



**YANAŞAN BİR GEMİNİN HAREKETLERİNİN
ZAMANIN BAĞLISI OLARAK MODELLENMESİ**
*(TIME DOMAIN MODELLING OF SHIP MOTIONS
DURING THE BERTHING)*

Gökdeniz Neşer*

ÖZET/ABSTRACT

Yanaşma yapılarının tasarımı, genellikle yanaşan gemilerin sahip olduğu kinetik enerjinin usturma sistemi tarafından tamamıyla sönmüldüğü yaklaşımını içerir. Tanım olarak usturma yapıları; gemilerin yanaşma yapılarına güvenle yanaşmasını sağlayan, yanaşma yapısını çarpmanın olumsuz etkilerinden koruyan ve gemilerin bağlıken de güven içinde kalmalarına yardımcı olan donanımlardır. Bu çalışmada yanaşma yapılarının tasarımına yeni bir bakış açısı getirmek amacıyla, bir geminin yanaşma-çarpma-ayırılma aşamalarından oluşan yanaşma zamanının bağıslı olarak irdelenmiştir. Yanaşma, temel öğeleri gemi, usturma sistemi ve yanaşma yapısı olan ve bu öğeler arasındaki etkileşimin yanaşma koşulları ve çevresel koşullarla sağlandığı bir sistem olarak algılanmıştır. Bir gemiye etkiyen, doğrusal olmayan etmenleri içerebilecek bir modelleme yapabilmek için geminin hareket denklemlerinin zamanın bağıslı olarak formüle edilmesi gerekir. Buna olanak tanıyan, yani dış yükler etkisiyle oluşmuş hidromekanik tepkime kuvvetlerinin ve momentlerinin elde edilmelerini sağlayan Cummins'in klasik formülasyonu ve bu formülasyona ilişkin Ogilvie'nin geliştirmeleri bu çalışmanın temelini oluşturur. Anılan denklemlerin sağ tarafını oluşturan dış yüklere, usturma yüklerinin eklenmesi Neşer tarafından gerçekleştirilmiştir. Ortaya çıkan matematiksel model, İzmir Körfezi'nde çalışan bir yolcu gemisine uygulanmıştır.

When designing a berthing structure generally an approach is used in which it is assumed the energy to be absorbed by fenders should be equal the kinetic energy of the ship. By definition, fenders makes ships berth safely, protect piers from shock, allow ships more safely after berthing. In this study, berthing problem which consists berthing, collision and leaving has been investigated and solved the time domain. For the mathematical model to simulate the external loads and the behaviour of a ship berthing to an open structure, Cummins equation solved in the time domain has been used. To add fender forces to other external loads of right hand side of Cummins equation, a program has been developed by Neşer. As a case study, a ship which is operating in marine transportation in Izmir Bay has been chosen.

ANAHTAR KELİMELELER/KEYWORDS

Usturma kuvvetleri, Gemi hareketleri, Zamanın bağıslı modelleme
Fender forces, Ship motions, Time domain modelling

* DEÜ Deniz Bilimleri ve Teknolojisi Enstitüsü, İnciraltı, 35340, İZMİR

1. GİRİŞ

Bu çalışmanın konusu olan ‘yanaşma problemi’nin çözüm yöntemlerinin, gemi inşaatı bilim dalında uyarlanabileceği alan oldukça geniştir. Bu yöntemler; patlamaya maruz kalan, çarpışma riskinin yüksek olduğu askeri gemilerin tasarımından, çarpma veya karaya oturma gibi kazaya uğramaları halinde doğal çevrede onarılamaz tahribatlara yol açabilecek petrol ve kimyasal madde nakliyatı amaçlı tankerlerin tasarımına kadar yararlanabilecek birer araç olabilirler.

Bunun yanında, deniz yapıları da etkinliklerini birçok risk altında gerçekleştirirler ki, bunlar içinde yapıya gemi çarpması temel risklerden biridir. Yapıların maruz kaldığı ve belli sıklıkla oluşan küçük çarpmalar da tasarımda önemli bir rol oynarken, çok daha az olasılıkla oluşan büyük çarpmalar insan yaşamına, gemiye ve yanaşma yapısına, doğal çevreye zarar verirler.

Yanaşma probleminin çözümüne duyulan gereksinim, bütün bu uygulama alanlarıyla birlikte yanaşma yapılarının usturma sistemlerinin tasarımında tasarımcının karşısına çıkar.

Bilindiği gibi, genel olarak bir yanaşma yapısı, rijid bir yapıya bağlı bir ya da birden çok elastik elemana sahiptir. ‘Usturma’ adı verilen bu elastik elemanlar, yanaşma yüklerini sönmüleyerek gemiyi ve yanaşma yapısını korumak amacıyla formlarını değiştirirler. Bir geminin yanaşma manevrası sırasında ortaya çıkan olgular karmaşıktır ve böyle olunca usturma yükleri de birçok değişkenden etkilenirler; yanaşma yapılarının konumu ve konstrüksiyonu, geminin geometrisi ve rijidliği, usturmaçaların mekanik özellikleri, yanaşma hızı, dalga, rüzgar, akıntı ve eğer yanaşma römorkör destekliyse römorkörden kaynaklanan yükler, suyun derinliği.

Bir yanaşma yapısının başarılı olarak nitelenmesi, yanaşma güvenliğinin ve kargo elleçleme donanımlarının etkin ve verimli çalışmasına bağlıdır. Yanaşma yapılarının tasarımı aşamasında bütüncül bir yaklaşım, gemi hareketlerinin genliklerinin aşırılması olumsuzluğunu giderebilecektir. Örneğin uygun dalgakıranlar ve benzeri koruma yapıları bu aşırılığı azaltırken, yanaşma periyodunda (yanaşma-çarpma-ayrılma) görev yapacak usturma ve bağlama sistemlerinin uygun seçimi, doğru donanımı ve kullanımı bu azalmaya yardımcı olacaktır.

Bu çalışmadaki, tasarlanan matematik modeldeki çarpma dış yüklerinin usturmaçanın karakteristiklerine bağlı olarak değiştirilmesi sistematiğiyle uygun donanım seçimi gerçekleştirilebilmektedir. Buradan anlaşılacağı gibi kurulan model tasarımdan çok, tasarlanmış sistemler içinde uygun olanların seçimine yönelik olarak kullanılabilir. Bununla birlikte kurulan sistemden yararlanılarak tasarım için de değişik yaklaşımlar üretilebilir.

2. GEMİ HAREKETLERİNİN ZAMANIN BAĞLISI OLARAK TANIMLANMASI

Konuya yakın olanlarca iyi bilinen yüzen bir cismin hareketlerinin frekansa bağlı formülasyonlarının irdelenmesiyle, cismin hareketlerine etkiyen herhangi bir sistem bu cismin yer değiştirmesi, hızı ve ivmesiyle lineer bir ilişki içinde olmalıdır. Oysa yüzen bir cismin karşılaşacağı birçok durum bu lineer ilişkiyi ortadan kaldırabilecek etkilere açıktır. Bu bakımdan frekansın bağılı olarak tanımlanan hareket denklemleri bu hallerde gerçeğe yakın sonuçlara ulaşılmasına yardımcı olmazlar. Yüzen bir cisme etkiyen dış etmenler sinüzoidal ve doğrusal bir karakterde olmadığı yani, frekansın bağılı denklemlerin hareketi tanımlamakta yetersiz kalacağı durumlara örnek olarak zamana göre değişken/kararsız akıntı, rüzgar, bağlama, demirleme ve yanaşma kuvvetlerinin tesiri verilebilir.

Bu doğrusal olmayan karakterdeki etkileri gemi hareketleriyle bağdaştırabilmek için bu hareketleri zamanın bağılı olarak tanımlamak gerekir ki bu tanım yardımıyla dış kuvvetlerin

ve momentlerin, tepki kuvvetlerinin ve momentlerinin ve gemi hareketlerinin anlık değişimi irdelenebilsin.

2.1. Cummins Denklemleri

Bu çalışmada, yukarıda anılmış olan zamanın bağılısı olarak değişen gemi hareketlerinin tanımlanmasında temel olarak Cummins'in klasik formülasyonu ve bu formülasyon üzerinde Ogilvie'nin gerçekleştirdiği düzenlemelerden yararlanılmıştır (Cummins, 1962; Ogilvie, 1964). Bu bağlamda yüzen cisim girdisi doğrusal ve açısal hızlar ve çıktısı hidromekanik tepki kuvvetleri ve momentleri olan bir lineer sistem olarak göz önüne alınmıştır.

Cisim $t=t_0$ anında hareketsiz haldedir. Bu andan sonra cisme bir Δt kısa zaman periyodunda, sabit bir V hızıyla impulsif bir Δx yer değiştirmesi uygulanmıştır (Eşitlik 1).

$$\Delta x = V \cdot \Delta t \quad (1)$$

Bu impulsif yer değiştirme sırasında su zerrecikleri hareket etmeye başlayacaktır. Akışkanın çevrintisiz, V ile lineer olarak orantılı bir hız potansiyeli, Φ 'ye sahip olduğu varsayımıyla Eşitlik 2 yazılır.

$$\Phi = V \cdot \Psi, \quad t_0 < t < t_0 + \Delta t \quad (2)$$

Burada Ψ terimi normalleştirilmiş hız potansiyelidir. Sözkonusu impulsif Δx yer değiştirmesi sona erdikten sonra dahi su zerrecikleri hareket halindedir. Sistemin lineerliği varsayımı gereği Φ hız potansiyeli ile tanımlanan akışkanın hareketi, impulsif Δx yer değiştirmesiyle orantılıdır (Eşitlik 3).

$$\Phi = \chi \cdot \Delta x, \quad t > t_0 + \Delta t \quad (3)$$

χ terimi yine normalleştirilmiş hız potansiyelidir. $(t_0, t_0 + \Delta t)$ periyod aralığındaki Δx impulsif yer değiştirmesi, akışkanın hareketini yalnız bu zaman aralığında değil, bunu takip eden diğer zaman aralıklarında da etkileyecektir. Bunun bir anlamı da, $(t_0, t_0 + \Delta t)$ aralığındaki hareketlerin bu zaman aralığından önceki hareketlerden de etkilendiğidir.

Cisim zamana göre değişen, keyfi etkiler altındayken cismin hareketi her bir etkinin yol açtığı impulsif yer değiştirmelerin, bileşkesi olarak irdelenebilir. Bundan hareketle, $(t_n, t_n + \Delta t)$ zaman aralığındaki hız potansiyeli Eşitlik 4'teki gibi yazılabilir.

$$\Phi(t) = \sum_{j=1}^6 \left[V_{j,n} \Psi_j + \sum_{k=1}^n [\chi_j(t_{n-k}, t_{n-k} + \Delta t) V_{j,k} \cdot \Delta t] \right] \quad (4)$$

Bu ifadede;

n : zaman adım sayısı,

t_n : $t_0 + n \cdot \Delta t$,

t_{n-k} : $t_0 + (n-k) \cdot \Delta t$,

$V_{j,n}$: $(t_n, t_n + \Delta t)$ periyodunda, j 'inci hız bileşeni,

$V_{j,k}$: $(t_{n-k}, t_{n-k} + \Delta t)$ periyodunda, j 'inci hız bileşeni,

Ψ_j : $(t_n, t_n + \Delta t)$ periyodunda, j yönündeki deplasman nedeniyle oluşan normalleştirilmiş hız potansiyeli

χ_j : $(t_{n-k}, t_{n-k}+\Delta t)$ periyodunda, j yönündeki deplasman nedeniyle oluşan normalleştirilmiş hız potansiyeli.

Δt 'nin sıfıra yaklaştığı varsayımıyla, hız potansiyeli için Eşitlik 5'deki sonuca ulaşılır.

$$\Phi(t) = \sum_{j=1}^6 \left[\dot{x}_j(t) \cdot \Psi_j + \int_{-\infty}^t \chi_j(t-\tau) \cdot \dot{x}_j(\tau) \cdot d\tau \right] \quad (5)$$

Burada $x(t)$ terimi, t zamanında j'inci hız bileşenini anlatır. Bernouilli denklemi yardımıyla, akışkanın oluşturduğu basınç alanı ise Eşitlik 6'daki gibi yazılabilir.

$$p = -p \cdot \frac{\partial \Phi}{\partial t} \quad (6)$$

Bu basınç ifadesinin yüzen cismin ıslak alanı boyunca integrasyonu, bu cismin bünyesinde oluşan hidrodinamik kuvvetler ve momentler, F_i elde edilecektir (Eşitlik 7). Burada n_i yüzeyin kosinüs doğrultmanıdır.

$$F_i = - \iint_S p \cdot n_i \cdot dS = \sum_{j=1}^6 \left[\left[p \cdot \iint_S \Psi_j \cdot n_i \cdot dS \right] \ddot{x}_j + \int_{-\infty}^t \left[p \cdot \iint_S \frac{\partial \chi_j(t-\tau)}{\partial t} \cdot n_i \cdot dS \right] \dot{x}_j(t) \cdot d\tau \right] \quad (7)$$

Eşitlik 7'de aşağıdaki tanımlamaları yaparak ve lineer yerine getirici yay terimleri olan “ $C_{i,j}, x_j$ ” terimini de ekleyerek hareketlerin zamana bağlı ifadeleri Eşitlik 10'daki hale gelir.

$$A_{i,j} = p \cdot \iint_S \Psi_j \cdot n_i \cdot dS \quad (8)$$

$$B_{i,j}(t) = p \cdot \iint_S \frac{\partial \chi_j(t-\tau)}{\partial t} \cdot n_i \cdot dS \quad (9)$$

$$F_i = \sum_{j=1}^6 \left[A_{i,j} \cdot \ddot{x}_j(t) + \int_{-\infty}^t B_{i,j}(t-\tau) \cdot \dot{x}_j(\tau) \cdot d\tau + C_{i,j} \cdot x_j(t) \right] \quad (10)$$

Burada;

$A_{i,j}$: Hidrodinamik kütle (ek su kütlesi) matrisi,

$B_{i,j}(t)$: Geciktirme (retardation) fonksiyonu matrisi,

C_{ij} : Yay terimleri matrisidir.

Sönümü ifade eden bölümdeki integral sınırları, “ $t-\tau$ ” yerine “ τ ” konularak değiştirilirse, hareket denklemleriyle hidromekanik kuvvet ve momentler arasındaki ilişkiyi zamanın bağılı olarak veren bu anlatım Eşitlik 11'deki şeklini alır.

$$\sum_{i=1}^6 \left[(M_{i,j} + A_{i,j}) \ddot{x}_j(t) + \int_{-\infty}^t B_{i,j}(t-\tau) \cdot \dot{x}_j(\tau) \cdot d\tau + C_{i,j} \cdot x_j(t) \right] = F_i(t), \quad i = 1, 2, \dots, 6 \quad (11)$$

Lineer, yerine getirici yay terimleri $C_{3,3}$, $C_{3,5}$, $C_{4,4}$, $C_{5,3}$ ve $C_{5,5}$ yüzen cismin su altı geometrisinden ve ağırlık merkezinin yerinden yararlanılarak saptanabilir. Burada belirtilmeyen diğer $C_{i,j}$ 'ler sıfırdır.

Eşitlik 11'deki $A_{i,j}$ ve $B_{i,j}$ terimlerini saptayabilmek için Φ ve Ψ hız potansiyelleri elde edilmelidir ki bu oldukça karmaşık bir yoldur. Terimlerin eldesi için daha kolay bir yaklaşım, iki ya da üç boyutlu potansiyel teoriiyi temel alan, frekans domeninde bir yaklaşıma sahip yazılımlardan yararlanarak hidrodinamik kütle ve sönüm verilerini bulmaktır. Bu verilerden denklemlerin gereksindiği terimlere geçiş yapılabilecektir.

Yüzen bir cismin j doğrultusunda 1 genlikle harmonik salınım gerçekleştirdiği kabul edilsin (Eşitlik 12).

$$X_j=1.\cos(\omega.t) \quad (12)$$

Bu ifade Cummins bağıntısında yerine konursa ve eşitlik tekrar düzenlenirse Eşitlik 13 elde edilir.

$$\begin{aligned} & -\omega^2 \left[M_{i,j} + A_{i,j} - \frac{1}{\omega} \int_0^{\infty} B_{i,j}(\tau) \sin(\omega\tau) d\tau \right] \cos(\omega.t) + \\ & -\omega \left[\int_0^{\infty} B_{i,j}(\tau) \cos(\omega\tau) d\tau \right] \sin(\omega.t) + [C_{i,j}] \cos(\omega.t) = X_i(t) \end{aligned} \quad (13)$$

Anılan hareketlerin frekansın bağılısı olarak ifadeleri ise Eşitlik 14'deki gibidir (Journée, 1993).

$$-\omega^2 \cdot [M_{i,j} + a_{i,j}(\omega)] \cos(\omega.t) - \omega \cdot [b_{i,j}(\omega)] \sin(\omega.t) + [c_{i,j}] \cos(\omega.t) = X_i(t) \quad (14)$$

Eşitlik 14'de,

$a_{i,j}(\omega)$: Frekansın bağılısı hidrodinamik kütle katsayısı,

$b_{i,j}(\omega)$: Frekansın bağılısı hidrodinamik sönüm katsayısı,

$c_{i,j}$: Yerine getirici yay katsayısıdır.

Zamanın bağılısı ve frekansın bağılısı hareket denklemlerinin karşılaştırılmasıyla her ikisinin sahip olduğu lineer terimlerin Eşitlik 15, Eşitlik 16 ve Eşitlik 17'deki gibi bir bağıntıya sahip olduğu görülecektir (Ogilvie, 1964).

$$a_{i,j} = A_{i,j} - \frac{1}{\omega} \int_0^{\infty} B_{i,j}(\tau) \sin(\omega\tau) d\tau \quad (15)$$

$$b_{i,j}(\omega) = \int_0^{\infty} B_{i,j}(\tau) \cos(\omega\tau) d\tau \quad (16)$$

$$c_{i,j} = C_{i,j} \quad (17)$$

Fourier dönüşümü yardımıyla, sönüm terimleri geciktirme fonksiyonu olarak ve kütle terimleri ise yine Eşitlik 18 ve Eşitlik 19'da belirtilen formda yazılabilecektir.

$$B_{i,j}(t) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} b_{i,j}(\omega) \cdot \cos(\omega t) \cdot d\omega \quad (18)$$

$$A_{i,j} = a_{i,j}(\omega) + \frac{1}{\omega} \int_0^{\infty} B_{i,j}(\tau) \cdot \sin(\omega t) \cdot d\tau \quad (19)$$

Bununla birlikte, yay matrisinin frekans domenindeki sabit değeri korunmaktadır (Eşitlik 20).

$$C_{i,j} = c_{i,j} \quad (20)$$

2.2. Hareket Denklemleri

Geminin zamana bağlı hareketlerini tanımlamak üzere Şekil 1’de sunulan koordinat sisteminden yararlanılacaktır. Şekil 1’deki koordinat sistemi aşağıdaki elemanlardan oluşmaktadır:

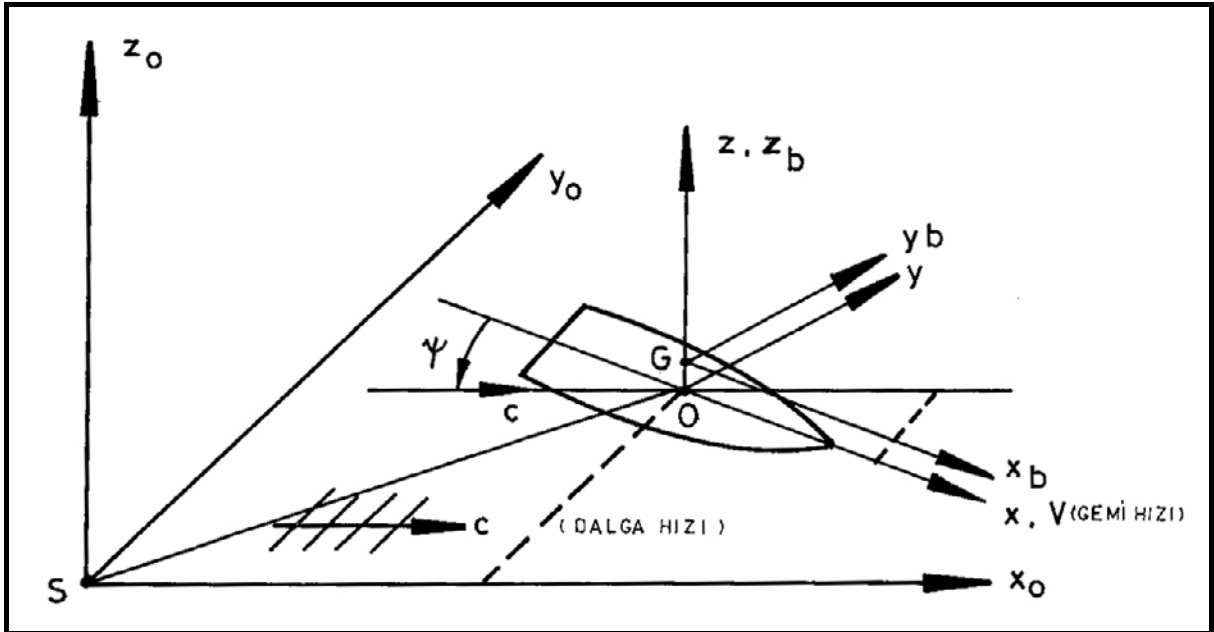
G-(X_b, y_b, z_b) : Ağırlık merkezi G’den gemiye bağlı koordinat sistemi

S-(x_0, y_0, z_0) : Uzayda bir noktaya bağlı, global koordinat sistemi

“O” : Sakin su yüzeyindedir.

G-(x, y, z) ya da G-(x_1, x_2, x_3): Geminin yaptığı yer değiştirmelerle, yani gemiyle birlikte hareket eden ve ağırlık merkezi G’den gemiye bağlı koordinat sistemi.

Geminin açılma hareketleri ise burada anılan eksenlerle ilişkilendirilerek şu şekilde anılacaktır: φ ya da x_4 (yalpa), θ ya da x_5 (baş-kıç vurma), ψ ya da x_6 (savrulma).



Şekil 1. Koordinat sistemi

Buna göre geminin (x_0, y_0, z_0) eksen takımına göre hızları, ağırlık merkezine göre hızlarından Eşitlik 21–Eşitlik 26’da verilen bağıntılar yardımıyla elde edilir.

$$\dot{x}_0 = \dot{x} \cdot \cos \psi - \dot{y} \cdot \sin \psi \quad (21)$$

$$\dot{y}_0 = \dot{x} \cdot \sin \psi + \dot{y} \cdot \cos \psi \quad (22)$$

$$\dot{z}_0 = \dot{z} \quad (23)$$

$$\varphi_0 = \dot{\varphi} \quad (24)$$

$$\theta_0 = \dot{\theta} \quad (25)$$

$$\psi_0 = \dot{\psi} \quad (26)$$

(x,y,z) eksen sisteminde hareketin Euler eşitlikleri yazılacak olursa Eşitlik 27–Eşitlik 32’de verilen bağıntılar elde edilir.

$$M \left(\ddot{x} - \dot{y} \cdot \dot{\psi} + \dot{z} \cdot \dot{\theta} \right) = X_{1h} + X_{1v} + X_{1ext}(t) \quad (27)$$

$$M \left(\ddot{y} + \dot{x} \cdot \dot{\psi} - \dot{z} \cdot \dot{\varphi} \right) = X_{2h} + X_{2v} + X_{2ext}(t) \quad (28)$$

$$M \left(\ddot{z} - \dot{x} \cdot \dot{\theta} + \dot{y} \cdot \dot{\varphi} \right) = X_{3h} + X_{3v} + X_{3ext}(t) \quad (29)$$

$$I_{xx} \cdot \ddot{\varphi} - (I_{yy} - I_{zz}) \cdot \dot{\theta} \cdot \dot{\psi} = X_{4h} + X_{4v} + X_{4ext}(t) \quad (30)$$

$$I_{yy} \cdot \ddot{\theta} - (I_{zz} - I_{xx}) \cdot \dot{\varphi} \cdot \dot{\psi} = X_{5h} + X_{5v} + X_{5ext}(t) \quad (31)$$

$$I_{zz} \cdot \ddot{\psi} - (I_{xx} - I_{yy}) \cdot \dot{\varphi} \cdot \dot{\theta} = X_{6h} + X_{6v} + X_{6ext}(t) \quad (32)$$

Bu denklemlerdeki ‘h’ alt indisi lineer potansiyel hidromekanik yükleri, ‘v’ alt indisi lineer olmayan viskoz hidromekanik yükleri ve ‘ext’ alt indisi ise dış yüklerin zaman serilerini anlatmakta kullanılmıştır. Çalışmada lineer olmayan viskoz yükler ihmal edilmiştir. Yine Eşitlik 27–Eşitlik 32’de M, toplam kütle ve I değerleri ise alt indislerinde verilen eksenlerdeki kesit atalet momentlerini ifade etmektedir.

2.3. Dış Yükler

Dış yüklerin etkisinde yaşanan bir geminin hareketleri temelinde irdelenecek olan ‘yanaşma problemi’, temel öğeleri gemi, usturmaça sistemi ve yanaşma yapısı olan bir sistem olarak göz önüne alınmıştır. Sistemin temel öğeleri arasındaki etkileşim ise çevresel koşullar, yani doğa koşulları ve yanaşma koşullarınca belirlenmektedir.

Anılan bu sistem geminin zamana bağlı hareket denklemleriyle ifade edilmektedir. Hareket denklemlerini sağ tarafında, ‘ext’ alt indisiyle yer alan zamanın bağılı dış yüklerle ilişkin yaklaşımlar aşağıdaki bölümlerde ayrıntılandırılmıştır.

2.3.1. Dalga Yükleri

Dalgalar tarafından oluşturulan kuvvet ve momentlerin zamanın bağılısı bir girdi olarak tanımlanması gerekliliği dalgaların enerji spektrumlarından yararlanarak gerçekleştirilmiştir.

Bilindiği gibi, geminin karışık deniz durumundaki davranışlarının hesabı, ilk olarak St. Denis ve Pierson tarafından ortaya atılan lineer süperpozisyon tekniğine dayanmaktadır (Denis ve Pierson, 1953).. Anılan araştırmacılar, geminin birçok sinüs dalgasına verdiği karşılıkların toplamının bu dalgaların toplamından oluşan ortama verdiği karşılığa eşit olduğunu varsaymışlardır. Bu varsayım, karışık denizde ilerleyen bir geminin hareketlerini düzgün dalgalarındaki gemi hareketleri ve geminin seyir yaptığı denizin özellikleri yardımıyla çözümlenmesine olanak sağlamaktadır. Ancak birçok deniz için anılan dalga ölçümlerinin varolmaması, dalga özelliklerinin daha kolay elde edilebilen meteorolojik verilere dayanılarak tahmin edilmesini zorunlu kılmış ve bu amaçla dalga enerjisini rüzgar hızının fonksiyonu olarak tanımlayan ve ‘dalga enerjisi spektrumu’ olarak adlandırılan yarı ampirik bağıntılar geliştirilmiştir (Gerritsma ve Beukelman, 1972). Bu çalışmanın temelini oluşturan algoritma kurulurken; tek boyutlu, kararlı olmayan dalgaların spektrumları için iki parametrelilik dalga spektrumlarından yararlanılmıştır.

Dalga genlikleri ξ_{an} , N adet düzgün dalga bileşeninin süperpoze edilmesiyle oluşturulmuş, kararlı olmayan deniz durumunu anlatan enerji spektrumları $S_{\xi\xi}$ 'dan elde edilmektedir. Bu genliklerin zamana bağlı tanımı ise Eşitlik 33'deki bağıntı ile verilmektedir.

$$\zeta(t) = \sum_{n=1}^N \zeta_{an} \cdot \cos(\omega_n \cdot t - \varepsilon_{\zeta n}) \quad (33)$$

Bu ifadede Eşitlik 34'de verilen faz açısı ε_{an} , random olarak seçilecektir.

$$\zeta_{an} = [2 \cdot S_{\xi\xi}(\omega_n) \cdot \Delta\omega_n]^{1/2} \quad (34)$$

Bu değer için random üretici birimi olmadan da, faz açısını örneği $1000 \cdot \sin(n)$ ifadesinin ondalık kısmından da kolaylıkla elde etmek mümkündür (Eşitlik 35).

$$\varepsilon_{\zeta n} = [1000 \cdot \sin(n) - \text{INT}(1000 \cdot \sin(n))] \cdot 2\pi \quad (35)$$

Buradaki frekans aralığı $\Delta\omega_n$ ise, sabit bir değer olarak seçilebilir: $\Delta\omega$. Bunun anlamı, dalga kuvvetleri ve momentlerinin zamana bağlı olarak anlatımı tekrarlı bir T_{repeat} zaman aralığından sonra tekrarlanacaktır (Eşitlik 36).

$$T_{\text{repeat}} = \frac{2 \cdot \pi}{\Delta\omega} \quad (36)$$

Bu zaman aralığında $H_{1/3}$ (belirgin dalga yüksekliği) ve T_2 (dalgaların sıfırı kesme periyodu) kolaylıkla tanımlanabilecektir.

Dalga kuvvetleri ve momentlerinin birinci mertebeli bileşenleri, temelde hareketlerin frekansın bağılısı değerlerinden elde edilmektedir. Frekansın bağılısı hareket denklemlerini elde edebilmek için, dilim teorisine dayanan birçok yazılım günümüzde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada ise, Delft Teknoloji Üniversitesi Deniz ve Makine Mühendisliği Bölümü öğretim üyesi Dr. J. M. J. Journée tarafından geliştirilmiş SEAWAY

yazılımının özel bir versiyonu olan SEAWAY-D adlı yazılımdan yararlanılmıştır (Journee, 1993a; Journee, 1993b; Journee, 1996).

Kararlı olmayan deniz durumunun oluşturduğu birinci mertbe kuvvet ve momentler zaman temelinde Eşitlik 37'deki gibi ifade edilecektir.

$$F_{wi}(t) = \sum_{n=1}^N \left[\frac{F_{wa}}{\zeta_a}(\omega) \cdot \zeta_{an} \cdot \cos(\omega_n \cdot t + \varepsilon_{cn} + \varepsilon_{F\zeta\zeta}) \right]; i = 1, 2, \dots, 6 \quad (37)$$

İkinci mertbe dalga kuvvetleri ve momentleri ise demirlemiş, bağlanmış sistemlerin hareketlerinde etkindir. Eğer böyle bir sistemin sönümsüz olan doğal frekansı düşük frekans alanına düşerse, ikinci mertbe sürüklenme kuvvetleri veya momentleri etkin hale geçerler. Bu çalışmadaki uygulamada ikincil dalga kuvvet ve momentleri göz önüne alınmamıştır.

2.3.2. Rüzgar ve Akıntı Yükleri

Rüzgar ve akıntı yüklerinin her ikisi de hız ve bu hızın yön vektörleriyle ifade edilirler. Vektör için ayrıca bir işaret tanımlaması gerekecektir ki, bunun için t=0 anında, geminin kıçından gelen rüzgar veya akıntı sıfır pozisyonunda ve gemiyi sancağa döndüren söz konusu etkilerin ise pozitif yönde olduğu varsayımı yürütülür. Çalışmada her iki etkinin yalnız geminin ilerleme, yan öteleme ve savrulma hareketleri üzerinde geçerli olduğu varsayılmıştır.

Örnek olarak rüzgar yüklerinin etkisini irdelemek yeterli olacaktır. Bununla birlikte, aşağıda sunulan açıklamada rüzgar yüklerini simgeleyen 'w' indisi yerine, akıntıyı simgeleyen 'c' indisinin yerleştirilmesiyle akıntıya ait etkiler de gösterilebilir.

Gemiye bağlı eksen sisteminde, t=0 anında rüzgar hızının kosinüs ve sinüs bileşenleri Eşitlik 38 ve Eşitlik 39'daki gibidir.

$$V_{wrc} = V_w \cdot \cos(\alpha_w - \psi) - \dot{x} G \quad (38)$$

$$V_{wrs} = V_w \cdot \sin(\alpha_w - \psi) - \dot{y} G \quad (39)$$

Bu değerlerden yola çıkılarak görece rüzgar hızı ve görece rüzgar doğrultusu Eşitlik 40 ve Eşitlik 41'deki gibi verilebilir.

$$V_{wr} = [V_{wrc}^2 + V_{wrs}^2]^{1/2} \quad (40)$$

$$\alpha_{wr} = \arctan \left[\frac{V_{wrs}}{V_{wrc}} \right] \quad (41)$$

Direnç katsayıları yardımıyla anılan hareket modlarında rüzgar yükleri ise Eşitlik 42–Eşitlik 47'deki gibi alınacaktır.

$$F_{w1} = C_{w1} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_w \cdot V_{wr}^2 \cdot A_r \quad (42)$$

$$F_{w2} = C_{w2} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_w \cdot V_{wr}^2 \cdot A_L \quad (43)$$

$$F_{w3}=0 \quad (44)$$

$$F_{w4}=0 \quad (45)$$

$$F_{w5}=0 \quad (46)$$

$$F_{w6} = C_{w6} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_w \cdot V_{wr}^2 \cdot A_L \cdot L \quad (47)$$

Yukarıdaki kuvvet ve moment formülasyonlarında geçen direnç katsayıları C_{wi} , α_{wr} 'nin bağılı olarak farklı değerler alırlar. Gerçek α_{wr} değerine karşılık gelen C_{wi} interpolasyonla bulunmalıdır. Eğer gerçek α_{wr} değeri π 'den büyük ise ve C_{wi} ise $0 < \alpha_{wr} < \pi$ arasında tanımlanmışsa Eşitlik 48–Eşitlik 50'deki değerler esas alınmalıdır.

$$\alpha_{wr} = 2 \cdot \pi - \alpha_{wr} \quad (48)$$

$$F_{w2} = -F_{w2} \quad (49)$$

$$F_{w6} = -F_{w6} \quad (50)$$

2.3.3. Usturmaça Yükleri

Daha önce de belirtildiği gibi, usturmaçaların karakteristikleri sahip oldukları enerji sönmüleme yetenekleriyle belirlenir. Bu bölümde ise, usturmaça yüklerinin elde edilmesi için ilgili literatürde 'Kinetik Enerji Yöntemi' olarak anılan yöntemden yararlanarak geliştirilmiş bir yaklaşım anlatılacaktır (Costa, 1978; Janava ve Jiang, 1983).

Yanaşan geminin sahip olduğu ve yanaşma yapısına aktardığı kinetik enerji Eşitlik 51'deki gibi varsayılmaktadır.

$$E = \frac{1}{2} \cdot M \cdot v^2 \cdot C \quad (51)$$

M: geminin kütlesi,

v: geminin yanaşma hızı ve

C: yanaşma koşulları katsayısıdır.

2.3.3.1. Geminin Kütlesi

Üzerinde çalışılan yöntemde, geminin kütlesinin geminin deplasmanı ve ek su kütlesinin toplamından oluştuğu yaklaşımı geçerlidir. Yazar tarafından geliştirilen yazılım gemi formunu girdi olarak alıp deplasmanı hesaplayabildiği gibi ek su kütlesi için de uygun deneysel tanımlamaları kullanabilmektedir (Girgrah, 1977).

2.3.3.2. Geminin Yanaşma Hızı

Yanaşma hızı için yine deneysel verilere başvurulabileceği gibi, bu çalışmada da kullanılan gözlemsel değerlerle de hesaplama yapılabilecektir.

2.3.3.3. Yanaşma Koşulları Katsayısı

Bu katsayı; geminin yanaşma geometrisi, yanaşma hızı ve yanaşma yapısının özelliklerine bağlı olarak geminin sahip olduğu enerjinin ne kadarının usturmaça tarafından sönmülenebileceğini anlatmaktadır. Sözü edilen bir usturmaça sistemi değil, tek bir birim usturmaçadır ki, enerji sönmüleme etkinliğinin yalnızca bir usturmaça tarafından gerçekleştirilebileceği gibi bir tasarım yaklaşımını içerir.

Yani C katsayısı temel olarak üç etmenin bileşkesidir (Eşitlik 52).

$$C=C_e.C_d.C_c \quad (52)$$

Burada;

C_e : eksantrisite etmeni,

C_d : geminin dış yüzeyi deformasyonu etmeni ve

C_c : yanaşma yapısı etmenidir.

a. Eksantrisite Etmeni, C_e

Yanaşma geometrisiyle ilgili olan bu etmen; geminin boyuna ekseninde jirasyon yarıçapının, geminin yanaşma yapısına değdiği noktanın ve yanaşma hızı vektörü doğrultusunun bir fonksiyonudur. Geminin yanaşma yapısına değmeden önceki ve değdikten sonraki iki durumu için momentumun ve enerjinin korunumu prensipleri işletilerek, eksantrisite etmeni elde edilmektedir.

b. Geminin Dış Yüzeyi Deformasyon Etmeni, C_d

Bu etmen, geminin rijidliği ile usturmaçanın rijidliği arasındaki ilişkiyi tanımlamak için kullanılmaktadır. Bir başka deyişle, geminin sahip olduğu enerjinin ne oranda gemi kaplaması dış yüzeyinin deformasyonu ile, ne oranda usturmaçanın deformasyonu ile sönmüleneceğine dair bir kestirimi içerir.

Bazı literatürde bu etmene “yumuşaklık (softness) etmeni”de denilmektedir. Bu bağlamda usturmaçaların sertliğinin göstergesi, sönmüledikleri enerji miktarına bağlı olarak bünyelerinde doğan tepki kuvvetinin büyüklüğüdür. Usturmaça üreticileri, bu etmen için aşağıdaki önerileri sunmaktadırlar:

$C_d = 0.50$ (Çok az deformasyon yapan, rijid usturmaçalar için)

$C_d = 1.00$ (Çok deformasyon yapan, yumuşak usturmaçalar için)

$C_d = 0.77$ (Usturmaça belirtilmemişse)

c. Yanaşma Yapısı Etmeni, C_c

Yanaşma sırasında, geminin sahip olduğu ve usturmaça tarafından sönmülenmesi beklenen enerji miktarının belirlenebilmesi için önem taşıyan etmenlerden biri yanaşma yapısının türüdür. Çünkü, geminin sahip olduğu enerjinin bir kısmı da yapı tarafından sönmülenecektir. Yanaşma yapısının konstrüksiyonunu dikkate alan bu etmen için, şu öneriler geçerlidir:

$C_c = 0.80$ (Kapalı tip yanaşma yapıları için)

$C_c = 0.90$ (Esneyebilen-kazıklı-yanaşma yapıları için)

$C_c = 1.00$ (Yüzen tip yanaşma yapıları için)

Yukarıda unsurları tanımlanan yanaşma sistemine bağlı olan ve usturmaçanın sönümlenmesi istenen enerjinin niceliğinin elde edilmesi için yazar tarafından bir bilgisayar programı geliştirilmiştir. Anılan programda, birim usturmaçaların performans eğrileri veri olarak kullanılmıştır. Usturmaça üreticilerinin ürünleri için deneysel olarak geliştirdikleri enerji-tepki kuvveti ilişkilerinden ise, yanaşan geminin maruz kalacağı maksimum reaksiyon kuvveti elde edilmiştir. Gemiye etkiyen diğer dış yükler ise, bu reaksiyon yükünün zamanın bağılısı olarak tanımlanabilmesi için Eşitlik 53’de verilen model düşünülmüştür.

$$r(t) = \begin{cases} t \leq t_1, & r(t) = 0 \\ t_1 < t \leq t_1 + t_2, & r(t) = R(t) \\ t > t_1 + t_2, & r(t) = 0 \end{cases} \quad (53)$$

Bu ifadede,

t_1 : geminin zaman öyküsünde, usturmaça değdiği an,

t_2 : geminin zaman öyküsünde, usturmaçadan ayrıldığı andır.

$R(t)$: deneysel yaklaşımların da yardımıyla Eşitlik 54’deki gibi göz önüne alınacaktır.

$$R(t) = \frac{R_{\max}}{2} \left[1 + \cos \left[\frac{(t - t_1)}{t_2} \cdot 2\pi - \pi \right] \right] \quad (54)$$

Buradaki R_{\max} , belirtilen yanaşma koşullarında usturmaçada doğacak en büyük tepki kuvvetidir. Usturmaça yüklerinin geminin boy öteleme, yan öteleme ve savrulma hareketlerine etkiyeceği, yani boyuna düzlemde çalışacağı varsayımıyla yola çıkmıştır.

β , geminin ağırlık merkezine bağlı eksen sisteminde geminin usturmaçaya değme noktası ve ağırlık merkezinden geçen doğru ile, y_b arasındaki açı; m ise anılan noktalar arasındaki uzaklık olmak üzere usturmaça yükleri Eşitlik 55–Eşitlik 60’daki gibi yazılabilir.

$$F_{f1} = -r(t) \cdot \sin\beta \quad (55)$$

$$F_{f2} = -r(t) \cdot \cos\beta \quad (56)$$

$$F_{f3} = 0 \quad (57)$$

$$F_{f4} = 0 \quad (58)$$

$$F_{f5} = 0 \quad (59)$$

$$F_{f6} = -r(t) \cdot m \cdot \sin^2\beta + r(t) \cdot m \cdot \cos^2\beta \quad (60)$$

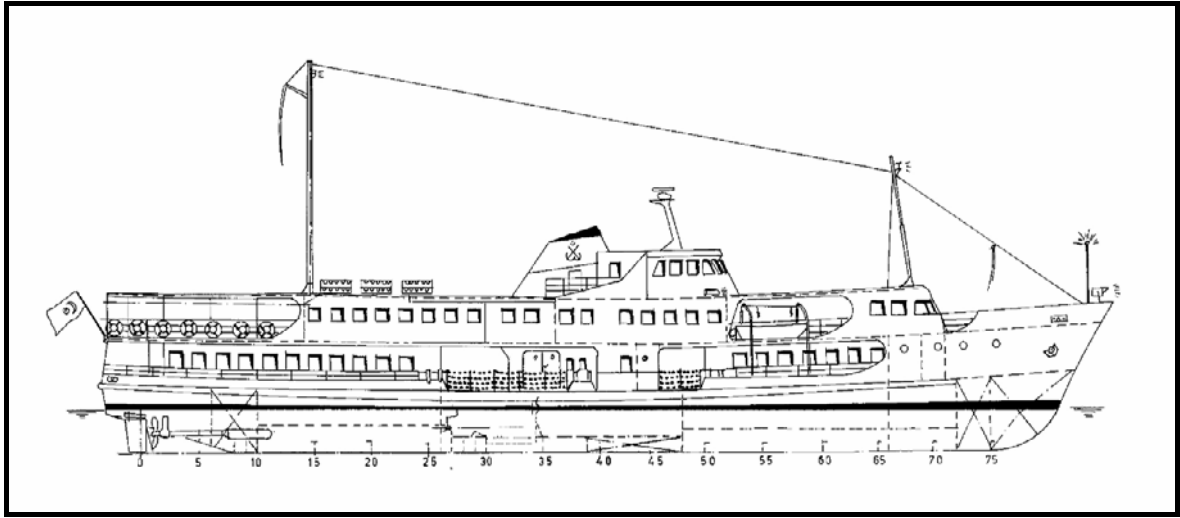
Fomülasyondan da anlaşılacağı üzere yükler, geminin baş taraftan ve iskele yönünde yanaşacağı varsayımına dayanmaktadır.

3. MATEMATİK MODELİN BİR YOLCU GEMİSİNE UYGULANMASI

3.1. Temel Girdiler

Çalışmada oluşturulan matematik modelin uygulanacağı gemi formu, halen İzmir Körfezi'nde yolcu taşımacılığı hizmeti veren 'Alaybey' ve 'Dokuz Eylül' adlı eş-gemilerin formudur. Söz konusu gemilerin formu Şekil 2'de sunulmaktadır. Modelin uygulanacağı forma ait temel değerler ise Çizelge 1'de verilmektedir.

Geminin yanaşma geometrisi ve koşullarına ilişkin değerler ise İzmir Körfezi'nde çalışan gemilerin manevralarının gözlemlenmesiyle elde edilmiştir. Bu yaklaşımlar Çizelge 2'de özetlenmektedir.



Şekil 2. Yolcu vapurunun profil görünümü

Çizelge 1. Yolcu vapuru formunun temel değerleri

Özellik	Birim	Değer
Tambo, L_{OA}	m	49.130
Suhattı boyu, L_{WL}	m	46.400
Dikmelerarası boy, L_{BP}	m	44.000
Maksimum genişlik, B_{MAX}	m	8.950
Derinlik, D	m	3.150
Ortakesitte draft, T_M	m	2.000
Kıç trim, t	m	0.000
Deplasman, Δ	t	380.275
Blok katsayısı, C_B		.5304
Enine metasankrik yükseklik, GM_T	m	.954
Boyuna metasankrik yükseklik, GM_L	m	81.768
Jirasyon yarıçapı, k_{xx}	m	3.176
Jirasyon yarıçapı, k_{yy}	m	11.000
Jirasyon yarıçapı, k_{zz}	m	11.000

Ayrıca İzmir Körfezi'ne ilişkin meteorolojik bültenler temel alınarak en rastlanan, ortalama denilebilecek oşinografik koşul göz önüne alınmıştır. Bu koşulun karakteristikleri ise Çizelge 3'te sunulmaktadır.

Çizelge 2. Yolcu vapurunun yanaşma geometrisi ve koşulları

Yanaşacağı iskele tipi	Bostanlı iskelesi (Esneyebilen yanaşma yapısı)
Yanaşacağı iskelede su derinliği	- 5.000 [m]
Yanaşma hızı	.5 [knot]
Yanaşma açısı	7°
Geminin dalgalarla karşılaşma açısı	135°

Çizelge 3. İzmir Körfezi'nin gözönüne alınan oşinografik koşulu

	En sık rastlanan, ortalama oşinografik koşul
Deniz durumu	3
Belirgin dalga yüksekliği, $H_{1/3}$ [m]	.88
Ortalama dalga periyodu, T [sn]	3.9
Rüzgar hızı [knot]	13.5
Rüzgar yönü	SE
Akıntı hızı [knot]	.10
Geminin akıntıyla karşılaşma açısı, [°]	0

Çalışmada karışık dalga değerlerine, düzgün dalga değerlerinden spektrum yöntemiyle geçilmektedir. İzmir Körfezi'nde bir çok adacık bulunduğu ve körfez karalarla çevrili kapalı bir deniz olduğundan dalgalar boylarına göre daha diktir ve denizin bu durumunu en iyi karakterize eden Jonswap Spektrumu'ndan yararlanılmıştır.

Yanaşma yapısının donatılacağı usturma sistemini oluşturan birim usturmaçalar, Shibata firmasının ürünlerinin katalog verilerinden yararlanılarak seçilmiştir (Shibata Industrial G.Ltd., 1989). Çizelge 3'te varsayılan koşuldan doğan, sönümlenmesi gereken enerji miktarına karşılık gelen, anılan firmaya ait 'V tipi' usturmaçanın özellikleri ise Çizelge 4'te verilmektedir. Bu usturmaça işlevini görürken burkulmaya çalıştığı için, literatürde 'burkulma tipi usturmaça' olarak yer almaktadır.

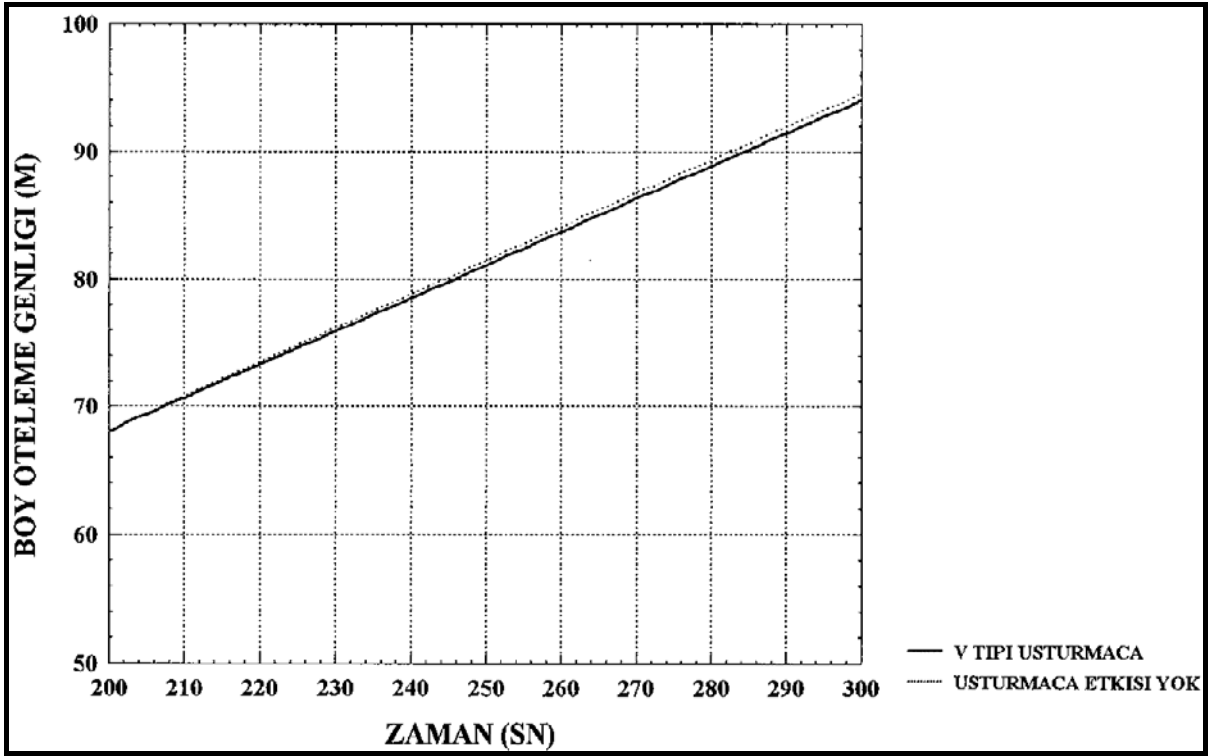
Çizelge 4. SHIBATA firmasının ürünü 'V tipi usturmaça'nın verilen yanaşma koşullarında davranışları

Boyutları	Yükseklik = 1.000 [m] / Boy = 1.000 [m]
Sönümlenmesi gereken enerji [t.m]	5.668
Defleksiyon oranı [%]	16.5
Maksimum tepki kuvveti [kN]	6.320

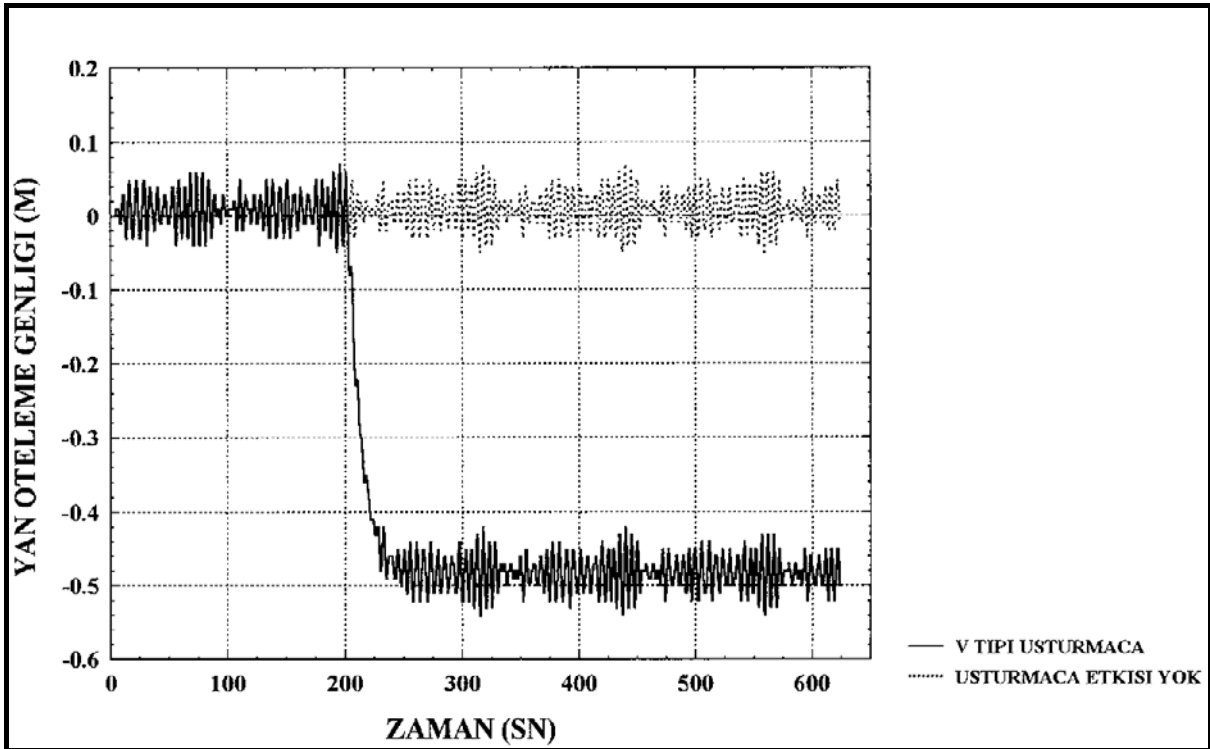
3.2. Geminin Boyuna Düzlemdeki Hareketlerinin Zaman Öyküleri

İzmir Körfezi'nde yolcu taşımacılığı etkinliği gösteren bir geminin, daha önce sözü edilen dış yükler etkisinde ve verilen oşinografik koşullar ile geminin temas edeceği sistemlerin ve temas sürelerinin önermeleri altında yapacağı boyuna düzlemdeki hareketlerine (boy öteleme,

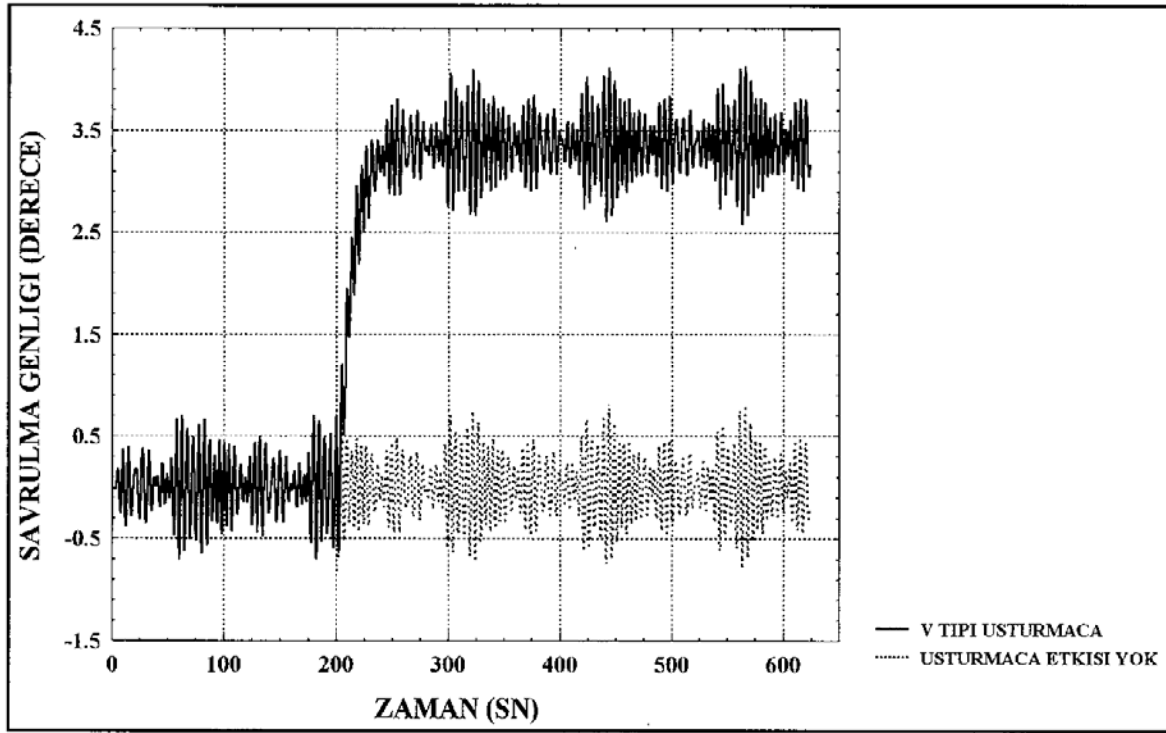
yan öteleme ve savrulma) ilişkin geliştirilen programlardan elde edilen zaman öyküleri, aşağıdaki şekillerde sunulmaktadır (Şekil 3–Şekil 5).



Şekil 3.Usturmaça 200.saniyede çarpan geminin 'boy öteleme' hareketinin zaman öyküsü



Şekil 4. Usturmaça 200.saniyede çarpan geminin 'yan öteleme' hareketinin zaman öyküsü



Şekil 5. Usturmaça 200.saniyede çarpan geminin 'savrulma' hareketinin zaman öyküsü

4. TARTIŞMA VE SONUÇ

Ortalama oşinografik koşulların altında, usturmaçayla temas eden geminin boy ötelemesi, yavaşma nedeniyle oluşan kuvvetten fazla etkilenmemektedir. Usturmanın etkisi boy öteleme hareketini 0.4 [m] azaltmak yönündedir. Yan öteleme hareketinde ise, sancak yönünde 0.48 [m]'lik bir öteleme meydana gelmektedir. Çarpma kuvvetinin etkimesinin ardından diğer dış koşullar nedeniyle yan öteleme hareketi, söz konusu ötelemeden sonra da devam etmektedir. Savrulma genliği ise pozitif yönde (yani saat yönünde) olmak üzere 3.42^0 'de kalmıştır.

Verili koşullarda yaşanan geminin çarpması nedeniyle usturmaçaların bünyesinde oluşan tepki kuvvetleriyle gemi hareketlerinin genlikleri arasında doğrusal bir ilişki görülebilmektedir. Bu ilişkinin başka usturmaça ürünleriyle analiz edilmesi, usturmaça tasarımında yararlı, yardımcı bir veri olacaktır. Yani oluşturulan matematik modeldeki çarpma dış yüklerinin usturmaçanın karakteristiklerine bağlı olarak değiştirilmesi sistemiyle uygun donanım seçimi gerçekleştirilebilecektir (Neşer, 1996).

Çalışmanın bundan sonraki aşamalarında, problemdeki çarpma yükünü farklı karakterlerde modellemek suretiyle de elde edilen sonuçlar gerçeğe daha çok yaklaştırılabilir. Bununla birlikte, matematiksel modelden elde edilen sonuçların gerçekliğe uyumunun irdelenebilmesi için fiziksel modelle de çalışılması gerekliliği açıktır.

KAYNAKLAR

- Costa V.C. (1978): "Fender as Energy Dissipators", The Dock and Harbour Authority, C. 59, N. 694, s. 132-134.
- Cummins W.E. (1962): "The Impulse Response Function and Ship Motions", Hamburg, Institut für Schiffbau der Universität Hamburg, Proceedings of Symposium on Ship Theory, s. 101-109.
- Gerittsma J., Beukelman W. (1972): "Analysis of The Resistance Increase in Waves of A Fast Cargo Ship", Delft, Netherlands Ship Research Center, Report No: 169.
- Girgrah M. (1977): "Practical Aspects of Dock Fender Design", Leningrad, Permanent International Association of Navigation Congresses, Proceedings of International Navigation Congress, p. 5-13.
- Janava R.C., Jiang C.W. (1983): "Development of Analytical Techniques for the Assessment of Energy Absorption Mechanism in Marine Fender Systems", Virginia, Office of Naval Research, Report No. 6A 31-115-001.
- Journee J.M.J. (1993a): "Calculations of Struck-Ship Motions by using The Cummins Equations with Strip Theory Potential Coefficient", Delft, Delft University of Technology Ship Hydromechanics Laboratory, Report No. 978-0.
- Journee J.M.J. (1993b): "User Manual of Program SEAWAY-D/4.10: A Pre-Processing Program of DREDMO/4.0", Delft, Delft University of Technology Ship Hydromechanics Laboratory, Report No. 969.
- Journee J.M.J. (1996): Delft, 08-10 Mayıs, Kişisel görüşme.
- Neşer G. (1996): "Gemi-Liman Çarpışmasının Analizi ve Liman Usturmaça Sistemlerinin Dizaynı", İzmir, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi.
- Ogilvie T.F. (1964): "Recent Progress towards The Understandings and Prediction of Ship Motions", Bergen, Office of U.S. Naval Research, Proceedings of Fifth Symposium of Naval Hydrodynamics, s. 4-126.
- Shibata Industrial G. Ltd. (1989): "Design Conception of Shibata Marine Fenders", Tokyo.
- St. Denis M., Pierson W.J. (1953): "On the Motions of Ship in Confused Seas", New York, Transactions of the Society of Naval Architects and Marine Engineers, V. 81, p. 109-143.