

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**GEMİLERİN PARAMETRİK YALPA REZONANSININ 2.NESİL
STABİLİTE KURALLARINA GÖRE DEĞERLENDİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Buğra Uğur YAZICI

**Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Anabilim Dalı
Gemi İnşaatı Yüksek Lisans Programı**

HAZİRAN 2018

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**GEMİLERİN PARAMETRİK YALPA REZONANSININ 2.NESİL
STABİLİTE KURALLARINA GÖRE DEĞERLENDİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Buğra Uğur YAZICI
508131027**

Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Anabilim Dalı

Gemi İnşaatı Mühendisliği Yüksek Lisans Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Metin TAYLAN

HAZİRAN 2018

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 508131027 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Buğra Uğur YAZICI, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “GEMİLERİN PARAMETRİK YALPA REZONANSININ 2.NESİL STABİLİTE KURALLARINA GÖRE DEĞERLENDİRİLMESİ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Metin TAYLAN**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Ali Can TAKİNACI**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Ahmet Ziya SAYDAM
Piri Reis Üniversitesi

Teslim Tarihi : **04 Mayıs 2018**
Savunma Tarihi : **07 Haziran 2018**





Aileme ve değerli arkadaşlarıma,



ÖNSÖZ

Bu çalışma, IMO 2. Nesil hasarsız stabilite kuralları ile getirilen yeni kurallardan birisi olan Parametrik Yalpa Rezonansı kriterlerinin incelenmesini ele almaktadır.

Yapmış olduğum bu çalışmada bana yol gösteren ve yardımlarını esirgemeyen çok değerli hocam Prof.Dr.Metin TAYLAN'a teşekkürü borç bilirim.

Yüksek lisans sürecim boyunca sürekli olarak beni destekleyen ve gelişimim için hep yanımda olan SEFT Gemi Tasarım ailesine, çok değerli arkadaşlarım Selim ÇAKIR, Ahmet SOYDAN ve abim Serkan ÖZDEN'e ayrıca teşekkür ederim.

Hayatıma anlam katan değerli eşim Ezgi'ye güzel kalbi ve motivasyonu için minnettar olduğumu belirtmek isterim. İyi ki geldin, iyi ki varsın.

Bu tezi manevi olarak yanımda hissettiğim tüm arkadaşlarıma ve aileme ithaf ederim.

Mayıs 2018

Buğra Uğur YAZICI
Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Müh.



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
SEMBOLLER	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ	xv
ŞEKİL LİSTESİ	xvii
ÖZET	xix
SUMMARY	xxi
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı	1
1.2 Literatür Araştırması	2
2. STABİLİTE KURALLARINDAKİ GELİŞMELER	7
2.1 Giriş	7
2.2 Mevcut Hasarsız Stabilitate Kuralları	8
2.2.1 Yolcu ve yük gemileri uygulanmakta olan kriterler	8
2.2.2 Yolcu gemilerinde uygulanmakta olan kriterler	9
2.2.3 Hava kriteri	10
3. IMO İKİNCİ NESİL STABİLİTE KRİTERLERİ	15
3.1 Toplam Stabilitate Kaybı	17
3.1.1 Dalgalarda doğrultma kolu değişimi	17
3.1.2 Toplam stabilite kaybı modu için kriter temeli	20
3.1.3 Toplam stabilite kaybı moduna karşı gemi zafiyetinin algoritması	21
3.1.3.1 Seviye 1 değerlendirilmesi	21
3.1.3.2 Seviye 2 değerlendirilmesi	23
3.2 Dalgaya Binme ve Yön Stabilitesi Kaybı	25
3.2.1 Dalgaya binme ve yön stabilitesi kaybı genel tanımı	25
3.2.2 Dalgaya binme dengesi tanımı: ilk eşik	28
3.2.3 Dalgaya binme denge stabilitesi	28
3.2.4 Dalgalanma hareketinden dalgaya binme hareketine geçiş	31
3.3 Ölü Gemi Durumu	32
3.3.1 Ölü gemi durumunun fiziksel arka planı	32
3.3.2 Ölü gemi durumunun fiziksel arka planı	32
3.3.2.1 Seviye 1 zafiyet kriteri değerlendirilmesi	32
3.3.2.2 Seviye 2 zafiyet kriteri değerlendirilmesi	33
3.3.2.3 Seviye 2 zafiyet kriteri değerlendirilmesi	36
3.4 Aşırı İvmelenme	37
3.4.1 Aşırı ivmelenme nedeniyle stabilite kaybının fiziksel arka planı	37
3.4.2 Gemi hareketlerinde senkron rezonans	38
4. PARAMETRİK YALPA REZONANSININ GELİŞİMİ VE ÖNEMİ	41
4.1 Giriş	41

4.1.1 Birinci çeyrek	42
4.1.2 İkinci çeyrek	42
4.1.3 Üçüncü çeyrek	43
4.1.4 Dördüncü çeyrek	43
4.1.5 Genel etki	43
4.2 Parametrik Yalpa Rezonansının Frekans Karakteristikleri	44
4.3 Yalpa Sönümlemenin Etkisi	44
4.4 Hızın ve Dalga Yönünün Etkisi	45
5. PARAMETRİK YALPA REZONANSI ZAFİYET KRİTERLERİ	47
5.1 Parametrik Yalpa için Seviye 1 Zafiyet Kriteri	47
5.2 Parametrik Yalpa için Seviye 2 Zafiyet Kriterleri	50
5.2.1 Zafiyet seviyesi 2 kriter 1 hesaplaması	50
5.2.1.1 Zafiyet seviyesi 2 kriter 1 GM varyasyon hesapları	50
5.2.1.2 Zafiyet seviyesi 2 kriter 1 kritik hız hesapları	51
5.2.2 Zafiyet seviyesi 2 kriter 2	52
5.2.3 Zafiyet seviyesi 2 kriter 2 hesaplaması	53
6. PARAMETRİK YALPA HAREKET DENKLEMİ VE MAKSİMUM YALPA AÇISININ HESAPLANMASI İÇİN ÇÖZÜM YÖNTEMİ	57
6.1 Atalet Momenti Terimi	57
6.2 Yalpa Sönümleme Terimi	58
6.3 Doğrultma Momenti Terimi	59
6.4 Hareket Denklemi İfadesi	63
6.5 Maksimum Yalpa Açısının Hesaplanması	65
7. HAREKET DENKLEMİNİN SAYISAL ÇÖZÜMÜ	67
8. HESAPLARDA KULLANILAN PROGRAM VE YAZILIMLAR	71
8.1 Gemi Geometrisinin Tanımlanması ve Genel Karakteristiklerin Girilmesi	72
8.2 Gemi Hidrostatik Hesaplamaları	73
8.2.1 Zafiyet seviyesi 1 kriter 1 hidrostatik hesaplamaları	73
8.2.2 Zafiyet seviyesi 2 kriter 1 hidrostatik hesaplamaları	73
8.2.3 Zafiyet seviyesi 2 kriter 2 hidrostatik hesaplamaları	74
8.3 Zafiyet Kriteri Hesaplamaları	74
9. ÖRNEK UYGULAMA	75
9.1 C11 Konteyner Gemisi	76
9.1.1 Zafiyet seviyesi 1 kriter 1 hesaplaması	77
9.1.2 Zafiyet seviyesi 2 kriter 1 hesaplaması	79
9.1.3 Zafiyet seviyesi 2 kriter 2 hesaplaması	80
10. SONUÇ VE ÖNERİLER	83
KAYNAKLAR	85
EKLER	87
ÖZGEÇMİŞ	97

KISALTMALAR

ABS	: American Bureau of Shipping
IMO	: International Maritime Organization
IS CODE	: Intact Stability Code
MSC	: Maritime Safety Committee
SLF	: Stability and Load Lines and on Fishing Vessels Safety
SOLAS	: Safety of Life at Sea
JASNAOE	: The Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers



SEMBOLLER

L	: Gemi boyu
Lbp	: Gemi dikmeler arası boyu
B	: Gemi kalıp genişliği
d	: Gemi su çekimi
D	: Gemi derinliği
τ	: Gemi trimi
LCG	: Gemi ağırlık merkezinin boyuna konumu
VCG	: Gemi ağırlık merkezinin düşey konumu
∇	: Deplasman hacmi
ρ	: Yoğunluk
Cm	: Orta kesit narinlik katsayısı
Cb	: Blok katsayısı
λ	: Dalga boyu
h	: Dalga yüksekliği
C1	: Zafiyet seviyesi 2 kriter 1
C2	: Zafiyet seviyesi 2 kriter 2
Wi	: Ağırlık faktörü
GM	: Metasantr yüksekliği
Vs	: Gemi Hızı
Vpr	: Geminin parametrik yalpa yapabileceği kritik hız
g	: Yerçekimi ivmesi
$W_{\phi} (\ddot{\phi})$	: Yalpa hareketi açısal ivmelenmesi
$V_{\phi} (\dot{\phi})$	: Yalpa hareketi hızı
ϕ	: Yalpa hareketi hızı
I_{xx}	: Kütle atalet momenti
A_{44}	: Ek su kütlesi atalet momenti
ω_{ϕ}	: Açısal yalpa frekansı
T_{ϕ}	: Doğal yalpa periyodu
Xc	: Dalga tepesinin kıç dikmeye olan mesafesini

ω	: Dalga frekansı
ω_e	: Dalga karşılaşma frekansı
T_e	: Dalga karşılaşma periyodu
ΔGM_1	: Metasantr yüksekliği varyasyonunun büyüklüğü
GM_C	: Serbest yüzey düzeltmesi yapılmış sakin su yükleme kondisyonu metasantr yüksekliği
W_{loc}	: Dalga tepesinin gemi boyuna mevkisi
GM_0	: Sakin su metasantr yüksekliği
GZ_0	: Sakin su doğrultma kolu eğrisi
Fn	: Froude sayısı
RAO	: Transfer fonksiyonu
S_w	: Deniz dalgasının spektral yoğunluğu
H_s	: Etkin dalga yüksekliği
T_z	: Ortalama sıfırdan geçiş periyodu
α	: Doğrusal sönüm katsayısı
γ	: Kübik sönüm katsayısı
B_{44}	: Eşdeğer yalpa sönüm katsayısı

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 5.1 : Dalga durumları.....	53
Çizelge 5.2 : Hız katsayıları.....	54
Çizelge 9.1 : C11 gemisi ana karakteristikleri.....	77
Çizelge 9.2 : Zafiyet seviyesi 1 kriter 1 dalga karakteristiği.....	77
Çizelge 9.3 : Dalga tepesinin farklı konumlarına göre GM değerleri	78
Çizelge 9.4 : Farklı dalga durumlarına göre seviye 2 kriter 1 hesapları.....	79
Çizelge 9.5 : Farklı dalga yüksekliklerine göre hesaplanan maksimum yalpa açıları.....	80
Çizelge 9.6 : Zafiyet seviyesi 2 kriteri 2 hesaplamaları.....	80
Çizelge 9.8 : Zafiyet seviyesi 2 kriteri 2 hesaplamaları.....	81
Çizelge 9.9 : Yapılan hesaplamalar ile IMO tarafından bulunan değerleri karşılaştırması.	82
Çizelge A.1 : Q1 ve Q2 katsayıları	90
Çizelge A.2 : Q3 katsayısı	90
Çizelge A.3 : Q4 ve Q5 katsayıları.....	91
Çizelge A.4 : Q6 katsayısı	92
Çizelge A.5 : Q7 katsayısı	93
Çizelge B.1 : Kuzey Atlantik dalga oluşum frekansları	95
Çizelge B.2 : Dalga oluşum frekanslarına karşılık gelen dalga yükseklikleri tablosu	96



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : APL China gemisine ait kaza sonrası çekilmiş bir görüntü.	8
Şekil 2.2 : IMO hasarsız stabilite kurallarını gösteren grafik.	9
Şekil 2.3 : Hava kriterinde kullanılan değerler	10
Şekil 3.1 : Gemi dalga çukurları durumunda gemi gövde geometrisindeki değişiklikler (a) 3 boyutlu görünüm ve (b)su hattı.....	18
Şekil 3.2 : Dalga çukuru ve dalga tepesi durumunda su hattı değişimine bağlı olarak stabilite değişimi	19
Şekil 3.3 : Teorik toplam stabilite kaybının oluşması için olası bir senaryo	19
Şekil 3.4 : Dalga varken gemi üzerine etki eden kuvvetler	26
Şekil 3.5 : (a) özitleme noktası ve itme direnci farkı ve (b) dalga kuvvetleri ve bir dalga üzerinde farklı gemi pozisyonları için gösterilen itme ve direnc arasındaki denge.....	27
Şekil 3.6 : Kendini sevk edebilme noktası etrafında küçük dalgalanma hareketi.....	27
Şekil 3.7 : Gemi üzerinde dalganın farklı konumlarına göre dalgaya binme eşliğini gösteren.itme ve direnc arasındaki dalga kuvvetleri ve denge.	28
Şekil 3.8 : Stabil dengeden ileride oluşan bir bozukluk.	29
Şekil 3.9 : Stabil dengeden geride oluşan bir bozukluk	29
Şekil 3.10: Stabil olmayan dengeden ileri oluşan bir bozukluk	30
Şekil 3.11: Stabil olmayan dengeden geride oluşan bir bozukluk.....	31
Şekil 3.12: Ölü gemi durumunda stabilite bozulması senaryosu.....	33
Şekil 3.13: Aşırı ivmelenme durumunda stabilite bozulması senaryosu	38
Şekil 4.1 : Parametrik yalpa rezonansının gelişimi	41
Şekil 4.2 : Parametrik yalpa rezonansının zamana bağlı değişimini gösteren grafik.....	43
Şekil 4.3 : (a) Yandan gelen dalgalarda yalpa rezonansı ; (b) parametrik yalpa rezonansı ; (c) parametrik yalpa rezonansının frekans aralığı	44
Şekil 4.4 : Yalpa sönümleme nedeniyle azalan yalpa genlikleri	45
Şekil 4.5 : Dalga yönünün parametrik rezonansa olan katkısı.(a) kıçtan; (b) baştan gelen dalga.....	46
Şekil 5.1 : Dalga tepesinin gemi ortasında olduğu durum.	49
Şekil 5.2 : Sintineyi temsil eden parçalı çizgiler arasındaki açının tanımı.	49
Şekil 6.1 : Herbir dalga tepesi için hesaplanan doğrultma kolu eğrileri.....	60
Şekil 6.2 : Hesaplanan doğrultma kollarının interpolasyonu ile oluşturulan yüzey	60
Şekil 6.3 : <i>Wloc</i> değişkeninin gemi boyuna göre konum ve değerleri.	62
Şekil 6.4 : Parametrik yalpa rezonansının zamana bağlı değişimi	64
Şekil 6.5 : Parametrik rezonans koşullarında yalpa hareketinin kararlı durum kısmı.	66
Şekil 6.6 : Parametrik yalpa yokluğunda yalpa hareketi.	66

Şekil 6.7 : Parametrik yalpa ve alabora durumunda yalpa hareketi.....	66
Şekil 8.1 : Kullanılan programlar arasındaki döngünün gösterimi.....	71
Şekil 9.1 : C11 Konteyner gemisi üç boyutlu gösterimi.....	76
Şekil 9.2 : C11 Konteyner gemisi en kesit resmi.....	77
Şekil 9.3 : Dalga Tepesinin Gemi Boyuna Göre Konumlarına Karşılık Gelen GM Değerleri.....	76



GEMİLERİN PARAMETRİK YALPA REZONANSININ 2.NESİL STABİLİTE KURALLARINA GÖRE DEĞERLENDİRİLMESİ

ÖZET

Gemilerin güvenli bir biçimde seyredebilmesi ve taşıdığı personel ile yükün güvenli bir şekilde istenilen yere sevkedebilmesi gereksinimi, gemi inşaatı mühendislerinin gemilerin tasarım aşamasından üretim aşamasına kadar uyması gereken kuralların ortaya çıkmasını sağlamıştır. Böylelikle uluslararası kuruluşlar tarafından gemilerin uyması gereken stabilite kuralları ortaya konulmuştur. Bu kurallar 1969 tarihinden itibaren IMO (International Maritime Organization) A.167 önergesiyle yürürlüğe konulmuştur. Gemi üzerine dışarıdan etkiyen kuvvetlerin de stabilite hesabına katılması amacıyla 1985 yılında A.562 önergesiyle hava kriteri yürürlüğe konulmuştur. 1993 yılında A.749 önergesiyle ilk kez bir araya getirilen bu kurallar, daha sonra MSC (Maritime Safety Committee) tarafından 2008 yılında IS Code (Intact Stability Code) - hasarsız stabilite kuralları olarak 24 metre ve üzeri gemilere uygulanacak şekilde kabul edilmiş ve 1 Temmuz 2010 tarihinden itibaren yürürlüğe konulmuştur. Ancak devam eden süreçte yaşanan kazalar, bu kuralların gemi stabilitesini değerlendirmek için yeterli olmadığı sonucuna varılmasını sağlamış ve ikinci nesil stabilite kurallarının oluşturulması gerektiği fark edilmiştir.

Bu çalışmada IMO tarafından taslak çalışmaları yapılan ikinci nesil yeni nesil stabilite konularından bir tanesi olan parametrik yalpa rezonansı çalışmalarının, mevcut gemiler üzerindeki etkisinin görülebilmesi için bir tasarım ve analiz ortamı oluşturulmuştur. İleride bu parametrik yalpa rezonansı değerlendirmesi yapmak isteyen araştırmacı ve mühendislere yol gösteren bir rehber olabilmesi amacıyla, karşılaşılabilecek zorluklar ve soru işaretlerinin ortadan kaldırabilmesi amaçlanmıştır. Bu kapsamda, güncel taslak kurallar ışığında, parametrik yalpa rezonansı zafiyet kriteri seviyeleri 1 ve 2 detaylı bir şekilde incelenerek adım adım yapılması gerekenler anlatılmıştır.

Bu çalışmanın ilk olarak, ikinci nesil stabilite kuralları ile getirilmesi planlanan parametrik yalpa rezonansı kriteri ve stabilite kurallarının tarihi gelişimi incelenmiştir. Sonrasında, parametrik yalpa rezonansının fiziksel olarak nasıl geliştiği ele alınmıştır. Üçüncü ve dördüncü bölümde parametrik yalpa rezonansı kriterleri ve bu kriterlerin sayısal olarak nasıl çözülebileceği üzerinde durulmuş ve son bölümde parametrik yalpa zafiyet seviyeler içerisinde bulunan kriterlerin çözümleri için uygulama yapılmıştır.



EVALUATION OF PARAMETRIC ROLL RESONANCE OF THE SHIPS ACCORDING TO SECOND GENERATION STABILITY RULES

SUMMARY

The need to safe navigation of ships and secure transportation of its load and its personnel to the targeted destination necessitated the development of rules that shipbuilding engineers have to comply with including at the design stage and production stage. Thus, the stability rules that the vessels must comply with are set forth by international organizations. These rules have been enacted by A.167 resolution of IMO (International Maritime Organization) starting from 1969. The weather criterion was put into force in 1985 with A562 in order to include the external forces acting on the ship in the stability calculation. All these rules were combined under A.749 resolution in 1993 and were later accepted by the MSC (Maritime Safety Committee) in 2008 as IS Code (Intact Stability Code) applicable to ships over 24 meters. A.749 resolution has been put into effect on July 1, 2010. However, the ongoing accidents have led to the conclusion that these rules are not sufficient to assess ship stability and it has been recognized that the second generation stability rules must be established.

The purpose of this study is to establish a design and analysis environment for the parametric roll resonance, one of the second generation next generation stability issues, to be undertaken by IMO as a draft study, to determine the effect on existing ships. It is aimed to remove the difficulties and questions that may be encountered in the future in order to be a guide to researchers and engineers who want to evaluate the parametric roll resonance. In this context, the parametric roll resonance failure criterion levels 1 and 2 are examined in detail in the light of the current draft rules.

As an initial research, historical evolution of the stability rules and the parametric roll resonance phenomenon which are planned to be originated from second generation intact stability rules are analysed. As a further analysis, physical evolution of the parametric rolling resonance phenomenon is examined. In the third and the fourth sections, parametric rolling resonance phenomenon criteria and their numerical resolution are elaborated and in the last section, a case study is given for the solutions of the criteria in parametric rolling vulnerability levels. As a result of the investigations, it could be seen that the rules of 2nd Generation Stability Code are based on operational/performance data whereas intact stability rules are based on experimental and statistical data. In consequence of APL China, MV Aratere and Chicago Express accidents, it was concluded that the parametric roll resonance can damage the cargo, cargo and personnel. In this context, the SLO group was established by the IMO in 2002 and the development of the second-generation stability rules started. The first important studies carried out have been in the SLF 48th session held in 2005. When evaluating the 2nd stability criteria, three types of stability faults have been addressed as restoring arm variation problems, stability under dead ship condition and maneuvering related problems. Parametric roll

resonance is considered within the problem of restoring arm variation among these error types.

As a further analysis, physical evolution of the parametric rolling resonance phenomenon is examined. In the third chapter, definition and development of parametric rolling resonance are discussed. The period of wave encounter with varying speeds of a ship navigating in longitudinal waves is changing. Where the wave encounter period is equal to two times the natural frequency of the ship, a parametric roll resonance can occur.

When the ship is making a roll motion, the amount of restoring moment applied to the ship will be greater because the area under the GZ curve is higher when the roll movement reaches the maximum amplitude towards the starboard / port side if the ship is in the wave trough. When the ship even reaches the keel position, the wave crest is positioned in the midship section and the area under the GZ curve is reduced because the roll period equals twice the wave encounter period. For this reason, the resistance to the restoring moment, which is relatively higher than that encountered in the wave crest, is reduced. The ship starts to roll in the opposite direction to complete the roll movement. At the point where the rolling amplitude is maximum, more restoring moment is applied since the ship will be in the wave trough again. Since this movement is carried out periodically, after each roll movement, the rolling amplitudes start to increase. Therefore the ship is exposed to the parametric roll resonance.

In the fourth chapter, parametric rolling resonance phenomenon criteria and their numerical resolution are elaborated. The solution methods for the vulnerability levels 1 and 2 proposed by IMO for the parametric roll resonance are explained. When calculations for vulnerability criterion 1 are made, the ship's calm water GZ value is first calculated. Later, for the sinusoidal wave form, the wave length value is taken equal to the vessel length and the wave height is taken equal to 0.0167 times the vessel length. After that wave crest is located 10 different position equally and longitudinally placed on the ship. The arithmetic mean is the difference between the maximum and minimum GM values within these 10 values. If the ratio between the GM difference value and the calm water GM value is calculated above the critical value, vulnerability to the parametric roll resonance is considered to exist.

When the level 2 criterion 1 is calculated, GM variability calculations and critical speed calculations are handled. If any one of these two calculations is provided, vulnerability to the parametric roll resonance is considered to exist. The GM variation calculation is the same as the method given by level 1 criterion 1, but the difference is that the wavelength and wave heights vary. There are 16 different wavelengths and wave heights in the proposed method.

Critical speed calculations are based on the comparison of the given critical speed formula with the service speed of the ship.

The level 2 criterion 2 is different from the conventional ship stability calculations. Here, the differential equation, expressed as the Mathieu equation, needs to be solved. For this purpose, assuming that external forces are at negligible level at longitudinal regular waves; acceleration, velocity and moment of inertia must be calculated.

In order to be able to calculate accelerations from these terms, it is necessary to calculate the moment of inertia of the ship and additional water mass moment terms.

For this purpose, these terms are calculated using the empirical formulas defined in the IS Code, if the terms of inertia and additional water mass calculated using numerical methods are not available.

Two different methods have been proposed for roll damping corresponding to the speed term. The first is that the coefficients corresponding to the linear and cubic coefficients of the roll amplitude are calculated before the solution of the differential equation. Another solution is to solve the differential equation by recalculating the equivalent damping coefficient at each solution step.

By using Ikeda's simplified method to calculate the roll damping terms; wave damping, lift damping, friction damping, eddy making damping and bilge keel damping. The values found are normalized and used in the differential equation.

The quasi-static method is used to calculate the restoring arm moment term. With the position of the wave crest shifting along the ship, GZ calculations are made for the condition corresponding to each wave crest position. The calculations are carried out by means of the values read out over the surface created by the cubic interpolation of the values obtained by the rolling angle of 5 degrees between 90 and 90 degrees. In this case, the restoring arm moment is obtained at each of the solution steps of the differential equation as a result of the use of the varying wave crest position as a parameter depending on the roll amplitude value and the wave encounter period in the previous iteration step.

In the seventh chapter, the proposed method for numerical solution of the differential equation is explained. In order to be able to perform calculations using the Runge-Kutta 45 method, it is necessary to reduce the degree of the Mathieu equation, which is in the form of the second ordinary differential equation. How to do this is given in detail.

In the eighth chapter, a description of the solution environment created by the computer softwares used in this study has been made. Geometric hull form and its general characteristics were defined and information was given on how to make panel meshes for stability calculations, which analysis method was used for hydrostatic calculations, and the necessary procedures for solution.

In the last section, a case study is given for the criteria of parametric rolling vulnerability levels. As a result of the work done, the solutions created within the scope of this study are compared with the benchmark results made by IMO and the validation of the code with relatively low differences is ensured.



1. GİRİŞ

Gemilerin güvenli bir biçimde seyredebilmesi ve taşıdığı personel ile yükün güvenli bir şekilde istenilen yere sevkedebilmesi, gemi inşaatı mühendislerinin gemilerin tasarım aşamasından üretim aşamasına kadar uyması gereken kuralların ortaya çıkmasını sağlamıştır. Bu kurallar, tarih boyunca gerçekleşmiş olan kazalar, felaketler ile yaşanan can ve mal kaybının incelenmesiyle ve değerlendirilmesiyle uzun süren tecrübelerle dayanarak oluşturulmuştur. Meydana gelen her kaza sonrasında, mevcut kuralların incelenmesi ile gerekli değişikliklerin yapılması veya kuralın tamamen değiştirilmesi gibi önlemler alınmak zorunda kalınmıştır.

Gemilerin uyması gereken ilk uluslararası stabilite kuralları Rahola'nın yapmış olduğu çalışmalardan yola çıkılarak gerçekleştirilmiştir. Bu kurallar içerisinde gemi üzerine etkileyen dış kuvvet/etkenlerin bulunmaması nedeniyle Uluslararası Denizcilik Örgütü IMO, 1985 yılında hava kriterini yürürlüğe koymuştur. Gemilerin uyması gereken stabilite kuralları, ilk kez 1993 yılında bir araya getirilmiştir. Sonrasında bu kurallar Denizcilik Güvenlik Komitesi MSC tarafından 2008 yılında revize edilerek, hasarsız stabilite kuralları IS Code 2008 olarak 1 Temmuz 2010 yılından itibaren kural koyucular tarafından zorunlu hale getirilmiştir.

Geçmişte yaşanan pek çok kazanın ve bilinen bazı şartların, geminin güvenli bir şekilde seyredebilmesini engelleyebileceği göz önünde bulundurularak, yeni nesil stabilite kurallarının geliştirilmesi gerektiği görülmüştür. Bu nedenle 2. nesil stabilite kurallarının çok yakın bir gelecekte yürürlüğe konması beklenmektedir.

1.1 Tezin Amacı

Bu tezin amacı, IMO tarafından taslak çalışmaları yapılan yeni nesil stabilite konularından bir tanesi olan parametrik yalpa rezonansı çalışmalarının, mevcut gemiler üzerindeki etkisinin görülebilmesi için bir tasarım ve analiz ortamı oluşturulmasıdır. İleride bu parametrik yalpa rezonansı değerlendirmesi yapmak isteyen araştırmacı ve mühendisler için yol gösteren bir rehber olabilmesi amacıyla,

karşılaşılabilecek zorluklar ve soru işaretlerinin ortadan kaldırabilmesi amaçlanmıştır. Bu kapsamda, güncel taslak kurallar ışığında, parametrik yalpa rezonansı zafiyet kriteri seviyeleri 1 ve 2 detaylı bir şekilde incelenerek adım adım yapılması gerekenler anlatılmıştır.

1.2 Literatür Araştırması

IMO tarafından yayımlanan hasarsız stabilite kuralları (IS Code-2008) incelenirken, deniz yüzeyinin düz olduğu varsayımı yapılarak hesaplamalar yapılmaktadır. Fakat gemi dalgalarının gemi stabilitesine olan etkisinin varlığı Fransız mühendisler Arndt ve Roden[1] ile Wendel[2] tarafından 19.yüzyılın sonlarında tartışılmıştır. 1920’lerde Doyère, dalgaların gemi stabilitesini nasıl etkilediğini açıklamış ve bu etkinin bulunması için çözüm önermiştir. 1950 sonrasında, stabil olduğu düşünülen bir kaç geminin batmasıyla, Doyère’nin yapmış olduğu çalışmaların doğru olduğu değerlendirilmiştir.

İlk etapta, yandan gelen dalgaların (dalga tepesinin gemiye dik olduğu dalgalar – paralel dalga) gemi için en tehlikeli durumu oluşturduğu düşünülmüştür. Gerçekten de paralel dalgalar büyük meyil açılarına neden olur; gemi üzerinde bulunan yükler gevşer ve stabiliteyi tehlikeye sokar. Bununla birlikte, dalgalarda gelişen ağırlık ve merkezkaç kuvvetleri dalga yüzeyine dik olarak gelişir. Bu nedenle, büyük ve kırıcı dalgalar haricinde düzgün yüklenmiş bir gemi paralel dalgalarda devrilmez. Gemiler baştan gelen dalgalar (geminin karşısından gelen dalgalar) ile kıçtan gelen (geminin hareket yönünde ilerleyen) dalgalar ile devrilebilirler. Baştan ve kıçtan gelen dalgaların yanı sıra, omuzluklardan gelen dalgalar da gemiyi devirici etkiye sahip olabilirler. Bu konu, 1951 yılının 30-31 Aralık gecesi Irene Oldendorff isimli geminin batması sonucu öğrenildi. Kurt Wendel olayı inceleyerek bu felaketin, dalgadaki doğrultucu kol değişimden kaynaklandığı sonucuna varmıştır. Dalgıçların batığı yaralanmamış olarak gözlemlemesi, Wendel’in hipotezini doğrulamıştır.

Kerwin 1955 yılında, dalgadaki GM değişiminin gemi stabilitesine olan etkilerinin basit bir modelle analiz etmiştir[3]. Onun araştırmaları Delft Üniversitesi’nde bu konu ile alakalı olarak yapılan deneyleri de kapsamaktadır. Ancak ekipman yetersizliğinden ötürü Kerwin çalışmalarını doğrulayamamıştır. Kerwin’in yapmış olduğu hesapların doğruluğunun ispatı için Hamburg’daki araştırmacılar Arndt ve

Roden model çekme tankında, Wenden ise kendinden tahrikli gemi modelleri ile gölde deneyler yapmışlardır. Diğer deniz facialarından sonra kaza yerlerinde yapılan incelemeler, geminin dalga tepesindeyken doğrultucu kolunun önemli miktarda azaldığını, hatta bazen negatif değerlere ulaştığını göstermektedir.

Paulling “Boyuna dalgalarda geminin enine stabilitesi” konusunu araştırmıştır[4].

Storch 13 adet büyük yengeç avlama teknesinin batma olayını analiz etmiş ve bir olayda, dalga tepesindeki doğrultucu kolun negatif olması gerektiği sonucuna varırken; farklı iki olayda ise önemli oranda azaldığını belirlemiştir[5].

Lindemann ve Skodemal Finneagle isimli gemi faciasını dalgalarındaki stabilitenin azalmasına bağlamışlardır[6]. 1 Ekim 1980 tarihinde Orkney Adaları yakınlarında gemi ile aynı yönde ilerleyen ve kıçtan gelen dalgalarla seyretmekte olan Finneagle Ro-Ro gemisi, üç adet büyük rulo yükünün yuvarlanmasıyla 40 derece meyletmıştır. Bu büyük açılı meyletme durumu, bir adet konteynerin serbest kalarak çatlamasına sebep olmuş, konteynerden sızan trimetilfosfat ile bir arabanın akümülatörünün asidi tepkimeye girmiş ve bu olaydan ötürü çıkan yangın geminin terkedilmesine sebep olmuştur.

Chantrel bir açıkdeniz hizmet şamandırasının büyük genlikli hareketlerini incelemiş, by hareketleri dalga özellerindeki değişimden oluşan ve parametrik rezonans olayına bağlamıştır[7]. Trimaran modellerine ait parametrik rezonans olayı ile ilgili deneysel ve teorik çalışmalar, University College of London’da Zucker Fellows kontrolünde 2000 yılında lisansüstü derslerinde incelenmiştir.

Parametrik yalpa rezonansının matematiksel ifadesi üzerindeki çalışmalar, Fransız Mathieu Emile-Léonard tarafından 1868 yılında eliptik sınırlı bir zarın titreşim modlarını araştırırken kullanılmıştır. Bu denklem, Grim ve Wendel tarafından yapılan ve geminin doğrultma momentinin stabiliteye olan etkisinin gösterildiği çalışmada Denklem 1.1 de olduğu gibi modellenmiştir. Bu denklem Mathieu denklemi olarak da bilinmektedir.

$$I\ddot{\phi} + \Delta(GM + \delta GM \cos(\omega_w t))\phi = 0 \quad (1.1)$$

Geçerli stabilite kriterlerini sağlamasına rağmen birçok geminin devrilmesi gemi dizaynında ve operasyonunda önemli değişiklikler yapılmasına neden olmuştur. Son on yılda ticari gemilerin dizaynında ve operasyonunda yapılan bu değişiklikler ve bu

değişikliklerin gemi stabilitesine etkisi IMO alt komitesi olan Stabilité, Yükleme Hatları ve Balıkçı Gemilerinin Emniyeti (SLF)'yi ikinci nesil hasarsız stabilite kuralları üzerinde çalışmalar yapmaya teşvik etmiştir[14]. İkinci nesil hasarsız stabilite kriterleri hakkındaki çalışmalar 2002 yılında IMO SLF alt komitesi bünyesinde hasarsız stabilite çalışma grubunun kurulmasıyla başlamıştır. Ancak bazı sebeplerden dolayı 2005 yılına kadar somut bir çalışma yapılamamıştır. 2005 yılında SLF'nin 48. Toplantısıyla beraber ikinci nesil hasarsız stabilite kriterleri üzerindeki asıl çalışmalar başlamıştır. Bu toplantıda ikinci nesil hasarsız stabilite kriterlerinin üç önemli stabilite zafiyet modunu temel alması gerektiği kararına varılmıştır. Bunlardan ilki doğrultucu moment kolu değişimi problemleri, ikincisi ölü gemi durumunda stabilite ve üçüncüsü de dalgalı durumlardaki manevra problemleridir.

Bu çalışmalar yapıldığı sırada Amerikan Loydu ABS (American Bureau of Shipping) 2004 yılında APL China gemisinin devrilmesinin ardından konteynır gemileri için parametrik yalpa değerlendirmesi adlı bir kılavuz çıkarmıştır. Bu kılavuzda konteynır gemileri için iki aşamalı bir değerlendirme hazırlanmıştır[11]. Yaşanan bu tecrübe ve yapılan bu çalışmalar ikinci nesil hasarsız stabilite kriterlerinin geliştirilmesinde önemli bir rol oynamıştır.

Yapılan bu çok aşamalı yaklaşım çalışması ikinci nesil kriterler için bir taslak oluşturmuş ve zafiyet kriteri fikrini ortaya çıkarmıştır. Belenky, Kat ve Umeda ABS'in hazırladığı çok aşamalı yaklaşıma dayanarak ikinci nesil hasarsız stabilite kriterleri için düşünülen bütün dinamik stabilite zafiyetlerinin yer aldığı taslağı hazırlamıştır[20]. Bu taslakta dört önemli stabilite zafiyet modu belirlenmiştir. Bunlar; ölü gemi durumu, parametrik yalpa, ani stabilite kaybı ve dalga tepesinde dönme ve devrilme (broaching) olayıdır. Bu yapıda IMO kapsamındaki tüm gemilere 2008 IS kod bölüm A'nın 2.2 ve 2.3 kısımları uygulanmaktadır. Ayrıca her gemi zafiyet kriteri seviye 1 uygulanarak ani stabilite kaybı, parametrik yalpa ve broaching durumlarındaki hasarlanma olasılıkları kontrol edilmektedir. Bir hasarlanma olasılığı tespit edilirse zafiyet kriteri seviye 2 uygulanmaktadır ve gerektiğinde bunu takiben doğrudan stabilite değerlendirmesi uygulanmaktadır.

Herhangi bir stabilite zafiyet modundaki doğrudan stabilite değerlendirmesi yüksek seviyede bir risk gösteriyorsa bayrak yönetiminin gereklerine bağlı olarak gemi özel operasyon kılavuzu geliştirilmektedir. Eğer herhangi bir stabilite zafiyet modu için hasarlanabilirlik tespit edilmezse veya hasarlanma olasılığı aşırı değil ise herhangi ek

bir işlem yapmaya gerek duyulmamaktadır[20]. İkinci nesil hasarsız stabilite kriterleri için taslak belirlendikten sonra çalışma grubundaki her üye ülke tarafından çalışmalar hazırlanmış ve teklifler sunulmuştur. Bu hazırlanan çalışmalar sayesinde kriterler geliştirilmiş ve yapılan örneklemelerle kriterlerin doğruluğu tespit edilmeye çalışılmıştır. Çalışma grubu üye ülkelerinden Japonya'nın hazırlayıp 2010 yılında SLF 53. Toplantısında sunduğu teklifte parametrik yalpa için seviye 1 zafiyet kriteri kapsamında çalışmalar yapmış ve bu çalışmalarını örnek gemilere uygulayarak bu gemilerin kriteri sağlayıp sağlamadığını gözlemlemiştir[22]. Aynı toplantıda Almanya tarafından sunulan çalışmada da parametrik yalpa seviye 1 zafiyet kriteri kapsamında çalışmalar yapılmış ve seçilen gemiler için örneklemeler yapılmıştır[23].

Shin, Belenky, Pauling, Weems ve Lin 2004 yılında ABS'in konteynır gemileri için parametrik yalpa değerlendirmesi kapsamında yaptığı çalışmada belli gemiler için uygulamalar yapmışlardır[14]. Bulian ve Francuschetto 2010 yılında İtalya adına sunduğu teklifte parametrik yalpa seviye 1 zafiyet kriteri için daha detaylı bir analiz yapmıştır[24]. İkinci nesil hasarsız stabilite kriterinin yapılan çalışmalarında örnek gemiler kullanılarak önemli değerlendirme gerçekleştirilmiş olmasına rağmen, tartışmalar sırasında bu çalışmaların henüz kriter olarak adlandırılacak bir olgunluğa ulaşmadığı görülmüştür. Önerilen kriterlerde çelişen veya çakışan noktaların olması ve birçok durumda olayın lineer olmayan karakterde bulunması çözümü daha karmaşık hale getirmektedir. Aynı konuda, farklı delegasyonlar tarafından önerilen taslakların arasında ortak olan veya çelişen durumların bulunması bu şekilde açıklanabilir. Bu nedenle, daha fazla sayıda ve türde gemi üzerinde uygulama yapılması gerekliliği ortak fikri desteklenmiştir[25].



2. STABİLİTE KURALLARINDAKİ GELİŞMELER

2.1 Giriş

Hava kriterlerinin erken versiyonlarının da geliştirildiği uluslararası stabilite kriterlerinin IMO tarafından yürürlüğe sokulan 2008 IS Code temelini oluşturan birinci nesil stabilite kriterlerinin Rahola'nın 1939 yılında yapmış olduğu öncü çalışmalarına kadar takip edilebilir. Gelişim tarihi ve bu kriterlerin arka planı Kobylinski ve Kastner[8] tarafından 2003 yılında açıklanmıştır; bu kriterlerin kökeninin bir özeti, Uluslararası Stabilite Kurallarının Açıklayıcı Notlarının (MSC.1 / Circ.12811) 3. bölümünde de mevcuttur.

Birinci nesil stabilite kriterleri ilk olarak 1993 yılında IMO tarafından Res. A.167(ES.IV) “100 metreden kısa yolcu ve kargo gemilerinin stabilitesi ile ilgili tavsiyeler” ve 1985 yılında yürürlüğe sokulan A.562(14) “24 metre ve üzerindeki yolcu ve kargo gemilerinin stabilitesi için şiddetli rüzgar ve yalpa kriteri” de dikkate alınarak Res. A.749(18)'de yazılmıştır. Bu kriterler 2008 IS Code – Hasarsız Stabilite Kriterine yazılmıştır ve 2010 yılında Uluslararası Yük Hattı sözleşmesi ve SOLAS'ın bir parçası olarak etkili olmuştur. (IMO Res. MSC.269(85) ve MSC.270(85)).

2008 IS Kodu'nun A Bölümündeki kriterler, hava kriteri hariç, geleneksel bir deneysel / istatistiksel yaklaşıma dayanmaktadır. Yolcu gemileri için dönüş ve yolcuların bir tarafta toplanmasıyla oluşan yalpa hareketine ilişkin kriter gemi yalpa hareketinin fizik tabanlı bir matematiksel modeli kullanılarak formüle edilmiştir.

Hava kriteri düzenli dalgalar ve sabit bir rüzgar tarafından uyarıldıktan sonra ani bir rüzgarın etkisi altındaki gemi yalpa hareketinin bir matematiksel modelini temel alır. Hava kriterinin parametreleri , kullanılan matematiksel modelin varsayımlarına ek olarak, hava kriterlerinin uygulanabilirliğini sınırlayan örnek bir gemi popülasyonu kullanılarak ayarlanmıştır. Buna karşılık IMO tarafından hava kriteri için alternatif bir deneysel yaklaşım benimsenmiştir. (cf. MSC.1/Circ.1200 ve MSC.1/Circ.1227).

Birinci nesil stabilite kurallarının temelini oluşturan referans gemilerin karakteristikleri ve kullanım şekillerine nazaran kayda değer derecede farklılık gösteren gemilerin ortaya çıkışı, geçerli kriterlerin kullanılması ile yeterli stabilitenin sağlandığı varsayımını zayıflatmıştır. Son 15 yıl içerisindeki bir dizi stabilite kaynaklı APL China, M/V Aratere, ve Chicago Express gibi kazalar stabilite kriterlerinin yeniden değerlendirilmesi gerektiğini açıkça göstermiştir.



Şekil 2.1 : APL China gemisine ait kaza sonrası çekilmiş bir görüntü.

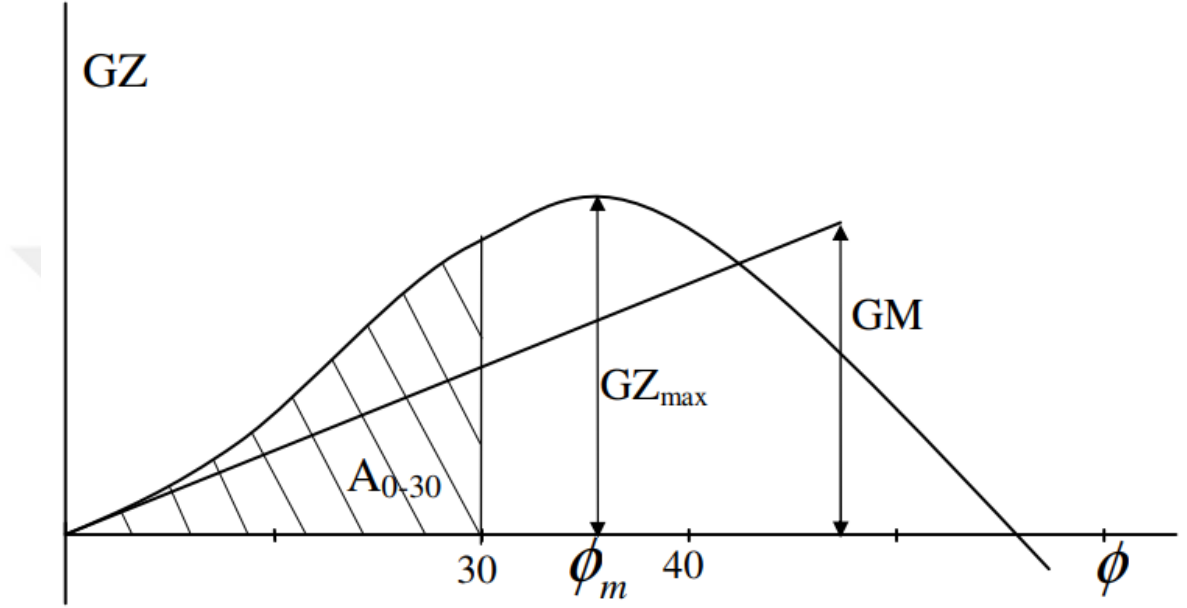
2.2 Mevcut Hasarsız Stabilite Kuralları

IMO 1993 yılında gemilere uygulanan stabilite kriterlerini A749(18) önergesinde toplayarak yürürlüğe koymuş ve daha önce konuyla ilgili yayınladığı önermeleri yürürlükten kaldırmıştır. Boyu 24 metre ve 24 metreden daha büyük gemiler için uygulanacak stabilite kriterleri aşağıdaki gibidir.

2.2.1 Yolcu ve yük gemileri uygulanmakta olan kriterler

1. $\theta=30^\circ$ 'ye kadar doğrultucu moment kolu eğrisi altında kalan alan değeri 0,055 m.radyan'dan az, $\theta=40^\circ$ veya su alma açısına kadar hangisi daha küçükse, doğrultucu moment kolu eğrisi altında kalan alan değeri 0,09 m.radyan'dan az olmamalıdır. $\theta=30^\circ$ 'den $\theta=40^\circ$ veya su alma açısına kadar, hangisi daha küçükse, doğrultucu moment kolu eğrisi altında kalan alan değeri 0,03 m.radyan'dan az olmamalıdır.

2. Doğrultucu moment kolu değeri, $\theta=30^\circ$ veya daha büyük bir açıda minimum 0,2 m olmalıdır.
3. Maksimum doğrultucu moment kolu değeri, $\theta=25^\circ$ 'den az tercihen $\theta=30^\circ$ 'den daha büyük bir açıda olmalıdır.
4. Başlangıç metasantr yüksekliği 0,15 m'den az olmamalıdır.



Şekil 2.2 : IMO hasarsız stabilite kurallarını gösteren grafik[29].

2.2.2 Yolcu gemilerinde uygulanmakta olan kriterler

5. Yolcu gemilerinde ilave olarak yolcuların bir tarafta toplanmalarından dolayı oluşacak meyil açısı $\theta=10^\circ$ 'yi geçmemelidir. Yolcuların bir tarafta toplanmalarında, oluşacak yatırıcı momentin hesabı aşağıdaki kabullere göre yapılacaktır:

a) Yolcuların her birinin ağırlığı 75 kg alınabilir ancak bu değer 60 kg'dan daha az alınamaz. Bu değere ek olarak yolcuların bagajlarında yetkili idarenin öngördüğü oranda eklenir.

b) Yolcuların ağırlık merkezleri aşağıda ifade edildiği gibi kabul edilmelidir: Ayaktaki yolcular için bulundukları güverteden itibaren 1 m. Yükseklikte alınmalıdır. Gerekmesi durumunda yolcuların bulundukları güvertenin sehim ve şiyer değerleri de dikkate alınabilir. Oturan yolcular için oturdukları yerden itibaren 0,3 m yükseklikte alınmalıdır.

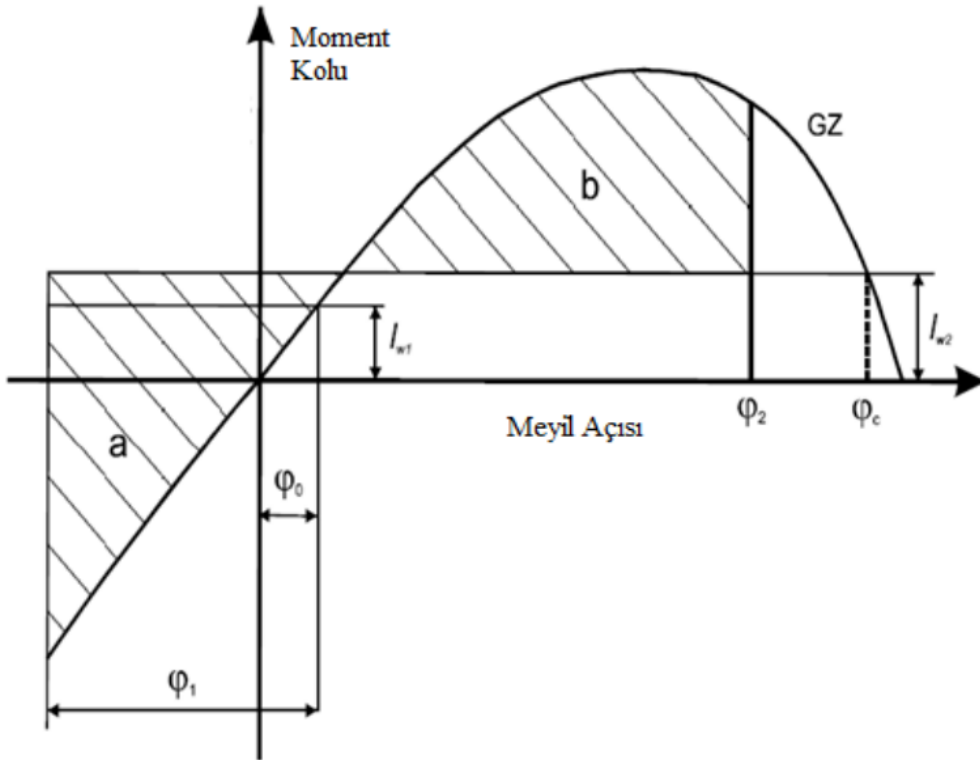
6. Yolcu gemilerinde ilave olarak geminin dönmesinden dolayı oluşacak meyil açısı $\theta=10^\circ$ 'yi geçmemelidir.

2.2.3 Hava kriteri

Bu kriter 1 maddesinde verilen kriterlere ek olarak, 24 metre ve daha büyük boydaki gemilere uygulanır. Gemiler, yalpa ve rüzgârın bileşik etkisi altında tüm yükleme durumlarında bu kriterin gereklerini karşılamalıdır. Şekil 2.3'de gösterilen “b” alanı “a” alanına eşit veya daha büyük olmalıdır.

Gemiler, yalpa ve rüzgarın bileşik etkisi altında tüm yükleme durumlarında bu kriterin gereklerini karşılamalıdır. Kritere göre:

1. Şekil 2.3'te gösterilen “b” alanı “a” alanına eşit veya daha büyük olmalıdır.
2. Durağan rüzgar etkisi altında geminin yaptığı meyil açısı 16° veya güverte kenarı suya girme açısının % 80'inden (hangisi küçükse) büyük olmamalıdır.



Şekil 2.3 : Hava kriterinde kullanılan değerler.[30]

Şekilde; b alanı, ϕ_2 ile sınırlıdır. Bu açı 50° veya tekne, üst yapıda veya güverte binalarında su geçirmez biçimde kapatılamayan açıklıkların suya girme açısı ϕ_f

değerlerinden hangisi küçükse o alınır. φ_c rüzgar sağanağı moment kolu ve GZ eğrisinin ikinci kesişim noktasındaki açıdır. Gemi, merkez hattına dik olarak etkiyen ve düzgün rüzgar yatırma koluna (l_{w1}) neden olan düzgün rüzgar basıncına maruzdur. Durağan rüzgar nedeniyle oluşan yatırıcı moment kolu (l_{w1}) metre cinsinden aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$l_{w1} = \frac{PAZ}{1000g\Delta} \quad (2.1)$$

Burada; P rüzgar basıncı değeridir ve 504 Pa olarak alınır. Gemilerin korumalı sularda seyir yapması durumunda yetkili idarenin onayıyla bu değer azaltılabilir. A metre kare cinsinden su hattı alanının üstünde gemi ve güverte üzerindeki yükün projeksiyon alanıdır. Z metre cinsinden, A alanının alan merkezi ile geminin su altı projeksiyon alan merkezi veya ortalama draft değerinin yarısı arasındaki mesafedir. Δ ton olarak deplasman kütlesi ve g yerçekimi ivmesidir. Yerçekimi ivmesinin değeri 9.81 m/s^2 'dir. Rüzgar sağanağı moment kolu ise (l_{w2}) aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır:

$$l_{w2} = 1.5l_{w1} \quad (2.2)$$

Kural, durağan rüzgar etkisi altında geminin yaptığı meyil açısını φ_0 olarak tanımlar ve ani esen rüzgarın gemiyi φ_0 statik açısında rüzgara doğru φ_1 açısına kadar meyil ettirdiğini varsayar. Geminin rüzgar tarafındaki yalpa açısı φ_1 aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$\varphi_1 = 109kX_1X_2\sqrt{rs} \quad (2.3)$$

Burada; X_1 Çizelge 2.1'den elde edilen geminin B/T oranına göre belirlenen sönüm katsayısıdır. X_2 ise çizelge 2.2'den elde edilen geminin C_B oranına göre belirlenen sönüm katsayısıdır [4].

Çizelge 2.1 : X_1 katsayısı [4].

B/T	≤2.4	2.5	2.6	2.7	2.8	2.9	3	3.1	3.2	3.4	≥3.5
X_1	1	0.98	0.96	0.95	0.93	0.91	0.9	0.88	0.86	0.82	0.8

Çizelge 2.2 : X_2 katsayısı [4].

C_B	≤0.45	0.5	0.55	0.6	0.65	≥0.70
X_2	0.75	0.82	0.89	0.95	0.97	1

k katsayısının kullanımı ile IMO kuralları stabilitedeki sönüm etkisini dolaylı olarak hesaba katmış olur. Daha açık bir şekilde belirtmek gerekirse, bu durumda kural, keskin sintine dönümlerinin yalpa omurgalarının ve lama omurgalarının yalpa genliğini düşürdüğünü kabul eder. Statik bir açıdan rüzgara doğru meyleden bir geminin ani bir rüzgara maruz kaldığı kabul edilirse, dinamik etkiler şiddetli bir şekilde ortaya çıkmaya başlar [1]. k katsayısı yuvarlak karinalı ve lama ve yalpa omurgasız gemiler için 1.0, yuvarlak karinalı olmayan gemiler için 0.7 alınmalıdır. Yuvarlak karinalı ve lama ve/veya yalpa omurgalı gemiler için ise Çizelge 2.3'den elde edilir.

Çizelge 2.3 : k katsayısı [4].

(Ak100 / LB)	0.00	1.00	1.50	2.00	2.50	3.00	3.50	≥ 4.0
k	0.00	1.00	0.95	0.88	0.79	0.74	0.72	0.70

Burada; A_k metre kare cinsinden yalpa omurgalarının toplam alanı veya lama omurganın projeksiyon alanı, her ikisinin bulunması durumunda bu alanların toplam değeridir. L ve B sırasıyla metre cinsinden geminin su hattı boyu ve kalıp genişliğidir.

Denklem 2.3'de verilen, rüzgar tarafındaki yalpa açısı ϕ_1 'i hesaplamak için gerekli r, efektif dalga eğimi katsayısı aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$r = 10.73 \pm 0.6 \frac{OG}{T} \quad (2.4)$$

Burada; OG metre cinsinden geminin ağırlık merkezi ile su hattı arasındaki mesafedir ve yukarı yönde pozitif kabul edilir. T ise metre cinsinden geminin ortalama kalıp değeridir. Denklem 2.3'de verilen s, Çizelge 2.4'den elde edilen dalga dikliği katsayısı olup yalpa periyodu T_1 'in bir fonksiyonudur. Yine kurala göre T_1 saniye cinsinden aşağıdaki formül yardımıyla hesaplanır:

$$T_1 = \frac{2CB}{\sqrt{GM}} \quad (2.5)$$

Burada; GM metre cinsinden serbest su yüzeyi düzeltilmesi yapılmış metasantr yüksekliğidir. C değeri ise aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$C = 0.373 + 0.023 \frac{B}{T} - 0.043 \frac{L}{100} \quad (2.6)$$

Çizelge 2.4 : s katsayısı [4].

T_1	≤ 6	7	8	12	14	16	18	≥ 20
s	0.1	0.098	0.093	0.065	0.053	0.044	0.038	0.035

Çizelgelerdeki ara değerler lineer interpolasyonla elde edilmelidir [4].



3. IMO İKİNCİ NESİL STABİLİTE KRİTERLERİ

İkinci nesil stabilite kurallarının geliştirilmesi 2002 yılında IMO'nun Stabilite, Yükleme Hattı ve Balıkçı Gemileri Güvenliği - SLF grubunun yeniden kurulması ile başlamıştır. Ancak, esasen stabilite kurallarının düzeltmelerinin onaya sunulmasının önceliği nedeniyle, ikinci nesil stabilite kuralları üzerindeki gerçek çalışma, 2005'te yapılan SLF'nin 48'inci seansına kadar tam anlamıyla başlamamıştır. Çalışma grubu, ikinci nesil stabilite kurallarının performans tabanlı olması ve şu üç stabilite hatası tipine değinmesi gerektiğine karar vermiştir [9]:

- Parametrik yalpa ve stabilitenin tam kaybı gibi doğrultma kolu varyasyon problemleri,
- SOLAS regülasyonu II-1/3-8'de tanımlandığı gibi boş gemi durumunda stabilite ve
- Devrilme gibi dalgalı durumda manevrayla alakalı problemler.

2008 Stabilite kurallarının girişinde, uzun vadeli geliştirmenin yönünü belirleyen, benzer bir formülasyon mevcuttu. Ancak doğrultma kolu varyasyon problemi, parametrik yalpa ve tam stabilite kaybı türlerinde iki ayrı problem olarak değerlendirilmiştir.

Bu ilk gelişme sırasında, ikinci nesil kriterlerin, stabilite hatasına yol açan belirli fenomenlerin fiziğine dayandırılması gerektiği konusunda genel bir anlaşma vardı. Yeni gemiler, yalnızca istatistiksel kriterler ve regresyon temelli yöntemlere güvenilir şekilde bağlı olamayacak tasarım ve çalışma tiplerine sahiplerdir. Ayrıca, risk analizi yöntemleri daha fazla kabul gördükleri ve diğer endüstrilerde standart araçlar haline geldiklerinden, yeni kriterleri stabilite hatalarına ilişkin diğer ölçütlerle ilişkilendirmek konusunda genel bir görüş birliği vardı.

Bu değerlendirmeler, SLF 50/4/4'te açıklanan ve 2007 yılının Mayıs ayında yapılan SLF'nin 50. oturumunda tartışılan ikinci nesil güvenilir stabilite kriterleri için çerçevenin oluşturulmasına yol açmıştır.

2007 yılına kadar, denizcilik sektöründe dinamik stabilite ile ilgili bazı konuların nasıl ele alınacağı konusunda bir takım deneyimler vardı. APL China[10] gemisinde parametrik yalpa kazasının ardından, American Bureau of Shipping (ABS), konteyner gemiler için parametrik yalpa değerlendirmesi için bir kılavuz yayınladı[11]. Kılavuz çok katmanlı bir değerlendirme prosedürüne dayanıyordu. İlk seviye zafiyet ölçütleri, düzenli dalgalardaki metasantr yüksekliğinin değerlendirilmesi ve Mathieu denklemi üzerine inşa edilmiştir. Bu kriteri geçen geminin parametrik yalpaya duyarlı olduğu tespit edildiğinde, daha karmaşık bir kriter uygulandı. Bu zafiyet kriteri, dalgalardaki tam doğrultma kolu eğrisinin hesaplanmasını ve yalpa denkleminin sayısal integrasyonunu içerir.

Aynı zamanda, Alman Loydu'nun çalışması, gelişmiş sayısal kod olan GL Simbel kullanılarak sayısal değerlendirme prosedürlerine odaklandı[12]. Ayrıca, Alman Loydu, parametrik yalpadan kaçınmak için gemiye özel operasyonel rehberliğin hazırlanmasına odaklanmıştır[13].

Klas kuruluşlarının çabalarının yanı sıra, parametrik yalpa konusunda ekip farkındalığını artırmak için eğitim programlarının geliştirilmesinde önemli ilerlemeler kaydedilmiştir. Herbert Engineering Corporation tarafından üretilen bir eğitim videosu, bu etkinliğin başarılı bir örneğidir.

Bu analizlerden edinilen deneyimler, gereksiz işlerden kaçınmanın bir yolu olarak ikinci nesil hasarsız stabilite kriterlerinin geliştirilmesi için çok aşamalı bir yaklaşımın uygulanması gerektiği anlayışına yol açmıştır. Bunun ışığında, güvenlik açığı kriteri ilk olarak Belenky ve arkadaşları tarafından 2008 yılında incelenmiştir[14]. Makale ayrıca, göz önünde bulundurulmuş dinamik stabilite zafiyet modlarının fiziksel arka planı hakkında geniş bir inceleme yapmıştır.

2005 yılında, Japonya Gemi İnşaatı ve Deniz Mühendisleri Derneği (JASNAOE), IMO Yeni Nesil Stabilite Kriterleri (SCAPE Komitesi) için Riskin Azaltılması için Tahmin Yöntemleri üzerine bir Stratejik Araştırma Komitesi kurdu. Bu programın sonucu JASNAOE oturumlarında rapor edilmiş ve diğer sonuçlar Osaka Colloquium'da 2008 yılında Ikeda tarafından İngilizce olarak bildirilmiştir[15]. Bu arada, ikinci nesil stabilite çalışma gruplarındaki gelişmeler, “kritik dalga grupları” olarak adlandırılan yaklaşımın artan düşüncesi ve pratik formülasyonundan etkilenmiştir. Bu, deterministik ve olasılıksal bakış açıları arasında pratik bir arayüz

sağlayan Avrupa SAFEDOR projesi sırasında olasılıksal hasarsız stabilite değerlendirmesi için kullanıldı[16]. SNAME, amacı dinamik stabilite alanındaki gelişmeleri ayrıntılı olarak gözden geçirmek olan bir Dinamik Stabilite Görev Grubu kurdu.

Zafiyet kriterleri, 1. ve 2. Uluslararası Gemi Tasarımında Dinamik Stabilite Değerlendirmesi (DSCSD) çalışmalarıdır[17].

İkinci nesil hasarsız stabilite kriterlerinin geliştirilmesi, 10. Uluslararası Gemi ve Okyanus Taşıtları İstikrarı Konferansı'nda ve 11. ve 12. Uluslararası Gemi stabilite Atölye Çalışmaları'nda yoğun bir şekilde tartışılmıştır[18-20].

3.1 Toplam Stabilite Kaybı

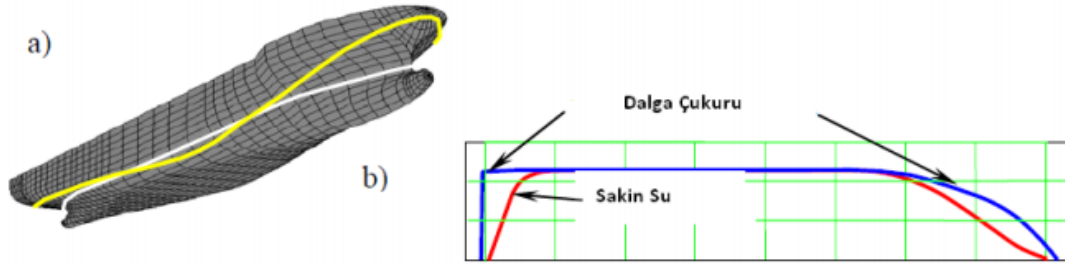
3.1.1 Dalgalarda doğrultma kolu değişimi

Bir gemi boyuna dalgalara girdiğinde, gövdenin suyun altında kalan kısmı değişir. Bu değişiklikler; dalganın uzunluğu, geminin uzunluğu ile karşılaştırılabilir olduğunda önemlidir. Birçok gemi için, pruvanın üst kısmı genellikle aldığı flare şeklinden dolayı geniştir. Bu flare, püskürtme ve güverte ıslanmasına karşı koruma sağlarken güverteye kargo yükleme olanağı da sağlar. Pruvanın üst kısmı kısmen suya batarsa, bu yay şeklindeki kısım su düzlemini daha geniş yapar. Gövdenin kış bölümünün üst kısmı daha geniş olabilir. Kargo yükleme hususları genellikle arka tarafın geniş olmasını zorunlu kılar. Bu nedenle, kış bölümünün üst kısmı suyun altında kalırsa su düzleminin arka tarafı da artar. Pruva ve kış bölümlerinin aksine, çoğu geminin orta bölümünün kenarları duvarlarla çevrilidir. Bu özellikler, su düzlemi genişliğinde, çekim değişimleriyle çok az değişikliğin meydana geldiği anlamına gelir. Geminin ortası dalga çukuruna denk geldiğinde, orta bölümde su çekimi düşük olur ancak gövdenin bu bölgede duvarlı olması nedeniyle, küçük bir su düzlemi değişimi de söz konusu olur. Sonuç olarak, Şekil 3.1 ile görüldüğü gibi dalga çukuru orta bölüme denk gelirse, tüm su hattı düzlem alanı artar.

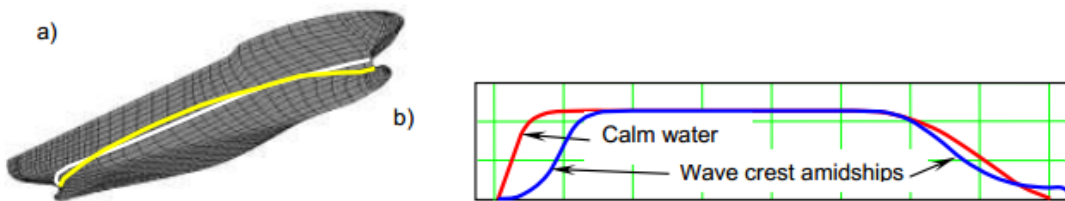
Dalغانın tepe kısmı geminin ortasına denk gelirse, durum önemli ölçüde değişir (Şekil 3.2). Baş bölgenin su altında kalan kısmı, özellikle su hattı çevresinde genellikle oldukça dardır. Bir balblı pruva için bile, flare şeklindeki kısma göre daha dardır. Bunun nedeni direncin değerlendirilmesidir. Gemi ne kadar hızlı olursa, pruvanın su altında kalan bölümünün o kadar dar olması gerekir. Dalga tepesi

geminin ortasına gelirse ve dalganın bir gemi uzunluğuna benzer bir uzunluğu varsa, dalga çukuru pruva bölümünün etrafında yer alır. Bu, dalga çukurunu pruvada oldukça sık hale getirir. Sonuç olarak, bu bölgede su düzlemi çok dar hale gelir. Kıç bölümünün su altında kalan kısmı da çok dardır. Ana tasarım düşüncesi, iticilerin gemiye etkili şekilde güç vermesini sağlamaktır. Enerji verimliliğinin göz önünde bulundurulması, bir tasarımcıyı daha sık ve daha geniş kıç tasarımına yönlendirir. Dalga tepesi geminin orta kısmına gelirse kıç kısmının yanında başka bir dalga çukuru var demektir.

Kıçtaki dalga çukuru sıklaşır, bu da su düzlemini kıç kısımda çok daha dar hale getirir. Daha önce de belirtildiği gibi, geminin orta bölümü tipik olarak daha çok duvarlıdır, bu yüzden su düzlemini pek etkilemez. Şekil 3.2(b), genel su düzleminin alanının azaldığı, dalga tepesinin orta kısma geldiğinde oluşan etkileri göstermektedir.



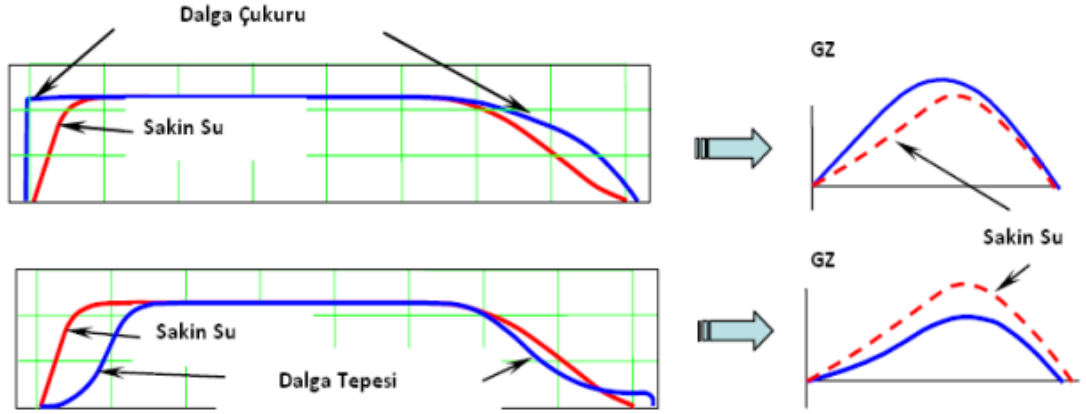
Şekil 3.1 : Gemi dalga çukurları durumunda gemi gövde geometrisindeki değişiklikler (a) 3 boyutlu görünüm ve (b) su hattı



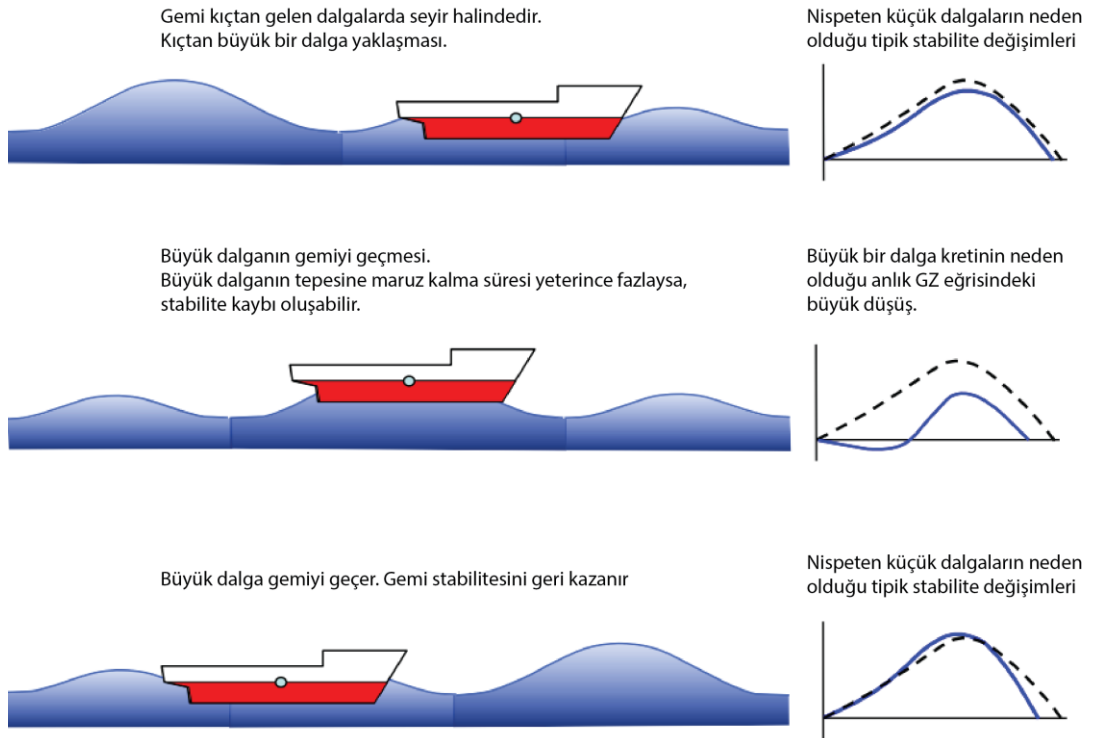
Şekil 3.1 : Gemi dalga tepesi durumunda gemi gövde geometrisindeki değişiklikler (a) 3 boyutlu görünüm ve (b) su hattı [26].

Su hattı düzlemi alanı, gemi hidrostatiklerinden iyi bilinen gemi dengesi üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Su düzlemi alanı azalırsa, Şekil 3.3 ile görülen doğrultma kolu (GZ) eğrisinin alanı da azalır. Dalgalardaki denge değişimi, yukarıda incelendiği gibi, toplam stabilite kaybı olarak bilinen denge arızası modunun fiziksel dayanağıdır. Toplam stabilite kaybının dinamikleri parametrik yalpadan farklıdır, fakat aynı zamanda su hattı düzlemi değişikliklerinin şiddeti ve süresi ile de

yakından ilgilidir. Tam stabilite kaybının neden olduğu stabilite kaybının gelişimi için olası bir senaryo Şekil 3.4 ile gösterilmiştir.



Şekil 3.2 : Dalga çukuru ve dalga tepesi durumunda su hattı eğimine bağlı olarak stabilite değişimi.



Şekil 3.3 : Teorik toplam stabilite kaybının oluşması için olası bir senaryo[26].

Şekil 3.3 ile görüldüğü gibi gemi, baş tarafıyla aynı yönde olan dalgalarda nispeten yüksek hızda devam ederken gemiye kıçtan yaklaşan büyük bir dalgayı göstermektedir. Büyük dalganın şiddeti (hız) gemi hızının sadece biraz üzerindeyse, büyük dalganın gemiyi geçmesi için gereken süre uzun olabilir. Büyük dalganın tepesi geminin orta kesitine yakın olduğunda, doğrultma kolu önemli ölçüde

azaltılabilir. Ayrıca bu durumun ortaya çıkabileceği önemli süreçten dolayı, büyük bir bayılma açısı gelişebilir ve bu da alabora olmaya yol açabilir. Büyük dalga gemiyi geçtikten sonra, önemli bir bayılma açısı oluşmamışsa doğrultma kolu geri yüklenir ve gemi dik konuma geri döner.

Göreceli dalga profiline bağlı olarak önemli ölçüde azaltılmış doğrultma kolu (GZ) eğrisi her zaman, tamamen veya kısmi stabilite kaybı ile sonuçlanmaz. Stabilite kaybı oluşması için harici bir bayılma anı gerekir. Harici bayılma anı yoksa, dalgadaki metasantrik yüksekliğin negatif hale geldiği durumlar haricinde, dik koşul sürdürülür. Bu da loll açısına olanak tanır. Seviye 2 hassasiyet ölçütünün anlamını ilgili dış anlar, gemi manevra hareketlerinden dolayı oluşan merkezkaç kuvvetinden doğan eğik dalga başı ve bayılma anının sebep olduğu dalga uyarıcı yalpa hareketleridir. Serbest çalışan gemi modellerini kık-çeyrek dalgalarda kullanan birkaç mevcut model deneyi, manevra hareketi ile birleşmenin, tam stabilite kaybının denge bozulmaları üzerindeki ileri hız etkisini açıklamak için gerekli olduğunu göstermektedir. Sadece dalga-yalpa birleşim hareketini hesaba katarsak, tam stabilite kaybı büyük ölçüde ileri hıza bağlı değildir. Bununla birlikte, manevra hareketleri ile birleşmeyi de hesaba katarsak, tam stabilite kaybı üzerindeki sert ileri hız etkisi açıklanabilir. Bundan dolayı, gemi manevra hareketleri yüzünden oluşan merkezkaç kuvvetinin sebep olduğu bayılma anı dahil edilmelidir.

3.1.2 Toplam stabilite kaybı modu için kriter temeli

Yukarıdakilere dayanarak, seviye 2 değerlendirmesi, dalga nedeniyle azalan doğrultma kolu durumunda iki kriterin değerlendirilmesini gerektirir.

1. Kriter 1, loll açısı ile yakından ilişkili olan stabilite kaybolma açısının, φ_V , bir değerlendirmesidir. Eğer φ_V standart değerden (30 derece) daha az ise, yükleme koşulunun, dikkate alınan dalga durumunda kabul edilemez bir hassasiyet düzeyine sahip olduğu düşünülmektedir.
2. Kriter 2, Froude numarasına bağlı bir harici bayılma kuvveti nedeniyle bayılma kolu (φ_S) hareketi uyarınca oluşan denge bayılma açısının bir değerlendirmesidir. Eğer φ_S standart bir değerden daha büyükse (yolcu gemileri için 15 derece ve diğer gemiler için 25 derece), yükleme koşulunun, dikkate alınan dalga durumunda kabul edilemez bir zafiyet düzeyine sahip olduğu düşünülmektedir.

Seviye 1 kriteri, seviye 2 kriterlerinin basitleştirilmiş bir versiyonudur. Seviye 2 kriteri, dalga sırasında doğrultma kolunun eğrisi ile zafiyeti değerlendirirken, seviye 1 kriteri dalgalarda serbest yüzey düzeltme de dahil olmak üzere metasantr yüksekliğini de değerlendirir. Bir dalga üzerinde GM_{min} 'in hesaplanması için iki yöntem kullanılır:

1. Bir dalga üzerinde GM_{min} 'in korunumlu, basitleştirilmiş bir formülü. GM_{min} hesaplamak için yapay bir düşük su çekiminde su hattı düzlemi alanının ikinci momentini hesaplar. Gemi için mevcut olan hidrostatik veriler bu düşük su çekimine ilişkin veri içeriyorsa, bu hesaplama GM_{min} 'i hesaplamak için denge yazılımı kullanmadan gerçekleştirilebilmelidir.
2. Aksi takdirde, GM_{min} , gemi boyuna eşit bir dalga boyu için geminin dik konumundaki hidrostatik dengede gemi için üzerinde durulan yükleme koşulu için hesaplanabilir. Bu, uzunluk boyunca 0,1 L aralıklarda olan dalga tepesi ile dalga yüksekliğini belirlemek için standart bir dikliktir. Belirtilen ön hesaplamada kullanılan on hesap arasındaki en az değere sahip olan metasentrik yüksekliğin değeri, standart 0,05 m değeriyle karşılaştırılan GM_{min} değeridir.

Küçük metasentrik yükseklik her zaman azami doğrultma kolunun küçük bir değeriyle sonuçlanmadığı için, seviye 2 kriterleri genel olarak seviye 1 kriterlerinden daha korunumlu olmalıdır.

3.1.3 Toplam stabilite kaybı moduna karşı gemi zafiyetinin algoritması

3.1.3.1 Seviye 1 değerlendirilmesi

Toplam stabilite kaybına karşı hassasiyetin değerlendirilmesi, yalnızca nispeten yüksek hizmet hızına sahip olan yani Froude sayısının 0,24 değerini aştığı gemiler için yapılır. Hız düşükse, geminin düşük dengeye maruz kaldığı süre (azaltılmış doğrultma kolu) genellikle büyük bir bayılma açısı oluşturmayacak kadar kısadır.

Tam stabilite kaybına karşı zafiyet seviye 1 değerlendirmesi, dalga geçişi sırasında hesaplanan en küçük GM değeriyle gerçekleştirilir. Dalga boyu λ gemi uzunluğuna eşit olarak alınır ve dalga yüksekliği H aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$H = 0.0334 \lambda \quad (3.1)$$

Dalgalardaki GM'nin hesaplanması için birçok ticari hidrostatik yazılım paketi mevcut olsa da, mevzuat tam stabilite kaybıyla ilgili düzenlemelere göre, basitleştirilmiş bir formülün kullanılmasına izin verir. GM_{min} basitleştirilmiş formülü sadece hidrostatik verileri gerektirir.

Basitleştirilmiş formülün kullanımı nispeten yüklü gemiler için tavsiye edilebilir; çünkü bu durumda dalga gemiyi geçerken önemli denge değişimi beklenmez. Genellikle basitleştirilmiş formül daha korunumlu bir sonuç üretir.

Tam stabilite kaybıyla ilgili düzenlemelere göre aşağıdaki şartın yerine getirilmesiyle temsil edilen önemli tumblehome özelliği (en yüksek güverte genişliğinin geminin maksimum genişliğinden düşük olması) olmayan tekne çeşitleri için basitleştirilmiş formülün kullanımını sınırlandırır:

$$\frac{V_D - V}{A_W(D - d)} \geq 1.0 \quad (3.2)$$

Burada,

V_D = su seviyesinde eşit yer değiştirme hacmi D [m^3]

V = addedilen yükleme koşuluna karşılık gelen yer değiştirme hacmi [m^3]

d = addedilen yükleme koşuluna karşılık gelen gemi draftı [m]

A_W = verilen d draftına karşılık gelen rüzgar alanı [m^2] ve

D = korunmasız güverte tarafındaki kalıp derinlik [m].

Denklem 3.2 ile verilen koşulun yerine getirilmesi durumunda, asgari GM için aşağıdaki basitleştirilmiş formül kullanılabilir:

$$GM_{min} = KB + \frac{I_L}{V} + KG \quad (3.3)$$

KB = addedilen yükleme koşuluna karşılık gelen düşey yüzme merkezinin yüksekliği [m]

KG = addedilen yükleme koşuluna karşılık gelen düşey ağırlık merkezi yüksekliği [m] ve

I_L = su düzleminin verilen d_L draftına karşılık gelen atalet momenti [m^4].

Su düzleminin eylemsizlik momenti I_L için verilen d_L aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$d_L = d - \delta d_L \quad (3.4)$$

$$\delta d_L = \min(d - 0.25d_{full}, 0.5 H_W) \quad (3.5)$$

Burada,

d_{full} = tam yüklü kalkış koşuluna karşılık gelen su çekimi [m].

Not : $d - 0.25d_{full}$ sıfırdan daha az alınmamalıdır.

Denklem 3.3 ile verilen basitleştirilmiş formül genellikle korunumlu bir sonuç sağladığı için mevzuat, dalgalarındaki maksimum GM değerlerinin gerçek (doğrudan) hesaplamalarının kullanılmasına olanak tanır. Doğrudan hesaplamanın iyileştirilmiş doğruluğu, su çekimi ile su hattı düzlem alanlarının önemli ölçüde değiştiği ince biçimli gemiler için yararlı olabilir. Doğrudan hesaplama, Denklem 3.2 ile verilen şartın yerine getirilmediği durumlarda da kullanılmalıdır.

Asgari GM, geminin ortasında ve 0,1L, 0,2L, 0,3L, 0,4L ve 0,5L ileri ve 0,1L, 0,2L, 0,3L, 0,4L ve 0,5L geride bulunan dalga tepesiyle 11 hesaplama arasından en küçüğü olarak kabul edilir.

Toplam stabilite kaybının yarı statik bir şekilde gerçekleşmesi beklendiğinden, GM hesaplamaları geleneksel hidrostatik hesaplamalar yapılır. Dalgalarındaki minimum GM'nin hesaplanması için kullanılan yazılım, gemiyi batma anında dengeleyebilmeli ve dalga tepesinin her pozisyonunda da düzeltebilmelidir. İncelenen yükleme koşuluna karşılık gelen serbest yüzey düzeltmesi uygulanmalıdır.

Yukarıda verilen tüm denklemler ile yapılan hesaplamalarda, asgari GM'nin 0,05 m'yi aşması durumunda geminin tam stabilite kaybına karşı zafiyetinin olmadığı kabul edilir.

3.1.3.2 Seviye 2 değerlendirilmesi

Toplam stabilite kaybına karşı hassasiyete yönelik seviye 2 değerlendirmesi, 10 farklı dalga için hesaplanan dalgalarındaki gerçek GZ eğrileri kullanılarak yapılır. Tüm dalgaların uzunluğu λ gemi uzunluğuna eşittir.

Bu 10 dalga için H dalga yüksekliği aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$H_i = i \cdot 0.01 \cdot \lambda \quad i = 1, 2, \dots, 10 \quad (3.6)$$

Hesaplamalar için gerekenler seviye 1 değerlendirmesine benzer. gemi ortasında ve 0,1L, 0,2L, 0,3L, 0,4L ve 0,5L ileri ve 0,1L, 0,2L, 0,3L, 0,4L ve 0,5L geride yer alan dalga tepesi ile her dalga yüksekliği için dalga tepesinin 11 farklı konumuna yönelik hesaplamalar yapılır:

Dalgalardaki GZ eğrilerinin hesaplanması için kullanılan yazılım, dalga tepesinin her pozisyonu için gemiyi düzeltbilmeli ve batma anında dengeleyebilmelidir. İncelenen yükleme koşuluna karşılık gelen serbest yüzey düzeltmesi uygulanmalıdır.

Her bir GZ eğrisi için, birleşme dengesi açısı değerlendirilmelidir. Her bir dalga yüksekliği için stabilite kaybolma açısının $\varphi_{V_{min}}$ en küçük değeri daha sonraki hesaplamalarda kullanılır.

İlk kısa vadeli kriter $C1_i$, her bir dalga yüksekliği Hw_i için hesaplanır:

$$C1_i = \begin{cases} 1 & \varphi_{\min i} < 30 \\ 0 & \text{diğer} \end{cases} \quad (3.7)$$

Her bir dalga yüksekliği λ_i için, bayılma anının bir kolu R_{PL3i} şöyle hesaplanır:

$$R_{PL3i} = 8d \cdot (Fn)^2 \cdot \frac{\lambda_i}{L_i} \quad (3.8)$$

Bir bayılma anı (R_{PL3i}) kolunun her bir değeri ve dalga tepesinin her bir konumu için, statik bir bayılma açısı (φ_s) hesaplanır; Eğer hesaplama mümkün değilse (R_{PL3i} , GZ eğrisinin maksimum değerini aşıyorsa), 180 derecelik değer kullanılır.

Her bir dalga yüksekliği λ_i için ortalama statik açı φ_{si} hesaplanır. Ortalama değer; bayılma anının, dalga geçişinin tam süresi boyunca mevcut olmayabileceği gerçeğini yansıtır.]

İkinci kısa vadeli kriter $C2_i$, her bir dalga yüksekliği λ_i için hesaplanır:

$$C1_i = \begin{cases} 1 & \varphi_{SAi} < 15 \\ 0 & \text{diğer} \end{cases} \quad (3.9)$$

CR1 ve CR2 arasındaki en büyük değer standart (yani 0.06) değeri aşmıyorsa geminin hassas olmadığı kabul edilir.

3.2 Dalgaya Binme ve Yön Stabilitesi Kaybı

3.2.1 Dalgaya binme ve yön stabilitesi kaybı genel tanımı

Yön stabilitesinin kaybı (broşlama, "broaching-to" ifadesinden gelmektedir), rotayı sürdürmek için yapılan maksimum dümen çabalarına rağmen ortaya çıkan şiddetli kontrol edilemez bir dönüş için kullanılmaktadır. Diğer keskin dönüş olaylarında olduğu gibi, broşlamaya, kısmi veya toplam stabilite zafiyetinin potansiyel etkisi olan büyük bir bayılma açısı eşlik eder. Broşlamayı genellikle, arka taraftan yaklaşan bir dalganın gemiyi yakaladığı ve gemiyi kendi hızına çıkardığı durumlarda ortaya çıkan sörf yapma olayı takip eder. Dalgaya binme, dalga profilinin gemiye göre değişmediği tek dalga olayıdır. Çoğu gemi, dalgaya binme koşullarında yönsel olarak kararsız olduğu için bu manevra sapması dengesizliği kontrol edilemeyen dönüşlü yön stabilitesi kaybına yol açar.

Dalgaya binme genellikle broşlamadan önce gerçekleştiğinden dolayı broşlama için gereken zafiyet kriterlerini formüllestirmek için sörf yapma olasılığı kullanabilir. Dalgaya binmenin gerçekleşmesi için, birkaç koşulun oluşması gerekir:

- Dalga boyu, gemi uzunluğunun bir ila üç katı arasında olmalıdır,
- Dalga, dalgaya binme gücü üretmek için yeterince dik olmalıdır ve
- Gemi hızı, dalga hızı ile karşılaştırılabilir olmalıdır.

Büyük gemiler (200 metreden daha uzun) dalgaya binme hareketini yapmaz çünkü bu ve daha büyük uzunluktaki dalgalar gemiden daha hızlı hareket eder. Bu büyüklükteki dalgaların hızı 34 ve üzeri deniz mili ile ifade edilmektedir.

Bir gemi Şekil 3.4 ile gösterilen dalgalarda ilerlediğinde, üç ana kuvvet eksenel yönde hareket eder. İtme kuvveti, geminin ilerlemesini sağlamak için geminin iticisi tarafından üretilen kuvvettir. Direnç (veya sürüklenme), ileri gemi hareketine karşı gelen kuvvettir. Yükselen dalga kuvveti, geminin sırasıyla bir dalganın önünde veya arkasında olmasına bağlı olarak, gemiyi ileriye veya geriye doğru iten bir dalga tarafından uygulanan kuvvettir.

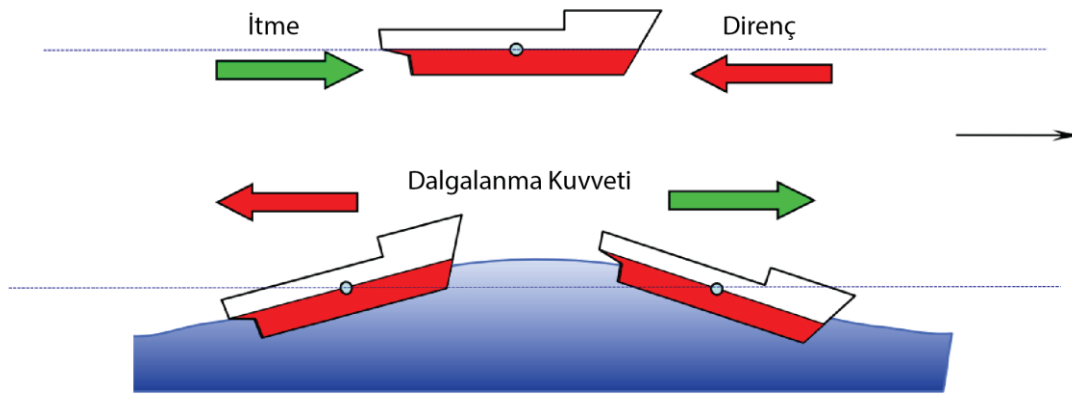
Yükselen bir dalga kuvveti olduğunda üç koşul olasıdır:

- Yükselen hareket. Bu durum, dalga hızında yükselen dalga kuvvetinin geminin itici gücü ve direnci arasındaki farkı yenmede yetersiz kaldığı

zamanlarda ortaya çıkar. Bu durumda, dalganın önündeyken artan hızdan dalganın arkasındayken azalan hıza kadar gemi sallanır - salınım hareketi.

Diğer iki koşul da , dalgaya binmeye olanak veren iki adet gemi hızı eşliği değerini içerir ve bunlar geminin pervanesinin mevcut hızı korumak için oluşturduğu itme ile doğrudan ilişkilidir.

- Belli başlangıç koşullarında dalgaya binebilmek için (sörf yapmak için ilk eşik). Bu durum, dalganın belirli bir noktasında dalganın ileri yönde olan kuvvetinin, geminin pervanesinin itiş ile geminin dalga hızındaki direncinin arasındaki farkı aşabileceği gemi hızıdır. Bu durumda, gemi bir dış kuvvet tarafından aniden hızlandırılırsa, sörf yapmak mümkün olabilir.
- Herhangi bir başlangıç koşulu altında dalgaya binebilmek için (sörf yapmak için ikinci eşik). Bu, geminin ileri hareket kinetik enerjisinin, bir dalganın geminin üstesinden gelmesi için çok büyük olduğu durumdur. Bu nedenle, dalgalanma hareketi, ilk gemi pozisyonu ve ilerleme hızı ne olursa olsun, sörfün gerçekleşeceği şekilde stabil bir durum değildir.

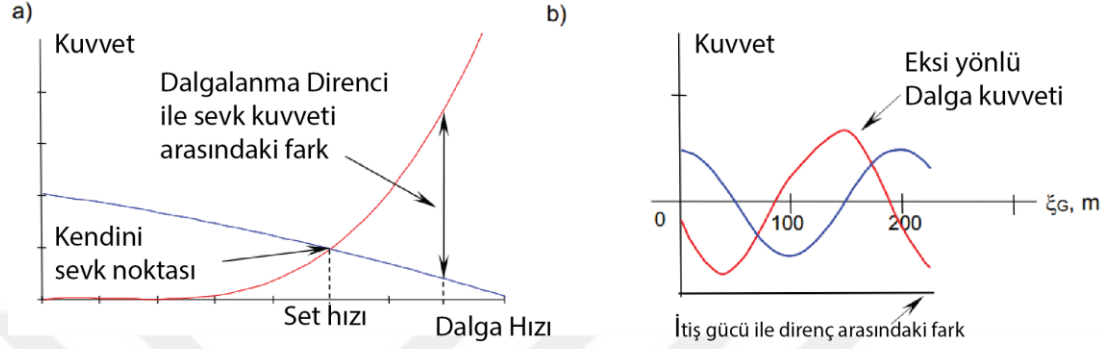


Şekil 3.4 : Dalga varken gemi üzerine etki eden kuvvetler[26].

Bu üç koşulu daha ayrıntılı olarak açıklamak için , gemi hızı dalga hızına eşit olduğu zaman dalgaya binme gerçekleştiğinden dolayı, dalga tepesindeki referans konumun yerini belirlemek sörf yapmayı anlamak için uygun bir yol sağlar. Bu bakımdan, gemi dalga üzerinde ilerlerken , referans konumu dalga ile hareket ettiğinden sabit kalıyor gibi görünmektedir.

Dalgalanma hareketi durumunda, geminin pervanesi tarafından sağlanan itiş, gemiyi, Şekil 3.5 (a) ile tasvir edilen sakin sudaki dalga hızına eşit bir hıza itmek için yeterli değildir. Şekil 3.5 (b), bir dalganın farklı pozisyonlarında bulunan geminin dalgasız

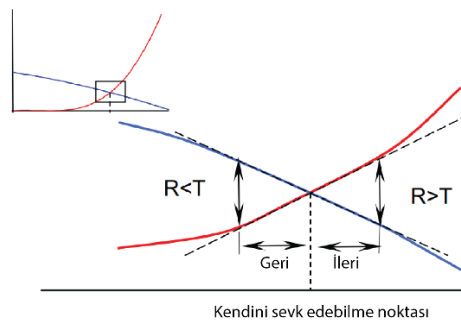
denizdeki itme ve direnci arasındaki farkı göstermektedir; Direnç, itme kuvvetinden daha büyük olduğunda bu fark negatiftir. Dalga üzerindeki itki - direnç farkının dalga kuvveti tarafından tam olarak telafi edildiği herhangi bir konum olmadığı için, meydana gelen tek hareket, geminin dalganın üzerindeki konumuna bağlı olarak ileri ve geri doğru olan dalgalanma hareketidir.



Şekil 3.5 : (a) özitleme noktası ve itme direnci farkı ve (b) dalga kuvvetleri ve bir dalga üzerinde farklı gemi pozisyonları için gösterilen itme ve direnç arasındaki denge[26].

denizdeki itme ve direnci arasındaki farkı göstermektedir; Direnç, itme kuvvetinden daha büyük olduğunda bu fark negatiftir. Dalga üzerindeki itki - direnç farkının dalga kuvveti tarafından tam olarak telafi edildiği herhangi bir konum olmadığı için, meydana gelen tek hareket, geminin dalganın üzerindeki konumuna bağlı olarak ileri ve geri doğru olan dalgalanma hareketidir.

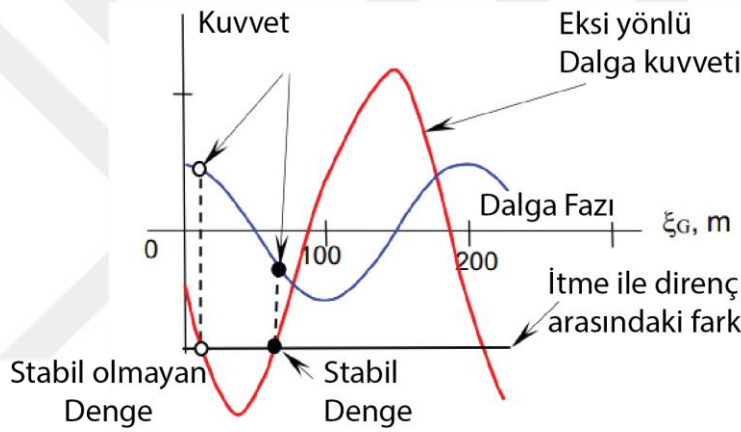
Dalgalanma mekaniği, Şekil 3.5'te gösterildiği gibi, itme ve direnç eğrileri kullanılarak gösterilebilir. Gemi, dalganın arka tarafında olduğunda, dalgalanma kuvveti, gemiyi geriye doğru iter, bu da anlık hızın azalmasına ve direncin itişten daha az olmasına neden olur. Bu fark, ileriye doğru, dalgalanma kuvvetine karşı yönlendirilmiştir. Gemi dalganın karşısında olduğunda, kuvvet, gemiyi ileriye doğru iter ve bu da anlık hızın artmasına ve direncin itme kuvvetini aşmasına neden olur. Dalga gemiyi geçtikçe, bu iki durum tekrar eder.



Şekil 3.6: .Kendini sevk edebilme noktası etrafında küçük dalgalanma hareketi[26].

3.2.2 Dalgaya binme dengesi tanımı: ilk eşik

Dalga kuvvetinin değeri, geminin dalga üzerindeki konumunun yanı sıra dalga yüksekliği ve dalga boyuna bağlıdır. Dalganın etkisi, gemiyi ileri doğru iter, böylece ileri dalga veya dalgalanma kuvveti oluşur; arka eğimi ise tersini yapar. Nitekim, dalga tepesi ve dalga çukurunun yakınında nötr noktalar vardır. Dalga uygun uzunluk ve yüksekliğe sahipse, dalgalanma kuvveti, itme ve direnç arasındaki negatif farkı dengelemek için yeterlidir. Bu durum, Şekil 3.7 ile gösterildiği gibi iki denge noktası oluşturur. Bu şekil, dalgalanma kuvvetini, itme ve direnç (apsisin altındaki yatay çizgi) arasındaki farkla üst üste getirir ve dalga üzerindeki iki denge noktasını işaretlemek için dalga kuvvet eğrisi ile kesişen noktaları gösterir. Stabil denge, dalgaya binmenin eşiğini işaret eder.



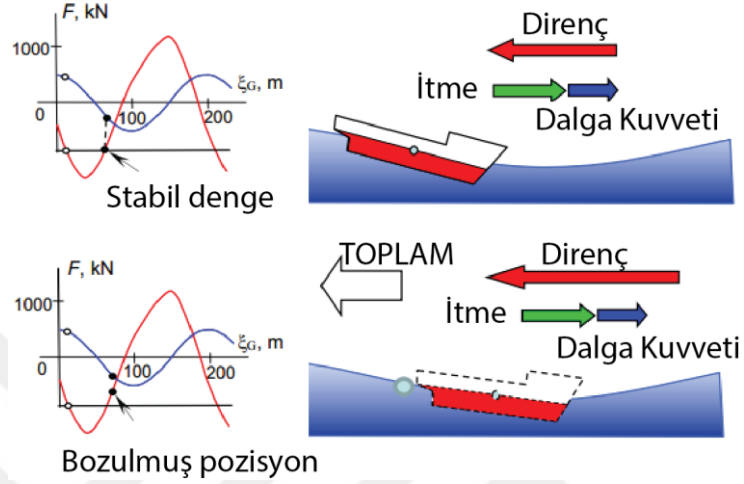
Şekil 3.7: Gemi üzerinde dalganın farklı konumlarına göre dalgaya binme eşiğini gösteren. itme ve direnç arasındaki dalga kuvvetleri ve denge[26].

3.2.3 Dalgaya binme denge stabilitesi

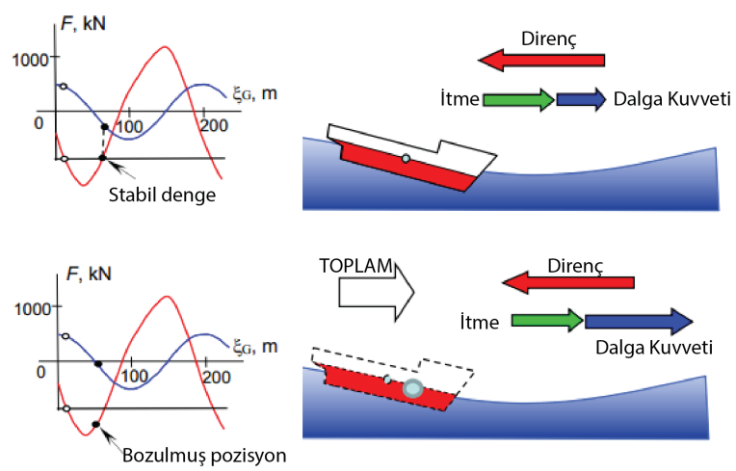
Şekil 3.8, stabil ve dengesiz olarak adlandırılan iki denge noktasının bir örneğini göstermektedir. Eğer bir geminin sörf yaptığı düşünülüyorsa, geminin ortası, dalga tepesinin yaklaşık 70 m uzağında yer alır (Şekil 3.7 ve Şekil 3.8 ile verilen dalga çukurunun yakınında stabil denge olarak işaretlenir), gemi hızı dalga hızına eşit olacaktır. Eğer gemi bu konumdan ileriye doğru ve dalga çukuruna doğru giderse, dalgalanma kuvveti azalır. Bu nedenle, itme ve direnç arasındaki fark, anlık gemi hızında bir azalmaya neden olacak ve dalga, gemiyi geçmeye başlayacaktır. Gemi dalga yüzeyinden dalga tepesine doğru geri giderken, dalgalanma kuvveti artar ve gemiyi stabil dengeye doğru iter.

Şekil 3.8 ile gösterilen durumun tersine, Şekil 3.9 için geminin denge arkasından dalga tepesine doğru - dengesinin bozulmasını gösterir. Bu durumda, dalga kuvveti,

itme ve direnç arasındaki farktan daha büyük olur. Böylelikle gemi hızı artacaktır ve dalganın üzerindeki sörf dengesine (dalga çukuruna) doğru ilerleyecektir. Bu nedenle, her iki durumda da (yani, ileriye veya geriye doğru denge bozulmasında), gemi, dalga çukurunun yanındaki dengeye doğru hareket etmeye eğilimlidir, bu da dengeyi stabil hale getirir.



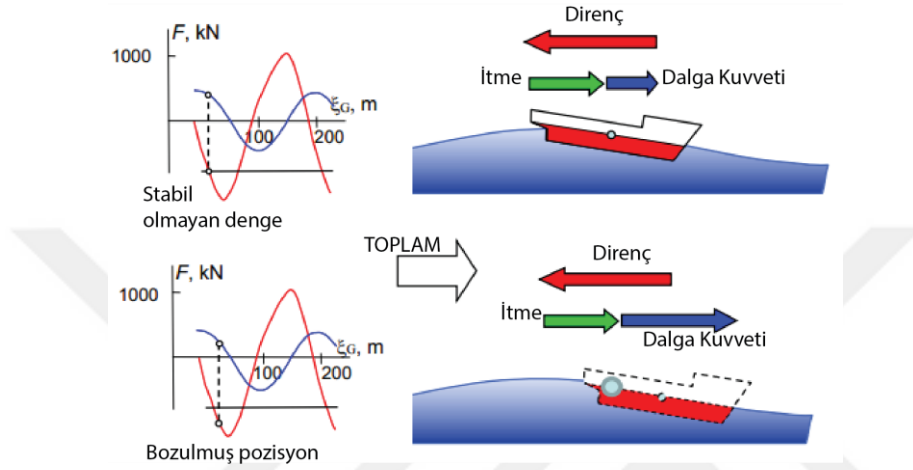
Şekil 3.8: Stabil dengeden ileride oluşan bir bozukluk.



Şekil 3.9: Stabil dengeden geride oluşan bir bozukluk[26].

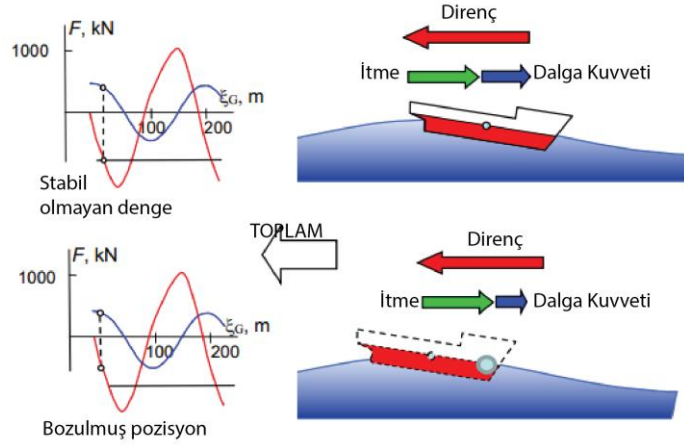
Eğer bir gemi, dalga tepesinin yaklaşık 30 m uzağında (Şekil 3.8 ile verilen dalga tepesi yakınında stabil olmayan denge olarak işaretlenmiş) sörf yapacak şekilde konumlanmışsa , gemi hızı dalga hızına eşit olacaktır. Eğer gemi bu konumdan öne doğru giderse (Şekil 3.10’da gösterildiği gibi dalga çukuruna doğru), dalga kuvveti artar ve geminin hızının artmasına ve geminin dalga çukurunun yakınında stabil duruma gelene kadar dalga üzerinde ilerlemesine neden olur.

Tam tersine, geminin bu konumdan geri gitmesi durumunda, Şekil 3.11'de gösterildiği gibi dalga tepesine doğru ilerler, dalga kuvveti azalır ve anlık hız da azalmaya başlar. Bu durumda, itme ve direnç arasındaki fark, dalganın gemiyi geçmesine neden olan anlık gemi hızında bir azalmaya neden olacaktır. Bundan sonra ne olabileceğini gösteren çeşitli senaryolar vardır, ancak hiçbir durumda gemi bu dengeye geri dönmez, bu da dalga tepesinin yakınındaki dengenin bozulmasına neden olur.



Şekil 3.10: Stabil olmayan dengeden ileri oluşan bir bozukluk[26].

Eğer dalgaya binme dengesi yoksa, sörf yapmak mümkün değildir ve gemi yalnızca yalpalayacaktır. Bu da, dalga üzerindeki anlık hızın ve pozisyonun tüm kombinasyonlarının aynı sonuca yol açtığı anlamına gelir. Bununla birlikte, dalga üzerindeki belirli noktalarda denge noktaları ortaya çıktığında, dalga pozisyonunun ve anlık hızın tüm kombinasyonları aynı tepkiyi vermez. Eğer bir gemi tam olarak dalga çukurunun yakınındaki stabil dengenin yerine "yerleştirilir" ve dalga hızına hızlandırılırsa, gemi dalgaya binerek sörf yapar. Bu konumdaki herhangi ufak bir bozulma, gemiyi dengeye geri döndürecektir. Eğer gemi dalga tepesinin yanındaki stabil olmayan dengeye yerleştirilirse, dalga hızına kadar hızlandırılır ve daha sonra dalga çukuruna doğru itilirse, stabil sörf dengesine ulaşır. Görüldüğü üzere, sörf yapmaya izin veren bir dizi dalga pozisyonu ve anlık hız kombinasyonları vardır. Bu kombinasyonların "sörf yapma dengesine bir çekim alanı" oluşturduğu söylenebilir. Bu alanın dışında, iki seçenek mümkündür: dalgalanmak veya sörf yapmak. Dolayısıyla prensipte, çekim alanının dışında, gemi ya yalpalamaya (salınmaya) devam eder ya da başka bir dalga üzerinde sörf yapma dengesine çekilir.



Şekil 3.11: Stabil olmayan dengeden geride oluşan bir bozukluk[26].

3.2.4 Dalgalanma hareketinden dalgaya binme hareketine geçiş

Dalganın ön yüzü ,dalgalanma kuvveti ileriye doğru yönlendirildiğinden, sörf yapmak için daha fazla şans sağlar. Eğer gemi dalganın arka tarafındaysa, dalgalanma gücü geriye doğru yönlendirilir, ancak hem dalgalanma hem de sörf aynı hız ayarı ve dalga parametreleri için mevcut olabileceğinden, hala bir dalga enerji dengesi ortaya çıkabilir. Başlangıçtaki kinetik enerji seviyesi, itme ve direnç arasındaki farkla dağıtılabiliyorsa, dalgalanma meydana gelecektir; değilse, sörf yapılabilecektir. Eğer dalga parametreleri, dalganın gemiye itme ve direnç arasındaki farkla dağıtılamayacak kadar fazla kinetik enerji (dik dalga) yüklediği şekildeyse , o zaman dalgalanma hareketleri artık mümkün olmayacaktır. Gemi, dalganın arka eğiminde düşük bir başlangıç kinetik enerji seviyesi ile başlarken, bir dizi itme gücü sağlayan geminin itici gücü ile başlasa bile, her bir ardışık dalga dağıtılamayacak bir miktarda kinetik enerji ekleyecektir; daha sonra gemi stabil şekilde dengeye doğru ilerlerken kaçınılmaz olarak sörf gerçekleşecektir. Bu durum, sörf yapmak için kullanılan hassasiyet kriterleri için kullanılan temel olan, "herhangi bir başlangıç koşulu altında sörf yapma" olarak adlandırılır. Bu kriter için "belirli başlangıç koşullarında sörf yapmak" kullanılmaz.

Belli bir dalga için, herhangi bir başlangıç koşulu altında sörf yapmadaki itiş, sörfün kaçınılmaz olduğu , gemi pervanesinin hassaslık ölçütündeki kritik ayarını tanımlar. Örneğin, bir dalganın gemiyi geçtiği süre boyunca oluşan enerji dengesini düşünün ,herhangi bir başlangıç koşulu altında sörf yapmayı tanımlamak için Melnikov analizi veya sistematik faz düzlemi analizi kullanılabilir. Seviye 2 zafiyet kriterleri,

dalga yüksekliği ve dalga boyunun birçok olası kombinasyonu için doğrudan Melnikov analizini kullanmaktadır.

Seviye 1 hassaslık kriterleri, stabil yer çekimi derin su dalgalarının uygulama sınırı olarak kabul edilen, 0.1'lik bir dalga dikliği varsayılarak, bu tür bir çok analizin hesaplanmış sonuçlarına dayanan ampirik tahminlerdir.

3.3 Ölü Gemi Durumu

3.3.1 Ölü gemi durumunun fiziksel arka planı

Ölü gemi durumu, IMO tarafından 1985'te kabul edilen (A.562 (14)) ve şimdi 2008 IS Kodu'nun A faslının 2.3 bölümünde yer alan , “hava durumu kriteri” olarak da bilinen fiziksel tabanlı şiddetli rüzgar-yalpalama kriteri ile ele alınan ilk stabilite hatasıydı. Hava durumu kriterinin senaryosu Şekil 3.12 ile gösterilmiştir. Bu senaryo, bir geminin gücünü yitirdiğini ve dalgaların etkisi altında aynı zamanda rüzgar hareketi altında sürüklenip yalpaladığını ve bordadan dalga yediğini varsayar. Savrulmaya bağlı yalpalama, rüzgarın aerodinamik kuvveti ve geminin enine hareketinden kaynaklanan hidrodinamik reaksiyon kuvvetlerinin etkisinin bir sonucudur.

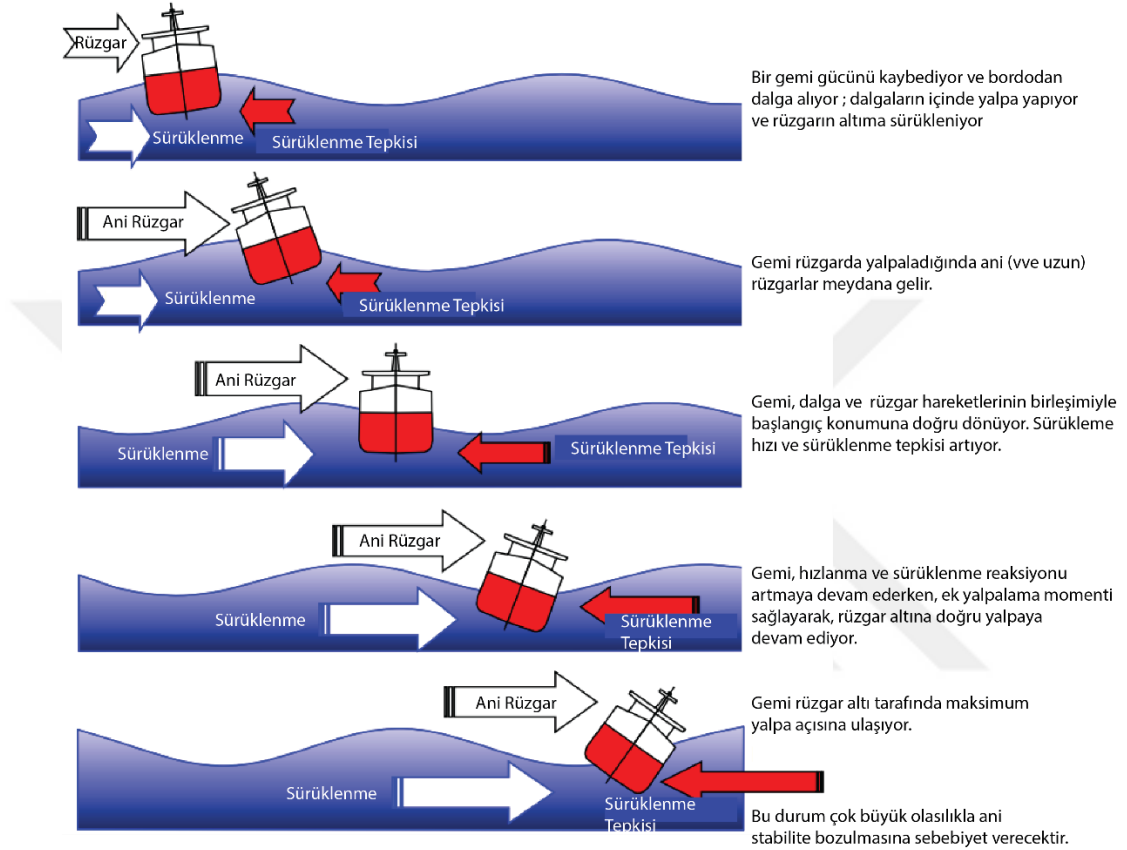
Ardından, ani ve uzun süreli rüzgar oluşur. Olası en kötü durum, geminin maksimum rüzgar açısında yalpa yapmasıdır; bu durumda, dalgaların hareketine rüzgarın etkisi eklenir. Güçlenen rüzgar sürüklenme hızını artırır ve bu da hidrodinamik sürüklenme reaksiyonunun artmasına yol açar. Sürüklenme hızının artması, hidrodinamik reaksiyonun artmasına ve dolayısıyla, aerodinamik ve hidrodinamik kuvvetlerin her ikisi tarafından yalpalama momentinin artmasına yol açar. Rüzgarın yeterince uzun sürdüğü kabul edilir, böylece gemi tamamen diğer tarafa yatabilir; erişilen orta rüzgaraltı dönme açısı durumu kriterin karşılanmasıdır. Çok büyükse veya bazı açıklıkları su basarsa, geminin stabilitesi yetersiz sayılır.

3.3.2 Ölü gemi durumunun fiziksel arka planı

3.3.2.1 Seviye 1 zafiyet kriteri değerlendirilmesi

Ölü gemi stabilitesi bozukluğu için 1. seviye zafiyet değerlendirmesi amacıyla, 2008 IS Kodu'nun A Faslındaki 2.3 bölümünün “Şiddetli rüzgar ve yalpalama kriteri (hava durumu kriteri)”, Kısım A'nın 2.3 bölümünün 2.3.4-4. bölümünde incelenen ve bu

çalışmada Bölüm 2.2.3 ile detaylı olarak açıklanan dik koşul faktörü kullanılarak yapılan hesaplama yöntem kullanılmalıdır; ancak ölü deniz durumu seviye 1 zafiyet modu değerlendirmesi yapılırken Çizelge 3.1 ile verilen hava kriterinin alternatif değerlendirmesi için geçici rehberde (MSC.1 / Circ.1200) verilen diklik faktörüyle katsayıları kullanılmalıdır.



Şekil 3.12: Ölü deniz durumunda stabilite bozulması senaryosu[26].

Çizelge 3.1 : s katsayısı.

T_1	≤ 6	7	8	12	14	16	18	20	22	24	26	28	≥ 30
s	0.1	0.098	0.093	0.065	0.053	0.044	0.038	0.032	0.028	0.025	0.023	0.021	0.020

3.3.2.2 Seviye 2 zafiyet kriteri değerlendirilmesi

Seviye 2 zafiyet değerlendirme metodolojisinin amacı, addedilen yükleme koşulu altında, geminin stabilite bozulma durumunun basitleştirilmiş koruyucu olasılıksal bir ölçümünü sunmaktır. C olarak belirtilen bu ölçüm, 0.0 (iyi) ile 1.0 (kötü) arasında değişen ve kısa vadeli endeksler ağırlıklı ortalaması C_s kullanılarak elde edilen uzun vadeli bir olasılık endeksidir.

Kısa vadeli ölü gemi durumu endeksi (C_S), addedilen yükleme koşulunda geminin özelliklerine ve belirli bir süredeki kısa vadeli çevresel koşullarına bağlıdır ve dikkate alınan kısa vadeli çevre koşulundaki yalpalama özelliklerini dikkate alan basitleştirilmiş bir hesaplama metodolojisi ile elde edilir.

Seviye 2 zafiyet kriteri değerlendirmesine uygun bir araç sağlamak için çeşitli varsayımlar gereklidir. Bu kriterin altında yatan varsayımların temel seti aşağıda verilmiştir.

- Geminin belirli bir maruz kalma süresi boyunca düzensiz dalgalar ve fırtınalı rüzgârda ölü gemi durumunda olduğu varsayılmaktadır,
- Rüzgar ve dalgaların aynı yönde esmesi / yayılması ve su derinliğinin, su derinliğinin sonsuz su derinliği varsayımına izin verecek kadar büyük ($su\ derinliği > d/2$) olduğu varsayılmaktadır,
- Geminin rüzgarı ve dalgaları bordadan aldığı varsayılmaktadır,
- Rüzgar durumu, ortalama rüzgar hızı ve sağanak spektrumu ile karakterize edilir,
- Deniz durumu, bir dalga yüksekliği spektrumu ile karakterize edilir ve dalgaların uzun tepeli olduğu varsayılır ve
- Geminin yalpa hareketi, bir derecelik serbestlik sistemi olarak modellenenebilir.

Bu değerlendirmede, rüzgar altı tarafına doğru yalpa açıları değer olarak pozitif kabul edilirken, rüzgar üstüne doğru olan yalpa açılarının negatif olduğu varsayılmaktadır.

İskele / sancak simetrik olmayan gemiler için, kısa süreli ölü gemi zafiyet endeksi C_S , rüzgâr için hesaplanan endeks ile hem iskele hem de sancak taraflarından gelen dalgalar arasındaki ortalama olarak belirlenmelidir.

Bu zafiyet seviyesinin değerlendirilmesi amacıyla, geminin konvansiyonel olarak, bir saat boyunca (3,600 saniye) her bir kısa vadeli çevre koşuluna maruz kaldığı varsayılmaktadır. Kısa vadeli modellemenin mantığına genel bakış aşağıdaki gibidir:

- Gemi karakteristik parametrelerinin mevcut olduğu varsayılmıştır (deplasman, doğrultma kolu eğrisi, yalpa sönümleme, rüzgar alanı özellikleri, vb.),

- Çevre şartları rüzgar ve dalgalar cinsinden belirtilmiştir,
- Rüzgar durumu, ortalama bir rüzgar hızı ve bir rüzgar sağanak spektrumu olarak öngörülür,
- Rüzgara bağlı ortalama meyil momenti ortalama rüzgar hızından başlayarak belirlenir,
- Ani rüzgar nedeniyle yalpa momentinin spektrumu rüzgar sağanak spektrumundan başlayarak belirlenir,
- Deniz durumu, bir dalga yükseklik spektrumunun doğrudan belirlendiği bir deniz dikliği spektrumu yönüyle sağlanır,
- Dalga yükseklik spektrumundan başlayarak dalgalara bağlı olarak yalpa momenti spektrumu belirlenir,
- Yalpa momentinin toplam spektrumu, rüzgara sağanak spektrumuna bağlı olarak hesaplanan yalpa momenti ve dalgalara bağlı olarak hesaplanan yalpa momentinin spektrum toplamı ile verildiği varsayılmaktadır,
- Yalpanın dinamikleri, daha sonra gemi karakteristiklerini (yalpa geri kazanımı, yalpa periyodu, yalpa sönümleme) ortalama rüzgara bağlı ortalama meyil momenti ve ani rüzgar ve dalgaların kombine etkisi nedeniyle düzensiz yalpa momentini hesaba katan doğrusal bir serbest dereceli hareket denklemi ile modellenmiştir.

Bölüm 3.3.2.3 aşağıdaki konularla ilgili bilgi sağlar:

- Rüzgar durumunun ve deniz durumunun kısa süreli karakterizasyonu,
- Rüzgar ve dalgalar arasındaki kısa vadeli ilişki,
- Çevrenin uzun vadeli karakterizasyonu,
- Alternatif çevre koşullarının muhtemel uygulanması, idarenin memnuniyeti.

Kısa süreli ölü gemi koşul zafiyet indeksi C_S , EK B Çizelge 1 ile verilen dalga yayılma tablosunun her bir hücresi için belirlenir ve bu değer için önemli dalga yüksekliği, H_S ve sıfır yukarı geçiş periyodu, T_Z belirtilir. $C_S = 0$ için karşılanması gereken iki kriter şunlardır:

- Alan b, alan a'dan daha az olmamalıdır ve

- Sabit rüzgarın etkisine göre meyil açısı, $\varphi_s (= \varphi_0)$, 16° veya güverte kenarı dalma açısının %80'i arasında küçük olan değeri geçmemelidir.

Sabit rüzgarın (l_{w1}) neden olduğu yana yatma kaldırıcı, kısa vadeli çevresel koşulun önemli dalga yüksekliğine (H_S) bağlı olan bir formülleştirmeden elde edilen ortalama rüzgar hızına karşılık gelen rüzgar basıncı kullanılarak hesaplanır.

Aynı şekilde, ani rüzgarın neden olduğu meyil doğrultma kolu l_{w2} , 1.5 olarak alınan bir faktörle çarpılan sabit rüzgarın neden olduğu meyil momenti kolu olarak hesaplanır.

3.3.2.3 Seviye 2 zafiyet kriteri değerlendirilmesi

Hem kısa hem de uzun vadeyi ifade eden bir dizi standart çevre şartı varsayılmaktadır. Kısa dönem karakterizasyonu, ortalama rüzgar hızı, ani rüzgar spektrumu ve deniz yükselmesi spektrumu açısından verilmiştir. Uzun vadeli karakterizasyon bir dalga dağılım diyagramı cinsinden verilmiştir. Ortalama rüzgar hızı ve kayda değer dalga yüksekliği arasında deterministik bir ilişki varsayılmaktadır.

Ortalama rüzgar hızının sadece etkin dalga yüksekliğine bağlı olduğu ve aşağıdaki gibi tanımlandığı kabul edilir:

$$U_{wind} = (0.06717^{-1} H_S)^{\frac{2}{3}} \quad (3.9)$$

Rüzgarın ortalama rüzgar hızı etrafında dalgalandığı varsayılmaktadır. Toplam rüzgar hızı, ortalama rüzgar hızı U_W (m/s) ve ani rüzgar hızı v (m / s) toplamı ile verilir. Ani rüzgarın spektrumu, S_v ((m/s)² / (rad/s)), Davenport tipindedir ve ortalama rüzgar hızı U_W (m/s) bağlıdır. Ani rüzgar spektrumu rüzgar dalgalanması dairesel frekans ω (rad/s)'ının bir fonksiyonudur ve aşağıdaki ifadeye sahip olduğu varsayılır:

$$S_v(\omega) = 4K \frac{U_W^2}{\omega} \frac{X_D^2}{(1 + X_D^2)^{4/3}} \quad (3.10)$$

Burada:

$$K = 0.003 \quad (3.11)$$

$$X_D = 600 \cdot \frac{\omega}{\pi U_w} \quad (3.12)$$

Ortalama rüzgarın etkisine bağlı yana yatma momenti M_{Wind} (Nm) ve karşılık gelen moment kolu l_{Wind} (m) meyil açısından bağımsız olarak kabul edilir ve aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$M_{Wind} = 0.5 \rho_{air} U_{wind}^2 C_m A_L Z ; l_{Wind} = \frac{M_{Wind}}{W} \quad (3.13)$$

Burada:

ρ_{hava} = 1.222 kg/m³ olacak şekilde hava yoğunluğu,

$U_{Wind}(m/s)$ = Ortalama rüzgar hızı,

C_m = Meyil moment katsayısıdır. Yeterli bilgi olmadığında, bu katsayı yaklaşık olarak $C_m = 1.22$ olarak alınabilir,

$A_L(m^2)$ = Yanal rüzgar alanı,

$Z(m)$ = A_L ortasından sualtı yanal alanın merkezine veya yaklaşık olarak ortalama su çekiminin bir buçuk katı olan bir noktaya dikey mesafedir ve

$W(N)$ = Gemi deplasmanının ağırlığıdır.

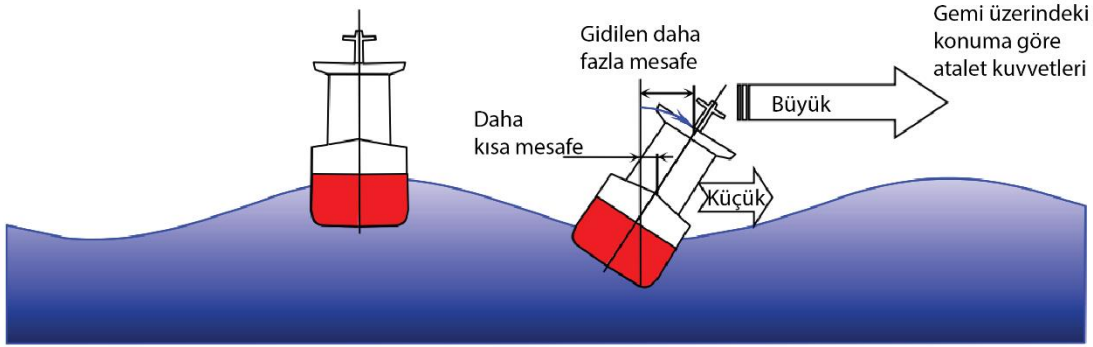
3.4 Aşırı İvmelenme

3.4.1 Aşırı ivmelenme nedeniyle stabilite kaybının fiziksel arka planı

Bir gemi seyrederken, gemi üzerinde daha yüksek konumdaki nesneler daha uzun mesafeler kat eder. Gemideki tüm konumlar için yalpa hareketleri süresi aynıdır. Aynı zamanda daha uzun mesafeyi kapatmak için, doğrusal hız daha büyük olmalıdır. Hız, her yarım devirde kendi yönünü değiştirdiği için, daha büyük lineer hız, daha büyük lineer ivmelere yol açar. Büyük doğrusal ivmelenme, daha büyük atalet kuvveti anlamına gelir.

Bir yatay düzlemde hareket eden atalet kuvvetleri, bir insan için dikey atalet kuvvetlerinden daha tehlikelidir. Dikey atalet kuvvetleri kısa süreli aşırı yüklenmeye neden olurken, yatay atalet kuvvetleri insanların bir dengeyi kaybetmelerine, düşmelerine ve hatta duvarlara, bölmelere veya diğer yapılara atılmasına neden olur.

Büyük ivmelenmeler çoğunlukla yalpa hareketlerinden kaynaklanır, bu nedenle ağırlıklı olarak yatay yöne sahiptirler.



Şekil 3.13: Aşırı ivmelenme durumunda stabilite bozulması senaryosu[26].

3.4.2 Gemi hareketlerinde senkron rezonans

Farklı fiziksel mekanizmalardan dolayı büyük bir yalpa açısı oluşabilir. Bazıları zaten ikinci nesil IMO stabilite kriterlerinin güvenlik zafiyeti değerlendirmesinin bir parçası olarak dahil edilmiştir: toplam stabilite kaybı, parametrik yalpa ve yön stabilitesi kaybı. Bu fenomenler arasında parametrik yalpanın aşırı ivmelere neden olduğu bilinmektedir. Bununla birlikte, senkron rezonans diğer güvenlik zafiyeti kriterleri kapsamında değildir.

Senkron rezonans, gemi hareketinin doğal frekansı dalga uyarımının frekansına yakın olduğunda hareket cevabının fazlaştırılması olgusudur. Dalga uyarımının sıklığı dalga frekansına, dalgalara göre gemi istikametine ve gemi hızına bağlıdır. Bir gemi dalgalara (baş ve omuzluk dalgası karşılaşma açıları arasında) doğru hareket ettiğinde, karşılaşma sıklığı dalgaların frekansından daha yüksektir. Bu etki baştan gelen dalgalarda en güçlüsüdür, bordadan gelen denizlerde zayıflar ve tamamen kaybolur. Bir gemi dalgalarla aynı yönde ilerlerken, karşılaşma sıklığı azalır. Bu etki, denizleri takip eden en güçlü olanıdır, kıç omuzluktan gelen denizlerde zayıflar ve denizlerde tamamen kaybolur. Daha yüksek hız bu etkiyi artırır.

Eşzamanlı rezonansın hareketi fazlaştırma etkisi, Şekil 3.13 ile görülebileceği gibi karşılaşma frekansı doğal yalpa frekansına yakın olduğunda en kuvvetlidir. Uyarma yalpa büyüklüğünün (dalga eğiminin açısı) artışı tüm frekanslarda rezonans etkisinin artmasına neden olur, ancak en yüksek artış Şekil 3.13 (a) ile görülebileceği gibi doğal yalpa frekansı etrafındadır.

Yalpa sönümlemenin arttırılması, hareket genliğinin azalmasına yol açar; etki doğal frekansta Şekil 3.13 (b) ile görülebileceği gibi fark edilir. Böylece yalpa sönümlemesinin artışı, senkron rezonansın etkilerini hafifletmeye yardımcı olur.

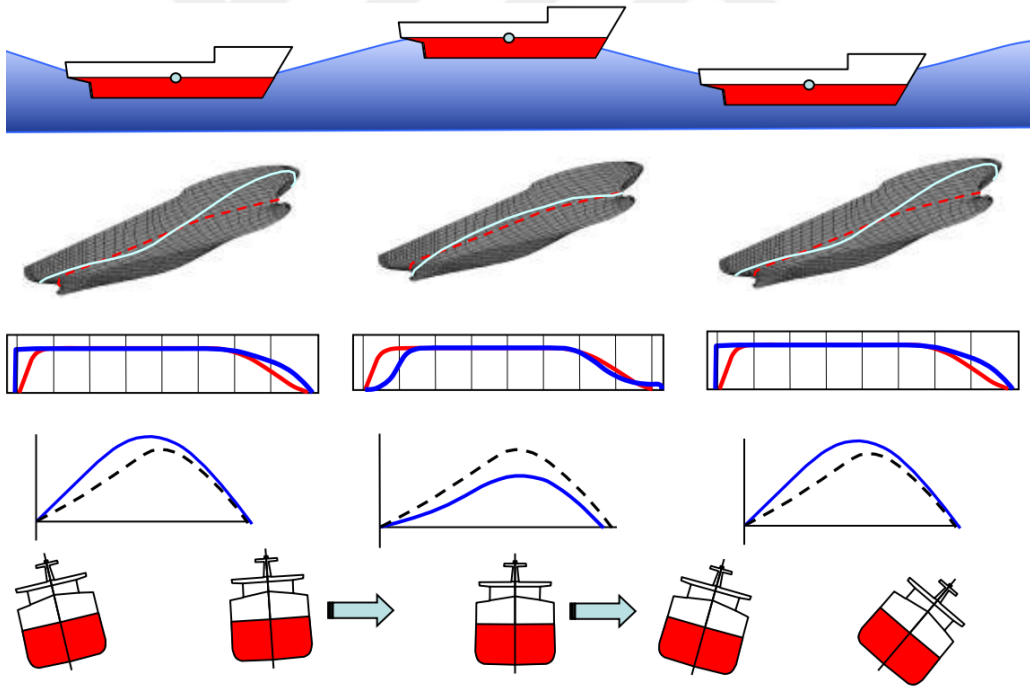




4. PARAMETRİK YALPA REZONANSININ GELİŞİMİ VE ÖNEMİ

4.1 Giriş

Parametrik yalpa ("parametrik yalpa rezonansı" biçimsel tanımlamasının kısaltması), dalga hareketlerindeki periyodik değişimin, geminin enine stabilitesinin periyodik olarak değişmesi sonucunda, yalpa hareketinin büyüklüğünün geminin alabora olacak seviyelerde yükselmesinin meydana getirdiği dinamik bir stabilite olgusudur. Parametrik yalpa rezonansı; geminin karşılaşma frekansı, geminin doğal yalpa frekansının yaklaşık iki katı olduğu ve gemi yalpa sönümlemesinin ek enerjiyi dağıtmak için yetersiz olduğu; ağırlıkla baş ve kıç taraftan gelen dalgalı denizlerinde görülür.



Şekil 4.1 : Parametrik yalpa rezonansının gelişimi[26].

Şekil 3.1, parametrik yalpanın gelişimini göstermektedir. Bu şekilde solda ve sağda gösterilen durumda mastoride gemi dalga çukurunda iken, ortadaki durumda dalga tepesine maruz kalmaktadır. Gemi dalga çukurunda yalpa yaparken, geminin su altında kalan hacminin artması sonucu kaldırma kolu arttığı için daha fazla doğrultma

momenti sağlayacaktır. Gemi başlangıçtaki meyilsiz konumuna dönerken, daha fazla doğrultma momentine maruz kaldığı için hareketi devam ettirme eğilimi artacak ve karşı tarafa daha büyük bir itme ile gidecektir. Geminin tam dik olduğu durumda, gemi ortasında dalga tepesi varsa, geminin stabilitesi azalacak, yalpaya karşı direnç düşecek ve geminin yalpa hareketi büyüyecektir. Gemi yalpa hareketinin sonunda yeniden dalga çukuruna maruz kalırsa, yalpa hareketinin genliği ilk durumda anlatılan nedenden ötürü yeniden artacaktır. Eğer gemi dik konuma geldiğinde gemi ortasında dalga tepesi ve yalpa hareketini tamamladığında gemi ortası dalga çukurunda ise yalpa hareketi önlenemez bir biçimde artmaya başlayacaktır.

Buradan yapılacak olan çıkarım ise, geminin yalpa periyodunun gemi dalga karşılaşma frekansının iki katı olduğu durumda parametrik yalpa rezonansının oluşacağıdır. Bu durum, Şekil 4.2’de görülmektedir.

Şekil 4.1’de bulunan kesikli hatlar, geminin sakin su hattını, mavi hatlar ise dalgalı haldeki durumu göstermektedir. Grafiklerde gözlemlenebileceği gibi, dalga çukuru durumunda GZ eğrisi altında kalan alan sakin su GZ eğrisine göre daha fazla iken, dalga tepesinde bu durum tam tersidir. Parametrik yalpa periyodu içerisinde geminin hareketini dört bölüme ayırıp her bir çeyrek içerisinde inceleyebiliriz.

4.1.1 Birinci çeyrek

İlk çeyrekte geminin stabilize karakteristikleri geminin dalga çukurunda olması nedeniyle artmaktadır. Sonuç olarak, doğrultma kolu nedeniyle oluşan yükleme momenti, bu çeyrekte GM değeri, Şekil 4.2’de gösterildiği gibi ortalama GM değerinden daha büyük olduğu için, gemiyi, meyil yapılan noktadan daha büyük bir su momentiyile geminin dik olduğu konumuna itme eğilimindedir. Bu, Şekil 4.2’de gösterildiği gibi, yalpa açısındaki değişimin sakin suya göre biraz daha büyük olmasını sağlar.

4.1.2 İkinci çeyrek

İkinci çeyrekte gemi bir dalga tepesiyle karşılaşır ve sonuç olarak stabilitesi azalır. Geri yükleme momenti artık, bu çeyrekte GM değeri, Şekil 4.2’de gösterildiği gibi ortalama GM değerinin altında olduğu için, daha az sakin-su momentiyile yalpa hareketine direnir. Sonuç olarak, gemi Şekil 4.2’de gösterildiği gibi sakin su durumuna nazaran daha büyük bir yalpa açısına ulaşır.

4.1.3 Üçüncü çeyrek

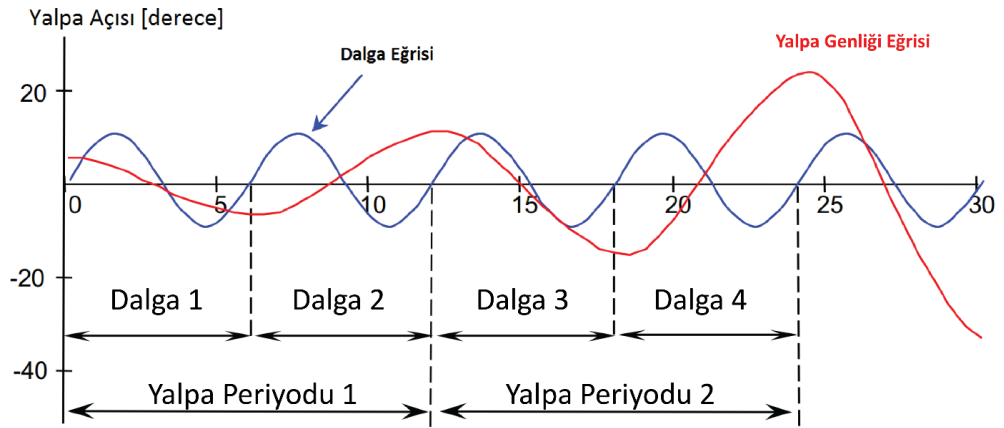
Üçüncü çeyrekte gemi ilk çeyrekte olduğu gibi aynı durumdan geçer ve bu çeyrekte GM değeri ortalama GM değerinden daha büyük olduğundan, sakın-sudan daha büyük olan bir geri yükleme momentine maruz kalmaktadır. Yalpa açısındaki değişim, Şekil 4.2’de gösterildiği gibi, sakın su durumuna nazaran daha büyük olur.

4.1.4 Dördüncü çeyrek

Dördüncü çeyrekte durum, ikinci çeyreğe benzer ve gemi, bu çeyrekte GM değeri, ortalama GM değerinin altında olduğu için, sakın su anı duruş hareketine göre daha fazla doğrultma momentine maruz kalır. Bu nedenle, yalpa salınımının T periyodunun sonunda, yalpa açısı Şekil 4.2’de gösterildiği gibi sakın suya nazaran daha da büyük olur.

4.1.5 Genel etki

Geminin dalgasıyla karşılaşma frekansında bir değişiklik olmazsa, doğrultma momentinin (sakin-su değerinden daha büyük) ve yalpaya direnen anın (sakin-su değerinden daha az) kombinasyonu, sadece birkaç döngüden sonra çok yüksek bir seviyeye kadar yalpa açısının büyümesine neden olabilir. Buna parametrik yalpa rezonans fenomeni denir.



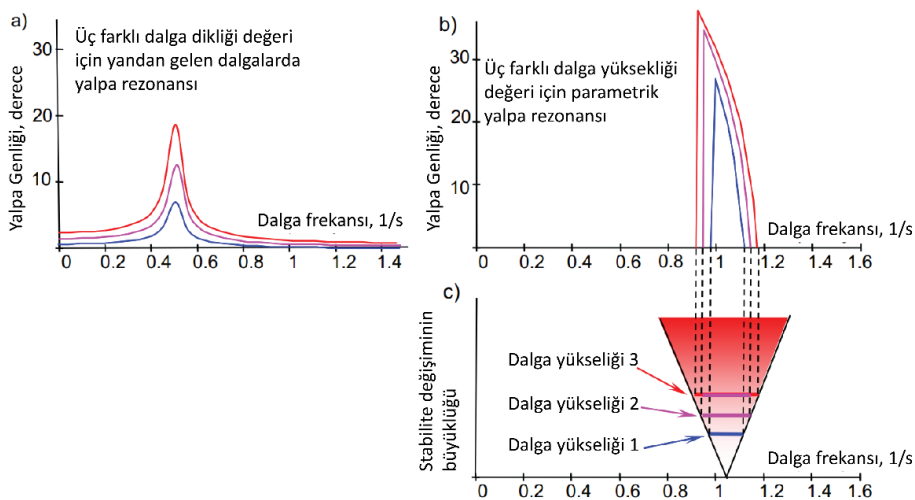
Şekil 4.2 : Parametrik yalpa rezonansının zamana bağlı değişimini gösteren grafik[26].

4.2 Parametrik Yalpa Rezonansının Frekans Karakteristikleri

Parametrik yalpa, bir rezonans olayıdır ve parametrik yalpa yandan gelen dalgalarda Şekil 3.3-a’da olduğu gibi sınırlı bir frekans aralığına sahiptir(Şekil 4.3-b). İki olay arasındaki temel fark, parametrik yalpa için frekans aralığının açıklığı stabilite büyüklüğüne bağlı olması, yalpa rezonansı içinse frekans aralığının dalga yüksekliğine bağlı olmasıdır (Şekil 4.3-c). Ayrıca yandan gelen dalgalar rezonans frekansından uzaktaysa, gemi sadece çok küçük yalpa genliklerine sahip olur. Parametrik yalpa olayı frekans aralığı dışında mevcut değildir. Yalpa genlikleri sıfıra eşittir.

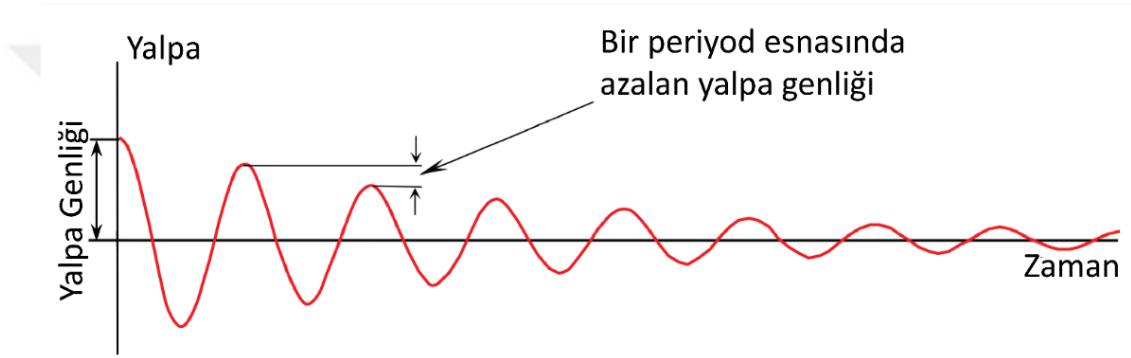
4.3 Yalpa Sönümlenmenin Etkisi

Bir gemi sakin suda hareketine başladıktan sonra, yalpa genlikleri Şekil 4.4’de görülebileceği gibi yalpa sönümlenme nedeniyle düzenli olarak azalmaktadır. Yalpa yapan bir gemi dalga ve girdaplar üretilip sürtünme direncine maruz kalır. Tüm bu süreçler yalpa sönümlenmesine katkıda bulunur. Yalpa sönümlenme parametrik yalpa rezonansına katkıda bulunur. Yalpa sönümlenme parametrik yalpa rezonansının gelişiminde kritik bir rol oynayabilir. Eğer yalpa sönümlenme neticesinde kaybedilen enerji, boyuna dalgalar nedeniyle kazanılan enerjiden daha fazla ise, yalpa açıları artmayacak ve parametrik rezonans oluşmayacaktır. Yalpa periyodu döngüsü boyunca, dalga nedeniyle geminin kazandığı enerji, yalpa sönümlenmesinden fazla olursa, parametrik yalpa genlikleri artmaya başlar.



Şekil 4.3 : (a) Yandan gelen dalgalarda yalpa rezonansı ; (b) parametrik yalpa rezonansı ; (c) parametrik yalpa rezonansının frekans aralığı[26].

Bu durumda, parametrik yalpa rezonansı için yalpa sönümleme eşiği vardır. Eğer yalpa sönümleme momenti bu eşikten fazlaysa, parametrik yalpa rezonansının oluşması mümkün değildir. Eğer yalpa sönümleme momenti bu eşiğin altında ise, parametrik yalpa rezonansı oluşabilir. Parametrik yalpa rezonansı sırasında, parametrik rezonansın gelişimi kısmında anlatıldığı gibi, dalga çukurunda artan ve dalga tepesinde azalan stabilite, daha sert geri itme kuvveti kombinasyonları oluşturması nedeniyle yüksek genliklere ulaşan yalpa meydana getirir. Karşılanması gereken tek koşul, yalpa sönümlemesinden kaynaklanan enerji kaybının parametrik yalpa rezonansının neden olduğu enerji artışını tamamen tüketecek kadar büyük olmasıdır.



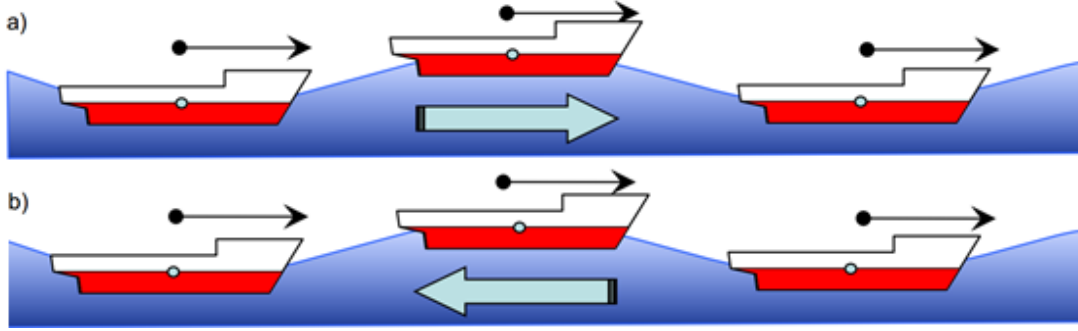
Şekil 4.4 : Yalpa sönümleme nedeniyle azalan yalpa genlikleri[26].

4.4 Hızın ve Dalga Yönünün Etkisi

Bir gemi hareket halindeyken dalgalarla karşılaşma sıklığı değişir. Bir gemi kıçtan veya kış omuzluktan gelen dalgalarda seyrederken, Şekil 4.5 a'da görüleceği gibi dalgaların yönü ve gemi istikameti benzerdir. Sonuç olarak, nispi hız küçüktür ve bir gemi aynı süre zarfında sıfır hız durumuyla kıyaslandığında daha az dalga ile karşılaşır. Karşılaşma periyodu, bu tip dalgalarda artmaktadır. Bekleneceği üzere karşılaşma frekansı da azalmaktadır.

Eğer gemi hareket halindeyken dalgaları baş veya baş omuzluktan alıyorsa, Şekil 4.5 b'da görüleceği gibi geminin hareket yönü ile dalgaların yönü farklıdır. Bunun sonucu olarak, nispi hız büyüktür ve gemi sıfır hız durumuna göre daha fazla dalga ile karşılaşır. Karşılaşma periyodu, bu tip dalgalarda azalmaktadır.

Parametrik yalpa rezonansı başlangıcı, parametrik yalpanın mümkün olduğu frekans aralığında olan karşılaşma sıklığına bağlıdır (Şekil 4.3-c). Bu nedenle parametrik yalpa rezonansı gelişimi geminin hızına ve dalga istikamete bağlıdır.



Şekil 4.5 : Dalga yönünün parametrik rezonansa olan katkısı.(a) kıçtan; (b) baştan gelen dalga[26].

5. PARAMETRİK YALPA REZONANSI ZAFİYET KRİTERLERİ

Zafiyet seviyesi 1 kriteri ve seviye 2 kriterlerinin ilk kontrolü, seviye 2 kriter 2 hesaplaması basitleştirerek geliştirilmiştir. Seviye 2 kriterlerinin ikinci kontrolünde kullanılan Mathieu denklemi, parametrik yalpa genliğinin, doğrusal olmayan yalpa sönümlemesi, doğrusal olmayan doğrultma momenti ve metasantr yüksekliği değişimine dayanarak, dalga frekansının, gemi yalpa frekansının yarısı kadar olduğunu belirleyen formüldür.

Seviye 1 kriteri ile seviye 2 kriterlerinin ilk kontrolü arasındaki fark; seviye 2 kriteri ilk kontrolü, metasantr yükseklik değişiminin hesaplanması için 16 farklı tipik dalga kullanırken, seviye 1 dalga boyunun gemi boyuna eşit olduğu ve en kötü senaryoya sahip dalgayı kullanır. Böylece, seviye 1 kriterinin, seviye 2 kriterlerinin ilk kontrolüne göre daha korunumlu olması beklenir.

Hem seviye 1 kriteri hem de seviye 2 kriterlerinin ilk kontrolü, ortaya çıkma koşulu ile parametrik yalpa tehlikesini yargılamakla birlikte, seviye 2 kriterinin ikinci kontrolü, parametrik yalpa genliğini incelemektedir. Bu, eğer parametrik yalpa küçük bir genlik ile gerçekleşirse, seviye 2 kriterlerinin ikinci kontrolü, geminin parametrik yuvarlanma nedeniyle parametrik yalpa durumuna karşı zafiyeti olmadığı sonucuna varabilir. Böylece, seviye 2 kriterlerinin ikinci kontrolü prensipte daha az güvenilir olduğunu göstermektedir.

Seviye 1 ve 2 kriterleri için standartlar, konteyner gemileri için toplanan büyük meyil açılarında oluşan kaza raporları baz alınarak belirlenmiştir.

5.1 Parametrik Yalpa için Seviye 1 Zafiyet Kriteri

Bir gemi aşağıdaki kriterleri karşılıyor ise parametrik yalpa moduna karşı zafiyeti yok olarak değerlendirilir:

$$\frac{\Delta GM_1}{GM_C} \leq R_{PR} \quad (5.1)$$

$R_{PR} = 1.87$ (Eğer gemi keskin sintine dönüşüne sahipse Şekil 5.2)

$$= \begin{cases} 0.17 + 0.425 \left(\frac{100 A_k}{LB} \right) & ; C_m \geq 0.96 \\ 0.17 + (10.625 C_m - 9.775) \left(\frac{100 A_k}{LB} \right) & ; 0.94 < C_m < 0.96 \\ 0.17 + 0.2125 \left(\frac{100 A_k}{LB} \right) & ; C_m \leq 0.94 \end{cases} \quad (5.2)$$

$\left(\frac{100 A_k}{LB} \right)$ 4 değerini geçmemelidir.

GM_C = Serbest yüzey düzeltmesi yapılmış sakin su yükleme kondisyonu
metesantr yüksekliği [m]

ΔGM_1 = Metesantr yüksekliği varyasyonunun büyüklüğü [m]

C_m = Orta kesit narinlik katsayısı

A_k = Yalpa omurgasının açılmış halinin toplam alanı [m²]

L = Gemi boyu [m]

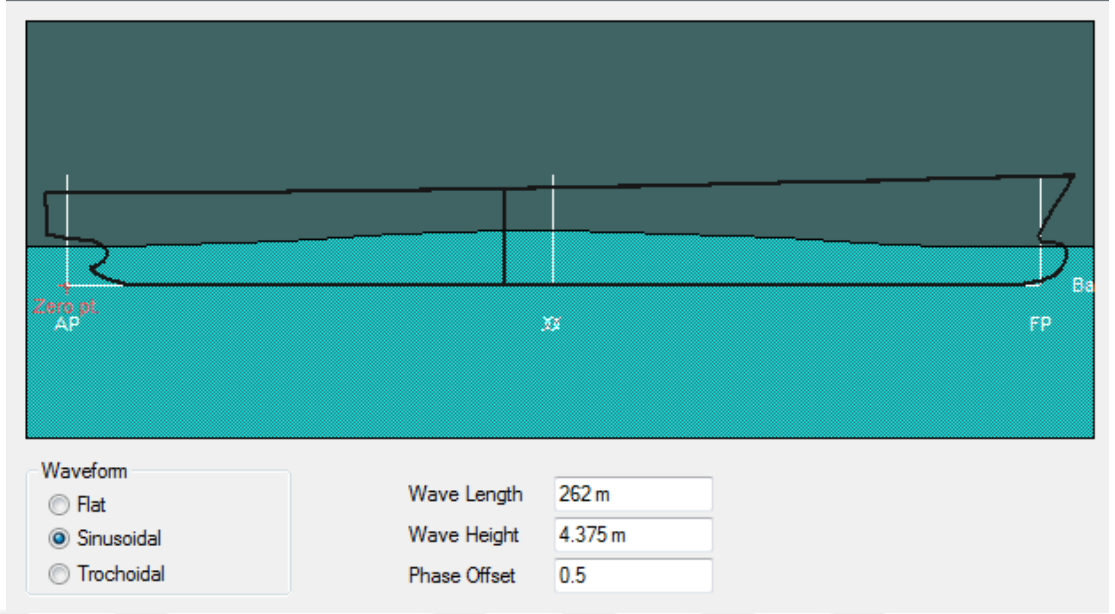
B = Gemi kalıp genişliği [m]

ΔGM_1 hesaplanırken, dalga boyu geminin boyuna eşitlenir. Dalga yüksekliği ise dalga boyu ile 0.0167 değerinin çarpılması ile bulunur. Bu dalganın sinüzoidal forma sahip olduğu varsayılarak, geminin dikmeleri arasında 10 istasyon için GM değerleri hesaplanır. Hesaplanan GM değerleri arasından en büyük ve en küçük olan değerlerin ortalaması ΔGM_1 değerini verir.

Dalga Boyu : $\lambda = L$;

Dalga Yüksekliği : $h = L \cdot S_w$; $S_w = 0.0167$

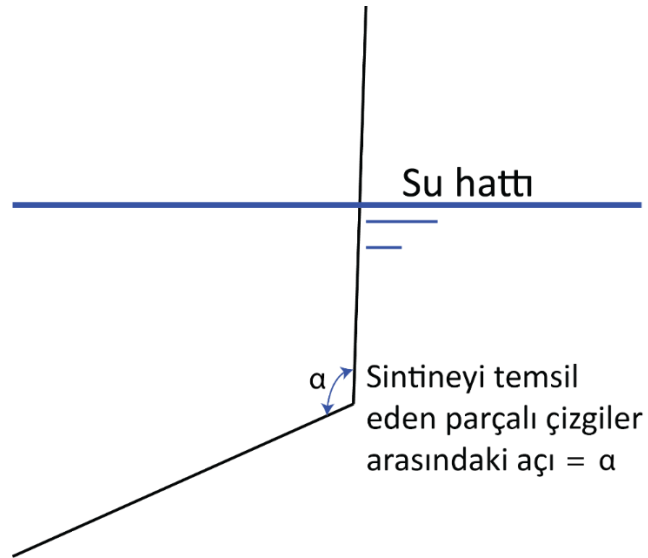
Dalge Tepesi : gemi mastorisinde (Şekil 5.1); $0.1L$, $0.2L$, $0.3L$, $0.4L$ ve $0.5L$ gemi başına doğru ve $0.1L$, $0.2L$, $0.3L$, $0.4L$ gemi kıkına doğru konumlandırılır.



Şekil 5.1 : Dalga tepesinin gemi ortasında olduğu durum.

Hasarsız stabilite kodunun B kısmının (IS Code–Part B) 2.11.2.1 paragrafındaki "keskin sintine", sintine yarıçapının, geminin genişliğinin % 1'inden daha küçük olduğu ve sintineyi temsil eden çizgiler arasındaki açının, Şekil 5.2'de gösterilen açının 120° 'den küçük olduğu anlamına gelir.

Bu bölümde yapılan hesaplamaların, gemi yükleme durumuna göre yapılması gerekmektedir. Aynı zamanda, geminin yüklü haliyle başlangıç su çekiminin değişmesi – batma ve triminin hesaplanarak, denge koşuluna gelmesi sağlanmalıdır. Sadece gemi formu baz alınarak yapılan hesaplamalar doğru olmayacaktır.



Şekil 5.2 : Sintineyi temsil eden parçalı çizgiler arasındaki açının tanımı.

5.2 Parametrik Yalpa için Seviye 2 Zafiyet Kriterleri

Eğer gemi formu yükleme durumuna göre seviye 1 zafiyet kriterini karşılamayacak seviyedeyse, seviye 2 zafiyet kriterleri kontrol edilir. Bir gemi için R_{PR0} aşağıda belirtilen şartlardan birisinden büyük ise parametrik yalpa moduna karşı zafiyeti yok olarak değerlendirilir:

- Zafiyet seviyesi 2 kriter 1 (C1) değeri,
- Zafiyet seviyesi 2 kriter 2 (C2) değeri.

Burada,

$R_{PR0} = 0.06$ olarak belirlenmiştir.

5.2.1 Zafiyet seviyesi 2 kriter 1 hesaplaması

C1 değeri aşağıda verilen formülasyon ile hesaplanmaktadır.

$$C1 = \sum_{i=1}^N W_i C_i \quad (5.3)$$

Burada,

W_i = Çizelge A'da verilen değeri gösteren ağırlık faktörü

$$C_i = \begin{cases} 0, & \text{Eğer bölüm 4.2.1.1 de verilen GM varyasyonları veya} \\ & \text{bölüm 4.2.1.2 de dalgalardeki gemi hızı sağlanıyorsa} \\ 1, & \text{yukarıda verilen şartlar sağlanmıyorsa} \end{cases}$$

N = Çizelge A'da verilen toplam dalga sayısı

5.2.1.1 Zafiyet seviyesi 2 kriter 1 GM varyasyon hesapları

Çizelge A'da verilen her bir dalga durumu için GM varyasyon gereksinimlerinin karşılanması için:

$$GM(H_i, \lambda_i) > 0 \quad \text{ve} \quad \frac{\Delta GM(H_i, \lambda_i)}{GM(H_i, \lambda_i)} < R_{PR} \quad (5.4)$$

olmalıdır. Burada,

i = Dalga durum numarası

R_{PR} = Parametrik yalpa için seviye 1 zafiyet kriteri hesaplamalarında bulunan değer

ΔGM_1 = H_i ve λ_i ile karakterize edilen bir dizi dalga üzerinde, gemi üzerinde batma ve trim koşullarının dengelenecek şekilde dikkate alınarak; yükleme koşuluna karşılık gelen, gemi için hesaplanan metasantr yüksekliğin maksimum ve minimum değerleri arasındaki farkın yarısı [m]

$GM(H_i, \lambda_i)$ = H_i ve λ_i ile karakterize edilen bir dizi dalga üzerinde, gemi üzerinde batma ve trim koşullarının dengelenecek şekilde dikkate alınan yükleme durumuna karşılık gelen gemi için hesaplanan metacentric yüksekliğinin ortalama değeri [m]

H_i = Çizelge 4.1’de verilen her bir dalga durumuna karşılık gelen dalga yüksekliği[m]

λ_i = Çizelge 4.1’de verilen her bir dalga durumuna karşılık gelen dalga boyu [m]

5.2.1.2 Zafiyet seviyesi 2 kriter 1 kritik hız hesapları

$$V_{PR_i} > V_S \quad (5.5)$$

olmalıdır. Burada,

V_S = Gemi servis hızı [m/s]

V_{PR_i} = $GM(H_i, \lambda_i) > 0$ olduğunda, parametrik rezonans koşullarına karşılık gelen referans gemisi hızı [m/s] :

$$\left| \frac{2\lambda_i}{T_\phi} \sqrt{\frac{GM(H_i, \lambda_i)}{GMC}} - \sqrt{g \frac{\lambda_i}{2\pi}} \right| \quad (5.6)$$

T_ϕ = Geminin sakin su doğal yalpa frekansı [s]

GMC = Bölüm 5.1’de tanımlandığı gibi

$GM(H_i, \lambda_i)$ = Bölüm 5.1’de tanımlandığı gibi

λ_i = Çizelge 5.1’de verilen her bir dalga durumuna karşılık gelen dalga boyu[m]

g = 9.81 m/s² değerine karşılık gelen yerçekimi ivmesi

$||$ = Mutlak değer operatörü

$GM(H_i, \lambda_i)$ ve $\Delta GM(H_i, \lambda_i)$ hesaplanırken, dalga tepesi mastoride; 0.1L, 0.2L, 0.3L, 0.4L ve 0.5L gemi başına doğru ve 0.1L, 0.2L, 0.3L, 0.4L gemi kıçına doğru konumlandırılır.

Bu bölümde yapılan hesaplamaların, Çizelge 5.1’de verilen her bir dalga durumu için GM varyasyon gereksinimlerinin karşılanması için Denklem 5.5 ile verilen koşulu sağlaması gerekmektedir.

5.2.2 Zafiyet seviyesi 2 kriter 2

İkinci seviye zafiyet kriteri için ikinci kontrol aşaması, parametrik yalpadan kaynaklanan maksimum yalpa açısının hesaplanmasını gerektirir. Bu hesaplama, çok karmaşık olmasa da geleneksel gemi mühendisliği hesaplarının kapsamı dışındadır. Gemi hareketlerini değerlendirmenin geleneksel yolu, genlik karşılık fonksiyonu (Response Amplitude Operator, RAO) kullanılmasıdır. RAO bir geminin dinamik özelliklerini ifade eder. RAO değerleri, deniz spektrumunun değerleri ile çarpılan ve hareket karakteristiklerini elde etmek için toplanan hareketlerin karakteristikleridir.

RAO kullanımı, dalgalardaki doğrusal gemi hareket denklemine bir eleman veya bir çözüm şeklidir. “Doğrusal gemi hareket denklemi” terimi, denklemin hareketlerinin küçük olduğunu ve tam gemi hareket denkleminin doğrusal olmayan kısımlarının ihmal edilebileceğini (çoğu zaman dalgaların gemiden önemli ölçüde daha uzun olması nedeniyle) göz ardı edilebileceğini varsayar. Özellikle, enine stabiliteyi karakterize eden GM, yalpa katılık matrisini ifade etmek için kullanılır. Buna karşın, büyük yalpa açılarında stabilite tek başına GM değerleri ile ifade edilemez.

Maksimum parametrik yalpa açısı, dalgalardaki değişimi bilinse bile sadece GM ile birlikte bulunamaz. Bununla birlikte giderek büyüyen yalpa açıları bu GM varyasyonları ile birlikte karşılaşma frekansının doğal yalpa frekansının iki katına yakın (teorik olarak iki katına eşit) olduğu bir frekans oranıyla ilişkilidir.

Çizelge 5.1 : Dalga durumları.

Dalga Durum Numarası	Ağırlık W_i	Dalga Boyu λ [m]	Dalga Yüksekliği H_i [m]
01	0.000013	22.574	0.350
02	0.001654	37.316	0.495
03	0.20912	55.743	0.857
04	0.092799	77.857	1.295
05	0.199218	103.655	1.732
06	0.248788	133.139	2.205
07	0.208699	166.309	2.697
08	0.128984	203.164	3.176
09	0.062446	243.705	3.625
10	0.24790	287.931	4.040
11	0.008367	335.843	4.421
12	0.002473	387.440	4.769
13	0.000658	442.723	5.097
14	0.000158	501.691	5.370
15	0.000034	564.345	5.621
16	0.000007	630.684	5.950

5.2.3 Zafiyet seviyesi 2 kriter 2 hesaplaması

$C2$ değeri, Çizelge B.1’de belirtilen dalga kümesinin ağırlıklı ortalaması olarak, her bir Froude sayısı ve belirtilen dalga yönleri için $C2 (Fn_i)$ değerinin ortalaması olarak hesaplanır.

Çizelge B içerisinde bulunan her bir dalga kümesi ağırlığına karşılık gelen dalga yükseklikleri hesaplanır. Sonrasında Çizelge 5.2’de verilen hız durumlarına karşılık gelen üç adet baştan gelen, üç adet kıçtan gelen ve bir adet sıfır hız durumu için, 11 adet dalga yüksekliğine göre maksimum yalpa açıları bulunur. Daha sonrasında çizelge B’de verilen dalga oluşum katsayısına karşılık gelen her bir dalga yüksekliğini için maksimum yalpa açısı lineer interpolasyon ile hesaplanır. Eğer bu hesap sonucunda bulunan değer 25 dereceden fazla ise, dalga yüksekliğine karşılık gelen dalga oluşum katsayısı ile çarpılarak ağırlıklı ortalaması bulunur.

$$C2 = \left[\sum_{i=1}^3 C2_h(Fn_i) + C2_h(0) + \sum_{i=1}^3 C2_f(Fn_i) \right] / 7 \quad (5.7)$$

Burada,

$C2_h(Fn_i) = C2_h(Fn_i)$ Denklem 6.20 ile verilen vektör-değer fonksiyonunun gemi baştan gelen dalgalarda V_i hızıyla seyrettiği durumda hesaplanır.

$C2_f(Fn_i) = C2_f(Fn_i)$ Denklem 6.20 ile verilen vektör-değer fonksiyonunun gemi kıçtan gelen dalgalarda V_i hızıyla seyrettiği durumda hesaplanır.

$$Fn_i = \frac{V_i}{\sqrt{gL}} = V_i \text{ hızına karşılık gelen Froude sayısı}$$

$$V_i = V_S K_i = \text{Gemi hızı [m/s]}$$

$$g = \text{Yerçekimi ivmesi [m/s}^2\text{]}$$

$$K_i = \text{Çizelge D'den elde edilen değerler}$$

$$L = \text{Gemi boyu [m]}$$

Çizelge 5.2 : Hız katsayıları.

i	K_i
1	1.000
2	0.866
3	0.50

$C2(Fn)$ değeri, Çizelge 5.2'de verilen tablo ve gemi hızına göre hesaplanan Froude sayısı ve dalga yönü için Çizelge B.1 'de belirtilen dalga oluşum katsayılarından ağırlıklı ortalama olarak hesaplanır:

$$C2_h(Fn) = \sum_{i=1}^N W_i C_i \quad (5.8)$$

$$C2_f(Fn) = \sum_{i=1}^N W_i C_i \quad (5.9)$$

Burada,

$W_i = \text{Çizelge B.1 'de her bir dalgaya karşılık gelen dalga oluşum katsayısı}$

C_i = Eğer bölüm 7 ile açıklanan hesaba göre maksimum yalpa açısı 25 dereceden büyük ise 1, değilse 0

N = Çizelge B.1 'de bulunan toplam dalga sayısı [17x16]

Baştan ve kıçtan eden dalgalarındaki maksimum yalpa açısı, 2.11.3.3'te tanımlanan her hız için 2.11.3.4.1'de önerildiği gibi değerlendirilmiştir. Her bir değerlendirme için, dalgalarındaki stabilite hesaplaması, geminin batma / trimde dengelenmesi ve aşağıdaki özelliklerle bir dizi dalga üzerinde düzeltilmesi gerektiğini varsaymalıdır:

Baştan gelen ve takip eden dalgalarındaki maksimum yalpa açısı, Çizelge 4.2'de tanımlanan katsayılar ile gemi hızının kombinasyonu olan her hız durumu için :

Dalga boyu $= \lambda = L$

Dalga yüksekliği, Çizelge B'deki dalga oluşum katsayılarına karşılık gelen dalga yüksekliğinin maksimum değeri olan yükseklik h_{max} için:

$$h_i = 0.1 j h_{max} , burada j = 0,1, \dots, 10 \quad (5.10)$$

karşılık gelen maksimum yalpa açısının lineer interpolasyonu ile hesaplanır.

Çizelge B'nin her bir hücresi, ortalama sıfır yukarı-geçiş dalga periyoduna (T_Z) ve etkin dalga yüksekliğine (H_S) karşılık gelir. Bu iki değerle, temsili bir dalga yüksekliği, H_{ri} hesaplanmalıdır,;

$$H_{ri} = \begin{cases} 4.0\sigma_{Heff} & 4.0\sigma_{Heff} \leq 0.1L \\ 0.1L & 4.0\sigma_{Heff} > 0.1L \end{cases} \quad (5.11)$$

$$\sigma_{Heff}^2 = \sum_{i=1}^N \left(RAO_{Heff}(\omega_i) \right)^2 S_W(\omega_i) \Delta\omega \quad (5.12)$$

$$RAO_{Heff}(\omega) = \begin{cases} \left\{ \frac{k_\omega(\omega) \cdot L \sin(0.5k_\omega(\omega) \cdot L)}{\pi^2 - (0.5k_\omega(\omega) \cdot L)^2} \right\} & \omega \neq \omega_L \\ 1.0 & \omega = \omega_L \end{cases} \quad (5.13)$$

$$k_\omega(\omega) = \frac{\omega^2}{g} \quad (5.14)$$

$$\omega_i = (i + 1)\Delta\omega ; i = 1,2,3, \dots N_{eff} \quad (5.15)$$

$$\Delta\omega = \frac{3\omega_L}{N_{eff}} \quad (5.16)$$

$$\omega_L = \sqrt{\frac{2\pi g}{L}} \quad (5.17)$$

$$S_W(\omega) = \frac{H_S^2}{4\pi} \left(\frac{2\pi}{T_Z}\right)^4 \omega^{-5} \exp\left(-\frac{1}{\pi} \left(\frac{2\pi}{T_Z}\right)^4 \omega^{-4}\right) \quad (5.18)$$

H_{ri} = Temsili dalga yüksekliği [m]

N_{eff} = İterasyonun sayısal hata oranını %0.001 olacak şekilde seçilen dalga frekans ayırıklaştırması.

RAO_{Heff} = Transfer fonksiyonu

S_W = Deniz dalgasının spektral yoğunluğu

ω = Dalga frekansı

H_S = Etkin dalga yüksekliği

T_Z = Ortalama sıfırdan geçiş periyodu

Yukarıda verilen H_S ve T_Z değerleri, çizelge B.1’de sırasıyla ilk sütun ve satırda bulunan hücrelerdeki değerlerdir.

6. PARAMETRİK YALPA HAREKET DENKLEMİ VE MAKSİMUM YALPA AÇISININ HESAPLANMASI İÇİN ÇÖZÜM YÖNTEMİ

Hareket denklemi, gemi üzerine etkiyen kuvvetleri hesaba katar. Maksimum yalpa açısının değerlendirilebilmesi için en basit matematiksel denklem dört adet moment değerini içermektedir.

1. Atalet Momenti : Hidrodinamik kuvvetlerin bir parçası olarak atalet momenti ve ilave atalet (ek kütle) momenti
2. Yalpa Sönümü : Dalgalar, girdaplar ve yüzey sürtünmesi yaratmak için kullanılan enerji kaybını ifade eden moment terimi
3. Doğrultma momenti : Dalganın boy, yükseklik ve tipine göre oluşturulmuş olan GZ eğrisini ifade eder.
4. Yandan gelen dalga kuvvetleri: Tam olarak takip eden veya uzun tepeli denizlerde seyreden bir gemi için mevcut değildir.

6.1 Atalet Momenti Terimi

Bir geminin katı bir cisim olarak yalpa ataleti, enine eylemsizlik momenti $[I_{xx}]$ ile ölçülür. Atalet kuvvetleri ivmeler ile doğru orantılıdır. İvmeli harekete maruz bırakılan bir gemiye etkiyen hidrodinamik kuvvetler de ivmelenmeyle doğru orantılıdır. Bu hidrodinamik kuvvetler genellikle ek bir kütle veya ek kütle momenti olarak adlandırılan atalet momenti olarak ifade edilir ve A_{44} ile gösterilir. Yalpa atalet momenti aşağıda olduğu gibi ifade edilir:

$$M_{IN} = (I_{xx} + A_{44})W_{\phi} \quad (6.1)$$

Burada,

$W_{\phi} (\ddot{\phi})$ = Yalpa hareketi açısal ivmelenmesi,

$I_{xx} + A_{44}$ = Atalet momenti ve ek kütle momenti toplamıdır.

Atalet momenti ve ek kütle momentini hesaplamak için,

$$\omega_{\phi} = \sqrt{\frac{\rho \nabla g G M_0}{I_{xx} + A_{44}}} \quad (6.2)$$

$$\omega_{\phi} = \frac{2\pi}{T_{\phi}} \quad (6.3)$$

Denklem 6.2 ve 6.3 kullanılarak,

$$\sqrt{\frac{\rho \nabla g G M_0}{I_{xx} + A_{44}}} = \frac{2\pi}{T_{\phi}} \quad (6.4)$$

ve

$$I_{xx} + A_{44} = \frac{\rho \nabla g G M_0 T_{\phi}^2}{4\pi^2} \quad (6.5)$$

Eğer doğal yalpa periyodu biliniyorsa yukarıdaki denklemde kullanılır. Bilinmediği durumlarda IS Code 2008-Part B (MSC.267(85)) paragraf 2.3.4 de bulunan ampirik formül kullanılabilir:

$$T_{\phi} = \frac{2CB}{\sqrt{GM_0}} \quad (6.6)$$

$$C = 0.373 + 0.023 \left(\frac{B}{d} \right) - 0.043 \left(\frac{L_{wl}}{100} \right) \quad (6.7)$$

Burada ω_{ϕ} açısal yalpa frekansı, T_{ϕ} doğal yalpa frekansı, B gemi kalıp genişliği, d gemi su çekimi, L_{wl} su hattı boyu, ρ tuzlu su yoğunluğu, ∇ deplasman hacmi, g yerçekimi ivmesi ve GM_0 sakin su metasandır yüksekliğidir.

6.2 Yalpa Sönümleme Terimi

Yalpa hareketinin sönümlenmesi, esasen hareketli bir geminin kinetik enerjisinin çevreye aktarılmasıdır. Bu karmaşık bir süreçtir, çünkü bu enerji transferi farklı fiziksel fenomenlerde ortaya çıkar. Yüzey sürtünmesi, gemi formuna en yakın su katmanlarının hareket etmesine neden olur.

Geminin hareket eden formunun yüzeyi vortekslerin oluşumuna yol açar. Oluşan bu vortekslerin kinetik enerjisi hareket halindeki gemiden kaynaklanmaktadır. Gemi ayrıca su yüzeyinde de enerji dağıtan dalgalar oluşturur. Bu fiziksel fenomenlerin karmaşıklığının, matematiksel olarak çözümlemeyi çok zor hale getirmesinden ötürü model testinin, yalpa sönümlemesinin ölçülmesi açısından en önemli bilgi kaynağı olmasının sebebidir.

Bununla birlikte, hesaplamalı akışkanlar dinamiğindeki (CFD) son gelişmeler gelecekte bu hesaplama yönteminin kullanılabilirliği konusunda söz sahibi olacağını göstermektedir. Gemiye özgü veya prototip verilerinin yokluğunda basitleştirilmiş Ikeda yöntemi önerilebilir (bkz: EK A). Bir yalpa sönümleme momenti aşağıdaki şekilde sunulmuştur:

$$M_D = (I_{xx} + A_{44})(\alpha V_\phi + \gamma V_\phi^3) = B_{44}(\phi_a)\dot{\phi} \quad (6.8)$$

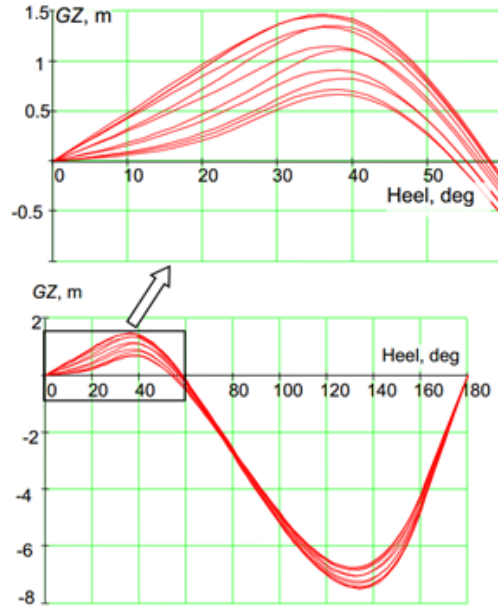
Burada α Ikeda'nın basitleştirilmiş yönteminde hesaplanan lineer terim, γ Ikeda'nın basitleştirilmiş yönteminde hesaplanan non-lineer terimdir. Bölüm 7'de anlatılan hesap yapıldıktan sonra bulunan değerler ile lineer ve non-lineer terimlerin bulunması amacıyla yine Bölüm 7'de verilen yöntem önerilmiştir.

Basitleştirilmiş Ikeda metodu bazı ampirik elementler içerir ve bu nedenle uygulanabilirliğinin aralığı gözlenmelidir. Bu aralıklar EK-A ile verilen ve gemi formunun genel karakteristiklerine ait olan sınır değerlerdir.

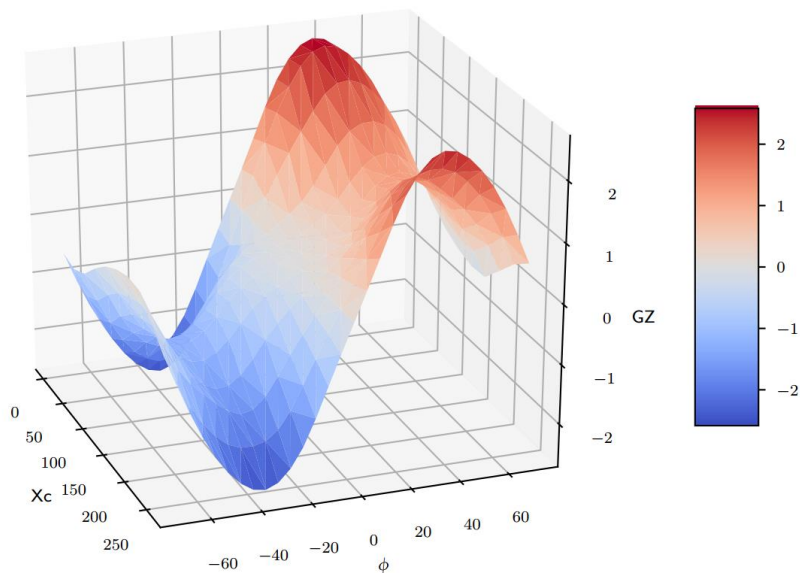
6.3 Doğrultma Momenti Terimi

Parametrik yalpanın doğru temsil edilebilmesi için doğrultma momentinin doğru bir şekilde gösterilmesi çok önemlidir. Dalgalarındaki stabilite değişimi, parametrik yalpanın gelişmesi için temel bir mekanizmadır. Doğrultma momentinin anlık hesabı, seviye 2 zafiyet kriteri kontrolü için çok kompleks bir hale gelebilir. Bu sebeple, yarı statik (quasi-static) yaklaşım kullanılabilir. Yarı statik yaklaşım, geminin dalga üzerindeyken GZ eğrisinin kuvvet ve momentlerin batma ve trim değerleri için dengelenerek yapıldığı geleneksel yaklaşımlar ile yapılmasını anlatmaktadır. Burada su hattı, normalde olduğundan farklı olarak düz olarak değil, dalga yüzeyi ile gemi formunun kesiştiği noktalar baz alınacak şekilde modellenmektedir. Pek çok ticari stabilite yazılım paketi, bu tarzda hesaplamaları yapabilecek kapasiteye sahiptir.

Parametrik yalpa hesaplarının değeriendirilebilmesi için, GZ eğrisinin 180 dereceye kadar hesaplanması önerilir. Böylelikle, doğal bir maksimum değeri tanımlanmış olur ve sayısal hesaplamalarda oluşacak hataların en aza indirilmesi sağlanır. Bu yaklaşıma alternatif olarak, hesaplama içerisinde maksimum kesme açısı kullanılabilir. Parametrik yalpa hesaplamaları, bu açı değeri aşıldıktan sonra durdurulur. Pratik olarak bu kesme açısı, GZ hesaplamalarının yapıldığı en büyük açı ve civarındaki değeri olarak sınırlandırılabilir.



Şekil 6.1: Herbir dalga tepesi için hesaplanan doğrultma kolu eğrileri[26].



Şekil 6.2 : Hesaplanan doğrultma kollarının interpolasyonu ile oluşturulan yüzey.

Şekil 6.1 her bir dalga tepesinin kırık dikmeye olan mesafesine göre göreceli olarak hesaplanan doğrultma kolu (GZ) değerleri gösterilmektedir. Şekil 6.2’de ise, ara değerlerin hesaplanabilmesi maksadıyla oluşturulan üç boyutlu GZ eğrisi verilmiştir. Burada ϕ yalpa açısını, X_c dalga tepesinin kırık dikmeye olan mesafesini göstermektedir. Yapılan hesaplamalarda her bir iterasyon içerisinde hesaplanan yalpa açısı ve dalga tepesinin konumu değerleri, bilinear veya bi-kübik spline interpolasyonu ile Şekil 6.2 ile gösterilen grafik üzerinden okunacaktır.

Dalga tepesinin gemi üzerinde boyuna konumunun zamana bağlı olarak hesaplanabilmesi için aşağıdaki denklemler kullanılmalıdır:

$$\omega = \sqrt{\frac{2\pi g}{L_{BP}}} \quad (6.9)$$

$$\omega_e = \omega - \frac{\omega^2}{g} V_s \cos \beta \quad (6.10)$$

$$T_e = \frac{2\pi}{\omega_e} \quad (6.11)$$

$$W_{loc} = \frac{t}{T_e} - floor\left(\frac{t}{T_e}\right) \quad (6.12)$$

$$X_C = \begin{cases} \frac{L_{BP}}{2} - L_{BP} \cdot W_{loc} & ; W_{loc} < 0.5 \\ L_{BP} - L_{BP} \cdot (W_{loc} - 0.5) & ; W_{loc} \geq 0.5 \end{cases} \quad (6.13)$$

Burada,

ω = Dalga frekansı [1/s]

ω_e = Dalga karşılaşma frekansı [1/s]

T_e = Dalga karşılaşma periyodu [s]

g = Yerçekimi ivmesi

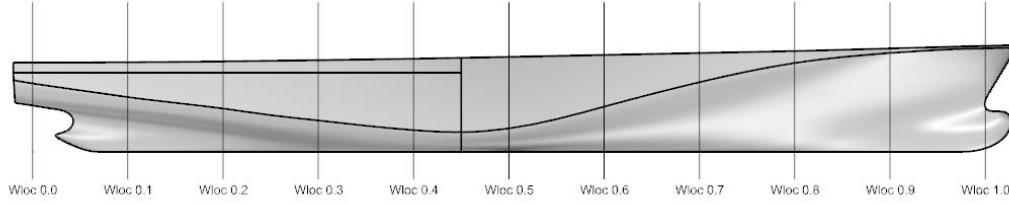
L_{BP} = Dikmeler arası boy

t = Hesaplama esnasındaki zaman

$floor$ = Parametreden $\left(\frac{t}{T_e}\right)$ küçük en büyük tam sayı

W_{loc} = Dalga tepesinin gemi boyuna mevkisi (Şekil 6.3)

X_C = Dalga tepesinin konumu (sıfır referans noktası: gemi kış dikmesi)



Şekil 6.3 : W_{loc} değişkeninin gemi boyuna göre konum ve değerleri.

Denklem 6.13 ile verilen ifade, parametrik yalpa analizine başlama konumunun $t = 0$ saniye anında gemi ortası olması için yapılmıştır.

Eğer hesaplama paket yazılımı mevcut değilse, dalgalarındaki sadece GM değerini kullanarak bir dalgadaki GZ eğrisi yaklaşımı kullanılabilir. Bu yaklaşımda kullanılan GZ eğrisi, dalgalı durum için hesaplanan metasantr yüksekliği değerleri ile sakin-su GZ eğrisi ile “modüle bir biçimde” ile gösterilebilir:

$$GZ(t, \phi) = \frac{GM(t)}{GM_0} GZ_0(\phi) \quad (6.14)$$

Burada,

$GM(t)$ = Dalgalı durum metasantr yüksekliği [m]

GM_0 = Sakin su metasantr yükseliği [m]

GZ_0 = Sakin su doğrultma kolu eğrisi [m]

Simetrik bir GZ eğrisi için toplam doğrultma momenti şu şekilde ifade edilir:

$$M_R = \text{sign}(\phi) \cdot \rho \nabla g \cdot GZ(t, |\phi|) \quad (6.15)$$

$$\text{sign}(\phi) = \begin{cases} 1 & \phi \geq 0 \\ -1 & \phi < 0 \end{cases} \quad (6.16)$$

Asimetrik bir GZ eğrisi için sancak ve iskele hesaplamaları ayrı ayrı yapılarak doğrultma momenti şu şekilde ifade edilir:

$$M_R = \rho \nabla g \cdot GZ_B(t, \phi) \quad (6.17)$$

$$GZ_B(t, \phi) = \begin{cases} GZ_S(t, \phi) & \phi \geq 0 \\ GZ_P(t, \phi) & \phi < 0 \end{cases} \quad (6.18)$$

Burada,

$GZ_B(t, \phi)$ = Toplam doğrultma eğrisi [m]

$GZ_S(t, \phi)$ = Sancak taraf için doğrultma eğrisi [m]

$GZ_P(t, \phi)$ = İskele taraf için doğrultma eğrisi [m]

Doğrultma eğrisinin doğrultma momenti işlemlerinin, sancak tarafa yalpa yaparken pozitif, iskele tarafa yalpa yaparken negatif değere sahip olduğu varsayılır.

6.4 Hareket Denklemi İfadesi

Newton'un ikinci yasasına uygun olan yalpa hareketi denklemi, diğer tüm kuvvetlerin toplamına eşit olan atalet kuvveti olarak ifade edilir. Gemi boyuna dalgalarda olduğu için, dalgalardan gelen ihmal edilebilir veya doğrudan zorlama yoktur:

$$M_{IN} = -M_D - M_R \quad (6.19)$$

Burada önceki bölümde bahsedildiği üzere,

M_{IN} = Atalet momenti terimi

M_D = Yalpa sönümü terimi

M_R = Doğrultma momenti terimi olarak verilmiştir.

Yukarıdaki denklemde, yalpa hareketi ve yalpa hızına karşı yönlenmelerinden ötürü yalpa sönümü ve doğrultma momenti terimleri eksi işaretli olarak verilmiştir. Yalpa hareketi denklemi her bir kuvvet teriminin yalpa parametreleri ve zamana göre yeniden yazılabilir:

$$M_{IN}(W_\phi) + M_D(V_\phi) + M_R(t, \phi) = 0 \quad (6.20)$$

$W_\phi(\ddot{\phi})$ = Yalpa hareketi açısal ivmesi

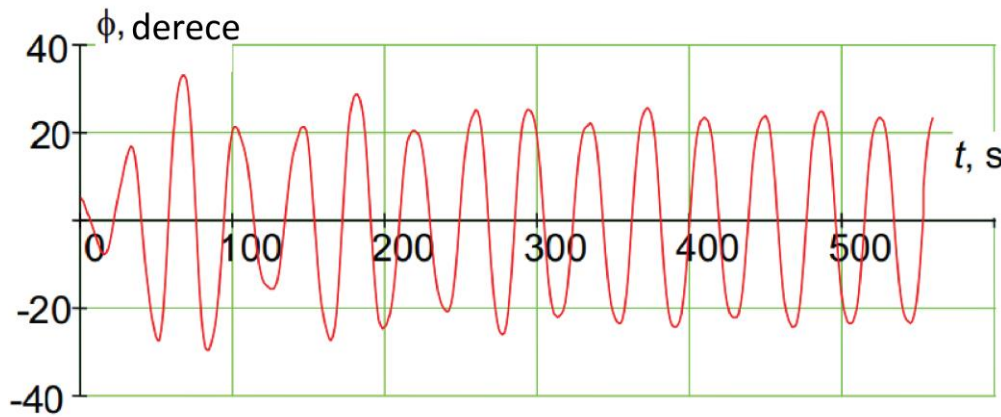
$V_\phi(\dot{\phi})$ = Yalpa hareketi hızı

ϕ = Yalpa açısı

Bu denklem, yalpa hareketini açısal yalpa hızı ve açısal yalpa ivmesi ile ilişkilendirir. Bu parametreler türev ile ilgilidir: açısal hız, yalpa büyüklüğünün türevidir ve açısal ivme, açısal hızın bir türevidir. Böylece, bu denklem diferansiyel bir denklem olarak karşımıza çıkmaktadır. Diferansiyel denklemin çözümü, Şekil 6.4'te gösterilene benzer bir şekilde, yalpa hareketlerinin zamana bağlı değişimidir. Şekil 6.4 parametrik yalpa rezonansı göstermektedir. Gemi boyuna dalgalarla seyrederken, enine düzlemde zorlama yoktur, dolayısıyla gözlemlenen dönme hareketi genellikle parametrik rezonansın bir sonucudur.

Denklem 6.19 ile verilen denklemin çözümü, uygun sayısal yöntemler kullanılarak bulunabilir. Bu amaçla hareket denklemi vektör-değer fonksiyonu olarak tanımlanırsa:

$$F\left(\begin{pmatrix} \phi \\ V_\phi \end{pmatrix}, t\right) = \frac{1}{I_{xx} + A_{44}} \begin{pmatrix} V_\phi \\ -M_D(V_\phi) - M_R(t, \phi) \end{pmatrix} \quad (6.21)$$



Şekil 6.4 : Parametrik yalpa rezonansının zamana bağlı değişimi[26].

Denklem 6.20'de gösterilen vektör-değer fonksiyonu ile tanımlanan diferansiyel denklem, başlangıç değer problemi olarak görülür. Runge-Kutta sayısal yöntemi gibi çözücüsü olan bu denklem, başlangıç şartları diğer bir deyişle başlangıç yalpa açısı değeri ve başlangıç yalpa hızı değeri gerektirmektedir. Şekil 6.4'te çözümü verilen parametrik yalpa rezonansı problemi, başlangıç şartları olarak yalpa açısını 5 derece, yalpa hızını 0 derece/saniye olacak şekilde varsayılarak hesaplanmıştır. Hesaplama başlangıç değeri olarak hem yalpa (ϕ) hem de yalpa hızı (V_ϕ) için sıfır kabul edilebilirken, bu durumda hesap süresi uzayabilir ve hesabın sonuna kadar parametrik yalpa rezonansı gelişimi gerçekleşmeyebilir.

Hesaplama için gerekli olan girdileri tanımlamak için iki parametre daha vardır. Bunlar her bir iterasyon adımında gerçekleşecek olan zaman artımı Δt ve toplam nokta sayısı N . Bu parametreler, hesaplama sürecinde boyuna dalgalarda kararlı durumun parametrik yalpa hareketi meydana getirmesi nedeniyle, yalpa periyodu T_ϕ ile ilişkilidir:

$$T_\phi = \frac{2\pi}{\omega_\phi} \quad (6.22)$$

$$\omega_\phi = \sqrt{\frac{\rho V g G M_0}{I_{xx} + A_{44}}} \quad (6.23)$$

Zaman artımı Δt , periyod başına nokta sayısı (N_{PPP}) ile ifade edilebilir:

$$\Delta t = \frac{T_\phi}{N_{PPP}} \quad (6.24)$$

Böylece, toplam nokta sayısı çoğaltılacak periyod sayısına bağlıdır:

$$N = N_{per} N_{PPP} \quad (6.25)$$

Yapılacak hesabın bitiş zamanı ise:

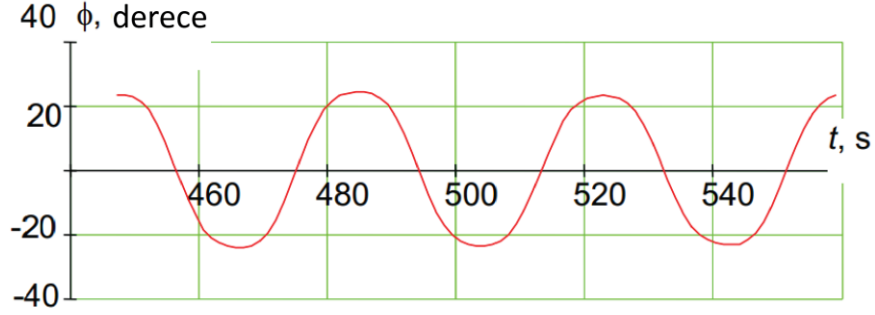
$$t_{final} = T_\phi N_{per} \quad (6.26)$$

6.5 Maksimum Yalpa Açısının Hesaplanması

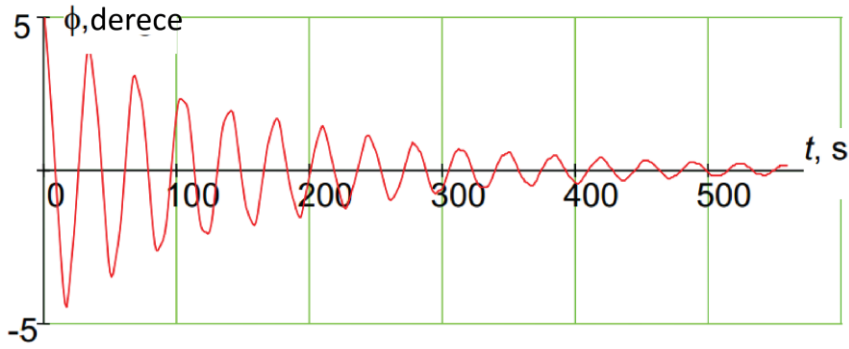
Parametrik yalpa rezonansı, başlangıç koşullarının halen kararlı duruma etki ettiği yalpa büyüklüklerinin birbirine yakın veya aynı olduğu durumda olabilir. “Yakınlık” için farklı kriterler kullanılabilir: göreceli (fark % 3–5’ten az) veya mutlak (bir dereceden az). Bu kriterleri takiben, grafiğin kararlı durum dışında olan kısmı çıkarılabilir (Şekil 6.5) ve sonuçta elde edilen maksimum yalpa açısı, sabit durumlu yalpa genlikleri ortalaması olarak bulunabilir.

Kararlı durum parametrik yalpa için mümkün olan tek tip değildir. Verilen dalga koşulları için parametrik yalpa mümkün değilse, çözüm Şekil 6.6’da gösterildiği gibi, sönümlenen yalpa salınımları ile temsil edilir. Buradaki maksimum yalpa açısı, bir önceki bölümde açıklandığı gibi 5 derecelik başlangıç açısıdır. Çözümün hareket

denkleminin hem parametrik uyarımı hem de doğrusal olmayan olmasından dolayı sönümlenen bir sinüs fonksiyonu gibi görünmesi beklenmemektedir. Bazı durumlarda, yalpa açısı başlangıçta artabilir ve sonra sönümlenebilir. Bu durumda da başlangıçta ortaya çıkan artış miktarı, maksimum yalpa açısı olarak sunulur.

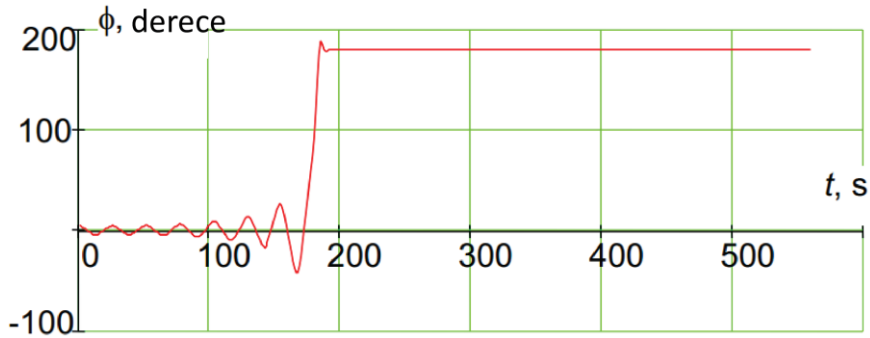


Şekil 6.5 : Parametrik rezonans koşullarında yalpa hareketinin kararlı durum kısmı[26].



Şekil 6.6 : Parametrik yalpa yokluğunda yalpa hareketi[26].

Bir başka olası cevap, GZ eğrisinin Şekil 6.2’de olduğu gibi tüm 180 derecelik bir aralık için hesaplanması durumunda “alabora oluşunu” (Şekil 6.7) içerebilir. GZ eğrisi tam aralık için hesaplanmamışsa, yalpa açısı kesilme yalpa açısını(cut-off angle) aştığında hesaplama durdurulmalıdır.



Şekil 6.7 : Parametrik yalpa ve alabora durumunda yalpa hareketi[26].

7. HAREKET DENKLEMİNİN SAYISAL ÇÖZÜMÜ

Bölüm 4.2’de anlatılan hareket denklemi, Denklem 7.1 veya 7.2 ile ifade edilebilir. Bu iki denklem arasındaki fark, Denklem 7.1’de yalpa sönüm katsayıları lineer ve kübik olarak ifade edilip hesaplamaya başlamadan önce bulunurken, Denklem 7.2’de Ikeda’nın eşdeğer lineer yalpa sönüm katsayısı tüm iterasyon adımlarında hesaplanan yalpa açısı için devamlı olarak hesaplanmaktadır.

$$\ddot{\phi} + (2\alpha + \gamma\phi^2)\dot{\phi} + \frac{1}{I_{xx} + A_{44}}\rho Vg.GZ(t, \phi) = 0 \quad (7.1)$$

$$\ddot{\phi} + \frac{1}{I_{xx} + A_{44}}B_{44}(\phi)\dot{\phi} + \frac{1}{I_{xx} + A_{44}}\rho Vg.GZ(t, \phi) = 0 \quad (7.2)$$

Yukarıda verilen denklemlerin sayısal olarak çözülebilmesi için Runge-Kutta 45 yöntemi python yazılım dilinde scipy kütüphanesi ode(dopri5) fonksiyonukullanılarak hesaplanmıştır[21]. Bu yöntemde çözüm elde edebilmek için, ikinci dereceden adi difansiyel denklem olan Denklem 7.1 ve 7.2 arasından seçilen denklem birinci mertebeden adi diferansiyel denkleme dönüştürülür. Bu amaçla kod içerisinde φ ve v isimli iki adet parametre oluşturulmuş ve bunlar ilgili terimlere atanmıştır.

$$\varphi = \phi(t) \quad (7.3)$$

$$v = \dot{\phi}(t) \quad (7.4)$$

Yukarıda kullanılan terim dönüştürmeler Denklem 5.1 veya 5.2’ye uygulanırsa:

$$\dot{\phi}(t) = v(t) \quad (7.5)$$

$$\dot{v}(t) = -(2\alpha + \gamma v^2)v - \frac{1}{I_{xx} + A_{44}}\rho Vg.GZ(t, \varphi) \quad (7.6)$$

veya

$$\dot{v}(t) = -\frac{1}{I_{xx} + A_{44}} B_{44}(\varphi)v - \frac{1}{I_{xx} + A_{44}} \rho V g \cdot GZ(t, \varphi) \quad (7.7)$$

olacak şekilde iki adet denklem elde edilir.

Denklem sayısal çözüm için ifade edildikten sonra Bölüm 6.4 -Hareket denkleminde belirtilen başlangıç şartları uygulanır. Aynı bölümde verilen zaman adımı ve analiz bitiş zamanına kadar iterasyon yapılarak zamana bağlı çözüm bulunur.

Yukarıda verilen denklemler içerisinde Denklem 7.6'nın kullanılması durumunda, α ve γ terimlerinin bulunması gerekmektedir. α , Ikeda'nın lineer sönüm katsayısı iken γ , Ikeda'nın kübik sönüm katsayısı olarak ifade edilmektedir. Bu katsayıların bulunabilmesi amacıyla aşağıdaki yöntem önerilmiştir:

$$(I_{xx} + A_{44})\ddot{\phi} + B_{44}(\phi)\dot{\phi} + W \cdot GM\phi = 0 \quad (7.8)$$

Bu denklemde W gemi ağırlığını ifade etmektedir. Gerekli dönüşümler yapılırsa:

$$\ddot{\phi} + 2\alpha_e \dot{\phi} + \omega_\phi^2 \phi = 0 \quad (7.9)$$

Burada,

$$2\alpha = \frac{B_{44}(\phi_a)}{I_{xx} + A_{44}} \quad (7.10)$$

$$\omega_\phi = \sqrt{\frac{WGM_m}{I_{xx} + A_{44}}} \quad (7.11)$$

Denklem 5.7'nin çözümü $\phi = \phi_0 e^{-at} \cos(\omega_\phi t - \varepsilon)$ ve sönüm eğrisi:

$$\Delta\phi = (a\phi_m + c\phi_m^2)\phi_m = a_e \phi_m \quad (7.12)$$

Burada,

$\Delta\phi$ = Yalpa sönüm testi azalma miktarı [radyan]

ϕ_m = Ortalama salınım açısı [radyan]

$$\alpha_e = \frac{\alpha T_\phi}{2} = \frac{\alpha\pi}{\omega_\phi} = \frac{B_{44}(\phi_a)}{2(I_{xx} + A_{44})} \frac{\pi}{\omega_\phi} \quad (7.13)$$

Yukarıdaki denklemde bulunan ilişkileri kullanarak, lineer ve kübik sönüm katsayılarını bulmak için kullanılacak prosedür şu şekildedir:

1. B_{44} değeri, yalpa genliği (ϕ_a) 1 derece olarak hesaplanan basitleştirilmiş Ikeda formülü ile hesaplanır. Denklem 7.12 kullanılarak ve $a = \alpha_e$ varsayılarak a bulunur.
2. B_{44} değeri, yalpa genliği (ϕ_a) 1 derece olarak hesaplanan basitleştirilmiş Ikeda formülü ile hesaplanır. Denklem 7.12 kullanılarak α_e değeri hesaplanır.
3. Madde 1 ve madde 2 de hesaplanan a ve α_e değerleri kullanılarak c hesaplanır:

$$\alpha_e = a + c\phi_m^2 \quad (7.14)$$

Burada ϕ_m 25 dereceye karşılık gelmektedir.

4. Son olarak lineer ve kübik sönüm katsayıları aşağıdaki denklemler yardımıyla bulunur:

$$\alpha = \frac{\omega_\phi}{\pi} a \quad (7.15)$$

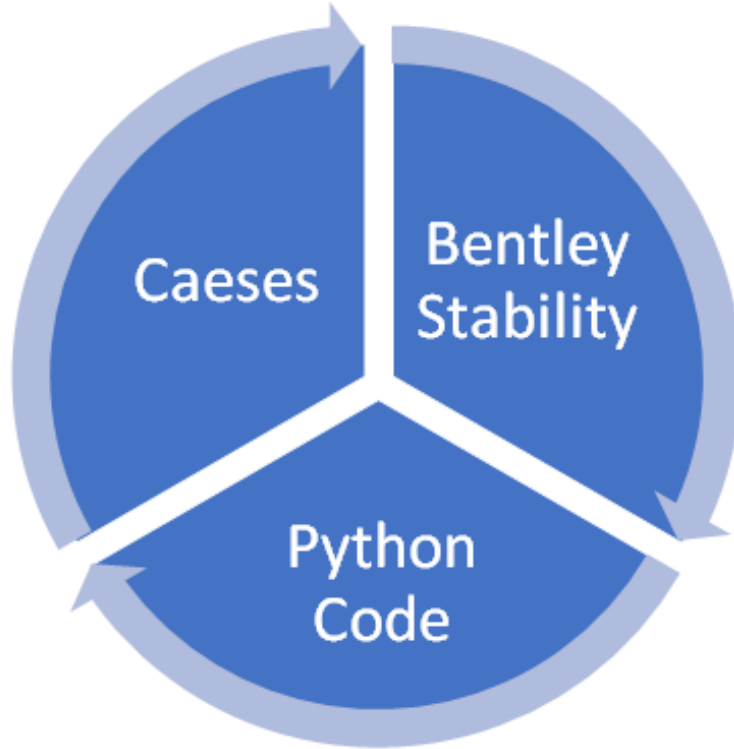
$$\gamma = \frac{4c}{3\pi^2} \left(\frac{2\pi}{\omega_\phi} \right) \quad (7.16)$$



8. HESAPLARDA KULLANILAN PROGRAM VE YAZILIMLAR

Yukarıdaki bölümlerde anlatılan teorik bölümler ve önerilen sayısal çözümlerin, parametrik yalpa analizi sonuçları aranan gemi formlarına uygulanması için tez içerisinde önerilen çözüm ortamı Şekil 8.1 ile gösterildiği gibi üç paket program ve yazılım altında toplanmaktadır.

Birinci ortam, gemi formunun 3 boyutlu modelinin ele alındığı, gemi ana karakteristiklerini içeren ve çözüm için girdiyi oluşturan parametrelerin tanımlandığı ve tüm çözüm basamaklarını yöneten CAESES adlı parametrik tasarım ve optimizasyon paket programıdır. Farklı geometrik yüzey uzantılarının kolaylıkla program içine aktarılabilmesi, program içerisine gömülü kodlama arayüzünün kullanım kolaylığı ile diğer paket program ve yazılımlar ile kolayca iletişim kurabilme yeteneği ve form varyasyonu ile optimizasyon yapabilme kabiliyetlerine sahip olması nedeniyle bu programın kullanılmasına karar verilmiştir.



Şekil 8.1 : Kullanılan programlar arasındaki döngünün gösterimi.

Bölüm 5 içerisinde zafiyet kriterleri hesaplamaları yapılırken tüm zafiyet modları için hidrostatik hesaplamalar ile GM ve GZ değerlerinin hesaplanması gerektiği açıklanmıştır. Bu maksatla, .NET ortamı içerisinde kütüphanesinin kullanıcı arayüzüne ihtiyaç duyulmaksızın kullanılabilmesi ve gemi inşa mühendisleri tarafından geleneksel gemi stabilite hesaplarının yapılabilmesine olanak sağlaması nedeniyle Bentley Stability modülü kullanılmıştır.

Son olarak, zafiyet modlarının IMO tarafından önerilen kriterlerine uygun olarak, hidrostatik hesaplamaları ve genel karakteristikleri belirlenmiş form için çözümlerin oluşturulması ve Bölüm 7 içerisinde verilen diferansiyel denklemin sayısal çözümü için Python yazılım dili kullanılmıştır.

8.1 Gemi Geometrisinin Tanımlanması ve Genel Karakteristiklerin Girilmesi

Parametrik yalpa rezonansı problemi çözümü aranan gemi formunun üç boyutlu modeli, CAESES adlı program içerisine aktarılır. Daha sonra bu program içerisinde bir program model ağacının içerisinde tanımlanmış olan parametrelerden programa kullanıcı tarafından elle verilmesi gereken girdi değerleri ilgili parametrelere atanır. Bu parametrelerden elle girilmesi gerekenler aşağıdaki gibidir:

- Geminin su çekimi,
- Eğer biliniyor ise yalpa periyodu,
- Gemi servis hızı,
- Ağırlık merkezinin yatay ve düşey konumu (LCG - VCG),
- Geminin kıç dikmesinin konumu

İçeri aktarılan formun, Bentley Stability içerisinde kullanılabilmesi için panel ağı(.pan) uzantılı olarak dışarıya aktarılabilmesi ve Bentley Stability tarafından yapılacak işlemlerin tanımlanması için, CAESES içerisinde “feature” isimli kullanıcı arayüzü kullanılmıştır. Bu özellik ile, gemi formu otomatik olarak panel ağlarına dönüştürülür, el ile tanımladığımız parametreler kullanılarak, Bentley Stability programı içerisinde kullanılacak tüm detayların oluşturulması sağlanmaktadır. Ayrıca CAESES içerisinde bulunan formüller kullanılarak, içeri aktarılan formun boyu, kalıp genişliği, baş dikmesinin gemi kıç dikmesine olan mesafesi form

tanımlandıktan sonra otomatik olarak oluşturulur. Böylelikle çözüm için kullanılacak dalga boyu ve yüksekliği, dalga frekans ve periyodu gibi hesaplamalar yapılmaktadır.

Bu işlemler tamamlandıktan sonra feature içerisine yazılan kod sayesinde, Bentley Stabilitate modülü açılarak dışarıya aktarılan panel ağı kullanılarak, zafiyet kriterlerine girdi olarak kullanılması gereken tüm hidrostatik hesaplamalar yapılır. Bu hesaplamalar sonucunda elde edilen sonuçlar, python kodunda kullanılabilme üzere, kütüphane ve liste biçimlerinde olmak üzere text(.txt) uzantılı olarak kaydedilir. Hidrostatik hesaplamalar yapıldıktan ve hesaplama çıktılarının çözüm dosyasına kaydedilmesinin ardından, Python kodları yine batch modda çalıştırılır ve IMO tarafından önerilen zafiyet seviyelerine ait kriter hesaplamaları yapılarak sonuçlar yine text(.txt) uzantılı olarak kaydedilir.

CAESES programı, Python tarafından oluşturulan sonuç dosyalarını kendi içerisinde belirlenen parametrelere aktarmak üzere program içerisine alır ve böylelikle işlem döngüsü tamamlanmış olur.

8.2 Gemi Hidrostatik Hesaplamaları

Zafiyet kriteri hesaplamalarının yapılabilmesi amacıyla, Bentley Stability modülü kullanılarak yapılan işlemler aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır.

8.2.1 Zafiyet seviyesi 1 kriter 1 hidrostatik hesaplamaları

Dışarıya aktarılan gemi formu ile bu forma ait ağırlık merkezi değerleri ve eğer gemi yükleme kondisyonu mevcut ise bu bilgiler ile gemi trim/su çekimi değerleri programa girdi olarak alınır. Zafiyet Seviyesi 1 Kriter 1 için gerekli olan başlangıç GM değeri öncelikle sakin su durumu için hesaplanır. Sonrasında yine CAESES programından aktarılan dalga boyu ve yükseklik değerine göre, analiz tipi olarak “equilibrium” seçilerek dalga tepesinin gemi boyunca farklı konumları için GM değerleri sonuçları ilgili dosya içerisinde olacak şekilde text dosyasına yazdırılır.

8.2.2 Zafiyet seviyesi 2 kriter 1 hidrostatik hesaplamaları

Çizelge 5.1 ile verilen tüm dalga durumlarında verilen dalga boyu ve dalga yükseklikleri için yine analiz tipi “equilibrium” seçilerek dalga tepesinin farklı

konumları için GM değerleri hesaplanır ve sonuçları ilgili dosya içerisinde olacak şekilde ayrı ayrı text dosyasına yazdırılır.

8.2.3 Zafiyet seviyesi 2 kriter 2 hidrostatik hesaplamaları

Seçilen dalga oluşum frekansları çizelgesinde bulunan maksimum dalga yüksekliği kullanılarak dalga boyunun gemi boyuna eşit olduğu ve dalga yüksekliğinin değiştirildiği duruma göre yapılan GM hesapları ilgili klasörde ayrı ayrı text dosyalarına yazdırılır. Daha sonrasında diferansiyel denklem içerisinde her bir iterasyonda doğrultma momenti terimi ifadesinde kullanılmak üzere -90 ile 90 derece arasında 5 derece adımla hesaplanan ve dalga tepesinin gemi boyunca farklı konumlandığı GZ dosyası ilgili dosyada içerisinde text dosyası olarak kaydedilir.

8.3 Zafiyet Kriteri Hesaplamaları

Python yazılım dili kullanılarak oluşturulmuş olan scriptler, CAESES programı içerisinde çağrılarak, Bölüm 8.2. de oluşturulan hidrostatik çıktı dosyaları input olarak kullanılacak şekilde yazılan kodlar sayesinde hesaplanır. Matris işlemlerinin yapılması için numpy kütüphanesi, Bölüm 8.2.3. ile oluşturulan GZ yüzeyi ve Zafiyet Seviyesi 2 Kriter 2 için hesaplanan her bir yalpa genliği grafikleri matplotlib kütüphanesi, diferansiyel denklem çözümünde kullanılmak üzere scipy kütüphanesinin integrate yöntemi kullanılmıştır. Bu sayede, hızlar için verilen Çizelge 5.2.de verilen katsayılar matrisi kullanılarak, 11 farklı dalga yüksekliği için toplamda 77 adet diferansiyel denklem çözülür. Daha sonra seçilen dalga durum frekansı çizelgesinde hesaplanan her bir dalga durumuna karşılık gelen dalga yükseklikleri için kübik interpolasyon kullanıp maksimum dalga genliği hesapları yapılır. Son olarak yapılan tüm zafiyet kriteri hesaplamalarının sonuçları CAESES tarafından değerlendirilmek üzere dosyalara yazdırılır.

Yukarıda belirtilen kriter çözümleri dışında, seçilen dalga oluşum frekanslarına karşılık gelen dalga yüksekliklerinin hesaplanması, basitleştirilmiş Ikeda yöntemi kullanılarak eşdeğer sönüm katsayısının bulunması da Python dili kullanılarak oluşturulan scriptler vasıtasıyla yapılmıştır.

9. ÖRNEK UYGULAMA

Bölüm 5 içerisinde anlatılan zafiyet seviyesi 1 ve 2 hesaplamalarının yapılması, çok fazla işlem gerektiren ve farklı dalga yüksekliği, dalga boyu ve dalga tepesi konumlarını içeren deniz durumlarına göre analiz yapmayı gerektirmektedir. Hasarsız stabilite kodları, bu işlemleri tek tek yapabilme imkanı sağlarken, henüz ikinci nesil stabilite ile alakalı olarak hesaplama yapma kabiliyetleri yoktur. Buradan yola çıkarak, böyle bir tasarım ortamının ön dizayn aşamasında oluşturularak, mühendislerin üzerine düşen hesap yükünün azaltılması iyi bir başlangıç noktası olacaktır.

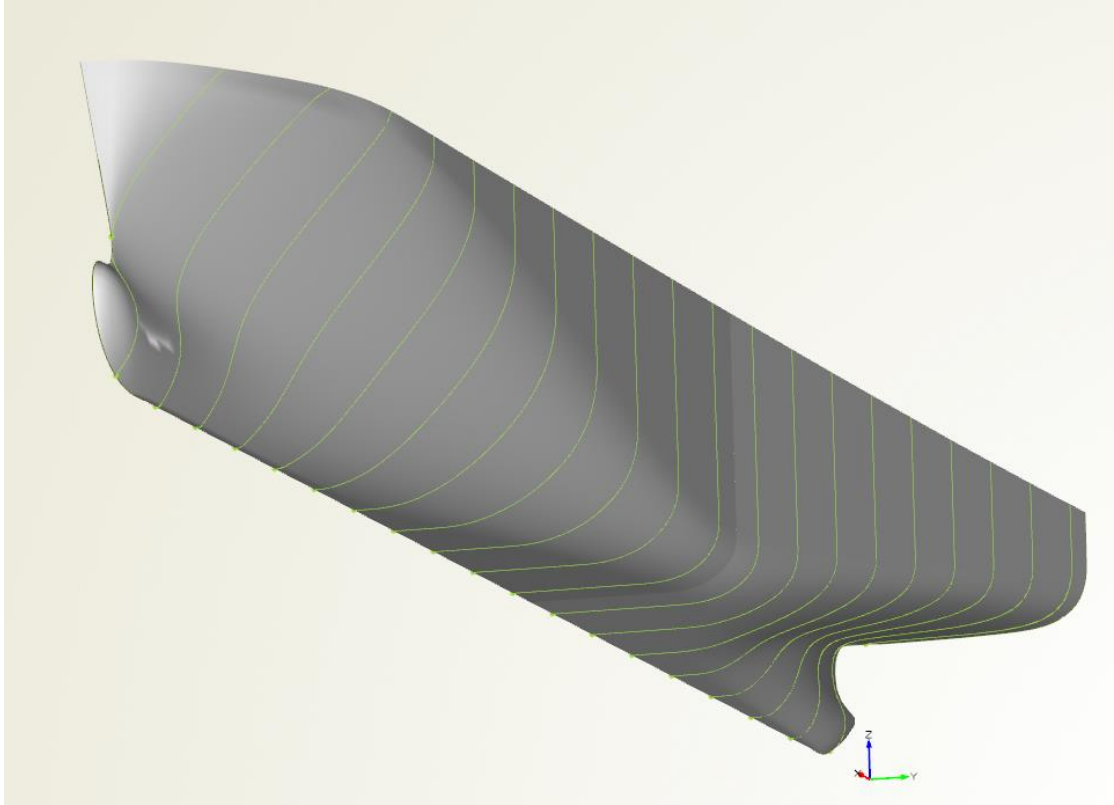
Bu kapsamda, teknenin panel modelinin oluşturulması ve Bentley Stability modülü ile entegre bir biçimde çalışabilmesi için CAESES yazılımı tercih edilmiştir. CAESES içerisine alınan gemi formu, Bentley Stability modülünde kullanılabilmek üzere panel ağlara bölünür. Daha sonrasında, CAESES içerisinde parametrik yalpa rezonansının yapılabilmesi amacıyla kullanıcı tarafından tanımlanması gereken girdiler program içerisine yazılır. CAESES tarafından, parametrik yalpa analizi başlatıldıktan sonra, program otomatik olarak Bentley Stability modülünü açar ve gerekli tüm hesaplamaları kendi bünyesinde toplar. Bu hesaplamalar, verilen dalga koşullarına göre geminin karakteristik özelliklerini içeren değerlerdir. Daha sonrasında bu değerler Python yazılım diliyle hazırlanmış Bölüm 5.2.1 ve Bölüm 5.2.2 ile açıklanan zafiyet kriterlerinin çözülmesi için hazırlanmış kodlar tarafından kullanılmak üzere text dosyalarına yazılır. Yine CAESES içerisinden Python ile yazılmış kodlardan ilgili olanlar batch modda çalıştırılarak, geminin zafiyet durumunun incelenmesi sağlanabilmektedir.

Yukarıda anlatılan kısımda CAESES genel süreci yöneten ve geometri ile ilgili kısımlar ile programların entegre bir biçimde çalışmasını sağlayan araç; Bentley Stability modülü gerekli hidrostatik hesapların yapılması ve değerlerin okunmasını sağlayan araç ve son olarak da Python zafiyet kriterlerinin çözülmesi için kullanılan araçtır.

Bu sayede, CAESES içerisindeki geminin formu değiştirilip, karakteristik özellikleri girildikten sonra, parametrik yalpa rezonansı hesaplamalarının herhangi bir form için otomatik olarak yapılması sağlanmıştır.

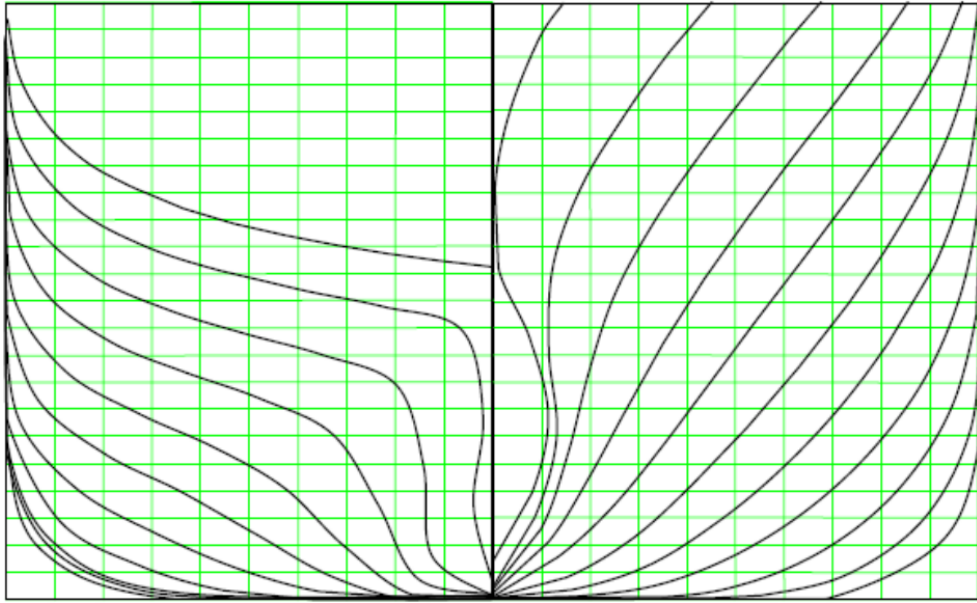
9.1 C11 Konteyner Gemisi

IMO ikinci nesil stabilite parametrik yalpa rezonansı kriterlerinin değerlendirilmesi amacıyla Şekil 9.1 ile üç boyutlu modeli verilen C11 konteyner gemisi kullanılmıştır. Bu geminin seçilmesinin nedeni, IMO-SLF çalışma grupları tarafından formun analizlerinin yapılmış olması nedeniyle oluşturulan tasarım ortamında yapılan işlemlerin doğrulanabilmesidir.



Şekil 9.1 : C11 Konteyner gemisinin üç boyutlu gösterimi.

Gemiye ait en kesit resmi Şekil 9.2’de gösterildiği gibidir. Yalnızca bu kesitler kullanılarak, gemi formuna ait hidrostatik hesapların, dalga tepesinin gemi boyunca yaptığı hareketleri içerir şekilde yapılabilmesi için ABS tarafından yayımlanan parametrik yalpa rezonansının değerlendirilmesi rehberinde sayfa 13-15 arasında verilen formüller kullanılabilir[11]. CAESES programına girdi olarak verilecek boyutlar ise Çizelge 9.1 içerisinde verilmiştir.



Şekil 9.2 : C11 Konteyner gemisinin en kesit resmi [11].

Çizelge 9.1 : C11 gemisi ana karakteristikleri.

Karakteristik	Değer	Açıklama
L_{BP}	262.0 m	Dikmeler arası boy
L_f	262.0 m	2008 IS ile tanımlanan gemi boyu
B	40.00 m	Gemi kalıp genişliği
D	24.45 m	Gemi kalıp derinliği
d	11.50 m	Gemi su çekimi
τ	0 m	Gemi trimi
LCG	125.52 m	Gemi ağırlık merkezinin boyuna konumu
VCG	18.40 m	Gemi ağırlık merkezinin düşey konumu
C_b	0.574	Blok katsayısı
C_m	0.971	Orta kesit katsayısı
GM	1.843 m	Metasantr Yüksekliği
T_ϕ	25.1 s	Doğal yalpa periyodu
l_{BK}/L_{PP}	0.292	Yalpa omurgası-dikmeler arası boy oranı
b_{BK}/B	0.010	Yalpa omurgası-kalıp genişlik oranı
V_S	12.165 m/s	Gemi servis hızı

9.1.1 Zafiyet seviyesi 1 kriter 1 hesaplaması

Kriter 1 değeri, Çizelge 9.2 ile verilen dalga karakteristiklerine göre hesaplanır.

Çizelge 9.2 : Zafiyet seviyesi 1 kriter 1 dalga karakteristiği.

Karakteristik	Değer	Açıklama
λ	262.0 m	Dalga boyu
h	4.3754 m	Dalga yüksekliği

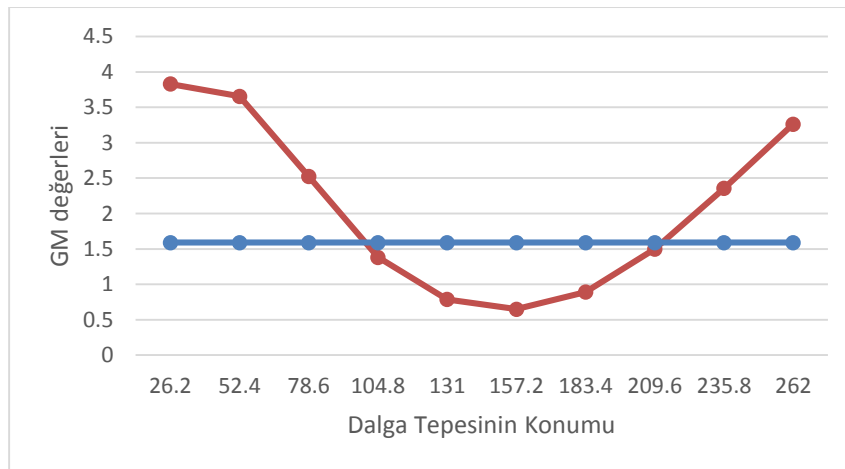
Çizelge 9.3 : Dalga tepesinin farklı konumlarına göre GM değerleri.

Dalga Tepesinin Kıç Dikmeye Mesafesi [m]	GM değeri [m]
26.2	3.829731
52.4	3.654663
78.6	2.525462
104.8	1.381343
131	0.787249
157.2	0.648401
183.4	0.89104
209.6	1.49913
235.8	2.356654
262	3.26294

Dalga tepesinin gemi boyunca farklı konumlarına göre, gemi yükleme kondisyonuna göre batma ve trim değerleri de hesaba katılarak hesaplanmış değerleri Çizelge 6.3 ile verilmiştir. Buradan Şekil 9.3'te mavi hat ile görülebileceği gibi $\Delta GM_1 = 1.590665105$ olarak hesaplanır. Serbest su yüzeyi düzeltmesi yapılmış sakin su metasantr yüksekliği $GM_C = 1.8320786$ olarak hesaplanmıştır. R_{PR} değeri ise 0.2941 olarak bulunmuştur. Sonuç olarak, denklem 5.1 ile verilen eşitlikte bulunan değerler yerine konulursa,

$$\frac{1.590665105}{1.8320786} \leq 0.2941$$

olmadığı için C11 gemisi formu, zafiyet seviyesi 1 kriter 1 hesaplamalarına göre parametrik yalpaya duyarlı olarak bulunmuştur. Gemi formu bu kriterde verilen şartı sağlamadığı için zafiyet seviyesi 2 kriterlerinin kontrol edilmesi gerekmektedir.



Şekil 9.3 : Dalga Tepesinin Gemi Boyuna Göre Konumlarına Karşılık Gelen GM Değerleri.

9.1.2 Zafiyet seviyesi 2 kriter 1 hesaplaması

C1 değeri, Çizelge 5.1 ile verilen dalga karakteristiklerine göre hesaplanır.

Çizelge 9.4 : Farklı dalga durumlarına göre seviye 2 kriter 1 hesapları.

Dalga No	$\Delta GM/GM_m$	GM_m	V_{pri}	Ci	Dalga Dikliği
1	1.941682	0.014992	4.136318	0	0.015505
2	1.94197	0.032728	4.656514	0	0.013265
3	1.947262	0.08567	4.876826	0	0.015374
4	1.958217	0.153543	4.789357	0	0.016633
5	1.981967	0.22188	4.369014	0	0.016709
6	1.992878	0.238237	3.659901	0	0.016562
7	2.038374	0.508187	2.523416	1	0.016217
8	2.111722	0.652236	0.911806	1	0.015633
9	2.136584	0.668681	0.882985	1	0.014875
10	2.136268	0.642496	2.885138	1	0.014031
11	2.125235	0.606408	5.124493	1	0.013164
12	2.105315	0.56445	7.581769	1	0.012309
13	2.082493	0.497178	10.27696	0	0.011513
14	2.052977	0.449105	13.1567	0	0.010704
15	2.023004	0.391941	16.2597	0	0.00996
16	2.002423	0.327242	19.70233	0	0.009434

Çizelge 9.4 ile zafiyet seviyesi 2 kriter 1 için yapılan hesaplamalar bulunmaktadır. Seviye 1 hesapları ile bulunan değer $R_{PR} = 0.2941$ ve gemi servis hızı $V_s = 12.165$ kullanılarak hesaplamalar yapılmalıdır.

Çizelge 9.4 içerisinde bulunan her bir satır için 3.sütunda verilen GM_m değerinin 0 dan büyük olduğu ve 2.sütunda verilen değer R_{PR} değerinden küçük olduğu veya 4.sütunda verilen V_{pri} değerinin V_s hızından büyük olduğu satırlarda Ci değeri 0 olarak verilmiştir.

Burada Ci ile gösterilen sütun, gemi formunun seviye 2 kriter 1 gereksinimlerini karşılayıp karşılamadığını gösteren sütundur. Bölüm 4.2.1.1 ve 4.2.1.2 ile verilen şartların sağlanmadığı dalga durumlarında, Ci değeri 1 olarak verilmektedir. Çizelge 5.1 ile verilen ağırlık değerleri (Wi) ile, Çizelge 9.4 ile verilen Ci değerleri çarpılır ve toplanırsa, C1 değeri hesaplanmış olur.

C11 gemi formu için yapılan analizler sonucunda, C1 değeri 0.436417 olarak bulunmuştur. Bu değer bölüm 4.2 de $R_{PR0} = 0.06$ olarak verilen değerden büyük

olduğu için parametrik yalpaya duyarlı olarak bulunmuştur. Bu sebeple, zafiyet seviyesi 2 kriter 2 kontrol edilmelidir.

9.1.3 Zafiyet seviyesi 2 kriter 2 hesaplaması

Bu kriterin hesaplanabilmesi için, öncelikle Çizelge B.1 ile verilen dalga oluşum frekanslarına karşılık gelen dalga yüksekliklerinin hesaplanması gerekmektedir. Bu hesaplamalar denklem 5.8 ile 5.15 arasında verilen formüller vasıtasıyla yapıldıktan sonra Çizelge B.2 ile verilen değerler elde edilir. Bu değerler içerisinde maksimum dalga yüksekliğine sahip olan dalga, $T_z = 10.5$ saniye ve $H_s = 16.5$ metreye karşılık gelen 11.91373 metre değerine sahip dalgadır.

Baştan ve kıçtan gelen dalgalar için 3 hız ve sıfır hız durumlarında, dalga boyunun gemi boyuna eşit olduğu, dalga yüksekliğinin değiştiği durumlar için yapılan maksimum yalpa açısı için Ikeda'nın sabit katsayıları kullanılarak yapılan hesaplar Çizelge 9.5 ile verilmiştir.

Çizelge 9.5 : Farklı dalga yüksekliklerine göre hesaplanan maksimum yalpa açıları.

Dalga Yüksekliği (m)										
Hız	1.192	2.383	3.575	4.767	5.959	7.150	8.342	9.534	10.725	11.917
12.165	5.000	5.000	5.086	6.146	7.231	8.345	9.487	11.641	15.782	21.219
10.535	5.000	5.000	5.796	7.008	8.246	9.655	13.581	19.416	24.594	27.480
6.083	5.000	5.730	8.530	17.151	25.506	30.403	34.433	36.367	37.240	40.325
0.000	5.000	19.703	27.356	32.637	36.149	38.636	42.489	47.514	48.719	51.812
-6.083	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.003	5.047	5.089
-10.462	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.006	5.072	5.145
-12.165	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.009	5.136	5.262

Yukarıdaki tabloda bulunan maksimum yalpa açılarının, çizelge B.2 da verilen tüm dalga yüksekliklerine göre hesaplanması için interpolasyon yapılırsa:

Çizelge 9.6 : Zafiyet seviyesi 2 kriteri 2 hesaplamaları.

Durum	Hız	C2
1	12.165	0
2	10.535	0
3	6.083	0.0193
4	0.000	0.2407
5	-6.083	0
6	-10.462	0
7	12.165	0

Buradan C2 değeri, 0.037 olarak bulunur. Bu değer, $R_{PRO} = 0.06$ değerinden küçük olduğu için, gemi formu yalpaya duyarlı değildir.

Baştan ve kıçtan gelen dalgalar için 3 hız ve sıfır hız durumlarında, dalga boyunun gemi boyuna eşit olduğu, dalga yüksekliğinin değiştiği durumlar için yapılan maksimum yalpa açısı için Ikeda'nın eşdeğer sönüm değerleri kullanılarak yapılan hesaplar Çizelge 9.7 ile verilmiştir.

Çizelge 9.7 : Farklı dalga yüksekliklerine göre hesaplanan maksimum yalpa açıları.

Dalga Yüksekliği (m)										
Hız	1.192	2.383	3.575	4.767	5.959	7.150	8.342	9.534	10.725	11.917
12.165	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.009	5.135	5.260
10.535	5.000	5.000	5.000	5.000	15.493	20.538	23.848	25.835	27.006	26.757
6.083	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.003	5.046	5.089
0.000	5.000	24.466	35.699	43.277	54.233	52.123	58.263	53.407	53.364	61.648
-6.083	5.000	5.831	8.938	20.963	32.233	37.796	40.545	40.290	44.330	48.449
-10.462	5.000	5.000	5.905	7.153	8.433	10.273	14.743	22.652	28.648	29.913
-12.165	5.000	5.000	5.179	6.270	7.390	8.545	9.739	12.535	17.898	24.252

Yukarıdaki tabloda bulunan maksimum yalpa açılarının, çizelge B.2 da verilen tüm dalga yüksekliklerine göre hesaplanması için interpolasyon yapılırsa:

Çizelge 9.8 : Zafiyet seviyesi 2 kriteri 2 hesaplamaları.

Durum	Hız	C2
1	12.165	0
2	10.535	0.000183
3	6.083	0.0193
4	0.000	0.451455
5	-6.083	0.041056
6	-10.462	0.000059
7	12.165	0

Buradan C2 değeri, 0.704 olarak bulunur. Bu değer, $R_{PRO} = 0.06$ değerinden küçük olduğu için, gemi formu yalpaya duyarlıdır.

Yapılan hesaplama ve analiz sonuçlarına göre, yalpa sönüm terimi için önerilen yöntemler arasında farklılık olduğu gözükmemektedir. IMO tarafından önerilen değerler ile karşılaştırma yapıldığında Ikeda'nın eşdeğer sönüm katsayısı kullanılarak yapılan hesaplamaların daha doğru sonuç verdiği görülmüştür. Çizelge 9.9 ile IMO

tarafından bulunan değerler ile bu çalışma kapsamında hesaplanan değerler arasındaki karşılaştırma verilmiştir.

Çizelge 9.9: Yapılan hesaplamalar ile IMO tarafından bulunan değerlerin karşılaştırması.

Kriter	IMO	Bulunan değer	Yüzdelik Fark
Seviye 1 Kriter 1	0.8682	1.045	+%20.36
Seviye 2 Kriter 1	0.4368	0.4364	-%0.091
Seviye 2 Kriter 2-SK	0.07283	0.037	-%49.19
Seviye 2 Kriter 2-ES	0.07283	0.037	-%3.34

10. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada IMO ikinci nesil hasarsız stabilite kriterleri kapsamında çalışmaları yürütülen parametrik yalpa rezonansı için zafiyet kriterleri detaylı olarak incelenmiştir. Bu kriterlerin örnek C11 konteyner gemisi ile değerlendirilmesi yapılmıştır.

Parametrik yalpanın nasıl geliştiği ve dalgalardaki stabilite değişimi ile olan bağlantısı açıklanmıştır. Geminin hızının ve dalganın gemi ile karşılaşma yönünün parametrik yalpa rezonansına olan etkisi gösterilmiştir. Parametrik yalpanın gemi üzerindeki etkisinin azaltılabilmesi ve gelişimi açısından yalpa sönümlemenin kritik bir parametre olduğu; yalpa sönümlemesi neticesinde geminin kaybettiği enerjinin boyuna dalgalar ile kazanılan enerjiden fazla olması durumunda parametrik rezonansı önleyebileceği önerilmiştir.

Parametrik yalpanın tespiti için IMO tarafından önerilen kriterlerin hesap yöntemleri ve kurallar adım adım açıklanmıştır. Her bir zafiyet modunda, üç seviyede ele alınan kriterler, aşamalı olarak uygulanmakta, bir seviye sağlandığında diğer seviyeye ihtiyaç duyulmamaktadır. İki seviyeyi de geçemeyen gemilerde son seviye olarak “doğrudan stabilite değerlendirmesi” aşamasının uygulanması zorunlu hale gelmektedir. Burada, model deneyleri ve altı serbestlik dereceli hareket denklemlerinin çözümü istenmektedir. Oldukça karmaşık hesaplamalar gerektiren bu seviyede, gelişmiş bilgisayar programlarının kullanılmasına ihtiyaç vardır.

Yukarıda belirtilen Mathieu denkleminin sayısal çözümü için yöntemler gösterilmiştir. Daha sonrasında kullanılan bilgisayar programları ve çözüm algoritmaları anlatılarak, farklı formlar için de çok kısa bir hazırlık süresi sonunda sonuç alınabileceği gösterilmiştir. Geminin hidrostatik hesaplarının yapılarak sonuçların alınabilmesi için Bentley Stability modülü ve Mathieu denkleminin sayısal olarak için Python kodlama dilinin numpy ve scipy kütüphaneleri kullanılmıştır.

Çizelge 9.9 ile bulunan sonuçlara göre, Seviye 1 Kriter 1 için bulunan değer arasındaki farklılık, IMO'nun sakin su GM değerlerini hesaplarken atalet momenti grafiğini kullanmasıdır. Bu çalışmada yapılan hesaplamalarda, Bentley Stability modülü kullanılarak, gemi formu özelinde sakin su düzeltilmesi yapılarak bulunan değerler daha doğru sonuç verdiği önerilmektedir. Seviye 2 Kriter 1 için yapılan hesaplamaların çok küçük bir yüzdelik fark ile doğru hesaplandığı görülmüştür.

Ikeda'nın Sabit Katsayılar yöntemi kullanılarak yapılan hesaplama (Çizelge 9.9 Seviye 2 Kriter 2-SK) sonuçlarının ise doğru olmadığı görülmektedir. Buna rağmen Ikeda'nın eşdeğer sönüm katsayısı yöntemi kullanılarak yapılan hesaplama (Çizelge 9.9 Seviye 2 Kriter 2-ES) sonucunda yine yüzdesel olarak düşük bir fark bulunmuş ve kodun doğru çalıştığı görülmüştür. Aradaki farkın, IMO'nun önerdiği dalga yüksekliğinin gemi derinliğine göre eşit bölünmesi istenirken, Çizelge B ile verilen tabloda yapılan interpolasyonda çıkan maksimum dalga yüksekliği olan 11.91373 metrenin, geminin derinliğinin yarısına yakın olduğunun gözlemlenmesidir. Bu kapsamda kod çalıştırılırken, maksimum dalga yüksekliği geminin derinliğine değil, yukarıda verilen maksimum dalga yüksekliğine göre değiştirilerek daha hassas çözüm alınmasıdır.

Gelecek çalışması olarak, ön tasarım aşamasında gemi formunun parametrik yalpaya duyarlı çıkabilmesi olasılığına karşın, parametrik olarak değiştirilecek deforme edilen form için optimizasyon döngüsü oluşturulması ve gemi ana karakteristiklerinin parametrik yalpaya olan etkilerinin incelenmesinin önemli olduğu düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] **Arndt B. and Rodin S.** (1958). Stabilität bei vor-und-achterlichem seegang. Schiffstechnik. V 5: 29, Nov 192-199.
- [2] **Wendel K** (1954). Stabilitätseinbussen im Seegang und durch Koksdeckslast. Hansa 2016-2022.
- [3] **Kerwin, J. E.** (1955). Stabilitätseinbussen im Seegang und durch Koksdeckslast. Hansa 2016-2022.
- [4] **Pauling, J.R.** (1961). "The Transverse Stability of a Ship in Longitudinal Seaway," J. Ship Res., 4, No. 4, pp. 37–49.
- [5] **Storch, R.L** (1978). Alaskan king crab boats. Marine Technology, 15 No.1, Jan.75-83.
- [6] **Lindemann, K. and Skomedal, N.** (1983). Modern hullforms and parametric excitation of the roll motion. Norwegian Maritime Research, 11, No. 2, 2-20.
- [7] **Chantrel, J.M.** (1984). Instabilites Parametriques dans le Mouvement des Corps Flottants- Application au cas des bouees de chargement, These presentee a "Ecole Nationale Superieure de Mecanique pour l'obtention du diplome de Docteur-Ingenieur". Paris: Editions Technip.
- [8] **Kobylnski, L. K. and S. Kastner** (2003). Stability and Safety of Ships: Regulation and Operation. Elsevier, Amsterdam, 454 p.
- [9] **IMO SLF 48/21** (2005). Report to Maritime Safety Committee, London, UK, 65 p.
- [10] **W. M, M. Levadou, T. W. Treakle, J. R. Paulling, K. Michel and C. Moore** (2003). An Investigation of Head-Sea Parametric Rolling and its Influence on Container Lashing Systems. Marine Tech., 40(1):1–19.
- [11] **ABS** (2004). Guide for the Assessment of Parametric Roll Resonance in the Design of Container Carriers, American Bureau of Shipping, Houston, TX, 70 p.
- [12] **Brunswig, J. and R. Pereira** (2006). Validation of Parametric Roll Motion Predictions for a Modern Containership Design. Proc. 9th International Conf. Stability Ships & Ocean Vehicles('06), Vol. 1, Rio de Janeiro, Brazil, pp. 157–168.
- [13] **Shigunov, V.** (2009). Operational Guidance for Prevention of Container Loss. Proc. 10th Int'l Conf. Stability of Ships & Ocean Vehicles (STAB '09), St. Petersburg, Russia, pp. 473–482.

- [14] **Shin YS, Belenky VL, Paulling JR, Weems KM and Lin WM** (2004). Criteria for parametric roll of large containerships in longitudinal seas. Transactions. SNAME. V 112:14-47.
- [15] **Ikeda, Y., M. Kashiwagi and N. Umeda, eds.** (2008). Proceedings 6th Osaka Colloquium on Seakeeping and Stability of Ships, Osaka, Japan.
- [16] **Themelis, N. and K. J. Spyrou** (2007). Probabilistic Assessment of Ship Stability. Trans. SNAME, 117:181–206.
- [17] **Kobylinski, L. K.** (2009). Proceedings International Workshop on Dynamic Stability Consideration in Ship Design, Foundation for Safety of Navigation and Environment Protection, Ilawa, Poland.
- [18] **Degtyarev, A.** (2009). Proceedings 10th International Conf. Stability of Ships & Ocean Vehicles (STAB '09). St. Petersburg, Russia, 754 p.
- [19] **Walree, F. van** (2010). Proceedings 11th International Ship Stability Workshop, Wageningen, the Netherlands.
- [20] **Belenky, V. L.** (2011). Proceedings 12th International Ship Stability Workshop, Washington, DC, viii+420 p.
- [21] **E. Hairer, S.P. Norsett and G. Wanner** (1993). Solving Ordinary Differential Equations i. Nonstiff Problems. 2nd edition. Springer Series in Computational Mathematics, Springer-Verlag
- [22] **IMO SLF 53/INF.10 Annex 2** (2010). “Draft Vulnerability Criteria on Parametric Rolling and Pure Loss of Stability with Their Sample Calculation Results”, IMO, London.
- [23] **IMO SLF 53/INF.10 Annex 9** (2010). “Application of Different Vulnerability Criteria to a Number of Different Ships and Ship Types and General Remarks to the Proposed Criteria”, IMO, London,.
- [24] **IMO SLF 53/INF.10 Annex 1** (2010). “Proposal Concerning a Level 1 Vulnerability Criterion for Parametric Roll”, IMO, London.
- [25] **Taylan, M.** (2011). “SLF 53 Değerlendirme Raporu”, Türk Loydu, İstanbul.
- [26] **IMO** (2016). “Draft explanatory notes on the vulnerability of ships to the parametric roll stability failure mode” SDC 3/WP.5 Annex 4, page 1, pp. 1-34.
- [27] **Taylan, M.** (1990). Application of nonlinear roll motion model for assessment of ship stability in waves, Ocean Eng Department Florida Institute of Technology Doktora Tezi, Florida.
- [28] **Pesman, E.** (2011). Boyuna Dalgalarda Gemilerin Yalpa Hareketi Analizi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Doktora Tezi, İstanbul.
- [29] **IMO** (2008). IMO Res. MSC.267(85), Part B Chapter 2.4.
- [30] **IMO Res. A.562(14)** (1985). Recommendation on a severe wind and rolling criterion (weather criterion) for the intact stability of passenger and cargo ships of 24 metres in length and over, London, UK, 5 p.

EKLER

EK A: Ikeda'nın Basitleştirilmiş Yöntemi

EK B : Dalga Oluşum Frekans Tablosu ve Yükseklikleri



EK A

Yalpa genliğinin bir fonksiyonu olarak eşdeğer doğrusal yalpa sönümleme katsayısı olan B_{44} , aşağıdaki tahmin yöntemiyle elde edilebilir. Burada yalpa sönümleme katsayısı B_{44} ve dairesel yalpa frekansı $\omega = 2\pi / T_\phi$ aşağıdaki gibi normalleştirilir:

$$\widehat{B}_{44} = \frac{B_{44}}{\rho \nabla B^2} \sqrt{\frac{B}{2g}} \quad (\text{A.1})$$

$$\widehat{\omega} = \omega \sqrt{\frac{B}{2g}} \quad (\text{A.2})$$

Burada ρ deniz suyu yoğunluğunu, ∇ deplasman hacmini, B gemi kalıp genişliğini, g yerçekimi ivmesini ve T_ϕ yalpa periyodudur. Yalpa sönümleme tahmin yöntemi, yalpa sönümleme terimlerini ayırarak; sürtünme sönümleme B_F , dalga sönümleme B_W , girdap yapma sönümlemesi B_E ve yalpa omurgası sönümleme B_{BK} için sıfır ileri hızda, kaldırma terimi B_L için ise ileri hızda hesaplanır:

$$B_{44} = B_F + B_W + B_E + B_L + B_{BK} \quad (\text{A.3})$$

Bu eşitlik aşağıda verilen sınırlar dahilinde geçerlidir:

$$0.5 \leq C_b \leq 0.85; \quad 2.5 \leq B/d \leq 4.5 \quad (\text{A.4})$$

$$-1.5 \leq OG/d \leq 0.2; \quad 0.9 \leq C_m \leq 0.99 \quad (\text{A.5})$$

$$0.01 \leq b_{BK}/B \leq 0.06; \quad 0.05 \leq l_{BK}/L_{BP} \leq 0.4 \quad (\text{A.6})$$

A.1. Sürtünme Sönüm Terimi

Sürtünme sönüm terimi B_F aşağıdaki şekilde eşitlik yardımıyla hesaplanır:

$$B_F = \frac{4}{3\pi} \rho s_f r_f^3 \phi_a \omega c_f \quad (\text{A.7})$$

Burada c_f sürtünme katsayısını, r_f dönme eksenine olan ortalama yarıçap ve s_f ıslak yüzey alanıdır.

$$c_f = 0.74 \frac{\sqrt{T_\phi v}}{r_f \phi_a} \quad (\text{A.8})$$

$$r_f = \frac{(0.887 + 0.145C_b) \cdot (1.7d + C_b B) - 2.0G}{\pi} \quad (\text{A.9})$$

$$s_f = L_{BP}(1.75d + C_b B) \quad (\text{A.10})$$

Burada ϕ_a yalpa genliğini, T_ϕ yalpa periyodunu, v dinamik viskoziteyi, OG sakin su yüzeyinden ağırlık merkezine olan mesafe (aşağı yön pozitif olacak şekilde), L_{BP} kaideler arası boydur.

A.2. Dalga Sönüm Terimi

Dalga sönüm terimi B_w aşağıdaki eşitlik yardımıyla hesaplanır:

$$\widehat{B_w} = \frac{A_1}{\widehat{\omega}} \cdot \exp(-0.6944A_2(\log(\widehat{\omega}) - A_3)^2) \quad (\text{A.11})$$

Burada:

$$x_1 = B/d; \quad x_2 = C_b; \quad x_3 = C_m; \quad x_4 = 1 - OG/d \quad (\text{A.12})$$

$$A_1 = AA_1 \cdot \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^4 \sum_{k=1}^5 Q1_{j+4i,k} x_1^{5-k} x_2^{4-j} x_4^{3-i} \quad (\text{A.13})$$

$$AA_1 = 1.0 + (1 - x_4) \cdot \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^4 \sum_{k=1}^5 Q1_{j+4i+12,k} x_1^{5-k} x_2^{3-j} x_3^{2-i} \quad (\text{A.14})$$

$$A_2 = \sum_{i=1}^5 Q2_i x_4^{5-i} \quad (\text{A.15})$$

$$A_3 = AA_3 + \sum_{i=1}^7 \sum_{j=1}^7 Q3_{i,j} x_2^{7-j} x_4^{7-i} \quad (\text{A.16})$$

$$AA_3 = \sum_{i=1}^4 Q_{4_{1,i}} x_1^{4-i} \sum_{j=1}^2 \sum_{k=1}^4 Q_{4_{2+j,k}} x_2^{3-k} x_4^{2-j} \cdot \left(\sum_{i=1}^{10} Q_{5_i} \left(x_4 - \sum_{j=1}^4 Q_{4_{4,j}} x_1^{4-j} \right)^{10-i} + \sum_{i=1}^3 Q_{5_{i+9}} x_1^{3-i} \right) \quad (A.17)$$

Çizelge A.1 : Q1 ve Q2 katsayıları [26].

Factor Q1					
	1	2	3	4	5
1	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
2	0.00000	-0.00222	0.04087	-0.28687	0.59942
3	0.00000	0.01019	-0.16118	0.90499	-1.64139
4	0.00000	-0.01542	0.22037	-1.08499	1.83417
5	-0.06287	0.49893	0.52735	-10.79187	16.61633
6	0.11407	-0.81090	-2.21868	25.12697	-37.77298
7	-0.05893	0.26397	3.19497	-21.81266	31.41135
8	0.01077	0.00187	-1.24941	6.94279	-10.20190
9	0.00000	0.19221	-2.78746	12.50785	-14.76486
10	0.00000	-0.35056	5.22235	-23.97485	29.00785
11	0.00000	0.23710	-3.53506	16.36838	-20.53991
12	0.00000	-0.06712	0.96636	-4.40754	5.89470
13	0.00000	17.94500	-166.29400	489.79900	-493.14200
14	0.00000	-25.50700	236.27500	-698.68300	701.49400
15	0.00000	9.07700	-84.33200	249.98300	-250.78700
16	0.00000	-16.87200	156.39900	-460.68900	463.84800
17	0.00000	24.01500	-222.50700	658.02700	-660.66500
18	0.00000	-8.56000	79.54900	-235.82700	236.57900
Factor Q2					
	0.00000	-1.40200	7.18900	-10.99300	9.45000

Çizelge A.2 : Q3 katsayısı [26].

Factor Q3							
	1	2	3	4	5	6	7
1	-7686.03	30131.57	-49048.97	42480.77	-20665.15	5355.20	-577.88
2	61639.91	-241201.06	392579.59	-340629.47	166348.69	-43358.79	4714.79
3	-130677.49	507996.26	-826728.71	722677.10	-358360.74	95501.49	-10682.86
4	-110034.66	446051.22	-724186.46	599411.93	-264294.72	58039.73	-4774.64
5	709672.07	-2803850.24	4553780.50	-3888378.99	1839829.26	-457313.69	46600.82
6	-822735.93	3238899.73	-5256636.55	4500543.15	-2143487.35	538548.12	-55751.15
7	299122.87	-1175773.16	1907356.14	-1634256.82	780020.94	-196679.71	20467.09

Çizelge A.3 : Q4 ve Q5 katsayıları [26].

Factor Q4				
	1	2	3	4
1	-0.3767	3.39	-10.356	11.588
2	-17.109	41.495	-33.234	8.8007
3	36.566	-89.203	71.8	-18.108
4	0	-0.0727	0.7	-1.2818
Factor Q5				
Index	1	2	3	4
Q5	-1.05584	12.688	-63.70534	172.84571
Index	5	6	7	8
Q5	-274.057	257.68705	-141.40915	44.13177
Index	9	10	11	12
Q5	-7.1654	-0.0495	0.4518	-0.61655

A.3. Girdap Yapma Sönüm Terimi

Girdap yapma sönüm terimi B_E aşağıdaki eşitlik yardımıyla hesaplanır:

$$\widehat{B}_E = \frac{4\hat{\omega}\phi_a}{3\pi x_2 \cdot x_1^3} C_R \quad (\text{A.18})$$

Burada:

$$x_1 = B/d ; x_2 = C_b ; x_3 = C_m ; \quad (\text{A.19})$$

$$C_R = A_E \cdot \exp(B_{E1} + B_{E2} \cdot x_3^{B_{E3}}) \quad (\text{A.20})$$

$$C_R = A_E \cdot \exp(B_{E1} + B_{E2} \cdot x_3^{B_{E3}}) \quad (\text{A.21})$$

$$A_E = (-0.0182x_2 + 0.0155) \cdot (x_1 - 1.8)^3 + \sum_{i=1}^5 Q6_{1,i} x_2^{5-i} \quad (\text{A.22})$$

$$B_{E1} = (0.2x_1 + 1.6) \cdot (3.98x_2 - 5.1525) \frac{OG}{d} \left(\frac{OG}{d} \sum_{i=1}^3 Q6_{2,i} x_2^{3-i} + \sum_{i=1}^2 Q6_{2,i+3} x_2^{2-i} \right) \quad (\text{A.23})$$

$$B_{E2} = (0.25x_4 + 0.95) \cdot x_4 + \sum_{i=1}^5 Q6_{2,i} x_2^{5-i} \quad ve \quad (\text{A.24})$$

$$B_{E3} = (46.5 - 15x_1).x_2 + 11.2x_1 - 28.6 \quad (A.25)$$

Çizelge A.4 : Q6 katsayısı [26].

Factor Q6					
	1	2	3	4	5
1	-79.414	215.695	-215.883	93.894	-14.848
2	0.9717	-1.55	0.723	0.04567	0.9408
3	0	-219.2	443.7	-283.3	59.6

A.4. Yalpa Omurgası Sönüm Terimi

Yalpa omurgası sönüm terimi B_{BK} aşağıdaki eşitlik yardımıyla hesaplanır:

$$\hat{B}_{BK} = A_{BK} \cdot \hat{\omega} \cdot \exp(B_{BK1} + B_{BK2} \cdot x_3^{B_{BK3}}) \quad (A.26)$$

Burada:

$$x_1 = B/d; \quad x_2 = C_b; \quad x_3 = C_m \quad (A.27)$$

$$x_6 = \varphi_a(deg); \quad x_7 = b_{BK}/B; \quad x_8 = l_{BK}/L_{PP} \quad (A.28)$$

$$A_{BK} = f_1 \cdot f_2 \cdot f_3 \quad (A.29)$$

$$f_2 = \sum_{i=1}^3 Q7_{3,i} x_6^{3-i} \quad (A.30)$$

$$f_3 = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^3 Q7_{3+i,j} x_7^{3-j} x_8^{3-i} \quad (A.31)$$

$$B_{BK1} = x_4 \cdot (5x_7 + 0.3x_1 - 0.2x_8 + \sum_{i=1}^3 Q7_{6,i} x_6^{3-i}) \quad (A.32)$$

$$B_{BK2} = -15x_7 + 1.2x_2 - 0.1x_1 + \sum_{i=1}^3 Q7_{7,i} \left(\frac{OG}{d}\right)^{3-i} \text{ ve} \quad (A.33)$$

$$B_{BK3} = 2.5 \frac{OG}{d} + 15.75 \quad (A.34)$$

Çizelge A.5 : Q6 katsayısı [26].

Factor Q7	1	2	3
1	0	-0.3651	0.3907
2	0	-2.21	2.632
3	0.00255	0.122	0.4794
4	-0.8913	-0.0733	0
5	5.2857	-0.01185	0.00189
6	0.00125	-0.0425	-1.86
7	-0.0657	0.0586	1.6164

A.4. Kaldırma Sönüm Terimi

Kaldırma sönüm terimi B_L aşağıdaki eşitlik yardımıyla hesaplanır:

$$\hat{B}_L = \frac{S_L U k_n l_0 l_R}{2 \nabla B^2} \left(1 - 1.4 \frac{OG}{l_R} + 0.7 \frac{OG^2}{l_0 l_R} \right) \sqrt{\frac{B}{2g}} \quad (\text{A.35})$$

Burada:

$$K_n = \frac{2\pi d}{L_{BP}} + \kappa \left(4.1 \frac{B}{L_{BP}} - 0.045 \right) \quad (\text{A.36})$$

$$S_L = L_{BP} d, \quad l_0 = 0.3d, \quad l_R = 0.5d, \quad U = F_n \sqrt{Lg} \quad \text{ve} \quad (\text{A.37})$$

$$\kappa = \begin{cases} 0 & C_m \leq 0.92 \\ 0.1 & 0.92 < C_m \leq 0.97 \\ 0.3 & 0.97 < C_m \end{cases} \quad (\text{A.38})$$



EK B

Standart çevre koşullarının uzun vadeli karakterizasyonu, bir dalga saçılım diyagramı vasıtasıyla verilmektedir. Dalga dağılım diyagramı, belirgin dalga yüksekliği H_s ve ortalama sıfır geçiş periyodu T_z 'nin farklı deniz durumu koşullarının meydana gelme istatistiki sıklığını bildirmektedir. Standart dalga dağılımı diyagramı Çizelge B.1 ile verilmiştir.

Çizelge B.1 : Kuzey Atlantik dalga oluşum frekansları [22].

Dalga Oluşum Frekansları (Toplam Dalga Sayısı : 100.000)																
$T_z(s)$																
$H_s(m)$	3.5	4.5	5.5	6.5	7.5	8.5	9.5	10.5	11.5	12.5	13.5	14.5	15.5	16.5	17.5	18.5
0.5	1.3	133.7	865.6	1186	634.2	186.3	36.9	5.6	0.7	0.1	0	0	0	0	0	0
1.5	0	29.3	986	4976	7738	5569.7	2375.7	703.5	160.7	30.5	5.1	0.8	0.1	0	0	0
2.5	0	2.2	197.5	2158.8	6230	7449.5	4860.4	2066	644.5	160.2	33.7	6.3	1.1	0.2	0	0
3.5	0	0.2	34.9	695.5	3226.5	5675	5099.1	2838	1114.1	337.7	84.3	18.2	3.5	0.6	0.1	0
4.5	0	0	6	196.1	1354.3	3288.5	3857.5	2685.5	1275.2	455.1	130.9	31.9	6.9	1.3	0.2	0
5.5	0	0	1	51	498.4	1602.9	2372.7	2008.3	1126	463.6	150.9	41	9.7	2.1	0.4	0.1
6.5	0	0	0.2	12.6	167	690.3	1257.9	1268.6	825.9	386.8	140.8	42.2	10.9	2.5	0.5	0.1
7.5	0	0	0	3	52.1	270.1	594.4	703.2	524.9	276.7	111.7	36.7	10.2	2.5	0.6	0.1
8.5	0	0	0	0.7	15.4	97.9	255.9	350.6	296.9	174.6	77.6	27.7	8.4	2.2	0.5	0.1
9.5	0	0	0	0.2	4.3	33.2	101.9	159.9	152.2	99.2	48.3	18.7	6.1	1.7	0.4	0.1
10.5	0	0	0	0	1.2	10.7	37.9	67.5	71.7	51.5	27.3	11.4	4	1.2	0.3	0.1
11.5	0	0	0	0	0.3	3.3	13.3	26.6	31.4	24.7	14.2	6.4	2.4	0.7	0.2	0.1
12.5	0	0	0	0	0.1	1	4.4	9.9	12.8	11	6.8	3.3	1.3	0.4	0.1	0
13.5	0	0	0	0	0	0.3	1.4	3.5	5	4.6	3.1	1.6	0.7	0.2	0.1	0
14.5	0	0	0	0	0	0.1	0.4	1.2	1.8	1.8	1.3	0.7	0.3	0.1	0	0
15.5	0	0	0	0	0	0	0.1	0.4	0.6	0.7	0.5	0.3	0.1	0.1	0	0
16.5	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0	0	0

Çizelge B.2: Dalga oluşum frekanslarına karşılık gelen dalga yükseklikleri tablosu.

Hs(m)	Tz(s)															
	3.5	4.5	5.5	6.5	7.5	8.5	9.5	10.5	11.5	12.5	13.5	14.5	15.5	16.5	17.5	18.5
0.5	0.028	0.053	0.100	0.192	0.280	0.336	0.360	0.361	0.348	0.328	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1.5	0.000	0.158	0.301	0.576	0.841	1.009	1.080	1.083	1.045	0.985	0.916	0.846	0.777	0.000	0.000	0.000
2.5	0.000	0.264	0.502	0.959	1.401	1.681	1.800	1.805	1.742	1.642	1.527	1.410	1.295	1.188	0.000	0.000
3.5	0.000	0.369	0.702	1.343	1.962	2.353	2.520	2.527	2.438	2.299	2.138	1.973	1.814	1.664	1.526	0.000
4.5	0.000	0.000	0.903	1.727	2.522	3.026	3.240	3.249	3.135	2.956	2.749	2.537	2.332	2.139	1.962	0.000
5.5	0.000	0.000	1.104	2.111	3.083	3.698	3.960	3.971	3.831	3.613	3.360	3.101	2.850	2.614	2.398	2.200
6.5	0.000	0.000	1.304	2.495	3.643	4.371	4.680	4.693	4.528	4.269	3.971	3.665	3.368	3.090	2.834	2.600
7.5	0.000	0.000	0.000	2.878	4.204	5.043	5.400	5.415	5.225	4.926	4.582	4.229	3.886	3.565	3.269	3.000
8.5	0.000	0.000	0.000	3.262	4.764	5.715	6.120	6.137	5.921	5.583	5.193	4.793	4.405	4.041	3.705	3.400
9.5	0.000	0.000	0.000	3.646	5.325	6.388	6.840	6.859	6.618	6.240	5.804	5.356	4.923	4.516	4.141	3.800
10.5	0.000	0.000	0.000	0.000	5.885	7.060	7.560	7.581	7.315	6.897	6.415	5.920	5.441	4.991	4.577	4.200
11.5	0.000	0.000	0.000	0.000	6.446	7.733	8.280	8.304	8.011	7.554	7.026	6.484	5.959	5.467	5.013	4.600
12.5	0.000	0.000	0.000	0.000	7.006	8.405	9.000	9.026	8.708	8.211	7.637	7.048	6.477	5.942	5.449	0.000
13.5	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	9.078	9.720	9.748	9.405	8.867	8.248	7.612	6.996	6.417	5.885	0.000
14.5	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	9.750	10.440	10.470	10.101	9.524	8.859	8.176	7.514	6.893	0.000	0.000
15.5	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	11.160	11.192	10.798	10.181	9.470	8.740	8.032	7.368	0.000	0.000
16.5	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	11.914	11.494	10.838	10.081	9.303	8.550	0.000	0.000	0.000

ÖZGEÇMİŞ



Ad-Soyad : Buğra Uğur Yazıcı
Doğum Tarihi ve Yeri : Üsküdar – 28.07.1991
E-posta : bugur.yazici@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2013, Milli Savunma Üniversitesi Deniz Harp Okulu, Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği (3,72/4,00)
- **Yükseklisans** : 2018, İstanbul Teknik Üniversitesi, Gemi İnşaatı ve Gemi Makinaları Anabilim Dalı, Gemi İnşaatı ve Gemi Makinaları Yüksek Lisans Programı (3,50/4,00)

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 11/2017 - ... MAN Diesel ve Turbo Satış Servis Ltd. Şti. – Satış Koordinatörü
- 06/2014 – 11/2017 Seft Gemi İnşaa Sanayi Ve Mühendislik – Ar-Ge Mühendisi

YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **TURKMEN S., SENER B., YAZICI B.Ugur, ATLAR M.**, 2018 “A Trim Optimisation of an Eights Racing Shell using Computational Fluid Dynamics Method”, INT-NAM, 3rd International Symposium on Naval Architecture and Maritime, Istanbul, 2018.
- **YAZICI B.Ugur, SENER B., OZDEN S.**, 2016 “Partially Parametric Modification of A Fast Patrol Boat Hull Form For Bow Optimization”, The Second Global Conference On Innovation In Marine Technology And Future Of Maritime Transportation