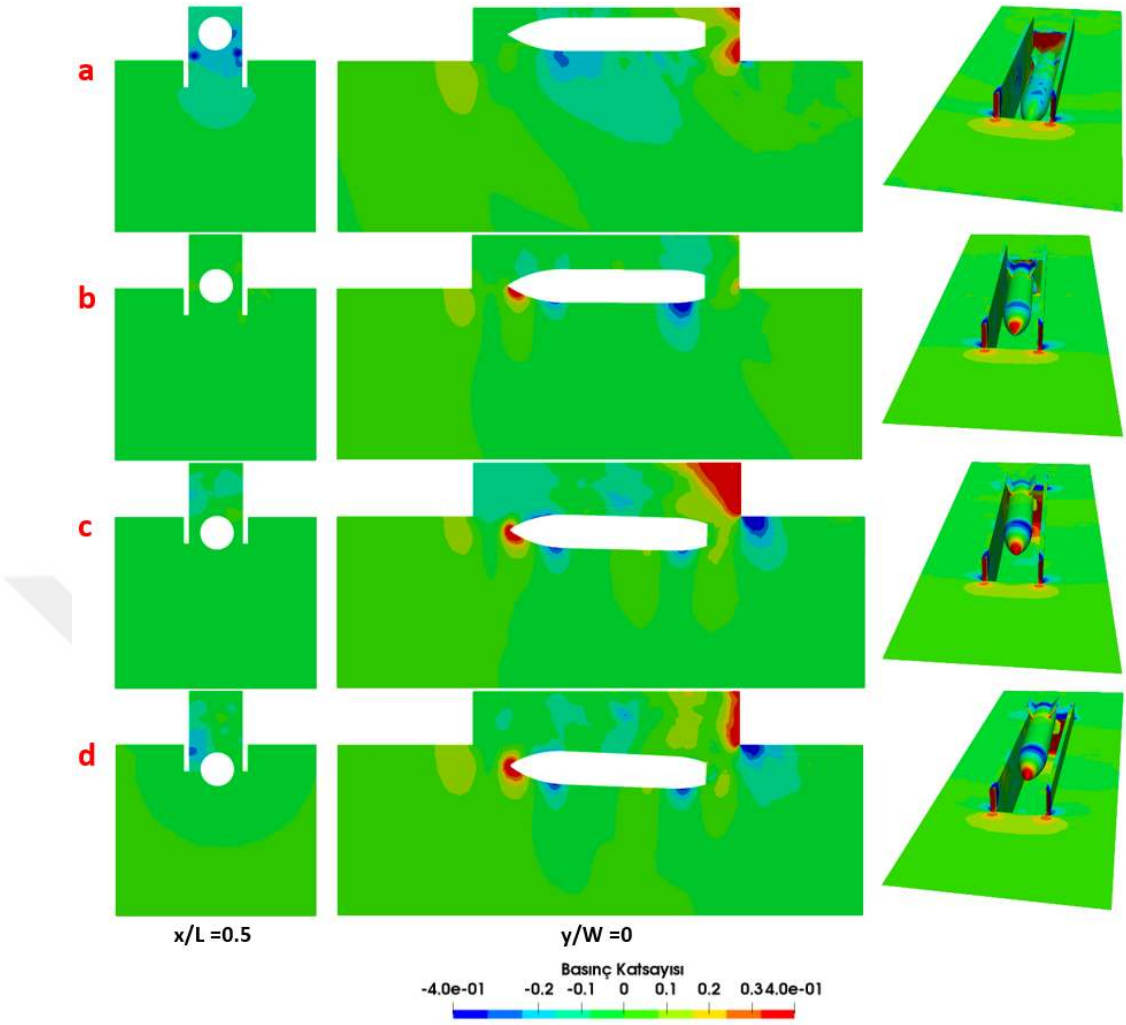
Şekil 4.24. *S CC D 90 A için hareketli sayısal çözüme (DES) ait Fz min için Girdap-y konturu a) t = 0 s, b) t = 0,098 s, c) t = 0,148 s, d) t = 0,198 s*

Benzer şekilde z ekseni boyunca mühimmata etkiyen kuvvetin maksimum olduğu anda bırakılması ile elde edilen hareketli çözüme ait farklı zamanlardan elde edilen akış parameterleri konturları **Şekil *4.25***, **Şekil *4.26***, **Şekil *4.27*** ve **Şekil *4.28***'de sunulmuştur. **Şekil *4.25***'te anlık Mach sayısı, **Şekil *4.26***'da anlık basınç katsayısı, **Şekil *4.27***'de x ekseni etrafında oluşan girdap ve **Şekil *4.28***'de ise y ekseni etrafında oluşan girdap konturlarının zamanla değişimleri gösterilmektedir. Bu şekiller incelendiğinde S CC D 90 A Fz min çözümünde olduğu gibi mühimmatın kavite içerisinden yüksek enerjiye sahip kayma tabakasına girmeye başlaması ile akışın mühimmat etrafında hızlandığı ve mühimmatın burun alt bölgesinde basınç değerinin yükselmeye başladığı, alt arka

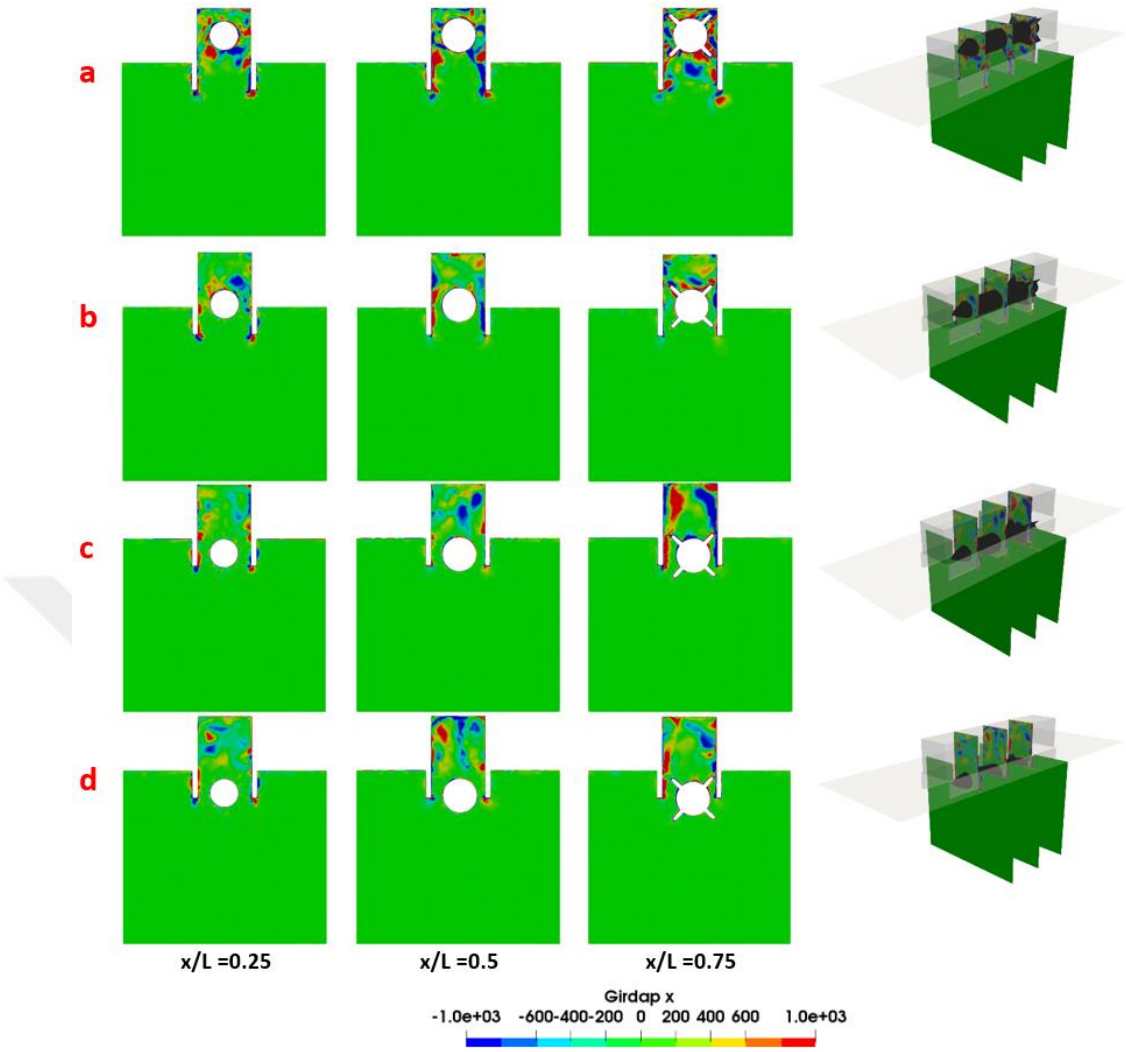
bölgesinde ise düştüğü görülmektedir. Aynı şekilde bunun sonucunda mühimmat burun yukarı hareketi yaptığı görülmektedir. Kayma tabasının içinde ve çıktıktan hemen sonra da bu eğilim devam etmiştir. Ayrıca mühimmat kayma tabakasını geçtikten sonra serbest akım ile karşılaşınca mühimmat altında ve üstünde mühimmat boyunca ters yönlü girdapların oluştuğu görülmektedir. Farklı olarak mühimmat kayma tabakası içerisinde iken ve kayma tabakasını terk ederken kavite firar kenarında anlık basınç değerinin S CC D 90 A Fz min çözümüne göre daha yüksek değerlere çıktığı görülmektedir. Sonuç olarak S CC D 90 A Fz min ve S CC D 90 A Fz max çözümlerinden elde edilen temel akış parametrelerinin benzerlik gösterdiği akış fiziğinde büyük bir faklılığın olmadığı görülmektedir.



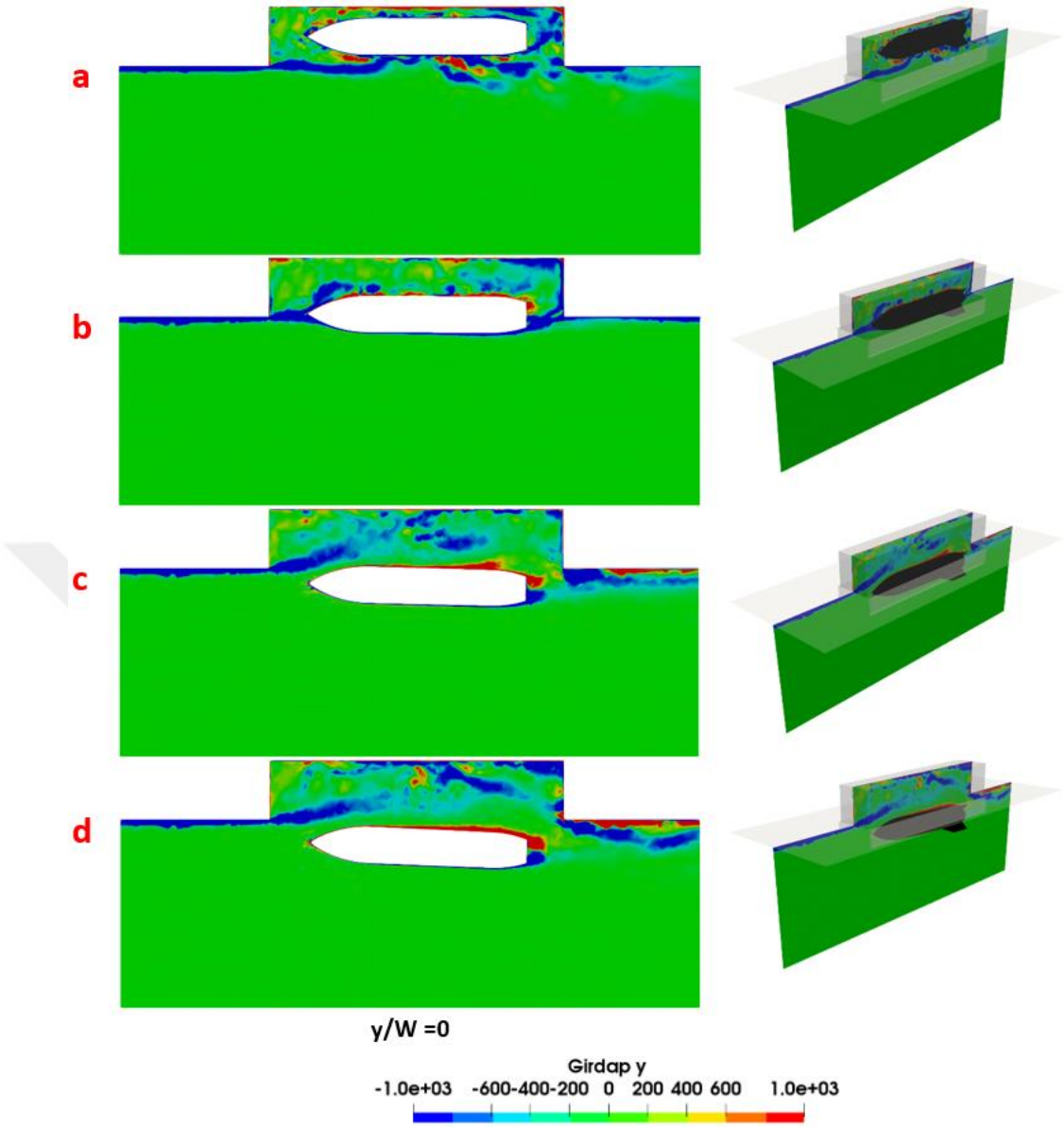
Şekil 4.25. *S CC D 90 A için hareketli sayısal çözüme (DES) ait Fz max için Mach Sayısı konturu a) t = 0 s, b) t = 0,099 s, c) t = 0,149 s, d) t = 0,199 s*



Şekil 4.26. *S CC D 90 A için hareketli sayısal çözüme (DES) ait Fz max için Basınç Katsayısı konturu a) t = 0 s, b) t = 0,099 s, c) t = 0,149 s, d) t = 0,199 s*



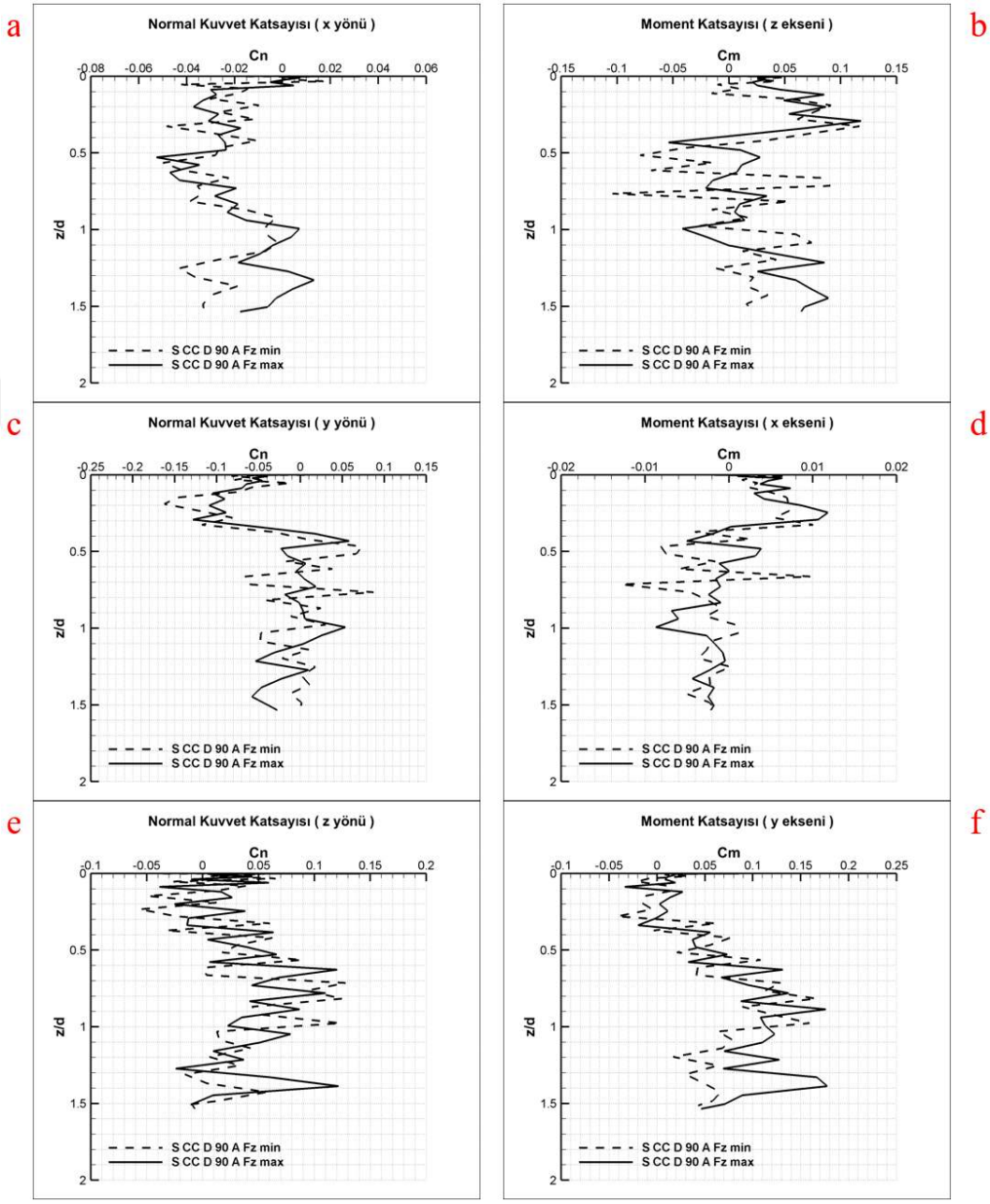
Şekil 4.27. *S CC D 90 A için hareketli sayısal çözüme (DES) ait Fz max için Girdap-x konturu a) t = 0 s, b) t = 0,099 s, c) t = 0,149 s, d) t = 0,199 s*



Şekil 4.28. *S CC D 90 A için hareketli sayısal çözüme (DES) ait Fz max için Girdap-y konturu a) t = 0 s, b) t = 0,099 s, c) t = 0,149 s, d) t = 0,199 s*

Şekil *4.29*'da z yönündeki normal kuvvetin maksimum ve minimum olduğu zamanlarda bırakılan iki sayısal çözüme ait mühimmat hareketi boyunca mühimmata etkiyen x, y ve z yönlerindeki normal kuvvetlerin ve moment katsayılarının değişimi gösterilmektedir. Burada mühimmatın z ekseninde aldığı yola karşılık kuvvet ve moment değerleri gösterilmiştir ve z ekseninde aldığı yol mühimmat çapına bölünerek boyutsuzlaştırılmıştır. **Şekil *4.21*** - **Şekil *4.28*** arasında verilen akış parametrelerinden anlaşılacağı gibi, akış fiziğinin değişmemesinden ötürü mühimmat üzerinde oluşan kuvvet ve moment değerleri de benzer eğilim göstermiştir. Hem kuvvet hem de moment katsayısı değerlerinin ortalama değerleri aynı eğilimde olsalar da anlık değerlerde farklar

görülmektedir. Zamana bağlı çözümlerde bu anlık farkaların olması problemin doğasından ileri gelmektedir. Bu kuvvet ve moment katsayılarının farklılığı öteleme ve dönme değerlerinde nitel anlamda olmasa da nicel anlamda farklılığa yol açmıştır.



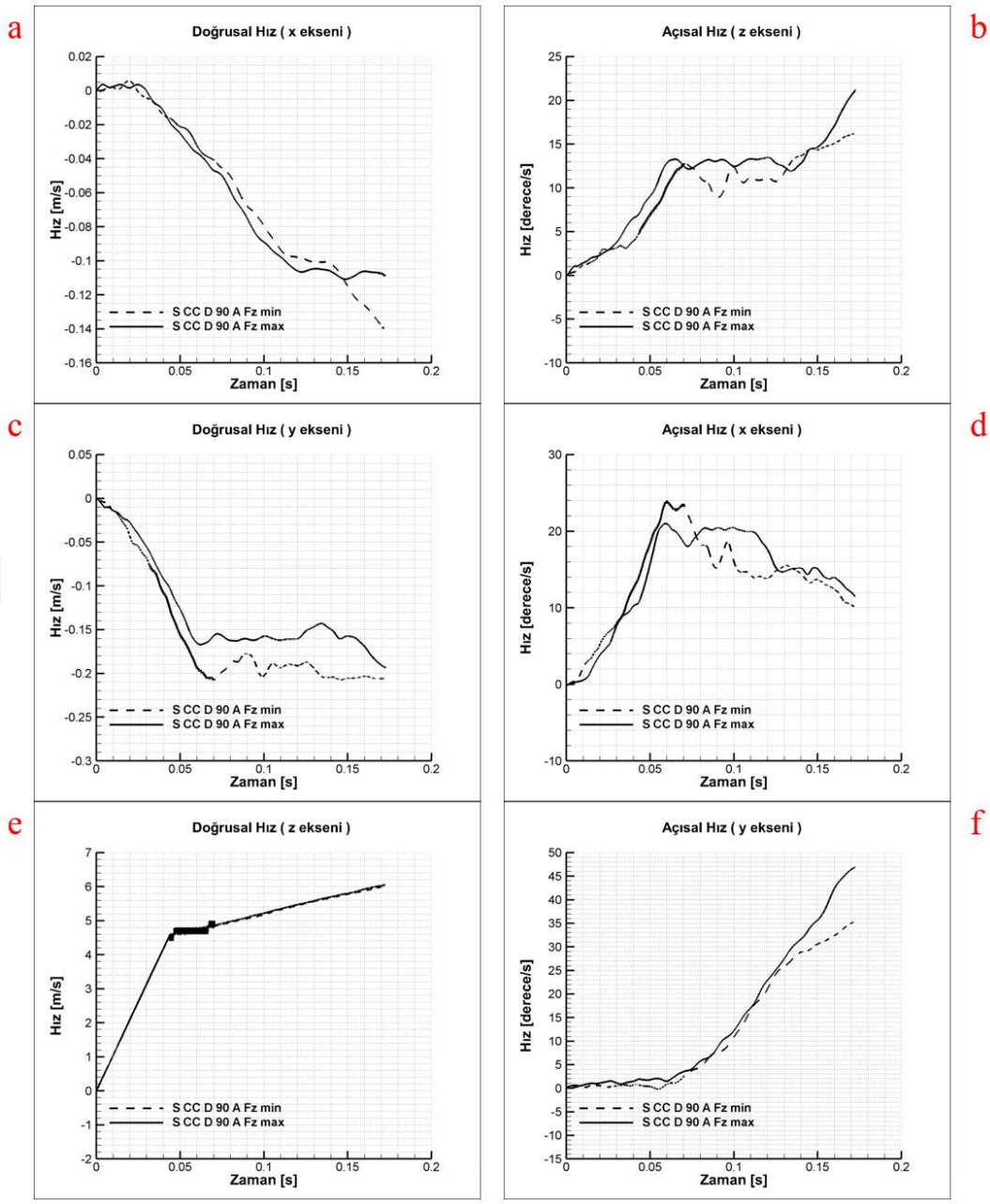
Şekil 4.29. *S CC D 90 A için hareketli sayısal çözüme (DES) ait Fz min ve Fz max için mühimmat üzerine etki eden kuvvet ve moment katsayıların değişimi a) x ekseni boyunca etki eden kuvvet katsayısı, b) z ekseni etrafında etki eden moment katsayısı, c) y ekseni boyunca etki eden kuvvet katsayısı, d) x ekseni etrafında etki eden moment katsayısı, e) z ekseni boyunca etki eden kuvvet katsayısı, f) y ekseni etrafında etki eden moment katsayısı*

Şekil *4.30*'da ve **Şekil *4.31***'de aynı fırlatma kuvvetine maruz kalmış bir mühimmatın iki farklı bırakma zamanına ait doğrusal ve açısal hızlar ile öteleme ve

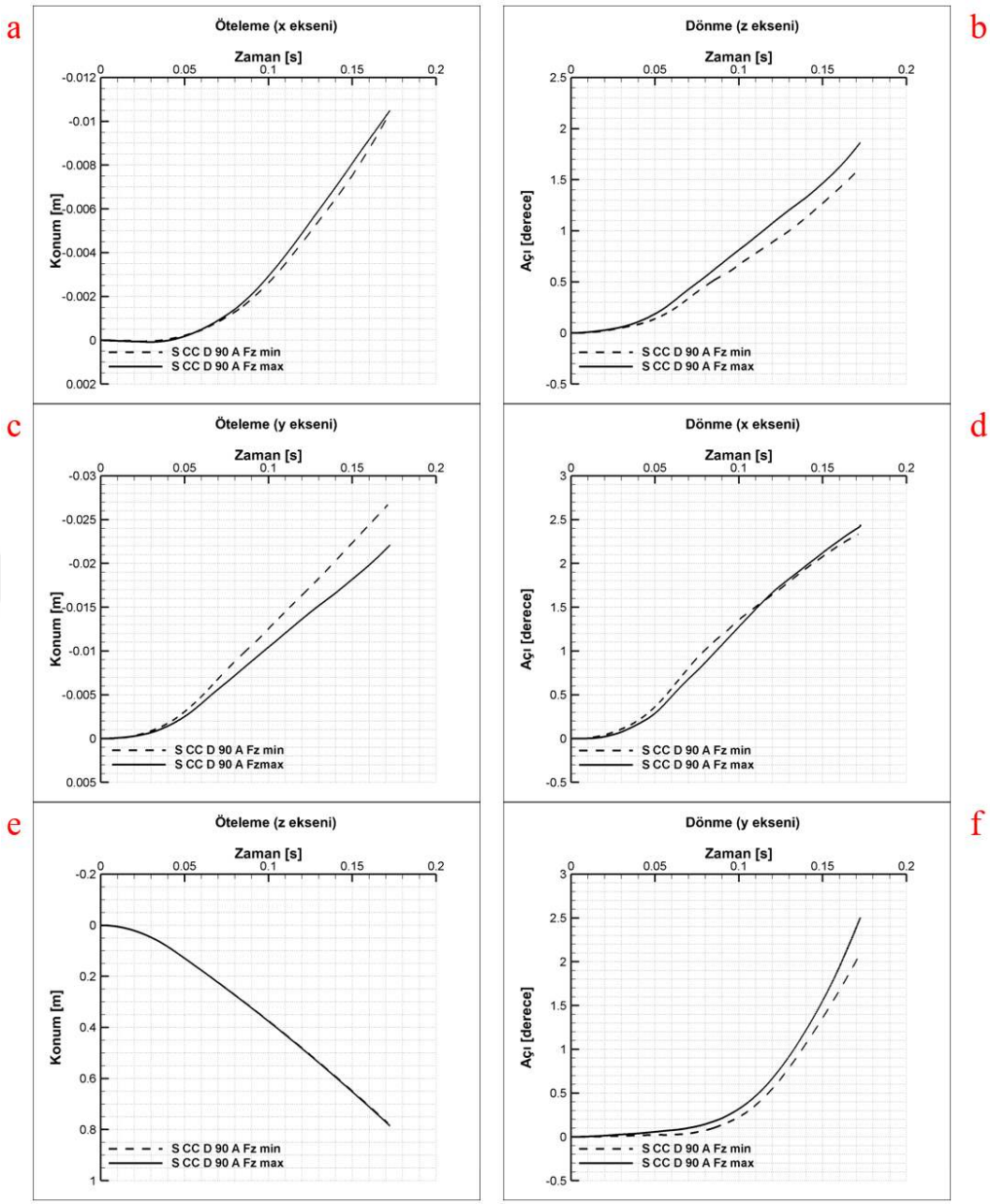
dönme değerleri verilmiştir. **Şekil *4.31***'daki öteleme değerleri karşılaştırıldığında normal kuvvetin maksimum olduğu durumda bırakılınca minimum olduğu duruma göre x ekseninde daha fazla, y ekseninde daha az ve z ekseninde ise eşit ötleme değerleri görülmüştür. **Şekil *4.31***'daki dönme değerleri karşılaştırıldığında normal kuvvetin maksimum olduğu durumda bırakılınca minimum olduğu duruma göre daha fazla burun yukarı ve sapma açısı yapma eğiliminde iken yalpalama açısında benzer davranış göstermişlerdir. S CC D 90 A Fz min ve S CC D 90 A Fz max olmak üzere iki farklı zamanda bırakılan mühimmat yaklaşık 0,175 s sonra her iki çözümde de kavite kapağına çarpmıştır. Her iki durumda da mühimmat tam olarak kaviteyi terk edecek iken mühimmatın arkasında bulunan kanatçıklarından biri kavite kapağına temas etmiştir. Bu iki durumda mühimmat temelde aynı yörüngeyi izlemiş olsa da öteleme ve dönme değerleri farklılık göstermiştir. Fakat literatürde değinilen ve **Şekil *1.12***'de gösterildiği gibi z yönündeki normal kuvvetin maksimum olduğu zamanın bırakma için iyi minimum olduğu değerin kötü olduğu sonucu görülmemiştir. Aksine normal kuvvetin maksimum olduğu zamanda mühimmatın genel olarak kaviteyi terk edene kadar öteleme ve dönme değerleri görece daha kötüdür.

Tüm parametrelerin aynı olması durumunda kavite içerisinden sadece farklı zamanlarda bir mühimmat bırakıldığında her ne kadar temel olarak aynı yörünge elde ediliyor olsa da sayısal değer anlamında farklılık görülmektedir. Fakat bu farklılık mühimmatın izleyeceği yörüngeyi belirleyici değildir. Mühimmat bırakmak için uygun olmayan bir kavite yapısından hangi bırakma zamanında bırakılırsa bırakılsın, mühimmat tehlike oluşturmaktadır. Mühimmatın kavite içerisinde hareketsiz durumda üzerine etki eden kuvvetlerden sadece z ekseni (mühimmatı uçaktan uzaklaştıracak eksen) boyunca etki edene bakarak, bu kuvvetin maksimum olduğu durum mühimmat bırakmak için iyi bir zaman denilemeyeceği sonucuna varılmıştır.

Bu mühimmat ayrılması mühimmatın kanatçığı kavite kapağına çarparak K. Jamison ve arkadaşlarının 2017 yılında yapmış olduğu sınıflandırmaya göre 0 kodunu alarak hem temiz olmayan hem de kabul edilemez ayrılma gerçekleşmiştir.

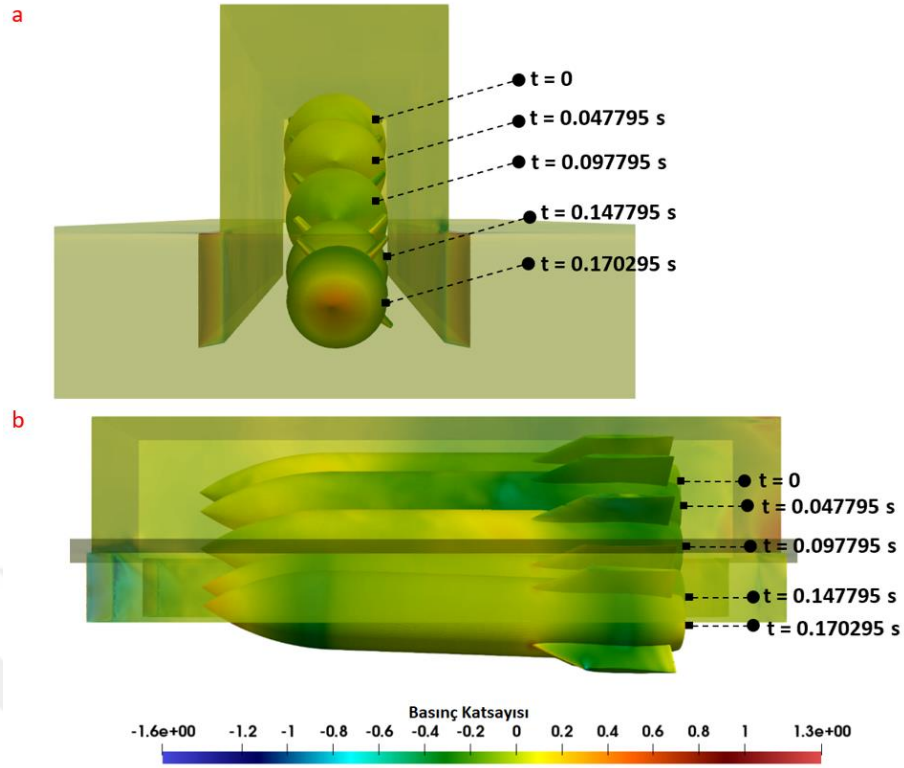


Şekil 4.30. *S CC D 90 A hareketli sayısal çözüme (DES) ait Fz min ve Fz max için mühimmat hızları a) x ekseni doğrusal hız bileşeni, b) z ekseni açısal hız bileşeni, c) y ekseni doğrusal hız bileşeni, d) x ekseni açısal hız bileşeni, e) z ekseni doğrusal hız bileşeni, f) y ekseni açısal hız bileşeni*

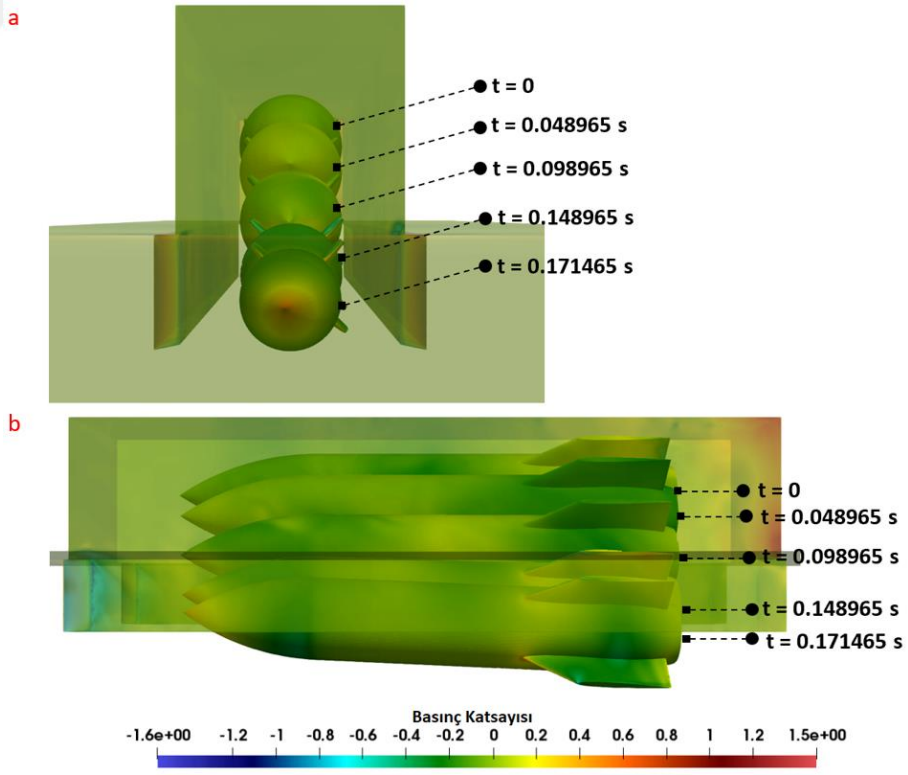


Şekil 4.31. *S CC D 90 A hareketli sayısal çözüme (DES) ait Fz min ve Fz max için mühimmat hareketi değerleri a) x ekseni boyunca öteleme, b) z ekseni etrafında dönme, c) y ekseni boyunca ötleme, d) x ekseni etrafında dönme, e) z ekseni boyunca öteleme, f) y ekseni etrafında dönme*

Şekil *4.32* ve **Şekil *4.33***'te mühimmatın z yönündeki kuvvetin maksimum ve minimum olduğu anlarda bırakılması ile izlediği yörünge önden ve yandan gösterilmektedir. Mühimmat, kavite ve kapaklar basınç katsayısı konturu ile renklendirilerek yörüngeyle birlikte basıncın bu bölgelerde nasıl değiştiği gösterilmiştir.



Şekil 4.32. *S CC D 90 A için hareketli sayısal çözüme (DES) ait Fz min için mühimmat hareketi gösterimi a) önden görünüş, b) yandan görünüş*



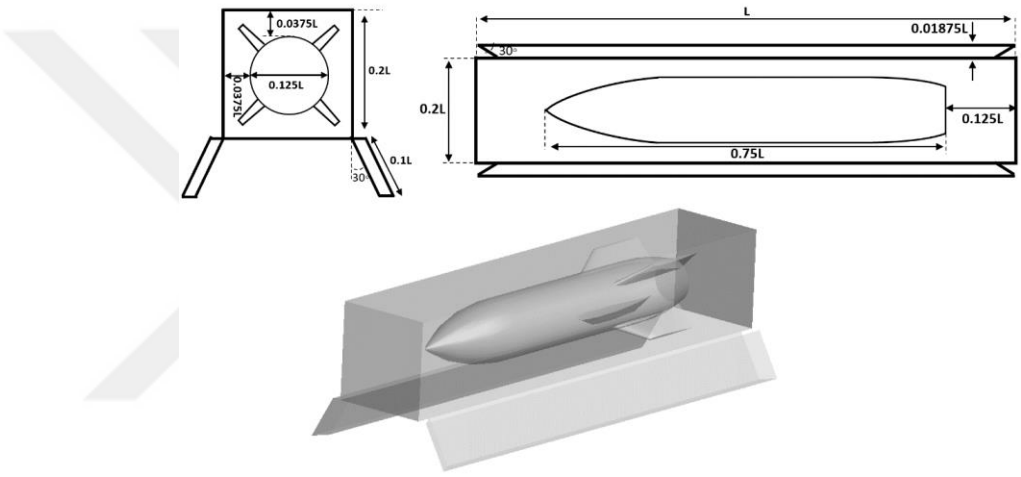
Şekil 4.33. *S CC D 90 A için hareketli sayısal çözüme (DES) ait Fz max için mühimmat hareketi gösterimi a) önden görünüş, b) yandan görünüş*

4.2. Mühimmat ve 60 Derece Açıya Sahip Kapaklı Temiz Kavite (S CC D 60)

90 derece açıya sahip kapaklı temiz kaviteden bırakılan mühimmatın kavite kapağına çarpmasından dolayı kavite kapaklarının açısı azaltılarak mühümmatın kapaklara çarpmaması sağlanmıştır. Bu kapsamda kavite kapakları kavite yüzeyiyle 60 derece açı yapacak şekilde konumlandırılmıştır.

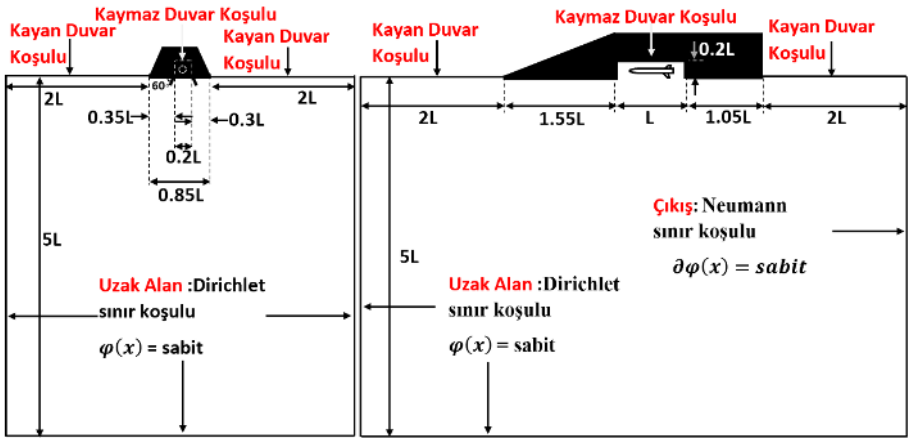
4.2.1. Hareketsiz sayısal çözüm

90 derece açıya sahip kapaklı çözümde kullanılan mühimmat aynı şekilde kavite içerisine yerleştirilmiştir. **Şekil *4.34***'te gösterildiği gibi kavite kapakları kavite yüzeyiyle 60 derece açı yapacak şekilde kavite dışına doğru yerleştirilmiştir.

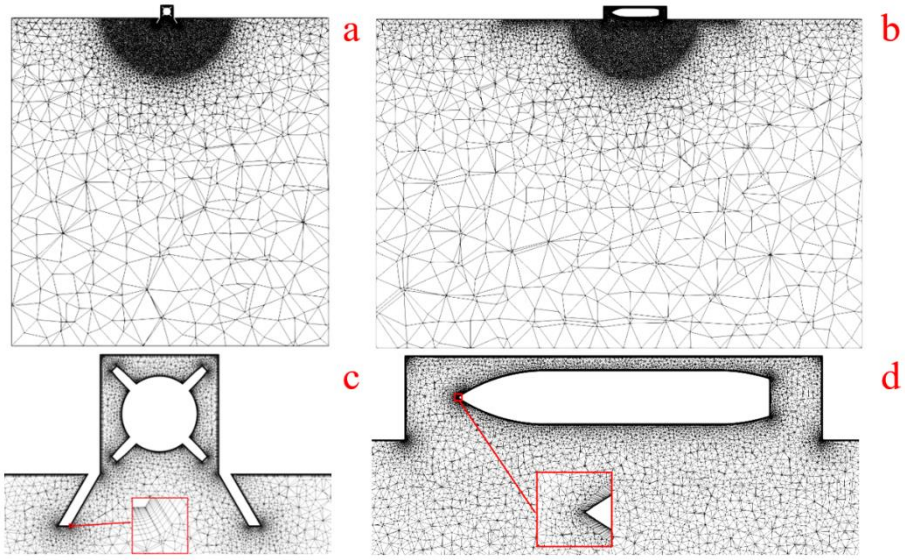


Şekil 4.34. *S CC D 60 A sayısal çözüm geometrisi*

S CC D 60 A çözüm alanı **Şekil *4.35***'deki gibi gösterilmektedir. Bu çözüm alanı için oluşturulan ağ yapısı ise **Şekil *4.36*** ile gösterilmektedir.

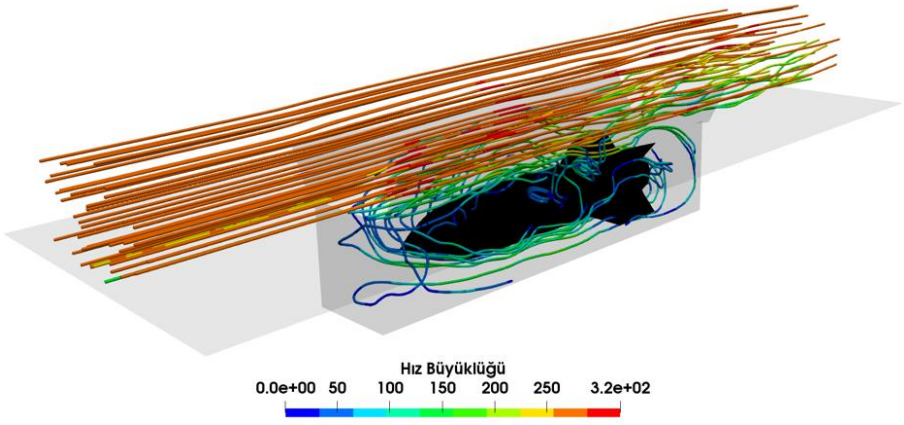


Şekil 4.35. *S CC D 60 A sayısal çözüm alanı*

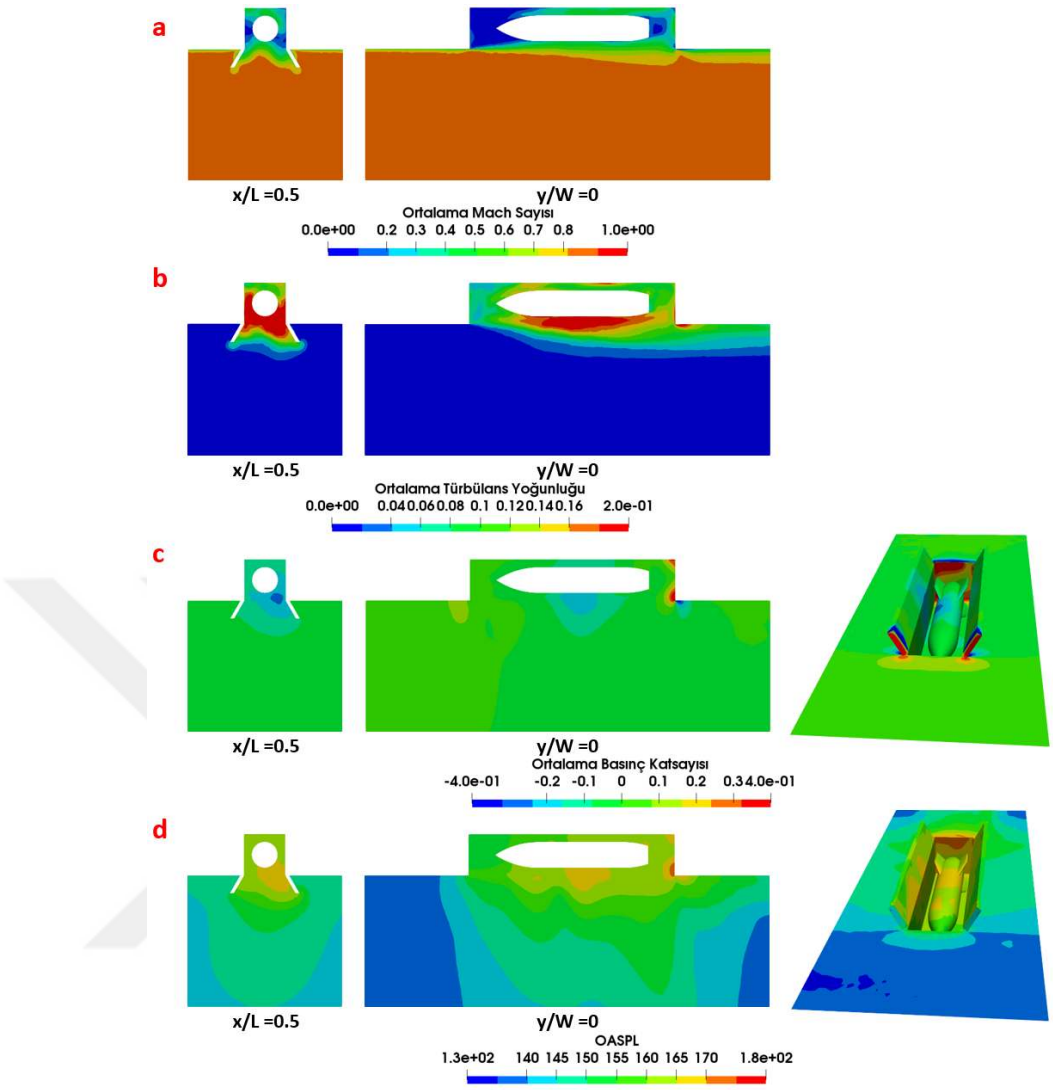


Şekil 4.36. *S CC D 60 A sayısal çözüm alanı ağı a) önden tüm ağ görüntüsü, b) yandan tüm ağ görüntüsü, c) önden yakın görüntü, d) yandan yakın görüntü*

Elde edilen anlık akım çizgileri **Şekil *4.37***'da ve ortalama değerlere ait konturlar **Şekil *4.38***'de gösterilmektedir. Kapak açısı 90 derece olan temiz kavite çözümü ile karşılaştırıldığında akım çizgilerinin, kayma tabakasının, basınç katsayısının ve OASPL dağılımlarının benzer olduğu görülmektedir. Kapakları açılandırmak türbülans yoğunluğunu bir miktar artırmıştır. Maksimum ve minimum değerlerin oluştuğu bölgeler ise aynı kalmıştır. S CC D 60 A çözümde kavite üzerinde oluşan maksimum OASPL değeri 172,09 dB iken mühimmat üzerinde oluşan maksimum OASPL değeri 174,803 dB olmuştur.

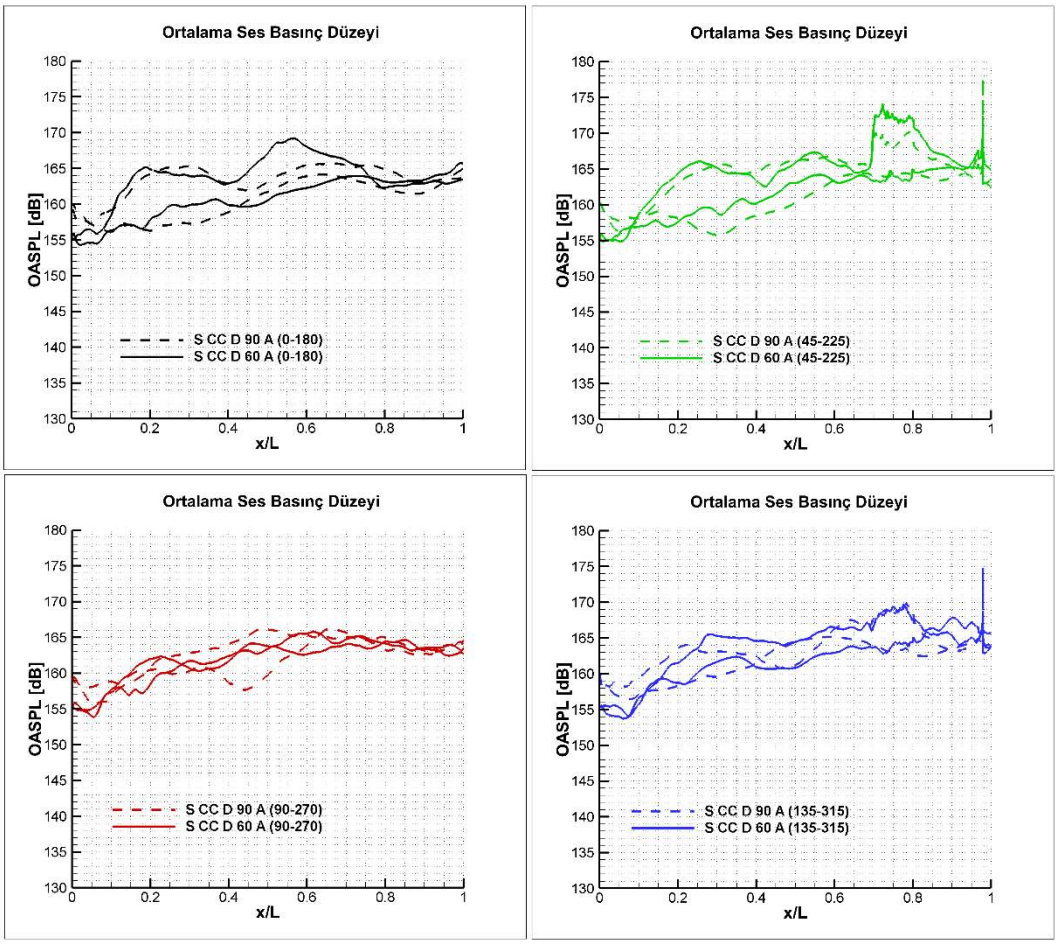


Şekil 4.37. *S CC D 60 A sayısal çözüme (DES) ait akım çizgileri*



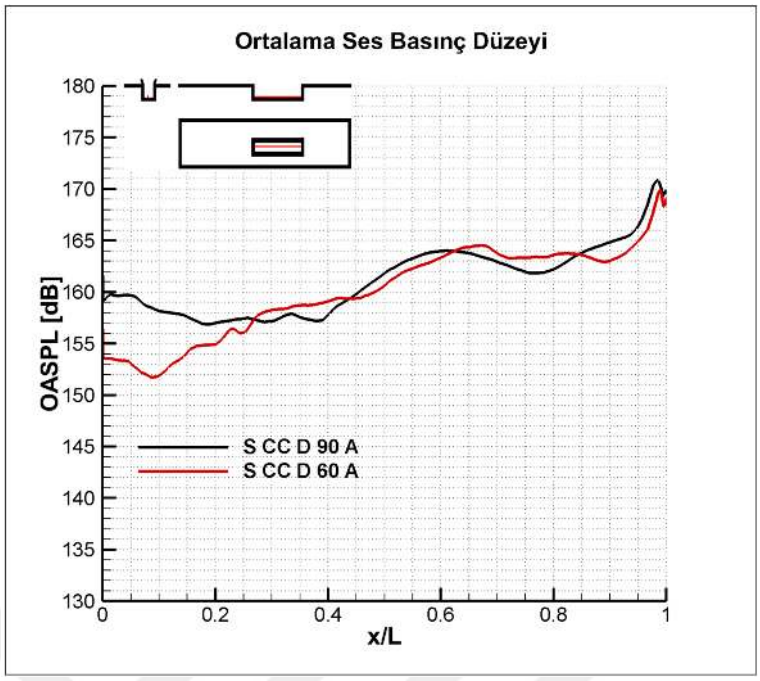
Şekil 4.38. *S CC D 60 A sayısal çözüme (DES) ait konturlar a) ortalama Mach sayısı, b) türbülans yoğunluğu, c) basınç katsayısı, d) OASPL*

Şekil *4.39*'da mühimmat boyunca **Şekil *4.8***'de gösterildiği gibi farklı açılarda alınmış OASPL değerleri grafiksel olarak gösterilmektedir. Maksimum OASPL değerleri yine aynı şekilde 225 dereceye denk gelen kesitte mühimmat arkasında bulunan kanatçık üzerinde oluşmuştur fakat S CC D 90 A çözümde mühimmat üzerinde oluşan maksimum OASPL değeri 176,351 dB iken S CC D 60 A çözümde bu değer 174,803 dB'e düşmüştür. **Şekil *4.39*** incelendiğinde görüleceği gibi kavite kapağı açısını artırmak mühimmat üzerinde ses basınç düzeyi olarak çok fark oluşturmamış olup maksimum değeri 1 dB kadar düşürmüştür.



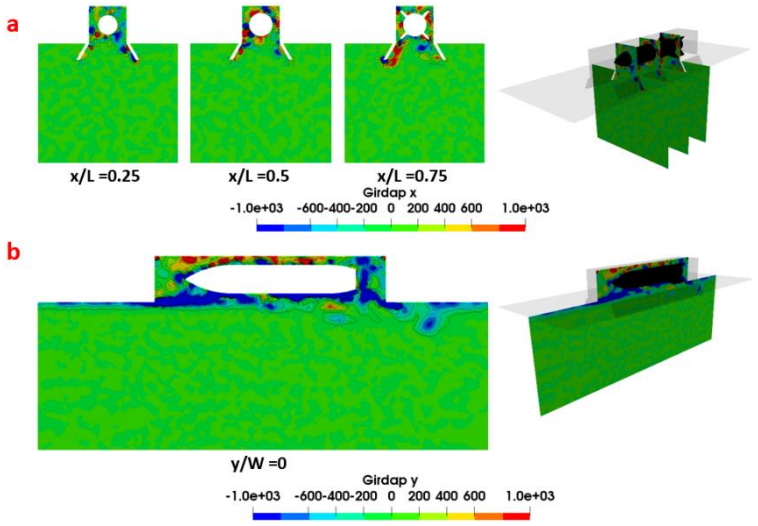
Şekil 4.39. *S CC D 60 A ve S CC D 90 A sayısal çözümlerine (DES) ait mühimmat OASPL değerleri*

Şekil *4.40*'de S CC D 90 A ve S CC D 90 A çözümlerinin kavite tabanından elde edilen OASPL değerleri karşılaştırılmıştır. Bu grafik incelendiğinde görüleceği gibi kapak açısını düşürerek kavite üzerindeki açıklığı artırmak kavite tabanındada kavite hücum kenarına yakın bölgede ses düzeyini düşürmektedir. Ayrıca S CC D 90 A çözümünde kavite duvarlarında oluşan maksimum OASPL değeri 174,367 dB iken S CC D 60 A çözümünde bu değer 172,09 dB'e düşmektedir. Böylece, kapak açısını düşürmek kavite duvarlarında oluşan maksimum OASPL değerini 2 dB düşürüyorken kavite tabanındaki OASPL dağılımını bazı bölgelerde düşürürken küçük bir bölgede artırmaktadır.

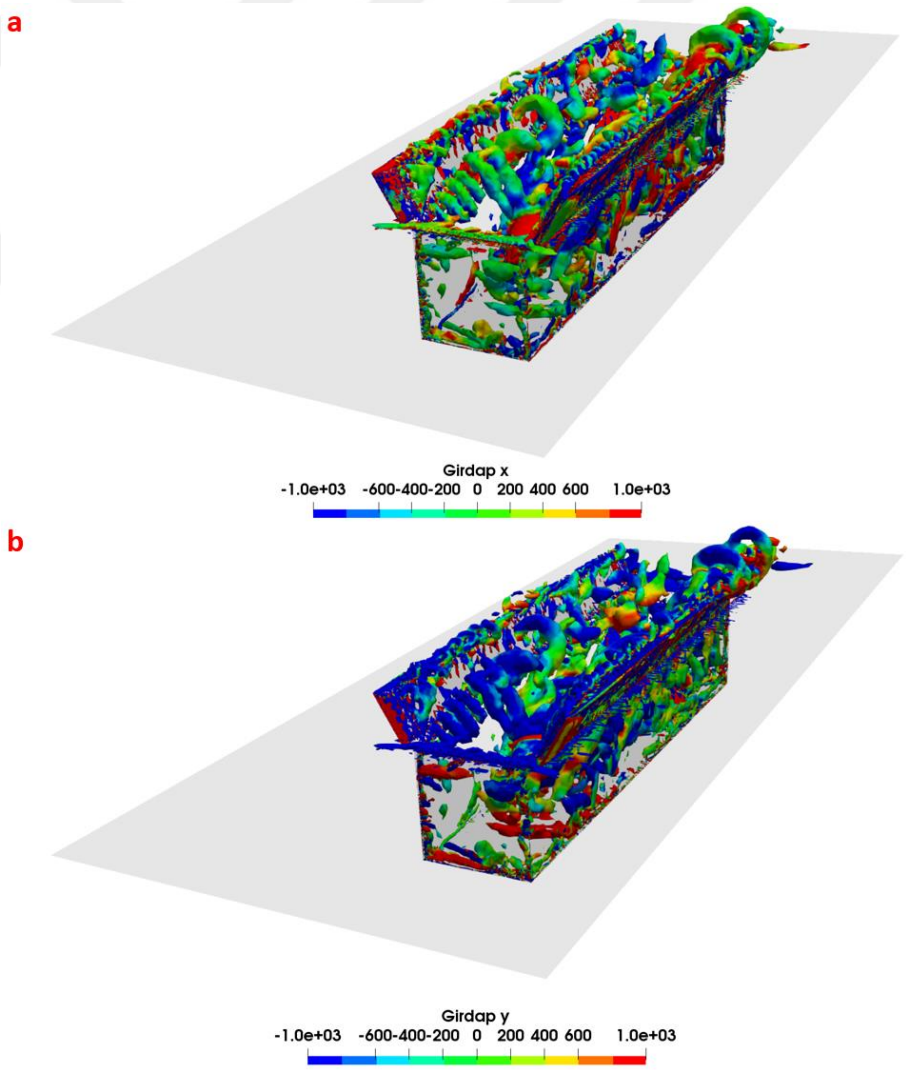


Şekil 4.40. *S CC D 60 A ve S CC D 90 A sayısal çözümlerine (DES) ait kavite tabanı OASPL karşılaştırması*

Şekil *4.41* ve **Şekil *4.42***'de S CC D 60 A çözümüne ait girdap yapıları görülmektedir. S CC D 90 A çözümden elde edilen girdap yapıları ile benzer yapılar elde edilmiştir. Kavite ortasında hücum kenarından firar kenarına doğru gelişen birincil sarmal tipi girdap yapılarının yanında kavite kenarlarında kapaklara doğru ikincil sarmal tipi girdapların oluştuğu görülmektedir. Yine benzer şekilde kapakaların önünde at nalı girdabı ile kapak uçlarında uç girdabının ve baloncuk tipi girdabın benzer şekilde oluştuğu görülmektedir. kapakların açılandırılması girdap yapıları anlamında akış fiziğini değiştirmediği görülmüştür.



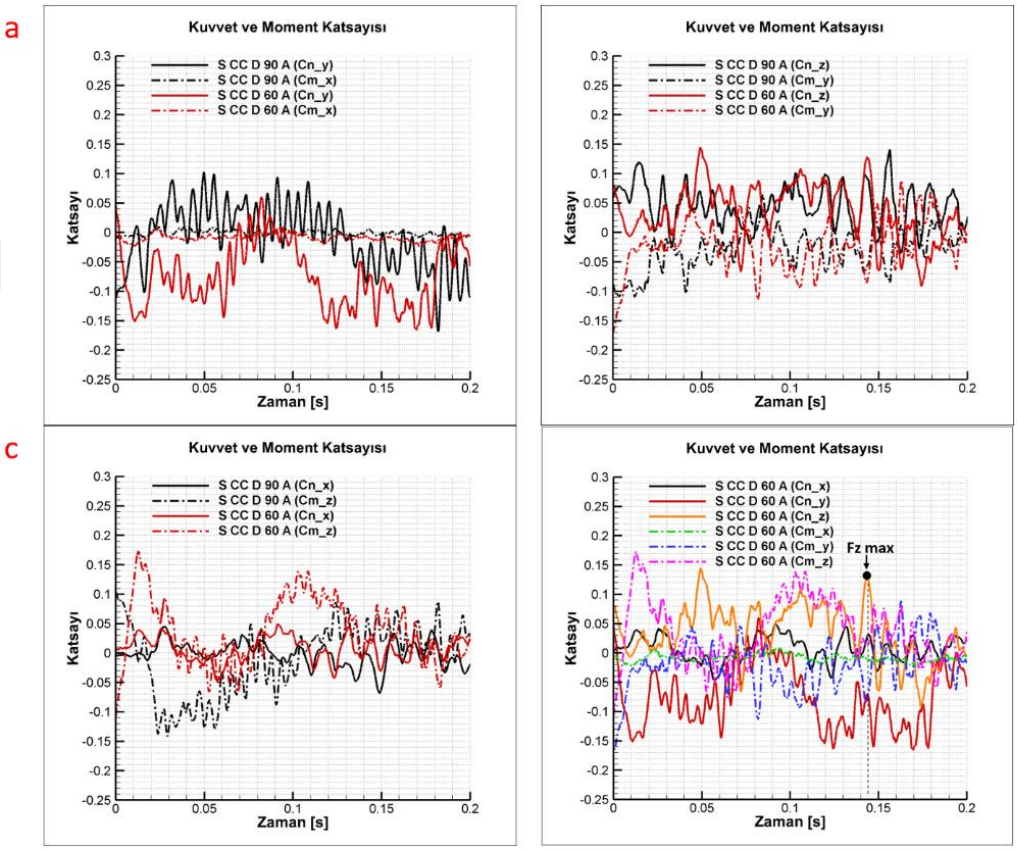
Şekil 4.41. *S CC D 60 A sayısal çözümüne (DES) ait girdap konturları a) x ekseni etrafında oluşan girdaplar, b) y ekseni etrafında oluşan girdaplar*



Şekil 4.42. *S CC D 60 A sayısal çözümüne (DES) ait eş yüzey Q-kriteri yapıları a) girdap-x ile renklendirme, b) girdap-y ile renklendirme*

4.2.2. Hareketli sayısal çözüm

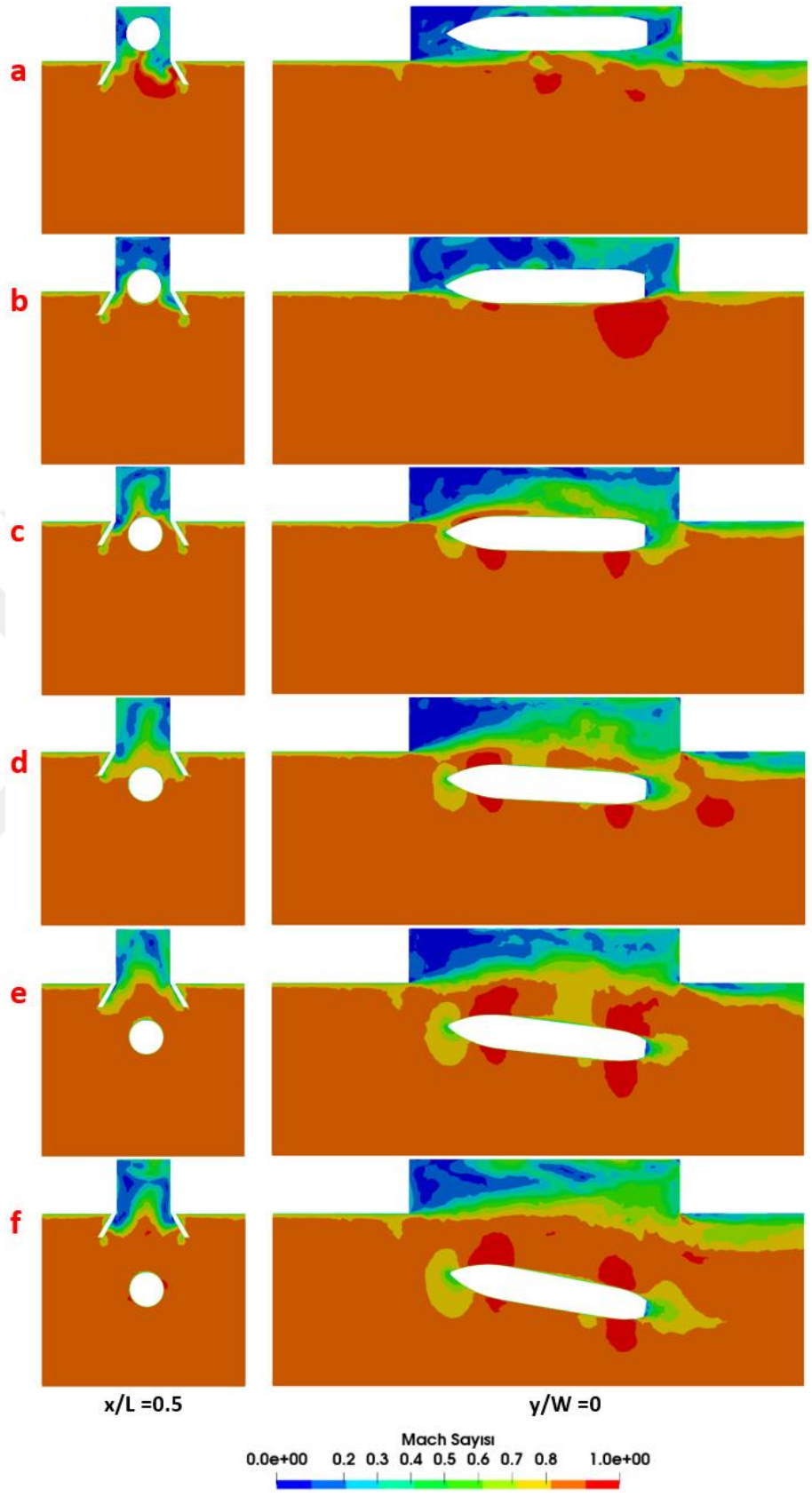
Hareketsiz çözümden elde edilen mühimmat üzerine etki eden kuvvet ve moment katsayıları 90 derece açıya sahip kapaklı çözümden elde edilenlerle birlikte **Şekil *4.43*** ile gösterilmektedir. Kavite kapağını açılandırmanın mühimat üzerine etki eden kuvvet ve moment katsayılarının frekansını ve genliğini değiştirmediği sadece zaman ile katsayıların işaretinin değişiminin farklılaştığı görülmektedir.



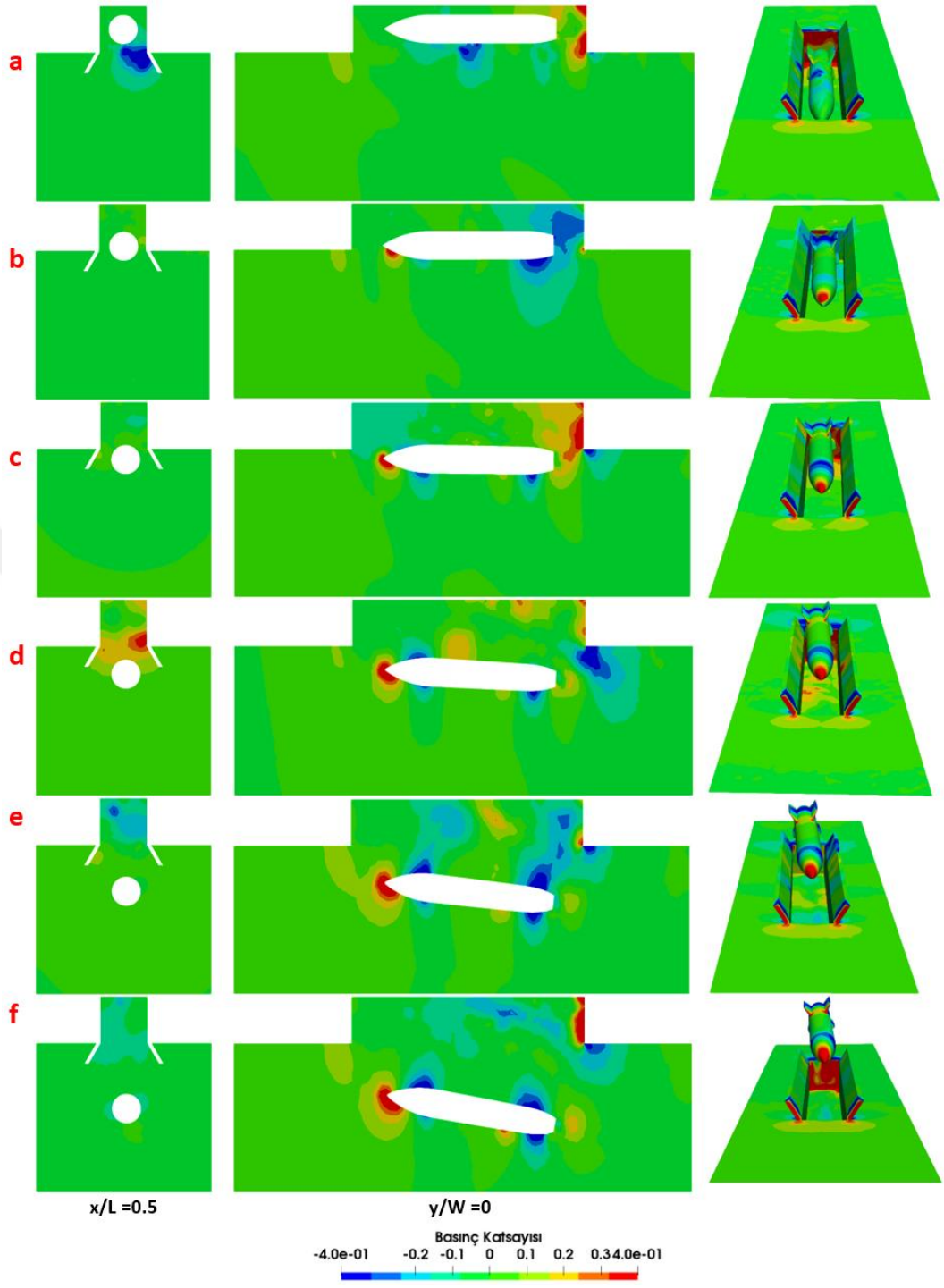
Şekil 4.43. *S CC D 60 A ve S CC D 90 A sayısal çözümlerine (DES) ait mühimmat üzerine etki eden kuvvet ve moment katsayıları a) y ekseni boyunca etki eden kuvvet katsayısı ve x ekseni etrafında etki eden moment katsayısı b) z ekseni boyunca etki eden kuvvet katsayısı ve y ekseni etrafında etki eden moment katsayısı c) x ekseni boyunca etki eden kuvvet katsayısı ve z ekseni etrafında etki eden moment katsayısı d) tüm katsayılar*

Başlangıç itici kuvvetleri ile S CC D 60 A ismiyle oluşturulan 60 derece kapak açısına sahip kapaklı temiz kaviteden **Şekil *4.43***'de gösterildiği gibi z ekseni boyunca normal kuvvetin maksimum olduğu anda bırakılarak hareketli çözüm gerçekleştirilmiştir. Bu çözüme ait farklı zamanlardan elde edilen akış parameterleri konturları **Şekil *4.44***, **Şekil *4.45***, **Şekil *4.46*** ve **Şekil *4.47***'de sunulmuştur. **Şekil *4.44***'de anlık Mach sayısı, **Şekil *4.45***'de anlık basınç katsayısı, **Şekil *4.46***'da x ekseni etrafında oluşan girdap ve **Şekil *4.47***'de ise y ekseni etrafında oluşan girdap konturlarının zamanla değişimleri

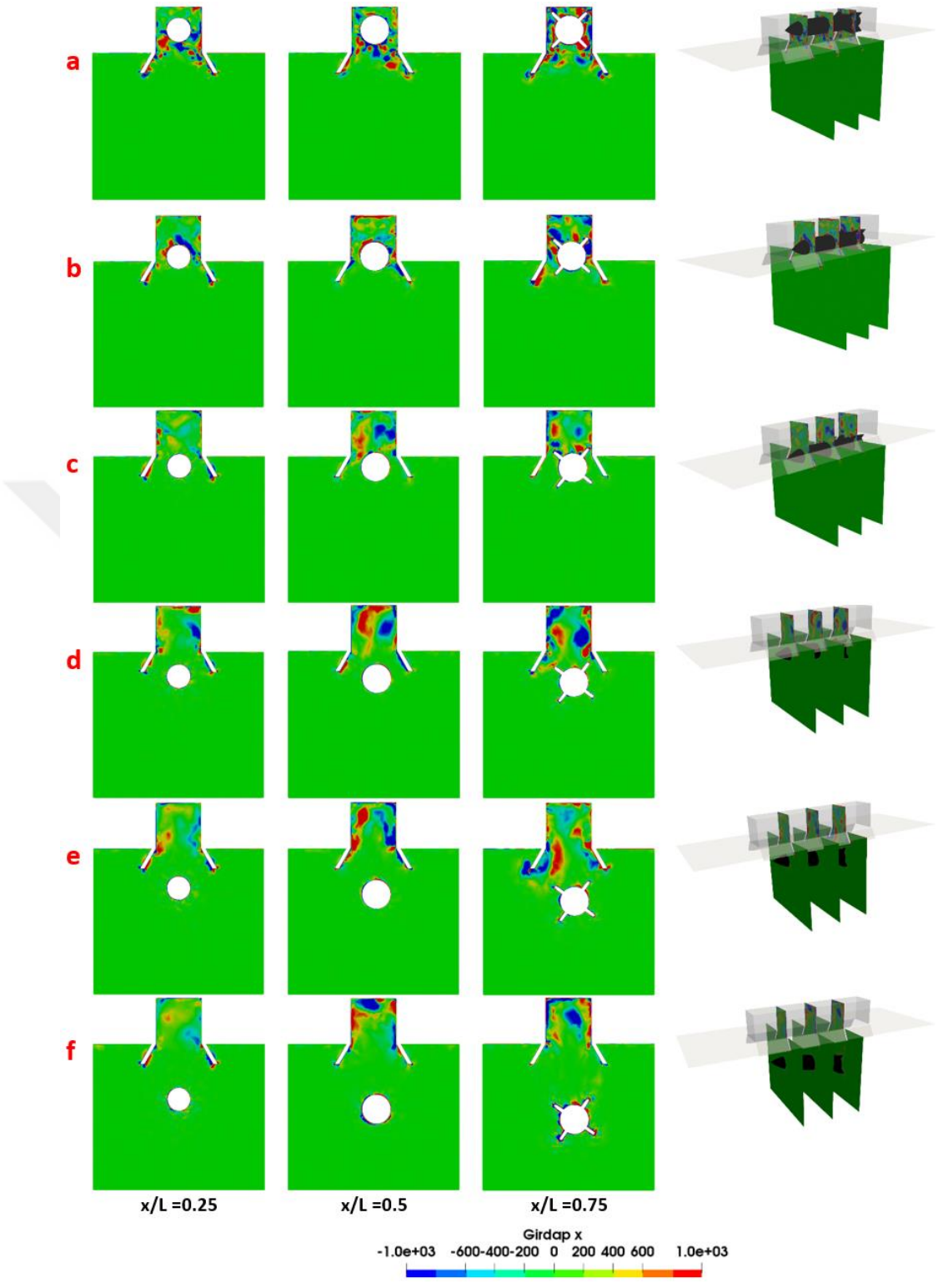
gösterilmektedir. Mühimmat kayma tabakası içerisinde ve hemen sonrasında mühümmat burnunun alt bölümünde durma noktası oluşmuştur. Mühimmat kayma tabakası içerisine girdiğinde mühimmatın alt arka bölgesinde ise akış hızlanmıştır. Buna bağlı olarak düşük basınç bölgesi oluşmuştur. Mühimmatın alt tarafında burun bölgesinde yüksek basıncın, arka bölgesinde düşük basıncın oluşması mühimmata hücüm açısı kazandırmıştır. Mühimmat kayma tabakasından ayrıldıktan sonra mühimmatın alt ve üst bölgesinde ters yönlü girdapların oluştuğu görülmektedir. Genel olarak değerlendirildiğinde elde edilen temel akış parametrelerinin konturları S CC D 90 A Fz max ve Fz min çözümlerinden elde edilenler ile benzerlik göstermektedir.



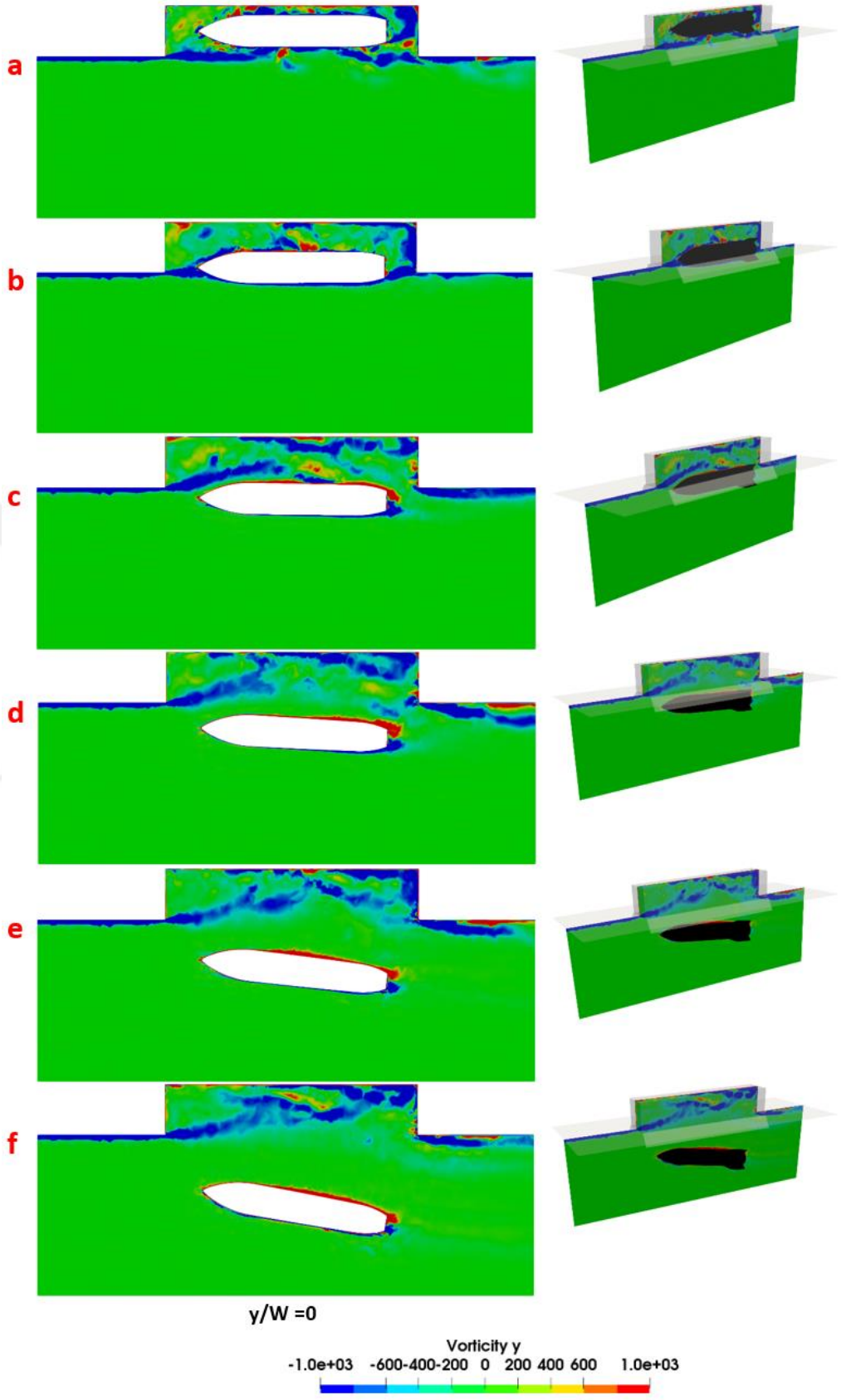
Şekil 4.44. *S CC D 60 A için hareketli sayısal çözüme (DES) ait Fz max için Mach Sayısı konturu a) t = 0 s, b) t = 0,091 s, c) t = 0,141 s, d) t = 0,191 s, e) t = 0,241 s, f) 0,291 s*



Şekil 4.45. *S CC D 60 A için hareketli sayısal çözüme (DES) ait Fz max için Basınç Katsayısı konturu a) t = 0 s, b) t = 0,091 s, c) t = 0,141 s, d) t = 0,191 s, e) t = 0,241 s, f) 0,291 s*

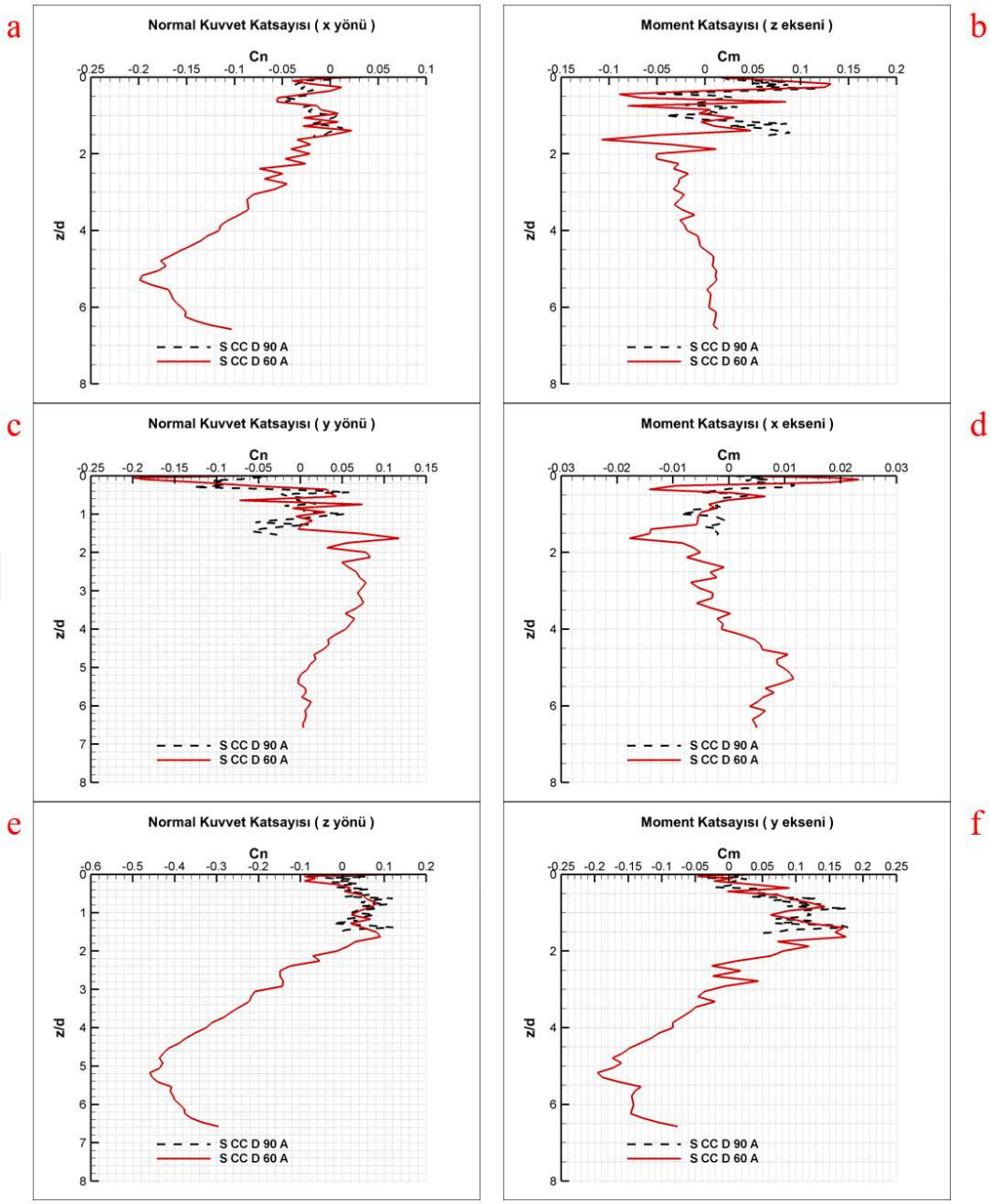


Şekil 4.46. *S CC D 60 A için hareketli sayısal çözüme (DES) ait Fz max için Girdap-x konturu a) t = 0 s, b) t = 0,091 s, c) t = 0,141 s, d) t = 0,191 s, e) t = 0,241 s, f) 0,291 s*



Şekil 4.47. *S CC D 60 A için hareketli sayısal çözüme (DES) ait Fz max için Girdap-y konturu a) t = 0 s, b) t = 0,091 s, c) t = 0,141 s, d) t = 0,191 s, e) t = 0,241 s, f) 0,291 s*

Şekil *4.48*'de z yönündeki normal kuvvetin maksimum olduğu zamanda bırakılan S CC D 90 A ve S CC D 60 A olarak adlandırılan iki sayısal çözüme ait mühimmat hareketi boyunca mühimmata etkiyen x, y ve z yönlerindeki normal kuvvet ve moment katsayılarının değişimi gösterilmektedir. S CC D 90 A çözümde mühimmat 0,175 s sonra kavite kapağına çarptığı için bu grafiklerde küçük bir bölümde görünmektedir. x ve z eksenleri boyunca etki eden kuvvet katsayıları bakımından iki çözümde benzer dağılım göstermektedir. Y ekseni boyunca etki eden kuvvette ise katsayı grafiğinden anlaşılacağı üzere S CC D 60 A çözümü daha fazla salınım göstermektedir. Bu katsayılardaki değişimin mühimmatın zamanla yapmış olduğu öteleme hareketine olan katkıları **Şekil *4.50***'de görülmektedir. Kuvvet katsaılarının ortalama olarak 0 dan ne kadar uzaklaşmalarına bağlı öteleme miktarları o kadar fazla olmaktadır. Moment katsayılarında ise y ekseni (yunuslama) etrafında dönmeyi sağlayan moment katsayıları benzer dağılım göstermiştir. Kapak açısını artırmak x ekseni (yalpalama) ve z ekseni (sapma) etrafında dönmeyi sağlayan moment katsayılarındaki değişimi artırarak aynı süre içerisinde daha fazla dönme açısı yaratmıştır.

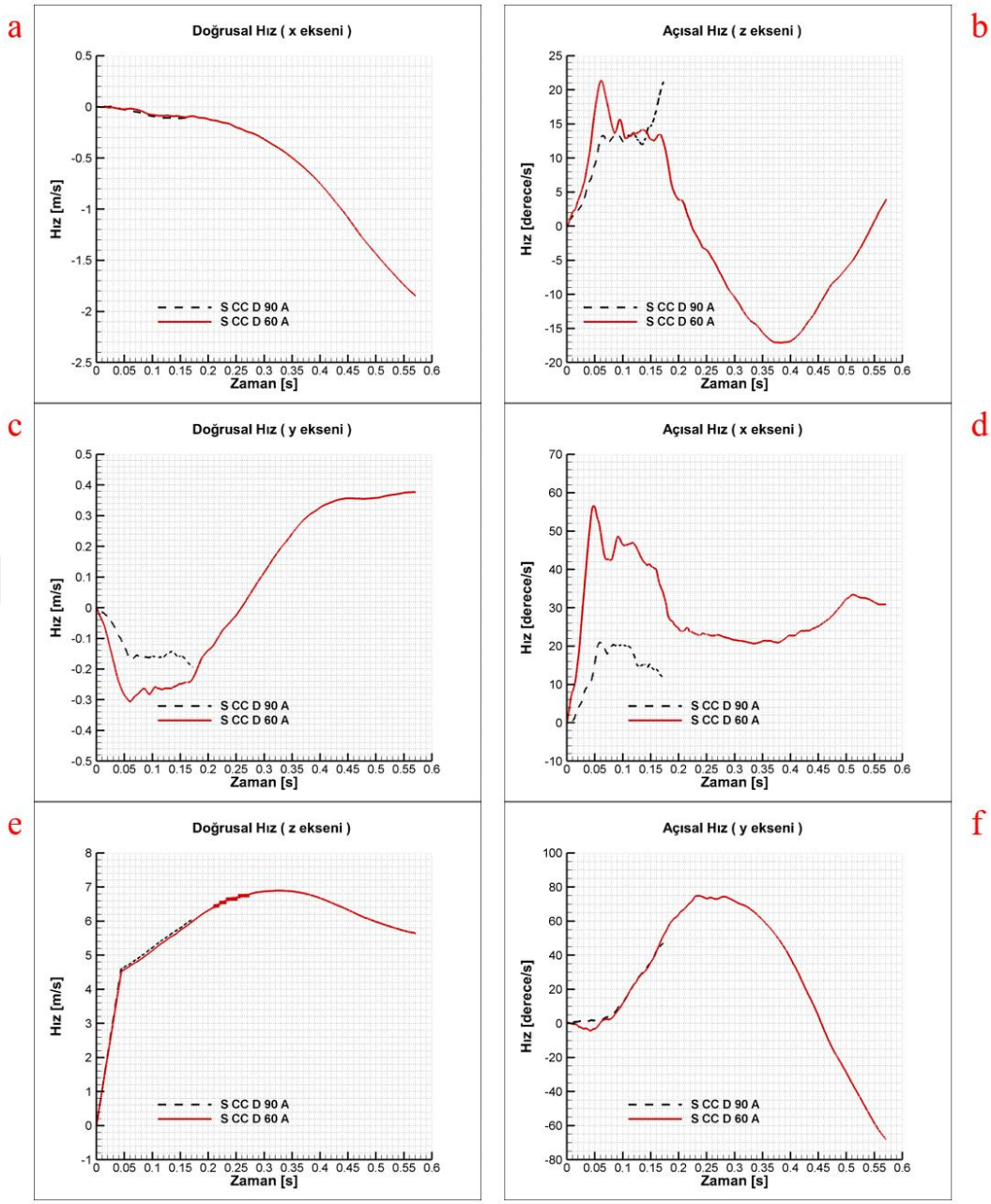


Şekil 4.48. *S CC D 60 A ve S CC D 90 A hareketli sayısal çözümlere (DES) ait Fz max için mühimmat üzerine etki eden katsayıların değişimi a) x ekseni boyunca etki eden kuvvet katsayısı, b) z ekseni etrafında etki eden moment katsayısı, c) y ekseni boyunca etki eden kuvvet katsayısı, d) x ekseni etrafında etki eden moment katsayısı, e) z ekseni boyunca etki eden kuvvet katsayısı, f) y ekseni etrafında etki eden moment katsayısı*

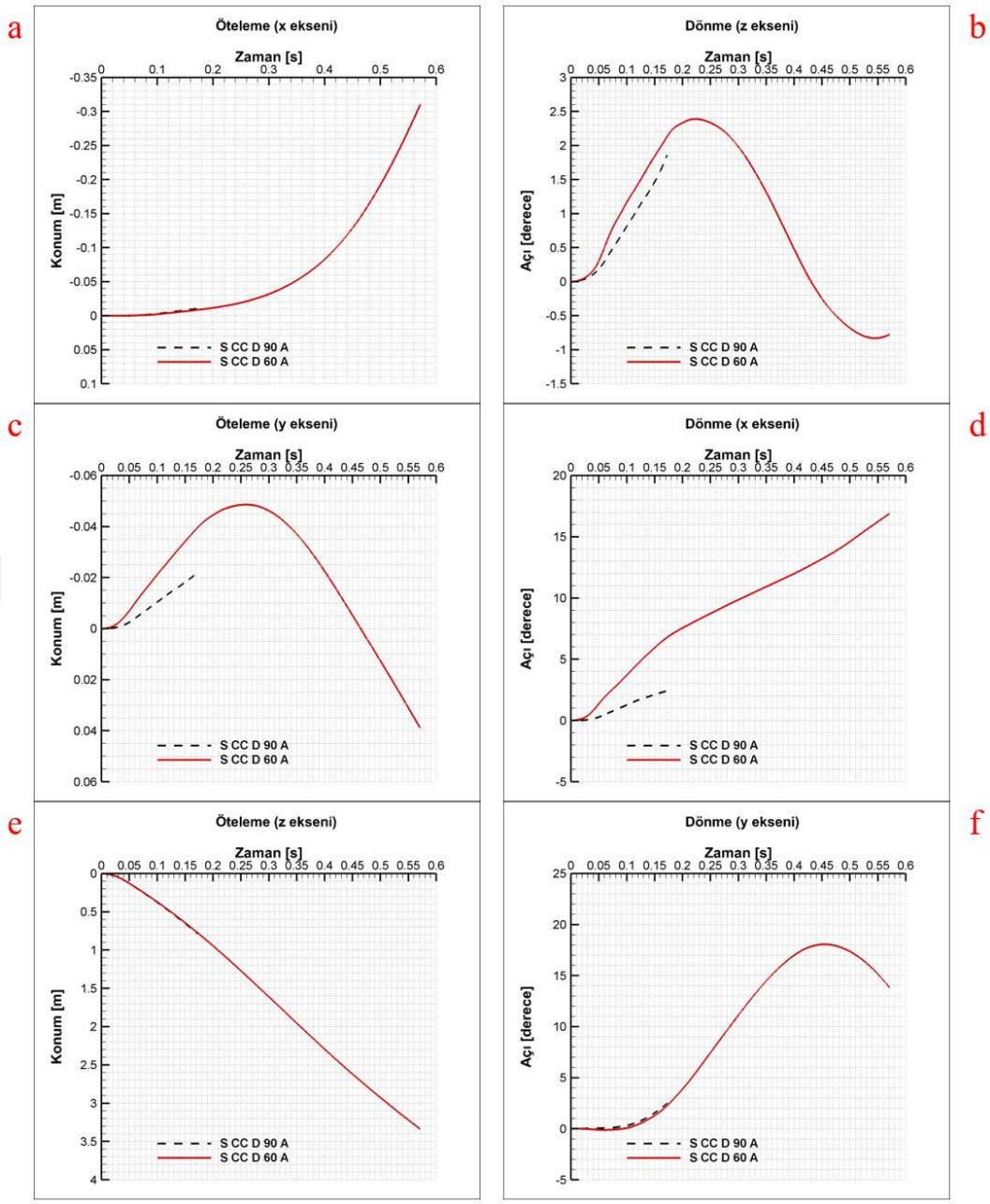
Şekil *4.49* ve **Şekil *4.50***'de aynı fırlatma kuvvetine maruz kalmış bir mühimmatın normal yöndeki kuvvetin maksimum olduğu anda 60 ve 90 derece kapak açısına sahip temiz kavite çözümlerine ait zamana bağlı çizgisel ve açısal hız, öteleme ve dönme değerleri verilmiştir. **Şekil *4.49***'da görüldüğü gibi kavite kapak dışarı doğru yerleştirildiğinde 0,17 s'ye kadar x ve z ekseni çigisel hızları aynı oluyorken y ekseni çizgisel hızı daha fazla olmaktadır. Benzer şekilde açısal hızları karşılaştırıldığında ise y

eksenindeki açısal hızları benzer iken x ve z ekseninde kapak açısı 60 derece olan çözüm daha fazla hızlanmıştır. **Şekil *4.50***'deki öteleme değerleri karşılaştırıldığında, 90 derece kapak açısına sahip kaviteden bırakılan mühimmatın kapağa çarptığı an olan 0,17 s'ye kadar x ve z ekseni boyunca öteleme değerlerin aynı olduğu y ekseninde ise kapak açısını azaltmanın mühimmatı daha fazla ötelediği görülmektedir. **Şekil *4.50***'deki dönme değerleri karşılaştırıldığında kapak açısını azaltmak yunuslama açısında farklılık oluşturmamasına karşın yalpalama ve sapma açılarını artırmıştır. Kavite kapağını dışarı doğru 30 derece yapacak şekilde yerleştirmek mühümmatın 0,17 s sonra x ekseni etrafındaki dönme değerini 2,5 dereceden 6 derecenin üzerine çıkarmıştır. Kavite içerisinden mühimmat bırakmada önemli olan mühimmatın ne kadar kaviteye yaklaştığı ya da uzaklaştığı ve kaviteye ne kadar yöneldiğidir. Bu nedenle y ve z eksenlerindeki öteleme ve dönme değerleri daha önemlidir. Kapak açısını azaltarak kapakları dışarı doğru 30 derece yapacak şekilde yerleştirmek yanal hareketi sağlayan hem y ekseni boyunca öteleme hemde z ekseni etrafındaki dönme değerini artırmıştır. Fakat kapaklar dışarı doğru yerleştirildiği için mühimmat kapaklara çarpmadan kavite ve kapakları tamamen terk etmiştir.

Yapılan bu analizde mühimmat kaviteyi tamamamen terk ederek K. Jamison ve arkadaşlarının yapmış olduğu sınıflandırmaya göre diğer tüm kriterleri geçerek **Tablo *1.2***'deki 4 kodunu alarak temiz ayrılma oluşturmuşur. Fakat 18 dereceyi geçen hücum açısı ve 80 derece/s'yi geçen açısal hızı ile kabuledilebilir sınıfa girmemektedir. Bundan sonraki çalışmalarda uygulanacak pasif kontrol yöntemlerin mühimmat ayrılmasına nasıl etki ettiği incelenecektir.

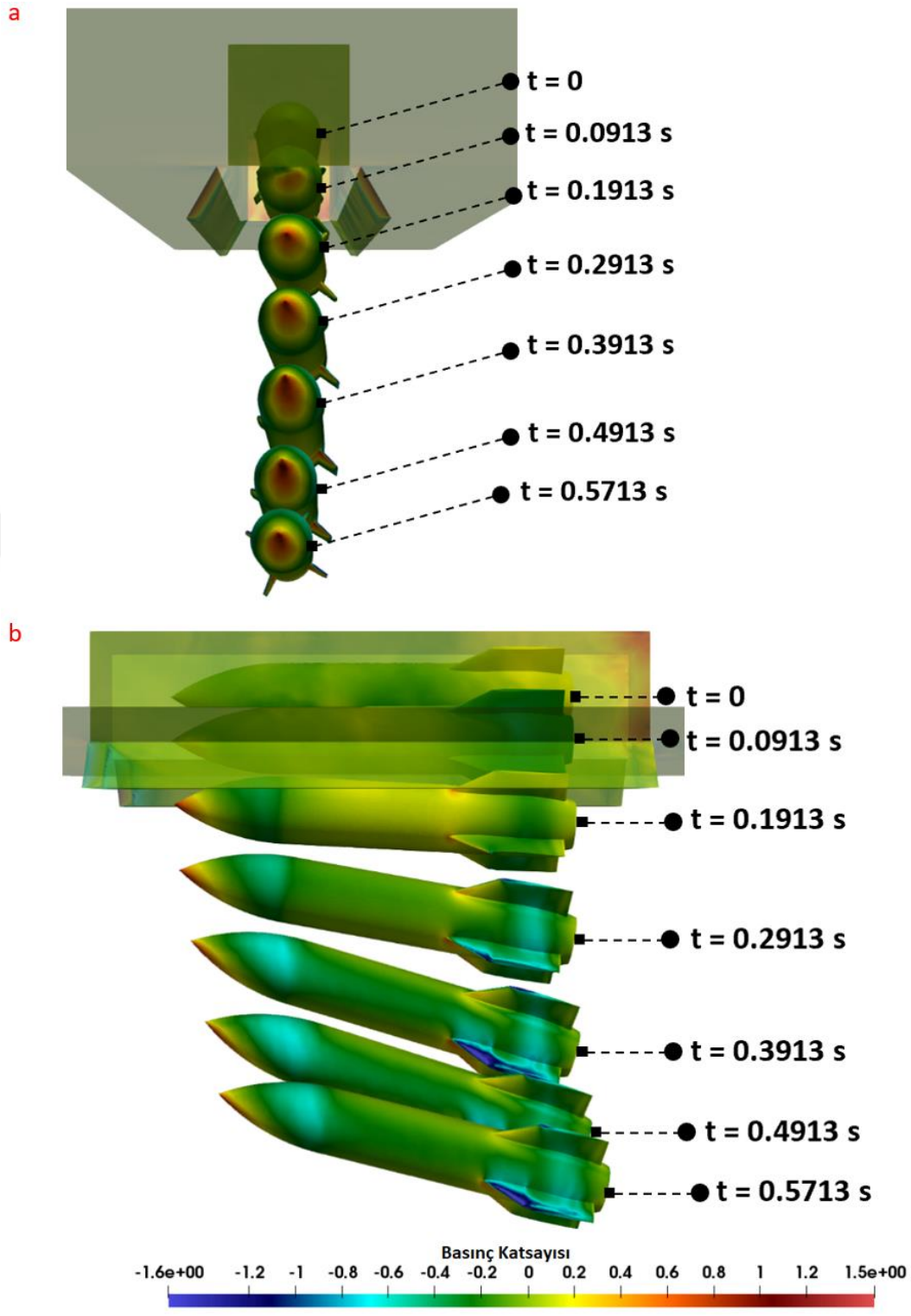


Şekil 4.49. *S CC D 60 A ve S CC D 90 A hareketli sayısal çözümlere (DES) ait Fz max için mühimmat hareket hızları a) x ekseni doğrusal hız bileşeni, b) z ekseni açısal hız bileşeni, c) y ekseni doğrusal hız bileşeni, d) x ekseni açısal hız bileşeni, e) z ekseni doğrusal hız bileşeni, f) y ekseni açısal hız bileşeni*



Şekil 4.50. *S CC D 60 A ve S CC D 90 A hareketli sayısal çözümlere (DES) ait Fz max için mühimmat hareketi a) x ekseni boyunca öteleme, b) z ekseni etrafında dönme, c) y ekseni boyunca ötleme, d) x ekseni etrafında dönme, e) z ekseni boyunca öteleme, f) y ekseni etrafında dönme*

Şekil *4.51*'de S CC D 60 A çözümünde elde edilen mühimmat yörüngesinin zamana bağlı görselleştirilmesi sunulmuştur.



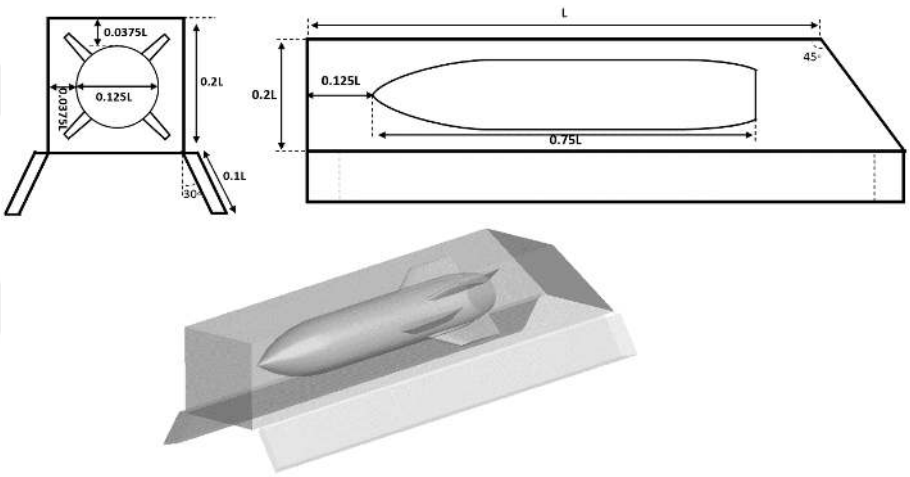
Şekil 4.51. *S CC D 60 A hareketli sayısal çözümlere (DES) ait Fz max için mühimmat hareketi gösterimi a) önden görünüş, b) yandan görünüş*

4.3. Mühimmat ve 60 Derece Açıya Sahip Kapaklı Arka Duvarı Eğimli Kavite (S SW D 60)

60 derece açıya sahip kapaklı temiz kaviteden bırakılan mühimmatın **Tablo *1.2***'ye göre temiz fakat Carter'a göre (Carter, 2012) kabuledilemez olmasından dolayı pasif akış kontrol uygulamalarından olan arka duvarın eğilmesi yöntemi kullanılmıştır. Bu kapsamda kavite firar duvarı 45 derece açı yapacak şekilde eğilmiştir.

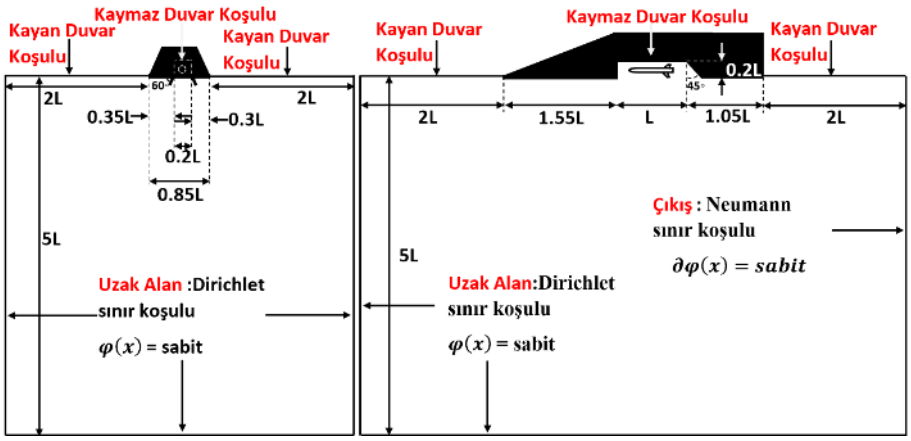
4.3.1. Hareketsiz sayısal çözüm

90 derece açıya sahip kapaklı çözümde kullanılan mühimmat aynı şekilde kavite içerisine yerleştirilmiştir. **Şekil *4.52***'da gösterildiği gibi kavite arka duvarı 45 derece eğilmiştir.

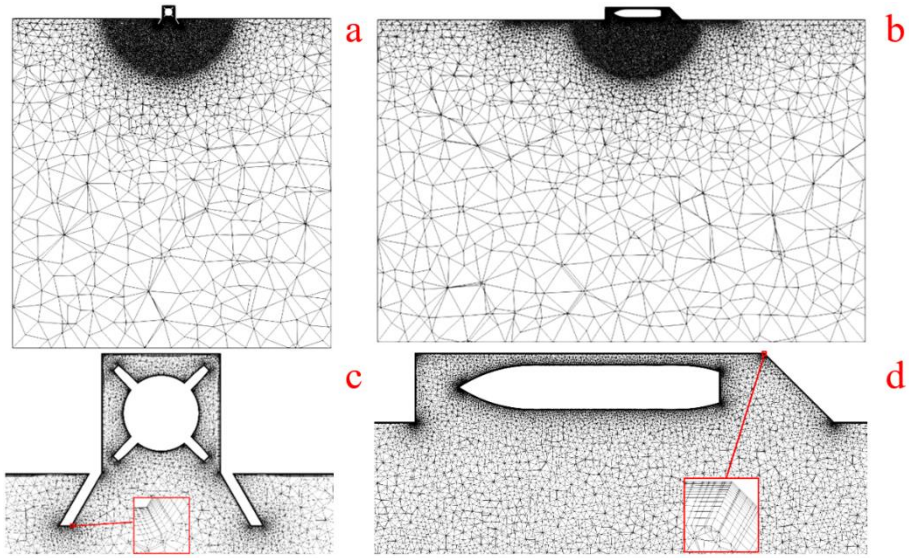


Şekil 4.52. *S SW D 60 A sayısal çözüm geometrisi*

S SW D 60 A çözüm alanı **Şekil *4.53***'teki gibi gösterilmektedir. Bu çözüm alanı için oluşturulan ağ yapısı ise **Şekil *4.54*** ile gösterilmektedir.

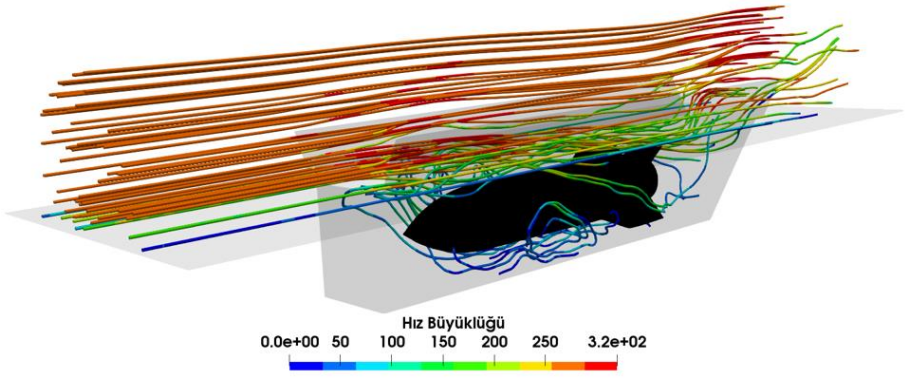


Şekil 4.53. *Mühimmatlı 60 derece açıya sahip kapaklı arka duvarı eğimli kavite çözüm alanı*

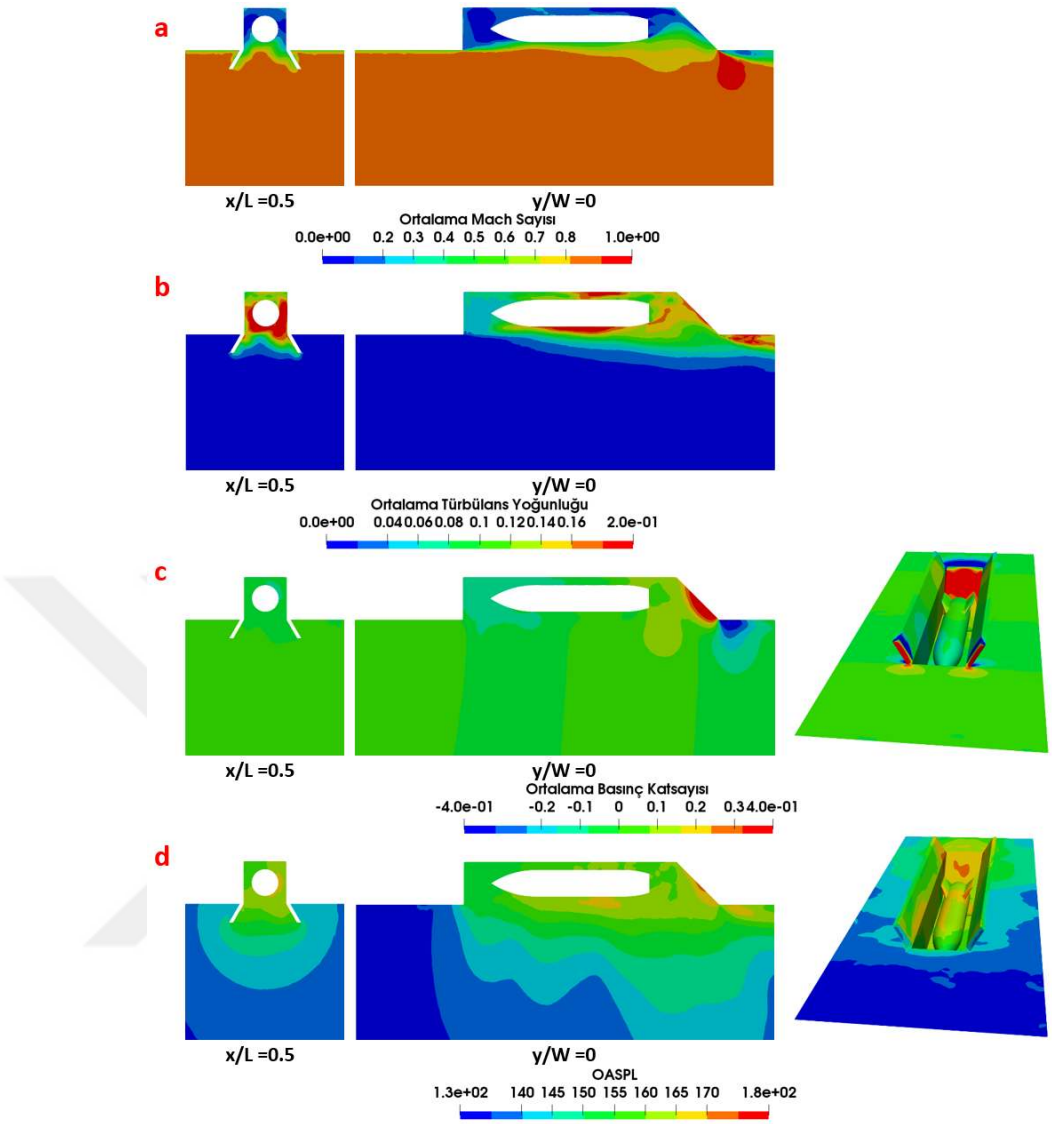


Şekil 4.54. *S SW D 60 A sayısal çözüm alanı ağı a) önden tüm ağ görüntüsü, b) yandan tüm ağ görüntüsü, c) önden yakın görüntü, d) yandan yakın görüntü*

Sayısal çözümden elde edilen anlık akım çizgileri **Şekil *4.55***'te ve ortalama değerlere ait konturlar **Şekil *4.56***'da gösterilmektedir. akışın kavite firar kenarı bölgesinde hızlandığı akım çizgilerinin kavite firar kenarının üstünde bir birilerine yaklaşmasından ve Mach konturundan açıkça görülmektedir. Temiz kavite ile karşılaştırıldığında arka duvarı eğmek genel akış yapısını değiştirmemekle birlikte mühimmat etrafındaki ortalama türbülans yoğunluğunu düşürdüğü, kavite firar duvarında ve mühimmatın alt arka köşesinde basınç katsayısını artırdığı ve OASPL dağılımında önemli derecede etki etmediği görülmektedir. Maksimum ve minimum değerlerin oluştuğu bölgeler aynı kalmıştır. S SW D 60 A çözümde kavite üzerinde oluşan maksimum OASPL değeri 175,735 dB iken mühimmat üzerinde oluşan maksimum OASPL değeri 176,38 dB olmuştur.

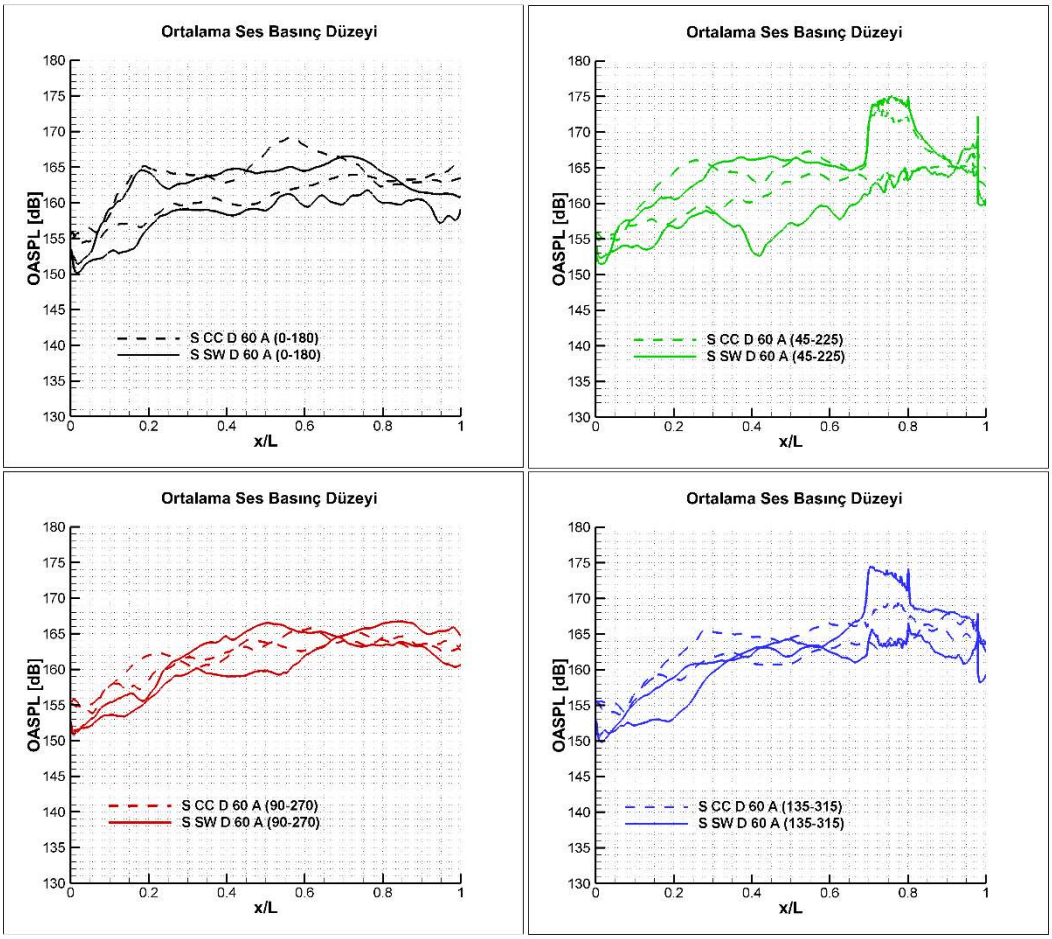


Şekil 4.55. *S SW D 60 A sayısal çözüme (DES) ait akım çizgileri*



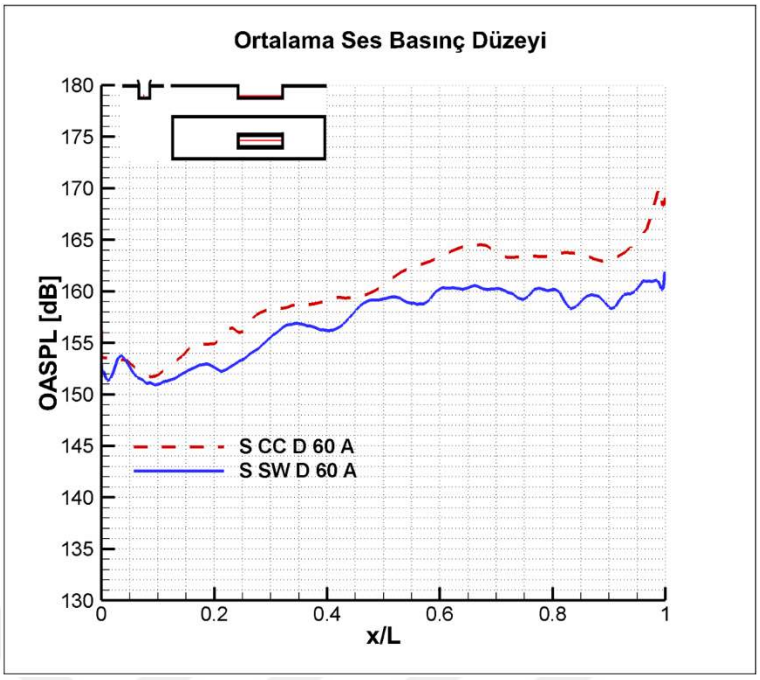
Şekil 4.56. *S SW D 60 A sayısal çözüme (DES) ait konturlar a) ortalama Mach sayısı, b) türbülans yoğunluğu, c) basınç katsayısı, d) OASPL*

Şekil *4.57*'da mühimmat boyunca **Şekil *4.8***'de gösterildiği gibi farklı açılarda alınmış OASPL değerleri grafiksel olarak gösterilmektedir. Maksimum OASPL değerleri yine aynı şekilde 225 dereceye denk gelen kesitte mühimmat arkasında bulunan kanatçık üzerinde oluşmuştur ve 135 dereceye denk gelen kesittede maksimum değere yakın değerler görülmüştür. S CC D 60 A çözümde mühimmat üzerinde oluşan maksimum OASPL değeri 174,803 dB iken S SW D 60 A çözümde bu değer 176,38 dB'e çıkmıştır. **Şekil *4.57*** incelendiğinde görüleceği gibi kavite arka duvarını eğmek mühimmat üzerinde oluşan ses basınç düzeyi dağılımını 45 derece kesitinde mühimmat ortasında iyileştirirken 135 derece kesitinde kanatçık bölgesinde kötüleştirmiştir. Maksimum ortalama ses basınç değerini 2 dB kadar artırmış dağılımda ise iyileştirme göstermemiştir.



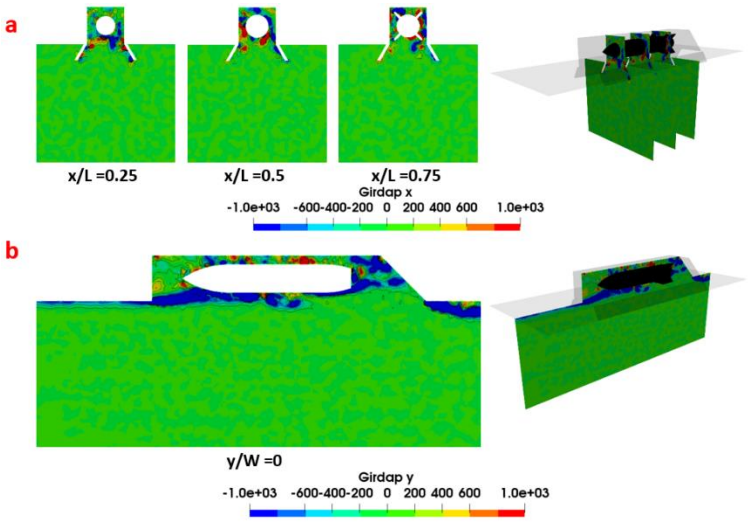
Şekil 4.57. *S SW D 60 A ve S CC D 60 A sayısal çözümlerine (DES) ait mühimmat OASPL değerleri*

Şekil *4.58*'de S CC D 60 A ve S SW D 60 A çözümlerinin kavite tabanından elde edilen OASPL değerleri karşılaştırılmıştır. Bu grafik incelendiğinde görüleceği gibi arka duvarı eğmek mühimmatsız yapıda olduğu gibi kavite tabanında da ses düzeyini düşürmektedir. Mühimmatsız kavitede arka duvarı eğmek kavite tabanında ses düzeyini ortalama 4-5 dB düşürüyor iken kavite içerisine mühimmat yerleştirildiğinde bu değer ortalama 2 dB'e düşmektedir. Ayrıca kavite duvarlarında oluşan maksimum OASPL değeri S CC D 60 A'da 172,09 dB iken S SW D 60 A çözümünde bu değer 175,735 dB'e çıkmıştır. Böylece, arka duvarı eğmek kavite duvarlarında oluşan maksimum OASPL değerini 2 dB kadar artırıyorken kavite tabanındaki OASPL dağılımını ortlama 2 dB düşürmektedir.

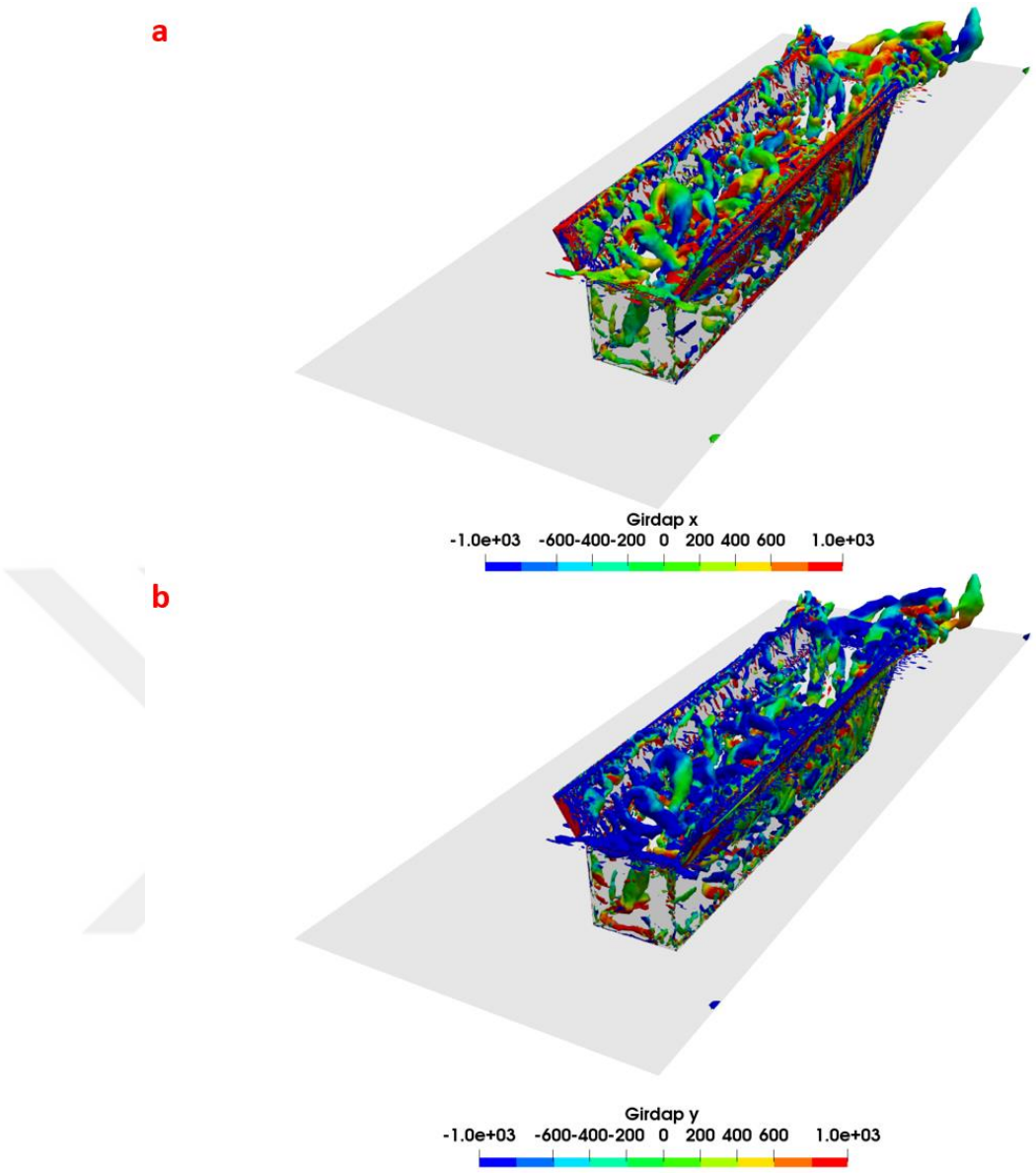


Şekil 4.58. *S SW D 60 A ve S CC D 60 A sayısal çözümlerine (DES) ait kavite tabanı OASPL karşılaştırması*

Şekil *4.59* ve **Şekil *4.60***'ta S SW D 60 A hareketsiz çözümüne ait girdap yapıları görülmektedir. Temiz kavite görülen girdap yapıların tamamı görülmüştür. Ayrıca kavite arka duvarın eğilmesi mühimmat ile firar duvarı arasında kalan boşluğu artırmasından dolayı kavite firar kenarı sonrasında hızı artırdığı gibi girdap yapılarını da artırmıştır.



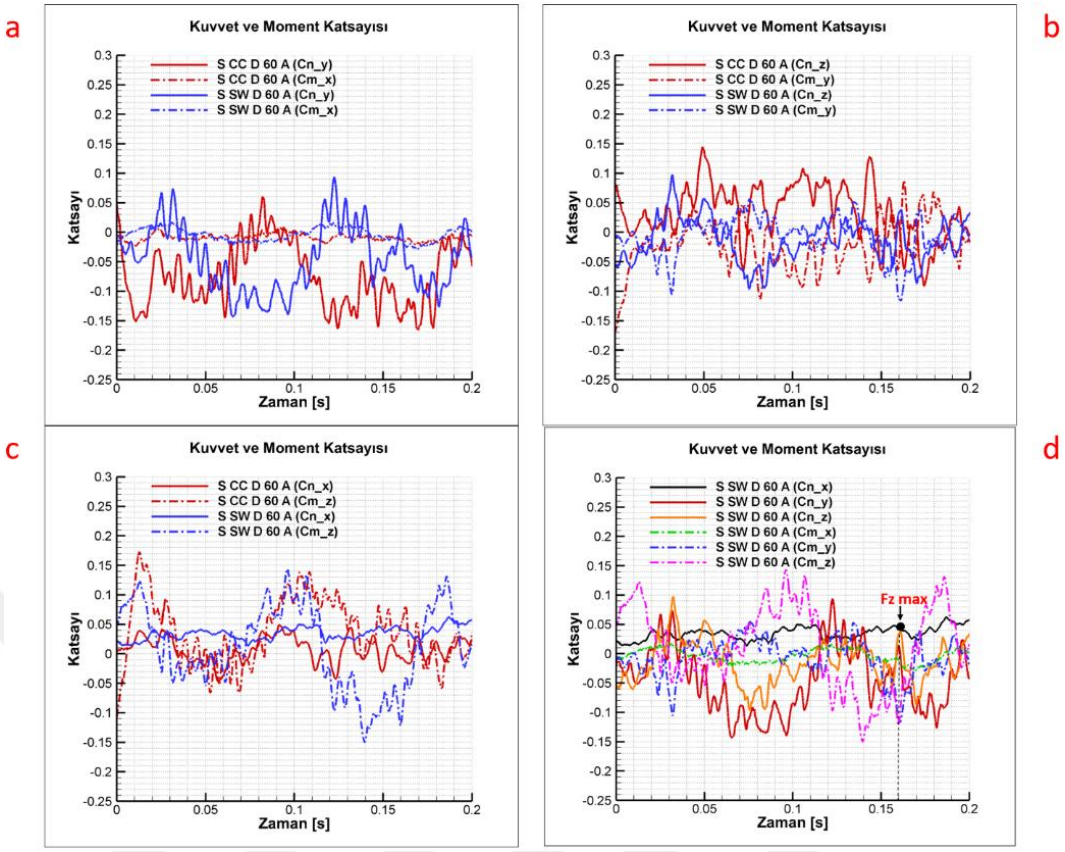
Şekil 4.59. *S SW D 60 A sayısal çözüme (DES) ait girdap konturları a) x ekseni etrafında oluşan girdaplar, b) y ekseni etrafında oluşan girdaplar*



Şekil 4.60. *S SW D 60 A sayısal çözüme (DES) ait eş yüzey Q-kriteri yapıları a) girdap-x ile renklendirme, b) girdap-y ile renklendirme*

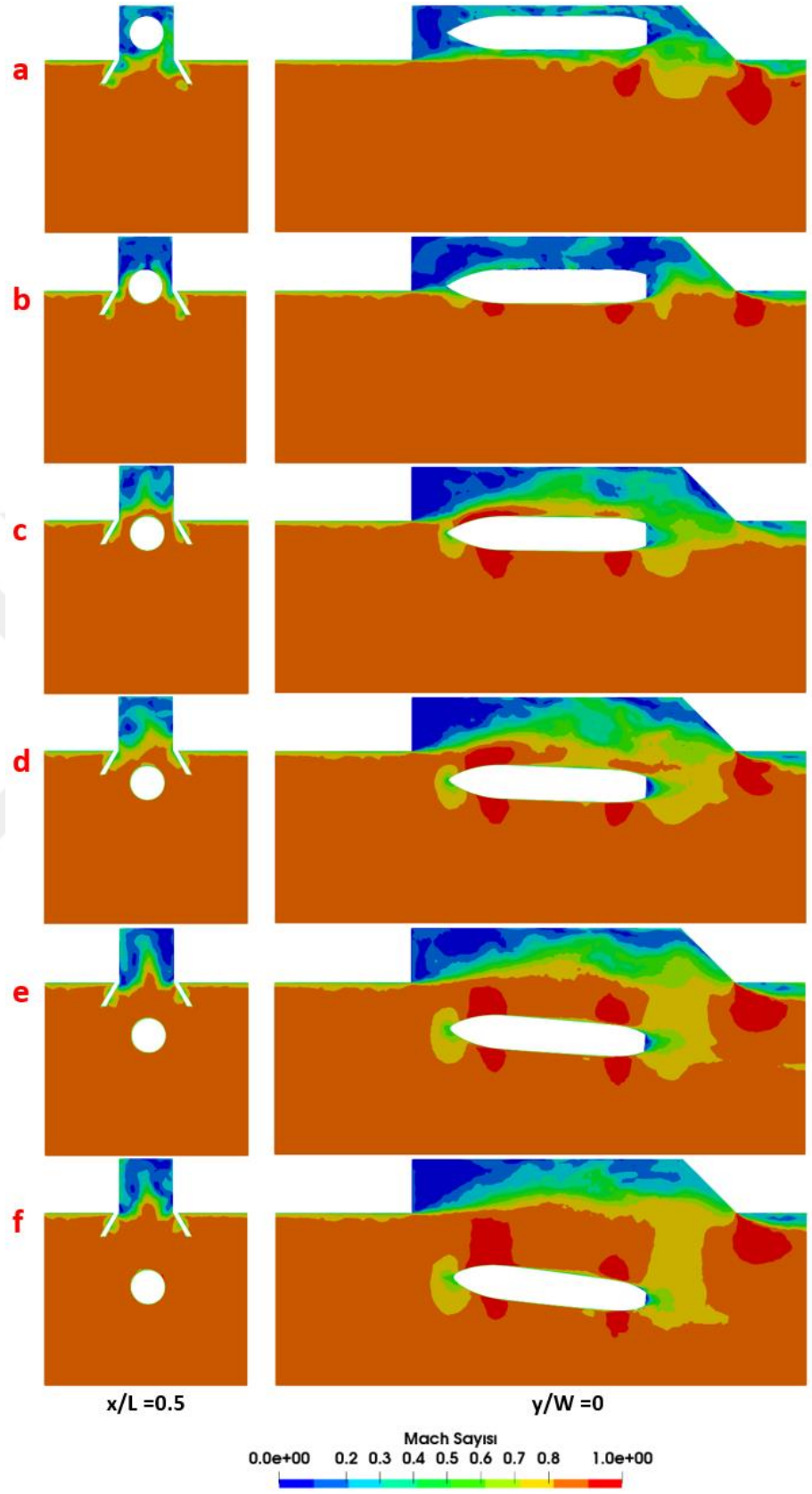
4.3.2. Hareketli sayısal çözüm

Daha önceki çözümlerde olduğu gibi hareketsiz çözümden elde edilen mühimmat üzerine etki eden kuvvet ve moment katsayıları temiz kavite çözümden elde edilenlerle birlikte **Şekil *4.61*** ile gösterilmektedir. Kavite arka duvarının eğilmesi kavakların açılı hale getirilmesinde olduğu gibi mühimat üzerine etki eden kuvvet ve moment katsayılarının frekans ve genliğini değiştirmediği sadece zaman ile katsayıların işaretinin değişimini farklılaştırdığı görülmektedir. Temiz kavitede kuvvet ve moment katsayısı maksimum değerde iken arka duvarı eğimli geometride minimum değerdedir.

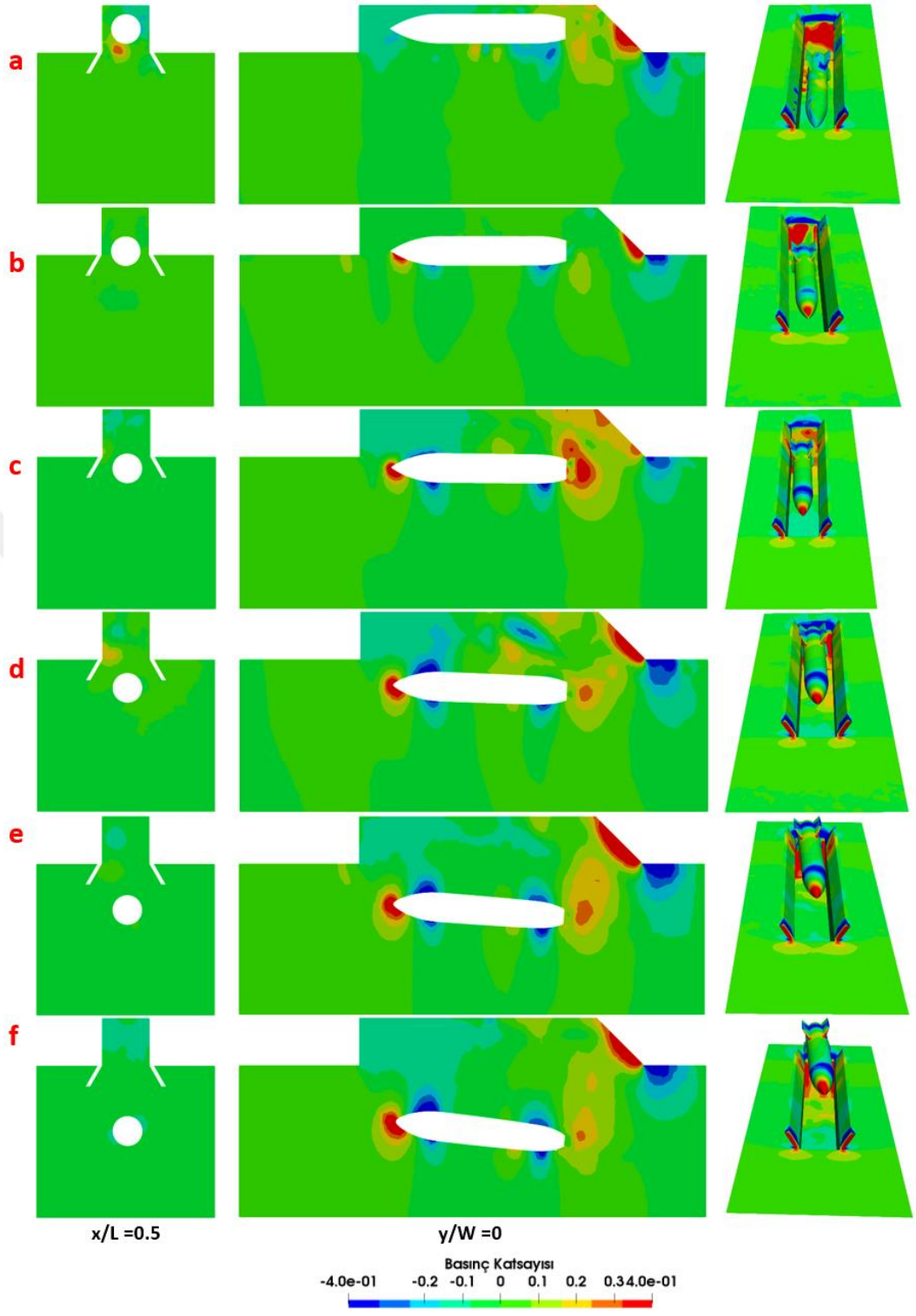


Şekil 4.61. *S SW D 60 A ve S CC D 60 A sayısal çözümlerine (DES) ait mühimmat üzerine etki eden kuvvet ve moment katsayıları a) y ekseni boyunca etki eden kuvvet katsayısı ve x ekseni etrafında etki eden moment katsayısı b) z ekseni boyunca etki eden kuvvet katsayısı ve y ekseni etrafında etki eden moment katsayısı c) x ekseni boyunca etki eden kuvvet katsayısı ve z ekseni etrafında etki eden moment katsayısı d) tüm katsayılar*

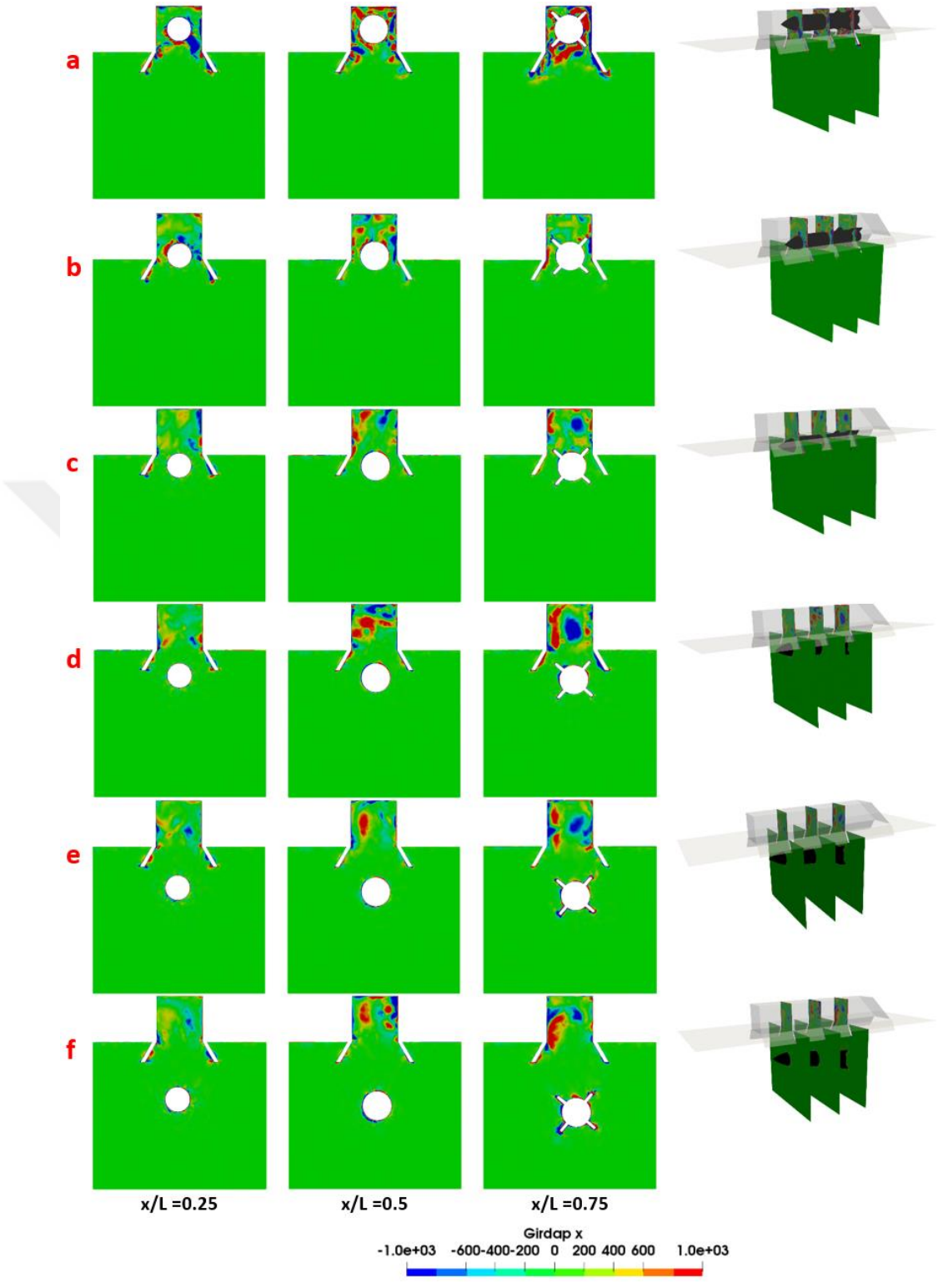
Başlangıç itici kuvvetleri ile S SW D 60 A ismiyle oluşturulan 60 derece kapak açısına sahip kapaklı arka duvarı eğimli kaviteden **Şekil *4.61***'de gösterildiği gibi z ekseni boyunca normal kuvvetin maksimum olduğu anda bırakılarak hareketli çözüm gerçekleştirilmiştir. Bu çözüme ait farklı zamanlardan elde edilen akış parametreleri konturları **Şekil *4.62***, **Şekil *4.63***, **Şekil *4.64*** ve **Şekil *4.65***'te sunulmuştur. **Şekil *4.62***'de anlık Mach sayısı, **Şekil *4.63***'te anlık basınç katsayısı, **Şekil *4.64***'de x ekseni etrafında oluşan girdap ve **Şekil *4.65***'de ise y ekseni etrafında oluşan girdap konturlarının zamanla değişimleri gösterilmektedir. S CC D 60 A çözümünden elde edilenler ile kıyaslandığında temel akış parametrelerinin konturları içerisinde basınç katsayısında farklılık dikkat çekmektedir. S CC D 60 A çözümünde olduğu gibi S SW D 60 A çözümünde de mühimmat kayma tabasıyla buluşması ile mühimmat burnunun alt bölümünde basınç değeri yükselirken arka alt bölümünde ise düşmektedir. Ayrıca kavite arka duvarını eğmek mühimmat arka yüzeyinde basınç değerini artırarak mühimmatı geriye doğru hareket ettiren aerodinamik kuvvette azaltmaya yol açmıştır.



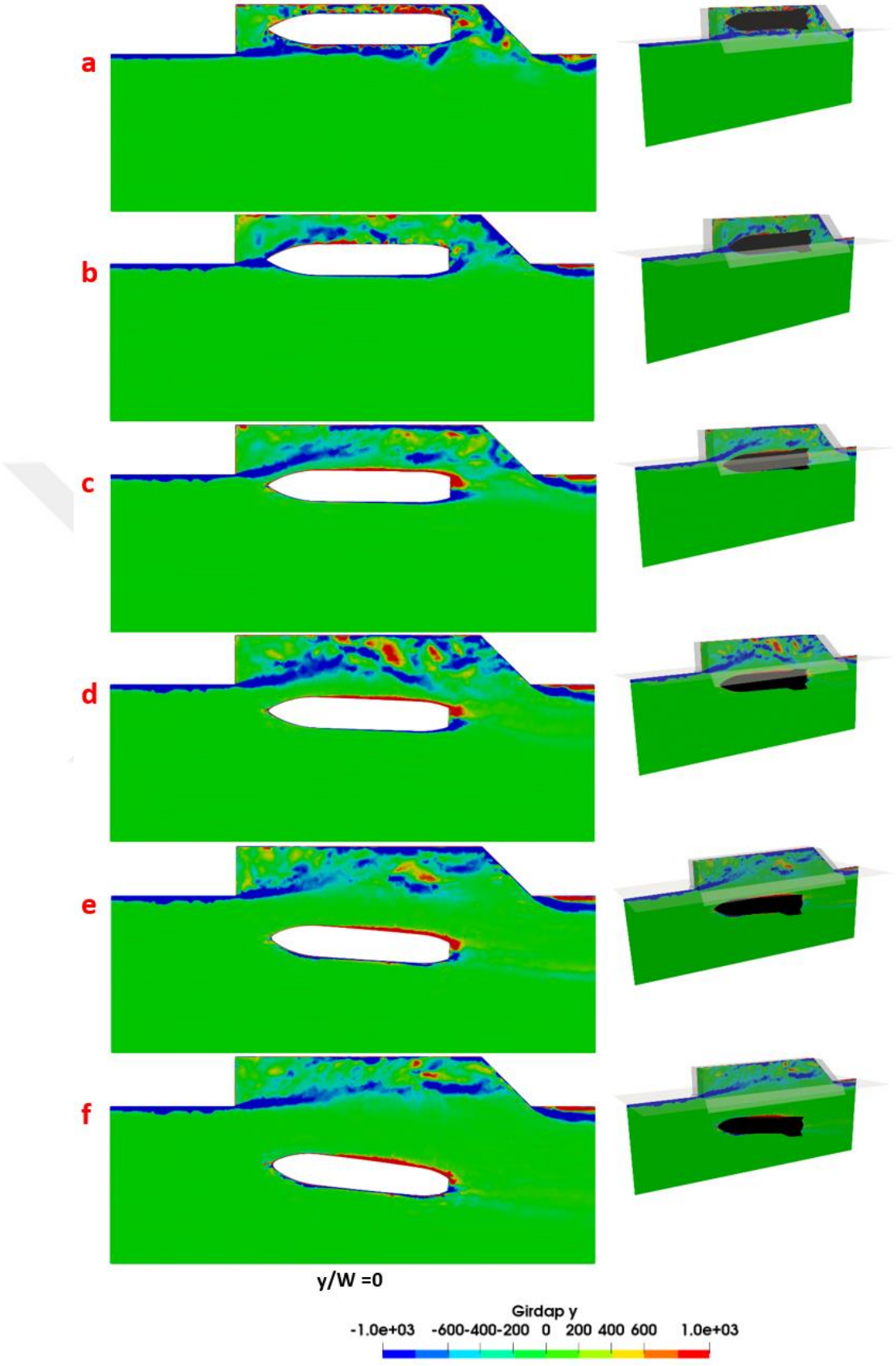
Şekil 4.62. *S SW D 60 A hareketli sayısal çözüme (DES) ait Fz max için Mach Sayısı konturu a) t = 0 s, b) t = 0,095 s, c) t = 0,145 s, d) t = 0,195 s, e) t = 0,245 s, f) 0,295 s*



Şekil 4.63. *S SW D 60 A hareketli sayısal çözüme (DES) ait Fz max için Basınç Katsayısı konturu a) t = 0 s, b) t = 0,095 s, c) t = 0,145 s, d) t = 0,195 s, e) t = 0,245 s, f) 0,295 s*

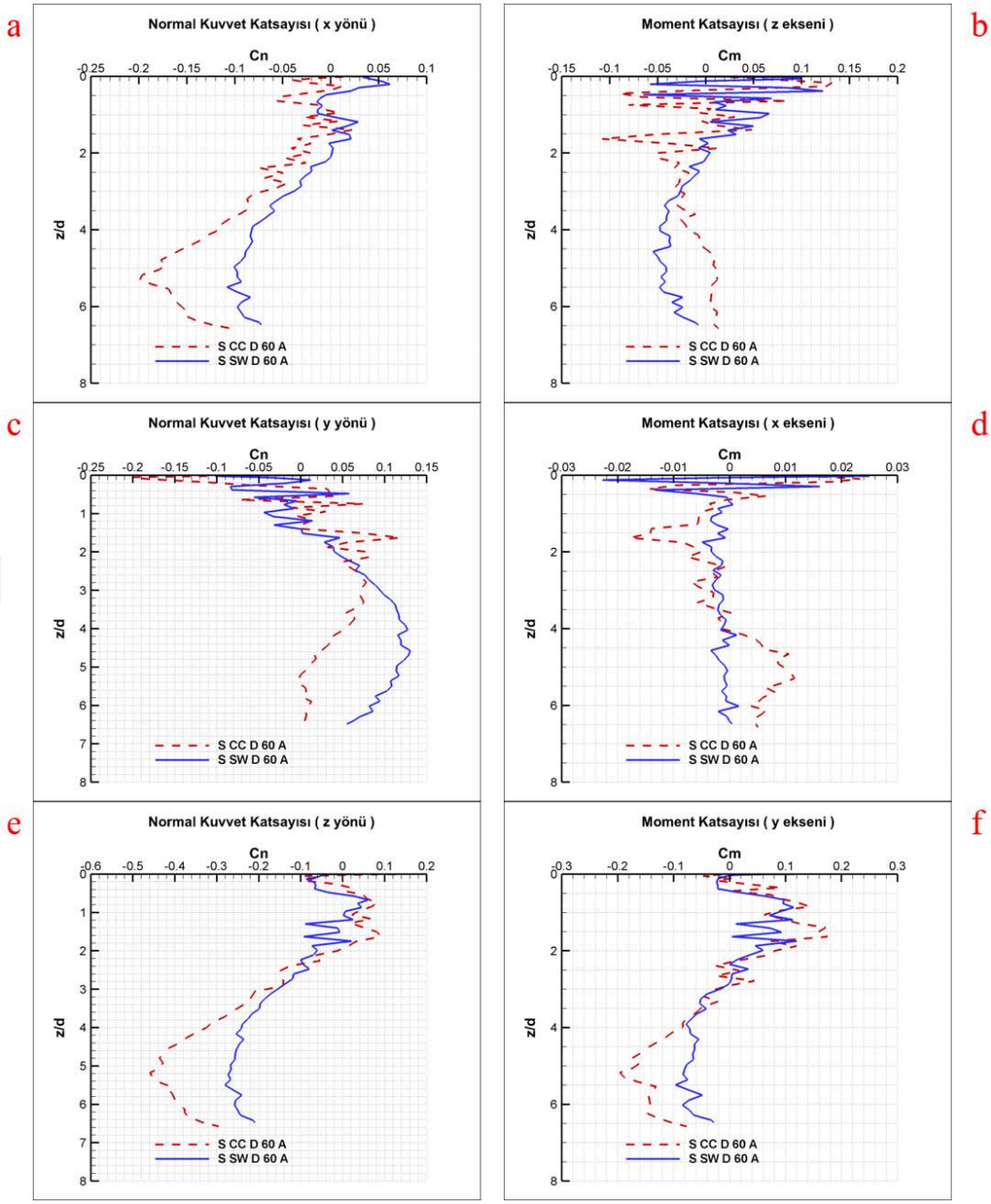


Şekil 4.64. *S SW D 60 A hareketli sayısal çözüme (DES) ait Fz max için Girdap-x konturu a) t = 0 s, b) t = 0,095 s, c) t = 0,145 s, d) t = 0,195 s, e) t = 0,245 s, f) 0,295 s*



Şekil 4.65. *S SW D 60 A hareketli sayısal çözüme (DES) ait Fz max için Girdap-y konturu a) t = 0 s, b) t = 0,095 s, c) t = 0,145 s, d) t = 0,195 s, e) t = 0,245 s, f) 0,295 s*

Şekil *4.66*'da z yönündeki normal kuvvetin maksimum olduğu anda bırakılan S CC D 60 A ve S SW D 60 A olarak adlandırılan iki sayısal çözüme ait mühimmat hareketi boyunca mühimmata etkiyen x, y ve z yönlerindeki normal kuvvet ve moment katsayılarının değişimi gösterilmektedir. Temiz ve arka duvarı eğimli kavitede mühimmat üzerine etki eden normal kuvvetler karşılaştırıldığında genel eğilimin aynı olduğu fakat katsayılardaki salınım değerlerinin farklılık gösterdiği görülmektedir. Mühimmata x ekseni boyunca etki eden normal kuvvet temiz kavitede negatif değerlerde iken bu çözümde pozitif değerlerdedir. Kaviteyi tamamen terk ettip serbest akışa maruz kalınca negatif değerlere geçmiştir. S CC D 60 A'da x ekseninde mühimmata etki eden kuvvet katsayısının maksimum değeri -0,2'yi geçiyor iken S SW D 60 A çözümünde -0,1'in altında kalmıştır. Y ekseninde S CC D 60 A çözümünde maksimum değerler kavite içerisinde -0,2, kavite dışında ise 0,12 iken S SW D 60 A çözümünde -0,1'e 0,13'tür. Z ekseninde ise kavite içerisinde benzer pozitif değer görülüyor iken kavite dışında S CC D 60 A çözümünde -0,5'e yaklaşan değer, S SW D 60 A çözümünde -0,3'ün altında kalmıştır. Moment katsayılarında ise; z ekseni (sapma) etrafında dönmeyi sağlayan moment katsayısının kavite içerisindeki genliği her iki çözüm için aynıdır. Kavite dışında S SW D 60 A'da -0,05 değerini geçiyor iken S CC D 60 A çözümünde -0,01 dolaylarındadır. X ekseni (yalpalama) etrafında dönmeyi sağlayan moment katsayılarında ise maksimum değerler S CC D 60 A'da kavite içinde 0,022, dışında 0,01 iken S SW D 60 A'da -0,022 ve -0,005'dir. Y ekseni (yunuslama) etrafında dönmeyi sağlayan moment katsayısında kavite içerisinde her iki çözümde değerler benzer iken kavite dışında S CC D 60 A'da maksimum değer -0,2, S SW D 60 A çözümünde -0,1'in altında kalmıştır.



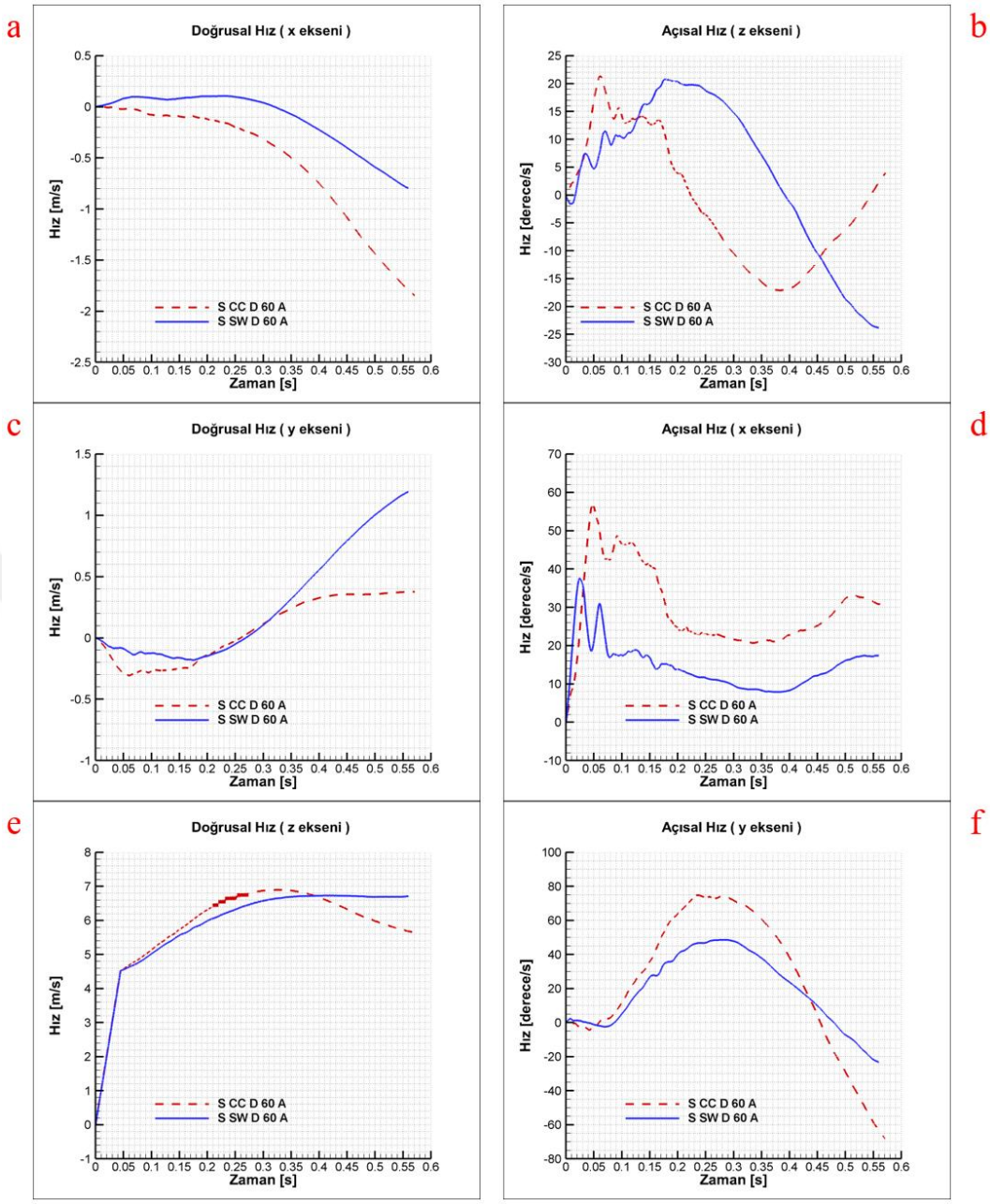
Şekil 4.66. *S SW D 60 A ve S CC D 60 A haraketli sayısal çözümlerine (DES) ait Fz max için mühimmat üzerine etki eden kuvvet ve moment katsayıların değişimi a) x ekseni boyunca etki eden kuvvet katsayısı, b) z ekseni etrafında etki eden moment katsayısı, c) y ekseni boyunca etki eden kuvvet katsayısı, d) x ekseni etrafında etki eden moment katsayısı, e) z ekseni boyunca etki eden kuvvet katsayısı, f) y ekseni etrafında etki eden moment katsayısı*

Şekil *4.67* ve **Şekil *4.68***'de S CC D 60 A ve S SW D 60 A çözümlerine ait zamana bağlı çizgisel ve açısal hız, öteleme ve dönme değerleri verilmiştir. **Şekil *4.66***'de sunulan mühimmat üzerine etki eden kuvvetlerin oluşturmuş olduğu hızlar incelendiğinde kavite arka duvarını eğmek x yönünde çizgisel hızı azaltmakta olup buna paralel şekilde x yönündeki öteleme değeri de temiz kaviteye göre 0,5 s sonunda yaklaşık 25 cm daha az olmuştur. Z ekseni etrafındaki açısal hızlar kıyaslandığında kavite içersinde pozitif yönlü

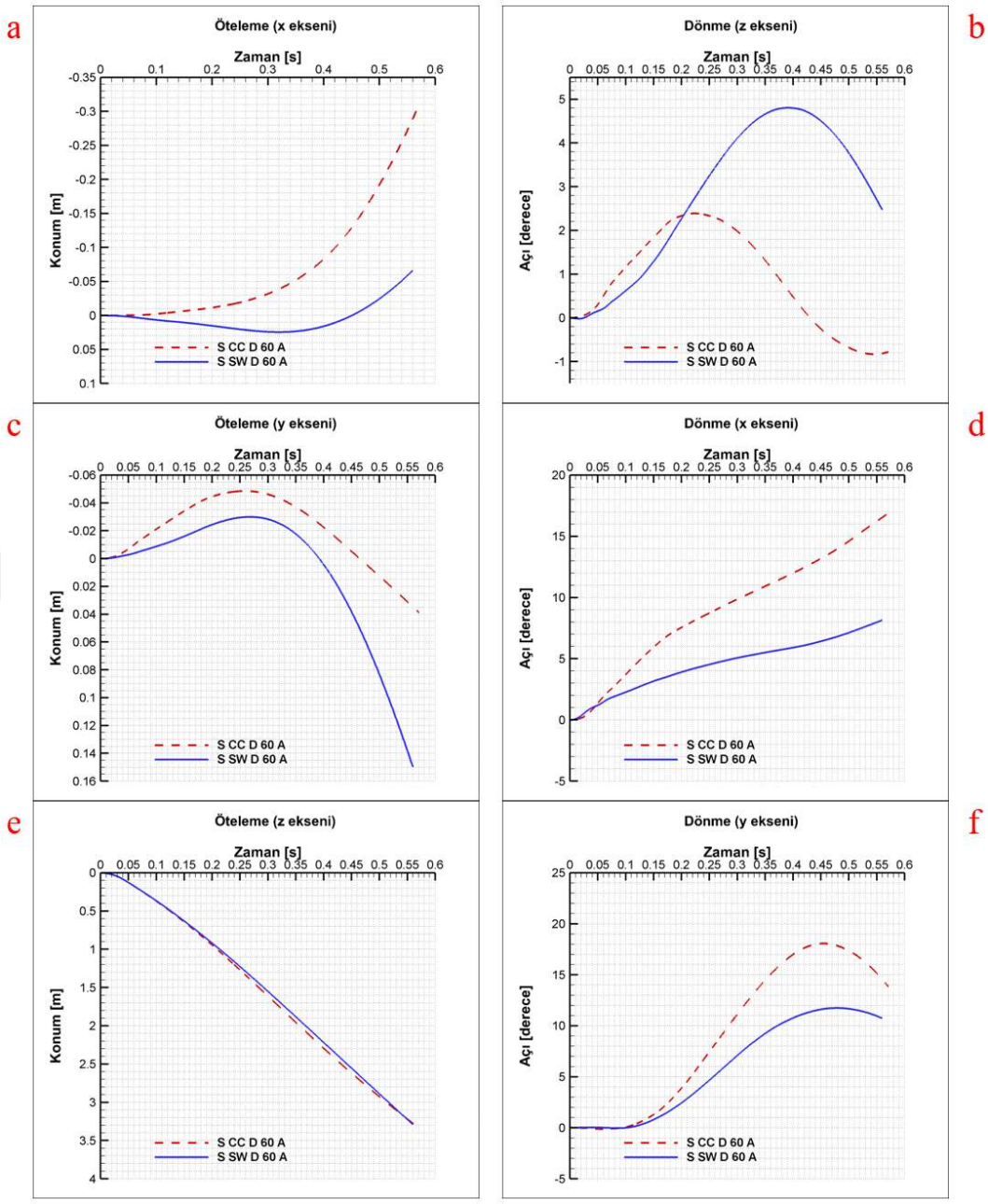
bir açısal hızlanma görülmüş iken kavite dışında her iki geometri için hız değeri yön değiştirmiştir. Z ekseni maksimum açısal hız değerinde bir düşüş görülmemiş olup kaviteyi terk edene kadar z ekseni etrafında yapmış olduğu dönme açısı aynı kalmıştır. Y ekseni yönündeki çizgisel hız bileşeni incelendiğinde arka duvarı eğimli geometride temiz kaviteye göre kavite içerisinde oluşan negatif hız değeri daha küçük iken kavite dışında 0,5 s sonunda oluşan pozitif hız değeri ise iki katından daha fazla büyüktür. Bu hızlara bağlı olarak S SW D 60 A'da kavite içerisinde mühimmat y yönünde 2 cm daha az ötelenirken kavite dışında 0,5 s sonunda 12 cm daha fazla ötelenmiştir. X ekseni maksimum açısal hız değerinde ise neredeyse yarısı kadar bir iyileşme görülmüştür. Buna bağlı olarak x ekseni etrafındaki dönme açısı da yarıya düşmüştür. Z ekseninde ise ilk 0,05 s boyunca fırlatma kuvvetin etkisiyle oluşan hızlar aynı ve aerodinamik kuvvetlerin etkisi görülmüyor iken fırlatma kuvvetinin etkisi bittikten sonra hızlarda küçük farklılık görülmeye başlanmıştır. Z yönünde fırlatma kuvveti aerodinamik kuvvetlere göre çok daha baskın olduğu için ve tüm geometrilerde ortak kuvvet uygulandığı için bu yöndeki hız ve öteleme değerleri benzerlik göstermiştir. Y ekseni açısal hızı incelendiğinde temiz kavitede saniyede 80 dereceyi bulan maksimum değere kavite arka duvarının 45 derece eğilmesi ile bu değer saniyede 50 derece düşürülmüştür. Buna bağlı olarak maksimum hücum açısıda 18 dereceden 11 dereceye düşürülmüştür.

Arka duvarı eğimli kaviteden mühimmat ayrılmasında mühimmat kaviteyi tamamamen terk ederek K. Jamison ve arkadaşlarının yapmış olduğu sınıflandırmaya göre diğer tüm kriterleri geçerek (**Tablo *1.2***) 4 kodunu alarak temiz ayrılma oluşturmuşur. Ayrıca maksimum hücum açısını 11 dereceye ve maksimum açısal hızı saniyede 50 derece düşürerek kabul edilebilir mühimmat yörüngesi oluşturmuştur.

Sonuç olarak kavite akışta kullanılan pasif yöntemlerden biri olan arka duvarın eğimli olması mühimmatsız geometride ses basınç düzeyinin kavite tabanında 5 dB kadar düşürmesine karşın kavite içerisine mühimmat konulduğunda mühimmat ve kavitede ses basınç düzeyi bakımından iyilşeme görülmemiştir. Fakat mühimmat bırakma analizleri bakımından mühimmatın izlediği yörüngede maksimum hız değerlerini ve açı değerlerini iyileştirdiği görülmüştür.

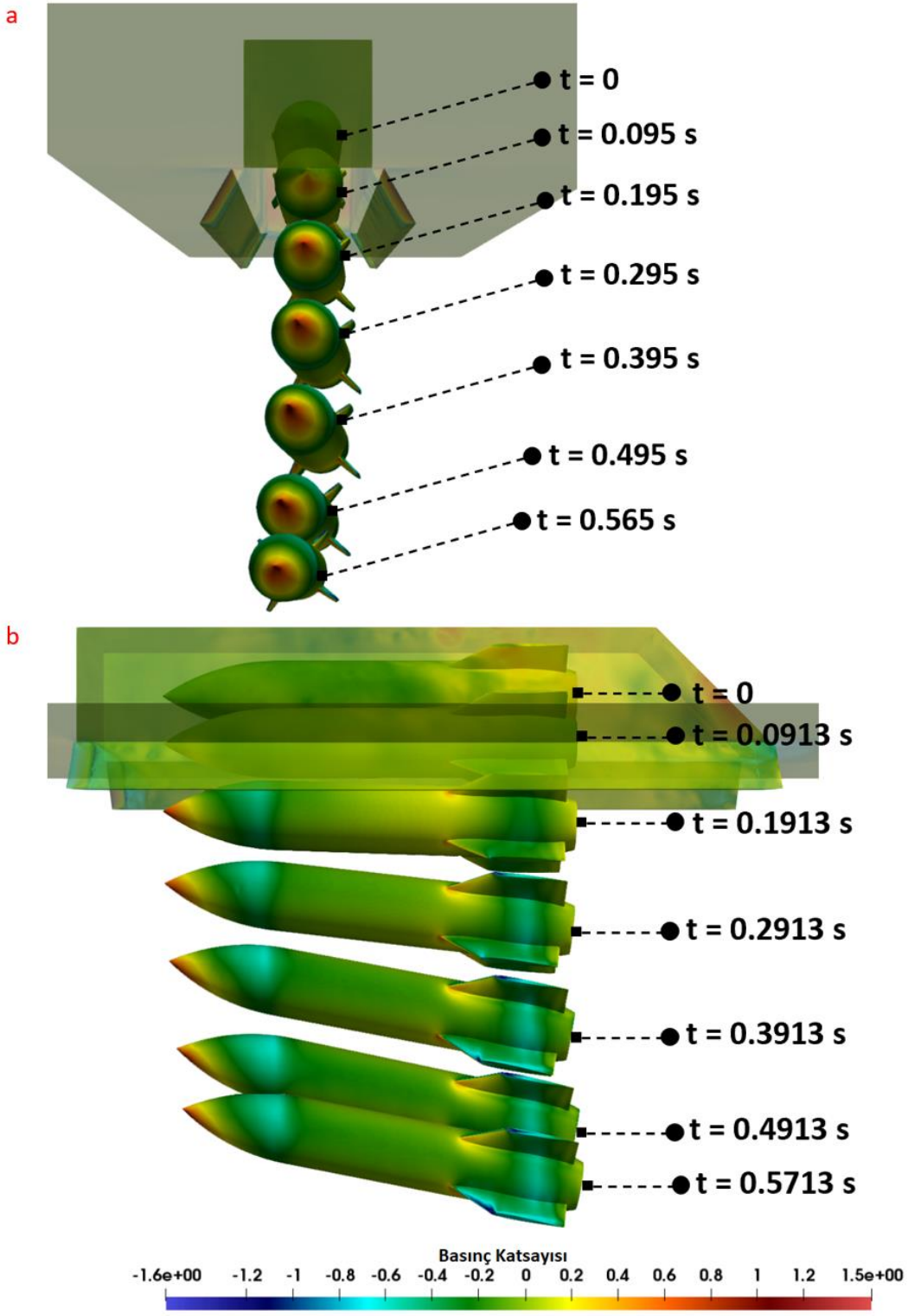


Şekil 4.67. *S SW D 60 A ve S CC D 60 A haraketli sayısal çözümlerine (DES) ait Fz max için mühimmat hareket hızları a) x ekseni doğrusal hız bileşeni, b) z ekseni açısal hız bileşeni, c) y ekseni doğrusal hız bileşeni, d) x ekseni açısal hız bileşeni, e) z ekseni doğrusal hız bileşeni, f) y ekseni açısal hız bileşeni*



Şekil 4.68. *S SW D 60 A ve S CC D 60 A haraketli sayısal çözümlerine (DES) ait Fz max için mühimmat hareketi a) x ekseni boyunca öteleme, b) z ekseni etrafında dönme, c) y ekseni boyunca ötleme, d) x ekseni etrafında dönme, e) z ekseni boyunca öteleme, f) y ekseni etrafında dönme*

Şekil *4.69*'da S SW D 60 A çözümünden elde edilen mühimmat yörüngesi sayısal değerleri daha iyi anlaşılması açısından görselleştirilmiştir.



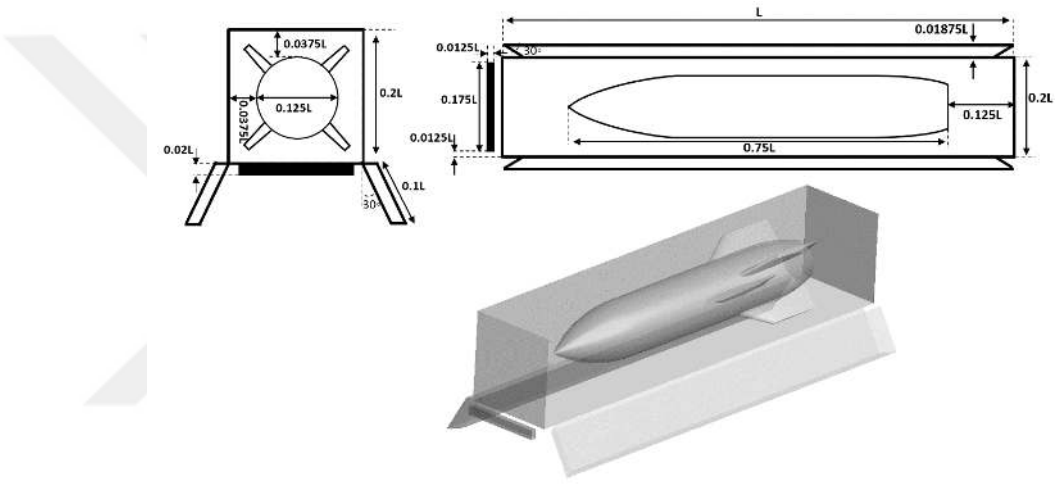
Şekil 4.69. *S SW D 60 A haraketli sayısal çözümüne (DES) ait mühimmat hareketi gösterimi a) önden görünüş, b) yandan görünüş*

4.4. Mühimmat ve 90 Derece Açıya Sahip Kapaklı Önünde Spoyler Olan Kavite (S FTS D 60)

Bu bölümde kavite akışta kullanılan bir diğer pasif kontrol yöntemi olan kavite önüne spoyler yerleştirilmesinin mühimmat ve kavitede oluşan ses basınç düzeyine olan etkisi ve mühimmatın bırakılmasında izlediği yörüngeye olan etkisi incelenmiştir.

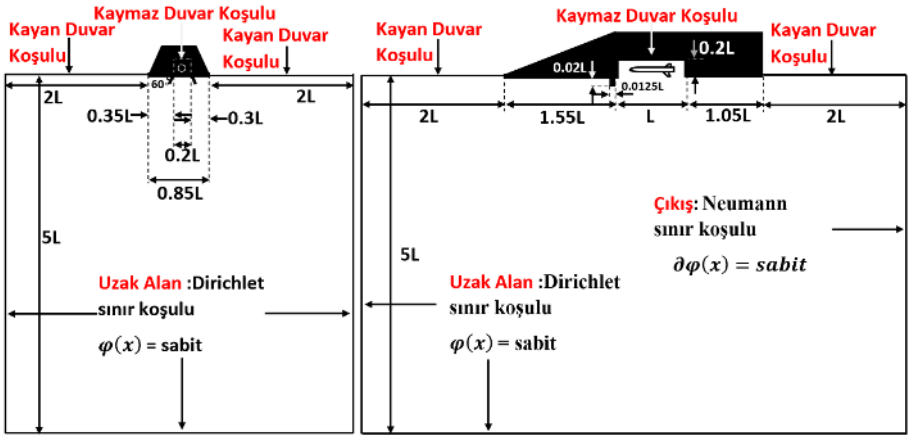
4.4.1. Hareketsiz sayısal çözüm

Daha önceki çözümlerde kullanılan mühimmat aynı şekilde kavite içerisine yerleştirilmiştir. **Şekil *4.70***'te gösterildiği kavite önüne dikdörtgen biçiminde spoyler yerleştirilmiştir.

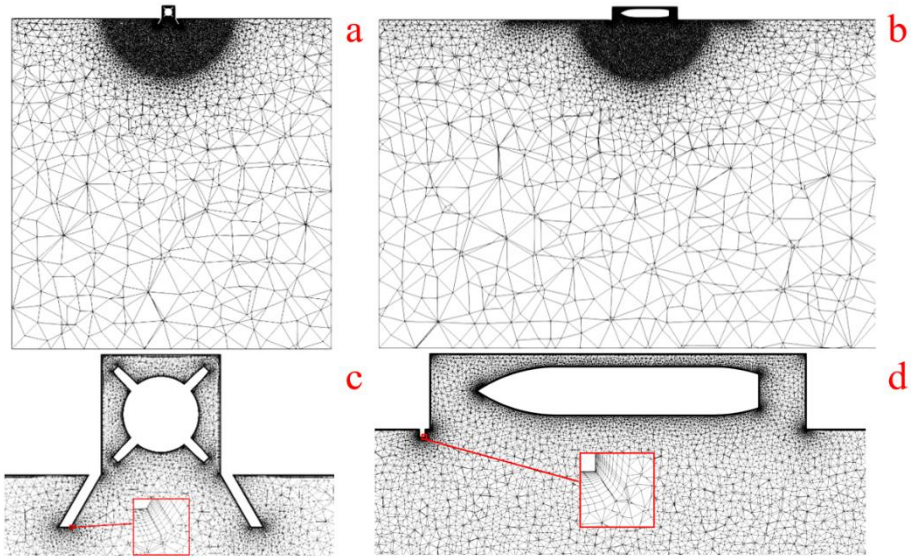


Şekil 4.70. *S FTS D 60 A sayısal çözüm geometrisi*

S FTS D 60 A çözüm alanı **Şekil *4.71*** gibi gösterilmektedir. Bu çözüm alanı için oluşturulan ağ yapısı ise **Şekil *4.72*** ile gösterilmektedir.

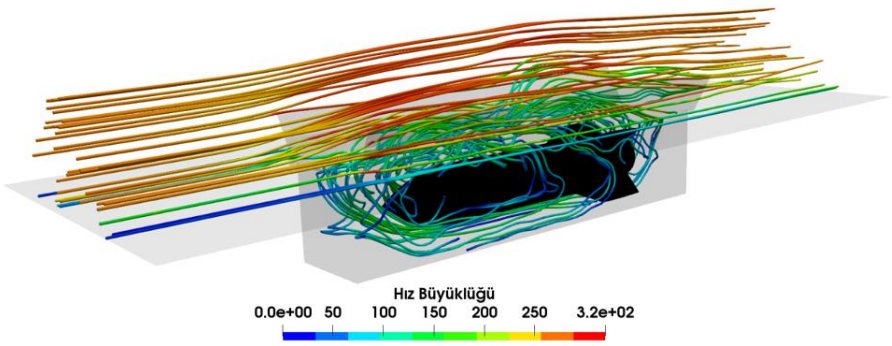


Şekil 4.71. *S FTS D 60 A sayısal çözüm alanı*

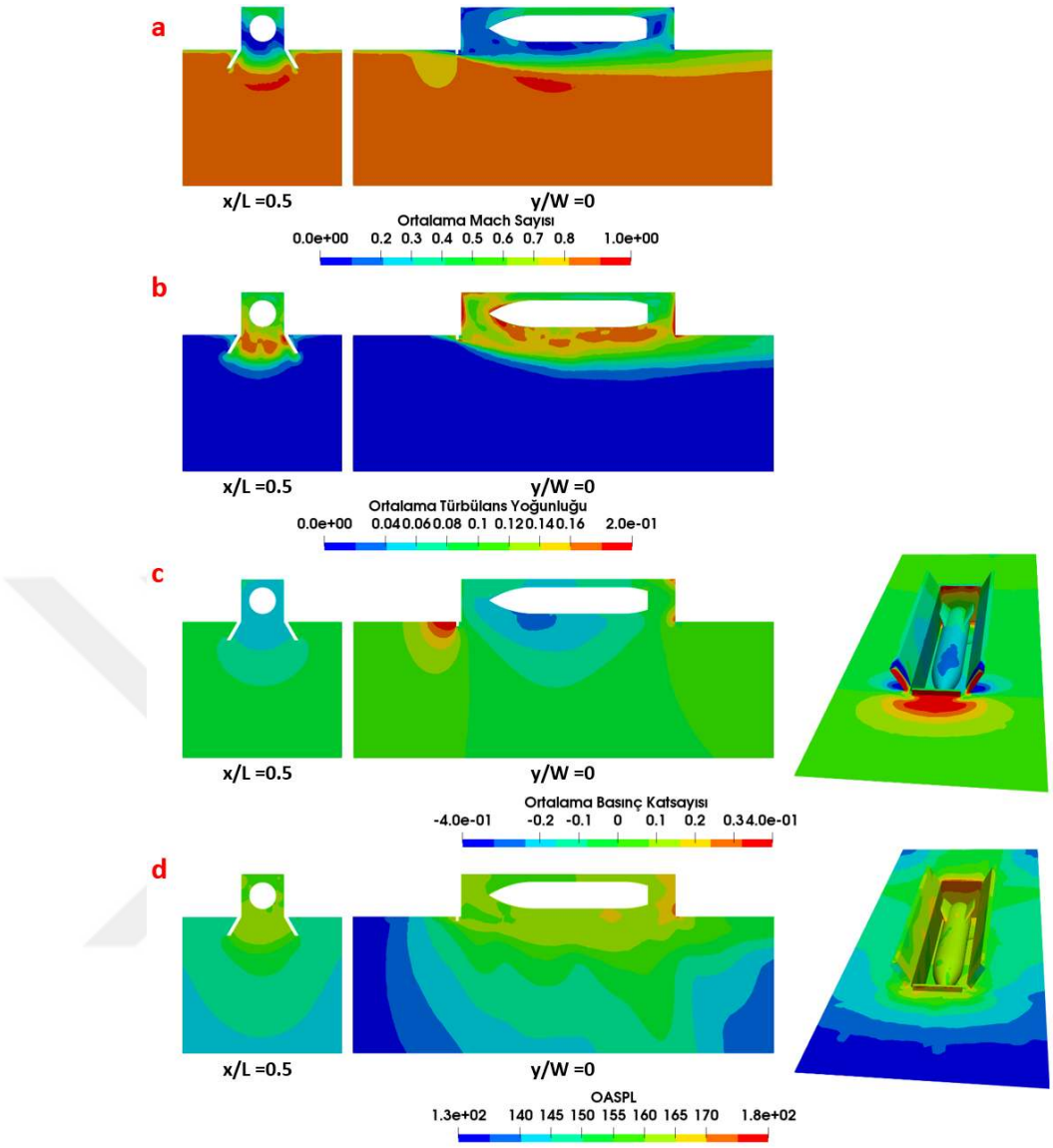


Şekil 4.72. *S FTS D 60 A sayısal çözüm alanı ağı a) önden tüm ağ görüntüsü, b) yandan tüm ağ görüntüsü, c) önden yakın görüntü, d) yandan yakın görüntü*

Sayısal çözümden elde edilen anlık akım çizgileri **Şekil *4.73***'de ve ortalama değerlere ait konturlar **Şekil *4.74***'te gösterilmektedir. temiz kavitede akım çizgileri kavite firar kenarına doğru bir birilerine yaklaşmasına karşın burada kavitenin ön bölgesinde bir birilerine yaklaşmıştır. Buda önüne spoyler konulan kavitede akışın hızlandığı bölgeyi kavite önüne taşıyarak mühimmatın ön alt bölgesinde düşük basınç bölgesi yaratmıştır. Temiz kavite ile karşılaştırıldığında önünde spoyler olan geometride kayma tabakasının temiz kavitedekinin aksine mühimmatın arkasına doğru mühimmata yapıştığı, kavite hücum kenarı bölgesinde türbülans yoğunluğunun arttığı, maksimum basınç katsayısının beklendiği üzere spoyler önünde gerçekleştiği ve OASPL dağılımında iyileşme olduğu görülmüştür. S FTS D 60 A çözümde kavite üzerinde oluşan maksimum OASPL değeri 173,476 dB iken mühimmat üzerinde oluşan maksimum OASPL değeri 170,891 dB olmuştur.



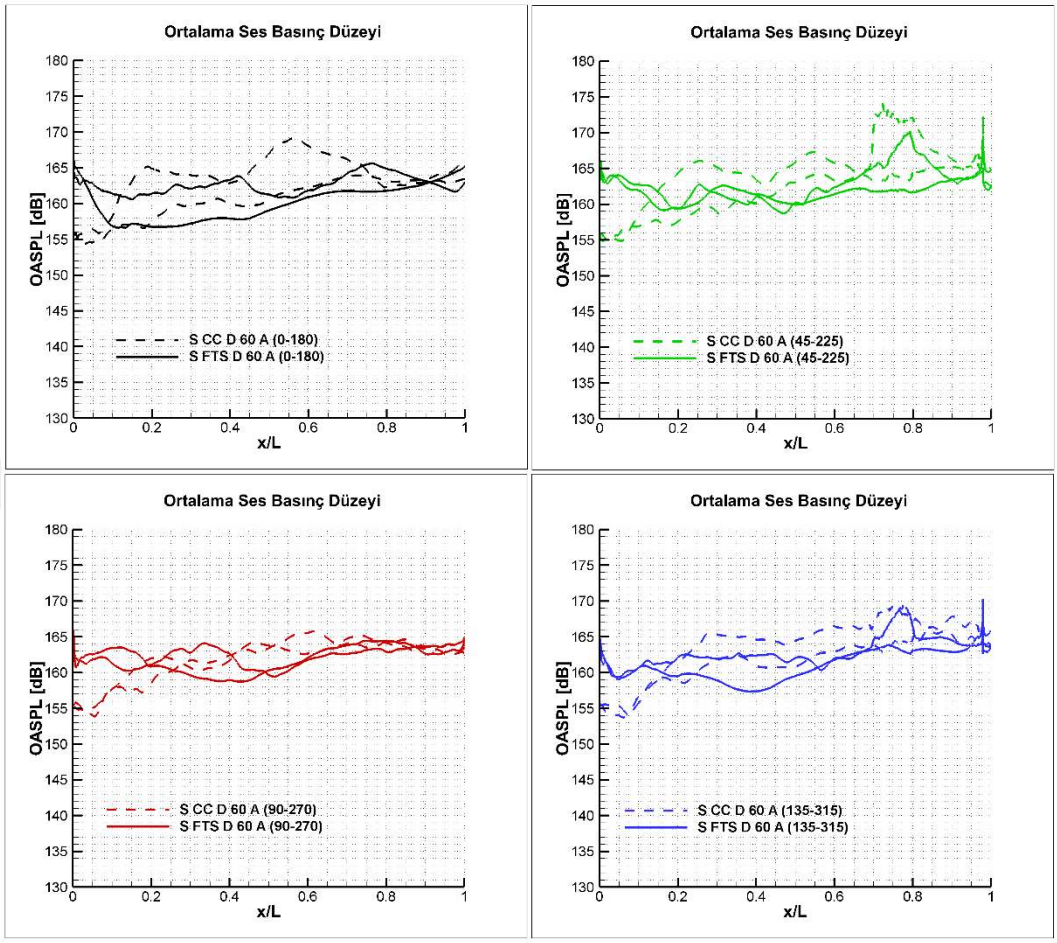
Şekil 4.73. *S FTS D 60 A sayısal çözüme (DES) ait akım çizgileri*



Şekil 4.74. *S FTS D 60 A sayısal çözüme (DES) ait konturlar a) ortalama Mach sayısı, b) türbülans yoğunluğu, c) basınç katsayısı, d) OASPL*

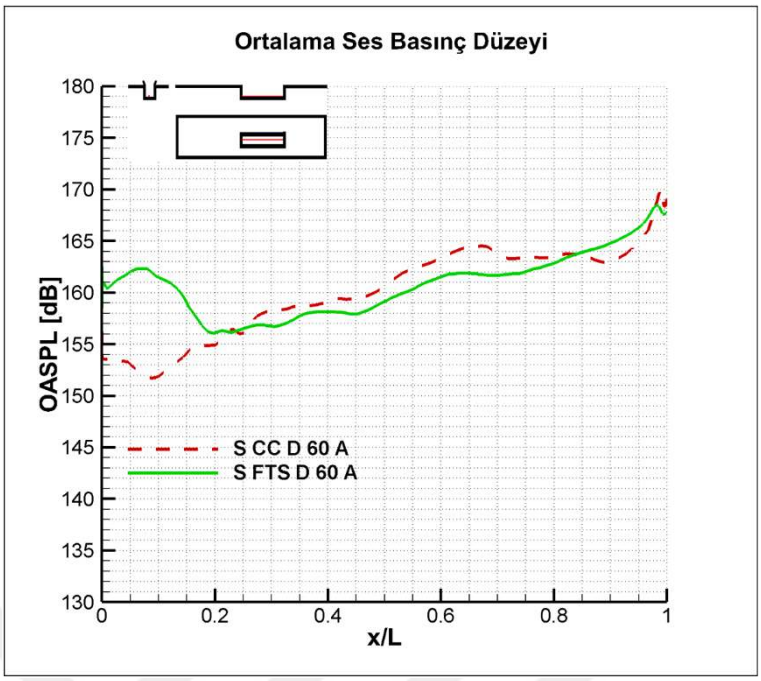
Şekil *4.75*'te mühimmat boyunca **Şekil *4.8***'de gösterildiği gibi farklı açılarda alınmış OASPL değerleri grafiksel olarak gösterilmektedir. Maksimum OASPL değerleri yine aynı şekilde 225 dereceye denk gelen kesitte mühimmat arkasında bulunan kanatçık üzerinde oluşmuştur ve 135 dereceye denk gelen kesittede maksimum değere yakın değerler görülmüştür. Ayrıca kavite önüne spoyler yerleştirme mühimmatın burun kısmında ses basınç düzeyini artırmış iken ortalama ve maksimum değerleri düşürmüştür. S CC D 60 A çözümde mühimmat üzerinde oluşan maksimum OASPL değeri 174,803 dB iken S FTS D 60 A çözümde bu değer 170,891 dB'e düşmüştür. **Şekil *4.75*** incelendiğinde görüleceği gibi kavite önüne spoyler yerleştirmek mühimmat üzerinde

oluşan hem ses basınç düzeyi dağılımını hemde maksimum değeri iyileştirmektedir. Maksimum ortalama ses basınç değerini 4 dB kadar düşürmüştür.



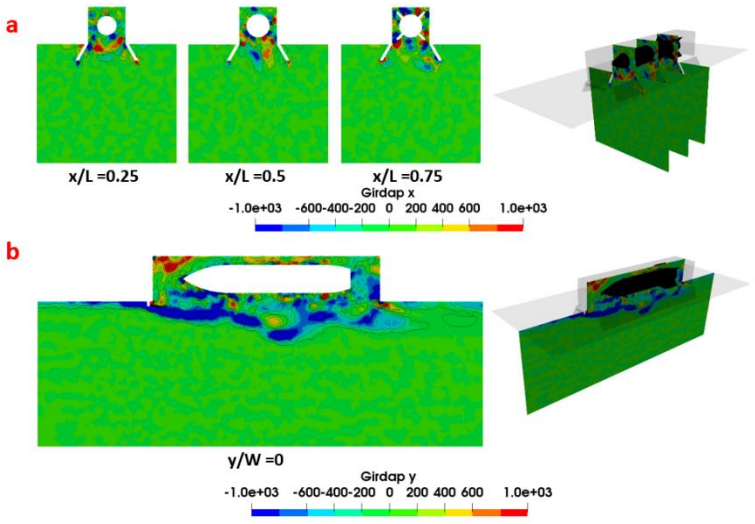
Şekil 4.75. *S FTS D 60 A ve S CC D 60 A sayısal çözümlerine (DES) ait mühimmat OASPL değerleri*

Şekil *4.76*'da S CC D 60 A ve S FTS D 60 A çözümlerinin kavite tabanından elde edilen OASPL değerleri karşılaştırılmıştır. Bu grafik incelendiğinde görüleceği gibi spoyler, kavite hücum kenarı bölgesinde ses düzeyini artırmasına karşın genel dağılımı düşürmektedir. Ayrıca kavite duvarlarında oluşan maksimum OASPL değeri S CC D 60 A'da 172,09 dB iken S FTS D 60 A çözümünde bu değer 173,476 dB'e çıkmıştır.

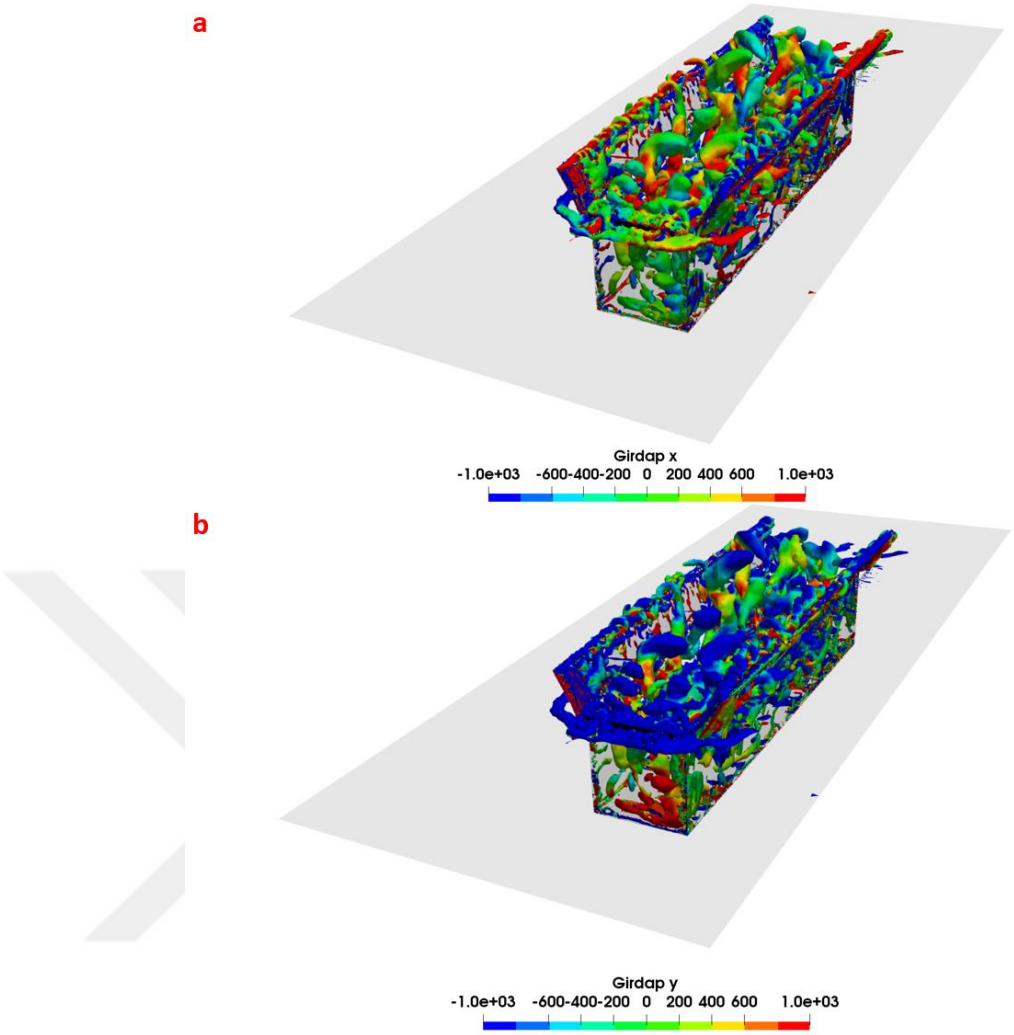


Şekil 4.76. *S FTS D 60 A ve S CC D 60 A sayısal çözümlerine (DES) ait kavite tabanı OASPL karşılaştırması*

Şekil *4.77* ve **Şekil *4.78***'de S FTS D 60 A çözümüne ait girdap yapıları verilmektedir. Temiz kavitede var olan girdap yapıları (sarmal, baloncuk tipi girdaplar ve uç ve at nalı girdapları) bu çözümde de elde edilmiştir. Mühimmatlı geometride kavite hücum kenarının önüne spoyler yerleştirilmesi kavite içerisindeki girdap yapılarını artırmıştır. Ayrıca **Şekil *4.78***'de görüleceği gibi kavite kapakları yerine spoyler önünde at nalı girdabı görülmektedir.



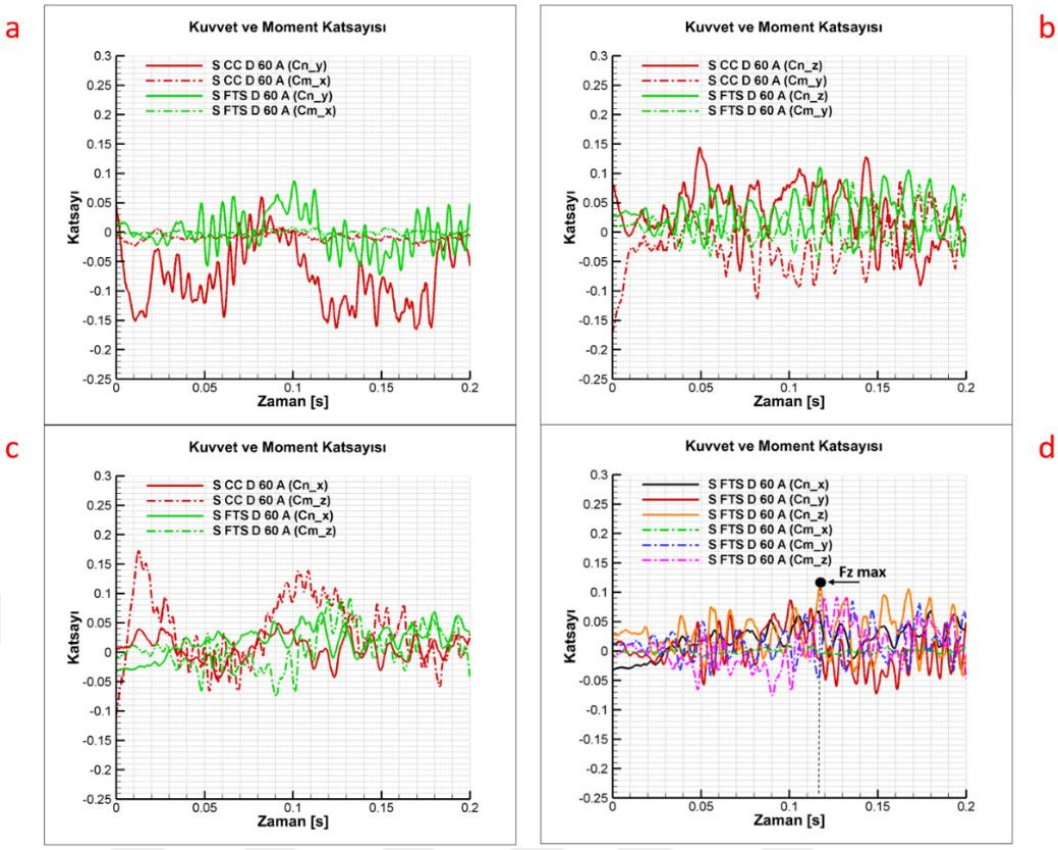
Şekil 4.77. *S FTS D 60 A sayısal çözümlerine (DES) ait girdap konturları a) x ekseni etrafında oluşan girdaplar, b) y ekseni etrafında oluşan girdaplar*



Şekil 4.78. *S FTS D 60 A sayısal çözümlerine (DES) ait eş yüzey Q-kriteri yapıları a) girdap-x ile renklendirme, b) girdap-y ile renklendirme*

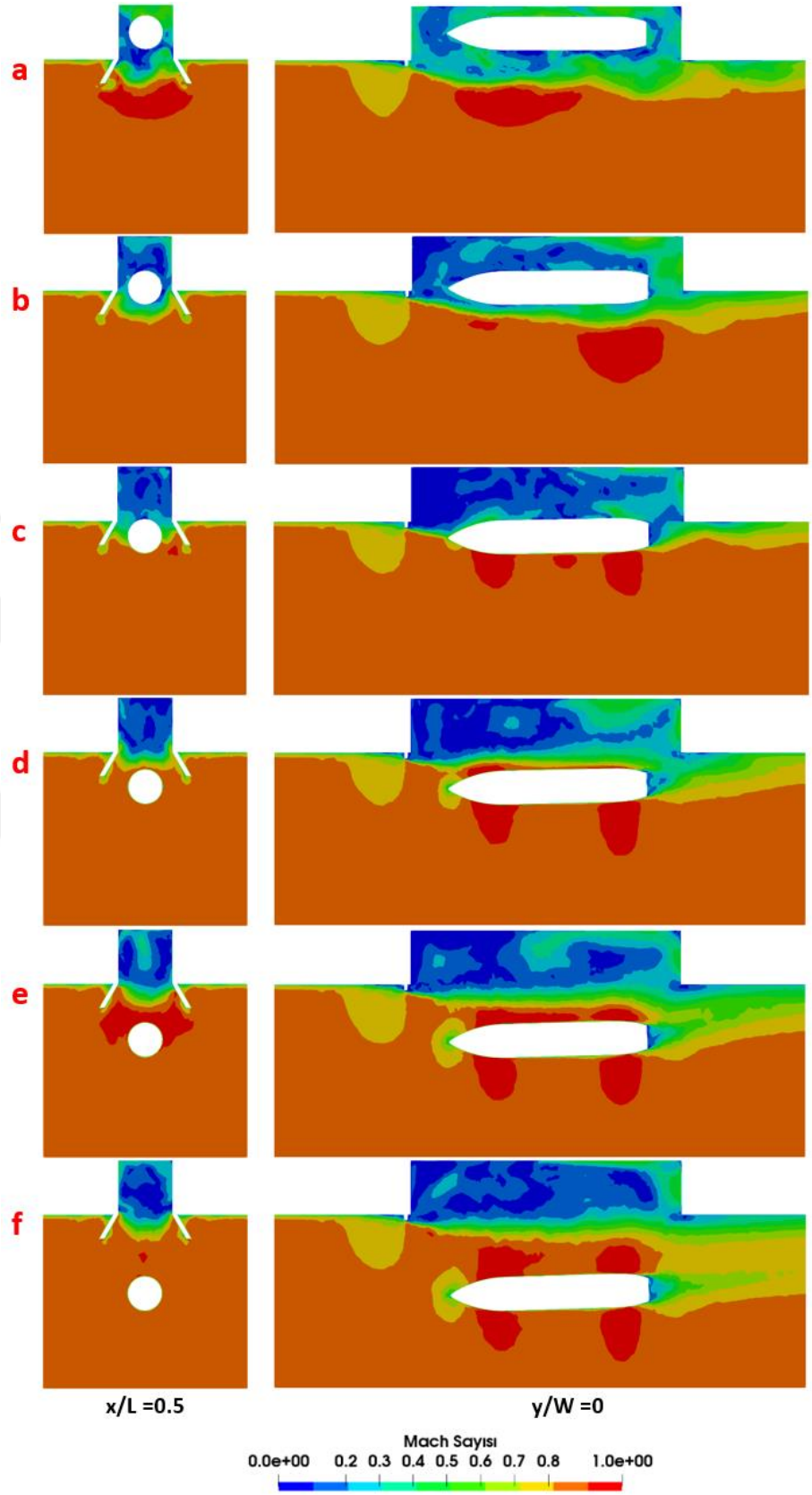
4.4.2. Hareketli sayısal çözüm

Daha önceki çözümlerde olduğu gibi hareketsiz çözümden elde edilen mühimmat üzerine etki eden kuvvet ve moment katsayıları temiz kavite çözümden elde edilenlerle birlikte **Şekil *4.79*** ile gösterilmektedir. Spoyler, hem normal kuvvet hem de moment katsayılarının genliğini düşürmüştür. S CC D 60 A çözümünde genel olarak 0,15 olan kat sayıların maksimum ve minimum değerleri S FTS D 60 A çözümünde 0,1'e düşmüştür.

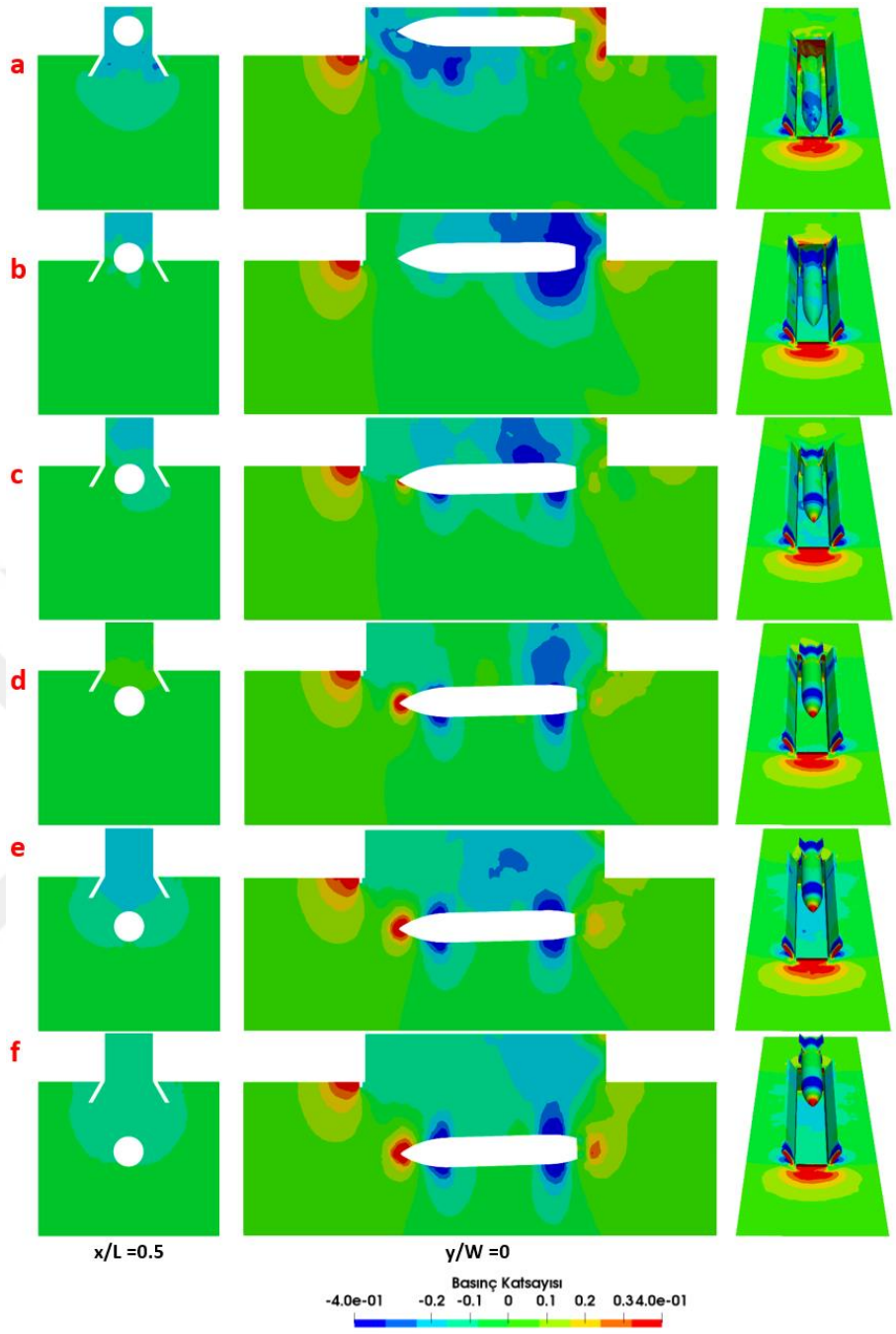


Şekil 4.79. *S FTS D 60 A ve S CC D 60 A sayısal çözümlere (DES) ait mühimmat üzerine etki eden kuvvet ve moment katsayıları karşılaştırması a) y ekseni boyunca etki eden kuvvet katsayısı ve x ekseni etrafında etki eden moment katsayısı b) z ekseni boyunca etki eden kuvvet katsayısı ve y ekseni etrafında etki eden moment katsayısı c) x ekseni boyunca etki eden kuvvet katsayısı ve z ekseni etrafında etki eden moment katsayısı d) tüm katsayılar*

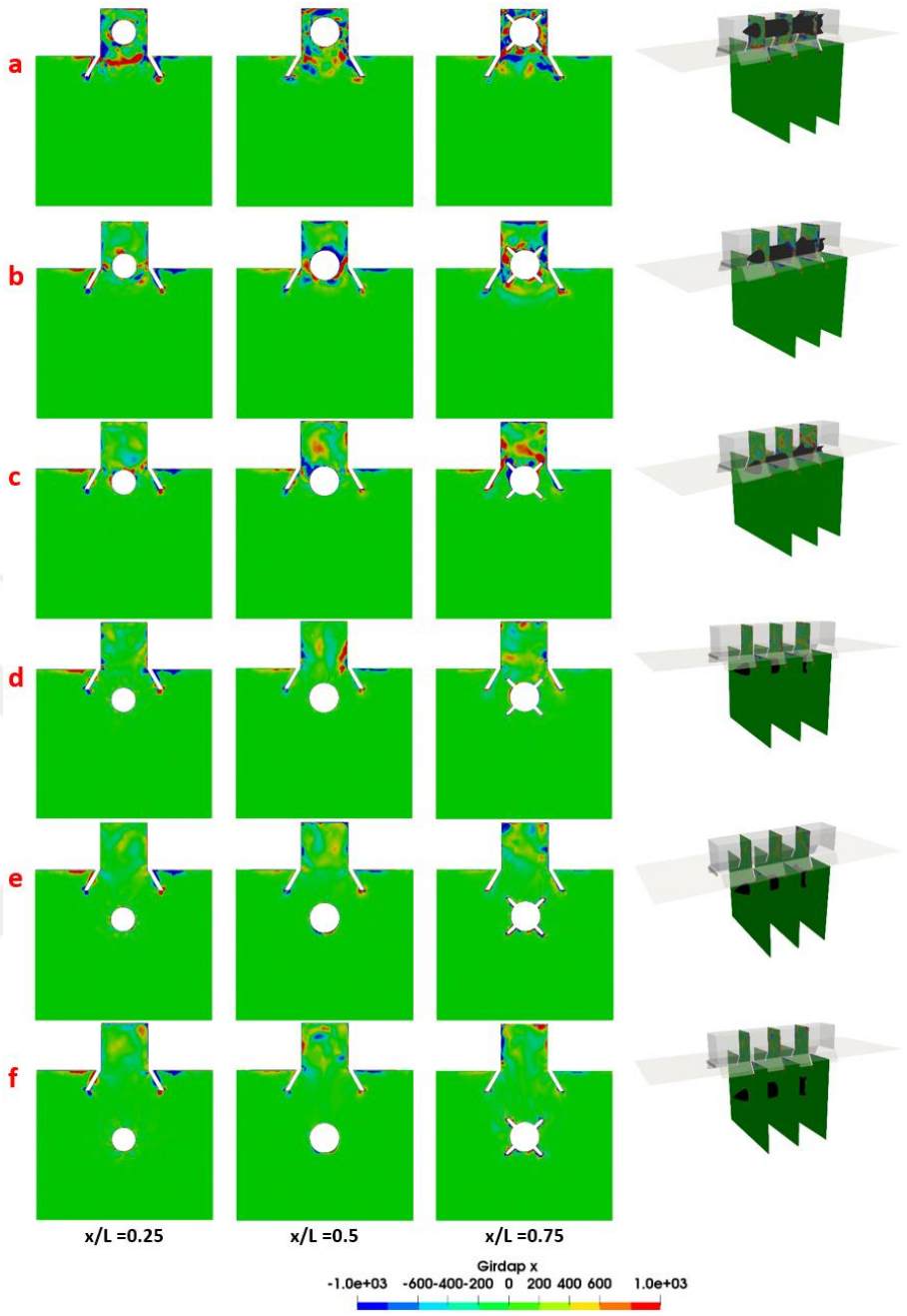
Başlangıç itici kuvvetleri ile **Şekil *4.79***'da gösterildiği gibi z ekseni boyunca normal kuvvetin maksimum olduğu anda bırakılarak S FTS D 60 A hareketli çözüm gerçekleştirilmiştir. Bu çözüme ait farklı zamanlardan elde edilen akış konturları olan **Şekil *4.80***'de anlık Mach sayısı, **Şekil *4.81***'de anlık basınç katsayısı, **Şekil *4.82***'de x ekseni etrafında oluşan girdap ve **Şekil *4.83***'te ise y ekseni etrafında oluşan girdap gösterilmektedir. S CC D 60 A çözümünden elde edilenler ile kıyaslandığında temel akış konturları içerisinde basınç katsayısındaki farklılık dikkat çekmektedir. Kavite içerisinde mühimmat ön alt bölgesinde düşük basınç oluşmuştur. Buna bağlı olarak kayma tabakasına burun aşağı girmiştir. Kayma tabakasından çıktıktan sonra mühimmatın burun bölgsinde yüksek basınç yine alt kısmda olmuştur. Fakat arka bölgede S CC D 60 A çözümünde sadece alt kısmında düşük basınç bölgesi oluşmuş iken S FTS D 60 A çözümünde hem alt hem üst kısmında oluşmuştur ve üst kısmındaki düşük basıncın daha büyük olduğu görülmektedir. Bunun sonucunda mühimmat temiz kavtedekinin aksine burun aşağı hareket etmiştir.



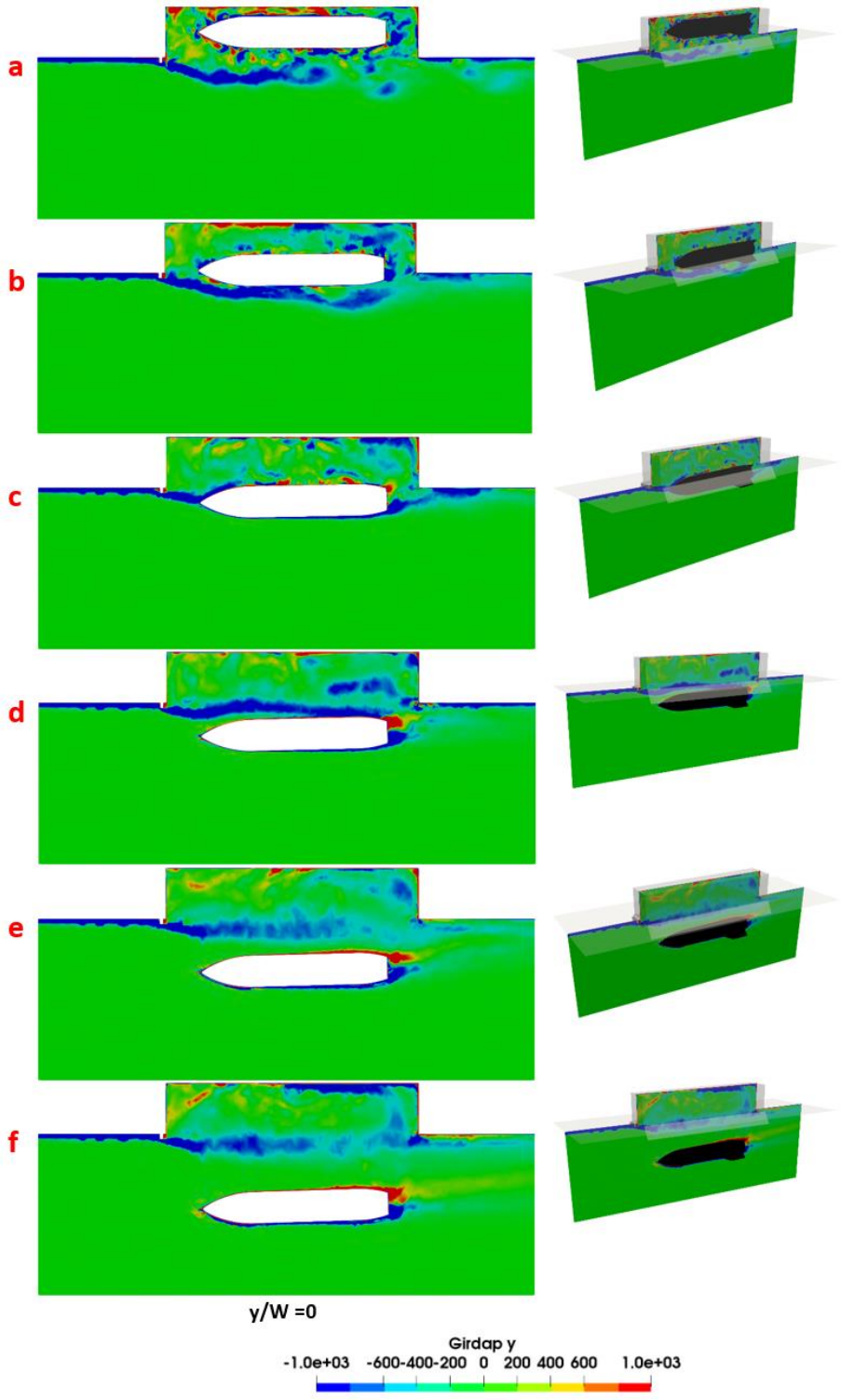
Şekil 4.80. *S FTS D 60 A hareketli sayısal çözüme (DES) ait Fz max için Mach Sayısı konturu a) t = 0 s, b) t = 0,097 s, c) t = 0,147 s, d) t = 0,197 s, e) t = 0,247 s, f) 0,297 s*



Şekil 4.81. *S FTS D 60 A hareketli sayısal çözüme (DES) ait Fz max için Basınç Katsayısı konturu a) t = 0 s, b) t = 0,097 s, c) t = 0,147 s, d) t = 0,197 s, e) t = 0,247 s, f) 0,297 s*



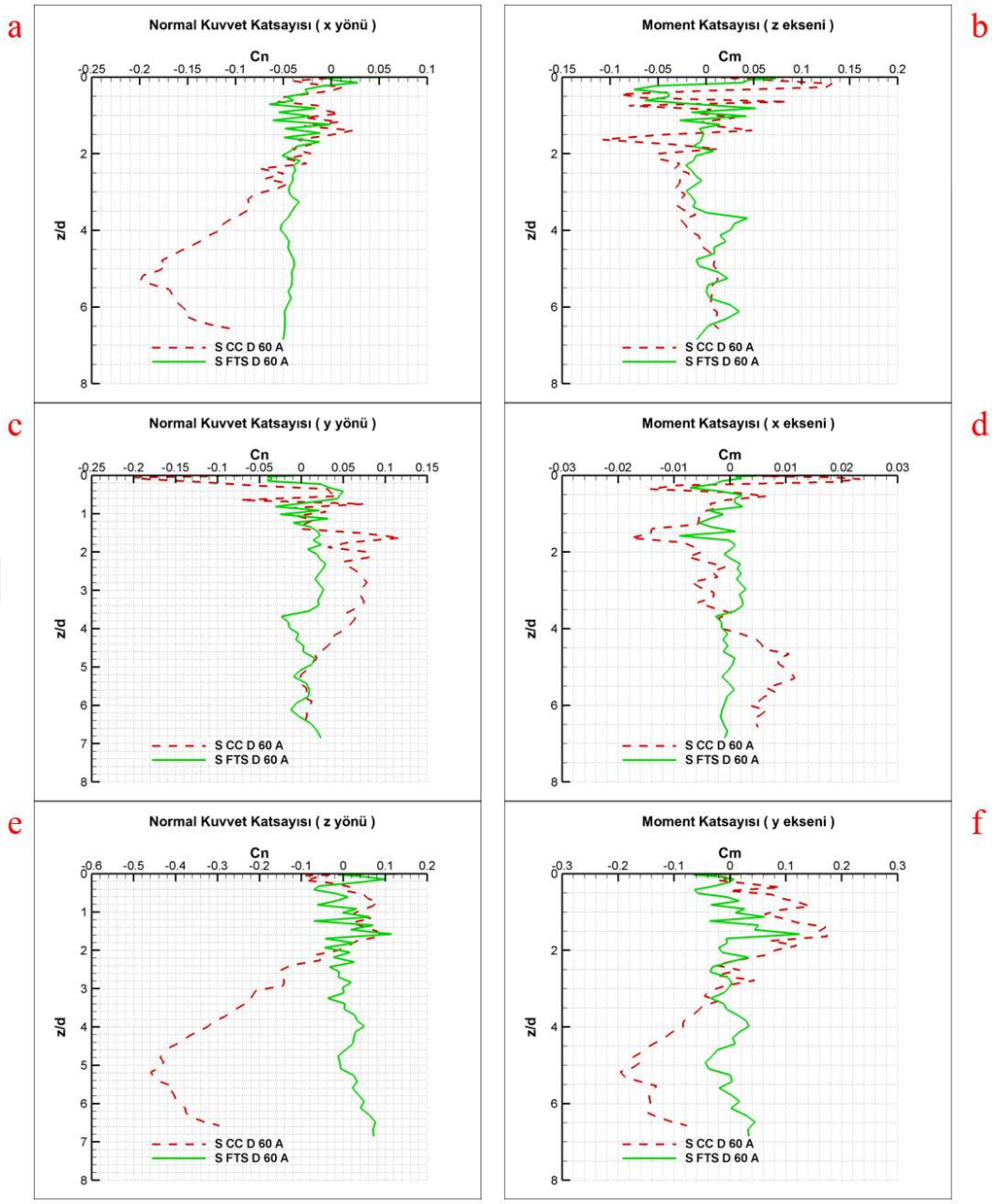
Şekil 4.82. *S FTS D 60 A hareketli sayısal çözüme (DES) ait Fz max için Girdap-x konturu a) t = 0 s, b) t = 0,097 s, c) t = 0,147 s, d) t = 0,197 s, e) t = 0,247 s, f) 0,297 s*



Şekil 4.83. *S FTS D 60 A hareketli sayısal çözüme (DES) ait Fz max için Girdap-y konturu a) t = 0 s, b) t = 0,097 s, c) t = 0,147 s, d) t = 0,197 s, e) t = 0,247 s, f) 0,297 s*

Şekil *4.84*'te S CC D 60 A ve S FTS D 60 A olarak adlandırılan iki sayısal çözüme ait mühimmat hareketi boyunca mühimmata etkiyen x, y ve z yönlerindeki normal kuvvet ve moment katsayılarının değişimi gösterilmektedir. S CC D 60 A ve S FTS D 60 A

çözümlerinde mühimmat üzerine etki eden normal kuvvetler karşılaştırıldığında genel olarak spoyler olan yapıda katsayıların sönümlendiği görülmektedir. X ekseni boyunca normal kuvvetin kavite içerisinde temiz kaviteyle benzer olduğu kavite dışında ise çok küçük olduğu görülmektedir. Y ve z eksenlerinde önünde spoyler olan yapıda hem kavite içinde hem de kavite dışında temiz kaviteye göre daha küçük kuvvet etkimiştir. Moment katsayılarında ise tüm eksenlerde (x (yalpalama), y (yunuslama) ve z (sapma)) önünde spoyler olan kavitede temiz kaviteye göre hem kavite içerisinde hem de kavite dışında katsayılar daha küçük değerler oluşturmuştur.



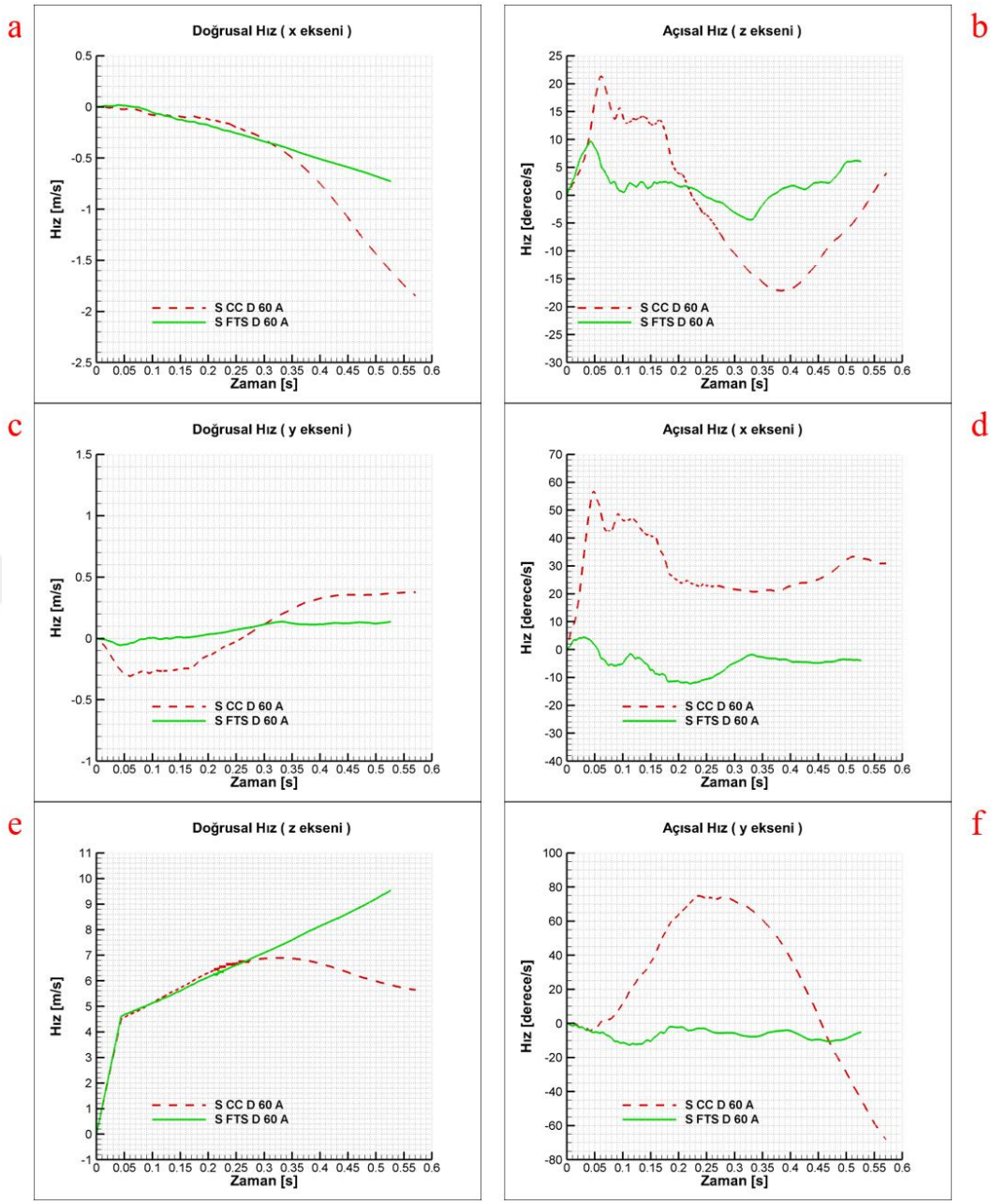
Şekil 4.84. *S FTS D 60 A ve S CC D 60 A hareketli sayısal çözümlere (DES) ait Fz max için mühimmat üzerine etki eden kuvvet ve moment katsayıların değişimi a) x ekseni boyunca etki eden kuvvet katsayısı, b) z ekseni etrafında etki eden moment katsayısı, c) y ekseni boyunca etki eden kuvvet katsayısı, d) x ekseni etrafında etki eden moment katsayısı, e) z ekseni boyunca etki eden kuvvet katsayısı, f) y ekseni etrafında etki eden moment katsayısı*

Şekil *4.85* ve **Şekil *4.86***'da S CC D 60 A ve S FTS D 60 A çözümlerine ait zamana bağlı çizgisel ve açısal hız ile öteleme ve dönme değerleri verilmiştir. **Şekil *4.84***'de sunulan mühimmat üzerine etki eden kuvvet ve momentler ile paralel şekilde hızlar incelendiğinde genel olarak tüm hız değerlerinde iyileşme olduğu görülmektedir. X ekseni boyunca etki eden çizgisel hızda kavite içerisinde benzer hız değerleri görülüyor iken kavite dışında S FTS D 60 A hız değerini düşürmüştür. Bu hız değerleri sonucunda

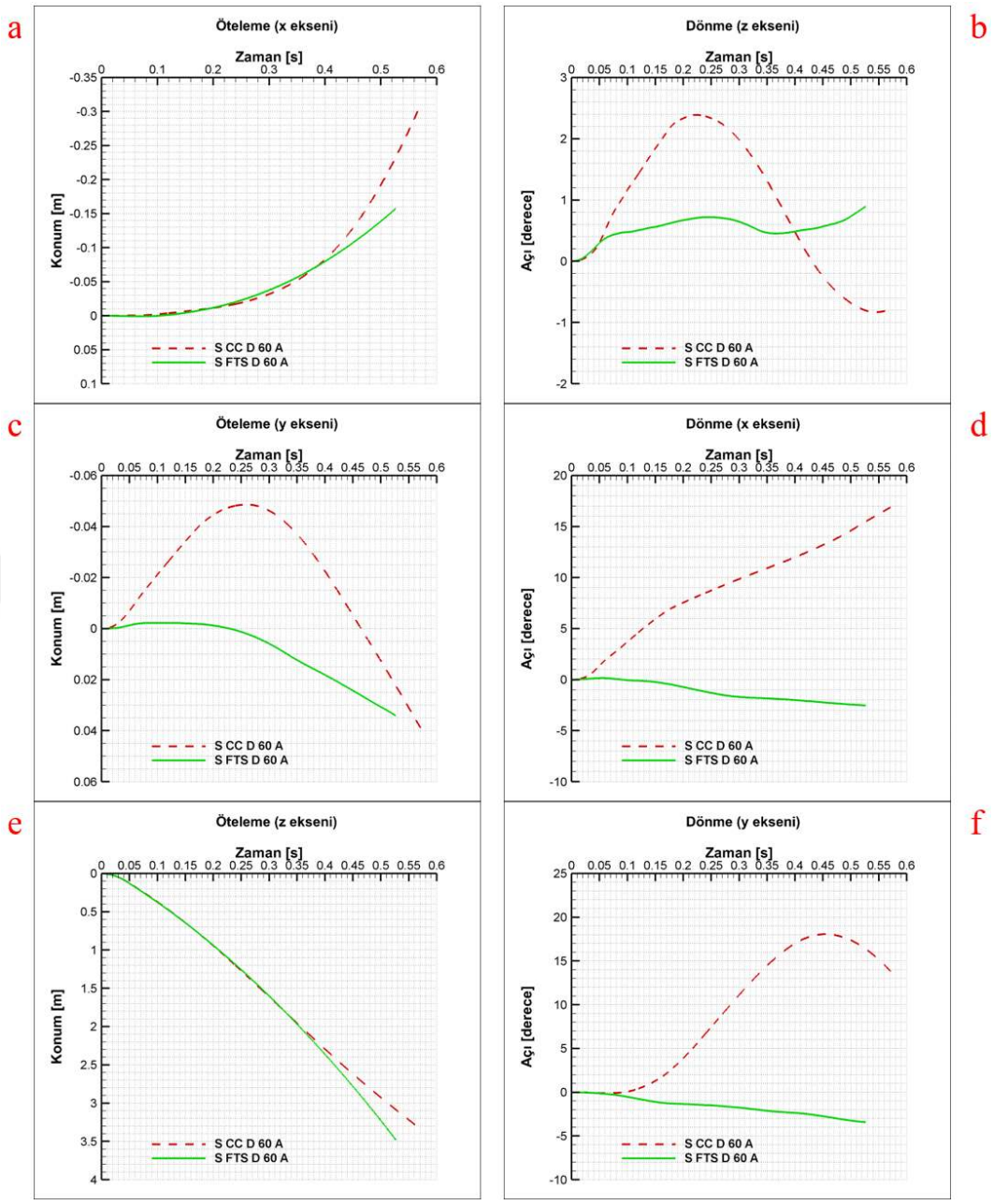
önünde spoyler olan yapıda temiz kaviteye göre x ekseni boyunca daha az öteleme gerçekleşmiştir. Z ekseni açısal hızları kıyaslandığında temiz kavitede 22 derece/s olan maksimum pozitif açısal hız önünde spoyler olan geometride 10 derece/s -16 derece/s olan maksimum negatif açısal hız -5 derece/s'ye düşmüştür. Benzer şekilde z ekseni etrafındaki dönme değeri 2,5 derece iken 1 derecenin altına inmiştir. y ekseni yönündeki çizgisel hız bileşeni incelendiğinde önünde spoyler olan geometride temiz kaviteye göre kavite içerisinde ve dışarısında oluşan hız değerleri sönümlenmiştir. Bu hızlara bağlı olarak kavite hücum kenarı önüne spoyler eklenmesi hem kavite içerisinde hemde kavite dışarısında y ekseni boyunca daha az hareket etmesini sağlamıştır. X ekseni maksimum açısal hız büyüklüğü 56 derece/s iken bu değer kavite hücum kenarı önüne spoyler konulması ile 10 derece/s'ye düşürülmüştür. Buna paralel olarak x ekseni etrafındaki dönme açısı büyüklüğü 18 dereceden 2,5 dereceye düşürülmüştür. Daha önceki çözümlerde olduğu gibi z ekseninde ise ilk 0,05 s boyunca fırlatma kuvvetin etkisiyle oluşan hızlar aynı ve aerodinamik kuvvetlerin etkisi görülmüyor iken fırlatma kuvvetinin etkisi bittikten sonra hızlarda farklılık görülmeye başlanmıştır. Mühimmat ayrılmasında istenildiği üzere z ekseni boyunca hız değeri temiz kaviteye göre daha fazla olması sağlanmıştır. Bu hız farkından dolayı 0,5 s sonra mühimmat uçaktan yaklaşık 20 cm daha fazla uzaklaşmıştır. Y ekseni açısal hızı incelendiğinde temiz kavitede saniyede 80 dereceyi bulan maksimum değer önünde spoyler olan kavitede bu değer saniyede 15 derecenin altına düşürülmüştür. Buna bağlı olarak maksimum hücum açısıda 18 dereceden -3,5 dereceye düşürülmüştür.

S FTS D 60 A çözümünde mühimmat kaviteyi tamamamen terk ederek K. Jamison ve arkadaşlarının yapmış olduğu sınıflandırmaya göre diğer tüm kriterleri geçerek 4 kodunu (**Tablo *1.2***) alarak temiz ayrılma oluşturmuşur. Ayrıca mamksimum hücum açısını -3,5 dereceye ve maksimum açısal hızı saniyede 15 derecenin altına düşürerek kabul edilebilir mühimmat yörüngesi oluşturmuştur.

Sonuç olarak kavite akışta kullanılan pasif yöntemlerden bir diğeri olan kavite hücum kenarı önüne spoyler eklenmesi temiz kaviteye göre mühimmat üzerinde oluşan maksimum ses basınç düzeyini 4 dB kadar düşürmüştür. Ayrıca mühimmat bırakma analizleri bakımından mühimmatın izlediği yörüngede tüm eksenlerde maksimum açısal hız değerlerini 15 derece/s'nin altında, 0,5 s sonra maksimum hücum açısı büyüklüğünü 3,5 derecede tutmuştur.

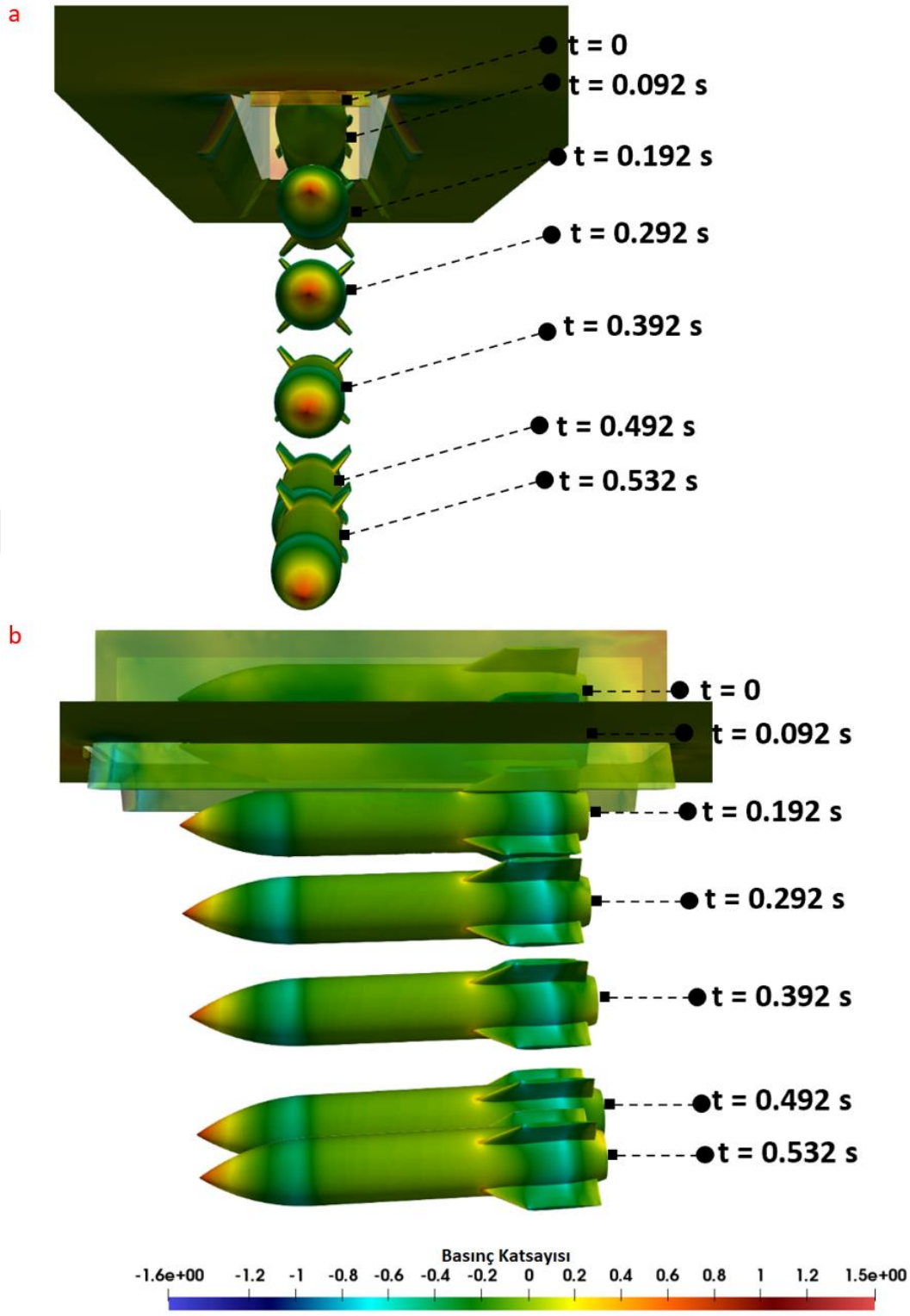


Şekil 4.85. *S FTS D 60 A ve S CC D 60 A hareketli sayısal çözümlere (DES) ait Fz max için mühimmat hareket hızları a) x ekseni doğrusal hız bileşeni, b) z ekseni açısal hız bileşeni, c) y ekseni doğrusal hız bileşeni, d) x ekseni açısal hız bileşeni, e) z ekseni doğrusal hız bileşeni, f) y ekseni açısal hız bileşeni*



Şekil 4.86. *S FTS D 60 A ve S CC D 60 A hareketli sayısal çözümlere (DES) ait Fz max için mühimmat hareketi a) x ekseni boyunca öteleme, b) z ekseni etrafında dönme, c) y ekseni boyunca ötleme, d) x ekseni etrafında dönme, e) z ekseni boyunca öteleme, f) y ekseni etrafında dönme*

Şekil *4.87*'de S FTS D 60 A çözümünden elde edilen sayısal yörünge değerleri zamana bağlı olarak görselleştirilmiştir.



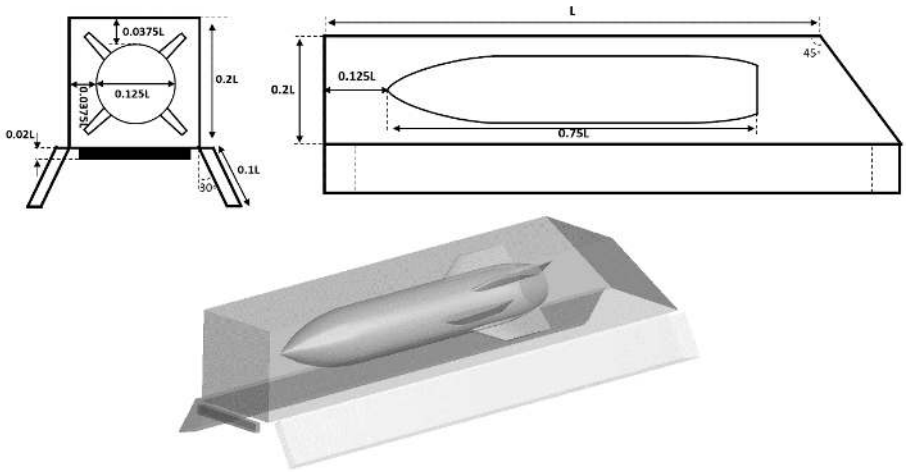
Şekil 4.87. *S FTS D 60 A ve S CC D 60 A hareketli sayısal çözümlere (DES) ait Fz max için mühimmat hareketi gösterimi a) önden görünüş, b) yandan görünüş*

4.5. Mühimmat ve 60 Derece Açıya Sahip Kapaklı Önünde Spoyler Olan Arka Duvarı Eğimli Kavite (S FTS SW D 60)

Pasif kontrol yöntemlerinin incelenmesi başlığı altında son olarak önünde spoyler olan arka duvarı eğimli kavitenin mühimmat üzerinde oluşan ses basınç düzeyine ve mühimmat yörüngesine olan etkisi incelenmiştir. Bu kapsamda daha önce incelenmiş olan iki pasif kontrol metodu birleştirilerek kavite firar duvarı 45 derece açı yapacak şekilde eğilmiş ve kavite hücum kenarı önüne dikdörtgen şeklinde bir spoyler yerleştirilmiştir.

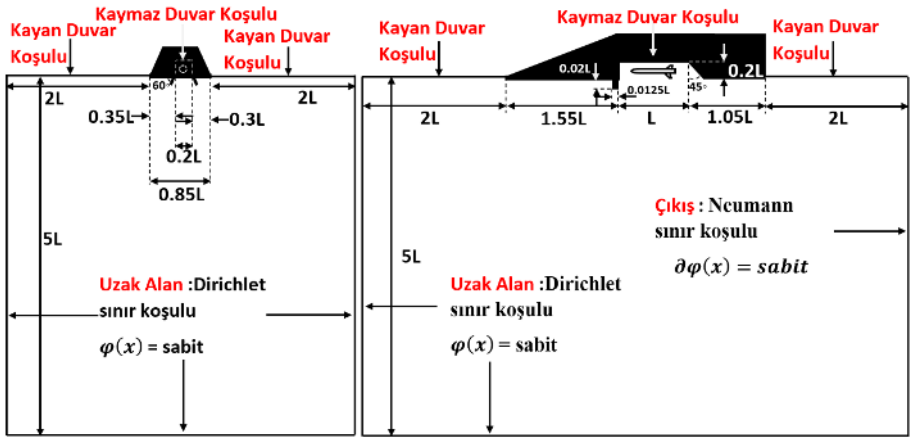
4.5.1. Hareketsiz sayısal çözüm

90 derece açıya sahip kapaklı çözümde kullanılan mühimmat aynı şekilde kavite içerisine yerleştirilmiştir. **Şekil *4.88***'de gösterildiği gibi kavite arka duvarı 45 derece eğilerek kavite önüne spoyler yerleştirilmiştir.

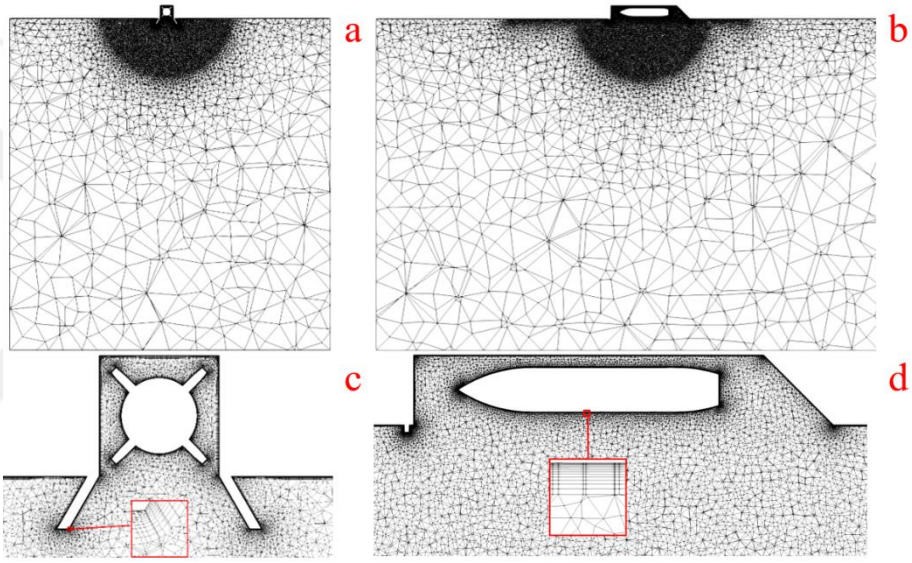


Şekil 4.88. *S FTS SW D 60 A sayısal çözüm geometrisi*

S FTS SW D 60 A çözüm alanı **Şekil *4.89*** gibi gösterilmektedir. Bu çözüm alanı için oluşturulan ağ yapısı ise **Şekil *4.90*** ile gösterilmektedir.

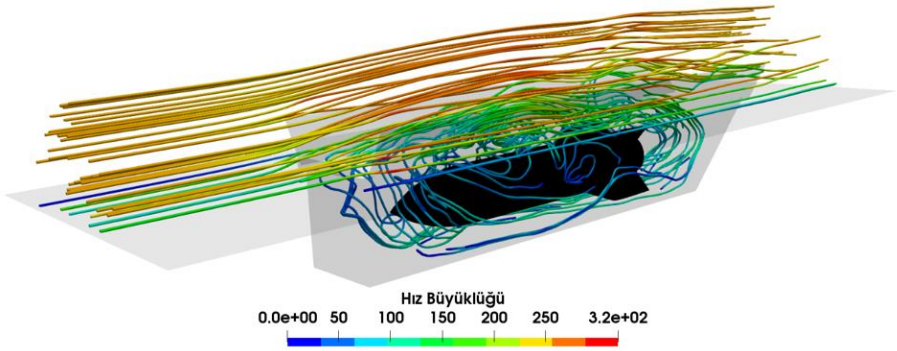


Şekil 4.89. *S FTS SW D 60 A sayısal çözüm alanı*

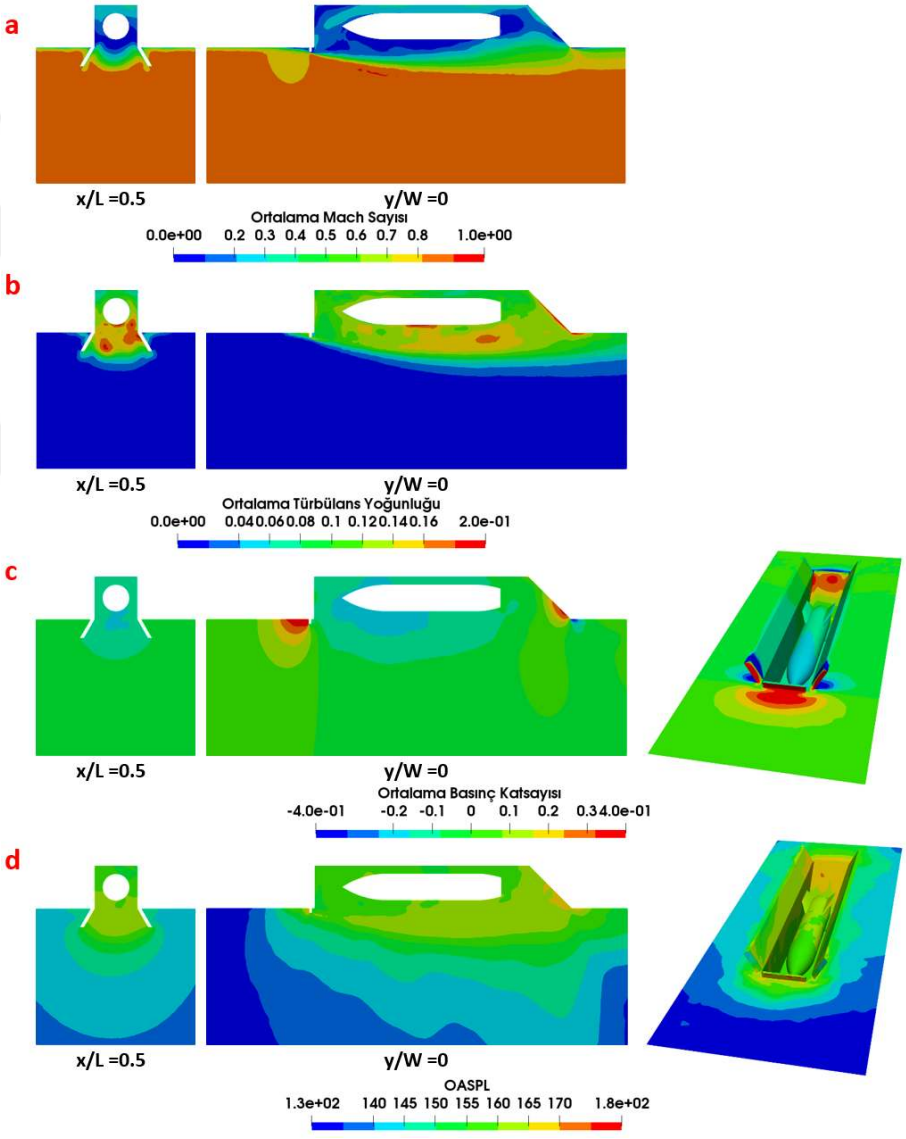


Şekil 4.90. *S FTS SW D 60 A sayısal çöüzüm alanı ağı a) önden tüm ağ görüntüsü, b) yandan tüm ağ görüntüsü, c) önden yakın görüntü, d) yandan yakın görüntü*

Elde edilen anlık akım çizgileri **Şekil *4.91***'de ve ortalama değerlere ait konturlar **Şekil *4.92***'de gösterilmektedir. Temiz kavite ile karşılaştırıldığında önünde spoyler olan geometride kayma tabakasının temiz kavitedekinin aksine sadece önünde spoyler olan kavitedeki gibi mühimmatın arkasına doğru mühimmata yapıştığı, türbülans yoğunluğunun azaldığı, maksimum basınç katsayısının spoyler önünde gerçekleştiği ve kavite arka duvarında basınç katsayısının sadece arka duvarı eğimli olan kavitede olduğu gibi arttığı ve OASPL dağılımında iyileşme olduğu görülmüştür. S FTS SW D 60 A çözümünde kavite üzerinde oluşan maksimum OASPL değeri 172,395 dB iken mühimmat üzerinde oluşan maksimum OASPL değeri 167,625 dB olmuştur.



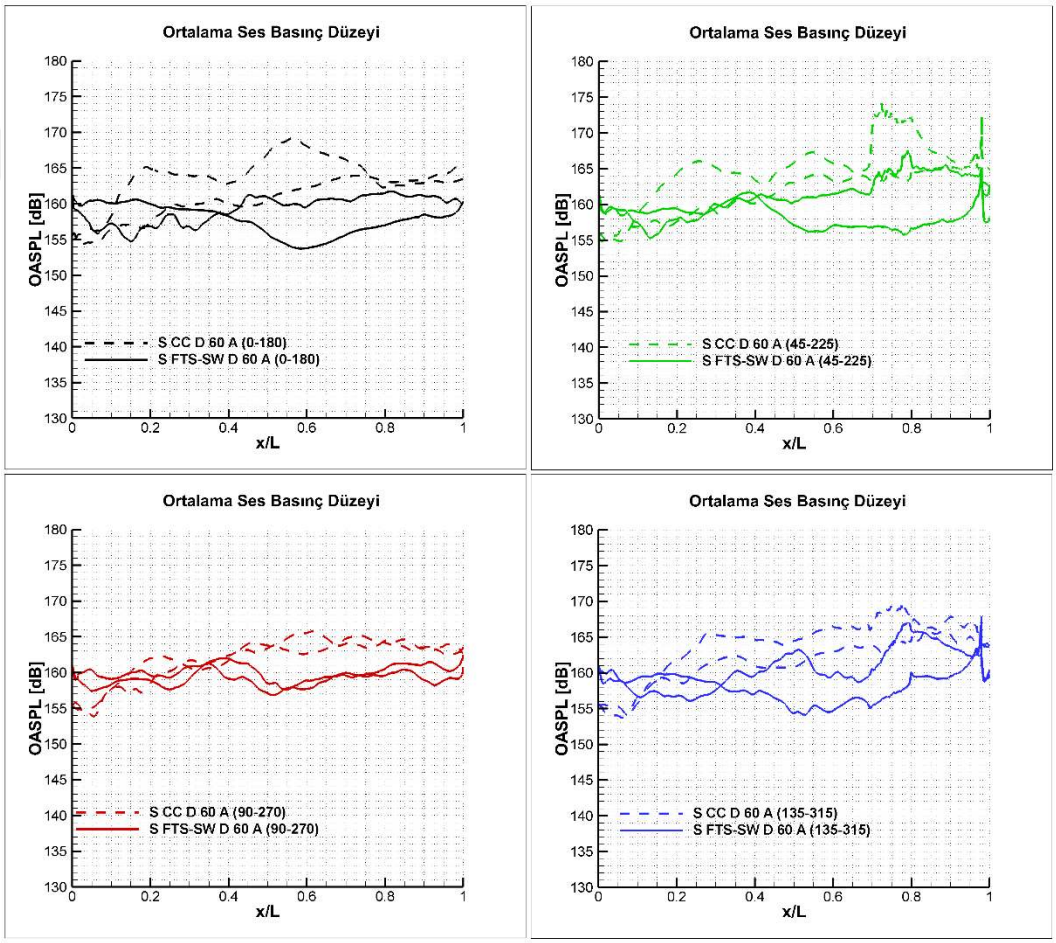
Şekil 4.91. *S FTS SW D 60 A sayısal çözüme (DES) ait akım çizgileri*



Şekil 4.92. *S FTS SW D 60 A sayısal çözüme (DES) ait konturlar a) ortalama Mach sayısı, b) türbülans yoğunluğu, c) basınç katsayısı, d) OASPL*

Şekil *4.93*'te mühimmat boyunca **Şekil *4.8***'de gösterildiği gibi farklı açılarda alınmış OASPL değerleri grafiksel olarak gösterilmektedir. Maksimum OASPL değerleri

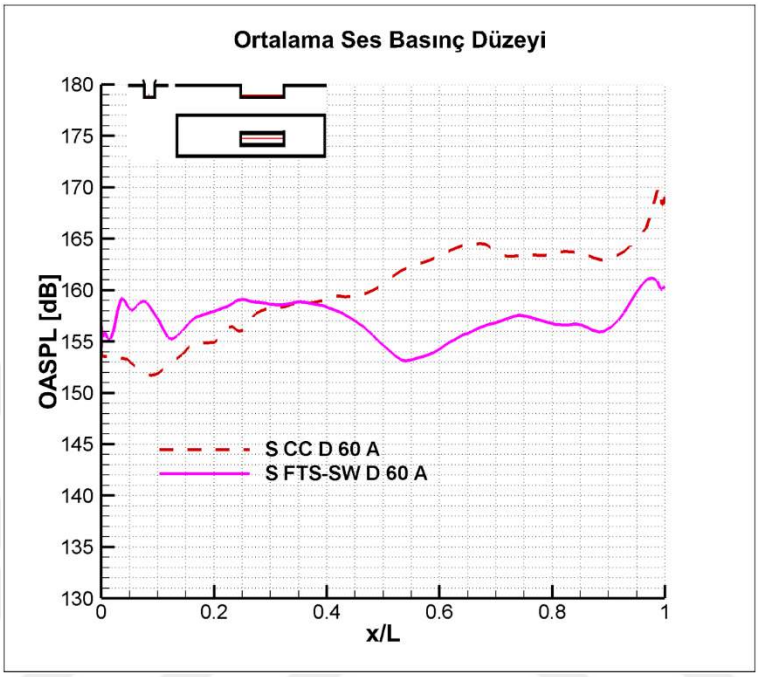
yine aynı şekilde 225 dereceye denk gelen kesitte mühimmat arkasında bulunan kanatçık üzerinde oluşmuştur ve 135 dereceye denk gelen kesitte de maksimum değere yakın değerler görülmüştür. S CC D 60 A çözümünde mühimmat üzerinde oluşan maksimum OASPL değeri 174,803 dB iken S FTS SW D 60 A çözümde bu değer 167,625 dB'e inmiştir. **Şekil *4.93*** incelendiğinde görüleceği gibi kavite önüne spoyler yerleştirip arka duvarı eğme mühimmat üzerinde oluşan ses basınç düzeyi dağılımını mühimmat burnu dışında tüm bölgelerde ciddi şekilde düşürmektedir. Maksimum ortalama ses basınç değerini 7 dB kadar düşürerek iyileştirme göstermiştir.



Şekil 4.93. *S FTS SW D 60 A ve S CC D 60 A sayısal çözümlerine (DES) ait mühimmat OASPL değerleri*

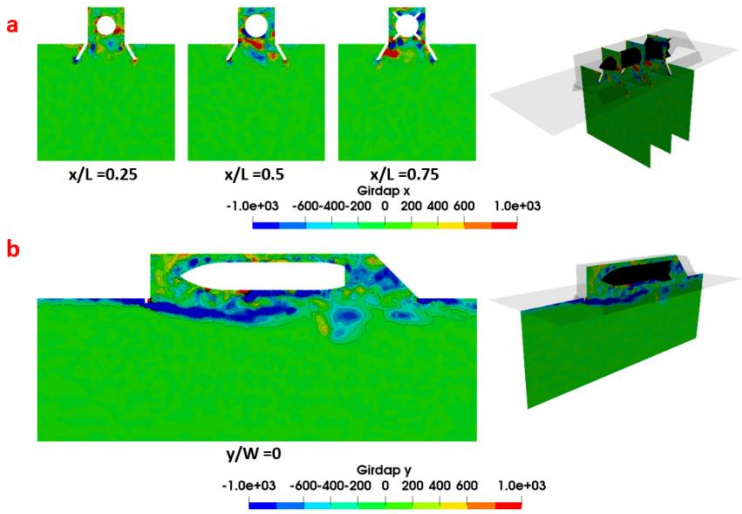
Şekil *4.94*'te S CC D 60 A ve S FTS SW D 60 A çözümlerinin kavite tabanından elde edilen OASPL değerleri karşılaştırılmıştır. Önünde spoyler olan arka duvarı eğimli kavitede temiz kaviteye göre kavite tabanında ses düzeyini kavite hücum kenarı bölgesinde artırıyor iken firar kenarı bölgesinde düşürmektedir. Ayrıca kavite duvarlarında oluşan maksimum OASPL değeri S CC D 60 A'da 172,09 dB iken S FTS

SW D 60 A çözümünde bu değer 172,395 dB'dir. Böylece, kavite önüne spoyler koyarak arka duvarı eğme kavite duvarlarında oluşan maksimum OASPL değerini değiştirmiyor iken, kavite tabanındaki OASPL dağılımını kavite firar kenarı bölgesinde ortlama 5 dB düşürmektedir.

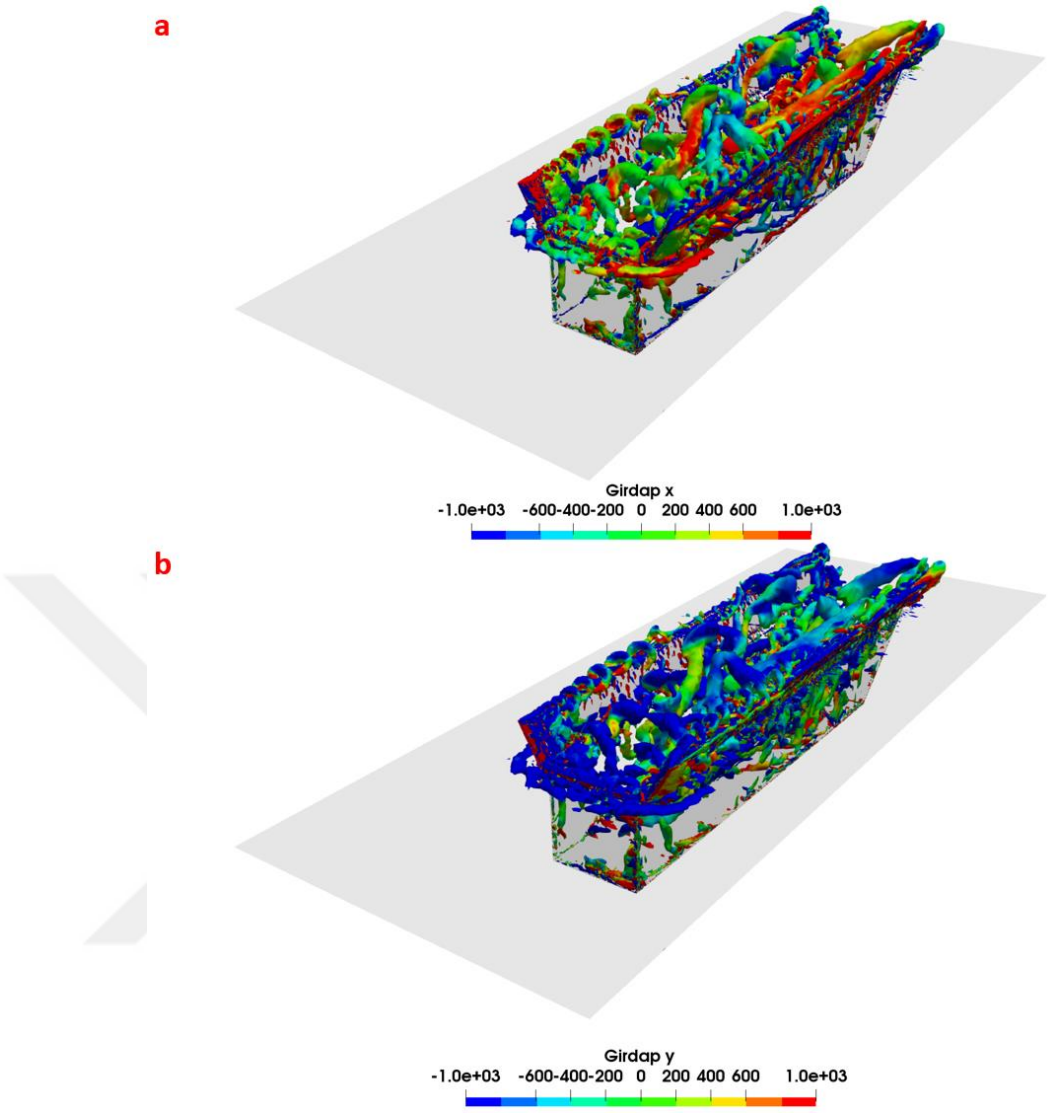


Şekil 4.94. *S FTS SW D 60 A ve S CC D 60 A sayısal çözümlerine (DES) ait kavite tabanı OASPL karşılaştırması*

Şekil *4.95* ve **Şekil *4.96***'da S FTS SW D 60 A çözümüne ait girdap yapıları görülmektedir. S FTS D 60 A çözümünde görülen girdap yapıları görülmüştür.



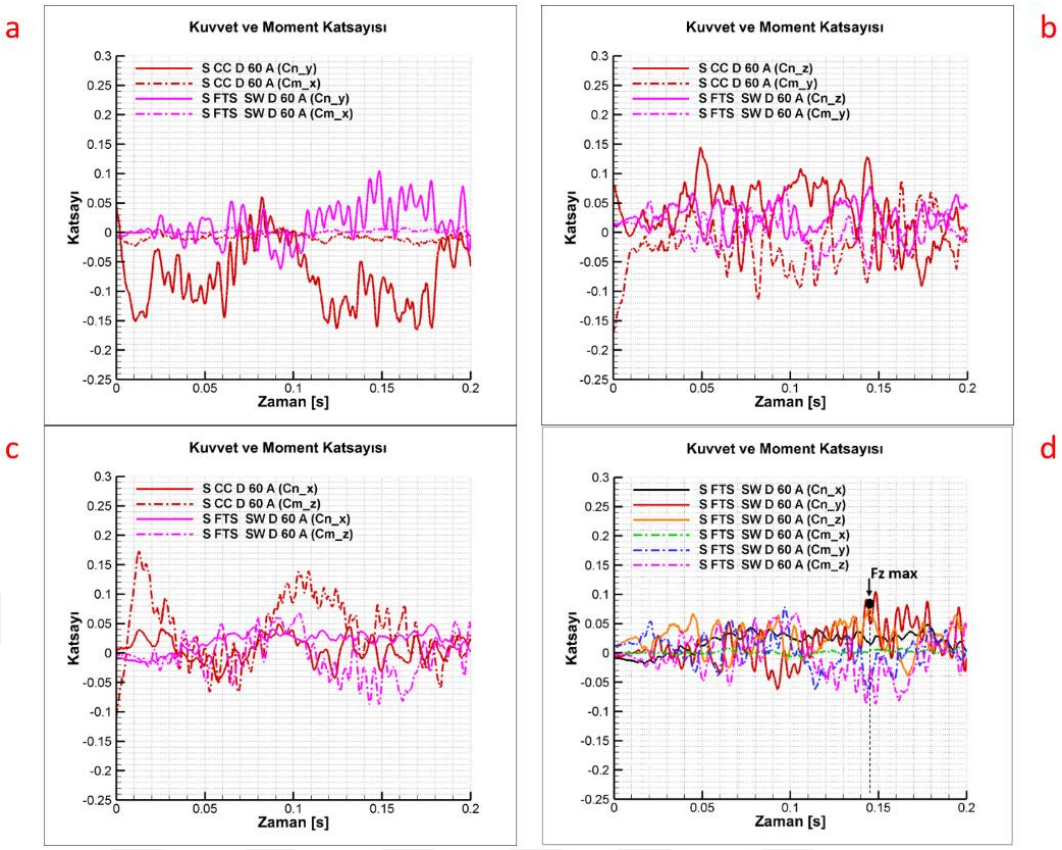
Şekil 4.95. *S FTS SW D 60 A sayısal çözümüne (DES) ait girdap konturları a) x ekseni etrafında oluşan girdaplar, b) y ekseni etrafında oluşan girdaplar*



Şekil 4.96. *S FTS SW D 60 A sayısal çözümüne (DES) ait eş yüzey Q-kriteri yapıları a) girdap-x ile renklendirme, b) girdap-y ile renklendirme*

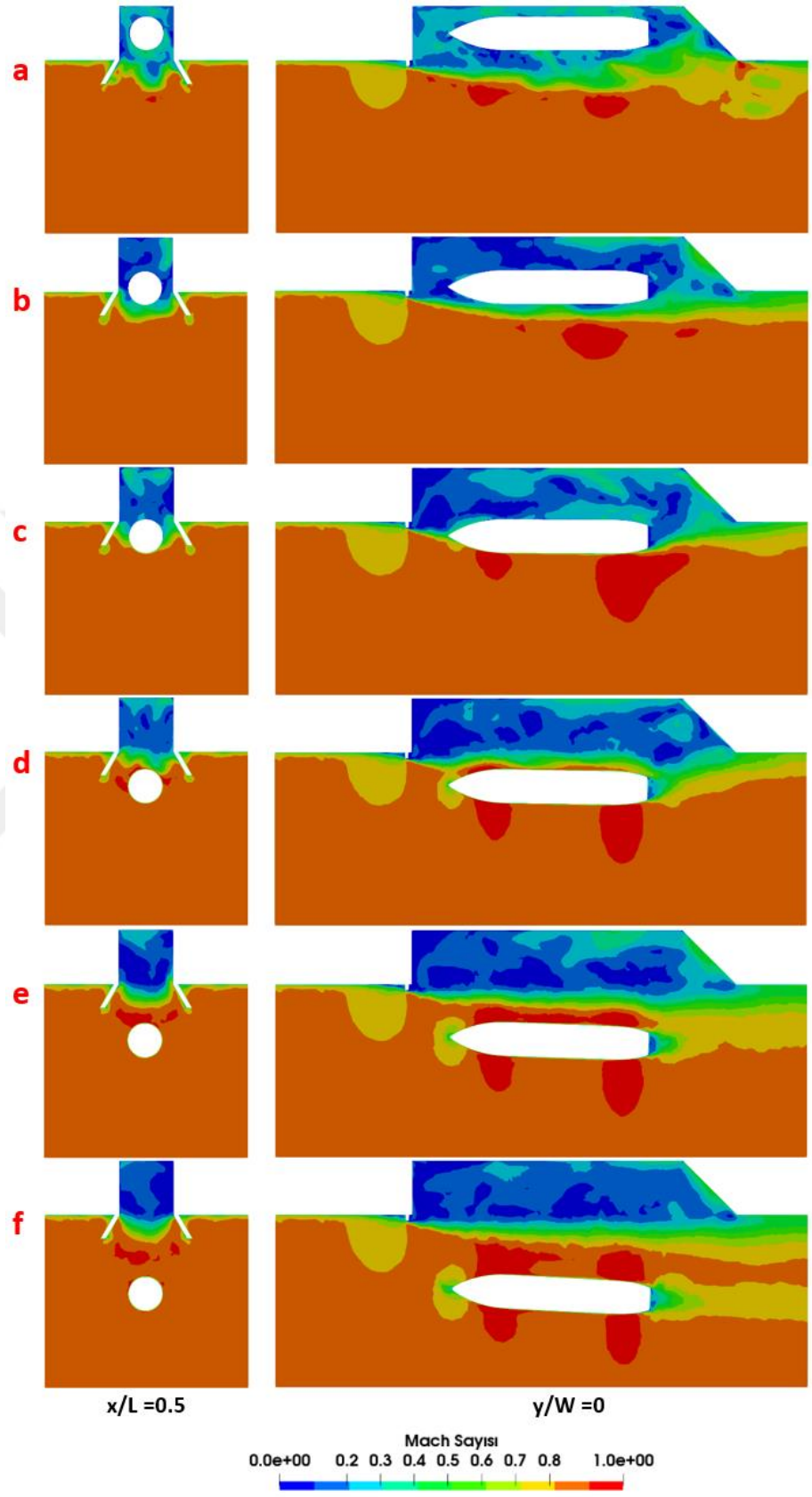
4.5.2. Hareketli sayısal çözüm

Daha önceki çözümlerde olduğu gibi hareketsiz çözümden elde edilen mühimmat üzerine etki eden kuvvet ve moment katsayıları temiz kavite çözümden elde edilenlerle birlikte **Şekil *4.97*** ile gösterilmektedir. Bu şekiller incelendiğinde kavite hücum kenarı önüne spoyler yerleştirerek kavite arka duvarını eğme sadece kavite önüne spoyler yerleştirmekte olduğu gibi hem normal kuvvet hemde moment katsayılarının genliğini düşürmüştür. Temiz kavitede genel olarak 0,15 olan kat sayıların maksimum ve minimum değerleri önünde spoyler olan kavite bu değerler 0,1'e düşmüştür.

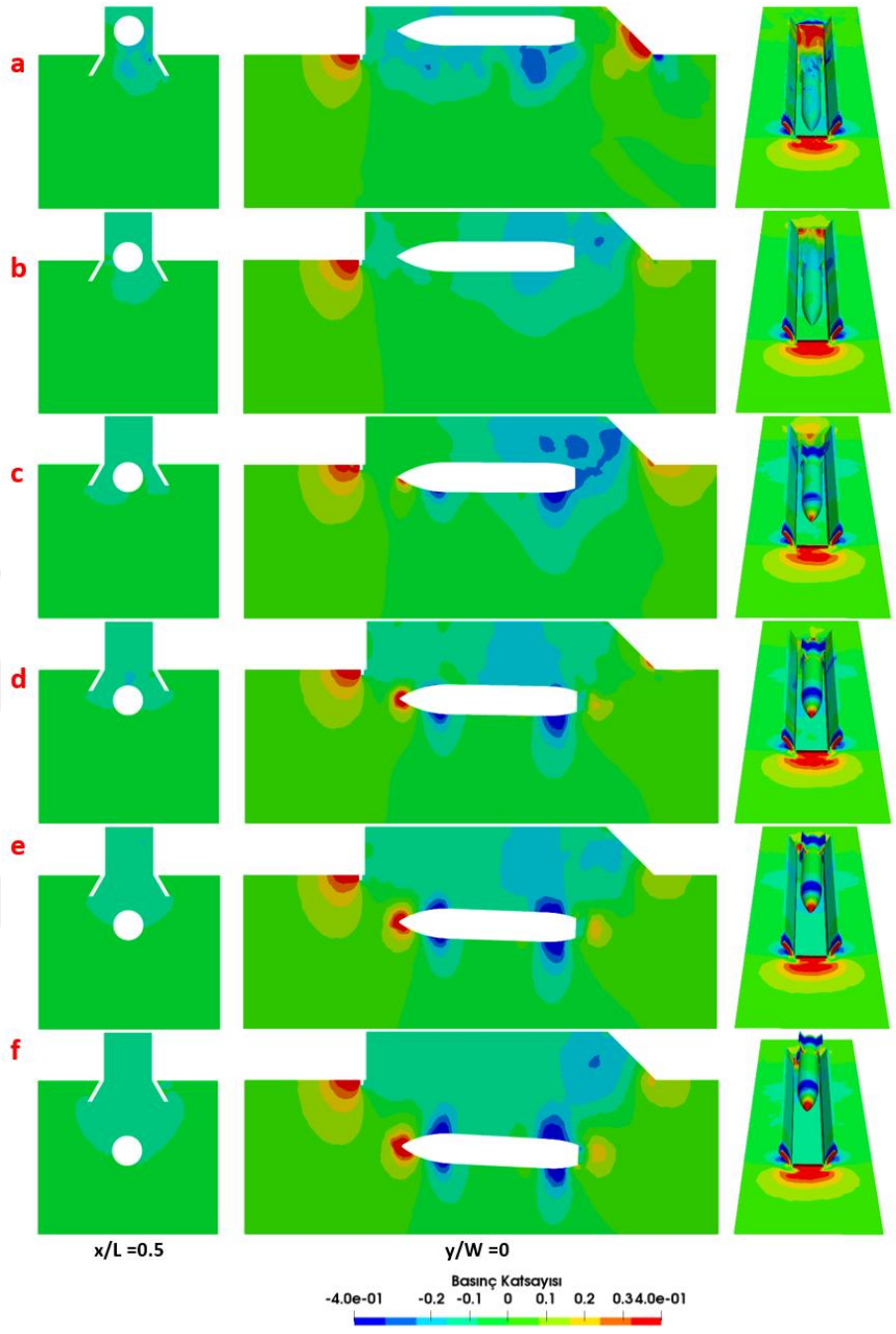


Şekil 4.97. *S FTS SW D 60 A ve S CC D 60 A sayısal çözümlere (DES) ait mühimmat üzerine etki eden kuvvet ve moment katsayıları a) y ekseni boyunca etki eden kuvvet katsayısı ve x ekseni etrafında etki eden moment katsayısı b) z ekseni boyunca etki eden kuvvet katsayısı ve y ekseni etrafında etki eden moment katsayısı c) x ekseni boyunca etki eden kuvvet katsayısı ve z ekseni etrafında etki eden moment katsayısı d) tüm katsayılar*

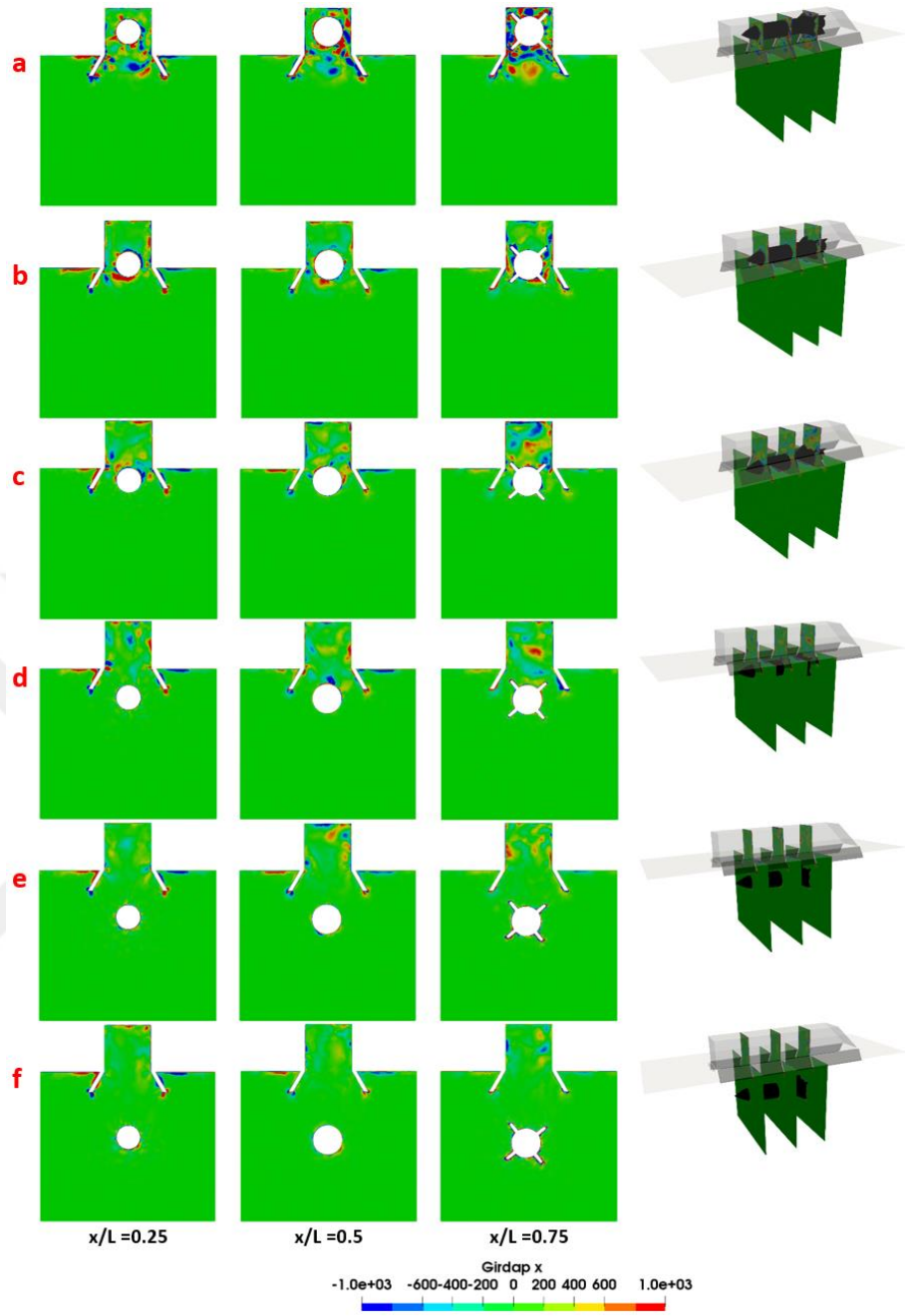
Başlangıç itici kuvvetleri ile **Şekil *4.97***'de gösterildiği gibi z ekseni boyunca normal kuvvetin maksimum olduğu anda bırakılarak S FTS SW D 60 A hareketli çözüm gerçekleştirilmiştir. Bu çözüme ait farklı zamanlarda elde edilen akış parameterleri konturları **Şekil *4.98***'de anlık Mach sayısı, **Şekil *4.99***'da anlık basınç katsayısı, **Şekil *4.100***'de x ekseni etrafında oluşan girdap ve **Şekil *4.101***'de ise y ekseni etrafında oluşan girdap ile gösterilmektedir. S CC D 60 A, S SW D 60 A ve S FTS D 60 A çözümünden elde edilenler ile kıyaslandığında temel akış parametrelerinin konturları içerisinden basınç katsayısın S FTS D 60 A çözümüne benzediği görülmüştür. Farklı olarak, mühimmat kavite içerisindeyken düşük basınç bölgesi hem mühimmatın ön alt tarafında hem de arka alt tarafında gerçekleşmiştir. Buna bağlı olarak kayma tabakasına düz birşekide girmiştir. Kayma tabakasından sonra mühimmatın burunda yüksek basınç bölgesi yine alt kısmında olmuş ve arka bölgesinde de S FTS D 60 A çözümünde olduğu gibi hem alt hem üst kısmında düşük basınç oluşmuştur. Bunun sonucunda mühimmat burun yukarı olacak şekilde hareket etmiştir.



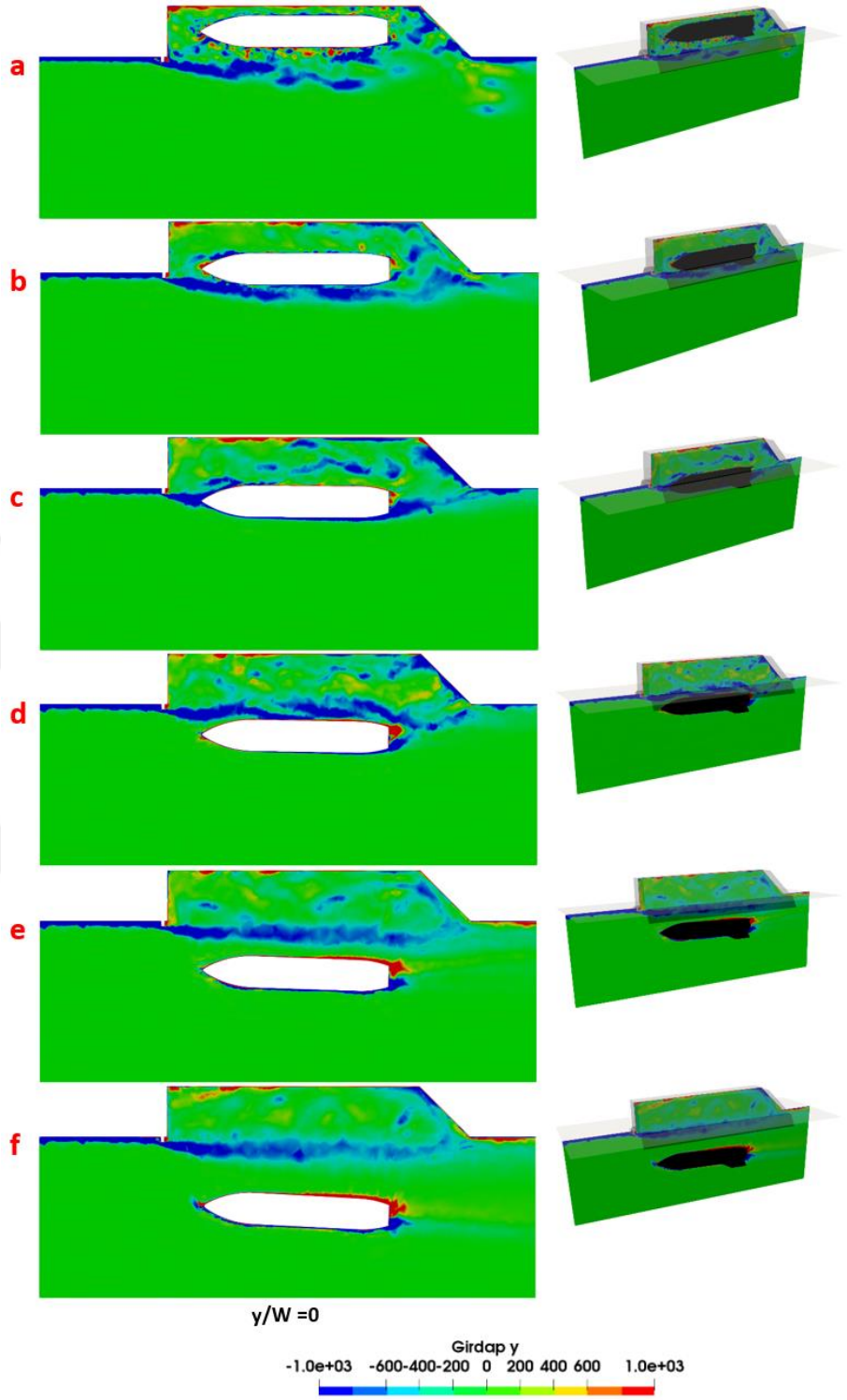
Şekil 4.98. *S FTS SW D 60 A hareketli sayısal çözüme (DES) ait Fz max için Mach Sayısı konturu a) t = 0 s, b) t = 0,095 s, c) t = 0,145 s, d) t = 0,195 s, e) t = 0,245 s, f) 0,295 s*



Şekil 4.99. *S FTS SW D 60 A hareketli sayısal çözüme (DES) ait Fz max için Basınç Katsayısı konturu a) t = 0 s, b) t = 0,095 s, c) t = 0,145 s, d) t = 0,195 s, e) t = 0,245 s, f) 0,295 s*



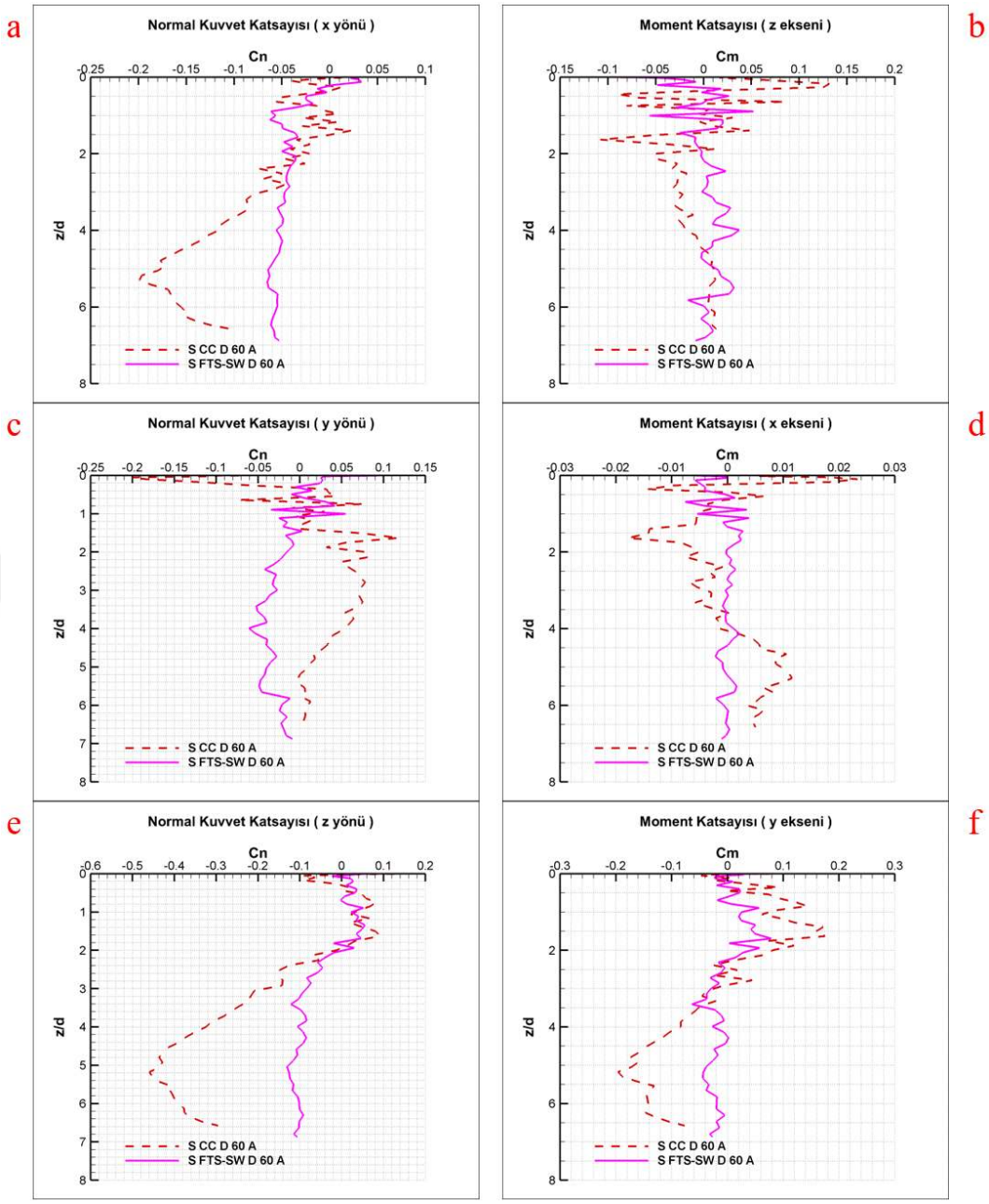
Şekil 4.100. *S FTS SW D 60 A hareketli sayısal çözüme (DES) ait Fz max için Girdap-x konturu a) t = 0 s, b) t = 0,095 s, c) t = 0,145 s, d) t = 0,195 s, e) t = 0,245 s, f) 0,295 s*



Şekil 4.101. *S FTS SW D 60 A hareketli sayısal çözüme (DES) ait Fz max için Girdap-y konturu a) t = 0 s, b) t = 0,095 s, c) t = 0,145 s, d) t = 0,195 s, e) t = 0,245 s, f) 0,295 s*

Şekil *4.102*'da S CC D 60 A ve S FTS SW D 60 A olarak adlandırılan iki sayısal çözüme ait mühimmat hareketi boyunca mühimmata etkiyen x, y ve z yönlerindeki normal kuvvet ve moment katsayılarının değişimi gösterilmektedir. S CC D 60 A ve S

FTS SW D 60 A çözümlerinde mühimmat üzerine etki eden normal kuvvetler karşılaştırıldığında genel olarak önünde spoyler olan arka duvarı eğimli yapıda sadece önünde spoyler olan yapıda olduğu gibi katsayıların sönümlendiği görülmektedir. Temiz kavite analizi ile kıyaslandığında, x ekseni boyunca normal kuvvetin kavite içerisinde benzer olduğu kavite dışında ise çok küçük olduğu görülmektedir. Mühimmat üstüne y ve z eksenlerinde S FTS SW D 60 A çözümünde hem kavite içinde hem de kavite dışında S CC D 60 A çözümüne göre daha küçük kuvvet etkimiştir. Moment katsayıları kıyaslandığında ise y (yunuslama) ve z (sapma) eksenlerinde S FTS SW D 60 A çözümünde S CC D 60 A çözümüne göre hem kavite içerisinde hem de kavite dışında katsayıların büyüklükleri daha küçük iken x (yalpalama) ekseninde ise benzerdir.



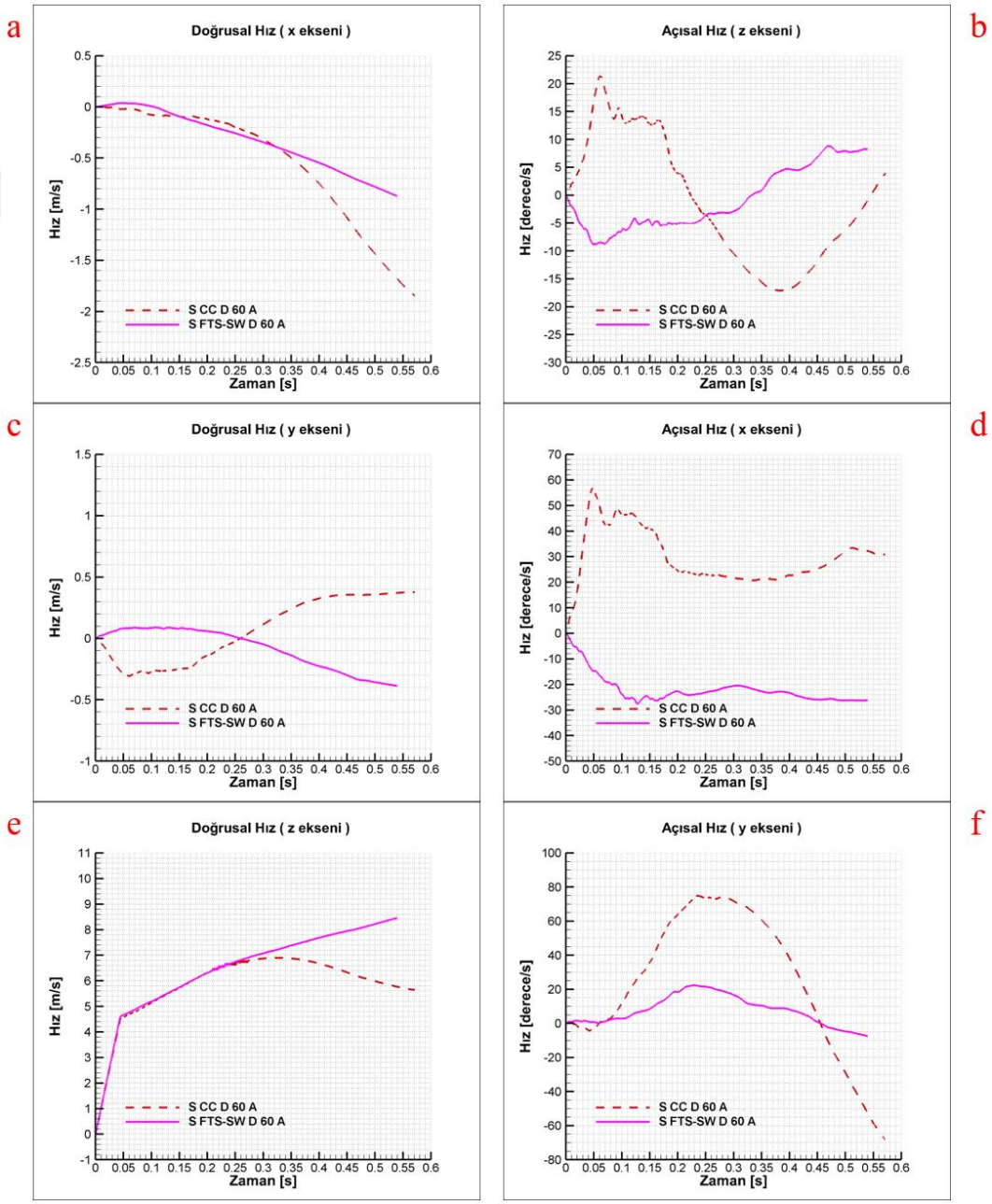
Şekil 4.102. *S FTS SW D 60 A ve S CC D 60 A hareketli sayısal çözümlere (DES) ait Fz max için mühimmat üzerine etki eden kuvvet ve moment katsayıların değişimi a) x ekseni boyunca etki eden kuvvet katsayısı, b) z ekseni etrafında etki eden moment katsayısı, c) y ekseni boyunca etki eden kuvvet katsayısı, d) x ekseni etrafında etki eden moment katsayısı, e) z ekseni boyunca etki eden kuvvet katsayısı, f) y ekseni etrafında etki eden moment katsayısı*

Şekil *4.103* ve **Şekil *4.104***'te S CC D 60 A ve S FTS SW D 60 A çözümlerine ait zamana bağlı çizgisel ve açısal hız ile öteleme ve dönme değerleri verilmiştir. **Şekil *4.102***'de sunulan mühimmat üzerine etki eden kuvvetler ile paralel şekilde bu kuvvetlerin oluşturmuş olduğu hızlar incelendiğinde sadece önünde spoyler olan yapıya benzer şekilde genel olarak tüm hız değerlerinde iyileşme olduğu görülmektedir. X ekseni boyunca etki eden çizgisel hızda kavite içerisinde benzer hız değerleri görülüyor iken

kavite dışında önünde spoyler olan arka duvarı eğimli pasif kontrol yöntemi hız değerini düşürmüştür. Bu hız değerleri sonucunda mühimmat S FTS SW D 60 A çözümünde S CC D 60 A çözümüne göre x ekseni boyunca daha az öteleme gerçekleşmiştir. Z ekseni açısal hızları kıyaslandığında S CC D 60 A çözümünde 22 derece/s olan maksimum pozitif açısal hız S FTS SW D 60 A çözümünde 9 derece/s, -16 derece/s olan maksimum negatif açısal hız -9 derece/s'ye düşmüştür. Benzer şekilde z ekseni etrafındaki dönme açısı büyüklüğü 2,5 derece iken 1,5 derecenin altına inmiştir. y ekseni yönündeki çizgisel hız bileşeni incelendiğinde S FTS SW D 60 A çözümünde S CC D 60 A çözümüne göre kavite içerisinde hız büyüklüğü sönümlenmiş iken kavite dışında benzer hız büyüklükleri görülmüştür. Bu hızlara bağlı olarak kavite hücum kenarı önüne spoyler eklenmesi ve arka duvarın eğilmesi kavite içerisinde y ekseni boyunca daha az hareket etmesini sağlamışken, kavite dışında eşit büyüklükte zıt yönde öteleme oluşturmuştur. X ekseni maksimum açısal hız büyüklüğü 56 derece/s iken bu değer kavite hücum kenarı önüne spoyler konulması ve arka duvarın eğilmesi ile 28 derece/s'ye düşürülmüştür. Buna paralel olarak x ekseni etrafındaki dönme açısı büyüklüğü 18 dereceden 12 dereceye düşürülmüştür. Daha önceki çözümlerde olduğu gibi z ekseninde ise ilk 0,05 s boyunca fırlatma kuvvetin etkisiyle oluşan hızlar aynı ve aerodinamik kuvvetlerin etkisi görülmüyor iken fırlatma kuvvetinin etkisi bittikten sonra hızlarda farklılık görülmüştür. Mühimmat ayrılmasında istenildiği üzere z ekseni boyunca hız değeri sadece önünde spoyler olan pasif kontrol yönteminde olduğu gibi temiz kaviteye göre daha fazla olması sağlanmıştır. Yine benzer şekilde bu hız farkından dolayı 0.5 s sonra mühimmat uçaktan yaklaşık 20 cm daha fazla uzaklaşmıştır. Y ekseni açısal hızı incelendiğinde S CC D 60 A çözümünde saniyede 80 dereceyi bulan maksimum değer S FTS SW D 60 A çözümünde saniyede 25 derecenin altına düşürülmüştür. Buna bağlı olarak maksimum hücum açısıda 18 dereceden 5 dereceye düşürülmüştür.

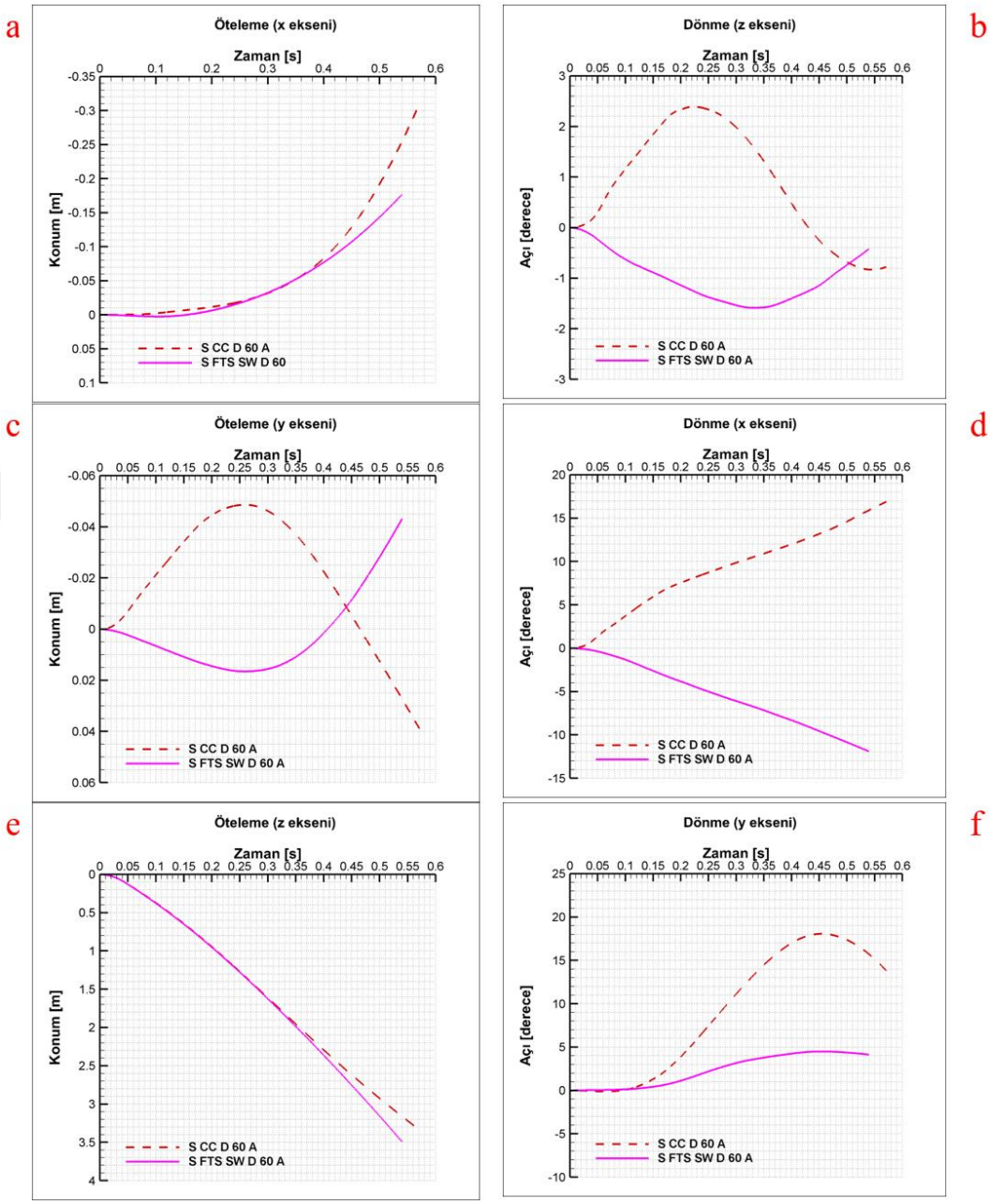
Önünde spoyler olan arka duvarı eğimli kaviteden mühimmat ayrılmasında mühimmat kaviteyi tamamamen terk ederek K. Jamison ve arkadaşlarının 2017 yılında yapmış olduğu sınıflandırmaya göre diğer tüm kriterleri geçerek 4 kodunu (**Tablo *1.2***) alarak temiz ayrılma oluşturmuşur. Ayrıca mamksimum hücum açısını 5 dereceye ve maksimum açısal hızı saniyede 30 derecenin altına düşürerek kabul edilebilir mühimmat yörüngesi oluşturmuştur.

Sonuç olarak kavite akışta kullanılan pasif yöntemlerden ikisi olan kavite hücum kenarı önüne spoyler eklenmesi ve arka duvarın 45 derece eğilmesi ile oluşturulan birleşik pasif kontrol yöntemi temiz kaviteye göre mühimmat üzerinde oluşan maksimum ses basınç düzeyini 7 dB kadar düşürmektedir. Ayrıca mühimmat bırakma analizleri bakımından mühimmatın izlediği yörüngede tüm eksenlerde maksimum açısal hız değerlerini 30 derece/s'nin altında, 0,5 s sonra maksimum hücum açısını ise 5 derecede tutmuştur.



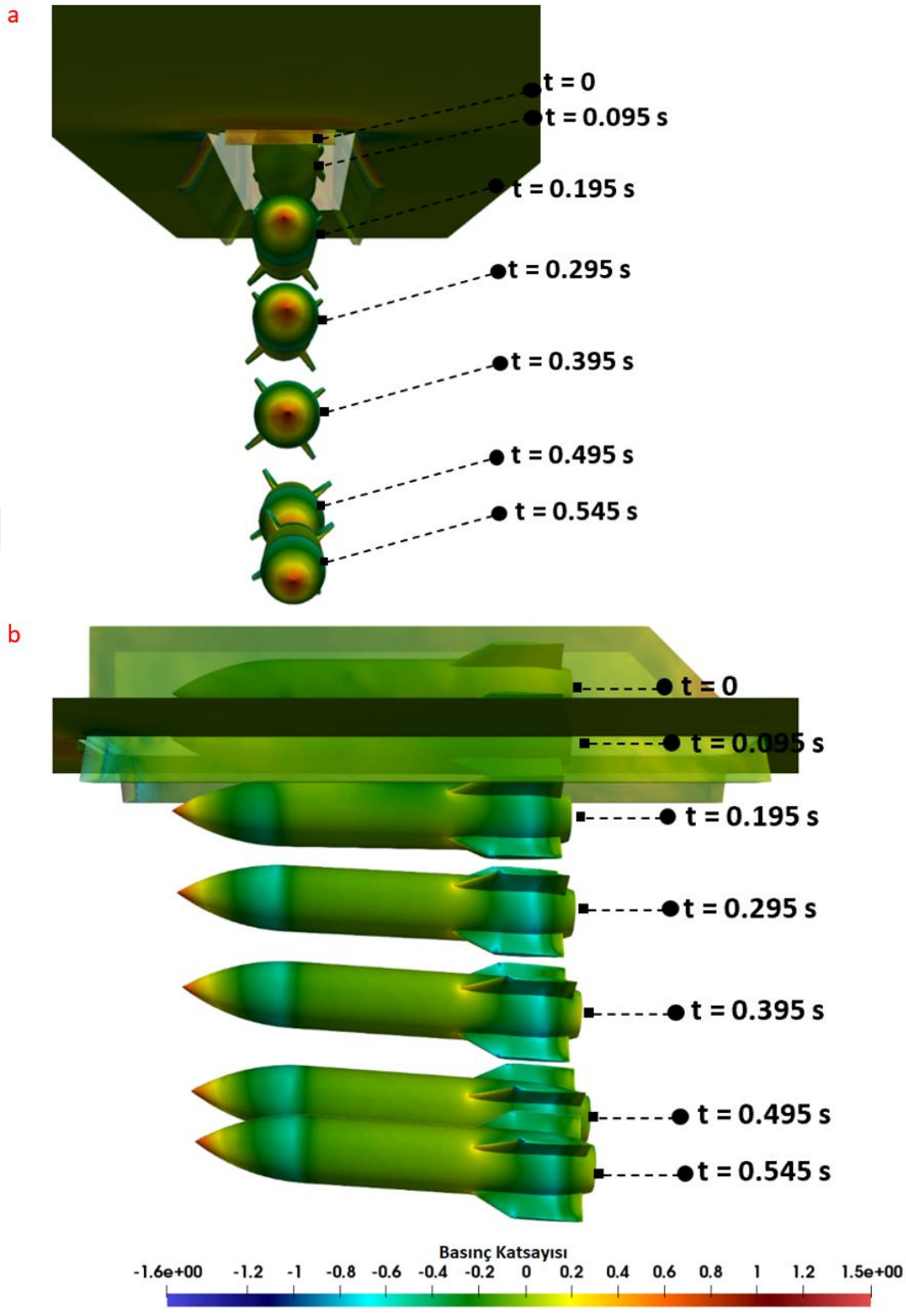
Şekil 4.103. *S FTS SW D 60 A ve S CC D 60 A hareketli sayısal çözümlere (DES) ait Fz max için mühimmat hareket hızları a) x ekseni doğrusal hız bileşeni, b) z ekseni açısal hız bileşeni, c) y ekseni*

doğrusal hız bileşeni, d) x ekseni açısal hız bileşeni, e) z ekseni doğrusal hız bileşeni, f) y ekseni açısal hız bileşeni



Şekil 4.104. *S FTS SW D 60 A ve S CC D 60 A hareketli sayısal çözümlere (DES) ait Fz max için mühimmat hareketi a) x ekseni boyunca öteleme, b) z ekseni etrafında dönme, c) y ekseni boyunca ötleme, d) x ekseni etrafında dönme, e) z ekseni boyunca öteleme, f) y ekseni etrafında dönme*

Şekil *4.105*'de S FTS SW D 60 A çözümünden elde edilen sayısal yörünge değerleri daha iyi görülmesi amacıyla görselleştirilmiştir.



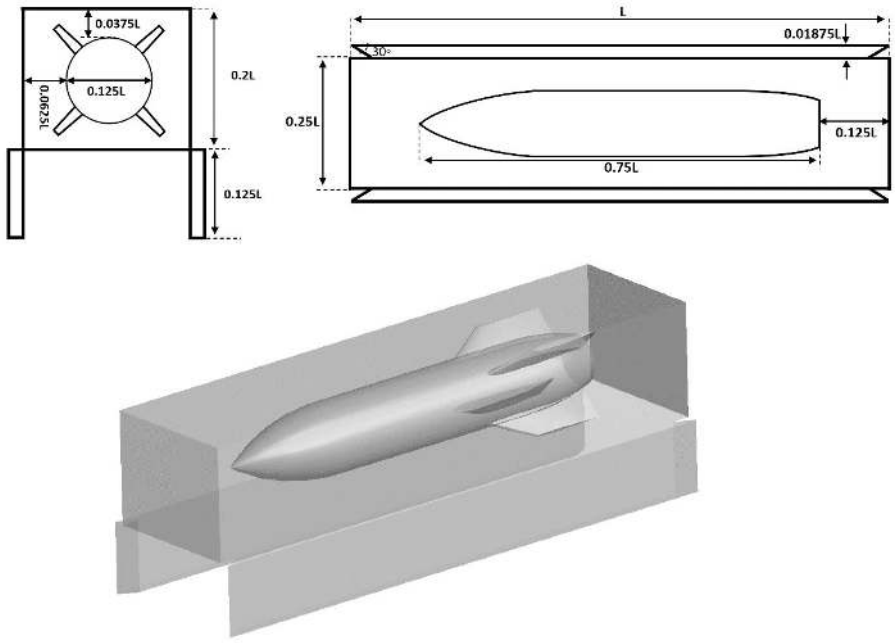
Şekil 4.105. *S FTS SW D 60 A hareketli sayısal çözümüne (DES) ait Fz max için mühimmat hareketi gösterimi a) önden görünüş, b) yandan görünüş*

4.6. Mühimmat ve 90 Derece Açıya Sahip Kapaklı Genişlik Derinlik Oranı 1,25 Olan Temiz Kavite (S CC D 90 W 1.25)

Pasif akış kontrol yöntemlerinin etkisinin incelenmesinden sonra kavite genişliğinin mühimmat üzerinde oluşan ses basınç düzeyine ve mühimmat yörüngesine olan etkisi incelenmiştir. Bu kapsamda daha önce kullanılan uzunluk derinlik oranı 5 ve genişlik derinlik oranı 1 olan M219 kavitesinin genişilk derinlik oranı 1,25 olacak şekilde genişletilmiştir .

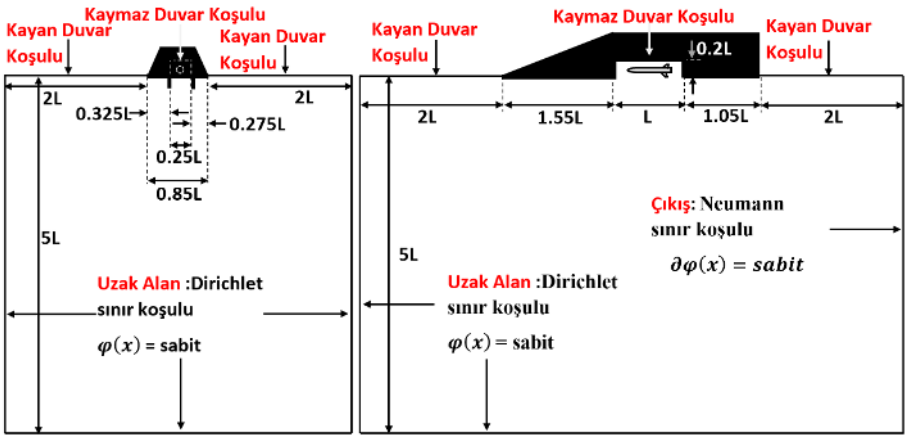
4.6.1. Hareketsiz sayısal çözüm

Daha önceki çözümlerde kullanılan mühimmat aynı şekilde kavite içerisine yerleştirilmiştir. **Şekil *4.106***'da gösterildiği gibi kavite genişliği kavite derinliğinin 1,25 katı olacak şekilde genişletilmiştir.

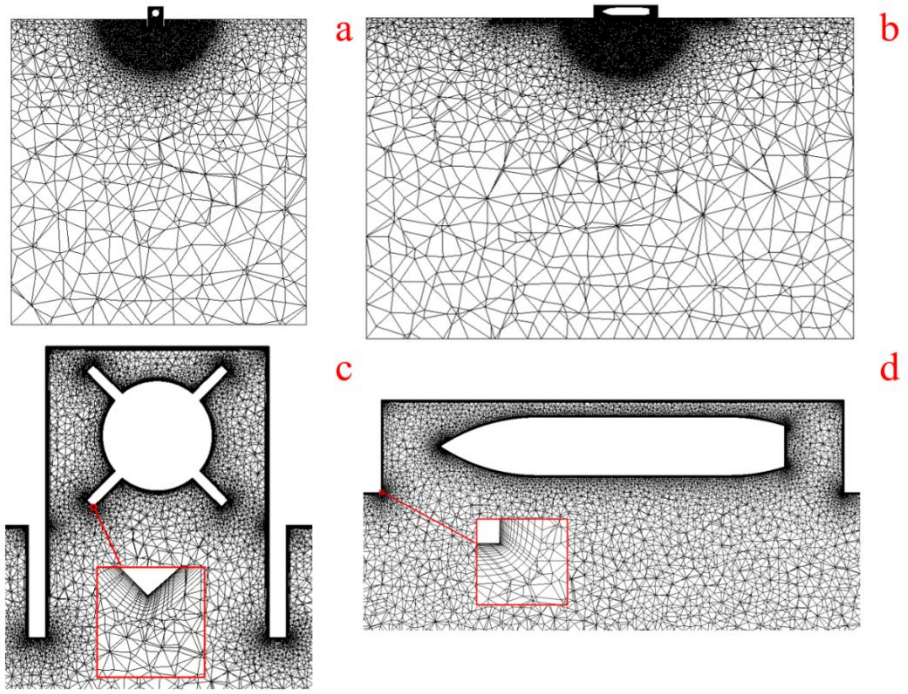


Şekil 4.106. *S CC D 90 W 1.25 sayısal çözüm geometrisi*

S CC D 90 W 1.25 A çözüm alanı **Şekil *4.107*** gibi gösterilmektedir. Bu çözüm alanı için oluşturulan ağ yapısı ise **Şekil *4.108*** ile gösterilmektedir.



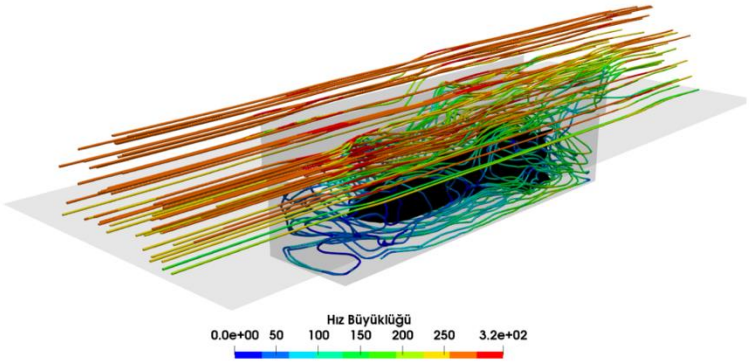
Şekil 4.107. *S CC D 90 W 1.25 A sayısal çözüm alanı*



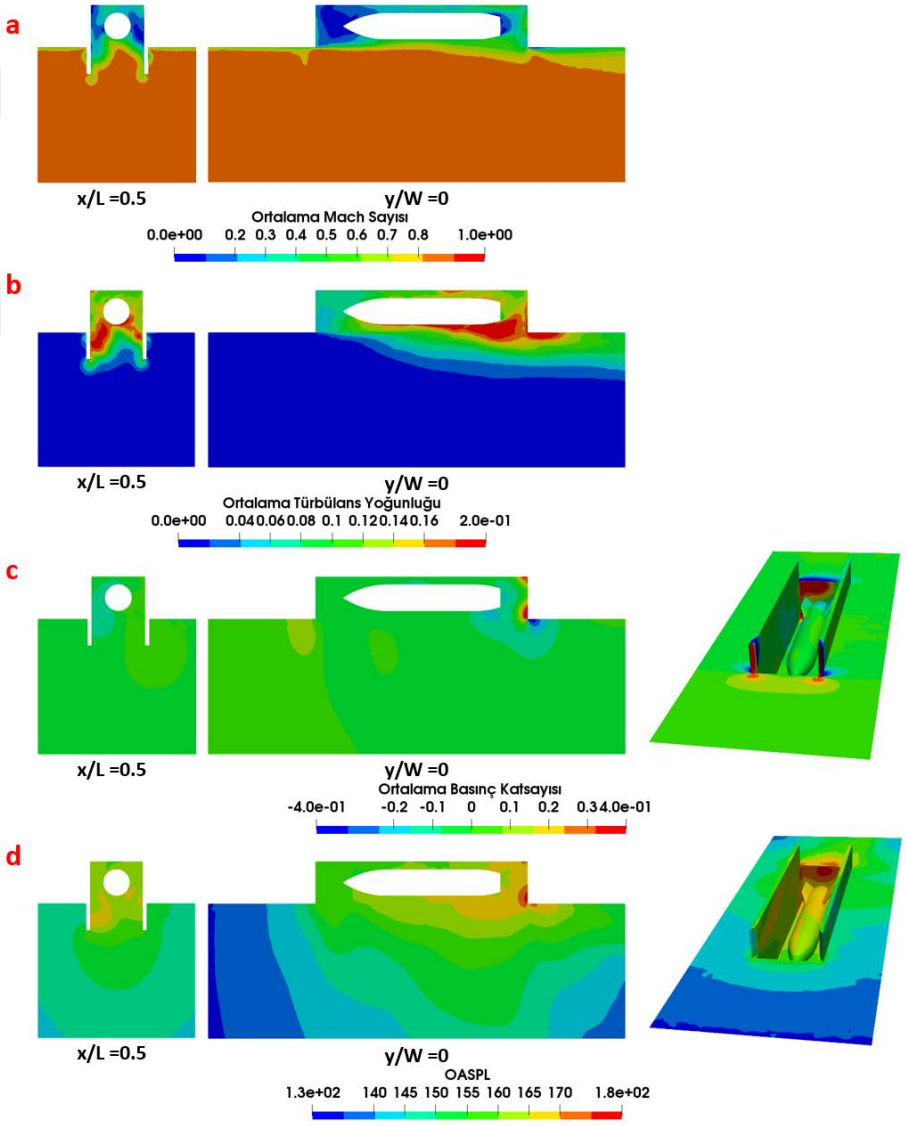
Şekil 4.108. *S CC D 90 W 1.25 A sayısal çözüm alanı ağı a) önden tüm ağ görüntüsü, b) yandan tüm ağ görüntüsü, c) önden yakın görüntü, d) yandan yakın görüntü*

Sayısal çözümden elde edilen anlık akım çizgileri **Şekil *4.109***'da ve ortalama değerlere ait konturlar **Şekil *4.110***'da gösterilmektedir. S CC D 90 W 1.25 A sayısal çözümünden elde edilen akım çizgileri ve konturlar S CC D 90 A ve S CC D 60 A sayısal çözümlerinden elde edilenler ile kıyaslandığında akım çizgileri, Mach sayısı ve basınç katsayısı konturu benzerlik göstermesine karşın kavite genişliğini artırmak türbülans yoğunluğunu kavite arkasına doğru taşıdığı gibi ortalama ses basınç düzeyini bu bölgde artırdığı görülmektedir. S CC D 90 W 1.25 A ait çözümde kavite üzerinde oluşan

maksimum OASPL değeri 176,431 dB iken mühimmat üzerinde oluşan maksimum OASPL değeri 177,033 dB olmuştur.

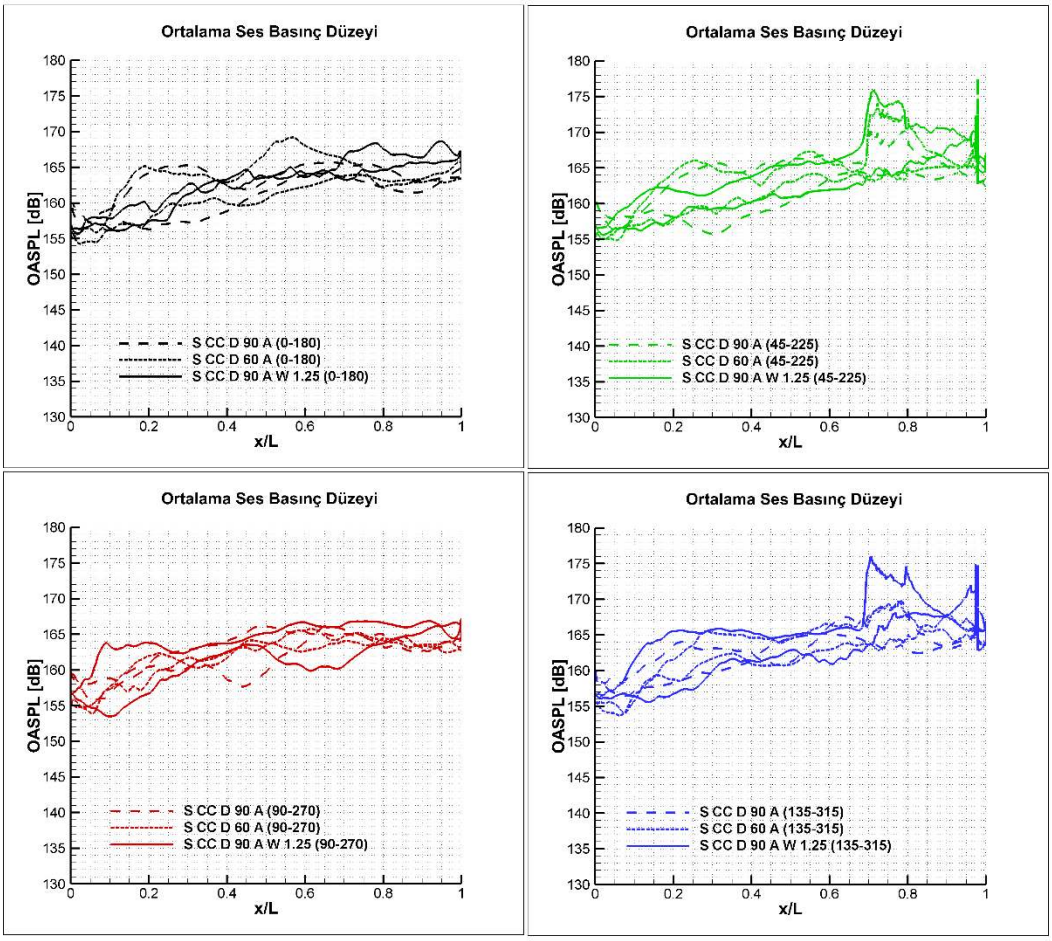


Şekil 4.109. *S CC D 90 W 1.25 A sayısal çözüme (DES) ait akım çizgileri*



Şekil 4.110. *S CC D 90 W 1.25 A sayısal çözüme (DES) ait konturlar a) ortalama Mach sayısı, b) türbülans yoğunluğu, c) basınç katsayısı, d) OASPL*

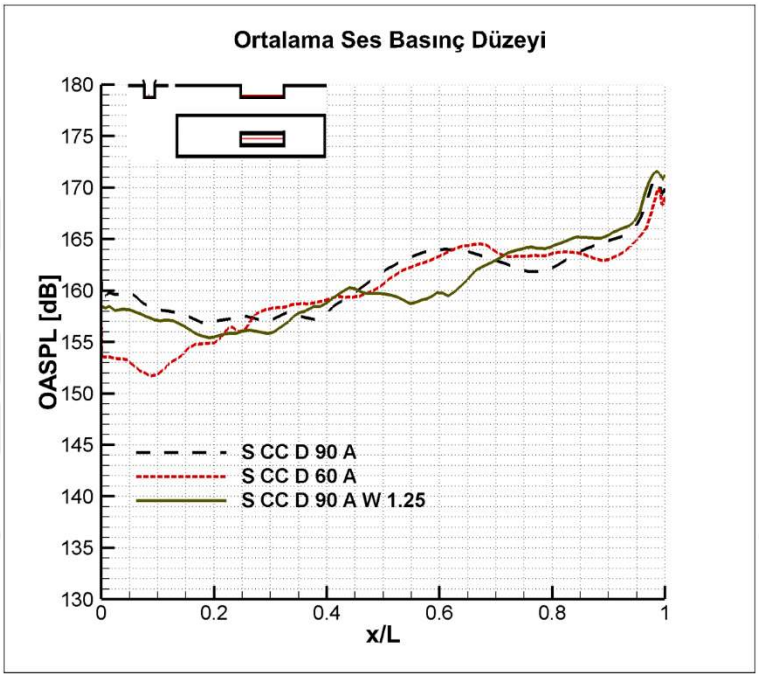
Şekil *4.111*'de mühimmat boyunca **Şekil *4.8***'de gösterildiği gibi farklı açılarda alınmış OASPL değerleri grafiksel olarak gösterilmektedir. Maksimum OASPL değerleri 225 ve 135 derece kesitinde mühimmat arkasında bulunan kanatçıklar üzerinde görülmüştür. S CC D 90 A çözümünde mühimmat üzerinde oluşan maksimum OASPL değeri 176,351 dB, S CC D 60 A çözümde bu değer 174,803 dB iken S CC D 90 W 1.25 A çözümünde 177,033 dB'e çıkmıştır. **Şekil *4.111*** incelendiğinde görüleceği gibi kavite genişliğini artırmak mühimmat üzerinde oluşan ortalama ses basınç düzeyi dağılımını 0-180 derece kesitinde bir miktar düşürse de genel olarak mühimmat üzerindeki ses düzeyini artırdığı görülmektedir. Sonuç olarak, kavite genişliğini artırmanın mühimmat üzerindeki maksimum ortalama ses basınç değerini 1 dB kadar artırdığı ve OASPL değeri dağılımını artırdığı görülmüştür.



Şekil 4.111. *S CC D 90 W 1.25 A, S CC D 90 A ve S CC D 60 A sayısal çözümlerine (DES) ait mühimmat OASPL değerleri*

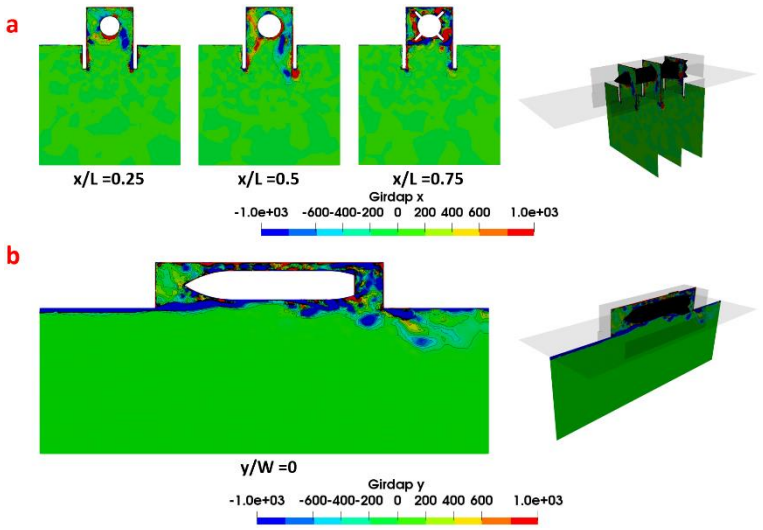
Şekil *4.112*'de S CC D 90 W 1.25 A, S CC D 90 A ve S CC D 60 A çözümlerinin kavite tabanından elde edilen OASPL değerleri karşılaştırılmıştır. Bu grafik

incelendiğinde görüleceği gibi kavite genişliğini artırmak kavite yarısına kadar ortalama ses basınç düzeyini 2-3 dB kadar düşürse de kavite arka bölgesinde 2-3 dB kadar artırmaktadır. Ayrıca kavite duvarlarında oluşan maksimum OASPL değeri S CC D 90 A çözümünde 174,367 dB, S CC D 60 A çözümünde 172,09 dB iken S CC D 90 W 1.25 A çözümünde bu değer 176,431 dB'dir. Böylece, kavite genişliğini artırmak kavite içerisinde maksimum OASPL değerini artırdığı OASPL dağılımında ise kavite hücum kenarı bölgesinde düşürüyor iken kavite firar kenarı bölgesinde artırdığı görülmektedir.

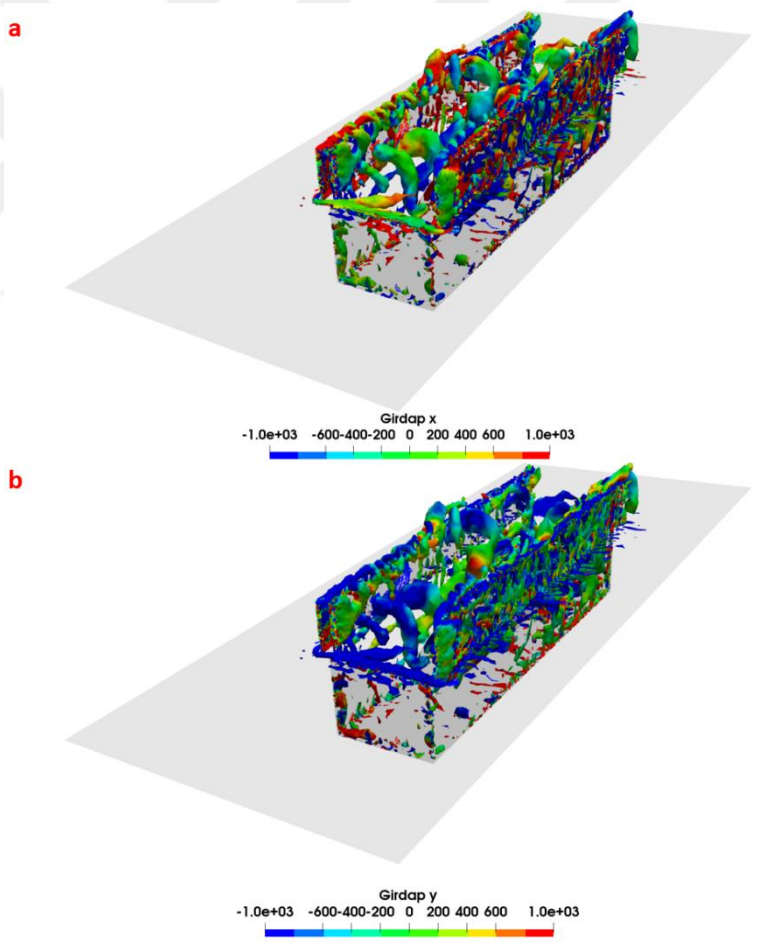


Şekil 4.112. *S CC D 90 W 1.25 A, S CC D 90 A ve S CC D 60 A sayısal çözümlerine (DES) ait kavite tabanı OASPL karşılaştırması*

Şekil *4.113* ve **Şekil *4.114***'te S CC D 90 W 1.25 A sayısal çözümüne ait girdap yapıları görülmektedir. S CC D 90 A çözümünden elde edilen kavite ortasında kavite hücum kenarından firar kenarına doğru gelişen birincil girdap yapıları ile birlikte kavite içerisinde kenar bölgelerinde oluşan ikincil girdap yapıları burada da oluşmuştur. Yine aynı şekilde kapakların önünde at nalı girdap yapısı ve kapakların uçlarında uç girdapları oluşmuştur. Genel olarak girdap yapıları bakımından S CC D 90 A çözümü ile S CC D 90 W 1.25 A çözümü benzerlik göstermektedir.



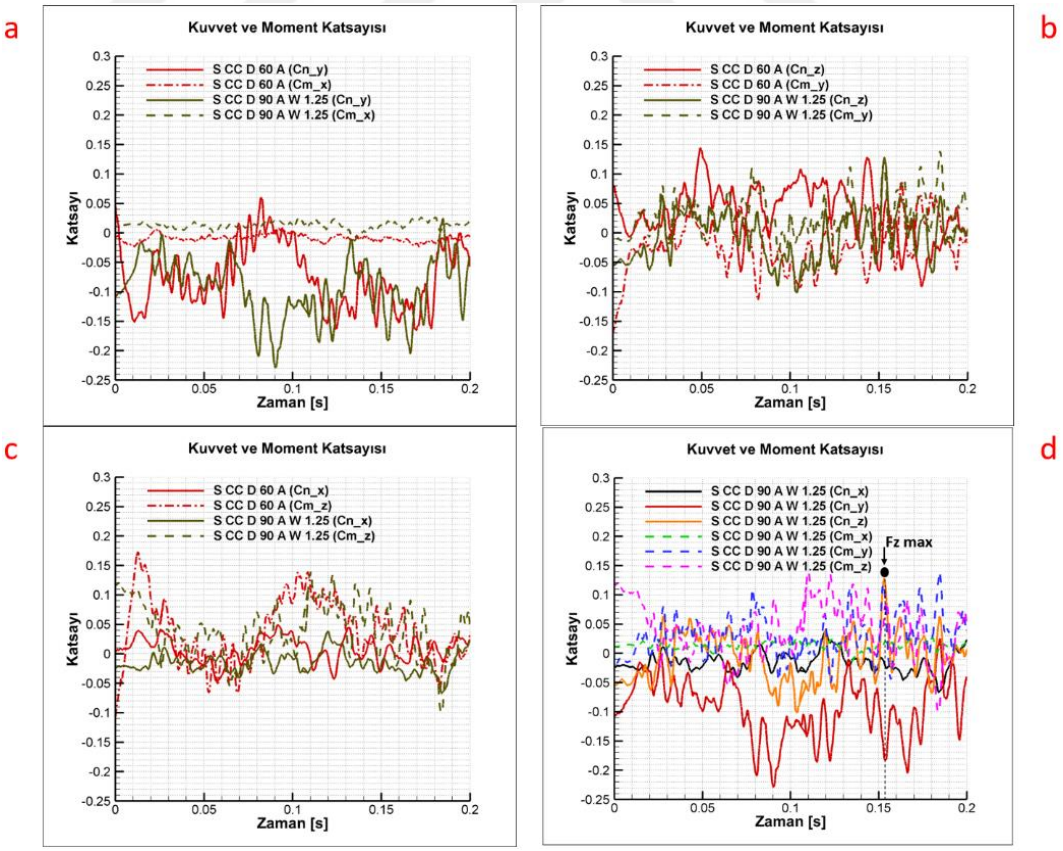
Şekil 4.113. *S CC D 90 W 1.25 A sayısal çözümüne (DES) ait girdap konturları a) x ekseni etrafında oluşan girdaplar, b) y ekseni etrafında oluşan girdaplar*



Şekil 4.114. *S CC D 90 W 1.25 A sayısal çözümüne (DES) ait eş yüzey Q-kriteri yapıları a) girdap-x ile renklendirme, b) girdap-y ile renklendirme*

4.6.2. Hareketli sayısal çözüm

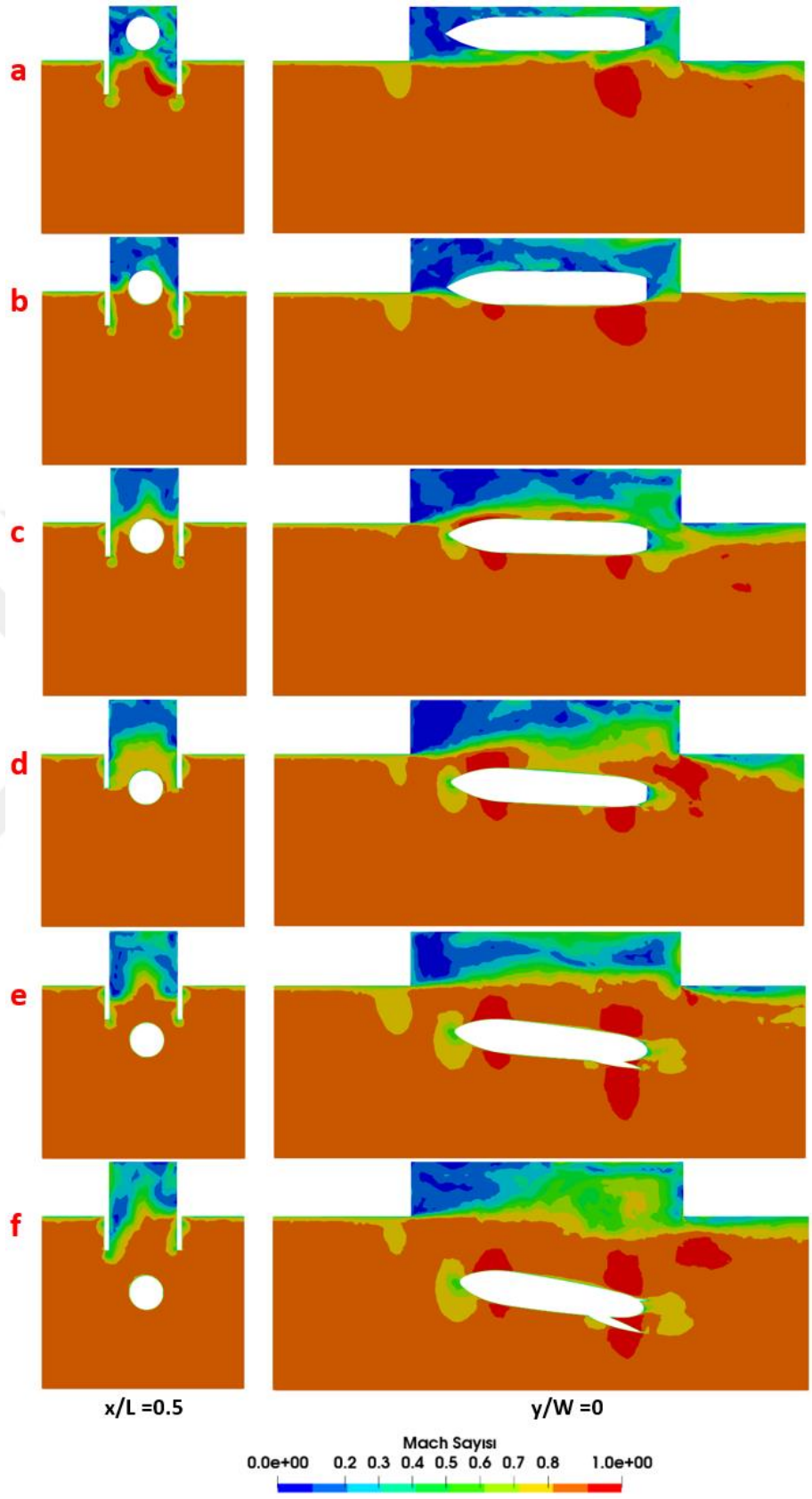
Daha önceki çözümlerde olduğu gibi S CC D 90 W 1.25 A ve S CC D 60 A geometrilerinin hareketsiz çözümlerinden elde edilen mühimmat üzerine etki eden kuvvet ve moment katsayıları **Şekil *4.115*** ile gösterilmektedir. Bu şekiller incelendiğinde daha önceki çözümlerde olduğu gibi kavite genişlik derinlik oranı 1,25 olan çözümde de kuvvet ve moment katsayısı değerleri pozitif ve negatif olacak şekilde salınım yapmaktadır. S CC D 90 W 1.25 A ve S CC D 60 A çözümlerinde x ekseni boyunca etki eden kuvvet ve z ekseni etrafında etki eden moment değerlerinin benzerlik gösterdiği görülmektedir. Yine z ekseni boyunca etki eden kuvvet ve y ekseni etrafında etki eden moment değerlerinin genliğinin 0,15 ile -0,1 arasında kalacak şekilde benzerlik gösterdiği görülmektedir. Fakat y ekseni boyunca etki eden kuvvet değerinin S CC D 90 W 1.25 çözümünde genliğin 0 ile -0,2 arasında olmasına karşın S CC D 60 A çözümünde bu değer 0,05 ile -0,15 arasındadır. Aynı şekilde x ekseni etrafında etki eden moment değerinin S CC D 60 A çözümünde negatif iken S CC D 90 W 1.25 A çözümünde pozitif olduğu görülmektedir.



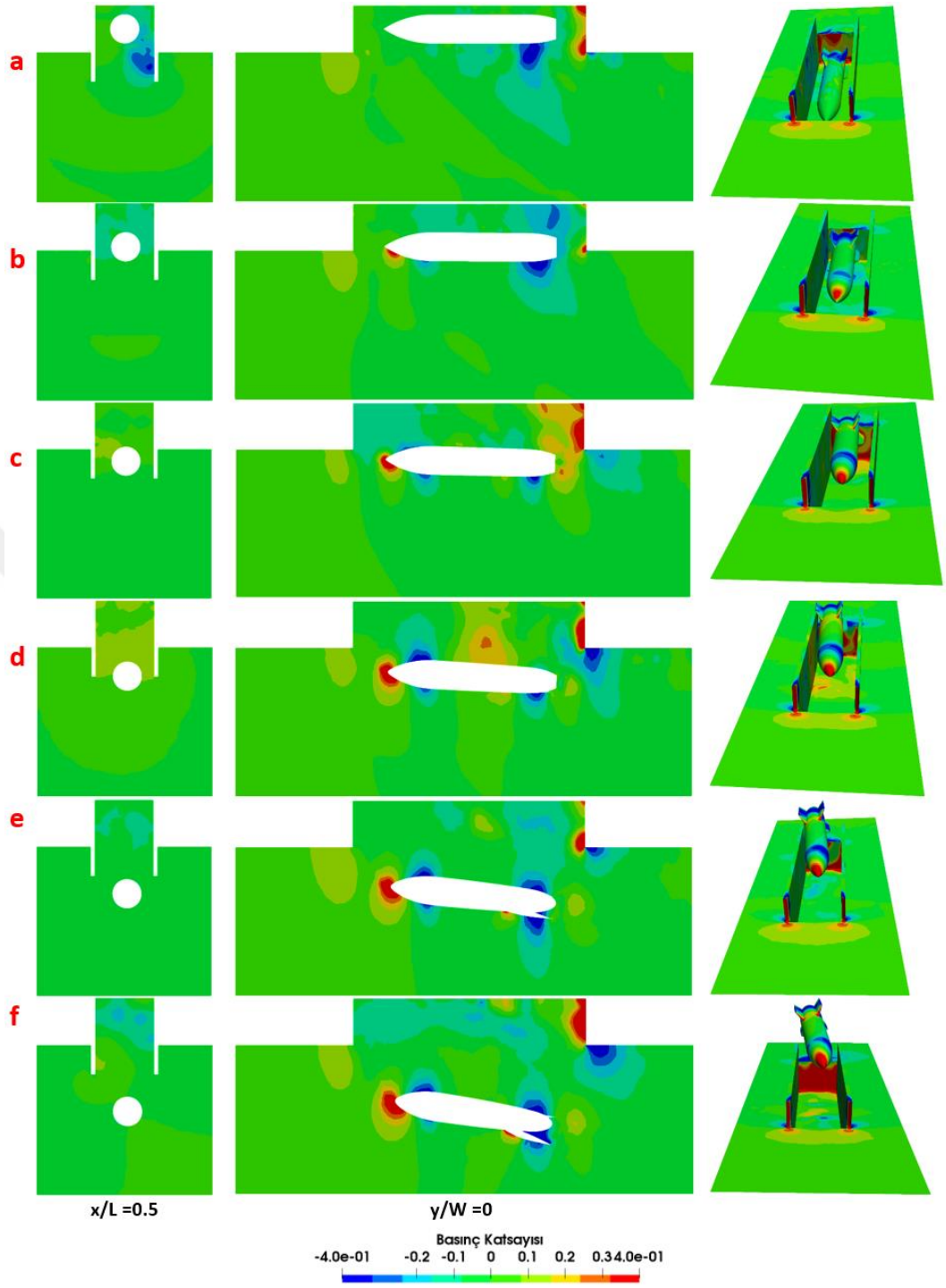
Şekil 4.115. *S CC D 90 W 1.25 A ve S CC D 60 A sayısal çözümlere (DES) ait mühimmat üzerine etki eden kuvvet ve moment katsayıları a) y ekseni boyunca etki eden kuvvet katsayısı ve x ekseni etrafında etki*

eden moment katsayısı b) z ekseni boyunca etki eden kuvvet katsayısı ve y ekseni etrafında etki eden moment katsayısı c) x ekseni boyunca etki eden kuvvet katsayısı ve z ekseni etrafında etki eden moment

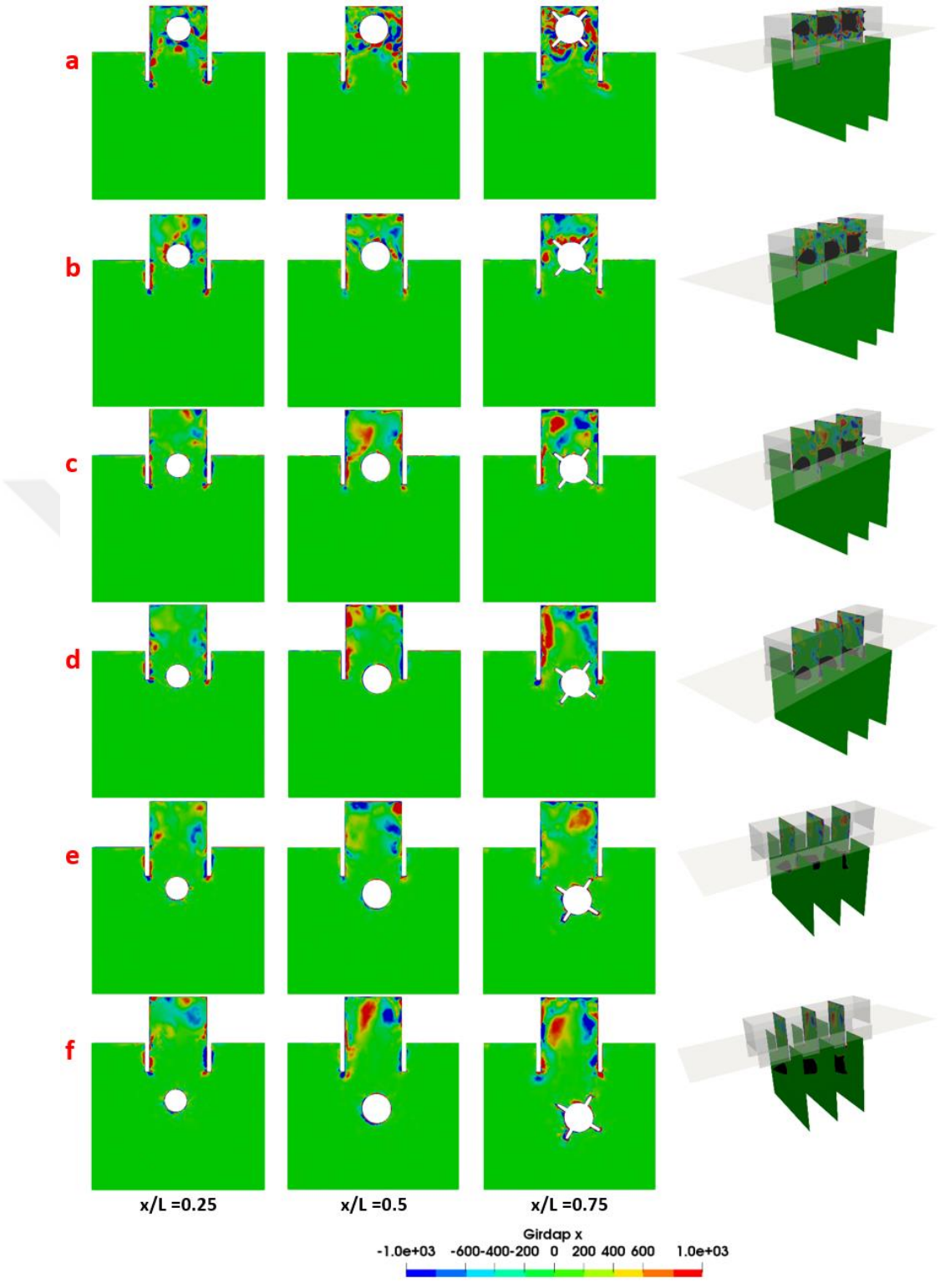
Başlangıç itici kuvvetleri ile **Şekil *4.115***'de gösterildiği gibi z ekseni boyunca normal kuvvetin maksimum olduğu anda bırakılarak S CC D 90 W 1.25 A hareketli çözüm gerçekleştirilmiştir. Bu çözüme ait farklı zamanlardan elde edilen akış parameterleri konturları **Şekil *4.116***'da anlık Mach sayısı, **Şekil *4.117***'de anlık basınç katsayısı, **Şekil *4.118***'de x ekseni etrafında oluşan girdap ve **Şekil *4.119***'da ise y ekseni etrafında oluşan girdap ile gösterilmektedir. S CC D 90 A ve S CC D 60 A çözümlerinden elde edilenler ile kıyaslandığında temel akış parametrelerinin konturlarının benzer olduğu görülmektedir. Kavite içerisinde mühimmat arkasında alt bölgede düşük basınç oluştuğu görülmektedir. Buna bağlı olarak mühimmat kayma tabakasına burun yukarı yaparak girmektedir. S CC D 90 A ve S CC D 60 A çözümlerinde olduğu gibi mühimmat kayma tabasıyla buluşması ile mühimmat burnunun alt bölümünde basınç değeri yükselirken arka alt bölümünde ise düşmektedir. Bunun sonucunda mühimmat burun yukarı hareket etmektedir.



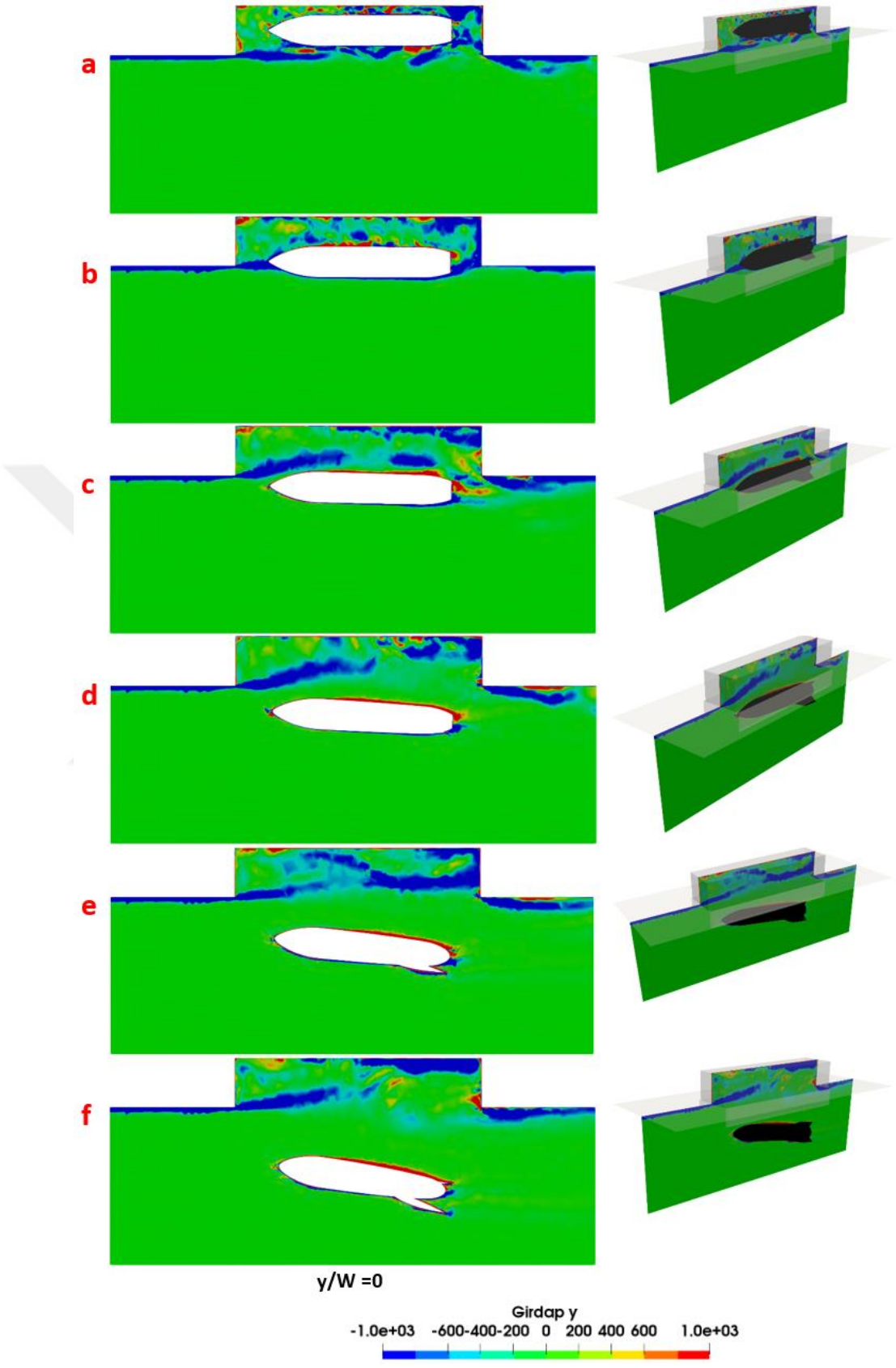
Şekil 4.116. *S CC D 90 W 1.25 A hareketli sayısal çözüme (DES) ait Fz max için Mach Sayısı konturu a) t = 0 s, b) t = 0,094 s, c) t = 0,144 s, d) t = 0,194 s, e) t = 0,244 s, f) 0,294 s*



Şekil 4.117. *S CC D 90 W 1.25 A hareketli sayısal çözüme (DES) ait Fz max için Basınç Katsayısı konturu a) t = 0 s, b) t = 0,094 s, c) t = 0,144 s, d) t = 0,194 s, e) t = 0,244 s, f) 0,294 s*

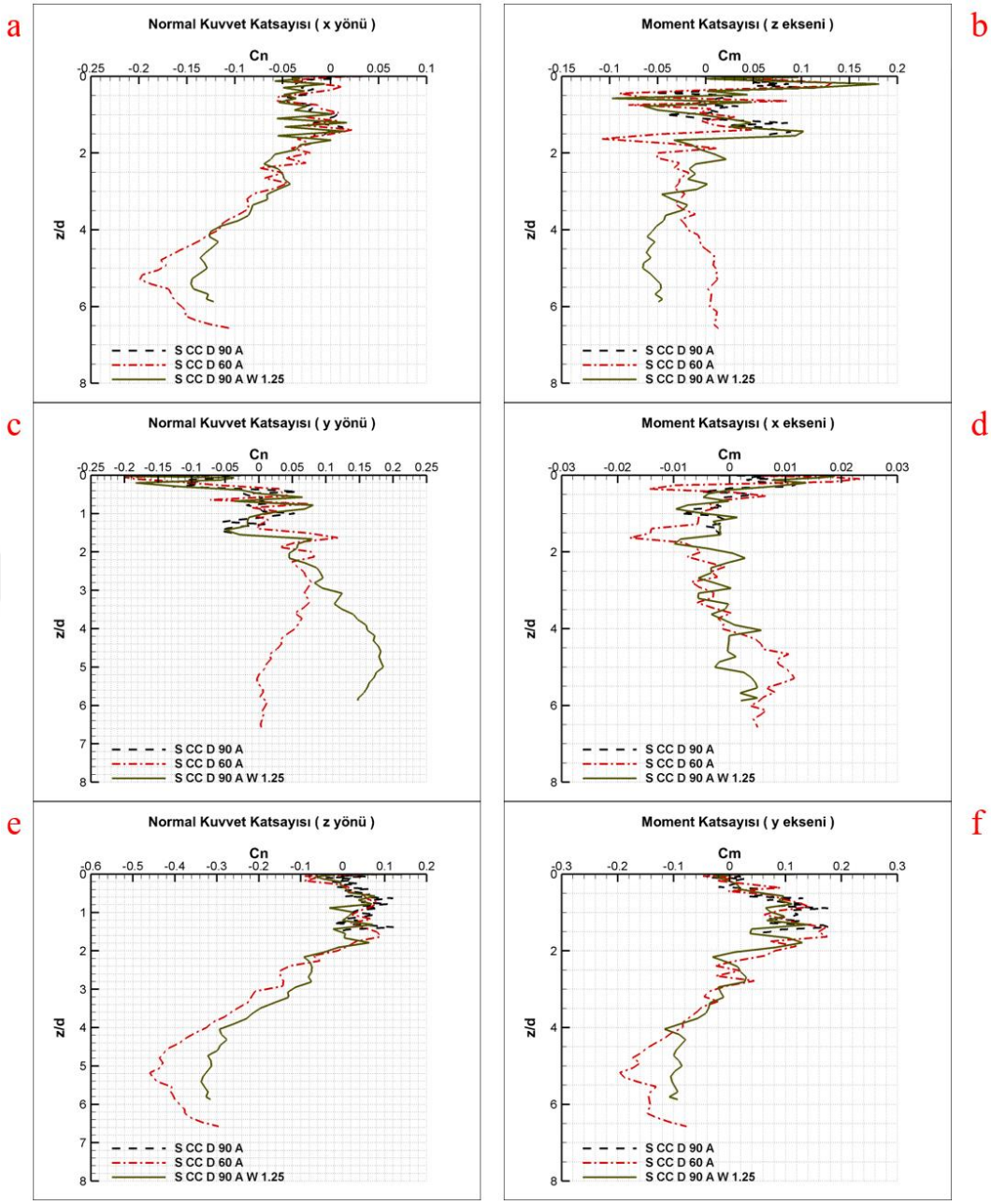


Şekil 4.118. *S CC D 90 W 1.25 A hareketli sayısal çözüme (DES) ait Fz max için Girdap-x konturu a) t = 0 s, b) t = 0,094 s, c) t = 0,144 s, d) t = 0,194 s, e) t = 0,244 s, f) 0,294 s*



Şekil 4.119. *S CC D 90 W 1.25 A hareketli sayısal çözüme (DES) ait Fz max için Girdap-y konturu a) t = 0 s, b) t = 0,094 s, c) t = 0,144 s, d) t = 0,194 s, e) t = 0,244 s, f) 0,294 s*

Şekil *4.120*'de z yönündeki normal kuvvetin maksimum olduğu zamanda bırakılan S CC D 90 W 1.25 A, S CC D 90 A ve S CC D 60 A çözümlerine ait mühimmat hareketi boyunca mühimmata etkiyen x, y ve z yönlerindeki normal kuvvet ve moment katsayılarının değişimi gösterilmektedir. S CC D 90 A ve S CC D 90 W 1.25 A hareketli çözümlerden elde edilen kuvvet ve moment katsayı değerleri karşılaştırıldığında genel olarak benzer eğilim gösterdiği x ekseni etrafında etki eden moment değerinde S CC D 90 W 1.25 A çözümünde daha büyük değerlere ulaşılmıştır. Benzer şekilde S CC D 90 W 1.25 ve S CC D 60 A hareketli çözümlerinden elde edilen kuvvet katsayı değerleri karşılaştırıldığında x ve z ekseninde benzerlik görülürken y ekseninde S CC D 90 W 1.25 A çözümünde mühimmatın kaviteyi terk etmesinden sonra S CC D 60 A çözümüne göre daha fazla kuvvete maruz kaldığı görülmektedir. Moment katsayıları kıyaslandığında ise benzer şekilde eğilimleri benzerlik gösterse de S CC D 90 W 1.25 A çözümündeki moment katsayısının değerleri z ekseninde özellikle mühimmat kavite içerisinde iken daha büyük değerlere ulaştığı görülmektedir.



Şekil 4.120. *S CC D 90 W 1.25 A, S CC D 90 A ve S CC D 60 A hareketli sayısal çözümlere (DES) ait Fz max için mühimmat üzerine etki eden kuvvet ve moment katsayıların değişimi a) x ekseni boyunca etki eden kuvvet katsayısı, b) z ekseni etrafında etki eden moment katsayısı, c) y ekseni boyunca etki eden kuvvet katsayısı, d) x ekseni etrafında etki eden moment katsayısı, e) z ekseni boyunca etki eden kuvvet katsayısı, f) y ekseni etrafında etki eden moment katsayısı*

Şekil *4.121* ve **Şekil *4.122***'de aynı fırlatma kuvvetine maruz kalmış bir mühimmatın normal yöndeki kuvvetin maksimum olduğu anda S CC D 90 A, S CC D 60 A ve S CC D 90 W 1.25 A çözümlerine ait zamana bağlı çizgisel ve açısal hız, öteleme ve dönme değerleri verilmiştir. **Şekil *4.120***'de sunulan mühimmat üzerine etki eden kuvvetler ile paralel şekilde bu kuvvetlerin oluşturmuş olduğu hızlar incelendiğinde mühimmatın x eksenindeki doğrusal hızın üç çözümde benzer eğilimde olduğu fakat

kavite genişliğini artırmanın mühimmatı geriye doğru götürme hızı olan x ekseni doğrusal hızını artırdığı görülmektedir. Bu hız değerleri sonucunda geniş kavitede bulunan mühimmat kapak açıları 90 ve 60 derece olan daha dar kavitedeki mühimmata göre x ekseni boyunca daha fazla öteleme gerçekleşmiştir. Buradan geniş kavitede bulunan mühimmatın eşit zaman sonunda uçağa daha fazla yaklaştığı görülmüştür. Mühimmatın z ekseni açısal hızları kıyaslandığında S CC D 90 A ve S CC D 60 A çözümlerinde 22 derece/s olan maksimum pozitif açısal hız S CC D 90 W 1.25 A çözümünde 26 derece/s'ye, -16 derece/s olan maksimum negatif açısal hız ise -23 derece/s'ye yükselmiştir. Benzer şekilde z ekseni etrafındaki dönme açısı büyüklüğü 2,5 derece iken 5,6 derecenin üstüne çıkmıştır.

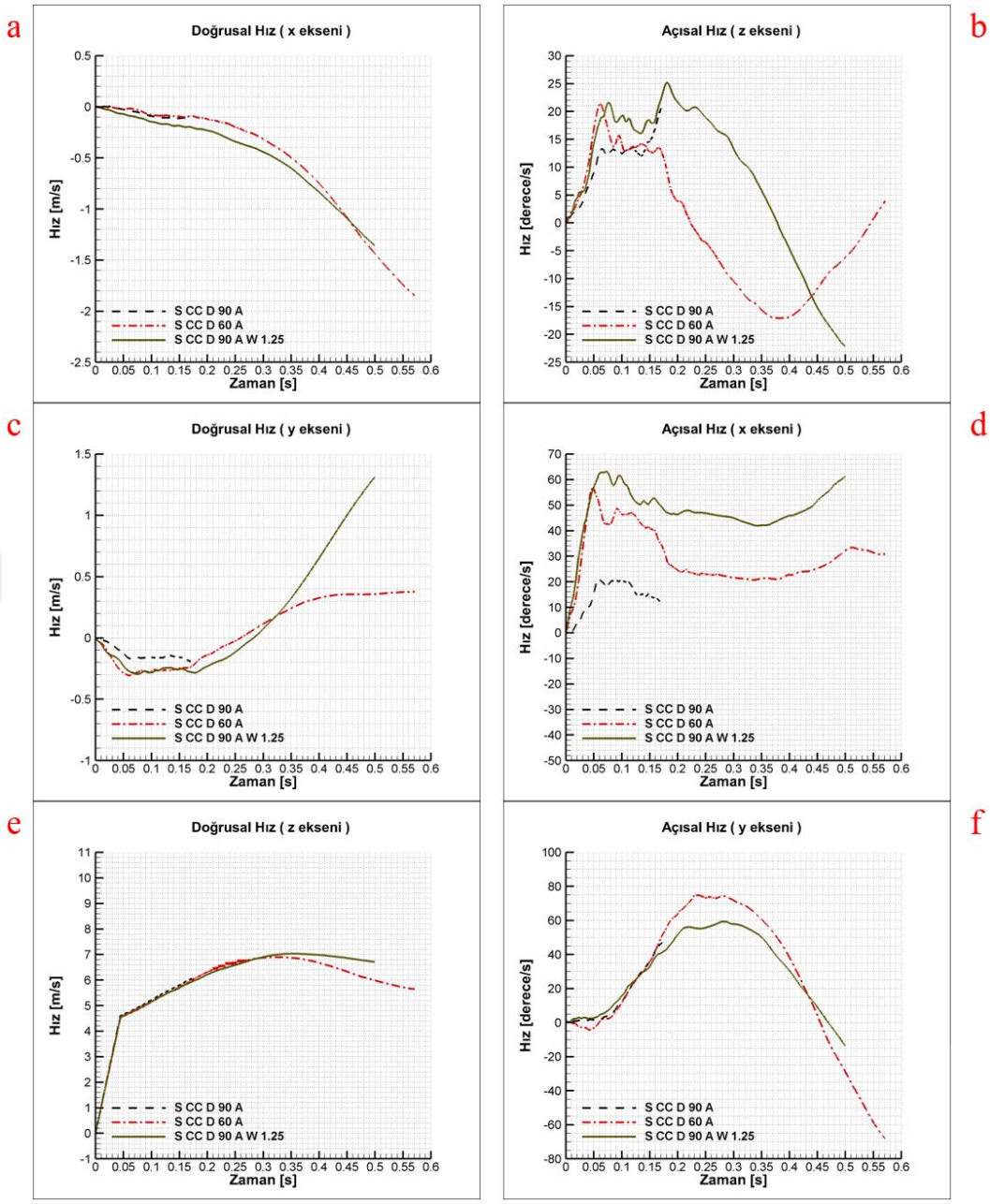
Y ekseni yönündeki çizgisel hız bileşeni incelendiğinde S CC D 90 W 1.25 A çözümünün hızı S CC D 90 A ve S CC D 60 A çözümlerine göre **Şekil *4.120***'de sunulan kuvvet katsayı değerleri ile paralalel bir şekilde kavite içerisinde benzer değerlerde iken kavite dışında pozitif yönlü ayrışarak 1 m/s değerinin üzerine çıkmıştır. Bu hızlara bağlı olarak S CC D 90 W 1.25 A çözümünde kavite içerisinde negatif y yönünde daha fazla öteleme görülüyor ve aynı şekilde kavite dışında da pozitif y yönünde yine daha fazla öteleme görülmüştür. Mühimmatın x ekseni maksimum açısal hız büyüklüğü S CC D 60 A çözümünde 56 derece/s iken bu değer S CC D 90 W 1.25 A çözümünde 65 derece/s'yenin üstüne çıkmıştır. Buna paralel olarak x ekseni etrafındaki dönme açısı büyüklüğü 18 dereceden 25 dereceye yaklaşmıştır.

Daha önceki çözümlerde olduğu gibi z ekseninde ise ilk 0,05 s boyunca fırlatma kuvvetin etkisiyle oluşan hızlar aynı ve aerodinamik kuvvetlerin etkisi görülmüyor iken fırlatma kuvvetinin etkisi bittikten sonra hızlarda farklılık görülmüştür. Mühimmat ayrılmasında istenildiği üzere z ekseni boyunca hız değeri S CC D 90 W 1.25 A çözümünde S CC D 60 A çözümüne göre kaviteden çıktıktan sonra daha fazla olduğu görülmektedir. Yine benzer şekilde bu hız farkından dolayı 0,5 s sonra mühimmat uçaktan yaklaşık 5 cm daha fazla uzaklaşmıştır. Y ekseni açısal hızı incelendiğinde S CC D 60 A çözümünde saniyede 80 dereceyi bulan maksimum değer S CC D 90 W 1.25 A çözümünde saniyede 60 derecenin altına düştüğü görülmüştür. Buna bağlı olarak maksimum hücum açısı da 18 dereceden 15 dereceye düşmüştür.

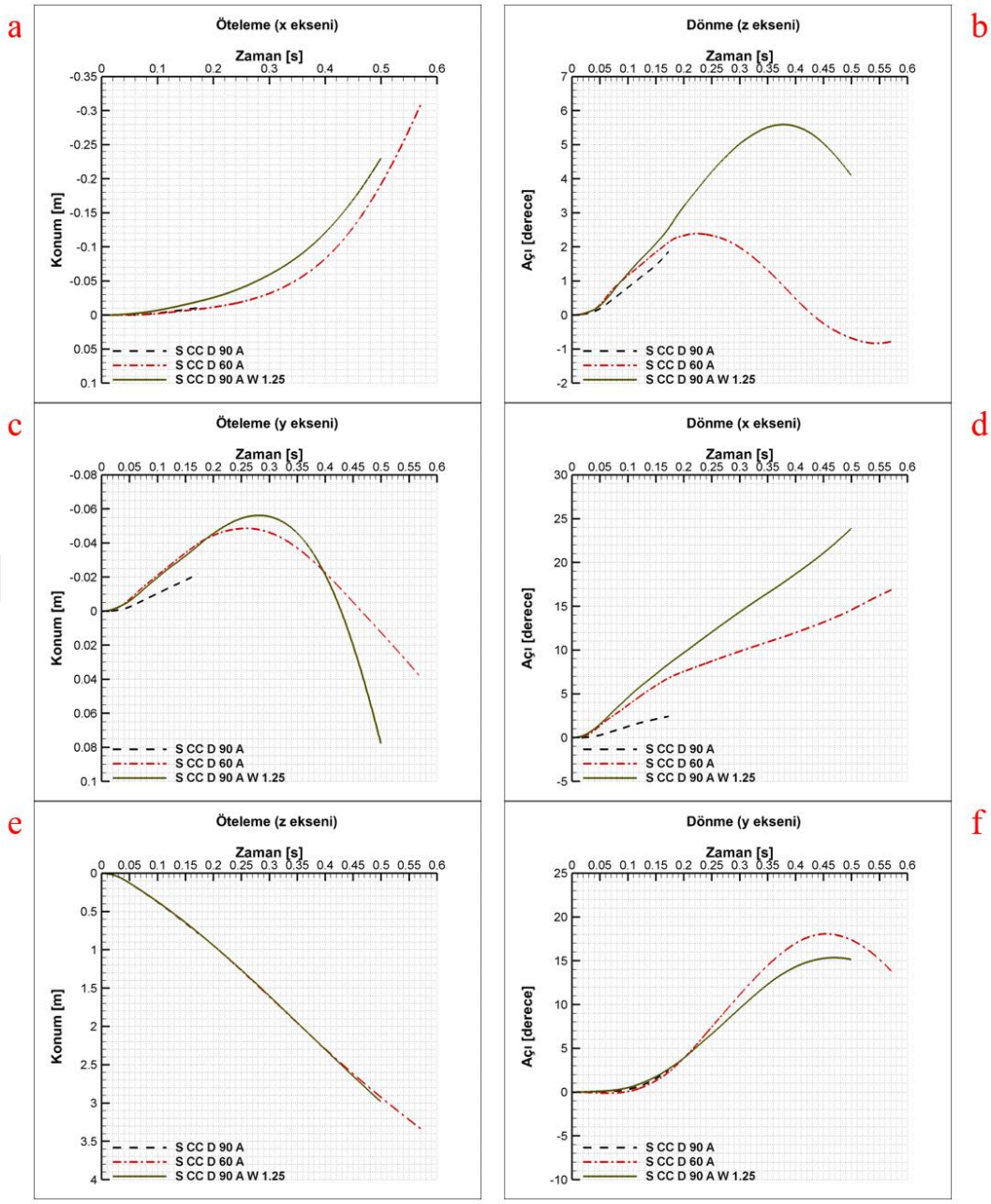
Genişlik derinlik oranı 1,25 olan temiz kaviteden mühimmat ayrılmasında mühimmat kaviteyi tamamamen terk ederek K. Jamison ve arkadaşlarının yapmış olduğu

sınıflandırmaya göre diğer tüm kriterleri geçerek 4 kodunu (**Tablo *1.2***) alarak temiz ayrılma oluşturmuşur. Fakat x ve y eksenindeki açısal hız değeri 60 derece/s ve mühimmat hücum açısı 15 dereceye ulaştığı için kabul edilebilir bir ayrılma elde edieememiştir.

Sonuç olarak genişlik derinlik oranı 1,25 ve kapak açısı 90 derece olan kaviteden bırakılan mühimmat, genişlik derinlik oranı 1 ve kapak açısı 60 derece olan kaviteden bırakılan mühimmattan daha kötü yörünge izlediği elde edilmiştir. Ayrıca kavite genişliğini artırmak hem kavite tabanında hem de mühimmat üzerinde oluşan maksimum ortalama ses basınç düzeyini 2 dB kadar artırdığı da tespit edilmiştir.

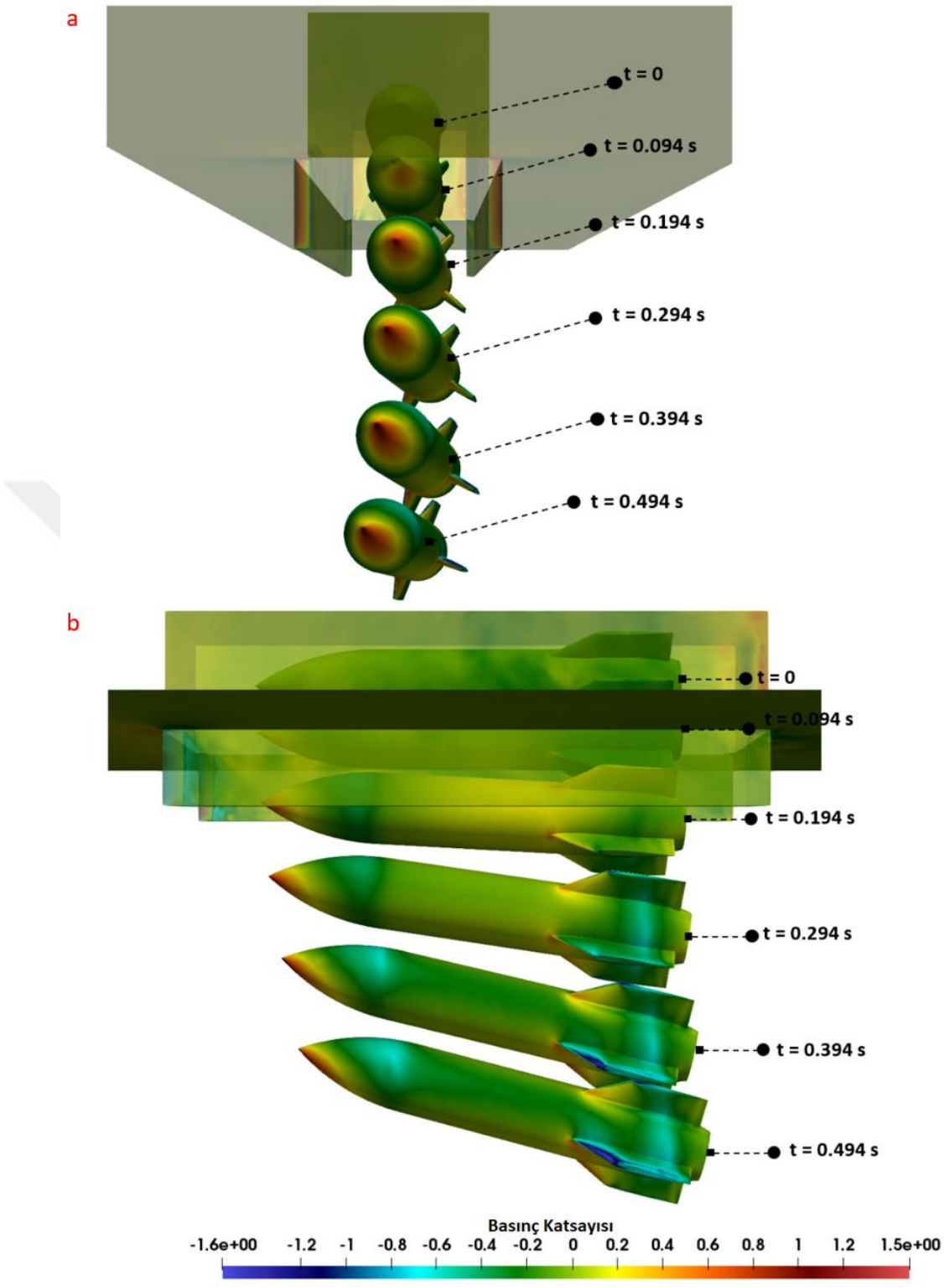


Şekil 4.121. *S CC D 90 W 1.25 A, S CC D 90 A ve S CC D 60 A hareketli sayısal çözümlere (DES) ait Fz max için mühimmat hareket hızları a) x ekseni doğrusal hız bileşeni, b) z ekseni açısal hız bileşeni, c) y ekseni doğrusal hız bileşeni, d) x ekseni açısal hız bileşeni, e) z ekseni doğrusal hız bileşeni, f) y ekseni açısal hız bileşeni*



Şekil 4.122. *S CC D 90 W 1.25 A, S CC D 90 A ve S CC D 60 A hareketli sayısal çözümlere (DES) ait Fz max için mühimmat hareketi a) x ekseni boyunca öteleme, b) z ekseni etrafında dönme, c) y ekseni boyunca ötleme, d) x ekseni etrafında dönme, e) z ekseni boyunca öteleme, f) y ekseni etrafında dönme*

Şekil *4.123*'te S CC D 90 W 1.25 A çözümünden elde edilen sayısal yörünge değerleri görselleştirilerek sunulmuştur.



Şekil 4.123. *S CC D 90 W 1.25 A hareketli sayısal çözümüne (DES) ait Fz max için mühimmat hareketi gösterimi a) önden görünüş, b) yandan görünüş*

5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu tez çalışmasında son yıllarda yeni nesil savaş uçaklarında yaygın ve zorunlu hale gelen mühimmatların içeriden ayrılması konusu ele alınmıştır. İçeriden mühimmat ayrılması mühimmatın maruz kaldığı karasız kavite akışı ve kayma tabakasından ötürü dışarıdan ayrılmaya göre daha karmaşık akış fiziğine sahiptir. Karmaşık akış fiziği mühimmatın içeriden bırakılması durumunda izleyeceği yörüngeyi tahmin edilemez hale getirmektedir. Etkili bazı pasif akış kontrol yöntemlerinin mühimmat yörüngesine olan etkisini anlamak için bu çalışma gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışmadan elde edilen sonuçları özetlemek gerekirse ;

- Literatürde içeriden mühimmat ayrılmasında mühimmatın izleyeceği yörüngenin mühimmatın bırakma zamanına bağlı olduğu konusu tartışmalıdır. Bu kapsamda yürütülen çalışmada uzunluk-derinlik oranı (L/D) 5 olan temiz kaviteden EGLIN deneysel çalışmasında kullanılan jenerik bir mühimmat üzerine yerçemi kuvvettinin etki ettiği eksendeki kuvvetin maksimum ve minimum olduğu ki farklı anda bırakılmıştır. Bu iki farklı zamanda bırakılan mühimmatın izlediği yörüngelerde nicelik olarak farklılıklar olsa da nitel olarak aynı yörüngeyi izlemişlerdir ve her ikiside kaviteyi tam olarak terketmek üzereyken mühimmatın kanatçığı kavite kapağına çarpmıştır.
- Temiz kavitede kapağı dışarı doğru açılandırmak mühimmatın izlediği yörüngede olumlu bir etki yapmasa da mühimmat üzerinde oluşan ses basınç düzeyini az da olsa düşürmüştür.
- Kavite akışta pasif akış kontrol yöntemlerinden biri olan kavite arka duvarının eğimli hale getirilmesi kavite içerisindeki ve kavite arka duvarındaki ses basınç düzeyini düşürdüğü literatürde hem deneysel hem de sayısal çalışmalar ile ortaya konulmuştur. Bu pasif akış kontrol yöntemin içeriden mühimmat ayrılmasında mühimmatın izlediği yörüngeye olan etkisi incelenmiştir. Bunun için tüm paramaterler aynı kalacak şekilde sadece arka duvarı kavite tabanı ile 45 derecelik bir açı yapacak şekilde eğimli hale getirilerek aynı mühimmat ayrılması gerçekleştirilmiştir. Bu sayısal çalışmada sadece mühimmat arka duvarının eğimli hale getirilmesi mühimmat üzerindeki ses basınç

düzeyini düşürdüğü ve mühimmatın izlediği yörüngeyi istenilen ölçüde iyileştiremediği tespit edilmiştir.

- Pasif akış kontrol yöntemlerinden bir diğeri olan kavite önüne yerleştirilen dikdörtgen biçimindeki spoylerin kavite içerisinde olmasa da mühimmat üzerinde ses düzeyini düşürdüğü görülmüştür. Ayrıca tek başına kavite önüne spoyler yerleştrilerek oluşturulan pasif akış kontrolü mühimmat ayrılmasında Euler açılarındaki değişimi en aza indirerek mühimmatın izlediği yörüngede en iyi sonucu vermiştir.
- Üçüncü pasif kontrol yöntemi olarak iki pasif kontrol yönteminin birlikte uygulanmasının etkileri incelenmştir. Bu kapsamda kavitenin önüne spoyler yerleştirilmiş kavite arka duvarı kavite tabanıyla 45 derece açı yapacak şekilde eğimli hale getirilmiştir. Diğer pasif yöntemlerde olduğu gibi kavite içerisinde ses düzeyi bakımından bir iyileşme görülmese de mühimmat üzerinde 7 dB düzeyinde ciddi bir iyileşme ortaya konmuştur. Mühimmatın izlediği yörünge bakımından kontrolsüz temiz kaviteye göre iyileştirme sağlasa da sadece kavite önüne spoyler eklenen pasif yöntem kadar iyileştirme sağlamadığı görülmüştür.
- Kavite kapak açısı değiştirilmeden mühimmatın kapağa çarpmaması için kavite genişliğinin 1,25 katına çıkarıldığı durumda mühimmat kapağa çarpmadan kaviteyi terketmiş olsa da mühimmatın izlediği yörüngede Euler açılarının değişim miktarları bakımından daha kötü sonuç vermiştir. Ayrıca kavite genişliğinin artırılması ses düzeyi bakımından hem kavitede hem de mühimmat üzerinde oluşan maksimum değeri artırmıştır.

Genel olarak değerlendirildiğinde içinde mühimmat olmayan kaviteye uygulanan pasif akış kontrol yöntemleri kavite tabanı ve kavite içinde ses basınç düzeyini düşürse de içine mühimmat konulduğunda bu pasif kontrol yöntemlerin kavite tabanında ve kavite yüzeylerinde anlamlı bir iyileştirme ortaya koyamadığı görülmüştür. Fakat bu pasif kontrol yöntemlerin özellikle önünde spoyler olan arka duvarı eğimli yapının mühimmat üzerinde oluşan ses basınç düzeyini kayda değer ölçüde iyileştirdiği görülmüştür.

Bu çalışmada kullanılan türbülans modelin DES olmasından, hareketli ağlı sayısal çözüm yapılıyor olmasından ve akış denklemlerinin yanı sıra altı serbestlik dereceli denklemlerin de çözülüyor olması çözüm sürelerini oldukça uzun hale getirmiştir. Buna

örnek vermek gerekirse bir hareketli ve hareketsiz çözümün toplam işlemci saati ortalama 72.000 işlemci-saatir. Bunun anlamı çözümünün 200 çekirdekli bir HPC sistemde 15 günde gerçekleşmiş olmasıdır. Bu değerler gözönünde bulundurulduğunda mühimmat ayrılmasının DES ve LES türbülans modeller ile benzetimi mevcut bilgisayar teknolojilerde çözümünün oldukça pahalı olduğu görülmektedir. İçeriden ayrılmalarda kavite akışın doğası gereği sahip olduğu kararsızlığın zamana bağlı olmasından ötürü süreklilik, momentum ve enerji ile hareket denklemlerinin birarada çözümüne ihtiyaç duyulmaktadır. Buda alternatif yöntemler olan yarı zamana bağlı süreklilik, momentum ve enerji ile hareket denklemlerinin ayrık çözüldüğü yöntemlerin içeriden mühimmat ayrılmasında kullanılmasına olanak tanımamaktadır. Sonuç olarak her ne kadar çözümü pahalı olsa da içeriden mühimmat ayrılması gerçekçi bir şekilde ve akış fiziğine uygun olarak modellenmek isteniyor ise süreklilik, momentum ve enerji ile hareket denklemlerinin birlikte çözüldüğü zamana bağlı sayısal benzetim kullanılmak zorunludur.

Literatürde bazı çalışmaların mühimmatın izlediği yörüngenin ciddi bir şekilde mühimmat bırakma zamanına bağlı olduğu ortaya konulmuştur. Bu çalışmada mühimmatın izlediği yörüngenin mühimmat bırakma zamanından etkilendiği fakat bırakma zamanının ana faktör olmadığı görülmüştür. Bunun nedeni olarak mühmmatın ağırlığının küçük ve kavite L/D oranının büyük olmasından ötürü kapalı tip kavitede mühimmatın izlediği yörüngenin daha karasız yapıda olduğu düşünülmektedir. Yürütülen bu çalışmada ele alınan jenerik mühimmat ağır sınıfına giren stabil yapıda olması ve L/D 5 olan açık tip kavite kullanılmış olması mühimmatın izlediği yörüngenin görece daha kararlı hale getirdiği bu sayede bırakma zamanından çok fazla etkilenmediği sonucu ortaya çıkmış olabilir. Bu konuda net bir yargıya varmak için ileri çalışmalar yapılması gerekliliği görülmüştür. Farklı mühimmat tipleri ve farklı kavite tipleri kullanılarak ileri çalışmalar yapılarak mühimmatın izlediği yörüngenin mühimmatı bırakma zamanına ne kadar bağlı olduğu net şekilde ortaya konulabilir.

Bu çalışmadaki mühimmat ayrılması sayısal benzetimi transonik rejimde gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmanın ayrıca farklı rejimlerde gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Hem farklı rejimlerdeki mühimmat ayrılması davranışının tam olarak ortaya konulması hem de pasif akış kontrol yöntemlerin sesüstü gibi rejimlerde etkisi

ortaya konulmalıdır. Bu amaçla farklı mühimmat tipleri ve kavite yapılarının yanı sıra sesüstü akış rejimleri için çalışmalar yürütülmesi planlanmaktadır.

KAYNAKÇA

ANSYS Inc. (2013). *ANSYS Fluent Theory Guide [Release 15.0].* Canonsburg, PA: ANSYS Inc.

Barakos, G. N., Lawson, S. J., Steijl, R., & Nayyar, P. (2009). Assessment of Flow Control Devices for Transonic Cavity Flows Using DES and LES. *IUTAM Bookseries* (s. 77-87). içinde Dordrecht: Springer.

Barakos, G. N., Lawson, S. J., Steijl, R., & Nayyar, P. (2009). Numerical Simulations of High-Speed Turbulent Cavity Flows. *Flow Turbulence Combust, 83*, 569-585.

Barone, M., & Arunajatesan, S. (2016). Pressure Loadings in a Rectangular Cavity with and Without a Captive Store. *Journal of Aircraft, 53*(4), 982-991.

Blair Jr., A. B., & Stallings Jr., R. L. (1988). Cavity Door Effcts on Aerodynamic Loadings of Compressed-Carriage Store Configurations Separating from Cavities at Supersonic Speeds. *AIAA 26th Aerospace Sciences Meeting.* Reno, Nevada.

Carter, R. E. (2012). *System Identification and Trajectory Optimization for Guided Store Separation.* Florida, USA: University of Florida .

Cenko, A., Deslandes, R., Dillenius, M., & Stanek, M. (2008). Unsteady Weapon Bay Aerodynamics - Urban Legend or Flight Clerance Nightmare. *46th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit.* Reno, Nevada.

Chen, D. (1990). Stores Separation Characteristic from a Generic Bay at Transonic Speeds. *AIAA 16th Aerodynamic Ground Testing Conference.* Seattle, WA.

Chin, D., Granlund, K., Maatz, I., Schmit, R. F., & Reeder, M. F. (2019). Stochastic Store Trajectory of Ice Models from a Cavity into Supersonic Flow. *Journal of Aircraft, 56*(4).

Crew Daily. (2019, Ocak 18). https://crewdaily.com/amazing-facts-about-rockwell-b-1-lancer/ adresinden alındı

Davis, M. B., Yagle, P., Smith, B. R., Chankaya, K. M., & Johnson, R. A. (2009). Store Trajectory Response to Unsteady Weapons Bay Flowfields. *47th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including The New Forum and Aerospace Exposition.* Orlando, Florida.

Demir, G., & Alemdaroğlu, N. (2017). CFD Based Solutions of Release of Generic Store. *AIAC-9th Ankara International Aerospace Conferance.* Ankara.

Demircan, O. M., Demir, O., Türk, S., & Güleren, K. M. (2018). Aeroacoustics Analysis of a Hybrid Control Method for the Flow-Induced Noise Generation of Transonic Cavity Flows. *ICCFD10, 10th International Conferance on Computational Fluid Dynamics.* Barcelona.

Flora, T. J., Reeder, M. F., Lofthouse, A., & Kraft, N. (2014). Dynaic Store Release of Ice Models from a Cavity into Mach 2.9 Flow. *Journal of Aircraft, 51*(6), 1927-1941.

Fox, J. H. (2000). *Generic Wing, Paylon, and Moving Finned Store.* Arnold AFB, USA: NATO, RTO-TR-26.

Güleren, K. M., Türk, S., Demircan, O. M., & Demir, O. (2018). Numerical Analysis of the Cavity Flow Subjected to Passive Controls Techniques. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 326*.

Hopkin, H. R. (1970). *A Scheme of Notation and Nomenclature for Aircraft Dynamics and Associated Aerodynamics.* London: Her Majesty's Stationery Office.

Jamison, K., Rossouw, P., & Miles, E. (2017). Quantitative Grading of Store Separation Trajectories. *9th Ankara International Aerospace Conference AIAC 2017.* Ankara Turkey.

Johnson, R. A., Stanek, M. J., & Grove, J. E. (2008). Store Separation Trajectory Deviations Due to Unsteady Weapons Bay Aerodynamics. *46th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit.* Reno, Nevada.

Kolar, V. (2007). Vortex identification: New requirements and limitations. *Heat and Fluid Flow*, 638-652.

Larcheveque, L., Sagaut, P., Le, T. H., & Comte, P. (2004). Large-eddy Simulation of a Compressible Flow in a Three-dimensional Open Cavity at High Reynolds number. *J. Fluid Mech., 516*, 265-301.

Lawson, S., & Barakos, G. (2010). Computational Fluid Dynamics Analyses of Flow over Weapons-Bay Geometries. *Journal of Aircraft, 47*(5), 1605-1623.

Lockheed Martin. (2012, Mart). *Flickr*. https://www.flickr.com/photos/lockheedmartin/6965210969/in/photostream/ adresinden alındı

Loupy, G. J., Barakos, G. N., & Taylor, N. J. (2017). Store Release Trajectory Variability from Weapon Bays Using Sclae-Adaptive Simulations. *AIAA Journal, 56*(2).

Loupy, G. J., Barakos, G. N., & Taylor, N. J. (2018). Multi-Disciplinary Simulations of Stores in Weapon Bays using Scale Adaptive Simulation. *AIAA SciTech Forum.* Kissimmee, Florida.

L'vov, V., & Procaccia, I. (1998). Hydrodynamic Turbulence: a 19th Centry Problem with a Challenge for the 21st Century. *Flow at Ultra-High Reynolds and Rayleigh Numbers*.

Merrick, J. D., & Reeder, M. F. (2015). Cavity-Store Interaction under Supersonic Freestream Conditions. *33rd AIAA Applied Aerodynamics Conference.* Dallas, TX.

Moukalled, F., Mangani, L., & Darwish, M. (2016). *The Finite Volume Method in Computational Fluid Dynamics An Advanced Introduction with OpenFOAM and Matlab.* Switzerland: Springer International Publishing.

Murray, N. E., Jansen, B. J., Gui, L., Seiner, J. M., & Birkbeck, R. (2009). Measurements of Store Separation Dynamics. *47th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including The New Horizons Forum and Aerospace Exposition.* Orlando, Florida.

Nayyar, P., Barakos, G., & Badcock, K. (2007). Numerical Study of Transonic Cavity Flows Using Large-eddy and Detached-eddy Simulation. *The Aeronautical Journal, 111*(1117), 153-164.

Nightingale, D., Ross, J., & Foster, G. (2005). *Cavity Unsteady Pressure Measurements Examples from Wind-Tunnel Tests.* Technical Report Version 3, Aerodynamics & Aeromechanics Systems Group, QinetiQ.

Ozen, M. (2014). *Meshing Workshop.* Ozen Engineering, INC.

Pope, S. B. (2000). *Turbulent Flows.* Cambridge University Press.

Rainey, R. W. (1954). *A Wind-Tunnel Investigation of Bomb Release at a Mach Number of 1.62.* Washington: National Advisory Committee for Aeronautics.

Savunma Sanayi. (2018, Ocak 8). https://www.savunmasanayi.org/hava-kuvvetlerimizin-operasyonlarda-kullandigi-muhimmatlar/ adresinden alındı

Schiestel, R. (2008). *Modeling and Simulation of Turbulent Flows.* London: Wiley.

Shipman, J., Arunajatesan, S., Cavallo, P. A., Birkbeck, R., Sinha, N., Ukeiliey, L., & Alvi, F. (2007). Flow Control for Enhanced Store Separation. *45th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit.* Reno, Nevada.

Spinetti, R. L., & Jolly, B. A. (2008). Time-Accurate Numerical Simulation of GBU-38s Separating from the B-1B Aircaft with Various Ejector Forces, Store Proprties, and Load-out Configurations. *46th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit.* Reno, Nevada.

Stallings Jr., R. L. (1983). Store Separation from Cavities at Supersonic Flight Speeds. *J. Spacecraft, 20*(2), 129-132.

Versteeg, H. K., & Malalasekera, W. (2007). *An Introduction to Computational Fluid Dynamics.* Harlow: Pearson Education Limited.

Westmoreland, W. S. (2009). Trajectory Variation Due to an Unsteady Flow-Field. *47th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including The New Horizons Forum and Aerospace Exposition.* Orlando, Florida.

Wilcox Jr., F. (1991). Tangential, Semisubmerged, and Internal Store Carriage and Separation at Supersonic Speeds. *29th Aerospace Science Meeting.* Reno, Nevada.

EKLER

EK-1

```
/*********************************************************

SDOF property compiled UDF with external forces/moments

*********************************************************/

#include "udf.h"

DEFINE_SDOF_PROPERTIES(delta_missile, prop, dt, time, dtime)

{

  prop[SDOF_MASS]       = 907.185;

  prop[SDOF_IXX]        = 27.116;

  prop[SDOF_IYY]        = 488.094;

  prop[SDOF_IZZ]        = 488.094;

  /* add injector forces, moments */

  {

   register real dfront = fabs (DT_CG (dt)[2] -

                    (0.179832*DT_THETA (dt)[1]));

   register real dback  = fabs (DT_CG (dt)[2] +

                    (0.329184*DT_THETA (dt)[1]));

   if (dfront <= 0.100584)

     {

       prop[SDOF_LOAD_F_Z] = 10676.0;

       prop[SDOF_LOAD_M_Y] = -1920.0;

     }

   if (dback <= 0.100584)
```

```
      {
        prop[SDOF_LOAD_F_Z] += 42703.0;
        prop[SDOF_LOAD_M_Y] += 14057.0;
      }
   }
   printf ("\ndelta_missile: updated 6DOF properties");
}
```

EK-2

```
/*****************************************************
SDOF property compiled UDF with external forces/moments
*****************************************************/
#include "udf.h"
DEFINE_SDOF_PROPERTIES(delta_missile, prop, dt, time, dtime)
{
   prop[SDOF_MASS]       = 907.185;
   prop[SDOF_IXX]        = 27.116;
   prop[SDOF_IYY]        = 488.094;
   prop[SDOF_IZZ]        = 488.094;
   /* add injector forces, moments */
   {
     register real dfront = fabs (DT_CG (dt)[2] -
                        (0.254*DT_THETA (dt)[1]));
     register real dback  = fabs (DT_CG (dt)[2] +
                        (0.254*DT_THETA (dt)[1]));
     if (dfront <= 0.100584)
       {
         prop[SDOF_LOAD_F_Z] = 42703.0;
         prop[SDOF_LOAD_M_Y] = -10846.562;
```

```
      }
    if (dback <= 0.100584)
      {
        prop[SDOF_LOAD_F_Z] += 42703.0;
        prop[SDOF_LOAD_M_Y] += 10846.562;
      }
  }
  printf ("\ndelta_missile: updated 6DOF properties");
}
```

ÖZGEÇMİŞ

ORCID NO: A-9609-2018

EĞİTİM

- **Doktora, Eskişehir Teknik Üniversitesi,** Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Eskişehir/Türkiye

2016-2021

- **Yüksek Lisans, Anadolu Üniveristesi,** Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Eskişehir/Türkiye

2013-2016

- **Lisans, İstanbul Teknik Üniversitesi,** Uçak ve Uzay Bilimleri Fakültesi**,** Istanbul/Turkey

2005-2012

İŞ DENEYİMİ

- **Araştırma Görevlisi,** Uydu ve Uzay Bilimleri Enstitüsü, Anadolu Üniveristesi, Eskişehir/Türkiye

2013-2018

- **Araştırma Görevlisi,** Yer ve Uzay Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir Teknik Üniversitesi, Eskişehir/Türkiye

2018-hâlâ

YAYINLAR

- Güleren, K. M., **Türk, S**., Demircan, O. M., & Demir, O. (2018, March). NUMERİCAL ANALYSİS OF THE CAVİTY FLOW SUBJECTED TO PASSİVE CONTROLS TECHNİQUES. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 326, No. 1, p. 012015). IOP Publishing.

- Demircan, O. M., Demir, O., **Türk, S**. & Güleren, K. M. (2018, 9-13 July). *AEROACUSTIC ANALYSIS OF A HYBRID CONTROL METHOD FOR THE FLOW-INDUCED NOISE GENERATION OF TRANSONIC CAVITY FLOWS.* 10th International Conference On Computational Fluid Dynamics (ICCFD10-092), Barcelona, Spain.

- Demircan, O. M., Demir, O., **Türk, S**. & Güleren, K. M. (2017, September). *VALIDATION OF OPEN SOURCE CFD SOFTWARE FOR HIGH SPEED TURBULENT CAVITY FLOWS.* Paper presented at the 9th Ankara International Aerospace Conference (AIAC), Ankara, Turkey. Retrieved from http://aiac.ae.metu.edu.tr/paper.php?No=AIAC-2017-152.

- **Türk, S**., Demircan, O. M., Demir, O. & Güleren, K. M. (2017). KAVİTE AKIŞLARDAKİ PASİF KONTROL YÖNTEMİNİN SAYISAL YÖNTEMLERLE DOĞRULAMASI. In H. Türkoğlu (Ed.), *ULİBTK Bildiri Kitabı* (pp. 346-355). Çorum, Turkey: Hitit University.

- Demir, O., Demircan, O. M., **Türk, S**. & Güleren, K. M. (2017). THE EFFECT OF BOUNDARY CONDITIONS ON THE SUBSONIC TURBULENT CAVITY FLOWS. In H. Karakoç (Ed.), *Proceedings of International Symposium on Sustainable Aviation 2017* (pp. 40-43). Kiev, Ukraine: National Aviation University.

- Acarer, S., Tatar, V., **Türk, S**. (2015). A NUMERICAL AND EXPERIMENTAL STUDY ON HEAT TRANSFER AT THE GAS TURBINE EXHAUST CONE. *7th Baltic Heat Transfer Conference, 2015*. Talin, Estonia.