

Sefer süresince meydana gelen yük değişimlerinin gemilerin stabilitesi üzerindeki etkileri

Metin TAYLAN*

İTÜ Gemi İnşaatı ve Deniz Bilimleri Fakültesi, 34469, Ayazağa, İstanbul

Özet

Denizde seyreden gemilerin davranışları statik olarak veya rüzgar, dalga gibi parametreleri de sistemin içine alacak biçimde yarı-statik olarak incelenir. Sefer esnasında gemilerin statik ve dinamik hareketleri, yük durumundaki değişikliklere bağlı olarak farklılık gösterebilir. Bu değişikliklerin, uluslararası kuruluşların koyduğu kriterler çerçevesinde olması gerekir. Bu çalışmada, gemi stabilitesi, sefer sırasında meydana gelen yükleme değişiklikleri dikkate alınarak statik ve dinamik halde incelenmiştir. Statik analiz konvansiyonel metodlarla gerçekleştirilirken, dinamik analiz ise bilgisayar programı destekli, güvenilir ve lineer olmayan bir yalpa hareketi modeli yardımıyla yapılmıştır. Stabilite performansının gemi tiplerine göre değişimini görmek amacıyla dört farklı gemi seçilmiştir. Sonuçlar karşılaştırmalı olarak tablolar ve grafikler halinde sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: *Duffing denklemi, lineer olmayan hareketler, yalpa, gemi dinamiği.*

Effect of loading conditions on ship stability during a voyage

Abstract

In general, ship behaviors at sea are analyzed either statically or so-called quasi-statically which introduces a number of dynamic effects such as steady wind and wave forces into the system. Breaking down stability into two parts and considering each one as an independent case may lead one to evaluate ship behaviors erroneously. Stability and dynamic behaviors of a ship undergo variations while her loading condition changes constantly during one leg of her trip. Thus, these variations have to be within the acceptable margins which international societies stipulate. In this study, ship stability is assessed both statically and dynamically over a range of loading conditions that a ship experiences throughout her voyage. Statical analysis has been carried out by conventional methods whereas dynamical assessment has been implemented by a proven nonlinear roll motion model supported with a suitable computer code. Four ship types are chosen to investigate overall stability performance for different loading conditions in order to analyze changes from one type to the other.

Keywords: *Duffing's equation, nonlinear motions, rolling, ship dynamics.*

*Yazışmaların yapılacağı yazar: Metin TAYLAN. taylan@itu.edu.tr; Tel: (212) 285 64 10.

Makale metni 10.06.2002 tarihinde dergiye ulaşmış, 09.10.2002 tarihinde basım kararı alınmıştır. Makale ile ilgili tartışmalar 31.05.2003 tarihine kadar dergiye gönderilmelidir.

Giriş

Çeşitli ulusal ve uluslararası denizcilik kuruluşlarına kayıtlı ticari gemilerin hepsi uluslararası stabilite kurallarını sağlamalarına rağmen, maalesef çeşitli nedenlerden dolayı bir kısmı alabora olmaktadır. Bunun çeşitli nedenleri olabilir, ama en önemlisi yük kayması, yaralanma vb. gibi nedenlerden dolayı geminin su geçirmez bütünlüğünü kaybetmesidir. Görülüyor ki, mevcut stabilite standartları, olağan dışı durumlarda gemilerin güvenliğini tamamen teminat altına alamamaktadır. Geminin içinde bulunduğu ortamın tahmin edilemez şartları gözönünde bulundurulduğunda, gerçekçi olmayan böyle bir güvenlik standardını da kimse beklememektedir. Fakat mal ve can kaybını mümkün olduğu kadar azaltmak üzere, gemilerin devrilme ve batma nedenlerini iyice anlayarak stabilitelerini artırıcı çalışmalar yapmak gerekmektedir.

Bu çalışmada, yukarıda bahsedilen amaca yönelik olarak, gemilerin seferleri sırasında içinde bulunmuş oldukları yükleme durumlarının stabilitelerini nasıl etkilediği araştırılmıştır. Yapılan detaylı analizde, stabilite üzerinde önemli etkileri bulunan, gemi ve içinde bulunduğu çevre şartlarını da içeren çok sayıda realistik parametre dikkate alınmıştır.

Bilindiği gibi, gemilerin stabilitesi gemi tiplerine göre farklılık gösterdiği gibi, yükleme durumlarına göre de farklılık sergileyebilir. Bir seferdeki kargo kapasitesi değişirse bile, yakıt, su ve yağ gibi sıvıların tüketimi veya yük kayması geminin stabilitesini kötü yönde etkileyebilir. Özellikle günümüz deniz taşımacılığındaki rekabet şartları içerisinde, bir geminin seferi son varış noktasına kadar değişik ayaklardan oluşabilir. Dolayısıyla, bu ağırlık değişimleri, geminin ağırlık merkezinin yerini üç boyutlu olarak sürekli değiştirir. Deplasmanın ve ağırlık merkezinin yerinin sürekli değişmesinin, stabilizeyi olumsuz yönde etkilemesi kaçınılmazdır.

Sefer sırasındaki yük değişimlerinin stabilite üzerindeki etkilerini belirlemek amacıyla, geminin üç değişik yükleme durumu, yani balastlı varış, yarı yüklü durum ve tam yüklü

durum örnek olarak seçilmiştir. Bunun yanında, yük değişiminin gemi tipleri üzerindeki etkilerini tespit etmek için, aynı prosedür dört farklı gemi türü üzerinde uygulanmıştır. Seçilen gemiler, ro-ro yolcu gemisi, dökme yük gemisi, tanker ve kuru yük gemisi olup, birbirlerinden farklı boyutta, formda ve tonajdadır. Üç farklı yükleme durumu, her bir gemi için ayrı ayrı uygulanmıştır. Böylece, geminin en uç iki yükleme durumu ve (balastlı varış ve tam yüklü hal), bunların arasında kalan yelpazedeki yükleme durumları taranmış olmaktadır. Zaten bir geminin seferi sırasında maruz kalabileceği yükleme durumları da bu aralık içerisinde oynayacaktır.

Yükleme durumları

Yapılan çalışmada örnek olarak seçilen tüm gemiler, uluslararası sularda ticari sefer yapan gemilerdir. Her gemi için üç farklı yükleme durumu ve bu yükleme durumlarına karşı gelen hidrostatik ve hidrodinamik özellikler dikkate alınmıştır. Üç sınır yükleme durumlarının arasında seçilen yükleme durumu ise, yaklaşık olarak geminin kargo kapasitesinin yarısı olan yükleme durumuna karşı gelmektedir. Makale içinde değinildiği şekliyle, gemilerin yükleme durumları aşağıdaki gibi olacaktır:

- No.1 Balastlı varış durumu
- No.2 Yarı yüklü durum
- No.3 Tam yüklü durum

Kullanılan gemilerin ana boyutları ve yükleme durumlarına göre draft, deplasman ve ağırlık merkezinin düşey mesafesi gibi hidrostatik özellikleri aşağıda tablolar halinde sunulmuştur, Tablo 1-4.

Tablo 1. Ro-ro yolcu gemisinin özellikleri

| | Balastlı varış | Yarı yüklü | Tam yüklü |
|---------------------|----------------|------------|-----------|
| L_{BP} = 158.0 m. | | | |
| B = 24.00 m. | | | |
| D = 18.20 m. | | | |
| T (m.) | 5.033 | 5.460 | 5.915 |
| Δ (ton) | 11104 | 12298 | 13393 |
| KG (m.) | 7.961 | 10.938 | 10.641 |

Tablo 2. Tankerin özellikleri

| | | | |
|----------------------------|-------------------|--------------|-------------|
| L _{BP} = 270.0 m. | | | |
| B = 44.50 m. | | | |
| D = 22.00 m. | | | |
| | Balastlı varış | Yarı yükü | Tam yükü |
| T (m.) | 8.25 | 12.66 | 16.87 |
| Δ (ton) | 78562 | 125183 | 170716 |
| KG (m.) | 11.05 | 12.31 | 12.35 |

Tablo 3. Kuru yük gemisinin özellikleri

| | | | |
|----------------------------|-------------------|--------------|-------------|
| L _{BP} = 145.0 m. | | | |
| B = 22.40 m. | | | |
| D = 12.50 m. | | | |
| | Balastlı varış | Yarı yükü | Tam yükü |
| T (m.) | 5.19 | 6.38 | 9.16 |
| Δ (ton) | 12394 | 15753 | 23652 |
| KG (m.) | 8.03 | 8.13 | 6.84 |

Tablo 4. Dökme yük gemisinin özellikleri

| | | | |
|----------------------------|-------------------|--------------|-------------|
| L _{BP} = 162.5 m. | | | |
| B = 26.80 m. | | | |
| D = 14.40 m. | | | |
| | Balastlı varış | Yarı yükü | Tam yükü |
| T (m.) | 6.16 | 7.25 | 10.30 |
| Δ (ton) | 21543 | 25754 | 37932 |
| KG (m.) | 9.85 | 8.60 | 8.54 |

Statik stabilite

Genel anlamda, yüzen cisimlerin veya gemilerin stabilitesi, suyun kaldırma kuvvetinin keşfinde bulunan prensiplere dayanır ve gemilerin bir çeşit güvenlik parametresi olarak kullanılan bir kavramdır. Bilindiği gibi, en basit tanımıyla stabilite, geminin herhangi bir andaki yük dağılımı sonucunda ağırlık ve yüzme merkezlerinin denge konumuna erişmesidir. Diğer bir deyişle, geminin sahip olduğu potansiyel enerjisiyle, yatırıcı kuvvetlere karşı koyabilme yeteneğidir. Bir geminin statik stabilitesi, meyil açılarına karşı çizilen GZ doğrultma kollarının oluşturduğu eğri ile

gösterilir. Fakat, geminin stabilitesinin statik anlamda durgun suda değerlendirilmesinin, geminin gerçek deniz şartlarında göstereceği stabilite davranışını tam olarak temsil edemeyeceği açıktır (Odabasi, 1982).

Çalışmanın bu aşamasında, konvansiyonel statik stabilite analizi kullanılmıştır. Yapılan bütün hidrostatik ve stabilite hesaplarında SHCP (Ship Hull Characteristics Program) bilgisayar programından yararlanılmıştır. Öncelikle, geminin geometrisinin bilgisayar ortamında tanımlanmasına ihtiyaç vardır. Daha sonra, istenilen modüller, gerekli input verileri girilerek çalıştırılır ve sonuçlar elde edilir. Doğal olarak önceden seçilen üç farklı yükleme durumunda sayısal hesapların her gemi için tekrarlanması gerekmektedir. Hesaplar sonucunda her bir geminin karakteristik GZ eğrilerini çizmek mümkün olmaktadır. Meyil açısı-doğrultma momenti GZ eğrileri, birçok klas kuruluşu tarafından geminin bir çeşit stabilite ölçütü olarak kabul edilmektedir. Genelde gemilerin statik stabilitesi, metasantrik yükseklik, stabilite aralığı, maksimum doğrultma kolu ve eğri altında kalan alan gibi GZ eğrisinin özellikleriyle tanımlanmaktadır. Bu eğrilerin gemi tipi ve yükleme durumlarına göre değişimleri, karşılaştırmalı olarak çizilen grafiklerde gösterilmiştir.

Lineer olmayan dinamik stabilite

Lineer olmayan dinamik stabilite analizi ise, yandan gelen dalgalarda diğer hareketlerin etkilemediği bir çeşit harmonik denge modeli ile yapılmıştır. Bunun için, gemilerin lineer olmayan yalpa genliklerini verecek olan bir yalpa diferansiyel denklemi kullanılmıştır (Taylan 1996). Literatürde benzer lineer olmayan yalpa hareketi modelleri de mevcuttur (Wright ve Marshfield 1979; Denise 1983; De Kat ve Paulling 1989; Witz v. diğ. 1989). Dinamik analizde, lineer olmayan terimler sadece sönüm ve geri döndürücü terimlerde kullanılmıştır. Yukarıda önerilen yalpa modelinde, geminin düzgün sinusoidal dalgalara maruz kaldığı ve hareket ile dalga arasında herhangi bir faz farkının bulunmadığı kabul edilmektedir. Genlikler açısından en kötü durum

olan rezonans durumu maksimum yalpa genliklerini hesaplamak için özel olarak seçilmiştir. Lineer ve lineer olmayan sönüm katsayıları, yalpa sönüm verilerini baz alan başka bir bilgisayar programı tarafından hesaplanmıştır. Bunun yanında gemilere ait gerekli olan diğer hidrostatik ve stabilite verileri SHCP programı yardımıyla hesaplanmıştır. Denklemden yararlanılarak üzere, gemilerin GZ eğrileri, beşinci dereceden bir polinom ile yaklaşık olarak ifade edilmiştir. Yalpa genliklerini hesaplamak üzere kurulan, lineer olmayan yalpa denklemi aşağıda verilmiştir:

$$\begin{aligned} & (I_{xx} + \delta I_{xx}) \ddot{\phi} + B_L \dot{\phi} + B_N \dot{\phi} |\dot{\phi}| + \\ & \Delta (C_1 \phi + C_3 \phi^3 + C_5 \phi^5) = \omega_e^2 \alpha_m I_{xx} \cos \omega_e t \end{aligned} \quad (1)$$

Denklemden, açısal hızın karesi $\dot{\phi} |\dot{\phi}|$, geminin iskele sancak hareket yaparken, sönüm momentinin daima harekete karşı olmasını sağlamak içindir. Ek kütle atalet momentinin ise, geminin atalet momentinin yüzde 15-20'si olduğu tespit edilmiştir. B_L ve B_N terimleri, sırasıyla lineer ve lineer olmayan sönüm katsayılarını temsil etmektedir. Bir başka katsayı olan α_m ise, maksimum dalga eğimidir ve bütün gemiler için 0.20 alınmıştır. Eğer denklem (1)'in iki tarafı da $(I_{xx} + \delta I_{xx})$ 'e bölünür ve C_1 , C_3 , C_5 katsayıları bilinen büyüklükler cinsinden yerine konulursa, boyutsuz katsayılarından oluşan aşağıdaki denklem elde edilir (Taylan, 1999, 2000):

$$\begin{aligned} & \ddot{\phi} + b_L \dot{\phi} + b_N \dot{\phi} |\dot{\phi}| + \omega_\phi^2 \phi + m_3 \phi^3 + m_5 \phi^5 \\ & = \lambda \omega_e^2 \alpha_m \cos \omega_e t \end{aligned} \quad (2)$$

Burada:

$$\omega_\phi^2 = \frac{\Delta GM}{I_{xx} + \delta I_{xx}} \quad (2a)$$

$$m_3 = \frac{4\omega_\phi^2}{\phi_v^2} \left[\frac{3A_{\phi v}}{GM\phi_v^2} - 1 \right] \quad (2b)$$

$$m_5 = -\frac{3\omega_\phi^2}{\phi_v^4} \left[\frac{4A_{\phi v}}{GM\phi_v^2} - 1 \right] \quad (2c)$$

$$b_L = \frac{B_L}{I_{xx} + \delta I_{xx}} \quad (2d)$$

$$b_N = \frac{B_N}{I_{xx} + \delta I_{xx}} \quad (2e)$$

GZ eğrisini ifade eden beşinci dereceden polinomun katsayıları, GZ eğrisinin çeşitli karakteristikleri kullanılarak aşağıdaki gibi bulunmuştur (Zborowski 1989):

$$C_1 = \frac{d(GZ)}{d\phi} = GM \quad (2f)$$

$$C_3 = \frac{4}{\phi_v^4} (3A_{\phi v} - GM\phi_v^2) \quad (2g)$$

$$C_5 = -\frac{3}{\phi_v^6} (4A_{\phi v} - GM\phi_v^2) \quad (2h)$$

2 No'lu denklemin çözümü, genelleştirilmiş Duffing denklemi yardımıyla bulunabilir:

$$\begin{aligned} & \ddot{\phi} + b_L \dot{\phi} + b_N \dot{\phi} |\dot{\phi}| + \omega_\phi^2 \phi + m_3 \phi^3 + m_5 \phi^5 \\ & = H \cos \omega_e t - G \sin \omega_e t \end{aligned} \quad (3)$$

Duffing denklemi gereğince, denklemden b_L , b_N , m_3 katsayılarının mertebesi olarak m_5 'ten küçük olduğu kabul edilir (Stoker, 1962). Faz farkını ortadan kaldırmak için uygun bir zaman orijini seçilirse, çözüm için başlangıç değeri olarak $\phi = \phi_a \cos \omega_e t$ kullanılabilir. Yukarıdaki başlangıç çözümünü ve ilgili türevlerini Denklem (3)'te yerine koyup, trigonometrik terimlerin seri açılımlarından yararlanırsak, aşağıdaki ifadeyi elde ederiz:

$$\begin{aligned} & -\phi_a \omega_e^2 \cos \omega_e t - b_L \phi_a \omega_e \sin \omega_e t - b_N \frac{8\phi_a^2 \omega_e^2}{3\pi} \\ & \times \left[\sin \omega_e t - \frac{1}{5} \sin 3\omega_e t - \frac{1}{35} \sin 5\omega_e t \right] \\ & + \phi_a \omega_\phi^2 \cos \omega_e t + m_3 \phi_a^3 \left[\frac{3}{4} \cos \omega_e t + \frac{1}{4} \cos 3\omega_e t \right] \\ & + m_5 \phi_a^5 \left[\frac{1}{16} (10 \cos \omega_e t + 5 \cos 3\omega_e t + \cos 5\omega_e t) \right] \\ & = H \cos \omega_e t - G \sin \omega_e t \end{aligned} \quad (4)$$

Burada yüksek harmonik terimler olan $\sin 3\omega_e t$, $\sin 5\omega_e t$, $\cos 3\omega_e t$ and $\cos 5\omega_e t$ ifadelerini ihmal edersek:

$$\begin{aligned} & \left[-\phi_a \omega_e^2 + \phi_a \omega_\phi^2 + \frac{3}{4} m_3 \phi_a^3 + \frac{10}{16} m_5 \phi_a^5 \right] \cos \omega_e t \\ & - \left[b_L \phi_a \omega_e + b_N \frac{8\phi_a^2 \omega_e^2}{3\pi} \right] \sin \omega_e t \\ & = H \cos \omega_e t - G \sin \omega_e t \end{aligned} \quad (5)$$

Denklemin her iki tarafında karşılıklı olarak $\sin \omega_e t$ ve $\cos \omega_e t$ terimlerinin katsayıları eşitlenecek olursa, çözüm bulunmuş olur. Denklemin sağ tarafı $\lambda \alpha_m \omega_e^2$, şeklinde yazılabilir, böylece (Wellicome, 1975):

$$\begin{aligned} & \frac{25}{64} m_5^2 \phi_a^{10} + \frac{15}{16} m_3 m_5 \phi_a^8 + \left[\frac{5}{4} m_5 (\omega_\phi^2 - \omega_e^2) + \frac{9}{16} m_3^2 \right] \phi_a^6 \\ & + \left[\frac{3}{2} m_3 (\omega_\phi^2 - \omega_e^2) + \frac{64\omega_e^4 b_N^2}{9\pi^2} \right] \phi_a^4 \\ & + \frac{16}{3\pi} b_L b_N \omega_e^3 \phi_a^3 + \left[(\omega_\phi^2 - \omega_e^2)^2 + b_L^2 \omega_e^2 \right] \phi_a^2 \\ & - (\lambda \alpha_m \omega_e^2)^2 = 0 \end{aligned} \quad (6)$$

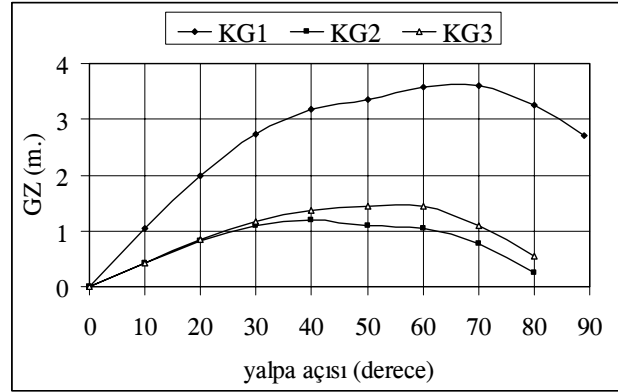
Yukarıda elde edilen (6) No'lu denklem ϕ_a 'nın onuncu dereceden bir polinomudur ve geminin lineer olmayan yalpa hareketi tepkileri bu denklemin reel kökleridir. Denklemdaki bütün katsayılar sayısal olarak bilindiğinden, sayısal çözüm herhangi bir kök bulma yöntemi vasıtasıyla gerçekleştirilebilir. Sadece reel çözümler dikkate alınmış ve sanal çözümler elenmiştir. Bu işlem oldukça zaman alıcı olduğundan, bir program yazılarak işlem rutin hale dönüştürülmüştür. Sonuçta, yalpa genliklerini, karşılaşma frekansına bağlı olarak hesaplayabilmekteyiz. Yalpa genliklerinin maksimum değeri, bir geminin verilen şartlar altında ve rezonans durumunda karşılaşılabileceği en kötü yalpa açısını tanımlamaktadır.

Çıktıların değerlendirilmesi

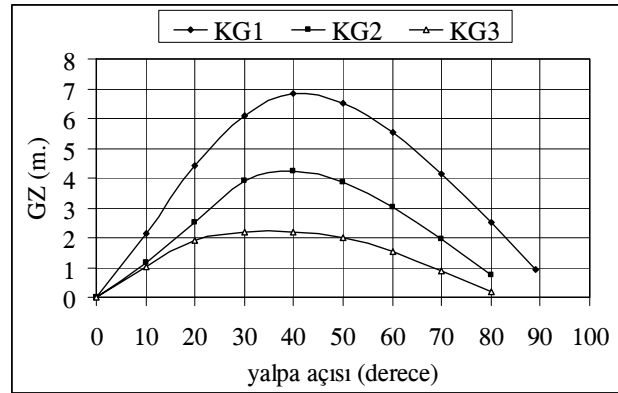
Dört farklı geminin statik ve dinamik davranışları değişik yükleme durumları için önceki bölümlerde açıklanan yöntemlerle hesaplanmıştır. Bu çalışmada her geminin seferi esnasında maruz kalabileceği değişik yükleme durumlarını temsilen üç KG değeri dikkate

alınmıştır. Bunun ana nedeni geminin stabilitesinin bir sefer süresince bahsedilen yük ve ağırlık merkezlerinin değişimi sonucunda önemli değişikliklere uğramasıdır. Statik analiz GZ eğrileri ile karakterize edilmiştir. Böylece eğrilerin belli karakterlerini kullanarak geminin stabilitesinin uluslararası kuruluşların koyduğu kural ve standartlara uygunluğu belirlenebilir.

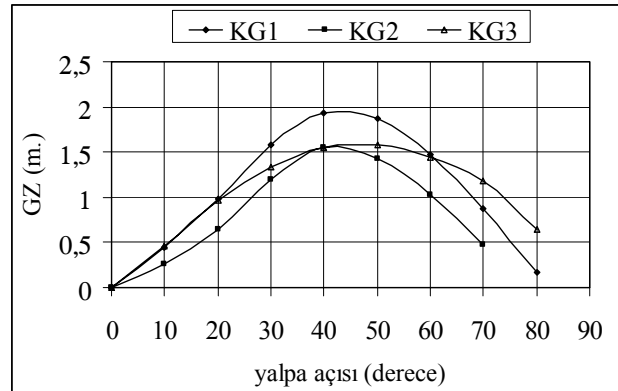
Seçilen örnek gemilere ait GZ eğrileri, Şekil 1, 2, 3 ve 4'te ve bu eğrilerden elde edilen sayısal sonuçlar ise Tablo 5'te gösterilmiştir.



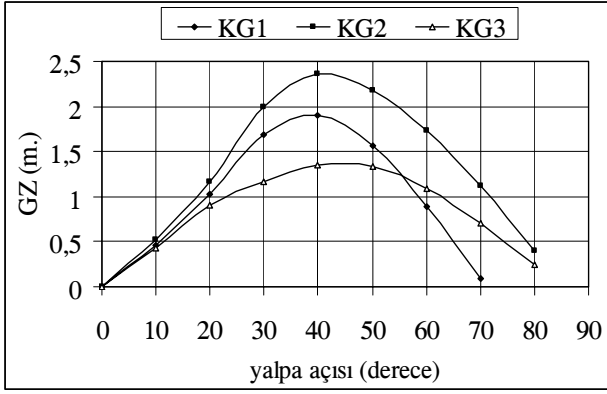
Şekil 1. Ro-ro yolcu gemisinin GZ eğrileri



Şekil 2. Tankerin GZ eğrileri



Şekil 3. Kuru yük gemisinin GZ eğrileri



Şekil 4 Dökme yük gemisinin GZ eğrileri

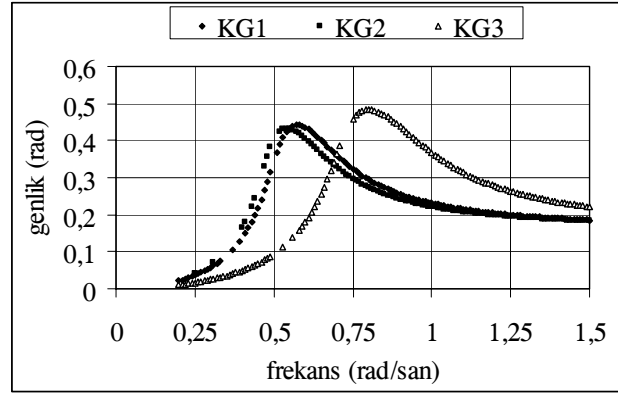
Tablo 5. GZ eğrilerinin özellikleri

| | | GM (m) | ϕ_v (der.) | GZ _{max} (m) | A_{ϕ_v} (rad.m) |
|---|-----|-----------|--------------------|--------------------------|-------------------------|
| Ro-ro Yolcu Gemisi | KG1 | 5.976 | 110 | 3.564 | 4.587 |
| | KG2 | 2.481 | 84 | 1.172 | 1.162 |
| | KG3 | 2.435 | 90 | 1.421 | 1.380 |
| Tanker | KG1 | 12.10 | 95 | 6.800 | 6.834 |
| | KG2 | 6.558 | 86 | 4.220 | 3.710 |
| | KG3 | 5.720 | 83 | 2.750 | 2.117 |
| Genel Amaçlı Kuru yük G. Dökme yük Gemisi | KG1 | 2.426 | 82 | 1.711 | 1.640 |
| | KG2 | 1.427 | 78 | 1.390 | 1.135 |
| | KG3 | 2.360 | 95 | 1.680 | 1.736 |
| | KG1 | 2.490 | 70 | 1.761 | 1.340 |
| | KG2 | 2.926 | 85 | 2.263 | 1.990 |
| | KG3 | 2.390 | 81 | 1.379 | 1.129 |

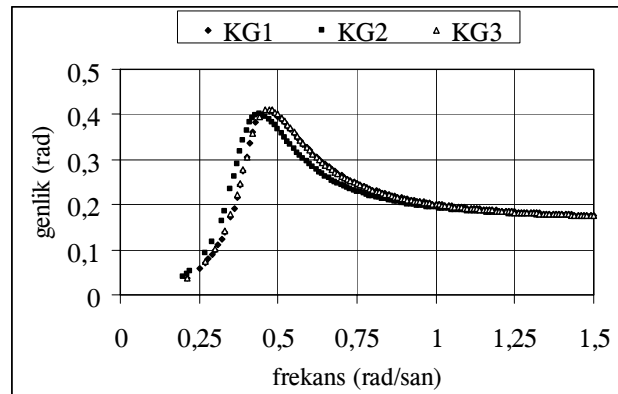
Eğrilerin incelenmesi sonucunda yapılacak değerlendirmede, balastlı durumdan tam yüklü duruma geçişte KG'deki değişimin geminin stabilitesi üzerinde büyük etki yarattığı görülmektedir. Fakat farklı gemi tiplerine bakıldığında aynı trendin kesin olarak devam ettiğini söylemek ve bir genelleme yapmak mümkün olmayabilir. Mesela, kuru yük ve dökme yük gemilerinde stabilitenin KG değişimlerinden çok fazla etkilendiği söylenemez. Buna karşın, ro-ro yolcu gemisinde üç yükleme durumu arasında çok büyük farklar gözlenmektedir. Maksimum GZ değerleri arasındaki fark %135'e kadar çıkmaktadır. Beklenildiği gibi, tankerin GZ eğrileri, KG

değişimlerine karşı genel formunu korumakta ancak ballast durumundan tam yüklü duruma doğru bir ötelenme tespit edilmektedir.

Dinamik analiz için ise, her gemi için lineer olmayan yalpa genliklerini bulmak amacıyla Denklem (6)'nın çözümünden yararlanılmıştır. Analizden çıkan sonuçlar, karşılaştırma amacıyla aynı grafik üzerinde çizilmiştir, (Şekil 5-8). Önceden de belirtildiği gibi, bulunan maksimum yalpa değerleri, o deniz şartlarında gemiyi yatırmaya zorlayan maksimum yalpa açılarıdır. Maksimum yalpa genlikleri ve karşı gelen karşılaşma frekansları Tablo 6'da sunulmuştur (Haddara v. diğ., 1994).

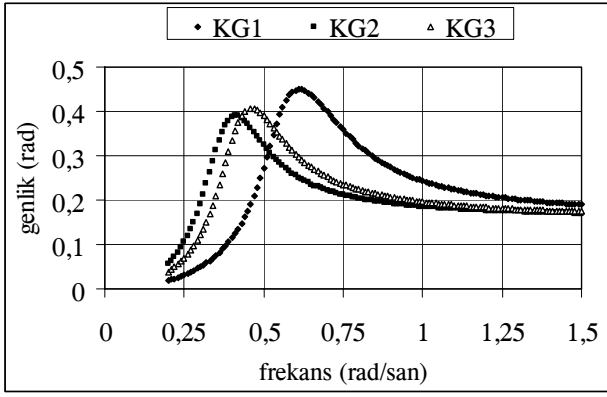


Şekil 5. Ro-ro yolcu gemisinin yalpa genlikleri

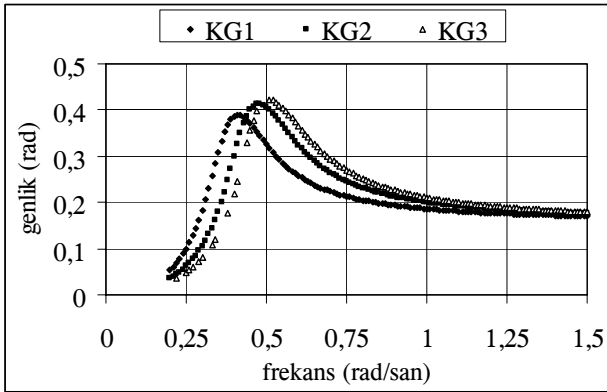


Şekil 6. Tankerin yalpa genlikleri

Şekiller incelendiğinde, tankerin dinamik stabilitesinin yük değişimlerinden çok fazla etkilenmediği görülür. Fakat rezonans durumunda geminin maruz kalacağı yalpa açısı küçümsenemeyecek değerdedir (yaklaşık 23 derece).



Şekil 7. Kuru yük gemisinin yalpa genlikleri



Şekil 8. Dökme yük gemisinin yalpa genlikleri

Tablo 6. Gemilerin maksimum yalpa genlikleri

| | | ω_e rad/san | ϕ_a rad. | ϕ_a der. |
|--------|-----|-----------------------|------------------|------------------|
| Ro-ro | KG1 | 0.58 | 0.441 | 25.3 |
| Yolcu | KG2 | 0.54 | 0.433 | 24.8 |
| Gemisi | KG3 | 0.80 | 0.484 | 27.7 |
| | KG1 | 0.47 | 0.409 | 23.4 |
| Tanker | KG2 | 0.44 | 0.400 | 22.9 |
| | KG3 | 0.47 | 0.411 | 23.5 |
| Kuru | KG1 | 0.61 | 0.450 | 25.8 |
| Yük | KG2 | 0.41 | 0.390 | 22.3 |
| Gemisi | KG3 | 0.46 | 0.408 | 23.4 |
| Dökme | KG1 | 0.41 | 0.389 | 22.3 |
| Yük | KG2 | 0.48 | 0.413 | 23.7 |
| Gemisi | KG3 | 0.51 | 0.423 | 24.2 |

Sonuçlar diğer üç gemi için farklılık arz etmektedir. Kuru yük gemisi minimum ve maksimum yükleme durumları arasında tepe yalpa açıları en büyük farklılığı

sergilemektedir (yaklaşık %13). Bu farklılığın yanısıra, rezonans frekanslarında bir ötelenme de göze çarpmaktadır. Ro-ro yolcu gemisinde ötelenme 0.22 rad/san. ve kuru yük gemisinde ise 0.20 rad/san. değerine ulaşmaktadır. Kaptanların rezonansı ve sonucundaki büyük yalpa açıları önlemek için bu frekans aralıklarının bilincinde olmaları hayati önem taşımaktadır (Bhattacharyya, 1978).

Bulunan sonuçlar, statik stabilite açısından kritik değerlere işaret etmemekle birlikte, dinamik stabilitenin tek başına veya bir yaralanma ve/veya su basması ile birlikte çok ciddi sonuçlar doğuracağı kaçınılmaz olabilir.

Sonuçlar

Bu makalenin ana amacı, değişik gemi tiplerinin bir sefer sırasındaki toplam stabilite performansını statik ve dinamik olarak değerlendirmek ve deniz işletmecilerinin ve kaptanların dikkatini bu çok önemli konuya çekmektir. Ticari gemilerin bozulmamış statik stabilitesi, bir zorunluluk olarak stabilite bukletlerinde yer aldığından kaptanlar için yeni birşey değildir. Ancak, dinamik stabilite, içinde çok fazla karmaşık ve çoğu zaman birbirleriyle çelişen parameter bulundurduğu için, hala gizemini korumaktadır. Yazarın kişisel görüşü, kazalar sonucu oluşacak can ve mal kaybını en aza indirmek için, özellikle stabilitenin dinamik kısmının çok iyi irdelenmesidir. İnsan hatası bir yana bırakılacak olursa, kaza istatistikleri hemen hemen bütün kazaların dalgalı denizlerde olduğunu göstermektedir. Dolayısıyla, dinamik analiz ve lineer olmayan yalpa hareketi bu çalışmanın ana temasını oluşturmuştur. Konuyla ilgili daha detaylı bilgi, yazarın statik ve dinamik stabiliteyi entegre ederek “rezerve stabilite” kavramını işleyen daha önceki makalelerinde bulunabilir (Blagoveshchensky, 1962).

Gemi tiplerinin kendilerine özgü su altı formları ve ağırlık dağılımlarına bağlı olarak suda ve dalgalı denizde belirleyici stabilite özellikleri vardır. Çalışmada dört farklı gemi grubunun seçilmesi, bu belirleyici özellikleri sayısal olarak ortaya koymak amacına yöneliktir.

Sonuçta, ro-ro yolcu ve kuru yük gemilerinin farklı deplasmanlarda yalpa hareketine diğer iki gemiye oranla daha duyarlı oldukları ortaya çıkmıştır. Buna karşın, ro-ro yolcu gemisi ve tankerin statik olarak yük değişimlerinden daha fazla etkilendikleri saptanmıştır.

Statik stabilite söz konusu olduğunda, bu çalışmadan çıkarılacak sonuç, bir geminin stabilitesinin sefer sırasında meydana gelen değişikliklerden belli miktarda etkilenmesidir. Bunun derecesinin geminin tipiyle yakında ilgili olduğu gerçektir. İncelenen 12 farklı durumun da mevcut stabilite standartlarını sağlamasına rağmen hala kazaların olması düşündürücüdür. Bu nedenle, bir geminin stabilitesini değerlendirirken sadece statik stabilitenin dikkate alınmasının yeterli olmadığı kanıtlanmaktadır.

Bir başka deyişle, statik analiz yanında, gemi güvenliğini tanımlayan kavramları daha iyi anlayabilmek için dinamik analize de ihtiyaç vardır. Yukarıda açıklanan lineer olmayan yalpa metodu, yandan gelen dalgalarda gemi hareketlerine ışık tutmaktadır. Bu yöntemle, test gemilerinin dalgaların hareketiyle büyük sayılabilecek 22-28 derecelik yalpa genliklerine maruz kaldığı bulunmuştur. Potansiyel enerjilerinin büyük bir bölümü, bu kuvvetlerin üstesinden gelebilmek için harcanmaktadır. Özetlenecek olursa, bir geminin toplam stabilitesi, onun denizdeki statik ve dinamik davranışlarının evliliği gibidir. Kaptanın sefer sırasında, gemisinin yük değişimlerinden dolayı stabilite ve güvenlik değişimleri yaşadığını ve bunların üstesinden nasıl geleceğini çok iyi bilmesi lazımdır. (Nayfeh, 1990; Flower, 1980)

Bu çalışmada kullanılan yöntem, gemilerin maruz kaldığı statik etkiler yanısıra harmonik denge yöntemiyle dinamik ve lineer olmayan etkileri de kapsadığı için sadece küçük yalpa açılarında değil, çok aşırı olmamak kaydıyla büyük yalpa açılarında da tatmin edici sonuçlar vermektedir. Bilindiği gibi çok aşırı yalpa açılarında geminin hidrostatik ve stabilite karakteristikleri standart kurallardan büyük ölçüde ayrıldığı için, bu açılarda genliklerin sağlıklı tayini de geçerliliğini kaybetmeye başlamaktadır.

Makale, gemilerin tip ve yükleme durumlarına göre stabilite performanslarını karşılaştırma olanağı sağlamıştır. Görülmüştür ki, elde edilen yalpa açıları, üzerilerine eklenecek en küçük bir negatif etki (yaralanma, su basması vs.) altında stabilite marjinlerini kaybedip bataabilirler. Bu çalışma ayrıca, kalitatif olarak detaylı yalpa stabilite analizine bir temel teşkil edebilir.

Semboller

| | |
|-----------------|---|
| ϕ | : Yalpa deplasmanı |
| $\dot{\phi}$ | : Açısal hız |
| $\ddot{\phi}$ | : Açısal ivme |
| ϕ_a | : Yalpa tepki genliği |
| I_{xx} | : Kütle atalet momenti |
| δI_{xx} | : Ek kütle atalet momenti |
| ω_e | : Karşılaşma frekansı |
| ω_ϕ | : Doğal frekans |
| α_m | : Maksimum dalga dikliği |
| B_L | : Lineer sönüm katsayısı |
| B_N | : Lineer olmayan sönüm katsayısı |
| b_L | : Boyutsuz lineer sönüm katsayısı |
| b_N | : Boyutsuz lineer olmayan sönüm katsayısı |
| λ | : Boyutsuz atalet terimi |
| Δ | : Deplasman |
| ϕ_v | : Stabilite kaybolma açısı |
| A_{ϕ_v} | : GZ eğrisi altında kalan alan |
| GZ | : Doğrultma kolu |
| GM | : Metasantrik yükseklik |

Kaynaklar

- Bhattacharyya, R. (1978). *Dynamics of Marine Vehicles*, John Wiley & Sons, New York.
- Blagoveshchensky, S.N. (1962). *Theory of Ship Motions*, Volumes I and II, Dover Publications, New York.
- Denise, J-P. F. (1983). On the Roll Motion of Barges, *Transactions RINA*, **125**, 255-268.
- De Kat, J. O. ve Paulling, J. R. (1989). The simulation of ship motions and capsizing in severe seas, *Transactions SNAME*.
- Haddara, M. R., Wishahy, M. ve Wu, X. (1994). Assessment of Ship's Transverse Stability at Sea, *Ocean Engineering*, **8**, 781-800.
- Flower, J. O. ve Sabti Aljaff, W. A. K. (1980). Krylov-Bogoliuboff's Solution to Decaying Nonlinear Oscillations in Marine Systems, *International Shipbuilding Progress*, **27**, 313, 225-230.

- Nayfeh, A. H. (1990). Undesirable Roll Characteristics of Ships in Regular Waves, *Journal of Ship Research*, **32**, 2, 92-100.
- Odabasi, A. Y. (1982). Morphology of Mathematical Stability Theory and its Applications to Intact Stability Assessment, *Proceedings*, 2nd International Conference on Stability of Ships and Ocean Vehicles, Tokyo, 47-64.
- Stoker, J. J. (1962). *Nonlinear Vibrations*, Interscience Publishers, New York, USA.
- Taylan, M. (1996). Nonlinear Roll Motion of Ships in Beam Waves, *Bulletin of the Technical University of Istanbul*, **49**, 459-479.
- Taylan, M. (1999). Solution of the Nonlinear Roll Model by a Generalized Asymptotic Method, *Ocean Engineering*, **26**, 1169-1181.
- Taylan, M. (2000). The Effect of Nonlinear Damping and Restoring in Ship Rolling, *Ocean Engineering*, **27**, 921-932.
- Wellicome, J. F. (1975), An Analytical Study of the Mechanism of Capsizing, *Proceedings*, International Conference on Stability of Ships and Ocean Vehicles, University of Strathclyde, Glasgow, UK.
- Witz, J. A., Ablett, C. B. ve Harrison, J. H. (1989). Roll Response of Semisubmersibles with Nonlinear Restoring Moment Characteristics, *Applied Ocean Research*, **11**, 153-166.
- Wright, J. H. G. ve Marshfield, W. B. (1979). Ship Roll Response and Capsize Behavior in Beam Seas, *Transactions RINA*, **122**, 129-148.
- Zborowski, A. ve Taylan, M. (1989). Evaluation of Small vessels' Roll Motion Stability Reserve for Resonance Conditions, SNAME Spring Meeting/STAR Symposium, New Orleans, **S1**-2-17.