

## Enerji Dengesi Yaklaşımına Dayalı Bir Stabilite Değerlendirmesi

Ahmet Dursun Alkan<sup>1,2</sup>

alkanad@yildiz.edu.tr

<sup>1</sup> Yıldız Teknik Üniversitesi, Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Bölümü, Beşiktaş, İstanbul, Türkiye

<sup>2</sup> (Halen) Millî Savunma Üniversitesi, Deniz Harp Okulu Dekanlığı, Tuzla, İstanbul, Türkiye

### ÖZET

Bu çalışmada, IMO hasarsız stabilite kriterlerini karşısında dalga ve rüzgâr etkilerinin dikkate alındığı iş/enerji dengesi ilkesine dayanan bir stabilite değerlendirme üzerinde durulmaktadır. 1850 yılında Moseley tarafından öne sürülmüş olan enerji dengesi yaklaşımı, gemi stabilite probleminde dış kuvvetlerin enerjisi ile geminin verdiği toplam karşılık olan doğrultma enerjisinin dengesini temel almaktadır. Dalga ve rüzgâr etkileri içerisinde geminin doğrultma moment kolu-meyil açısı  $\overline{GZ} - \phi$  eğrisinin zamana bağlı değişiminin modellendiği enerji dengesi yaklaşımı, stabilite hesaplamalarına güvenilirlik sağlamaktadır. Bu ilkeden yola çıkılarak küçük tekneler için enerji dengesi ilkesine göre geliştirilmiş bir stabilite modeli ele alınarak modelin uygulamasından elde edilen sonuçlar üzerinde durulmaktadır.

**Anahtar kelimeler:** Gemi, hasarsız stabilite, enerji dengesi, kritik yalpa

**Makale geçmişi:** Geliş 25/11/2019 – Kabul 29/12/2019

# A Stability Assessment Based on the Energy Balance Approach

Ahmet Dursun Alkan<sup>1,2</sup>

alkanad@yildiz.edu.tr

<sup>1</sup>Yildiz Technical University, Dept. of Naval Architecture and Marine Engineering, Beşiktaş, Istanbul, Turkey

<sup>2</sup>(Actually) Dept. of Naval Architecture and Marine Engineering, Naval Academy, National Defense University, Tuzla, Istanbul, Turkey

## ABSTRACT

In this study, a stability assessment based on work / energy balance principle considering wave and wind effects against IMO intact stability criteria is emphasized. The energy balance approach proposed by Moseley in 1850 is the concept of “dynamic stability” as the work done by in inclining a ship and consequently stored as potential energy balance of the energy of excitation forces and the total response of the ship in the ship stability problem. The energy balance approach, in which the time-dependent variation  $[\overline{GZ}(\phi, t)]$  of righting arm curve of the ship subjected to wave excitation and wind forces is modeled, provides reliability for stability calculations. Based on this principle, a stability model developed according to the energy balance principle for small boats is discussed and the results obtained from the application of the model are emphasized.

**Keywords:** Ship, undamaged stability, energy balance, critical roll

**Article history:** Received 25/11/2019 – 29/12/2019

## 1. Giriş

Bu çalışmada IMO hasarsız stabilite kriterlerini karşısında dalga ve rüzgar etkilerinin dikkate alındığı iş/enerji dengesi ilkesine dayanan bir stabilite değerlendirmesi üzerinde durulmaktadır (IMO 1993, 2008). İlk defa 1850 yılında Moseley (1850) tarafından öne sürülen gemi stabilitesinde enerji dengesi yaklaşımı gemilerin stabilite probleminde dış kuvvetlerin enerjisi ile geminin verdiği karşılık olan doğrultma enerjisinin dengesini temel almaktadır. Dalga ve rüzgâr etkileri içerisinde geminin  $GZ-\phi$  eğrisinin zamana bağlı değişiminin modellendiği enerji dengesi yaklaşımı stabilite hesaplamalarına güvenilirlik sağlamaktadır. Enerji dengesi ilkesine göre Kuo ve diğ. (1983) tarafından geliştirilmiş stabilite yaklaşımı ele alınarak bu yaklaşımın küçük teknelere uygulamasından elde edilen sonuçlar üzerinde durulacaktır. Halen IMO tarafından enerji dengesi ilkesinin temel alındığı güvenli stabilitenin belirlenmesi konusunda yoğun çalışmalar yapıldığı bilinmektedir. Bununla birlikte değişik gemi tipleri, işletme ve çevre şartlarının oluşturduğu geniş çerçevede kriter/standart geliştirebilme açısından zorluklar bulunmaktadır.

## 2. Enerji Dengesi Yaklaşımı

Kuo ve diğ. (1983) tarafından geliştirilen enerji dengesi yaklaşımı zamana bağlı yalpa hareketini karşılayıcı momentin; gemi su üstü formunun izdüşümüne etkiyen rüzgâr, baş, kık ve omuzlukların alınan dalga durumları ve yükleme şartlarına bağlı olarak incelenmesi temeline dayanmaktadır. Dalga boyunun hesaplamalarda gemi boyuna eşit olduğu ve geminin karşılaşma frekansının geminin kritik yalpa frekansına eşit alınması ile maksimum yarım yalpa periyodunun, yalpanın geminin rüzgâr yönüne yaptığı bir açı ile rüzgâr arkasına maksimum yaptığı bir yalpa açısı arasında olduğu kabul edilmiştir. Maksimum yarım yalpa sürecinde minimum doğrultucu moment eğrisi, trimsiz durumda, gemiye göre her bir dalga konumu dikkate alınarak ilgili meyil açıları için hesaplanmaktadır. Stabilitate karakteristiğini gösteren meyil açısına ve zaman bağlı doğrultma moment kolu eğrisi  $\overline{GZ}(\phi, t)$ , sinüs fonksiyonuna uyan dalgalarda geminin zamana bağlı yalpa doğrultucu moment kolunu temsil etmektedir. Bunu izleyen aşamada enerji dengesi hesabı, sönüm ve rüzgâr etkilerinin de hesaba katılmasıyla Moseley'in İş/Enerji Dengesi yöntemi yardımıyla yapılar ve doğrultucu moment ile zorlayıcı momentler arasındaki fark olarak tanımlanan 'net alan' elde edilmektedir. Zamanın fonksiyonu olarak pozitif yüzde net alan eğrisi çizildiğinde, bu eğri geminin devrilmeye karşı emniyetliliğinin bir ölçüsü olmaktadır.

### 2.1 Yalpa hareket denklemi

Stabilitate açısından oluşabilecek tüm kritik halleri verebilmesi için yalpa hareketinin genel denklemi dikkate alınmaktadır. Buna göre teorik yönden öneme sahip ve hesaplanabilen terimleri içeren bir yalpa hareket denklemi [2] genel halde

$$I\ddot{\phi} + D(\phi, \dot{\phi}) + M_r(t) = M_e(V, t) + W(\phi) + M_L(t) + M_{RB}(t) \quad (1)$$

dir. Burada  $\phi$  yalpa açısını,  $I$  gemi ve ek-su kütlesi dahil olmak üzere yalpa eksenine göre toplam kütle atalet momentini,  $D(\phi, \dot{\phi})$  doğrusal olmayan sönüm terimini,  $M_r(t)$  yalpa doğrultma momentini,  $M_e(V, t)$   $V$  gemi ilerleme hızında 6 serbestlik dereceli birleşik gemi hareketinin fonksiyonu olan zorlayıcı dalga momentini,  $W(\phi)$  rüzgâr meyil momentini,  $M_L(t)$  pervane ve dümen kuvvetleri ve güverteye giren su ve benzeri kuvvetlerin oluşturduğu bir momenti ve  $M_{RB}(t)$ , rijit gemi gövdesindeki birleşik hareketlerin dinamik etkilerini gösteren zorlayıcı bir momenttir.

Denklem (1), stabiliteyi etkileyen kık ve baş omuzluk dalgalarının en tehlikeli halleri oluşturduğu kabulü ile küçük karşılaşma frekanslarında dinamik kuvvetlerin hidrostatik kuvvetlere nazaran ihmal edilmesi ve ayrıca tek serbestlik dereceli olarak düzenlenerek basit bir yalpa denklemi haline getirildiğinde

$$I\ddot{\phi} + C_e\dot{\phi} + g\Delta\overline{GZ}(\phi, t) = W(\phi) \quad (2)$$

elde edilir (Kuo ve diğ., 1983). Burada  $C_e$  eşdeğer doğrusal sönüm katsayısını,  $g$  yerçekimi ivmesini ve  $\Delta$  geminin deplasman kuvvetini göstermektedir. Denklem (2) dalıp-çıkma ve baş-kık vurma hareketleri ile dalga zorlamasının konuma bağlı bileşke halini içermektedir. Güvertesi basan su, dümen ve pervane kuvvetleri gibi diğer dış momentler açık halde özel kriterlere göre hesaplanabildiği gibi zorlayıcı bu kuvvetlerin ölçeklendirilebileceği önerilmiştir (Kuo ve diğ., 1983).

### 2.2 Dalga ve Rüzgâr etkisinde İş/Enerji dengesi

Burada incelenen yaklaşımda, stabilite düzeyinin ölçülebilir bir halde türetilebilmesi için Moseley (1850) tarafından önerilen dinamik stabilite kuramı kullanılmaktadır. Stabilitate denklemindeki momentler zaman ( $t$ ), yalpa açısı ( $\phi$ ) ve yalpa hızına  $\dot{\phi}$  bağlıdır. Denklem (2)'nin Şekil 1'de gösterilen kritik yalpa yarım salınımı (iskele veya sancak tarafta) boyunca integrali alınması ile dalga

zorlamasından dolayı geminin rüzgâr tarafına yaptığı yalpa açısı  $\phi_1$  hesaplanmaktadır (Kuo ve diğ., 1983):

$$\frac{1}{2} \dot{\phi}^2 + \int_{\phi_1}^{\phi_2} [C_e \dot{\phi} + g\Delta\overline{GZ}(\phi, t) - W(\phi)] d\phi = 0 \quad (3)$$

Kritik yarım yalpa salınımı zamana bağlı olarak aşağıdaki gibi tanımlanmıştır:

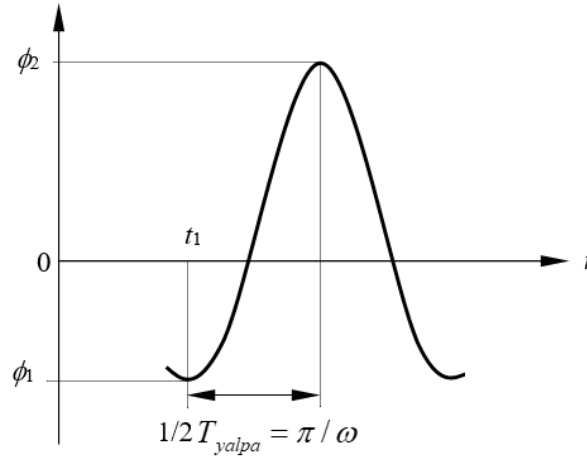
$$\phi(t) = (\phi_1 + \phi_2) + \frac{1}{2}(\phi_1 - \phi_2) \cos[\omega(t - t_1)] \quad (4)$$

Denklem (2) kritik yalpa salınımı boyunca ( $t_1 \leq t \leq t_1 + \pi/\omega$ ) yazılırsa

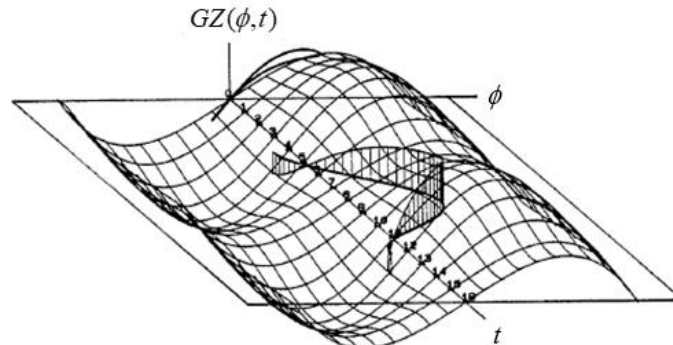
$$F(\phi_1, \phi_2) = \int_{t_1}^{t_1 + \pi/\omega} [C_e \dot{\phi} + g\Delta\overline{GZ}(\phi, t) - W(\phi)] \phi d\phi = 0 \quad (5)$$

elde edilir. Burada  $F(\phi_1, \phi_2)$  fonksiyonu Net Alan (NA) olarak ifade edilmektedir.

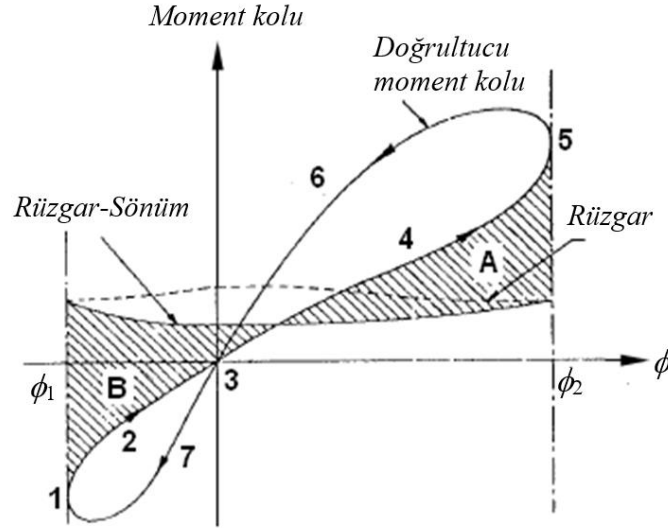
Şekil 2'de yarım yalpa periyodunu kapsayan zaman adımlarında hesaplanan doğrultucu moment kolu  $\overline{GZ}(\phi, t)$  değerlerinin oluşturduğu yüzey görülmektedir. Şekil 3'de ise iki boyutlu  $\overline{GZ} - \phi$  yüzeyine izdüşüm ile elde edilen zorlayıcı ve doğrultucu moment kolları gösterilmiştir. Kritik yarım yalpa hareketinde  $\phi_2$ , ana güvertenin suya giriş açısı veya  $50^\circ$  değerinden küçük olanıdır. Net Alan, pratikte [ (Doğrultucu momentin yaptığı iş/enerji) - (Zorlayıcı momentlerin yaptığı iş/enerji) ] değeridir.  $NA > 0$  değeri pozitif geminin stabilitesinin güvenli olduğunu,  $NA = 0$  sıfır değeri kritik stabiliteyi ve  $NA < 0$  ise zorlayıcı enerjinin doğrultucu enerjiden daha fazla olduğunu yani stabilitenin sağlanmadığını göstermektedir.



Şekil 1. Yarım yalpa periyodu ve parametreleri.



Şekil 2. Yarım yalpa periyodu boyunca  $GZ(\phi, t)$  yüzeyinin elde edilmesi (Kuo ve diğ., 1983).



**Şekil 3.** Yarım yalpa periyodu boyunca  $GZ - \phi$  düzleminde zorlayıcı ve doğrultucu momentler (Kuo ve diğ., 1983).

### 3. Uygulama

Yukarıda ele alınan enerji dengesi yaklaşımının küçük balıkçı teknelerine (Kafalı, 1980) yapılan uygulamalarında doğrultucu ve zorlayıcı kuvvetlerin oluşturduğu enerji değerlerinin farkı olan Net Alan değerinin, kritik ve en yüksek değerini kapsayan bir aralık dikkate alınmıştır (yüzde olarak 0, 25, 50, 75 ve 100). Net Alan değerlerine karşılık gelen maksimum müsaade edilebilir stabiliteyi yansıtmak üzere gemi ağırlık merkezinin düşey konumunun en büyük ( $\overline{KG}_{maks}$ ) değerleri hesaplanmıştır. Karşılaştırmaya fırsat vermek için ( $\overline{KG}_{maks}/D$ ) oranlarına dönüştürülmüştür ( $D$  geminin derinliğidir). Tablo 1’de aynı teknelerin IMO İstatistiksel ve Hava (IMO, 2008) kriterlerine göre elde edilmiş  $\overline{KG}_{maks}/D$  değerleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

**Tablo 1.** Enerji dengesi NA yüzdesi ve klasik IMO kriterlerine göre  $\overline{KG}_{maks}/D$  değerleri.

Gemi Kod	Yükleme Durumu	IMO		Net Alan (%)				
		İstatistiksel	Hava	0	25	50	75	100
148/1-B	1	0.816	0.628	0.765	0.757	0.744	0.736	0.723
	2	0.771	0.631	0.761	0.737	0.721	0.713	0.706
	3	0.666	0.457	0.747	0.718	0.687	0.668	0.661
148/3-B	1	0.786	0.578	0.753	0.746	0.736	0.729	0.720
	2	0.758	0.571	0.746	0.725	0.709	0.701	0.696
	3	0.658	0.465	0.732	0.705	0.678	0.661	0.654
148/6-B	1	0.786	0.516	0.699	0.692	0.682	0.675	0.666
	2	0.758	0.609	0.705	0.680	0.665	0.657	0.652
	3	0.658	0.414	0.695	0.669	0.644	0.628	0.621
148/8-B	1	0.786	0.368	0.607	0.599	0.588	0.582	0.575
	2	0.758	0.475	0.646	0.620	0.605	0.598	0.594
	3	0.658	0.508	0.648	0.626	0.601	0.585	0.579

Uygulamada İstanbul Teknik Üniversitesi Balıkçı Gemileri tekne ailesinden, ana gemi 148/1-B ( $L_{pp}=20.0$  m.,  $B=5.714$  m.,  $T=2.286$  m,  $C_B=0.378$ ), 148/3-B ( $L_{pp}=20.0$ ,  $B=5.517$ ,  $T=2.286$ ,  $C_B=0.406$ ), 148/6-B ( $L_{pp}=22.9$ ,  $B=5.714$ ,  $T=2.286$ ,  $C_B=0.400$ ) ve 148/8-B ( $L_{pp}=28.6$ ,  $B=5.714$ ,  $T=2.286$ ,  $C_B=0.400$ ) seçilmişlerdir. Bu teknelerden 148/6-B ve 148/8-B, 148/3-B kodlu teknenin en kesit geometrileri

değiştirilmeksizin sadece bu teknenin boyu uzatılarak elde edilmişlerdir. Tablo 1’de ikinci sütunda 1,2,3 indisleri yükleme durumunu yansıtan su-çekimi değerlerini göstermektedir (1,2,3 sırası ile  $T=1.715$ , 2.286 ve 2.858 m).

148/3-B, 148/6-B ve 148/8-B teknelerinin IMO İstatistiksel kriterlerine göre elde edilen  $\overline{KG}_{maks}/D$  değerlerinin boy yani deplasman artışından etkilenmediği görülmektedir. Buna karşılık IMO hava kriterine göre yapılmış olan stabilite hesaplarında boy uzatıldığında (148/3-B, 148/6-B, 148/8-B)  $\overline{KG}_{maks}/D$  değerlerinde düşme olduğu gözlenmektedir. Benzer azalma durumu NA değerlerine karşı helen  $\overline{KG}_{maks}/D$  değerlerinde de görülmektedir. Buradan çıkarılacak sonuç, gemi form özellikleri ve çevre etkilerini dikkate alan bir yaklaşımın dizayn parametreleri ve yükleme durumundaki değişikliklere karşı duyarlılık gösterebilmesidir.

Bu çalışmada ele alınan rüzgâr ve dalga etkileri ile birlikte, zamana bağlı yalpa hareketi altında geminin stabilite davranışının modellendiği enerji dengesi yaklaşımının, küçük teknelere yapılmış olan uygulamasından elde edilen sonuçları itibari ile yaklaşımın IMO Hava kriterine göre daha toleranslı olduğu görülmektedir. İlgili kaynaklar ve uygulamadaki tecrübeler dikkate alındığında NA değerinin hangi yüzde değerinde alınması gerektiği hakkında bir genelleme yer almamaktadır.

#### 4. Sonuç

Güvenli stabiliteyi garanti altına alabilmek, gemi form özellikleri ile dalga ve rüzgâr etkileri yanında geminin yükleme/işletim şartlarını gerçekçi olarak modelleyen bir yaklaşım ile mümkün olmaktadır. Hasarsız stabilite konusunda IMO tarafından uzun dönemde yapılmış çalışmalar çerçevesinde geliştirilen kriterlere bakıldığında, gemi dizayn aşamasında pratik ve kullanım kolaylığı olan ampirik yaklaşımlara yer verildiği görülmektedir. Buna karşılık çevre etkileri, gemi özellikleri ve işletim şartlarını modelleyebilen yaklaşımların gerçekçi ve güvenli sonuçlara ulaşmada bir çözüm olduğu mutlaklıdır.

Bu çalışmada ele alınan rüzgâr ve dalga etkileri ile birlikte zamana bağlı yalpa hareketi altında, geminin stabilite davranışının modellendiği enerji dengesi yaklaşımı, gemi form özellikleri veya dizayn parametreleri ile yükleme durumlarındaki değişikliklere karşılık verebilmektedir. Denizde can emniyetinin hassas bir ölçüsü olan stabilite problemi hakkında IMO ile ilişkili olarak araştırmacıların yoğun çabalar gösterdiği bilinmektedir. Bu çalışmalarda enerji dengesi ve benzeri modellerin dinamik içeriğinin genişletilmesi yanında kaçınılmaz olarak deniz ortamının istatistiksel yorumu daha da kapsamlı olarak incelenmektedir.

Yeni nesil hasarsız stabilite kriterleri geliştirme amaçlı çalışmalar IMO tarafından uzun bir süreç içerisinde devam etmektedir. Bu süreci IMO stabilite komitesindeki çalışmalara (Sub-Committee on Ship Design and Construction - SDC) katkı sunan araştırmacılardan iki yazarın bulgu ve değerlendirmelerinin incelenmesi faydalı olacaktır (Francescutto, 2019; Taylan, 2016).

*Yazarın notu: Bu makale GMO Gemi İnşaatı ve Deniz Teknolojisi Teknik Kongresi 2012’de bildiri olarak sunulmuştur, Pîrî Reis Üniversitesi, Tuzla, 13-14 Aralık 2012. / This paper was presented at the International Shipbuilding and Marine Technology Congress, Turkish Chamber of Naval Architects, Pîrî Reis University, 13-14 December 2012, Tuzla, Istanbul.*

#### 5. Kaynaklar

IMO, 1993, MSC.75(69), Amendments to the Code on Intact Stability for All Types of Ships Covered by IMO Instruments, Resolution A.749(18).

IMO, 2008, “International Code on Intact Stability”.

Moseley H. (1850). On the Dynamical Stability and on the Oscillations of Floating Bodies, Phil. of the Transactions of the Royal Society, Sayfa 609.

Kafalı K. (1980). Balıkçı Gemisi Formlarının İncelenmesi, Gemi İnşaatı Fakültesi-Gemi Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, No. 25.

Kuo C., Vassalos D., Martin J., Alexander J. G. ve Barrie D. A. (1983), SAFESHIP Project-Mathematical Modelling, Part B: Stability Criteria Based on Time Varying Roll Restoring/Excitation Moments, Safeship (5) Final Report, Department of Ship and Marine Technology, University of Strathclyde.

İlave kaynaklar / Further reading:

Francescutto A. (2019). Rahola Criterion and the Development of the Intact Stability Code, Proceedings of the 17th International Ship Stability Workshop, pp.21-27, 10-12 June 2019, Helsinki.

Taylan M. (2016). From Rahola to the Second Generation Evolution of the Intact Stability Criteria, Proceedings of the 1st International Conference on Ship and Marine Technology (GMO-SHIPMAR 2016, [www.gmo.org.tr](http://www.gmo.org.tr)), pp.95-107, 08 December 2016, İstanbul.