



Hydroacoustical investigation on an generic underwater vehicle using Lighthill-Curle

Emre Güngör*

Department of Mechanical Engineering, Istanbul Technical University, Gumussuyu, 34396, Turkey

Highlights:

- Computational Fluid Dynamics
- Noise Sources
- Lighthill Curle Method

Keywords:

- Hydroacoustics
- Lighthill
- Sound propagation
- Noise

Article Info:

Research Article
Received: 31.01.2018
Accepted: 25.07.2018

DOI:

10.17341/gazimmfd.460531

Correspondence:

Author: Emre Güngör
e-mail:
emregungor@hotmail.de
phone: +90 544 740 2750

Graphical/Tabular Abstract

The flow noise generated by a generic underwater vehicle is modeled and solved in a numerical environment. By using the Large Eddy Simulation (LES), the hydrodynamic analysis is performed using the finite volume methods and the acoustic analogies modeling the sound propagation. Sound pressure levels, sound direction, noise spectra and acoustic trace are found in the fluid environment. By using the pressure-based commercial code, the flow dynamics equations are solved in filtering process and the pressure obtained from hydrodynamic solution is defined as an acoustic source. Along with this, in order to be able to verify the method, a numerical process was created which will be evaluated considering the experimental studies in the literature. The numerical results of the thrust and torque curves at different rpms and speeds for the 4382 propeller were compared with test data. In addition, the amplitude levels of the noise harmonics generated by the VP1304 propeller are obtained by hybrid method at the receivers in the numerical environment and the results are compared with the test data. With the verification of the current method, the noise characteristics of the underwater vehicle were found by the Lighthill-Curle method and the classification of noise sources was performed using hydrodynamic sources. Thus, the feasibility and application of current work, which is an important criterion in the design and development phases, has been demonstrated and developed in this paper. As given in Figure A. the noises from propulsion can be implemented to the Lighthill approach to find the main noise characteristics of the vehicle in a numerical manner.

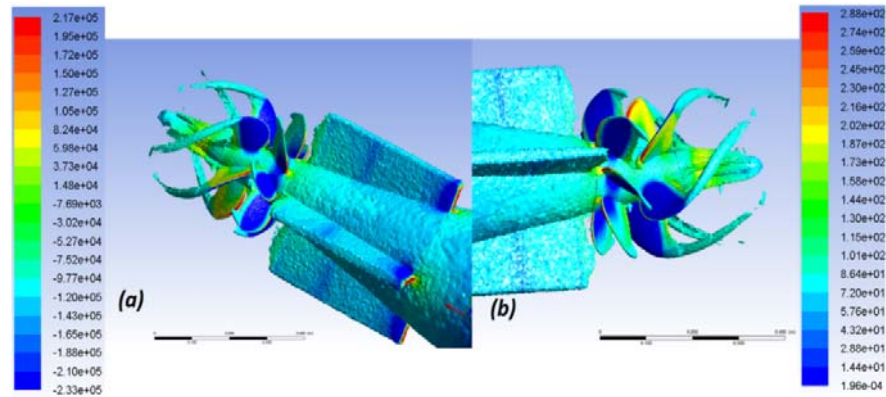


Figure A. The noises existing from propulsion system

Purpose: This section should state the purpose of the research. Times New Roman fonts 9 pts

Theory and Methods:

Lighthill-Curle method is an acoustical approach to find the noise characteristics of an moving object underwater. This method can be used to visualize the whole spectrum range and the proper

Results:

The dominant noise sources are from propeller and wake region, so acoustical analogy can be used easily.

Conclusion: Experimental validation has to be provided further to compare noise characteristics of vehicle



Jenerik sualtı aracı üzerinde Lighthill-Curle yöntemi ile hidroakustik incelemeler

Emre Güngör*^{ID}

İstanbul Teknik Üniversitesi, Makina Fakültesi, Gümüssuyu, İstanbul, 34396, Türkiye

Ö N E Ç I K A N L A R

- Sualtı hidrodinamiği ve sayısal akışkanlar dinamiği ile deneysel doğrulamalı analizleri
- Sualtı gürültü kaynaklarının sayısal analizi
- Lighthill-curle yöntemi ile sualtı akustiği spektrumunun çözümü

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 31.01.2018

Kabul: 25.07.2018

DOI:

10.17341/gazimmfd.460531

Anahtar Kelimeler:

Hidroakustik,
Lighthill,
ses yayılımı

ÖZET

Jenerik bir sualtı aracının yaymış olduğu akış gürültüsü modellenmiş ve sayısal ortamda çözülmüştür. Büyük Burgaç Benzetimi (LES) ile hidrodinamik çözümlemenin gerçekleştirildiği sonlu hacim yöntemleri ve ses yayılımının modellendiği akustik analogiler birlikte kullanılarak akışkan ortamındaki ses basınç seviyeleri, ses yönelimi, gürültü spektrumları ve akustik iz bulunmuştur. Doğruluğun artırılabilmesi için yoğun ağ yapısı kullanılmış ve ikinci dereceden ayrıklaştırmalar gerçekleştirilmiştir. Basınç tabanlı ticari koddan faydalanılarak akış dinamiği denklemleri filtrelenerek çözülmüş ve buradan elde edilmiş basınç bilgisi akustik kaynağı olarak tanımlanmıştır. Bununla birlikte izlenen yöntemin doğrulanabilmesi için literatürde test verisi mevcut olan denektaşı çalışmaları ele alınarak buna uygunluk gösterecek sayısal kurgu oluşturulmuştur. Hidrodinamik test verileri mevcut olan 4382 pervanesinin farklı hız ve devirlerdeki itme ve tork grafikleri sayısal çözümleme ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca VP1304 pervanesinin oluşturduğu gürültü harmoniklerine ait olan genlik seviyeleri, sayısal ortamdaki alıcı noktalarında hibrit yöntem ile bulunarak sonuçlar test verileri ile karşılaştırılmıştır. Yöntemin doğrulanması ile birlikte sualtı aracının yaymış olduğu gürültü karakteristiği Lighthill-Curle yöntemi ile sayısal olarak bulunmuş ve hidroakustik olarak gürültü kaynaklarının sınıflandırılması gerçekleştirilmiştir. Böylece tasarım ve geliştirme aşamalarında önemli bir kriter olan hidroakustik çalışmanın yapılabilirliği ve uygulanışı bu makalede gösterilmiştir.

Hydroacoustical investigation on an generic underwater vehicle using Lighthill-Curle

H I G H L I G H T S

- Experimental validation analysis with underwater hydrodynamics and computational fluid dynamics
- Numerical analysis of underwater noise sources
- Solution of underwater acoustics spectrum by Lighthill-curle method

Article Info

Research Article

Received: 31.01.2018

Accepted: 25.07.2018

DOI:

10.17341/gazimmfd.460531

Keywords:

Hydroacoustics,
Lighthill,
sound propagation

ABSTRACT

The flow noise generated by a generic underwater vehicle is modeled and solved in a numerical environment. By using the Large Eddy Simulation (LES), the hydrodynamic analysis is performed using the finite volume methods and the acoustic analogies modeling the sound propagation. Sound pressure levels, sound direction, noise spectra and acoustic trace are found in the fluid environment. In order to increase the accuracy, fine mesh structure was used and second order discretization was applied to the volume. By using the pressure-based commercial code, the flow dynamics equations are solved in filtering process and the pressure obtained from hydrodynamic solution is defined as an acoustic source. Along with this, in order to be able to verify the method, a numerical process was created which will be evaluated considering the experimental studies in the literature. The numerical results of the thrust and torque curves at different rpms and speeds for the 4382 propeller were compared with test data. In addition, the amplitude levels of the noise harmonics generated by the VP1304 propeller are obtained by hybrid method at the receivers in the numerical environment and the results are compared with the test data. With the verification of the current method, the noise characteristics of the underwater vehicle were found by the Lighthill-Curle method and the classification of noise sources was performed using hydrodynamic sources. Thus, the feasibility and application of current work, which is an important criterion in the design and development phases, has been demonstrated and developed in this paper.

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: emregungor@hotmail.de / Tel: +90 544 740 2750

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Yüksek hızlı bilgisayar teknolojisindeki gelişmeye bağlı olarak hesaplamalı yöntemler ivme kazanmış durumdadır. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) çözümlerinin gelmiş olduğu günümüz koşullarında birçok akış kaynaklı mühendislik probleminin çözülebilmesi ticari yazılımlar ile mümkün olmaktadır. En gerçekçi çözümü türbülans ölçeklerinin modele ihtiyaç duyulmaksızın çözüldüğü Doğrudan Sayısal Benzetim (Direct Numerical Simulation-DNS) metodu vermektedir. Ancak özellikle yüksek Reynolds sayıları bulunan fiziksel durumlarda bilgisayar teknoloji kapasitesi çok zayıf kalmakta, düşük Reynolds sayıları ve basit geometriler için uygulanabilir gözükmemektedir. HAD için yaygın kullanılan yöntemlerden diğeri ise Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes (RANS) metodudur. Burada da sadece ortalama akış bilgisi ele alındığı ve türbülans modellerine yüksek bağımlılık söz konusu olduğu için akustik alanda kullanımı sınırlıdır. Bunun yerine zamana bağlı RANS çözümleri daha yaygın kullanılmaktadır. Büyük ölçekli yapıların doğrudan çözüldüğü ve küçük ölçekli olanların modellenerek filtreye tabi tutulduğu bir diğeri yöntem Büyük Ölçekli Girdap Simülasyonudur (Large Eddy Simulation, LES). RANS ve LES çözümlerinin hibrit kullanıldığı Bağımsız Girdap Simülasyonu (Detached Eddy Simulation, DES) da tercihler arasındadır. Tüm bu yöntemlerin başarısını kendi içerisinde karşılaştırabilmek için deneysel veriler ile birlikte çalışmak gerekmektedir. Örnek olarak HAD yöntemlerinin hidrodinamik alanında RANS tabanlı değerlendirilmesi Dhinesh [1] tarafından pervane üzerinde gerçekleştirilmiştir ve tutarlı sonuçlar elde edilmiştir. Benzer bir sualtı problemi için HAD yazılımlarında türbülans modelleri karşılaştırılarak dümen gibi unsurların etkileri sürece dahil edilebilir ve verim karşılaştırması metodları arasında gerçekleştirilebilir [2]. Her ne kadar sisteme ait dümen gibi takıntılar önemli olsa da kavitasyon problemi bazı durumlar için önemli olabilmekte ve sürece dahil edilmesi gerekmektedir [4]. Ayrıca bu tarz akışlarda geçerli olan homojen olmayan çift fazlı akışlar için HAD çözümleri genişletilerek Güngör [3] tarafından sunulmuş ve basınç salınımları bilgisi gürültü spektrumunu elde etmek üzere hesaplanmıştır. Ancak bu noktada zamana bağlı çözümler, homojen olmayan etkileri gözlemleyebilmek adına önemli olmaktadır. Çünkü yüzeylerdeki basınç dağılımları zamandan bağımsız düşünülmemelidir [5]. Ayrıca, akış ortamındaki türbülanslı koşullardan doğan saçılmaların oluşturacağı verim kayıpları oldukça önemlidir ve benzetilerek kaynakları gösterilebilmelidir [6]. Türbülanslı yapıların ilk meydana geldiği ve sınır tabakanın oluşmaya başladığı bölge gövde üzerinde olduğu için HAD çalışmaları ile uyumlu şekilde gövde formu oluşturulmalıdır [7]. Diğer yandan hava ortamındaki akışlara örnek olarak Sovani ve Chen [8] verilebilir. Burada aeroakustik hesap öncesinde, otomobil yağmur oluğuna (rain gutter) ait aerodinamik hesap HAD yazılımında gerçekleştirmiştir. Sonuçları sayısal ortamda Ffowes Williams Hawkings (FWH) modülüne besleyerek gürültü tahmini yapmıştır.

Ayrıca Rumpfkeil [9] çalışmasında aerodinamik ses yayılımını farklı teknikler uygulayarak test verilerinden yararlanmak suretiyle karşılaştırmıştır. Bunlardan farklı olarak, Sonlu Elemanlar Metodu (FEM) yerine Sınır Elemanları Metodu (BEM) tekniği temelli hidrodinamiğin ve hidroakustiğin tümleşik olarak modellemesi Salvatore ve diğ. [10] tarafından yapılmıştır. Diğer yandan gürültü karakteristiğinin belirlenmesi adına kimi uygulamalarda çift fazlı akışlar kullanılarak sonuçlar karşılaştırmalı sunulmaktadır. Çift fazlı akışın varlığı neticesinde pervaneye ait verim kayıpları gözlenmekte ve gürültü seviyesi artmaktadır [11]. Vibroakustik etkiler ele alındığında ise gürültü seviyesi daha da artmakta ve sürecin analiz ile benzetilmesi çok zorlaşmaktadır. Bu nedenle akış ve titreşim kaynaklı gürültünün analiz ortamında ayrı değerlendirilmesi tercih edilmektedir [12]. Bununla birlikte tam ölçekli modellerin deneysel ölçümlerini gerçekleştirmek her zaman zor olmuştur. Örnek olarak gövde boyutlarının oldukça büyük olduğu sistemlerdeki akış ve titreşim kaynaklı gürültüler baskın olmakta, spektrumlarının birbirinden ayrıştırılması çok zorlaşmaktadır [13]. Hidroakustik çözümlere gelindiğinde ise gürültü tahminleri analiz ortamında gerçekleştirilebilmektedir. Bilgisayar kapasitesi gereksinimi bakımından, hacim ayrıklaştırılmalı metodlar yerine Green fonksiyonu kullanarak integral çözümüne dayanan Lighthill yaklaşımı, Curle formülasyonu, FWH yaklaşımı, Kirschhoff Metodu ve bunların uzantıları genelde tercih edilmektedir. Ancak basitlikten uzak geometriler ve yapısal etkileşimler söz konusu olduğu zaman hacim ayrıklaştırılmalı metodlara (sonlu farklar, süresiz Galerkin, sonlu hacim, sonlu elemanlar yöntemi) başvurmak gerekir. Bu yöntemlerde doğrusallaştırılmış Euler ve Lighthill denklemleri çözülmektedir. Oberai ve diğ. [14] tarafından Lighthill'in homojen olmayan zayıf (weak, variational) formdaki dalga yayılım denklemleri ele alınarak ağırlıklı artık metodu (weighted residual method) kullanarak sonlu elemanlar yöntemine uygulanabilir hale dönüştürülmüştür. Burada zayıf formdaki dalga denklemi bir test fonksiyonu ile çarpılmakta ve tüm hacim boyunca integre edilmektedir. Böylece bilinmeyen basınç gibi terimler matris çözümlerinden bulunabilmektedir.

Bununla birlikte sessizlik isterinin önemli olduğu tüm çalışmalarda analiz ve test süreçlerine yer verilmektedir, ancak kimi durumlarda analiz çalışmaları testlerin önüne geçerek kolaylıklar sunmaktadır. Sualtı araçlarının yaymış olduğu akustik gürültünün sayısal olarak belirlenmesi tasarım sürecinde işgücünün verimli kullanılması ve maliyetler anlamında önemli olmaktadır. Tasarımda ortaya çıkacak farklı seçenekler gürültü performansı açısından değerlendirilerek mevcut seçenekler en aza indirgenilmekte ve böylece nihai tasarıma erişilebilmektedir. Her ne kadar test koşulları akustik gürültünün belirlenmesi amacıyla kullanılıyor olsa da kontrollü bir ortamın oluşturulması yüksek maliyetlere sebep olmaktadır. Analiz sürecinde ise kolaylıkla problem benzetilerek tasarıma yönlendirme yapılabilmektedir. Bir çok iterasyona gerek duyulan tasarım durumlarında akustik

analizlerin testlere göre avantajı oldukça fazla olmaktadır. Ancak, literatürde sayısal akustik analizler üzerinde gerçekleştirilmiş çalışmaların çoğu sualtiler araçları özelinde değildir. Ayrıca gövde ve pervanenin hidrodinamik olarak çözümlenmiş akustik analiz ile hibrit çözümün gerçekleştirildiği çalışmalar az sayıdadır. Ters dönüşlü pervanelerin bulunduğu sualtiler araçları her zaman gürültü problemleri ile karşı karşıyadır ve tasarım sürecinde akustik analizler ile desteklenmelidir. Literatürdeki çalışmalar genelde FWH yaklaşımı temelli olduğundan dolayı şuanki çalışmada uygulanan Lighthill-Curle çözümlemesi bu boşluğu dolduracak niteliktedir. Diğer yandan şu anki çalışmada test verisi ile doğrulanmış modeller kullanılmıştır ve makalenin literatüre pratik ve teorik katkılar sunacağı düşünülmektedir. Kullanılan metod ve kurgu farklı sistemler üzerinde uygulanarak etkinliği gözlemlenebilir ve sonuçlar irdelenerek tasarım sürecine yönlendirmeler yapılabilir.

2. SAYISAL ÇÖZÜM YÖNTEMLERİ (NUMERICAL SOLUTION METHODS)

2.1. Akış Denklemleri ve Sayısal Çözüm (Flow Equations and Numerical Solution)

Akışkanlar dinamiği için geçerli olan bu korunum denklemleri sonsuz küçüklükteki sabit hacim akış elemanına uygulanabilir. Böylece kütle korunumu Eş. 1’de verildiği üzere ,

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

olarak tanımlanır ve denklemdeki u akışkan parçacığının hızını, ρ ise yoğunluğunu gösterir. Momentumun korunumu ise Eş. 2’deki gibi denkleme dökülebilir ve bu eşitlikteki p basınç bilgisini σ_{ij} viskoz gerilme tensörünü ve f harici uygulanmış kuvvetleri tanımlamaktadır.

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial (p \delta_{ij} - \sigma_{ij})}{\partial x_j} + f_i \quad (2)$$

Viskoz gerilme tensörü için uygun bir model varlığında bu denklemler Navier-Stokes denklemlerine dönüşmektedir. Momentum ve kütle taşınımı büyük oranda büyük burgaçlar aracılığı ile olur. Küçük burgaçlar geometriye bağlı değilken, büyük ölçekli olanlar geometri ve sınır koşullarından çok etkilenir. Büyük ölçekli yapıları ihtiva eden akış hız alanını bulabilmek için filtreleme yapılması gerekmektedir. Filtrelenmiş hız Eş. 3’deki gibi gösterildiğinde lokal ortalama ve kesme uzunluğunu içeren Kernel fonksiyonundan $K(x, x')$ faydalanılmaktadır.

$$\bar{u}_i(x) = \int K(x, x') u_i(x') dx' \quad (3)$$

Filtrelenmiş ölçekten daha büyük burgaçlar çözümlenirken, daha ufak olanlar modellenmektedir. Sıkıştırılmaz akış

filtrelemeye tabi tutulduğunda momentum ve kütle denklemi sırasıyla Eş. 4 ve 5’de tanımlanmıştır.

$$\frac{\partial \bar{\rho} \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{\rho} \bar{u}_i \bar{u}_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (4)$$

$$\frac{\partial \bar{\rho} \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (5)$$

Filtre altı küçük ölçek Reynolds Gerilmesi (Subgrid-scale Reynolds Stress) Eş. 6’daki gibi,

$$\tau_{ij}^s = -\rho \left[(\bar{\rho} \bar{u}_i \bar{u}_j) - \bar{u}_i \bar{u}_j \right] \quad (6)$$

modellenmesi gereken küçük ölçekli yapıların etkileşimi neticesinde ortaya çıkan momentum akısını tarifler. Smagorinsky [15] Eş. 7’de bağıntısını önermiştir.

$$\tau_{ij}^s - \frac{1}{3} \tau_{ij}^s \delta_{ij} = \mu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (7)$$

Buradaki denklemin sağ tarafı, büyük ölçeklerin ve burgaç viskozitesinin gerilim oranını içermektedir. Basınç tabanlı çözücü kullanılarak hız alanı basınç düzeltme denkleminde bulunabilmiştir. Kayıcı ağ yöntemi sayesinde pervanenin dönüşü modellenebilmiştir. Döner sisteme göre oluşan bağıl hız Eş. 8’de süreklilik denkleminde yerine konursa Eş. 9 dakine benzer elde edilir.

$$\mathbf{u}_r = \mathbf{u} - \boldsymbol{\Omega}_p \times \mathbf{r} \quad (8)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_r}{\partial x_i} = S_m \quad (9)$$

Pervane açılma hızı $\boldsymbol{\Omega}_p$ olarak gösterilmiştir. Momentum denkleminin bağıl hız cinsinden yazarken denklemin sağ tarafı Eş. 10’daki halini alır.

$$\frac{\partial \rho \mathbf{u}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \mathbf{u}_r) + 2\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{u}_r + \boldsymbol{\Omega} \times \boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{r} + \rho \frac{\partial \boldsymbol{\Omega}}{\partial t} \times \mathbf{r} \quad (10)$$

2.2. Ses Yayılm Denklemleri ve Sayısal Çözüm (Acoustical Equations and Numerical Solution)

Kütle korunumu denkleminin zamana göre türevini alıp momentum denkleminin diverjansını taraf tarafa çıkartırsak Eş. 11’de tanımlanabilir.

$$\frac{\partial^2 \rho}{\partial t^2} = \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j} \left(\frac{\partial(\rho \delta_{ij} - \sigma_{ij} + \rho u_i u_j)}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial f_i}{\partial x_i} \quad (11)$$

Bu denklemin her iki tarafından terim çıkartılması yapılrısa Eş. 12'de oluşan denklem Lighthill analojisi eşitliği olarak geçmektedir.

$$\frac{1}{c_o^2} \frac{\partial^2 p'}{\partial t^2} - \frac{\partial^2 p'}{\partial x_i^2} = \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j} (\rho u_i u_j - \sigma_{ij}) - \frac{\partial f_i}{\partial x_i} + \frac{\partial^2}{\partial t^2} \left(\frac{p'}{c_o^2} - \rho' \right) \quad (12)$$

Curle [9] duvar varlığındaki akışlar için Lighthill analojisini genişletmiştir. Curle dalga denklemini çözebilmek için sabit bir yüzey olan S ve onu çevreleyen hacme V Green fonksiyonu ve hacim/yüzey integralleri uygulanır. Sonuçta Eş. 13 integrallerini içeren çözüme erişilir.

$$p'(\bar{x}, t) = c_o^2 \rho'(\bar{x}, t) = \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j} \int_V \frac{T_{ij}}{4\pi r} dV + \frac{\partial}{\partial t} \int_S \frac{\rho u_i n_i}{4\pi r} dS - \frac{\partial}{\partial x_j} \int_S \frac{p \delta_{ij} - \sigma_{ij} + \rho u_i u_j}{4\pi r} n_i dS \quad (13)$$

Sağ taraftaki ilk integral quadrupol terimidir ve akış hacmi bölgesinde tanımlıdır. İkinci terim kütle akı eklentisinin zamanla değişimini gösterdiğinden monopol olarak adlandırılır. Son integral ise yüzey boyunca alınmıştır ve akışın yüzey üzerinde uyguladığı kuvvete duvarın göstermiş olduğu tepki olarak tanımlanır. Bu kuvvetle birlikte gelişen ses dipol kaynağı oluşturur. Quadrupol kaynakların oluşturulabilmesi için duvar yüzeyleri gerekmez ve hacim içerisindeki hızın zamanla değişiminin bilinmesi yeterlidir. Dipol kaynaklar durağan yüzeylerde türbülanslı sınır tabakaların gelişmesi ile doğmaktadır ve zamana göre basınç verisinin bilinmesini gerektirir.

Hidrodinamik çözümün gerçekleştirildiği ve kaynak terimlerin bulunduğu tüm analizler ANSYS© sonlu hacim yazılımında gerçekleştirilmiştir [16]. Akış hacmi için gövdenin uzunluğunun 10 katı uzunluğundaki silindirik yapı oluşturulmuştur ve pervane dönüşünü benzetebilmek maksatlı pervane çapını %5 oranında aşan boyuttaki silindirik hareketli referans yüzeyleri modellenmiştir. Normal hız vektörlerinin sıfırlandığı duvar şartı, sabit hız bilgisinin beslendiği giriş-hızı şartı ve sabit basıncın uygulandığı çıkış-basıncı şartı sayısal analizde tercih edilmiştir. Hidrodinamik çözümleme sonucunda elde edilmiş olan yüzeylerdeki basınç kaynak bilgisi SIEMENS Virtual.LAB© yazılımına yüzeylerdeki sınır şartı olarak atanmıştır [17]. Akustik hacmin dış yüzeyi ise tüm ses dalgasının absorbe edileceği şekilde sınır şartı olarak atanmış ve konvektif yaklaşım ile ses dalgasının geri yansımaları önlenmiştir. Akustik hacim için akış hacmindeki benzer boyuttaki yapı tercih edilmiştir.

3. AKUSTİK METOD DOĞRULAMA ÇALIŞMALARI (ACOUSTICAL METHOD VALIDATIONS)

3.1. 4382 Pervanesi Üzerinde Doğrulamalar (Validation on Propeller 4382)

Akustik denklemlerin çözümünde gerekli olan ses kaynağı bilgisi, akış dinamiği çözümlerinde elde edilmiş olan basınç verisinden elde edilmektedir. Bu nedenle ilk aşamada akış dinamiğinin sayısal benzetimi ve modellenmesi doğrulanmalıdır. Bu maksatla Boswell [18] tarafından testleri gerçekleştirilmiş olan 4382 pervanesinin verileri sayısal sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

Pervanenin performansını boyutsuz terimler cinsinden simgeleyen parametreler ilerleme katsayısı J , itme katsayısı K_t ve tork katsayısı K_q 'dir. Boyutsuzlaştırılmış olan bu parametrelerde itme kuvveti T , tork değeri Q , pervane çapı D ile gösterilmiştir. Eş. 14'deki gibi tanımlanabilir.

$$K_t = \frac{T}{\rho \Omega_p^2 D^4} \quad K_q = \frac{Q}{\rho \Omega_p^2 D^5} \quad J = \frac{u}{\Omega_p D} \quad (14)$$

Testi gerçekleştirilmiş olunan 4382 pervanesinin çapı 0.305 m, çalışma devri ise 468 d/dak olarak sayısal ortamda benzetilmiştir. Akış hacmi içerisinde yaklaşık 8 milyondan oluşan yapısal olmayan (unstructured) ağ örgüsü Şekil 1'dekine benzer şekilde oluşturulmuştur.

Akış hacmi pervanene çapının on katı kadar genişlikte tutulmuş, girişe sabit akış hızı tanımlanmış, uzak alan sabit su basıncında tanımlanmıştır. Yüzeylerde $y+ < 3.0$ olacak şekilde sınır tabaka oluşturulmuştur. Basınç tabanlı çözücü de LES ile zamana bağlı olarak sonuçlar elde edilmiştir. Her ne kadar zaman ortalamalı daimi koşulların uygulandığı çözümleme yeterli olsa da akustik anlamda veri toplayabilmek için zamana bağlı çözücülere ihtiyaç duyulmaktadır. Ayrıklaştırmalar ikinci derece tercih edilerek doğruluk artırılmıştır (Şekil 2).

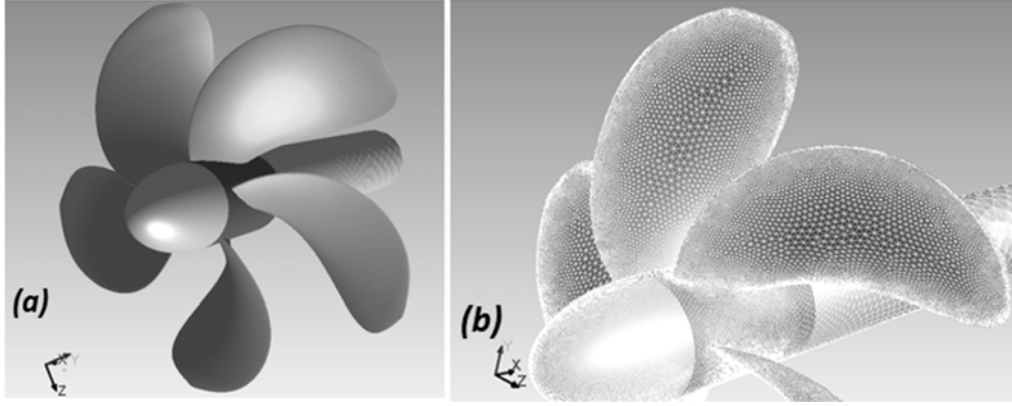
Hesaplamalar deney verileri ile oldukça uyumlu olmakla birlikte yalnızca düşük ve yüksek ilerleme katsayılarında deney sonuçlarından bir miktar sapma gözlemlenmektedir. Bunun sebebi yüksek devir veya yüksek akış hızlarında kanat üzerindeki ayrılmaların fazlalığı ve akışkanın kanat üzerindeki tutunma karakterinin aşırı düzensizliğidir.

3.2 VP1304 Pervanesi Üzerinde Doğrulamalar (Validation on Propeller 4382)

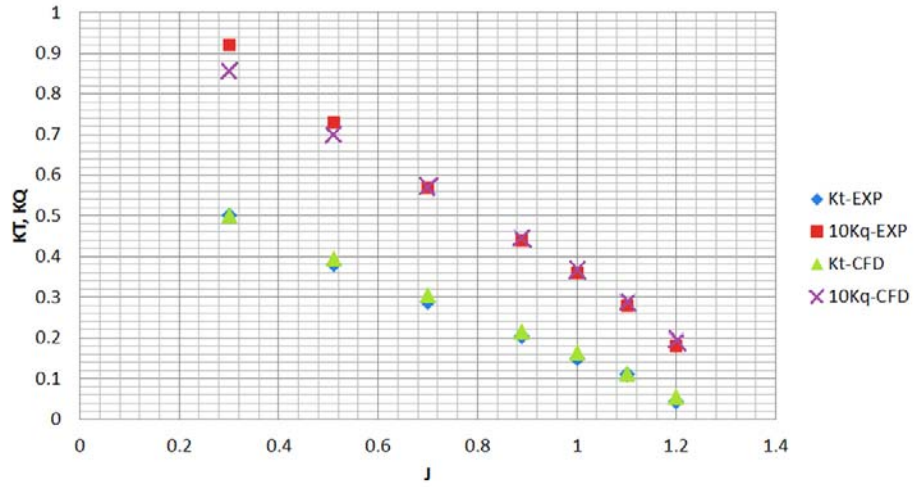
Eğik bir shaft üzerinde dönen pervanenin testleri Potsdam [19] tarafından kavitasyon tüneli içerisinde gerçekleştirilmiştir. Şekil 3'te gösterilen noktalara hidrofona alıcıları yerleştirilerek basınç salınımları ölçülmüştür. Teste özgü parametreler Tablo 1'de verilmiştir. Akış koşulları ve Hareketli referans ağ çözümü uygulanarak pervanenin dönmesi modellenmiştir. İlerleme katsayısı ve pervane devri gözetilerek her operasyon noktası için tünel içerisindeki akış hızı belirlenmiş ve sınır şartı olarak akış

hacmine sunulmuştur. Akış hacmine ait en dış yüzey ise sabit basınç ile tanımlanarak uzak bölgenin su ortamına benzetimi sağlanabilmiştir. Analiz ağ örgüsü oluşturulurken kavitasyon tüneline ait duvar etkileri minimum seviyede olduğu için duvar detaylarına yer verilmeden pervane doğrudan akış ortamına taşınmıştır. Yaklaşık yedi milyon adet hücreye sahip yapılı olmayan (unstructured) tetrahedral ağ örgüsü tipi tercih edilmiş, LES çözümü uygulanmış ve zamana bağlı

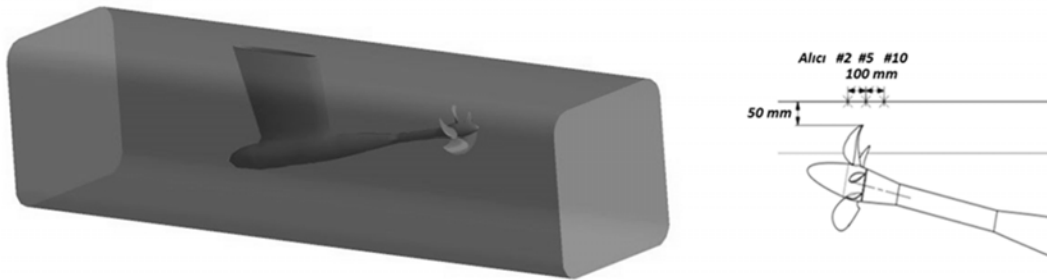
olarak sonuç alınmıştır. Kanat yakınlarında, firar-hücum kenarlarında ve göbek bölgesinde oldukça sıkı ağ örgüsü oluşturulmuş ve hassasiyet artırılmıştır. Zaman adımı, saniyede 1° kanat dönüşü olacak şekilde seçilmiştir. Daha ufak zaman adımları çözüm süresini artırmakta olduğu için tercih edilmemektedir. 16 işlemciye sahip bir bilgisayarda çözüm süresi yaklaşık 80 saattir.



Şekil 1. a) Modellenmiş 4382 pervanesi ve b) üzerinde uygulanan ağ örgüsü (Modelled 4382 propeller and mesh around)



Şekil 2. 4382 pervanesinin deney ve sayısal sonuçlarının boyutsuz katsayılar ile karşılaştırılması (Comparison of numerical and experimental results)

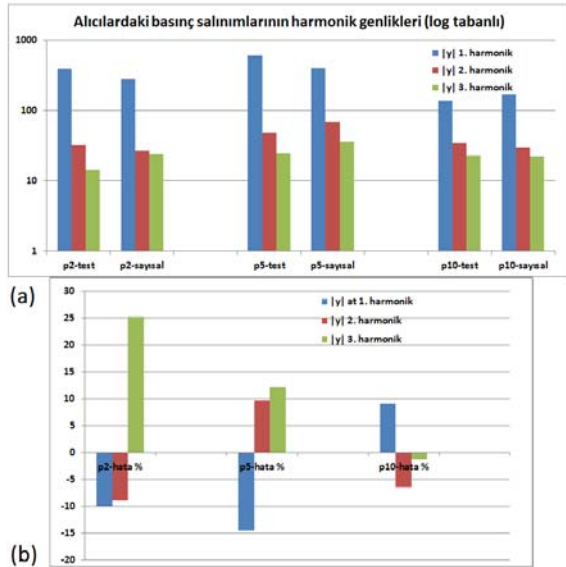


Şekil 3. VP1304 pervanesinin kavitasyon tüneline içerisinde gösterimi ve alıcıların yerleşimi (Representation of VP1304 propeller in cavitation tunnel and position of transducers)

HAD çözümleri kaynak bilgisi kullanılmış ve belirli noktalara alıcılar yerleştirilerek Lighthill-Curle analojisinin doğruluğu sınanmıştır. Hareketli yüzeylerin varlığından dolayı monopol kaynaklar kendisine yer bulmuştur. Kanat geçiş frekansları baskın kaynak olarak kendisini göstermiştir. Quadrupol terimler ise geniş ve yüksek bantta sonuçlara etki etmektedir. Dipol terimler yüzeylerdeki basıncın zamanla değişmesinden oluştuğu için gürültüye önemli katkı sağlamaktadır. Üç adet harmonik genliği kanat geçiş frekanslarında bulunmaya çalışılmıştır.

Tablo 1: Teste özgü özellikler (Parameters for test setup)

Özellikler	Sembol	Boyut	Değer
İlerleme katsayısı	J	-	1.019
Pervane açılmal hızı	Ω_p	1/s	20
Su yoğunluğu	ρ	kg/m ³	997.38
Su kinematik viskozitesi	ν	m ² /s	9.199E-07
Şaft eğiklik açısı	ϕ	°	12



Şekil 4. VP1304 pervanesinin yaydığı harmonik gürültü genliklerinin a) hidroakustik analiz sonuçları ve test verisi ile karşılaştırılması ve b) farklılığın yüzdesel dağılımı (Comparison of amplitude harmonic noise of VP1304 propellers (a) using analytical and test results & (b) error percentage.)

Test tüneli duvarlarına ses yansıtma yeteneği olmayacak şekilde sınır şartı atanmıştır. Uzak alan yoğunluğu, ses hızı ve referans akustik basınç değerleri 1020 kg/m³, 1050 m/s and 10-5 Pa olarak seçilmiştir. Analiz sonuçları ile test verisi Şekil 4'te harmonik tabanlı karşılaştırılmıştır. Birinci (#2) ve ikinci (#5) basınç sensörleri kanat uç noktalarına yakın olduğu için genlikler en yüksek çıkmıştır. İkinci sensöre ait birinci harmonik ve birinci sensöre ait üçüncü harmonik dışında sayısal sonuçlar test verileriyle tutarlıdır. Bununla birlikte ikinci sensördeki yüzdesel hata oranı tüm harmoniklerde yaklaşık benzer seviyeler taşımaktadır. Birinci sensördeki üçüncü harmoniğin analiz ile teşhisi zor

olmakta ve hata oranı artmaktadır. Herşeye rağmen yüzde 25 üzerinde bir farklılık gözlemlenmiştir. Değerlerin dB seviyesinde karşılaştırılması akustik sonuçların anlamlı değerlendirilebilmesine imkan tanımaktadır. Tüm sensörlerdeki ikinci ve üçüncü harmonikler karşılaştırmanın kolay olabilmesi için ölçeklendirilmiştir. Spektrumdaki kanat geçiş frekansları kolayca gözlemlenebilmiştir. Homojen olmayan akış neticesinde pervane kanat uçlarındaki anlık salınımların yüksek mertebede olmasından dolayı birinci harmonikler belli bir miktarda sapma göstermiştir. İkinci harmoniklerin ötesinde ise genliklerin teşhisi oldukça zorlaşmaktadır. Diğer yandan genliklerdeki farklılaşma test verisinden de kaynaklanabileceği değerlendirilmektedir. Her ne kadar dış ortam gürültüsü test içerisinde yok edilmiş olsa da sonuçlara pervanenin su içerisinde çalışması ile birlikte ortaya çıkacak titreşim kaynaklı gürültülerden gelen ilave genlikler dahil olabilecektir. Bu etkilerin varlığı test içerisinde göz ardı edilmiş bulunmaktadır.

3. JENERİK SUALTI ARACINA AİT AKIŞ GÜRÜLTÜSÜ ANALİZLERİ (HYDROACOUSTICAL CALCULATIONS FOR A GENERIC UNDERWATER VEHICLE)

Jenerik olarak oluşturulmuş olan sualtı aracı gövde formu ve Ters Dönüşlü Pervane sistemi (CRP) üzerinde ticari yazılım aracılığı ile sonlu hacim analizleri gerçekleştirilmiştir. Böylece akış dinamiği çözülerek hidroakustik çalışmalar için ses kaynağı bilgisi depolanmıştır. Doğrulaması yapılan metodlar ve parametreler kullanılarak zamana bağlı LES analizleri gerçekleştirilmiş, iki adet pervanenin belli bir devirdeki açılmal dönüşü kayıcı ağ yöntemi ile modellenmiştir. Her zaman adımında önceki zaman adımına ait basınç, hız ve türbülanslı yapı özellikleri kullanılarak çözüme gidilmiştir. Gövde ve pervane sistemine ait katı model Şekil 5'te gösterilmiştir.

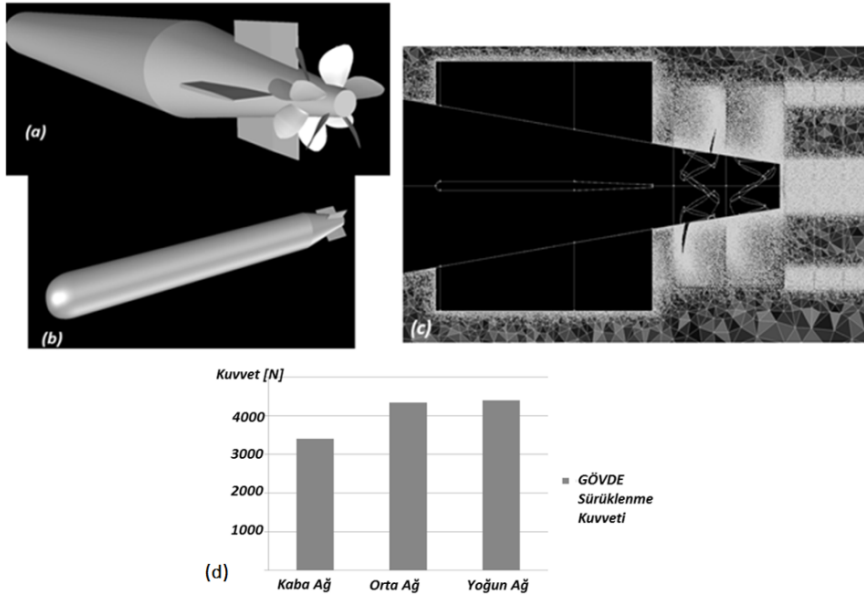
Sualtı aracı gövdesi 5.20 m uzunluğa ve 0.67 m çapa sahiptir. Gövdeye yakın olan 7 kanatlı pervane ön pervane, diğeri 5 kanattan oluşan ise arka pervane olarak adlandırılmıştır. Çapları sırası ile 0.62 m ve 0.58 m'dir. Toplam 4 adet dümeni bulunmakta ancak analiz kapsamında sıfır açı pozisyonu korunmuştur. Sistem 30 kts hız ile ilerlerken ön pervane 650 rpm, arkadaki ise 500 rpm devir ile dönmektedir. Aracının boyunun on katı büyüklüğünde bir akış hacmi seçilmiş ve toplamda 25 milyon hücreli ağ yapısı oluşturulmuştur. Öncesinde, ağ örgüsü hücre sayısına bağımlılığı gözlemlenmek için 16, 25 ve 30 milyon hücreden oluşan üç farklı ağ modeli oluşturularak gövdenin üzerindeki sürüklenme kuvveti karşılaştırılmıştır (Şekil 5). Bu nedenle orta ağ modelinde karar kılınmıştır. Ayrıca pervane tarafında ağ yapısı olabildiğince yoğunlaştırılmış, kanat uçlarından ve göbek bölgesinden kopan ard izi ve girdapları istenildiği şekilde küçük yapıları da dahil ederek yakalayabilmek için Şekil 5'te gösterildiği gibi pervane arkasındaki ağ yapısı inceltirilerek yoğunlaştırılmıştır. Toplamda 10 adet sınır

tabaka atılmış ve birinci katman kalınlığı y^+ değeri 3.5 altında olacak şekilde belirlenmiştir. Ayrıca gövde üzerindeki viskoz etkilerin kuvvetli olması nedeniyle y^+ değeri 1.0 altına çekilmiştir. Pervaneye ait stabil olan tork ve itme değeri elde edene kadar analiz yakınsatılmaya çalışılmıştır. Sonrasında ise 5 tam tur atacak kadar analiz devam ettirilerek hidroakustik analiz için basınç kaydı oluşturulmuştur. Zaman adımı 0.00016 sn seçilmiş ve yaklaşık 1.0 sn kayıt oluşturulmuştur. Akış hacmi olarak 30 m uzunluğunda, 20 m çapında silindirik bir yapı tercih edilirken, pervane dönüşünün benzetildiği silindirik yapı 420 mm çapında oluşturulmuştur.

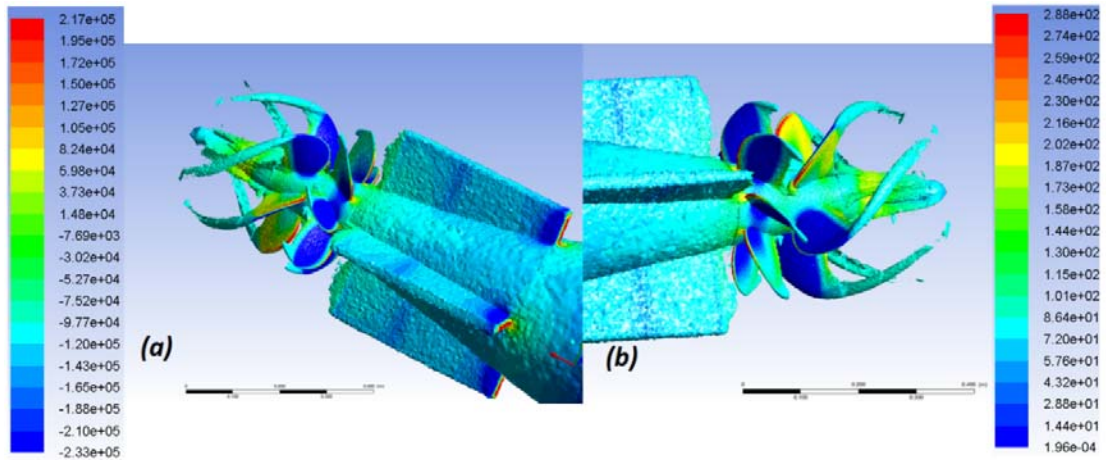
Şekil 6 ve 7 birlikte değerlendirildiğinde, her ne kadar viskoz etkiler oldukça şiddetli ve ıslak alan miktarı fazla olsa da konik yüzeylerden kopan girdaplar incelendiğinde büyük

oranda ayrılmaların gerçekleşmediği gözlemlenmiştir. Bunun nedeni akış hızının ayrılmalara neden olacak denli büyük olmamasıdır. Ayrıca konik yüzey açısı, benzer sualtı araçlarından yola çıkarak paralel düzlem ile 15 dereceden daha düşük açı yapacak şekilde tercih edilmiştir. Akustik ağ örgüsünün etkisini gözlemlemek için kaba ve yoğun örgü modeli oluşturulmuştur. Yoğun ağ yapısı (~1.8 milyon hücre) altında, sadece gövde üzerindeki kaynaklar ele alındığında yaklaşık 90 GB bellek gereksinimi doğmuş ve 16 çekirdekli işlemci kullanılarak 8 saatte çözüm alınmıştır.

10 Hz band çözünürlüğü uygulanabilmiştir. Kaba ağ yapısında (~0.8 milyon) ise yine aynı işlemci kullanılarak 2.5 saatte çözüm alınabilmiştir. 10 Hz çözünürlük bandı bilgisayar gereksinimleri kapsamında zorunlu olmuştur. Sonuçlardan görüleceği üzere kaba ağ yapısının düşük ve



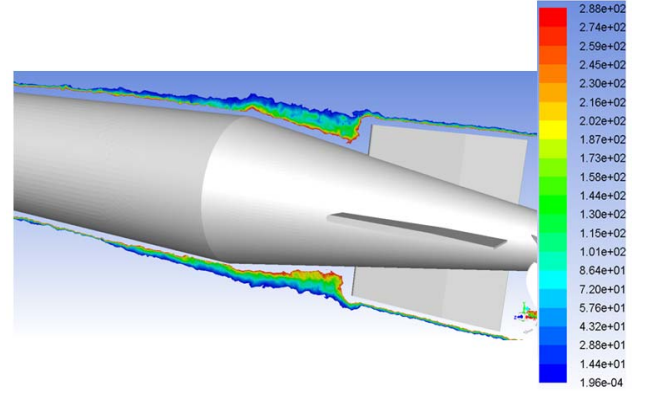
Şekil 5. Sualtı aracının a) pervaneli b) pervanesiz jenerik modelleri c) hacme ait ağ örgüsü ve d) ağ örgüsü sayısına bağımlılık analizi (Representation of generic underwater vehicle with and without propellers & mesh dependency study)



Şekil 6. Dümenler üzerindeki a) basınç dağılımı-Pa biriminde ve CRP arkasında gözlenen b) gürültü kaynakları-1/s biriminde (Representation of pressure contours on rudders and akustik wake behind CRP)

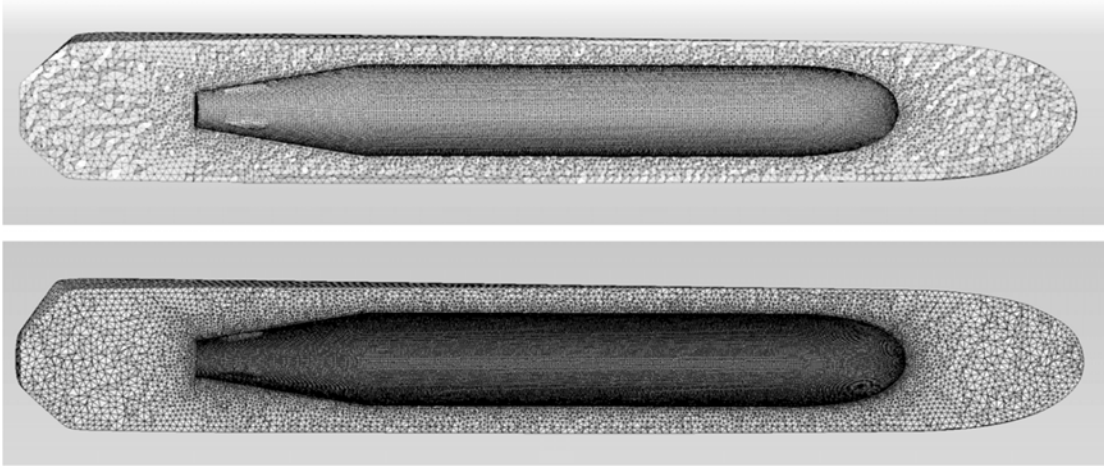
yüksek bant için yeterli olduğu görülmüştür. Orta bantta ise maksimum yüzde 20 oranında bazı frekanslarda farklılık gözlemlenmiştir. Bu nedenle çalışmalarda ince ağ yapısı tercih edilmiş olup, yüksek frekans çözünürlüğü ile çözüm alınması gereken durumlarda kaba ağ yapısına başvurulmuştur. Akustik haritalandırma yapılırken kullanılmış olan kaba ve ince ağ yapısı Şekil 8’de verilmiştir.

Bununla birlikte pervane üzerindeki dipol kaynaklar da baskın gürültü kaynağı oluşturacağı için haritalandırılırken kaba ve ince ağ modelleri karşılaştırılmıştır. Şekil 9’dan görüleceği üzere aradaki farklar oldukça az ve sonuçları değiştirmeyecek niteliktedir. Bu nedenle bilgisayar kapasitesinin elverişli olmadığı yüksek frekans çözünürlüğü arzulanan bölgelerde kaba ağ yapısı kullanılmış, düşük çözünürlükte ise ince ağ modeli tercih edilmiştir. Aksi halde yüksek ağ modelleri anlık bellek (RAM) gereksinimini çok artırmakta ve çözüm sürecini zorlaştırmaktadır. Her ne kadar sonlu hacim çözümlerine göre daha kısa çözüm sürelerine sahip olsa da bir çok durumun değerlendirileceği ve yüksek frekans tabanlı spektrum çözümlerinin yapılacağı çalışmalarda oluşturulan ağ modelinin basitliği önemini korumaktadır (Şekil 10).

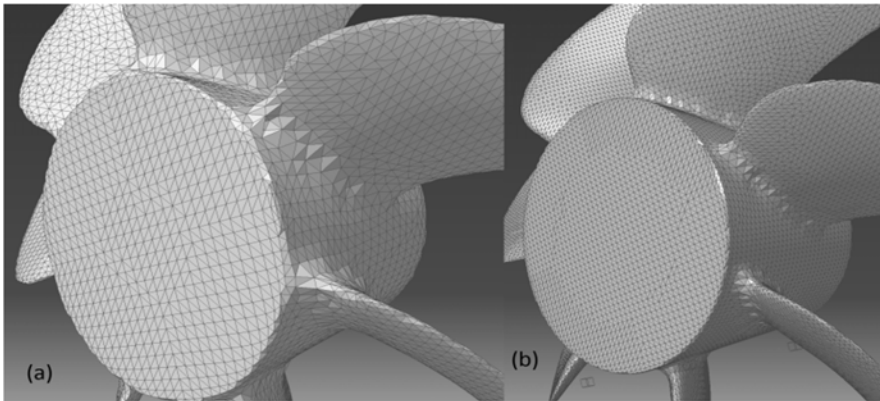


Şekil 7. Konik yüzey üzerindeki girdaplılığın ($1/sn$) değerlendirilmesi
(Examination of vorticity distribution on conical surface)

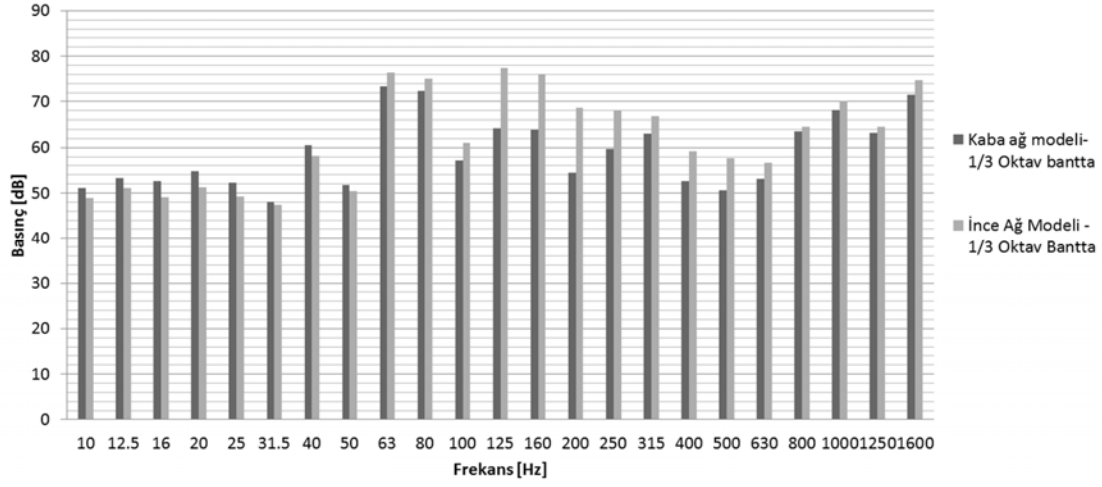
Pervane ve gövde üzerindeki monopol ve dipol kaynaklar ayrı ayrı haritalandırıldığı için akustik katkıları birbirinden ayrıştırılarak gösterilebilir. Şekil 11’den görüleceği üzere, kaynaktan çıktıktan sonra dalga şeklinde ilerleyen ses, kanat bölgesinde güçlü iken dışa doğru ilerledikçe şiddeti



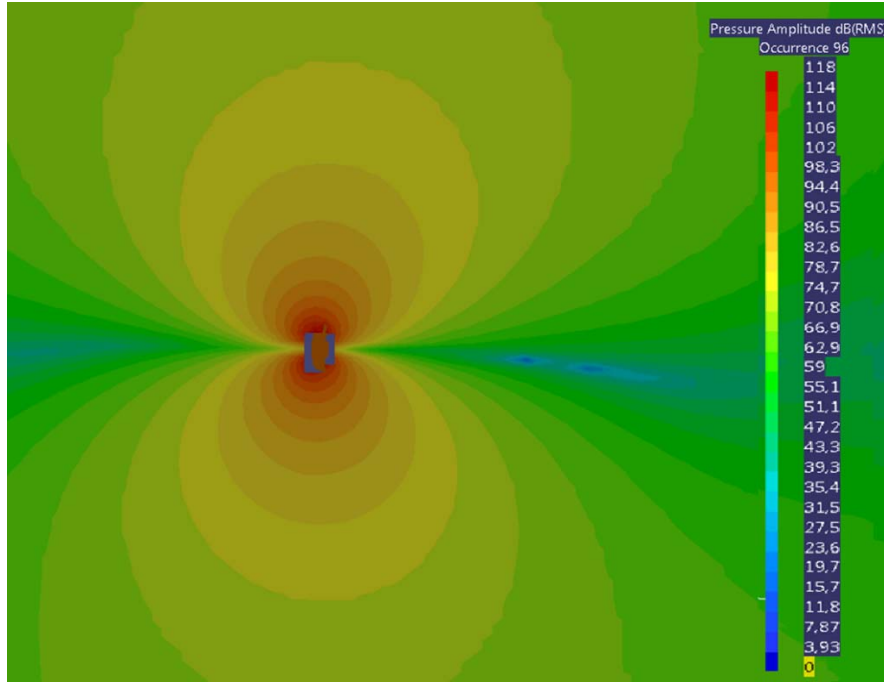
Şekil 8. Gövde üzerindeki Kaba ve ince akustik ağ yapısının gösterimi
(Representation of coarse and fine mesh on body surfaces)



Şekil 9. Pervane üzerindeki kaba ve ince akustik ağ yapısının gösterimi
(Representation of coarse and fine mesh on propeller surfaces)



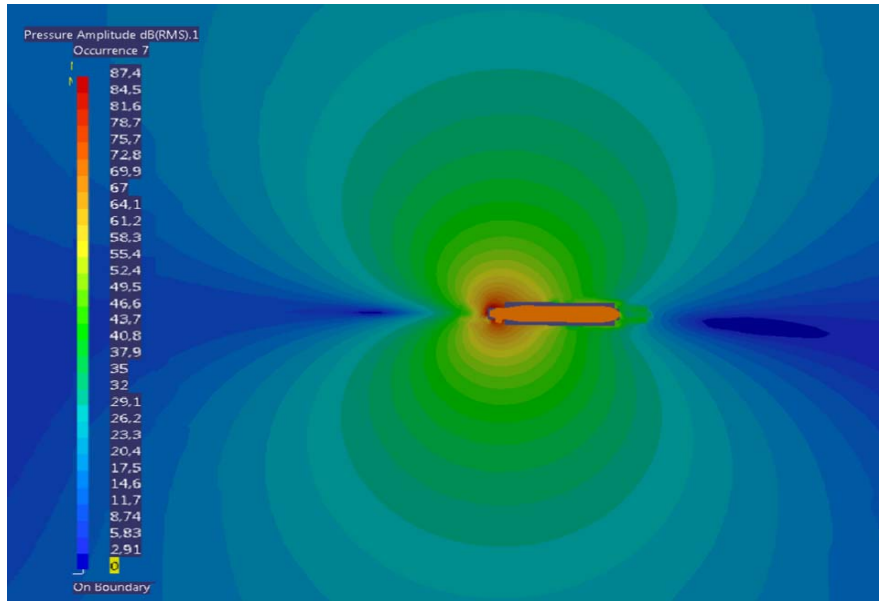
Şekil 10. Oktav bantta gözlemlenen kaba ve yoğun ağ yapısının etkisi
(Investigation of the effect of mesh dependency in octave band)



Şekil 11. Ön pervanenin 200 Hz frekansında su altındaki ses yayılımı ve ses basınç dalgalarının dışa doğru sönümlenmesi.
(Propagation of forward propeller at 200 Hz and dissipation of sound waves)

azalmaktadır. Kanat ucundan kopan girdaplar oldukça baskın şekilde ses yönelimi gerçekleştirmektedir. Frekansa bağlı ses seviyeleri değişiklik gösterse de ses yönelimi daha önemli olmaktadır. Sabit bir frekanstan dinleme yapılarak gürültü karakteristiği yapılmak istenirse tüm frekans boyunca ses yönelimi incelenmeli ve dinleme yapılacak olan yön belirlenmelidir. Huzmelendirme tekniğini planar düzlem üzerinde rahatlıkla uygulanabilmektedir. Bunun için gürültü yayan hedefe ait sinyal bilgileri derlenmelidir [20]. Bu kaynak bilgisi hidroakustik çözümlemeden elde edilip benzetim yoluyla huzmelendirme tekniği içerisinde girdi olarak sunulabilir. Böylelikle gürültü kaynağına ait yönelim

açıları bulunabilmektedir. Bununla ilgili olarak [21] geniş banttaki sinyal içerisinde tekniğin detaylarını sunmuştur. Algoritmalar gerçekleştirilerek huzmelendirme işlemi kendi gürültüsünü yayan sistemler üzerinde uyarlanabilir. Ancak bu çalışmalar detaylı bilgiler barındırdığı için bu çalışma kapsamında irdelenmemiştir. Gövde ve pervane birleştirildiğinde ise ses basınç seviyesi artmakta ve Şekil 12'de gösterildiği gibi etkileri birleşmektedir. Örneğin iki adet ses kaynağının birleştiği arayüzdeki çizgi üzerinde hareket eden bir dalga ile karşılaşmaktadır. Bu dalga dışa doğru açılım göstermekte ve bir müddet sonra sönümlenmektedir. Karakteristik uzunluğun yaklaşık on katı

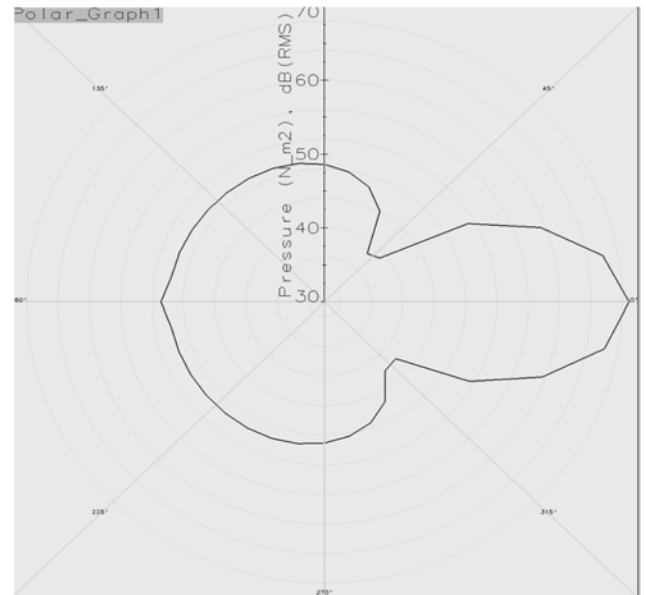


Şekil 12. Su altındaki ses yayılımı ve ses basınç dalgalarının dışa doğru sönümlenmesi.
(Propagation and dissipation of sound waves)

uzunluğunda bir bölgede ses dalgalarının yeterince sönümlendiği ve genlik seviyesinin oldukça düştüğü gözlemlenmiştir. Tüm alıcı sensörler yüzeylerden 1 metre uzaklıkta ölçülmesinin ve standarta bağlanmasının ana sebeplerinden birisi budur. Yüksek genlik bilgisi içerdiği için 260 Hz noktasına ait spektrumdaki yönelim karakteristiği Şekil 13'deki gibi polar koordinata taşınmıştır. Farklı frekans bölgeleri için saçılım miktarı ve yönelim grafikleri değişiklik göstermekle birlikte 260 Hz frekans bölgesinde pervane ön tarafında indükleme kaynaklı gürültü oluşmuştur ve göbek tarafından arkaya doğru saçılmaktadır. Simektrik bir yapı hakimdir. Burun bölgesinde de akustik gürültü oluştuğu görülebilmektedir. Genlik seviyesi sadece akış bilgisini barındırmakta vibroakustik bilgiyi içermemektedir.

Her ne kadar frekans çözünürlüğü için 10 Hz yeterli gözükse de spektrum grafiği akustik sınıflandırma için oldukça önemli sonuçlar barındırmaktadır. Eksenel doğrultuda pervaneden 1 m uzaklığa konulan akustik sensör sensör 1, gövdenin tam ortasından dikey düzlemde 1 m uzaklığa yerleştirilmiş olan sensör 2 ve gövde burnundan 1 m uzaklıktaki sensör ise sensör 3 olarak tariflenmiştir. Gövdenin yaymış olduğu gürültünün frekans sahasındaki logaritmik genlikleri Şekil 14'de verilmiştir. Düşük bant çevresinde pervane harmonikleri açıkça görülürken, 140 Hz, 210 Hz ve 280 Hz frekanslarında harmonikler şeklinde oldukça baskın sınıflar görülmüştür. Bu sınıfların, pervanenin gövde arkasındaki konik yüzeylere olan basınç indüklemesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Boyut ölçeği gösterimi ile daha önceden açıklandığı gibi 870-990-1080 Hz frekans civarları kanat kesitlerinden kopan girdapların spektruma yansımalarıdır. Sensör 1 verisi incelendiğinde pervane kanatlarının hemen arkasındaki gürültü kaynaklarından etkilendiği için bu frekans hattı oldukça baskın çıkmıştır. Bir diğer yüksek gürültü kaynağı

ise kanatçıklar olup bunlar kendisini 1480 Hz civarında göstermiştir. Ayrıca sensör 2 de bariz şekilde ortaya çıktığı görülmektedir. Her şeye rağmen en baskın kaynaklar pervane kanat geçiş frekanslarına ait akustik izlerdir ve bu durum tüm sensörler için teyit edilmiştir. Daha yüksek frekanslara ait basınç bilgisi hidrodinamik çözümleme tarafında elde edilemediği için genlik seviyeleri 1800 Hz bandına doğru akustik gücünü korumuştur. Ancak daha yüksek frekanslar gözlemlenirse akustik güç ve buna bağlı olarak genlik seviyelerinde azalmalar belirgin gözlemlenecektir.

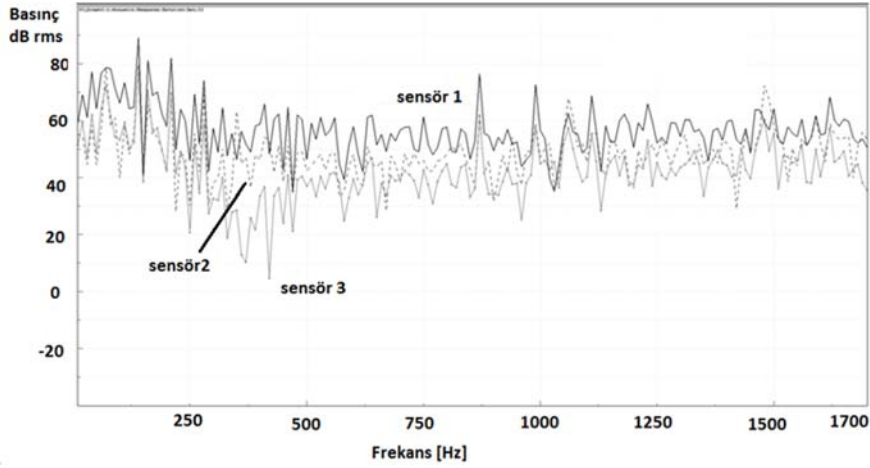


Şekil 13. Gövde üzerinde yayılan gürültünün 260 Hz frekansındaki yönelimi polar koordinatlarda gösterilmiştir
(Directivity of radiated noise from body is shown in polar coordinates at 260 Hz)

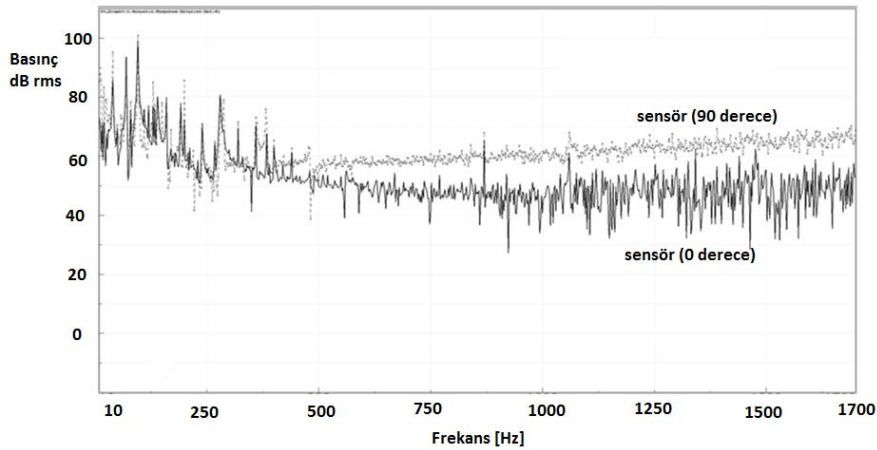
Pervane eksenine sıfır ve doksan derece açılı yerleştirilmiş iki adet sensörden ölçülen basınç verisi değerlendirilmiştir. Şekil 15'den görüleceği üzere, alçak bantta 70 Hz frekansındaki pervane harmonikleri baskınken (orta bantta 800 Hz frekansında) kanattan türbülanslı yapı kopmaları ile oluşmuş kaynakları barındırmaktadır. 270 Hz bölgesi ise tam netleştirilmemiş olup ön ve arka pervanenin birbiri ile olan etkileşimini yansıtabildiği gibi göbek tarafındaki girdap kopmalarını da içerebileceği düşünülmektedir. Şekil 15'den görüleceği üzere 1700 Hz bandına doğru güç yoğunluğu artmaktadır, ancak çözümlenmiş hidrodinamik veri ancak bu limite kadar çalışmaya izin verdiği için daha yüksek frekans bölgeleri gözlemlenememiştir. Ses yönelimi incelendiğinde kaynaktan çıkarak dalga şeklinde ilerleyen sesin, kanat bölgesinde güçlü iken dışa doğru ilerledikçe şiddetinin azaldığı görülmektedir. Frekansa bağlı ses yayılımı yöneliminin değiştiği açıkça görülmektedir. Genlik seviyesi önemli olsa da sesin yönelimi de akustik açıdan oldukça önemlidir.

Genel hatları incelendiğinde akış gürültüsünün sualtı aracına ait karakteristiğini belirlemede rahatlıkla kullanılabilceği

değerlendirilmektedir. Spektrum içerisinde ayrılmaya kolaylık tanıyan frekans bölgeleri bulunduğu için özellikle huzmelenme (beamforming) aşamasında bu tanımlı alanlardan faydalanılabilir. Ancak diğer yandan çift fazlı akışında yüksek hızlarda meydana gelebileceği düşünülmektedir. Kavite olarak tanımlanan bu durumlar ayrıca değerlendirilmeli ve sürece ilave edilmelidir. Pervane kanatları ve yüzeyleri üzerinde özellikle yüksek hız ve devirlerde kaçınılmaz bir şekilde kaviteasyon olayı gözlemlenebilmektedir. Her ne kadar önlenmesi anlamında pervane tasarımı ve modellemesi gerçekleştirilecek olsa da kanattan koparak akışa yönlenen kanat ucu kaviteasyonu akustik spektrumunu geniş bantta baskılayacaktır. Yüksek frekanslarda çalışan sonar sistemleri kaviteasyonun gerçekleştiği frekansları yakalayıp huzmelenme yapabilmektedir. Ancak kaviteasyon modellemeleri halen gelişme aşamasındadır ve literatürde tıpkı türbülans modellemesinde olduğu gibi her duruma hitap edebilecek bir seçenek bulunmamaktadır. Hidroakustik yanında vibroakustik çalışmalar gerçekleştirilerek yapıdan doğan titreşim kaynaklı gürültüler de sürece dahil edilebilmektedir. Çünkü titreşim kaynaklı gürültüler yadsınamayacak denli



Şekil 14. Sualtı aracının gövdesinin yaydığı akış gürültüsü üç ayrı alıcıda sayısal ölçülmüştür. (Numerical measurement of radiated noise from body at three different sensors)



Şekil 15. Sualtı aracına ait pervanelerin yaydığı akış gürültüsünün belli uzaklıktaki alıcılarda sayısal ölçümü (Numerical measurement of CRP radiated noise at three sensors)

spektruma etki edebilmektedir. Kanat geçiş frekansları yapıya tahrik etmesi neticesinde yapının modları seviyesince titreşimler meydana gelmektedir. Yüzey üzerindeki hız vektörü akustik parçacığın hızı ile aynı olacak şekilde seçilerek FEM formülasyonları gerçekleştirilebilir. Yine de tüm hesaplamalar hidroakustik ile ayrı ortamlarda değerlendirmeli ve ayrık çözümler yapılmalıdır. Aksi halde birbiri içerisine girmiş durumdaki spektrum ayırıştırması oldukça zor olmaktadır. Gelecekte buna benzer ileri seviye çalışmalar gerçekleştirilebileceği değerlendirilmiştir.

4. SİMGELER (SYMBOLS)

c	: Ses hızı
D	: Çap
f	: Harici kuvvetler
J	: İlerleme katsayısı
Kt	: İtme katsayısı
Kq	: Tork katsayısı
K(x,x')	: Kernel fonksiyonu
p	: Basınç
Q	: Tork
r	: Radyal koordinat
S	: Sabit yüzey
Sm	: Kaynak terimleri
T	: İtme
Tij	: Lighthill gerilmesi
u	: Akış hızı
ur	: Bağlı hız
V	: Hacim
x	: Eksenel koordinat

4.1. Yunan Harfleri (Greek Letters)

ρ	: Yoğunluk
σ_{ij}	: Viskoz gerilme tensörü
τ_{ij}^s	: Filtre altı küçük Reynolds gerilmesi
Ω_p	: Pervane açılma hızı
δ_{ij}	: Kronecker delta
v	: Kinematik viskozite

5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Makale kapsamında jenerik bir sualtı aracının hidroakustik özellikleri sayısal yöntemlerle tahmin edilmeye çalışılmıştır. Hibrit yaklaşım ile HAD, Lighthill analojisi birlikte kullanılarak disiplinlerarası bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Hidrodinamik ölçeklerin akustik ölçeklerden oldukça farklı olmasından dolayı DNS ile olan direkt çözümler endüstriyel alanda maalesef mümkün olmamaktadır. Bu nedenle hibrit analoji çözümlerine başvurma kaçınılmazdır. Sayısal yöntemin doğruluğunu görebilmek maksatlı çeşitli uygulamalar gerçekleştirilerek takip edilen sayısal yöntemin geçerliliği sorgulanmıştır. Test verileri mevcut olan bu uygulamalar sayısal benzetime tabi tutulduğunda yüksek doğruluk elde edilebilmiştir. Bu nedenle geçerlenmiş yöntemin benzeri sualtı aracı platformu üzerinde tatbik

edilebilmiştir. Gövde formu, dümen ve ters dönüşlü pervanenin HAD ve HAA içindeki rolü detayları ile sunulmuştur. Baskın gürültü kaynaklarının sorgulandığı ve buna yönelik tasarımda yönlendirmelerin zorunlu olduğu durumda izlenebilecek bir yöntem sunulmuştur. Spektrumda akustik iz sınıflandırılması yeterli düzeyde yapılmıştır. Sualtı aracından belli uzaklıklara yerleştirilmiş olan ses basınç ölçerler aracılığı ile SPL seviyeleri tesbit edilmiştir. Bununla birlikte gövde, ön pervane ve arka pervane ayrı ayrı ele alınarak ses dalgasının yönelimine ait değerlendirmeler yapılmıştır. İzlenen yöntemin sualtı aracı dışında akışa maruz kalan farklı platformlara uygulanabilirliği gösterilmiştir. Böylece akustik iz sınıflandırması, ses basınç seviyesi gözleme, ses yayılım diyagramı rahatlıkla elde edilebilir olmuştur. HAD aşamasında yeterli hücre sayısında ve doğru türbülans modeli altında, zamana bağlı yöntemin seçilmesinin önemli olduğu gösterilmiştir. Bilindiği üzere, hibrit akustik çözüm uygulanırken kaydedilmiş zamana bağlı basınç bilgisi kullanılmaktadır. Her ne kadar dalga boylarının büyük olmasından ötürü kaba ağ örgüsü akustik ortamda yeterli olsa da, haritalandırmanın yeterli düzeyde gerçekleştirilebilmesi için akustik FEM ağ örgüsü de dalga boyunun gerektirdiği hücre boyutunun en az beşte biri kadar yüksek yoğunlukta olması gerektiği gösterilmiştir. Hidroakustik çalışmalar LES tabanlı gerçekleştirildiği için, yüksek hız ve bellek kapasiteli bir bilgisayar kullanılsa bile hesaplamalar zaman gerektirmektedir. Akustik taraftaki FEM çözümleri her ne kadar görece daha kısa sürse de buradaki yoğun matris çözümlerinden dolayı yine bellek gereksinimi oldukça fazladır. Bunlar gözetildiğinde, altyapının yeterli olması durumunda, gelecekteki çalışmalara vibroakustik unsurlar da dahil edilerek ileri seviye bütünleyici çalışmalar gerçekleştirilebilir görülmektedir. Böylelikle titreşimden doğan ses kaynakları da spektrum içerisinde sınıflandırılarak yapıların iyileştirilmesine dönük çalışmalar gerçekleştirilebilir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENT)

Çalışmanın şekillenmesinde görüş vererek bilgilerini paylaşan Prof. Dr. Mehmet Şahin ve Yrd. Doç. Dr. Altuğ Başol'a içten teşekkürlerimi sunarım. Roketsan Teknoloji ve Araştırma Merkezine bilgisayar altyapısı desteği için teşekkür ederim.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Dhinesh G., Murali K., Subramanian V. A, Estimation of hull-propeller interaction of a self-propelling model hull using a RANSE solver, Ships and Offshore Structure, 5, 2010.
2. Sun Y., Su, Y. Wang, X., Hu H., Experimental and numerical analyses of the hydrodynamic performance of propeller boss cap fins in a propeller-rudder system, Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics, 10, 2016.
3. Vrijdag A., Stapersma D., Terwisga T. V., Control of propeller cavitation in operational conditions, Journal of Marine Engineering & Technology, 9, 2010.

4. Güngör E. Prediction of Performance of Test-Case Inclined Propeller SMP15 in Cavitating and Non Cavitating Conditions. Fourth International Symposium on Marine Propulsors smp'15. Austin, Texas, USA, 2015.
5. Yari E., Ghassemi, H., The unsteady hydrodynamic characteristics of a partial submerged propeller via a RANS solver, *Journal of Marine Engineering & Technology*, Volume 14, 2015.
6. Luo G. Study of scattering from turbulence structure generated by propeller with FLUENT, *Waves in Random and Complex Media*, 27, 2017.
7. Gao T., Wang Y., Pang Y., Cao J., Hull shape optimization for autonomous underwater vehicles using CFD, *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 10, 2016.
8. Sovani S. D. & Chen K. H. Aeroacoustics of an Automotive A-Pillar Raingutter: A Numerical Study with the Ffowcs-Williams Hawkins Method, *SAE Noise and Vibration Conference and Exhibition*. Traverse City, Michigan, 2005.
9. Rumpfkeil M. P., Robertson K. D., Visbal M. R.. Comparison of aerodynamic noise propagation techniques. *AIAA SciTech*, 52nd Aerospace Sciences Meeting, Maryland, 2014.
10. Salvatore F., Testa C., and Greco L. Coupled Hydrodynamics-Hydroacoustics BEM Modelling of Marine Propellers Operating in a wakefield., *First International Symposium on Marine Propulsors*. Trondheim, Norway, 2009.
11. Bagheri M. R., Seif, M. S., Mehdigholi, H., Yaakob, O., Analysis of noise behaviour for marine propellers under cavitating and non-cavitating conditions, *Ships and Offshore Structures*, 12, 2017.
12. Kinns R., Thompson I., Kessissoglou N., Tso Y., Hull vibratory forces transmitted via the fluid and the shaft from a submarine propeller, *Ships and Offshore Structures*, 2, 2007.
13. Salio M. P, Numerical assessment of underwater noise radiated by a cruise ship, *Ships and Offshore Structures*, 10, 2015.
14. Oberai A. Ronaldkin F., Hughes T. Computational procedures for determining structural-acoustic response due to hydrodynamic sources, *Comp. Methods Appl. Mech. Engineering* 190, 345-361,2000.
15. Smagorinsky J. General circulation experiments with the primitive equations, *Monthly Weather Review*, 93 (3), 99, 1963.
16. ANSYS®, Ansys v13 Fluent User's Guide, USA, 2010.
17. Desmet W. and Vandepitte D. Finite Element Modeling for Acoustics, MFN 08-878, LMS International, 2005.
18. Boswell J. R., Design, cavitation performance, and open-water performance of a series of research skewed propellers, Department of the Navy Naval Ship Research Development Center, Washington, D.C., 1971.
19. Potsdam Experimental Team, Proceedings of the Second Workshop on Cavitation and Propeller Performance, Fourth International Symposium on Marine Propulsors SMP15 . Austin, Texas, USA, 2015.
20. Grythe, J., Beamforming algorithms - beamformers. Technical Note, Norsonic AS, Norway, 2015.
21. Messer, H., The Potential Performance Gain in Using Spectral Information in Passive Detection/Localization of Wideband Sources. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 43 (12), December, 1995.