

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**YÜZEN BİR YAPININ KARIŞIK DENİZ ŞARTLARINDA HİDROELASTİK
ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Salim TAMER

Gemi İnşaatı ve Gemi Makinaları Mühendisliği Anabilim Dalı

Gemi İnşaatı ve Gemi Makinaları Mühendisliği Programı

MAYIS 2014

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**YÜZEN BİR YAPININ KARIŞIK DENİZ ŞARTLARINDA HİDROELASTİK
ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Salim TAMER
(508111010)**

Gemi İnşaatı ve Gemi Makinaları Mühendisliği Anabilim Dalı

Gemi İnşaatı ve Gemi Makinaları Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Bahadır UĞURLU

MAYIS 2014

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 508111010 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Salim TAMER** ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**YÜZEN BİR YAPININ KARIŞIK DENİZ ŞARTLARINDA HİDROELASTİK ANALİZİ** ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Yrd. Doç. Dr. Bahadır UĞURLU**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Ahmet ERGİN**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. İsmail BAYER
Yıldız Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : **5 Mayıs 2014**
Savunma Tarihi : **30 Mayıs 2014**

Gazi Mustafa Kemal Atatürk'e

"Bir ulusun asker ordusu ne kadar güçlü olursa olsun, kazandığı zafer ne kadar yüce olursa olsun, bir ulus ilim ordusuna sahip değilse, savaş meydanlarında kazanılmış zaferlerin sonu olacaktır. Bu nedenle bir an önce büyük, mükemmel bir ilim ordusuna sahip olma zorunluluğu vardır."

ÖNSÖZ

Bu satırları kaleme alırken, zorlu ve uzun bir çalışma döneminin sonunda yüksek lisans tezimi tamamlamış olmanın verdiği mutluluğu yaşıyorum.

Öncelikle, bilgi birikimini benimle paylaşan, bana her zaman doğru yolu ve kaynakları gösteren, daha da önemlisi nasıl iyi bir araştırmacı ve akademisyen olunabileceğini öğreten çok değerli hocam Dr. Bahadır Uğurlu' ya teşekkür ederim.

İlkokulda bana okuma-yazmayı öğreten öğretmenimden bu günki yüksek lisans eğitimime kadar bende emeği geçen tüm hocalarıma; ayrıca lisans eğitimim süresince bana rehberlik eden ve araştırma görevlisi olmamda emekleri geçen değerli hocalarım Prof. Dr. Hüseyin Yılmaz, Prof. Dr. Yasin Üst, Prof. Dr. Fahri Çelik'e; zor zamanlarımda samimi desteğini ve yardımını esirgemeyen başta Onur Usta olmak üzere isimlilerini tek tek yazamayacağım çok değerli araştırma görevlisi arkadaşlarıma; bana gösterdikleri yardımlardan dolayı İTÜ Gemi İnşaatı ve Deniz Bilimleri Fakültesindeki değerli hocalarıma ve idari personele; ÖYP kadromun bulunduğu ve doktora eğitimim sonunda göreve başlayacağım Bartın Üniversitesindeki akademik ve idari personele teşekkür ederim.

Son olarak araştırma görevlileri için ellerindeki imkânın en iyisini sağlamaya çalışan ve ÖYP bütçesi ile bize destek olan Türkiye Cumhuriyeti devleti yetkililerine teşekkür ederim ve bu çalışmaya maddi destek sağlayan İTÜ BAP Birimine ve Türk Loydu Vakfına şükranlarımı sunarım.

Mayıs 2014

Salim Tamer
(Gemi İnşaatı ve Gemi Makinaları
Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xv
ÖZET.....	xvii
SUMMARY	xxii
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı ve İçeriği	3
1.2 Hidroelastisite Teorilerinin Gelişimi.....	6
2. MATEMATİK MODEL.....	11
2.1 Lineer Hidrodinamik Model.....	12
2.2 Genelleştirilmiş Hidrodinamik Kuvvetler	17
2.2.1 Asal koordinatlar ve şekil değiştirmeler	19
2.2.2 Hız potansiyeli	20
2.2.3 Lineerleştirilmiş sınır şartlarının özeti	21
2.2.4 Basınç dağılımı	22
2.2.5 Genelleştirilmiş akışkan kuvvetleri.....	23
2.2.5.1 Genelleştirilmiş dalga kuvvetleri	23
2.2.5.2 Genelleştirilmiş radyasyon kuvvetleri.....	24
2.2.5.3 Genelleştirilmiş düzeltici kuvvetler	25
2.2.5.4 Genelleştirilmiş hidrostatik ve yerçekimi kuvvetleri	25
2.2.5.5 Genelleştirilmiş hareket denklemi.....	26
3. HESAPLAMA YÖNTEMİ:SINIR ELEMANLARI METODU.....	29
3.1 Genel Özellikleri	30
3.2 Temsili Formülasyon.....	31
3.3 Temel Çözümler	33
3.4 Sınır İntegral Denkleminin Ayırıştırılması.....	35
3.5 Kollakosyan Metodu	35
4. ESNEK BİR YAPININ KARIŞIK DENİZ ŞARTLARINDA DAVRANIŞI..	39
4.1 Genelleştirilmiş Ek-su Kütlesi ve Hidrodinamik Sönüm Katsayıları	40
4.2 Asal Koordinatların Hesaplanması	44
4.3 Tepki Genliği Fonksiyonun (RAO) Hesaplanması	46
4.4 Dalga Spektrumu	47
4.5 Karışık Dalgalarda Yüzen Yapının Davranışı.....	50
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	55
KAYNAKLAR	57
ÖZGEÇMİŞ.....	61

KISALTMALAR

CAD	: Computer Aided Design
LNG	: Liquefied Natural Gas
OBO	: Oil, Bulk, Ore Carrier
RAO	: Response Amplitude Operator
ITTC	: International Towing Tank Conference

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 4.1 : Serbest titreşim analizi.	40
--	----

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Dalga yükleri ve hareketlerinden kaynaklı önemli gemi problemlerine örnekler.	2
Şekil 2.1 : Bir gemiye etkiyen dalgalar	12
Şekil 2.2 : Dalga tahrik kuvvetleri, ek su kütlesi, hidrodinamik rijitlik ve hidrodinamik sönümün süperpozisyonu	13
Şekil 2.3 : Dairesel bir en kesitin dalıp-çıkma hareketine ait hidrodinamik katsayılar (a) ek-su kütlesi (b) sönüm.....	16
Şekil 2.4 : Sınır şartlarının gösterimi.	22
Şekil 3.1 : Sonlu elemanlar metodunda bölgenin ayrıklaştırılması (solda) ve sınır elemanları metodunda sınırın ayrıklaştırılması (sağda)	30
Şekil 4.1 : Analizi yapılan geminin ana boyutları	39
Şekil 4.2 : Mod 1-5 için Genelleştirilmiş Ek-su Kütlesi Matrisinin Köşegen Değerleri.....	40
Şekil 4.3 : Mod 5-10 için Genelleştirilmiş Ek-su Kütlesi Matrisinin Köşegen Değerleri.....	42
Şekil 4.4 : İlk on elastik mod için genelleştirilmiş ek-su kütlesi matrisi.....	43
Şekil 4.5 : Mod 1-5 için Genelleştirilmiş Hidrodinamik Sönüm Matrisinin Köşegen Değerleri.....	43
Şekil 4.6 : Mod 5-10 için Genelleştirilmiş Hidrodinamik Sönüm Matrisinin Köşegen Değerleri.....	44
Şekil 4.7 : İlk on elastik mod için genelleştirilmiş hidrodinamik sönüm matrisi	44
Şekil 4.8 : İlk on elastik mod için dalga kuvveti vektörü	45
Şekil 4.9 : P_1 'in Frekansa Bağlı Değişimi	45
Şekil 4.10 : P_5 'in Frekansa Bağlı Değişimi	46
Şekil 4.11 : P_7 'nin Frekansa Bağlı Değişimi	46
Şekil 4.12: Tepki genliği fonksiyonu - RAO.....	47
Şekil 4.13 : Dalga spektrumunun elde edilmesi	48
Şekil 4.14 : Tam gelişmiş deniz dalgalarının oluşumu.....	49
Şekil 4.15 : Karakteristik dalga yüksekliği 5m ve modal periyodu 10sn olan dalga spektrumu.	50
Şekil 4.16 : Deniz durumuna göre hesaplanan dalga spektrumları.	52
Şekil 4.17 : Seçilen dalga spektrumlarının bilgileri.....	52
Şekil 4.18 : Hesaplanan hareket spektrumları	53

YÜZEN BİR YAPININ KARIŞIK DENİZ ŞARTLARINDA HİDROELASTİK ANALİZİ

ÖZET

Bir gemi ya da deniz yapısı dalgaların içerisinde ilerlerken sakin suda karşılaşmadığı çeşitli yüklere ve hareketlere maruz kalır. Bu hareketler ve etkileri birçok ciddi soruna neden olabileceği için dikkatle değerlendirilmeleri gerekir. Yüzen yapıların dalgalara verebileceği yanıtlar, elastik olmayan katı bir cisim olarak gerçekleştirecekleri rijid cisim hareketleri olabileceği gibi, şekil değişikliklerini içeren elastik hareketler de olabilir.

Geminin rijit yapı olduğu kabulü altında dalgalara karşı davranışı yıllardır incelenmeye devam etmektedir. Bu yaklaşımda yani rijitlik kabulü altında, yapının hareketleri ne gerilme nede şekil değiştirmeye sebep olmaz. Bundan dolayı, mod şekilleri, doğal frekansları, yorulma vs. gibi kavramlar söz konusu değildir.

Yüzen cisimlerin hidrodinamik analizi -dalga kuvvetlerinin hesabı ve cismin bu kuvvetlere verdiği karşılık- üç ana başlık toplanabilir bunlar manevra, denizcilik ve mukavemet analizleridir. Manevra, rijit geminin, pervane, dümen yelken, stabilize kanatları, iticiler gibi dış güçler altındaki davranışı ile ilgilidir. Denizcilik teorisi ise yine rijit geminin düzenli ya da karışık dalgalarda hareketini, mukavemet analizlerinde amaç ise yapı üzerine uygulanan dış veya iç kuvvetlere karşı yapının göstereceği davranışı ve yapı üzerinde oluşacak gerilmeleri incelemektir. Kısacası, standart gemi dizayn prosedürü genelde ayrı ayrı hidrodinamik ve yapısal analizlerden oluşur.

Hidroelastisite ise yapının hidrodinamik yükler altındaki dinamik davranışında değerlendirmeye katarak, daha gelişmiş bir çözüm sunar. Gemiler için hidroelastisite, denizdeki hidrodinamik yüklerin gemide oluşturduğu hareket ve şekil değiştirme davranışlarının incelenmesi olarak tanımlanabilir. Yani yüzen yapının elastikliğinden dolayı, gerilme ve şekil değiştirmelere maruz kalabileceği farkındalığı altındaki davranışlarını değerlendirilir. Bu davranışlar, yapının rezonansa girmesi, sürekli dinamik yüke karşı yorulması, ani dinamik yükler altında kalıcı şekil değiştirmesi olabilir. Yapısal davranışlara ek olarak dinamik dalga kuvvetleri, bir geminin güvenli, verimli yani operasyon halinin sağlıklı devam edebilmesini sağlamak için geminin dizayn aşamasında değerlendirilmesi gerekir.

Günümüzde, sıvı hareketlerinden yani okyanus dalgalarından kaynaklı yüklerin gerçekte esnek olan deniz yapılarında oluşturduğu davranışların incelenmesi, daha güvenli, hafif konstrüksiyonda ve daha hızlı servis hızlarında gemi ve deniz yapılarının dizaynı için gereklidir.

Bu değerlendirmeyi, gemilere hidroelastik analizini uygulayarak elde edebiliriz. Hidroelastik analiz, temel olarak hidrodinamik yüklerin yapı ile eşleştirilerek analiz edilmesi ile uygulanır. Bu eşleştirme için araştırmacılar ve mühendisler modal süperpozisyon metodunu kullanmışlardır. Modal süperpozisyon metodu ile

eşleştirme yapılabilmesi için ilk önce yapısal bilgiye yani doğal frekanslara ve karşılık gelen mod şekillerine ihtiyaç vardır. Bu eşleştirme metoduna alternatif olarak yapısal bilgiye ihtiyaç duymadan hidrodinamik yükleri yapıya etkitebileceğimiz direkt eşleştirme metodu daha güncel olarak geliştirilmiş olsa da bu çalışmada modal süperpozisyon kullanılarak eşleştirme yapılan metot uygulanmıştır.

Bu çalışmada, modal analiz prensiplerini temel alan lineer hidroelastisite teorisi konvansiyonel tipte bir gemi için uygulanmıştır. Lineer hidroelastisite teorisinde, yapısal ve hidrodinamik problemler lineer davranış ve potansiyel akım kabulleri altında ilişkilendirilir. Modal süperpozisyon teknikleri serbest titreşim ve zorlamalı titreşimi problemlerini verimli bir şekilde çözebilmemizi sağlar. Modal süperpozisyon, temel olarak her bir titreşim modunun hareket denkleminde yaptığı katkının bulunmasına dayanır. Pratikteki birçok problem için tüm doğal modları kullanmak gerekmez. İlk birkaç asal modun süperpozisyonu ile iyi yakınsayan bir sonuç elde edilebilir. Bu yöntem sayesinde yapısal tepki, asal modlardaki hareketlerin, şekil değiştirmelerin, vs. birleşimi olarak alınabilir. Bu çerçevede, öncelikle yapısal sönüm ve dış kuvvetlerin yokluğunda yüzen yapının dinamik karakteristikleri yani doğal frekanslar ve karşılık gelen şekil değiştirme modları standart sonlu elemanlar programı ile belirlenir. Problemin ikinci aşamasında, her bir moda karşılık gelen akışkan kuvvetlerinin hareket denkleminde dâhil edilmesi gerekir. Yüzen yapının oluşturduğu hareketlenmeler ve akışkanın yapıya uyguladığı dalga tahrik kuvvetlerinin bulunabilmesi için sınır elemanları metoduna kullanılmıştır. Akışkanın ideal (viskoz olmayan ve sıkıştırılamaz) ve hareketinin döngüsel kabul edilmesi halinde akım Laplace denklemini sağlar. Potansiyel akımı tanımlayan Laplace denklemi gerekli sınır koşullarını sağlayan bir sınır integral denkleminde dönüştürülür. Böylelikle problem sadece geminin ıslak yüzeyi olan arayüzde tanımlı hale gelir. Serbest su yüzeyi şartını sağlayan Green fonksiyonu sınır integral denkleminin temel çözümünü oluşturur. Sınır integral denkleminin tanımlandığı arayüz elemanlara ayrıştırılarak kaynak/potansiyel dağılımı ile çözülmesi mümkün olur. Her bir hidrodinamik kuvveti ifade eden eşitlik, Bernoulli denkleminin türetilmiştir ve ıslak yüzeydeki hız potansiyeli dağılımına bağlıdır. Dolayısıyla, Bernoulli denklemiyle potansiyel alan cinsinden ifade edilen akışkan basıncı kullanılarak, genelleştirilmiş akışkan-yapı etkileşim kuvvetleri, ek-su kütlesi, hidrodinamik sönüm ve hidrodinamik rijitlik formunda hesaplanabilir.

Yapıya etrafındaki potansiyel alan, radyasyon ve difraksiyon potansiyeli olarak ayrılabilir. Yüzen yapının, sakin su yüzeyinde oluşturduğu potansiyel, radyasyon potansiyelidir. Radyasyon potansiyeli yapının hareket denklemindeki ek su kütlesine, hidrodinamik sönüm ve hidrodinamik rijitlik ifadelerine katkı yapar. Difraksiyon potansiyeli ise gemi hareketlerinin sınırlandığı gemiye etkiyen düzenli dalga kuvvetlerini tanımlayan potansiyeldir. Haskind bağıntısı vasıtasıyla radyasyon ve difraksiyon problemleri ilişkilendirilerek, benzer bir sınır eleman denkleminin difraksiyon problemi için de ele alınması gereği ortadan kaldırılabilir. Yapısal serbest titreşim ve dalga radyasyon problemlerinin çözümünde sırasıyla sonlu eleman metodu ve sınır eleman metodu uygulanır.

Lineer hidroelastisite teorisi, lineer yapısal model ve lineer hidrodinamik teoriye dayanır. Yapının davranışları modal analiz tekniklerini kullanarak hesaplanır. Yapının üç boyutlu dinamik davranışı sonlu elemanlar metodu ile dış yüklerin olmadığı yani akışkan yüklerinin olmadığı vakum ortamında hesaplanır. Yapının akışkan ortamı içerisindeki hareketleri ile ilgili olan akışkan etkileri ise hidrodinamik model kullanılarak sınır elemanları metodu ile hesaplanır.

Hareket denkleminin çözümü ile gemi davranışları hakkında bilgi sahibi olabileceğimiz tepki genlik fonksiyonu (Response Amplitude Operator: RAO) elde edilir. Tepki genliği fonksiyonu gemi ya da yüzen diğer yapıların dizaynında, denizde operasyon halinde bulunan bir geminin olası davranışlarına karar vermede kullanılır. Tepki genliği fonksiyonları, deniz durumunun geminin sudaki hareketlerindeki etkisine karar vermek için kullanılan etkin transfer fonksiyonlarıdır. Geniş kapsamlı RAO oluşturulması dizayn esnasında gemi inşaat mühendisine güvenlik sebeplerinden gerekebilecek değişikliklere karar vermesini sağlar. RAO'lar ve hidrodinamik veriler birlikte, modelleme ve mühendislik sınırlamalarının mümkün kıldığı kadar dizaynı istenilen geminin davranışı hakkında belirli güvence sağlar. Aynı zamanda mühendisin, deniz durumu istatistiklerini temel alarak, gemiyi ya da yapıyı boyutlandırmasını sağlar böylelikle gemi maruz kalabileceği en zor deniz durumlarına dayanabilir.

Dalga dikliğinin küçük değerlerde kaldığı kabulü altında karışık deniz şartları, farklı genlik, doğrultu ve dalga boylarındaki düzenli dalgaların lineer birleşimleri olarak tanımlanan dalga spektrumları ile ifade edilebilir. Benzer şekilde, karışık dalgalar etkisindeki yüzen bir yapının dinamik davranışı, farklı özelliklere sahip düzenli dalgalara verilen cevapların lineer birleşimi şeklinde hesaplanabilir. İstenilen deniz şiddeti için seçilen dalga spektrumu ve daha önce elastik yapı için hesaplanan tepki genliği fonksiyonu kullanılarak gerçek deniz şartlarındaki gemi hareketinin davranışını temsil eden tepki spektrum fonksiyonu oluşturulur ve gemi hareket karakteristikleri hesaplanabilir.

HYDROELASTIC ANALYSIS OF A FLOATING STRUCTURE IN IRREGULAR SEA WAVES

SUMMARY

Ships or offshore structures expose to variety of loadings or motions in sea environment which do not effective in calm water enviroment. Motions and effects can cause many severe problems for structures. These problems can be summarized in certain way.

Ships subjected to extra resistance in rough seas. This causes to low ship speed by consuming the same amount of machine power and fuel oil. If ship's captain forces the ship to move at the same speed under heavy sea conditions, the structure can suffer damages due to plunging in to the water. Ocean waves break over the ship deck since fore deck dives in which is undesirable for safety. Slamming is another important phenomena. Bow rises over the waves and crashes back to the water suddenly thus ship vibrates due to impact loads. Impact and sudden loads may cause fatigue on ship bottom plane. Extreme stress may damage equipment such as sonar and also other local impairments may arise. One another issue of ship motions is sea sickness. The main cause of sea sickness is horizontal accelerations. Ship captain can choose to decrease ship speed under heavy sea conditions to maintain stable the ship crew's performance however this is not always helpful solution. Sea sickness can be inevitable. Structural stresses is another vital effect. Ship is an elastic structure thus water waves cause deformation on the elastic structure. Hydroelasticity is interested in this problem. Apart from slamming behavior, reducing ship speed to limit structural stress is not a true solution. Additionally, captain cannot estimate how serious this deformations and stresses can be. Taking precautions against this severe structural loadings is not possible for captain.

All of the mentioned phenomena are difficult issues to handle for ship designer. Briefly, designing ships with a small amplitude response to ocean waves is reasonable. Ship responses to the sea waves can be considered as either rigid body motions where deformation of structure is neglected or elastic structure responses where deformation of structure take into account essentially. In other words, designer should consider appropriate parameters to estimate ship responses in different and challenging ocean conditions and seaways.

In terms of design, predicting ship behavior in certain sea state at the same time in violent sea conditions which ship encounter in her lifetime a few time is always become a subject areaof study. Calculating ship responses in service area and time there is a need to knowledge of ship responses in regular waves and wave spectrum. Wave spectrum is obtained by statistical information in years. To determine the ship response in certain and desired sea condition there is a need to this statistical information and also ship behavior in regular sea state. By the help of these two

important knowledge, the ship response can be determined in random and real ocean seaway.

Hydroelasticity is an interest of responses of a floating elastic structure in fluid domain. Hydroelasticity theory is applied to an elastic ship or offshore structures to determine stresses, motions and deformations. In other words, hydroelasticity concerns the loadings arise from fluid motion and effects of these loads with elastic structure. This assessment is important to build lighter constructions as well as to design ships with faster service speed.

This study bases on modal analysis principles which means structural response considered as sum of motions and deformations at principal coordinates. Structural and hydrodynamic problems are coupled weakly by depending on linear hydroelasticity theory where structural and hydrodynamic problems regarded under the linear behavior and potential flow theory respectively.

Depending on this context, firstly, dynamic characteristic of structure is determined with in the absence of structural damping and external forces. Dynamic characteristic of structure namely natural frequencies and corresponding natural mode shapes is determined by free vibration analysis.

The purpose of second analysis, wet analysis, is to take flow effects into consideration. Structure is regarded as vibrating in its principal coordinates to for coupling structure and fluid. Structural vibrations are caused pressure distribution on wet surface. Flow problem on wet surface of structure is solved to determine fluid forces. Structural motion originated perturbation potential in fluid environment becomes definite on intersection area of structure and fluid which is named wet surface.

Finite element method is used for free vibration analysis of structure. Boundary element method is used to determine sea loads arise from coming and scattering waves around the floating structure as well as to determine wave loads arise from radiating waves due to ship motion. By the help of Haskind relation radiation and diffraction problems can be related. Thus the necessity to solve another similar boundary element equation can be eliminated. In this situation, excitation forces which effect the floating structure, can be determined by using distribution of velocity potential and radiation originated distributed velocity potential takes the effect of deep water. In this approach the structure response can be calculated under the condition of small wave steepness for regular waves. However real ocean environment is highly irregular which consists of different wave amplitudes in any direction. By using wave spectrums real ocean environment can be represented. Wave spectrums are obtained by principle of linear superposition of regular sea waves. In a similar way, response behavior of a ship in real sea environment can be determined by linear superposition of responses which obtained for regular waves.

Ideal and irrotational fluid (nonviscous and incompressible) assumption allows fluid flow problem to be determined by using Laplace equation. Laplace equation which identifies potential flow and necessary boundary condition is converted to boundary integral equation. So that, fluid flow problem becomes only definite at the boundary surface. Green function that satisfies the free surface boundary condition is the fundamental solution for the boundary integral equation. Boundary integral equation which is obtained by reducing Laplace equation to the boundary needs a fundamental solution. Green function satisfies problems governing equation and free surface boundary condition and this is the most important aim of obtaining Green function.

In the second part of solution process, wave forces arise from structural vibrations and incident wave forces are determined by using boundary integral equation. Determination of velocity potential only on the fluid-structure intersection by using boundary integral equation is the main advantage. Laplace equation which identifies potential fluid reduced to boundary and this reducing process is the most efficient way of solution. Velocity potential which is independent of surface geometry can be obtained with determining boundary values by using boundary integral equation. Therefore, perturbation potential arise from structural deformations can be solved on wet surface. Boundary integral equation is solved by discretising the boundary surface to linear or constant elements.

All boundary conditions, free surface condition, radiation to infinity, body boundary condition are adapted to boundary integral equation. After adapting boundary conditions to the integral equation flow motion due to structural vibration and incident wave potential are determined. Velocity potential determined for every principal coordinate. Floating elastic structure motions causes to radiation potential. Radiation potential contributes to equation of motion in the terms of added mass, hydrodynamic damping and hydrodynamic stiffness. On the other hand, diffraction potential is determined in limited motion of structure as well as includes incident waves upon floating structure. By the help of Haskind relation radiation and diffraction problems get related, therefore another extra boundary integral equation is not solved for diffraction potential.

Generalized fluid-structure interaction forces, added mass, hydrodynamic damping, hydrodynamic stiffness terms identified in terms of potential velocity by the help of Bernoulli equation. Generalized equation of motion becomes solvable with determination of velocity potential around floating structure.

Hydroelastic analysis of floating structure in regular waves adapted to real ocean waves which are quite irregular. Random wave surface can be obtained with summation of regular waves which have different amplitudes and directions, under the assumption of small wave steepness. In similar way dynamic response of structure in random waves can be determined by the help of wave spectrums.

Linear hydroelasticity theory depends on linear structural model and linear hydrodynamic theory. Response of structure is calculated by using modal analysis techniques. Three dimensional structure response are determined in the absence of external loads in vacua. Fluid effects which are caused my motion of structure in fluid are determined with hydrodynamic model by the boundary element method. Ship responses in regular waves and wave spectrums are used to determine floating structures responses in service area and time. Wave spectrums depends statistical information measured in years. The statistical information allows to determine ship responses in desired sea environment.

1. GİRİŞ

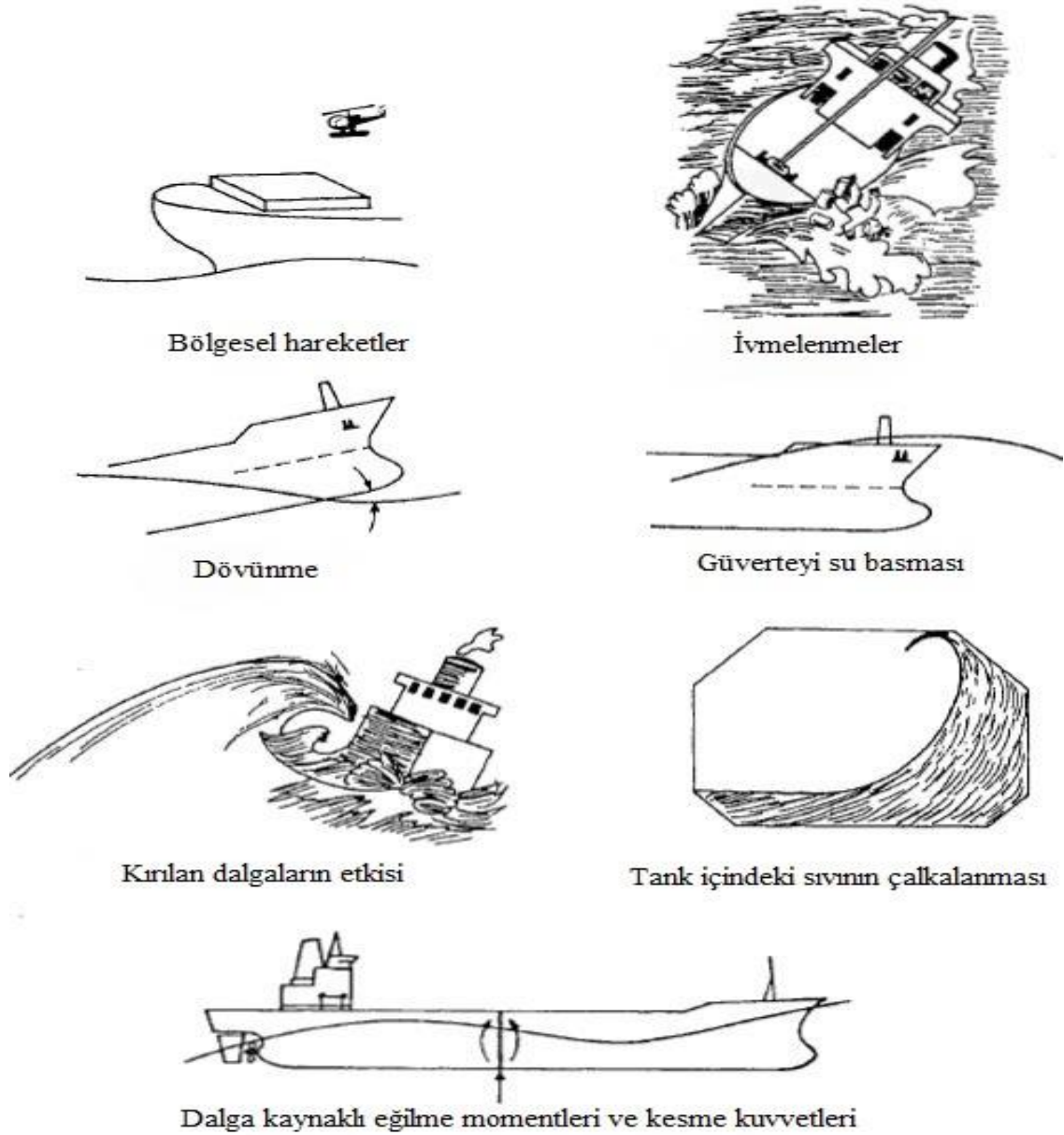
Bir gemi ya da deniz yapısı dalgaların içerisinde ilerlerken sakin suda karşılaşmadığı çeşitli yüklere ve hareketlere maruz kalır. Bu hareketler ve etkileri birçok ciddi soruna neden olur. Bu zorluklar şu şekilde açıklanabilir.

Yapının dalgalara verdiği yanıtlardan birisi olan dikey ivmelenmeler yani gemi ve dalgalar arasındaki bağıl düşey hareketler incelenmesi gereken bir durumdur. İvmelenmeler, donanım ve kargo üzerinde yüklerin oluşmasına ya da mürettebat ve yolcular için deniz tutmasına neden olur. Bağıl dikey hareketler ise dövünme ve güverteye su basması gibi durumların olasılığı ve muhtemel hasarların hesaplanması için kullanılabilir. Gemi için dövünme hareketinden ve güverteyi su basması durumlarından kaçınmak, bu durumların sonucunda yapıda oluşabilecek bölgesel hasarları engellemek için önemlidir.

Yalpa hareketi özellikle gemi operasyon halindeyken önemlidir. Özellikle balıkçı tekneleri, destek gemileri, yolcu gemileri ve savaş gemileri operasyon halindeyken yalpa hareketi problem oluşturabilir. Geminin yalpalanmasını engellemek bu yüzden önemlidir. Örneğin; yalpa omurgaları, yalpa engelleyici tanklar, aktif salma omurgaları bu yalpa hareketini engellemek için oluşturulmuştur. Küçük tekneler için, yalpa hareketi ile birlikte rüzgâr ya da güverteyi su basması durumu alaboraya sebep olabilir. Küçük teknelerin alabora olmasının başka bir nedeni kırılan dalgalardır. Denizlerin kıyı kısımlarında birçok kaza kırılan dalgalardan dolayı gerçekleşir. Takip eden dalgalar ise farklı kritik alabora durumlarına neden olabilir. Eğer dalga profili gemiyle aynı hızda hareket ediyorsa, dalga profilinin durumuna göre gemi statik olarak dengesiz olabilir. Gemi takip eden dalgalardan dolayı dengesini kaybedebilir. Bu durumdan kaçınmak için dalgaların yönüne göre gemi rotası değiştirilir. Bu duruma broşlama denilir ve statik stabilitenin değişimi ile geminin alabora olmasını engelleme açısından kritik önemdedir.

Tanklarda ki sıvı çalkantısı dökme yük gemileri, petrol, dökme yük, ya da cevher taşıyabilen OBO gemileri, sıvılaştırılmış doğal gaz taşıyan LNG gemileri ve açık

deniz yapılarına yükleme yapan tankerler için problem teşkil edebilir. Tank içerisinde sıvı çalkantısının hasar verici olmasının iki sebep vardır. Birincisi tank içindeki sıvı hareketinin doğal frekansının, geminin frekans bölgesinde olması dolayısıyla ciddi yapısal hareketlerin oluşmasıdır. Diğer bir neden, genelde tank içindeki sıvı hareketine karşı küçük sönümlenme olmasıdır. Eğer tahrik frekansı, tankın doğal frekansına yakınsa tank içerisindeki sıvı hareketinin güçlü olarak arttığı görülür. Sıvı çalkantısı yüksek yerel basınçlara ek olarak büyük toplam kuvvetlere sebep olabilir. Her iki etkide dizayn açısından önemlidir.



Şekil 1.1 : Dalga yükleri ve hareketlerinden kaynaklı önemli gemi problemlerine örnekler (Faltinsen, 1990).

Büyük gemilerde ise dalga kaynaklı eğilme momentleri, kesme kuvvetleri ve burulma momentleri önemlidir. Daha özellikli problemler ise kırbaçlama ve yaylanma hareketleridir. Kırbaçlama davranışı, dövünme hareketinden kaynaklı gemi gövdesinde yayılan elastik titreşim olarak tanımlanır. Yaylanma davranışı, dalga kuvvetleriyle rezonansa girerek ve sürekli bir titreşim içinde olmasını tanımlar ve okyanus aşırı çalışan büyük gemiler için özel öneme sahiptir. Yaylanma davranışı, lineer ve lineer olmayan tahrik mekanizmalarından dolayı oluşabilir. Lineer tahrik kuvvetleri gemiye göre küçük dalga boyuna sahip dalgalarla ilgilidir.

Gemi hareketleri ve dalga yükleri istemli ya da zorunlu hız düşüşleri yüzünden gemi hızını önemli ölçüde etkileyebilir. İstemli hız düşümü gemi kaptanının, dövünme davranışı, güvertiyi su basması ya da yüksek ivmelenmeler sebebiyle gemi hızını düşürmesi demektir. Zorunlu hız düşümü ise dalgalar ve rüzgâr sebebiyle gemiye karşı ek direnç oluşması ve dalgalardan dolayı pervane verimindeki değişimlerden kaynaklanır.

Sabit makina gücü ile ilerleyen geminin hızı farklı yönden gelen dalgalar sebebiyle değişebilir. Dalgalara doğru ilerleyen gemi zorunlu hız düşümü yapar. Geminin gövdesel bütünlüğü, donanımın operasyonu, taşınan kargonun güvenliği, mürettebatın güvenliği ve verimliliği belirli kriterlerde değerlendirilir.

Bahsedilen bu çeşitli fenomenler gemi dizaynı için baş edilmesi güç problemlerdir. Belirli deniz durumlarındaki gemi davranışını aynı zamanda geminin ömründe azda olsa karşılaşılabileceği olağanüstü deniz durumlarında nasıl davranacağını tahmin etmek dizayn açısından önemli ve gereklidir.

1.1 Tezin Amacı ve İçeriği

Geminin dalgalara verebileceği yanıtlar, elastik olmayan katı bir cisim olarak gerçekleştirecekleri rijid cisim hareketleri olabileceği gibi, şekil değişikliklerini içeren elastik hareketler de olabilir. Denizcilik problemleri gemiyi rijit yapı kabulüyle incelse de gemi gerçekte elastik bir yapıdır. Elastik yapının akışkan ortamındaki davranışlarıyla hidroelastisite ilgilenir.

Hidroelastisite, akışkan içerisinde yüzen esnek cismin davranışlarının incelenmesidir. Esnek bir gemi ya da açık deniz yapısı için hidroelastisite teorisi uygulanarak yapıdaki gerilmeler, hareketler ve yer değiştirmeler bulunabilir.

Bu çalışmanın ilk kısmında, düzenli sinüzoidal dalgalar etkisinde yüzen konvansiyonel bir geminin hidroelastik analizi lineer hidroelastisite teorisi kullanılarak yapılmıştır. Lineer hidroelastisite teorisi modal analiz prensiplerini temel alır ve iki farklı analize dayanır. Bunlardan ilki serbest titreşim analizidir. Serbest titreşim analizi, yapısal sönüm ve dış tahrik kuvvetlerinin olmadığı durum için hareket denklemini sadeleştirip, yapısal dinamik karakteristikler olan doğal frekanslar ve karşılık gelen asal modların belirlenmesidir. İkinci analizin amacı ise akışkan etkilerinin dâhil edilmesidir. Vakum ortamında yapılan analizden ıslak ortamdaki analize geçebilmek için yapının akışkanla etki halindeyken asal modlarında hareket ettiği düşünülür. Bu hareketlerin yapı ıslak yüzeyinde basınç dağılımına sebep olduğu kabulü ile akışkan problemi çözülerek, hidrodinamik kuvvetler hesaplanır. Akışkan kuvvetlerinin genelleştirilmiş hareket denklemine dâhil edilmesiyle akışkan-yapı sistemi bir araya getirilmiş olur. İlk olarak vakum ortamında yapılan analiz, yüzen yapının üç boyutlu modelinin standart sonlu elemanlar programıyla gerçekleştirilir. Analizin ikinci kısmı, akışkan yapı arayüzünde akışkan hareketlerinin tanımlandığı sınır integral denkleminin çözümünden oluşmaktadır.

Akışkanın ideal (viskoz olmayan ve sıkıştırılamaz) ve hareketinin döngüsüz kabul edilmesi halinde akım Laplace denklemini sağlar. Potansiyel akımı tanımlayan Laplace denklemi gerekli sınır koşullarını sağlayan bir sınır integral denklemine dönüştürülür. Böylelikle problem sadece sınırdaki tanımlı hale gelir. Serbest su yüzeyi şartını sağlayan Green fonksiyonu sınır integral denkleminin temel çözümünü oluşturur. Laplace denkleminin sınıra indirgenmesi ile elde edilen sınır integral denkleminin çözümü için temel çözüme ihtiyaç vardır. Çözölmek istenen problem için uygun sınır şartlarını sağlayan temel çözüm seçilmelidir. Bu bağlamda Green fonksiyonu geliştirilmiştir. Green fonksiyonunun oluşturulmasının en önemli sebebi serbest yüzey şartını ve problemin denklemlerini sağlıyor olmasıdır.

Yapısal hareketlenmelerden kaynaklanan dalga kuvvetlerinin ve yapıya etki eden dalga kuvvetlerinin belirlendiği çözümün ikinci kısmında sınır eleman metodundan yararlanılmasının amacı sadece yapı-akışkan arayüzündeki hız potansiyelinin dağılımının bulunmasının yeterli olmasıdır. Potansiyel alanı ifade eden Laplace denkleminin sınır integral denklemine dönüştürülmesi ile akışkan probleminin sadece sınır değerlerinin araştırıldığı forma indirgenmesi, yüzey geometrisinden

bağımsız genel bir çözüm için etkin bir yol olduğu söylenebilir. Böylelikle, yapısal hareketlerin akışkan ortamında neden olduğu pertürbasyonları tanımlayan sınır integral denklemi akışkan-yapı ara yüzü üzerinde yani yapı ıslak yüzeyinde tanımlı hale gelir. Sınır integral denkleminin tanımlandığı arayüz sabit ya da lineer elemanlara ayrıştırılarak kaynak/potansiyel dağılımı ile çözülmesi mümkün olur.

Tüm sınır koşullarını, serbest su yüzeyi, sonsuza yayılım şartı, kinematik şartı sınır integral ifadesine uyarlandıktan sonra, sınır elemanları metodu kullanılarak, yapısal titreşimin yapı etrafındaki akım üzerindeki etkisi ve akışkan kaynaklı tahrik kuvveti hesaplanır. Her bir asal mod için akım potansiyeli sınır integral denklemi ile bulunur. Yüzen elastik yapının, sakin su yüzeyinde oluşturduğu potansiyel, radyasyon potansiyelidir. Radyasyon potansiyeli yapının hareket denklemindeki ek su kütesine, hidrodinamik sönüm ve hidrodinamik rijitlik ifadelerine katkı yapar. Difraksiyon potansiyeli ise gemi hareketlerinin sınırlandığı ve duran gemiye etkileyen düzenli dalga kuvvetlerini oluşturan potansiyeldir. Haskind bağıntısı vasıtasıyla radyasyon ve difraksiyon problemleri ilişkilendirilerek, benzer bir sınır eleman denkleminin difraksiyon problemi için de ele alınması gereği ortadan kaldırılabilir.

Bernoulli denklemiyle potansiyel alan cinsinden ifade edilen akışkan basıncı kullanılarak, genelleştirilmiş akışkan-yapı etkileşim kuvvetleri, ek-su kütesi, hidrodinamik sönüm ve hidrodinamik rijitlik hesaplanabilir. Cisim etrafındaki akım potansiyelinin hesaplanmasıyla birlikte düzenli dalgalarda yüzen yapı için hareket denklemi çözülebilir hale gelir.

Bu çalışmanın ikinci kısmında, lineer hidroelastik analizi yapılan konvansiyonel bir geminin davranışları gerçekte düzensiz olan okyanus dalgaları için uyarlanmıştır. Dalga dikliğinin küçük değerlerde kaldığı kabulü altında karışık deniz şartları, farklı genlik, doğrultu ve dalga boylarındaki düzenli dalgaların lineer birleşimleri olarak tanımlanan dalga spektrumları ile ifade edilebilir. Benzer şekilde, karışık dalgalar etkisindeki yüzen bir yapının dinamik davranışı, farklı özelliklere sahip düzenli dalgalara verilen cevapların lineer birleşimi şeklinde ifade edilir.

Kısaca ifade edecek olursak, lineer yapısal modele ve lineer hidrodinamik teoriye dayanan lineer hidroelastisite teorisi kullanılarak yüzen bir yapının karışık dalgalardaki davranışı incelenmektedir. Yapının davranışları modal analiz tekniklerini kullanarak hesaplanır. Öncelikle yapının üç boyutlu dinamik davranışı

dış yüklerin olmadığı yani dalga yüklerinin olmadığı vakum ortamında sonlu elemanlar metodu ile hesaplanır. Yapının akışkan ortamı içerisindeki hareketleri ile ilgili olan akışkan etkileri ise hidrodinamik model kullanılarak sınır elemanları metodu ile hesaplanır. Servis bölgesinde ve zamanında gemi davranışlarını öğrenebilmek için düzenli dalgalarındaki gemi davranışları ve dalga spektrumundan faydalanılır. Dalga spektrumu yıllar içerisindeki istatistiksel bilgilere dayanır. Bu istatistiksel bilgilerden yararlanıp istediğimiz deniz koşulu için gemi davranışlarını, düzenli dalgalarındaki gemi davranışları yardımıyla elde edebiliriz.

1.2 Hidroelastisite Teorilerinin Gelişimi

Bishop ve Price (1979) ilk olarak dalgalar içerisindeki gemileri esnek yapılar olarak analiz ettiler. Modelleri modal süperpozisyon metodu ile ince bir geminin incelenmesine dayanıyordu. Dalga kaynaklı tekne deformasyonunu, hava ortamında bir kirişin bir seri serbest titreşim modu ile temsil etmişlerdir. İlk altı mod rijit yapı hareketlerini geri kalan modlar ise esnek yapıyı temsil etmektedir. Hidrodinamik kuvvetler olan, hidrodinamik sönüm ve ek-su kütlesi matrisleri ile dış kuvvet yük vektörünü titreşim modları ile ilişkilendirip dilim teorisi ile çözüm sağlamışlardır. Yalın teori, geminin simetrik ve antisimetrik davranışları için iki boyutlu hidroelastik teorisinin kurulmasında ilk adımların atılmasını sağladı. Özet olarak, iki boyutlu teoride gemi üniform olmayan Timoshenko kirişi olarak kabul edilmiştir. Akışkan-yapı etkileşim problemini genelleştirilmiş hareket denklemi ile çözülmüştür.

Burada hareket denklemi,

$$(A + a) \ddot{p} + (B + b) \dot{p} + (C + c)p = E \quad (1.1)$$

Bu denklemde, p asal koordinat vektörü; a , b ve c sırasıyla vakum ortamındaki yapının genelleştirilmiş kütle, sönüm ve rijitlik matrisleridir. A , B , C ise sırasıyla genelleştirilmiş hidrodinamik ek-su kütlesi, hidrodinamik sönüm ve hidrodinamik rijitlik matrisleridir. E genelleştirilmiş dalga kaynaklı kuvvettir. Bu denklem düzenli dalgalarda seyir eden gemi için sadece frekans bölgesinde geçerlidir. Asal koordinatlar için elde edilen sonuçlar modal süperpozisyonla bağlantılı olarak yapının her kesiti için, dinamik yer değiştirme, eğilme momentleri ve kesme kuvvetlerinin vs. bulunmasını sağlar.

Belirli basitleştirmeler temel alınarak Bishop (1978) ve Belik (1980) frekans bölgesindeki analizi genişletmişler ve elastik geminin düzensiz baştan gelen dalgalarındaki davranışlarını dövmüne etkilerini de dâhil ederek zaman bölgesinde sonuç elde edebilecekleri hale getirmişlerdir. Bu yaklaşım firkateynlere, dalga ve dövmüne kaynaklı yapısal cevapları için geniş çapta uygulanmış ve tam ölçekli deney sonuçlarıyla iyi uyum göstermiştir.

Wu (1984), Price ve Wu (1985), Bishop ve diğerleri (1986) iki boyutlu hidroelastik teorilerden kaynaklanan sınırlamaları aşmak ve kirişe olarak modellenmesi uygun olmayan esnek yapıların davranışını inceleyebilmek için genel üç boyutlu lineer hidroelastik teoriyi geliştirdi. Vakum ortamında dinamik davranışları tanımlamak için lineer sonlu elemanlar yaklaşımı kullanıldı. Islak yüzeydeki elastik yapının dinamik hareketlerinden kaynaklanan akışkan hareketleri, esnek yüzen yapı etrafındaki üç boyutlu potansiyel akım modeli ile hesaplandı.

Bu teoride genel hareket denklemi, hareket denklemi (1.1) ile aynı yapıya sahiptir ancak katsayılar farklı hesaplanır. İdeal, döngüsüz akışkan kabulü ile genelleştirilmiş hidrodinamik ek-su kütlesi, hidrodinamik sönümleme ve hidrodinamik rijitlik kuvvet matrisleri sırasıyla A , B ve C ile birlikte E genelleştirilmiş dalga tahrik kuvveti, ıslak yüzey üzerindeki potansiyel akımın integrallerinin çözümü olarak tanımlanır.

Bu üç boyutlu hidroelastik teori geniş bir alanda akışkan yapı problemleri için uygulanmıştır. Bu alan çok farklı durumları kapsar. Örneğin; karışık dalgalara maruz kalan herhangi bir şekle sahip esnek yapılarda uygulanmıştır ve iyi sonuçlar vermiştir. Daha özellikli durumlar olan baştan gelen dalgalara karşı seyreden esnek yapılarda dövmüne analizinde ya da patlamalardan dolayı oluşan geçici yüklerin esnek yapıya etkileri için lineer hidroelastisite teorisi uygulanmıştır. Her durumda üç boyutlu hidroelastik teori geçerliliğin kanıtlamıştır. Üç boyutlu hidroelastik teori akışkan-yapı etkileşim sürecinde rijit yapı ya da elastik yapı davranışlarında ya da iç ve dış gerilmelerin değerlendirildiği farklı durumlarda güvenilir sonuçlar vermiştir.

Wang(1991) ve Che (1992,1994) çok büyük yüzen yapıların (VLFS) ve SWATH tipi gemilerin okyanus dalgalarındaki hidroelastik davranışını hesaplayabilen geliştirilmiş hidroelastik teoriyi sundular. Bu çalışmada plakadaki yer değiştirmeler için ara yüzeyinin ayrıklaştırması konsepti ile ana batmış yapısal elemanların hidrodinamik etkileşimi için yeni dilim teorisi geliştirildi. Üç boyutlu kuru dinamik

analizler için konvansiyonel sonlu elemanlar metodu uygulandı. Yapıda üç boyutlu sonlu elemanlar metodu kullanıldığı için metot, yapısal her eleman için kuvvet ve gerilmeler gibi üç boyutlu yapısal davranışları direkt hesaplanabilmesini sağladı.

Liu ve Sakai (2000, 2002) esnek yüzen yapıların dalgalar etkisine karşı davranışının analizi için zaman bölgesinde sayısal bir metot geliştirdi. Akışkan hareketini hesaplamak için sınır elemanlar yöntemi, yapının elastik deformasyonunu analiz etmek için sonlu elemanlar yöntemi kullandılar. Dinamik akışkan-yapı etkileşimi, dalga üreten sınırın her adım aralığı için koşullarını tayin ederek, akışkan-yapı arayüzünde basıncın ve yer değiştirmenin sürekliliği sağlanarak simule edildi. Nümerik yöntem deneysel sonuçlarla kıyaslandı. Ek olarak, esnek yüzen yapının altında tek dalganın gelişimi hem nümerik analizlerle hem de deneylerle gözlemlendi.

Wu ve diğerleri (1997) üç boyutlu non-lineer hidroelastik teoriyi sundular. Teoride ikinci mertebeden hidrodinamik kuvvetler Wu ve diğerleri (1997) tarafından formüle edildi ve lineer olmayan hareket denklemleri frekans ve zaman bölgelerinde sunuldu.

Wu ve diğerleri (1997) geliştirdiği teoriyi temel alarak, ikinci mertebeden lineer olmayan metot ve demirlemiş yüzen yapının nümerik sonuçları Chen (2001), Chen ve diğerleri (2002a,b, 2003d,e) tarafından sunuldu. Yapı için hesaplanan asal koordinatlarda, farklı yönlerden gelen dalgalar etkisinde yapının rezonansa girebileceği görüldü. İkinci mertebeden kuvvetlerin yüzen yapının davranışlarında etkili olduğunu tespit ettiler.

Deniz yapıları için hidroelastisite teorilerinin tarihsel gelişimi açıklanmıştır. İki boyutlu lineer teori ve frekans bölgesindeki üç boyutlu lineer teori gelişimini tamamlamıştır. Ancak üç boyutlu non-lineer teori ve non-lineer yapısal etkilerin değerlendirildiği hidroelastik teori hala geliştirilmektedir. Yakın gelecekte, zaman bölgesinde etkili non-lineer hidroelastik teorilerin geliştirilmesi ana hedef olarak görülmektedir (Chen ve diğerleri, 2005).

Bilgisayarların hafızasındaki ve yüksek hesaplama hızlarındaki hızlı gelişme sayesinde nümerik hesaplamalar gemi ve açık deniz yapılarında ki dalga kaynaklı hareket ve kuvvetleri hesaplamada giderek artan önemde rol oynamaktadır. Nümerik hesaplamalardaki gelişimde çok önemli adımlar 70'ler de atılmaya başladı. Ancak, şunu vurgulamak önemlidir, nümerik bilgisayar programlarının gelişimi hidrodinamik teorilerin gelişimine bağlıdır.

Özellikle ayrık viskoz akımla ve gemi ve açık deniz yapılarındaki aşırı dalga etkilerini ilgili bilgiyi artırmak için teorik araştırmalara ihtiyaç vardır.

Yakın gelecek için bilgisayar programlarının model testlerinin yerini tamamen alacağı gerçekçi değildir. İdeal olan model testlerinin ve nümerik yöntemlerin birleştirilmesidir. Bazı durumlarda bilgisayar programları güvenilir değildir, özellikle tamamen yeni kavramlar test edildiğinde model testleri çoğunlukla bilgisayar programlarından daha güvenilirirdir.

Deneysel sonuçlara göre teorik temeli bilgisayar programı tatmin edici olduğunda bilgisayar programları model testlerine göre avantajlıdır. Çeşitli deniz koşullarında farklı dizaynları geliştirmek için genelde bilgisayar programları model testlerinden daha verimli yönde kullanılabilir. Ayrıca, sonuçların doğru değerlendirilmesi her zaman önemlidir bunun için problemin temelinin fiziksel olarak anlaşılması gerekir.

Bu çalışmada, Bishop, Price ve Wu (1986)'nın geliştirmiş oldukları üç boyutlu lineer hidroelastisite teorisi konvansiyonel tipte bir gemi için uygulanmıştır. Geliştirilmiş olan bu teori yıllar içerisinde birçok akışkan-yapı problemine uyarlanmış ve doğru sonuçlar vererek geçerliliğini kanıtlamıştır. Bölüm 2'de üç boyutlu lineer hidroelastisite teorisi genel hatları ile açıklanmıştır. Bölüm 3'te hidroelastisite teorisinin uygulanması için gerekli olan dinamik akışkan kuvvetlerini bulmamızı sağlayan sınır integral denkleminde ve temel çözümünden bahsedilmiştir. Bölüm 4'te standart sonlu elemanlar programı ve sınır elemanları programları kullanarak hesaplanmış olunan düzenli dalgalarda gemi davranışı fonksiyonu sunulmuştur. Ek olarak düzensiz dalgalarda elastik yapının davranışını hesaplayabileceğimiz dalga spektrumları açıklanmış ve konvansiyonel tipteki gemi için çözümler sunulmuştur.

2. MATEMATİK MODEL

Gemi inşaatı mühendislerinin ilgilendiği önemli bir konu, yüzen ve yarı-batık deniz araçlarının okyanus dalgalarından nasıl etkilendiğinin incelenmesidir. Dalgalara maruz kalan yapının tipi, dalgaların etkisinin değerlendirilmesi açısından önemlidir. Örneğin, yüzen yapının denizde duran sabit yapı olması ya da demirlemiş veya serbestçe yüzen gemiler olması, dalga yüklerinin değerlendirilmesi açısından önemlidir. Serbest yüzen cisimlerin salınım hareketi ya da sabit duran yapıların maruz kaldığı yükler en çok araştırılan davranışlardır. Bazı nedenlerden dolayı bu konvansiyonel dizayn problemlerinde yüzen cisim rijit yani şekil değiştirmeyen yapı olarak kabul edilir. Gerçekte ise gemi elastik bir yapıdır ve üzerine etkiyen kuvvetlere şekil değiştirerek yanıt verir.

Yüzen yapının şekil değişimindeki davranışlarını inceleyebilmek için öncelikle üzerine etkiyen hidrodinamik kuvvetlerin hesaplanması gerekir. Akışkan kaynaklı yüklerin hesaplanabilmesi için hidrodinamik teoriye ihtiyaç vardır. Okyanus dalgalarının matematiksel olarak modellenmesi güçtür. Ancak belirli kabuller yaparak okyanus ortamının matematiksel olarak modellenmesi mümkündür. Akımın, potansiyel akım olarak kabul edilmesi yani akışkan parçacıklarının döngüsüz hareket ettiği ve viskoz olmayan akım varsayımı matematiksel modellemenin yapılabilmesi için ciddi kolaylık sağlar. Buna ek olarak akımın sıkıştırılmaz akım olarak kabul edilmesinin sonucu olarak hız potansiyeli Laplace denklemini sağlar. Tüm bu kabullerden sonra hız potansiyeli, Laplace denklemine gerekli sınır koşulları uygulanarak hesaplanabilir.

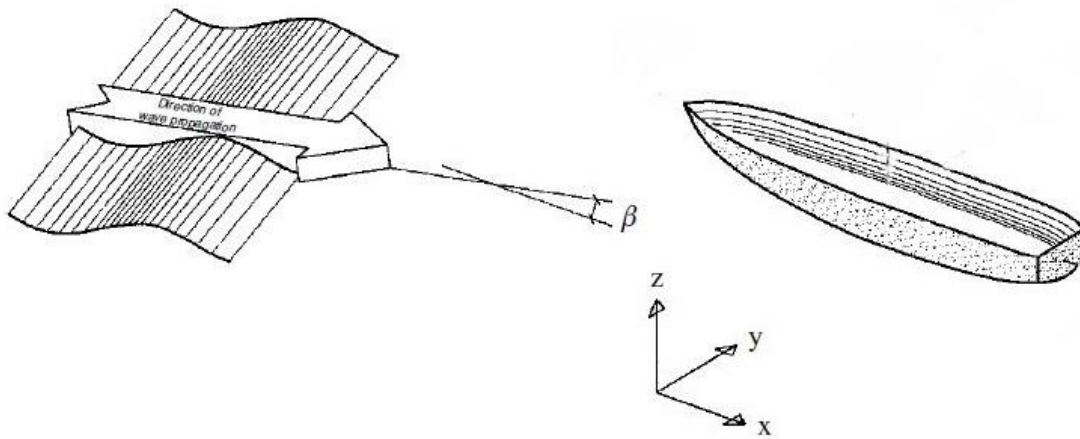
Yüzen cisim etrafındaki akımın potansiyelinin hesaplanması ile yapının etkilendiği hidrodinamik kuvvetler hesaplanabilir. Rijit yapının etkilendiği hidrodinamik kuvvetler ile elastik yapının etkilendiği hidrodinamik kuvvetler benzer şekilde lineer hidrodinamik teori kullanılarak hesaplanır. Lineer hidrodinamik teori ilk olarak rijit yapılar için geliştirilmiştir. Bu nedenden dolayı öncelikle düzenli dalgalarda yüzen

yapının rijit olduğu kabulü altında hidrodinamik kuvvetlerin bulunması için gerekli olan matematik model bu kısımda açıklanacaktır.

2.1 Lineer Hidrodinamik Model

Hidrodinamik teörinin lineer olabilmesi için en basit durumda yapının maruz kaldığı dalgaların, düşük genlikli sinüzoidal olarak zamanla ilerleyen dalgalar olduğu varsayılabilir. Eğer yapıya etkiyen dalgalar yeterince küçük genlikteyse ve cisim dengedeysse, oluşan kuvvetler aynı oranda küçük olur.

Burada, A genliğindeki ve θ yönündeki dalgalar rijit cisim üzerinde etkilidir. Cisim için üç tane öteleme üç tane dönme hareketi tanımlanmıştır. Öteleme hareketleri, dalıp-çıkma, boyuna ve enine ötelemedir. Dönme hareketleri ise yalpa, savrulma ve baş-kıç vurma hareketleridir.

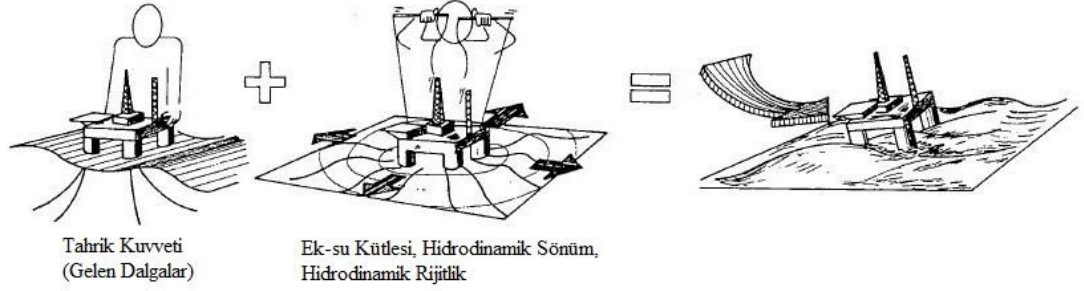


Şekil 2.1 : Bir gemiye etkiyen dalgalar (Newman, 1977).

Eğer cisme etkiyen dalgaların genlikleri yeterince küçükse ve cisim dengeli yüzüyorsa hız potansiyeli,

$$\phi(x, y, z, t) = Re \left\{ \left(\sum_{j=1}^6 \xi_j \phi_j(x, y, z) + A \phi_A(x, y, z) \right) e^{i\omega t} \right\} \quad (2.1)$$

ifadesi ile radyasyon ve difraksiyon bileşenlerine ayrılabilir.



Şekil 2.2 : Dalga tahrik kuvvetleri, ek su kütlesi, hidrodinamik rijitlik ve hidrodinamik sönümün süperpozisyonu (Faltinsen,1990).

İfade ki, ϕ_j fonksiyonu sakin sudaki cismin birim genlikteki hareketinde dolayı oluşan hız potansiyelini temsil eder. Sınır yüzeyi S_B 'ye uygulanacak uygun sınır koşullu ϕ_j potansiyelinin normal türevini, cisim hızının normal bileşenine eşitleyerek elde edilir. Bu problemin çözümü genelde radyasyon probleminin çözümüdür.

$$\frac{\partial \phi_j}{\partial n} = i\omega n_j, \quad j = 1, 2, 3, \quad (2.2)$$

$$\frac{\partial \phi_j}{\partial n} = i\omega(r \times n)_{j-3}, \quad j = 4, 5, 6 \quad (2.3)$$

Diğer potansiyel terimi ϕ_A tahrik kuvvetleri ve bu kuvvetlerin cisim ile etkileşimi ile ilgilidir. Bu potansiyel gemi hareketlerinden bağımsızdır ve cismin sabit olduğu pozisyon için tanımlanır. Cisim yüzeyindeki uygun sınır koşulu,

$$\frac{\partial \phi_A}{\partial n} = 0 \quad (2.4)$$

ile ifade edilir bu sınır şartı ile tanımlanan probleme dalga difraksiyon problemi denir. Cismin akışkan içerisindeki varlığından dolayı gelen dalgalar gemi etrafında yayılır. Bu da farklı bir potansiyel tanımlamamızı gerektirir. Gelen dalgaları toplam potansiyeli, ϕ_0 dağılmamış dalgaların potansiyeli ve ϕ_7 saçılan dalgaların potansiyeli olmak üzere;

$$\phi_A = \phi_0 + \phi_7 \quad (2.5)$$

ifadesi ile tanımlanır.

Tahrik kuvveti sonsuz derinlik için,

$$\phi_0 = \frac{gA}{w} e^{ky} \sin(kx - \omega t) \quad (2.6)$$

şeklinde verilmiştir (Newman, 1974). Denklemden, A gelen dalgaların genliğini, k dalga sayısını, n akışkandan cismin içine doğru olan normal vektörünü ifade etmektedir. Gelen dalgaların cismin varlığından dolayı saçılmasını ifade eden potansiyel ise

$$\partial \phi_7 / \partial n = - \partial \phi_0 / \partial n \quad (2.7)$$

sınır şartını sağlar. Bu sınır koşullarına ek olarak akım bölgesinde her bir potansiyel Laplace denklemini sağlamalıdır.

$$\nabla^2 \phi_j = 0, \quad j = 0, 1, \dots, 7. \quad (2.8)$$

Serbest su yüzeyi etkisi değerlendiriliyorsa Laplace denklemi gerekli sınır koşulunu sağlamalıdır. Serbest su yüzeyi sınır şartı, dinamik ve kinematik sınır koşullarının birleşimiyle elde edilir. Dinamik sınır koşulu serbest su yüzeyinde basıncın atmosferik basınca eşit olduğunu söyler. Kinematik sınır koşulu ise akışkan parçacıklarının akışkan yüzeyinden ayrılamayacağını ifade eder. Bu iki sınır koşulu birleştirip yüksek mertebeden terimlerin ihmal edilmesiyle lineerleştirilmiş serbest su yüzeyi şartı elde edilir.

$$-\frac{\omega^2}{g} \phi_j + \frac{\partial \phi_j}{\partial y} = 0 \quad j = 0, 1, \dots, 7 \quad (2.9)$$

Şimdiye kadar sınır koşulları cisim yüzeyinde, serbest su yüzeyinde tanımlandı fakat sınır değer problemi henüz “*tekil*” değildir. Dolayısıyla çözümü yoktur. Bu problemin üstesinden gelmek gelen dalgaların potansiyelinden farklı olarak geminin oluşturduğu potansiyeller için serbest su yüzeyinde sonsuza yayılım şartı uygulanmalıdır. Böylelikle dalga potansiyelleri ϕ_j ($j=1, 2, \dots, 7$) cisimden uzağa doğru yayılması ifade edilir. İki boyutlu durum için uygun yayılım şartı,

$$\phi_j \propto e^{\pm ikx}, \quad x \rightarrow \pm\infty, \quad j = 1, 2, \dots, 7. \quad (2.10)$$

ile tanımlanmıştır (Newman, 1974). Cisme etkiyen hidrodinamik kuvvetler toplam potansiyeli Bernoulli denkleminde yerine koyarak çözülür.

Bernoulli denkleminde sadece birinci mertebeden lineer terimleri korunursa toplam basınç,

$$p = -\rho \left(\frac{\partial \phi}{\partial t} + gy \right) \quad (2.11)$$

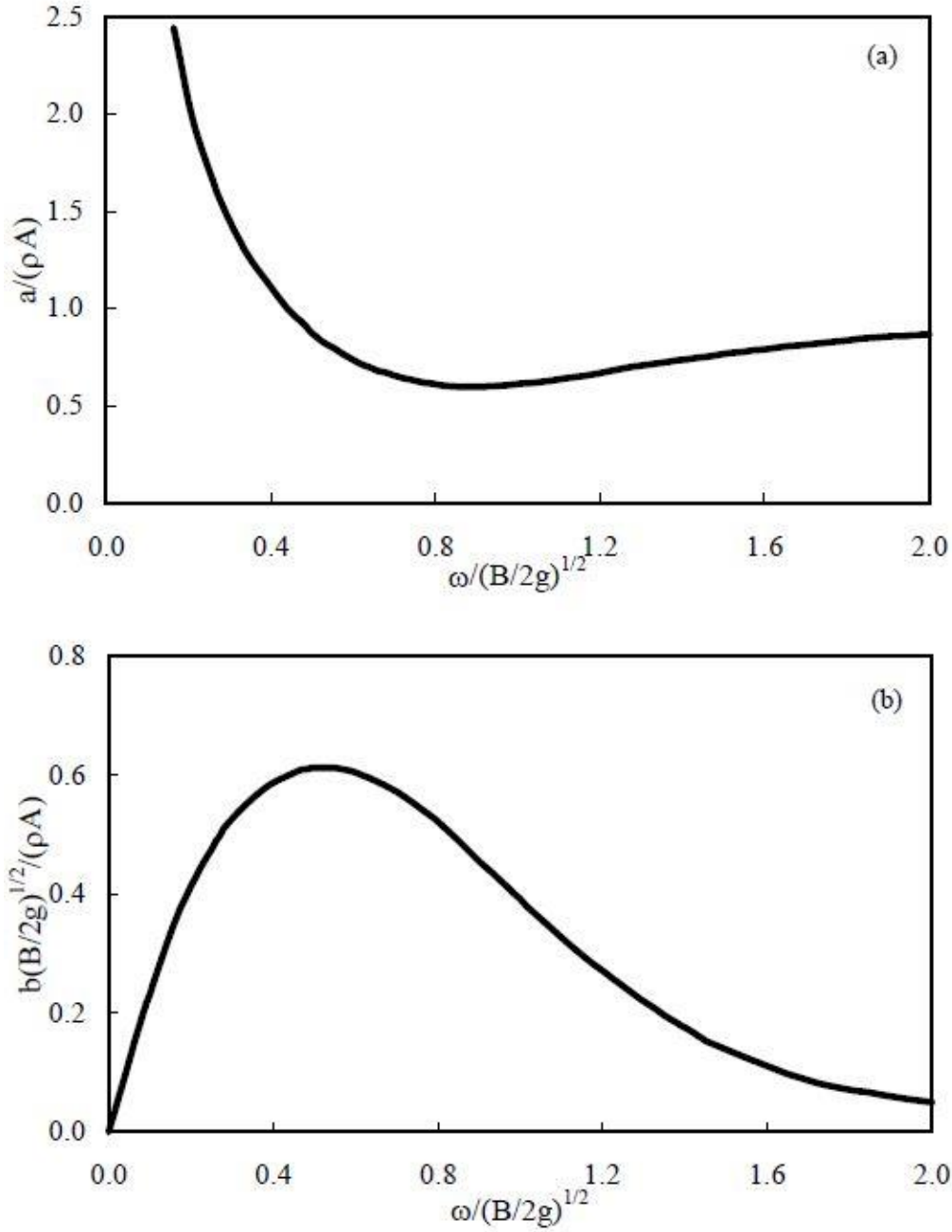
ifadesine indirgenir. İndirgenen hidrodinamik basınç ifadesine toplam potansiyelin yerleştirilmesiyle hidrodinamik basınç ifadesi şu formu alır.

$$p = -\rho \operatorname{Re} \left\{ \left(\sum_{j=1}^6 \xi_j \phi_j + A(\phi_0 + \phi_7) \right) i\omega e^{i\omega t} \right\} - \rho gy. \quad (2.12)$$

F kuvveti ve M momenti akışkan basıncının ıslak yüzey üzerinde integre edilmesi ile bulunur.

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} F \\ M \end{pmatrix} = & -\rho g \iint_{S_B} \begin{pmatrix} n \\ r \times n \end{pmatrix} y d \\ & - \rho \operatorname{Re} \sum_{j=1}^6 i\omega \xi_j e^{i\omega t} \iint_{S_B} \begin{pmatrix} n \\ r \times n \end{pmatrix} \phi_j dS \\ & - \rho \operatorname{Re} i\omega A e^{i\omega t} \iint_{S_B} \begin{pmatrix} n \\ r \times n \end{pmatrix} (\phi_0 + \phi_7) dS \end{aligned} \quad (2.13)$$

Bu ifadedeki üç integral toplam kuvvet ve momente açıkça birbirinden farklı katkılar sağlar. Birincisi hidrostatik bileşendir. İkinci integralin gerçek ve sanal sayı olan kısımları sırasıyla ek su kütlesi katsayısına ve sönümleme katsayısına karşılık gelir. Son olarak, son terim gelen dalganın genliği ile orantılı tahrik kuvveti ya da momentidir.



Şekil 2.3 : Dairesel bir en kesitin dalıp-çıkma hareketine ait hidrodinamik katsayılar (a) ek-su kütlesi (b) sönüm (Vughts,1968).

Basınç kuvvetlerinin toplamını ve cisim ağırlığından dolayı oluşan düzeltici kuvvetlerin toplamını, atalet kuvvetlerine eşitlenirse cismin serbest salınımı ile ilgili hareket denklemleri elde edilir. Burada cismin rijit, bağımsız ve sakin suda denge durumunda olduğu kabul edilmiştir. Bu ilişkileri birleştirerek, altı adet hareket denklemi elde edilir.

$$\sum_{j=1}^6 \xi_j (-c_{ij} + \omega^2 a_{ij} - i\omega b_{ij}) + AX_i = -\omega^2 \sum_{j=1}^6 M_{ij} \xi_j. \quad (2.14)$$

Bu denklem yeniden düzenlenirse ,

$$\sum_{j=1}^6 \xi_j [-\omega^2 (M_{ij} + a_{ij}) + i\omega b_{ij} + c_{ij}] = AX_i \quad (2.15)$$

Altı adet lineer hareket denklemi elde edilir, bu denklemler ξ_j için standart matrisin tersini alma yöntemleriyle çözülebilir. Böylelikle cismin hareketi (ξ_j) şu eşitlik ifadesi ile açıklanabilir.

$$\xi_j = A \sum_{j=1}^6 [C_{ij}]^{-1} X_i \quad (2.16)$$

C_{ij} bir önceki eşitliğin sol tarafındaki köşeli parantez içindeki toplam matrisi ifade etmektedir. (ξ_j/A) oranı özel öneme sahiptir ve ayrı olarak tanımlanır.

$$Z_j(w, \theta) \equiv \xi_j/A = \sum_{j=1}^6 [C_{ij}]^{-1} X_i. \quad (2.17)$$

Fiziksel olarak, bu sanal sayılardan oluşan genlik büyüklüğü j 'ninci moddaki cisim hareketinin, w frekansında ve θ yönündeki tahrik dalgalarına karşı davranışını ifade eder. Bu oran transfer fonksiyonu ya da tepki genlik fonksiyonu olarak bilinir. Transfer fonksiyonu eğer ek su kütlesi, sönümleme, tahrik ve hidrostatik kuvvetleri biliniyorsa yukarıda ki ifadeden hesaplanabilir.

2.2 Genelleştirilmiş Hidrodinamik Kuvvetler

Sonlu elemanlarda ayrıklaştırılmış yapının dış kuvvet etkisinde davranışını tanımlayan hareket denklemi;

$$M\ddot{U} + C_V\dot{U} + KU = P. \quad (2.28)$$

M , C_V , K sırasıyla kütle, yapısal sönüm ve rijitlik matrislerini ifade etmektedir. U , $\dot{U}$ ve $\ddot{U}$ vektörleri yapısal şekil değiştirme, hız ve ivmelenmeleri, P vektörü dış yükü temsil etmektedir. Sonlu elemanlardaki bir yapı için, şekil değiştirmeler;

$$U^T = [U_1 \ U_2 \ ... \ U_j \ ... \ U_n]. \quad (2.19)$$

j 'ninci düğüm noktasındaki şekil değişimini U_j temsil etmektedir ve n ayrıklaştırmada kullanılan düğüm noktası sayısıdır. Global xyz-koordinat siteminde, kabuk eleman için, her düğüm noktası 6 serbestlik derecesine sahiptir, üç öteleme u_x , u_y ve u_z ve üç dönme θ_x , θ_y ve θ_z . Böylelikle j 'ninci düğüm noktasındaki yer değiştirmeler;

$$U_j^T = [u_x \ u_y \ u_z \ \theta_x \ \theta_y \ \theta_z]. \quad (2.20)$$

Vakum ortamındaki analizlerde, yapısal sönüm ve dış kuvvetlerin etkisi olmadan yapının titreştiği varsayılır,

$$M\ddot{U} + KU = 0. \quad (2.31)$$

$U = de^{i\omega t}$ formundaki deneme çözümü denklemde yerine konulup, $e^{i\omega t}$ ortak terimi sadeleştirilirse,

$$(-\omega^2 M + K)d = 0 \quad (2.22)$$

hareket denklemi serbest titreşimi ifade eden forma indirgenir. Bu denklem sönüm olmayan yapılar için basit harmonik salınımları tanımlar ve vakum ortamındaki asal modları d , ve doğal frekanslar ω bu denklemden elde edilir.

Yapıdaki yer değiştirmeler asal modlardaki şekil değiştirmeleri toplamı olarak ifade edilebilir,

$$U = Dp(t). \quad (2.43)$$

D modal matrisinin kolonları, sönümsüz durumdaki modal vektörlerden (d) oluşur, p ise asal koordinatların vektörüdür. Denklemi (2.18)'i denklem (2.23)'te yerine yazarsak ve D^T ile çarparsak, genelleştirilmiş hareket denklemini, asal koordinatlar cinsinden elde edilir.

$$a\ddot{p}(t) + b\dot{p}(t) + cp(t) = Q(t) \quad (2.24)$$

İfadede a , b , c genelleştirilmiş kütle, sönüm ve rijitlik matrislerini tanımlar.

$$a = D^T M D, \quad b = D^T C_v D, \quad c = D^T K D, \quad Q = D^T P. \quad (2.25)$$

Genelleştirilmiş kütle matrisi a , rijitlik matrisi c diyagonaldır. Fakat genelleştirilmiş sönüm matrisi b diyagonal olmak zorunda değildir. Genelleştirilmiş dış kuvvet matrisi $Q(t)$ akışkan-yapı etkileşimini ve diğer tüm dış kuvvetleri temsil eder. Şu ifade ile açıklanabilir,

$$Q(t) = -(A\ddot{p}(t) + B\dot{p}(t) + Cp(t)) + E(t), \quad (2.56)$$

A , B ve C sırasıyla genelleştirilmiş ek su kütlesi, genelleştirilmiş hidrodinamik sönümü, ve genelleştirilmiş hidrodinamik rijitliğine karşılık gelir. $E(t)$ ise genelleştirilmiş dış tahrik kuvvetlerini ifade eder.

Böylelikle hareket denklemi;

$$(a + A)\ddot{p}(t) + (b + B)\dot{p}(t) + (c + C)p(t) = E(t) \quad (2.67)$$

şeklinde yazılabilir.

2.2.1 Asal koordinatlar ve şekil değiştirmeler

Yapıların dinamik tahrik kuvveti altındaki özellikleri modal analiz ile incelenir. Modal analiz, zamana bağlı değişen bir kuvvet ile tahrik edilen yapıların dinamik davranışları ölçme ve analiz etmemizi sağlar. Modal analiz yapının birçok doğal titreşim periyodunu bulmak için yapının toplam kütle ve rijitliğinden faydalanır.

Akışkan içerisinde ki yapı dalga kuvvetleri tarafından tahrik edilir. Rayleigh (1894)' göre, yapıda ki herhangi bir şekil değişimi, asal modlar da ki şekil değiştirmelerin toplamı olarak ifade edilebilir. Bu yüzen yapının şekil değişimi Oxyz eksen takımında,

$$u(x, y, z, t) = \sum_{r=1}^{\infty} p_r(t)u_r(x, y, z) \quad (2.28)$$

$$v(x, y, z, t) = \sum_{r=1}^{\infty} p_r(t)v_r(x, y, z) \quad (2.29)$$

$$w(x, y, z, t) = \sum_{r=1}^{\infty} p_r(t) w_r(x, y, z) \quad (2.70)$$

İfade de $p_r(t)$, r 'nci asal koordinatları ve u_r, v_r, w_r r 'nci asal moddaki kuru teknenin şekil değiştirmelerinin Ox, Oy, Oz eksen yönündeki bileşenlerini temsil etmektedir.

Yapı için eğilme ve dönmenin tanımlanabilir etkiler olduğunu varsayılırsa yani yapı elastikiyeti değerlendirmeye alınırsa kuru teknenin asal koordinatları ile ilgili M_r, V_r, T_r eğilme momenti, kesme kuvveti ve dönme momenti için karakteristik fonksiyonlardır. Eğer yapı akışkan içerisinde ise yapının eşdeğer tepkileri,

$$M(x, y, z, t) = \sum_{r=1}^{\infty} p_r(t) M_r(x, y, z) \quad (2.81)$$

İfadesiyle açıklanır çünkü rijit cisim hareketlerinin oluşturduğu yük yoktur. Yani,

$$M_1 = 0 = M_2 = \dots = M_6 = V_1 = V_2 = \dots = V_6 = T_1 = T_2 = \dots = T_6. \quad (2.92)$$

2.2.2 Hız potansiyeli

Hız potansiyelinin daimi olmayan bileşeni Φ , gelen ve saçılan dalga alanlarına ek olarak yapının etrafında dağılan akışkanın potansiyelini içerir. Bu potansiyel,

Hız potansiyelin daimi olmayan bileşeni,

$$\Phi(x, y, z, t) = \Phi_0(x, y, z, t) + \Phi_D(x, y, z, t) + \sum_{r=1}^{\infty} \Phi_r(x, y, z, t). \quad (2.103)$$

Φ_0, Φ_D, Φ_r potansiyelleri sırasıyla gelen dalga potansiyelini, saçılan dalga potansiyelini ve esnek yapının davranışının sonucu olarak ortaya çıkan radyasyon potansiyelini ifade etmektedir.

Yüzen yapının şekil değiştirmesi asal modlarda ki bir seri şekil değiştirme modları ile açıklanabilmesinden dolayı benzer seri ifadesi ile radyasyon potansiyeli ifadesi için adapte edilir. Böylelikle bir seri potansiyelin olduğu $\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_6, \Phi_7, \dots$ ve her birinin kuru teknenin her bir asal modu ve dolayısıyla asal koordinatına karşılık geldiğini varsayılır.

$$\Phi_r(x, y, z, t) = \Phi_r(x, y, z) p_r(t) \quad (2.114)$$

$$r = 1, 2, \dots, 6, 7, \dots$$

Tahrik eden sinüzoidal dalga için karşılaşma frekansı ω_e olmak üzere hız potansiyeli salınımlı form alır.

$$\begin{aligned} \Phi(x, y, z, t) &= \Phi(x, y, z) e^{i\omega_e t} \\ &= [\Phi_0(x, y, z) + \Phi_D(x, y, z) + \sum_{r=1}^{\infty} p_r \Phi_r(x, y, z)] e^{i\omega_e t} \end{aligned} \quad (2.125)$$

Gelen dalgaların potansiyeli sonlu derinlikli durum için şu ifade ile temsil edilir.

$$\Phi_0 = (iga/\omega) \exp[kz - ik(x\cos X - y\sin X)] \quad (2.136)$$

Φ_D saçılan dalgaların potansiyeli, Φ_r radyasyon potansiyelinin genliği ve asal koordinatların $p_r(t) = p_r e^{i\omega_e t}$ formunda olduğu varsayılır. Bu ifadede p_r kompleks sayılardan oluşabilir. Bu notasyonda, $p_1(t)$ boyuna öteleme, $p_2(t)$ yanıl öteleme, $p_3(t)$ dalıp çıkma, $p_4(t)$ yalpa, $p_5(t)$ baş-kıç vurma, $p_6(t)$ savrulma hareketleri ile $p_7(t), p_8(t) \dots$ yapının şekil değiştirme davranışları ile ilgilidir.

2.2.3 Lineerleştirilmiş sınır şartlarının özeti

İleri hızlısız yüzen esnek yapı etrafında ki lineer hız potansiyeli ile ilgili sınır koşulları şunlardır.

- 1) Serbest su yüzeyinde, ani, difraksiyon, radyasyon potansiyelleri sırasıyla Φ_0, Φ_D, Φ_r ($r = 1, 2, \dots$) olmak üzere lineerleştirilmiş sınır koşulu,

$$-\omega_e^2 \Phi + g \Phi_z = 0; \quad z = 0 \quad (2.147)$$

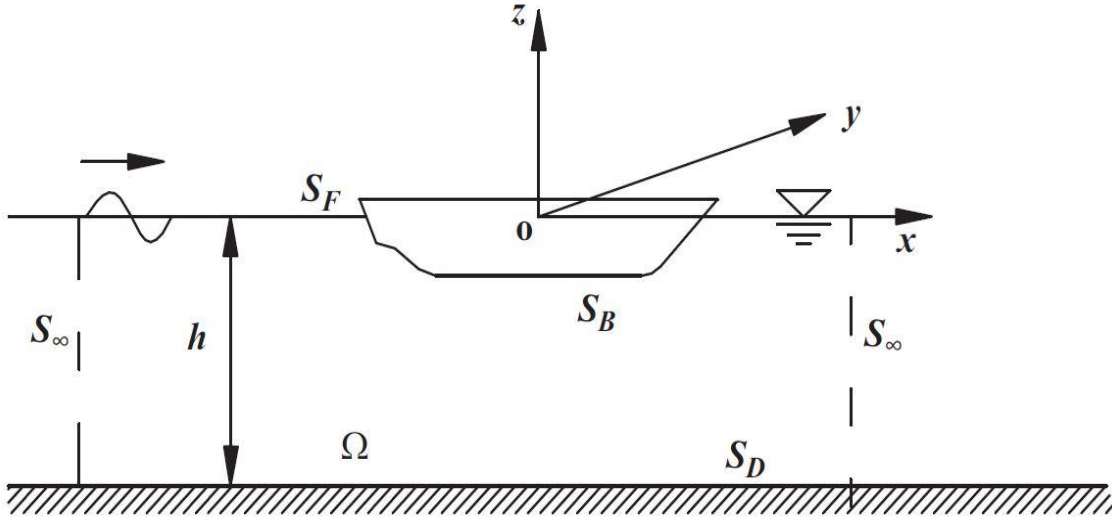
olmak üzere, Φ bu sınır koşulunda Φ_0, Φ_D, Φ_r potansiyellerinden herhangi birini temsil etmektedir.

- 2) Uygun derinlik koşulu ve salınım yapan yapıdan sonsuz uzaklıkta ki yayılım şartı probleme uygulanmalıdır.
- 3) Ani dalgalar ve ani dalgaların cismin varlığından dolayı saçılması ile oluşan sinüzoidal dalgalarla ilgili sınır koşulu,

$$\partial \Phi_0 / \partial n = -\partial \Phi_D / \partial n. \quad (2.158)$$

- 4) Radyasyon potansiyeli, cisim sınır şartı ile hesaplanır.

$$\partial \Phi_r / \partial n = [i\omega_e u_r] \cdot n \quad (2.39)$$



Şekil 2.4 : Sınır şartlarının gösterimi.

Şekilde, S_F serbest su yüzeyi şartı, S_B kinematik şartı ya da cisim sınır şartını, S_∞ sonsuza yayılım şartını, S_D sonlu derinlik şartını ifade eder. Eğer gemi herhangi bir kanalda değil de denizde yani sonsuz derinlik etkisinde ilerliyorsa, sonlu derinlik şartı olan S_B yerine sonsuza yayılım şartı S_∞ uygulanır.

2.2.4 Basınç dağılımı

Esnek yapının salınım hareketi sürecince S anlık ıslak yüzeyinde ki akışkan basıncı Bernoulli denkleminde bulunabilir.

$$p = -\rho \left[\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \frac{1}{2} \nabla \Phi \cdot \nabla \Phi + gz \right] \quad (2.160)$$

Eğer yapının salınım hareketinin ve etrafında oluşan akımın küçük olduğu varsayımı altında daimi olmayan bileşeni için ikinci mertebeden terimler ihmal edilirse, S ıslak yüzeyi için lineerleştirilmiş basınç,

$$p = -\rho \left(\frac{\partial \Phi}{\partial t} + gz' + g\omega \right) \quad (2.171)$$

ifadesine indirgenir.

2.2.5 Genelleştirilmiş akışkan kuvvetleri

Akışkandan kaynaklanan genelleştirilmiş Z dış kuvvetinin r. bileşeni yapı üzerinde şu formda açıklanabilir.

$$Z_r(t) = - \iint n^T \cdot u_r p \, dS \quad (2.182)$$

n^T bu ifade de yapıdan dışarı yönde ve akışkan içine doğru olan birim normal vektör matrisinin devriğini temsil etmektedir. Islak yüzey S boyunca integrasyon yapılarak bulunabilir. Yüzey integralinin ıslak yüzey boyunca her bir eleman için toplamı S ıslak yüzey alanını oluşturur.

Basınç denkleminde ki, daimi ve daimi olmayan potansiyel bileşenleri yerine konulursa ve genelleştirilmiş yer çekimi kuvvetinin eklenirse, dış kuvvetin *r'ninci* bileşeni şu formda bulunabilir.

$$Z_r(t) = E_r(t) + H_r(t) + R_r(t) + \bar{R}_r \quad (2.193)$$
$$r = 1, 2, \dots, m$$

Bu ifadede $E_r, H_r, R_r, \bar{R}_r$ sırasıyla *r'ninci* genelleştirilmiş dalga tahrik kuvveti, radyasyon kuvveti, düzeltici kuvveti ve hidrostatik kuvveti temsil etmektedir.

2.2.5.1 Genelleştirilmiş dalga kuvvetleri

Genelleştirilmiş dalga tahrik kuvvetlerinin *r'ninci* bileşeni bazı matematiksel işlemlerden sonra bulunur.

$$E_r(t) = E_r e^{i\omega_e t} = (E_{0r} + E_{Dr}) e^{i\omega_e t} \quad (2.204)$$
$$= \rho \iint n^T \cdot u_r \left(\frac{\partial}{\partial x} \right) (\Phi_0 + \Phi_d) e^{i\omega_e t} dS.$$

Bu ifadede *r'ninci* genelleştirilmiş Froude – Krylov kuvvetinin katkısı,

$$E_{0r} = \rho \iint n^T \cdot u_r (i\omega_e) \Phi_0 \, dS. \quad (2.215)$$

Esnek yapının varlığından dolayı tahrik dalgalarının yayılmasıyla oluşan genelleştirilmiş difraksiyon kuvveti ise,

$$\Xi_{Dr} = \rho \iint n^T \cdot u_r (i\omega_e) \Phi_D dS \quad (2.226)$$

r 'ninci genelleştirilmiş Froude – Krylov kuvveti,

$$\Xi_{0r} = \rho \iint n^T \cdot u_r \cdot \omega \cdot \Phi_0 dS \quad (2.47)$$

indirgenir ve $r = 1, 2, \dots, m$ için ileri hızdan bağımsız olarak geçerlidir. Bu kuvvet yapının varlığının gelen dalga basınç dağılımını etkilemediğini gerçeğini yansıtır.

2.2.5.2 Genelleştirilmiş radyasyon kuvvetleri

Genelleştirilmiş radyasyon kuvvetinin r 'ninci bileşeni,

$$H_r(t) = \rho \iint n^T \cdot u_r \left(\frac{\partial}{\partial t} \right) \sum_{k=1}^m p_k(t) \Phi_k dS \quad (2.48)$$

Bu ifadede m analizde kabul edilen asal koordinatların sayısını temsil eder. Eğer r 'ninci asal koordinat sinüzoidal olarak değişiyorsa,

$$p_r(t) = p_r e^{i\omega_e t} \quad (2.49)$$

Genelleştirilmiş radyasyon kuvvetinin r 'ninci bileşeni,

$$H_r(t) = \sum_{k=1}^m p_k T_{rk} e^{i\omega_e t} = \sum_{k=1}^m p_k (\omega_e^2 A_{rk} - i\omega_e B_{rk}) e^{i\omega_e t} \quad (2.50)$$

ve $r = 1, 2, \dots, m$ için.

Katsayılar;

$$A_{rk} = \left(\frac{\rho}{\omega_e^2} \right) \text{Re} \left[\iint n^T \cdot u_r (i\omega_e) \Phi_k dS \right] \quad (2.51)$$

A_{rk} ivme ile ilgili olan değişimleri temsil eder.

$$B_{rk} = \left(-\frac{\rho}{\omega_e^2} \right) \text{Im} \left[\iint n^T \cdot u_r (i\omega_e) \Phi_k dS \right] \quad (2.52)$$

B_{rk} hız ile ilgili olan değişimleri temsil eder.

A_{rk} 'yı içeren terimler “*ek su kütlelerini*” temsil eder. B_{rk} 'yı içeren terimler ise “*akışkan sönümlemesini*” temsil eder. Her iki terimde r 'nci mod ile ilgilidir ve k 'nci moddaki birim genlik salınımına bağlı etkileri temsil eder. Teori bu katsayıların

deneysel olarak kuru teknenin tanımlanan asal modlarında zorlamalı titreşim analizi ile hesaplanabileceğini söyler.

2.2.5.3 Genelleştirilmiş düzeltici kuvvetleri

r 'nci genelleştirilmiş düzeltici kuvvet ifadesi;

$$R_r(t) = - \sum_{k=1}^m p_k C_{rk} e^{i\omega_e t} \quad (2.53)$$

Düzeltilici kuvvet katsayısı;

$$C_{rk} = -\rho \iint n^T \cdot u_r \omega_k dS \quad (2.54)$$

Bu ifadenin kolayca ince gemi benzeri yapıların denizcilik analizi için tanımlı ($r \leq 6, k \leq 6$) düzeltici kuvvet katsayısını içerdiği görülebilir.

Cismin şekil değiştirmesi, rijit cisim hareketlerine ek düzeltici kuvvet sağlar. C 'nin her zaman simetrik matris olması gerekmez.

2.2.5.4 Genelleştirilmiş hidrostatik ve yerçekimi kuvvetleri

Hidrostatik ve yerçekimi kuvvetlerinin genelleştirilmiş kuvvetleri etkilileri tüm düzensiz hareketlerden bağımsızdır.

r 'nci mod genelleştirilmiş hidrostatik kuvvet,

$$\bar{R}_r = \rho \iint n^T \cdot u_r [gz'] dS \quad (2.55)$$

r 'nci yerçekimi kuvveti,

$$G_r = - \iiint \rho_b g \omega_r' dV \quad (2.56)$$

$$r = 1, 2, \dots, m$$

İfadede $\forall$ materyalin toplam hacmini, ρ_b akışkan yoğunluğunu temsil eder.

2.2.5.5 Genelleştirilmiş hareket denklemi

Hareket denklemi matris formunda,

$$a\ddot{p}(t) + b\dot{p}(t) + cp(t) = Z(t) + G + \Delta(t) \quad (2.57)$$

Genel olarak,

$$\begin{aligned} &= \Xi_r(t)e^{i\omega_e t} - \sum_{k=1}^m [A_{rk}\ddot{p}_k(t) + B_{rk}\dot{p}_k(t)] \\ &\quad - \sum_{k=1}^m [C_{rk}p_k(t) + \bar{R}_r + G_r + \Delta_r(t)] \end{aligned} \quad (2.58)$$

İfadede $r = 1, 2, \dots, m$, serbestçe yüzen yapı için tekil dış yük yoksa $\Delta_r(t) = 0$ olur.

Genelleştirilmiş lineer hareket denklemleri serbestçe dalgalar içerisinde yüzen yapı için şu şekilde yazılabilir.

$$\begin{aligned} \omega_r^2 a_{rr} p_r(t) + \sum_{k=1}^m [(a_{rk} + A_{rk})\ddot{p}_k(t) + (b_{rk} + B_{rk})\dot{p}_k(t) + C_{rk}p_k] \\ = \Xi_r(t)e^{i\omega_e t} \end{aligned} \quad (2.58)$$

İfadede $r = 1, 2, \dots, m$. Matris formunda yazılırsa,

$$(a + A)\ddot{p}(t) + (b + B)\dot{p}(t) + (c + C)p(t) = \Xi_r(t)e^{i\omega_e t} \quad (2.59)$$

Çözüm olarak,

$$\begin{aligned} p(t) &= pe^{i\omega_e t}, \\ Ip &= [adj D / \det D] \Xi \end{aligned} \quad (2.60)$$

Burada I birim matristir.

$$D = -\omega_e^2(a + A) + i\omega_e(b + B) + (c + C) \quad (2.61)$$

A, B, D denklemleri karşılaşma frekansı ω_e 'ye bağlıdır.

Kuru yapının asal mod şekillerini ve asal koordinatlarını bilerek yapı üzerindeki herhangi bir noktadaki şekil değiştirme bulunabilir.

$$u(x, y, z, t) = \sum_{k=1}^m u_r(x, y, z) p_r e^{i\omega_e t}, \quad (2.62)$$

Eğilme momentleri, kesme kuvvetleri, dönme momentleri, ve gerekli diğer tepkiler benzer şekilde, kuru yapının uygun karakteristik fonksiyonu kullanılarak hesaplanabilir.

Rijit cisim modları olmaması durumunda, sabit esnek yapı sadece defarmosyon modlarında cevap üretir. Böylelikle lineer hareket denklemi geçerli kalır, fakat sadece kuru yapının $r = 7, 8, \dots, m$ modlarından kaynaklanan katkıların değerlendirilmesi gerekir.

3. HESAPLAMA YÖNTEMİ:SINIR ELEMANLARI METODU

Bir problem modellenirken, ilk olarak, elde ki problem için temel fiziksel teori (sürekli ortam mekaniği, hidrodinamik, vs.) seçilmelidir. Daha sonra, problem boyutları, malzeme, yükleme, vs. gibi bazı ek varsayımlarla desteklenir böylelikle ilgilenilen bütün özellikler izin verilen doğrulukta tanımlanabilir. Buna problemin fiziksel modeli denir.

Fiziksel model uygun bir matematik modele dönüştürülmelidir. Fiziksel model matematiksel olarak birçok şekilde (uygun koordinat sistemi, birimler, bağımsız değişkenler) oluşturulabileceği için istenilen ihtiyaçları karşılayacak biçimde temsil edilmelidir. Bu bize diferansiyel ya da integral denklemlerle uygun sınır, başlangıç şartları ve ek sınırlamalarla problemi matematiksel olarak tanımlamamızı sağlar. Matematiksel modelleme aşaması çok önemlidir, çünkü herhangi nümerik araçla elde edebileceğimiz, en iyi sonuçları hesaplamamızı sağlar. Bu nümerik araçlar sınır elemanları metodu, sonlu elemanlar metodu, sonlu farklar metodu ya da herhangi bir nümerik yaklaşım olabilir. Fiziksel ya da matematiksel modelleme aşamasında yapılan herhangi bir hata kaçınılmaz olarak nümerik çözümleri etkiler. Çünkü bilgisayar programları sadece matematik denklemlerin çözülmesine yardımcıdır ve ilgilenilen fiziksel problemin simülasyonun yeterli olup olmadığını kontrol edemez. Eğer iyi bir matematik modele sahipsek, hazırlık ve hesaplama maliyetini en aza indirmek için uygun çözüm şemasının seçimi çok önemlidir.

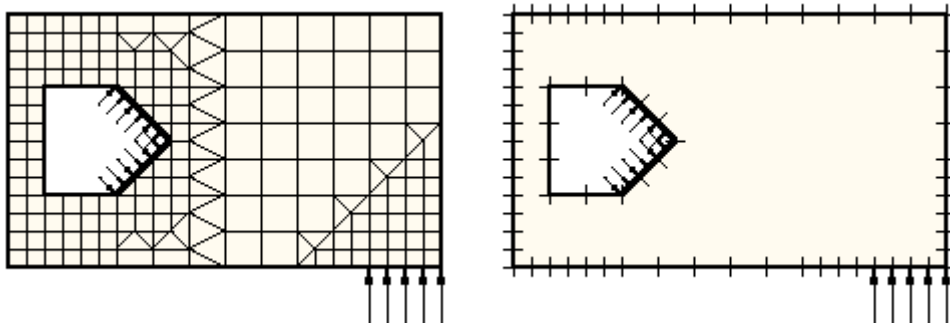
Problemi nümerik olarak başarılı bir şekilde çözmek için kullandığımız nümerik araçlar iyi anlaşılmalıdır çünkü çoğunlukla doğrudan çözüm aşaması yoktur. Çözüm süresini hızlandırabilecek, ya da tam çözümü mümkün kılmak için bir seri çözüm parametresi seçilmelidir, aksi durumda yanlış uygulamalar hatalı sonuçlar üretebilir. Örneğin sınır elemanları metodu ile çözüm yaparken, eleman tipi (sabit, lineer ya da yüksek mertebeden şekil fonksiyonları), ağ yoğunluğu, zaman integrasyonu için parametreler dikkatlice seçilmelidir.

3.1 Genel Özellikleri

Sınır elemanları yönteminin ana özelliği “temel çözümleri” kullanıyor olmasıdır. Temel çözüm, yöneten diferansiyel denklemin nokta kaynak etkisinde serbest bölge analitik çözümüdür. Kesin çözüm olması sınır elemanları yönteminin avantajı olarak sayılabilir. Örneğin, Laplace denkleminin çözümü kesindir. Ancak bazı problemler için sınır integral denkleminin temel çözümü, kesin çözüm değildir. Örneğin rasgele şekle sahip cisimler etrafındaki hız potansiyelini ve gradyanını bulmamızı sağlayan Green fonksiyonu problemin diferansiyel denkleminin kesin çözümü değildir. Serbest su yüzeyi şartını sağlayan Green fonksiyonunun çözümü yaklaşık yöntemlerle mümkündür.

Buna ek olarak bazı diferansiyel operatörler için temel çözümler elde edilemez ya da sınır elemanları metodunda kullanmaya uygun değildir. Örneğin, lineer olmayan ve bazı anistoropik operatörler için bu durum söz konusudur.

Sınır elemanları metodunun en önemli avantajı ayrıklaştırmanın sadece sınırda yapıyor olmasıdır. ($\Gamma=\partial\Omega$) Geometrinin ve yükleme durumunun karışık olması durumuna göre bu özellik ağın oluşturulması ve düzenlenmesinde önemli zaman kazandırır. Kolay veri işlenebilir olması diğer bir avantajıdır. Örneğin, CAD'den girilen verilerin kolayca ayrıklaştırılabilir.



Şekil 3.1 : Sonlu elemanlar metodunda bölgenin ayrıklaştırılması (solda) ve sınır elemanları metodunda sınırın ayrıklaştırılması (sağda).

Sınır elemanları metodunda gerilme gibi ikincil değişkenler için doğruluk oranının yüksektir. Bu avantajlarına ek olarak sonsuz ve yarı-sonsuz bölgedeki problemlerin kolay ve doğru modellenebilir. Ayrıca simetrik problemlerin çözümü kolaydır.

Tüm bu önemli avantajlarına rağmen sınır elemanları metodunda da bazı dezavantajları vardır. Bu dezavantajlarından ilki, kollakasyon metodu ile simetrik

olmayan ve tamamen dolu denklem sistemleri çözülmek zorunda kalınmasıdır. Bir diğer önemli dezavantajı homojen olmayan ve lineer olmayan problemlerin ele alınması zorluğudur. Gerekli ‘temel çözümün’ bilinmesi bazı problemler için avantaj olabileceği gibi temel çözümü olmayan problemler için bir dezavantajdır.

3.2 Temsili Formülasyon

Laplace denklemi için sınır integral denklemi şöyle elde edilir, öncelikle problem alanında geçerli olan Laplace denklemi,

$$u_{,ii} = 0 \quad \Omega(\text{bölgede}) \quad (3.1)$$

şeklinde ifade edilir. Potansiyel için jenerik değişken u kullanılarak, akı için;

$$q_i = u_{,i} \rightarrow q = u_{,i} n_i \quad (3.2)$$

Sınır eleman formülasyonunun ilk aşaması problemi yöneten diferansiyel denklemin, integral denkleme dönüştürülmesidir. Bu ağırlıklı artıklar yöntemi kullanılarak gerçekleştirilebilir. Laplace denklemini w test fonksiyonu ile çarpılırsa,

$$\int_{\Omega} u_{,ii} w \, d\Omega = 0 \quad (3.3)$$

Daha sonra, potansiyel fonksiyonunda ki kısmi türevleri bölgede tanımlı integralden eleriz. Bu da kısmi integralle mümkündür.

$$\int_{\Omega} u_{,ii} w \, d\Omega = \int_{\Omega} (u_{,i} w)_{,i} \, d\Omega - \int_{\Omega} u_{,i} w_{,i} \, d\Omega \quad (3.4)$$

Bölgede tanımlı integrali sınır integraline dönüştürmek için ifadenin sağ tarafında ki ilk terime Gauss teoremini uygularsak, Green’in birinci özdeşliğini elde ederiz.

$$\int_{\Omega} u_{,ii} w \, d\Omega = \int_{\Gamma} u_{,i} w \, n_i \, d\Gamma - \int_{\Gamma} u_{,i} w_{,i} \, d\Omega \quad (3.5)$$

Sağ tarafta ki bölgede tanımlı integralin de geriye kalan kısmi türevi de $(u_{,i})$ yok etmek için tekrar kısmi integrasyon ve Gauss teoremi uygulanır. Green’in ikinci özdeşliği olarak bilinen ifade elde edilir.

$$\int_{\Omega} u_{,ii} w \, d\Omega = \int_{\Gamma} (u_{,i} w - u w_{,i}) \, n_i \, d\Gamma + \int_{\Omega} u w_{,ii} \, d\Omega \quad (3.6)$$

(3.1)’deki diferansiyel denklemi Green’in ikinci özdeşliğinde yerine koyarsak, ilk bölgede tanımlı integral yok edilir.

$$-\int_{\Omega} u w_{,ii} d\Omega = \int_{\Gamma} (u_{,i} w - u w_{,i}) n_i d\Gamma \quad (3.7)$$

Sınır elemanları ifadesini elde etmek için yapılmak istenen geriye kalan domain integralinin yok edilmesidir, böylelikle gerekli ayrıklaştırma cismin domaininde (Ω) değil sadece cismin sınırında (Γ) uygulanır. Bu domainin ayrıklaştırıldığı sonlu elemanlar metodu ya da sonlu farklı metoduna göre avantajdır. Bu özellik ayrıklaştırma sürecinde önemli zaman kazanımına dolayısıyla bütün hesaplama maliyetinin düşmesini sağlar.

Dirac fonksiyonu $\delta(x, \xi)$ tanımlanmış ve eleme özelliği $\int f(x) \delta(x, \xi) dx = f(\xi)$ şeklindedir. Bu bize spesifik $f(\xi)$ fonksiyonel değerinin integralden ayırmamızı sağlar. Bu özellik (3.7) denkleminde domain integralini yok etmek için uygulanır.

$$w_{(ii)} := -\delta(x, \xi) \quad (3.8)$$

Buradan,

$$-\int_{\Omega} u w_{,ii} d\Omega = u(\xi) \quad (3.9)$$

Kolaylık olması açısından, cevap noktası vektörü x_i ve yük noktası vektörü fonksiyonun değişkenleri olarak tanımlanmıştır. x ve ξ olarak yazılacaktır yani $f(x, \xi) \equiv f(x_i, \xi_i)$.

w fonksiyonu sözde temel çözüm olarak (3.8)'da tanımlanmıştır. Genel olarak, diferansiyel operatör L^* 'nin, temel çözümü u^*

$L^* u^* = -\delta(x, \xi)$ denkleminin, tüm uzayda Ω^∞ çözümüdür. Dirac fonksiyonunun önünde ki eksi işareti basitleştirme için kullanılmıştır.

Test fonksiyonu olarak w ve temel çözüm için u^* kullanılırsa, (3.9) denkleminde şu ifade elde edilir.

$$u(\xi) = \int_{\Gamma} (q(x) u^*(x, \xi) - u(x) q^*(x, \xi)) d\Gamma \quad (3.10)$$

İfadede, $q^* := u^*_{,i} n_i$ akı için temel çözümdür. Denklem (3.10) temsili formül olarak tanımlanır, özel durumlar için bazen Green'in temsili formülü olarak bilinir ve hem iki boyutlu hem de üç boyutlu potansiyel problemleri için geçerlidir. Temsili formülasyon sınır da ki çözüm bilinince (potansiyel u ve akı q), domainin içerisinde ki potansiyelin bilinmeyen değerlerini hesaplamamızı sağlar.

3.3 Temel Çözümler

Green fonksiyonları matematikte homojen olmayan diferansiyel denklemlerin, istenen sınır koşulları altında çözülmesinde kullanılan bir yöntemi ve bu yöntemle ilişkili olarak hesaplanan fonksiyonu belirtmekte kullanılır. İlk kez matematikçi George Green tarafından kullanılmıştır.

Bilgisayar teknolojilerinin gelişmesiyle birlikte herhangi bir şekle sahip cisimden yayılan ve saçılan dalgaların hesaplanması mümkün olmuştur. Sınır integral denklemlerini temel alan birçok bilgisayar programı geliştirilmiştir. Sınır integral denklemi temel çözüme dayanır. Çözülme istenen problem için uygun sınır şartlarını sağlayan temel çözüm seçilmelidir. Bu bağlamda “*serbest su yüzeyi Green fonksiyonu*” geliştirilmiştir. Green fonksiyonunun oluşturulmasının en önemli sebebi serbest yüzey şartını ve problemin denklemlerini sağlıyor olmasıdır.

Hız potansiyelini hesaplamak için kullanılan sınır integral denklemi bir noktanın başka bir noktada indüklediği potansiyeli serbest su yüzeyi şartı dâhil ederek Green fonksiyonu ile çözülebilir. Sınır integral denkleminin hesaplama süresi, Green fonksiyonunu ve gradyanını hesaplama süresi ile ilgilidir.

Serbest yüzey Green fonksiyonu, lineer deniz dalgaları teorisinde en önemli konulardan birisidir. Birçok cisim için özellikle rasgele şekle sahip cisimlerin nümerik çözümlerin oluşturulmasını sağlar. Green fonksiyonu için birçok farklı temsil bulunur. Bu temsillerden biri, dalga direnci için Green fonksiyonunun alternatif integral formunda temsilidir ve Noblesse (1981) tarafından yılında sunmuştur. Telste ve Noblesse (1986), radyasyon ve difraksiyon problemlerini çözebileceğimiz Green fonksiyonunu nümerik yöntemlerle çözmüşler ve sunmuşlardır. Bu çalışmada da, Telste ve Noblesse’nin (1986) çözümünü geliştirip sundukları Green fonksiyonundan faydalanılmıştır.

Telste ve Noblesse (1986) çözümünü sundukları Green fonksiyonu, sonsuz akışkan bölgesindeki üç boyutlu akım problemini, sonlu akışkan bölgesindeki iki boyutlu akım problemine indirger. Sonlu akışkan bölgesi anlık ıslak yüzeyi ifade etmektedir. Green fonksiyonunun verimli olarak hesaplanması isteğinden dolayı tek bir integral olarak ve seri açılımı ile nümerik olarak çözülür. Telste ve Noblesse (1986) asimptotik açılım ve yaklaşan serilerle Green fonksiyonu hesaplamıştır. Nümerik çözümü bilinen Green fonksiyonu, sınır integral denklemine dâhil edilerek serbest su

yüzey etkisi ile birlikte üç boyutlu cisim etrafındaki potansiyel dağılımı hesaplanabilir.

Laplace denklemi için ise temel çözümler şu şekildedir.

İki boyutlu durum için Laplace denkleminin temel çözümü;

$$u^*(x, \xi) = -\frac{1}{2\pi} \ln|x_i - \xi_i| = -\frac{1}{2\pi} \ln r, \quad (3.11)$$

$$q^*(x, \xi) = u^*_{,i} n_i = -\frac{1}{2\pi r} r_{,i} n_i = -\frac{1}{2\pi|x_i - \xi_i|^2} (x_i - \xi_i) n_i \quad (3.12)$$

İfadelerde r yük noktası ξ_i ve cevap noktası x_i arasındaki mesafedir. $r = |x_i - \xi_i| = \sqrt{(x_i - \xi_i)^2}$.

Üç boyutlu durum için,

$$u^*(x, \xi) = \frac{1}{4\pi|x_i - \xi_i|} = \frac{1}{4\pi r}, \quad (3.13)$$

$$q^*(x, \xi) = -\frac{1}{4\pi r^2} r_{,i} n_i = -\frac{1}{4\pi|x_i - \xi_i|^3} (x_i - \xi_i) n_i \quad (3.14)$$

Laplace denkleminin temel çözümü (u^*) akışkanlar dinamiğinden iyi bilinen, yük noktası ξ_i 'deki noktasal yüklemenden dolayı oluşan akım potansiyelini tanımlar.

(3.10)'da ki temsili formülasyon, sınırda ki çözüm bilindiğinde domainin içerisindeki potansiyeli u bulmamızı sağlar. Bu nedenle, sadece sınır verilerini içeren denklem elde etmek için, yük noktası ξ sınıra hareket ettirilir. Sonuçta elde edilen denklem sınır integral denklemidir ve sınır elemanları yönteminde gerekli olan ayrıklaştırma sürecinin temelini oluşturur.

Yük noktasını sınıra hareket ettirme süreci önemlidir ve dikkat gerektirir çünkü dirak fonksiyonunun eleme özelliği yük noktasının sınırda olduğu durum için şu şekilde tanımlanmamıştır.

$$\int f(x) \delta(x, \xi) d\Omega = \begin{cases} f(\xi), & \xi \in \Omega \\ 0, & \xi \notin \Omega, \xi \notin \Gamma \\ \text{tanımsız}, & \xi \in \Gamma \end{cases} \quad (3.15)$$

Problem yük noktasının komşuluğunda sınırı düzenleyerek ve sonra yük noktasını limit sürecinde sınıra hareket ettirerek çözülür.

3.4 Sınır İntegral Denkleminin Ayırıklaştırılması

Geometriye yaklaşık olarak ifade edebilmek için sınır Γ , E tane elemana $\Gamma^{(1)}, \dots, \Gamma^{(E)}$ bölünür, her birinin bir ya da daha fazla düğüm noktası mevcuttur.

(e) elemanının içerisinde, yerel koordinat s , potansiyel $u^{(e)}$ ve akı $q^{(e)}$, şekil fonksiyonları $\Phi_m(s)$ ve düğüm noktalarını $\tilde{u}_m^{(e)}$ ve $\tilde{q}_m^{(e)}$ kullanarak interpolate edilir,

$$\begin{aligned} u^{(e)}(s) &= \sum_{m=1}^{M(e)} \Phi_m(s) \tilde{u}_m^{(e)} \\ q^{(e)}(s) &= \sum_{m=1}^{M(e)} \Phi_m(s) \tilde{q}_m^{(e)} \end{aligned} \quad (3.16)$$

Matris notasyonu ile,

$$\begin{aligned} u^{(e)}(s) &= \Phi^T(s) \tilde{u}^{(e)} \\ q^{(e)}(s) &= \Phi^T(s) \tilde{q}^{(e)} \end{aligned} \quad (3.17)$$

İfadede; $\tilde{u}^{(e)}$, $\tilde{q}^{(e)}$, Φ ($M \times 1$) boyutunda matrislerdir. 2 boyutlu analizde, en basit şekil fonksiyonları sabit ve lineer şekil fonksiyonlarıdır.

Sınır integralleri denklemini ayırıştırılırsa;

$$c(\xi) u(\xi) + \sum_{e=1}^E \int_{\Gamma_e} \left(\sum_{m=1}^M \Phi_m u_m^{(e)} \right) q^* d\Gamma = \sum_{e=1}^E \int_{\Gamma_e} \left(\sum_{m=1}^M \Phi_m q_m^{(e)} \right) u^* d\Gamma \quad (3.18)$$

3.5 Kollakosyan Metodu

Ayrıklaştırılmış sınır integral denklemi şimdi bilinmeyen sınır değerlerini bulmak için denklemler sistemi kurmada kullanılır.

Bu kollokasyon metodu ile yapılır. Kollokasyon metodunda, yük noktası ξ sırasıyla bütün düğüm noktalarına yerleştirilir. Bu yolla, serbest terim $c(\xi) u(\xi)$ ayrıklaştırılan düğüm noktasında potansiyeli içerir bu sayede ek bilinmeyenler ortaya çıkmaz. Lineer ve yüksek mertebeden çok terimli şekil fonksiyonları kullanırken, bazı düğüm

noktaları birden fazla elemana aittir, bu nedenle elemanlardan bağımsız olarak global düğüm noktalarının numaralandırılması ($n=1, \dots, N$) daha avantajlıdır.

Yük noktasını birinci global düğüm noktasına yerleştirerek,

$$\begin{aligned} & \check{u}_1 \left(\int_{\Gamma^{(1,e)}} \Phi_m q^*(x, \xi^1) d\Gamma + c_1 \right) + \dots + \check{u}_N \left(\int_{\Gamma^{(N,e)}} \Phi_N q^*(x, \xi^1) d\Gamma + c_1 \right) \\ &= \check{q}_1 \int_{\Gamma^{(1,e)}} \Phi_m q^*(x, \xi^1) d\Gamma + \dots + \int_{\Gamma^{(N,e)}} \Phi_N q^*(x, \xi^1) d\Gamma \end{aligned} \quad (3.19)$$

Bu ifade de, integral $\int_{\Gamma^{(n,e)}} (\cdot) d\Gamma$ tüm integrallerin (n) global düğüm noktasının yer aldığı (e) elemanı üzerinde toplamını temsil eder ve karşılık gelen şekil fonksiyonun Φ_N 'dir.

Matris notasyonunda,

$$\begin{bmatrix} \check{H}_{11} & H_{12} & \dots & H_{1N} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \check{u}_1 \\ \check{u}_2 \\ \vdots \\ \check{u}_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} & \dots & G_{1N} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \check{q}_1 \\ \check{q}_2 \\ \vdots \\ q_N \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

$\check{H}_{11}$ serbest terim ifadesini $c(\xi) = c(\xi^1)$ içerdiğini göstermektedir.

Yük noktasını düğüm noktaları 2'den N'e kadar yerleştirirsek eksik olan denklemleri elde edilir.

$$\begin{bmatrix} \check{H}_{11} & H_{12} & \dots & H_{1N} \\ H_{21} & \check{H}_{22} & \dots & H_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ H_{N1} & H_{N2} & \dots & \check{H}_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \check{u}_1 \\ \check{u}_2 \\ \vdots \\ \check{u}_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} & \dots & G_{1N} \\ G_{21} & G_{22} & \dots & G_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ G_{N1} & G_{N2} & \dots & G_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \check{q}_1 \\ \check{q}_2 \\ \vdots \\ q_N \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

$$H \check{u} = G \check{q} \quad (3.22)$$

H ve G matrislerinin köşegen elemanları sırasıyla güçlüce ve zayıfça tekil integralleri içerir çünkü $r = |x_i - \xi_i|$ eşitliği eğer ξ düğüm noktası integralin alındığı elemanın üzerindeyse kaybolur. Diğer bütün matris elemanları düzenli integraller içerir.

Düğüm noktası vektörleri $\tilde{u}$ ve $\tilde{q}$ hem bilinen hem de bilinmeyen sınır değerleri içerdiği için, bütün bilinmeyenleri bir tarafta $\tilde{y}$ vektöründe yazılmalıdır.

$$A \tilde{y} = f \quad (3.23)$$

f vektörü bilinen sınır değerlerinin karşılık gelen matris değerleri ile çarpımından üretilmiştir. Bu sistem direkt ya da iteratif yöntemlerle çözülebilir.

4. ESNEK BİR YAPININ KARIŞIK DENİZ ŞARTLARINDA DAVRANIŞI

Düzenli dalgalarındaki yapının davranışı fiziksel olarak ilgilenilse de gerçekteki değerleri büyük ölçüde düzensiz doğası olan asıl okyanus dalgalarını düşünülecek olursa sorgulamaya açıktır. Ancak neyse ki bu iki konu düzensiz dalgaların sinüzoidal bileşenlerinin lineer süperpozisyonu şeklinde tanımlanması ile ilintilidir. Bu sayede asıl okyanus dalgaları etkisindeki yapının davranışı hakkında fikir sahibi olunabilir. Asıl okyanus şartları en gerçekçi şekilde düzensiz olarak tanımlanır, bu da yapının düzensiz davranmasına yol açar.

Bu bağlamda esnek yüzen yapı olarak belirlenen ve ana boyutları Şekil (4.1)'de verilen konteynır gemisinin ilk önce serbest titreşim analizi ardından ıslak ortamda yapının hareket denklemi çözülerek yapısal davranışları hakkında fikir sahibi olmamızı sağlayan tepki genlik fonksiyonları bulunmuştur. Daha sonraki aşamada tepki genlik fonksiyonları dalga spektrumları yardımıyla farklı deniz durumları için uyarlanmıştır.

Tipi:	Konteynır Gemisi
DWT :	32000 t
NT :	11200 t
LOA :	180 m
LBP :	174 m
B :	28 m
D :	14.15 m
T :	9.8 m

Şekil 4.1: Analizi yapılan geminin ana boyutları.

4.1 Genelleştirilmiş Ek-Su Kütlesi Ve Hidrodinamik Sönüm Katsayıları

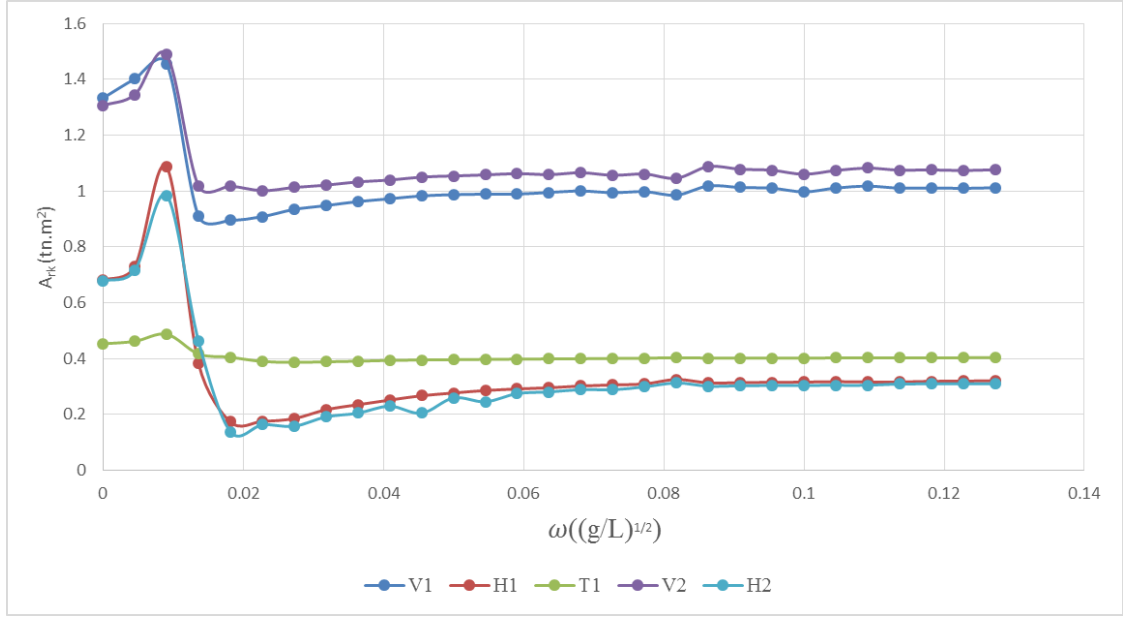
Düzenli dalgalarındaki esnek yapı davranışını hesaplayabilmek için akışkan-yapı etkileşiminin dâhil edildiği hareket denklemini çözmemiz gerekir. Hareket denklemini çözebilmek için sınır elemanları programını kullanarak hesapladığımız, her bir elastik moda karşılık gelen genelleştirilmiş ek-su kütlesi ve hidrodinamik sönüm katsayılarına ihtiyacımız vardır.

Elastik modlar standart sonlu elemanlar programı kullanılarak, serbest titreşim analizi ile hesaplanmıştır. Her bir asal moda karşı bir asal frekans denk gelmektedir. Hesaplanan asal modların her biri yapının hareketine farklı oranlarda katkı yapar. Çizelge (4.1)'te analizi yapılan konteynır gemisi hesaplanan için asal modlar ve karşılık gelen asal frekanslar sunulmuştur.

Çizelge 4.1: Serbest titreşim analizi.

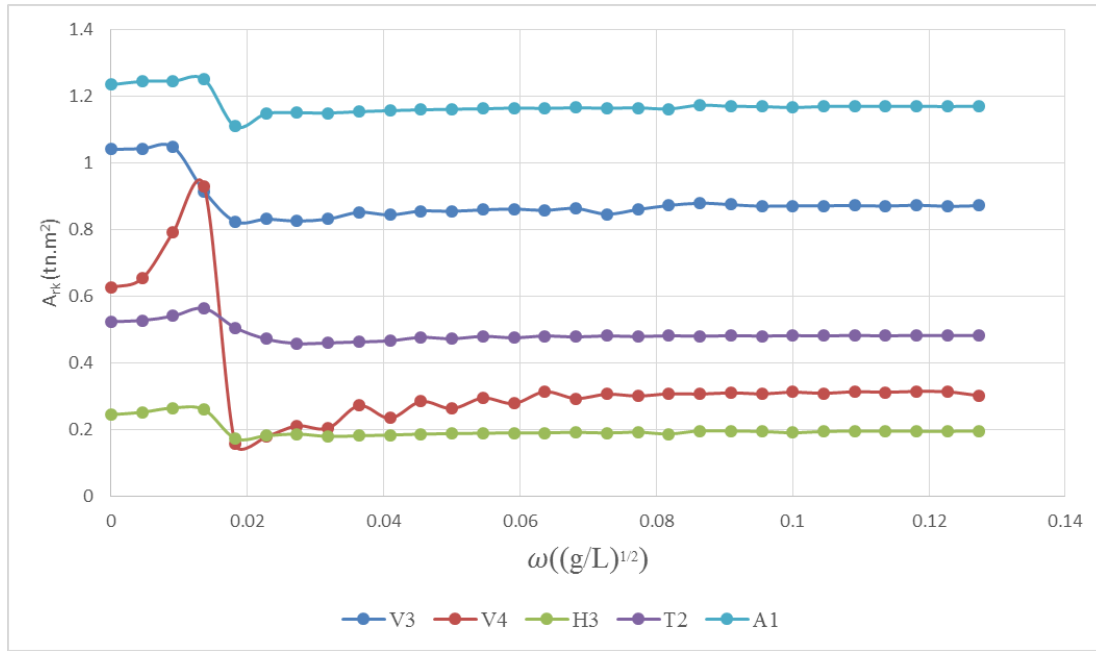
Asal Mod Numaraları	Asal Modlar	Asal Frekanslar
1	Düşey Eğilme Modu (V1)	1.285Hz
2	Yatay Eğilme Modu (H1)	1.553Hz
3	Burulma Modu (T1)	1.833Hz
4	Düşey Eğilme Modu (V2)	2.919Hz
5	Yatay Eğilme Modu (H2)	3.263Hz
6	Düşey Eğilme Modu (V3)	4.539Hz
7	Düşey Eğilme Modu (V4)	6.576Hz
8	Yatay Eğilme Modu (H3)	5.538Hz
9	Burulma Modu (T2)	6.214Hz
10	Eksenel Mod (A1)	5.574Hz

Tabloda belirtilen asal modlara karşılık gelen genelleştirilmiş ek-su kütlesi matrisinin köşegen değerleri, A_{rk} , frekansa bağlı değişimi Şekil (4.2) ve Şekil (4.3) 'te gösterilmiştir. Grafiklerin genel karakteristiği küçük frekanslarda yüksek değerlere ulaşması, ilerleyen yüksek frekanslarda bir değerde sabitlenmesidir. Ek-su kütlesi ve hidrodinamik sönüm terimleri için köşegen değerler her bir mod ile ilgilidir ve aynı moddaki birim genlik salınıma bağlı etkileri temsil eder.



Şekil 4.2: Mod 1-5 için Genelleştirilmiş Ek-su Kütlesi Matrisinin Köşegen Değerleri.

Grafiklerden açıkça görülebileceği üzere düşey ve yatay eğilme modları küçük değerlerde yüksek değerlere ulaşmakta, yüksek frekanslarda sabitlenmektedir.

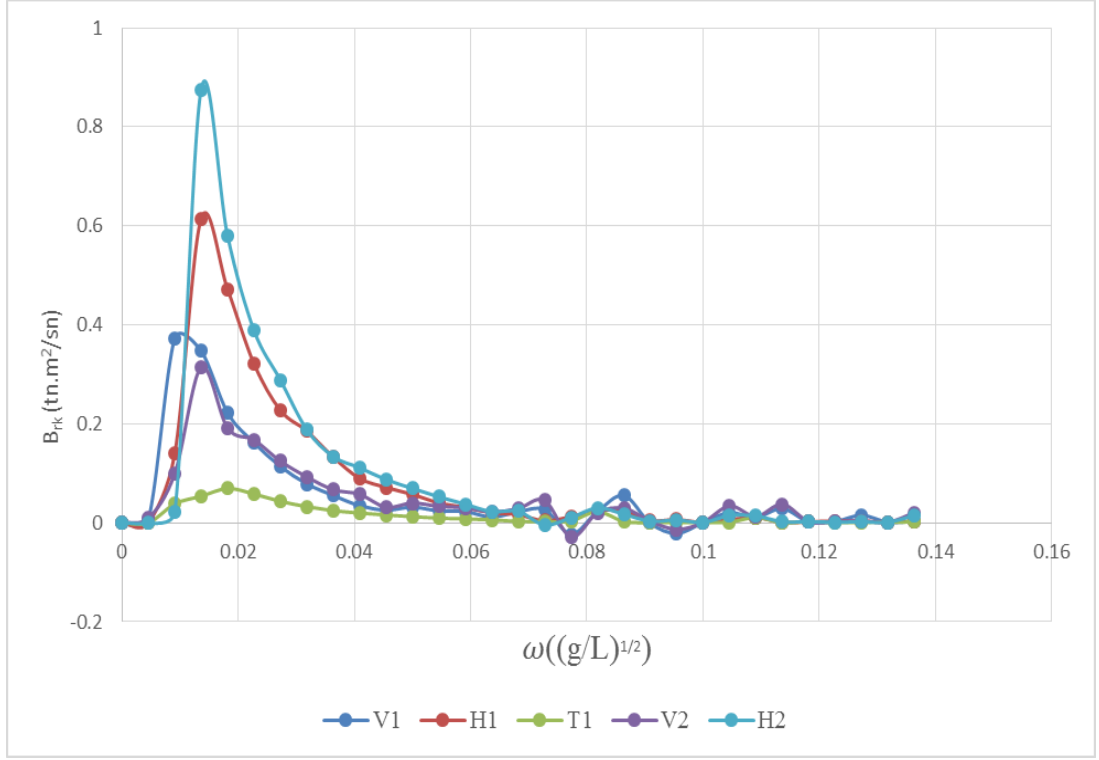


Şekil 4.3: Mod 5-10 için Genelleştirilmiş Ek-su Kütlesi Matrisinin Köşegen Değerleri.

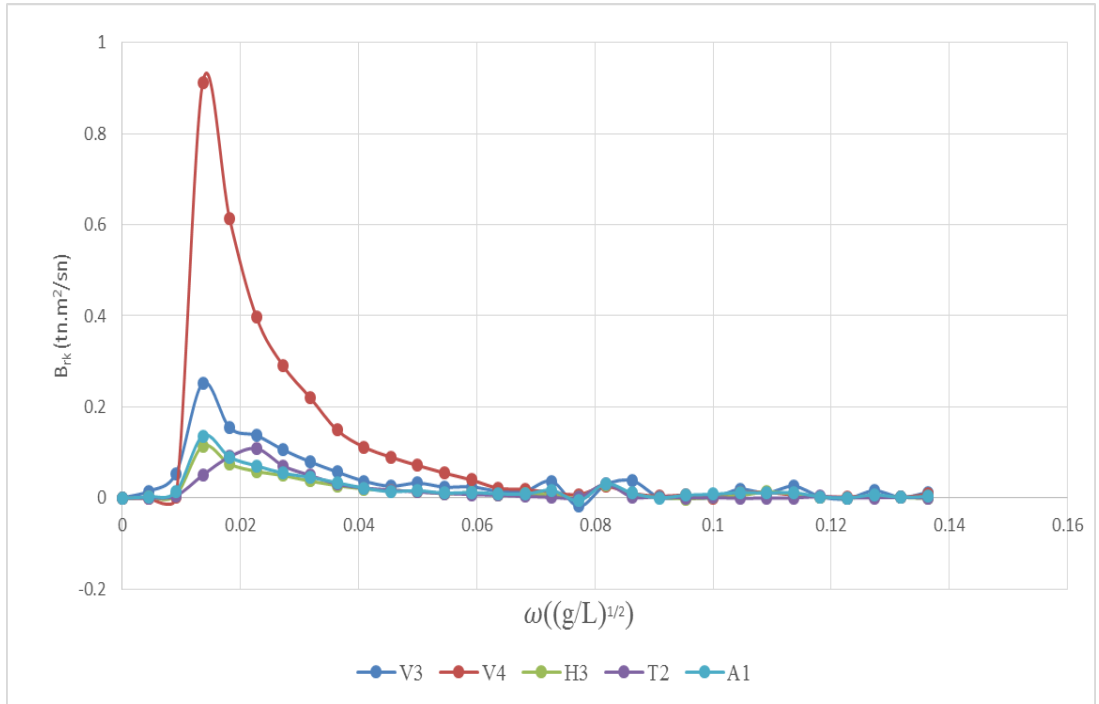
1.4559	0.0050	-0.0047	-0.2411	-0.0004	-0.0308	-0.0015	-0.0105	-0.0013	-0.1010
0.0054	1.0858	0.0241	0.0003	-0.0463	-0.0028	-0.0211	0.0122	-0.1139	0.0023
-0.0069	0.0366	0.4872	0.0018	0.0439	0.0025	-0.0664	0.0207	-0.0391	0.0021
-0.2391	-0.0020	0.0020	1.4874	-0.0027	0.0236	0.0147	0.0500	0.0013	-0.1823
-0.0023	-0.0604	0.0677	-0.0029	0.9842	-0.0001	-0.0493	0.0123	-0.0734	0.0013
0.0030	-0.0021	-0.0005	0.0093	-0.0010	1.0471	0.1183	0.3967	0.0025	-0.1704
0.0028	-0.0437	-0.0710	0.0157	-0.0440	0.1202	0.7909	-0.1754	-0.0678	-0.0137
-0.0031	0.0189	0.0214	0.0480	0.0106	0.4053	-0.1754	0.2640	0.0227	-0.0548
-0.0004	-0.1007	-0.0404	0.0054	-0.0644	0.0006	-0.0786	0.0259	0.5401	0.0075
-0.1233	0.0002	0.0026	-0.2418	0.0026	-0.1729	-0.0174	-0.0640	0.0047	1.2452

Şekil 4.4: İlk on elastik mod için genelleştirilmiş ek-su kütlesi matrisi ($\omega_e = 0.1Hz$).

Genelleştirilmiş hidrodinamik sönüm katsayıları grafikleri, B_{rk} , Şekil (4.2) ve Şekil (4.3), viskoz etkilerin ihmal edildiği akışkan ortamında titreşen yapı için beklenildiği gibidir. Sıfır değerinden başlayarak küçük frekanslarda maksimum değerine ulaşmaktadır. Yüksek frekanslarda tekrar sıfır değerine gelmektedir. Hidrodinamik sönüm katsayısının birimi $ton.m^2/sn'$ dir.



Şekil 4.5 : Mod 1-5 için Genelleştirilmiş Hidrodinamik Sönüm Matrisinin Köşegen Değerleri.



Şekil 4.6 : Mod 5-10 için Genelleştirilmiş Hidrodinamik Sönüm Matrisinin Köşegen Değerleri.

-0.0111	-0.0001	0.0001	0.0217	-0.0001	0.0126	0.0017	0.0058	0.0003	0.0109
0.3727	0.0012	-0.0012	-0.0767	0.0000	-0.1154	-0.0045	-0.0129	-0.0004	-0.0062
0.0027	0.1401	0.0039	-0.0003	0.0026	-0.0009	0.0127	-0.0030	0.0081	-0.0004
-0.0025	0.0056	0.0384	0.0004	0.0158	0.0005	0.0029	-0.0010	0.0002	-0.0002
-0.0826	-0.0006	0.0006	0.0996	-0.0001	0.0373	0.0044	0.0144	0.0006	0.0300
-0.0011	0.0008	0.0290	-0.0004	0.0218	0.0002	0.0020	-0.0009	0.0003	-0.0004
-0.1010	-0.0003	0.0002	0.0389	-0.0003	0.0540	0.0031	0.0097	0.0008	0.0127
-0.0024	0.0009	0.0059	0.0059	0.0025	0.0027	0.0017	0.0019	0.0007	0.0030
-0.0119	0.0003	-0.0015	0.0181	-0.0008	0.0101	0.0017	0.0064	0.0000	0.0087
0.0002	0.0069	-0.0035	0.0012	-0.0015	0.0002	0.0019	-0.0001	0.0050	0.0005

Şekil 4.7: İlk on elastik mod için hidrodinamik sönüm katsayısı matrisi($\omega_e = 0.1Hz$).

Tahrik kuvvetleri ise radyasyon kuvvetleri (ek-su kütlesi ve hidrodinamik sönüm) ve gelen dalgaların kuvvetleri ile bunların normal türevlerinden faydalanılan Haskind ilişkileri ile hesaplanmıştır (Newman, 1963). Serbest su yüzeyi etkisi dâhil edildiği için hesaplanan yüzey integrallerinin çözümleri karmaşık sayılardan oluşur.

129.6851+74.5572i
1.5185+1.7734i
-0.1056-3.1328i
-35.0791+38.1165i
1.514+5.0037i
-6.7612-18.6289i
0.2353+2.7874i
4.0781-2.6374i
-0.536-5.7036i
-3.3483-0.1321i

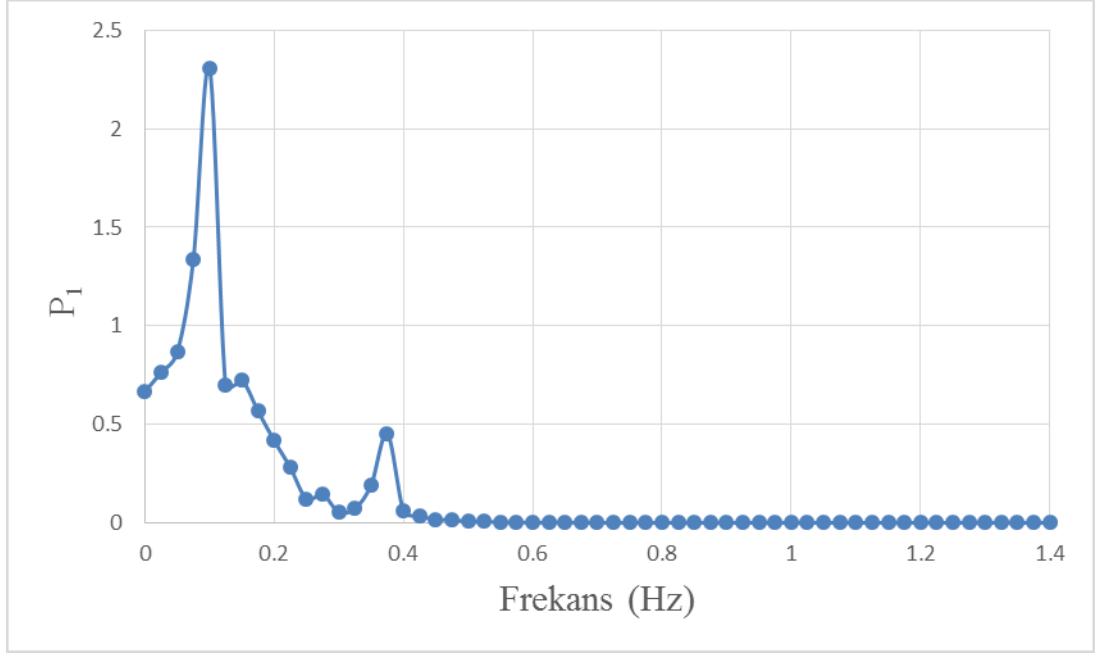
Şekil 4.8 : İlk on elastik mod için dalga kuvveti vektörü ($\omega_e = 0.1Hz$).

4.2 Asal Koordinatların Hesaplanması

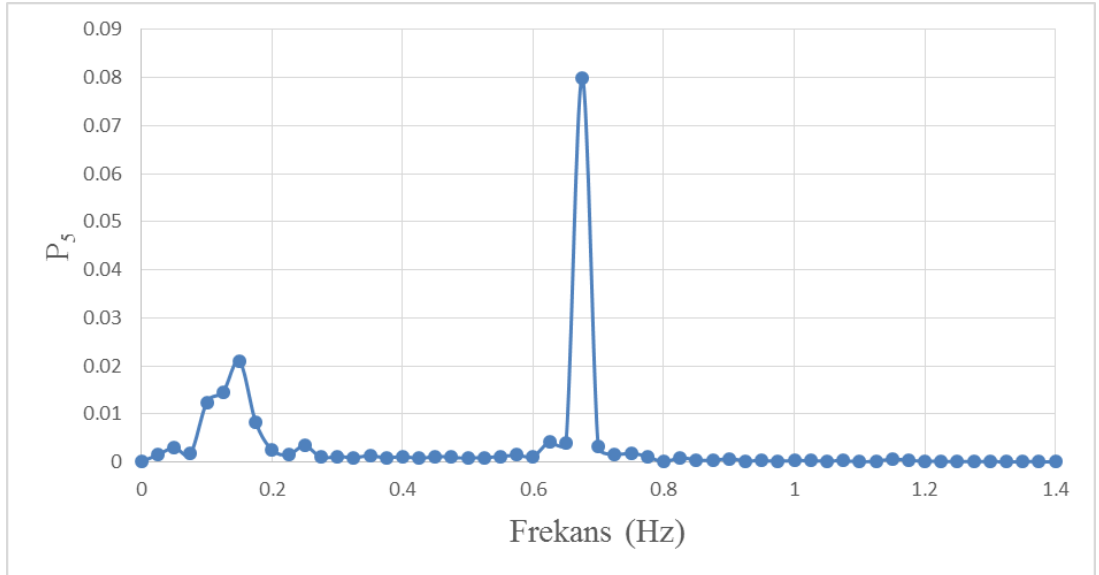
Her bir moda karşılık gelen, genelleştirilmiş ek-su kütlesi katsayısı ve hidrodinamik sönüm katsayısı belirlendikten sonra, yapının zorlanmış titreşimi için tanımlanan hareket denklemi (2.59), $p(t) = pe^{i\omega_e t}$, formundaki deneme çözümü ile çözülmesiyle her bir asal mod için asal koordinatlar (p_r) elde edilir.

$$p_r = [-\omega_e^2(a + A) + i\omega_e(b + B) + (c + C)][D]^{-1} \quad (4.2)$$

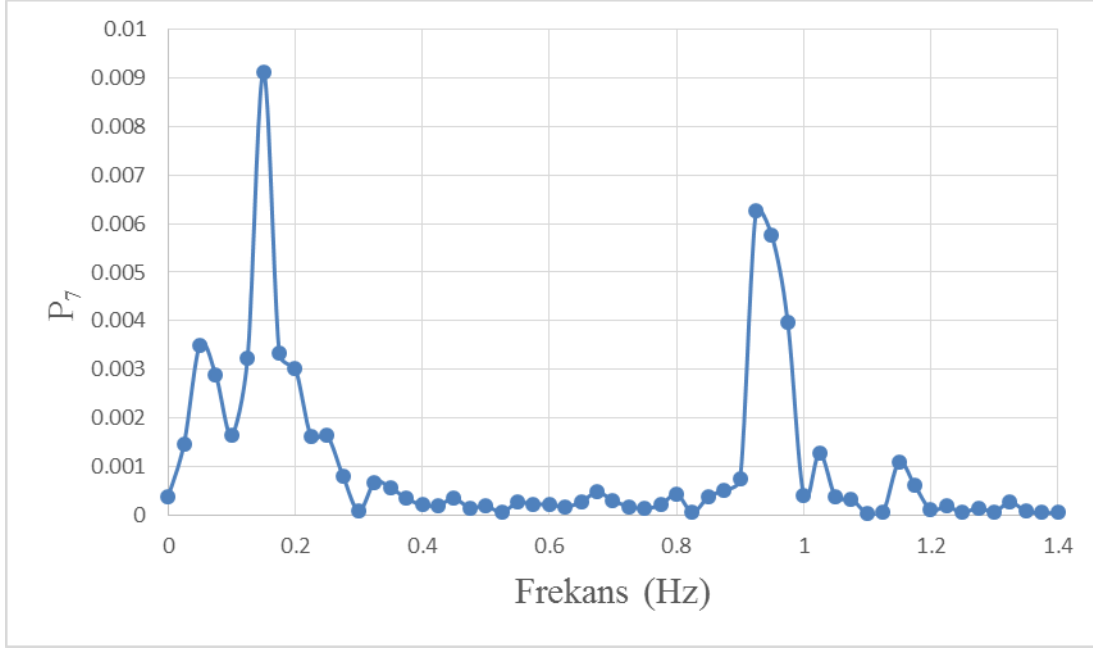
Böylelikle, kuru yapının asal mod şekillerini ve asal koordinatlarını kullanılarak yapı üzerindeki herhangi bir noktadaki yer değiştirme bulunabilir. Benzer şekilde, şekil değiştirme, eğilme momentleri, kesme kuvvetleri, burulma momentleri hesaplanabilir. Birinci, beşinci ve yedinci modlar için asal koordinatların frekansa bağlı değişimi Şekil (4.6), (4.7), ve (4.8)'de gösterilmiştir.



Şekil 4.9 : P_1 'nin Frekansa Bağlı Değişimi.



Şekil 4.10 : P_5 'in Frekansa Bağlı Değişimi.

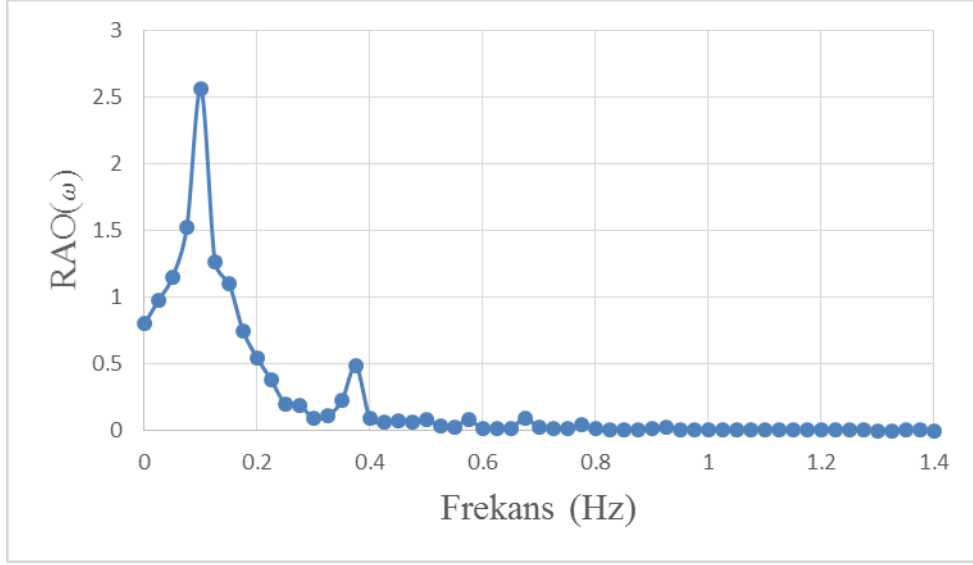


Şekil 4.11 : P_7 'nin Frekansa Bağlı Değişimi.

4.3 Tepki Genlik Fonksiyonunun (RAO) Hesaplanması

Her bir mod için yapının davranışı hesaplandıktan sonra yapısal sistemin tümünün dinamik davranışı modal süperpozisyon prensipleri kullanılarak hesaplanır. Şekil (4.9) incelenen konteynır gemisi için elde edilen transfer fonksiyonu diğer adıyla tepki genlik fonksiyonu sunulmuştur.

Yapısal analizlerde yapının doğal frekansı ile dış kuvvetin frekansının eşleşmesi durumunda büyük yapısal hareketler meydana gelir. Tepki genlik fonksiyonun maksimum değeri rezonansın gerçekleşeceği dalga frekansını işaret eder. Gemi inşaatı mühendisi için tepki genliği fonksiyonu eğrisinin tepe noktaları yapısal güvenlik açısından önemlidir ve dikkatle incelenmelidir.



Şekil 4.12 : Tepki genliği fonksiyonu - RAO.

4.4 Dalga Spektrumu

Karışık dalgalardan oluşan gerçek okyanus ortamı, farklı dalga boyları ve yüksekliğindeki çok sayıda sinüzoidal dalganın toplanmasıyla elde edilebilir. Elde edilen karışık ve düzensiz okyanus dalgaları, dalga boyu, dalga yüksekliği, dalga periyodu bakımından kesin bir doku yapısı göstermez.

Birçok sinüzoidal dalganın süperpozisyonu sadece düzensiz deniz yolu yaratmaz buna ek olarak hiçbir zaman birbirini tekrarlamayacak deniz yüzeyi oluşmasını sağlar. Düzenli sinüzoidal dalgaların enerjilerini süperpoze ederek, düzensiz denizyolu elde edilebilir. Denizyolunun şiddeti ise hâlihazırdaki dalgaların toplam enerjileri ile ölçülebilir.

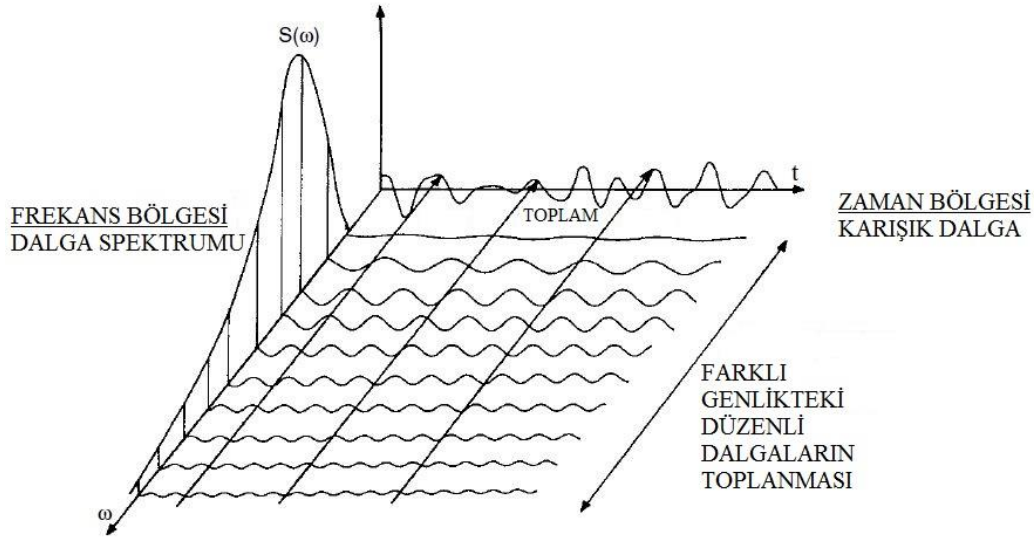
Sinüzoidal dalganın enerjisi deniz yüzeyindeki birim alan için, ζ_a dalga genliği olmak üzere;

$$\frac{1}{2} \rho g \zeta_a^2 \quad (4.2)$$

ile tanımlanır. Yüzeydeki birim alan için dalga genlikleri $\zeta_{a1}, \zeta_{a2}, \dots, \zeta_{an}$ olan dalgaların, enerjilerinin toplamı,

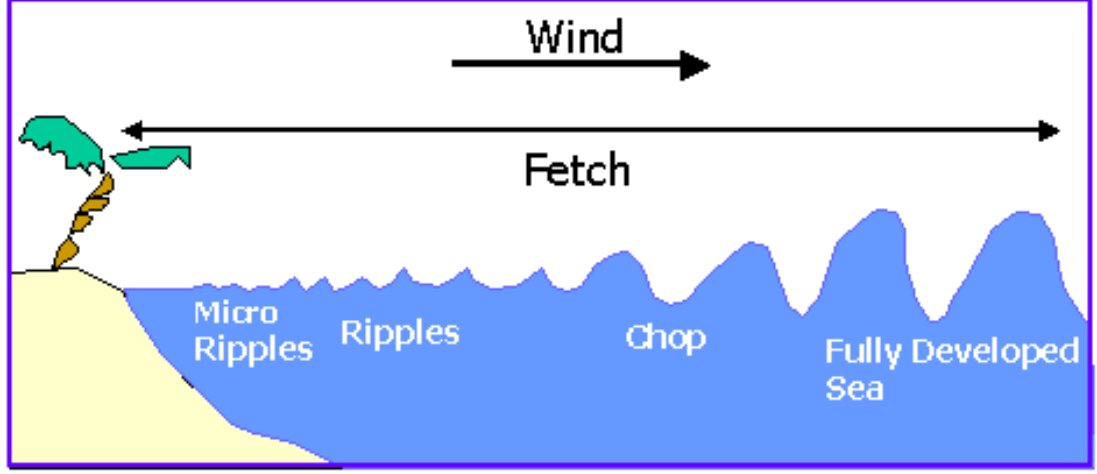
$$E_T = \frac{1}{2} \rho g (\zeta_{a1}^2 + \zeta_{a2}^2 + \dots + \zeta_{an}^2) \quad (4.3)$$

ile ifade edilir. Bu nedenle herhangi istenen bir deniz durumu için enerji dağılımı, istenilen deniz durumuna karşılık gelen birçok farklı frekanslardaki dalganın birleşimi ile hesaplanabilir. İncelenen deniz bölgesi ya da durumu için enerjinin frekansa bağlı dağılımına enerji spektrumu denir. Enerji spektrumunun altındaki alan dalga bileşenlerinin yani araştırılan denizin toplam enerjisini verir.



Şekil 4.13 : Dalga spektrumunun elde edilmesi (Faltinsen, 2005).

Belirlenen rüzgâr hızı için ilk oluşan dalga boylarının küçük olduğuna dikkat edilmelidir, uzun dalga boyundaki dalgalar ise daha sonra rüzgâr esmeye devam ettikçe oluşur. En son olarak dengeli ve rüzgârın esmesine devam etmesiyle değişmeyen tam gelişmiş deniz oluşur. Şekil (4.11)'de tam gelişmiş denizin oluşumu temsil edilmiştir. Bu nedenle enerji spektrumu tam gelişmiş deniz oluşana kadar sürekli değişir. Bu gelişim sırasında daha büyük dalga boyundaki dalgalar oluşur ve küçük dalgaların katkıları ihmal edilebilir. Şekil (4.10)'da büyük dalga boyuna sahip dalgaların oluşması ile birlikte enerji spektrumunun daha küçük frekanslara kaydığı görülebilir.



Şekil 4.14 : Tam gelişmiş deniz dalgalarının oluşumu (Url-4).

Eşitlik (4.3) dalgaların enerjisini temsil eder. Enerji spektrumu oluşturmak yerine ordinatının aşağıdaki ifadenin oluşturduğu farklı bir grafik elde edilebilir (Bhattacharyya, 1978).

$$\frac{1}{2} (\zeta_{a1}^2 + \zeta_{a2}^2 + \dots \zeta_{an}^2) \quad (4.4)$$

Bu ifade de dikkat edilmesi gereken enerji spektrumunun ρg ifadesine bölünerek elde edilmiş olmasıdır. Yeni grafik, dalga spektrumu olarak bilinir ve ordinat eksenini $S_{\zeta}(\omega_w)$ sembolü ile gösterilir ve dalga enerjisinin spektral yoğunluğu olarak adlandırılır. Yeni oluşan eğrinin altında kalan alan ise m_0 ile gösterilir ve dalgaların enerjisi elde edilmek isteniyorsa ρg ile çarpılır.

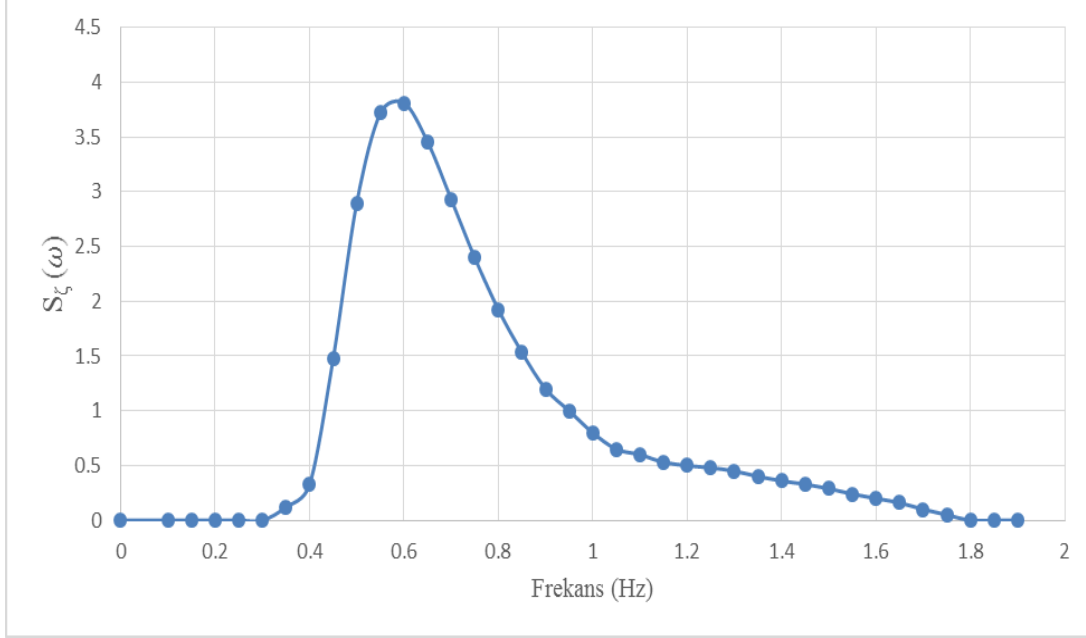
Denizyolunu tanımlayabilmek için, ilgilenilen bölge ve sınırlı zaman dilimi için dalga boyu ve dalga frekansı ile ilgili örnek kayıtların alınması gerekir. Deniz yüzey yapısı bir daha kendisini tekrarlamayacak olsa da deniz durumunun istatistiksel karakterleri, yani enerji spektrumu ya da dalga spektrumu değişmez. Bu istatistiksel araştırma yapmanın önemli bir avantajıdır.

Dünya üzerinde bulunan her bir deniz birbirinden farklı karakteristiklere sahiptir. Bu nedenle yapılan ölçümler neticesinde farklı dalga spektrumları, farklı kurumlar ya da kişiler tarafından oluşturulmuştur. ITTC iki parametrelili dalga spektrumu, ITTC tarafından önerilmiştir ve özel bir deniz bölgesinden ziyade daha geneldir ve daha genel kabul görmüştür.

ITTC iki parametrelili dalga spektrumu, $H_{1/3}$ karakteristik dalga yüksekliği, T modal dalga periyodu ve ω karşılaşma frekansı olmak üzere şu ifade ile gösterilir.

$$S_{\zeta}(w) = \frac{487 H_{1/3}^2}{T^4 \omega^5} \exp\left(-\frac{1948}{T^4 \omega^4}\right) \quad (4.5)$$

Şekil (4.12)'de karakteristik dalga yüksekliği 5m ve modal periyodu 10sn olan dalga spektrumu sunulmuştur



Şekil 4.15 : Karakteristik dalga yüksekliği 5m ve modal periyodu 10sn olan dalga spektrumu.

4.5 Karışık Dalgalarda Yüzen Yapının Davranışı

Düzensiz dalgalarındaki gemi davranışı, düzensiz dalgalara benzer şekilde istatistiksel kurallarla hesaplanabilir. Gemi davranışlarının grafiği, dalga spektrumu eğrisine benzer yapı gösterir. Lineer teoriye göre, dış kuvvetler olan okyanus dalgaları ile yapının davranışları lineer olarak değişecektir. Bu nedenle, karşılaşma frekansa göre yapısal hareketlerinin genliği ile ilgili grafik oluşturulur. Elde edilen grafiğe yanıt ya da davranış spektrumu denir. Düzensiz dalgalardan oluşan denizdeki gemi hareketi şu adımlarla hesaplanır.

(i) Öncelikle geminin seyir edeceği denizyolu için uygun dalga spektrumu seçilir. ITTC'nin dalga spektrumuna benzer standart dalga spektrumu gemi hareketlerinin dizayn tahmini için seçilir. Ancak, özel denizyolu (örn: Atlantik denizi) için gemi dizayn ediliyorsa ITTC spektrumunun yerine ilgili dalga spektrumu seçilmelidir.

(ii) Seçilen dalga spektrumunu karşılaşma frekansına göre düzenlenmesi gerekir. Dalga spektrumu gelen dalga frekansı yerine, karşılaşma frekansına göre düzenlenir. Ancak düzenlenen spektrumun altında kalan alan orijinal spektrum ile aynıdır çünkü toplam enerji değişmez.

(iii) Bir önceki adımda elde edilen gemi hareketi genliğinin karesinin dalga genliğinin karesine bölünmesiyle yeni diyagram elde edilir. Bu diyagram RAO ya da transfer fonksiyonu olarak adlandırılır.

(iv) Düzenli dalgalardaki hareketin genliğinin spektrumunun karesi ile düzenlenen dalga spektrumunun ordinatı çarpılarak düzensiz dalgalar için hareket spektrumu elde edilir. Hareket genliği spektrumunun altında kalan alan farklı hareket karakteristiklerini hesaplamak için kullanılabilir. Ayrıca farklı yönlerden gelen dalgalar için yapılacak olan analiz ile yapısal davranışlar daha kapsamlı olarak değerlendirilebilir.

Karışık dalgalardaki gemi hareketini hesaplayabileceğimiz lineer süper pozisyon tekniği iki temel kabule dayanır.

Herhangi tek bir düzenli dalga için geminin davranışı bu dalga bileşenin genliğinin lineer bir fonksiyonudur. Eğer dalga genliği iki katına çıkarılırsa gemi hareketinin genliği de iki katına çıkar. Gemi davranışının dalga genliğine lineer olarak orantılı olduğu varsayılırsa, belirli bir dalga, $a_i \sin \omega_i t$ dalgasına karşı $b_i \sin(\omega_i t + \epsilon_i)$ yanıtına sebep olur. Bu ifade de $b_i = a_i H(\omega_i)$ ve $H(\omega_i)$ frekansa bağlı yanıt fonksiyonudur.

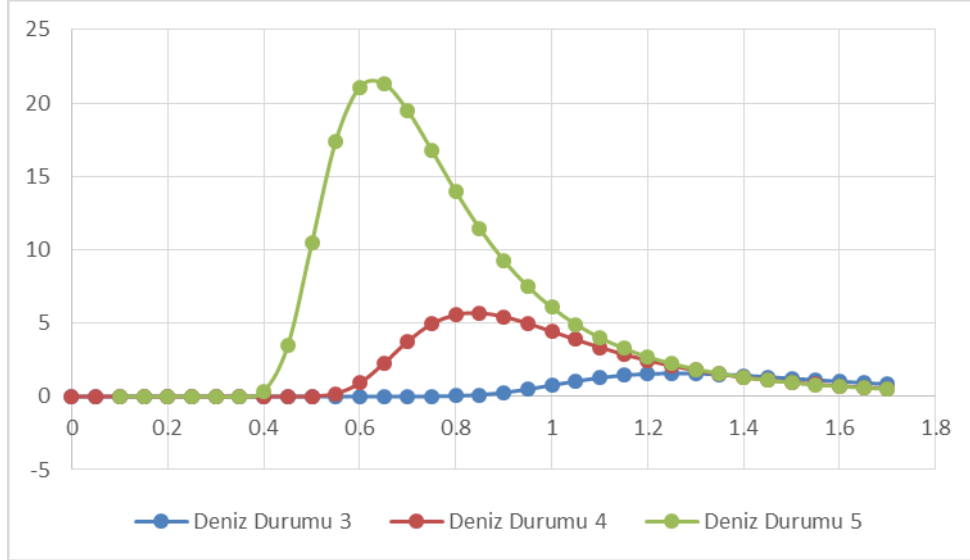
Geminin tek bir düzenli dalgaya karşı olan yanıtı diğer dalga bileşenlerinden bağımsızdır. Bu demektir ki geminin denizyolundaki davranışı, her bir tek dalga bileşeni için olan yanıtlarının toplamı olarak ifade edilir.

Gemi davranışının spektral yoğunluk fonksiyonu, dalgaların spektral yoğunluk fonksiyonu ile RAO'ların çarpımına eşittir.

$$S_\Phi(\omega_e) = S_\zeta(\omega_e) \cdot |H(\omega_e)|^2 \quad (4.6)$$

İfadede, $S_\zeta(\omega_e)$ dalga spektrumunun yoğunluk fonksiyonuna eşittir. $S_\Phi(\omega_e)$ gemi hareketinin spektral yoğunluk fonksiyonudur. Spektral yoğunluk fonksiyonu hareket spektrumu olarak da adlandırılır.

Bu denklem büyük öneme sahiptir çünkü herhangi iki büyüklük bilindiğinde üçüncüsünü bulunabilir. Eğer dalga spektrumu ($S_{\zeta}(w_e)$) ve yüzen yapının düzenli dalga şartlarında ki davranışı ($|H(w_e)|^2$) biliniyorsa denklem yardımıyla istenilen deniz durumu için gemi davranışları hesaplanabilir.



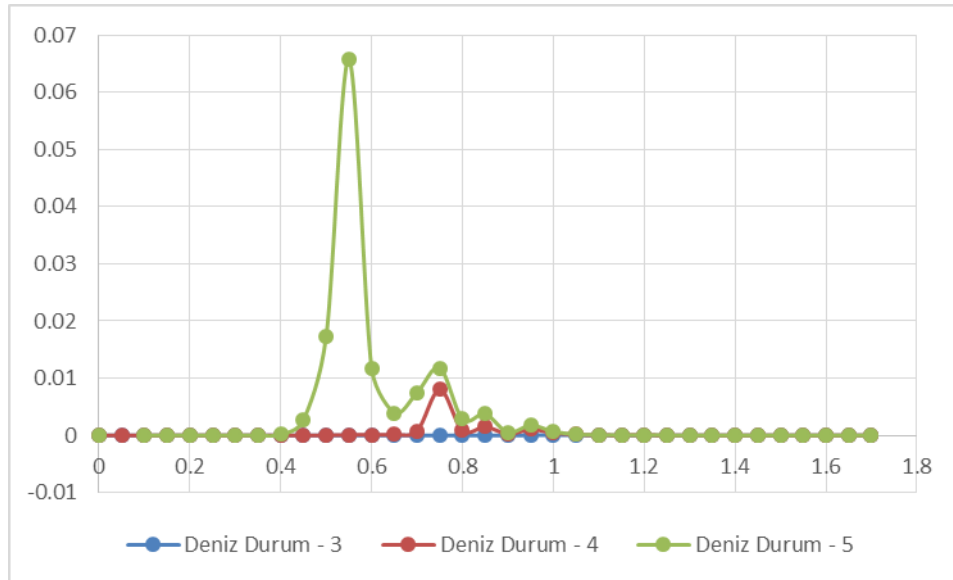
Şekil 4.16: Deniz durumuna göre hesaplanan dalga spektrumları.

	T_m	$H_{1/3}$
Deniz Durumu 3	5 sn	4.7 m
Deniz Durumu 4	7.5 sn	7.3 m
Deniz Durumu 5	10 sn	12.3 m

Şekil 4.17 : Seçilen dalga spektrumlarının bilgileri (Bhattacharyya, 1978).

Oşinografide, belirli alandaki ve zamandaki rüzgâr kaynaklı dalgalardan dolayı değişen deniz yüzeyini tanımlamak için standartlaştırılmış deniz durumlarından faydalanılır. Orta şiddette ve dalga boyu kısa olan deniz durumunu 3 kuvvetindeki deniz tanımlar ve gemi seyri için herhangi bir tehdit oluşturmaz. 4 kuvvetindeki deniz durumu ise orta deniz durumunda orta yükseklikteki dalga boylarından oluşan denizi tanımlar. 5 şiddetindeki deniz durumu ise ağır deniz şartlarının yani fırtınanın oluşmaya başladığı deniz yüzeyini ifade eder. Bu deniz durumunda artık dalga boyları yükselmiş ve kırılmaya başlamıştır. Dolayısıyla önemle incelenmesi gerekir. Deniz durumunu tanımlayan deniz kuvvetleri 0-9 arasında giderek artan şiddetler için ölçeklendirilmiştir. Şekil (4.14)'te deniz durumları 3, 4 ve 5'in modal periyot ve karakteristik dalga yükseklikleri gösterilmiştir. ITTC iki parametrelili dalga spektrumu (4.5)'e göre elde edilen dalga spektrumu eğrileri şekil (4.13)'te sunulmuştur.

Deniz durumu ile ilgili bu ölçümler kısa dönem periyodları için yapılmıştır. Kısa dönem deniz durumu için yapılan istatistiki ölçümlerden faydalanarak uzun dönem gemi davranışları ile ilgili hesaplama yapmak mümkündür. Farklı deniz durumları için ilgili tablodan karakteristik dalga yüksekliği $H_{1/3}$ ve modal periyot T_m okunup, istenilen deniz durumu için hesap yapılması mümkündür. En aşırı deniz durumlarında gemi yapısal elemanlarına etkiyecek yük ve cevaplar hakkında transfer fonksiyonları kullanılarak hesaplama yapılabilir.



Şekil 4.18 : Hesaplanan hareket spektrumları.

Şekil (4.15)'te konteynır gemisi için üç farklı deniz durumuna ait hareket spektrumları sunulmuştur. 5 kuvvetindeki deniz durumuna ait hareket spektrumu 0.5 Hz frekansa sahip dalgalar geldiğinde en yüksek değere ulaşmaktadır. Elde edilen hareket spektrumu kullanılarak, bu frekansta yapısal davranışlar dikkatle incelenmelidir. 3 şiddetindeki deniz durumunda beklenildiği gibi ciddi yapısal hareketler söz konusu değildir. Artan deniz durumlarında ise yapısal davranışlar giderek belirginleşmektedir ve yapısal davranışların incelenmesi önem kazanmaktadır.

Geminin operasyon halinde bulunacağı deniz ve deniz şartları için dalga spektrumu grafiği gemi inşaatı mühendisine hangi doğal frekanslardan kaçınması gerektiği hakkında bilgi verir. Gemi inşaatı mühendisi, kritik yapısal hareketlere ait tepki genliği fonksiyonlarının rezonans yaratacak olması durumunda bu durumu mümkün olduğu kadar değiştirmeye çalışır. Bu durumdan kaçınmak için genelde iki ana önlem alınabilir. Bu önlemlerden ilki, rezonansa neden olacak deniz bölgesinden ve durumundan kaçınmaktır. İkinci önlem ise gemi ana boyutlarını ve yapısal özelliklerinin rezonansa maruz kalmayacak şekilde değiştirmektir.

Gemi hareketi spektrumu istatistiki dağılımı temsil ettiği için tepki genlik fonksiyonunda olduğu gibi mutlak değerden bahsedilemez. İstatistiki değerlendirme yapılması gerekir. Hareket spektrumu grafiği altında kalan alan bir varyans değeridir. Bu varyans değeri kullanılarak temel istatistiki değerler elde edilebilir. Yapısal hareketlerde ise bu varyans değeri kullanılarak farklı yönlerden gelen dalgalar için değerlendirme yapılması mümkündür.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Üç boyutlu lineer hidroelastisite teorisi (Bishop, Price, Wu, 1986) herhangi bir şekilde sahip esnek yapıların düzenli ya da düzensiz frekanslarda ki okyanus dalgaları gibi akışkan kaynaklı dış kuvvetler etkisinde dinamik davranışını inceleyen birleştirilmiş bir analizi metodunu önerir. İncelenen yapı su yüzünde ya da daldırılmış olarak yüzüyor olabilir. Hidroelastik analiz iki ayrı analizden oluşur. İlk analiz, dış kuvvetlerin ve yapısal sönümün yokluğundaki serbest titreşim analizidir. Serbest titreşim analizi yapının, dinamik karakteristikleri olan asal frekans ve asal modların hesaplanmasını sağlar. Hidroelastik analizin ikinci kısmı, ıslak analiz, dış kuvvetler olarak yapıya etkileyen akışkan etkilerinin hesaplanmasını içerir. Islak analizde akışkan kuvvetleri, lineer üç boyutlu potansiyel teori ile akışkanın sıkıştırılmaz, viskoz, homojen ve akışkan parçacıklarının döngüsüz hareket ettiği kabulü altında hesaplanmıştır. Esnek yapının davranışı, modal süperpozisyon prensipleri ile değerlendirilmiştir.

Bu çalışmanın amacı, konvansiyonel tipteki bir geminin dinamik davranışlarını düzenli ve düzensiz okyanus dalgalarının etkileri dâhil edilerek hesaplanmasıdır. Üç boyutlu olarak geminin serbest titreşim analizi standart sonlu elemanlar programı ile gerçekleştirilmiştir. İkinci kısım analizler ise akışkan yapı etkileşimini uygulanmasını sağlayan genelleştirilmiş ek-su kütlesi ve hidrodinamik sönüm katsayılarının hesabıdır ve sınır elemanları programı ile hesaplanmıştır.

Genelleştirilmiş hidrodinamik katsayılar beklenen karakteri göstermiştir. Yapı serbest su yüzeyinde titreşirken, düşük frekans bölgesinde hidrodinamik katsayılar frekansa göre değişir oysaki yüksek frekans bölgesinde sabit bir değere yakınsar.

Her iki uygulama bölümünde ele alınan sayısal problem üzerinde, çeşitli davranış karakteristikleri genel olarak teorik beklentilerle uyum içindeki sonuçlar göstermiştir. Sunulan çözüm tekniğinin elastik yapıların hidroelastik analizi için güvenilirliğini ve etkinliğini açıkça göstermektedir.

Yapı ve akışkan analizlerinin bağımsız gerçekleştirilerek, modal hareketlerin ve akışkan kuvvetlerinin arayüz üzerindeki aktarımı yoluyla ilişkilendirilmiş olmaları, dinamik etkileşimin zayıf bir yaklaşımla sağlandığına işaret etmektedir. Ancak yapısal tepkilerin bir anlamda modal vektörler cinsinden seriye açılarak tanımlanmış olması etkileşim probleminin lineer sınırlar içinde ele alınması dâhilinde, problem fiziğiyle uyumunu etkilememektedir.

Etkileşim kuvvetlerinin hesaplanması için akışkan-yapı arayüzü üzerindeki potansiyel dağılımının yeterli olması, akışkan probleminin salt sınır değerlerinin araştırıldığı bir forma indirgenerek problem boyutunun azaltıldığı sınır eleman metodunu etkin bir tercih olarak öne çıkarmaktadır. Bu şekilde sınırsız akışkan ortamları için yayılım şartları da doğrudan sağlanabilmektedir. Ayrıca, elastik sistemin serbest titreşim analizinin sonlu eleman metoduyla yerine getirilmesiyle, yapı ve akışkan davranışları için bağımsız modellerin kullanılabilmesi, etkileşiminin kurulduğu arayüzün her iki ayrıklaştırmada uygun bir yapıda olması gerekliliğine rağmen, çözüme esneklik kazandırmaktadır.

Akışkan problemi, elastik sistemin modal karakteristiklerine bağlı olarak tanımlanmış olmakla birlikte etkileşim kuvvetleri vasıtasıyla normal modlar arasında meydana getirdiği hidrodinamik etkileşimler göz önüne alınarak, dinamik davranış yeterli sayıda moda dayanan analizlerle araştırılmalıdır.

Hidroelastik metodun çizilen sınırlar içindeki geçerliliği gösterilmiş olmakla birlikte, akışkan-yapı dinamik etkileşim problemlerinin gerektirebileceği daha kapsamlı çözümlere ulaşılması bakımından bazı önerilerde bulunulabilir.

Bu önerilerden ilki, akışkan davranışıyla ilişkilidir. Akışkan davranışı değerlendirilirken yapılan kabuller doğrultusunda ihmal edilen etkilerin (lineer olmayan serbest yüzey dalgalarının varlığı, viskozite, döngülü akım vs.) değerlendirmeye alınmasıyla daha doğru bir matematik model elde edilebilir.

İkinci öneri ise, yapıda oluşabilecek yer değiştirmelerin büyük değer alması durumunda lineer yaklaşım geçersiz hale geleceği dolayısıyla yapısal non-lineerliklerin analize dâhil edilmesi gerekliliğidir.

KAYNAKLAR

- Belik, Ö.** (1980). On the slamming response of ships to regular head waves. Transactions of the Royal Institution of Naval Architects
- Başaran, İ.** (2012). Doktora Tezi. Gemi Yapılarını Hidroelastik Davranışlarının Dövmüne Etkisi Altında İncelenmesi.
- Bhattacharyya, R.** (1978). Dynamics of Marine Vehicles, A Wiley-Interscience Publication
- Buchholdt, H.** (1997). Structural Dynamics for Engineers
- Bishop, R.E.D.** (1978). On the dynamics of slamming, Transactions of the Royal Institution of Naval Architects
- Bishop, R.E.D. ve Price, W.G.** (1979). Hydroelasticity of ships, Cambridge University Press.
- Brebbia, C.A.R. ve Dominguez, J.** (1977). Boundary Element Methods for Potential Problems, Applied Mathematical Modelling.
- Bishop, R.E.D., Price, W.G., Wu, Y..** (1986). A General Linear Hydroelasticity Theory of Floating Structures Moving in a Seaway, The Royal Society
- Che, X.L.** (1992). Two-Dimensional Analysis of Prying Response of Twin-Hull Floating Structures Proceedings of 2nd International Offshore and Polar Engineering Conference.
- Chen, X.J.** (2001). Second Order Hydroelasticity Analyses for Marine Structures PhD Thesis, China Ship Scientific Research Center.
- Chen, X.J.** (2002a). Second order nonlinear hydroelastic analyses of floating bodies—theory. Journal of Ship Mechanics.
- Chen, X., Wu, Y., Cui, W., Jensen, J.J.** (2005). Review of hydroelasticity theories for global response of marine structures, Ocean Engineering
- Das, S.** (2011). Hydroelasticity of Marine Vessels Advancing in a Seaway. Doktora Tezi
- Ergin, A., Uğurlu, B.** (2002). Linear vibration analysis of cantilever plates partially submerged in fluid, Journal of Fluids and Structures
- Faltinsen, O.M.** (1990). Sea Loads on Ships and Offshore Structures, Cambridge University Press
- Faltinsen, O.M.** (2005). Hydrodynamics of High Speed Marine Vehicles, Cambridge University Press.
- Gaul, L., Kögl, M., Wagner, M.** (2003). Boundary Element Methods for Engineers and Scientists: An Introductory Course with Advanced Topics. Springer.

- Islam, M.N.,Islam, M. R. ve Baree, M. S..** (2004). Computation of Ship Responses in Waves Using Panel Method, Journal of Naval Architecture and Marine Engineering.
- Liu, S. ve Sakai, G.K.** (2002). Time domain analysis on the dynamic response of a flexible floating structure to waves. Journal of Engineering Mechanics.
- Liu, S. ve Sakai, G.K.** (2000) Nonlinear analysis on the interaction of waves and flexible floating structure. Proceedings of 10th International Offshore and Polar Engineering Conference.
- Mousavizadegan, S.H M.,** (2005). Numerical Method in Wave Body Interactions, Journal of Applied Mathematic and Computing.
- Noblesse, F.** (1981). Alternative integral representations for the Green function of theory of ship wave resistance, Journal of Engineering Math.
- Noblesse, F.** (1982). The Green function in the theory of radiation and diffraction of regular water waves by a body, Journal of Engineering Math.
- Newman, J.N.** (1963). The Exciting Forces on Fixed Bodies in Waves, Hydromechanics Laboratory Research and Development Report.MIT.
- Newman, J.N.** (1977). Marine Hydrodynamics, The MIT Press.
- Price, W.G. ve Wu, Y.S.** (1985). Structural Responses of a SWATH of Multi-Hulled Vessel Traveling in WavesInternational Conference on SWATH Ships and Advanced Multi-hulled Vessels. RoyalInstitution of NavalArchitects, London.
- Rayleigh, L.** (1894) The Theory of Sound (2nd edn.) Macmillan
- Telste, J.G. ve Noblesse, F.** (1986). Numerical Evaluation of the Green Function of Water-Wave Radiation and Diffraction, Journal of Ship Research
- Uğurlu, B., Ergin, A.** (2005). A hydroelasticity method for vibrating structures containing and/or submerged in flowing fluid, Journal of Sound and Vibration
- Uğurlu, B., Ergin, A.** (2008). A hydroelastic investigation of circular cylindrical shells-containing flowing fluid with different end conditions. Journal of Sound and Vibration.
- Uğurlu, B.** (2006). Kısmen Akışkanla dolu ve daldırılmış, yüksek frekanslı yapıların hidroelastik analizi, Doktora Tezi
- Wang, D.Y.** (1991). Three-dimensional hydroelastic response of a very large floatingstructure. International Journal of Offshore and Polar Engineering
- Wu, Y.S.** (1997). Hydroelasticity of Floating Bodies, PhD. Thesis, Brunel University, UK.
- Wu, Y.S.** (1997). Journal of Hydrodynamics, Series A
- Xia, J. Z. ve Wu, Y.S.** (1993). A general form of the interface boundary condition of the fluid-structure interactions. Ship Behavior Research.

Yılmaz, T. (2011). Gemi Mühendisliği El Kitabı, GMO Yayın

Zhou, H. (2003). Hydrodynamic Response of an Advanced Marine Vehicle in Waves. Yüksek Lisans Tezi

Url-1 < http://en.wikipedia.org/wiki/Response_amplitude_operator >, alındığı tarih: 29.03.2014.

Url-2 < http://www.wikiwaves.org/Free-Surface_Green_Function >, alındığı tarih: 10.01.2014.

Url-3 < http://tr.wikipedia.org/wiki/Green_fonksiyonları>, alındığı tarih: 10.01.2014.

Url-4 < <http://lighthouse.tamucc.edu/Waves>>, alındığı tarih: 10.01.2014.

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Salim Tamer
Doğum Yeri ve Tarihi: Aydın-Söke 24.11.1987
Adres: İTÜ Gemi İnşaatı ve Deniz Bilimleri Fakültesi
E-Posta: stamer@itu.edu.tr
salimtamer09@gmail.com
Lisans: Yıldız Teknik Üniversitesi