

# Zorlama etkisi altındaki yalpa hareketinin çekirdek güvenli bölgeleri

**Erdem ÜÇER\***, **A. Yücel ODABAŞI**

*İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Gemi İnşaatı ve Gemi Makinaları Mühendisliği Programı, 34469, Ayazağa, İstanbul*

## Özet

*Gemilerin yalpa hareketi bilim adamları ve araştırmacıların her zaman popüler bir araştırma konusu olmuştur. Bunun sebebi IMO kurallarının ve şu anki mevcut IS kodunun rasyonel temellere dayanmayan ve en az 30 yıl önce kabul edilmiş kurallara dayanması, ya da yalpa hareketinin araştırmacılar tarafından tamamıyla açıklanamamış olmasına bağlanabilir. Bu konu üzerine çalışma yapmamızın sebebi de mevcut IS kodunu geliştirilmesine bir katkı sağlamaktır. Bu makalede, gemilerin enine stabilitesinin matematiksel yöntemlerle irdelenmesinde yeni bir yaklaşım olarak “çekirdek güvenli bölge kavramı” ortaya çıkarılmıştır. Çekirdek güvenli bölge, yalpa açısı ve yalpa açısız hızından oluşan faz uzayındaki sağlanması gereken en küçük güvenli bölgedir. Bu bölgenin dış sınırı zorlanmamış yalpa hareketinin Lyapunov fonksiyonu kullanılarak belirlenmektedir. İzin verilen en büyük yalpa açısı ise geminin çalışma koşullarına bağlı olarak çıkartılmaktadır. Çekirdek güvenli bölgenin belli bir miktardan fazla erozyona uğraması, geminin stabilitesinin büyük bir tehlike içerisinde olduğu anlamına gelmektedir. Dışarıdan ve parametrik zorlama etkisi altında, rüzgar ve sönüm kuvvetlerinin çekirdek güvenli bölgenin büyüklüğü üzerindeki etkileri gösterilmiş ve geminin çalışma koşullarına bağlı olarak stabil olup olmadığı ortaya konulmuştur. Karşılaşma frekansı doğal frekans civarında olduğu zaman en tehlikeli durumlar gözlemlenmiş, sönümün artırılması geminin devrilme olayının daha büyük dalgalarda oluşmasını sağlamıştır. Ön meyil açısının artırılması ise daha küçük yükseklikli dalgaların tehlikeli hale gelmesine yol açmıştır. Kıç omuzluktan gelen dalgalarda enine metasantr yüksekliğinin IMO tarafından belirlenen sınırın biraz üzerine çıkarılması, kıçtan gelen dalgalarda ise enine metasantr yüksekliğinin sınırın biraz altına indirilmesi geminin devrilme riskini arttırmıştır.*

**Anahtar Kelimeler:** Çekirdek güvenli bölge, yalpa hareketi, Lyapunov Direkt Yöntemi.

\*Yazışmaların yapılacağı yazar: Erdem ÜÇER. ucerer@itu.edu.tr; Tel: (212) 285 63 81

Bu makale, birinci yazar tarafından İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Gemi İnşaatı ve Gemi Makinaları Mühendisliği Programı'nda tamamlanmış olan "Gemilerin enine stabilitesinin matematiksel yöntemlerle irdelenmesi" adlı doktora tezinin hazırlanmıştır. Makale metni 09.01.2008 tarihinde dergiye ulaşmış, 05.03.2008 tarihinde basım kararı alınmıştır. Makale ile ilgili tartışmalar 31.07.2009 tarihine kadar dergiye gönderilmelidir.

## Kernel safe basins of the rolling motion under excitation

### Extended abstract

*Rolling motion of the ship has always been popular subject of the researchers. The reason for this can be IMO rules or the present IS (Intact Stability) code of the ships is based on the rules which are not based on rational reasoning and which was accepted 30 years ago or rolling motion of the ship could not be explained completely by researchers.*

*Although the ships especially the small ships such as fishing vessels and research vessels ensure IMO stability criteria or the present IS code, they could still capsize due to combined environmental effects. The present stability criteria are insufficient because the rules are only based on the static stability at calm water and they do not include any effect of nature of the sea and dynamic response of the ships directly. Thus, IMO should renew its rules to include dynamic effects. Oscillatory sudden capsizing, oscillatory symmetric and anti-symmetric build-up capsizing can not be explained by present stability criteria. Only non-oscillatory capsizing can be explained by current rules.*

*In this study, the kernel safe basin concept was presented to improve the present stability criteria. Kernel safe basin is the smallest safe basin in the roll angle and roll angular velocity phase space. If the ship is stable or not in a dangerous situation, there is no erosion at kernel safe basin of the ship. The condition which causes erosion at kernel safe basin more than an agreed amount can be named as dangerous situation.*

*The boundary of kernel safe basin is determined by using the Lyapunov function of the non-excited roll motion and defines a reserve energy level. The maximum roll angle of the kernel safe basin is dependant on the working environment of the vessel. In this study, it was assumed to be 25° for external excitation case and 20° for parametric excitation case. However, kernel safe basins that have different sizes, were also investigated in the PhD. Thesis.*

*Although the rolling motion is strongly coupled with sway and yaw motion, in this study it was assumed to be uncoupled with other ship motions by defining roll center. The uncoupled roll motion was examined by using the integrity curves which show the amount*

*of erosion occurred at kernel safe basin under the influence of external and parametric excitation.*

*In this study, the importance of damping moment, excitation amplitude, excitation frequency and bias angle on the stability of the ships were shown from the investigation of the uncoupled rolling motion under external excitation. Increment of damping moment caused to decrease the risk of capsizes. Thus, the ship could survive or operate for rougher waves. Both increment of wave height (excitation amplitude) and bias angle caused to increase the erosion occurred at kernel safe basin. Thus it could be said that the ship should operate at smaller waves when the bias exists. When excitation frequency to natural frequency ratio is around 0.8, the maximum erosion occurred at kernel safe basin. Thus it can be concluded that main resonance case is the most critical case for safety of vessel in beam seas.*

*While examining the protection of kernel safe basins under the influence of parametric and external excitation, the ratio of metacentre height variation of the ship was assumed to be function of the heading angle and the ratio of the component of wave length in the direction of ship heading to ship length. In addition, it was assumed that there was constant wind effect while modeling rolling motion.*

*The results showed that the small increment of metacentre height (GM) over the value defined by IMO caused the increment of erosion occurred at kernel safe basin for stern quartering waves whereas the waves which come from the stern of the ship with an angle (0°-15°), caused less erosion at kernel safe basin. The small decrement of GM under the value defined by IMO caused to decrease the erosion occurred at kernel safe basin for stern quartering waves whereas the erosion increased for stern waves (0°-15°). If the value of GM is too small than the IMO defined value, both stern and stern quartering waves caused too much erosion at kernel safe basin. However, it should not be forgotten that the encounter frequency and angle are also operational variables (they can take different values by changing the velocity and heading of the ship) for following seas so in the evaluation of the transverse stability of the ships not only the design factors but also the operational factors should be considered.*

**Keywords:** Kernel safe basin, rolling motion, Lyapunov direct method.

## **Giriş**

Gemilerin yalpa hareketi bilim adamları ve araştırmacıların her zaman popüler bir araştırma konusu olmuştur. Bunun sebebi IMO kurallarının ve şu anki mevcut IS kodunun bundan en az 30 yıl önce kabul edilmiş kurallara dayanması yada yalpa hareketinin araştırmacılar tarafından tamamıyla açıklanamamış olmasına bağlanabilir. Muhtemelen bu sebeplerin ikisi birden de doğrudur.

IMO kurallarını ve mevcut IS kodunu sağladığı halde gemiler hala devrilmektedir. Bu gemilerin devrilme nedeni, mevcut kurallarda doğrultma moment koluyla karakterize edilen sakin sudaki statik stabilite çok önemli bir yer tutarken, denizin doğası ve geminin dinamik tepkilerinin açıkça yer almamasına bağlanabilir. Mevcut stabilite kurallarının geliştirilmesi ve yenilenmesi gerekmektedir. Olayın fiziği doğru şekilde modellenmeli ve kuralların içinde yer alması sağlanmalıdır.

Gemilerin enine stabilitesi üzerine bir çalışma yapmamızın sebebi, yukarıda bahsedildiği gibi bu konu ile ilgili hala doldurulması gereken boşluklar olması ve mevcut stabilite kurallarının yenilenebilmesi için bir katkıda bulunmak istememizdir.

Dalgalar arasında altı serbestlik derecesine sahip olan bir geminin, genelde bütün hareketleri aynı büyüklükte yapmadığı da göz önünde bulundurulurken, sadece iki yada üç hareketin birbirleriyle olan etkileşimleri hesaba katılmaktadır.

Gemi sancak ve iskele doğrultusunda simetriye sahipse, boyuna öteleme, dalıp çıkma, baş kıç vurma hareketlerinin, bordadan gelen dalgalarda, yalpa hareketi üzerindeki birinci mertebeden etkileşimleri sıfırdır. Fakat yan sürüklenme ve savrulma hareketlerinin yalpa üzerinde etkileri vardır (Jiang, 1995).

Savrulma hareketinin yan sürüklenme hareketine nazaran yalpa üzerinde daha az etkili olduğu kabul edilip, sanal bir yalpa merkezi tanımlayarak, yalpa hareketi diğer gemi hareketleri ile etkileşimsiz hale getirilebilir (Lewis, 1988, Hutchison, 1991).

Yalpa hareketinin diğer gemi hareketleri ile etkileşimi olmadığını kabul edip, gemilerin enine stabilitesini inceleyen birçok araştırma bulunmaktadır. Bu araştırmalara örnek olarak Arnold ve diğerleri (2004), Grim (1952), McCue (2005), Nayfeh ve Khedir (1986), Odabasi (1977), Soliman ve Thompson (1991) ve Taylan (1999)'nın çalışmaları verilebilir.

Arnold ve diğerleri (2004) ve McCue (2005), Lyapunov eksponansiyellerini kullanarak gemilerin stabilitesini ve devrilmesini incelemiştir.

Grim'in 1952 yılındaki çalışması dalgalar arasında doğrultma momentinin zamana bağlı değişimini hesaba katan ilk çalışmalardan biridir. Günümüzdeki boyuna dalgalardaki gemilerin enine stabilitesini inceleyen araştırmaların da temelini oluşturmaktadır.

Nayfeh ve Khdeir 1986 yılındaki çalışmalarında düzenli bordadan gelen dalgalarda yalpa hareketi denkleminin çözümünü çok katlı ölçek yöntemi kullanarak elde etmiştir.

Odabasi 1977 yılındaki çalışmasında gemilerin nihai stabilitesini incelemiştir.

Soliman ve Thompson 1991 yılındaki çalışmalarında lineer olmayan yalpa hareketinin güvenli bölgelerini dördüncü mertebeden Runge-Kutta yöntemi ile elde etmiş, girişim eğrileri ile sönüm, zorlama kuvveti genliği ve frekansına bağlı olarak zorlamamış yalpa hareketinin güvenli bölgesinin korunmasının nasıl değiştiğini göstermişlerdir.

Taylan 1999 yılındaki çalışmasında Bogoulibov Krylov asimptotik yöntemini kullanarak yalpa hareketinin yaklaşık çözümünü elde etmiştir.

Bu çalışmada da, bir serbestlik dereceli, diğer gemi hareketleri ile etkileşimsiz yalpa hareketi, bordadan, kıç ve kıç omuzluktan gelen dalgalarda gemilerin enine stabilitesinin incelenmesi için kullanılmış, gemi için uygun çalışma koşulları çekirdek güvenli bölge kavramı kullanarak belirlenmeye çalışılmıştır.

Çekirdek güvenli bölge, yalpa açısı ve yalpa açısal hızından oluşan faz uzayındaki sağlanması gereken en küçük güvenli bölgedir. Bu bölgenin dış sınırı zorlanmamış yalpa hareketinin Lyapunov fonksiyonu kullanarak belirlenmektedir. İzin verilen en büyük yalpa açısı veya standart enerji değeri ise geminin çalışma koşullarından belirlenebilmektedir.

Çekirdek güvenli bölge, aslında hava ve deniz koşulları ne olursa olsun erozyona uğramaması gereken bir bölgedir. Fakat, bu bölge gereğinden fazla emniyetli seçilmiş olabilir veya hava ve deniz koşulları ön görülen durumdan daha kötü hale gelmiş olabilir. Dolayısıyla, çekirdek güvenli bölgede belli bir emniyet payı da bulundurulmalıdır. Çekirdek güvenli bölgede meydana gelebilecek erozyona ne kadar oranda izin verilebileceği detaylı bir şekilde araştırılmalıdır. Bu tez çalışmasında, %5 oranı erozyon emniyet payı olarak belirlenmiştir.

Bu çalışmanın birinci kısmında bordadan gelen dalgalarda, ikinci kısmında ise kış ve kış omuzluktan gelen dalgalarda gemilerin enine stabilitesi çekirdek güvenli bölge kavramı kullanılarak incelenmiştir. Rüzgar, sönüm ve dalga zorlama kuvvetlerinin çekirdek güvenli bölgenin büyüklüğü üzerindeki etkileri gösterilmiştir. İkinci kısımda bunlara ilave olarak kabul edilen hız değeri için geminin enine metasantr yüksekliğinin stabilite üzerine etkisi de gösterilmiştir.

## Bordadan gelen düzenli dalgalarda gemilerin enine stabilitesi

### Model

Geminin bordadan gelen düzenli dalgardaki yalpa hareketi modellenirken aşağıdaki kabuller yapılmıştır.

- Geminin bütün diğer serbestlik derecelerinin etkileri ihmal edilmiştir.
- Gemi sancak ve iskele doğrultusunda simetriye sahiptir.
- Gemi rijid kabul edilmiştir.

Bu kabullere dayanarak lineer olmayan yalpa hareketi Denklem (1) ile gösterilebilir.

$$I\ddot{\theta} + S(\theta, \dot{\theta}) + M_d(\theta) = E(t) + M_{ruz} \quad (1)$$

Burada;

$\theta$  : Yalpa açısı (radyan)

$I$  : Geminin harekete karşı reaksiyonundan doğan yalpa atalet momentiyle, deniz suyunun gemi hareketine karşı reaksiyonundan doğan ek kütle atalet momentinin toplamını göstermektedir. Her ikisinde hareketin ivmesine bağlıdır. Ek kütle atalet momentinin meyil açısından bağımsız sabit değeri olduğu kabul edilmiştir.

$S(\theta, \dot{\theta})$ : Sönüm momentini göstermektedir. Gemi boyunca dalgaların doğurduğu yalpa hızıyla değişen direnç momentiyle, yalpa hızının karesiyle orantılı olarak değişen suyun, viskozite etkisine bağlı olarak değişen momentin toplamına eşittir. Aşağıdaki bağıntıda gösterildiği gibi yazılabilir.

$$S(\theta, \dot{\theta}) = s_1\dot{\theta} + s_2|\dot{\theta}|\dot{\theta} \quad (2)$$

$E(t)$  : Dalga zorlama momentini göstermektedir. Düzenli enine dalgalar sonucu meydana geldiği kabul edildiğinden, zorlama momenti Denklem (3)'te gösterilen bağıntıdaki gibi yazılabilir.

$$E(t) = E_w \cos(\Omega t + \beta) \quad (3)$$

Burada  $E_w$  genlik ve  $\Omega$  zorlayıcı kuvvetin frekans ve  $\beta$  faz farkını göstermektedir.

$M_d(\theta)$ : Doğrultma momentini göstermektedir. Katsayıları stabilite eğrisinden yararlanılarak elde edilen yalpa açısı cinsinden tek polinomla ifade edilebilir.

$$M_d(\theta) = \Delta \overline{GZ}(\theta) = \Delta \sum_i k_i \theta^i \quad (i=1,3,5,\dots) \quad (4)$$

Burada  $\Delta$  deplasman kuvveti (ton)

$M_{ruz}$  : Rüzgar momentini göstermektedir. Sabit bir değeri olduğu kabul edilecektir. Bu kabullere bağlı olarak Denklem (1)'de yazdığımız bağıntı (5)'teki gibi ifade edilebilir.

$$I\ddot{\theta} + s_1\dot{\theta} + s_2\theta|\dot{\theta}| + \Delta\sum_i k_i\theta^i = E_w \cos(\Omega t + \beta) + M_{ruz} \quad (5)$$

Denklemin her iki tarafı yalpa atalet momenti ile ek kütle atalet momenti toplamına bölünürse Denklem (6)'daki ifade elde edilir.

$$\ddot{\theta} + \mu\dot{\theta} + \eta\theta|\dot{\theta}| + \frac{\Delta}{I}\sum_i k_i\theta^i = F \cos(\Omega t + \beta) + F_{ruz} \quad (6)$$

$$\text{Burada } \mu = \frac{s_1}{I}, \eta = \frac{s_2}{I}, F = \frac{E_w}{I}, F_{ruz} = \frac{M_{ruz}}{I}$$

Doğrultma moment kolu eğrisi üçüncü dereceden tek bir polinomla ifade edilirse Denklem (7) elde edilir.

$$\ddot{\theta} + \mu\dot{\theta} + \eta\theta|\dot{\theta}| + c_1\theta - c_2\theta^3 = F \cos(\Omega t) + F_{ruz} \quad (7)$$

$$\text{Burada, } c_1 = \frac{\Delta k_1}{I}, c_2 = -\frac{\Delta k_2}{I} \text{ ve } F = \pi \frac{H}{\lambda} c_1$$

H: dalga yüksekliği (m.),  $\lambda$ : Dalga boyu (m.)

Denklem (7)'de gösterilen ifadede  $\theta = x + \theta_s$  dönüşümü yapılırsa, Denklem (8) elde edilir.

$$\ddot{x} + \mu\dot{x} + \omega_0^2 x - d_1 x^2 - d_2 x^3 = F \cos(\Omega t) \quad (8)$$

$$\text{Burada } \omega_0^2 = c_1 - 3c_2\theta_s^2, d_1 = 3\theta_s c_2, d_2 = c_2$$

### Çekirdek güvenli bölge kavramı kullanarak stabilitenin incelenmesi

Bu kısımda, MV Gaul balıkçı ve MS Helland Hansen araştırma gemilerinin değişik şartlar altındaki stabiliteyi, çekirdek güvenli bölgelerinin korunup korunmadığına bakılarak kontrol edilecektir. İzin verilen en büyük erozyon %5 olarak belirlenmiştir.

Mv Gaul ve MS Helland Hansen gemilerinin çekirdek güvenli bölgelerinin dış sınırı yada izin verilen en büyük yalpa açısal hızları ise Denklem (9)'da gösterilen Lyapunov enerji fonksiyonu yardımıyla bulunmuştur.

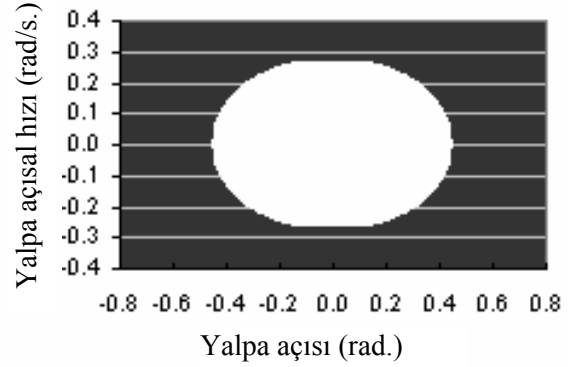
$$\frac{\dot{\theta}^2}{2} + G(\theta) = V_{st} \quad (9)$$

Burada;

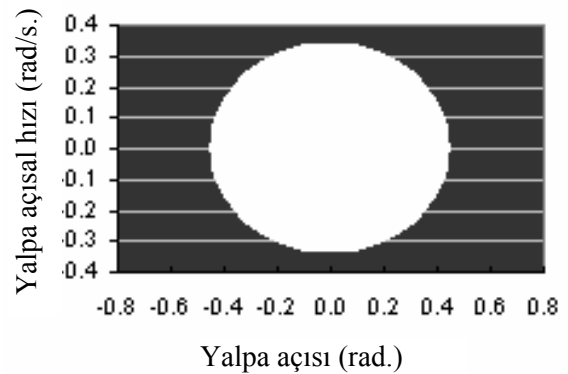
$$G(\theta) = (2c_1\theta^2 - c_2\theta^4)/4 \text{ 'dır.}$$

Mv Gaul gemisi için  $c_1$  ve  $c_2$  katsayıları sırasıyla 0.372423 ve 0.131664'dür. MS Helland Hansen'in ise 0.63 ve 0.765'dir.  $V_{st}$  sabittir ve  $G(25^\circ)$ 'ye eşittir.

Şekil 1'de MV Gaul balıkçı gemisinin, Şekil 2 de MS Helland Hansen araştırma gemisinin çekirdek bölgeleri gösterilmiştir. Bu çekirdek güvenli bölgelerde, mutlak değerce en büyük izin verilen yalpa açısının  $\theta_m=0.43633$  radyan ( $25^\circ$ ) olduğu ve bu yalpa açısına karşılık gelen en büyük izin verilen yalpa açısal hızının 0 olduğu kabul edilmiştir.



Şekil 1. Mv Gaul için çekirdek güvenli bölge



Şekil 2. Hansen için çekirdek güvenli bölge

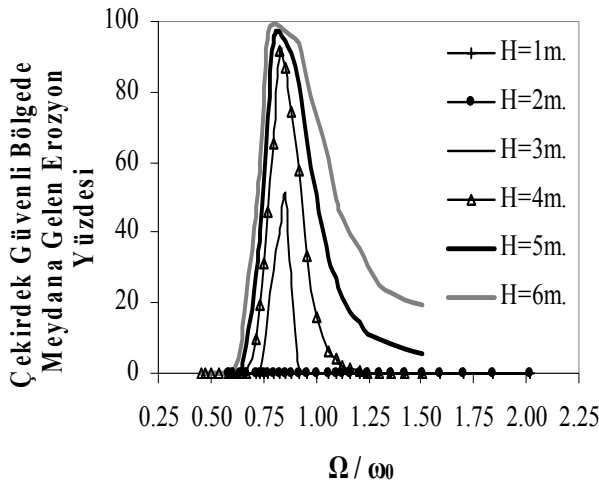
Mv Gaul balıkçı gemisinin Şekil 1'de gösterilen çekirdek bölgesinde, ön meyil açısı 0, 0.1 ve 0.2 radyanken, Tablo 1'de gösterilen dalga boyu ve yüksekliği değerlerinden oluşan zorlama kuv-

vetleri, sadece bir durum için erozyon meydana getirmiş diğer durumlarda ise bölge tamamen korunmuştur. Erozyon meydana getiren durumda, başlangıç meyil açısı 0.2 radyanken, 6m yüksekliğinde ve 250m boyundaki dalganın çekirdek güvenli bölgede %5.2'lik erozyona sebep olduğu durumdur.

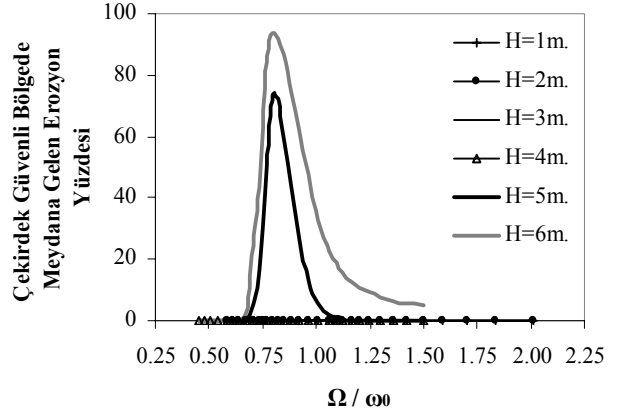
Tablo 1. Nümerik hesaplamalarda kullanılan dalgaların yükseklik ve boyları

Dalga Yüksekliği (m.)	Dalga boyları (m.)
H=1m., 2m. 3m.	(25 + 5 i) i=0,..., 12 90 + 10 (i-13) i=13,...,23 200+25 (i-24) i=24,...,28
H=4m., 5m. 6m.	(45 + 5 i) i=0,..., 8 90 + 10 (i-9) i=9,...,19 200+25 (i-20) i=20,...,23 300+50 (i-24) i=24,...,28

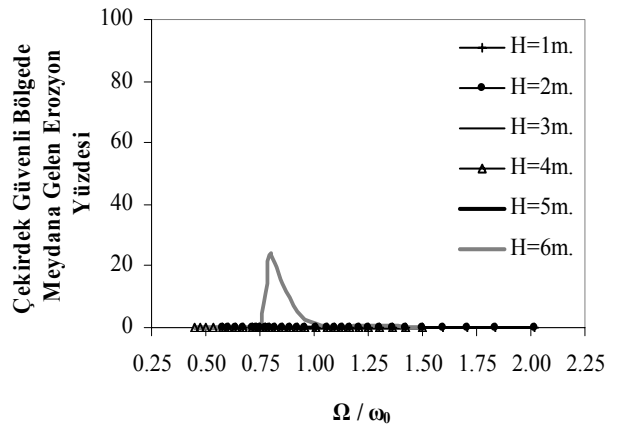
Şekil 3'ten görülebileceği gibi, Helland Hansen araştırma gemisinin ön meyilsiz durumda, çekirdek güvenli bölgesinde, kuadratik sönüm katsayısı sıfıra eşitken 3m üzeri yükseklikteki dalgalar erozyona sebep olmaktadır. Kuadratik sönüm katsayısının değeri 0.1'e çıkarıldığında 5m. ve üzeri yükseklikteki dalgalar erozyona sebep olmaktadır (Bkz. Şekil 4). Kuadratik sönüm katsayısı 0.2 değerini aldığı anda ise 6m yükseklikli dalgalar ancak erozyona sebep olmaktadır (Bkz. Şekil 5).



Şekil 3. Girişim eğrisi  $\theta_s=0$  rad.  $\eta=0$

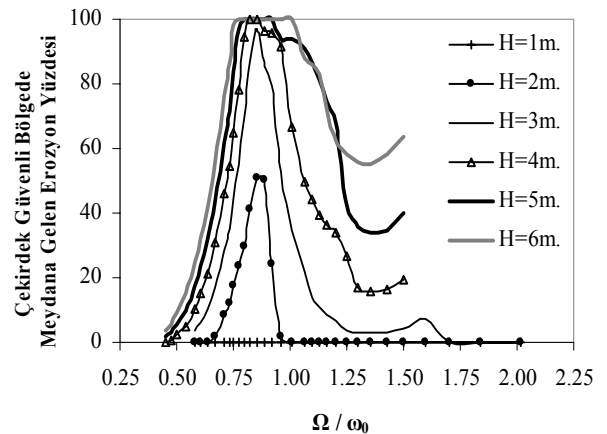


Şekil 4. Girişim eğrisi  $\theta_s=0$  rad.  $\eta=0.1$



Şekil 5. Girişim eğrisi  $\theta_s=0$  rad.  $\eta=0.2$

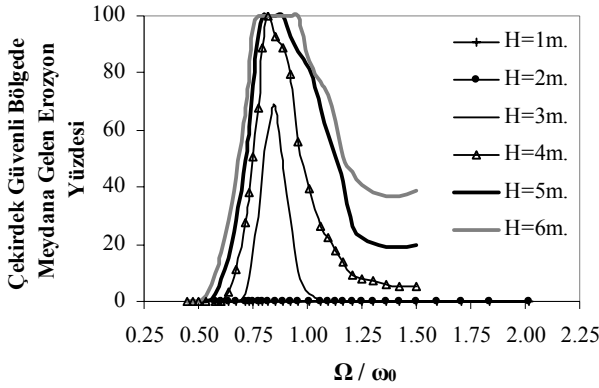
Şekil 6'dan görülebileceği gibi, Helland Hansen araştırma gemisinin 0.1 radyan ön meyilli durumda, çekirdek güvenli bölgesinde, kuadratik sönüm katsayısı sıfıra eşitken 2m üzeri yükseklikteki dalgalar erozyona sebep olmaktadır.



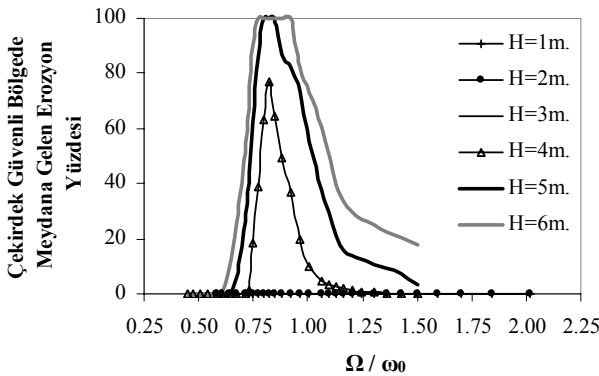
Şekil 6. Girişim eğrisi  $\theta_s=0.1$  rad.  $\eta=0$

Şekil 7'den görülebileceği gibi, 0.1 radyan ön meyilli durumda, kuadratik sönüm katsayısının değeri 0.1'e çıkarıldığında, 3m.'den yüksek dalgalar çekirdek güvenli bölgede erozyona sebep olmaktadır. Kuadratik sönüm katsayısı 0.2 değerini aldığı anda ise, 4m.'den yüksek dalgalar çekirdek güvenli bölgede erozyona sebep olmaktadır (Bkz. Şekil 8).

Ön meyil açısındaki artış çekirdek güvenli bölgede erozyona sebep olan dalgaların yüksekliğinin küçülmesine yol açmaktadır. Kuadratik sönümdeki artış ise çekirdek güvenli bölgede, daha büyük yükseklikli dalgaların erozyona yol açmasına sebep olmaktadır.



Şekil 7. Girişim eğrisi  $\theta_s=0.1$  rad.  $\eta=0.1$



Şekil 8. Girişim eğrisi  $\theta_s=0.1$  rad.  $\eta=0.2$

Şekil 3-8'deki girişim eğrilerinden, çekirdek güvenli bölgede meydana gelen en büyük erozyonun ana rezonans bölgesinde meydana geldiği görülmektedir. Ön meyil açısı sıfırken, ana rezonans bölgesinde özellikle zorlama frekansı doğal frekansın 0.80 katı civarındayken ön me-

vil açısı 0.1 radyana eşit olduğu zaman ise zorlama frekansı doğal frekansın 0.85 katı civarındayken, çekirdek güvenli bölgede en büyük miktarda erozyon meydana gelmektedir.

## Takip eden dalgalarda gemilerin enine stabilitesinin incelenmesi

### Model

Takip eden dalgalarda gemilerin enine stabilitesini incelemek için, dışarıdan ve parametrik zorlama etkisi altındaki, diğer gemi hareketleri ile etkileşimsiz lineer olmayan yalpa hareketini gösteren Denklem (10)'daki ifade kullanılmıştır. Bu ifadede, doğrultma moment kolu eğrisi yedinci dereceden tek bir polinomla ifade edilmiş, viskoz sönümün etkisi hesaba katılmamıştır. Enine metasantr yüksekliği değişim oranı (a)'nın dalganın geminin ilerleme doğrultusundaki bileşeninin gemi boyuna oranına ve dalgaların geliş doğrultusuna bağlı bir fonksiyonu olduğu düşünülmüştür.

$$\ddot{\theta} + \Gamma (c_1 \theta + c_2 \theta^3 + c_3 \theta^5 + c_4 \theta^7) = (F - \Gamma c_1 a \theta) \cos \omega_e t - \mu \dot{\theta} + F_{ruz} \quad (10)$$

Burada

$$a = \begin{cases} 2 \left( \frac{\lambda_x}{L_s} \right) - \left( \frac{\lambda_x}{L_s} \right)^2 \Big] a_{\max} & 0 < \frac{\lambda_x}{L_s} \leq 1.8 \quad 0^\circ \leq \chi \leq 90^\circ \\ 77.745 a_{\max} e^{-2.9862 \left( \frac{\lambda_x}{L_s} \right)} & \frac{\lambda_x}{L_s} > 1.8, 0^\circ \leq \chi \leq 90^\circ \end{cases}$$

$$\lambda_x = \lambda \cos \chi, \quad F = \pi \frac{H}{\lambda} \Gamma GM \sin \chi, \quad \Gamma = \frac{\Delta}{I}$$

Nümerik hesaplamalar sırasında  $\mu$ ,  $\Gamma$ ,  $a_{\max}$ ,  $c_1$ ,  $c_2$ ,  $c_3$ ,  $c_4$  ve  $F_{ruz}$  katsayıları sırasıyla 0.04, 0.593455, -0.5, 0.365, 0.39845, -0.58344, 0.12595, 0.0414'e eşit olduğu kabul edilmiştir.

### Çekirdek güvenli bölge kavramı kullanarak stabilitenin incelenmesi

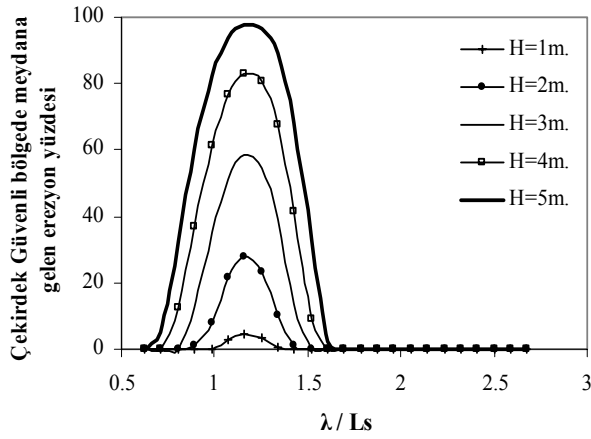
Şekil 9-20'de MV Gaul balıkçı gemisinin, değişik enine metasantr yüksekliklerine karşılık gelen çekirdek güvenli bölgelerinde, 1m ile 5m'ye

kadar yükseklikli dalgaların, meydana getirdikleri erozyon miktarlarını gösteren girişim eğrileri gösterilmiştir.

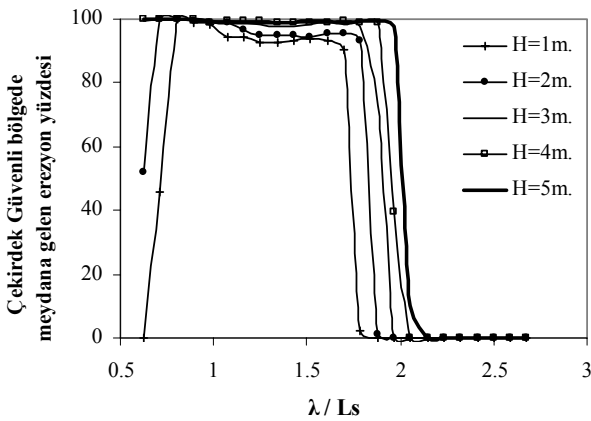
Şekil 9-11'teki  $GM=0.365m$ . için elde edilmiş girişim eğrilerinden görülebileceği gibi, en fazla problemi kıç omuzluktan  $30^\circ$  ile gelen dalgalar yaratmaktadır.

Şekil 9'dan görülebileceği gibi,  $GM=0.365m$ . için kıçtan  $15^\circ$  doğrultu ile gelen dalgalarda ise, yüksekliği 2m'den fazla ve boyu gemi boyu civarında olan dalgalar tehlike yaratmaktadır.

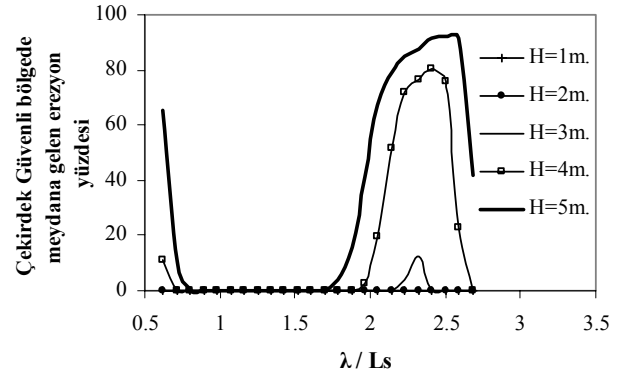
Şekil 11'den görülebileceği gibi  $GM=0.365m$  için, kıç omuzluktan  $45^\circ$  doğrultu ile gelen 4m ve üzeri yükseklikli, boyları gemi boyunun iki katı civarında olan dalgalar ancak problem yaratmaktadır.



Şekil 9. Girişim eğrisi ( $\chi=15^\circ$   $GM=0.365m$ )

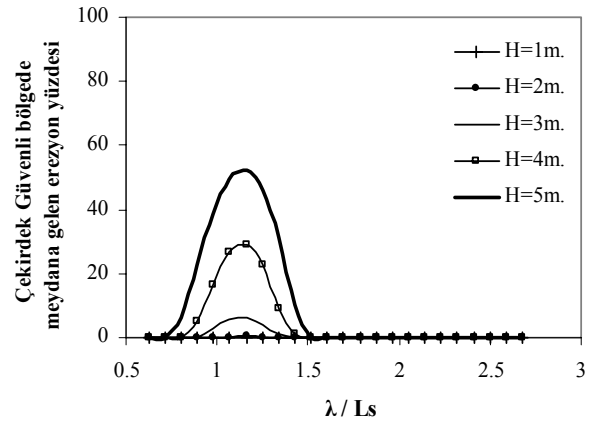


Şekil 10. Girişim eğrisi ( $\chi=30^\circ$   $GM=0.365m$ )

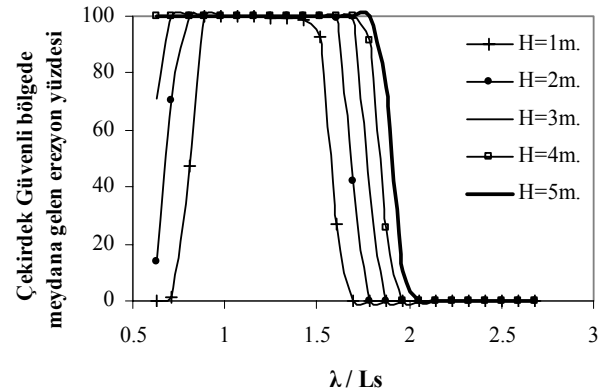


Şekil 11. Girişim eğrisi ( $\chi=45^\circ$   $GM=0.365m$ )

Şekil 12-14'de  $GM=0.40m$ . için elde edilmiş girişim eğrileri gösterilmiştir. Bu girişim eğrilerinden  $GM$ 'in  $0.365m$ . 'den  $0.40m$ . 'ye çıkarılmasının, kıçtan gelen dalgaların çekirdek güvenli bölgede daha az erozyon meydana getirmesine, kıç omuzluktan özellikle  $45^\circ$  ile gelen dalgaların ise çok daha büyük miktarda erozyon meydana getirmesine yol açtığı gözlemlenmiştir.

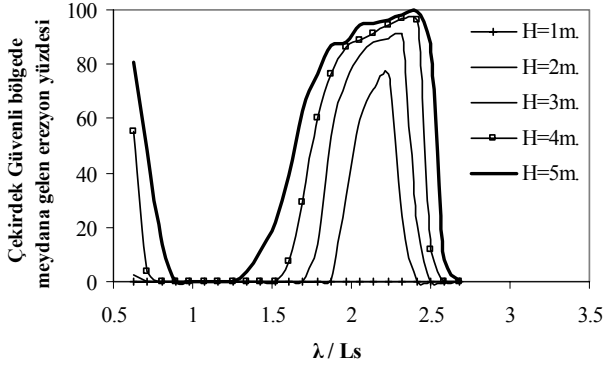


Şekil 12. Girişim eğrisi ( $\chi=15^\circ$   $GM=0.40m$ )



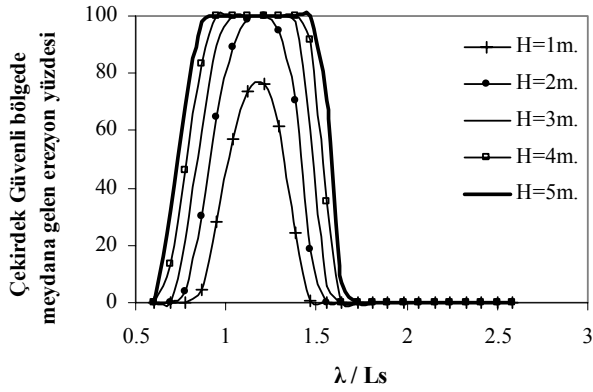
Şekil 13. Girişim eğrisi ( $\chi=30^\circ$   $GM=0.40m$ )



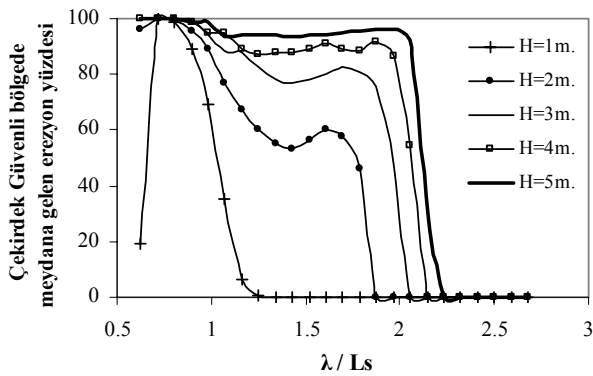


Şekil 14. Girişim eğrisi ( $\chi=45^\circ$   $GM=0.40m$ .)

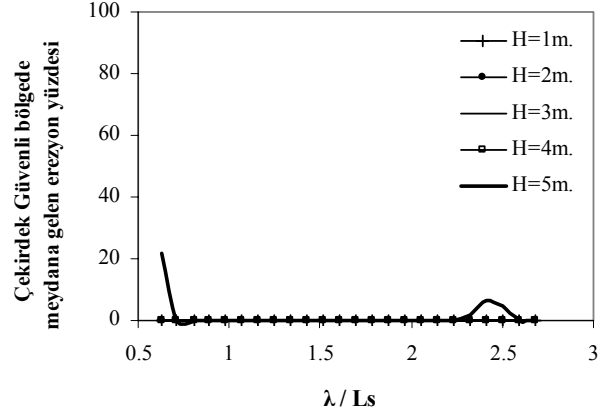
Şekil 15-17'den görülebileceği gibi, Enine metasentr yüksekliği 0.365m'den 0.33m'ye indirilmesiyle birlikte, enine metasentr yüksekliğindeki artışının meydana getirdiği sonuçların tam tersi olarak, kıçtan gelen dalgalar çekirdek güvenli bölgede daha fazla erozyon meydana getirmeye başlamışlardır. Kıç omuzluktan  $45^\circ$  ile gelen dalgalar ise çekirdek güvenli bölgede daha az erozyon meydana getirmiştir.



Şekil 15. Girişim eğrisi ( $\chi=15^\circ$   $GM=0.33m$ )

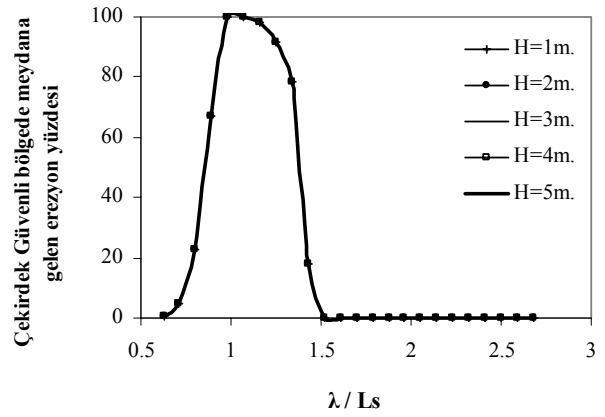


Şekil 16. Girişim eğrisi ( $\chi=30^\circ$   $GM=0.33m$ )

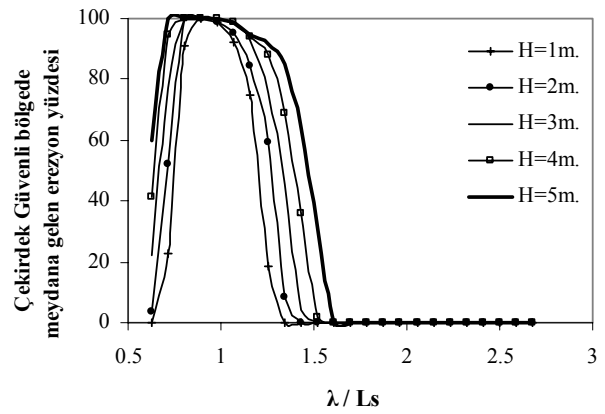


Şekil 17. Girişim eğrisi ( $\chi=45^\circ$   $GM=0.33m$ )

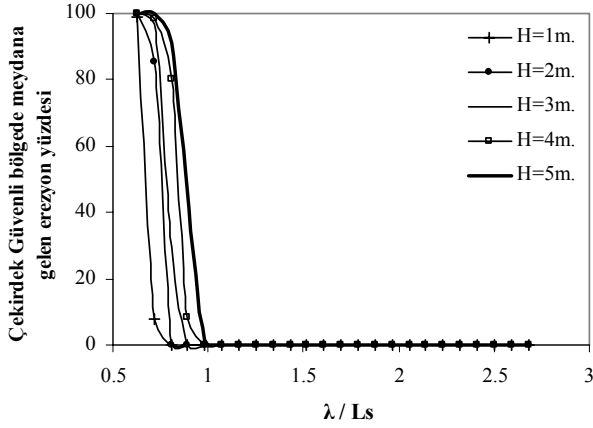
Şekil 18-20'den görülebileceği gibi GM'in IMO tarafından belirlenen sınırın çok altına çekilmesi  $30^\circ$ 'den küçük kıçtan gelen dalgaların çekirdek güvenli bölgede çok daha fazla erozyon meydana getirmesine sebep olmuştur.



Şekil 18. Girişim eğrisi ( $\chi=0^\circ$   $GM=0.25m$ )



Şekil 19. Girişim eğrisi ( $\chi=15^\circ$   $GM=0.25m$ )



Şekil 20. Girişim eğrisi ( $\chi=30^\circ$   $GM=0.25m$ )

Özetlemek gerekirse, gemiyi çok dik başlı yapmanın, kıç ve kıç omuzluktan gelen dalgalarda, stabilite bakımından çok fazla kazanımı bulunmadığı görülmektedir. Yalnız  $GM$ 'in sınır değerinin çok da altına çekilmesi ( $GM=0.25m$ ), tam kıçtan ve kıç omuzluktan  $30^\circ$  gelen dalgalar için geminin stabilitesi çok kritik hale gelmiştir. Buradan yola çıkılarak  $GM$ 'in belli değerinin altına indirilemeyeceği söylenebilir.

Ancak takip eden dalgalarda, dalga karşılaşma frekansı ve karşılaşma açısının, gemi hızı ve doğrultusu değiştirilerek farklı değerler elde edilmesinin mümkün olduğu unutulmamalıdır.

## Sonuçlar

Elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- Çekirdek güvenli bölge pratik bir stabilite kriteri yaratmak için oldukça elverişlidir. Yalnız kriter yaratmak için incelenen gemi sayısı ve tipini arttırmak gereklidir.
- Sönümün artırılması gemilerin devrilme olasılığını azaltmakta, ön meyil açısı ve zorlayıcı kuvvet genliğinin artırılması ise arttırmaktadır. IMO kriterlerine ve IS koduna sönümün etkisi dahil edilmesi gereklidir. Şu anki kriterler yetersizdir.
- MV Gaul balıkçı gemisinin enine metasantr yüksekliğinin IMO tarafından belirlenen sınır üzerine çıkarılması, kıç omuzluktan gelen dalgalarda çekirdek güvenli bölgede daha fazla erozyon görül-

mesine yani geminin devrilme olasılığının artmasına, kıçtan gelen dalgalarda ise daha az erozyon görülmesine bir başka değişle devrilme olasılığının düşmesine yol açmıştır. Enine metasantr yüksekliği IMO tarafından belirlenen sınırın biraz altına çekilmesi ise, kıçtan gelen dalgaların geminin stabilitesinde daha büyük tehlikeler yol açmasına, kıç omuzluktan gelen dalgaların ise daha az problem yaratmasına sebep olmuştur.

- Ancak takip eden dalgalarda dalga karşılaşma frekansı ve karşılaşma açısı operasyonel değişkenler olduğundan, (gemi hızı ve doğrultusu değiştirilerek farklı değerler elde edilmesi mümkün olduğundan), gemilerin enine stabilite değerlendirmesinde sadece tasarım değil aynı zamanda operasyonel unsurlarında değerlendirmesi gerekmektedir.

## Kaynaklar

- Arnold, L., Chueshov, I. ve Gunter, O., (2004). Stability and capsizing of ships in random seas – a survey, *Nonlinear Dynamics*, **36**, 135-179.
- Grim, O., (1952). Rollschwingungen stabilitat und sicherheit in seegang, *Schiffstechnik*, **1**, 10-21
- Hutchison, B. L., (1991). Transverse plane motions of ships, *Marine Technology*, **28**, 2, 55-72.
- Jiang, C., (1995). Highly nonlinear rolling motion leading to capsizing, *Doktora Tezi*, University of Michigan, Ann Arbor.
- Lewis, E. V., (1988). *Principles of Naval Architecture*, **3**, SNAME, New Jersey
- McCue, L. S., (2005). Applications of finite time Lyapunov Exponents to the study of capsizing in beam seas, 8th International Ship Stability Workshop, 1-8, İstanbul.
- Nayfeh, A. H. ve Khdeir, A. A., (1986). Nonlinear rolling of ships in beam seas, *International Shipbuilding Progress*, **33**, 40-49.
- Odabaşı, A. Y., (1977). Ultimate stability of ships, *Transactions RINA*, **119**, 237-262.
- Soliman, M. ve Thompson, J. M. T., (1991). Transient and steady state analysis of capsizing phenomena, *Applied Ocean Research*, **13**, 82-92.
- Taylan, M., (1999). Solution of nonlinear roll model by generalized asymptotic method, *Ocean Engineering*, **26**, 1169-1181.