

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**SIFIR HIZ DURUMUNDAKİ GEMİLERİN
DALGALAR ARASINDAKİ HAREKETLERİNİN
TEORİK VE DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Hasan Barış KARAYEL**

Anabilim Dalı : Gemi İnşaatı ve Gemi Makinaları Mühendisliği

Programı : Gemi İnşaatı ve Gemi Makinaları Mühendisliği

HAZİRAN 2009

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**SIFIR HIZ DURUMUNDAKİ GEMİLERİN
DALGALAR ARASINDAKİ HAREKETLERİNİN
TEORİK VE DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Hasan Barış KARAYEL
(508061007)**

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 04 Mayıs 2009

Tezin Savunulduğu Tarih : 01 Haziran 2009

**Tez Danışmanı : Y. Doç. Dr. Yalçın ÜNSAN (İTÜ)
Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Ömer GÖREN (İTÜ)
Doç. Dr. M. Barbaros OKAN (İTÜ)**

HAZİRAN 2009

Eşime,

ÖNSÖZ

Bu çalışma, TÜBİTAK tarafından desteklenen 106M481 No'lu "Gemilerin Dalgalar Arasındaki Hareketlerinin Dinamik Analizi İçin Sayısal Bir Yöntem Geliştirilmesi: Teorik ve Deneysel bir Çalışma" projesi kapsamında yapılan çalışmaların bir kısmından oluşmaktadır. Bu amaçla; baştan gelen dalgalarda sıfır hız durumundaki gemilerin yaptıkları hareketler, 3 boyutlu bir yöntem kullanılarak hesaplanmıştır. İki aşamadan oluşan bu çalışmanın ilk aşamasında teorik çalışmalar yapılmıştır. Daha sonra yapılan deneysel çalışmalar ile teorik çalışmaların sonucunda elde edilen değerler kıyaslanmıştır.

Bu çalışmada bana değerli zamanlarını ayıran, bilgi, tecrübe ve anlayışlarıyla destek olan hocam Sayın Doç. Dr. M. Barbaros Okan'a ve danışman hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Yalçın Ünsan'a şükranlarımı arz ederim. Ayrıca deneyler sırasında bana bilgi ve tecrübelerini aktaran Sayın Doç. Dr. Emin Korkut ve Sayın Doç Dr. İsmail Hakkı Helvacıoğlu ile deneylerde her türlü yardımda bulunan Ar. Gör. Ayhan Menteş, Ar. Gör. Murat Özbulut ve Ar. Gör. İsmail Başaran'a teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Son olarak, bu tezin hazırlanması sırasında bana olan desteği ve sabrından dolayı sevgili eşim ve meslektaşım Semra Karayel'e teşekkürlerimi sunarım.

Haziran 2009

Hasan Barış Karayel
Gemi İnşaatı ve Deniz Mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

KISALTMALAR	ix
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xi
ŞEKİL LİSTESİ.....	xiii
ÖZET.....	xv
SUMMARY	xvii
1. GİRİŞ	1
2. TEORİK ÇALIŞMALAR	9
2.1. Genel Denklemler	9
2.1.1. Eksen Takımları	9
2.1.2. Genel Hareket Denklemleri	11
2.1.3. Potansiyel Teori	13
2.2. Gelen Dalgalar Problemi	17
2.3. Kırınım Problemi.....	20
2.4. Yayınım Problemi	23
2.5. Çözüm Tekniği.....	25
2.6. Hareket Denklemleri	26
2.7. Gemi Hareketleri Analizi Yazılımı	28
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	33
3.1. Deney Tankı	33
3.2. Model Çekme Arabası.....	34
3.3. Dalga Sönümleyici Sahil	35
3.4. Dalga Cihazı	35
3.4.1. Dalga cihazının özellikleri	35
3.4.2. Yenileme çalışmaları.....	37
3.4.2.1. Ön tasarım çalışması	37
3.4.2.2. Yenilenen sistem	43
3.4.3. Sistemin kalibrasyonu	46
3.4.3.1. Teorik kalibrasyon	47
3.4.3.2. Deneysel kalibrasyon	48
3.5. Dalga Ölçüm Sistemi	53
3.6. Hareket Ölçüm Sistemi	57
3.7. Deneyler	60
3.7.1. Boyuna ağırlık merkezinin (LCG) bulunması	60
3.7.2. Jirasyon yarıçapının bulunması.....	61
3.7.3. Deney düzeneği.....	62
4. UYGULAMA.....	65
4.1. Kullanılan Gemi Formu	65
4.2. Teorik Çalışma Aşamaları.....	66
4.3. Deneysel Çalışma Aşamaları	66

4.4. Sonuçların Kıyaslanması	70
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	71
KAYNAKLAR.....	73
EKLER.....	77

KISALTMALAR

RAO : Genlik-Karşılık Fonksiyonu

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : “ <i>Main_Input_Data_Generator.dsw</i> ” modülünün girdi değerleri	29
Çizelge 3.1 : Dalga periyotları ve yükseklikleri ile teorik kırılma limitleri	39
Çizelge 3.2 : Periyot ve dalga yükseklikleri	47
Çizelge 3.3 : Dalgalara ait değerler	50
Çizelge 3.4 : Pistona ait değerler	51
Çizelge 3.5 : Kalibrasyon değerleri	57
Çizelge 4.1 : Seri 60 formuna ait özellikler	65
Çizelge 4.2 : LCG'nin bulunması.	67
Çizelge 4.3 : Ağırlıklar ve kış kaimeden itibaren merkezleri.....	67
Çizelge 4.4 : Jirasyon yarıçapının bulunması	68
Çizelge 4.5 : Dalga ve hareket ölçümleri.....	69

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : x'y'z' eksen takımının xyz eksen takımına göre hareketleri.	10
Şekil 2.2 : Sabit eksen takımı ve gelen dalgaların doğrultusu.	17
Şekil 2.3 : Gemi yüzeyinin panellere ayrılması.	25
Şekil 3.1 : Model deney tankı.	34
Şekil 3.2 : Dalga cihazının kısımları.	36
Şekil 3.3 : Dalga cihazı.	37
Şekil 3.4 : Flap tipi dalga cihazının çalışma şeması ve eksenlerin tanımı.	38
Şekil 3.5 : Dalga yükseklikleri, flap hareketi genlikleri ve dalgaların kırılma limiti.	39
Şekil 3.6 : Flap hareketi ile piston hareketi arasındaki ilişki.	39
Şekil 3.7 : Pistonun konumu ve hızının zamanla değişimi.	40
Şekil 3.8 : Pistonun hareket ve hızının genliklerinin periyoda göre değişimi.	41
Şekil 3.9 : Tork bileşenlerinin genlikleri ve toplam torkun zamanla değişimi.	42
Şekil 3.10 : Piston kuvvetleri genliklerinin periyoda bağlı olarak değişimi.	42
Şekil 3.11 : Dalga cihazının yenilenmiş hali.	43
Şekil 3.12 : Kontrol konsolu a) Ana Şalter b) İç görünüm.	44
Şekil 3.13 : Kontrol Paneli.	45
Şekil 3.14 : Kontrol sisteminin programı.	46
Şekil 3.15 : Teorik kalibrasyon eğrileri.	48
Şekil 3.16 : Kontrol sistemi çalışma prensibi.	49
Şekil 3.17 : Piston hareketi.	50
Şekil 3.18 : Teorik ve deneysel kalibrasyon sonuçları.	51
Şekil 3.19 : Karışık dalgaya ait olan piston ve dalga genliği spektrumları.	52
Şekil 3.20 : Zamanla karışık dalgalarındaki değişim.	52
Şekil 3.21 : Zamanla piston hareketinin değişimi.	53
Şekil 3.22 : Dalga ölçüm sistemi.	54
Şekil 3.23 : Dalga problemleri düzeneği.	55
Şekil 3.24 : Problemlerin kalibrasyon eğrisi.	56
Şekil 3.25 : 2 ve 6 hareket dereceli dinamometreler.	58
Şekil 3.26 : Hızlı kamera sistemi.	59
Şekil 3.27 : Kalibrasyon düzeneği.	59
Şekil 3.28 : LCG'nin deneysel olarak bulunması.	61
Şekil 3.29 : Jirasyon yarıçapının bulunması.	61
Şekil 3.30 : Deney düzeneği.	63
Şekil 4.1 : Seri 60 formu endaze planı.	66
Şekil 4.2 : Hareket miktarlarının bulunabilmesi için tanımlanan eksenler.	68
Şekil 4.3 : Genlik-karşılık (RAO) fonksiyonları.	70
Şekil B.1 : Gemiye ait eksen takımları.	81
Şekil C.1 : Panel Tipleri.	85
Şekil C.2 : Panellerde tekillik hesabı.	87

SIFIR HIZ DURUMUNDAKİ GEMİLERİN DALGALAR ARASINDAKİ HAREKETLERİNİN TEORİK VE DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

ÖZET

Türkiye’de gemi inşaatı sanayinin gelişmesine paralel olarak araştırma geliştirme yönünde bir ihtiyaç ortaya çıkmıştır. Bu ihtiyacı karşılamak için İTÜ Gemi İnşaatı ve Deniz Bilimleri Fakültesi bünyesinde yer alan Ata Nutku Gemi Model Deney Laboratuvarı hem teorik olarak hem de deneysel olarak çalışmaktadır. Ne var ki, kuruluşundan bu yana gemi hareketleri konusunda yapılan çalışmalar yetersiz kalmıştır. Fakülte bünyesinde gemi hareketlerinin analizini iki boyutlu olarak yapan bir program geliştirilmiştir. Ancak bu program iki boyutlu olmasından dolayı boy öteleme hareketinin hesabını yapamamaktadır. Ayrıca laboratuvarın denizcilik deneyleri konusunda yetenekleri sınırlı kalmıştır. Ağırlıklı olarak direnç ve akım deneyleri yapılan laboratuvarında denizcilik deneyleri konusunda yeterli bir tecrübe oluşmamıştır.

Gemi hareketleri analizi konusunda bu açıkları kapatmak amacıyla TUBİTAK’a bir araştırma projesi önerilmiş ve kabul görmüştür. Bu proje kapsamında gemi hareketleri analizi için daha gelişmiş ve akademik literatürde de çok kullanılan üç boyutlu bir yöntem kullanılacaktır. Bu yöntem gereği hidrodinamik etkiler bir Green fonksiyonu yardımıyla bulunacaktır. Ancak analitik olarak bu fonksiyonun çözümü zor olduğundan panel metodu adı verilen sayısal bir yöntem ile bu fonksiyon çözülecektir.

Üç boyutlu yöntemler ilk olarak 1970’li yılların ortalarından itibaren ortaya çıkmıştır. O döneme kadar gemi hareketleri analizinde dilim teorisi oldukça çok kullanılmaktaydı. Ancak bu teori iki boyutlu olarak problemi çözmekte ve boy öteleme hareketinin etkisini ihmal etmekteydi. Bu yüzden bu yöntem gemi hareketlerinin analizi için yetersiz kalmaktaydı. Bilgisayarların hesaplama kapasitelerinin artmasıyla beraber üç boyutlu yöntemlerde kullanılmaya başlanmıştır. Panel metodu ile çözülen Green fonksiyonları dışında Rankine kaynakları ve sınır elemanları yöntemleri kullanılarak da çözüm aranmıştır. Ancak literatür incelendiğinde panel metodu ve Green fonksiyonları kullanılarak çözüm aranmış bir çok çalışma görülür.

Teorik çalışmaların bitirilmesinin ardından yapılan çalışmalar FORTRAN programlama dili kullanılarak bir yazılım haline getirilmiştir. Bu yazılımdan elde edilen sonuçlar literatürdeki diğer çalışmalar ile kıyaslanmış ve yayınlanmıştır [1].

Teorik çalışmaların ardından deneysel çalışmalara geçilmiştir. Bu amaçla laboratuvarında görülen eksiklikler proje kapsamında giderilmiş ve uygun bir deney ortamı sağlanmıştır. Yapılan deneyler ilk aşamada sıfır hız hali için olmuştur. İkinci olarak ise ileri hız hali için yapılmıştır. Bu tezin konusu ilk aşamada yapılan çalışmaları kapsamaktadır.

THEORETICAL AND EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS OF THE SHIPS WITH ZERO SPEED IN SEA WAVES

SUMMARY

Parallel to the development of ship construction industry in Turkey, a need for the direction of research and development has emerged. To meet this requirement, Ata Nutku Ship Model Testing Laboratory under ITU Faculty of Naval Architecture and Ocean Engineering Faculty has being done theoretical and experimental works. However, since its foundation, the works of seakeeping had been insufficient. Within the Faculty a two-dimensional seakeeping analysis program has been developed. However, this program, due to doing a two-dimensional analysis, can not calculate the surge motion. Moreover, capabilities of seakeeping experiments remain limited. Ship resistance and current experiments are made primarily and there is not enough experience in seakeeping experiments.

To close the gap on the analysis of seakeeping, a research project proposed to TUBITAK and is accepted. Within the scope of this Project, more advanced and widely used (in academic literature) three-dimensional method will be used. This method requires a Green function to find the hydrodynamic effects. However, this analytical solution is difficult, so this function shall be resolved by a numerical method, called panel method.

The first three-dimensional method emerged in the mid 1970s. Until this period, a two-dimensional theory, called strip theory, has been used widely. However, this theory solve the problem in a two-dimensional space and neglect the effect of surge motion. Therefore, this method is inadequate. In consequence of the fact that calculation capacity of computers increases, the three-dimensional methods began to appear. Except Green's functions by solved panel method, the motion problem was tried to solve in different methods like with Rankine sources and boundary element methods. However, if the literature is reviewed, it will be sought that there are lots of works done by the panel method solution using Green's functions.

After finishing the theoretical studies of the work, the works has been turned into a software by using the FORTRAN programming language. The results from this software were compared with other studies in literature and were published [1].

After the theoretical studies experimental works were done. For this purpose, the some laboratory equipments were obtained from the budget of the project, so a suitable experimentation environment was provided. In the first stage, the experiments were done for zero speed state. In the second stage, they were done for the forward speed. The topic of this thesis covers the works of the first stage.

1. GİRİŞ

Gemiler her türlü hava koşulunda kendilerinden beklenen görevleri yerine getirmek üzere tasarlanırlar. Gemi formu tasarlanırken en önemli kısıtlardan biri dalgalı deniz koşullarında göstereceği performanstır. Çünkü bilindiği gibi fırtınalı denizde seyreden bir gemi, çok büyük riskler doğurabilecek fiziksel zorlanmalara maruz kalmaktadır. Bu zorlanmalar sonucunda gemide bir takım sorunlar ortaya çıkar. Bunlardan bazıları, geminin stabilitesinin bozulması, gemi bünyesinde ek eğilme momenti ve gerilmelerin oluşması, gemi başında şiddetli dövünmeler oluşması, pervanenin sudan çıkması sonucu sevk veriminin düşmesi, aşırı ivmelenme sonucu elektronik seyir ve navigasyon cihazlarının zarar görmesi, güvertenin sular altında kalması, vb. olarak verilebilir [2]. Zorlu deniz koşullarında oluşacak bu tehlikeleri tasarım aşamasında öngörebilmek amacıyla dalgalı denizlerde hareket eden bir geminin hareketleri bilinmelidir. Gemi hareketlerinin bilinmesi ile yukarıda belirtilen etkiler tasarım aşamasında minimuma indirilebilir.

Gemilerin dalgalar arasında katı bir cisim gibi hareket ettiği kabul edilirse gemi hareketleri problemi en genel anlamda iki kısımda incelenebilir. Bunlardan ilki gemi hareketlerinin dinamik problemi olup bu problemin çözümü gemiye ait atalet kuvvetlerinin hesaplanması ile yapılır. Bu kuvvetler geminin yaptığı hareket ile orantılıdır. Yalnız, atalet kuvvetlerinin hesabı yapılırken gelen dalgaların gemi üzerinde oluşturduğu dış etkiler göz önüne alınmalıdır. Bu etkilerin bulunabilmesi için gemi hareketleri probleminin ikinci kısmını oluşturan hidrodinamik problem çözülmelidir. Dinamik problem ve hidrodinamik problem arasında Newton yasaları gereği

$$\begin{aligned} F_{Atalet} &= F_{Dış} \\ M_{Atalet} &= M_{Dış} \end{aligned} \tag{1.1}$$

bağıntıları vardır. Burada yer alan F_{Atalet} ve $F_{Dış}$ sırasıyla atalet ve dış kuvvetleri gösterirken, M_{Atalet} ve $M_{Dış}$ ise sırasıyla atalet ve dış momentleri göstermektedir. Yukarıdaki (1.1) eşitliklerinin solundaki atalet kuvvetleri ve momentleri gemi

hareketleri ile orantılıdır. Eşitliklerin sağındaki dış kuvvetler ve momentler ise tamamen gemiye doğru gelen dalgalar ile ilgilidir.

Gemi hareketleri konusunda ilk çalışmalar stabilitenin öneminden dolayı yalpa hareketlerinin incelenmesi ile başlamıştır. Bu konuda Euler ve Bernoulli, gemi benzeri şekillerin yalpa hareketlerini sakin ve dalgalı deniz koşulları için hesaplamışlardır. Ancak, gemi hareketleri konusunda kayda değer ilk çalışmalar W. Froude [3] ve R. E. Froude [4] tarafından yapılmıştır. Yazarlar, bu çalışmalarında gemilerin ince ve uzun yapılar olduğunu varsayarak bordadan gelen dalgalar için yalpa hareketini incelemişlerdir. Gelen dalgaların geminin varlığından etkilenmediğini varsayarak gemi yüzeyi üzerindeki dinamik basınç alanının sadece bu dalgaların potansiyelinden yararlanarak hesaplamışlardır. Daha sonraki yıllarda Krylov [5, 6] bu teoriyi biraz daha geliştirip baş-kıç vurma hareketini de ekleyerek bugün de kullanılan Froude-Krylov teorisini oluşturmuştur.

Froude-Krylov teorisi, gemi hareketleri probleminde hidrodinamik etkileri dinamik probleme ilişkilendiren ilk çalışma olduğundan önemlidir. Ancak uzun yıllar kullanılan bu teori gemi hareketlerinin analizi için tek başına yeterli olmamıştır. Bunun temel nedeni Froude-Krylov teorisinin iki önemli fiziksel olayı içermemesidir. Bunlardan ilki kırınım¹ olarak adlandırılan ve gelen dalgaların geminin varlığından dolayı etkilenmesi ve bozulması sonucu gemi yüzeyinde ek bir basınç alanı oluşturan olaydır. Diğer fiziksel olay ise yayınım² olarak adlandırılır ve geminin ivmeli bir hareket yapmasından kaynaklanmaktadır. İvmeli hareket yapan gemi bu hareketin enerjisini denize vererek bir dalgalanma oluşturur ve böylece gemi yüzeyindeki basınç alanı değişir. Değişen basınç alanı ise ek kuvvetler oluşturur. Yayınım olayı iki fiziksel sonuç doğurur. Bunlardan ilki geminin ivmeli hareketi ile orantılı olan ek su kütlesi, ikincisi ise hareketin hızı ile orantılı olan sönüm olaylarıdır. Tüm bu fiziksel olaylar zamanla dikkate alınmış ve teoriye bir takım ilaveler yapılmıştır. İlk olarak teoriye yayınım olayındaki hareketin ivmesi ile orantılı olan ek su kütlesinin etkisi ilave edilmiş [7] daha sonra ise geminin ileri hızından dolayı ortaya çıkan karşılaşma frekansı kavramı ortaya atılmıştır [8]. Uzunca bir süre kullanılan bu teori, yayınım ve kırınım etkilerini hesaplayabilen yöntemlerin bulunması ile gelişerek bugün kullanılan şekle gelmiştir.

¹ İngilizce “diffraction” teriminden çevrilmiştir.

² İngilizce “radiation” teriminden çevrilmiştir.

Gemi hareketleri problemi, zaman uzayında ve frekans uzayında olmak üzere iki farklı uzay sisteminde çözülebilmektedir. Problemi zaman uzayında çözebilmek için her bir zaman diliminde hareket denklemlerini tekrar çözmek gerekmektedir. Bu da çözümün oldukça uzun sürmesi demektir. Frekans uzayında çözüm ise zaman uzayında yapılan çözüme nispeten daha kolay olmaktadır. Burada her bir frekans değeri için hesaplar yapılmakta ve sonuçlar frekansa bağlı olan genlik-karşılık fonksiyonları (RAO) ile temsil edilmektedir. Zaman uzayına geçmek gerektiğinde ise Fourier dönüşümü yapılabilmektedir.

Karışık dalgalarda gemi hareketlerinin analizi uzunca bir süre yapılamamış sadece düzenli dalgalarda çalışmalar yürütülebilmiştir. Çünkü karışık dalgaların zaman uzayında temsil edilebilmesi oldukça zordu. Frekans uzayında ise nasıl temsil edileceği bilinmiyordu. Ancak 1950’de St. Denis ve Pierson, karışık dalgaları temsil edebilmek amacıyla bir yöntem geliştirmişlerdir [9]. Bu yöntem ile karışık dalgalar, farklı frekans ve genlikteki düzenli dalgaların süperpozisyonu ile elde edilen spektrumlar ile temsil edilebilmektedir. Böylece karışık dalgaların frekans uzayında temsili mümkün kılınmış ve problem düzenli dalgardaki hareketlerin bulunması ve bu hareketlerin istatistiki olarak işlenmesi şeklinde iki probleme indirgenmiştir

Gemi hareketlerinin analizi için Froude-Krylov teorisinden sonra ortaya çıkıp günümüze kadar gelen yöntemleri iki boyutlu ve üç boyutlu olmak üzere iki kısımda inceleyebiliriz. Bilgisayarların hesaplama kapasitelerinin düşük olduğu yıllarda üç boyutlu problem bir dizi varsayımlar yardımıyla iki boyuta indirgenerek çözülmüştür [10]. Daha sonraları bilgisayarların hesaplama kapasitelerindeki artışla beraber üç boyutlu çözümler için yeni yöntemler geliştirilmiştir.

Üç boyutlu bir problemi iki boyuta indirgeyebilmek için günümüze kadar gelen süre zarfında 3 farklı kabul kullanılmıştır. Bunlardan ilki ince gemi kabulüdür. Bu kabul ile geminin eninin gemi boyuna göre çok küçük olduğu kabulü yapılmıştır. Ancak bu kabul tanker gibi gemiler için uygun değildir ve bu kabulle yapılan hesaplarda hatalı sonuçlar verebilmektedir. Bir başka kabul yassı gemi kabulüdür. Burada gemi su çekiminin gemi boyuna oranla çok küçük olduğu kabulü yapılır. Böylece problem serbest su yüzeyine indirgenir. Ancak bu kabul tarihsel süreçte çok rağbet görmemiştir. Üçüncü ve son kabul ise narin gemi kabulüdür. Burada hem gemi eninin hem de gemi su çekiminin gemi boyuna oranları çok küçüktür. İnce gemi ve yassı gemi kabullerinin kullanılması ile çözümlerde oluşan hatalar bu kabul ile bir

miktar azaltılmıştır. Narin gemi ve ince gemi kabulleri en çok kullanılan iki kabul olmuşlardır. Yukarıda anlatılan üç kabul ile gemi hareketleri probleminin iki boyuta indirilmesinin sonucu boy-öteleme hareketi ihmal edilmiş olur.

İki boyutlu problemde radyasyon etkisi ile oluşan ve akışkana ait olan ek-su kütlesi atalet momentleri ve dalga sönüm değerlerini bulabilmek amacıyla bir takım çalışmalar yapılmıştır. Bunlardan ilki Ursell'a [11] aittir. Ursell, yarı dairesel bir kesitin suda dalıp-çıkma hareketi yapması sonucu oluşan probleme ait ek-su kütlesi ve sönüm değerlerini incelemiştir. Multipole'ler yardımıyla serbest su yüzeyi sınır koşulunu da sağlayarak harekete ait potansiyeli çözmüştür. Çözüm yolu matematiksel açıdan oldukça iyi olmasına rağmen Ursell'a ait yöntemin en kötü tarafı potansiyelin dairesel kesitlere ait olmasıdır. Ancak gemi kesitleri dairesel kesitlerle temsil edilemeyeceğinden bu yöntem yetersiz kalmıştır.

Hidrodinamik katsayıların bulunabilmesi için gerekli olan diğer bir yöntem ise Lewis'e [7] aittir. Lewis, Jukowski'ye ait konform tasvir tekniklerinden faydalanarak çeşitli modlarda titreşen yüzer bir cisme ait olan ek-su kütlesi değerlerini hesaplamıştır. Burada yüzen cisimleri kesitlere ayırmış daha sonra bu kesitlerde elde ettiği değerleri kesitler boyunca entegre ederek aradığı değere ulaşmıştır. Bu aynı zamanda dilim teorisi olarak adlandırılan yöntemin de ilk uygulamalarından biri olmuştur. Lewis, her bir kesiti gemi formuna yakın bir şekilde modelleyebilmek için polinomlar kullanmıştır. Bu polinomlara ait hesaplar yapmış ve bunları tablolar halinde hazırlamıştır. Lewis formları genişliğin su çekimine oranı ve kesit alanı katsayısı ile tanımlanırlar. Bu iki değer biliniş ile o kesite ait ek su kütlesi değeri kolaylıkla bulunur.

Lewis ve Ursell'in yöntemleri dışında Frank'in [12] geliştirdiği bir yöntem daha vardır. Frank Close Fit adı verilen bu yöntemde akışkana ait hız potansiyeli gemi kesitleri üzerindeki kesitleri temsil eden her bir elemana dağıtılarak bir çözüm elde edilir. Burada gemi kesitlerinin temsili çizgi elemanlarla yapılmakta ve oldukça iyi sonuçlar vermektedir.

Gemi inşaat mühendislerine gemi hidrodinamiği problemine pratik açıdan yaklaşırlarken, matematikçiler ve fizikçiler bu olayın matematiksel çözümleri için daha teorik yaklaşımlarda bulunmuşlardır. Havelock [13, 14] ve John [15, 16] de bu araştırmacılar olup Green fonksiyonlarını gemi hareketleri problemine ilk

uygulayanlardandır. Bunların dışında Peters ve Stoker [17] de ince gemi kabulünü kullanarak gemi hareketleri problemine pertürbasyon teorisini uygulamışlardır. Ancak kullandıkları ince gemi kabulü bu problem için başarılı sonuçlar verememiştir.

St. Denis ve Pierson'ın çalışmasından sonra en önemli çalışmalardan biri de Korvin-Kroukovsky ve Jacobs [18] tarafından yapılmıştır. Yazarlar, bu çalışmalarında narin gemi varsayımını kullanarak dilim teorisi adı verilen bir yöntem geliştirmişlerdir. Tamamen mühendislik bir yaklaşımla izah edilen olan bu yöntem iki boyutlu bir yöntem olduğundan boy-öteleme hareketini hesaplayamamaktadır.

Dilim teorisi, 1970'li yılların ortalarına kadar araştırmacılar için önemli bir konu olmuş ve teorisinin geliştirilmesi amacıyla birçok çalışma yapılmıştır. Bunlardan biri de Gerritsma ve Buekelman'a [19] aittir. Yazarlar, problemin modellenmesinde pratik mühendislik yaklaşımını kullanmışlardır. Buna göre; yazarlar, gemiyi belli sayıda dilimlere ayırıp bu dilimlerin sanki birer duba gibi dalıp-çıkma hareketi yaptığını varsayarak her bir dilimin hidrodinamik katsayılarını hesaplamıştır. Hesaplanan bu katsayılar daha sonra gemi yüzeyi boyunca entegre edilerek toplanır ve gemiye ait olan hidrodinamik katsayılar hesaplanır.

Dilim teorisinde bir diğer yöntem de Ogilvie ve Tuck [20] tarafından önerilen teorik yaklaşımdır. Bu teorik yaklaşım daha sonra Salvasen, Tuck ve Faltinsen [21] tarafından önerilen bir makale ile geliştirilmiştir. Bu makalede anlatılan yöntem, Gerritsma ve Buekelman'ın çalışmalarından biraz farklıdır ve teorik açıdan daha kuvvetlidir. Yazarlar, burada gene gemiyi dilimlere ayırmışlar ancak her bir dilimin sadece dalıp-çıkma hareketi dışında baş-kıç vurma hareketini de yaptığını varsaymışlardır. Yapılan bu hareketler sonucu her dilimde oluşan hidrodinamik katsayıların hesabı için de Frank'in close-fit yaklaşımını kullanmışlardır. Böylece hız potansiyelinin bilinmesi halinde kesitlerdeki katsayılar Frank close fit yaklaşımı ile bulunur ve tüm gemi boyunca entegre edilerek geminin hidrodinamik katsayıları ortaya çıkar.

Bilgisayarların hesaplama kapasitelerinin artması ile paralel olarak 1970'li yıllardan itibaren literatürde 3 boyutlu çözüm yöntemleri görülmeye başlanmıştır. Bunlar ağırlıklı olarak panel yöntemlerine dayalıydı. Üç boyutlu problemin çözümünde frekans uzayında yapılan ilk çalışmalar Faltinsen ve Michelsen ile Hogben ve

Standing'e [22, 23] ait olan çalışmalardır. Bu her iki çalışmada da ileri hız faktörü göz önüne alınmamıştır. İleri hıza ait denklemlerin bilinmesine rağmen ileri hızın probleme ilavesi yapılmamıştır. Bunda en önemli etken ileri hıza ait denklemlerin çözümünün oldukça zor oluşudur. Üç boyutlu problemin çözümünde zaman uzayında da hesaplamalar yapılmıştır. Bu konuda ilk çalışmalardan biri Liapis ve Beck'e [24] aittir.

Yapılan tüm bu teorik çalışmalarının yanında önemli deneysel çalışmalar da yapılmıştır. Gerritsma'nın [25] yaptığı çalışma bunlardan biridir. Kendisi deney ile teoriyi birlikte kullanan ilk araştırmacıdır. Yaptığı çalışma sınırlı olmakla birlikte zorlanmış dalıp-çıkma ve baş-kıç vurma hareketlerinin deneylerinden hesap yoluyla ek kütle ve sönüm katsayılarını bulmuştur. Bir diğer araştırmacı olan Galavato [26] ise tek serbestlik dereceli hareketler için deneyler yaparak transient hareketleri ölçüp bunları yay-kütle sistemi hareketleri ile karşılaştırıp hareketlerdeki hafıza etkisi ve konvülsiyon entegralinin gerekliliğini göstermiştir.

Bu çalışmalar dışında ilk sistemik deneysel çalışmalar, Vossers, Swaan ve Rijken [27] tarafından yapılmıştır. Deneyler düzenli dalgalarda yapılmıştır. Model olarak boyları 10 m olan seri 60 modelleri kullanılmış gemi genişliği, su çekimi ve blok katsayısı değerleri sistematik olarak değiştirilmiştir. Dalga yüksekliğinin gemi boyuna oranı sabit tutulmuştur. Buna karşın dalga boyu gemi boyunun %60 ile %180 arasında değiştirilmiştir. Dalga geliş açısı da 10 ile 170 arasındadır. Modellerin ağırlıkları ve ağırlık dağılımları sabit tutulmuş hızlarında sistematik bir değişim uygulanmıştır. Tüm bu çalışmada modellerin baş-kıç vurma, dalıp-çıkma, yalpa hareketleri ve sevk karakteristikleri ölçülmüştür.

Bugüne kadar yapılan çalışmalara bakıldığında en çok kullanılan yöntemin, Green fonksiyonları ile çözüm yöntemi olduğu görülmektedir. Bu yöntem ile çözüm doğrudan bulunabileceği gibi frekans uzayında çözülüp istenildiği takdirde zaman uzayına geçmek mümkündür. Bu yapılan çalışmada gerekli olan hidrodinamik hesapların yapılabilmesi için zamandan bağımsız Green fonksiyonları kullanılacaktır. Ayrıca Green teoreminin sayısal çözümü için de panel metodu kullanılacaktır. Tüm bu çalışma, sıfır hız durumu için geçerli olduğundan seçilecek Green fonksiyonu ayrıca hızdan bağımsız bir fonksiyon olacaktır.

Bu çalışma, "106M481" kodlu TÜBİTAK desteğinde yapılan "Gemilerin Dalgalar

Arasındaki Hareketinin Sayısal Analizi: Teorik ve Deneysel Bir Çalışma” adlı projenin 1.5 yıl boyunca yapılan çalışmalarını kapsamaktadır. Bugüne kadar yapılmış ve burada işlenen konu, iki aşamada olacaktır. Bunlardan ilki yapılan teorik çalışmalar olup 2. Bölüm’de anlatılmıştır. Daha sonra deneysel çalışmalar yapılmıştır. Yapılan bu çalışma 3. Bölümde anlatılmaktadır. Son olarak bu iki çalışmanın sonucu bir uygulama yapılmıştır. Bu uygulama ilgili bilgiler 4. Bölümde anlatılmış olup elde edilen sonuçlar ise 5. Bölüm’de verilmiştir.

2. TEORİK ÇALIŞMALAR

2.1. Genel Denklemler

Herhangi bir geminin açık denizde seyir halindeyken uzun cepheli dalgalara maruz kaldığını düşünelim. Bu durumda gemi hem ileri hızından dolayı hem de dalgaların zorlamasından kaynaklanan hareketler yapar. Geminin ileri hızından kaynaklanan hareketler gemi direnci probleminin temelini oluşturmaktadır. Bu çalışmada gemi direnci incelenmeyeceğinden gemi ileri hızından kaynaklanan hidrodinamik problemlere yer verilmemiştir. Dalgaların zorlamasıyla oluşan hareketler ise bir takım dönme ve öteleme hareketleridir. Bu hareketler toplamda 6 bileşene sahiptir. Bu çalışmada gemi ilerleme hızının sıfır olduğu durumlarda geminin dalgalar sonucu zorlanması ile yaptığı bu 6 bileşenli hareketler incelenecektir. Bu hareketler hakkında bir fikir elde edebilmek amacıyla önce bu probleme ait eksen takımları verilecek daha sonra da problemin çözümüne ait genel denklemler verilecektir. Son olarak ise teorik çalışmaların ardından yazılan bilgisayar programının çalışma şekli hakkında bilgi verilecektir.

2.1.1. Eksen Takımları

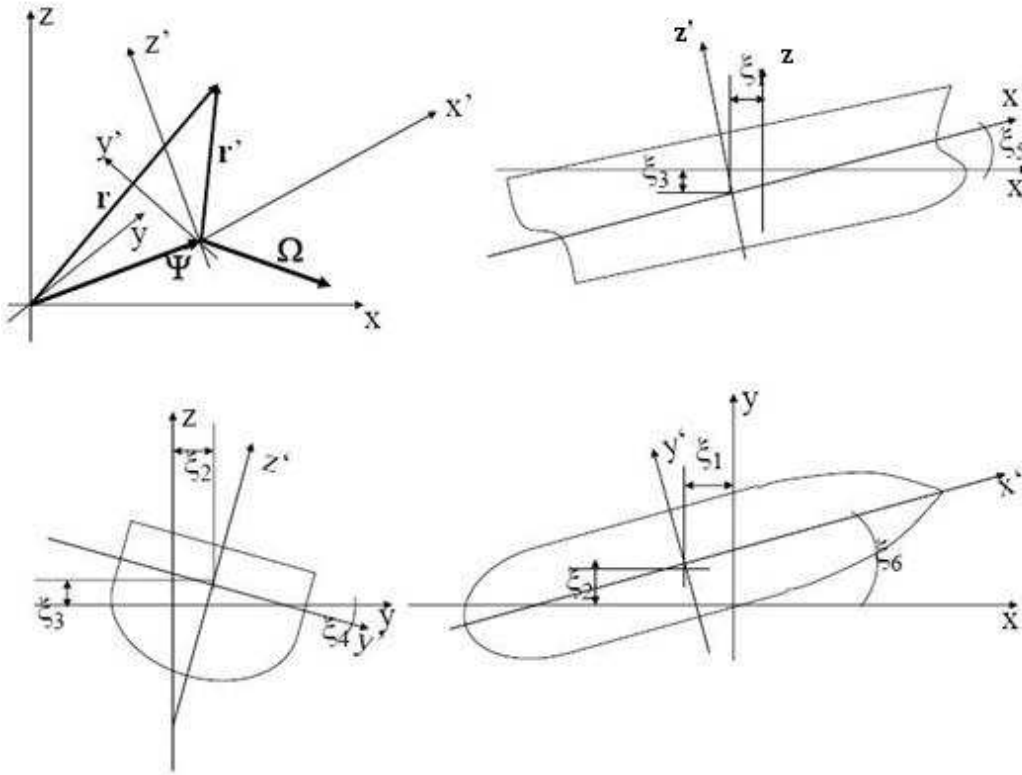
Gemi hareketleri probleminin çözümü için 2 farklı eksen takımı kullanılacaktır. Bunlardan ilki uzayda sabit herhangi bir xyz eksen takımıdır. Bu eksen takımının orijini sakin su hattı üzerinde yer almakta olup z ekseni sakin su yüzeyinden yukarı doğru pozitif değerleri alır. Bu eksen takımında zaman t ile ifade edilir. Diğer eksen takımı ise gemiye bağlı $x'y'z'$ dik kartezyen eksen takımıdır. Sakin suda hareket olmaması halinde xyz eksen takımı ile çakışmıştır. Sakin suyun hareketlenmesi sonucu oluşan dalgaların etkisi ile xyz eksen takımına göre her an altı serbestlik dereceli hareketler yapar (Şekil 2.1).

İki eksen takımının birbirine göre yaptığı hareketler bir öteleme vektörü ve bir dönme vektörü cinsinden

$$\vec{r}(t) = x(t)\vec{i} + y(t)\vec{j} + z(t)\vec{k} = \vec{\Psi}(t) + \vec{\Omega}(t) \times \vec{r}' \quad (2.1)$$

$$\vec{r}' = x'\vec{i} + y'\vec{j} + z'\vec{k} \quad \vec{\Psi} = \xi_1\vec{i} + \xi_2\vec{j} + \xi_3\vec{k} \quad \vec{\Omega} = \xi_4\vec{i} + \xi_5\vec{j} + \xi_6\vec{k}$$

şeklinde yazılabilir. Burada yer alan $\xi_j(t)$ değişkeni, $j = 1, 2, \dots, 6$ olmak koşulu ile gemiye ait hareket bileşenlerini gösterir. Bunlar sırasıyla boy-öteleme, yan öteleme, dalıp-çıkma, yalpa, baş-kıç vurma ve savrulma hareketleridir.



Şekil 2.1 : x'y'z' eksen takımının xyz eksen takımına göre hareketleri.

Yukarıda yer alan (2.1) denklemleri kullanılarak xyz ile x'y'z' eksen takımları arasındaki ilişki

$$\begin{aligned} x &= \xi_1 + z'\xi_5 - y'\xi_6 \\ y &= \xi_2 - z'\xi_4 + x'\xi_6 \\ z &= \xi_3 + y'\xi_4 - x'\xi_5 \end{aligned} \quad (2.2)$$

şeklinde yazılabilir. Eksen takımlarına ait bağıntıların bulunması ile birlikte gemiye ait hareket denklemleri bulunabilir.

2.1.2. Genel Hareket Denklemleri

Bir geminin dalgalar arasında katı bir cisim gibi hareket ettiğini düşünelim. Bu durumda en genel anlamda gemi hareketleri problemini iki kısma ayırabiliriz. Bunlardan ilki katı cisme ait olan problem olup tamamen geminin dinamik hareketlerini kapsamaktadır. Diğeri ise akışkana ait problem olup akışkanın hidrodinamik özelliklerini kapsamaktadır. Bu iki problemin birbirinden ayrılması ile katı-sıvı etkileşiminden kurtulmuş olunur ve denklemlerin çözümünde kolaylık sağlanır.

Bir gemiye etki eden atalet kuvvetleri Newton'un hareket yasaları gereği o gemiye etki eden dış kuvvetlere eşittir. Daha önce de (1.1) denklemi ile ifade edilen bu kuralın sonucu olarak bir geminin dalgalı denizlerdeki hareketini veren denklem

$$\sum_{j=1}^6 (m_{jk} + a_{jk}) \ddot{\xi}_k + b_{jk} \dot{\xi}_k + c_{jk} \xi_k = f_j^T \quad (2.3)$$

olarak yazılabilir. Bu denklemin sol tarafında yer alan katsayılar geminin dalgalarla zorlanması sonucu yaptığı hareketlerin bağımlıdır. Sağ taraf ise gemiye etkiyen dalga kuvvetlerini gösterir ve gemi hareketlerinden bağımsızdır.

Hareket denkleminin sol tarafında yer alan ilk matris olan m_{jk} , gemiye ait kütle matrisi olarak adlandırılır. Gemiler genellikle xz düzlemine göre simetrik olduklarından dolayı bu matrisin bazı değerleri sıfıra eşit olur. Kütle matrisi

$$m_{jk} = \begin{bmatrix} M & 0 & 0 & 0 & Mz_c & 0 \\ 0 & M & 0 & -Mz_c & 0 & Mx_c \\ 0 & 0 & M & 0 & -Mx_c & 0 \\ 0 & -Mz_c & 0 & I_{xx} & 0 & -I_{xz} \\ Mz_c & 0 & -Mx_c & 0 & I_{yy} & 0 \\ 0 & Mx_c & 0 & -I_{xz} & 0 & I_{zz} \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

olarak verilir. Burada M , x_c ve z_c sırasıyla geminin kütle, boyuna ve yüksekliğine ağırlık merkezlerini göstermektedir. Diğer terimlerden I_{xx} , I_{yy} , I_{zz} ve I_{xz} ise sırasıyla geminin x, y, z eksenlerine ve x ekseninin z eksenine göre atalet momentlerini vermektedir.

Geminin dalgalar tarafından zorlanması ile gemi hareket eder ve bünyesinde bir enerji birikir. Denizle olan her temasında ise bu enerjisinin bir kısmını denize aktarır. Bunun sonucu olarak gemi, çevresinden bir tepki ile karşılaşır. Bu tepkinin bir kısmı hareketin ivmesi ile bir kısmı da hızı ile orantılıdır. İvme ile orantılı olan tepkinin katsayısı kütle boyutunda olup ek su kütlesi olarak bilinir. Hız ile orantılı olan bileşen ise hidrodinamik bir sönüm yarattığından hidrodinamik sönüm katsayısı olarak bilinir. Bu hidrodinamik olaylar tamamen geminin hareketlerine bağımlıdır ve yayınım problemi olarak adlandırılırlar. Denklemden yer alan a_{jk} ve b_{jk} , sırasıyla ek su kütlesi katsayısı ve hidrodinamik sönüm katsayısı olarak adlandırılırlar ve bu yayınım probleminin sonucu olarak ortaya çıkarlar. Bu katsayılara ait matris

$$a_{jk} \text{ veya } b_{jk} = \begin{bmatrix} a_{11}(b_{11}) & 0 & a_{13}(b_{13}) & 0 & a_{15}(b_{15}) & 0 \\ 0 & a_{22}(b_{22}) & 0 & a_{24}(b_{24}) & 0 & a_{26}(b_{26}) \\ a_{31}(b_{31}) & 0 & a_{33}(b_{33}) & 0 & a_{35}(b_{35}) & 0 \\ 0 & a_{42}(b_{42}) & 0 & a_{44}(b_{44}) & 0 & a_{46}(b_{46}) \\ a_{51}(b_{51}) & 0 & a_{53}(b_{53}) & 0 & a_{55}(b_{55}) & 0 \\ 0 & a_{62}(b_{62}) & 0 & a_{64}(b_{64}) & 0 & a_{66}(b_{66}) \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

şeklinde verilir. Burada yer alan terimleri hesaplayabilmek için radyasyon etkisini hesaplamak gerekmektedir. Bunun için gerekli olan hesap yöntemi ileride verilecektir.

Hareket denkleminin sol tarafında yer alan en son terim olan c_{jk} ise hidrostatik doğrultma katsayısı olarak adlandırılır. Bu terim, geminin hareketleri sırasında yüzeyinde değişen hidrostatik değerleri göstermektedir. Bu katsayıya ait matrisin sıfırdan farklı olan terimleri

$$\begin{aligned} c_{33} &= \rho g A_{WP} & c_{35} &= c_{53} = -\rho g M_{WP} \\ c_{44} &= \rho g I_T & c_{55} &= \rho g I_L \end{aligned} \quad (2.6)$$

olarak verilebilir.

Hareket denkleminin sağ tarafında toplam dış kuvvetler yer almaktadır. Toplam dış kuvvetleri iki bileşenden oluşmaktadır. Bunlardan ilki Froude-Krylov kuvvetidir. Daha önce de bahsedildiği gibi, gemiye doğru gelen dalgaların sanki gemi yokmuş gibi gemi yüzeyinde oluşturdukları basınç dağılımı Froude-Krylov kuvvetlerini oluşturmaktadır. Ancak gerçekte geminin varlığından dolayı gelen dalgaların bir kısmı kırına uğrayacaktır. Bundan dolayı gemi yüzeyi üzerindeki basınç dağılımı

değişecektir. Oluşan bu yeni kuvvet değerine kırım kuvveti denir ve dış kuvvetlerin ikincisini oluşturur. Bu iki kuvvet gemi hareketlerinden bağımsızdırlar.

Gemi hareketlerini veren (2.3) denkleminin akışkana ait hidrodinamik problemini çözebilmek için potansiyel teori kullanılacaktır.

2.1.3. Potansiyel Teori

Akışkana ait hidrodinamik kuvvet ve moment değerlerini bulabilmek amacıyla potansiyel teori kullanılacaktır. Bunun için akışkanın viskozitesiz, homojen, yüzey gerilimi olmayan, sıkıştırılamaz ve akımın da çevrimsiz olduğu kabul edilecektir. Bu durumda akışkana ait olan hız terimleri bir potansiyelden türetilir. Bu varsayımlar altında hız ve basınç terimleri

$$\begin{aligned} V(x, y, z, t) &= \nabla \Phi(x, y, z, t) \\ p(x, y, z, t) &= -\rho \left(\frac{\partial \Phi(x, y, z, t)}{\partial t} + \frac{1}{2} (\nabla \Phi(x, y, z, t))^2 + gz \right) \end{aligned} \quad (2.7)$$

olarak yazılabilir. Akışkana ait problemin çözümü için belli bir takım sınır koşulları altında akışkana ait bölgedeki denklemi çözmek gerekir. Bu denklem kütle korunumu ilkesi sonucu ortaya çıkan süreklilik denklemi olup

$$\nabla \cdot V(x, y, z, t) = \nabla^2 \Phi(x, y, z, t) = 0 \quad (2.8)$$

şeklinde ifade edilir. Bu denklem ikinci dereceden kısmi türevli diferansiyel bir denklem olup çözebilmek için bazı sınır şartlarını belirlemek gerek. Bunlardan ilki deniz dibinin sızdırmaz olduğundan dolayı yüzeye dik doğrultudaki akışkan hızının sıfıra eşit olduğunu gösteren deniz dibi sızdırmazlık koşulu olup

$$\vec{n} \cdot \nabla \Phi(x, y, z, t) = \frac{\partial \Phi(x, y, z, t)}{\partial z} = 0 \quad (2.9)$$

şeklinde ifade edilir. İkinci sınır koşulu serbest su yüzeyi sınır koşuludur. Bu koşul iki kısımdan oluşmaktadır. Bunlardan ilki serbest su yüzeyi üzerindeki su zerreciklerinin daima yüzey üzerinde kalacağını gösteren kinematik serbest su yüzeyi sınır koşuludur. Serbest su yüzeyini veren denklemin $F(x, y, z, t) = z - \zeta(x, y, t)$ şeklinde olduğu düşünülürse kinematik serbest su yüzeyi sınır koşulu

$$\frac{DF(x, y, z, t)}{Dt} = \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial \zeta}{\partial y} \frac{\partial \Phi}{\partial y} - \frac{\partial \Phi}{\partial z} = 0 \quad (2.10)$$

şeklinde ifade edilir. Serbest su yüzeyine etki eden basıncın atmosferik basınç olduğu ve bu basıncın sabit olduğunu belirten koşul, serbest su yüzeyinin ikinci koşulu olup dinamik serbest su yüzeyi sınır koşulu olarak adlandırılır ve

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial \Phi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Phi}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Phi}{\partial z} \right)^2 \right] + g\zeta = 0 \quad (2.11)$$

şeklinde gösterilir.

Serbest su yüzeyindeki denklemlerde yer alan ikinci mertebeden ifadeler problemin lineer olmayan sonuçlar vermesine neden olmaktadır. Çözümün yapılabilmesi için bu lineer olmayan terimleri lineer yapmak gerekmektedir (EK A). Bunun için dalga yüksekliğinin dalga boyuna oranının çok küçük olduğu kabul edilirse potansiyelinin ve türevlerinin de küçük olacağı ve böylece ikinci mertebeden terimlerin ihmal edilebileceği gözükmemektedir. Bu lineerleştirme sonucu serbest su yüzeyinin her iki koşulunda tek bir denklem halinde birleştirilirse

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} + g \frac{\partial \Phi}{\partial z} = 0 \quad (2.12)$$

şeklinde bir sonuç elde edilir.

Son sınır şartı ise gemi yüzeyinin sızdırmaz olduğunu ve bu yüzden gemi yüzeyine dik etkiyen hızın sıfıra eşit olduğunu gösteren gemi yüzeyi sınır koşulu olup geminin yüzeyinin sızdırmaz olduğunu gösteren denklemin $B(x, y, z, t) = 0$ olduğu düşünülürse denklem,

$$\frac{DB(x, y, z, t)}{Dt} = \frac{\partial B}{\partial t} + \nabla \Phi \cdot \nabla B = 0 \quad (2.13)$$

şeklinde ifade edilir. Bu denklemde yer alan bazı terimler yerine

$$\frac{1}{|\nabla B|} \frac{\partial B}{\partial t} = V_n \quad \frac{\nabla B}{|\nabla B|} = \vec{n} \quad (2.14)$$

yazarsak denklemi,

$$\vec{n} \cdot \nabla \Phi = -V_n \quad (2.15)$$

şekilde sadeleştirebiliriz.

Sınır koşullarının bulunması ile birlikte denklemin tek bir çözümü için ayrıca bir de uygun bir radyasyon koşulu belirlenmelidir. Aksi halde denklem birçok çözüm

verecektir. Son olarak serbest su yüzeyindeki lineerleştirme sonucu gemi yüzeyine etki eden basınç aşağıdaki şeklini alır.

$$p(x, y, z, t) = -\rho \left(\frac{\partial \Phi(x, y, z, t)}{\partial t} + gz \right) \quad (2.16)$$

Problemin lineerleştirilmesi beraberinde birçok avantaj getirmektedir. Bunlardan biri de gemi hareketlerinin belirlenmesi için kullanılan potansiyelin bileşenlerine ayrıştırılabilmesidir. Bu bileşenler birbirini etkilemezler ve birbirinden bağımsız çözümleri yapılabilir. Toplam potansiyel bileşenlerine aşağıdaki şekildeki gibi ayrılır.

$$\Phi(x, y, z, t) = \Phi_I(x, y, z, t) + \Phi_R(x, y, z, t) + \Phi_D(x, y, z, t) \quad (2.17)$$

Burada Φ_I gemiden uzakta oluşmuş ve gemiye doğru yaklaşmakta olan dalgaların potansiyelini, Φ_D gemiye gelen dalgaların gemiden dolayı kırınması sonucu ortaya çıkan potansiyelini, Φ_R de geminin dalgalar arasındaki altı serbestlik dereceli hareketleri sonucu ortaya çıkan potansiyelini temsil etmektedir. Eğer bu potansiyel tanımı süreklilik denklemi ve sınır koşullarında yerlerine yerleştirilirse gemi yüzeyi sınır koşulu hariç birbirinden bağımsız denklemler elde edilir. Gemi yüzeyinde ise aşağıdaki koşul sağlanır.

$$\vec{n} \cdot \nabla \Phi_I + \vec{n} \cdot \nabla \Phi_R + \vec{n} \cdot \nabla \Phi_D = -V_n \quad (2.18)$$

Bu koşulu her bir potansiyel bileşeni için ayrı incelemek gerekmektedir.

Potansiyelin ilk bileşeni olan gelen dalgaların potansiyelinin hesabı için gemi yüzeyi sınır şartına ihtiyaç yoktur. Bu durumda denklemler aşağıdaki şekilde olacaktır.

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 \Phi_I}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi_I}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Phi_I}{\partial z^2} &= 0 \\ \frac{\partial \Phi_I}{\partial z} &= 0 \\ \frac{\partial^2 \Phi_I}{\partial t^2} + g \frac{\partial \Phi_I}{\partial z} &= 0 \end{aligned} \quad (2.19)$$

Saçılan dalgaların potansiyeli geminin hareketlerinden dolayı ortaya çıkan V_n hızından etkilenmezler. Ancak bu potansiyelin hızı gelen dalgaların hızı ile ilgilidir ve bu hızın gemi yüzeyine dik olan bileşeni gelen dalgaların gemi yüzeyindeki dik bileşeninin hızına eşit ve tersi yönde olmalıdır. Bu durumda kırınım denklemi aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$\begin{aligned}
\frac{\partial^2 \Phi_D}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi_D}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Phi_D}{\partial z^2} &= 0 \\
\frac{\partial \Phi_D}{\partial z} &= 0 \\
\frac{\partial^2 \Phi_D}{\partial t^2} + g \frac{\partial \Phi_D}{\partial z} &= 0 \\
\vec{n} \cdot \nabla \Phi_D &= -\vec{n} \cdot \nabla \Phi_I
\end{aligned} \tag{2.20}$$

Son potansiyel olan yayının potansiyelinin gemi yüzeyi sınır koşulu ise gemi hareketine bağlı olan gemi hızının tersine eşit olur. Bu durumda genel denklemler aşağıdaki gibi yazılabilir.

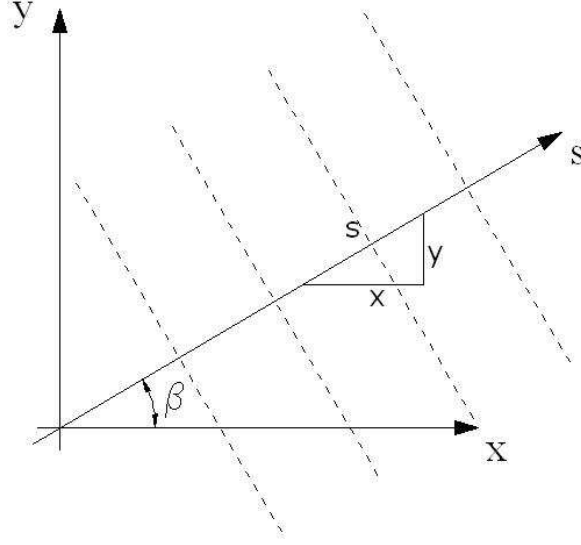
$$\begin{aligned}
\frac{\partial^2 \Phi_R}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi_R}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Phi_R}{\partial z^2} &= 0 \\
\frac{\partial \Phi_R}{\partial z} &= 0 \\
\frac{\partial^2 \Phi_R}{\partial t^2} + g \frac{\partial \Phi_R}{\partial z} &= 0 \\
\vec{n} \cdot \nabla \Phi_R &= -V_n
\end{aligned} \tag{2.21}$$

Potansiyeller ile ilgili denklemlerin bulunmasından sonra hidrodinamik basınç ve kuvvetlerin bulunması gerekmektedir. Bunun için daha önce verilmiş olan lineerleştirilmiş basınç denklemi kullanılır. Toplam potansiyelin bileşenlerine ait basınç ve kuvvet değerleri aşağıda verilmiştir.

$$\begin{aligned}
\vec{F}^I &= -\iint_S \vec{n} p_I(x, y, z, t) ds & \vec{M}^I &= -\iint_S \vec{r}' \times \vec{n} p_I(x, y, z, t) ds \\
p_I(x, y, z, t) &= -\rho \frac{\partial \Phi_I}{\partial t} \\
\vec{F}^D &= -\iint_S \vec{n} p_D(x, y, z, t) ds & \vec{M}^D &= -\iint_S \vec{r}' \times \vec{n} p_D(x, y, z, t) ds \\
p_D(x, y, z, t) &= -\rho \frac{\partial \Phi_D}{\partial t} \\
\vec{F}^R &= -\iint_S \vec{n} p_R(x, y, z, t) ds & \vec{M}^R &= -\iint_S \vec{r}' \times \vec{n} p_R(x, y, z, t) ds \\
p_R(x, y, z, t) &= -\rho \frac{\partial \Phi_R}{\partial t} \\
\vec{F}^{HS} &= -\iint_S \vec{n} p_{HS}(x, y, z, t) ds & \vec{M}^{HS} &= -\iint_S \vec{r}' \times \vec{n} p_{HS}(x, y, z, t) ds \\
p_{HS}(x, y, z, t) &= -\rho g z
\end{aligned} \tag{2.22}$$

2.2. Gelen Dalgalar Problemi

Toplam dalga potansiyelinin ilk bileşeni olan gelen dalgaların potansiyelini çözebilmek için süreklilik denklemini sınır koşullarını verecek şekilde çözmek gerekmektedir. Öncelikle x eksenini orijininde yer alan ve hareket etmeyen bir gemiye bu eksene β açısı yapacak şekilde s doğrultusu boyunca gelen dalgalar olduğunu düşünelim (Şekil 2.2).



Şekil 2.2 : Sabit eksen takımı ve gelen dalgaların doğrultusu.

Gemiye doğru gelen dalgaya ait genlik, frekans ve dalga sayısı parametreleri sırasıyla ζ_0 , ω_0 , μ_0 olarak gösterilirse dalgaya ait denklem

$$\zeta(s,t) = \zeta_0 e^{i(\mu_0 s - \omega_0 t)} \quad (2.23)$$

olarak verilir. Burada s değerini x ve y eksenleri cinsinden ifade etmek amacıyla

$$s = x \cdot \cos \beta + y \cdot \sin \beta \quad (2.24)$$

bağıntısı kullanılır. Bu bağıntının da kullanılması ile gemiye doğru gelen dalgalara ait dalga denklemi ve hız potansiyeli

$$\begin{aligned} \zeta(s,t) &= \zeta_0 e^{i \left[\mu_0 (x \cdot \cos \beta + y \cdot \sin \beta) - \omega_0 t \right]} \\ \Phi_I(x,y,z,t) &= -i \frac{g \zeta_0}{\omega_0} \frac{\cosh \left[\mu_0 (z + d) \right]}{\cosh(\mu_0 d)} e^{i \left[\mu_0 (x \cdot \cos \beta + y \cdot \sin \beta) - \omega_0 t \right]} \end{aligned} \quad (2.25)$$

şeklinde yazılabilir. Buradaki hız potansiyelini serbest su yüzeyi sınır koşuluna yerleştirirsek dalga sayısı ile açısal frekans arasındaki bağıntıyı veren ve dispersiyon bağıntısı olarak adlandırılan

$$\omega_o^2 = g\mu_o \tanh(\mu_o d) \quad (2.26)$$

denklemini elde ederiz. Bu bağıntıda da görüleceği üzere deniz derinliğinin çok büyük olacağı değerlerde ($d \rightarrow \infty$) hiperbolik ifade olan $\tanh(\mu_o d) \rightarrow 1$ olacağından derin deniz dalga sayısı $\mu_o = \omega_o^2/g$ olarak hesaplanır.

Gelen dalgaların gemi yüzeyi üzerinde yarattığı kuvvetleri hesaplayabilmek için öncelikle gelen dalgaların basınç denklemi olan

$$p_I(x, y, z, t) = -\rho \frac{\partial \Phi_I}{\partial t} \quad (2.27)$$

denklemi çözülmelidir. Bunun için gelen dalgalara ait hız potansiyelinin zamana göre türevi alınıp basınç denklemine yerleştirilse

$$p_I(x, y, z, t) = ig\zeta_o \frac{\cosh[\mu_o(z+d)]}{\cosh(\mu_o d)} e^{i[\mu_o(x \cdot \cos \beta + y \cdot \sin \beta) - \omega_o t]} \quad (2.28)$$

denkleme ulaşılır. Burada $d \rightarrow \infty$ olduğu durumlarda denklem

$$p_I(x, y, z, t) = ig\zeta_o e^{i[\mu_o(x \cdot \cos \beta + y \cdot \sin \beta) - \omega_o t]} \quad (2.29)$$

şeklinde yazılabilir. Burada basınç değerleri hesaplanırken karmaşık fonksiyonun gerçek kısmının göz önüne alındığı unutulmamalıdır.

Froude-Krylov kuvvetleri olarak adlandırılan ve de verilen gelen dalgalara ait kuvvet denkleme basınç denklemi yerleştirildiğinde

$$d \leq \infty$$

$$F^{FK} = -\rho g \zeta_o \iint_s \vec{n} \cdot \left\{ \frac{\cosh[\mu_o(z+d)]}{\cosh(\mu_o d)} e^{i[\mu_o(x \cdot \cos \beta + y \cdot \sin \beta) - \omega_o t]} \right\} ds \quad (2.30)$$

$d \rightarrow \infty$

$$F^{FK} = \rho g \zeta_o \iint_s \vec{n} \cdot \left\{ e^{i[\mu_o(x \cdot \cos \beta + y \cdot \sin \beta) - \omega_o t]} \right\} ds$$

şeklini alır. Burada n vektörü daha önce verilmiş olan genelleştirilmiş yüzey normallerinin bileşenleri cinsinden ifade edilirse basınç denklemi

$$d \leq \infty$$

$$F_j^{FK} = -\rho g \zeta_o \iint_S n_j \cdot \left\{ \frac{\cosh[\mu_o(z+d)]}{\cosh(\mu_o d)} e^{i[\mu_o(x \cdot \cos \beta + y \cdot \sin \beta) - \omega_o t]} \right\} ds$$

$$d \rightarrow \infty$$

$$F_j^{FK} = \rho g \zeta_o \iint_S n_j \cdot \left\{ e^{i[\mu_o(x \cdot \cos \beta + y \cdot \sin \beta) - \omega_o t]} \right\} ds \quad (2.31)$$

olarak yazılabilir.

Gemi yüzeyinde gelen dalgalardan dolayı dinamik bir basınç değişimi oluşurken aynı zamanda hidrostatik bir basınç farkı da oluşur. Bu basınç farkı sakin su durumunda $\rho g z$ terimi ile orantılı olup her derinlik için sabit bir değere sabittir. Ancak dalgalı bir denizde gemi yüzeyini tanımlayan (2.1) denklemleri geçerli olduğundan bu değerle aynı derinlikte farklı sonuçlar verir. Bu yüzden dalgalı denizdeki bir geminin hidrostatik basınç farkını veren

$$p_{HS}(x, y, z, t) = -\rho g z = -\rho g(\xi_3 + y' \xi_4 - x' \xi_5) \quad (2.32)$$

denklemini çözmek gerekmektedir. Bu denklem (2.22)'deki hidrostatik kuvveti ve momentini veren denklemlere yerleştirilirse

$$\begin{aligned} \iint_S \vec{n} \cdot p_{HS} ds &= -\rho g \vec{i} \iint_S n_x \cdot (\xi_3 + y' \xi_4 - x' \xi_5) ds \\ &\quad - \rho g \vec{j} \iint_S n_y \cdot (\xi_3 + y' \xi_4 - x' \xi_5) ds \\ &\quad - \rho g \vec{k} \iint_S n_z \cdot (\xi_3 + y' \xi_4 - x' \xi_5) ds \end{aligned} \quad (2.33)$$

$$\begin{aligned} \iint_S \vec{r}' \times \vec{n} \cdot p_{HS} ds &= -\rho g \vec{i} \iint_S (y' n_z - z' n_y) \cdot (\xi_3 + y' \xi_4 - x' \xi_5) ds \\ &\quad - \rho g \vec{j} \iint_S (z' n_x - x' n_z) \cdot (\xi_3 + y' \xi_4 - x' \xi_5) ds \\ &\quad - \rho g \vec{k} \iint_S (x' n_y - y' n_x) \cdot (\xi_3 + y' \xi_4 - x' \xi_5) ds \end{aligned} \quad (2.34)$$

bulunur. Geminin simetrisinden dolayı sıfıra yakınsayan integraller ihmal edilir ve diğer integraller de

$$\iint_S n_z \cdot ds = A_{WP} \quad \iint_S x' n_z \cdot ds = M_{WP} \quad \iint_S y'^2 n_z \cdot ds = I_T \quad \iint_S x'^2 n_z \cdot ds = I_L \quad (2.35)$$

şeklinde tanımlanırsa her iki denklemi veren lineer matris denklemi

$$\begin{Bmatrix} F_1^{HS} \\ F_2^{HS} \\ F_3^{HS} \\ F_4^{HS} \\ F_5^{HS} \\ F_6^{HS} \end{Bmatrix} = \rho g \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & A_{WP} & 0 & -M_{WP} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I_T & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -M_{WP} & 0 & I_L & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \xi_1 \\ \xi_2 \\ \xi_3 \\ \xi_4 \\ \xi_5 \\ \xi_6 \end{Bmatrix} \quad (2.36)$$

şeklinde yazılabilir. Hidrostatik kuvvetlerin hesaplanmasını sağlayan lineer denklem takımının sağ tarafındaki bu matris daha önce belirtilen hidrostatik doğrultma matrisi olan c_{jk} matrisidir. Gemi formunun bilinmesi ile birlikte bu matris kolaylıkla hesaplanır.

Bundan sonra denklemin çözümü için geriye kalan terimlerden kırınım kuvvetleri ile ek-su kütlesi ve sönüm katsayıları hesaplanacaktır.

2.3. Kırınım Problemi

Kırınım probleminin çözümü için gerekli olan potansiyeli hesaplayabilmek için (2.20) denklemleri kullanılacaktır. Bu denklemlere ayrıca çözümün tekil olabilmesi amacıyla uygun bir radyasyon koşulu da ilave etmek gerekmektedir. Bunun için öncelikle kırınım potansiyelini bulurken potansiyelin zamana bağlılığının dalgaların frekansı ile harmonik olarak değiştiği düşünülmelidir. Öyleyse kırınım potansiyeli,

$$\Phi_D(x, y, z, t) = \varphi_D(x, y, z) \cdot e^{-i\omega_0 t} \quad (2.37)$$

şeklinde ifade edilebilir. (2.37)'de yer alan ifade (2.20)'de yerine konulursa denklem sistemi

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 \varphi_D}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi_D}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi_D}{\partial z^2} &= 0 \\ \frac{\partial \varphi_D}{\partial z} &= 0 \\ \frac{\partial^2 \varphi_D}{\partial t^2} + g \frac{\partial \varphi_D}{\partial z} &= 0 \\ \vec{n} \cdot \nabla \varphi_D &= -\vec{n} \cdot \nabla \varphi_I \\ R \rightarrow \infty \quad \lim \sqrt{R} \left(\frac{\partial \varphi_D}{\partial R} - i\mu_0 \varphi_D \right) &\rightarrow 0 \quad R = \sqrt{x^2 + y^2} \end{aligned} \quad (2.38)$$

şeklinde indirgenir. Buradan itibaren zamandan bağımsız olan bu potansiyelin çözümü Green fonksiyonları kullanılarak aranılacaktır. Bu amaçla, (2.38) denklemlerinde gemi yüzeyindeki sınır koşulları haricinde diğer tüm sınır koşullarını sağlayan ve tekil bir çözümü olan bir Green fonksiyonu olduğu varsayılın. Bu durumda kırımın potansiyeli bu Green fonksiyonuna ve gemi yüzeyi üzerine dağıtılmış bir kaynak fonksiyonuna bağlı olarak

$$\varphi_D(x, y, z) = \frac{1}{4\pi} \iint_S \sigma_D(\xi, \eta, \zeta) G(x, y, z; \xi, \eta, \zeta) ds \quad (2.39)$$

şeklinde ifade edilir. Burada $G(x, y, z; \xi, \eta, \zeta)$, gemi yüzeyinin bir (ξ, η, ζ) noktasındaki birim kaynağın uzayın herhangi bir (x, y, z) noktasında yaratacağı potansiyele, $\sigma_D(\xi, \eta, \zeta)$ fonksiyonu da (ξ, η, ζ) noktasındaki kaynağın şiddetine karşılık gelmektedir.

Potansiyeli Green fonksiyonu ve kaynak fonksiyonunun bir fonksiyonu olarak veren (2.39) denklemi (2.38)'deki yerine koyulursa

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 G}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 G}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 G}{\partial z^2} &= \delta(x, y, z; \xi, \eta, \zeta) \\ \frac{\partial G}{\partial z} &= 0 \\ \frac{\partial^2 G}{\partial t^2} + g \frac{\partial G}{\partial z} &= 0 \end{aligned} \quad (2.40)$$

$$R = \sqrt{(x - \xi)^2 + (y - \zeta)^2} \rightarrow \infty \quad \lim_{R \rightarrow \infty} \sqrt{R} \left(\frac{\partial G}{\partial R} - i\mu_o G \right) \rightarrow 0$$

denklemlerine ulaşılır.

Yukarıdaki denklemlerde kullanılacak olan Green fonksiyonu, Wehausen ve Latoine [28] tarafından verilmiş olup

$$\begin{aligned} G(x, y, z; \xi, \eta, \zeta) &= \frac{1}{\sqrt{(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2 + (z - \zeta)^2}} + \\ &+ \frac{1}{\sqrt{(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2 + (z + \zeta + 2d)^2}} + \\ &+ 2 \int_0^\infty \frac{(k + v_e) e^{-kd} \text{Ch}[k(\zeta + d)] \text{Ch}[k(z + d)] J_0(kR)}{k \text{Sh}(kd) - v_e \text{Ch}(kd)} dk + \\ &+ i \frac{2\pi(\mu_e^2 - v_e^2) \text{Ch}[\mu_e(\zeta + d)] \text{Ch}[\mu_e(z + d)] J_0(\mu_e R)}{(\mu_e^2 - v_e^2)d + v_e} \end{aligned} \quad (2.41)$$

şeklinde tanımlanmıştır. Derin deniz koşullarında denklemde yer alan hiperbolik ifadeler sadeleşeceğinden (2.41) denklemi

$$G(x, y, z; \xi, \eta, \zeta) = \frac{1}{\sqrt{(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2 + (z - \zeta)^2}} - \frac{1}{\sqrt{(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2 + (z + \zeta)^2}} + 2 \int_0^{\infty} \frac{k e^{-k(z+\zeta)} J_0(kR)}{k - v_e} dk + i 2 \pi v_e e^{v_e(z+\zeta)} J_0(v_e R) \quad (2.42)$$

şeklini alır. Buradaki ilk terim tekil çözümü, ikinci terim tekil çözümün serbest yüzeye göre simetriğini, üçüncü terim serbest su yüzeyini, dördüncü terim de dalgalarındaki faz farkına karşılık gelen sanal terimi vermektedir. Bu şekli ile Green fonksiyonu kısmi türevlerinin hesabında zor olmasından dolayı bazı manipülasyonlar yapılarak

$$G(x, y, z; \xi, \eta, \zeta) = \frac{1}{\sqrt{(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2 + (z - \zeta)^2}} + \frac{1}{\sqrt{(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2 + (z + \zeta)^2}} + 2 v_e \int_0^{\infty} \frac{e^{-k(z+\zeta)} J_0(kR)}{k - v_e} dk + i 2 \pi v_e e^{v_e(z+\zeta)} J_0(v_e R) \quad (2.43)$$

şeklini alır.

En genel halde (2.39) denklemi ile verilen potansiyelin çözümü için potansiyel, sınır koşullarındaki gemi yüzeyi sınır koşuluna yerleştirilip

$$\frac{\partial G}{\partial n} = n_x \frac{\partial G}{\partial x} + n_y \frac{\partial G}{\partial y} + n_z \frac{\partial G}{\partial z} = \hat{G}^r + i \hat{G}^i \quad \sigma = \sigma^r + i \sigma^i \quad (2.44)$$

tanımları yapılırsa

$$\begin{aligned} & \frac{1}{4\pi} \iint_S \sigma^r(\xi, \eta, \zeta) G^r(x, y, z; \xi, \eta, \zeta) ds \\ & - \frac{1}{4\pi} \iint_S \sigma^i(\xi, \eta, \zeta) G^i(x, y, z; \xi, \eta, \zeta) ds = q^c \\ & \frac{1}{4\pi} \iint_S \sigma^{ri}(\xi, \eta, \zeta) G^i(x, y, z; \xi, \eta, \zeta) ds \\ & + \frac{1}{4\pi} \iint_S \sigma^i(\xi, \eta, \zeta) G^r(x, y, z; \xi, \eta, \zeta) ds = q^c \end{aligned} \quad (2.45)$$

denklemleri elde edilir. Burada denklemin sağ tarafında yer alan q^c ve q^s terimleri gelen dalga potansiyelinin normal doğrultudaki türevinin sırasıyla gerçek ve sanal kısımlarının (x,y,z) noktasındaki değerlerine karşılık gelmektedir.

2.4. Yayınım Problemi

Yayınım potansiyelinin hesabı için (2.21) denklemleri kullanılacaktır. Kırınım probleminde olduğu gibi potansiyelin denklem (2.37)'deki şekli yayınım potansiyeli için uygulanır ve (2.21)'deki denklemlere yerleştirilirse

$$\begin{aligned}\frac{\partial^2 \phi_R}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi_R}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi_R}{\partial z^2} &= 0 \\ \frac{\partial \phi_R}{\partial z} &= 0 \\ \frac{\partial^2 \phi_R}{\partial t^2} + g \frac{\partial \phi_R}{\partial z} &= 0 \\ \vec{n} \cdot \nabla \phi_R &= -V_n\end{aligned}\tag{2.46}$$

denklemlerine ulaşılır.

(2.46)'te yer alan denklemler, kırınım potansiyeline ait (2.38)'deki denklemlerle kıyaslandığında aradaki tek farkın gemi yüzeyindeki sınır koşullarından geldiği görülür. Burada gemi yüzeyinin normal hızının belirlenmesi ile denklem (2.46) çözülebilir. Gemi yüzeyinin normal hızını bulabilmek için (2.1) denklemindeki yer vektörünün zamana göre alınır. Bu durumda gemi yüzeyinin normal hızı

$$V_n = \vec{n} \cdot \left[\dot{\vec{\Psi}} + \dot{\vec{\Omega}} \times \vec{r}' - V_o (\vec{\Omega} \times \vec{i}) \right]\tag{2.47}$$

olarak ifade edilir. (2.47) denklemi açık olarak yazılırsa genelleştirilmiş hız bileşenleri

$$\begin{aligned}V_1 &= -i\omega_o n_x & V_2 &= -i\omega_o n_y & V_3 &= -i\omega_o n_z & V_4 &= -i\omega_o (y'n_x - z'n_y) \\ V_5 &= -i\omega_o (z'n_x - x'n_z) - V_o n_z & V_6 &= -i\omega_o (x'n_y - y'n_x) - V_o n_y\end{aligned}\tag{2.48}$$

şeklinde bulunur. Bu durumda (2.46)'de yer alan gemi yüzeyi sınır koşulu

$$\vec{n} \cdot \nabla \phi_R = \sum_{j=1}^6 \xi_j V_j\tag{2.49}$$

şeklinde indirgenmiş olur. Yalnız bu indirgeme problemi çözmeye tek başına yeterli olmaz. Çünkü gemi yüzeyindeki sınır koşulu, bilinmeyen hareketlerin bir fonksiyonudur. Bu durumda yayınım potansiyelini tekrar tanımlamak gerekmektedir.

Yayınım potansiyelini her hareket ile orantılı olan potansiyellerin toplamı olarak düşünürsek

$$\phi_R = \sum_{j=1}^6 \xi_j \varphi_j \quad (2.50)$$

şeklinde yazabilir. Bu potansiyeli (2.46) ve (2.49)'daki denklemlerde yerine koyarsak

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 \varphi_j}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi_j}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi_j}{\partial z^2} &= 0 \\ \frac{\partial \varphi_j}{\partial z} &= 0 \\ \frac{\partial^2 \varphi_j}{\partial t^2} + g \frac{\partial \varphi_j}{\partial z} &= 0 \\ \vec{n} \cdot \nabla \varphi_j &= V_j \end{aligned} \quad (2.51)$$

$$R \rightarrow \infty \quad \lim \sqrt{R} \left(\frac{\partial \varphi_j}{\partial R} - i\mu \varphi_j \right) \rightarrow 0 \quad R = \sqrt{x^2 + y^2}$$

denklemlerine ulaşılır.

Yayınım probleminin çözümü için kırınım probleminde olduğu gibi Green fonksiyonları kullanılacaktır. Bu amaçla denklem (2.39)'da tanımlanmış olan

$$\varphi_D(x, y, z) = \frac{1}{4\pi} \iint_S \sigma^j(\xi, \eta, \zeta) G(x, y, z; \xi, \eta, \zeta) ds \quad (2.52)$$

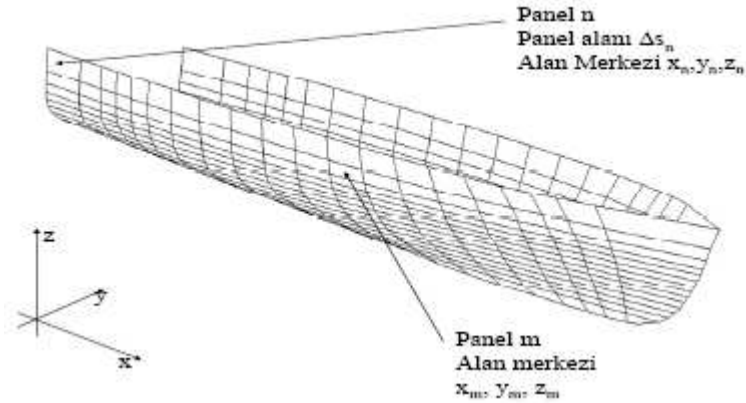
potansiyeli kullanılacaktır. Bu durumda problem

$$\begin{aligned} &\frac{1}{4\pi} \iint_S \sigma^{jr}(\xi, \eta, \zeta) G^r(x, y, z; \xi, \eta, \zeta) ds \\ &- \frac{1}{4\pi} \iint_S \sigma^{ji}(\xi, \eta, \zeta) G^i(x, y, z; \xi, \eta, \zeta) ds = q^{jc} \\ &\frac{1}{4\pi} \iint_S \sigma^{jr}(\xi, \eta, \zeta) G^i(x, y, z; \xi, \eta, \zeta) ds \\ &+ \frac{1}{4\pi} \iint_S \sigma^{ji}(\xi, \eta, \zeta) G^r(x, y, z; \xi, \eta, \zeta) ds = q^{jc} \end{aligned} \quad (2.53)$$

denklemlerine indirgenir.

2.5. Çözüm Tekniği

Yukarıdaki (2.42) ve (2.50) denklem sistemlerinin çözümü zor olduğundan panel yöntemi ile sayısal bir çözüm aranacaktır. Panel yöntemini kullanabilmek amacıyla gemi yüzeyi yeteri kadar çok küçük panellere ayrılır (Şekil 2.3). Bu panellerin geometrik özellikleri olan alan merkezleri, yüzey normaleri ve alanları gemi formunun bilinmesinden dolayı bellidir.



Şekil 2.3 : Gemi yüzeyinin panellere ayrılması.

Paneller çok küçük olarak seçildiğinden kaynak dağılımı her bir panelde sabit kabul edilebilir. Bu kabul ile gemi yüzeyindeki herhangi bir m panelinin alan merkezine herhangi bir n panelinden gelen etkileri ve n panelindeki kaynak dağılımlarını kırımın problemi için

$$\begin{aligned} \frac{1}{4\pi} \iint_{S_n} \hat{G}^r(x_m, y_m, z_m; \xi, \eta, \zeta) ds &= \hat{G}_{mn}^r & \sigma^r(\xi, \eta, \zeta) &\Rightarrow \sigma_n^r \\ \frac{1}{4\pi} \iint_{S_n} \hat{G}^i(x_m, y_m, z_m; \xi, \eta, \zeta) ds &= \hat{G}_{mn}^i & \sigma^i(\xi, \eta, \zeta) &\Rightarrow \sigma_n^i \end{aligned} \quad (2.54)$$

şeklinde, yayılım problemi için ise

$$\begin{aligned} \frac{1}{4\pi} \iint_{S_n} \hat{G}^r(x_m, y_m, z_m; \xi, \eta, \zeta) ds &= \hat{G}_{mn}^r & \sigma^{jr}(\xi, \eta, \zeta) &\Rightarrow \sigma_n^{jr} \\ \frac{1}{4\pi} \iint_{S_n} \hat{G}^i(x_m, y_m, z_m; \xi, \eta, \zeta) ds &= \hat{G}_{mn}^i & \sigma^{ji}(\xi, \eta, \zeta) &\Rightarrow \sigma_n^{ji} \end{aligned} \quad (2.55)$$

şeklinde tanımlarsak problem

$$\begin{bmatrix} \hat{G}_{mn}^r \\ \hat{G}_{mn}^i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\hat{G}_{mn}^i \\ \hat{G}_{mn}^r \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\sigma_n^r\} \\ \{\sigma_n^i\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{q_n^c\} \\ \{q_n^s\} \end{Bmatrix} \quad (2.56)$$

ve

$$\begin{bmatrix} \hat{G}_{mn}^r \\ \hat{G}_{mn}^i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\hat{G}_{mn}^i \\ \hat{G}_{mn}^r \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_n^{jr} \\ \sigma_n^{ji} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} q_n^{jc} \\ q_n^{js} \end{Bmatrix} \quad (2.57)$$

lineer sistemlerinin çözümüne indirgenir. Kaynak dağılımı bu şekilde hesaplandıktan sonra potansiyeli hesaplayabilmek mümkündür.

Kırınım kuvvetlerine ait basınç değerlerinin hesabı için (2.20) ile verilen basınç denkleminde potansiyel yerine yerleştirilse basıncın gerçek ve sanal kısımları

$$\begin{bmatrix} P_{mn}^r \\ P_{mn}^i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -P_{mn}^i \\ P_{mn}^r \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_n^{Dr} \\ \sigma_n^{Di} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} p_{Dn}^c \\ p_{Dn}^s \end{Bmatrix} \quad (2.58)$$

lineer denklem sisteminden elde edilir. Buradaki basıncın değerlerini (2.22)'deki kuvvet tanımlarında yer alan ifadeye yerleştirirsek

$$f_j^{Dr} = \sum_m n_j p_{Dm}^c \Delta s_m \quad f_j^{Di} = \sum_m n_j p_{Dm}^s \Delta s_m \quad (2.59)$$

denklemlerini elde ederiz.

Aynı şekilde yayınım kuvvetlerinden kaynaklanan basınç değerlerini elde edebilmek için potansiyel, (2.21)'deki basınç denkleminde yerleştirilerek

$$\begin{bmatrix} P_{mn}^r \\ P_{mn}^i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -P_{mn}^i \\ P_{mn}^r \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_n^{jr} \\ \sigma_n^{ji} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} p_{Dn}^{jc} \\ p_{Dn}^{js} \end{Bmatrix} \quad (2.60)$$

elde edilir. Bu denklem sisteminden elde edilen basınç değerlerinin (2.22)'deki kuvvet denkleminde yerleştirilmesi ile ek su kütlesi ve hidrodinamik sönüm katsayıları elde edilir.

$$a_{jk} = \frac{1}{\omega_o^2} \sum_n n_{jn} p_n^{kc} \Delta s_n \quad b_{jk} = \frac{1}{\omega_o} \sum_n n_{jn} p_n^{ks} \Delta s_n \quad (2.61)$$

Hidrodinamik katsayı ve kuvvetlerin elde edilmesinden sonra harekete ait denklemlerin hesaplanmasına geçilebilir.

2.6. Hareket Denklemleri

Bir gemiye ait hareket denklemlerinin gösterimi için Genlik-karşılık fonksiyonlarına ihtiyaç vardır. Genlik karşılık fonksiyonları hareket genlikleri ile dalga genlikleri arasındaki oranı vermektedir. Bu çalışmada da gemilerin düzgün dalgalar arasındaki hareketlerinin analizinde genlik-karşılık fonksiyonları kullanılacaktır. Bunun için

öncelikle (2.3) denkleminde yer alan matrislerin hesabı yapılır. Bu matrisler yapıları gereği birbirinden bağımsız iki guruba ayrılır. Bunlardan her bir gurup 3 bilinmeyenli lineer diferansiyel denklem çözümüne indirgenir. Birinci gurup xy simetri düzleminde yer alan boy öteleme, baş-kıç vurma ve dalıp-çıkma hareketlerinden oluşur. Diğer gurup ise yan-öteleme, yalpa ve savrulma hareketlerinden oluşmaktadır.

Herhangi bir geminin düzgün dalgalar arasındaki hareketi incelenirken gemiyi zorlayan kuvvetler hareket miktarı aynı periyotta olur. Bu durumda hareket ve kuvvet değerleri ve hareketin türevleri

$$\begin{aligned}\xi_k &= \bar{\xi}_k e^{i\omega t} & f_k &= \bar{f}_k e^{i\omega t} & k &= 1,2,\dots,6 \\ \dot{\xi}_k &= i\omega \bar{\xi}_k e^{i\omega t} & \ddot{\xi}_k &= -\omega^2 \bar{\xi}_k e^{i\omega t}\end{aligned}\quad (2.62)$$

şeklinde yazılabilir. Bu terimler (2.3)'teki genl hareket denkleminde yerlerine yerleştirilirse ve bu denklem daha önce de bahsedildiği gibi iki guruba ayrılırsa

$$\sum_{n=1}^3 s_{mn} \alpha_n = p_m \quad \sum_{n=1}^3 u_{mn} \beta_n = q_m \quad m = 1,2,3 \quad (2.63)$$

denklemleri elde edilir. Burada yer alan s_{mn} ve u_{mn} terimleri

$$\begin{aligned}s_{mn} &= c_{jk} - \omega^2(m_{jk} + a_{jk}) + ib_{jk} & j &= 2m-1 & k &= 2n-1 \\ u_{mn} &= c_{jk} - \omega^2(m_{jk} + a_{jk}) + ib_{jk} & j &= 2m & k &= 2n\end{aligned}\quad (2.64)$$

ile gösterilirken α_n ve β_n ile p_m ve q_m

$$\begin{aligned}\alpha_n &= \bar{\xi}_k & p_n &= \bar{f}_k & k &= 2n-1 \\ \beta_n &= \bar{\xi}_k & q_n &= \bar{f}_k & k &= 2n\end{aligned}\quad (2.65)$$

ile ifade edilir. Bu denklemlerde s_{mn} ve u_{mn} terimlerinin değerleri ile p_m ve q_m terimlerinin değerleri karmaşık sayılar olduklarından dolayı α_n ve β_n değerleri de karmaşık sayılar olacaklardır. Bu durumda hareket genlikleri gerçek ve sanal kısımlar kullanılarak

$$\bar{\alpha}_n = \sqrt{[\text{Re}(\alpha_n)]^2 + [\text{Im}(\alpha_n)]^2} \quad \bar{\beta}_n = \sqrt{[\text{Re}(\beta_n)]^2 + [\text{Im}(\beta_n)]^2} \quad (2.66)$$

şeklinde elde edilir. Hareketin dalgalar arasındaki faz açısı ise

$$\begin{aligned}\phi_n &= a \tan\left(-\frac{\text{Im}(\alpha_n)}{\text{Re}(\alpha_n)}\right) \\ \varphi_n &= a \tan\left(-\frac{\text{Im}(\beta_n)}{\text{Re}(\beta_n)}\right)\end{aligned}\quad (2.67)$$

denklemlerinden elde edilir.

2.7. Gemi Hareketleri Analizi Yazılımı

Yukarıda anlatılan çalışmaların tümü FORTRAN programlama dili kullanılarak bir yazılım haline getirilmiştir. Bu yazılım belli bir takım modüllere ayrılmıştır. Her modül farklı hesaplar yapmaktadır. Bu modülleri 5 ana başlık altında toplayabiliriz.

- Geometri
- Hidrostatik
- Gemi Mukavemeti
- Hidrodinamik
- Gemi Hareketleri

Geometri bölümünde 3 tane modül bulunmaktadır. Bunlar çalışma sırasıyla

- Main_Input_Data_Generator.dsw
- Ship_Section_Definition.dsw
- Ship_Surface_Elements.dsw

olarak adlandırılmıştır. İlk modül olan “*Main_Input_Data_Generator.dsw*” ile analizinin yapılması istenen gemiye ait temel büyüklükler girilir. Bu büyüklükler çizelge 2.1’de verilmiştir.

Geminin ana boyutlarının girilmesi sonucu modül, “*Main_Dimensions*” adı altında bir dosya oluşturulur. Bu dosya ve daha önce elle veya başka bir yazılım vasıtasıyla hazırlanmış olan endaze dosyası “*Section_Data*” kullanılarak ikinci modül olan “*Ship_Section_Definition.dsw*” çalıştırılır. Bu modül ana boyutları ve endaze bilgisini kullanarak her kesite ait B-spline eğrilerini çizer (EK B). Bu eğrilere ait değerler olan kontrol noktalarını ise “*Form_Data*” dosyasında saklar. Girdi dosyası olan “*Section_Data*” dosyasının hazırlanması ile ilgili bilgi Ek A’da verilmiştir. Son modül olan “*Ship_Surface_Element.dsw*” ise “*Main_Dimensions*” ve “*Form_Data*” dosyalarını alarak gemi yüzeyinde paneller oluşturur (EK C). Oluşturduğu panellere ait geometrik değerleri ise “*Hull_Panels*” ve “*Panel_Corners*” dosyalarına kaydetmektedir.

Çizelge 2.1 : “Main_Input_Data_Generator.dsw” modülünün girdi değerleri

LBP	Kaimeler arası boy
LWL	Su hattı boyu
LOA	Tam boy
Bm	Genişlik
Dm	Su çekimi (mastoride)
Df	Su çekimi (Baş kaimede)
Hf	Derinlik
XMax	Geminin baş tarafındaki en uzak noktası
XMin	Geminin kıç tarafındaki en uzak noktası
NT	Posta sayısı
IDTYPE	Panel tipi
ρ_w	Su yoğunluğu
M	Gemi kütlesi
LCG	Boyuna ağırlık merkezi
VCG	Enine ağırlık merkezi
I_{xx}	Kütle atalet momentleri
I_{yy}	
I_{zz}	
I_{xz}	
Nwl	Hidrostaik hesaplar için toplam su hattı sayısı
Nws	Toplam su hattı sayısı (stabilite için)
N _A	Toplam stabilite hesap açısı

Geometri bölümdeki modüller çalıştırılıp gerekli olan dosyalar oluşturulduktan sonra geminin hidrostatik hesapları yapılır. Bunun için Hidrostatik bölümünde yer alan iki modül kullanılır. Bunlardan ilki gemi hidrostatik ve Bon-jean eğrilerini hesaplayan “Ship_Hydrostatics.dsw” modülüdür. Bu modül, “Main_Dimensions” ve “Form_Data” değerlerini alarak geminin hidrostatik hesaplarını yapar ve Bon-jean eğrilerine ait verileri “BonJean_Data” adlı dosyaya diğer tüm hidrostaik eğrilerin verilerini de “Hydrostatic_Data” adlı dosyaya kaydeder. Bir sonraki modül olan “Cross_Curves_of_Stability.dsw” ise yine bir önceki modül gibi “Main_Dimensions” ve “Form_Data” dosyalarını alarak çapraz stabilite eğrilerini hesaplar ve “Stability_Data” dosyasına kaydeder.

Hidrodinamik hesaplara geçmeden önce çalıştırılması gereken son bölüm Gemi Mukavemeti bölümüdür. Bu bölüm iki adet modülden oluşur. Bunlar;

- Weight_Input_Generator.dsw
- Longitudinal_Strength.dsw

olarak adlandırılır. İlk modül, gemiye ait ağırlık dağılımının programa girilmesi ile bir ağırlık dağılımı dosyası oluşturmaktadır. Bu bilgiler “*Weight_Data*” dosyasında saklanmaktadır. Program öncelikle ana boyutları “*Main_Dimensions*” dosyasından okumaktadır. Daha sonra istenilen posta sayısı girilmektedir. Posta sayısının girilmesinin ardından gemi tipi seçilmektedir. Üç farklı gemi tipi bulunmaktadır. Bunlar, genel kargo, tanker ve yolcu gemisidir. Bunlardan birinin seçilmesi ile o gemiye ait ağırlık değerleri belirli kategoriler altında girilir. Bu kategoriler sırasıyla; çelik ağırlığı, ana makine ağırlığı, yardımcı makine ağırlığı, donanım ağırlığı, yakıt ağırlığı, yağlama yağı, temiz su, erzak, balast ve ana kargo ağırlıklarıdır. En son olarak tüm bu ağırlıklar toplanarak bir ağırlık dağılımı dosyası oluşturulur. İkinci modül olan “*Longitudinal_Strength.dsw*” ise oluşturulan ağırlık dağılımını içeren bu dosya ile “*Main_Dimensions*”, “*Hydrostatics_Data*” ve “*BonJean_Data*” dosyalarını alarak geminin dalgalar arasındaki mukavemet hesaplarını en kritik koşullar olan dalga tepesi ve dalga çukuru için hesaplamaktadır. Daha sonra çıkan sonuçları “*Strength_Data*” dosyasında saklamaktadır.

Gemiye ait geometri, hidrostatik ve ağırlık dağılımı dosyaları oluşturulduktan sonra asıl hareket analizlerinin yapıldığı bölüm olan Hidrodinamik bölümüne geçilir. Bu bölümde yer alan modüller sırasıyla aşağıdaki gibidir.

- *Hydrodynamic_Input_Data_Generator.dsw*
- *Diffraction.dsw*
- *Radiation.dsw*
- *Diffraction_Results.dsw*
- *Radiation_Results.dsw*

İlk modül, “*Main_Dimensions*” dosyasından gerekli olan bilgileri okur ve analiz için gerekli olan değerleri kullanıcının girmesini istemektedir. Bu değerler sırasıyla frekans aralığı ve frekans sayısı, dalga geliş açısı aralığı ve açı sayısı ile deniz derinliği ve yoğunluğudur. Bu değerlerin hepsini “*Hydrodynamic_Data*” dosyasında saklamaktadır.

İkinci modül olan “*Diffraction.dsw*” ile dalga kuvvetleri hesaplanmaktadır. Bunun için “*Main_Dimensions*”, “*Hull_Panels*” ve “*Hydrodynamic_Data*” dosyalarına ihtiyaç vardır. Bu dosyalardaki veriler okunduktan sonra Bölüm 2.3 ve 2.5’teki

formülasyon kullanılarak sayısal olarak dalga kuvvetleri hesaplanır ve “*Diffraction_Data*” dosyasına yazılır. Difraksiyon analizinin yapılmasının ardından kuvvetleri hesaplayabilmek amacıyla “*Diffraction_Results.dsw*” modülü çalıştırılır. “*Main_Dimensions*”, “*Weight_Data*” ve “*Diffraction_Data*” dosyalarını alan program, bu üç girdiden aldığı değerleri “*Forces*” dosyasına yazar.

Diğer modül olan “*Radiation.dsw*” ile Bölüm 3.4 ve 3.5’te anlatıldığı şekilde sayısal olarak ek su kütlesi ve sönüm katsayıları hesaplanır. Bunun için “*Diffraction*” programındaki giriş dosyaları kullanılmaktadır. Yapılan hesaplar sonucu elde edilen sonuçlar “*Radiation_Data*” dosyasına yazılmaktadır. Bu dosya daha sonra “*Main_Dimensions*” ve “*Weight_Data*” dosyaları ile birlikte son modül olan “*Radiation_Results.dsw*” programına girdi olur. Burada düzenlenen bilgiler “*A-D_Coeffs*” dosyasına yazılır.

Gemi hareketlerini veren denklem (2.3)’teki tüm katsayılar bulunduktan gemi hareketlerini temsil eden RAO eğrileri hesaplanabilir. Bunun için son bölüm olan Gemi Hareketleri bölümünde yer alan tek modül olan “*Response_Amplitude_Operators.dsw*” modülü kullanılır. Bu modüle girdi olarak “*Main_Dimensions*”, “*Weight_Data*”, “*Radiation_Data*” ve “*Diffraction_Data*” dosyaları girilir. Bölüm 2.6’da anlatılan hareket denklemlerinin yardımıyla buradan geminin RAO eğrileri hesaplanmaktadır. Bu modülden elde edilen “*ROA_Data*”, Excel veya MathCad yazılımları yardımıyla okunabilir ve grafik haline getirilebilir.

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Teorik çalışmaların tamamlanmasının ardından deneysel çalışmalara geçilmiştir. Deneysel çalışma yapılmasının amacı; teorik çalışmaların verdiği sonuçların, deneyler yapılarak elde edilen sonuçlar ile uyumlu olup olmadığını kontrol etmektir. Bu amaçla, İTÜ Gemi İnşaatı ve Deniz Bilimleri Fakültesi bünyesinde yer alan Ata Nutku Gemi Model Deney Laboratuvarı'ndaki büyük model havuzunda deneyler yapılmıştır.

Deneyler başlamadan önce havuzun sahip olduğu cihazların ve gereçlerin bazılarının yetersiz ve bazılarının da çalışmaz durumda olduğu görülmüştür. Bu yüzden TÜBİTAK projesinden gelen bütçe ile deneylerin yapılması için gerekli olan bazı gereçlerde ve cihazlarda bir takım iyileştirmelere gidilmiştir. Bu iyileştirme çalışmaları için bir takım tasarım ve kalibrasyon çalışmaları yapılmıştır. Bu bölümde deneyin yapılabilmesi için kullanılan ortam, donanımlar ve cihazlar ile ilgili bilgiler verilerek yapılan iyileştirme çalışmalarına değinilecektir ve son olarak deney için kullanılan deney düzeneğinden bahsedilecektir.

3.1. Deney Tankı

Denizcilik deneylerinin yapıldığı büyük model deney tankı, 160 m uzunluğunda olup, 6 metre genişliğindedir. İçerisindeki su derinliği ise 3.20 m'de sabit tutulmaktadır (Şekil 3.1). Model havuzunda 5 m boya kadar olan modellerin direnç ve denizcilik deneyleri yapılabilir.

Havuz, yapısı gereği bünyesinde bazı sorunları barındırmaktadır. Kullanılan havuz 1980'li yıllarda inşa edilmiş olup zaman içinde boyu uzatılmış ve 160 m'ye çıkarılmıştır. Bu aşamada bu ilavelerin olduğu yerlerde bir takım sızıntılar olmaktadır. Bu sızıntılar özellikle havanın soğuk olduğu günlerde daha fazla olmaktadır. Kış mevsiminde günde ortalama 1.5 cm su yüksekliğinde su sızıntısı gözlemlenmiştir. Bu sızıntı yüzünden deneylerin süresi aksayabiliyordu. Ticari projeler yüzünden oldukça aktif olan havuzda deneylerin aksaması büyük bir problem olmaktadır. Deneylerin yapıldığı ortamdaki havanın en azından oda

sıcaklığında olması ise bu problemi bir nebze olsun çözebilmektedir. Laboratuvarın genelinde yapılan iklimlendirme sisteminin bakımı ile bu sorun çözülmüştür.

Havuzdaki bir diğer sorun ise havuzun duvarlarından kaynaklanmaktadır. Ciddi bir bakım görmemiş olan havuzun duvarlarında zamanla bazı deformasyonlar oluşmuştur. Bu deformasyonlar sonucu dalga cihazı tarafından üretilen dalgalar havuzda ilerlerken duvarlarda sürtünmeye maruz kalmaktadırlar. Bu sürtünme sonucu dalgalar ilerledikçe uzun cepheli olarak ilerleyemeyip bombeleşmeye başlamaktadırlar. Deneyler dalga cihazına yakın bir yerde yapılarak dalgaların bu etkilerden asgari düzeyde etkilenmesi sağlanmıştır.



Şekil 3.1 : Model deney tankı.

3.2. Model Çekme Arabası

Deney tankının üzerinde bu gemi modellerinin bağlandığı bir model çekme arabası mevcuttur. Bu araba azami olarak 6 m/s hızda modelleri çekebilmektedir. Deney arabasının üzerinde tüm deneylerde kullanılan donanımların kontrol üniteleri bulunmaktadır.

3.3. Dalga Sönümleyici Sahil

Dalga cihazının ürettiği dalgaların daha kısa sürede sönümlenebilmesi amacıyla havuzun baş tarafında ise bir sahil bulunmaktadır. Bu sahil hidrolik bir sistemle yukarı çekilerek dalganın sönümlenme süresi azaltılabilmektedir.

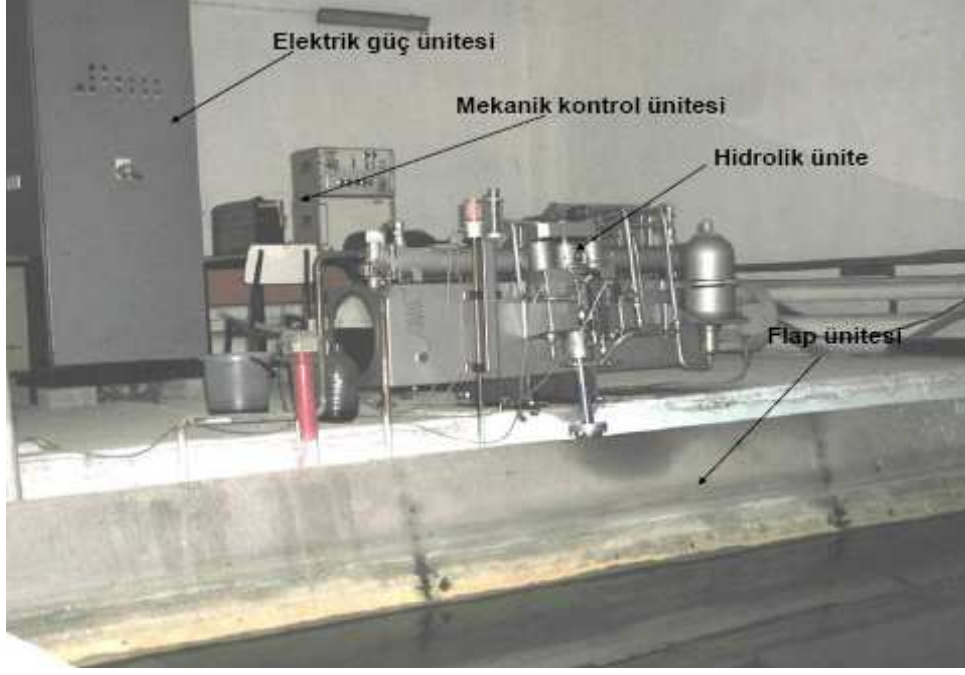
3.4. Dalga Cihazı

3.4.1. Dalga cihazının özellikleri

Büyük model havuzunda dalgalı deniz koşullarını modelleyebilmek amacıyla bir dalga cihazı bulunmaktadır. Dalga cihazına istenilen periyot, genlik ve faz açıları girildiğinde düzenli ve karışık dalgalar üretilebilmektedir. 1972 yılında Alman Kempf und Remmers firması tarafından imal edilen cihaz, 1953 yılında kurulan Gemi Model Laboratuvarına 1975 yılında yapılan bir anlaşma ile ithal edilmiştir. 1988 yılında laboratuvar ile beraber Taşkışla'dan Ayazağa'ya taşınmıştır. Bu taşınma sonrasında havuzun boyutları değişmiş ancak sistem aynı kalmıştır.

Dalga cihazı 4 üniteden oluşmaktadır (Şekil 3.2). Bunlar, elektrik kontrol ünitesi, mekanik kontrol ünitesi, hidrolik ünite ve flap ünitesidir. Elektronik kontrol ünitesi, cihazın çalışması için gerekli olan elektrik trafosu ve sigortalarını barındırmaktadır. Cihaza, bu ünitenin üzerinde yer alan ana şalterin açılması ile elektrik akımı gelir. Dalga cihazının çalışması için gerekli olan girdiler mekanik kontrol ünitesi vasıtasıyla sağlanır. Burada dalga cihazını ve flap arkasındaki suyu boşaltan pompayı kontrol eden bir cihaz ve dalgaların formunu belirlemek için mekanik aksamı diğer bir cihaz bulunmaktadır.

Hidrolik ünite, bir yağ deposu, bu deponun üzerine yerleştirilmiş 12.5 kW'lık elektrik motoru tahrikli bir pompa, flabın hareketini sağlayan piston ve bu pistonu besleyen iki devreden oluşmaktadır. Bu devrelerden ilki yüksek basınç devresi olup flabın önünde ve arkasındaki su seviyesinden dolayı oluşan hidrostatik basıncı dengelemektedir. Bu devre düşük hızlarda çalışmaktadır. Gerekli olan basınçlı yağ ise bir yağ şişesinde depolanmaktadır. Diğer devre düşük basınç devresidir. Bu devre flabın hareketini sağlayan pistonu doğrudan bağlıdır ve yüksek hızlarda çalışır. Pistonu hareket komutları bu devreler üzerinden solenoid vanalar aracılığıyla verilmektedir.

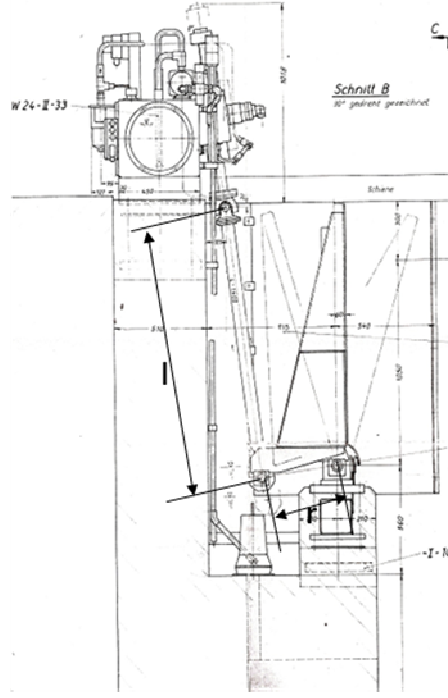


Şekil 3.2 : Dalga cihazının kısımları.

Son ünite olan flap ünitesi, dalga cihazının havuzda dalgaların oluşmasını sağlayan parçasıdır. Flap, havuz tabanından 3150 mm yükseklikteki bir topuk üzerinde mafsallanmış 1350 mm yüksekliğe sahip üçgen şeklinde bir yapıdır. Flap, hareketi veren hidrolik pistonu bir mil aracılığıyla bağlanmıştır. Pistonun lineer hareketine karşılık flap topuktaki mafsallık etrafında dönme hareketi yapar ve bunun sonucunda havuzda dalgalar oluşur (Şekil 3.3).

Mevcut olan bu sistem 1970’li yılların teknolojisi ile üretilmiş olup geçen zamanda teknolojisi oldukça eskimiştir. Mekanik kontrol ünitesiyle oluşturulabilecek frekans değerleri sınırlıdır. Bu yüzden bu sistem karışık dalgaların oluşturulmasında yetersiz kalmaktadır. Günümüze kadar gelen süre zarfında mekanik kontrol ünitesinde bir takım iyileştirme çalışmaları yapılmıştır. Mekanik sistem bilgisayarla kontrol edilebilir hale getirilmiştir. Ancak mevcut sistem korunmuştur ve sinyaller analog olarak gönderilmeye devam edilmiştir. Bu yüzden bu sistem de yetersiz kalmıştır.

Diğer bir sorun ise yetersiz dalga yükseklikleridir. Cihazın ilk tasarımı belli bir dalga yüksekliği yaratacak şekilde yapılmıştır. Ancak artan model boylarından dolayı dalga yüksekliklerinde bir artışa ihtiyaç vardır. Bunun için dalga cihazı istenilen dalga yüksekliğini karşılayacak şekilde geliştirilmesi gerekmektedir.



Şekil 3.3 : Dalgı cihazı.

Sistem uzun yıllardır kullanılmasına karşın gerekli olan bakım çalışmaları yapılamamıştır. Mekanik kontrol sistemindeki bazı parçalar çalışmaz hale gelmişti. Hidrolik üniteye ise bazı parçalar yağ sızdırmaya başlamıştı. Bu yüzden dalgı cihazı düzenli bir şekilde çalıştırılamamaktaydı.

3.4.2. Yenileme çalışmaları

Yukarıda anlatılan problemlerden dolayı gemi hareketleri deneylerinin sağlıklı yapılamayacağı anlaşıldığından dalgı cihazının yenilenmesi gündeme gelmiştir. Bu amaçla çok büyük bir masrafa girmeden dalgı cihazının yenilenmesi ile ilgili bir takım çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalarda masraflarda en büyük kalem olan inşaat işlerinin asgari seviyede tutulması uygun görülmüştür. Bu amaçla flaba ait yapı korunmuştur. Gerek havuzun boyutları gerekse de ileride yapılabilecek inşaat işleri düşünülerek yapılan tasarımda dalgı cihazından istenilen performans değerleri belirlenmiş ve ona göre gücünde bir artırıma gidilmiştir. Ayrıca oldukça eskimiş olan kontrol sisteminin yerine ise modern dijital bir kontrol sistemi kullanılması uygun görülmüştür. Böylece mekanik bir aksama gerek kalmadan tüm veriler dijital olarak bir bilgisayar aracılığıyla işlenebilir hale getirilecektir.

3.4.2.1. Ön tasarım çalışması

Deney havuzunda üretilen dalgaların sınırlarını belirleyen iki faktör vardır.

Bunlardan ilki havuzun boyutlarıdır ve bu boyutlar sabit değerlerdir. Bu boyutlarda bu proje kapsamında herhangi bir değişiklik yapılamayacağından diğer faktör olan dalga cihazının fiziksel kapasitesi üretmek istenen dalgalar için bulunmalıdır. Dalga cihazının kapasitesi, flaba ait yapının korunmuş olmasından dolayı flaba hareketi sağlayan pistonun kuvveti ve hızı ile ilgilidir. Bu parametrelerin bulunması ile hidrolik sistem için gerekli olan bilgiler sağlanmış olur.

Şekil 3.4 : Flap tipi dalga cihazının çalışma şeması ve eksenlerin tanımı.

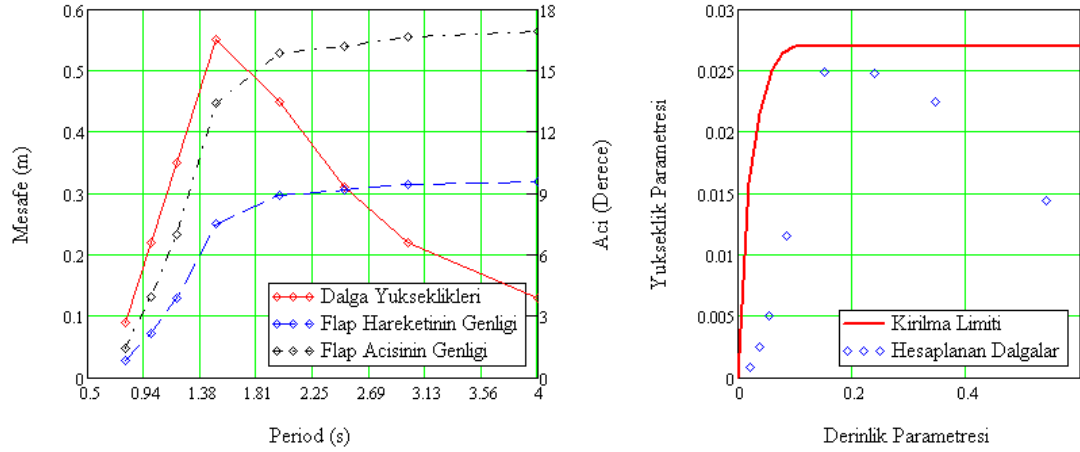
şeklindeki gibi bir bağıntı vardır. Burada ilerleyen dalganın dalga sayısı olan k terimi

denklemleri kullanılarak bulunabilir.

Üretilen dalgalar ait kırılma limitleri ile dalga yükseklikleri ve flap genlikleri ise Şekil 3.4'te verilmiştir.

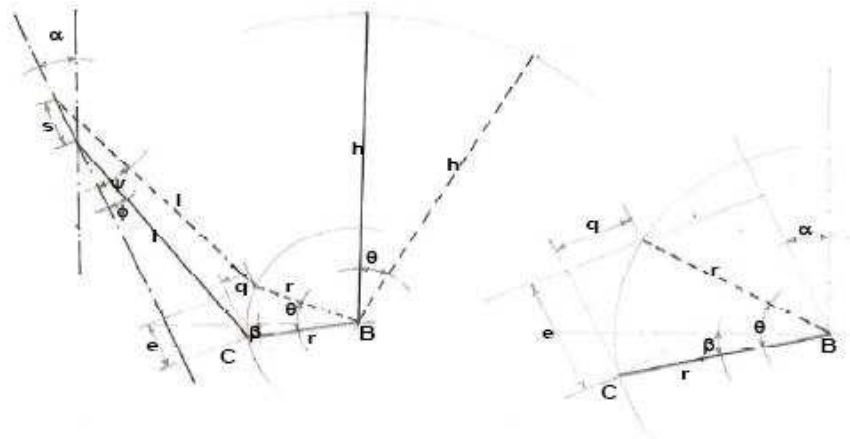
Çizelge 3.1 : Dalga periyotları ve yükseklikleri ile teorik kırılma limitleri

T (s)	0.80	1.00	1.20	1.50	2.00	2.50	3.00	4.00
H (m)	0.09	0.22	0.35	0.55	0.45	0.31	0.22	0.13
α (°)	1.4	3.9	7.0	13.4	15.8	16.2	16.6	16.9



Şekil 3.5 : Dalga yükseklikleri, flap hareketi genlikleri ve dalgaların kırılma limiti.

Bu kısıtlamalar bulunduktan sonra pistonun hareketi ile flabın hareketi arasındaki bağıntıları bulmak gerekmektedir. Şekil 3.6'da da görüleceği üzere piston bir mafsal ile üçgen şeklindeki flaba C noktasından bağlıdır. Böylece pistonun s genliği ile ileri geri hareketi sonucu flapta B noktası etrafında r yarıçaplı daire üzerinde θ açısal genliği ve ω açısal frekansı ile dönme hareketi yapar.



Şekil 3.6 : Flap hareketi ile piston hareketi arasındaki ilişki.

Şekil 3.6'daki geometrik benzerliklerden faydalanarak piston hareketini veren denklem

$$s = l \cos \psi - [l - a] \quad (3.3)$$

şeklinde yazılabilir. Burada a uzunluğu yerine

$$a = r \sin \theta \quad (3.4)$$

yazılır ve pistonu flaba bağlayan şaftın piston eksenini ile yaptığı açı olan ψ açısı da

$$\sin \psi = \frac{r}{l} [1 - \cos \theta] \quad (3.5)$$

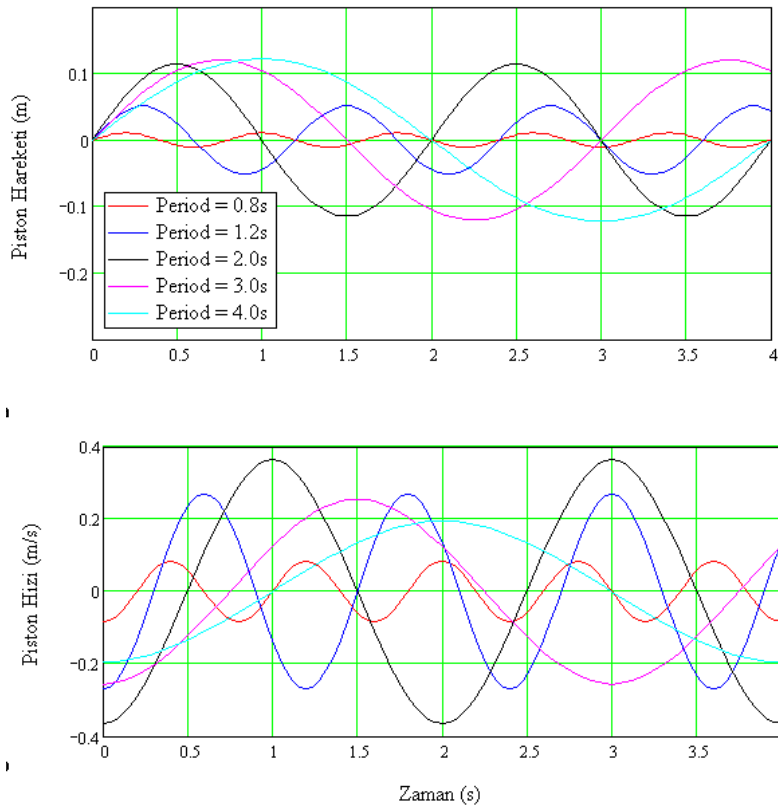
denklemden hesaplanıp (3.3)'teki denklemden yerine konursa

$$s = \sqrt{l^2 - r^2 [1 - \cos \theta]^2} - [l - r \sin \theta] \quad (3.6)$$

denklemini elde edilir. Burada da görüldüğü üzere pistonun genliğinin değişimi sinüzoidal bir hareket değildir. Ancak r/l oranının ve θ açısının küçük değerler olmasından dolayı pistonun hareketi sinüzoidalıya yakın çıkar. Piston genliğinin zamana göre türevinin alınması ile pistonun hızı

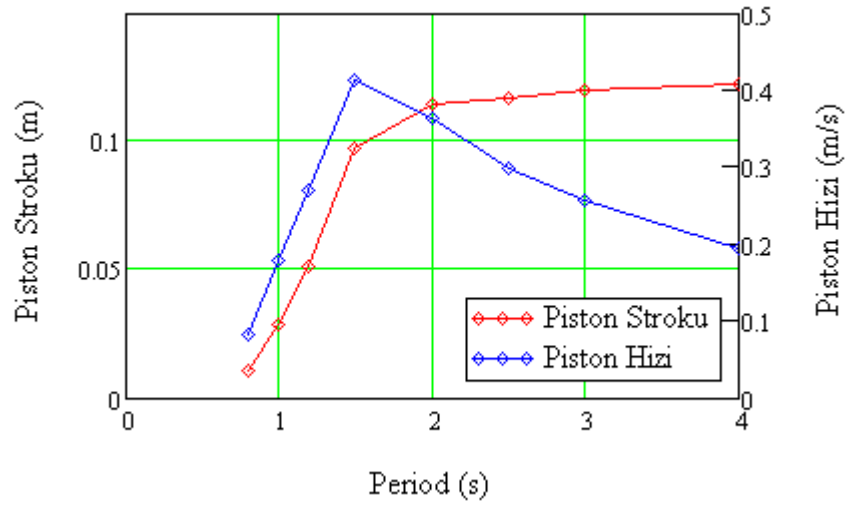
$$v = \dot{s} \left[r \cos \theta - \frac{r^2 [1 - \cos \theta] \sin \theta}{\sqrt{l^2 - r^2 [1 - \cos \theta]^2}} \right] \dot{\theta} \quad (3.7)$$

hız denklemini bulunur. Belirli periyotlardaki piston genliği ve hızı Şekil 3.7'de verilmiştir. Bu şekilde de açıkça görüldüğü üzere pistonun hareket genliği sinüzoidalıya yakındır.



Şekil 3.7 : Pistonun konumu ve hızının zamanla değişimi.

Piston ve hız değerlerinin herbir periyottaki değerleri Şekil 3.8’de verilmiştir. Burada görüldüğü üzere piston maksimum hızına 1.5 sn periyotta erişmektedir.



Şekil 3.8 : Pistonun hareket ve hızının genliklerinin periyoda göre değişimi.

Pistonun hareketi için gerekli olan kuvvet

$$F_p = \frac{T_t}{r \sin \theta} \quad (3.8)$$

denklemleri ile bulunur. Burada yer alan T_t , toplam torku göstermektedir. Toplam tork dört adet bileşenden oluşmaktadır. Bunlardan ilk ikisi havuzda oluşan sinüzoidal ilerleyen ve duran dalgalara ait tork değerleridir. Üçüncüsü flabın önü ve arkasındaki su seviyesi farkından kaynaklanan hidrostatik basınçtan gelen torktur. Sonuncusu ise flabın kendi ataletinden gelen tork değeridir. İlerleyen dalga torku olan T_i , flabın hızı ile duran dalgaların torku T_d ve flabın atalet torku T_a flabın ivmesi ile aynı fazdadır. Hidrostatik tork ise sabittir. Toplam tork tüm bu bileşenler cinsinden

$$T_t = T_i \cos(\omega t) + (T_d + T_a) \sin(\omega t) + T_o \quad (3.9)$$

şeklinde ifade edilir. Tork bileşenlerinin genlikleri dalga karakteristikleri ve tank boyutları cinsinden

$$T_i = T_i \cos(\omega t) + (T_d + T_a) \sin(\omega t) + T_o \quad (3.10)$$

$$T_t = T_i \cos(\omega t) + (T_d + T_a) \sin(\omega t) + T_o \quad (3.11)$$

$$T_t = T_i \cos(\omega t) + (T_d + T_a) \sin(\omega t) + T_o \quad (3.12)$$

$$T_t = T_i \cos(\omega t) + (T_d + T_a) \sin(\omega t) + T_o \quad (3.13)$$

şeklinde hesaplanır. Duran dalgalarındaki tork denkleminde yer alan A_n ifadesi

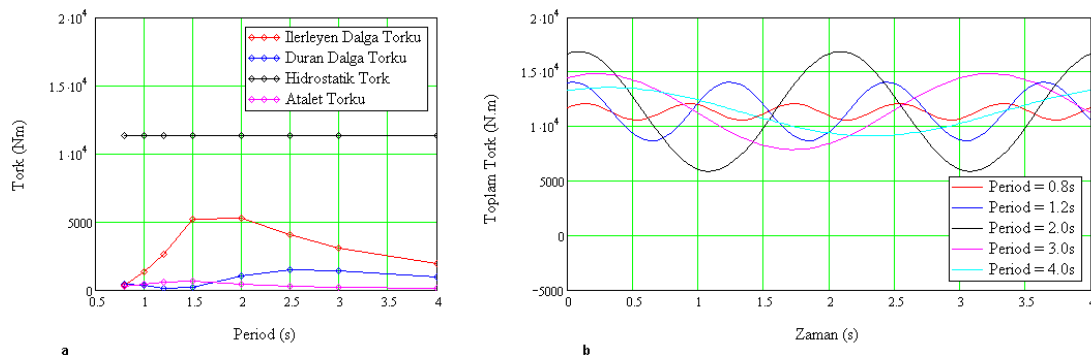
$$A_n = 2s \frac{k_n f \sinh(k_n h) + \cosh(k_n h) - \cos(k_n d)}{k_n f [\sinh(k_n h) \cosh(k_n h) + k_n h]} \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (3.14)$$

şeklinde hesaplanır. Buradaki duran dalgaların dalga sayısı olan k_n ise

$$-gk_n \tanh(k_n h) = \omega^2 \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (3.15)$$

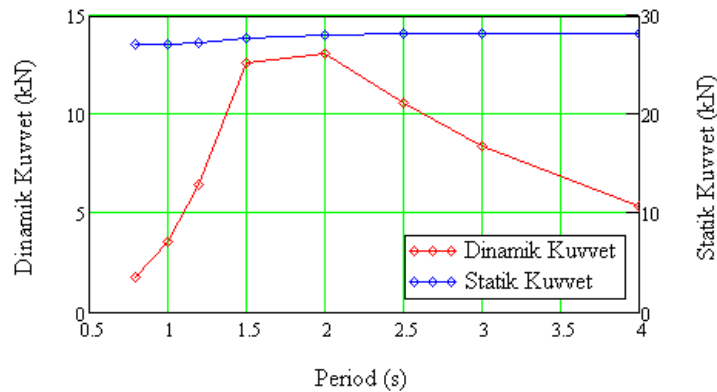
denkleminde elde edilir.

Bu tork değerlerinin her periyottaki değerleri ve bu periyotlardaki toplam torkun zamanla değişimi Şekil 3.9'de verilmiştir. Buna göre toplam torkta en büyük etkiyi hidrostatik torkun sağladığı görülmektedir. İkinci büyük tork değeri ise ilerleyen dalgaların torkudur. Diğer iki tork değeri ise nispeten küçük kalmaktadır.



Şekil 3.9 : Tork bileşenlerinin genlikleri ve toplam torkun zamanla değişimi.

Toplam torkun bulunması ile (3.8) denklemi kullanılarak toplam piston kuvveti hesaplanır. Dalga cihazının flabı çalıştırması için gerekli olan hidrolik gücün iki devreden sağlandığı önceden söylenmişti. Bunlardan yüksek basınç devresi için gerekli olan gücü hesaplarken piston kuvvetinin statik kuvvetini hesaba katmak gerekmektedir. Düşük basınç devresindeki güç hesabı için ise toplam kuvvetin dinamik bileşenini kullanmak gerekmektedir. Bu bileşenlerin her bir periyottaki değerleri Şekil 3.10'da verilmiştir.



Şekil 3.10 : Piston kuvvetleri genliklerinin periyoda bağlı olarak değişimi.

Burada da görüldüğü üzere dalga cihazının tasarımı için gerekli olan maksimum dinamik piston kuvveti 2 sn periyotta 13.1 kN ve maksimum statik piston kuvveti 4 sn periyotta 28.3 kN olarak belirlenmiştir. Ayrıca Şekil 3.8’de görüldüğü üzere maksimum piston hızı 1.5 sn periyotta 0.41 ms^{-1} olarak seçilmiştir.

3.4.2.2. Yenilenen sistem

Yapılan tasarım çalışmalarının ardından iki firma ile temasa geçilerek dalga cihazının yenilenmesi konusunda anlaşmaya varıldı. Bu iki firmadan biri hidrolik sistemin yenilenmesi diğeri ise kendi ürettikleri dijital kontrol sistemini cihaza entegre etmek için çalışmışlardır. Çalışmalar iki ay sürmüş ve sistem çalışabilir hale gelmiştir (Şekil 3.11).



Şekil 3.11 : Dalga cihazının yenilenmiş hali.

Hidrolik sistemin gücünün artırılması amacıyla yağ tankının üzerindeki elektrik motoru ve yağ pompasına eş değerde bir motor ve pompa daha yerleştirildi. Bu pompadan da eski sistemde olduğu gibi iki basınçlı yağ devresi çıkmaktadır. Bunlardan ilki yüksek basınç devresi olup bu devre eklenen ikinci bir yağ şişesine gitmekte ve yağı burada depolamaktadır. Bu şişeden çıkan yüksek basınçlı yağ eski şişeden çıkan yağ ile birlikte birleşip silindire giderek buradaki hidrostatik kuvveti karşılamaktadır. Düşük basınçlı devre ise yeni pompadan çıkıp eskisi ile birlikte doğrudan silindirde birleşmekte ve böylece dinamik kuvveti karşılamaktadır.

Eski sistemin mekanik kontrol ünitesi ve elektrik ünitesi tamamen değiştirilerek yeni ve nispeten daha az yer kaplayan bir elektrik ve kontrol ünitesi yerleştirildi. Elektrik şalterleri ve sigortaları ile dijital kontrol kartı küçük bir konsol içine yerleştirildi (Şekil 3.12). Şekil 3.12a'da görüldüğü üzere sistemin çalıştırılabilmesi için konsolun yanında yer alan ana şalter açılmalıdır. Şekil 3.12b'de konsolun üst yapısında yer alan kontrol kartında bilgisyardan kontrolü sağlayan bir seri kablo bağlantısı bulunmaktadır. Ayrıca bu bölümde harici bir 220 V soketi bulunmaktadır. Konsolun alt yapısında görülen şalterler ve sigortalar ise hidrolik pompalar ve flap arkasındaki suyu boşaltan pompayı kontrol etmektedir.



Şekil 3.12 : Kontrol konsolu a) Ana Şalter b) İç görünüm

Konsoldaki manuel kumanda işleri konsolun üzerinde yer alan bir panel ile yapılır. Bu panel Şekil 3.13'de verilmiştir. Burada da görüldüğü üzere sistem start düğmesine basılarak çalışmaktadır. Sistemi kumanda etmek için iki seçenek bulunmaktadır. Bu iki seçenek çalışma modu seçim düğmesi ile belirlenir. Sistem çalışmadan önce flap yatık durumdan dik duruma getirilmelidir. Bunun için bu düğme önce manuele getirilmelidir. Manuelde iken manuel kumanda düğmeleri ile flap dik konuma getirilir. Daha sonra mode seçim düğmesi otomatiğe alınır. Böylece sistem bilgisyardan çalışır hale gelmektedir. Konsol üzerinde ayrıca iki tane de filtre göstergeleri yer almaktadır. Bunlardan filtrelerde herhangi bir pislik birikmesi

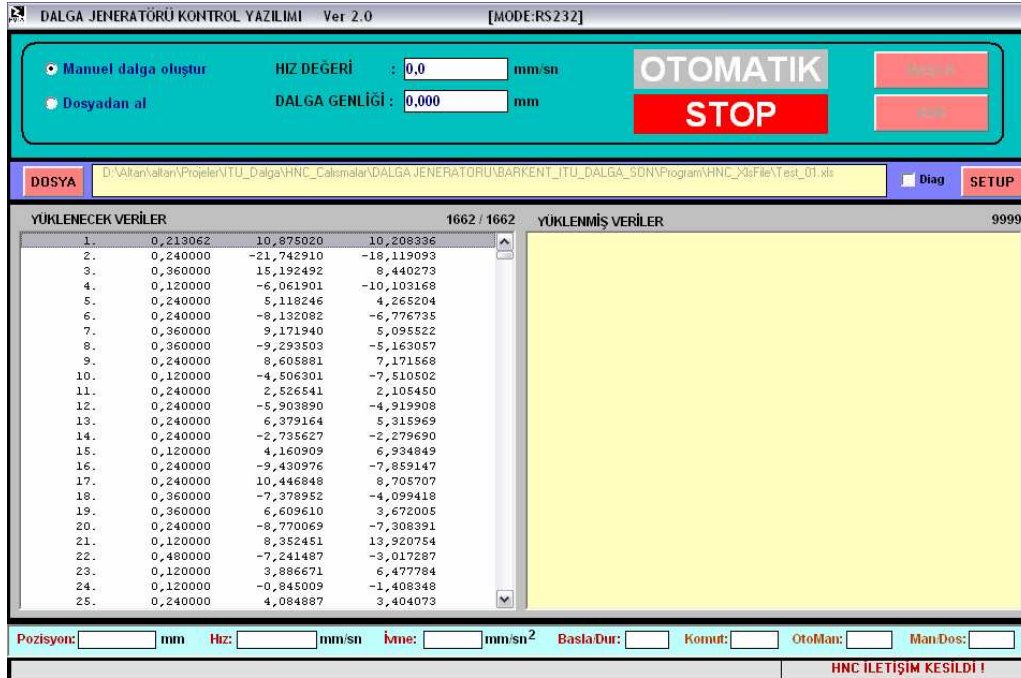
sonucu oluşacak hataları ışıklı olarak bildirmektedirler. Sistemin açılışında bazen bu ışıklar yanmaktadır. Ancak bir süre sonra bu uyarı ışıkları sönmektedir. Bunun nedeni kullanılan yüksek viskoz yağın ısınmamasından dolayı filtreden yağın çok yavaş akmasından kaynaklanmaktadır. Yağ ısınınca bu sorun ortadan kalkmaktadır. Sistemi durdurmak için ya da aniden kapatmak gerektiğinde sistem ani stop düğmesinden kapatılmaktadır.



Şekil 3.13 : Kontrol Paneli.

Kontrol panelinden çalışma modu otomatik moda getirildikten sonra kontrol bilgisayarda yer alan “Rota Teknik Dalga Jeneratörü Software” programı kullanılarak yapılır. Bu program ilk olarak sistem yenilendiği zaman kurulmuş ancak daha sonra üretilen dalgalarda yetersiz kaldığı için bir takım ekler yapılmıştır. Bu ekler sonucu en son halini almıştır (Şekil 3.14). Bu programda dalgalar iki şekilde oluşturabilmektedir. Bunlardan ilki “manuel dalga oluştur” seçeneğiyle üretilen dalgalar olup düzenli dalgaları oluşturmak için kullanılır. Burada üç adet girdi girilmesi gerekmektedir. Bunlar pistonun hızı, genliği ve ivmesidir. Diğer seçenek ise “dosyadan al”dır. Bu seçenek ile bir Excel dosyası kullanılarak dalga formu oluşturulur. bu dalga hem düzenli hem de karışık dalga olabilir. Yüklenecek Excel dosyasındaki veriler 4 tanedir. Bunlar sırasıyla girdinin sıra numarası, ivme, konum ve hızdır. Dosya butonuna basılarak dosya bilgisayardan programa yüklenir ve

içerisindeki veriler programın içindeki “Yüklenecek Veriler” penceresinde görülür. Program “başla” tuşuna basılarak çalıştırıldığında 10’ar 10’ar veriler alınarak belleğe yüklenir ve her verinin işi bitince yerine yenisi yüklenir. Tüm bu işler ise “Yüklenmiş Veriler” bölümünde görülür.



Şekil 3.14 : Kontrol sisteminin programı.

3.4.3. Sistemin kalibrasyonu

Sistemin yenilenmesinin ardından sistemin kalibrasyon çalışmaları yapılmıştır. Kalibrasyon çalışmaları, pistonun hareketi ile oluşacak dalga arasındaki bağıntının bulunmasını içermektedir. İki tip dalga üretileceğinden kalibrasyonda bu her iki dalga türü için ayrı yapılacaktır. Düzgün dalgalarda faz açısı önemli olmadığından dalga genliği ile piston genliği arasındaki ilişkinin bilinmesi yeterlidir. Ancak karışık dalgalarda her hareket anındaki faz açısının da bilinmesi gerekmektedir.

Düzenli ve karışık dalgalar için yapılan kalibrasyon işlemleri iki şekilde yapılacaktır. Önce pistona ait kinematik denklemler ve dalgalara ait genel denklemler kullanılarak piston ile dalgalar arasında matematiksel bir ilişki bulunacaktır. Buna teorik kalibrasyon işlemi denmektedir. Daha sonra ise teorik kalibrasyondan elde edilen değerler kullanılarak dalga cihazı çalıştırılacak ve burada pistonun hareketi ile üretilen dalganın özelliklerinin teorik değerlerle uyuşup uyuşmadığı kontrol edilecektir. Bu da deneysel kalibrasyon işlemi olarak adlandırılır.

3.4.3.1. Teorik kalibrasyon

Dalga cihazına ait flabın açısıl genliğinin üretilen dalganın genliği ile olan ilişkisi (3.1) denklemi ile verilmiştir. Flaba hareketi sağlayan pistonun genliğinin flabın açısıl genliği ile olan ilişkisi ise (3.6) denklemi ile verilmiştir. Bu denklemler kullanılarak piston genliği ile dalga genliği arasındaki ilişki bulunabilir. Bu ilişki kullanılarak seçilen her bir periyot için piston genliğinin dalga genliğine oranı bulunabilir. Bu oran kalibrasyon katsayısı olarak adlandırılır ve

$$\beta_w = \frac{H_p}{H_d} \quad (3.16)$$

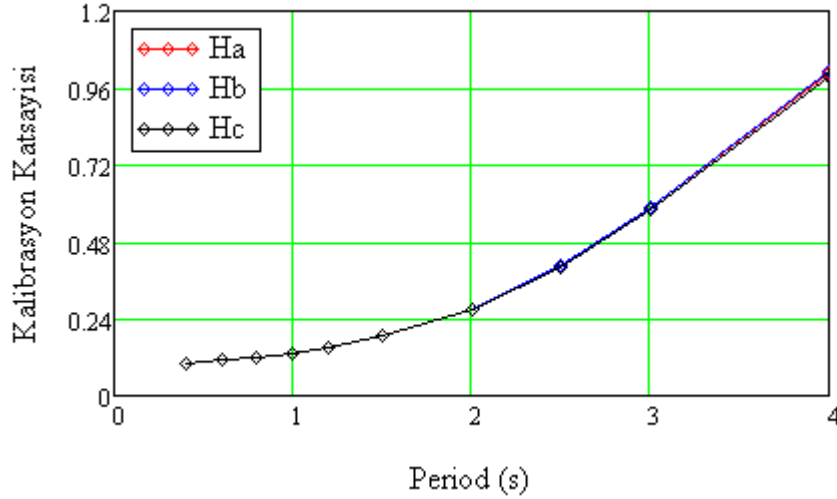
şeklinde gösterilir. Dalgalara ait kalibrasyon fonksiyonunu belirleyebilmek için her frekansa karşılık gelen kalibrasyon katsayısı bulunmalıdır. Böylece elde edilen eğrinin denklemi kalibrasyon fonksiyonunu verecektir.

Kalibrasyon fonksiyonu dalga yüksekliklerinden bağımsız olmalıdır. Yani aynı periyotta her bir dalga yüksekliğinde kalibrasyon katsayısı aynı değeri vermelidir. Bu amaçla, yapılan çalışmada farklı dalga yüksekliklerinde üç adet teorik kalibrasyon fonksiyonu bulunmuştur. Periyotlar ve bunlara karşı gelen üç farklı dalga yükseklikleri matrisleri Çizelge 3.2’teki gibi verilirse periyoda karşılık kalibrasyon katsayıları grafiği Şekil 3.15’teki gibi olur. Görüldüğü üzere değişik aynı periyotta farklı dalga yükseklikleri kullanılmasına rağmen kalibrasyon eğrilerinde bir farklılık görülmemektedir.

Çizelge 3.2 : Periyot ve dalga yükseklikleri

T [s]	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.5	2.0	2.5	3.0	4.0
Ha [m]	0.04	0.06	0.09	0.12	0.20	0.25	0.25	0.15	0.10	0.06
Hb [m]	0.04	0.05	0.05	0.10	0.18	0.20	0.18	0.10	0.07	0.05
Hc [m]	0.04	0.08	0.09	0.17	0.27	0.40	0.30	0.21	0.15	0.09

Kalibrasyon katsayısı, (3.1) denklemindeki havuza ait derinlik parametresinden dolayı her bir derinlik değeri için farklılık göstermektedir. Bu yüzden derinliğin değişmesi durumunda kalibrasyon katsayıları yeniden hesaplanmalıdır.



Şekil 3.15 : Teorik kalibrasyon eğrileri.

Teorik kalibrasyon hesabında yapılması gereken son çalışma ise her periyotta oluşan piston hareketi ile dalga hareketi arasındaki faz farkının belirlenmesidir. Faz farkı mevcut denklemlerden kolaylıkla elde edilemez. Bu yüzden başlangıçta bir yorum yapılarak tahmin edilebilir. Flap ile pistonun dengede olduğu durumlarda dalga en düşük durumunda olacağı için arada 90° 'lik faz farkı olduğu söylenebilir. Bu durumda her bir periyotta faz farkının 90° olduğu kabul edilir. Ancak gerçekte bu böyle olmayabilir. Bu ancak yapılacak deneysel kalibrasyon çalışmaları ile anlaşılabilir.

3.4.3.2. Deneysel kalibrasyon

Deneysel kalibrasyon, düzenli ve karışık dalgalar için ayrı ayrı yapılır. Düzenli dalgaların deneysel kalibrasyonu için öncelikle teorik kalibrasyondan elde edilen kalibrasyon değerleri ile dalga cihazından düzenli dalgalar üretilir. Dalga cihazının düzenli dalgalar üretmesi için üç adet parametreye ihtiyacı vardır. Bunlar piston genliği, hızı ve ivmesidir. Piston genliği değeri, istenilen periyot ve dalga yüksekliğine karşı gelen teorik kalibrasyon eğrisinden bulunur. Piston hızı ve ivmesini bulabilmek için ise bir dizi işlem yapmak gerekmektedir. Öncelikle istenilen dalgaya ait olan dalga genliği ζ_0 ve dalga periyodu T_0 belirlenir. Bu değerler,

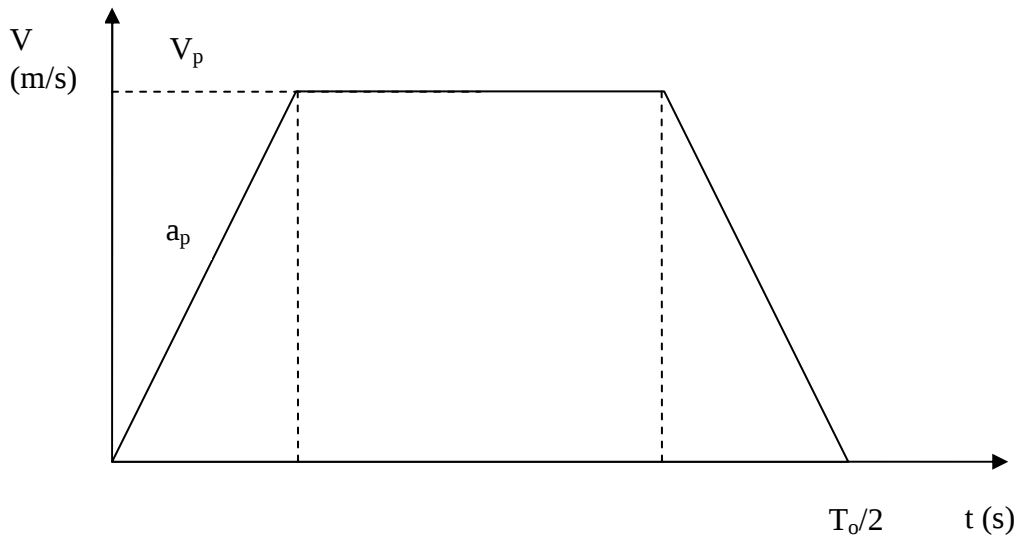
$$\zeta(x, t) = \zeta_0 \cos(k_0 x - \omega_0 t - \phi_0) \quad (3.18)$$

dalga denkleminde yerine konur. Burada yer alan Φ_0 keyfi seçilmiş faz açısı olup düzenli dalgalarda bir önemi olmadığından sıfır olarak alabiliriz. Denkleminde yer alan dalga sayısı k_0 ve açısal frekans ω_0 ise

$$\omega_o = \frac{2\pi}{T_o} \quad k_o = \sqrt{\frac{\omega_o^2}{g \tanh(k_o d)}} \quad (3.19)$$

şeklinde gösterilir.

Pistonun hareketi de ω_o açısal frekansı ile olmaktadır. Ancak dijital kontrol sistemi pistonu sinüzoidal bir hareket yaptırmamaktadır. Bunun yerine Şekil 3.16'da görüldüğü üzere piston, sabit bir ivmeyle sıfır hızdan istenilen piston hızına kadar hızlanmakta daha sonra bir süre bu hızda gittikten sonra yine aynı ivme değeriyle hızı sıfıra gelmektedir.



Şekil 3.16 : Kontrol sistemi çalışma prensibi.

Piston genliğine eşit sürede olan bu hareketin denklemini bulabilmek amacıyla bu hareketin gerçekleştiği sürenin yarısı yani periyodun dörtte biri alınır (Şekil 3.17).

Burada t_a hızın sabit olduğu süreyi göstermekte olup hareketin bittiği sürenin bu süreye oranı

$$\frac{T_o/4}{t_a} = n \quad (3.20)$$

şeklinde gösterilir. Buna göre ivmeli hareketin gerçekleştiği zaman

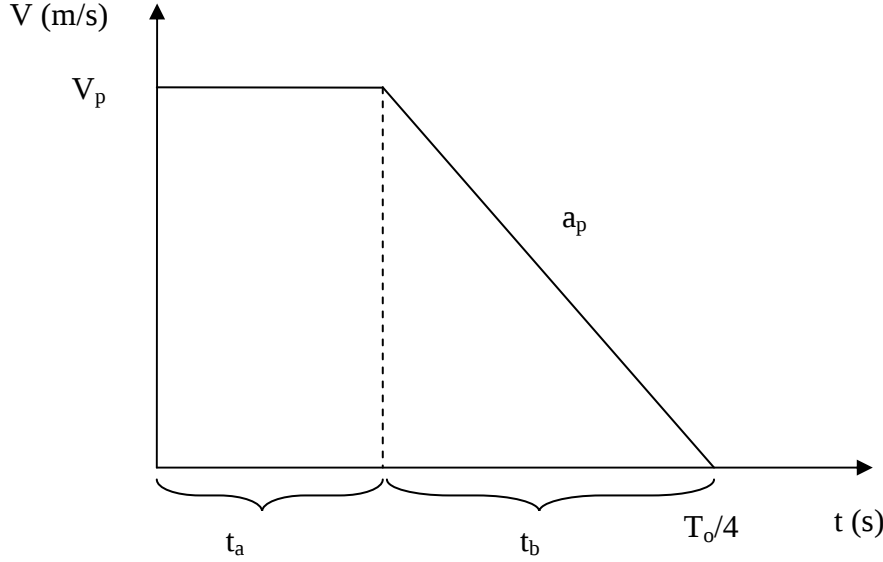
$$t_b = \frac{T_o}{4} \frac{(n-1)}{n} \quad (3.21)$$

olarak gösterilir. Bu durumda pistonu ait ivme ve hız denklemleri

$$a_p = \frac{32 \cdot s}{T_o^2} \frac{n^2}{n^2 - 1} \quad (3.22)$$

$$v_p = a_p \cdot \frac{T}{4} \frac{n-1}{n}$$

olarak bulunur.



Şekil 3.17 : Piston hareketi.

Bu denklemlerde yer alan n terimine deneme yanılma yolu ile en uygun değer 1.7 olarak belirlenmiştir. Bu durumda matris halinde verilen

Çizelge 3.3 : Dalgalara ait değerler

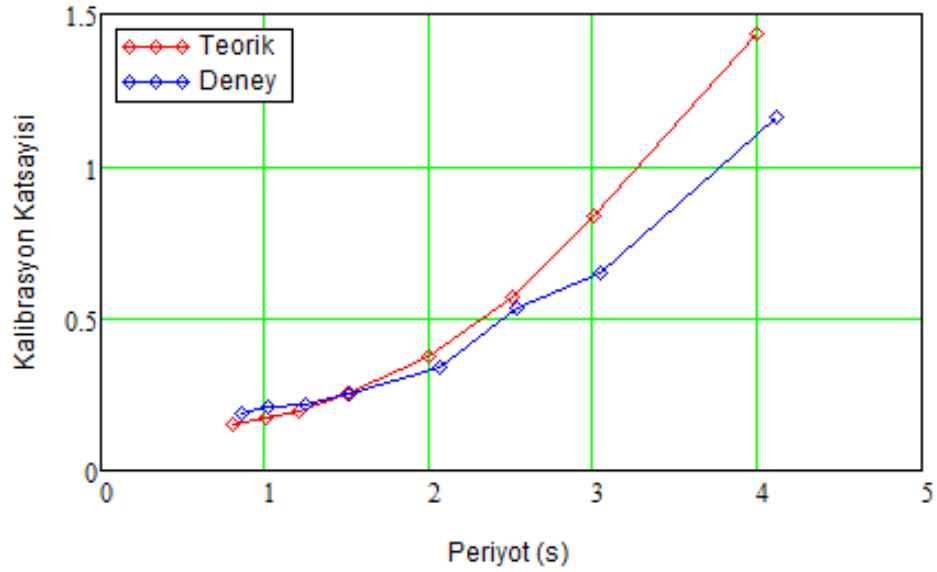
T_o [s]	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.6	1.8	2.0	2.2	2.4	2.6	3.0
H_w [m]	0.05	0.05	0.05	0.10	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.10	0.05	0.05

periyot ve dalga yüksekliği değerlerine karşılık gelen pistona ait genlik, hız ve ivme değerleri hesaplanır. Bu durumda hesaplanan bu değerler Çizelge 3.4’de verilmiştir.

Çizelge 3.3’deki değerler dalga cihazının yazılımında girdi olarak girilir ve dalga cihazı çalıştırılır. Dalga cihazının üzerindeki elektronik cetvelden ve dalga problarından sırasıyla piston genliği ve dalga genlik değerleri ölçülür. Yapılan ölçümlerin sonucunda her bir periyota karşılık gelen kalibrasyon katsayıları hesaplanır ve deneysel kalibrasyon fonksiyonu elde edilir. Deneysel ve teorik kalibrasyon eğrilerinin karşılaştırılması Şekil 3.18’da verilmiştir.

Çizelge 3.4 : Pistona ait değerler

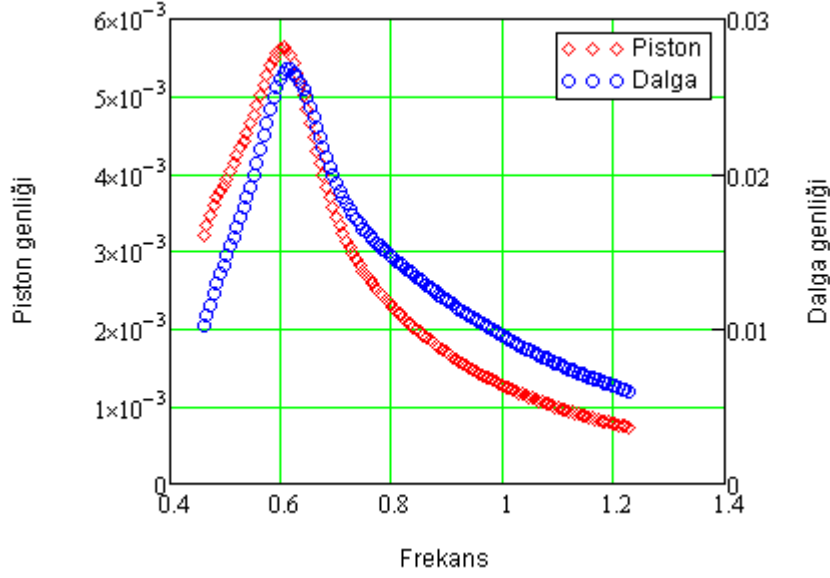
T_o [s]	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.6	1.8	2.0	2.2	2.4	2.6	3.0
V_p [mm/s]	82	58	48	86	125	131	134	141	155	112	61	70
H_p [mm]	6	7	8	17	30	42	80	56	68	53	31	42
A_p [mm/s ²]	1986	933	580	840	1008	797	721	684	686	452	226	228



Şekil 3.18 : Teorik ve deneysel kalibrasyon sonuçları.

Şekilde de görüldüğü üzere her iki kalibrasyon eğrisi periyodun 2.4 s olduğu yere kadar uyumlu gitmekle beraber buradan sonra eğimlerinde bir farklılaşma gözükmemektedir. Bu tamamen flabın yapısı ve pistonun gerçekte lineer olmayan hareketinden kaynaklanmaktadır. Bu durumda havuzda düzgün dalgalarla yapılacak deneyler için periyodun 0.8 s ile 2.4 s arasında seçilmesi gerekmektedir.

Benzer şekilde karışık dalgalarda kalibrasyon işlemlerini yapmak için karışık dalgaları temsil eden bir spektrum seçmek gerekmektedir. Bunun için JOWNSWAP Spektrumu kullanılacaktır. Havuzdaki üretilen dalgaların ise 1/50 ölçekde olduğu kabul edilecektir. Bu durumda belli bir periyot aralığında üretilen dalgalarla ait spektrum ve pistonun ait spektrum Şekil 3.19'daki gibi olacaktır.

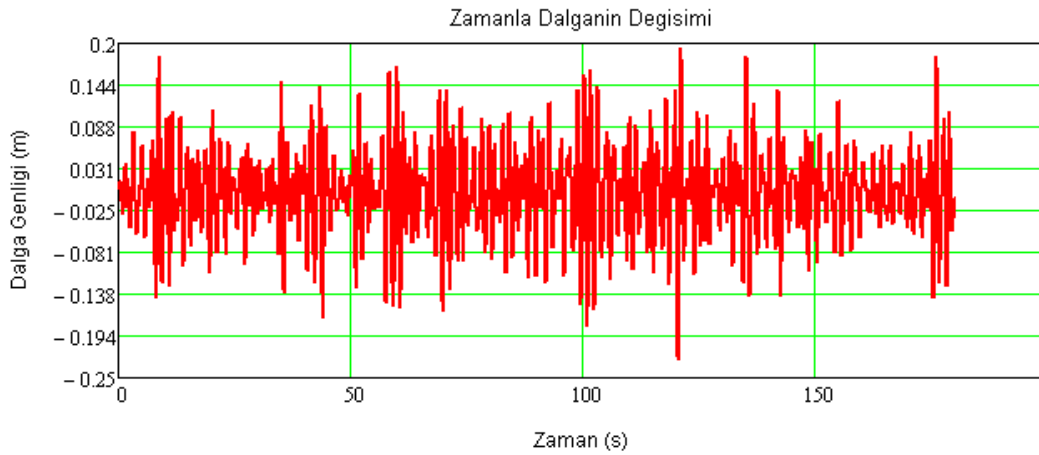


Şekil 3.19 : Karışık dalgaya ait olan piston ve dalga genliği spektrumları.

Bu spektrumlar bulunduktan sonra bunları zaman serileri şeklinde açarak istenilen dalga formlarına getirmek gerekir. karışık dalgalar çok sayıda periyodik dalgadan oluştuğundan

$$\zeta(x,t) = \sum_n a_n \cos(k_n x - \omega_n t + \phi_n) \quad (3.23)$$

denklemini ile karışık dalgayı ifade edebiliriz. Böylece oluşan dalgaya ait form Şekil 3.20’de verilmiştir.

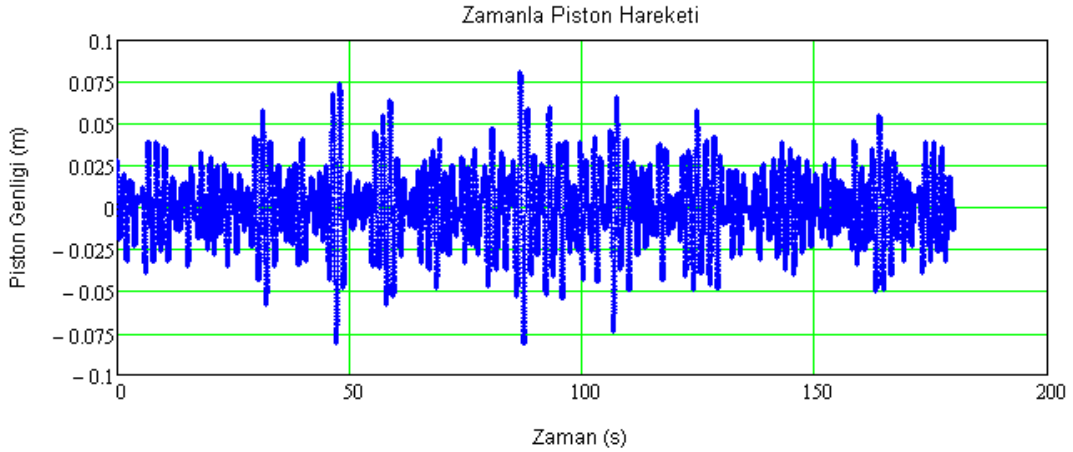


Şekil 3.20 : Zamanla karışık dalgadaki değişim.

Aynı şekilde pistonun ait olan hareketi de

$$\begin{aligned}
s(t) &= \sum_n s_n \cos(\omega_n t + \phi_{pn}) & s_n &= \beta_n a_n & \phi_{pn} &= \phi_{fn} - \phi_n \\
v(t) &= -\sum_n \omega_n s_n \sin(\omega_n t + \phi_{pn}) \\
a(t) &= -\sum_n \omega_n^2 s_n \sin(\omega_n t + \phi_{pn})
\end{aligned} \tag{3.24}$$

denklemleri ile ifade edebiliriz. Burada pistonu ait hareket formu Şekil 3.21’de verilmiştir.



Şekil 3.21 : Zamanla piston hareketinin değişimi.

Pistona ait hareket miktarları hesaplandıktan sonra FORTRAN’da yazılmış olan bir kod vasıtasıyla bu hareketlerin tepe ve çukur değerleri bulunur ve buradan bulunan genliklerin hız ve ivme değerleri hesaplanır. Hesaplanan değerler bir Excel dosyasına yazdırılır. Bu dosya Dalga Cihazı Yazılımına dalga girdi dosyası olarak okutulur. Ve dalga cihazı çalıştırılır.

Kalibrasyon işlemlerinde ağırlıklı olarak düzenli dalgalar üzerinde durulmuştur. Düzensiz dalgalar ile ilgili deneyler henüz tam anlamıyla yapılmamıştır. O yüzden bu çalışmada çok üzerinde durulmayacaktır.

3.5. Dalga Ölçüm Sistemi

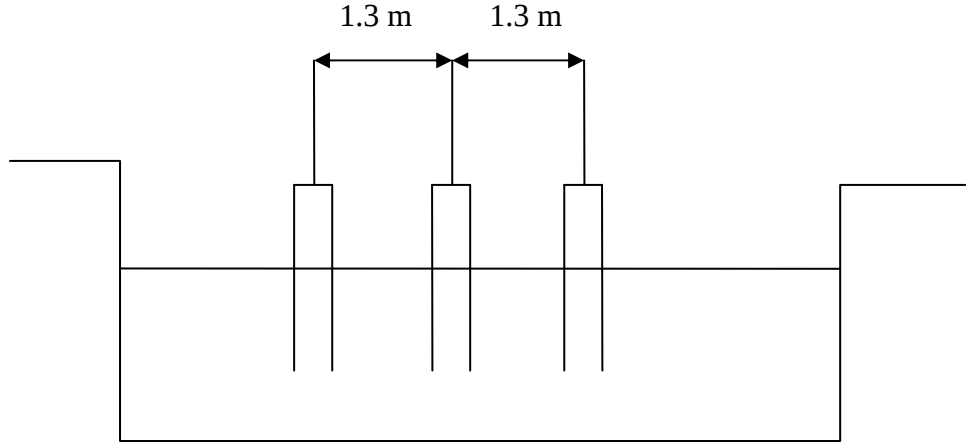
Üretilen dalgaların genliklerinin ölçülebilmesi için dalga ölçüm sistemi kullanılmıştır. Dalga ölçüm sistemi, HR Wallingford firması tarafından imal edilmiş olup üç adet dalga probu, bu problardan gelen sinyalleri yükselten iki adet amplifikatör ve veri iletim kablolarından oluşmaktadır (Şekil 3.22).



Şekil 3.22 : Dalga ölçüm sistemi.

Dalga problemleri, birbirinden izole edilmiş iki iletken telden imal edilmiştir. Bu iki tel arasında su seviyesi değiştiğinde bir elektrik akımı oluşur. Bu akım, veri iletim kabloları vasıtasıyla amplifikatörlere gelmektedir. Küçük akım değerleri burada yükseltilir. Burada yükseltilen analog sinyaller daha sonra bilgisayara iletilmek üzere bir A/D çeviriciye aktarılır. Dijital hale gelen sinyal bilgisayarda yer alan Labview yazılımında oluşturulmuş olan bir ara yüz vasıtasıyla okunur ve kayıt altına alınır. Dalga verileri kayıt altına alınırken “V_xx_H_xxx_A_xxxx.lvm” formatı kullanılır. Burada xx yerine dalga cihazının piston hızı değeri, xxx yerine piston stroğu, xxxx yerine ise pistonun ivme değeri yazılır (Ör: V_40_H_12_A_266.lvm, vb.). Kayıt altına alınan her dosya sistematik olarak deneylerin yapıldığı güne ait olan tarihli klasörlerde saklanır. Deneylerde saniyede 100 veri toplanmaktadır. Bu dalgaların analiz edilmesi için oldukça uygun bir değerdir.

Dalgaların genliklerinin ölçümü için kullanılan deney düzeneği Şekil 3.23’de verilmiştir. Dalgaların havuz eni boyunca deformasyona uğrayıp uğramadığını ölçmek amacıyla havuz eni boyunca eşit mesafede 3 adet dalga probu kullanılmıştır. Dalga problemlerinin biri merkezde diğer ikisi ise bu probun sağından ve solundan 1.3 m uzaklıkta olmak üzere bir köprüye bağlanmıştır. Köprü dalga cihazından 20 m ileride sabitlenmiştir.

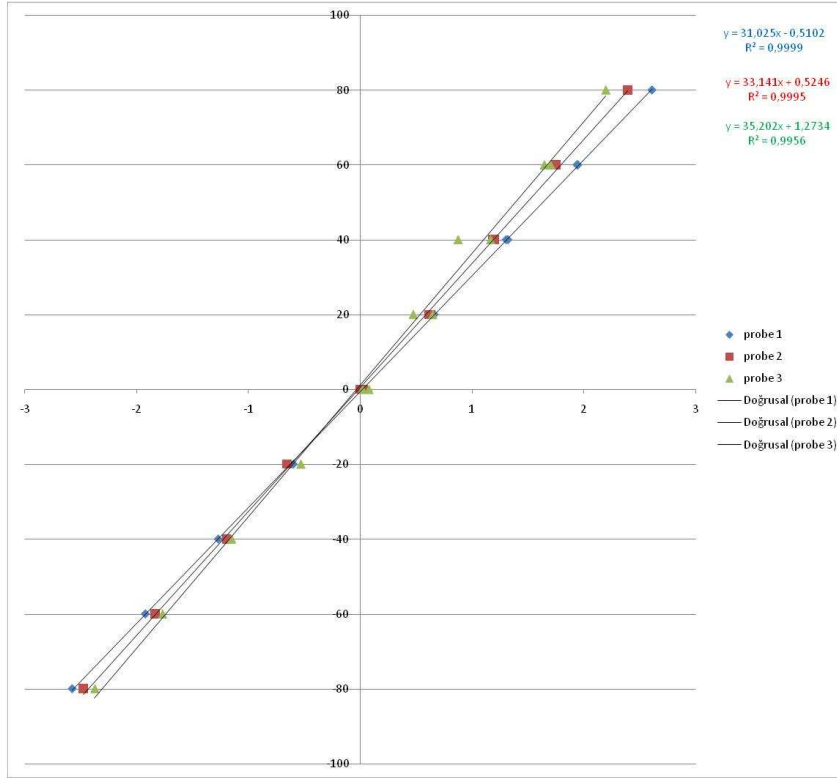


Şekil 3.23 : Dalga probları düzeneği.

Deneyler başlamadan önce sistem iki adet işleme tabi tutulur. Bunlardan ilki kompensasyon işlemidir. Bu işlem her deneyden önce yapılmaz sadece tek bir defa yapılır. Amacı, kablolarda oluşan direnç değerlerinin amplifikatörde sıfırlanmasıdır. Böylece problardaki akım değerleri sağlıklı bir şekilde ölçülür. Kompasasyon için problarla amplifikatör arasında kullanılan veri iletim kablolarının her iki ucu amplifikatördeki TEST ve PROBE girişlerine bağlanır. Daha sonra OPERATE/TEST düğmesi TEST moduna getirilir. Amplifikatörün üzerinde yer alan ekranda ibre sıfır konumuna gelene kadar üzerinde DATUM ADJUST yazan ayar düğmesi çevrilir. Daha sonra TEST toggle switch'i basılı tutulur. Bu sırada ibre bir miktar sağa veya sola kayar. Bir yıldız tornavida ile BALANCE yazılı ayar vidası çevrilerek ibre tekrar sıfıra getirilir. Düğmeden elimizi çektiğimizde ibre tekrar oynamıyorsa kompensasyon bitmiştir. Ancak bir oynama varsa ibrede bir oynama olmayıncaya kadar DATUM ADJUST ayar düğmesi ile başlayan işlemler tekrar yapılır.

Kompasasyon işleminin bitmesi ile beraber diğer işlem olan kalibrasyon işlemine geçilir. Bunun için öncelikle kabloların uçlarından TEST'e takılı olan ikisi dalga probuna takılır. Kalibrasyon işlemi için havuzun sakin su durumunda olması gerekmektedir. Dalga probları yerlerine yerleştirilir. Probların tam ortası sakin su hattına denk gelmelidir. Sakin su hattında konum sıfırdır. Buradan ölçümler alınır. Probların üzerinde yer alan 2 cm arayla delikler bulunmaktadır. Bu delikler sayesinde probalar belli mesafelerde daldırılıp çıkarılır. Sıfır ölçümü alındıktan sonra probalar 2'şer cm daldırılır. Her bir mesafeye karşılık gelen voltaj değerleri okunup kaydedilir. Maksimum mesafeye batırıldıktan sonra tekrar yukarı çıkarılır. Bu sırada

daha önce ölçülen mesafeler tekrar ölçülür. Böylece herhangi bir histerisis olup olmadığına bakılır. Sıfıra geldikten sonra yukarı doğru çıkarılır ve aynı işlemler burada da yapılır. En son tekrar sıfıra getirilir. Yapılan tüm ölçümler sonucu elde edilen voltaj değerleri ile bir eğri çizilir (Şekil 3.24).



Şekil 3.24 : Probların kalibrasyon eğrisi.

Şekil 3.24'deki eğrinin x-ekseninde voltaj, y-ekseninde ise konum değerleri bulunur. Çizelge 3.5 'de bir kalibrasyon çalışmasına ait örnek değerler verilmiştir.

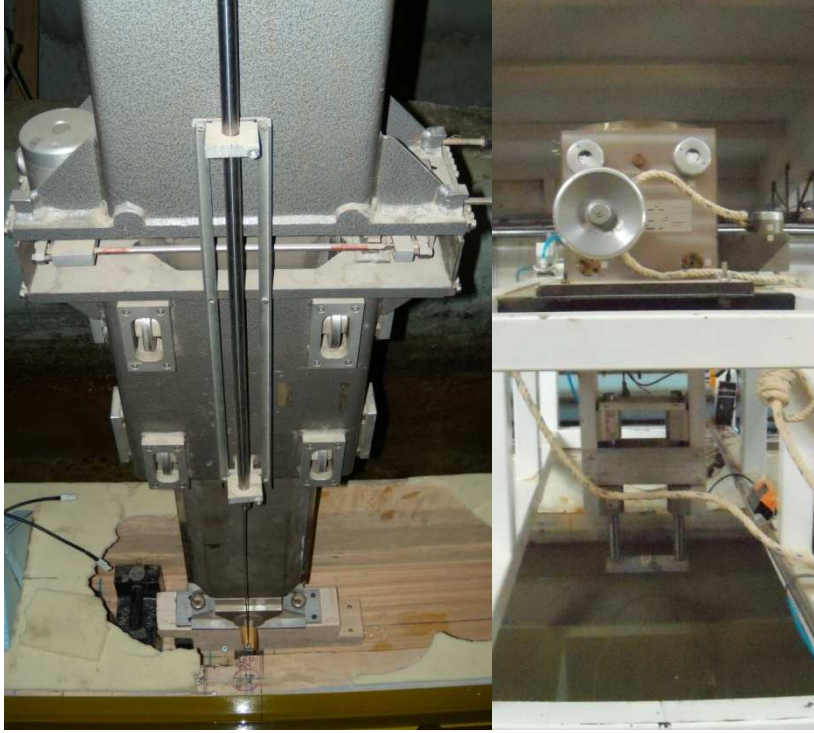
Dalga probları ile ölçüm alınırken bir takım sorunlar ile karşılaşmıştır. Bu sorunlardan ilki amplifikatörlerin tam randımanlı çalışmamasıdır. Bunun nedeni bu cihazların bakımlarının uzun zamandır yapılmamasıdır. Mevcut cihazlardan tam randımanlı çalışan üç kanal bulunmuş ve sürekli olarak bu kanallarla çalışılmıştır. Bir diğer sorun ise dalga problemlerinin uzun zaman nemli ortamda kalmasından dolayı oksitlenmesidir. Bunun için probler deneyler bittikten sonra sudan çıkarılmalı ve nemli olmayan ortamlarda saklanmalıdır. Oksitlenmiş bir prob ise deneyler başlamadan önce ince bir zımpara ile temizlenmelidir.

Çizelge 3.5 : Kalibrasyon değerleri

Uzunluk (mm)	Voltaj 1 (V)	Voltaj 2 (V)	Voltaj 3 (V)
0	0.00488	-0.00329	0.01651
-20	0.64859	0.61252	0.47066
-40	1.30205	1.18707	0.87150
-60	1.93504	1.75138	1.64324
-80	2.60550	2.39185	2.19244
-60	1.94360	1.75058	1.69943
-40	1.31761	1.19998	1.16244
-20	0.65965	0.63274	0.64541
0	0.01984	0.00461	0.07448
20	-0.59887	-0.65472	-0.53468
40	-1.26902	-1.19458	-1.15505
60	-1.92045	-1.83410	-1.77149
80	-2.57387	-2.47542	-2.37630
0	0.02350	0.03068	0.05417

3.6. Hareket Ölçüm Sistemi

Gemi hareketlerinin ölçümü için birçok farklı yöntem kullanılmaktadır. Ata Nutku gemi Model Deney Laboratuvarında denizcilik deneylerinde kullanılmak amacıyla 2 ve 6 serbestlik dereceli dinamometreler bulunmaktadır (Şekil 3.25). Bu iki dinamometre, üzerinde yer alan LVDT'ler yardımıyla hareket miktarını analog elektrik sinyallerine çevirmektedirler. Bu sinyaller de önce bir amplifikatör ile yükseltilip daha sonra bir A/D çevirici ile dijital elektrik sinyallerine çevrilir. Bu mevcut sistem bir takım sorunlar içermektedir. Bu sorunlardan ilki ölçüm işlemini gerçekleştiren LVDT'lerin eskimiş ve bundan dolayı bir kısmının çalışmaz hale gelmiş olmasıdır. Diğer bir sorun ise dinamometrelerin uzun süre bakımı yapılmamasından dolayı bazı mekanik parçalarının bozuk veya kayıp olmasıdır. Bu yüzden yeni ve modern bir ölçüm sistemine ihtiyaç duyulmuştur.



Şekil 3.25 : 2 ve 6 hareket dereceli dinamometreler.

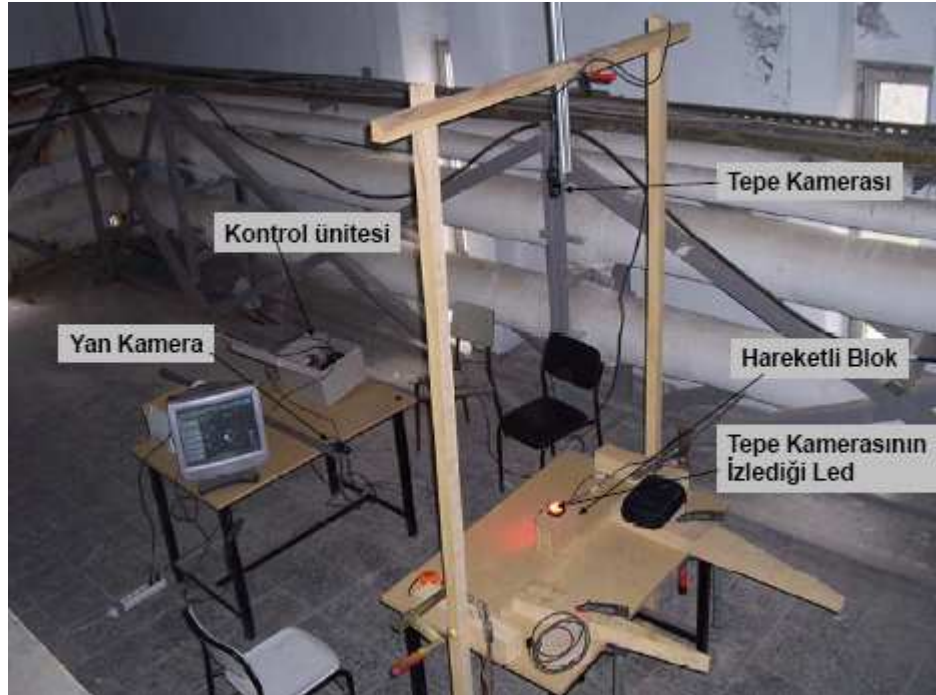
Günümüzde en çok kullanılan ölçüm sistemlerinden biri hızlı kamera ile ölçüm sistemidir. Bu amaçla bu proje kapsamında sağlanan bütçe ile hızlı kamera sistemi alımı yapılmıştır. Alınan kamera sistemi KEYENCE firmasının CV-3001 model kamera sistemidir. Bu sistem, 6 farklı gemi hareketini ölçebilmesi için 3 adet kamera ve bu kameralar ile birlikte bir kontrol ünitesi ile kameraları model çekme arabasına bağlayan 3 adet askıdan oluşmaktadır. Ayrıca sistemin kullanılması için gerekli olan bir monitör de sonradan sağlanmıştır. Bu sistem, ölçüm sonuçlarını bilgisayarda Excel dosyası formatında kaydedebilmektedir. Bunun için bir Ethernet kablosu ile bilgisayara bağlanır. Bilgisayarda ise sistemin kendi yazılımı kullanılarak sonuçlar kayıt edilir. Sisteme ait tüm parçalar Şekil 3.26’da verilmiştir.

Kamera sistemi bu tip deneysel çalışmalar için daha önce denenmiş bir sistem değildir. Bu yüzden kamera sisteminin denizcilik deneylerine uyumlu hale getirilmesi sırasında bir takım sorunlar ile karşılaşmıştır. Bu sorunlardan ilki kameraların derinlik algılamasının olmamasıdır. Bu yüzden modelin her bir hareketinde kameraya yaklaşması veya kameradan uzaklaşmasıyla beraber takip ettikleri ışıkların kayıt sırasını kayırabilmekte ve bunun sonucunda da ölçümlerde hatalar oluşabilmektedir. Bunun için öncelikle kameraların odaklama ayarları iyice yapılmalı ve kameralar ışıklardan yeteri miktarda uzağa yerleştirilmelidir. Ayrıca en az iki kamera kullanılarak hata oranları ölçülmelidir.



Şekil 3.26 : Hızlı kamera sistemi.

Kameralar tedarik edildikten sonra iki farklı kalibrasyon işlemi yapılmıştır. Bunlardan ilki kameraların takip ettiği ışıkların mesafelerini görüş alanı içindeki her yerde aynı şekilde ölçüp ölçmediğinin kontrolü ile ilgilidir. Bunun için bir düzenek hazırlanmış (Şekil 3.27) ve aynı anda iki kameradan elde edilen değerlerle kameraların bu kalibrasyon işlemi için gerekli olan veriler toplanmıştır.



Şekil 3.27 : Kalibrasyon düzeneği.

Hazırlanan düzende üstten ve yandan bakan kameralar belli bir mesafede doğrusal hareket eden bir bloğun üzerindeki iki adet led lambasını izlemektedirler. Burada bloğun hareketi ettiği mesafeyi kameralar piksel değerinden vermektedirler. Her bir

mesafeye karşı gelen piksele değerlerinin bulunması ile kalibrasyon işlemi yapılmış olur.

İkinci kalibrasyon işlemi ise statik olarak kameranın okuyabileceği en küçük açı ve hareket miktarlarını bulmak ile ilgilidir. Bunun için yeni bir düzenek hazırlanmıştır. Bu düzende her bir kamera sırasıyla kullanılmıştır.

3.7. Deneyler

Denizcilik deneyleri başlamadan önce bir takım çalışmalar yapılmıştır. Bunlardan ilki modelin boyuna ağırlık merkezinin bulunmasıdır. Model, hareketini ağırlık merkezinden yapacağından dolayı bu merkezin bulunması gerekmektedir. Bir diğer yapılması gereken çalışma ise jirasyon yarıçapının bulunmasıdır. Modelin jirasyon yarıçapının bilinmesi modelin kütle atalet momenti bulunabilir. Bir geminin teorik denizcilik hesapları ile o gemiye ait modelin deneysel hesaplarının karşılaştırılabilmesi için kütle atalet momentlerinin de aynı olması gerekmektedir. Bu yüzden deneysel olarak bulunan jirasyon yarıçapı ile modelin kütle atalet momenti hesaplanmış daha sonra sonrada benzerlik katsayısı ile gemiye ait olan kütle atalet momenti bulunmuştur. Tüm bu işlemlerin yapılmasının ardından da uygun bir deney düzeneği tasarlanmış ve böylece deneylerin yapımına geçilmiştir.

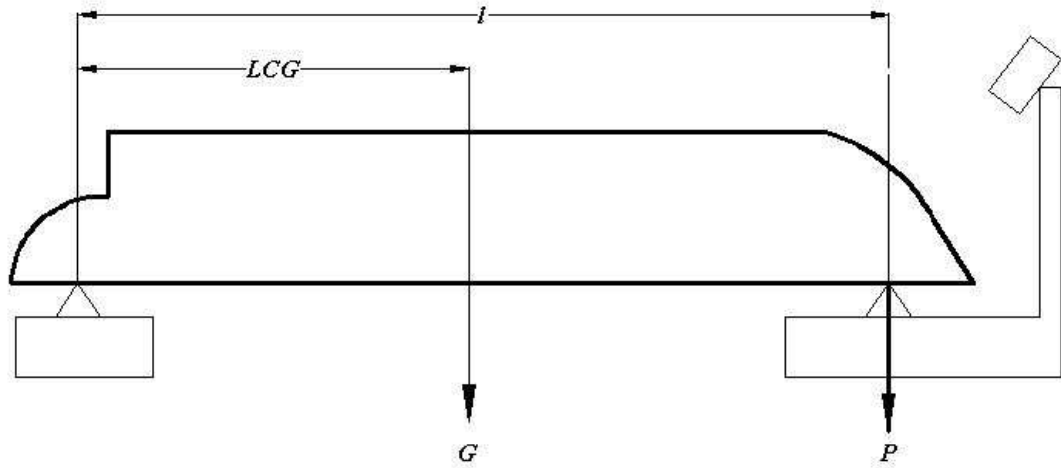
3.7.1. Boyuna ağırlık merkezinin (LCG) bulunması

Deneysel olarak modelin boyuna ağırlık merkezinin (LCG) bulunması için öncelikle model, üçgen şeklinde olan iki profilin keskin uçlarının üzerine yerleştirilir. Bu profillerden biri elektronik kantarın üzerine diğeri de zeminde bir ahşabın üzerine yerleştirilmiştir. Buradaki önemli nokta iki profile temas eden modelin terazide olması gereğidir.

Elektronik kantarın dijital göstergesinden okunan değer

$$LCG = \frac{(p-l)a}{\Delta} \quad (3.25)$$

denkleminde yerine konulursa modelin LCG'si ahşap takozun üzerindeki profilin modele temas ettiği noktadan itibaren hesaplanmış olur. Eğer profil 0 no'lu postaya denk getirilse denklem LCG'yi direkt verecektir.

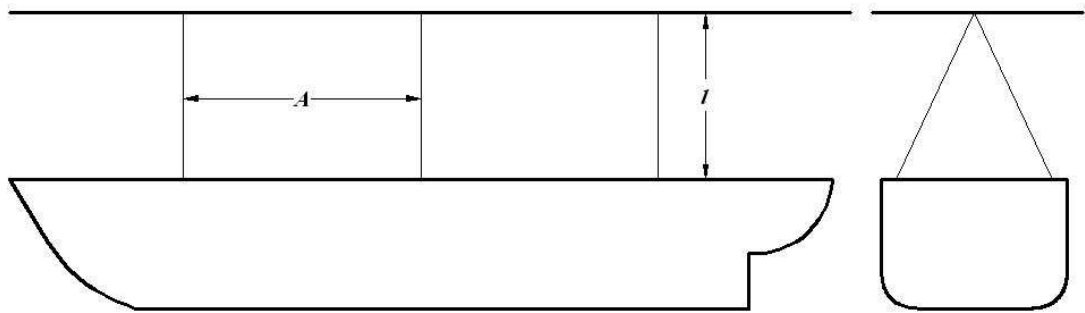


Şekil 3.28 : LCG'nin deneysel olarak bulunması.

Denklem (3.25)'de yer alan p , elektronik kantardan okunan değeri, l , elektronik kantar üzerindeki profilin ağırlığını, a , her iki profil arasındaki mesafeyi ve Δ ise modelin boş ağırlığını göstermektedir.

3.7.2. Jirasyon yarıçapının bulunması

Modelin baş-kıç vurma jirasyon yarıçapını bulmak için öncelikle model, eşit uzunluktaki 6 adet halat ile sallandırılmalıdır. Bu halatların ilk ikisi tam LCG'nin olduğu yerde enlemesine eşit mesafede olacak şekilde yerleştirilmelidir. Belli bir mesafede diğer iki halat baş tarafa son iki halat ise yine aynı mesafede kıç tarafa yerleştirilmelidir. Burada 6 adet halat kullanılmasının nedeni model sallandığında savrulma ve yalpa hareketlerini yapmasını engellemektir. (Şekil 3.29)



Şekil 3.29 : Jirasyon yarıçapının bulunması.

Model asıldıktan sonra belli bir mesafe itilir ve bırakılır. Bir sarkaç gibi sallanan modelin 10 periyotluk hareketini bir kronometre vasıtasıyla kaç saniyede gerçekleştirdiği ölçülür. Bu işlem en az 5 kez tekrar edilir. Daha sonra bu 5 verinin

ortalaması alınır. Elde edilen sonuç 10 periyotluk hareketin süresi olduğundan bir tam periyotluk süreyi bulmak için bu süre 10'a bölünür. Daha sonra bu sonuç

$$k_{zz} = \frac{\sqrt{g}AT}{2\pi\sqrt{l}} \quad (3.26)$$

denkleminde yerleştirildiğinde jirasyon yarıçapı hesaplanmış olur. Bu denklemde yer alan g, yerçekimi ivmesi, A, iki halat arasındaki uzaklık, T, ölçülen periyot, l ise her bir halatın uzunluğudur. Denklem (3.26)'dan elde edilen sonuç ile kütle atalet momenti

$$I_{zz} = \Delta k_{zz}^2 \quad (3.27)$$

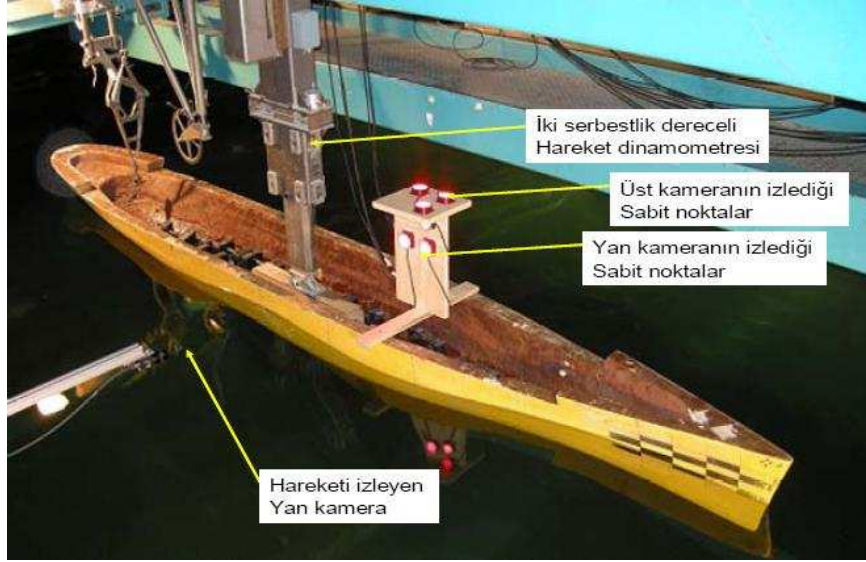
denkleminde hesaplanır. Burada bulunan jirasyon yarıçapı ve kütle atalet momenti boş haldeki modelin değerleri olup daha sonra modeli su hattına kadar batırmak için yerleştirilecek külçe ağırlıklar ile istenilen değerlere çekilebilir.

3.7.3. Deney düzeneği

Deney düzeneği hazırlanırken modelin 3 adet düzlemsel hareketi yapabilmesi esas alınmıştır. Bunlar sırasıyla boy öteleme, dalıp-çıkma ve baş-kıç vurmaktır. Bu amaçla hazırlanan ilk düzenekte model boyunca bir kalas bağlanmış, bu kalasa kılavuzluk etmesi içinde kalas iki adet ahşap askı arasına yerleştirilmiştir. T şeklinde olan bu askıların altları modeldeki kalasın hareketlerine izin verecek şekilde oyulmuştur. Kılavuz askılar, model çekme arabasının üzerindeki köprüye ikişer adet işkence ile bağlanmıştır. Ne yazık ki bu sistem neden olduğu aşırı sürtünmeler nedeniyle kısıtlı olarak üç harekete izin vermiştir. Bu yüzden yeni bir düzenek tasarlanmıştır. Bu yeni düzenekte havuzda yer alan 2 bileşenli dinamometrenin kullanılması kararlaştırılmıştır. Bu yüzden yapılan deneysel çalışmalarda dalıp-çıkma ve baş-kıç vurma hareketleri incelenecek, ancak boy öteleme hareketi incelenemeyecektir. Deneylerde kullanılan düzenek Şekil 3.30'de verilmiştir.

Şekil 3.30'de de görüldüğü üzere model, model çekme arabasına iki harekete izin veren bir dinamometre ile bağlanmıştır. Dinamometre modelin ağırlık merkezine bağlıdır. Modelin üzerinde kameraların takip edebilmesi amacıyla led ışıkları yerleştirilmiştir. Bu led ışıkları yan ve üst kameralara dik doğrultuda olacak şekilde iki adet tablaya vidalanmıştır. Her bir tablada üçer adet led ışığı yer almaktadır. Burada düzlemsel hareketi ölçecek olan kamera yandan bakan kameradır. Üç adet

led ışığını kullanarak bu kameradan gelen verilerle öteleme ve dönme hareketleri hesaplanabilir.



Şekil 3.30 : Deney düzeneği.

Üstten bakan kamera ise daha önce de belirtildiği gibi derinlik algılamasından kaynaklanabilecek hataları görebilmek amacıyla konulmuştur. Havuzun yapısından dolayı gelen dalgalarda bombeleşme olması ve modelin tam olarak gelen dalgalara göre dik doğrultuda bağlanamaması gibi etkenlerle modelde bir takım savrulma ve yalpa hareketi olabilmektedir. Her ne kadar iki harekete izin veren bir dinamometre kullanılsa da bu hareketlerden tamamen kaçınılamamıştır. Ancak deneyler sırasında yapılan ölçümlerde ve gözlemlerde bu istenmeyen hareketlerin etkisinin çok az olduğu ve sonuçlara önemli bir oranda etkmediği görülmüştür. Son olarak deneylerin hepsi dalga cihazına en yakın yerde yapılmaya çalışılmıştır. Bunun için de en uygun yer olarak dalga problemlerinin önü seçilmiştir.

4. UYGULAMA

Yapılan teorik çalışmaların ardından yazılan yazılımdan elde edilen sonuçların kontrol edilebilmesi için bir uygulama yapılmıştır. Bu uygulama için Ata Nutku Model Deney Laboratuvarındaki mevcut modellerden en uygun olanı aranmıştır. Bu deneysel çalışmalara uygun birkaç model bulunmasına karşın içlerinde en uygun olanı Seri 60 modeli olmuştur. Proje numarası 205 olan bu modelin öncelikle düzgün dalgalardaki hareketlerinin teorik hesapları Bölüm 2.7’de bahsedilen yazılım ile yapılmıştır. Daha sonra ise laboratuvarda Bölüm 3.7.3’de bahsedilen düzenek hazırlandıktan sonra deneyleri yapılmıştır. Yapılan her iki çalışmanın sonuçları bu bölümde anlatılmaktadır.

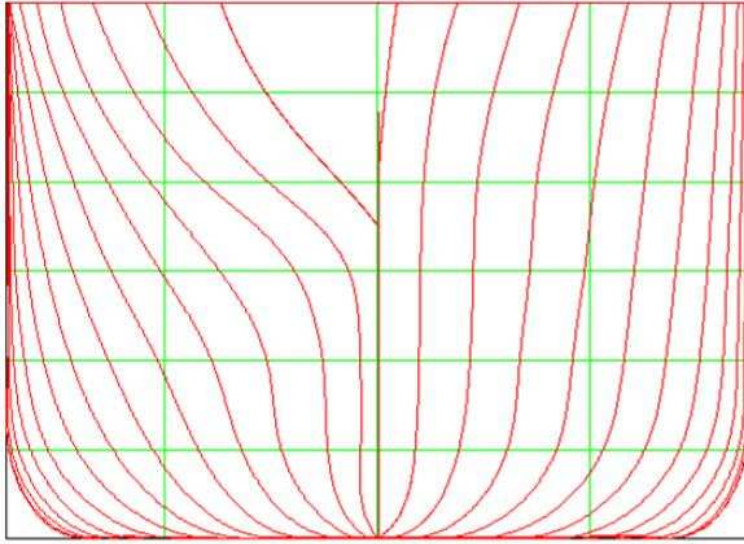
4.1. Kullanılan Gemi Formu

Deneyssel ve teorik çalışmalarda bir seri 60 modeli kullanılmıştır. Modele ait boyutlar Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1 : Seri 60 formuna ait özellikler.

L_{BP} [m]	4.064
L_{WL} [m]	4.132
L_{BP}/B	7.50
B/T	2.50
LCB/L_{BP} (%)	1.5 K1Ç
$L_{BP}/V^{1/3}$	6.165
C_B	0.600
C_M	0.977
C_P	0.614
C_{WP}	0.706
L_E/L_{BP}	0.500
L_P/L_{BP}	0.000
L_R/L_{BP}	0.500
$1/2\alpha_E$	7.0
WS [m ²]	2.815

Modele ait endaze planı aşağıda verilmiştir (Şekil 4.1).



Şekil 4.1 : Seri 60 formu endaze planı.

4.2. Teorik Çalışma Aşamaları

Modelin belirlenmesinin ardından modelin endazeşi oluşturulmuştur. Oluşturulan endaze programa girilmiştir. Endazenin ve ana boyutların girilmesi ile beraber geminin yüzeyi panellere ayrılmış ve hidrostatik hesapları yapılmıştır. Daha sonra ise hidrodinamik hesapları yapılmış ve ek-su kütlesi ile sönüm katsayıları hesaplanmıştır.

Modelden elde edilen jirasyon yarıçapına uygun olarak bir hesaplama ile ağırlık dağılımı yapılmıştır. Buna göre hareket hesapları yapılmış ve elde edilen verilerle sıfır hız durumu için RAO grafiği çizilmiştir.

4.3. Deneysel Çalışma Aşamaları

Yapılan tüm yenileme ve kalibrasyon çalışmaları sonucunda deney düzeneği hazırlanmış ve seri 60 modeli ile deneyler yapılmıştır. Deneyler öncelikle Seri 60 gemisinin ağırlık merkezinin bulunması ile başlamıştır. Bunun için Bölüm 3.7.1’de anlatılan işlemler uygulanmıştır. Modele ait olan LCG değerini bulmak için bulunan değerler Çizelge 4.2’de verilmiştir.

Çizelge 4.2 : LCG'nin bulunması.

P [kg]	28.15 kg
I [kg]	1.00 kg
a [m]	2.30 m
Δ [kg]	103.55 kg
LCG₁ [cm]	60.30 cm
LCG [m]	1.388 m
(Kıç kaimeden)	

Modele ait LCG'nin bulunması bittikten sonra jirasyon yarıçapının hesabına geçilmiştir. Bunun için öncelikle model yüzme hattında ve suda trimsiz halde durana kadar ağırlık yerleştirilir. Yerleştirilen ağırlıkların yeri işaretlenir. Bu ağırlıklar ve yerleri Çizelge 4.3'te verilmiştir.

Çizelge 4.3 : Ağırlıklar ve kıç kaimeden itibaren merkezleri.

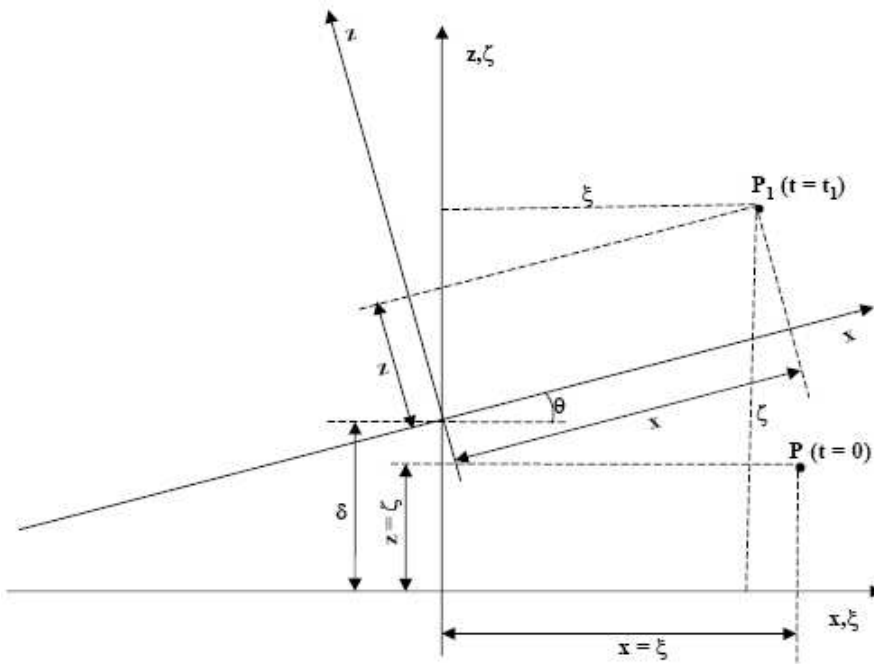
Eleman	Ağırlık (kg)	Konum (m)
Dinamometre	8	2.000
Bağlantı parçası	1.05	2.000
Külçe 1	10	2.535
Külçe 2	10	1.620
Külçe 3	10	1.620
Külçe 4	10	1.810
Külçe 5	10	2.000
Külçe 6	10	2.190
Külçe 7	10	2.380
Külçe 8	10	1.620
Külçe 9	10	1.810
Külçe 10	10	2.000
Külçe 11	10	2.190
Külçe 12	10	2.380
Külçe 13	10	2.345
Külçe 14	10	2.535
Külçe 15	10	2.195
Külçe 16	10	2.570
Külçe 17	10	2.570

Bu işlemler bittikten sonra ağırlıklar çıkarılır. Ve model, Bölüm 3.7.2'de anlatılan işlemlere tabi tutulur. Bunun sonucunda modelin çıplak haldeki jirasyonu hesaplanır. Ağırlıkların yeri bilindiğinden bunlarında hesaba katılmasıyla modele ait gerçek jirasyon yarıçapı hesaplanmış olur. Bunun ölçek katsayısı ile çarpımı sonucu gemiye ait jirasyon yarıçapı hesaplanır (Çizelge 4.4).

Çizelge 4.4 : Jirasyon yarıçapının bulunması

A [m]	0.65
T [s]	1.773
L [m]	1.00
k_{zz} [m]	0.574
I_{zz} [kg.m²]	34.17

Denizcilik deneylerinde, Bölüm 3.7.3’de bahsedilen deney düzeneği kullanılmıştır. Kullanılan kameralar her bir led lambasının konumları ölçülmüştür. Ölçümler sonucunda bir takım işlemler yardımıyla dalıp-çıkma ve baş-kıç vurma hareketleri hesaplanır. Bu hareketlerin bulunabilmesi için öncelikle iki eksen takımı tanımlanır (Şekil 4.2).



Şekil 4.2 : Hareket miktarlarının bulunabilmesi için tanımlanan eksenler.

İlk anda $t = 0$ iken xz hareketli eksenini ile $\xi\zeta$ sabit eksenini çakışmıştır. Bu durumda herhangi bir P noktası her iki eksen takımında da aynı değere sahiptir. Daha sonra herhangi bir t_1 anında hareketli eksenin bir θ açısı kadar dönme ve bir δ kadar öteleme hareketi yaptığını ve P noktasının P_1 konumuna geldiğini düşünelim. Bu durumda iki eksen takımı arasında

$$\begin{aligned}\xi &= x \cos \theta - z \sin \theta \\ \zeta &= \delta + x \sin \theta + z \cos \theta\end{aligned}\tag{4.1}$$

ilişkileri söz konusu olacaktır. Boy öteleme hareketi sınırlandırıldığı için kameranın takip ettiği iki ledin konum bilgileri yeterli olacaktır. Bu iki ledin konumlarının sırasıyla $L_1(x_1, z_1)$ ve $L_2(x_2, z_2)$ olduğunu düşünersek

$$\begin{aligned}
\xi_1 &= x_1 \cos \theta - z_1 \sin \theta \\
\zeta_1 &= \delta + x_1 \sin \theta + z_1 \cos \theta \\
\xi_2 &= x_2 \cos \theta - z_2 \sin \theta \\
\zeta_2 &= \delta + x_2 \sin \theta + z_2 \cos \theta
\end{aligned} \tag{4.2}$$

denklemlerine ulaşılır. Bu denklemler yardımıyla baş-kıç vurma genliğinin sinüs ve kosinüs ifadelerine ulaşılır.

$$\begin{aligned}
\sin \theta &= \frac{(x_2 - x_1)(\zeta_2 - \zeta_1) - (z_2 - z_1)(\xi_2 - \xi_1)}{(x_2 - x_1)^2 + (z_2 - z_1)^2} \\
\cos \theta &= \frac{(x_2 - x_1)(\xi_2 - \xi_1) + (z_2 - z_1)(\zeta_2 - \zeta_1)}{(x_2 - x_1)^2 + (z_2 - z_1)^2}
\end{aligned} \tag{4.3}$$

Baş-kıç vurma ve dalıp-çıkma genliklerine ait denklemler (4.2) ve (4.3)'deki denklemler kullanılarak

$$\theta = \sin^{-1} \left[\frac{(x_2 - x_1)(\zeta_2 - \zeta_1) - (z_2 - z_1)(\xi_2 - \xi_1)}{(x_2 - x_1)^2 + (z_2 - z_1)^2} \right] \tag{4.4}$$

$$\delta = \zeta_1 - x_1 \sin \theta - z_1 \cos \theta = \zeta_2 - x_2 \sin \theta - z_2 \cos \theta$$

şeklinde bulunur.

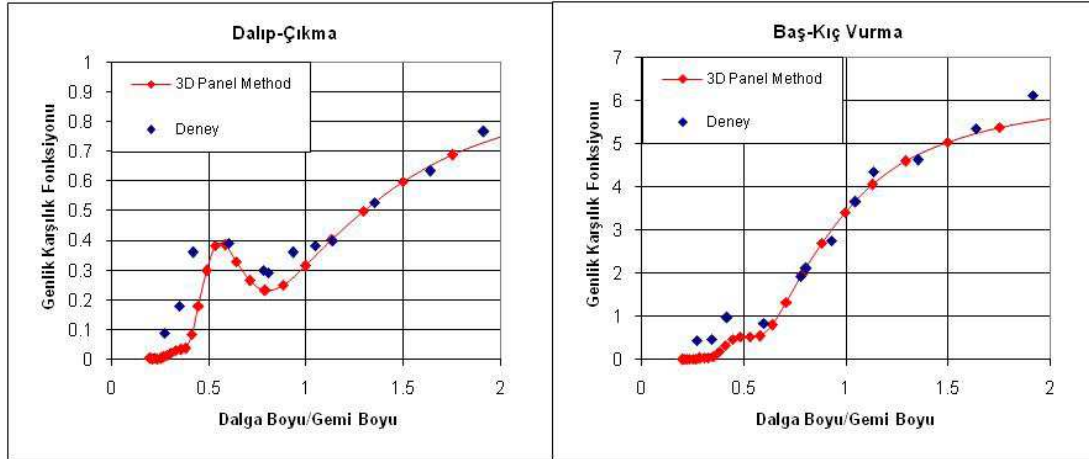
Deneyler 0.8 s ile 2.2 s periyot değerleri arasında yapılmıştır. Çizelge 4.5'de de görüldüğü üzere 12 adet dalga gönderilmiş bunlara karşılık gelen hareket ölçümleri yapılmıştır.

Çizelge 4.5 : Dalga ve hareket ölçümleri.

Ölçülen Dalga			Ölçülen Hareket		
Periyot (s)	Genlik (mm)	Frekans (Hz)	Periyot (s)	Baş-Kıç Vurma (rad)	Dalıp-Çıkma (mm)
0.84	45	1.214	0.82	0.018	4
0.94	50	1.063	0.94	0.017	9
1.04	50	0.962	1.04	0.029	18
1.24	51	0.812	1.23	0.018	20
1.41	50	0.747	1.34	0.031	15
1.44	55	0.697	1.44	0.036	16
1.55	50	0.646	1.55	0.037	18
1.64	55	0.614	1.63	0.048	21
1.71	50	0.575	1.74	0.048	20
1.86	55	0.546	1.83	0.047	29
2.05	60	0.488	2.05	0.049	38
2.21	60	0.445	2.25	0.048	46

4.4. Sonuçların Kıyaslanması

Yapılan tüm bu teorik ve deneysel çalışmalar sonucunda periyodik dalgalar arasındaki seri 60 modeline ait genlik-karşılık fonksiyonlarının grafiksel olarak gösterimi Şekil 4.3’de verilmiştir.



Şekil 4.3 : Genlik-karşılık (RAO) fonksiyonları.

Şekildeki grafiklerde yatay eksen dalga boylarının gemi boyuna oranını, dikey eksen ise genlik-karşılık fonksiyonunu göstermektedir. Sol tarafta yer alan grafik dalıp-çıkma, sağ taraftaki ise baş-kıç vurma genliğini göstermektedir. Her iki grafikte boyutsuz değerlerden oluşmaktadır.

Yapılan çalışmalar sonucu deneylerden elde edilen verilerle teoriden elde edilen verilerin oldukça uyumlu olduğu görülmektedir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

TÜBİTAK mühendislik Araştırma Gurubu tarafından desteklenen bu projede düzgün dalgalara maruz kalan bir geminin hareketlerini analiz etmek için bir yazılım geliştirilmiştir. Bu yazılım için öncelikle bir teorik çalışma yapılmıştır. Bu teorik çalışma, gemi hareketlerinin analizi için gerekli olan kırımım ve yayınım etkilerinin üç boyutlu olarak hesaplanmasını teşkil etmektedir. Bu amaçla bu etkilerin hesabı için sıfır hızlarda geçerli olan bir Green fonksiyonu kullanılmıştır. Bu fonksiyonun analitik çözümü zor olduğundan dolayı bir sayısal yöntem ile çözülmesi düşünülmüş ve bunun için de panel metodu kullanılmıştır.

Teorik çalışmaların sonuçlarının kıyaslanması için bir takım deneysel çalışmalar yapılması düşünülmüştür. Bu amaçla deneysel çalışmaları yürütmek için Ata Nutku Gemi Model Deney Laboratuvarı kullanılmıştır. Ne var ki, burada kullanılması düşünülen cihazlar uzun bir süre kullanılmaması ve bakımlarının yapılmamasından dolayı bozulmuş veya randımanlı bir şekilde çalışmamıştır. Bu amaçla projeden sağlanan bütçe ile bir takım cihazların alımı yapılmış bazılarının ise tamiri veya yenilenmesi yapılmıştır. Bu cihazlardan dalga cihazı mevcut yapısı korunarak yenilenmiş, mevcut hareket ölçer dinamometreler bozuk olduklarından dolayı yerlerine hızlı kamera sistemi alınmıştır.

Tüm yapılan bu işlemler sonucunda bir Seri 60 modelinin sıfır hız durumundaki baş-kıç vurma ve dalıp çıkma hareketleri mevcut yazılım ile hesaplanmıştır. Daha sonra model deney havuzunda bu seri 60 modelinin aynı koşullardaki deneyleri yapılmıştır. Yapılan teorik ve deneysel çalışmalar sonucu elde edilen değerler kıyaslanmıştır. Her iki çalışmadan elde edilen değerler ile genlik-karşılık fonksiyonları (RAO) oluşturulmuş ve bunlar grafiksel olarak gösterilmiştir. Deneysel ve teorik RAO eğrileri kıyaslandığında sonuçların yüksek frekanslarda birbirleriyle uyumlu olduğu düşük frekanslarda ise deneysel verilerin teorik verilerden bir miktar saptığı görülmüştür. Buradaki deney sonuçlarında deneysel ortamda daha önceki bölümlerde belirtilmiş olan olumsuzların da bir etkisi olmuştur.

Tüm yapılan bu çalışmalar sonucunda yaşanan bir takım sorunlar olmuştur. Teorik hesaplar yapılırken kullanılan gemi eğer yumru başa sahipse veya skeg'leri varsa modellemeye bir takım sorunlar çıkmakta ve panellerin hesabı yapılamamaktadır. İleride yazılıma yapılacak bazı müdahaleler ile bu sorun ortadan kaldırılabilir. DeneySEL olarak ise ilerde diğer hareket türleri içinde çalışmalar yapılmalı ve yeni ve daha uygun bir deney düzeneği kullanılmalıdır. Bu tezin yazımı sırasında ileri hız için de deneyler yapılmıştır. Ancak onun sonuçları tezin konusunun kapsamı dışında olduğundan burada verilmemiştir. Bu çalışmanın sonuçlarına Okan'ın [29] çalışmasından ulaşılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] **Okan, M. B.**, 2007: Gemilerin Düşük Hızlarda Dalgalar Arasındaki Hareketlerinin İncelenmesi İçin Sayısal Bir Yöntem. Deniz Teknolojisi Bölümü, Teknik Rapor. TR 07/01. İTÜ. İstanbul.
- [2] **Sabuncu, T.**, 1983: Gemi Hareketleri, İTÜ, İstanbul.
- [3] **Froude, W.**, 1861: On the Rolling of Ships. *Trans. INA*. Vol. 2, p. 180.
- [4] **Froude, R. E.**, 1896: The Non-Uniform Rolling of Ships. *Trans. INA*. Vol. 37, p. 293.
- [5] **Krylov, A. N.**, 1896: A New Theory of Pitching of Ships on Waves and of the the Stresses Produced by This Motion. *Trans. INA*. Vol. 37, s. 326-359.
- [6] **Krylov, A. N.**, 1896: A General Theory of the Oscillations of a Ship on Waves. *Trans. INA.*, Vol. 40, p. 184.
- [7] **Lewis, F. M.**, 1929: The Inertia of Water Surrounding a Vibrating Ship. *Trans. SNAME*. Vol. 37, pp. 1-20.
- [8] **Manning, G. C.**, 1930The Motions of Ships Among Waves. *Principles of Naval Architecture*. Vol. 2, SNAME. New York.
- [9] **Denis, M. St. and Pierson, W. J.**, 1953: On the Motion of Ships in Confused Seas. *Trans. SNAME*. Vol. 69, pp. 280-357.
- [10] **Odabaşı, A. Y. and Hearn, G. E.**, 1978: Seakeeping Theories: What is the Choice?. *Trans. North East Coast Institution of Engineers and Ship Builders*, Vol. 94, pp. 53-84.
- [11] **Ursell, F.**, 1949: On the Heaving Motion of a Circular Cyllinder on the Surface of a Fluid. *Quart. J. of Mech. And Appl. Maths.*, Vol. 2, pp. 218-231.
- [12] **Frank, W.**, 1967: Oscillation of Cylinders in or Below the Free Surface of Deep Fluids. NSDRC Rep. No 2375.

- [13] **Havelock, T. H.**, 1958: The Effect of Speed of Advance Upon the Damping of Heave and Pitch. *Trans. INA*. Vol. **100**, pp. 131-135.
- [14] **Havelock, T. H.**, 1942: The Damping of the Heaving and Pitching Motion of a Ship. *Philosophical Magazine*. Vol. **33**, pp. 666-673.
- [15] **John, F.**, 1949: On the Motion of Floating Bodies, Part I. *Comm. Pure & Appl. Math.* Vol. **2**, pp. 13-57.
- [16] **John, F.**, 1950: On the Motion of Floating Bodies, Part II. *Comm. Pure & Appl. Math.* Vol. **3**, pp. 45-101.
- [17] **Peters, A. S. and Stoker, J. J.**, 1957: The Motion of a Ship, as a Floating Rigid Body in a Seaway. *Comm. Pure & Appl. Math.* Vol. **10**, pp. 399-409.
- [18] **Korvin-Kroukovsky, B. V. and Jacobs, W. D.**, 1957: Pitching and Heaving Motion of a Ship in Regular Waves. *Trans. SNAME*. Vol. **65**, pp. 590-632.
- [19] **Gerritsma, J. and Beukelman, W.**, 1964: The Distribution of the Hydrodynamic Forces on a Heaving and Pitching Ship Model in Still Water. *Int. Shipbuilding Progress*. Vol. **123**, pp. 506-522.
- [20] **Ogilvie, T. F. and Tuck, E. O.**, 1969: A Rational Strip Theory of Ship Motions: Part I. The Univ. of Michigan. Report 013.
- [21] **Salvasen, N., Tuck, E. O. and Faltinsen, O. M.**, 1970: Ship Motions and Sea Loads. *Trans. SNAME*. Vol. **78**, pp. 250-287.
- [22] **Faltinsen, O. M. and Michelsen, F. C.**, 1974: Motions of Large Structures in Waves at Zero Froude Number. *Int. Symp. On the Dynamics of Marine Vehicles and Structures in Waves*. pp. 91-106, London.
- [23] **Hogben, N. and Standing, R. G.**, 1974: Wave Loads on Large Bodies. *Int. Symp. On the Dynamics of Marine Vehicles and Structures in Waves*. pp. 258-277, London.
- [24] **Liapis, S. J. and Beck, R. F.**, 1985: Seakeeping Computations Using Time Domain Analysis. Washington D.C. : National Academy of Sciences. *Proc. Of 4th International Symposium on Numerical Hydrodynamics*. pp. 34-55.

- [25] **Gerritsma, J.**, 1957: Experimental Determination of Damping and Added Mass Moment of Inertia of a Ship Model. *International Shipbuilding Progress*. Vol. **4**, pp. 505-519.
- [26] **Golovato, P.**, 1959: A Study of Transient Pitching Oscillations of a Ship. *Journal of Ship Research*. Vol. **2**, pp. 22-30.
- [27] **Vossers, G., Swaan, A. and Rijken, H.**, 1960: Experiments with Series 60 Models in Waves. *Trans. SNAME*. Vol. **68**, pp. 364-450.
- [28] **Latoine, J. V. Wehausen and E. V.**, 1960: Surface Waves. *Handbuch der Physik*, Band IX, Part II. Berlin. Springer Verlag, pp. 446 - 778.
- [29] **Okan, M. B.**, 2008: TÜBİTAK Araştırma Projesi Gelişme Raporu. İstanbul

EKLER

EK A: Serbest Su Yüzeyinin Lineerleştirilmesi

EK B: Gemi Formunun Tanımlanması

EK C: Panel Geometrisinin Tanımlanması

EK A : Serbest Su Yüzeyinin Lineerleştirilmesi

Serbest su yüzeyinde yer alan iki sınır koşulu akışkana ait olan potansiyelin çözümü için zorluk çıkarmaktadır. Bunun iki nedeni vardır. Bunlardan ilki, serbest su yüzeyini veren $z = \zeta(x, y; t)$ denkleminin tam olarak bilinmemesidir. İkincisi ise sınır şartlarındaki lineer olmayan terimlerdir. Bu terimleri yok edebilmek için serbest su yüzeyi koşullarını oluşturan denklemleri, bilinen bir bölgeye yakınsamak gerekir. Bunun için pertürbasyon yöntemi kullanılır. Bu yöntemde göre öncelikle bir ε boyutsuz parametresi seçilir. Bu parametrenin sıfıra yakınsaması durumunda ($\varepsilon \rightarrow 0$) su yüzeyi, sakin su yüzeyine benzer.

Akışkana ait potansiyel ve serbest su yüzeyine ait denklemi,

$$\phi(x, y, z, t; \varepsilon) = \varepsilon \cdot \phi^{(1)}(x, y, z, t) + \varepsilon^2 \cdot \phi^{(2)}(x, y, z, t) + \dots \quad (\text{A.1})$$

$$\zeta(x, y, t; \varepsilon) = \zeta^{(0)}(x, y, t) + \varepsilon \cdot \zeta^{(1)}(x, y, t) + \varepsilon^2 \cdot \zeta^{(2)}(x, y, t) + \dots \quad (\text{A.2})$$

şeklinde ε 'un kuvvet serilerine açılabilir. Burada $z \rightarrow \zeta$ olması durumunda (A.1) denklemi,

$$\phi(x, y, z, t; \varepsilon) \rightarrow \phi(x, y, \zeta, t; \varepsilon) = \varepsilon \cdot \phi^{(1)}(x, y, \zeta, t) + \varepsilon^2 \cdot \phi^{(2)}(x, y, \zeta, t) + \dots \quad (\text{A.3})$$

şeklinde yazılır. Yukarıdaki (A.3) denkleminde potansiyele ait türevlerin her biri $\zeta \rightarrow 0$ civarında Taylor serilerine açılırsa

$$\phi^{(1)}(x, y, \zeta, t; \varepsilon) = \phi^{(1)}(x, y, 0, t) + \zeta(x, y, t) \cdot \frac{\partial \phi^{(1)}}{\partial z}(x, y, 0, t) + \dots \quad (\text{A.4})$$

$$\phi^{(2)}(x, y, \zeta, t; \varepsilon) = \phi^{(2)}(x, y, 0, t) + \zeta(x, y, t) \cdot \frac{\partial \phi^{(2)}}{\partial z}(x, y, 0, t) + \dots \quad (\text{A.5})$$

ifadelerine ulaşılır. Buradaki su yüzeyini veren fonksiyonun yerine (A.2)'deki ifade yerleştirilirse

$$\begin{aligned} \phi^{(1)}(x, y, \zeta, t; \varepsilon) &= \phi^{(1)}(x, y, 0, t) + \varepsilon \cdot \zeta^{(1)}(x, y, t) \cdot \frac{\partial \phi^{(1)}}{\partial z}(x, y, 0, t) + \\ &+ \varepsilon^2 \cdot \zeta^{(2)}(x, y, t) \cdot \frac{\partial \phi^{(1)}}{\partial z}(x, y, 0, t) + \dots \end{aligned} \quad (\text{A.6})$$

$$\begin{aligned} \phi^{(2)}(x, y, \zeta, t; \varepsilon) &= \phi^{(2)}(x, y, 0, t) + \varepsilon \cdot \zeta^{(1)}(x, y, t) \cdot \frac{\partial \phi^{(2)}}{\partial z}(x, y, 0, t) + \\ &+ \varepsilon^2 \cdot \zeta^{(2)}(x, y, t) \cdot \frac{\partial \phi^{(2)}}{\partial z}(x, y, 0, t) + \dots \end{aligned} \quad (\text{A.7})$$

denklemlerine ulaşılır. Yukarıdaki (A.6) ve (A.7) denklemleri (A.3)'de tanımlanmış olan potansiyel denklemindeki yerlerine konulursa

$$\begin{aligned}\phi(x, y, \zeta; t, \varepsilon) &= \varepsilon \cdot \phi^{(1)}(x, y, 0, t) + \varepsilon^2 \left[\phi^{(2)}(x, y, 0, t) + \right. \\ &\quad \left. + \zeta^{(1)}(x, y; t) \frac{\partial \phi^{(2)}}{\partial z}(x, y, 0, t) \right] + \varepsilon^3 \left[\phi^{(2)}(x, y, 0, t) + \dots \right] + \dots\end{aligned}\quad (\text{A.8})$$

denkleminde ulaşılır. Yeni ifadesiyle (A.8)'deki potansiyel serbest su yüzeyinin iki koşulunda yerlerine konularak bu denklemlerin sadeleşmesi sağlanacaktır. Öncelikle potansiyel, Bölüm 2'deki (2.10) denklemi olan serbest su yüzeyinin kinematik sınır koşulu denkleminde yerine yerleştirilir.

$$\frac{\partial \zeta(x, y; t, \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial \zeta(x, y; t, \varepsilon)}{\partial y} \frac{\partial \Phi(x, y, \zeta; t, \varepsilon)}{\partial y} - \frac{\partial \Phi(x, y, \zeta; t, \varepsilon)}{\partial z} = 0 \quad (\text{A.9})$$

Yukarıda yer alan (A.9) denklemindeki kısmi türevler hesaplandığında denklem

$$\varepsilon \left[\frac{\partial \zeta}{\partial t} - \frac{\partial \Phi}{\partial z} \right] + \varepsilon^2 \left[\frac{\partial \zeta}{\partial x} \frac{\partial \Phi}{\partial x} + \frac{\partial \zeta}{\partial y} \frac{\partial \Phi}{\partial y} + \zeta \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} \right] + \dots = 0 \quad (\text{A.10})$$

halini alır. Burada ε çok küçük bir değer olduğundan ($\varepsilon \ll 1$), ε 'un kuvvetleri de sıfıra yakınsayacaktır ($\varepsilon^2 \rightarrow 0$, $\varepsilon^3 \rightarrow 0$, ...). Öyleyse, (A.10) denklemi

$$\frac{\partial \zeta(x, y; t)}{\partial t} - \frac{\partial \Phi(x, y, 0, t)}{\partial z} = 0 \quad (\text{A.11})$$

olarak sadeleşecektir.

Benzer şekilde (A.8)'de tarifli potansiyel, bu kez Bölüm 2'deki (2.11) denklemi olan serbest su yüzeyinin dinamik sınır koşulu denkleminde yerleştirilir.

$$\frac{\partial \Phi(x, y, \zeta; t, \varepsilon)}{\partial t} + \frac{1}{2} \nabla^2 \Phi(x, y, \zeta; t, \varepsilon) + g \zeta(x, y; t, \varepsilon) = 0 \quad (\text{A.12})$$

Gereken kısmi türevlerin alınması ile (A.12) denklemi

$$\varepsilon \left[\frac{\partial \Phi}{\partial t} + g \zeta \right] + \varepsilon^2 \left[\frac{\partial \zeta}{\partial t} \frac{\partial \Phi}{\partial z} + \zeta \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z \partial t} + \frac{1}{2} \nabla^2 \Phi \right] + \dots = 0 \quad (\text{A.13})$$

şeklini alır. Yukarıda da bahsedildiği gibi ε 'un çok küçük olmasından dolayı kuvvetleri sıfıra yakınsayacağından (A.13) denklemi

$$\frac{\partial \Phi(x, y, 0; t)}{\partial t} + g \zeta(x, y; t) = 0 \quad (\text{A.14})$$

olarak sadeleşir.

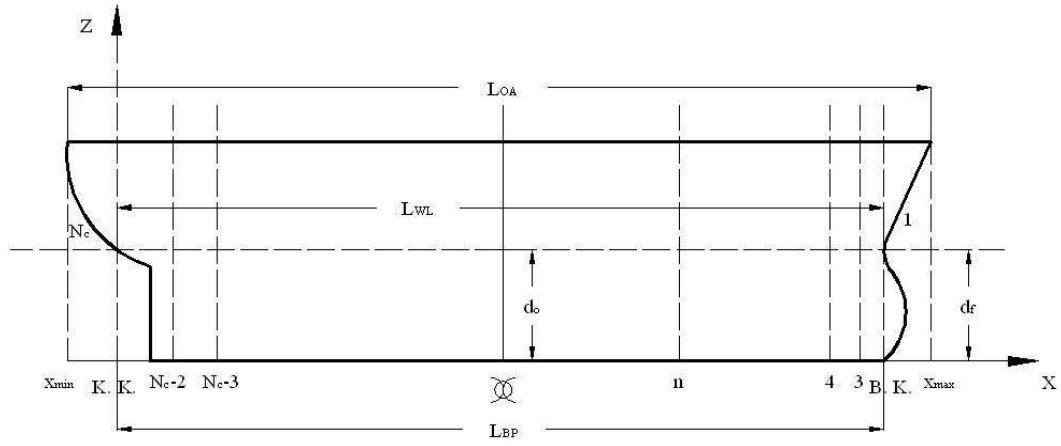
Lineer olmayan ifadelerinin sadeleşmesinin ardından (A.11) ve (A.14) denklemleri birleştirilirse serbest su yüzeyi sınır koşulunu veren

$$\frac{\partial^2 \Phi(x, y, 0; t)}{\partial t^2} + g \frac{\partial \zeta(x, y; t)}{\partial z} = 0 \quad -\infty \leq x, y \leq \infty \quad z = 0 \quad (\text{A.15})$$

denkleminde ulaşılır.

EK B : Gemi Formunun Tanımlanması

Gemi hareketleri analizi yazılımının çalışabilmesi için gemi formunun programa girilmesi gerekmektedir. Gemi formu girilirken dikkat edilmesi gereken hususlar bulunmaktadır. Ancak bu hususlara geçilmeden önce gemi formunun girilmesi için gereken eksen takımının tarifi yapılmalıdır. Şekil 1’de de görüldüğü üzere xyz eksen takımının orijini geminin kaide hattı ile kıç kaime ve merkez hattının kesiştiği noktadadır. Buna göre x eksenini gemi boyu doğrultusunda ve gemi başına doğru pozitif değer almaktadır. Diğer bir eksen olan y eksenini merkez hattından iskeleye doğru pozitif değer almaktadır. Son eksen olan z eksenini ise kaide hattından yukarı doğru pozitif değer almaktadır.



Şekil B.1 : Gemiye ait eksen takımları.

Toplam N_c kesit ile temsil edilen geminin birinci kesiti baştan başlar. Birinci kesiti, baş kasara oluşturur. Daha sonraki kesit ise baş kasaranın bittiği noktadan itibaren başlar. Son kesit olan N_c . kesit ise kıç kasara olup ondan bir önce yer alan postanın x eksenindeki konumundan başlar.

Endaze girdi dosyası olan “Section_Data” dosyası hazırlanırken öncelikle dosyanın başına “Section data for (gemi_adı)” adlı bir başlık konur. Daha sonra bu başlığın altına girilen toplam posta sayısı ile onun hemen yanına simetri katsayısı girilir. Bu katsayı 1 için geminin simetrik olduğunu 0 için simetrik olmadığını gösterir. Toplam posta sayısı girilirken tek sayı olmasına dikkat edilmelidir.

Posta sayısı ve simetri katsayısı değerlerinin hemen altına kesitler girilir. Kesitler girilirken öncelikle kesitlerin kaç adet nokta ile temsil edileceği belirtilir. Onun hemen yanına da kesitin x yönündeki koordinatı girilir. Birinci ve sonuncu kesitler baş ve kıç kasara olduklarından dolayı x koordinatı yerine 0 değeri girilir. Bu

değerlerin hemen altına sırasıyla alt alta kesitlerin Y ve Z koordinatları ile eğri katsayıları girilir. Birinci ve sonuncu kesitlerde ise Y koordinatı yerine X koordinatındaki değerleri girilir. Eğri katsayıları B-splayn eğrileri oluşturulurken gerekmektedir. Burada 0 değeri sürekli eğriyi, 1 birinci türev süreksizliğini, 2 ise ikinci türev süreksizliğini gösterir.

“Section_Data” dosyası hazırlandıktan sonra her bir kesit için verilen noktalardan üçüncü dereceden bir B-splayn eğrisi geçirilir. Bu eğriyi bulabilmek için verilen N_p kadar $\{x_n, y_n\}$ noktasından N_p tane $\{X_n, Y_n\}$ poligon noktası ve N_p+4 tane de $\{\lambda_n\}$ düğüm noktası hesaplanmalıdır. Bu değerleri bulabilmek için öncelikle bu noktaların u parametrik denklemi hesaplanmalıdır. Parametrik denklem

$$u_1 = 0 \quad u_n = u_{n-1} + \sqrt{(x_n - x_{n-1})^2 + (y_n - y_{n-1})^2} \quad n = 2, 3, \dots, N_p \quad (\text{B.1})$$

şeklinde hesaplanır. Parametrik denklem hesaplandıktan sonra düğüm noktalarının hesabına geçilir. Bir kesidin verilen ilk ve son noktalarından bir eğri geçirebilmek için bu noktalar katlı düğüm noktası olmalıdır. Yani, u_1 parametrisinde $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$ düğüm noktaları olmalıdır. Aynı şekilde u_N parametrisinde $\lambda_{N+1}, \lambda_{N+2}, \lambda_{N+3}, \lambda_{N+4}$ düğüm noktaları olmalıdır. Ayrıca ilk ve son aralıklarda teğet durumlarının belirlenebilmesi için ikinci ve sondan bir önceki nokta düğüm noktası olamaz. Bu durumda,

$$\begin{aligned} \lambda_{n+2} &= u_n \quad n = 3, 4, \dots, N_p - 2 \\ n = 3 \text{ için } \lambda_5 &= u_3 \\ n = N_p - 2 \text{ için } \lambda_N &= u_{N-2} \end{aligned} \quad (\text{B.2})$$

olur. Bu şekilde elde edilen eğri sürekli bir eğridir. Ancak kesitte süreksizlik istenildiği zaman endaze verileri ile verilmiş olan eğri katsayıları ile süreksizlik yaratılabilir. Bunun için istenilen süreksizlik eğer birinci türev süreksizliği olursa bunun için süreksizliğin istenildiği düğüm noktası, ona komşu olan düğüm noktalarından biri ile çakıştırılır.

İkinci türev süreksizliği istenildiği zaman birinci türev süreksizliğinde olduğu gibi düğüm noktaları çakıştırılır. Ancak bu kez o düğüm noktasına ait komşu iki düğüm noktası çakıştırılır.

Süreksizlik uygulamada bazı sınırlamalar söz konusudur:

i) $n = 1, 2, 3$ ve $n = N-2, N-1, N$ noktalarında süreksizlik yapılamaz.

ii) n noktasındaki eğri katsayısı 1 ise n+1 ve n+2 noktası 0 olmalıdır.

iii) n noktasında eğri katsayısı 2 ise n-2, n-1, n+1, n+2 noktalarındaki eğri katsayısı 0 olmalıdır.

Düğüm noktaları bulunduktan sonra poligon noktaları hesaplanabilir. Bunun için

$$x_m = \sum_{n=1}^N X_n B_m^{(3)}(u_n) \quad y_m = \sum_{n=1}^N Y_n B_m^{(3)}(u_n) \quad (\text{B.3})$$

parametrik denklemleri oluşturulur. Burada $B_m^{(3)}(u_n)$ B-splayn baz matrisidir olup B_{mn} şeklinde gösterilir.

İki düğüm noktası arasındaki aralık I_j ile gösterilir ve

$$u_m \in I_j \quad (\text{B.4})$$

ise B-splayn baz matrisi

$$\begin{aligned} B_{mn} &= 0 \quad m=1, \dots, j-1 \quad n=j+4, \dots, N-3 \\ B_{jn} &= r_1(u_n) \quad B_{j+1n} = r_2(u_n) \quad B_{j+2n} = r_3(u_n) \quad B_{j+3n} = r_4(u_n) \end{aligned} \quad (\text{B.5})$$

olarak bulunur. Burada,

$$\begin{aligned} r_1(u) &= \frac{(\lambda_{j+4} - u)^3}{(\lambda_{j+4} - \lambda_{j+1})(\lambda_{j+4} - \lambda_{j+2})(\lambda_{j+4} - \lambda_{j+3})} \\ r_2(u) &= \frac{(\lambda_{j+4} - u)^2(u - \lambda_{j+1})}{(\lambda_{j+4} - \lambda_{j+1})(\lambda_{j+4} - \lambda_{j+2})(\lambda_{j+4} - \lambda_{j+3})} + \\ &\quad \frac{(\lambda_{j+5} - u)(u - \lambda_{j+2})(\lambda_{j+4} - u)}{(\lambda_{j+5} - \lambda_{j+2})(\lambda_{j+4} - \lambda_{j+2})(\lambda_{j+4} - \lambda_{j+3})} + \\ &\quad \frac{(\lambda_{j+5} - u)^2(u - \lambda_{j+3})}{(\lambda_{j+5} - \lambda_{j+2})(\lambda_{j+5} - \lambda_{j+3})(\lambda_{j+4} - \lambda_{j+3})} \\ r_3(u) &= \frac{(\lambda_{j+4} - u)(u - \lambda_{j+2})^2}{(\lambda_{j+5} - \lambda_{j+2})(\lambda_{j+4} - \lambda_{j+2})(\lambda_{j+4} - \lambda_{j+3})} + \\ &\quad \frac{(\lambda_{j+5} - u)(u - \lambda_{j+2})(u - \lambda_{j+3})}{(\lambda_{j+5} - \lambda_{j+2})(\lambda_{j+5} - \lambda_{j+3})(\lambda_{j+4} - \lambda_{j+3})} + \\ &\quad \frac{(\lambda_{j+6} - u)(u - \lambda_{j+3})^2}{(\lambda_{j+6} - \lambda_{j+3})(\lambda_{j+5} - \lambda_{j+3})(\lambda_{j+4} - \lambda_{j+3})} \\ r_4(u) &= \frac{(u - \lambda_{j+3})^3}{(\lambda_{j+6} - \lambda_{j+3})(\lambda_{j+5} - \lambda_{j+3})(\lambda_{j+4} - \lambda_{j+3})} \end{aligned} \quad (\text{B.6})$$

olarak belirtilir.

B-splayn baz matrisi B_{mn} 'in bulunması ve $\{x_m\}$ ile $\{y_m\}$ matrislerinin bilinmesi ile

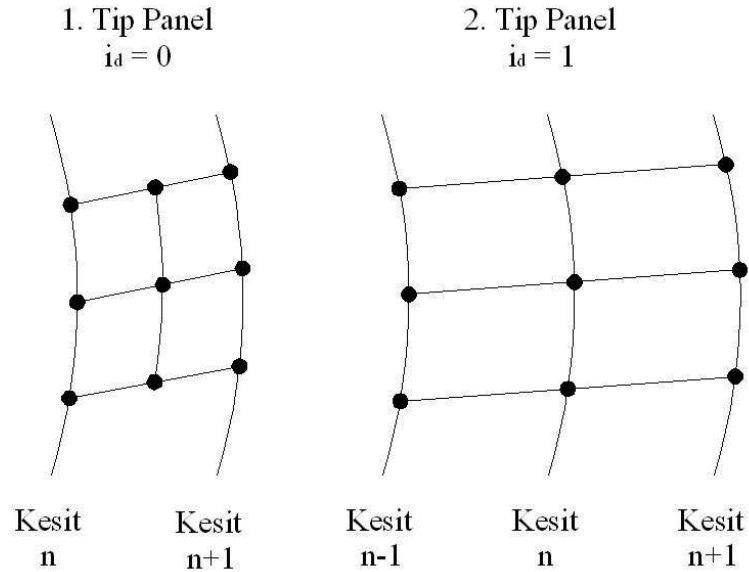
$$\begin{aligned}\{x_m\} &= [B_{mn}] \{X_n\} & \{y_m\} &= [B_{mn}] \{Y_n\} \\ \{X_m\} &= [B_{mn}]^{-1} \{x_n\} & \{Y_m\} &= [B_{mn}]^{-1} \{y_n\}\end{aligned}\tag{B.7}$$

lineer denklem sistemi çözülür ve poligon noktaları bulunmuş olur.

EK C : Panel Geometrisinin Tanımlanması

B-splayn eğrilerinin oluşturulmasının ardından gemi panellere ayrılır. Gemiye ait paneller, su hattı düzleminin altındaki yüzeylerde oluşturulur. bir panelin enine sınırı kesitlerin eşit sayıda bölümünden elde edilmesi ile bulunurken boyuna sınırları ise iki komşu kesit arasındaki mesafeden bulunur.

Panellere ayırma işleminde iki tip panel kullanılmaktadır. Bunlardan biri işlem başlamadan önce seçilir. Birinci panel tipi az sayıda kesit olması durumunda geçerli olup oluşturulan panel dört parçaya bölünerek alt paneller oluşturulur. Bu paneller enterpolasyon ile hesaplanır. İkinci panel tipi ise çok sayıda kesit olması durumunda geçerlidir. Bu tipte her iki kesitte bir kesit panel sınırı kabul edilir. Ara kesitler ise panelin dört parçasını elde etmekte kullanılır (Şekil C.1). Paneller oluşturulurken dikkat edilmesi gereken bir nokta da baş ve kıç kaimenin olduğu kesitlerin kullanılmamasıdır.



Şekil C.1 : Panel Tipleri.

Tekilliklerin hesabı açısından daha hassas hesap yapmaya yardımcı olması için her panel dört parçadan oluşmaktadır. Paneldeki her alan A_i ($i = 1,2,3,4$) ile gösterilirse tüm alan merkezi

$$A_o = \sum_{i=1}^4 A_i \quad (C.1)$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada her bir dörtgenin alanı

$$A \approx |r_u \times r_v| \Delta u \Delta v \quad (C.2)$$

formülü ile bulunur. Alan A'nın karesi alınır ve

$$r_u \Delta u = 2\vec{a} \quad r_v \Delta v = 2\vec{b} \quad (\text{C.3})$$

eşitlikleri yerlerine konursa

$$A^2 = 16(\vec{a} \cdot \vec{a})(\vec{b} \cdot \vec{b}) - 4(\vec{a} \cdot \vec{a} + \vec{b} \cdot \vec{b} - \vec{c} \cdot \vec{c})^2 \quad (\text{C.4})$$

denkleminde ulaşılır. Bu denklemin karekökünün alınması ile alan

$$A = 2\sqrt{4(\vec{a} \cdot \vec{a})(\vec{b} \cdot \vec{b}) - (\vec{a} \cdot \vec{a} + \vec{b} \cdot \vec{b} - \vec{c} \cdot \vec{c})^2} \quad (\text{C.5})$$

şeklinde bulunur. Bu alanın alan merkezi ise

$$x = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + x_4}{4} \quad y = \frac{y_1 + y_2 + y_3 + y_4}{4} \quad z = \frac{z_1 + z_2 + z_3 + z_4}{4} \quad (\text{C.6})$$

denklemleri ile bulunur.

Her bir panelin dış normal

$$\vec{n} = \frac{r_u \times r_v}{|r_u \times r_v|} = \frac{\vec{a} \times \vec{b}}{|\vec{a} \times \vec{b}|} \quad (\text{C.7})$$

denklemleri ile verilirse normal vektörünün her bir terimi

$$\begin{aligned} n_x &= \frac{a_y b_z - b_y a_z}{\sqrt{(a_y b_z - b_y a_z)^2 + (a_z b_x - b_z a_x)^2 + (a_x b_y - b_x a_y)^2}} \\ n_y &= \frac{a_z b_x - b_z a_x}{\sqrt{(a_y b_z - b_y a_z)^2 + (a_z b_x - b_z a_x)^2 + (a_x b_y - b_x a_y)^2}} \\ n_z &= \frac{a_x b_y - b_x a_y}{\sqrt{(a_y b_z - b_y a_z)^2 + (a_z b_x - b_z a_x)^2 + (a_x b_y - b_x a_y)^2}} \end{aligned} \quad (\text{C.8})$$

şeklinde olur.

Panellerin geometrik tanımları bittikten sonra teklik hesaplarına geçilir. Bir panelin teklik hesabı için

$$\beta = \lim_{R \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta S} \iint_S \frac{1}{R} dS \quad (\text{C.9})$$

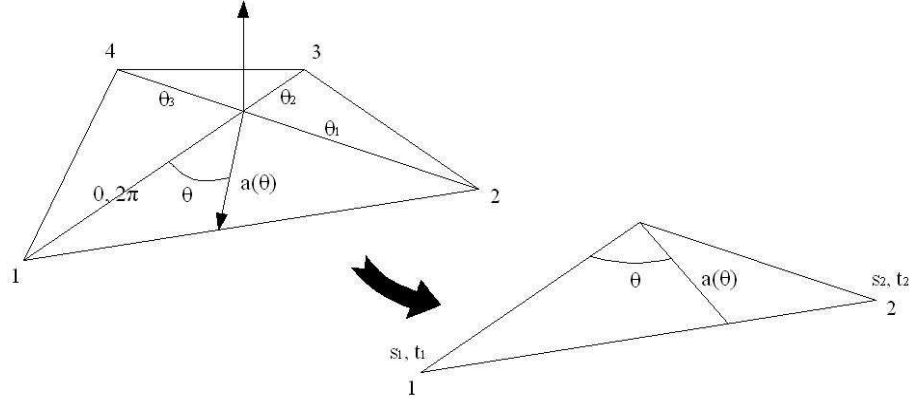
denklemleri kullanılır. Burada

$$R = \sqrt{r^2 + h^2} \quad \Delta S; 0 \leq \theta \leq 2\pi; 0 < r \leq a(\theta) \quad (\text{C.10})$$

dönüşümü yapılırsa (C.9) denklemi

$$\beta = \frac{1}{\Delta S} \int_0^{2\pi} a(\theta) d\theta \quad (\text{C.11})$$

denklemine dönüşür. Bunu bir panelde uygulamak için panel 4 adet üçgen parçaya bölünür (Şekil C.2).



Şekil C.2 : Panellerde tekillik hesabı.

Burada üçgenin üzerindeki (s1, t1) ve (s2, t2) noktaları üçgenin bir düzlemde olduğu varsayılarak hesaplanır.

ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad : Hasan Barış Karayel

Doğum Yeri ve Tarihi : Kadıköy - 05.04.1983

Adres : İ.T.Ü. Ayazağa Yerleşkesi

Gemi İnş. ve Den. Bil. Fak. Deniz Tekn. Müh. ABD

Oda No: 414 Maslak/İSTANBUL-TÜRKİYE

Lisans Üniversite : İstanbul Teknik Üniversitesi

Yayın Listesi:

- **Karayel H. B.,** Okan M. B., 2008: Gemilerin Dalgalar Arasındaki Hareketlerinin İncelenmesi İçin Bir Yöntem: Sıfır Hız Hali. *Gemi İnşaatı ve Deniz Teknolojisi Teknik Kongresi*, Kasım 24-25, 2008 TMMOB Gemi Mühendisleri Odası, İstanbul.