

SU ALTI ARAÇLARI İÇİN DÜZLEMSEL HAREKET MEKANİZMASI TESTİNİN SAYISAL OLARAK MODELLENMESİ

Mustafa Can*
Roketsan A.Ş., Ankara

Bora Atak†
Roketsan A.Ş., Ankara

İskender Kayabaşı‡
Roketsan A.Ş., Ankara

Doç. Dr. Sinan Eyi§
ODTÜ, Ankara

ÖZET

Otonom su altı araçlarının sistem benzetimi için gerekli olan hidrodinamik katsayıları veya manevra türevlerini elde etmek için düzlemsel hareket (Planar Motion Mechanism), döner kol (Rotating Arm) ve konileme hareketi (Conic Motion Mechanism) gibi çeşitli testler gerçekleştirilir. Düzlemsel hareket testinde diğerlerinden farklı olarak model için kombine hareketler tanımlanabilmektedir. Bu sayede bir düzlemsel hareket testi ile hız, dönüye ve ivmeye bağlı türevler elde edilebilir. Düzlemsel hareket mekanizmasında modele bağlı iki adet dikme (oscilator) bulunmaktadır. Dikmelerden bir tanesi ağırlık merkezinin önünde diğeri arkasında konumlandırılır. Bu iki dikmenin koordineli hareketi ile modele çekme tankı içerisinde yunuslama (pure pitch), kaldırma (pure heave) ve bu hareketlerin kombinasyonu yaptırılabilir. Bu çalışmada ilk olarak DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency) ve Autosub denek-taşı modellerinin çekme testleri hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) yöntemleri kullanılarak modellenmiştir. Bu denek-taşlarına ait çekme testi verileri ile HAD analizlerinden elde edilen statik katsayılar kıyaslanarak, statik HAD modelleme yönteminin doğrulanması amaçlanmıştır. Statik HAD modelleme yöntemi doğrulandıktan sonra Autosub denek-taşı modeli için düzlemsel hareket testi sayısal olarak modellenmiş ve HAD yöntemleri ile zamana bağlı olarak çözülmüştür. Elde edilen analiz sonuçları düzlemsel hareket test verileri ile kıyaslanmıştır. Bu bildiride yapılan çalışmalarla; otonom su altı araçların hidrodinamik tasarım ve analizlerinde kullanılabilecek modelleme yöntemlerinin doğrulanması yapılmıştır.

GİRİŞ

Bir otonom su altı aracının tasarım sürecinde test olanaklarının kısıtlı ve pahalı olması nedeniyle sistem benzetiminin yapılabilmesi büyük önem taşımaktadır. Sistem benzetiminin yapılabilmesi için ilk olarak statik ve dinamik hidrodinamik katsayıların elde edilmesi gereklidir. Bu katsayılar yüzdürme tanklarında gerçekleştirilen testlerle elde edilebilir. Ancak bu testlerin gerçekleştirilebileceği merkezlerin kısıtlı olması ve test maliyetlerinin yüksek olması alternatif çözümler gerektirmektedir. Yüzdürme tanklarında gerçekleştirilen testlerin HAD yöntemleri kullanılarak modellenmesi hidrodinamik katsayıların hesaplanması için alternatif bir yöntemdir. Statik hidrodinamik katsayıların elde edilmesi için çekme testlerinin HAD yöntemleri ile zamandan bağımsız modellenmesi yeterlidir. Ancak dinamik hidrodinamik katsayıların elde edilebilmesi için düzlemsel hareket testi, konileme hareketi testi veya döner kol testinin HAD yöntemleri kullanılarak modellenmesi gerekir. Bu çalışmada; 3-Boyutlu Navier-Stokes denklemleri zamana bağlı olarak çözümlenerek düzlemsel hareket testi modellenmiştir.

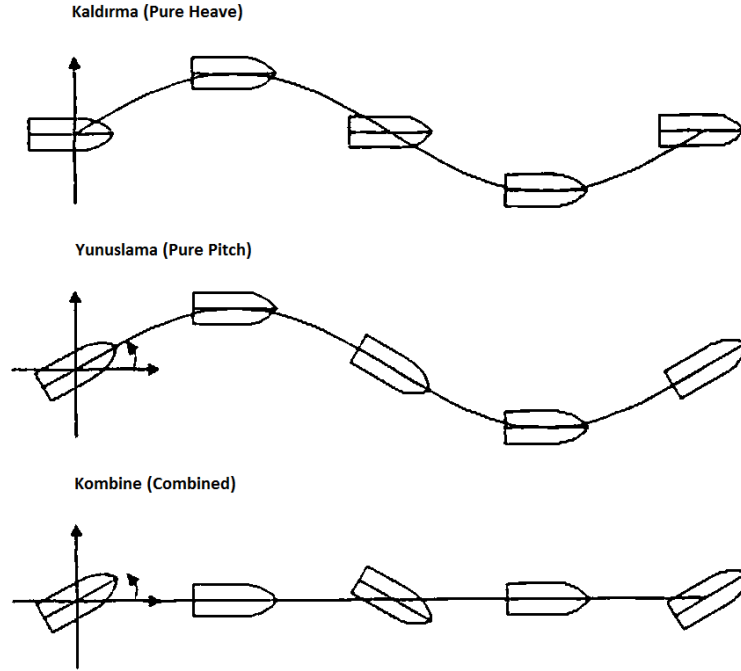
* Mühendis, Roketsan A. Ş., E-posta: mustafa.can@roketan.com.tr

† Uzman Mühendis, Roketsan A. Ş., E-posta: ikayabasi@roketan.com.tr

‡ Uzman Mühendis, Roketsan A. Ş., E-posta: batak@roketan.com.tr

§ Doçent Doktor, ODTÜ, E-posta: seyi@metu.edu.tr

Düzlemsel hareket testi ile otonom su altı araçları, kaldırma (*pure heave*), yunuslama (*pure pitch*) ve kombine (*combined*) gibi farklı hareketler yapmaya zorlanır. Bu hareketler Şekil 1'de gösterilmiştir.

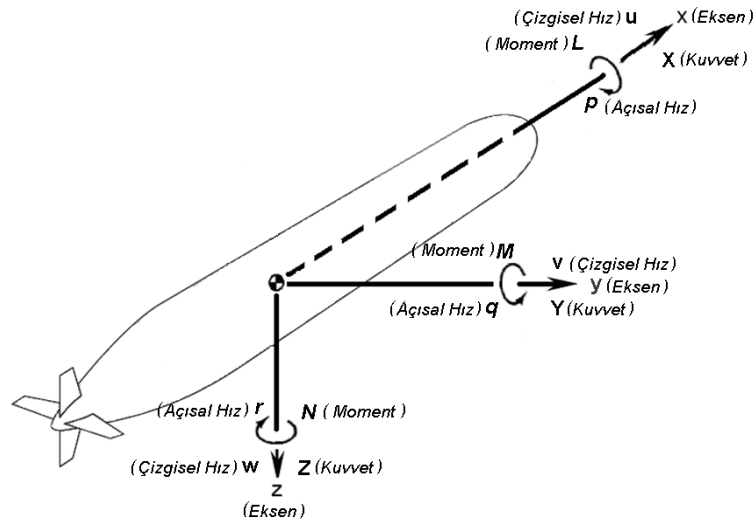


Şekil 1: Otonom su altı araçların düzlemsel hareket testi için hareketlerin tanımlanması [Ikeda, Katayama, Okumura, 2000]

Bu çalışma kapsamında kaldırma (*pure heave*) ve kombine hareketler modellenmiştir.

HAD MODELLEME ÇALIŞMALARI

Su altı araçları için kullanılan hidrodinamik eksen takımı Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2: Hidrodinamik eksen takımı

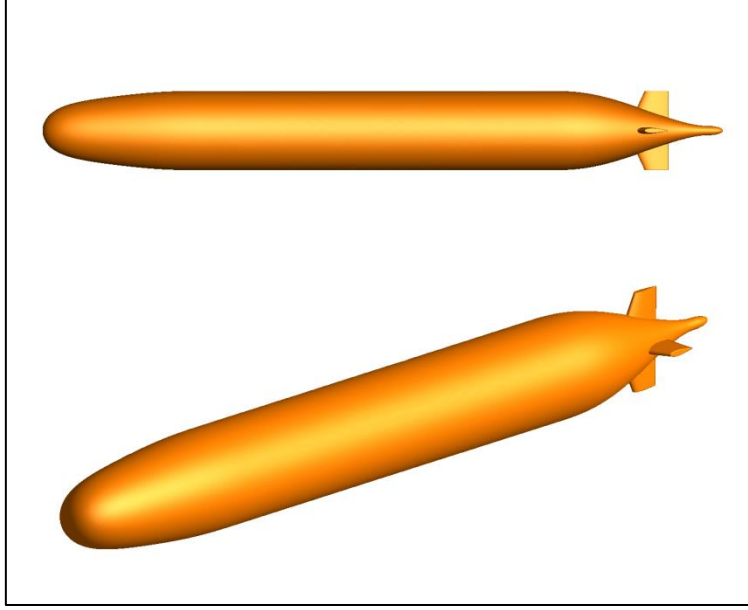
Kuvvet ve moment katsayıları için boyutsuzlaştırma parametreleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1: Katsayılar ve boyutsuzlaştırma parametreleri

| Katsayı | Boyutsuzlaştırma Parametresi |
|---------|--------------------------------|
| X' | $1/2 \rho u^2 S_{ref}$ |
| Z' | $1/2 \rho u^2 S_{ref}$ |
| M' | $1/2 \rho u^2 S_{ref} L_{ref}$ |

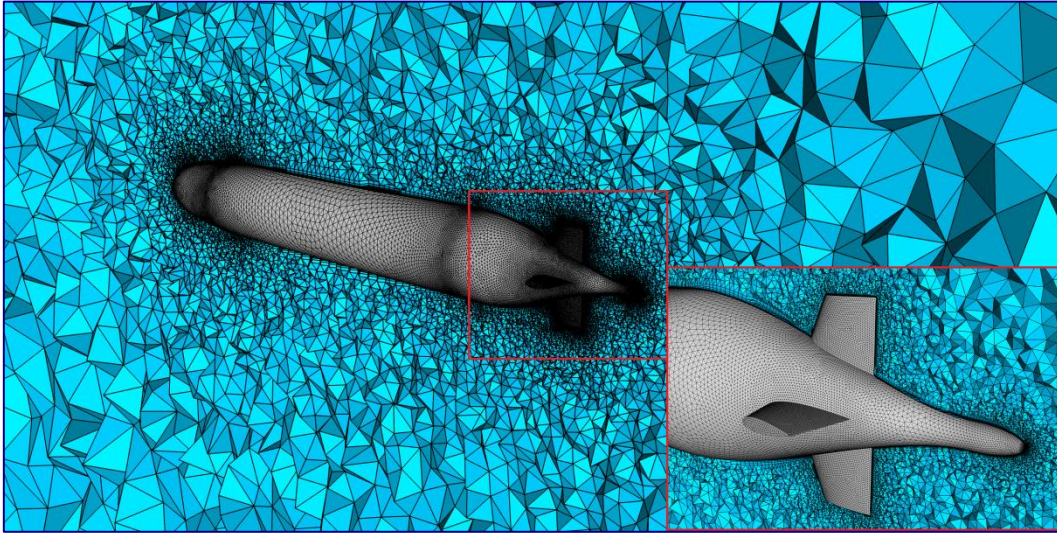
DARPA Denek-Taşı Hidrodinamik Modelleme Çalışmaları

DARPA denek-taşı çekme testlerinin HAD yöntemleri ile modellenmesi çalışmasında kullanılmıştır. HAD analizlerinde kullanılan DARPA denek taşı katı modeli Şekil 3' te verilmiştir.



Şekil 3: DARPA denek taşı katı modeli

DARPA denek-taşı için çözüm ağı GAMBİT ve TGRID ticari yazılımları kullanılarak oluşturulmuştur. DARPA modeli yüzey ve hacim ağı Şekil 4'te gösterilmiştir.



Şekil 4: DARPA modeli hacim ve yüzey çözüm ağı

HAD analizleri de FLUENT ticari yazılımı ile yapılmıştır [FLUENT, 2009]. HAD analizleri Tablo 2'de verilen seyir koşullarında gerçekleştirilmiştir.

Tablo 2: Çekme Testi Analiz Koşulları [Roddy, 1990]

| | |
|----------------------------------|--------------------------|
| Reynolds Number (Re) | 14,500,000 |
| Hız (m/s) | 3.34 |
| Viskozite Katsayısı (m^2/s) | 1.0E-06 |
| Yoğunluk (ρ) (kg/m^3) | 998.2 |
| Hücum Açısı ($^\circ$) | 0,2,4,6,8,10,12,14,16,18 |

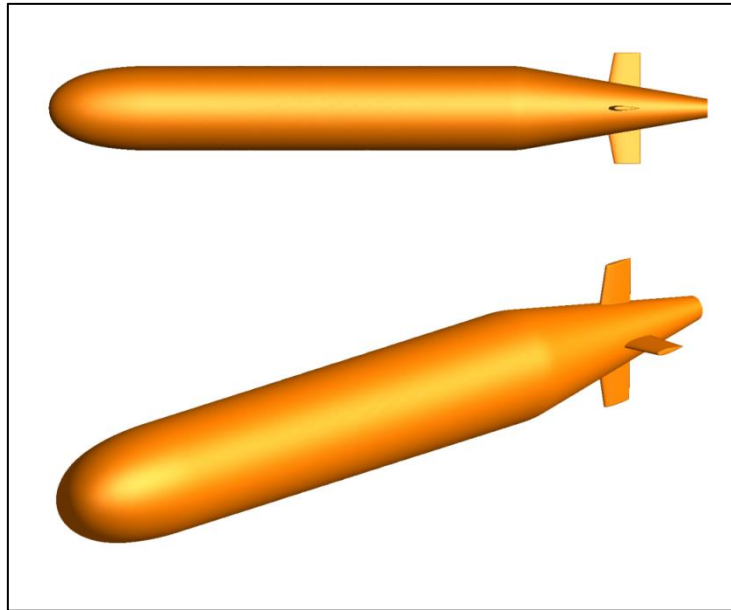
Hidrodinamik katsayıların boyutsuzlaştırılmasında kullanılan referans değerler ve referans moment noktası Tablo 3'de verilmiştir.

Tablo 3: DARPA denek-taşı modeli referans bilgileri [Groves, Huang, Chang, 1989]

| | |
|---------------------------------------|--------------|
| Referans Uzunluk (L_{ref}) (m) | 4.261 m |
| Referans Alan (S_{ref}) (m^2) | 18.156 m^2 |
| Moment Ref. Noktası (m) | 2.009 m |

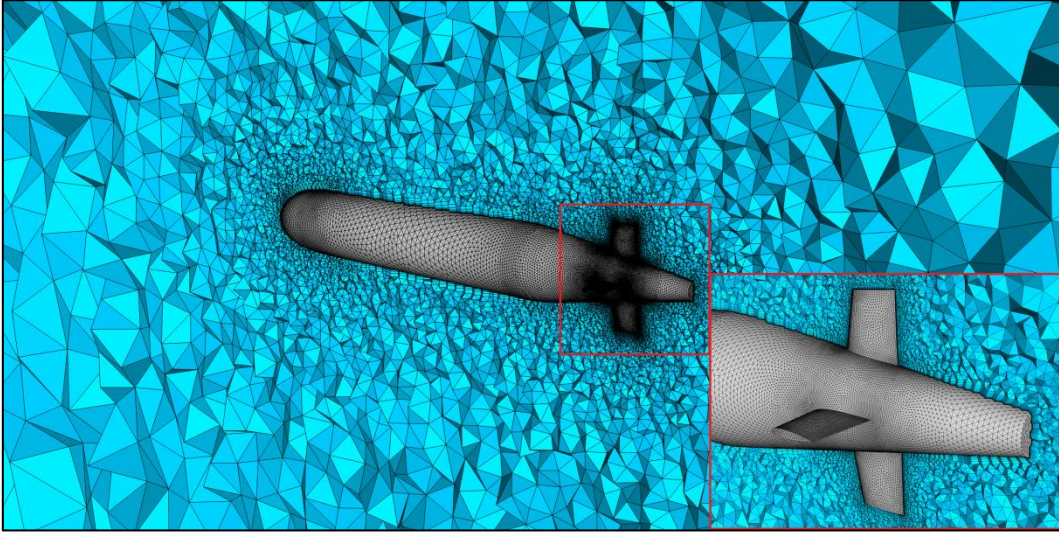
Autosub Denek-Taşı Hidrodinamik Modelleme Çalışmaları

Autosub denek-taşı modeli kullanılarak; çekme testi, düzlemsel hareket testindeki kaldırma ve kombine hareketlerinin HAD yöntemleri ile modellenmesi çalışmaları yapılmıştır. HAD analizlerinde kullanılan Autosub denek-taşı katı modeli Şekil 5' te verilmiştir.



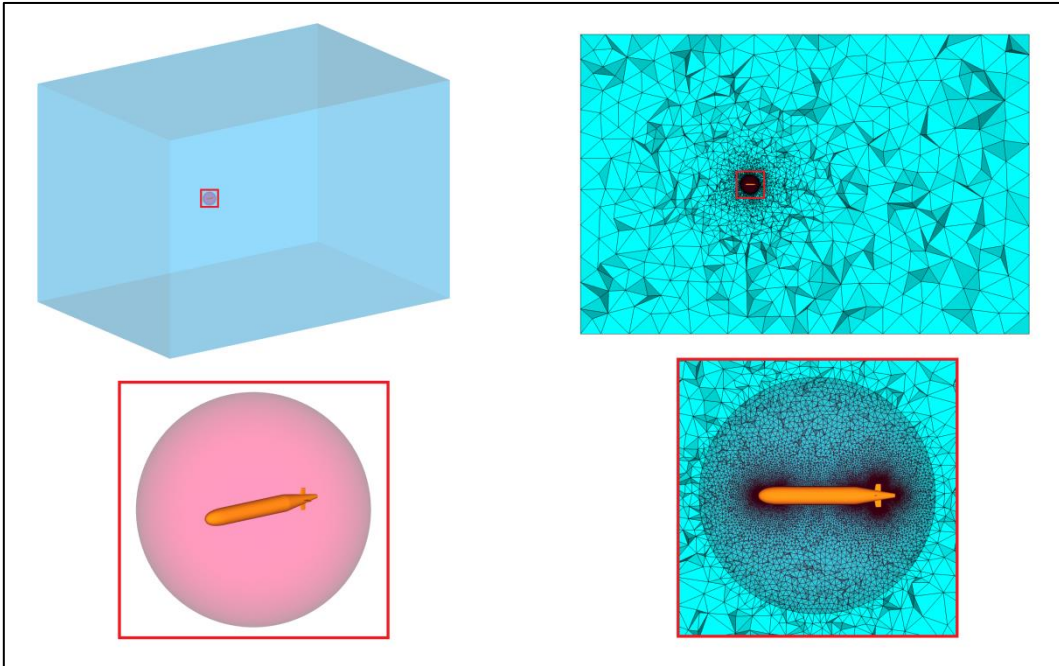
Şekil 5: Autosub denek-taşı katı modeli

Autosub denek-taşı modeli için de çözüm ağları GAMBIT ve TGRID ticari yazılımları kullanılarak oluşturulmuştur. Sayısal modelleme tekniklerinin gereksinimlerinden kaynaklı olarak Autosub denek-taşı için 3 farklı çözüm ağı oluşturulmuştur. Oluşturulan tüm çözüm ağlarında aynı yüzey ve sınır tabaka çözüm ağı kullanılmıştır. Düzlemsel hareket testleri için oluşturulan akış hacmi, çekme testi analizlerinde kullanılan çözüm ağından farklı olarak, 2 alt-hacimden oluşmaktadır. Çekme testleri için oluşturulan Autosub modeli yüzey ve hacim çözüm ağı Şekil 6'da gösterilmiştir.



Şekil 6: Autosub modeli hacim ve yüzey çözüm ağı

Kaldırma hareketi için modellenen akış hacmi ve hacim çözüm ağı Şekil 7’de gösterilmiştir. İç kısımdaki alt-hacim, modele tanımlı hareketin yaptırılmasını sağlamak amacı ile oluşturulmuştur. Kombine hareket için de benzer bir çözüm ağı oluşturulmuştur. Kaldırma hareketinde iç kısımdaki alt-hacme z eksenine boyunca “sinüzoidal-yukarı aşağı” hareketi tanımlanmıştır. Kombine hareket için ise alt-hacme y ekseninde “sinüzoidal-dönü” hareketi tanımlanmıştır.



Şekil 7: Kaldırma hareketi için oluşturulan akış hacmi ve hacim çözüm ağı

Autosub çekme testi HAD analizleri Tablo 4’de verilen seyir koşullarında gerçekleştirilmiştir.

Tablo 4: Autosub çekme testi analiz koşulları [Philips, Furlong, Turnock, 2007]

| | |
|----------------------------------|--------------|
| Reynolds Number (Re) | 13,900,000 |
| Hız (m/s) | 2.69 |
| Viskozite Katsayısı (m^2/s) | 1.0E-06 |
| Yoğunluk (ρ) (kg/m^3) | 998.2 |
| Hücum Açısı ($^\circ$) | 0,2,4,6,8,10 |

Autosub denek-taşı modeli için kaldırma hareketi ve kombine hareketi Tablo 5 ve Tablo 6'da verilen koşullarda analiz edilmiştir. Bu hareketler sinüzoidal fonksiyonlar ile tanımlanmıştır.

Tablo 5: Autosub kaldırma hareketi analiz koşulları [Kimber, Scrimshaw]

| | |
|----------------------------------|---------|
| Genlik (m) | 0.1 |
| Frekans (s^{-1}) | 1.5 |
| Hız (m/s) | 2.69 |
| Viskozite Katsayısı (m^2/s) | 1.0E-06 |
| Yoğunluk (ρ) (kg/m^3) | 998.2 |

Tablo 6: Autosub kombine hareket analiz koşulları [Kimber, Scrimshaw]

| | |
|----------------------------------|---------|
| Genlik ($^\circ$) | 10 |
| Frekans (s^{-1}) | 1.5 |
| Hız (m/s) | 2.69 |
| Viskozite Katsayısı (m^2/s) | 1.0E-06 |
| Yoğunluk (ρ) (kg/m^3) | 998.2 |

Autosub modeline ait hidrodinamik katsayıların boyutsuzlaştırılmasında kullanılan referans değerler ve referans moment noktası Tablo 7'de verilmiştir.

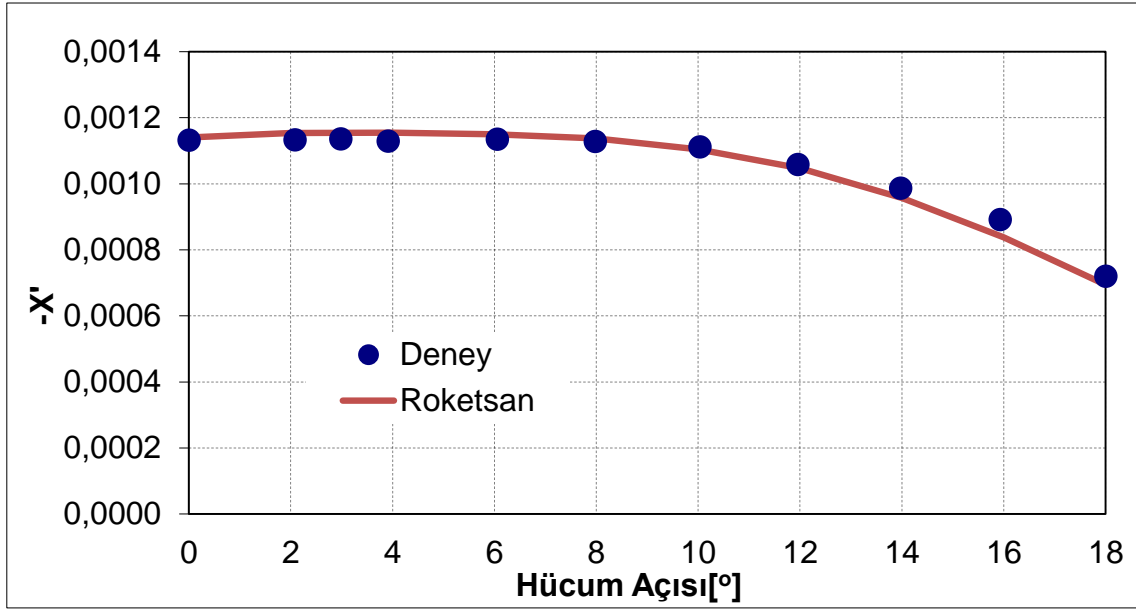
Tablo 7: Autosub denek-taşı model referans bilgileri [Griffiths]

| | |
|---------------------------------------|-------|
| Referans Uzunluk (L_{ref}) (m) | 5.2 |
| Referans Alan (S_{ref}) (m^2) | 27.04 |
| Moment Ref. Noktası (m) | 2.357 |

SONUÇLAR

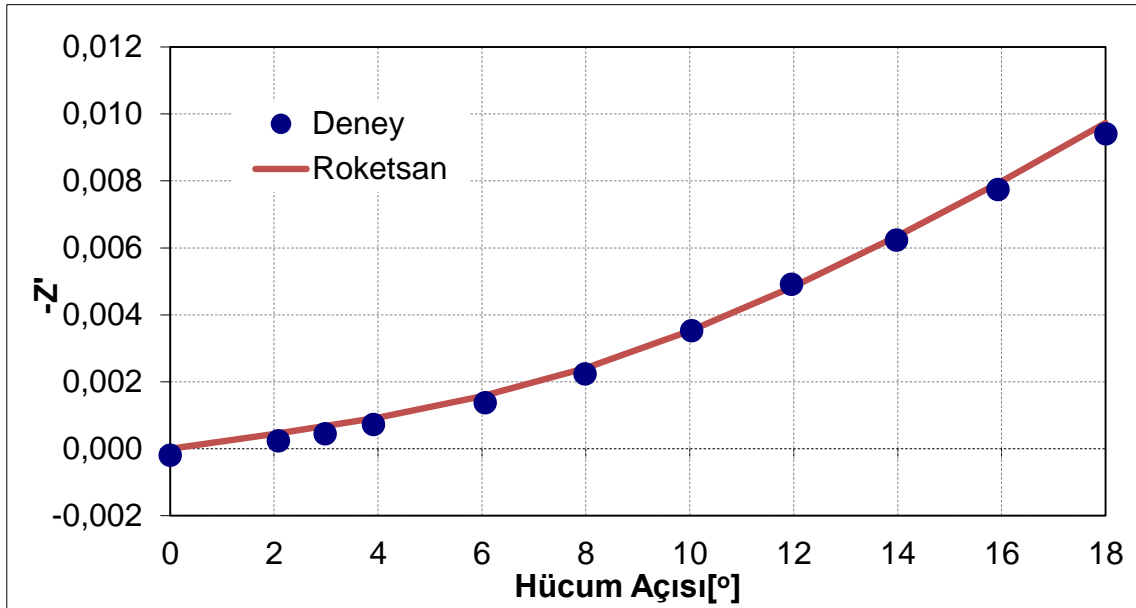
Çekme Testi HAD Analizleri

Çekme testi HAD analizleri için DARPA ve Autosub denek-taşı modelleri kullanılmıştır. DARPA denek-taşı için analiz sonuçlarından elde edilen statik hidrodinamik katsayılar deney verileri ile kıyaslanmıştır. HAD analizleriyle elde edilen eksenel kuvvet katsayısının hücum açısına göre değişimi ve deney verileri ile kıyaslanması Şekil 8'de verilmiştir.



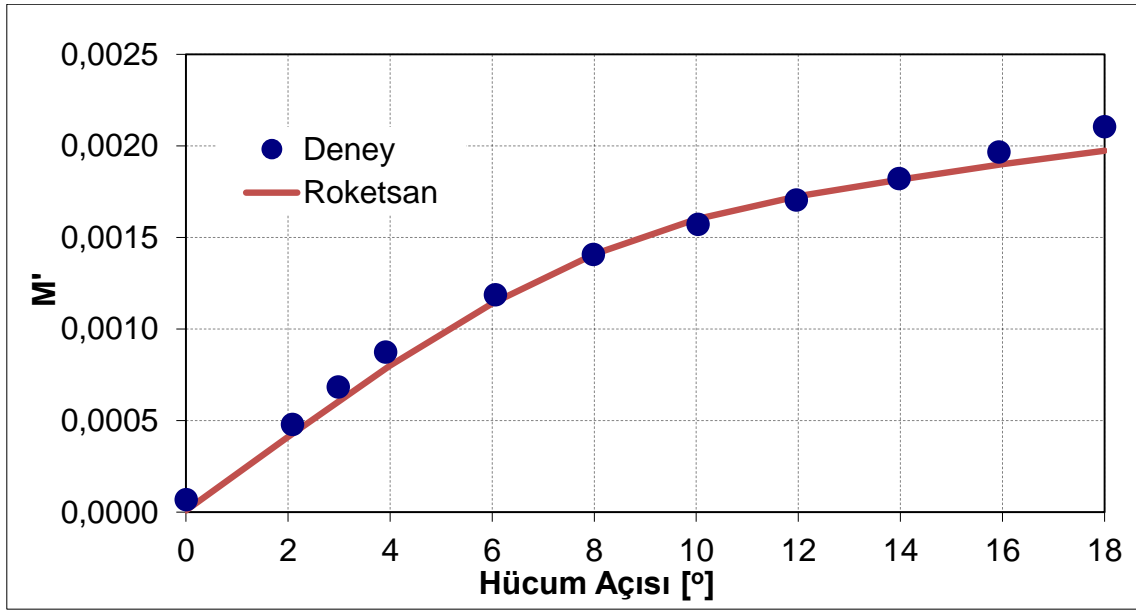
Şekil 8: DARPA denek-taşı modeli aksenal kuvvet katsayısının hücum açısına göre değişimi [Roddy, 1990]

HAD analizlerinden elde edilen normal kuvvet katsayısının hücum açısına göre değişimi ve deney verileri Şekil 9'da verilmiştir.



Şekil 9: DARPA denek-taşı modeli normal kuvvet katsayısının hücum açısına göre değişimi [Roddy, 1990]

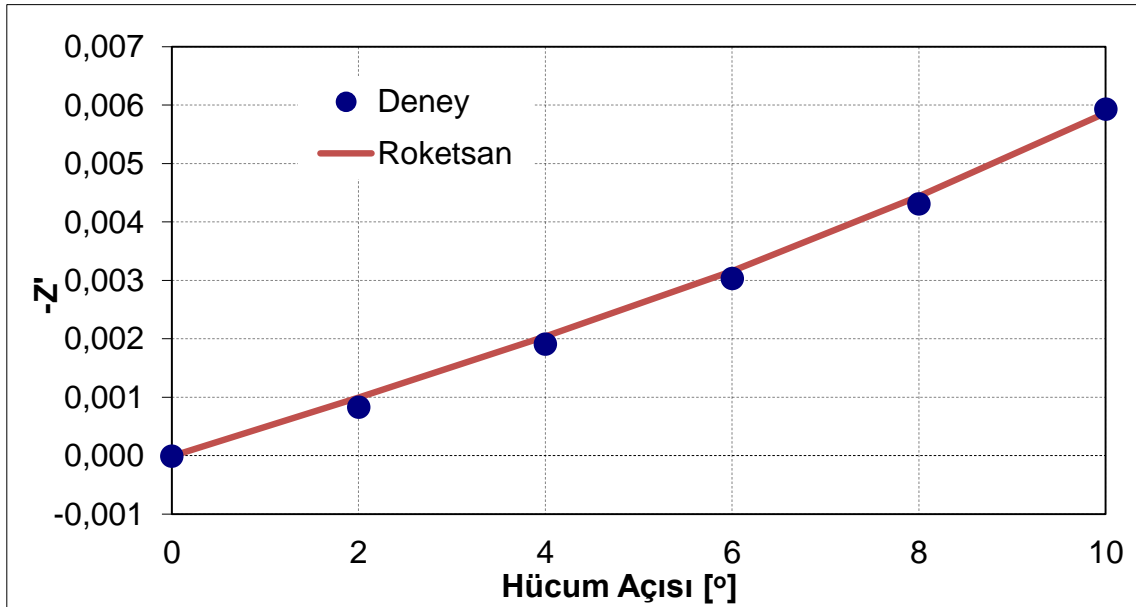
HAD analizlerinden elde edilen yunuslama moment katsayısının hücum açısına göre değişimi ve deney verileri ile kıyaslanması Şekil 10'da verilmiştir.



Şekil 10: DARPA denek-taşı modeli yunuslama momenti katsayısının hücum açısına göre değişimi [Roddy, 1990]

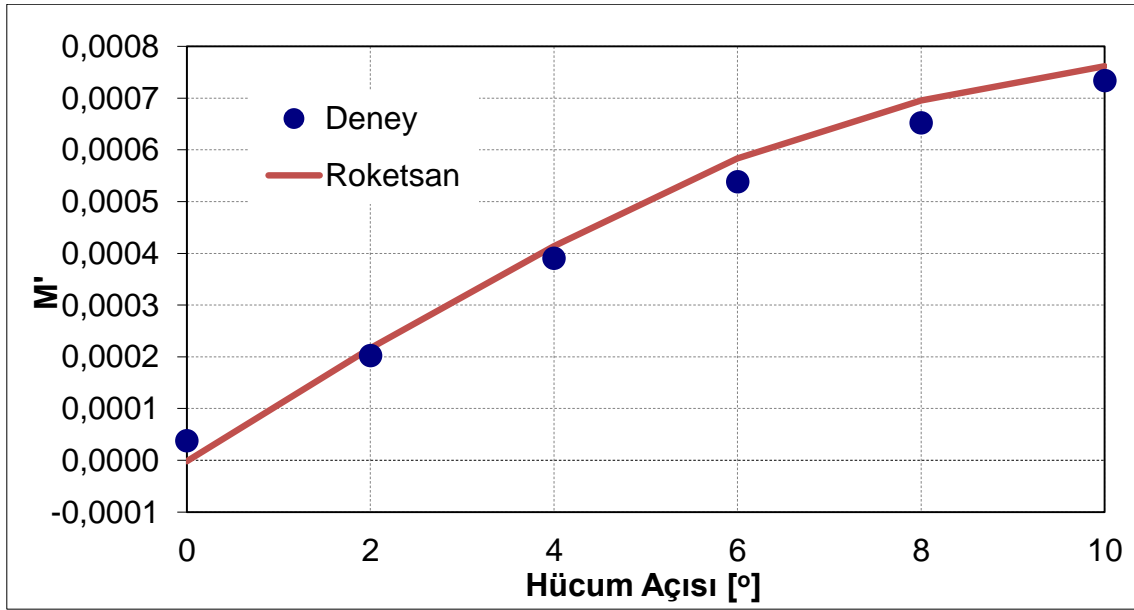
Doğrusal çekme testi için gerçekleştirilen HAD analizleri sonuçları ile deney verileri arasında %7'den az farklılık belirlenmiştir.

Autosub denek-taşı için de çekme testi HAD analizleri gerçekleştirilmiştir. HAD analiz sonuçlarından elde edilen statik hidrodinamik katsayılar deney verileri ile kıyaslanmıştır. HAD analizleriyle elde edilen normal kuvvet katsayısının hücum açısına göre değişimi ve deney verileri ile kıyaslanması Şekil 11'de verilmiştir.



Şekil 11: Autosub denek-taşı modeli normal kuvvet katsayısının hücum açısına göre değişimi [Philips, Furlong, Turnock, 2007]

Autosub modeli için gerçekleştirilen HAD analizlerinden elde edilen yunuslama moment katsayısının hücum açısına göre değişimi ve deney verileri ile kıyaslanması Şekil 12'de verilmiştir.



Şekil 12: Autosub modeli yunuslama momenti katsayısının hücum açısına göre [Philips, Furlong, Turnock, 2007]

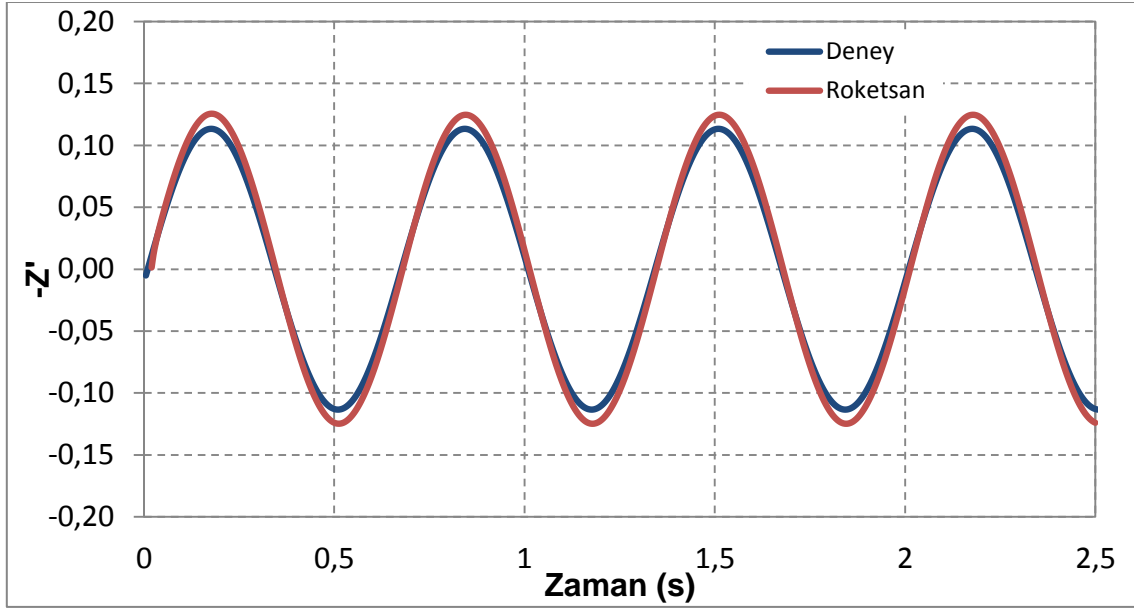
Doğrusal çekme testi için gerçekleştirilen HAD analizleri sonuçları ile deney verileri arasında %4'den az farklılık belirlenmiştir.

Çekme testi analizlerinde kullanılan HAD modelleme yöntemlerinin detay hidrodinamik tasarım ve sistem benzetim çalışmaları için yeterli doğruluk seviyesinde olduğu değerlendirilmektedir.

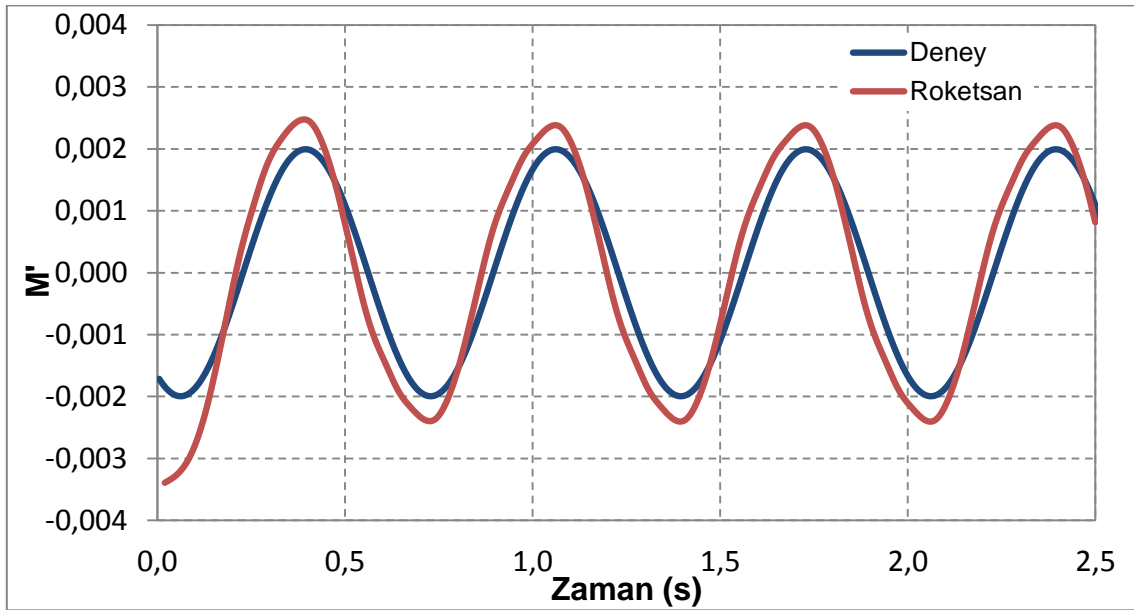
Düzlemsel Hareket Testi HAD Analizleri

Düzlemsel hareket testi HAD analizleri kapsamında Autosub denek-taşı modeli için kaldırma ve kombine olmak üzere iki farklı hareket tanımlanmıştır. Aşağıda her iki harekete ait HAD analizlerinin sonuçları verilmiştir.

Autosub denek-taşı modeli için kaldırma hareketi HAD yöntemleri ile modellenmiş ve zamana bağlı olarak çözülmüştür. HAD analizi sonucunda norma kuvvet ve yunuslama momenti katsayıları zamana bağlı olarak elde edilmiştir. Analiz sonuçları deney verileri ile birlikte Şekil 13 ve Şekil 14'te verilmiştir. Grafiklerde gösterilen deney sonuçları referans dokümanda verilen hareket denklemleri ve dinamik katsayılar kullanılarak elde edilmiştir.



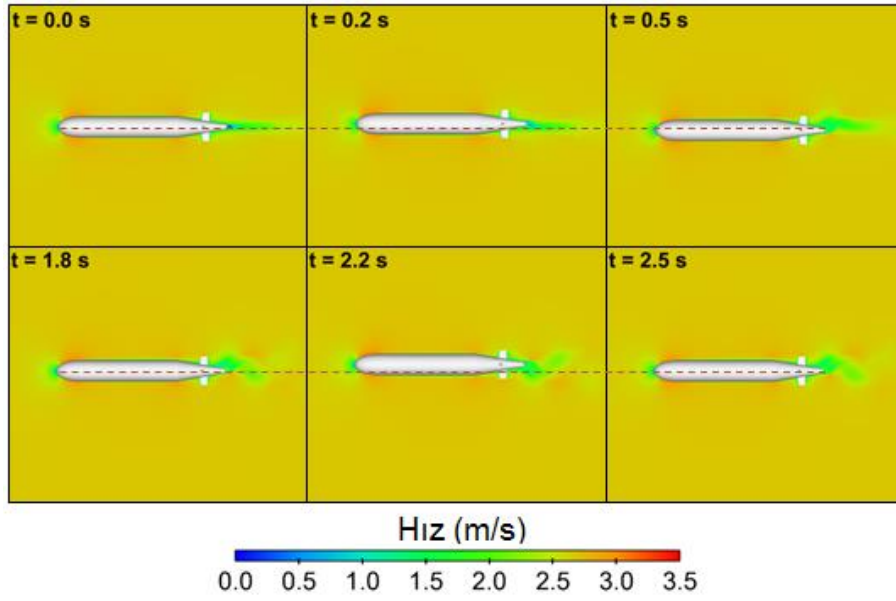
Şekil 13: Kaldırma hareketi için normal kuvvet katsayısı değerlerinin zamanla değişimi [Kimber, Scrimshaw]



Şekil 14: Kaldırma hareketi için yunuslama momenti katsayısı değerlerinin zamanla değişimi [Kimber, Scrimshaw]

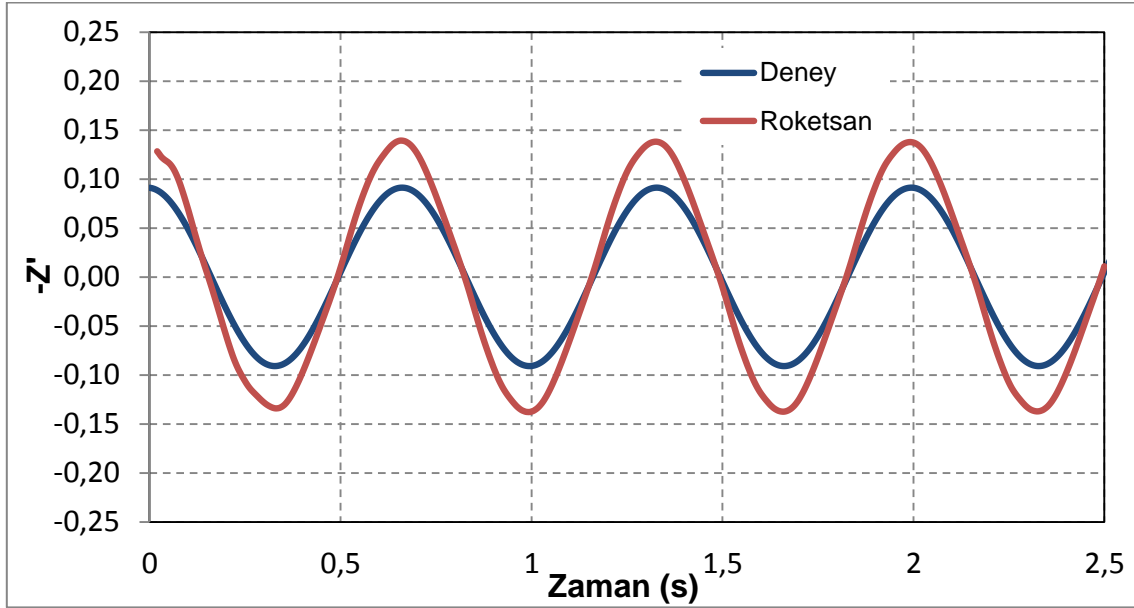
HAD analizi sonuçları frekans değeri ve faz açısından deney verileri ile uyumludur. Genlik değerlerinde ise kuvvet katsayısı değerleri ile deney verileri arasında %10'un altında, moment katsayısı değerleri ile deney verileri arasında %25'in altında farklılık belirlenmiştir. Kaldırma hareketi için uygulanan bu hidrodinamik modelleme yönteminin doğruluk seviyesi, ön ve detay tasarım aşamalarında kullanılabilecek düzeydedir.

Ayrıca HAD analizi sonucunda oluşan akış hacmi zamana bağlı olarak incelenmiştir. Akış hacmi içerisindeki hız dağılımı zamana bağlı olarak Şekil 15'de verilmiştir.

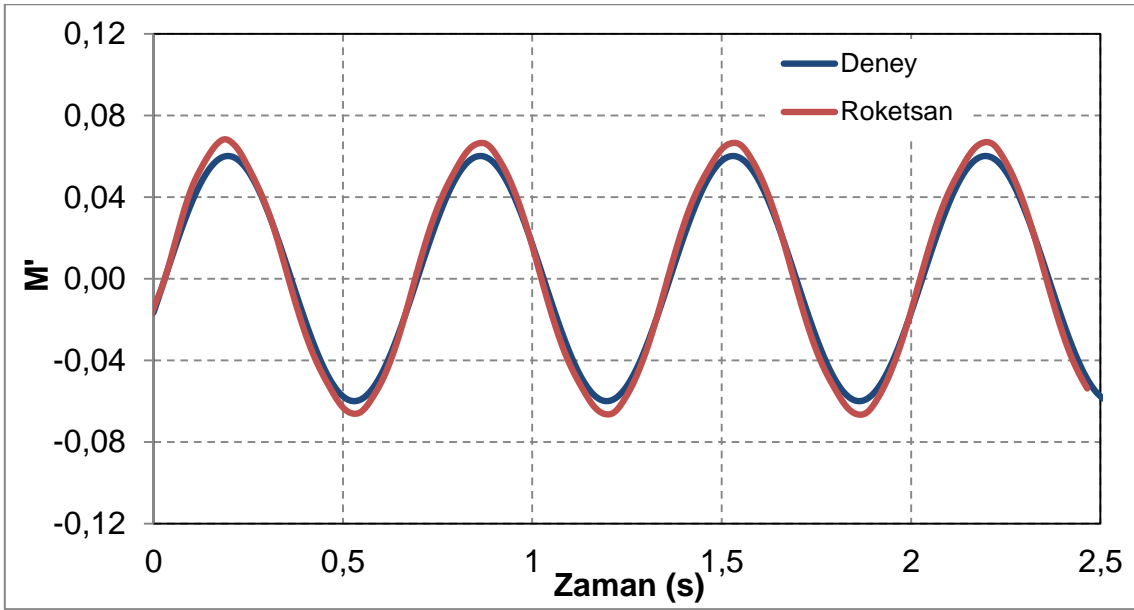


Şekil 15: Farklı zamanlarda kaldırma hareketi analizi için akış hacmi hız dağılımı

Autosub denek-taşı modeli için kombine hareket HAD yöntemleri ile modellenmiş ve zamana bağlı olarak çözülmüştür. HAD analizi sonucunda normal kuvvet ve yunuslama momenti katsayıları zamana bağlı olarak elde edilmiştir. Analiz sonuçları deney verileri ile birlikte Şekil 16 ve Şekil 17'de verilmiştir. Grafiklerde gösterilen deney sonuçları referans dokümanda verilen hareket denklemleri ve dinamik katsayılar kullanılarak elde edilmiştir.



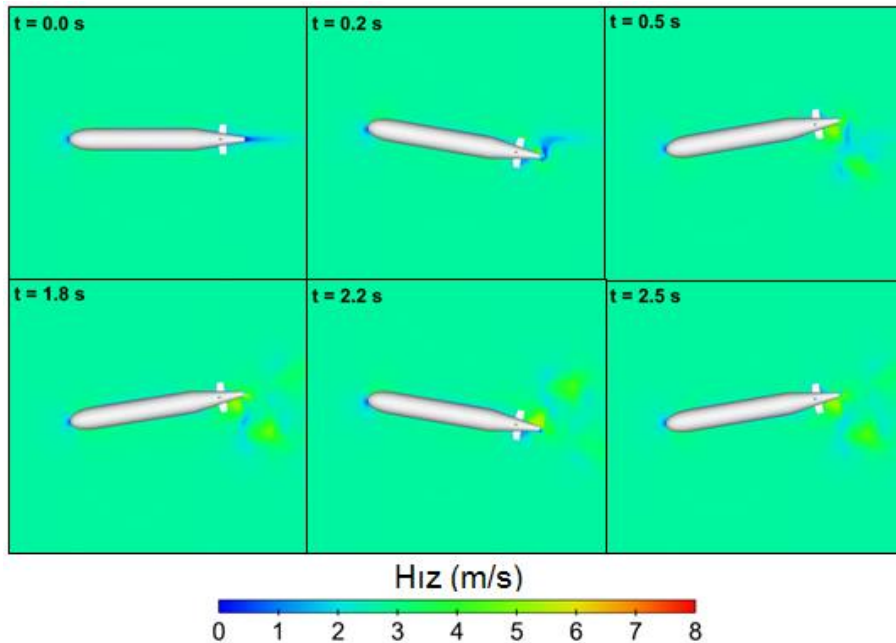
Şekil 16: Kombine hareket için normal kuvvet katsayısı değerlerinin zamanla değişimi [Kimber, Scrimshaw]



Şekil 17: Kombine hareket için yunuslama momenti katsayısı değerlerinin zamanla değişimi [Kimber, Scrimshaw]

HAD analizi sonuçları frekans değeri ve faz açısından deney verileri ile uyumludur. Genlik değerleri ise kuvvet katsayısı için deney verileri ile tutarsızken, moment katsayısı değerleri ile deney verileri arasında %15'in altında farklılık belirlenmiştir. Bu durum kuvvet-moment ilişkisine uyuşmamaktadır. HAD yöntemleri ile elde edilen normal kuvvet katsayısı değerleri deney verilerinden farklı iken yunuslama momenti katsayısı değerlerinin deney verileri ile tutarlı olması, basınç merkezi konumunun da deney verilerinden farklı hesaplandığını göstermektedir. Diğer bir deyişle moment katsayısı HAD sonuçları, deney verileri ile rastgele bir tutarlılık sağlamıştır. Bu sebeple kombine hareket için uygulanan bu hidrodinamik modelleme yönteminin doğruluk seviyesi, ancak ön tasarım aşamasında kullanılabilir düzeydedir.

Ayrıca HAD analizi sonucunda akış hacminde oluşan hız dağılımı zamana bağlı olarak incelenmiştir. Akış hacmi içerisinde farklı zamanlardaki hız dağılımını Şekil 18'de gösterilmiştir.



Şekil 18: Farklı zamanlarda kombine hareket analizi için akış hacmi hız dağılımı

DEĞERLENDİRMELER

Bu çalışmada hidrodinamik su-altı araçları için düzlemsel hareket testinin HAD yöntemleri ile modellenmesi amaçlanmıştır. Bu doğrultuda ilk olarak çekme testi HAD yöntemleri ile modellenmiş ve modelleme yöntemi deney verileri ile doğrulanmıştır. Bu doğrulama çalışmasında DARPA ve Autosub denek-taşı modelleri kullanılmıştır. Daha sonra benzer HAD yöntemleri ile Autosub denek-taşı modeli için düzlemsel hareket testi kapsamındaki kaldırma ve kombine hareketler modellenmiştir.

Kaldırma hareketi HAD analizi sonuçları genlik değerleri, frekans değeri ve faz açısından deney verileri ile uyumludur. Analizler sonucunda kaldırma hareketi için kullanılan HAD modelleme yönteminin detay tasarım aşamasında kullanılabilirlik seviyesinde olduğu değerlendirilmiştir.

Kombine hareket HAD analizi sonuçları frekans değeri ve faz açısından deney verileri ile uyumludur. Genlik değerleri ise kuvvet katsayısı için deney verileri ile tutarsızken, moment değerleri için deney tutarlıdır. Deney verileri üzerindeki belirsizliklerle birlikte değerlendirildiğinde, bu çalışmada kullanılan HAD modelleme yönteminin, ön tasarım aşamasında kullanılabilirlik seviyesinde olduğu değerlendirilmiştir. Detaylı hidrodinamik tasarım aşamasında, hidrodinamik testlerin yapılması kaçınılmazdır.

Kaynaklar

FLUENT, 12.0, 2009 . *User's Guide*. s.l. : ANSYS.

Griffiths, G., et al. *Open Ocean Operational Experience with the Autosub-1 AUVs*. Southampton, UK : Southampton Ocean Centre.

Groves, N.C., T.T., Huang ve Chang, M.S. 1989. *Geometric Characteristics of DARPA SUBOFF Models*. USA : David Taylor Research Center.

Ikeda, Y., Katayama, T. ve Okumura, H. 2000. *Characteristics of Hydrodynamic Derivatives in Maneuvering Equations for Super High-Speed Planning Hulls*. Seattle, USA : Tenth International Offshore and Polar Engineering Conference.

Kimber, N.I. ve Scrimshaw, K. H. *Hydrodynamic Testing of A 3/4 Scale Autosub Model*. Hampshire, UK : Defence Research Agency.

Millard, N.W., et al. *Remote Presence in the Marine Environment with the Autosub-1 AUV*. Southampton, UK : Southampton Oceanography Centre.

Philips, A., Furlong, M. ve Turnock, S.R. 2007. *The Use of Computational Fluid Dynamics to Determine Dynamic Stability of an Autonomous Underwater Vehicle*. Southampton : University of Southampton.

Roddy, R. F. 1990. *Investigation of The Stability and Control Characteristics of Several Configuration of The DARPA Suboff Model From Captive-Model Experiments*. Bethesda, Maryland : David Taylor Research Center.