

## Traktör Tipi Refakat Römorkörleri için Dinamik Cer Kuvveti Hesabı

Çağrı Aydın<sup>1</sup>, Utku Cem Karabulut<sup>2</sup>, Uğur Onal Ünal<sup>3</sup>, Kadir Sariöz<sup>4</sup>

<sup>1</sup>aydincagr@itu.edu.tr, <sup>2</sup>ukarabulut@bandirma.edu.tr, <sup>3</sup>ounal@itu.edu.tr, <sup>4</sup>sarioz@itu.edu.tr

<sup>1,3,4</sup>İstanbul Teknik Üniversitesi, Gemi İnşaatı ve Deniz Bilimleri Fakültesi, 34469 Maslak, İstanbul

<sup>2</sup>Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi, Denizcilik Fakültesi, 10200 Bandırma, Balıkesir

### Özet

Bu makalede traktör tipi refakat römorkörleri tarafından büyük gemilere, özellikle petrol tankerlerine, uygulanan dinamik cer (durdurma ve döndürme) kuvvetlerinin belirlenmesinde kullanılabilecek iki farklı hesaplamalı yöntem sunulmaktadır. Bir refakat römorkörünün performansının belirlenmesinde en önemli aşama römorkör teknesinden ve skeg gibi takıntılardan kaynaklanan hidrodinamik kuvvetlerin belirlenmesidir. Bu hidrodinamik kuvvetler ve pervane tarafından sağlanan itme kuvveti kullanılarak römorkörün refakat performansını belirleyen durdurma ve döndürme kuvvetleri hesaplanabilir. Her ne kadar hidrodinamik kuvvetlerin belirlenmesinde en güvenilir yöntemin ölçekli model deneyleri olduğu kabul edilse de bu tür deneyler maliyet ve zaman kısıtlamaları nedeni ile dizayn sürecinin başlangıç aşamaları için kullanışlı değildir. Bu makalede sunulan yöntemlerden ilki model deneyi ölçümleri ile seyir tecrübesi verilerinden elde edilmiş yarı-ampirik yöntemlere dayanmakta ve kısıtlı dizayn bilgisinin mevcut olduğu kavram dizaynı aşamasında kullanılmak üzere geliştirilmiştir. Tekne ve takıntı geometrilerinin detaylarının belli olduğu daha ileri dizayn aşamalarında hidrodinamik kuvvetlerin belirlenmesinde Reynolds-Ortalama Navier-Stokes (RANS) denklemlerine dayalı hesaplama yöntemi önerilmektedir. Yerel akım özellikleri dikkate alınan bu yaklaşım tekne ve takıntı geometrilerinin iyileştirilmesinde de kullanılabilecektir. Bu çalışmada refakat römorkörlerinin performansını belirlemeye yönelik iki farklı yaklaşım tanıtılmakta ve tipik bir refakat römorkörü üzerinde uygulanmaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** Refakat Römorkörü, Hidrodinamik Kuvvetler, RANS.

## Computation of Steering and Braking Forces of Tractor Type Escort Tugs

Çağrı Aydın<sup>1</sup>, Utku Cem Karabulut<sup>2</sup>, Uğur Onal Ünal<sup>3</sup>, Kadir Sariöz<sup>4</sup>

<sup>1</sup>aydincagr@itu.edu.tr, <sup>2</sup>ukarabulut@bandirma.edu.tr, <sup>3</sup>ounal@itu.edu.tr, <sup>4</sup>sarioz@itu.edu.tr

<sup>1,3,4</sup> İstanbul Teknik Üniversitesi, Gemi İnşaatı ve Deniz Bilimleri Fakültesi, 34469 Maslak, İstanbul

<sup>2</sup>Bandırma Onyedli Eylül Üniversitesi, Denizcilik Fakültesi, 10200 Bandırma, Balıkesir

### Abstract

This paper presents two practical computational procedures to predict the steering and braking forces applied by tractor type escort tugs to large vessels, particularly oil tankers. The essential part of the escort performance prediction methodology is the computation of hydrodynamic forces generated by the tug's hull and the appendages such as skeg. These forces can be converted into the steering and braking force components which define the escort performance of the tug. The hydrodynamic forces can be estimated by scaled model tests however this approach is not suitable for early design studies because of cost and time restrictions. The first methodology presented in this paper is based on semi-empirical methods, obtained from model test measurements and full-scale test results, and developed in order to be used at early design stages where limited design information is available. A computational technique based on Reynolds-Averaged-Navier-Stokes (RANS) equations is recommended for the later stages of design process in which more precise definition of hull and appendages geometries are available. This approach, which takes local flow characteristics into account, can be used for the optimisation of hull and appendages geometries. In this study, two different approaches are presented and used on a given escort tug.

**Keywords:** Escort Tug, Hydrodynamic Forces, RANS

## 1. Giriş

Büyük gemiler, özellikle yüklü tankerler, İstanbul Boğazı gibi kısıtlı sularda can, mal ve çevre güvenliği açısından ciddi risk oluşturmaktadır. Büyük tonajlı ve tehlikeli madde taşıyan gemiler ile tam boyu 300 metreyi aşan veya özel risk içeren gemi ve deniz araçlarının geçişi sırasında çatışma veya karaya oturma sonucu ortaya çıkacak riskleri azaltmak amacıyla Türk Boğazları Gemi Trafik Hizmetleri (TBGTH) Otoritesi uygun tip, güç ve sayıda refakat römorkörünün eşlik etmesini talep etmektedir. Otorite tarafından belirlenen refakat römorkörü tip, adet ve güç değerleri bazı durumlarda gemi işletmecileri tarafından aşırı bulunmakta ve Otorite'nin bu değerleri hangi kriterlere göre belirlediği sorgulanmaktadır. Başta IMO olmak üzere uluslararası denizcilik kuruluşları İstanbul boğazı gibi kısıtlı sularda özellikle büyük tonajlı tehlikeli madde taşıyan gemilerin refakat römorkörü eşliğinde seyretmesini emniyet açısından kaçınılmaz görmekle birlikte refakat römorkörü kapasitesinin belirlenmesinin bilimsel yöntemlere göre yapılmasını tavsiye etmektedirler (OCIMF, 1997; OCIMF, 2007).

Büyük bir geminin, sınırlı bir su yolundan geçişi sırasında gemi dümen kontrolünü kaybettiğinde veya sevk sistemi ile ilgili sorun yaşadığında, çatışma, karaya oturma gibi kaza risklerini azaltmanın en etkili yolunun yeterli sayı ve özellikte refakat römorkörünün müdahalesi olacağı kabul edilmektedir. Refakat römorkörlerinin konvansiyonel römorkörlere kıyasla en önemli avantajları, yedekledikleri tekneleri döndürmek ya da durdurmak amacıyla dolaylı bir cer kuvveti uygulayabilmeleridir. Burada söz konusu dolaylı cer kuvveti, refakat römorkörünün eşlik ettiği gemiye göre uygun bir hücum açısı ile seyretmesi sonucu elde edilen kaldırma ve direnç kuvvetlerinden kaynaklanmaktadır. Bu römorkörler, sahip oldukları tekne-skeg konfigürasyonu, 360° itiş sağlayabilen sevk sistemleri ve özel cer ekipmanları ile konvansiyonel römorkörlerden ayrılırlar. Refakat römorkörlerinin çeşitli tipleri olmasına karşın bu çalışmada yalnızca traktör tipi refakat römorkörlerinin performans analizi ele alınacaktır (Hutchison ve diğerleri, 1993; Sturmhöfel ve Bartels 1993; Jagannathan ve diğerleri, 1995; Dabbar ve Morgan, 1996; Hensen, 1997).

Refakat römorkörleri eşlik edilen geminin seyir hızına bağlı olarak farklı modlarda kullanılabilirler. 6 knot'un altındaki hızlarda genel uygulama römorkörün direkt modda kumanda edilmesidir. Direkt modda, eşlik edilen gemiyi yavaşlatmak ya da döndürmek için yalnızca sevk sistemi tarafından üretilen kuvvetlerden yararlanır. Seyir hızı arttıkça, özellikle 8 knot'un üzerindeki hızlarda, römorkör dolaylı modda kumanda edilir. Böylece tekne ve skegden kaynaklanan hidrodinamik kuvvetler etkin hale gelirler. Römorkörün belirli bir hücum açısını korumaya çalıştığı serbest dolaylı modda sevk birimleri yalnızca römorkörün merkez hattına dik yönde kuvvet uygularlar. Maksimum döndürme kuvvetinin elde edilmesi amaçlanan tahrikli dolaylı modda ise römorkör operatörü, maksimum makine gücünü kullanırken en verimli hücum açısını korur. Tahrikli dolaylı modda römorkörün maksimum statik cer kuvvetinin çok üzerinde dinamik cer kuvveti elde etmek mümkündür. Serbest dolaylı modda döndürme ve durdurma için yalnızca hidrodinamik kuvvetlerden yararlanılırken, tahrikli dolaylı modda sevk sisteminden kaynaklanan kuvvetler hidrodinamik kuvvetlere eklenerek maksimum döndürme kuvveti elde edilir (Allan, 2000; Allan ve Molyneux, 2004).

Bir refakat römorkörünün eşlik ettiği gemiye uygulayacağı döndürme ve durdurma kuvvetlerinin, sevk ünitesi tarafından üretilen itme kuvveti ve hidrodinamik kuvvetler (boyuna ve yanal öteleme) ve moment (savrulma) kullanılarak kolayca belirlenebileceği gösterilecektir. Burada en büyük zorluk

römorkörün teknesi ve skeg gibi takıntıların belli hücum açılarında yaratacağı hidrodinamik kuvvetlerin belirlenmesinde ortaya çıkmaktadır.

Bu çalışmada, verilen bir refakat römorkörü dizayn konfigürasyonu, eşlik edilen gemi hızı ve operasyon türü için döndürme ve durdurma kuvvetlerinin belirlenmesinde kullanılacak hesaplamalı yöntemler sunulmaktadır. Refakat römorkörü dizaynına ait detaylı tekne ve takıntı geometrisinin mevcut olmadığı varsayılan kavram dizaynı aşamasında kullanılmak üzere model deneyi sonuçlarına dayalı bir yarı-ampirik yöntem önerilmektedir. Bu yöntem sadece temel dizayn parametrelerini kullandığı için oldukça pratiktir ancak tekne ve takıntı geometrileri dikkate alınmadığı için elde edilen sonuçlar oldukça kaba olabilir. Dizaynın ilerleyen aşamalarında tekne ve takıntı geometrilerinin netleşmesi ile RANS temelli bir viskoz, türbülanslı akış hesaplama yöntemi kullanılması mümkün hale gelir. Bu ikinci yaklaşım yarı-ampirik yöntemle göre çok daha karmaşık olmakla birlikte yerel akım özellikleri dikkate alındığından çok daha hassas sonuçlar elde etmek mümkündür.

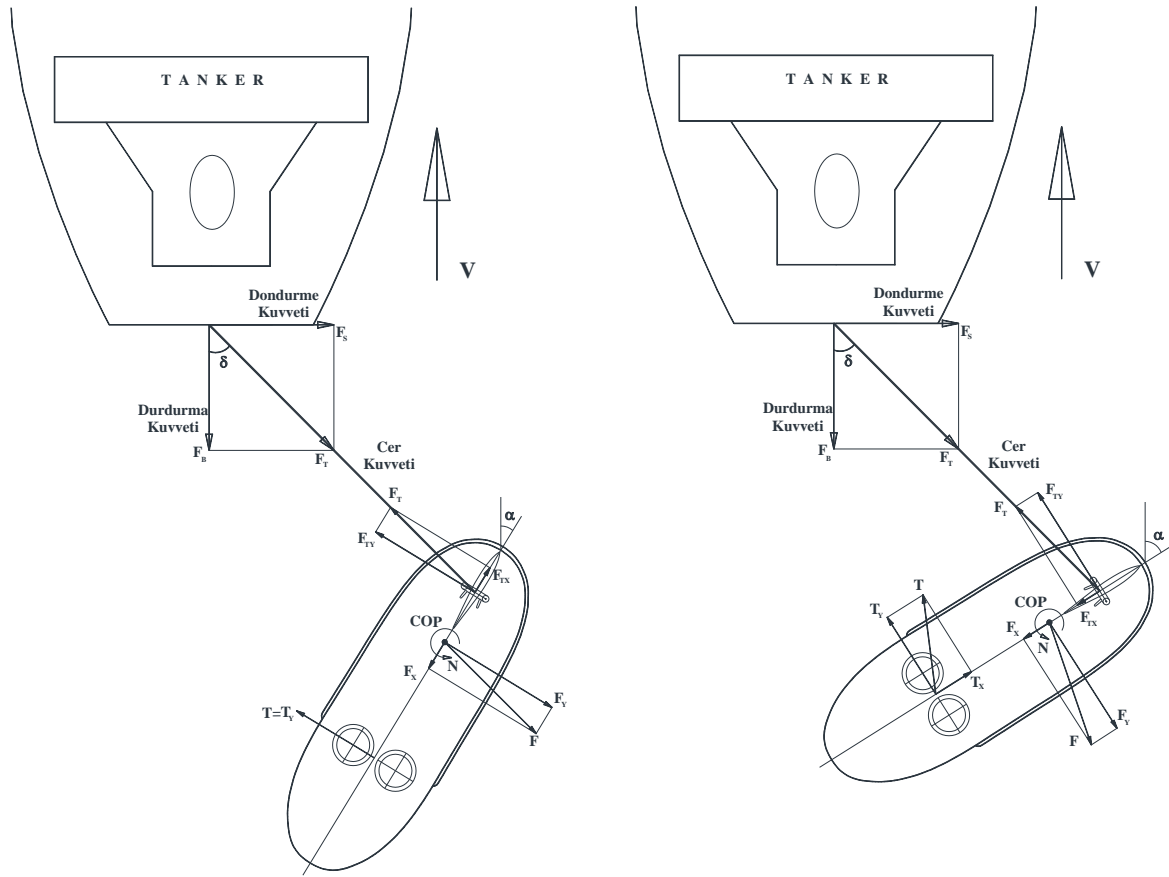
## 2. Döndürme ve durdurma kuvvetleri

Römorkörün sualtı basınç merkezi (COP) referans alındığında, traktör tipi bir refakat römorköre serbest ve tahrikli dolaylı modlarda etkiyen temel kuvvet bileşenleri sırası ile Şekil 1(a) ve 1(b)'de gösterilmiştir. Refakat römorkörü, yedeklenen gemiye çekme halatı vasıtası ile durdurma ve döndürme kuvvetleri uygular. Çekme halatı kuvvetinin yedeklenen geminin hareketine göre boyuna bileşeni durdurma kuvveti ( $F_B$ ), yanıl bileşeni döndürme kuvveti ( $F_S$ ) olarak tanımlanmıştır. Bu kuvvet bileşenleri çekme halatı kuvveti ( $F_T$ ) ve yedekleme açısına ( $\delta$ ) bağılı olarak aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$F_S = F_T \sin \delta \quad (1)$$

$$F_B = F_T \cos \delta \quad (2)$$

Durdurma kuvveti ve döndürme kuvveti oranı römorkörün eşlik edilen geminin merkez hattına göre tanımlanan hücum açısı ( $\alpha$ ) ve yedekleme açısına ( $\delta$ ) bağılı olarak değişecektir.



(a) Serbest dolaylı mod

(b) Tahrikli dolaylı mod

**Şekil 1.** Durdurma ve döndürme kuvveti bileşenleri

Dolaylı modda, iyi dizayn edilmiş römorkör tekne ve skeg geometrileri ile elde edilen etkili hidrodinamik direnç ve kaldırma kuvvetlerinden yararlanılarak yüksek döndürme ve durdurma kuvvetleri elde etmek mümkündür. Şekil 1(a)'da gösterilen serbest dolaylı modda itici kuvvetin yalnızca (römorkör üzerinde tanımlı eksen takımına göre) yanal doğrultuda etki ettiği ve yalnızca hücum açısını korumak için yeterli büyüklükte olduğu kabul edilmiştir. Çekme halatı kuvveti ve itme kuvveti, aşağıdaki gibi, sırası ile X ve Y yönünde kuvvetlerin dengelenmesi ve basınç merkezine etkileyen momentlerin dengelenmesi ile belirlenebilir. Aşağıdaki denklemler kuvvet yönlerinin Şekil 1'de gösterildiği biçimde alınması ile oluşturulmuştur.

$$F_{TX} - F_X = 0 \quad (3)$$

$$T_Y + F_{TY} - F_Y = 0 \quad (4)$$

$$N + F_{TY}x_{FC} + T_Yx_{PC} = 0 \quad (5)$$

İtme kuvveti ve çekme halatı kuvveti aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$T_X = 0 \quad (6)$$

$$F_{TX} = F_X \quad (7)$$

Pervane konumuna göre moment alınarak,

$$F_{TY} = \frac{N + F_Yx_{PC}}{x_{TC} + x_{PC}} \quad (8)$$

$$T_Y = F_Y - F_{TY} = F_Y - \frac{N + F_Y x_{PC}}{x_{TC} + x_{PC}} = \frac{F_Y x_{TC} - N}{x_{TC} + x_{PC}} \quad (9)$$

elde edilebilir. Döndürme ve durdurma kuvvetleri çekme halatı kuvvetinin römorköre göre tanımlanan yerel eksen takımından tankere göre tanımlanan global koordinatlara dönüştürülerek bulunabilir.

$$F_S = F_{TY} \cos \alpha - F_{TX} \sin \alpha \quad (10)$$

$$F_B = F_{TY} \sin \alpha + F_{TX} \cos \alpha \quad (11)$$

Burada

$F_{TY}$  : Çekme halatı kuvvetinin yanal bileşeni (merkez hattına dik)

$F_{TX}$  : Çekme halatı kuvvetinin boyuna bileşeni (merkez hattına paralel)

$F_Y$  : Yanal hidrodinamik kuvvet bileşeni

$F_X$  : Boyuna hidrodinamik kuvvet bileşeni

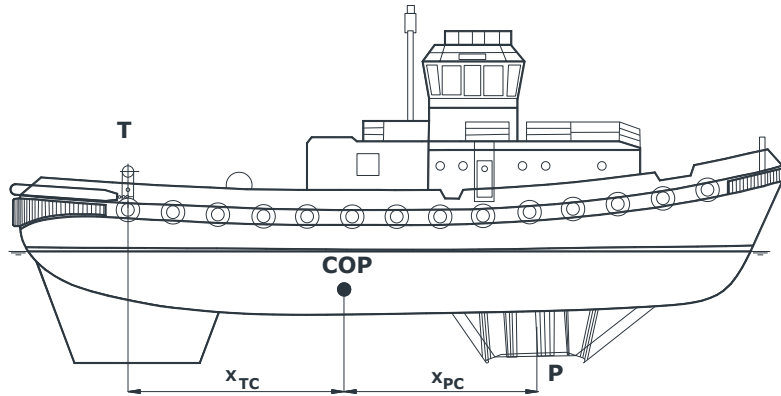
$N$  : Savrulma momenti

$T_X$  : İtme kuvvetinin boyuna bileşeni

$T_Y$  : İtme kuvvetinin yanal bileşeni

$x_{TC}$  : Cer noktası ile basınç merkezi arasındaki boyuna uzunluk

$x_{PC}$  : Sevk birimi ile basınç merkezi arasındaki boyuna uzunluk



**Şekil 2.** Cer noktası ve sevk biriminin sualtı basınç merkezinden boyuna uzaklığı

Serbest dolaylı modda hücum açısını korumak için gerekli itme gücü, römorkörün maksimum itme gücüne oranla çok küçüktür. Bu nedenle, bu mod, maksimum itme gücünü hesaba katmaksızın, çeşitli tekne ve skeg geometrisine sahip römorkörlerin refakat performanslarını değerlendirmede faydalıdır. Daha yüksek döndürme kuvveti gerektiğinde römorkör tahrikli dolaylı modda kumanda edilmelidir. Şekil 1(b)'de gösterilen tahrikli dolaylı modda, römorkörün maksimum itme kuvvetini ürettiği kabul edilirse itme ve çekme halatı kuvvetleri aşağıdaki gibi elde edilebilir.

$$F_{TY} = \frac{N + F_Y x_{PC}}{x_{TC} + x_{PC}} \quad (12)$$

$$T_Y = F_Y - F_{TY} = F_Y - \frac{N + F_Y x_{PC}}{x_{TC} + x_{PC}} = \frac{F_Y x_{TC} - N}{x_{TC} + x_{PC}} \quad (13)$$

$$T_X = \sqrt{BP^2 - T_Y^2} \quad (14)$$

$$F_{TX} = T_X - F_X \quad (15)$$

Burada BP römorkörün statik cer kuvvetini temsil etmektedir. Durdurma ve döndürme kuvveti bileşenleri serbest dolaylı moda benzer şekilde elde edilebilir.

### 3. Hidrodinamik kuvvetlerin hesabı için yarı-ampirik yöntem

Refakat römorkörü tarafından çekme halatı yoluyla yedeklenen gemiye iletilen kuvvetler geminin rotasına zıt yönde etkiyen durdurma kuvveti ve dik yönde etkiyen döndürme kuvveti bileşenlerine ayrılabilir. Sevk sisteminden kaynaklanan kuvvetlere ek olarak römorkörün belli bir açı ile gemi tarafından sürüklenmesinden kaynaklanan direnç ve kaldırma kuvvetleri durdurma ve döndürme kuvvetlerini destekler.

Bir gemiye bağlı olarak belli bir açı ile sürüklenen bir refakat römorkörüne etkiyen hidrodinamik kuvvetlerin hesabında viskoz etkiler büyük rol oynar. Küçük sürüklenme açılarında römorkörün teknesi ve skeg basit bir profil olarak değerlendirilebilir ancak bu açı büyüdükçe çapraz akımdan kaynaklanan doğrusal olmayan viskoz sönüm kuvvetleri ortaya çıkar. Statik sürüklenme hareketi yapan bir römorköre etkiyen boyuna ve yanal öteleme kuvvetleri ile savrulma momenti aşağıdaki gibi boyuna ve yanal hız bileşenleri ile manevra türevi adı verilen katsayılar cinsinden ifade edilebilir:

$$\text{Boyuna öteleme} \quad F_X = \frac{\rho}{2} L^2 (X'_{u|u}|u| + X'_{vv}v^2) \quad (16)$$

$$\text{Yanal öteleme} \quad F_Y = \frac{\rho}{2} L^2 (Y'_{uv}uv + Y'_{v|v}|v|v|) \quad (17)$$

$$\text{Savrulma} \quad N = \frac{\rho}{2} L^3 (N'_{v}uv + N'_{v|v}|v|v|) \quad (18)$$

Sürüklenme açısının 0 olması halinde boyuna öteleme kuvveti römorkörün sabit rotadaki değerine eşdeğer olacaktır. Yanal öteleme kuvveti küçük sürüklenme açılarında geçerli lineer kaldırma kuvveti katsayısı,  $Y'_v$ , ve büyük sürüklenme açılarında geçerli nonlinear çapraz akım katsayısı,  $Y'_{v|v|}$ , ile karakterize edilir. Manevra türevleri tekne ve takıntı geometrisine bağlı olup model deneyleri ile güvenilir bir şekilde belirlenebilir. Burada, pratik bir yöntem sağlamak üzere çok sayıda gemi model deneyi sonuçlarına dayalı ampirik formüller kullanılacaktır. Lineer yanal öteleme kuvveti katsayısı,  $Y'_v$ , ve doğrusal olmayan çapraz akım katsayısı,  $Y'_{v|v|}$ , için aşağıdaki gibi tekne ana boyutları ve blok katsayısına bağlı ampirik formüller kullanılabilir (Ankudinov, 1985).

$$Y'_v = -\pi \left(\frac{T}{L}\right)^2 \left[ 0.25 \left(\frac{C_{BB}}{T}\right)^2 - 1.5 \left(\frac{C_{BB}}{T}\right) + 3 \right] \quad (19)$$

$$Y'_{v|v|} = 0.045 + 1.1 \frac{T}{L} + \left( 0.004 \frac{B}{T} - 0.27 \right) \frac{B}{L} \quad (20)$$

Savrulma momenti için önerilen benzer ampirik formüller aşağıda verilmektedir (Ankudinov, 1985):

$$N'_v = -\pi \left(\frac{T}{L}\right)^2 \left[0.75 - 0.04 \left(\frac{C_{BB}}{\pi T}\right)\right] \quad (21)$$

$$N'_{v|v|} = -0.75N'_v \quad (22)$$

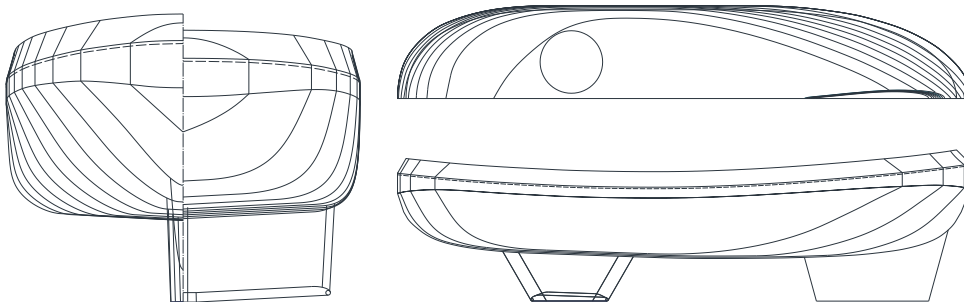
Refakat römorkörü performansını etkileyen önemli bir unsur skeg geometrisi olup skeg tarafından üretilen direnç ve kaldırma kuvvetleri refakat römorkörünün durdurma ve döndürme kapasitesini önemli ölçüde arttırabilir. Skegden kaynaklanan direnç ve kaldırma kuvvetlerini belirlemek üzere yarı-ampirik bir yöntem mevcut olup Bilici vd. (2016) tarafından açıklanmıştır.

#### 4. Uygulama

Refakat römorkörleri için performans belirleme prosedürünü açıklamak üzere tipik bir Voith traktör tipi refakat römorkörü ele alınmaktadır. Marmara denizi ve boğazlar bölgesinde çalışmak üzere dizayn edilen bu römorkörün temel dizayn özellikleri Tablo 1'de, tekne formu ise Şekil 3'te sunulmaktadır.

**Tablo 1.** Voith traktör tipi refakat römorkörü genel dizayn özellikleri

|   |                       |
|---|-----------------------|
| Tam boy (L <sub>OA</sub> )                | 37.60 m               |
| Su hattı boyu (L <sub>WL</sub> )          | 36.10 m               |
| Su hattındaki genişlik (B <sub>WL</sub> ) | 12.00 m               |
| Derinlik (D)                              | 4.50 m                |
| Su çekimi (T)                             | 3.15 m                |
| Deplasman                                 | 880 t                 |
| Su altı yanal alanı                       | 123.35 m <sup>2</sup> |
| Statik cer kuvveti (BP)                   | 60 t                  |



**Şekil 3.** Voith traktör tipi refakat römorkörü form planı

Yarı-ampirik ve RANS tabanlı yöntemler ile hesaplanan boyuna ve yanal hidrodinamik kuvvetler aşağıdaki şekilde boyutsuzlaştırılmaktadır:



$$C_L = \frac{F_X}{0.5\rho A_L V^2} \quad (23)$$

$$C_T = \frac{F_Y}{0.5\rho A_L V^2} \quad (24)$$

$C_T$  römorkör merkez hattına dik yöndeki yanal kuvvet katsayısını,  $C_L$  ise römorkör merkez hattı yönündeki boyuna kuvvet katsayısını temsil etmektedir.  $A_L$  römorkör su altı yanal alanını (skeg dahil),  $\rho$  deniz suyu yoğunluğunu ve  $V$  eşlik edilen geminin seyir hızını göstermektedir.

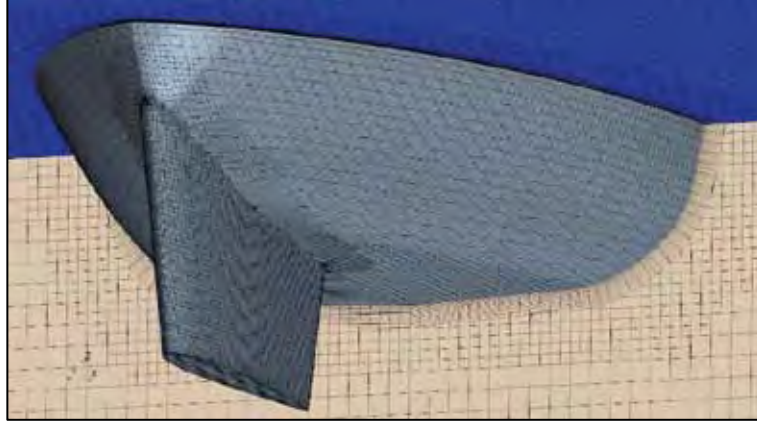
## 5. RANS hesaplamaları

### 5.1. Hesaplamalı model, sınır koşulları ve ağdan bağımsızlık

RANS hesaplamaları önceki başlıkta tanıtılmış olan VSP refakat römorkörü için 1:10 model ölçeğinde yapılmıştır. Üç boyutlu geometri, tekne formunun iki boyutlu endazesi kullanılarak üretilmiştir. Şekil 3'te görülen sevk sistemi kafesi göz ardı edilmiştir.

Analizlerde Kartezyen koordinat sistemi kullanılmıştır. Buna göre, pozitif X, Y ve Z yönleri sırasıyla kıç tarafı, sancak tarafı ve römorkörün üst tarafını göstermektedir. Makalede skegin bulunduğu taraf baş taraf olarak adlandırılmıştır. Koordinat sistemi merkezi, su hattı başlangıç noktası olacak şekilde seçilmiştir. Bazı hesaplama vakalarındaki yüksek hücum açıları nedeniyle büyük miktarda akım ayrılması meydana geleceğinden, römorkör dolgun cisim biçiminde davranacak ve basınç farklılıkları oluşan akış alanı genişleyecektir. Bu nedene bağlı olarak oluşabilecek sayısal blokaj etkisinin azaltılması amacıyla büyük bir çözüm hacmi kullanılmıştır. Buna göre, X yönünde, yan ve alt sınırlardaki hesaplama giriş ve çıkış sınırları, teknenin merkezinden itibaren sırasıyla 4L, 12L, 6L ve 3L uzaklığa yerleştirilmiştir. Burada L model su hattı boyunu göstermektedir. Simülasyonlarda serbest yüzeyin etkisi dikkate alınmadığından, üst sınır teknenin su çekimine karşılık gelen bir yüksekliğe yerleştirilmiştir.

Hesaplama ağı modern ve gelişmiş bir ağ üretimi yazılım paketi kullanılarak oluşturulmuştur. Ağ örgüsü, temelde birbiriyile-örtüşmeyen-blok-düzensiz hacim ağı üretme tekniği olan ve literatürde sıkça karşılaşılan kesilmiş-hücre (cut-cell) metodu ile üretilmiştir. Yüzey ağ örgüsü yapısı hem üçgen hem de dörtgen elemanları içermekle birlikte, çözüm hacmi genelinde, dört yüzlü hücre elemanlarının da yer aldığı yakın duvar bölgesi hariç olmak üzere, altı yüzeyle elemanlar kullanılmıştır. Bu ağ örgüsü tekniğinde birçok yerel ağ iyileştirme bloğu etkili bir şekilde belirlenebilmektedir. Söz konusu tekniğin avantajı, nispeten basit ve hızlı bir ağ örgüsü oluşturma olanağı sağlamasıdır. Oluşturulan çözüm ağının bir görünümü Şekil 4'te sunulmuştur. Hesaplama için kaynak gereksinimlerini azaltmak ve hızlı bir çözüm elde etmek amacıyla, yüzeye komşu ilk hücrenin boyutsuz  $y^+$  değeri, tekne ve skegin büyük bölümü için 50 civarında tutulmuştur. Çalışmanın pratik olabilmesi amacıyla, her bir vaka için ayrı çözüm ağı oluşturmak yerine, sıfır derece hücum açısı için bir ağ oluşturulmuş ve bu ağ, giriş hızı açıları değiştirilerek tüm vakalar için kullanılmıştır. Ancak hatırlanmalıdır ki, tüm hücum açıları için ayrı ağ örgüsü kullanılması, çözüm doğruluğunu nispeten artıracaktır.



**Şekil 4.** Kullanılan kesilmiş-hücre ağ örgüsünün bir görünümü

Giriş sınırında akış hızı bileşenleri ve türbülans özellikleri verilmiştir. Hesaplamalarda kullanılmak üzere Froude sayısı (Fr) 0.221'e tekabül eden 1.301 m/s hız değeri seçilmiş ve %1 değerinde düşük bir türbülans şiddeti belirlenmiştir. Çıkış sınırında, atmosferik basınç değeri belirtilirken, üst ve alt sınırlar için "kayan-duvar" olarak yorumlanabilecek simetri sınır koşulu kullanılmıştır.

45°'lik hücum açısında ağdan bağımsızlık analizi gerçekleştirilmiştir. Analizler için üç farklı ağ çözünürlüğü ele alınmıştır. İlk ağ yapısının oluşturulmasını takiben çözünürlükler, koordinat sisteminin her bir yönünde yaklaşık  $\sqrt[3]{2}$  oranında sistematik olarak artırılmıştır. Bu yaklaşım sonucunda iyileştirilmiş ağ yapılarında kabaca iki katına çıkan toplam hücre sayıları elde edilmiştir. Tablo 2, kullanılan ağların temel özelliklerini ve ilgili ağ tipi ile elde edilen yanal hidrodinamik kuvveti göstermektedir. Ağ çözünürlükleri B ve C ile elde edilen sonuçlar arasındaki bağıl farkın %1'den küçük olması nedeniyle, hesaplamalı vakaların geri kalanlarına B ağı ile devam edilmesi uygun bulunmuştur.

**Tablo 2.** Ağdan Bağımsızlık Analizi: Temel ağ özellikleri ve yanal hidrodinamik kuvvet

| Vaka            | Ağ tipi | Ortalama $y^+$ | Ortalama yan oranı | Tekne üzerindeki hücre sayısı | Skeg üzerindeki hücre sayısı | Toplam hücre sayısı $\times 10^{-6}$ | Yanal hidrodinamik kuvvet (N) |
|-----------------|---------|----------------|--------------------|-------------------------------|------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------|
| 45° hücum açısı | A       | 47             | 2.8                | 10069                         | 5406                         | 2.09                                 | 416                           |
|                 | B       | 56             | 2.3                | 16769                         | 8560                         | 3.90                                 | 409                           |
|                 | C       | 45             | 2.1                | 24581                         | 13238                        | 7.29                                 | 405                           |

## 5.2.Hesaplama detayları

Analizler için zamandan bağımsız, sıkıştırılmaz Reynolds-Ortalama Navier-Stokes (RANS) denklemleri Wilcox (2006) çözülmüştür. Türbülans alanını hesaplamak ve böylece RANS denklemlerinde bulunan Reynolds gerilmelerini modellemek için Boussinesq hipotezini (Tennekes ve Lumley, 1972) temel alan Realizable  $k - \epsilon$  türbülans modeli (Shih ve diğerleri, 1995) kullanılmıştır. RANS ve türbülans taşınma denklemlerini çözmek için sonlu hacim ayrıklaştırmasına (Blazek, 2001) dayanan ve denklemleri sırasıyla ele alan bir algoritma kullanılmıştır. Basınç-hız eşleştirmesi için standart basınç-düzeltilme prosedürü (SIMPLE) (Patankar ve Spalding, 1972) uygulanmıştır. Taşınım terimlerin uzaysal

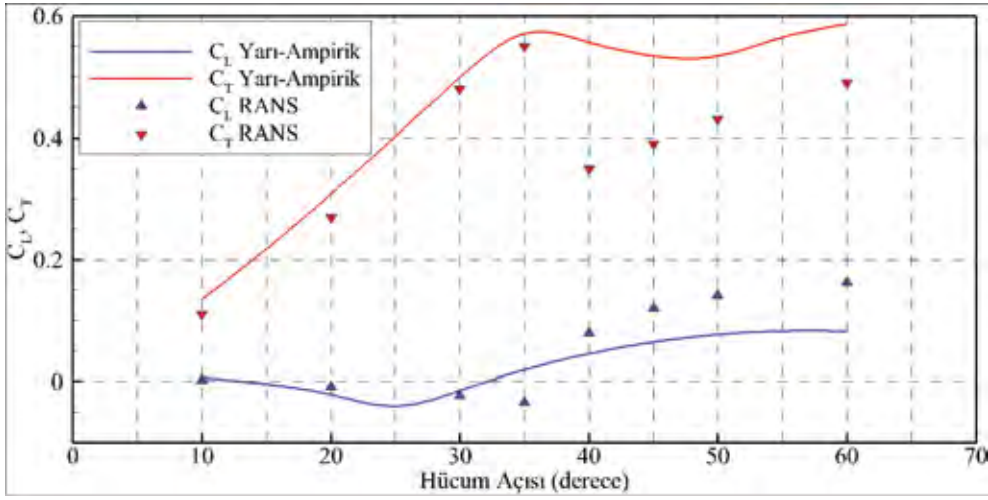
ayrıklaştırması ikinci-derece-ileriye-doğru bir Őema ile sağlanırken, viskoz terimler için ikinci-derece-merkezi-farklar Őeması kullanılmıştır. Yakınsamanın sağlandığına karar verilebilmesi için iz alanındaki basınç ve hız gibi akış deđiŐkenlerinin iterasyon sürecindeki deđiŐimleri, normalleŐtirilmiŐ artık değerler ile birlikte sistematik olarak kontrol edilmiştir.

## 6. Sonuçlar

### 6.1. Hidrodinamik kuvvetlerin karŐılaŐtırmalı sonuçları

Yarı-ampirik olarak hesaplanmış boyuna ve yanal hidrodinamik kuvvet katsayılarının RANS hesaplamaları ile elde edilmiş olanlar ile karşılaştırması Şekil 5'te sunulmaktadır. Yanal kuvvet katsayısı,  $C_T$  için, stol (stall) aÇısına çok yakın olan  $35^\circ$  hücüm aÇısına kadar her iki yöntem ile elde edilen sonuçlar arasındaki uyumun çok iyi olduğu gözlenmektedir. Grafikten stol durumunun  $35^\circ$  ve  $40^\circ$  arasındaki hücüm aÇıları arasında meydana geldiği anlaşılmaktadır. Bu fiziksel husus her iki analiz yöntemiyle de dođrulanmıŐtır. Yarı-ampirik yöntemde, kullanılan nispeten basit sayılabilecek formüllerle vakaya özel yerel akış nitelikleri göz önüne alınmadığı için, stol aÇısının üzerindeki hücüm aÇılarında viskoz basınçtaki dramatik deđiŐimin de ancak kısmen yakalanabilmesinin kuvvetle muhtemel olmasından dolayı, her iki hesaplama yönteminin sonuçları arasındaki farklılıklar  $35^\circ$ 'nin üzerindeki hücüm aÇılarında daha fazladır. RANS hesaplamalarının sonuçlarına göre, yanal kuvvet stol aÇısından sonra dramatik bir Şekilde azalmaktadır. Bu nokta yarı-ampirik hesaplamalarla kısmen yakalanabilmiŐtir. Bununla birlikte, iki yöntemin sonuçları hücüm aÇısı arttıkça yanal kuvvet için artan bir eğilime iŐaret etmektedir.

Boyuna kuvvet katsayısı,  $C_L$  için, RANS hesaplamalarında, stol aÇısına kadar, sıfıra yakın, çok düşük değerler elde edilmiştir (Şekil 5). Bu hücüm aÇıları aralığında römorkörün baş kısmı çevresinde oluşan çok düşük basınç (yüksek emme) alanı nedeniyle, bazı hücüm aÇılarında elde edilen sonuçlar negatiftir. Stol aÇısından sonra, boyuna kuvvet artmakta ve parabolik bir biçimde yükselmeye devam etmektedir. Bu çalışmada dikkate alınmayan çok yüksek hücüm aÇıları için bu kuvvet değerlerinin azalması beklenmektedir. Yarı-ampirik yöntemin sonuçları benzer bir eğilimi göstermekte ve RANS hesaplamalarıyla aynı sonuca varmaktadır. Özellikle, stol aÇısından düşük olan hücüm aŐılarındaki kuvvet katsayılarının uyumu yüksektir. Bununla birlikte, yarı-ampirik yöntem ile yapılan hesaplamalarda, boyuna kuvvetin yükselmesi stol aÇısından önce başlamaktadır. Bu durum, yöntemin, römorkör etrafındaki viskoz basınç alanının yerel deđiŐimlerini yakalamadaki nispeten sınırlı kapasitesine bağlanabilir. Stol aÇısından sonra, söz konusu akış rejimleri için viskoz etkiler daha baskın hale geldiğinden, sonuşlardaki farklılıklar da artmaktadır. Bununla birlikte, ilgili eğrinin eğilimi RANS sonuşlarının eğilimi ile benzerlik göstermektedir.



Şekil 5. Hidrodinamik kuvvet katsayılarının karşılaştırması ( $Fr \approx 0.22$ )

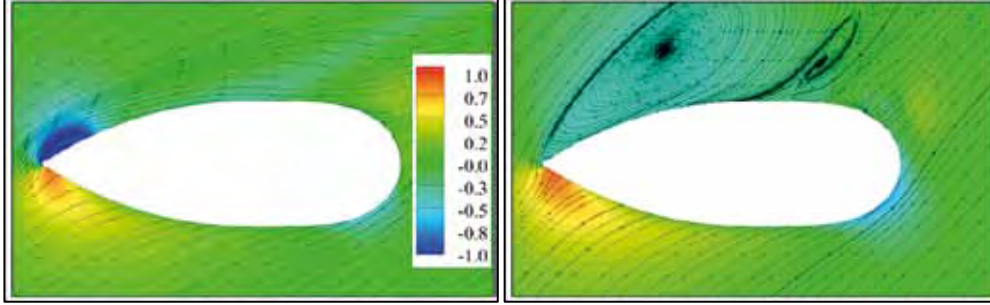
## 6.2. Tekne ve skeg çevresindeki akış topolojisi

Bu bölümde römorkör etrafındaki akış alanının temel yapısı RANS simülasyonlarından yararlanılarak kısaca sunulmuştur.  $35^\circ$  ve  $45^\circ$  hücum açısı vakalarında (bundan sonra Y35 ve Y45 olarak anılacaklardır), tekne çevresinde statik basınç katsayısı dağılımları ve iki boyutlu (2B) akım hatları Şekil 6'da gösterilmiştir. Akış rejimlerindeki önemli farklılık, şekilde açıkça görülmektedir. Y45 vakasında, Y35'te teknenin baş tarafında meydana gelen çok düşük basınç bölgesi hemen hemen mevcut değilken, yüksek basınç bölgesi de Y35'tekine kıyasla daha kuvvetli görünmektedir. Bu vakada (Y45), sancak tarafındaki akış alanında büyük çaplı akım ayrılması egemendir. Bahsi geçen akış hadiseleri Şekil 6'da görülen ve stol açısında oluşan boyuna kuvvet katsayısındaki ani yükselmeyi ve yanal kuvvet katsayısındaki dramatik düşüşü açıklamaktadır.

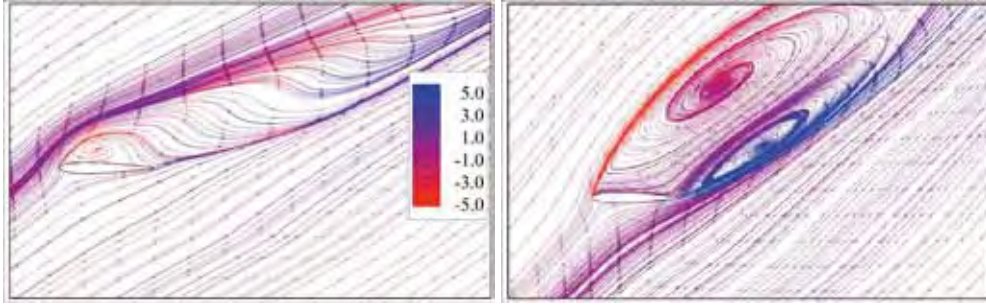
Skeg etrafındaki 2B akım hatları, aynı vakalar için Şekil 7'de sunulmuştur. Y35 vakasında, skeg tarafından üretilen yanal kuvvet bileşeninin, direnç kuvvetinin giderek artan katkısı ile oluşmasına neden olan ve dar bir alanda yoğunlaşmış bulunan girdap yapısı ile meydana gelen akım ayrılması hadisesi gözlenmektedir. Öte yandan, Y45 vakasında görülen ve çok daha geniş bir alana yayılmış olan, yüksek enerjili iki adet ters-dönümlü girdap yapısının oluşturduğu akım ayrılması bölgesi düşük basınç bölgesinin genişlemesi ve skegin uzağına taşınmasının etkisiyle yanal kuvvette şiddetli bir düşüşe sebep olmaktadır.

Şekil 8, skegin izler kenarının gerisinde yer alan YZ düzlemindeki akış yapısını göstermektedir. Skegin uç bölgesinde oluşan ve hücum açısı arttıkça teknenin gövdesinden uzaklaşan büyük girdap, şekilde açık olarak görülebilmektedir. Y35 vakasında girdabın daha dar ve gövdeye yakın bir alanda meydana gelmesinden ötürü teknenin baş tarafında önemli bir basınç düşüşüne neden olduğu anlaşılmaktadır.

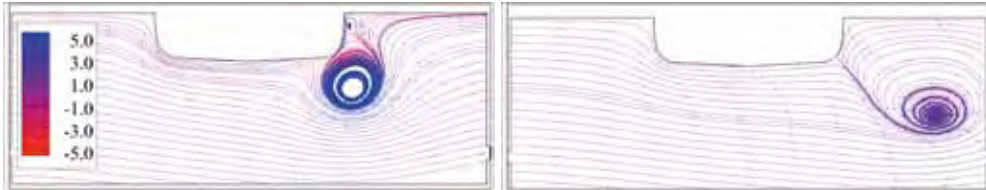
Römorkör çevresindeki üç boyutlu (3B) akım hatlarının yapısı Şekil 9'da sunulmaktadır. Y35 için akım ayrılması ve kuvvetli helisel hareket esas olarak skeg geometrisinden kaynaklanmaktadır. Stol açısından sonra, Y45 için, kıç tarafının ürettiği girdaplılıkla kısmen karışan çok yüksek bir girdaplılık alanı şekilde baskın olarak görülebilmektedir. Akış rejimindeki bu fark, tekne üzerindeki basınç dağılımını, şüphesiz şekilde de görülebildiği gibi- büyük ölçüde etkilemektedir.



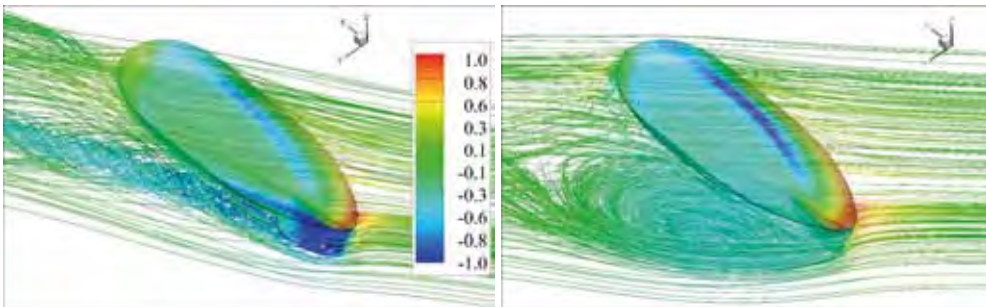
**Şekil 6.** Tekne çevresindeki 35° (sol) ve 45° hücum açılarında statik basınç katsayısı ( $C_p$ ) dağılımı ve 2B akım hatları (XY düzlemi,  $Z/L=-0.047$ )



**Şekil 7.** 35° (sol) ve 45° hücum açılarında skeg çevresindeki 2B akım hatları (XY düzlemi,  $Z/L=-0.12$ , Z-girdaplılık ile renklendirildi.)



**Şekil 8.** Tekne çevresindeki 35° (sol) ve 45° hücum açılarında basınç 2B akım hatları (YZ düzlemi,  $X/L=0.28$ , X-girdaplılık ile renklendirildi.)



**Şekil 9.** 35° (sol) ve 45° hücum açılarında tekne çevresindeki 3B akış hatları (Statik basınç katsayısı ( $C_p$ ) ile renklendirildi.)

### 6.3. Tam ölçekte refakat performans hesaplamaları

Tekne ve takıntılar üzerine etki eden hidrodinamik kuvvetlerin önceki başlıklar altında açıklandığı biçimde belirlenmesi sevk gücü kullanımına bağlı olarak, refakat römorkörünün serbest dolaylı veya

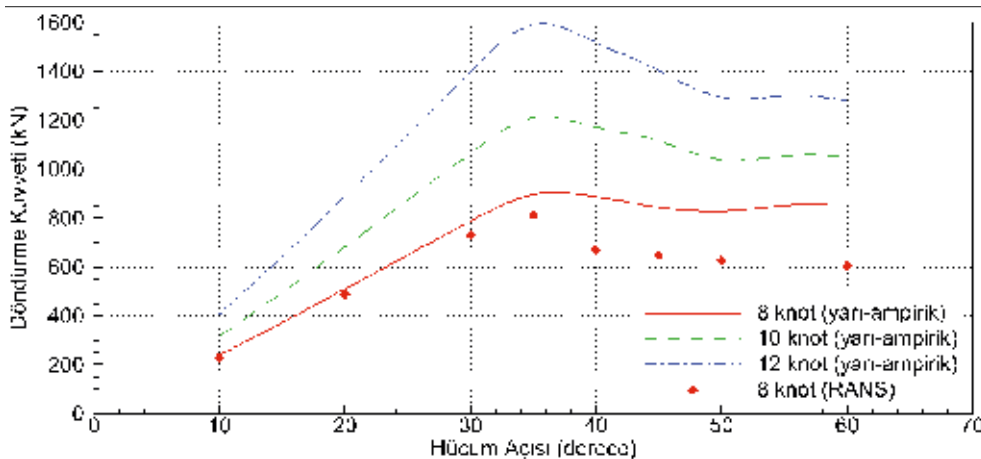


tahrikli dolaylı modlardaki performansı belirlenebilir. Serbest dolaylı modda iticiler, belirli bir hücum açısını koruyabilmek için römorkörün merkez hattına dik bir kuvvet uygular. Bunun için gereken itme gücü toplam itme gücünün yalnızca küçük bir yüzdesidir. Döndürme kuvvetinin artırılabilmesi için, römorkörün yedeklenen gemiyle yaptığı açının daraltılması ve bunun için de itme gücünün artırılması gerekecektir. Böylece ortaya çıkan tahrikli dolaylı modda, hidrodinamik kuvvetler iticilerle artırılarak daha yüksek döndürme ve durdurma kuvvetleri elde edilebilmektedir. Serbest ve tahrikli dolaylı moddaki itme kuvveti ve çekme halatı kuvveti bileşenleri, Bölüm 2'de açıklandığı üzere, X ve Y yönlerindeki kuvvetler ile basınç merkezi etrafındaki momentin dengelenmesi ile belirlenebilmektedir.

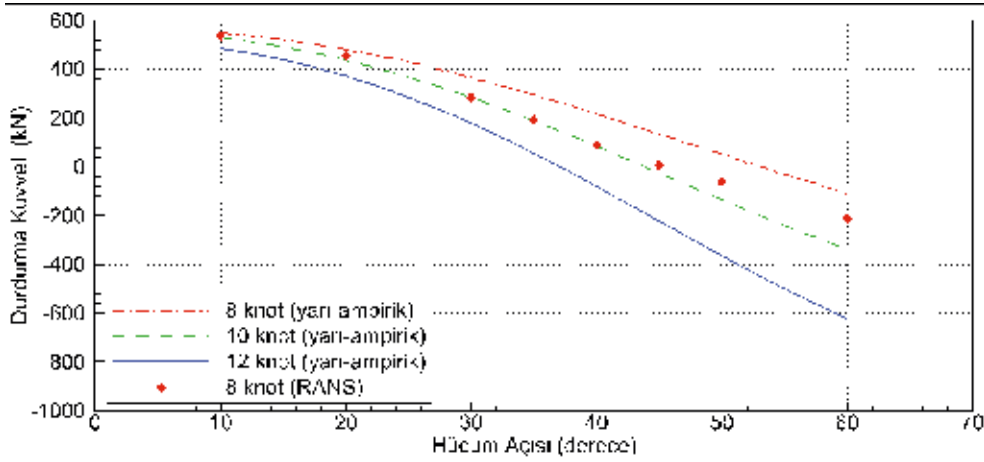
Serbest dolaylı modda refakat römorkörü performansı hidrodinamik performansın önemli bir göstergesi olmakla birlikte, operasyonel bakış açısından refakat performansı, maksimum durdurma ve döndürme kuvvetlerinin eldesi için maksimum itme gücünün kullanıldığı tahrikli dolaylı mod ile temsil edilmektedir. Tahrikli dolaylı moddaki refakat römorkörü için döndürme ve durdurma kuvvetleri, yarı-ampirik yöntem ile 8, 10, 12 knot olmak üzere üç hız için ve RANS tabanlı olarak da 8 knot hız için hesaplanmış olup sonuçlar Şekil 10 ve Şekil 11'de sunulmuştur. Hesaplarda toplam statik itme gücünün her yönde sağlanabildiği varsayılmıştır.

Şekil 10'da görüleceği gibi, 8 knot hızda, yarı-ampirik ve RANS tabanlı yöntemler ile elde edilen döndürme kuvveti sonuçları, stol açısına kadar birbirlerine çok yakındır. Ancak daha büyük hücum açılarında, iki yöntem arasındaki uyum azalmaktadır. Şekilde stol açısına kadar döndürme kuvvetinin arttığı, ancak daha yüksek hücum açılarında, özellikle yüksek hızlarda, bu kuvvetin hayli azaldığı görülmektedir.

Yarı-ampirik ve RANS tabanlı yaklaşımlara göre hesaplanan durdurma kuvvetleri Şekil 11'de sunulmaktadır. Durdurma kuvvetinin stol açısına bağlılığının döndürme kuvvetine göre daha az olduğu göze çarpmaktadır. Durdurma kuvveti tüm hızlarda parabolik bir biçimde azalma göstermektedir. Döndürme kuvvetine benzer biçimde bu kuvvet bileşeni için de yarı-ampirik ve RANS tabanlı hesaplamalardaki uyumun stol açısına kadar daha iyi olduğu gözlenmektedir.



Şekil 10. Tahrikli dolaylı moddaki döndürme kuvvetleri



Şekil 11. Tahrikli dolaylı moddaki durdurma kuvvetleri

## 7. Değerlendirme

Traktör tipi refakat römorkörlerinin serbest dolaylı ve tahrikli dolaylı modlardaki performans özelliklerini belirlemek üzere iki ayrı yaklaşıma dayalı bir yöntem sunulmuştur. İlk yaklaşım, refakat römorkörü dizayn sürecinin en erken safhalarında az miktarda bilgi ile gerçekleştirilebilen yarı-ampirik bir yöntemdir. Römorkörün tekne ve skeginden kaynaklanan boyuna ve yanal hidrodinamik kuvvetler, model deneylerine dayanan güvenilir bir yarı-ampirik formül seti ile hesaplanmaktadır. İkinci yaklaşım ise tekne ve takıntıların geometrik tanımının mevcut olduğu dizayn sürecinin ileri aşamalarında kullanılması düşünülen RANS denklemlerinin çözümüne dayalı bir hesaplama tekniğidir.

Her iki yöntem ile yapılan hesaplamalarda, hesaplanan boyuna ve yanal hidrodinamik kuvvet değerlerinin stol açısına kadar uyumlu olduğu gözlenmiştir. Yarı-ampirik yöntem yerel akış özelliklerini tam anlamıyla dikkate almadığından stol açısının ötesindeki sonuçlarda farklılıklar ortaya çıkmıştır. Sonuçlar, yarı-ampirik yöntemin römorkörün performansı hakkında kaba tahminler verebildiğini göstermektedir. Öte yandan, RANS tabanlı hesaplama geometri ve yerel akış topolojisinin ayrıntılarına oldukça duyarlı olduğundan, tekne ve takıntı formlarının iyileştirilmesi amacıyla kullanılması mümkündür. Ayrıca her iki yaklaşım ana boyutlar ile itici ve çekme vinci konumları gibi ana dizayn özelliklerinin etkilerini araştırmak için de kullanılabilir.

RANS hesaplamaları yoluyla daha doğru ve güvenilir bir hidrodinamik analiz için pratik uygulamada karşılaşılan römorkör meyil açısının etkisi simülasyonlara dahil edilmelidir. Özellikle teknenin yukarı akım tarafındaki basınç dağılımını ve sürtünme kuvveti bileşenini etkilemesinden dolayı serbest yüzey deformasyonlarının da dikkate alınması hesaplama doğruluğunu, şüphesiz, arttıracaktır. Yazarlar, bu ek etkileri gelecekteki hesaplamalarına dahil etmeyi amaçlamaktadırlar.

## Kaynaklar

Allan R. G. (2000). "The Evolution of Escort Tug Technology: Fulfilling a Promise", SNAME Transactions, Vol. 108.

Allan R. G. ve Molyneux D. (2004). "Escort Tug Design Alternatives and a Comparison of their Hydrodynamic Performance", SNAME Transactions, Vol. 112.

Ankudinov V. (1985). "Ship Manoeuvring Simulation Model Including Regimes of Slow Speeds and Large Drift Angles", Report for the First International Maritime Simulation Symposium, Munich, Germany.

Bilici G., Aydın Ç., Ünal U. O. ve Sarıöz K. (2016). "Performance Prediction for Tractor Type Escort Tugs", 2<sup>nd</sup> International Meeting on Recent Advances in Prediction Techniques for Safe Manoeuvring of Ships and Submarines, 17 – 18 November 2016, Istanbul, Turkey.

Blazek J. (2001). "Computational Fluid Dynamics: Principles and Applications", Elsevier, Oxford, UK.

Dabbar J. M. ve Morgan J. M. (1996). "Tractor Tug: Conceptual Design to Implementation", Marine Technology, Vol. 33, No 1, January.

"Guidelines for Transiting the Turkish Straits", Briefing Paper for OCIMF Member Companies, Oil Companies International Marine Forum (OCIMF), August 2007.

Hensen H. (1997). "Tug use in Port – A Practical Guide", The Nautical Institute.

Hutchison B. L., Gray D. L., ve Jagannathan S. (1993). "New Insights into Voith Schneider Tractor Tug Capability", Marine Technology, Vol 30, No 4, October.

Jagannathan S., Gray D. L., Mathai T., ve de Jong J. (1995). "Tanker Escort: Requirements, Assessments, and Validation", SNAME Transactions, Vol. 103.

Patankar, S.V. ve Spalding, D.B. (1972). "A Calculation Procedure for Heat, Mass and Momentum Transfer in Three-Dimensional Parabolic Flows", International Journal of Heat and Mass Transfer, 15, 1787-1806.

"Safety of Navigation through the Bosphorus Strait, Sea of Marmara and Dardanelles", Report submitted by the Oil Companies International Marine Forum (OCIMF), IMO Marine Safety Committee (MSC), MSC 67/7/12, 1997.

Shih, T-H., Liou, W.W., Shabbir, A., Yang, Z., Zhu, J. "A New  $k-\epsilon$  Eddy Viscosity Model for High Reynolds Number Turbulent Flows", Computers and Fluids, Vol 24, No 3, 227-238, March 1995.

Sturmhöfel U. ve Bartels J-E. (1993). "Basic Requirements for Safe Escort Vessels – Theoretical Consideration and Model Measurements", RINA International Conference on Escort Tugs, Design, Construction and Handling – The Way Ahead, London, England, 4 February.

Tennekes H. ve Lumley J.L. (1972). "A First Course in Turbulence", MIT Press, Cambridge, UK.

Wilcox D.C. (2006). "Turbulence Modeling for CFD", DCW Industries, California, USA.