

# Determination of Transverse Stability Properties of Yachts between 20 and 60 m in Length during Concept Design Stage by Employing Residual Stability Method

Erdoğan Açık\*<sup>1</sup>, Ahmet Dursun Alkan<sup>1</sup>

eacikel@hotmail.com

<sup>1</sup> Naval Architecture and Maritime Faculty, Yıldız Technical University, Istanbul, Turkey

## Abstract

Consistent determination of unknown values based on statistical data at the concept design stage is a widely used approach. It is clear that the determination of the main dimensions and capacities of the ships in the conceptual design phase at an acceptable accuracy is decisive for the success of the next stages of the design as well as the bid preparation. For yachts, the main dimensions, areas and volumes of the decks forming the top building besides the main values such as ship size, width and depth directly affect the external design features and cost levels of such special boats.

In the concept design phase, for example in the modeling of a characteristic such as stability, the minimization of the design variables to be used as much as possible gives the naval architect the ease of operation and the ability to control these variables more freely.

In summary, it is aimed to present a simple and useful approach to the naval architect, which can be used during the conceptual design stage of mega yachts and yield an error level as low as possible. The resulting formula obtained from the method developed in this paper is given as follows:

$$\text{For } \Phi \leq 30^\circ: C_{RS} \cdot 10^3 = \left(\frac{B}{T}\right)^2 \cdot a + \left(\frac{KG}{B}\right) \cdot b + c$$

$$\text{For } \Phi > 30^\circ: C_{RS} \cdot 10^3 = \left(\frac{B}{T}\right)^2 \cdot a + \left(\frac{KG}{B}\right) \cdot b + \left(\frac{D}{T}\right) \cdot c + d$$

**Keywords:** Superstructure, concept design, residual stability, mega yacht

# Kavram Dizayn Aşamasında 20 ile 60 m Arasındaki Yatların Enine Stabilite Özelliklerinin Artık Stabilite Yöntemi ile Belirlenmesi

Erdinç Açikel<sup>\*1</sup>, Prof.Dr.Ahmet D. Alkan<sup>1</sup>

eacikel@hotmail.com

<sup>1</sup> Gemi İnşaatı ve Denizcilik Fakültesi, Yıldız Teknik Üniversitesi

## Özet

Kavram dizayn aşamasında bilinmeyen değerlerin istatistiksel verilere dayanılarak tutarlı olarak belirlenmesi yaygın ölçüde kullanılan bir yaklaşımdır. Gemilerin kavram dizayn aşamasında ana boyutlarının ve kapasitelerinin kabul edilebilir doğrulukta belirlenmesinin, gerek teklif hazırlama gerekse dizaynın sonraki aşamalarının başarısı için belirleyici olduğu açıktır. Yatlar için gemi boyu, genişlik, derinlik gibi ana değerlerin yanında üst yapıyı oluşturan güvertelerin ana boyut, alan ve hacimleri ile donatım malzemeleri bu tip özel teknelerin dış tasarım özelliklerini ve maliyet seviyelerini doğrudan etkilemektedir.

Kavram dizayn aşamasında, örneğin stabilite gibi bir karakteristiği modellemede, kullanılacak dizayn değişkenlerinin olabildiğince en az sayıya indirilmesi gemi mühendisine işlem kolaylığı ve bu değişkenleri daha serbest kontrol edebilme imkânı sağlamaktadır.

Özet olarak, temelde karmaşık olan teorik hesaplamalardan mega yatların kavram dizayn aşamasında kullanılabilecek ve olabildiğince düşük hata payıyla sonuç alınabilecek basit ve kullanışlı bir yaklaşımın gemi mühendisine sunulması amaçlanmıştır. Detayları aşağıda açıklanacak olan yöntemlerden sonuç olarak varılan formülasyon aşağıdaki gibidir:

$$\Phi \leq 30^\circ \text{ için: } C_{RS} \cdot 10^3 = \left(\frac{B}{T}\right)^2 \cdot a + \left(\frac{KG}{B}\right) \cdot b + c$$

$$\Phi > 30^\circ \text{ için: } C_{RS} \cdot 10^3 = \left(\frac{B}{T}\right)^2 \cdot a + \left(\frac{KG}{B}\right) \cdot b + \left(\frac{D}{T}\right) \cdot c + d$$

**Anahtar Kelimeler:** Üst bina, kavram dizayn, artık stabilite, mega yat

## 1. Giriş

Kavram dizayn basamakları süresince gemi mühendisi, geminin sonuç olarak sahip olacağı form parametreleri ve katsayıları hakkında bir öngöründe bulunmak durumunda kalacaktır. Gemi mühendisi genellikle parametreleri hız ve güç gereksinimlerini baz alarak seçecek, bir yandan da stabilite

üzerinde bu parametrelerin etkisini göz önünde bulundurması gerekecektir. Dizayn spiralindeki ilk döngü tamamlanmadan geminin bazı stabilite karakteristiklerinin hesaplanabilmesi dizayna iyi bir başlangıç sağlamada yardımcı olacak ve gemi mühendisi şüphesiz bir adım önde başlayacaktır.

Statik Kavram dizayn perspektifi bir yana, gemi hareketlerinin anlaşılmasına da ciddi bir ihtiyaç vardır. Statik stabilite verileri tek başına bir geminin ağır deniz koşullarındaki hareketlerini tahmin etmek açısından yetersiz olacaktır. Bir geminin deniz seyirindeki dinamikleri, lineer olmayan dış kuvvetler ile lineer olmayan düzeltme kuvvetlerinin etkileşiminin sonucudur. Lineer gemi hareketleri alanında bir çok araştırma yapılmıştır. Özellikle İstatiksel Dinamik Stabilite (Rahola, 1939) ve Model Testi (Amy ve diğ., 1976) çalışmalarının tümü geminin dinamik tepkilerini stabilitenin ölçülebilirliği ile ilişkilendirmeyi amaçlamışlardır. 1940'ların sonunda Prof. C. W. Prohaska tarafından doğrultma kolunun ağırlık bileşeni ve tekne form bileşeni olarak çözümlendiği yeni bir metod 'Artık Stabilite' ismiyle ortaya konulmuştur. Bu çözümlenme ve özellikleri bu makalede işlenen konunun temelini oluşturmaktadır. Sonuç olarak 20m ile 60m arasında değişen değişik formlara sahip yatlar için uygulanabilecek  $C_{RS}$  katsayılarının elde edilmesi, bunların kavram dizayn aşamasında nasıl kullanılabileceği ve en gerçekçi  $C_{RS}$  katsayılarının, uygun katsayılar seçildikten sonra regresyon yardımı ile elde edilmesi açıklanacaktır.

## 2. Tekne formunun statik stabilite üzerindeki etkisi

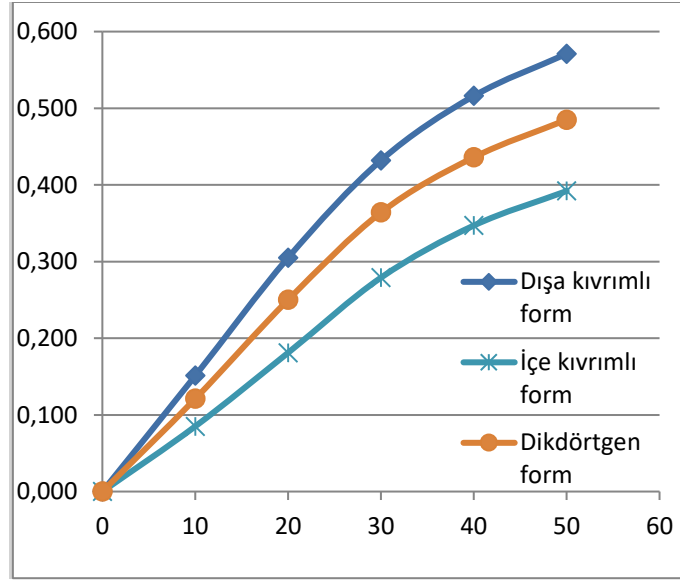
Genel olarak GZ eğrisine bakıldığında, maksimum GZ noktasının sol kısmında belli bir açıda eğim karakteristiğinin değiştiği gözlemlenir. Bu açı kabaca güvertenin suya girdiği açıya tekabül etmektedir ve ileriki kısımlarda analizde kullanılacaktır. Tekne formu bu açıda belirleyici olacağı gibi, maksimum doğrultma kolu ve alabora olma açısını da belirleyen ana etken olacaktır. Gemi formunun yanında geminin ağırlık merkezi genel olarak doğrultma kollarının (değişik açılarda) büyüklüğünü belirleyecektir.

Geminin ana boyutlarından olan genişlik, enine stabilitede en büyük etkiye sahip olacaktır. Atalet momenti genişliğin küpü ile doğru orantılı olarak değişeceğinden, geminin genişliğindeki artış metasantrik yarıçapı ve dolayısıyla  $GM'$ 'yi kayda değer bir biçimde etkileyecektir.

Genel olarak genişliğin artırılması küçük açılarda stabiliteyi iyileştirecek ve maksimum doğrultma kolunun değerini arttıracaktır. Buna karşın büyük açılarda stabiliteye ve pozitif stabilitenin olduğu alana olumsuz etkisi olacaktır.

Ağırlık merkezi sabit alınıp geminin derinliğinde artış yapıldığında, güvertenin denize giriş açısına kadar doğrultma kolunun büyüklüğünde bir değişiklik olmayacaktır. Derinlik (D)'deki artış maksimum doğrultma kolunu, grafik üzerinde sağa yani daha büyük açılara taşıyacak ve pozitif stabilite aralığını genişletecektir. Fakat gemi mühendisinin bu durumda karşılaşacağı sıkıntı, derinliğin artmasına bağlı olarak gelen ek konstrüksiyon ağırlığının etkisiyle ağırlık merkezinin yukarıya kayması olacaktır.

Dışa doğru açılan 'flaring' tarz yan duvarları olan gemilerde su kesit alanındaki hızlı artış ve yüzme merkezindeki hızlı kaymaya bağlı olarak büyük doğrultma kolları oluşacaktır. Aksi durumda, yani içe kıvrımlı formlarda tam tersi etki gözlenecek ve çok sığ bir GZ eğrisi ortaya çıkacaktır. Şekil 1, basit dikdörtgensel forma sahip bir pontonun her üç durum için kıyaslanmasını göstermektedir. Her üç pontonun da stabil durumda su altı formları aynı olmakla beraber su üstünde kalan formları farklılık göstermektedir.



Şekil 1. GZ eğrilerinin orta kesit form tipine göre karşılaştırılması

### 3. Yaklaşık yöntemler

Ana parametrelerin başlangıç stabilite için hesaplanmasında geniş çevrelerin kabul gösterdiği çeşitli yaklaşım metodları vardır. Bunlar arasından en bilinenlerden bir tanesi, standart gemi formları için geçerli ve yüzme merkezinin su hattına mesafesinin yaklaşık olarak elde edilmesi için geliştirilmiş olan Morrish'in formülüdür (Rawson&Tupper, 1983). Denklem 1, bu formülün uyarlanmış ve günümüz gemi mühendisinin başvurabileceği şekliyle yüzme merkezinin dikey konumunu vermektedir.

Bir diğer yaklaşım, Denklem 2'de Posdunine'nin formülü ile ifade edilmiştir. Pratikte KB, dolgun formlu gemiler için yaklaşık 0,52T ve narin formlu gemiler için ise 0,58T civarında olacaktır. Bu değer, yüzen cismin formu dikdörtgen prizma formuna yaklaştıkça 0,5T'ye yaklaşacaktır (Bartholomew, Marsh and Hopper, 1992).

$$KB = \frac{1}{3} \cdot \left( \frac{5T}{2} - \frac{\nabla}{A_{WP}} \right) \quad (1)$$

$$KB = T_m \cdot \frac{A_{WP}}{A_{WP} + \frac{\nabla}{T_m}} \quad (2)$$

Enine metasantrik yarıçap ile ilgili bir bağıntı da Saunders ve Mills tarafından ortaya konmuştur. Örnek olarak aşağıda bu ifadenin firkateynlere uyarlanmış hali verilmektedir:

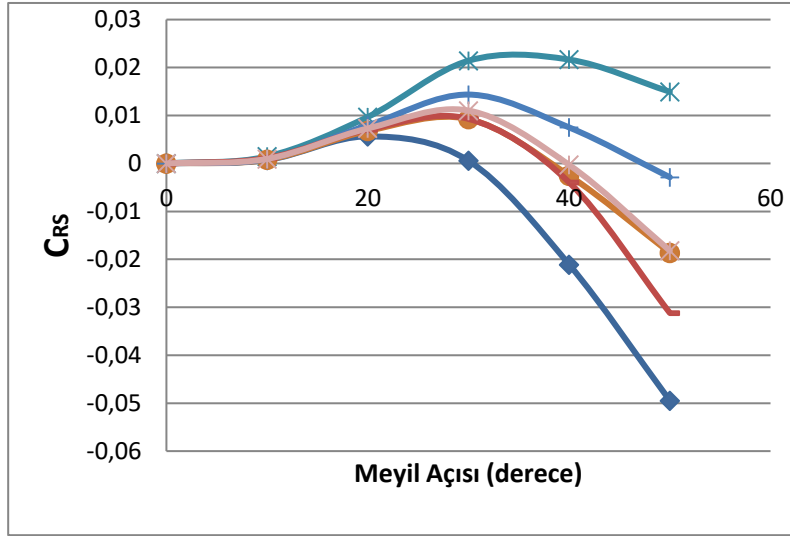
$$BM_T = \frac{LB^3}{12V} [1.204C_p - 0.157] \quad (3)$$

### 4. Artık stabilite teorisi

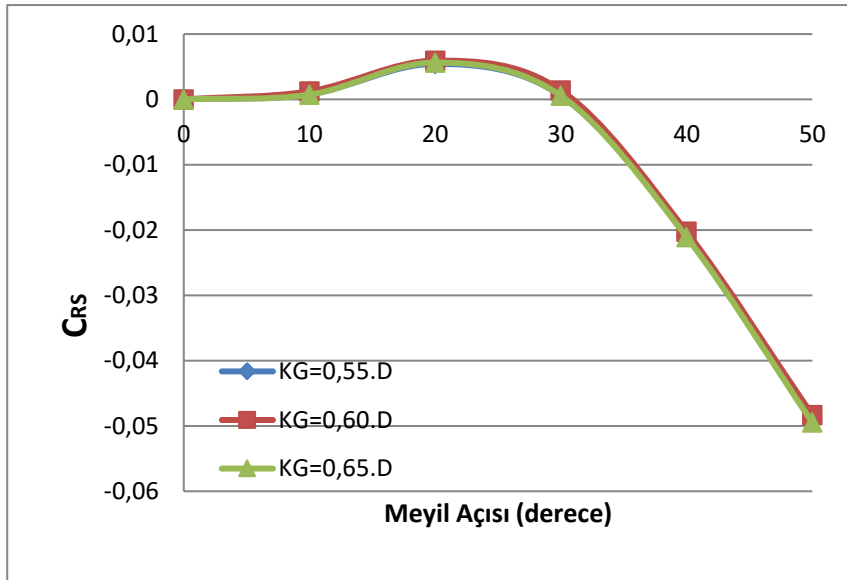
Prohaska 1947 yılında doğrultma kolu için birinci kısmı ağırlıklı olarak yüklemeye, ikinci kısmı ise tekne formuna bağlı olan ve birbirinden bağımsız iki terimle ifade edilen artık stabilite kavramını ortaya atmıştır.

$$GZ = GM \cdot \sin \Phi + MS \quad (4)$$





Şekil 3. Artık stabilite katsayı eğrileri



Şekil 4. Farklı KG değerleri için  $C_{RS}$  katsayıları

Çalışmasından çıkan bazı sonuçlar:

- Sabit  $B/D$  için; en yüksek  $C_{RS}$ ,  $T=0,5D$ 'de oluşacaktır.
- Sabit  $C_{WP}$  için;  $C_{RS}$   $CB$  ile doğru orantılı olarak azalır.
- Sabit  $C_M$  için karina açısındaki artış, büyük draftlar için  $C_{RS}$ 'de artışa neden olurken, düşük draftlarda azalmasına neden olacaktır.

Bu sonuçlar, çeşitli form parametreleriyle 30 derecede artık stabilite için yaklaşık ifade geliştiren diğer araştırmacılar için temel oluşturmuştur (Brown 1979). Çok sayıdaki tekne formu için  $C_{RS}$  eğrilerini hesaplayıp çizmiş ve çoklu lineer regresyon analizi ile aşağıdaki ifadeleri sunmuştur.

$$C_{RS}(30) = 0,8566 - 1,2262 \frac{KB}{T} - 0,035 \frac{B}{T} \quad (6)$$

$$C_{RS}(30) = -0,1859 - 0,0315 \frac{B}{T} + 0,3526 C_M \quad (7)$$

Burada;  $C_{RS}(30)$ : 30 derecedeki artık stabilite katsayısı

$C_M$ : orta kesit katsayısıdır.

Bu formüllerin kusuru, form parametrelerinin artık stabiliteye sadece bir tek açıdan ilişkilendirilmiş olmasıdır. Benzer ifadelerin yatlar ve bununla beraber doğrultma kolunun bütün bir stabilite aralığı için ortaya koyan yayınlanmış bir çalışma yoktur.

Artık stabilite metodunda, bir teknenin izin verilen KG maksimum değerini dinamik stabilite kriterleri ile birlikte kullanarak iyi bir yaklaşım elde edilmesi için çalışılmıştır. IMO tarafından önerilen 6 kriter, kritik GM değerlerini hesaplamak için kullanılacak 6 parametrik denklemin türetilmesinde kullanılmıştır. Başlangıç stabilite parametreleri için yaklaşım metodlarını kullanırken, bu değerlerin en kritik altısı kritik KG olarak ifade edilmiştir. Düşük genişliğe sahip gemiler hariç, kritik KG'nin derinliğe oranının test edilen bütün formlarda sabit kaldığı ulaşılan sonuçlardan birisi olmuştur (Krishna Rao, 1979).

$C_{RS}$  eğrisinin integrali, (eğri altında kalan alan) doğrultma enerjisinin kesiti ile doğru orantılı olduğundan, 'BM<sub>T</sub>.Δ' tekne formunun doğrultma enerjisi ile benzerlik göstermektedir. Bu incelemede ortaya çıkan sonuçlardan bir diğeri ise artık stabilitenin integrali, geminin draft ve triminin bir geometrik özelliği olduğudur ki bu da Prohaska ve Brown'ın elde ettiği sonuçları desteklemektedir (Khoushy, 1979).

## 5. Yaklaşım metodunun analizi

Önceden de belirttiğimiz gibi çalışmamızın amacı, bir geminin ana geometrik karakteristikleri ile doğrultma enerjisi arasında fonksiyonel bir bağlantı kurmaktır. Prohaska'nın geliştirdiği metod yaklaşımımız için temel olarak seçilmiştir. Bunun nedeni, doğrultma kolunun form bileşenlerini ağırlık bileşenlerinden ayırmış olmasıdır. Tekne form parametreleri ile artık stabilite katsayısı arasındaki fonksiyonel bağıntıyı belirleyebilmek için öncelikli olarak araştırma sonuçlarının olabildiğince genellenebileceği tekne form tiplerinin seçilmesi gerekmektedir. Daha sonra her bir tekne için hidrostatik ve stabilite hesapları yapılmış, bunlar istatistiksel yaklaşımda kullanılmıştır. İstatistiksel yaklaşımda kullanılacak parametreler seçilmiş ve nihayet yaklaşım sonuçlarını test etmek için beş adet hali hazırda kullanımda olan teknelerin sonuçları ile karşılaştırılıp, sonuçların kalitesi kontrol edilmiştir.

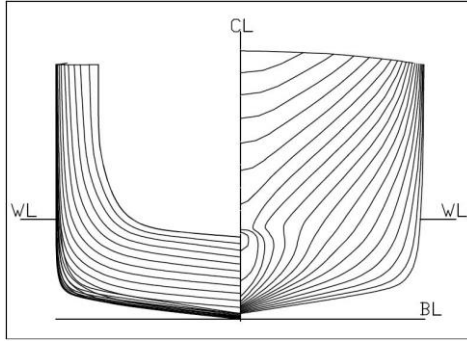
## 6. Veritabanı

Veri havuzunda kullanılacak gemi formu tipleri ve ana boyutları seçilirken çeşitli parametreler göz önüne alınmıştır.

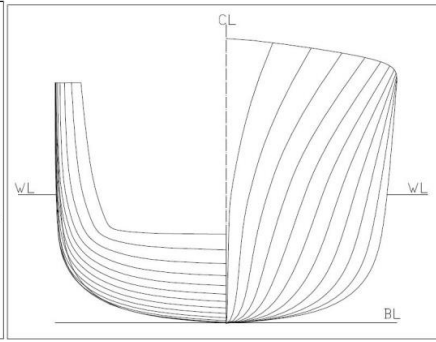
Ana boyut olarak son yıllarda hızla artan 'daha uzun yat' piyasa eğilimine karşın, gerek yaklaşımın gerçek sonuçlara yakınlığını sağlamak gerekse uzun boylarda devreye girecek diğer parametreler farklı L/B oranı, değişken üst yapı talepleri vs.) yaklaşımın basitliğini bozup bizi hedefimizden uzaklaştıracağı için tam boyu 20m ile 60m arasında olan gemiler seçilmiştir.

Gemi form tipi olarak bu boyutlar arasında son 40 sene içerisinde büyük yat üreticilerinin en çok kullandığı tekne form tipleri seçilmiştir. Sonuçları genelleyebilmek için 3 farklı form tipi seçilmiştir.

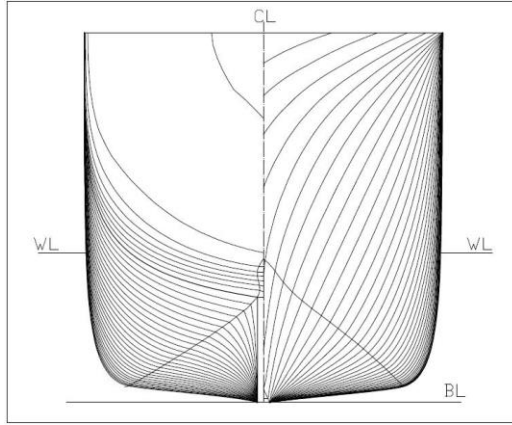
Bu üç form birbirinden farklı hidrostatik karakteristikleri olan ve blok katsayıları genel olarak 0,5 ile 0,6 arasında değişen formlardır. Aşağıda örnek olarak seçilen form tiplerine ait kavramlar gösterilmiştir:



Şekil 5. Kavram-1 posta kesitleri



Şekil 6. Kavram-2 posta kesitleri



Şekil 7. Kavram-3 posta kesitleri

Seçilen tekne formları MaxSurf programında modellenip ayrıca bunlardan yeni tekne formları türetilmiştir. Sonrasında veri regresyon analizlerinde kullanılacak hidrostatik ve stabilite değerler HydroMax modülünde hesaplanmıştır. Türetilen formlar orijinal tekne formuna yakın prizmatik ve blok katsayılarına sahip olmaktadır. Böylece etkisi incelenmesi istenen parametreler ön planda kalmış ve sonuçlar incelenirken bu katsayıların da etkilerinin olup olmadığı sorusuna mahal bırakılmamıştır.

#### 7. Doğrultma kolları ve artık stabilitenin hesaplanması

Temel hidrostatik değerler hesabını izleyen aşamada GZ doğrultma kolları 0 dereceden başlanarak 10 derecelik adımlarla, stabilite kriterinde belirtilen parametreleri kapsayacak minimum değer olan 50 dereceye kadar hesaplanmıştır.

İleriki tespitlerimizde kullanacağımız temel hidrostatik değerler (Su-çekimi, GMT, BMT, KB gibi) bütün formlar için hesaplanmıştır. Bu değerlerin hesaplanmasında formun modellenmesi ve deplasman ile ağırlık merkezinin programa girişinin yapılması gerekmektedir. Artık stabilite eğrileri (MS), (4) eşitliğinin yeniden düzenlenmesi ile hesaplanmıştır:

$$MS = GZ - GM \cdot \sin(\Phi)$$

(8)



Bu denklemde kullanılan GM, denge durumundaki enine GM değeridir. Daha sonra her bir veri noktası,  $C_{RS}$  eğrisinin belirlenmesi için başlangıç  $BM_T$  değeri ile normalize edilmiştir.

Standard işlem sağlamak üzere LCG, gemiye sıfır trim yaptıracak boyuna konuma yerleştirilecektir. Ağırlık merkezinin dikey konumu enine stabilite üzerinde belirleyici faktörlerden olacağından, bunun için değişik seçeneklerin hesaba katılmasına karar verilmiştir. Bu seçeneklerin belirlenmesi için öncelikle bu boy aralığındaki teknelerde KG'nin genel olarak hangi aralıkta değiştiği incelenmiş ve yine çalışmamızda kullandığımız ana parametrelerden biri olan derinlik ile oransal ilişkisi üzerinde durulmuştur. Sonuç olarak;  $KG/D=0,55$ ,  $KG/D=0,60$  ve  $KG/D=0,65$  konumları, ağırlık merkezinin dikey konumu (KG) ve derinlik (D)'ye bağlantılı olarak üç farklı seçenek şeklinde ayrı ayrı incelenmiş, buna bağlı olarak herbir orantı için ayrı bağıntılar elde edilmiştir.

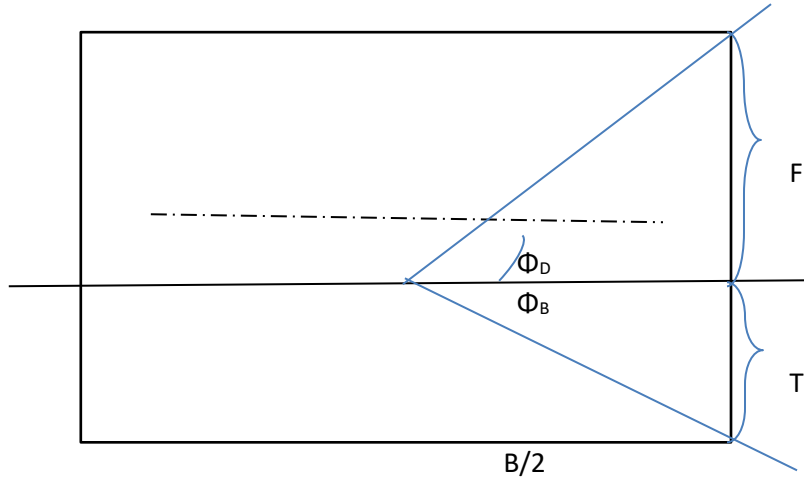
### 8. Kontrol parametrelerinin seçilmesi

Seçilen tekne tiplerinde artık stabilite davranışını incelemek için öncelikli olarak üreteceğimiz denklemde kontrol değişkenleri olarak görev alacak parametrelerin belirlenmesi gerekmektedir. Çalışmamızda olabildiğince boyutsuz parametreler kullanıp verilerin normalize edilmesi ve sonuç olarak olabildiğince genelleştirici standard bir yaklaşım elde edilmeye çalışılmıştır. Böylece sonuçlar, incelenen boy aralığındaki tekneler için kapsayıcı özelliğe sahip olacaktır.

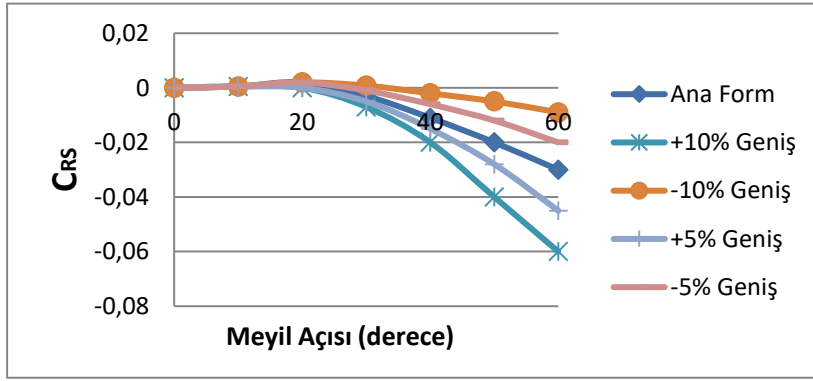
Prohaska'nın yaptığı çalışmada en belirgin olan parametreler derinlik-deplasman oranı ( $D/\Delta$ ), genişlik-derinlik oranı ( $B/D$ ), draft-derinlik oranı ( $T/D$ ) ve genişlik-draft oranıdır ( $B/T$ ). Sözü edilen çalışmada kullanılan diğer parametreler ise ağırlık merkezinin dikey konumu-derinlik oranı ( $KG/D$ ) ve sephiye merkezi enine konumu-su-çekimi oranıdır ( $KB/T$ ). Özellikle bu son iki oran, temel geometrik değişkenlere göre tekne formunun detay parametrelerine bağlıdır. Bu yüzden değişik gemi türleri için yapılan araştırmalarda KG sıfır olarak hesaba alınmış ve dolayısıyla bu parametrenin etkisi göz ardı edilmiştir. Fakat bu değişkenin ana stabilite üzerindeki baskın ve belirleyici özelliğinden ötürü KG, çalışmaya özellikle dahil edilmiştir. Yine artık stabilite konusunda belirleyici olacak fribord büyüklüğü için çalışmaya, direk freeboard'ın derinliğe veya su-çekimine oranı yerine, derinlik-su-çekimi oranı ( $D/T$ ) dahil edilmiştir.

Başlangıç olarak sıradan dikdörtgen prizmatik forma sahip barç formları bu parametrelerin artık stabilite üzerindeki temel etkilerinin incelenmesinde kullanılmıştır. Basit forma sahip bu barçların seçilme nedenleri, dizaynlarının basit olması ve köşeli yapıya sahip oldukları için suya girme ve çıkma açılarının daha net bir şekilde ayırt edilebilmesi olmuştur. Şekil 8'de gösterilen güverte dalma açısı ( $\Phi_D$ ) ve sintine dönümünün su üstüne çıkma açısının ( $\Phi_B$ ) artık stabilite üzerinde etkisi olduğu düşünülmektedir.

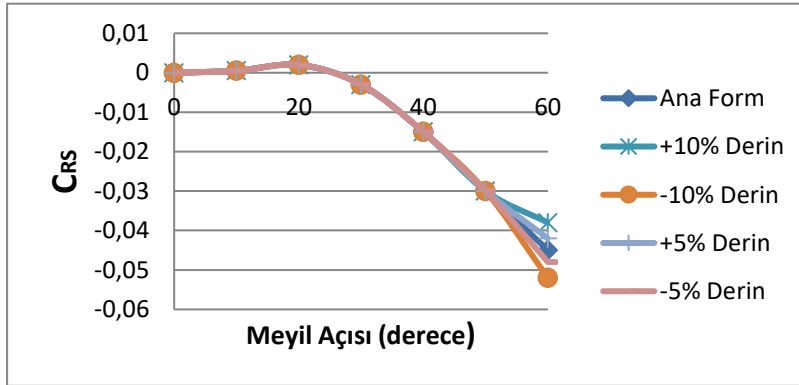
Parametrelerin belirlenmesi için 3 farklı boyuta sahip barç seçilmiştir. Bunlar seçilirken, kullandığımız yat form konseptlerine benzer karakteristik özelliklere sahip formlar seçilmeye çalışılmıştır. Daha sonra her tip barç formu ile %10'luk marjin sınırı içinde ve/veya genişlik ölçüleri ile oynanarak yeni barç formları türetilmiş ve değişik parametrelerin etkileri incelenmiştir.



Şekil 8. Bir barçın güverte suya girme ve sintine dönümü sudan çıkma açıları



Şekil 9. Genişlikteki değişmeye bağlı artık stabilite (Barç-1)



Şekil 10. Derinlikteki değişmeye bağlı artık stabilite (Barç-1)

Bu incelemelerimiz sırasında her iki eğri grubunun da güvertenin suya girmesi ve sintine dönümünün sudan çıkmasına bağlı olarak azalma eğilimine girdiği gözlemlenmiştir.

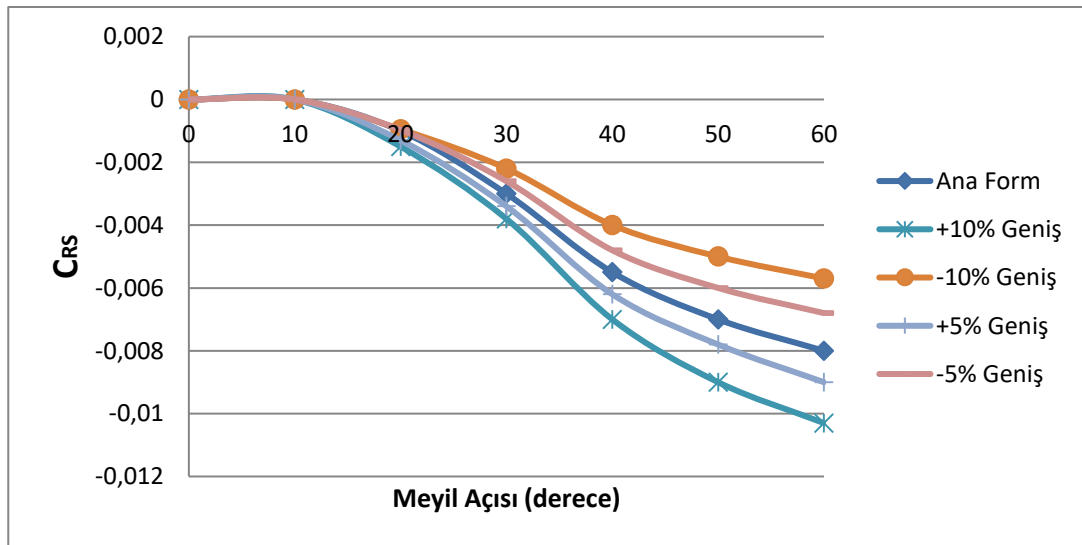
Çizelge 1'de her bir opsiyon için bu iki açının alacağı değerler listelenmektedir. Gerçekte bir yatın tekne formu için her ne kadar sintine dönümünün yuvarlak hatlı ve düzgün bir forma sahip olması

güvertenin suya girme açısı üstünde etkili olsa da,  $C_{RS}$  eğrisinin davranışının incelenmesinde ve parametreleri belirleme safhasında bu modelin kullanılabileceğini kabul edebiliriz.

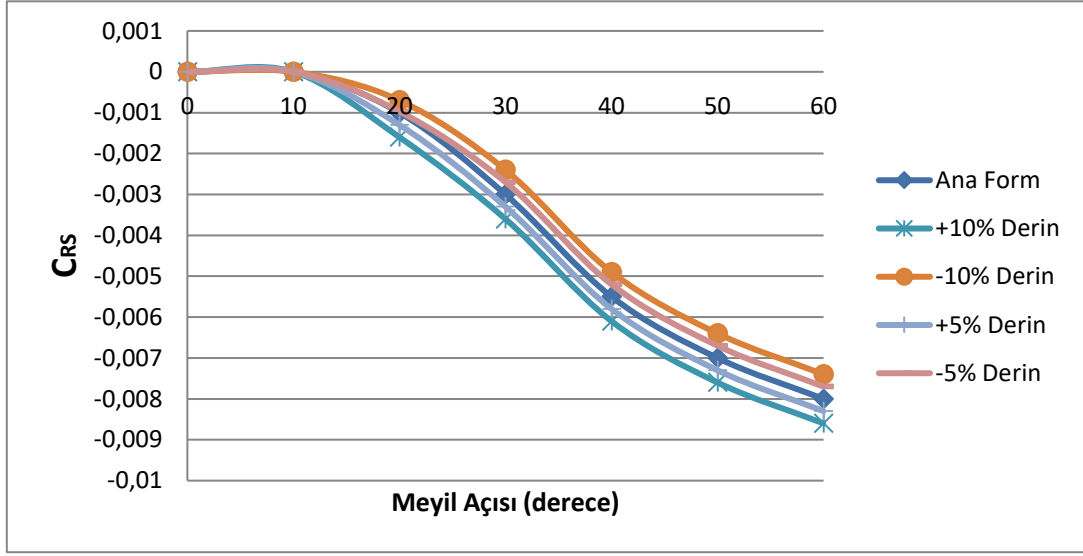
**Tablo 1.** Barge-1 ve türevlerinin ana karakteristikleri

Türev adı	B (m)	D (m)	T (m)	Güverte suya girme açısı	Sintine sudan çıkış açısı
Ana tekne	14,3	9,4	2,2	45	17
+10% Genişlik	15,7	9,4	2,0	43	14
-10% Genişlik	12,9	9,4	2,5	47	21
+5% Genişlik	15,0	9,4	2,1	44	15
-5% Genişlik	13,6	9,4	2,3	46	19
+10% Derinlik	14,3	10,4	2,2	48	17
-10% Derinlik	14,3	8,5	2,2	41	17
+5% Derinlik	14,3	9,9	2,2	47	17
-5% Derinlik	14,3	9,0	2,2	43	17

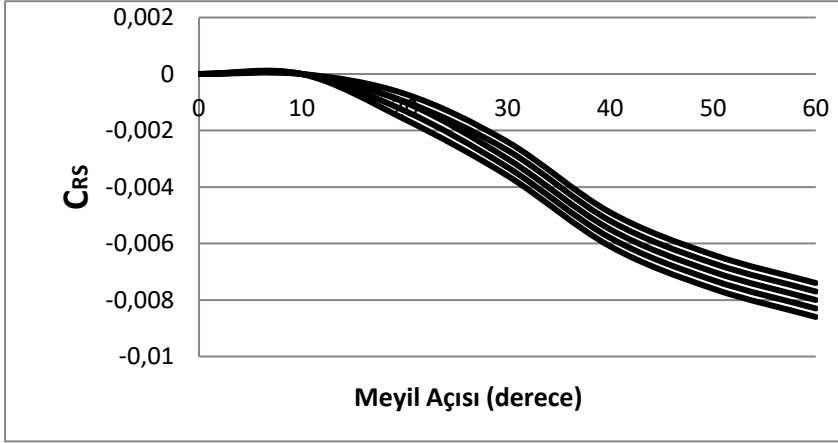
Bu teori barge-2 ve barge-3 formları tarafından da desteklenmektedir. Barge-2, bir sıç su barge'dır ve ortalama olarak derinliğinin yarısı büyüklüğünde bir drafta sahiptir. Şekil 11 ve 12'den de görüleceği üzere derinlik türevlerinde eğriler aşağıya doğru kıvrım yaptıktan sonra eğriler arasındaki mesafe sabit kalmaktadır. Genişlik türevlerinde ise eğriler arasındaki mesafe, açı büyüdükçe artmaktadır. Düşük güverte suya batma açısı ve büyük bir sintine sudan çıkma açısına sahip barge-3 kavramı için, Şekil 13'te, artık stabilitenin  $BM_T$  aracılığıyla normalize edilmesi durumunda artık stabilite katsayılarının değişimi gösterilmektedir.



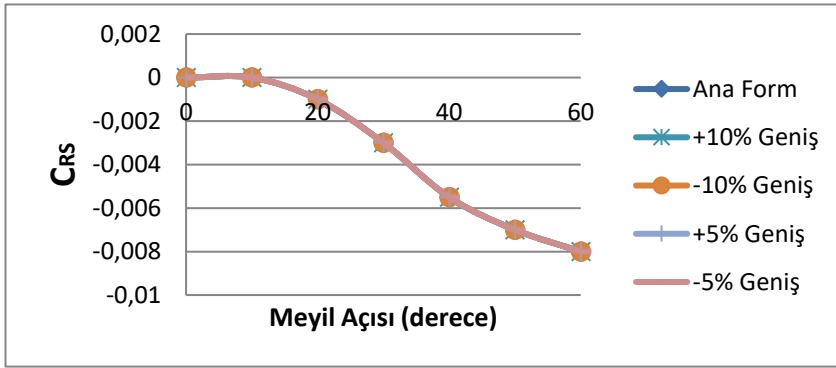
**Şekil 11.** Genişlikteki değişmeye bağlı artık stabilite (barge-2)



Şekil 12. Derinlikteki değişmeye bağlı artık stabilite (barge-2)



Şekil 13. Barge-2 ve türevleri için artık stabilite



Şekil 14. Barge-3 ve türevleri için artık stabilite

Şekil 14'de görüldüğü gibi bu barç kavramının türevleri için  $C_{RS}$  değerleri,  $60^\circ$ lik meyil açısına kadar aynı değerleri almaktadır. MS ve  $C_{RS}$  eğrilerinin davranışları bu temel geometrik parametreler ile bu iki açı arasında bir ilişki olduğunu göstermektedir. Bu ilişki aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$B/F = 2\cot(\Phi_D) \quad (9)$$

$$B/T = 2\cot(\Phi_B) \quad (10)$$

$$B/D = \frac{1}{2} [\tan(\Phi_D) + \tan(\Phi_B)] \quad (11)$$

$$D/T = [\tan(\Phi_D) + \tan(\Phi_B)] / \tan(\Phi_B) \quad (12)$$

Sonuç olarak B/T, KG/B ve D/T analiz için birincil kontrol parametreleri olarak seçilmiştir.

### 9. Kavram dizayn için parametrik yaklaşımın geliştirilmesi

Bu aşamada gemi mühendisinin elinde henüz kesin bir form olmadığından, tekne form kavramının seçilmesinden sonra aşağıdaki öngörüler ve tercihler yapılabilecektir:

- Enine stabilite ile ilgili öngörüle bulunabilme
- Teknenin ana boyutlarının seçilmesi
- Ağırlık merkezindeki dikey yer değiştirmenin enine stabiliteye etkisi (dolayısıyla üst bina boyutları ve ağırlık dağılımının etkisinin incelenmesi)

Çalışmada ortaya konan tekniği kavram dizayn aşamasında kullanıma uygun hale getirebilmek için stabilite denklemindeki parametreleri dönüştürmemiz gerekmektedir.

Bu noktadan itibaren Denklem 4'te yer alan parametrelerin, özellikle tekne ana boyutlarını içerecek şekilde nasıl yeniden belirlenebileceğine bakacağız ve sonuç olarak yeni bir yaklaşıma varmaya çalışacağız. Yeniden parametre belirlemedeki temel amaçlarımız:

- Henüz kavram dizayn aşamasında yaklaşık olarak bilinen ana boyut değerlerinin kullanılması
- Dizayn sarmalında başlangıç iterasyonu için en kullanışlı olacak parametrelerin kullanılması
- Gemi inşaatı literatüründe daha önceden başka tip gemiler için yapılmış yaklaşımların parametrelerinin ve buna bağlı olarak katsayılarının mega yatlar için seçilmesi ve amaca uygun uyarlanması

Şimdi sırasıyla yapacağımız iyileştirmeleri ve ortaya koyacağımız yaklaşımları inceleyelim. Denklem 4'e baktığımızda:

- I. GM yerine ' $GM = KB + BM - KG$ ' eşitliği yazılırsa elimizde KB, BM ve KG değişkenleri kalacaktır.
- II. KB için Denklem 1'de verilen Rawson & Tupper yaklaşımını baz aldığımızda yeni ifade T ve  $C_{wp}$ 'ye bağlı olarak ifade edilebilir. Katsayıları veri havuzuna aldığımız tekne konseptleri ve bunlardan türetilen formları incelediğimizde aşağıdaki değerlere ulaşacağız:

$$KB = \frac{T}{3} (a - C_{wp}) \quad (13)$$

- III. BM için ise, günümüze kadar yapılan yaklaşımlar arasında bir karşılaştırma yaptığımızda, yatlara en efektif biçimde uygulayacağımız yaklaşımın Saunders & Mills'inki olduğunu gördük.

Katsayılar veri havuzumuzda yer alan tekneler için regresyon yöntemi ile belirlendiğinde aşağıdaki değerlere ulaşacağız.

$$BM_t = \frac{LB^3}{12V} (C_p \cdot a + b) \quad (14)$$

- IV. Varılan sonuçlar ve bunların hata yüzdelere bağlı olarak 30°'ye kadar olan açılarda parametre olarak  $(B/T)^2$  ve  $KG/B$  seçilmişken, 30° üstü açılarda ek bir parametre  $(D/T)$  eklenmesi uygun görülmüştür. Sonuç olarak:

$$\Phi \leq 30^\circ \text{ için: } C_{RS} \cdot 10^3 = \left(\frac{B}{T}\right)^2 \cdot a + \left(\frac{KG}{B}\right) \cdot b + c \quad (15)$$

$$\Phi > 30^\circ \text{ için: } C_{RS} \cdot 10^3 = \left(\frac{B}{T}\right)^2 \cdot a + \left(\frac{KG}{B}\right) \cdot b + \left(\frac{D}{T}\right) \cdot c + d \quad (16)$$

**Tablo 2.** a,b,c,d değerleri

	CRS(10)			CRS(20)			CRS(30)			CRS(40)				CRS(50)			
	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	d	a	b	c	d
KG=0,55D	0	-3	-4	-1	-13	28	-6	75	56	9	1558	-183	-250	14	2337	-193	-580
KG=0,60D	0	-1	-4	-1	-13	29	-6	69	55	3	1143	-112	-218	5	1714	-85	-535
KG=0,65D	0	-1	3	-1	-12	28	-6	62	56	9	1307	-182	-246	14	1971	-191	-579

## 10. Parametrik denklemin doğruluğu

Bir sonraki adım, hali hazırda serviste bulunan tekneler için ulaştığımız sonuçların test edilmesi ve doğrulanması; bunun yanında gemi mühendisine izleyeceği yol ile ilgili tavsiyelerde bulunmaktır.

Değişik ülkelerde muhtelif tersanelerde inşa edilmiş ve çalışmaya konu olan boy aralığındaki mega yatlardan bilgilerine ulaşılabilen 5 yat, test teknesi olarak seçilmiştir. Bunların ana boyutları ve çalışmada ihtiyaç duyulacak karakteristikleri Çizelge 3'de verildiği gibidir. Bu noktadan itibaren tekneler Test-1, Test-2, Test-3, Test-4 ve Test-5 olarak adlandırılacaktır.

**Tablo 3.** Test teknelerinin ana karakteristikleri

	Test-1	Test-2	Test-3	Test-4	Test-5
Deplasman (ton)	159,1	318,4	571,5	825,2	1005,6
Hacim (m <sup>3</sup> )	155,0	310,0	557,0	808,0	984,0
Su-çekimi (m)	1,850	2,300	2,600	3,200	3,600
L <sub>WL</sub> (m)	26,923	35,414	46,283	55,000	57,500
B <sub>WL</sub> (m)	5,998	7,300	8,998	7,800	9,050
D	4,10	5,00	5,90	5,30	6,00
C <sub>p</sub>	0,602	0,608	0,605	0,660	0,590
C <sub>B</sub>	0,520	0,524	0,516	0,573	0,514
C <sub>M</sub>	0,875	0,883	0,879	0,868	0,862
C <sub>wp</sub>	0,790	0,796	0,792	0,789	0,751
KB (m)	1,155	1,442	1,635	1,913	2,206
KG (m)	2,255	2,750	3,500	3,445	3,900
BM <sub>T</sub> (m)	1,984	2,382	3,218	1,846	2,240
GM <sub>T</sub> (m)	0,883	1,075	1,313	0,315	0,546
KM <sub>T</sub> (m)	3,138	3,825	4,853	3,760	4,446

Önceki kısımlarda açıklandığı üzere, ihtiyaç duyulan oransal parametreler Çizelge 4'te gösterilmiştir. Çizelge 4'ten de görüleceği gibi KG/D oranı Test-1 ve Test-2 için 0,55, Test-3 için 0,6 ve Test-4 ile Test-5 için 0,65'tir. Aynı zamanda stabiliteye büyük etkisi olacak B/T oranı Test-4 ve Test-5 için Test-1, Test-2 ve Test-3'e göre nispeten düşüktür. Bir diğer çıkarılabilecek sonuç da, düşük D/T oranı nedeniyle Test-4 ve Test-5'in güvertelerinin daha düşük meyil açılarında suya gireceğidir. Dolayısıyla test tekneleri çalışmanın doğruluğunu test etmeye yetecek çeşitliliği göstermektedir.

**Tablo 4.** Test teknelerinin KG/D oranları

	Test-1	Test-2	Test-3	Test-4	Test-5
B/T	3,24	3,17	3,46	2,44	2,51
(B/T) <sup>2</sup>	10,51	10,07	11,98	5,94	6,32
D/T	2,22	2,17	2,27	1,66	1,67
KG/D	0,55	0,55	0,60	0,65	0,65
F /T	1,22	1,17	1,27	0,66	0,67
F/B	0,38	0,37	0,37	0,27	0,27
KG/B	0,38	0,38	0,39	0,44	0,43
KG/T	1,22	1,20	1,35	1,08	1,08

Mega yatlarda BM<sub>t</sub>'nin hesaplanması için sunduğumuz formül uygulandığında ulaşılan sonuçlar Çizelge 5'te gösterilmiştir. Görüldüğü gibi sunulan formül mega yatlar için çok düşük hata oranlarıyla olumlu sonuçlar vermektedir ve rahatlıkla kavram dizayn aşamasında kullanılabilir.

**Tablo 5.** BM<sub>T</sub> (yaklaşım) hata oranı

	BM <sub>t</sub> (yaklaşım)	BM <sub>t</sub> (gerçek)	Hata (%)
Test-1	1,980	1,984	-0,2
Test-2	2,369	2,382	-0,5
Test-3	3,213	3,218	-0,1
Test-4	1,858	1,846	0,6
Test-5	2,246	2,240	0,3

Sonuç olarak, 3 farklı KG/D değerine göre ayrı ayrı ortaya koyulan denklemlerle büyük açılar için varılan GZ değerleri ve gerçek değerler aşağıda Çizelge 6'te gösterilmiştir:

**Tablo 6.** GZ yaklaşım-gerçek değerlerin karşılaştırması

	Yaklaşım				
	GZ-10	GZ-20	GZ-30	GZ-40	GZ-50
Test-1	0,147	0,307	0,464	0,587	0,681
Test-2	0,176	0,369	0,562	0,715	0,824
Test-3	0,225	0,466	0,686	0,862	1,000
Test-4	0,061	0,148	0,264	0,376	0,372
Test-5	0,091	0,213	0,363	0,492	0,488
	Gerçek Değerler				
	GZ-10	GZ-20	GZ-30	GZ-40	GZ-50
Test-1	0,156	0,321	0,484	0,611	0,706
Test-2	0,190	0,393	0,600	0,767	0,897
Test-3	0,232	0,473	0,692	0,843	0,948
Test-4	0,058	0,139	0,254	0,309	0,260
Test-5	0,099	0,220	0,370	0,500	0,519

Tablo 6'dan görüleceği üzere 'yaklaşım değerleri' ve 'gerçek değerler' arasındaki hata payı önemsenmeyecek ölçüde az olduğu tespit edilmiştir.

## 11. Sonuç ve tavsiyeler

İncelenen açılarda GZ doğrultucu kol değerlerinin belirlenmesinden sonra, gemi mühendisinin takip etmesi gereken adımlar stabilite kısmının değerlendirilmesi için aşağıdaki gibi özetlenmiştir.

Yapılan çalışmanın sonucunda, mega yatlarda büyük açılarda GZ değerleri ile ilgili öngörülebilir bulunabileceği gösterilmiştir. Her ne kadar sonuçların test edilmesi için 5 test teknesi kullanıldıysa da, seçilen test teknelerinin karakteristiklerindeki çeşitlilik sebebiyle, bulunan formüllerin bu boy aralığındaki bütün monohull yatlarda kullanılabileceği beklenmektedir. Benzer şekilde balıkçı gemileri, offshore destek gemileri ve benzer gemi tipleri için de çalışmaların yapılabileceği görülmektedir.

Bu çalışmada sunulan değerler bir sonraki adımlara ışık tutacak ve enine stabilite ile ilgili genel bir fikir sahibi olmak için kavram dizayn aşamasında kullanılabilecektir. Bu yaklaşımların denizcilik sektöründe kullanışlı bir uygulama alanı bulacağına inanılmaktadır.

Sunulan bu yöntemin en büyük avantajı, gemi mühendisinin kısıtlı sayıdaki veri ile gayet makul sayılabilecek hata payları içerisinde öngörüler yapabilmesini sağlamasıdır. Bunun yardımıyla gemi inşaatı mühendisi, kavram dizaynın optimizasyon sürecinde tekne formunun belirlenmesi ve iyileştirmesini yapabilecektir. Bu formülasyon sadece dizayner için değil kaptan için de kısıtlı sayıda veri ile yaralı stabilite durumu hakkında öngörülerde bulunması için yardımcı bir araç olacaktır. Dolayısıyla ortaya konan bu çalışmanın iki temel uygulama alanı olacaktır: Kavram dizayn aşamasındaki uygulaması ve hızlı stabilite değerlendirmesi.

Geleneksel dizayn spiralinde, başlangıç iterasyonu için tekne geometrisi seçimi toplam hacim veya yük taşıma hacminin tahminine dayanmaktadır. Bu aşamada hacim değerleri, sıklıkla önceki yapılmış teknelerin değerlerinden interpolasyon yöntemiyle elde edilir. Enine stabilitenin değerlendirilmesi alışlageldiği üzere bundan bir kaç adım sonra, ana makinanın seçimi ve konumunun belirlenmesinden sonra yapılır. Eğer stabilite yetersiz bulunursa, gemi mühendisi bunu iyileştirecek yöntemler denemek zorunda kalacaktır. Örnek olarak genişliğin arttırılması veya ana makinanın dikey konumunun alçaltılması gibi her zaman da fizibil olmayan yöntemler verilebilir. Bu yaklaşım bilindiği üzere gemi dizaynında deneme-yanılma yönteminin kullanılmasıdır. Zaman açısından çok daha verimli olduğundan, en güncel gemi sentez programlarında dahil dizayn spiralindeki her iterasyonun sonunda stabilite kontrolü uygulanmaktadır.

Bir geminin enine stabilitesinin değerlendirmesi için kullanılan integrasyon teknikleri güvenilir ve kabul edilebilir derecede hassastır. Tekrar vurgulamakta fayda olan nokta, artık stabilite tekniğinin bu tekniklerin yerini alması gerektiği değil; kavram dizayn aşamasında gemi mühendisine sağlayacağı kolaylık ve kazandıracağı zamandır.



## Kaynaklar

Amy, J.R., Johnson, R. E., Miller, E. R., "Development of Intact Stability Criteria for Towing and Fishing Vessels," Marine Technology, SNAME.

Barrass, B., Derrett, D.R., (2006). Ship Stability for Masters and Mates, ISBN: 9780080460086.

Bartholomew, C.A., Marsh, B., Hooper, R.W. (1992). U.S. Navy Salvage Engineer's Handbook, Vol 1, Naval Sea Systems Command.

Biran, A.B., (2003). Ship Hydrostatics and Stability, ISBN: 978-0-7506-4988-9.

Brown, A. J. and Deybach, F. (1998), Towards A Rational Intact Stability Criteria For Naval Ships. Naval Engineers Journal, 110: 65–77. doi:10.1111/j.1559-3584.1998.tb02386.x.

Bureau Veritas, (2012). Rules for the Classification and the Certification of Yachts.

Deybach, F., (1997). Intact Stability Criteria for Naval Ships, Master Thesis, MIT Dept. of Ocean Engineering.

IMO Res. MSC.267(85), (2008). Intact Stability Code.

Korteweg, J.A., (1984). Geometry and Stability. Report no. 516-K, TU Delft.

Krishna Rao, A. V. (1979). "An Approximate Method for Finding Maximum KG to Satisfy the IMCO Intact Stability Criteria, The Naval Architect, no. 6, London.

Rawson, K., Tupper, E., Basic Ship Theory, vol. 1, Longman, Inc., 1983.

Perunovic, J.V., (2009). Ship Dynamic Intact Stability Focus on Parametric Roll. Technical Report, Technical University of Denmark.

Prohaska, C.W., (1947). "Residuary Stability", Transactions of Institution of Naval Architects.

Prohaska, C.W., (1951). "Influence of Ship Form on Transverse Stability".

Rahola, J. (1939) "The Judging of the Stability of Ships and the Determination of the Minimum Amount of Stability", PhD Thesis, Helsinki.

Sebastian, J.W., (1997). Parametric Prediction of the Transverse Dynamic Stability of Ships, Master Thesis, Naval Postgraduate School, Monterey.

Wolfson Unit (Maritime ve Coastguard Agency), (2007). Intact Stability Severe Wind and Rolling Criterion- An Equivalent Standard.

\* Corresponding author