

Denizaltıdan Kapsül İçerisinde Fırlatılan Bir Mühimmatın Dinamik Davranışının İncelenmesi

Bülent ÖZKAN^{a*}, Harun GÖKÇE^a

^a*TÜBİTAK Savunma Sanayii Araştırma ve Geliştirme Enstitüsü, ANKARA 06261, TÜRKİYE

MAKALE BİLGİSİ

Alınma: 12.07.2017
Kabul: 20.10.2017

Anahtar Kelimeler:

Denizaltıdan fırlatılan mühimmat, hidrodinamik modelleme, bilgisayar benzetimleri.

^{*}**Sorumlu Yazar:**

e-posta:
bulent.ozkan@tubitak.gov.tr

ÖZET

Bu çalışmada, denizaltıdan kapsül adı verilen hidrodinamik bir zarf içerisinde önceden belirlenen bir hedefe doğru fırlatılan güdümlü bir mühimmatın düşey düzlemde iki boyutlu dinamik modeli çıkarılmış ve modelde kullanılan parametreler için makul sayısal değerler göz önüne alınarak bilgisayar benzetimleri gerçekleştirilmiştir. Modellemede mühimmat hareketinin kovan içi ve kovan dışı aşamalarında karşı karşıya kalınan itme, sürtünme ve eylemsizlik kuvvetleri ile hidrodinamik etkiler hesaba katılmıştır. Farklı kuyruk kanatçığı açısı, itme basıncı, fırlatma derinliği ve mühimmat kütlesi değerleri için gerçekleştirilen bilgisayar benzetimleri sonucunda, belirtilen parametrelerden ilk ikisindeki artışın ve/veya son ikisindeki azalmanın mühimmatın su içerisindeki toplam seyir süresini kısaltacağı, buna mukabil satha çıkışta mühimmatın su yüzeyiyle yaptığı açıyı artıracığı gözlenmiştir.

DOI:

Investigation of the Dynamic Behaviour of A Munition Fired From A Submarine Within a Capsule

ARTICLE INFO

Received: 12.07.2017
Accepted: 20.10.2017

Keywords:

Munition fired from submarine, hydrodynamic modelling, computer simulations.

^{*}**Corresponding**

Authors

e-mail:
bulent.ozkan@tubitak.gov.tr

ABSTRACT

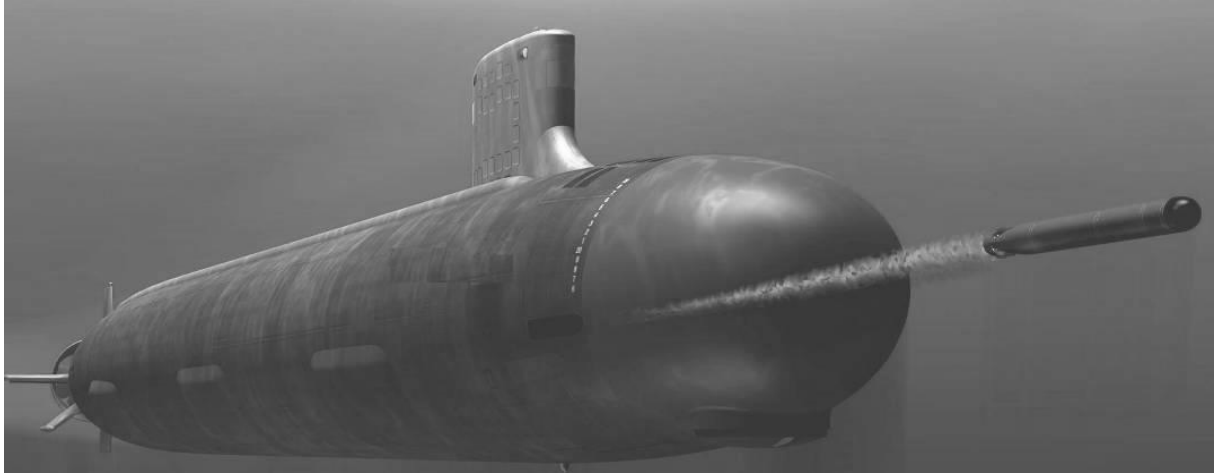
In this study, the planar dynamic model of a guided munition fired from a submarine within a hydrodynamic envelope called capsule toward a predetermined target is derived in the vertical plane and the relevant computer simulations are carried out by considering consistent numerical values for the parameters used. In the modeling, the thrust, friction, and inertial forces are taken into account as the external forces encountered inside and outside the firing slot of the submarine in addition to the hydrodynamic effects. As a result of the computer simulations conducted for different values of the tail fin angle, thrust pressure, firing depth, and munition mass, it is observed that the increment in the first two and/or decrement in the last two parameters listed above leads the cruise duration of the munition in the water to shorten but the orientation angle between the munition and the water surface when leaving the water to enhance.

1. Giriş (Introduction)

Değişen stratejik gereksinimler doğrultusunda savunma sistemlerinin niteliğinde de farklılıklar ortaya çıkmaktadır. Teknolojik gelişmeler sayesinde hedef ve tehditlerin daha hassas şekilde tespit edilebilmesi, geliştirilecek savunma sistemlerinin yüksek doğrulukla işlevlerini yerine getirebilmesini zorunlu kılmaktadır [1].

Bu kapsamda değerlendirilebilecek sistemlerden biri de su altı platformlarından fırlatılabilen mühimmatlardır. Günümüzde “su altı platformları” denildiğinde denizaltılar anlaşılakta olup, bu platformlardan fırlatılan mühimmatlar olarak da çoğunlukla torpidolar akla gelmektedir. Öte yandan, su altı hedeflerinin yanısıra önceden belirlenen kara, su üstü ve hava hedeflerine karşı kullanılabilir güdümlü mühimmatlar da denizaltılardan fırlatılabilmektedir. Denizaltıların torpido atışı için kullanılan ve “kovan” olarak adlandırılan atış yuvaları kullanılarak, kısa ve orta menzilli

mühimmatları belirlenen hedef veya hedeflere doğru sevk etmek mümkün olmaktadır. Belirtilen senaryoda mühimmat, “kapsül” adı verilen hidrodinamik bir kılıf içerisine yerleştirilmekte ve denizaltıdan, Şekil 1’de de gösterildiği gibi bu zarf içerisinde bulunduğu halde fırlatılmaktadır. Kapsül malzemesi genellikle metal veya kompozit esaslı olup, görevi mühimmatı su yüzeyine (satha) ulaştırdığında sona ermektedir. Bir başka deyişle, belirli bir basınç altında denizaltı dışarısına fırlatılan mühimmat, sabit bir açıda konumlandırılmış kuyruk kanatçıklarına sahip olan kapsül sayesinde su yüzeyine doğru yol almaktadır. Kapsülün uç kısmına yerleştirilmiş olan bir yaklaşma algılayıcısı sayesinde anlık derinlik değeri alınmakta ve satha olan mesafe belirlenen bir değere ulaştığında önceden yerleştirilmiş patlayıcı düzenek aktif hale gelerek kapsülü parçalamaktadır. Bundan sonra kapsülden kurtulan mühimmat serbest kalarak su üzerindeki hareketine bağımsız olarak devam etmektedir [1,3].



Şekil 1. Denizaltıdan kapsül içerisinde mühimmat fırlatılması [2]

Su altından fırlatılan mühimmatın kontrolü açısından, su içerisinde geçirdiği süre kadar satha ulaştığında su yüzeyiyle yaptığı açı da önemlidir. Belirtilen zaman ve yönelim açısı parametreleri, esas olarak fırlatma derinliği ve mühimmat içeren kapsülün toplam kütesinin yanısıra fırlatma basıncı ve kapsül kuyruk kanatçıklarının sabit yerleşim açısının da fonksiyonudur. Buna göre, ele alınan mühimmatın su içerisinde öngörülen azami hareket süresi ve sathı dışında serbest hareketine başladığı anda sahip olması gereken yönelim açısı değerlerine göre, mühimmat kütlesi ve fırlatma derinliği dikkate alınarak kapsül kanatçıkları yerleşme açısı ve fırlatma basıncı büyüklüklerinin belirlenmesi gerekir.

Öte yandan, hidrodinamik kısmı başta olmak üzere mühimmat modellemesi belirli varsayımlar doğrultusunda yapılabildiğinden, gerçekleştirilen bilgisayar benzetimleri ile ulaşılan sonuçlar yüzde yüz kesinlik arz etmemektedir. Yine de elde edilen benzetim sonuçları, bir miktar hata içermekle birlikte tasarım açısından oldukça yararlı veriler sunmaktadır [1, 3].

Bu çalışmada, boyutsal ve eyletimsel değişkenleri için makul sayısal değerler atanan bir mühimmatın kapsül içerisinde denizaltıdan fırlatılması durumunda, kapsül kanatçıklarının yerleşim açısı, fırlatma derinliği ve itme basıncına bağlı olarak su

içerisinde yolalma süresi ve satha ulaştığı anda su yüzeyiyle yaptığı açı belirlenmeye çalışılmıştır. Bu kapsamda, yanal hareketindeki değişimlerin düşey düzlemdeki hareketine göre çok daha düşük olacağı kabulüyle mühimmatın yalnızca düşey düzlemdeki dinamiği göz önüne alınmış ve ilgili kinematik ifadelerin bulunmasının ardından sistemin hareket denklemleri çıkarılmıştır. Denklemler çıkarılırken mühimmat içeren kapsülün kovan içerisinde bulunduğu ve kovan dışında ilerlediği aşamalar ayrı ayrı değerlendirilmiş ve kovan içi aşamasında kovanın alt ve üst kısımlarına bütünlümlenmiş olan kılavuz raylarla kovan arasındaki sürtünme Stribeck sürtünme modeli kullanılarak modellenmiştir [4]. Yine kovan içi durumunda kapsüle uygulanan itme basıncı da modellemede hesaba katılmış olup, kovan dışı aşamasında maruz kalınan hidrodinamik kuvvet ve moment katsayıları geçerli yaklaşımlar ve ampirik ifadeler esas alınarak elde edilmiştir [5]. Nihayet belirtilen sayısal değerler kullanılarak, farklı mühimmat kütlesi değerleri için bilgisayar benzetimleri gerçekleştirilmiş ve kapsül kanatçık açısı, fırlatma derinliği ve itme basıncı değerleriyle mühimmat kütlelerinin, mühimmat içeren kapsülün satha ulaşma süresi ve su yüzeyine göre yönelimi üzerindeki etkileri belirlenmeye çalışılmıştır.

2. Mühimmat Kinematığı (Munition Kinematics)

Mühimmatın dinamik davranışını belirten ifadeler türetilirken kullanılması uygun olan ve mühimmat gövdesine yapışık olduğu varsayılan gövde eksen takımının (F_b) hareketsiz olduğu kabul edilen yeryüzü eksen takımına (F_0) göre iki boyutlu düşey düzlemdeki yönelimi, F_0 'ın \vec{u}_2^0 birim vektörü ile tanımlanan yanlamasına ekseni etrafında ifade edilen yunuslama açısı (θ) cinsinden aşağıdaki gibi tanımlanabilir [6]:

$$F_0 \xrightarrow{\theta} F_b \quad (1)$$

Buna göre F_b 'nin F_0 'a göre bağlı yönelimi tanımlayan dönüşüm matrisi $[\hat{C}^{0,b}]$, ikinci temel dönüş matrisi cinsinden aşağıdaki gibi yazılabilir [6]:

$$\hat{C}^{(0,b)} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & 0 & -\sin(\theta) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(\theta) & 0 & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (2)$$

Eş.1'de belirtilen dönüş sırasına göre mühimmatın yere göre açısal hız vektörü ($\vec{\omega}_{b/0}$) aşağıdaki eşitlikten bulunabilir [6]:

$$\vec{\omega}_{b/0} = \dot{\theta} \vec{u}_2^{(0)} = \dot{\theta} \vec{u}_2^{(b)} \quad (3)$$

Mühimmatın “yunuslama düzlemi” olarak da adlandırılabilir düşey düzlemdeki yunuslama hızı bileşeninin (q) büyüklüğü, yunuslama açısının türevine eşittir. Bir başka deyişle:

$$q = \dot{\theta} \quad (4)$$

Eş.4, Eş.3'de yerine yazıldığında, mühimmat açısal hızı için aşağıdaki eşitlik ortaya çıkmaktadır:

$$\vec{\omega}_{b/0} = q \vec{u}_2^{(b)} \quad (5)$$

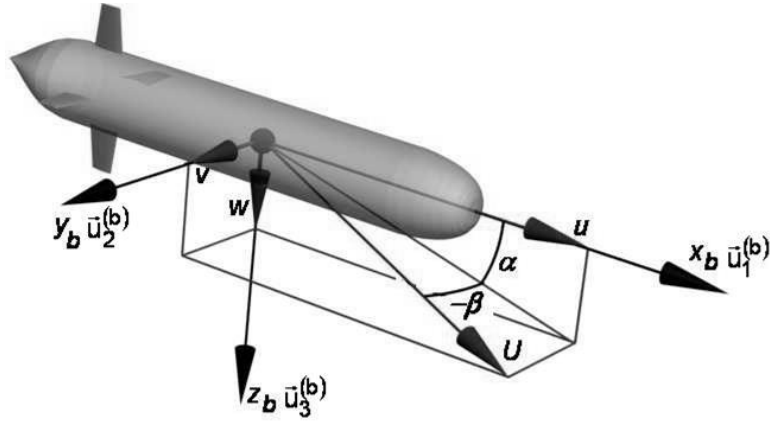
D_0 sembolü F_0 üzerindeki zamana göre türev operatörünü göstermek üzere Eş.5'in zamana göre türevi, müteakip ifade de görüldüğü gibi mühimmatın yere göre açısal ivme vektörünü ($\vec{\alpha}_{b/0}$) verir [6]:

$$\vec{\alpha}_{b/0} = D_0 \vec{\omega}_{b/0} = \dot{q} \vec{u}_2^{(b)} \quad (6)$$

M harfi ile tanımlanan mühimmat ağırlık merkezinin F_0 'ın orijinine göre bağlı doğrusal hız vektörü ($\vec{V}_{M/0}$), F_b üzerinde $\vec{u}_1^{(b)}$ ve $\vec{u}_3^{(b)}$ birim vektörleri ile ifade edilen boylamasına ve düşey eksenler doğrultusundaki bileşenleri (u ve w) kullanılarak aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\vec{V}_{M/0} = u \vec{u}_1^{(b)} + w \vec{u}_3^{(b)} \quad (7)$$

Burada tanımlanan hız vektörü bileşenleri, üç boyutlu uzaydaki yanal hız bileşenini (v) içerecek şekilde, en genel halde Şekil 2'deki gibi şematik olarak gösterilebilir. Şekilde görülen x_b , y_b ve z_b harfleri sırasıyla $\vec{u}_1^{(b)}$, $\vec{u}_2^{(b)}$ ve $\vec{u}_3^{(b)}$ birim vektörleri ile tanımlanan eksenleri belirtmekte olup α ve β sembolleri sırasıyla hücum ve yana kayma açılarını temsil etmektedir.



Şekil 2. Mühimmat hız vektörü bileşenleri [5]

Eş.7'nin zaman göre türevi, mühimmat ağırlık merkezinin 0 noktasına göre bağıl doğrusal ivme vektörünü ($\vec{a}_{M/0}$) vermektedir. Buna göre, gerekli vektörel işlemler yapıldıktan sonra, $\vec{a}_{M/0}$ için aşağıdaki eşitlik elde edilir [6]:

$$\vec{a}_{M/0} = D_0 \vec{v}_{M/0} = (\dot{u} + qw)\vec{u}_1^{(b)} + (w - qu)\vec{u}_3^{(b)} \quad (8)$$

Burada u ve w harflerinin üzerindeki noktalar, ilgili doğrusal hız bileşenlerinin zamana göre türevini ifade etmektedir.

3. Mühimmat Dinamiği (Munition Dynamics)

Kapsül içerisinde olduğu halde ilgili denizaltı kovanında hareketsiz halde bulunan mühimmat, ağırlık merkezi ile basınç merkezi arasındaki kaçıklık miktarıyla orantılı olacak şekilde hidrostatik bir momente maruz kalır. Belirtilen moment etkisi, kovan ağız ileri doğrultuyu göstermek üzere basınç merkezinin ağırlık merkezinin önünde olması durumunda kapsül içerisindeki mühimmatı kovandan çıkarken yukarıya doğru, arkasında olması durumunda da aşağıya doğru bastıracaktır. Bu etki, mühimmat dinamiğinin modellenmesi sırasında ayrıca ele alınmalıdır. Yapılan hesaplamaların basitleştirilmesi amacıyla, bu çalışmada göz önüne alınan mühimmatın ağırlık ve basınç merkezlerinin çakışık olduğu kabul edilmiştir [5,7].

Mühimmatın kapsül içerisinde bulunduğu haldeki dinamik davranışı, denizaltı kovanının içerisinde bulunduğu ve kovan dışında olduğu durumlarda farklılık gösterecektir. Sözgelimi, kovan içerisinde iken ağırlığı, itme kuvveti, kılavuz raylardan kaynaklanan sürtünme kuvveti ve eksenel hidrodinamik kuvvete maruz kalıyorken, kovan

dışında hidrodinamik kuvvet ve moment bileşenlerinin etkisinde hareketini sürdürecektir. Ayrıca, su içerisindeki hareketi sırasında gövde etrafında toplanan su kütlesi, mühimmatın mevcut kütlesi üzerine ek bir kütle artışı getirecektir. Hidrodinamik terminolojisinde "ek kütle" olarak adlandırılan bu sanal artış temelde mühimmat boyutsal değişkenlerine bağlı olup, kovan dışındaki hareket aşamasında mühimmat kütlesi üzerine dahil edilecektir [5].

Yukarıda bahsedilen her iki aşamayı da kapsayacak şekilde, mühimmatın iki boyutlu yunuslama düzlemindeki hareketini tanımlayan kuvvet ve moment denklemleri, bilinen Newton-Euler eşitlikleri kullanılarak aşağıdaki gibi yazılabilir [6, 8]:

$$\vec{F}_e + \vec{W} = m\vec{a}_{M/0} \quad (9)$$

$$\vec{M}_e = \vec{J}_C \times \vec{\alpha}_{b/0} + \vec{\omega}_{b/0} \times \vec{J}_C \times \vec{\omega}_{b/0} \quad (10)$$

Burada \vec{F}_e ve \vec{M}_e mühimmat üzerine etkiyen dış kuvvet ve moment vektörlerini göstermekte olup \vec{J}_C ile mühimmatın ağırlık merkezine göre eylemsizlik momenti diyadığı, m ve \vec{W} harfleriyle mühimmatın sırasıyla kütlesi ve ağırlık vektörü temsil edilmektedir. Bu anlamda m ve \vec{W} arasındaki ilişki, \vec{g} yerçekimi ivmesi vektörünü temsil etmek üzere aşağıdaki gibi yazılabilir [8]:

$$\vec{W} = m \times \vec{g} \quad (11)$$

Burada \vec{g} , $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ değeri için, F_0 'ın $\vec{u}_3^{(0)}$ birim vektörü ile belirtilen düşey eksen doğrultusunda aşağıdaki gibi belirtilebilir:

$$\vec{g} = g \times \vec{u}_3^{(0)} \quad (12)$$

Eş.12, Eş.11'de yerine yazılarak elde edilen denklem Eş.2'deki temel dönüş matrisi kullanılarak F_b 'de ifade edilirse, \vec{W} için mütekip eşitlik ortaya çıkar [8]:

$$\vec{W} = mg[-\sin(\theta)\vec{u}_1^{(b)} + \cos(\theta)\vec{u}_3^{(b)}] \quad (13)$$

\vec{J}_c diyadığı de yunuslama düzlemindeki bileşeni J_z olacak şekilde aşağıdaki şekli almaktadır:

$$\vec{J}_c = J_z \vec{u}_2^{(b)} \vec{u}_2^{(b)} \quad (14)$$

J_z , mühimmatın silindirik geometride olduğu kabulüyle, mühimmatın boy (L_M), çap (d_M) ve kütlesi (m) cinsinden yaklaşık olarak aşağıdaki ifadeden hesaplanabilir:

$$J_z = m(3d_M^2 + 4L_M^2)/48 \quad (15)$$

Ayrıca \vec{F}_e ve \vec{M}_e vektörleri, yatay ve düşey kuvvet bileşenleri sırasıyla X_e ve Z_e ve yunuslama düzlemindeki moment bileşeni de M_e ile sembolize edilmek üzere, en genel anlamda aşağıdaki eşitlikte belirtilebilir:

$$\vec{F}_e = X_e \vec{u}_1^{(b)} + Z_e \vec{u}_3^{(b)} \quad (16)$$

$$\vec{M}_e = M_e \vec{u}_2^{(b)} \quad (17)$$

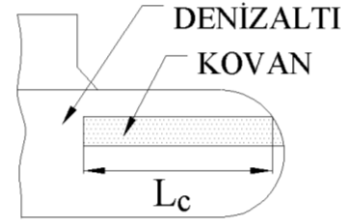
Kapsül içerisindeki mühimmata, yerçekimi etkisi haricinde kovan içi aşamasında boylamasına eksenini doğrultusunda itme ve kılavuz raylardan kaynaklanan sürtünme kuvveti ile aksel hidrodinamik kuvvet etkimekte olup, mühimmat; yapılan kabullere göre düşey doğrultuda yerçekimi dışında herhangi bir dış kuvvete maruz kalmamaktadır. Kovan dışı aşamasında ise dış kuvvet olarak yalnızca aksel ve düşey hidrodinamik kuvvet söz konusu olmaktadır. Bunun yanı sıra, mühimmat ağırlık ve basınç merkezlerinin çakışık olduğu kabulü dolayısıyla kovan içindeki hareketi sırasında mühimmat üzerinde herhangi bir dış moment etkisi gözlenmemekte, kovan dışında ise hidrodinamik yunuslama momenti ortaya çıkmaktadır. Buna göre kapsül içerisindeki mühimmata etkiyen dış kuvvet ve momentler, F_T , F_s , X_h , Z_h , M_h , x_M ve L_c sembolleri sırasıyla itme kuvveti, sürtünme kuvveti, aksel hidrodinamik kuvvet, düşey hidrodinamik kuvvet, hidrodinamik

yunuslama momenti, mühimmatın aksel konumu ve Şekil 3'de de şematik olarak gösterildiği gibi kovan boyunu temsil etmek üzere, aşağıdaki denklemlerle belirtilebilir [8]:

$$X_e = \begin{cases} F_T + F_f + X_h & 0 < x_M < L_c \\ X_h & x_M \geq L_c \end{cases} \quad (18)$$

$$Z_e = \begin{cases} 0 & 0 < x_M < L_c \\ Z_h & x_M \geq L_c \end{cases} \quad (19)$$

$$M_e = \begin{cases} 0 & 0 < x_M < L_c \\ M_h & x_M \geq L_c \end{cases} \quad (20)$$



Şekil 3. Denizaltı kovanının şematik gösterimi

Eş.18'deki kuvvet bileşenlerinden F_T , mühimmat içeren kapsülü kovan dışına fırlatmak için uygulanan basınç P_T ile mühimmat kesit alanının (S_M) çarpımından elde edilen kuvvettir. Yani;

$$F_T = P_T + S_M \quad (21)$$

$$\text{Burada, } S_M = (\pi/4)d_M^2$$

Uygulamada mühimmatı kovan dışına fırlatmadan önce iç ve dış ortam arasındaki basınç dengesini sağlamak amacıyla kovan içerisine bir miktar su basılmakta; gerekli dengenin elde edilmesinin ardından P_T basıncı uygulanarak mühimmat yüklü kapsül kovan dışına sevk edilmektedir [1].

Eş.18'de yer alan dış etkilerden kovan kılavuz rayları ile kapsül temas yüzeyleri arasındaki sürtünme kuvveti, yukarıda da ifade edildiği üzere Stribeck sürtünme modeli kullanılarak modellenmiştir. Buna göre, statik ve Coulomb sürtünme katsayıları μ_s ve μ_c , Stribeck hızı, viskoz sürtünme katsayısı ve biçim faktörü de sırasıyla v_s , b_v ve γ ile gösterilmek üzere, F_f mühimmatın kovan içerisindeki yatay hız bileşeninin (u) fonksiyonu olarak aşağıdaki gibi ifade edilebilir [4]:

$$F_f = [(F_s - F_c)e^{-|u/v_s|} + F_c] \text{sgn}(v) + b_v u \quad (22)$$

Burada $F_s = \mu_s mg$ ve $F_c = \mu_c mg$ olup, genel bir yaklaşım olarak, $\mu_s \sim 1.5\mu_c$ olarak alınmaktadır [4]. Ayrıca, Eş.22'de verilen işaret fonksiyonu [$\text{sgn}()$]

göz önüne alınan herhangi bir $f(x)$ fonksiyonu için aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır:

$$\text{sgn}[f(x)] = \begin{cases} -1 & f(x) < 0 \\ 0 & f(x) = 0 \\ 1 & f(x) > 0 \end{cases} \quad (23)$$

Sonuç olarak, denklem Eş.5, Eş.6, Eş.8, Eş.13, Eş.14, Eş.16 ve Eş.17'nin Eş.9 ve Eş.10'da yerine yazılmasıyla, mühimmatın yunuslama düzlemindeki hareketini tanımlamak üzere aşağıdaki skalar denklemler elde edilir [8]:

$$\dot{u} + qw = -g \sin(\theta) + X_e/m \quad (24)$$

$$\dot{w} - qu = g \cos(\theta) + Z_e/m \quad (25)$$

$$\dot{q} = M_e/J_z \quad (26)$$

Eş.24'den Eş.26'ya kadar olan eşitlikler matris formunda aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\begin{bmatrix} \dot{\alpha}_x \\ \dot{\alpha}_z \\ \dot{\alpha}_y \end{bmatrix} = \hat{M}_M^{-1} \begin{bmatrix} X_e \\ Z_e \\ M_e \end{bmatrix} + mg \begin{bmatrix} -\sin(\theta) \\ \cos(\theta) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (27)$$

Burada $\alpha_x = \dot{u} + qw$, $\alpha_z = \dot{w} - qu$ ve $\alpha_y = \dot{q}$ olup, mühimmat kütle matrisi (\hat{M}_M) aşağıda verildiği gibi tanımlanmıştır:

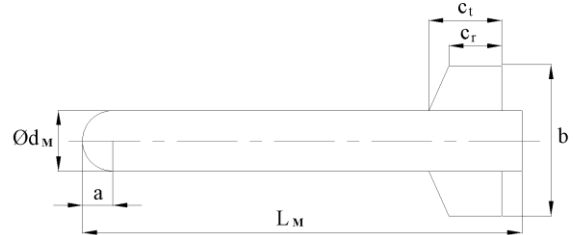
$$\hat{M}_M = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 \\ 0 & 0 & J_z \end{bmatrix} \quad (28)$$

\hat{M}_M kapsül içerisindeki mühimmatın kovan içi aşamasındaki eylemsizliğini tanımlamaktadır. Öte yandan, yukarıda da belirtildiği gibi, kovan dışı aşamasında mühimmatın içerisinde hareket ettiği su kütesinden kaynaklanan ek bir kütle daha söz konusudur. Bahsedilen artışa karşılık gelen ek kütle matrisi (\hat{M}_A), mühimmatın ele alınan hareket eksenlerini içerecek şekilde aşağıdaki gibi tanımlanabilir [5]:

$$\hat{M}_A = \begin{bmatrix} X_{\dot{u}} & 0 & 0 \\ 0 & Z_{\dot{w}} & Z_{\dot{q}} \\ 0 & M_{\dot{w}} & M_{\dot{q}} \end{bmatrix} \quad (29)$$

Burada, X ve Z mühimmatın ek kütle dolayısıyla eksenel ve düşey doğrultuda maruz kaldığı kuvvetleri ve M de ek moment bileşenini gösterecek şekilde, $X_{\dot{u}} = \partial X / \partial \dot{u}$, $Z_{\dot{w}} = \partial Z / \partial \dot{w}$, $Z_{\dot{q}} = \partial Z / \partial \dot{q}$, $M_{\dot{w}} = \partial M / \partial \dot{w}$ ve $M_{\dot{q}} = \partial M / \partial \dot{q}$ şeklinde tanımlanmıştır. Ayrıca, \hat{M}_A 'nın simetri özelliğinin bir sonucu olarak, $M_{\dot{w}} = Z_{\dot{q}}$ eşitliği geçerlidir [5].

Eş.29'da verilen \hat{M}_A 'nın elemanları; bir başka deyişle ek kütle matrisi bileşenleri, tanımları Şekil 4'deki çizimde verilen mühimmat çapı (dM) ve kanat açıklığı (b) parametrelerinin fonksiyonu olarak ampirik yaklaşımla hesaplanmıştır. Hesaplamalarda, çap değerinin mühimmat boyunca değişmediği ve kanat açıklığının da kök ve uç veterleri (c_r ve c_t) üzerinde sabit kaldığı kabulü yapılmıştır [5]. Şekil 4'deki bir diğer parametre olan a , burun ovallık yarıçapını temsil etmektedir.



Şekil 4. Mühimmat boyutsal parametreleri

Bu durumda mühimmatın kovan dışı aşamasındaki toplam kütle matrisi (\hat{M}), ek kütle etkisi de gözönüne alınarak aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\hat{M} = \hat{M}_M + \hat{M}_A \quad (30)$$

Böylelikle, kapsül içerisindeki mühimmat dinamiğini tanımlayan Eş.27, kovan içi ve kovan dışı aşamalarının her ikisi için de geçerli olacak şekilde aşağıdaki gibi genelleştirilebilir:

$$\begin{bmatrix} \dot{\alpha}_x \\ \dot{\alpha}_z \\ \dot{\alpha}_y \end{bmatrix} = \hat{M}^{-1} \begin{bmatrix} X_e \\ Z_e \\ M_e \end{bmatrix} + mg \begin{bmatrix} -\sin(\theta) \\ \cos(\theta) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (31)$$

Burada, mühimmatın kapsülü toplam uçuş zamanına göre çok kısa sürede terk ettiği göz önüne alınarak, kovan içi aşamasında ek kütle terimlerinin katkısı gözardı edilebilir. Böylelikle Eş.31'deki M büyüklüğü, kovan içi ve kovan dışı aşamaları için aşağıdaki gibi tanımlanabilir [8]:

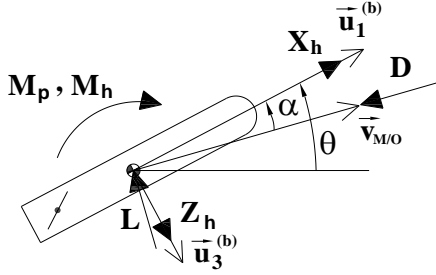
$$\hat{M} = \begin{cases} \hat{M}_M & 0 < x_M < L_c \\ \hat{M}_M + \hat{M}_A & x_M \geq L_c \end{cases} \quad (32)$$

4. Mühimmat Hidrodinamiği (Munition Hydrodynamics)

Mühimmat, su içerisindeki hareketi sırasında, şematik olarak Şekil 5'de gösterildiği gibi hız vektörüyle aynı doğrultuda ancak zıt yöndeki sürüklenme kuvveti ve hız vektörüne dik ve yönü mühimmata doğru olan kaldırma kuvveti ile hidrodinamik yunuslama momentine maruz kalır.

Şekil 5’de görülen X_h , Z_h ve M_h ise yukarıda da belirtildiği gibi F_b üzerinde tanımlı eksenel ve düşey hidrodinamik kuvvet ve moment bileşenleri olup, nihai hali Eş.31’de verilen hareket denklemlerinde esasen bu bileşenler kullanılacaktır. Burada hücum açısı (α), Şekil 2’deki çizimin de yardımıyla aşağıdaki eşitlikten hesaplanabilir [6]:

$$\alpha = a \tan(w/u) \quad (33)$$



Şekil 5. Mühimmat üzerine etkiyen hidrodinamik kuvvet ve moment bileşenleri

Mühimmat üzerine etkiyen hidrodinamik kuvvet ve moment bileşenleri olan D , L ve M_p , sırasıyla C_{D0} , C_L , C_m sembolleri ile gösterilen sürüklenme kuvveti, kaldırma kuvveti ve hidrodinamik yunuslama momenti katsayıları kullanılarak aşağıdaki ifadelerden bulunabilir [6]:

$$D = C_{D0} q_{\infty} S_M \quad (34)$$

$$L = C_L q_{\infty} S_M \quad (35)$$

$$M_p = C_m q_{\infty} S_M d_M \quad (36)$$

Burada q_{∞} mühimmat üzerindeki hidrodinamik basıncı sembolize etmekte olup, mühimmat doğrusal hızının genliği ($v_M = |\vec{v}_{M/0}|$) ve su yoğunluğu (ρ_w) cinsinden aşağıdaki gibi elde edilir:

$$q_{\infty} = \left(\frac{1}{2}\right) \rho_w v_M^2 \quad (37)$$

Eş.34’den Eş.36’ya kadar olan denklemlerden de görüldüğü üzere, boyutsuz C_{D0} , C_L , C_m katsayılarının bulunması halinde gerekli hidrodinamik kuvvet ve moment terimleri belirlenecektir.

C_{D0} mühimmat gövdesinin yaklaşık olarak uygun boyutlardaki bir elipsoidle tanımlanabileceği kabulüyle, L_M , d_M , c_r ve c_t parametreleri ile kuyruk kanatçığı kalınlığı (t) ve suyun kinematik viskozitesinin (ν_w) fonksiyonu, ampirik olarak geliştirilmiş ifadelerden hesaplanabilir. Formüller, mühimmat gövdesinin yanısıra kanatçıklardan

kaynaklanan sürüklenme etkilerini de ayrıca hesaba katmaktadır [5].

Hidrodinamik kaldırma kuvveti ve yunuslama momenti katsayıları olan C_L ve C_m ise, α , sabit kuyruk kanatçığı açısı (δ_f) ve q değişkenlerinin fonksiyonu olarak aşağıdaki eşitliklerden bulunabilir [8]:

$$C_L = C_{L\alpha} \alpha + C_{L\delta} \delta + [(C_{Lq} d_M)/(2v_M)] q \quad (38)$$

$$C_m = C_{m\alpha} \alpha + C_{m\delta} \delta + [(C_{mq} d_M)/(2v_M)] q \quad (39)$$

Eş.38 ve Eş.39’da yer alan ve “kararlılık türevleri” olarak adlandırılan $C_{L\alpha}$, $C_{L\delta}$, C_{Lq} , $C_{m\alpha}$, $C_{m\delta}$ ve C_{mq} katsayıları, L_M , d_M , c_r , c_t ve b ile burun ve ağırlık merkezi arasındaki uzaklık (x_m) için göz önüne alınan değerler kullanılarak, mühimmat gövdesi ve kanatçık etkilerinin her ikisi de hesaba katılarak türetilen ampirik denklemlerden bulunabilir [5].

Burada önemli olan bir husus da; mühimmatın statik kararlılığının sağlanabilmesi için, $C_{m\alpha}$, $C_{m\delta}$ ve C_{mq} katsayılarının negatif olması zorunluluğudur [5,7]. Yukarıdaki formülasyonun uygulanmasıyla, belirtilen katsayıların işaretinin negatif olduğu görülmüştür.

İlgili katsayıların bulunması ile D , L ve M_p büyüklükleri hesaplanabilir. Ancak, yukarıda ifade edildiği gibi, ele alınan modelde F_b üzerinde tanımlı kuvvet ve moment parametrelerinin kullanılması gerekmektedir. Şekil 5’e göre, boylamasına eksenini $\vec{v}_{M/0}$ ile aynı yönlü \vec{u}_1^w birim vektörü ile temsil edilebilecek olan hız eksen takımı (F_w) α kadar döndürüldüğünde F_b elde edilmektedir. Bahsedilen dönüşüm, F_w eksen takımının \vec{u}_2^w birim vektörü ile belirtilen eksenini etrafında olacak şekilde aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$F_w \xrightarrow[\alpha]{\vec{u}_2^w} F_b \quad (40)$$

Buradan F_b ’nin F_w ’ye göre bağlı yönelimi tanımlayan dönüş matrisi $[\hat{C}^{w,b}]$, Eş.2’deki gibi ikinci temel dönüş matrisi cinsinden aşağıdaki şekilde oluşturulabilir:

$$[\hat{C}^{w,b}] = \begin{bmatrix} \cos \alpha & 0 & -\sin \alpha \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \alpha & 0 & \cos \alpha \end{bmatrix} \quad (41)$$

Sürüklenme ve kaldırma bileşenlerini içerecek hidrodinamik kuvvet vektörü (\vec{F}_h) ile hidrodinamik moment vektörü (\vec{M}_p), F_w üzerinde aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\vec{F}_h = -D\vec{u}_1^w - L\vec{u}_3^w \quad (42)$$

$$\vec{M}_p = M_p\vec{u}_2^w \quad (43)$$

Burada \vec{u}_3^w , F_w 'nin düşey eksenini doğrultusundaki birim vektörünü göstermektedir.

\vec{F}_h ve \vec{M}_p , F_b 'nin birim vektörleri cinsinden müteakip eşitliklerdeki gibi ifade edilebilir:

$$\vec{F}_h = X_h\vec{u}_1^b + Z_h\vec{u}_3^b \quad (44)$$

$$\vec{M}_p = M_h\vec{u}_2^b \quad (45)$$

Eş.44 ve Eş.45, Eş.42 ve Eş.43'e eşitlenerek elde edilen denklemler Eş.41'deki dönüşüm matrisi kullanılarak aynı eksen takımında ifade edilirse, X_h , Z_h ve M_h büyüklükleri D , L ve M_p türünden aşağıdaki gibi bulunur [8]:

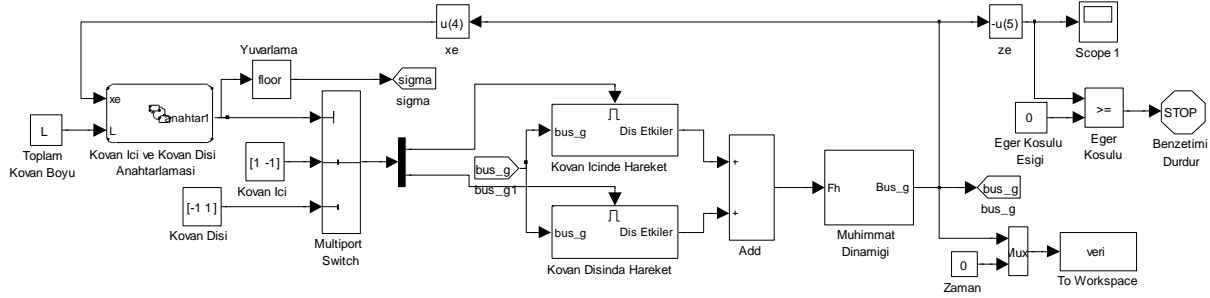
$$X_h = -D \cos(\alpha) + L \sin(\alpha) \quad (46)$$

$$Z_h = -D \sin(\alpha) - L \cos(\alpha) \quad (47)$$

$$M_h = M_p \quad (48)$$

5. Bilgisayar Benzetimleri (Computer Simulations)

Tablo 1'den de görüldüğü gibi ve beklendiği üzere sürüklenme ve kaldırma kuvvetlerine ilişkin hidrodinamik katsayılar pozitif işaretli çıkarken, yunuslama momenti katsayıları ($C_{m\alpha}$, $C_{m\delta}$ ve C_{mq}) negatif olarak elde edilmiştir.



Şekil 6. MATLAB® SIMULINK® ortamında oluşturulan benzetim modeli

Tablo 1: Benzetimlerde kullanılan sayısal değerler

Parametre	Sayısal Değer	Parametre	Sayısal Değer	Parametre	Sayısal Değer
L_M	4000 mm	ρ_w	1025 kg/m ³	C_{Lq}	3.85×10^{-2}
d_M	400 mm	v_w	$1.56 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$	$C_{m\alpha}$	-2.14×10^{-2}
a	400 mm	μ_s	0.25	$C_{m\delta}$	-2.82×10^{-3}
c_r	200 mm	μ_c	0.15	C_{mq}	-5.9×10^{-4}
c_t	200 mm	b_v	0.085	$X_{\dot{u}}$	7.113
b	800 mm	v_s	0.001 m/s	$Z_{\dot{w}}$	573.2
t	3 mm	γ	1	$M_{\dot{q}}$	0.015
L_c	6000 mm	C_{D0}	2.471×10^{-3}	$Z_{\dot{q}}$	8.372
x_m	2000 mm	$C_{L\alpha}$	3.2×10^{-2}	$M_{\dot{w}}$	8.372
g	9.81 m/s ²	$C_{L\delta}$	6.93×10^{-3}		

Tablo 1'de verilen parametre değerleri kullanılarak, kapsülün kuyruk kısmında bulunan kanatçıkların sabit açısının 5 ve 10 derece olduğu varsayılmış ve

her iki durum için bilgisayar benzetimleri yapılmıştır. Her iki benzetim grubunda da kapsül içerisindeki mühimmatın 20 ve 50 m derinlikten sırasıyla 100,

150 ve 200 bar değerindeki itme basıncıyla fırlatıldığı öngörülmüştür. Kapsül dahil olmak üzere mühimmat toplam kütlesi için de 250, 500 ve 750 kg değerleri atanmış ve belirtilen farklı açı, derinlik, basınç ve kütle değerlerinden oluşturulan kombinasyonlar için çalıştırılan benzetim modelinden mühimmatın su içinde hareket etme süresi ve satha ulaştığında su yüzeyiyle yaptığı yönelim açısı değerleri hesaplanmıştır. Ele alınan durumlar için elde edilen sonuçlar Tablo 2 ve Tablo 3'de sunulmuştur.

Ayrıca, kütle ve itme basıncı değişiminin mühimmat yörüngesi üzerindeki etkisini karşılaştırmalı olarak görmek amacıyla, sırasıyla itme basıncının 150 bar ve mühimmat kütlelerinin 500 kg değerinde sabit tutulduğu hallerdeki seyir süresi ve yönelim açısı grafikleri, sabit kanatçık açısının 10 derece olması hali için Şekil 7, Şekil 8, Şekil 9 ve Şekil 10'da verilmiştir.

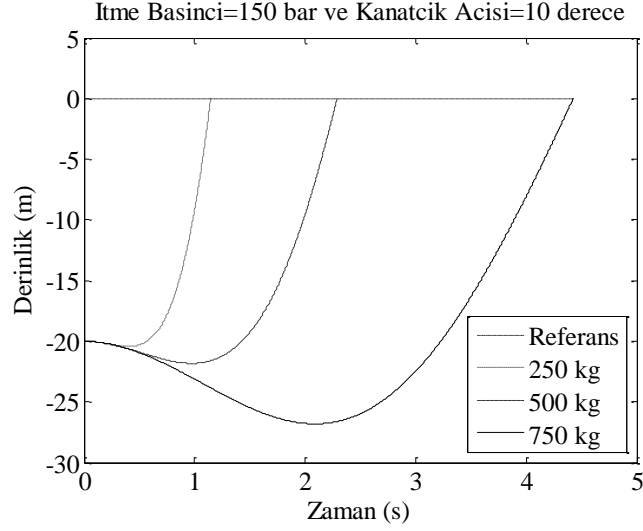
Tablo 2. Sabit kanatçık açısının (δ) 5° olması durumu için elde edilen benzetim sonuçları

Derinlik (m)	İtme Basıncı (P_T) (bar)	Kütle (m) (kg)	Satha Ulaşma Süresi (s)	Nihai Yunuslama Açısı (°)
20	100	250	2.016	19.697
		500	Satha ulaşamıyor.	
		750	Satha ulaşamıyor.	
	150	250	1.604	21.505
		500	3.772	8.609
		750	Satha ulaşamıyor.	
	200	250	1.304	22.585
		500	2.820	13.467
		750	Satha ulaşamıyor.	
50	100	250	2.960	14.039
		500	Satha ulaşamıyor.	
		750	Satha ulaşamıyor.	
	150	250	2.312	15.735
		500	6.842	13.280
		750	Satha ulaşamıyor.	
	200	250	1.858	16.997
		500	4.274	10.300
		750	Satha ulaşamıyor.	

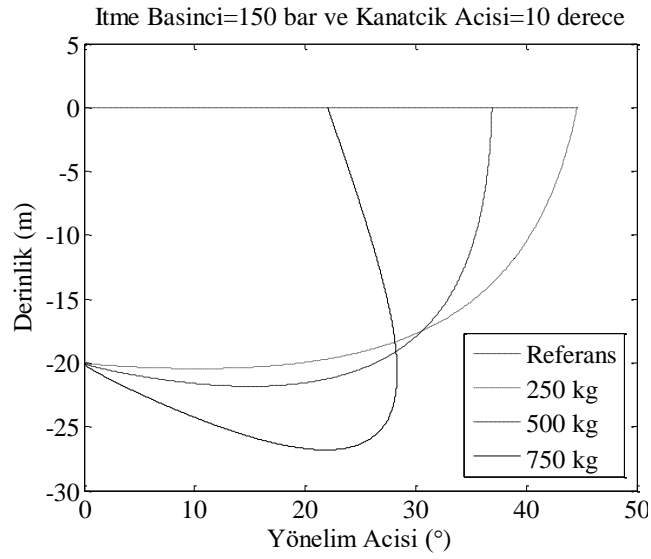
Tablo 3. Sabit kanatçık açısının (δ) 10° olması durumu için elde edilen benzetim sonuçları

Derinlik (m)	İtme Basıncı (P_T) (bar)	Kütle (m) (kg)	Satha Ulaşma Süresi (s)	Nihai Yunuslama Açısı (°)
20	100	250	1.402	44.146
		500	3.154	32.909
		750	Satha ulaşamıyor.	
	150	250	1.146	44.631
		500	2.288	36.896
		750	4.426	22.027
	200	250	0.948	44.974
		500	1.912	38.108
		750	3.352	29.302
50	100	250	1.780	44.705
		500	4.078	26.615
		750	Satha ulaşamıyor.	
	150	250	1.456	45.814

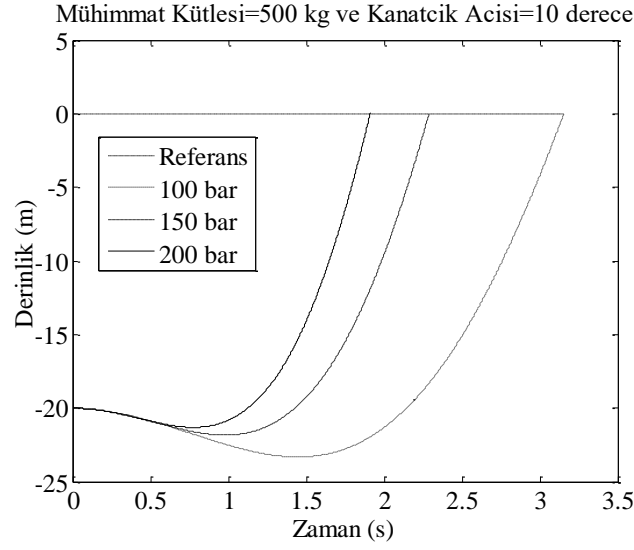
		500	2.934	33.793
		750	6.028	13.598
	200	250	1.202	46.537
		500	2.448	36.419
		750	4.334	21.814



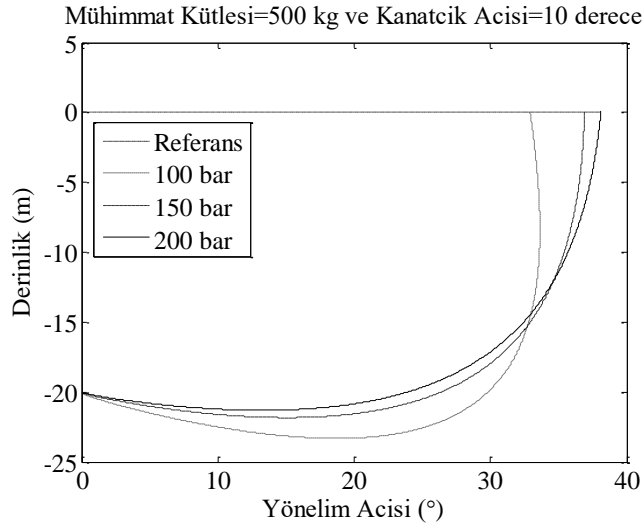
Şekil 7. İtme basıncının 150 bar ve kanatçık açısının 10° olması durumunda farklı kütle değerleri için mühimmatın suda kalma süresi



Şekil 8. İtme basıncının 150 bar ve kanatçık açısının 10° olması durumunda farklı kütle değerleri için mühimmatın su yüzeyine göre yönelim (yunuslama) açısı



Şekil 9. Mühimmat kütleinin 500 kg ve kanatçık açısının 10° olması durumunda farklı itme basıncı değerleri için mühimmatın suda kalma süresi



Şekil 10. Mühimmat kütleinin 500 kg ve kanatçık açısının 10° olması durumunda farklı itme basıncı değerleri için mühimmatın su yüzeyine göre yönelim (yunuslama) açısı

6. Tartışma ve Sonuç (Discussion and Conclusion)

Tablo 2 ve Tablo 3’de verilen benzetim sonuçları incelendiğinde ilk göze çarpan husus; kapsül dahil mühimmat kütleinin 750 kg olması halinde, kanatçık açısının 5° olduğu durumda mühimmatın su yüzeyine çıkamadığıdır (satha ulaşamadığıdır). Benzer durum, aynı kanatçık açısında itme basıncı 150 bar iken kütleinin 500 kg değerinde olduğu kombinasyonlar için de ortaya çıkmaktadır. Sabit kanatçık açısının 10°’ye çıkarılması halinde ise, 750 kg’lık mühimmat yalnızca itme basıncının 100 bar olduğu durumlarda satha ulaşmamaktadır.

Mevcut benzetim kombinasyonlarının tamamı değerlendirildiğinde, genel olarak kanatçık açısı ve itme basıncındaki artışla derinlik ve kütle değerlerindeki azalmanın satha ulaşma süresini düşürdüğü, buna mukabil mühimmatın su dışına çıkarken yüzeyle yaptığı nihai yönelim (yunuslama) açısını artırdığı görülmektedir. Tablo 2 ve Tablo 3’deki veriler üzerinden nicel bir değerlendirme yapılırsa, diğer parametreler sabit tutulmak kaydıyla kanatçık açısının 5’den 10 derece’ye (iki katına) çıkarılması satha ulaşma süresini ortalama %37 oranında kısaltırken, nihai yunuslama açısını ortalama %183 kadar artırmıştır. Mühimmatın

fırlatma derinliğinin 20 m'den 50 m'ye (iki buçuk katına) yükseltilmesi durumunda ise satha ulaşma süresi ortalama %43 oranında artmış; buna karşın nihai yunuslama açısı %29'luk bir düşüş göstermiştir. Yukarıda da belirtildiği gibi, itme basıncındaki artış mühimmatın su içerisindeki hareket süresinde azalmaya neden olurken, nihai yunuslama açısını da artırmıştır. Bir başka deyişle, basıncın 100 bar'dan önce 150 bar (bir buçuk katına) ve sonra da 200 bar (iki katına) yükseltilmesi halinde satha ulaşma süreleri sırasıyla %22 ve 36 oranlarında gerilemiş, nihai yunuslama açısı ise sırasıyla %10 ve 16'lık yükselişler göstermiştir. Kanatçık açısının 10 derece, fırlatma derinliğinin 20 m ve mühimmat kütesinin de 500 kg olması durumunda farklı basınç değerleri (100, 150 ve 200 bar) için elde edilen derinlik-zaman ve derinlik-yunuslama açısı grafikleri sırasıyla Şekil 9 ve Şekil 10'da verilmiştir. Şekil 9'dan görüleceği gibi, itme basıncı azaldıkça mühimmatın su yüzeyine doğru hareketine başlamadan önceki dibe batma miktarı artmakta, bu da doğal olarak satha ulaşma süresini uzatmaktadır. Nihayet mühimmat kütesi 250 kg'dan 500 kg (iki kat) ve 750 kg (üç kat) şeklinde artırıldığında ise, satha ulaşma süresi değerleri sırasıyla %124 ve 279 oranında uzamış, öte yandan nihai yunuslama açısında sırasıyla %30 ve 52'lik düşüş gözlenmiştir. Diğer parametreler 10 derece, 20 m ve 150 bar değerlerinde sabit tutulmak üzere farklı kütle (250, 500 ve 750 kg) sahip mühimmatın satha ulaşma süresi ve yunuslama açısını karşılaştırmalı olarak gösteren grafikler sırasıyla Şekil 7 ve Şekil 8'de sunulmuştur. Yukarıda Şekil 9 için yapılan yorumun bir benzeri Şekil 7'deki grafikler üzerinden de yapılabilir. Bir başka deyişle, beklenildiği üzere kütesindeki artışa paralel olarak fırlatmanın hemen ardından mühimmatın ilk batma miktarı artış göstermiş; dolayısıyla da satha çıkışı daha uzun zaman almıştır.

7. Simgeler (Symbols)

Latin Harfleri (Latin Letters)

- a : Burun ovallik yarıçapı
- $\vec{a}_{M/O}$: M noktasının O noktasına göre bağlı doğrusal ivme vektörü
- b : Mühimmatın kanat açıklığı
- b_v : Viskoz sürtünme katsayısı
- $\hat{C}^{(x,y)}$: F_x eksen takımından F_y eksen takımına dönüşüm matrisi
- C_{D0} : Sürüklenme kuvveti katsayısı
- C_L : Kaldırma kuvveti katsayısı
- C_m : Hidrodinamik yunuslama momenti katsayısı
- c_r : Kök veteri
- c_t : Uç veteri

Çalışma kapsamında geliştirilen dinamik model ve hazırlanan bilgisayar kodu kullanılarak, farklı boyut ve kütle karakteristiğine sahip mühimmatların bir su altı platformundan fırlatılması durumundaki dinamik davranışının benzetimi gerçekleştirilebilir. Özellikle bu çalışmada belli kabuller dahilinde yapılan hidrodinamik modellemenin gerçeğe daha yakın bir hale getirilmesiyle, bilgisayar benzetimleri sonucunda ulaşılan sonuçların daha doğru olması sağlanacaktır. Ayrıca, burada değişken olarak alınan sabit kanatçık açısı, fırlatma derinliği, itme basıncı ve mühimmat kütesi parametreleri için yeterince fazla değer atanarak oluşturulacak geniş veri setleri kullanılarak, parametreler için göz önüne alınan değer aralıklarında bulunan bütün mühimmatların satha ulaşma süresi ve nihai yunuslama açısını yaklaşık olarak verecek yapay sinir ağı tabanlı yapılar gibi doğrusal olmayan modeller de hazırlanabilir.

Sonuç olarak, bu çalışma kapsamında; su altı platformlarından fırlatılacak ve planlanan yörüngesinin su dışına kadar olan kısmını üzerinde denetim uygulanmaksızın itme kuvvetinin etkisiyle tamamlayacak olan mühimmatların dinamik modeli çıkarılmış ve ilgili parametrelerin farklı nicel değerleri için mühimmatın su içerisindeki davranışını belirlemede kullanılabilecek bir benzetim modeli oluşturulmuştur. Anılan benzetim modeli burada yapıldığı gibi yalnızca satha ulaşma süresi ve yunuslama açısı değerlerinin hesaplanması için değil, gereksinim duyulan diğer sistem parametrelerinin elde edilmesi amacıyla da uygulanabilir. Ayrıca yapılan kabullerin yeni yöntem ve yaklaşımlarla iyileştirilmesi halinde, daha gerçekçi sonuçlara ulaşılabilecektir.

- D : Sürüklenme kuvveti
 D_0 : F_0 eksen takımı üzerinde zamana göre türev operatörü
 d_M : Mühimmat çapı
 F_0 : Yeryüzü eksen takımı
 F_b : Gövde eksen takımı
 \vec{F}_e : Mühimmat üzerine etkiyen dış kuvvet vektörü
 F_f : Sürtünme kuvveti
 \vec{F}_h : Hidrodinamik kuvvet vektörü
 F_T : İtme kuvveti
 F_w : Hız eksen takımı
 \vec{g} : Yerçekimi ivmesi vektörü
 g : Yerçekimi ivmesi ($=9.81 \text{ m/s}^2$)
 \vec{J}_C : Mühimmatın ağırlık merkezine göre eylemsizlik momenti diyadiği
 J_z : Yunuslama düzlemindeki eylemsizlik momenti bileşeni
 L : Kaldırma kuvveti
 L_c : Kovan boyu
 L_M : Mühimmatın boyu
 \hat{M} : Mühimmatın kovan dışı aşamasındaki toplam kütle matrisi
 M : i. Mühimmat ağırlık merkezi
 ii. Mühimmatın ek kütle dolayısıyla maruz kaldığı momentin yunuslama düzlemindeki bileşeni
 m : Mühimmatın kütlesi
 \hat{M}_A : Ek kütle matrisi
 M_a : Yunuslama momenti
 \vec{M}_e : Mühimmat üzerine etkiyen dış moment vektörü
 M_e : Mühimmat üzerine etkiyen dış moment vektörünün yunuslama düzlemindeki bileşeni
 M_h : Hidrodinamik yunuslama momenti
 \hat{M}_M : Mühimmat kütle matrisi
 \vec{M}_p : Hidrodinamik moment vektörü
 O : F_0 eksen takımının orijini
 P_T : Mühimmat içeren kapsülü kovan dışına fırlatmak için uygulanan basınç
 q : Yunuslama hızı bileşeni
 q_∞ : Mühimmat üzerindeki hidrodinamik basınç
 S_M : Mühimmat kesit alanı
 t : Kuyruk kanatçığı kalınlığı
 u : Mühimmat bağlı hız vektörünün boylamasına eksen doğrultusundaki bileşeni
 v : Mühimmat bağlı hız vektörünün yanal eksen doğrultusundaki bileşeni
 v_M : Mühimmat doğrusal hızının genliği
 \vec{W} : Mühimmatın ağırlık vektörü
 w : Mühimmat bağlı hız vektörünün düşey eksen doğrultusundaki bileşeni
 $\vec{u}_i^{(j)}$: j eksen takımının i . ($i=1, 2$ ve 3) birim vektörü
 $\vec{v}_{M/O}$: M noktasının O noktasına göre bağlı doğrusal hız vektörü
 v_s : Stribeck hızı
 X : Mühimmatın ek kütle dolayısıyla maruz kaldığı kuvvetin eksenel doğrultudaki bileşeni
 x_b : Mühimmat boylamasına eksenini gösteren sembol
 X_e : Mühimmat üzerine etkiyen dış kuvvet vektörünün yatay bileşeni
 X_h : Eksenel hidrodinamik kuvvet
 x_M : Mühimmatın eksenel konumu
 x_m : Mühimmatın burnu ve ağırlık merkezi arasındaki uzaklık
 y_b : Mühimmat yanlamasına eksenini gösteren sembol
 Z : Mühimmatın ek kütle dolayısıyla maruz kaldığı kuvvetin düşey doğrultudaki bileşeni
 z_b : Mühimmat düşey eksenini gösteren sembol

- Z_e : Mühimmat üzerine etkiyen dış kuvvet vektörünün düşey bileşeni
 Z_h : Düşey hidrodinamik kuvvet

Yunan Harfleri (Greek Letters)

- α : Hücüm açısı
 $\vec{\alpha}_{b/0}$: Mühimmatın yere göre açısal ivme vektörü
 β : Yana kayma açısı
 δ_f : Sabit kuyruk kanatçığı açısı
 γ : Biçim faktörü
 μ_c : Coulomb sürtünme katsayısı
 μ_s : Statik sürtünme katsayısı
 ν_w : Suyun kinematik viskozitesi
 $\vec{\omega}_{b/0}$: Mühimmatın yere göre açısal hız vektörü
 ρ_w : Su yoğunluğu
 π : Pi sayısı (≈ 3.14)
 θ : Yunuslama açısı

Teşekkür (Acknowledgement)

Makalenin yazarları, çalışmanın gerçekleştirilmesi sırasındaki katkılarından dolayı Koray KÜÇÜK ve Berkay BAYKARA'ya teşekkürü bir borç bilirlir.

Kaynaklar (References)

1. Federation of American Scientists (FAS)-AGM-84 Mühimmatı Ağ Sayfası. <http://www.fas.org/man/dod-101/sys/smart/agm-84.htm>, 2009.
2. New Submarine Ağ Sayfası. http://blogs.knoxnews.com/knx/eder/2007/12/new_s_ubmarine_money_has_nuke_f.html, 2007.
3. Wikipedia-Boeing Harpoon Maddesi, http://en.wikipedia.org/wiki/Boeing_Harpoon, Mart 2009.
4. Lampaert, V., Swevers, J. and Al-Bender, F., Comparison of Model and Non-Model Based Friction Compensation Techniques in the Neighbourhood of Pre-sliding Friction, Proceedings of the 2004 American Control Conference, Boston, Massachusetts, USA, 1121-1126, 2004.
5. Bø, H., Hydrodynamic Estimation and Identification, Yüksek Lisans Tezi, Norwegian University of Science and Technology (NTNU), Department of Engineering Cybernetics, 2004.
6. Özkan, B., Dynamic Modeling, Guidance, and Control of Homing Missiles, PhD Dissertation, Middle East Technical University, Ankara, Turkey, 2005.

7. Ridley, P., Fontan, J. and Corke, P., Submarine Automatic Control, Common Proceeding of the Queensland University of Technology-School of Mechanical Engineering and CSIRO Manufacturing Science and Technology, Australia, 2006.

8. Özkan, B., Denizaltıdan Kapsül İçerisinde Fırlatılan Bir Mühimmatın Dinamik Modellemesi, 14. Ulusal Makina Teorisi Sempozyumu, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Kuzey Kıbrıs Kampüsü, Kuzey Kıbrıs Türk Cumhuriyeti, 2009.

Bülent ÖZKAN*

Bülent ÖZKAN was born in 1974 in Taşköprü. He was graduated from the mechanical engineering department of Gazi University in 1991. Afterwards, he took the MSc and PhD degrees from Middle East Technical University in mechanical engineering in 1999 and 2005, respectively. He has worked in TÜBİTAK SAGE since 2000. His research interests are on system dynamics, guidance and control, robotics, dynamics of machinery, and mechanisms. He is married and has a son.