

## DOĞRUSAL OLMAYAN GEMİNİN SALLANMA HAREKETİ İÇİN MAKSİMUM GENLİKLERİN HESAPLANMASI

İlyas ÇANKAYA  
Sakarya Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Elektronik-Bilgisayar Eğitimi Bölümü,  
Esentepe Kampüsü, 54187 – SAKARYA

### ÖZET

Bu çalışmada, harmonik denge denklemlerinin elde edilmesinde kullanılan genelleştirilmiş harmonik denge metodu açışal olarak kübik söndürücü ve kübik ve beşinci sertlik terimlerine bağımlı örnek bir geminin sallanma modeli üzerinde sunulmuştur. Denge denklemleri sadece rezonans cevabıyla ilgili olan açışal bir değerle çözülmüştür. Rezonans anındaki cevabın genliği ve rezonansın meydana geldiği andaki frekans değeri, geniş bir frekans bandı üzerindeki cevabı hesaplanmadan elde edilmiştir. Bu, giriş uyarımının seviyesindeki rezonans cevabının bağımlılığını araştırmada etkili bir araç ortaya koymuştur. Çok daha fazla zamana ihtiyaç gösteren simülasyon metotları (Euler, Runge-Kutta 3, Adams, Ode45 gibi) ile daha uyumlu sonuçlar vermektedir.

**Anahtar Kelimeler :** Doğrusal olmayan, Geminin sallanma hareketi, Harmonik denge denklemleri, Frekans boyutu.

## THE COMPUTATION OF MAXIMUM AMPLITUDES FOR NONLINEAR SHIP ROLL MOTION

### ABSTRACT

In this study, generalized harmonic balance method for deriving the harmonic balance equations is illustrated using a ship roll model with angle dependent cubic damping, and cubic and quintic stiffness terms. The balance equations are then solved subject to a phase constraint which identifies the resonant solution only. The amplitude of the response at resonance, and the frequency at which resonance occurs, can therefore be obtained without needing to compute the response over a wide frequency range. This provides an efficient toll for investigating the dependence of the resonant response on the level of input excitation, with results which agree well with more time-consuming simulation methods.

**Key Words :** Nonlinear, Ship roll motion, Harmonic balance equations, Frequency domain

### 1. GİRİŞ

Çok sayıda araştırımcı gemilerin olağanüstü şartlar altındaki güvenliğini ele alan çalışmalar üzerinde durmaktadır. Bu çalışmalar düzenli ve düzensiz deniz dalgalarında oluşan gemi hareketlerinin cevabının incelenmesi şeklinde gerçekteştirilmektedir. Düzenli deniz dalgalarında yer alan bir geminin sallanma cevabı birinci dereceden serbestliğe sahip bir diferansiyel denklem sayesinde modellenebilmektedir. Bundan dolayı, bu probleme çeşitli doğrusal olmayan modeller ve analiz teknikleri uygulanmaktadır. İlgilenilen geniş genlikli hareketler çoklu çözümler, atlama olayı, doğđal frekans kayması, alt ve süper harmonik rezonans üretimini içeren doğrusal olmayan davranışlardan bir çeşidini ortaya koyabilir. Bunlar uyarım metodunun, Bogolyubov ve Mitropolsky asimtotik metodunun, çok zaman ölçekli veya harmonik denge metotlarının kullanıldığı çalışmalar sonucunda elde edilmektedir (1-4).

Pratikte uyarım metodu gibi bazı metotlar sadece zayıf doğrusal olmayan davranışların analizinde kullanılmaktadır. Bunun yanında kullanılan

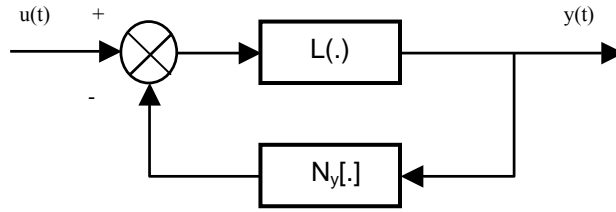
bütün tekniklerin, çok daha fazla doğruluğa sahip sonuçlar istendiğinde, artan oranda karmaşık bir yapıya kavuştuğu görölmektedir. Ancak, harmonik denge metodunun durumunda (yeni yaklaşımlar) ya doğrusal olmayan terimler bir Fourier serisi gibi kullanılarak (4) yada doğrusal olmayan elemanların tanımlama fonksiyonları için cebirsel ifadeler kullanılarak denge denklemlerinin formülasyonu oldukça kolay hale getirilebilmektedir (5). Tipik olarak harmonik denge metodu veya diğerlerinden herhangi biri kullanılarak elde edilen analizin sonuçları ilgilenilen frekans bölgesini kapsayan bir frekans cevabında sunulur. Bazen frekans bölgesini kapsayan cevabın hesaplanmasındaki yöntem maksimum sallanma genliğinin üretildiği frekansın tespit edilmesini de sağlar (6).

Bu makalede, direkt olarak harmonik denge denklemlerinden elde edilen maksimum sallanma cevabının ve bunun oluştuğu andaki frekansın elde edilmesini sağlayan bir metot sunulmaktadır. 2. bölümde harmonik denge denklemlerinin formülasyonu anlatılmaktadır. 3. bölümde ise maksimum sallanma parametrelerinin nasıl belirlendiği

anlatılmakta ve sunulan metodun doğruluğu örnek bir gemi modeli için elde edilen sonuçlarla daha fazla zamana ihtiyaç gösteren simülasyon sonuçlarıyla karşılaştırılarak ortaya konmaktadır. Son olarak, 4. bölümde elde edilen sonuçların özeti sunulmaktadır.

## 2. HARMONİK DENGE DENKLEMLERİNİN FORMÜLASYONU

Düşüncede basit olsa bile, harmonik denge metodunun geleneksel uygulaması (giriş ve çıkış dalga formları için farz edilen formüller temel sallanma denkleminin içine yerleştirildiğinde) basit durumlarda bile artan uzunlukta trigonometrik açınımlar verir. Bu açınım sonradan göz ardı edilecek olan gereksiz terimleri de üretir. Aynı zamanda bu işlem denklemde yer alan doğrusal olmayan her bir terim için tekrarlanmalıdır. Dolayısıyla uygulanan bu metotta daha fazla harmonik ele alındığı zaman hata yapma ihtimali artar.



Şekil 1. Sistemin eşdeğer blok diyagramı

Son zamanlarda harmonik denge denklemlerinin, doğrudan doğruya temel sallanma denkleminin sabitleri kullanılarak, elde edildiği genel bir cebirsel metot sunulmuştur (5). Bu metot Şekil 1'de görülen yapıya sahip herhangi bir doğrusal olmayan sistemin denge denklemlerine ait ifadeleri otomatik olarak üreten sembolik bir matematik programlama diline kodlanmıştır. Şekil 1'deki yapıda  $L(\cdot)$  bir doğrusal (lineer) elemanı,  $N_y[\cdot]$ 'de polinom tipindeki dinamik doğrusal olmayan elemanı temsil etmektedir. Örneğin birinci dereceden serbestliğe sahip geminin sallanma modellerine (çoğunluğunda) bakıldığında ikinci dereceden doğrusal sistem dinamikleri  $L(\cdot)$  ile ve doğrusal olmayan düz ve söndürücü momentlerinden ortaya çıkan geri-besleme terimleri  $N_y[\cdot]$  ile temsil edilmektedir.

Giriş ve çıkış dalga formları, her biri genlik ve faz ( $A_{x,r}$ ,  $\phi_{x,r}$ ) değerleri ile birlikte temsil edilen rast gele sayıdaki  $R_x$  harmonik bileşenlerinin

ele alındığı oldukça genel formüllerdir. Bu yüzden giriş sinyali  $u(t)$  Fourier dönüşümü ile temsil edilebilir,

$$U(j\omega) = A_u \sum_{r=-R_u}^{R_u} 2\pi \frac{A_{u,|r|}}{2} e^{j\phi_{u,r}} \delta(\omega - \omega_r) \quad (1)$$

burada  $\omega_{-r} = -\omega_r$  ve  $\phi_{u,-r} = -\phi_{u,r}$  şeklindedir.

Aynı zamanda  $dc$  (bias) bileşen  $\omega_0 = 0$  ve  $A_{u,0} = 2A_{u,dc}$  ile tanımlanarak düzenlenir. Benzer tanımlamalar bilinmeyen çıkış dalga formunun ( $y(t)$ ) Fourier dönüşümü içinde ( $u$  yerine  $y$  karakteri kullanılarak) yapılabilir. Giriş ve çıkış sinyallerine ait bu formüller verildiğinde harmonik denge denklemleri Şekil 1'de yer alan  $L(j\omega_r)$  ve tanımlama fonksiyonu  $N_{u,r}(A_u, j\omega_r)$ ,  $N_{y,r}(A_y, j\omega_r)$  elemanları da kullanılarak frekans cevabını verecek şekilde yazılabilir,

$$Y(j\omega_r) = L(j\omega_r) [N_{u,r}(A_u, j\omega_r) U(j\omega_r) - N_{y,r}(A_y, j\omega_r) Y(j\omega_r)] \quad (2)$$

Elde edilen 2 numaralı denklem analizde yer alan her bir frekans değeri için tutulacak olursa harmonik denge denklemlerinin genel formülü ortaya çıkar. Böylece bunlar belirli bir sisteme ve her bir uygulamada yer alan giriş / çıkış dalga formlarına göre değerlendirilebilir.

Örnek olarak doğrusal (lineer) artı kübik sönmü terimleri ve doğrusal, kübik ve beşinci sertlik terimleri içeren birinci dereceden serbestliğe sahip bir geminin sallanma modelini ele alalım (1),

$$\ddot{y}(t) + 2\mu\dot{y}(t) + d_2\dot{y}(t)^3 + \omega_n^2 y(t) + \alpha_3 y(t)^3 + \alpha_5 y(t)^5 = u(t) \quad (3)$$

burada  $y(t)$  çıkış sallanma açısını  $u(t)$  ise uyarım kuvvetini temsil eder. Sistem parametrelerinin değerleri ise,

$$\omega_n = 5.2779; \quad d_2 = 0.108; \quad \mu = 0.0855; \\ \alpha_3 = -1.69119\omega_n^2; \quad \alpha_5 = 0.63297\omega_n^2;$$

$$A_u = 0.8\omega^2 F; \quad F = [0.04, \dots, 0.4]; \quad A_{u,dc} = 0 \quad (4)$$

şeklindedir. Bu model Şekil 1'de görülen yapıya aşağıda olduğu gibi kolaylıkla ayrılabilir,

$$L(\cdot) : \ddot{w}(t) + 2\mu\dot{w}(t) + \omega_n^2 w(t) = x(t) \quad (5)$$

$$N_y[\cdot] : w(t) = d_2\dot{x}(t)^3 + \alpha_3 x(t)^3 + \alpha_5 x(t)^5 \quad (6)$$

burada  $x(t)$  ve  $w(t)$ , sırasıyla, verilen herhangi bir blok için giriş ve çıkışı temsil eder. Giriş sin-

yalinin dalga formunda herhangi bir  $dc$  bileşen yer almadığı için doğrusal olmayan kübik terim sadece tekli derecelerden oluşan harmonikler üretecektir. Buna göre giriş / çıkış sinyalleri için aşağıda verilen dalga formları kullanılabilir,

$$y(t) = A_1 \cos(\omega t + \phi_1) + A_3 \cos(3\omega t + \phi_3) \quad \text{ve} \\ u(t) = A_u \cos(\omega t) \quad (7)$$

Burada  $\phi_1$  fazı alt çalışmalarda kolaylık sağlanması için çıkıştan ziyade giriş ile alakalandırılmıştır. Buna göre çıkış dalga formunda yer alan üçüncü harmoniğin faz açısı da  $\phi_3' = \phi_3 + 3\phi_1$ 'dir.

Şekil 1 ve 5, 6 numaralı denklemlerle tanımlanan alt sistem bloklarının her biriyle bunlara ait frekans değerlerinin nasıl dönüştürüldüğünü tanımlayabilmek için ilgilenilen her bir frekansa ait  $L(j\omega_r)$ ,  $N_{u,r}(A_u, j\omega_r)$  ve  $N_{y,r}(A_y, j\omega_r)$  frekans cevaplarının hesaplanması gerekir. Doğrusal eleman  $L(\cdot)$ 'nin durumunda temel harmonik cevabı basitçe,

$$L(j\omega) = \frac{1}{(j\omega)^2 + 2\mu j\omega + \omega_n^2} \quad (8)$$

yazılabilir ve bu ifade,  $\omega$  ile  $3\omega$  yer değiştirildiğinde, yüksek harmonik değeri için de geçerlidir. Peyton Jones tarafından sunulan tanımlama fonksiyonunun hesaplanmasında kullanılan genelleştirilmiş metoda göre elde edilen temel ve üçüncü harmonik sonuçları aşağıdaki gibi yazılabilir (7),

$$N_{y,1}(A_1, A_3, j\omega) = \frac{3\alpha_3}{4} [A_1^2 + 2A_3^2 + A_1 A_3 e^{j\phi_3}] \quad (9)$$

$$+ \frac{3j\omega^3 d_2}{4} [A_1^2 + 18A_3^2 - 3A_1 A_3 e^{j\phi_3}]$$

$$+ \frac{5\alpha_5}{8} \left[ A_1^4 + 3A_3^4 + 6A_1^2 A_3^2 + \frac{1}{2} A_1^3 A_3 e^{-j\phi_3} \right]$$

$$+ A_1 A_3 e^{j\phi_3} (2A_1^2 + 3A_3^2)]$$

$$N_{y,3}(A_1, A_3, 3j\omega) = \frac{3\alpha_3}{4} \left[ 2A_1^2 + A_3^2 + \frac{1}{3A_3} A_1^3 e^{-j\phi_3} \right] \quad (10)$$

$$+ \frac{3j\omega^3 d_2}{4} \left[ 6A_1^2 + 27A_3^2 - \frac{1}{3A_3} A_1^3 e^{-j\phi_3} \right]$$

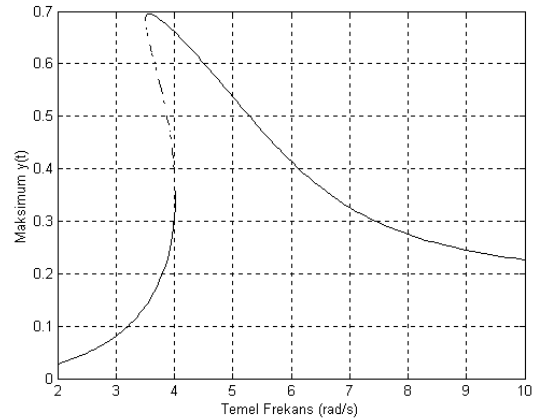
$$+ \frac{5\alpha_5}{8} \left[ 3A_1^4 + A_3^4 + 6A_1^2 A_3^2 + A_1^3 A_3 e^{j\phi_3} \right. \\ \left. + A_1^3 e^{-j\phi_3} \left( \frac{A_1^2}{2A_3} + 2A_3 \right) \right]$$

Son olarak harmonik denge denklemleri 8-10 numaralı denklemlerin 2 numaralı denklemde yerine yazılmasıyla aşağıdaki özel formda elde edilir,

$$A_1 [(j\omega)^2 + 2\mu j\omega + \omega_n^2 + N_{y,1}(A_1, A_3, j\omega)] = A_u e^{-j\phi_1} \quad (11)$$

$$A_3 e^{j\phi_3} [(3j\omega)^2 + 6\mu j\omega + \omega_n^2 + N_{y,3}(A_1, A_3, 3j\omega)] = 0 \quad (12)$$

Burada ele alınan her bir frekans bileşeni için bir tane olmak üzere sadece iki denklem yer alır. Fakat bunlar gerçek ve sanal bölümler için birlikte tutulur. Elde edilen bu iki denklem bilinmeyen dört değer çözümünde kullanılır. Temel ve süper-harmonik bölgelerinde birlikte tutulan bu denklemler zayıf doğrusal olmayan sistemlerle sınırlı değildir ve özellikle süper-harmonik bölgesinde birinci dereceden açınımların yaygın olarak kullanıldığı sonuçlardan çok daha doğru sonuçlar vermektedir (6). Genelleştirilmiş harmonik denge yaklaşımının bir başka avantajı da aşağıdaki bölümde anlatılan teknik kullanılarak maksimum (pik) sallanma cevabının frekans bölgesinin tamamını kapsayan bir maksimum değer araştırmasına ihtiyaç duyulmadan elde edilebilmesine imkan sağlamasıdır.



Şekil 2. Frekansın bir fonksiyonu olarak maksimum sallanma cevabı

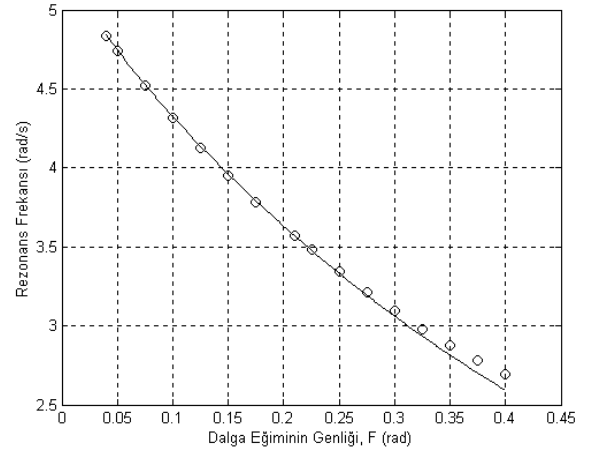
### 3. MAKSİMUM SALLANMA PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ

3 numaralı denklem modelinde tanımlanan birinci dereceden serbestliğe sahip örnek sisteme ait frekans cevabının elde edilebilmesi için öncelikle giriş uyarım frekansının belirli bir değerinde çıkış dalga formunun bilinmeyen genlik  $A_{y,r}$  ve faz  $\phi_{y,r}$  değerlerini veren klasik harmonik denge denklemleri çözülür. Daha sonra ilgilenilen frekans bölgesine karşılık bu işlem tekrarlandığında sistemin frekans cevabı elde edilir. 3 numaralı denklem modeline ait 11 ve 12 numaralı denge denklemleri için işlem yapıldığında Şekil 2’de görülen atlama rezonans cevabı ortaya çıkar (bunların karakteristiklerine ait detaylı bilgi (5, 8 ve 9) numaralı kaynaklardan elde edilebilir). Ancak, maksimum sallanma açısı ile bunun meydana geldiği andaki frekans değeri rezonans pik değeri araştırıldığında bulunabilir.

Maksimum sallanma parametrelerinin elde edilmesinde kullanılabilen bu metod uygulamada bazı zorluklar gösterebilir. Örneğin atlama rezonansının bulunduğu sistemlerde (özellikle ilgilenilen rezonans veya atlama frekansına yakın olan yerlerde) denge denklemlerinin sayısal çözümü başlangıç koşullarına artan bir oranda bağımlı olmaya başlar. Eğer yüksek genlik çözümü varsa onun maksimum değeri bir simülasyon sonucunda elde edilen cevabın sahip olduğu son değerlerin bir sonraki simülasyonda başlangıç değerleri olarak kullanılmasıyla ve bu işlemin çok küçük frekans aralıklarında tekrarlanmasıyla elde edilebilir (10,11). Dolayısıyla bu yolla maksimum sallanma genliğinin ve frekansının araştırılması hata yapmaya meyilli ve dolayısıyla kullanışsızdır.

Denge denklemlerinin çözümüne alternatif olarak kullanılacak bir yaklaşım sadece rezonans anındaki çözümü bazı sabit değerler kullanarak yapmaktır. Örneğin zayıf sönümlü rezonans koşulları altında güç kaybı çok küçük olduğundan elde edilen cevap zorlayıcı fonksiyonuna yaklaşık olarak kareseldir. Bir başka deyişle  $\phi_1 = -\pi/2$  değeri bu amaca uygun olarak kullanılacak bir sabittir. Bu işlem bilinmeyenlerin sayısını bire indirir. Böylece rezonansın meydana geldiği andaki frekans denge denklemlerinden elde edilen değişkenlerin listesine eklenebilir. Dolayısıyla maksimum

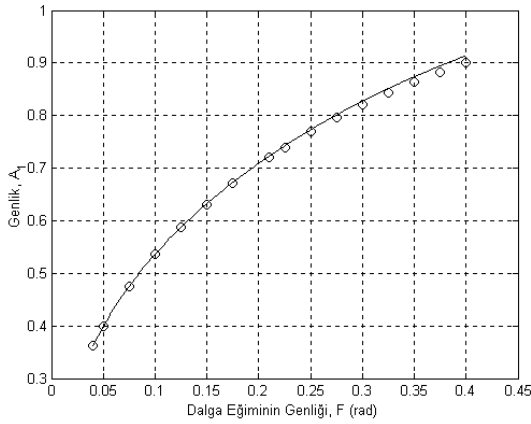
değerin olduğu andaki frekansında bulunduğu maksimum sallanma parametreleri girilen rezonans şartında (sadece bir defa) denge denklemlerinin çözümünden elde edilebilir.



Şekil 3. Dalga eğiminin genliğine karşılık rezonans anındaki frekansın simülasyon sonuçları (yuvarlak noktalar) ile birlikte değişimi.

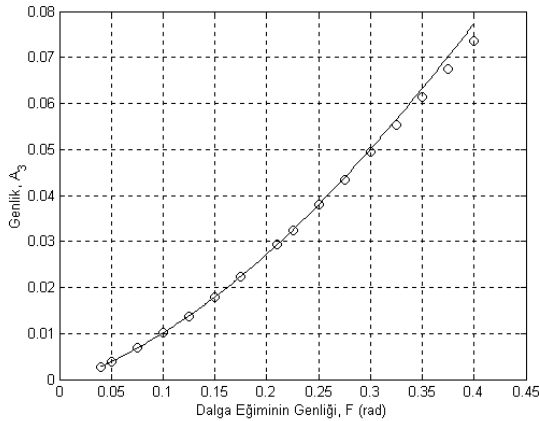
Bu yaklaşımın devamında 3 numaralı denklemde yer alan geminin sallanma modeline ait temel rezonans karakteristikleri 11 ve 12 numaralı denklemlerde  $\phi_1 = -\pi/2$  değeri yerine konularak ve  $A_1, A_3, \phi_3, \omega$  için çözümü yapılarak tanımlanır. Bu işlem artan uyarım seviyelerinin etkilerini araştırmada  $F$ 'nin farklı değerleri için tekrar edilebilir. Elde edilen sonuçlar rezonans frekansının ve cevapta yer alan temel ve üçüncü harmonik bileşenlerinin giriş genliğine olan bağımlılığını göstermektedir. Bunlar sırasıyla Şekil 3, 4 ve 5’de görülmektedir. Farklı giriş genliklerine karşılık  $\phi_3$ 'ün değişimi çok küçük olduğundan burada gösterilmemiştir. Bu değer hesaplamalarda yaklaşık olarak  $-\pi/2$  bulunmuştur.

Şekil 3’de  $F$  dalga eğiminin 0.04 ile 0.4 arasındaki genlik seviyelerine karşılık rezonans anındaki frekans değerleri çizilmiştir. Ortaya çıkan grafiğe bakıldığında hafif bir eğim yer almasına rağmen rezonans frekansındaki değişim yaklaşık olarak doğrusaldır. Bunun yanında dalga eğiminin genliği arttırıldığında rezonans frekansının düştüğü gözlenir. Şekil 4 ve 5’de rezonans anındaki temel ve üçüncü harmonik cevabının genlikleri  $F$  dalga eğiminin genlik seviyesine karşılık çizilmiştir.



Şekil 4. Dalga eğiminin genliğine karşılık rezonans anındaki temel harmonik bileşenin simülasyon sonuçları (yuvarlak noktalar) ile birlikte değişimi.

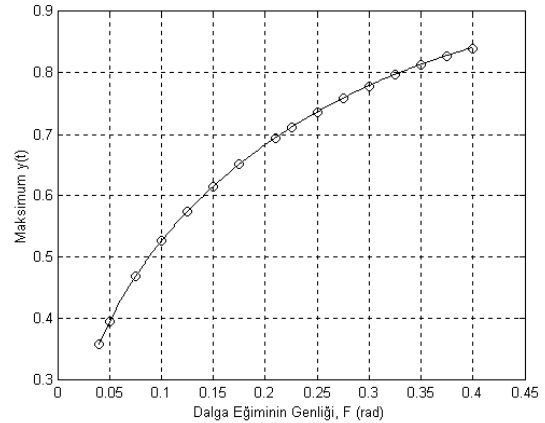
Şekil 4’de düşük giriş uyarımında temel harmonik bileşenin genliğinde daha fazla artış gözlenmektedir. Daha sonraları ise, yani giriş dalga eğiminin genliğindeki büyük değerlerde bu artışın yavaşladığı ve bu nedenle de grafikte bir kavisin ortaya çıktığı gözlenir. Buna karşılık Şekil 5’de giriş uyarımının 0.04’e yakın olan değerlerinde üçüncü harmonik bileşenin çok az bir artış gösterdiği ancak giriş uyarımının büyük olan değerlerinde hızlı bir artışa sahip olduğu görülmektedir.



Şekil 5. Dalga eğiminin genliğine karşılık rezonans anındaki üçüncü harmonik bileşenin simülasyon sonuçları (yuvarlak noktalar) ile birlikte değişimi.

Şekil 6’da temel ve üçüncü harmonik bileşenlerinin toplamından elde edilen maksimum sallanma cevabı görülmektedir. Gerçekten, bu sistem için, maksimum sallanma cevabı yaklaşık ola-

rak  $A_1$  ve  $A_3$  (her ikisinin frekans bileşenleri yaklaşık olarak aynı fazda olduğundan) genliklerinin toplamıdır. Giriş uyarımının küçük olan değerlerinde üçüncü harmonik bileşenin etkisi çok az olduğundan elde edilen cevap yaklaşık olarak temel harmonik bileşenin yapısını vermektedir. Ancak giriş uyarımındaki genliğin büyük değerlerinde üçüncü harmonik bileşenin etkisi görülerek maksimum sallanma cevabının temel harmonik bileşeni ile karşılaştırıldığında daha küçük değerler olduğu görülmektedir. Ayrıca elde edilen grafik incelendiğinde yukarıdaki açıklamadan da anlaşılacağı gibi küçük giriş uyarımlarında daha fazla değişim buna karşılık büyük giriş uyarımlarında daha az değişim gözlenmektedir.



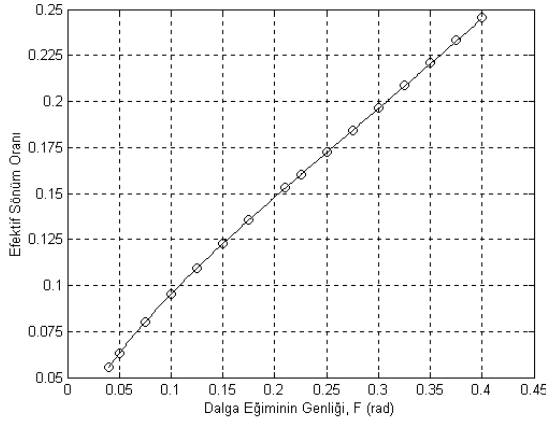
Şekil 6. Dalga eğiminin genliğine karşılık rezonans anındaki maksimum sallanma cevabının simülasyon sonuçları (yuvarlak noktalar) ile birlikte değişimi.

Bu çalışmada elde edilen teorik sonuçların geçerliliği dairesel noktalarla gösterilen sallanma denkleminin doğrudan doğruya sayısal simülasyondan elde edilen sonuçlarıyla karşılaştırılarak ortaya konmuştur. Sonuçlara bakıldığında gerçekçi olmayan yüksek giriş seviyelerinde bile mükemmel uyum içerisinde oldukları görülür.

Bu sonuçlar cesaret vericidir, fakat farz edilen düşük sönüme bağımlıdır. Bundan dolayı bu metodun çok daha genel uygulanabilirliğini göstermede sönüm seviyelerini kontrol etmek faydalı olur. Doğrusal olmayan sallanma denkleminin sabitlerinden sönümün belirlenmesi her zaman kolay olmadığından çok daha uygun olan ölçüm rezonans koşulundaki efektif doğrusal sönüm oranının hesaplanmasıdır. İkinci dereceden bir doğrusal sistemin rezonans anındaki kazanç eşitliğinden efektif sönüm oranı,

$$\zeta = \sqrt{\frac{1}{2} \left( 1 \pm \sqrt{1 - \left( \frac{A_u}{\max(y(t))} \right)^2} \right)} \quad (13)$$

şeklinde yazılabilir. Şekil 7’de sunulan grafik  $\zeta$ ’nın dalga eğiminin genliğine bağımlılığını simülasyon bilgilerinden aynı özellik kullanılarak hesaplanan sonuçlarla birlikte göstermektedir. Grafikte özellikle düşük giriş genliklerinde biraz eğim olsa da bu ilişki yaklaşık olarak doğrusal gözükmektedir. Bununla birlikte çok daha önemli olan husus 0.2 kadar yüksek ve onun üzerindeki efektif sönüm oranları için bile teorik ve simülasyon sonuçlarının iyi bir uyum içerisinde olmasıdır.



Şekil 7. Dalga eğiminin genliğine karşılık rezonans anındaki efektif sönüm oranının simülasyon sonuçları (yuvarlak noktalar) ile birlikte değişimi.

#### 4. SONUÇ

Bilgisayarda kolaylıkla ifade edilebilen cebirsel ifadeler birinci dereceden serbestliğe sahip geminin sallanma modeli için harmonik denge denklemlerinin elde edilmesinde kullanılabilir. Temel rezonans anındaki çözüm bir frekans bölgesini kapsayan denge denklemlerini çözmek yerine doğrudan  $\phi_1 = -\pi/2$  kullanıldığı denklemler çözümlere elde edilebilir. Bu, rezonansın meydana geldiği andaki frekans değerinin elde edilmesiyle birlikte analizde içerilen çeşitli frekans bileşenlerine ait genliklerin ve fazların da aynı anda elde edilmesini sağlar. Güvenlik bakımından çok daha fazla öneme sahip olan bu değerler rezonans dışında kalan frekanslarda hesaplamaya gerek duyulmadan elde edilebilir. Bu durum, sunulan çalışmada açısız olarak kübik ve beşinci dereceden

sönüm ve kübik sertlik terimlerine bağımlı olan örnek bir gemi modeli üzerinde gösterilmiştir.

Sunulan bu analitik metodun avantajları özellikle sonuçların geçerliliğinde kullanılan direkt simülasyon metodları ile karşılaştırıldığında ortaya çıkmıştır. Direkt simülasyon metodları her bir simülasyon için kararlı durum koşullarına ulaşmada yeterli bir zamana ihtiyaç duyduğundan ve maksimum cevabın ortaya çıkışının bulunmasında bu işlemin farklı frekans değerlerinde tekrar edilmesi gerektiğinden oldukça zaman alıcı bir uygulamadır. Çoklu çözümlerin mümkün olduğu durumlarda özel cevabın elde edilmesi başlangıç koşullarına hassasiyet gösterir. Bu, maksimum cevabın düşük bir genlik cevabına geçiş yapmadan (atlamadan) elde edilmesini zorlaştırır. Sunulan bu yaklaşım yukarıdaki zorlukları ortadan kaldırmıştır.

#### 5. KAYNAKLAR

1. Wright, J.H.G., Marshfield, W.B., Ship Roll Response and Capsize Behaviour in Beam Seas, Trans. Royal Inst of Naval Architects, Vol 122, pp.129-148, 1980.
2. Cardo, A., Francescutto, A., Nabergoj, R., Ultraharmonics and Subharmonics in the Rolling Motion of a Ship: Steady State Solution, Int. Shipbuilding Progress, Vol 28, No.326, pp.234-251, 1981.
3. Nayfeh, A.H., Khdeir, A.A., Nonlinear Rolling of Ships in regular Beam Seas, Int. Shipbuilding Progress, Vol 33, No.379, pp.40-49, 1986.
4. Senjanovic, I., Harmonic Analysis of Nonlinear Oscillations of Cubic Dynamical Systems, J. Ship Research, Vol 38, No.3, pp.225-238, 1994.
5. Peyton Jones, J.C., Çankaya, İ., Generalized Harmonic Analysis of Nonlinear Ship Roll Dynamics, Journal of Ship Research, Vol. 40, No. 4, pp. 39-48, 1996.
6. Peyton Jones, J.C., Çankaya, İ., A Note on the Computation of Maksimum Roll Amplitudes in Regular Beam Seas, Journal of Ship Research, Vol. 41, No. 3, pp. 224-229, 1997.
7. Peyton Jones, J.C., Generalised Describing Functions for a Class of Nonlinear Difference and Differential Equation Models, Proceedings IFAC NOLCOS'95, Lake Tahoe, USA, pp. 901-906, 1995.

8. Peyton Jones, J.C., Çankaya, İ., The Effect of a Constant Heeling Moment on the Main and Superharmonic Roll Response of a Ship in Regular Beam Seas, International Shipbuilding Progress, Vol. 46, No. 446, pp. 165-187, 1999.
9. Nayfeh, A.H., Mook, D.T., Nonlinear Oscillations, Wiley Interscience, New York, 1979.
10. Peyton Jones, J.C., Zhuang, M., A Simulation Toll for Nonlinear Frequency Response Investigations, Proceedings, European Simulation Multi-Conference, Barcelona, Spain, pp. 136-140, 1994.
11. Çankaya, İ., Simülasyon İçin Başlangıç Değerlerinin Seçimi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 2002 (teslim edildi).