

## 5. MODEL DENEYLERİ İLE GEMİ DİRENCİNİ BELİRLEME YÖNTEMLERİ

Model deney sonuçlarından yararlanılarak, tam ölçekli bir geminin direncini belirlemede kullanılabilecek birçok yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntemlerden önemli olanları; **Froude yöntemi**, **Telfer'in geosim yöntemi**, **Hughes yöntemi**, **Prohaska yöntemi**, **ITTC 1957 yöntemi** ve **ITTC 1978 yöntemi**dir. Aşağıda Froude yöntemi, Hughes yöntemi, ITTC 1957 yöntemi ve ITTC 1978 yöntemi detaylı olarak açıklanmıştır:

### 5.1 Froude Yöntemi

Model deneyleri yardımıyla gemi direncinin belirlenmesi üzerine ilk bilimsel çalışmalar, 1868'li yıllarda W. Froude tarafından gerçekleştirilmiştir. Froude, model deneylerinden yararlanılarak toplam gemi direncinin belirlenmesindeki güçlüğü ( **$F_n$**  ve  **$R_n$**  değerlerinin aynı anda sağlanması gerektiğini); toplam direnci, sürtünme direnci ve artık direnç olarak iki bileşene ayırmak suretiyle çözmüştür. Bu ayırımda sürtünme direnci sadece Reynolds sayısına, artık direnç (viskoz basınç direnci + dalga direnci) ise hem Reynolds sayısına hem de Froude sayısına bağlı olduğu için, söz konusu bu ayırım teorik olarak tam doğru değildir. Ancak mühendislik amaçlarına uygun olarak gemi direncinin belirlenmesinde kullanılabilecek iyi bir yaklaşımdır.

Froude yönteminde; toplam direnç ( $R_T = R_F + R_R$ ) şeklinde bileşenlere ayrılarak, model deneylerinden hareketle tam ölçekli geminin toplam direncinin belirlenmesinde aşağıdaki sıra takip edilir:

1.  $\lambda = L_s / L_m$  ölçeğinde yapılan model, gerçek gemi ile aynı  **$F_n$**  değerine sahip olacak şekilde ( **$F_{n_m} = F_{n_s}$** ), değişik  $v_m = v_s / \sqrt{\lambda}$  hızlarında çekilir.
2. Söz konusu bu hızlarda, modelin  **$R_{Tm}$**  toplam direnç değerleri ölçülür. Modelin herhangi bir hızdaki toplam direnç değeri, modeli çeken çelik teldeki gerilme kuvvetine eşittir.
3. Modelin sürtünme direnci ( **$R_{Fm}$** ) hesaplanır. Modelin sürtünme direnci, aynı boy ve aynı ıslak yüzey alanına sahip düz bir levhanın aynı hızda çekilmesi ile bulunacak olan levha sürtünme direncine eşit olduğu kabul edilerek hesaplanır. Türbülanslı akım halinde Reynolds sayısına bağlı olarak düz levha sürtünme direnç katsayılarını veren formüllerden  **$C_F$**  hesaplandıktan sonra, modelin sürtünme direnci aşağıdaki bağıntı ile hesaplanır:

$$R_{Fm} = \frac{1}{2} C_{Fm} \rho_m S_m v_m^2$$

**$\rho_m$** : Suyun kütleli yoğunluğu (ton/m<sup>3</sup>)  
 **$S_m$** : Modelin ıslak yüzey alanı (m<sup>2</sup>)  
 $(S_s / S_m) = \lambda^2$   
 **$v_m$** : Model hızı (m/s)

4. Model deneyi ile ölçülen toplam dirençten, hesaplanan sürtünme direnci çıkarılarak modelin artık direnci bulunur:

$$R_{Rm} = R_{Tm} - R_{Fm}$$

5. Gemi ve modelin aynı  **$F_n$**  değerine ( **$F_{n_m} = F_{n_s}$** ) sahip olmaları (Froude benzerliği) ve dolayısıyla artık direnç katsayılarının eşit olması ( **$C_{Rm} = C_{Rs}$** ) gerçeğinin bir sonucu olan Froude Mukayese Kanununa göre  **$v_s$**  hızındaki geminin artık direnci bulunur:

$$R_{Rs} = R_{Rm} \frac{\rho_s}{\rho_m} \lambda^3 = (R_{Tm} - R_{Fm}) \frac{\rho_s}{\rho_m} \lambda^3$$

6. Geminin sürtünme direnç katsayısı ve sürtünme direnci, yukarıda 3. maddede model için yapılan hesaplamalara benzer şekilde gemi boyu ve gemi hızı kullanılarak hesaplanır:

$$R_{Fs} = \frac{1}{2} C_{Fs} \rho_s S_s v_s^2$$

$\rho_s$ : Suyun kütlelesel yoğunluğu (ton/m<sup>3</sup>)  
 $S_s$ : Geminin ıslak yüzey alanı (m<sup>2</sup>)  
 $(S_s / S_m) = \lambda^2$   
 $v_s$ : Gemi hızı (m/s)

7. Hesaplanan sürtünme direnci ve artık direnç toplanarak, geminin toplam direnci bulunur:

$$R_{Ts} = R_{Fs} + R_{Rs} = R_{Fs} + (R_{Tm} - R_{Fm}) \frac{\rho_s}{\rho_m} \lambda^3$$

Froude yönteminde, model ve gemi için sürtünme direnç katsayıları levhalar ve dubalar üzerinde yapılmış deneysel ve teorik çalışmalar dikkate alınarak, türbülanslı akım hali için verilmiş formüllerden hesaplanır.

## 5.2 Hughes Yöntemi

G. Hughes; 1950'lerde yaptığı deneysel çalışmalar sonucunda, gemi toplam direncinin üç ana bileşene ayrılmasının daha doğru olacağını belirledi. Söz konusu bu direnç bileşenleri, viskozite kaynaklı **sürtünme direnci** ve **viskoz basınç direnci** ile yerçekimi **kaynaklı dalga** direncidir.

Bu üç direnç bileşeninin ayrı ayrı ölçülememesi sebebiyle, Reynolds sayısına bağlı olanlar birleştirilmiş ve bunların toplamına **viskoz direnç** denilmiştir. Böylece bir geminin direnci, Hughes yaklaşımında **viskoz direnç** ve **dalga direnci** olmak üzere fiziksel açıdan daha doğru bir şekilde bileşenlere ayrılmıştır:

$$R_T(Rn, Fn) = R_F(Rn) + R_{pV}(Rn) + R_W(Fn)$$

$$R_V(Rn) = R_F(Rn) + R_{pV}(Rn)$$

$$R_T(Rn, Fn) = R_V(Rn) + R_W(Fn)$$

Söz konusu bu durum direnç katsayıları şeklinde de aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$C_T(Rn, Fn) = C_F(Rn) + C_{pV}(Rn) + C_W(Fn)$$

$$C_V(Rn) = C_F(Rn) + C_{pV}(Rn)$$

$$C_T(Rn, Fn) = C_V(Rn) + C_W(Fn)$$

Viskoz direnci oluşturan bileşenlerden biri olan **sürtünme direnci**, yukarıda Froude yönteminde anlatıldığı şekilde geliştirilmiş yaklaşık formüller yardımıyla hesaplanır.

**Viskoz basınç direnci** ise hesaplanan sürtünme direncinin sabit bir **k** katsayısı ile çarpılmasıyla bulunur. Tamamen gemi formuna bağlı olan bu **k** değerine **form faktörü** denilir. **k** Form faktörünün, gemi hızı ve ölçekle değişmediği kabul edilir.

$$R_V = R_F + R_{pV} = (1 + k) R_F \text{ veya}$$

$$C_V = C_F + C_{pV} = (1 + k) C_F$$

$$(1 + k) = \frac{R_V}{R_F} = \frac{C_V}{C_F}$$

Burada  $(1+k)$ , verilen bir tekne formu için sabit bir değerdir.

Gemi direncinin model deneyleri yardımı ile hesaplanmasında Hughes yönteminin uygulanması için takip edilecek sıra aşağıdaki gibi olmalıdır:

1.  $\lambda = (L_s / L_m)$  ölçeğinde yapılan model, gerçek gemi ile aynı  **$F_n$**  değerine sahip olacak şekilde ( **$F_{n_m} = F_{n_s}$** ),  $v_m = v_s / \sqrt{\lambda}$  karşıt hızda çekilir.
2. Modelin toplam direnci ( **$R_{Tm}$** ) ölçülür ve toplam direnç katsayısı ( **$C_{Tm}$** ) hesaplanır.
3. Modelin sürtünme direnç katsayısı ( **$C_{Fm}$** ), yukarıda Froude yönteminde anlatıldığı şekilde modelin Reynolds sayısına ( **$Rn_m$** ) bağlı olarak hesaplanır.
4.  **$k$**  Form faktörü belirlenir.  **$k$**  Form faktörünü değişik yöntemler kullanarak elde etmek mümkündür. Söz konusu bu yöntemler aşağıda detaylıca anlatılacaktır.
5. Modelin viskoz direnç katsayısı hesaplanır:

$$C_{Vm} = C_{Fm} + C_{PVm} = (1 + k) C_{Fm}$$

6. Modelin toplam direnç katsayısından viskoz direnç katsayısı çıkartılarak, modelin dalga direnç katsayısı elde edilir:

$$C_{Wm} = C_{Tm} - C_{Vm}$$

7. Gemi ve model, aynı  **$F_n$**  değerlerine sahip ve geometrik benzer oldukları için, dalga direnç katsayıları da aynı olacaktır ( **$C_{Wm} = C_{Ws}$** ).

8. Geminin sürtünme direnç katsayısı ( $C_{Fs}$ ), Froude yönteminde anlatıldığı şekilde geminin Reynolds sayısına ( $Rn_s$ ) bağlı olarak hesaplanır.

9. Geminin viskoz direnç katsayısı ( $C_{Vs}$ ), toplam direnç katsayısı ( $C_{Ts}$ ) ve dolayısıyla geminin toplam direnci ( $R_{Ts}$ ) hesaplanır. Model için hesaplanan  **$k$  form faktörünün hız ve ölçekle değişmediği kabul edildiğinden**, gemi için de  **$k$  form faktörü aynı değere sahip olacaktır.**

$$C_{Vs} = C_{Fs} + C_{PVs} = (1 + k) C_{Fs}$$

$$C_{Ts} = (1 + k) C_{Fs} + C_{Ws} = C_{Vs} + C_{Ws}$$

$$R_{Ts} = \frac{1}{2} C_{Ts} \rho_s S_s v_s^2$$

### 5.2.1 *k* Form Faktörünün Hesaplanması

Hughes yönteminde kullanılan ve geminin viskoz basınç direncinin sürtünme direncine oranını gösteren *k* form faktörü, üç farklı şekilde hesaplanabilir:

#### a) Ampirik formüller kullanılarak *k* form faktörünün hesabı

Gemi ve modelin sürtünme direnç katsayısının hesabında ITTC 1957 formülü kullanılıyor ise *k* form faktörünün hesabında da aşağıdaki formül kullanılabilir:

$$k_{ITTC} = \frac{32.8 C_B^2}{(L/B)^2 (B/T)} - 0.03$$

*k* Form faktörü için verilmiş ampirik formüllerden en uygun olanı kullanılarak, yaklaşık olarak *k* form faktörü elde edilebilir.

#### b) Düşük Froude sayılarında yapılan model deney sonuçlarından yararlanılarak *k* form faktörünün belirlenmesi

Düşük Froude sayılarında hareket eden bir geminin oluşturduğu dalgalar ve dolayısıyla dalga direnci ihmal edilebilecek mertebededir. Böyle bir geminin sudan gördüğü direncin tamamı viskozite kaynaklıdır, yani geminin toplam direnci geminin viskoz direncine eşittir.

Dalga direncinin ihmal edilebileceği gemi hızlarının, Froude benzerliğine göre karşıt hızlarında çekilen modelin oluşturacağı dalgalar ve dolayısıyla dalga



dirençleri ihmal edilebilecek düzeyde olacaktır. Böylece modelin ölçülen toplam direnci, modelin viskoz direncine eşit olacaktır. Modelin viskoz direnci ve viskoz direnç katsayısı belirlendikten sonra, daha önce verilen ampirik formüller yardımıyla sürtünme direnç katsayısı elde edilir ve sonra da **k** form faktörü belirlenir.

Bu yöntemle form faktörünün belirlenmesinde takip edilecek sıra, aşağıda verildiği gibi olmalıdır:

1. Gemi dalga direncinin ihmal edilebileceği Froude sayısı ve gemi hızı belirlenir.

2.  $v_m = v_s / \sqrt{\lambda}$  karşıt hızda çekilen modelin **R<sub>Tm</sub>** toplam direnci ölçülür ve **C<sub>Tm</sub>** toplam direnç katsayısı hesaplanır. Bu hızda modelin toplam direnci, modelin viskoz direncine eşit olacaktır:

$$R_{Wm} = 0 \text{ ve } C_{Wm} = 0$$

$$R_{Tm} = R_{Vm} \text{ ve } C_{Tm} = C_{Vm}$$

3. Modelin viskoz direnç katsayısı, sürtünme direnç katsayısı ve **k** form faktörü hesaplanır:

$$C_{Vm} = \frac{R_{Vm}}{\frac{1}{2} \rho_m S_m v_m^2}$$

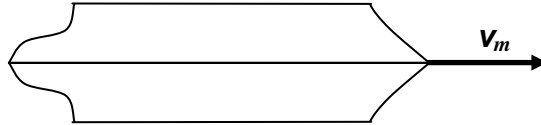
$$Rn_m = \frac{v_m L_m}{\nu_m}, \quad C_{Fm} = \frac{0.075}{(\log Rn_m - 2)^2} \quad (\text{ITTC 1957})$$

$$C_{Vm} = C_{Fm} + C_{pVm} = (1 + k) C_{Fm}$$

$k = \frac{C_{Vm}}{C_{Fm}} - 1$  model için bulunan  $k$  değerinin, tam ölçekli gemi için de aynı olduğu kabul edilir ( $k_s = k_m = k$ ).

**c) Çift modelle yapılan deney sonuçlarından yararlanılarak  $k$  form faktörünün belirlenmesi**

Gemi modelinin yüklü su hattı altında kalan kısmının bir eşi daha yapılarak elde edilen ikiz modeller, yüklü su hatları simetri düzlemi olacak şekilde birleştirilir ve Şekil 5.1’de gösterildiği gibi ayna simetrik bir çift model oluşturulur.



**Şekil 5.1** Su içine dalmış bir çift modelin direnç deneyi.

Oluşturulan bu çift modelin yeterli derinlikte çekilmesiyle ölçülecek toplam direnç, tek bir modelin aynı hızda su yüzeyinde çekilmesiyle bulunacak viskoz direncinin iki katı olacaktır. Çünkü çift modelle yapılan deneyde dalga direnci olmayacak ve toplam direnç de viskozite kaynaklı olacaktır. Böylece tek bir modelin viskoz direnci ve  $k$  form faktörü aşağıdaki sıra takip edilerek belirlenebilir:

1.  $v_m = v_s / \sqrt{\lambda}$  karşıt hızda çekilen ayna simetrik çift modelin  $R_{Tm}$  toplam direnci ölçölür ve  $C_{Tm}$  toplam direnç katsayısı hesaplanır. Ölçölen bu toplam direnç, tek bir modelin viskoz direncinin iki katıdır:

$$R_{Tm} = 2 R_{Vm} \text{ veya } R_{Vm} = R_{Tm} / 2$$

$$C_{Tm} = 2 C_{Vm} \text{ veya } C_{Vm} = C_{Tm} / 2$$

2. Modelin viskoz direnç katsayısı ve sürtünme direnç katsayısı belirlendikten sonra model için  $k$  form faktörü hesaplanır:

$$C_{Vm} = \frac{R_{Vm}}{\frac{1}{2} \rho_m S_m v_m^2}$$

$$Rn_m = \frac{v_m L_m}{v_m}, \quad C_{Fm} = \frac{0.075}{(\log Rn_m - 2)^2} \quad (\text{ITTC 1957})$$

$$C_{Vm} = C_{Fm} + C_{pVm} = (1 + k) C_{Fm}$$

$$k = \frac{C_{Vm}}{C_{Fm}} - 1 \quad (\text{Model için bulunan } k \text{ değęerinin, tam ölçekli gemi için de aynı değęer olduğu kabul edilir.})$$

### 5.3 ITTC 1957 Yöntemi

Model deneylerinden hareketle gemi toplam direncinin hesaplanmasında yararlanılabilecek yukarıda anlatılan Froude yöntemine benzer diğer bir yöntem de ITTC 1957 yöntemidir. Model deney sonuçlarının tam ölçekli gemiye uygulanışı için, 1957’de Uluslararası Model Deney Tankları Konferansında (ITTC 1957), düz levha sürtünme direnç katsayısı için aşağıdaki formül kabul edilmiştir:

$$C_F = \frac{0.075}{(\log Rn - 2)^2} \quad (\text{ITTC 1957})$$

Böylece ITTC 1957 yöntemi, toplam direnci Froude prensibine göre bileşenlerine ayırarak, yukarıdaki formülle belirlenen eğriyi gemi-model uyum hattı olarak kabul etmiştir. ITTC 1957 yöntemiyle gemi toplam direncinin hesaplanmasında aşağıdaki sıra takip edilir:

1. Gemi karşıt hızında çekilen modelin toplam direnci ( $R_{Tm}$ ) ölçülür.

2. Modelin toplam direnç katsayısı hesaplanır:

$$C_{Tm} = \frac{R_{Tm}}{\frac{1}{2} \rho_m S_m v_m^2}$$

3. Modelin  $C_{Fm}$  sürtünme direnç katsayısı, ITTC 1957 formülüyle hesaplanır.

4. Toplam direnç katsayısından sürtünme direnç katsayısı çıkartılarak, modelin artık direnç katsayısı elde edilir:

$$C_{Rm} = C_{Tm} - C_{Fm}$$

5. Gemi ve model aynı Froude sayısına ( $\mathbf{Fn}_s = \mathbf{Fn}_m$ ) sahip oldukları için, bunların artık direnç katsayıları da birbirine eşit olur ( $\mathbf{C}_{Rs} = \mathbf{C}_{Rm}$ ).
6. Tam ölçekli gemi için  $\mathbf{C}_{Fs}$  sürtünme direnç katsayısı da ITTC 1957 formülüyle hesaplanır.
7. Geminin sürtünme direnç katsayısı ( $\mathbf{C}_{Fs}$ ) ve artık direnç katsayısı ( $\mathbf{C}_{Rs}$ ) toplanarak, geminin toplam direnç katsayısı ( $\mathbf{C}_{Ts}$ ) ve dolayısıyla geminin toplam direnci ( $\mathbf{R}_{Ts}$ ) elde edilir:

$$C_{Ts} = C_{Fs} + C_{Rs}$$

$$R_{Ts} = \frac{1}{2} C_{Ts} \rho_s S_s v_s^2$$

## 5.4 ITTC 1978 Yöntemi

1978 yılında ITTC üyeleri, tek pervaneli gemiler için  $C_{Ts}$  toplam direnç katsayısını aşağıdaki gibi belirlemeyi önermişlerdir:

$$C_{Ts} = (1 + k)C_{Fs} + C_R + C_A + C_{AA}$$

Burada,

$k$ : Form faktörü

$C_{Fs}$ : ITTC 1957 formülüyle hesaplanan gemi sürtünme direnci katsayısı

$C_R$ : Modelin artık direnç katsayısı ( $C_R = C_{Tm} - (1+k)C_{Fm}$ )

$C_A$ : Pürüzlülük etkisi

$C_{AA}$ : Hava direnci katsayısı

Model deneyleri ile gemi direncini belirlemek için kullanılan değişik yöntemlerde, gemi-model uyum hattı olarak çeşitli formüller kullanılmıştır. Türbülanslı akımda  $C_F$  sürtünme direnci katsayısını veren bu formüllerin,  $Rn$  değerlerine bağlı olarak verdikleri  $C_F$  değerleri birbirinden farklıdır. Örneğin ITTC 1957 formülüne göre bulunan  $C_F$  değerleri, Hughes formülü ile bulunan  $C_F$  değerlerinden % 12 daha büyüktür.