

Gemi mühendisliği problemlerinin sayısal çözümü için belirsizlik ve hata analizi

M. K. GÖKÇE & Ö. K. KINACI

Yıldız Teknik Üniversitesi (Gemi İnşaatı ve Denizcilik Fakültesi, İstanbul, Türkiye)

ÖZET: Referans çalışmalar nümerik metotların doğrulanmasını sağlayan en temel ve yaygın çalışmalardır. S175, Kriso Container Ship (KCS), Duisburg Test Case (DTC) ve Hamburg Test Case (HTC) gibi referans çalışmaların geometrileri ve deney ölçüm değerleri literatürde mevcuttur. Bu referans çalışmalardan elde edilen değerler yapılsimülasyonların hata ve belirsizliklerini hesaplama imkanı vermekte ve bu sayede simülasyonların gerçeği ne ölçüde yansıttığı; eğer yansıtmıyorsa bunun nedenleri hakkında önemli bilgiler vermektedir.

Bu çalışmada, sayısal çalışmaların doğasında var olan hata ve belirsizliklerin hangi gerekçelerle kaynaklanabileceği ve literatürde var olan bir hesaplama yöntemi anlatılmıştır. Daha sonra Duisburg Test Case referans teknesi sayısal olarak farklı ağ yapılarında çözülmüş ve sayısal hata ve belirsizlikler hesaplanmıştır. Doğrulama ve onaylama olarak ikiye ayrılan yöntem bu örnek tekne üzerinde gösterilmeye çalışılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Belirsizlik analizi, hata analizi, gemi direnci, HAD, Duisburg Test Case

SİMGELER

C_G	ağ düzeltme faktörü	U_{GC}	düzeltilmiş ağ yapısı belirsizliği
C_T	toplam direnç katsayısı	U_I	iteratif belirsizlik
D	deney sonuç değeri	U_S	simülasyon belirsizliği
E	karşılaştırmalı hata değeri	U_{SN}	sayısal belirsizlik
Fr	Froude sayısı	U_{SM}	modelleme belirsizliği
p_G	ağ yapısı doğruluk mertebesi	U_V	doğrulama belirsizliği
r_G	ağ tasfiye katsayısı	δ	hata
S	simülasyon sonuç değeri	δ_D	deney sonucu hatası
S_C	düzeltilmiş sonuç değeri	δ_{REG1}	birinci derece Richardson Ekstrapolasyon yaklaşımı hata değeri
S_L	osilasyonun minimum değeri		
S_M	ağ yapısı için ortalama sonuç değeri	δ_{SM}	modelleme hatası
S_U	osilasyonun maksimum değeri	δ_{SN}	nümerik hata
T	gerçek değer	δ^*_{G1}	düzeltilmiş birinci derece Richardson Ekstrapolasyon yaklaşımı hata değeri
U	belirsizlik		
U_D	deney belirsizliği		
U_E	hata belirsizliği		
U_G	ağ yapısı belirsizliği	ϵ_{mnG}	ağ yapılarına göre sonuç değişimi

1.GİRİŞ

Gemi mühendisliğini ilgilendiren çoğu problem için sayısal hesaplamalar kaçınılmazdır. Bilhassa gemi hidrodinamiği alanında analitik çözümler sadece belirli bazı basit geometriler için bulunabilir. Geleneksel gemi formları için analitik çözüm yapmak günümüz şartlarında mümkün değildir. Bu sebeple, gemi etrafındaki akış problemi belirli bazı sayısal yöntemlerle çözülmeye çalışılmaktadır.

Ancak sayısal yöntemler içinde birçok hata ve belirsizliği barındırır. Örneğin, herhangi bir teknenin servis hızındaki direncini bulmak istediğimizi farz edelim. Aynı yöntemi kullanan ve alanlarında çok iyi olan iki ayrı kişiden hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) yöntemini kullanarak geminin servis hızındaki toplam direncini bulmasını istediğimizde, çok yüksek ihtimalle, buldukları sonuçlar birbirinden farklı olacaktır. Bu farkın sebebi bir kullanıcının diğerinden daha iyi ya da kötü olmasından değil; kullandıkları ağ yapılarının veya türbülans modellerinin farklı olmasından kaynaklanmaktadır. Kullanılan ağ yapısı ve türbülans modelinin elde edilen sonuçta kaçınılmaz olarak etkileri olacak; ve HAD yaklaşımıyla bulunan her sonuçta belirli bir hata olacaktır. Nihai sonuca ulaşılırken bu hatalar ve belirsizlikler tespit edilip, sonuç belirli bir aralıkta verildiğinde iki kullanıcının bulduğu sonuçların muhtemelen birbiriyle uyumlu olduğu görülecektir.

HAD simülasyonlarında hata ve belirsizlik hesaplamaları için gerekli metodoloji ve çalışmalar bu konuya artan ilgi sebebiyle belli bir olgunluğa ulaşmıştır (AIAA, 1998). Detaylı metodolojiye sahip bir çalışma 1998'de Roache tarafından yapılmıştır, bunun yanında birçok durum çalışması mevcuttur (ör., Mehta 1998). HAD'nin giderek artan karmaşık geometrilerde ve fiziksel durumlarda kullanılmasıyla hata ve belirsizlik hesaplama yöntemlerine duyulan ihtiyaçlar artmış, bu durum da hata ve belirsizlik analizi konusundaki ilerlemeleri hızlandırmıştır. Bu çalışmada; önce Stern ve arkadaşlarının (1999) temel yapısını belirlemiş olduğu hata ve belirsizlik analizi yöntemi anlatılacak, daha sonra da örnek bir tekne üzerinde yapılan HAD çalışmasının sonuçları ile hata ve belirsizlik analizi yapılacaktır.

2. DOĞRULAMA VE ONAYLAMA YÖNTEM DİZİSİ

HAD simülasyon sonuçları şüphesiz ki içerisinde hata ve belirsizlikler barındırır. Hata (δ), simülasyon sonucuyla deney sonucu veya gerçek arasındaki farktır. Hata sifira yaklaştıkça doğruluk artar. Bu yüzden hatanın hesaplanması kaçınılmazdır. Belirsizlik (U) hatanın aralığı olarak ifade edilebilir. Simülasyon sonuçlarındaki hata ve belirsizlikler genel olarak modelleme ve nümerik olarak ikiye ayrılabilir;. Modelleme kaynaklı hata ve belirsizlikler fiziksel probleme (geometri, matematiksel denklemler, koordinat dönüşümü, sınır şartları, türbülans modelleri) bağlıdır. Nümerik hata ve belirsizliklerse matematiksel denklemlerin çözümüyle (tamamlanmamış iteratif ve ağ yakınsaması, kütle, momentum ve enerji dönüşümü denklemlerinin sağlanmaması, süreklilik denkleminin sağlanmaması, bilgisayarın nümerik yuvarlama yapması gibi) ilgilidir. Simülasyon hatası δ_S simülasyon sonucuyla (S) gerçek (T) arasındaki fark yani nümerik hata (δ_{SN}) ve modelleme hatalarının (δ_{SM}) toplamıdır;

$$\delta_S = S - T = \delta_{SM} + \delta_{SN} \quad (1)$$

Simülasyon belirsizliği (U_S) şu şekilde hesaplanır;

$$U_S = \sqrt{U_{SN}^2 + U_{SM}^2} \quad (2)$$

burada U_{SN} ve U_{SM} sırasıyla nümerik ve modelleme belirsizlikleridir. Bu çalışmada anlatılacak olan hata ve belirsizlik hesaplama yöntemi, (Stern et al., 1999) çalışmasından derlenmiştir. Daha detaylı bir izahat için ilgili çalışmanın incelenmesi önerilmektedir. 1

2.1 Doğrulama

Doğrulama; nümerik belirsizlikle (U_{SN}) beraber uygun verilerle nümerik hatanın (δ_{SN}) büyüklüğünü ve işaretini ayrıca bu hata tahminindeki belirsizliği belirleme olarak ifade edilebilir. Nümerik hata $\delta_{SN} = \delta_I + \delta_G$ ve nümerik belirsizlik $U_{SN} = \sqrt{U_I^2 + U_G^2}$ şeklinde bulunur. Burada δ_I ve δ_G sırasıyla iteratif ve ağ yapısı hataları, U_I, U_G ise iteratif ve ağ yapısı belirsizlikleridir. Nümerik belirsizlik U_I şu şekilde hesaplanmaktadır;

$$U_I = \frac{1}{2} |S_U - S_L| \quad (3)$$

Denklemden geçen S_U ve S_L değerleri sırasıyla HAD simülasyonu çözümündeki salınımın azami ve asgarideğerleridir. Bilgisayar teknolojisinin son yıllarda oldukça ivme kazanması ile hesaplamalarda kullanılan ağ eleman sayıları artmış ve bu da U_I değerinin genellikle ağ yapısı belirsizliği U_G değerine göre oldukça küçük kalmasına yol açmıştır. Bu durumda U_I dikkate alınmaz ve $U_{SN} \approx U_G$ ve $\delta_{SN} \approx \delta_G$ kabul edilir. Ağ yapısı belirsizliği U_G ise şu şekilde bulunur;

$$U_G = |C_G \delta_{RE_{G1}}| + |(1 - C_G) \delta_{RE_{G1}}| \quad (4)$$

Burada C_G ağ düzeltme faktörüdür ve şu şekilde hesaplanır;

$$C_G = \frac{r_G^{p_G} - 1}{r_G^{p_{G_{est}}} - 1} \quad (5)$$

$p_{G_{est}}$ ağ geometrisine bağlı bir katsayı olup kullanılan ağ yapısına göre değişmektedir. R_G ağ tasfiye katsayısıdır ve Richardson Ekstrapolasyonu'na göre bu değer $\sqrt{2}$ 'dir. p_G değeriye ağ yapısı doğruluk mertebesidir ve şu şekilde hesaplanır;

$$p_G = \frac{\ln(\varepsilon_{32G} - \varepsilon_{21G})}{\ln(r_G)} \quad (6)$$

Bu denklemdeki ε değeri her bir ağ yapısı için ortalama sonuç değeri S_M 'lerin farkıdır. Örneğin ε_{mn} , m no'lu ağ yapısındaki S_M değeriyle, n no'lu ağ yapısındaki S_M değerinin farkıdır. Ortalama sonuç değeri S_M şu şekilde hesaplanır;

$$S_M = \frac{1}{2} |S_U + S_L| \quad (7)$$

Son olarak denklemde yer alan $\delta_{RE_{G1}}$ yani birinci derece Richardson Ekstrapolasyon yaklaşımı hata değeri şu şekilde bulunur;

$$\varepsilon_{21G} = S_{M2} - S_{M1} \quad (8)$$

$$\delta_{RE_{G1}} = \frac{\varepsilon_{21G}}{r_G^{p_G} - 1} \quad (9)$$

Hata ve belirsizlik tahmini esnasında, C_G 'nin 1'e yakın veya 1'den büyük olma durumuna göre iki ayrı yol izlenir. C_G değeri eğer 1'den oldukça büyükse çözüm (8) ve (9) no.'lu denklemlerle yapılır. Ancak 1'e yakın olduğu durumda farklı bir yol

izlenmektedir. Bu durumda düzeltilmiş ağ yapısı belirsizliği değeri (U_{GC}) ve bunun için de düzeltilmiş Richardson Ekstrapolasyon yaklaşımı hata değeri (δ_{G1}^*) bulunur. Bu değer;

$$\delta_{G1}^* = C_G \delta_{RE_{G1}} \quad (10)$$

şeklinde ve buradan U_{GC} şu şekilde hesaplanır;

$$U_{GC} = |(1 - C_G) \delta_{RE_{G1}}| \quad (11)$$

Dolayısıyla düzeltilmiş sonuç, S_C şu şekli alır;

$$S_C = S_{M1} - \delta_{G1}^* \quad (12)$$

Buradaki S_{M1} , 1 numaralı ağ yapısıyla yapılan simülasyonda bulunan değerdir. Kısaca izah etmek gerekirse C_G 'nin 1'den çok büyük veya çok küçük olduğu durumda eldeki sonuç nihai sonuç olarak alınır; C_G 'nin 1'e yakın olduğu durumda ise düzeltme faktörü, S_C hesaplanır ve sonuca ilave edilir.

2.2 Onaylama

Onaylama; modelleme belirsizliğinin referans çalışmanın deney sonuçları kullanılarak hesaplanması, ayrıca veriler uygunsuz modelleme hatasının kaynağını bulmak olarak ifade edilir. Modelleme hatası, deney sonuçlarından elde edilen değerlerle simülasyon sonuçları arasındaki farktır. Deney sonuçlarının tamamen gerçek değerleri yansıttığı iddia edilemez. Hiç şüphe yoktur ki gerçek deney ekipmanlarından kaynaklı, gerekse deneyde izlenen yol gereği deneyden elde edilen değerlerin içinde de bir hata (δ_D) mevcuttur. Gerçek (T) ile deney sonuçları (D) arasındaki bu fark hata değeri olan δ_D 'yi verecektir. Aynı şekilde simülasyon sonuçları (S) ile gerçek arasındaki farkın da simülasyon hatası (δ_S)'i vereceği önceki bölümde bahsedilmiştir. Bu durumda;

$$D - \delta_D = S - \delta_S \quad (13)$$

olarak alınabilir. Bu durumda karşılaştırmalı hata (E) şu hali alır;

$$E = D - S = \delta_D - \delta_S \quad (14)$$

Karşılaştırmalı hata değeri E , yukarıdaki denklemlerden de anlaşılacağı gibi içerisinde hem simülasyon hatalarını, hem de deney kaynaklı hataları

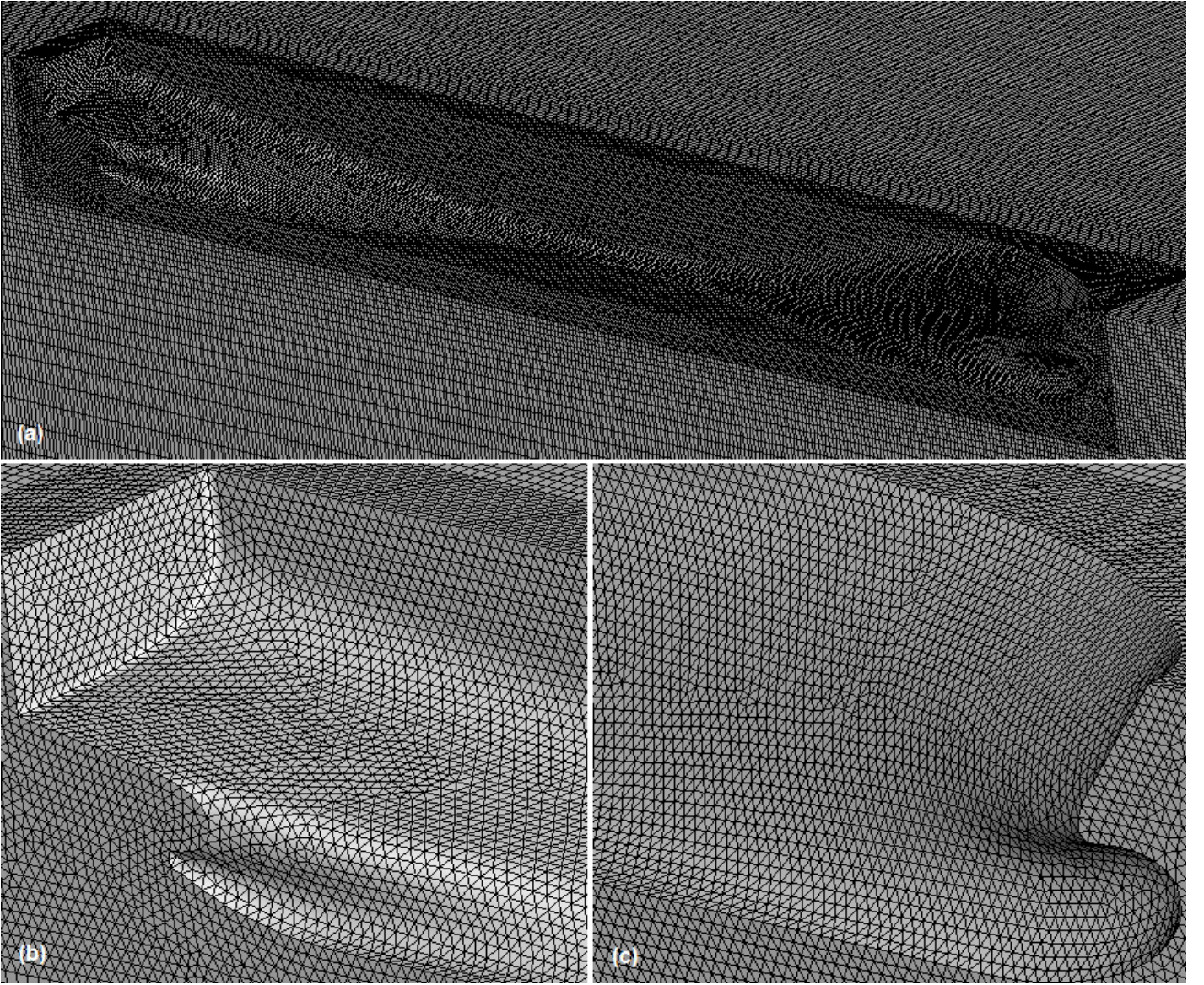
barındırmaktadır. Sayısal hesaplamalarda modelleme hatası olmadığı kabul edilirse, doğrulama belirsizliği U_V sayısal belirsizlik ve deney belirsizliklerinden (U_D) oluşur ve şu şekilde hesaplanır;

$$U_V = \sqrt{U_{SN}^2 + U_D^2} \quad (15)$$

Hata değeri E doğrulama belirsizliği U_V değerinin içinde olması gerektiğinden, onaylanmanın sağlanması için $|E| < |U_V|$ olmalıdır.

3. ÖRNEK BİR ÇALIŞMA

Bu çalışmada DTC referans çalışmasındaki model teknenin geometrisi aynı yapıda fakat farklı sıklıkta ağ yapılarıyla modellenmiş ve elde edilen deney sonuçları baz alınarak hata ve belirsizlik analizi yapılmıştır. Analiz edilen model teknenin hidrostatik özellikleri Tablo 1’de verilmiştir. Seri 60 teknesi için yapılan bir başka örnek Stern ve arkadaşlarının (1999) çalışmasında bulunabilir. HAD analizleri zamandan bağımsız olarak çözülmüştür. Bu doğrultuda ikinci bölümde anlatılan yöntem dizisi takip edilmiş ve referans tekne olarak da Duisburg Test Case gemisi ele alınmıştır. Teknenin model havuzunda yapılan deney sonuçları (El Moctar et al., 2012)’de verilmiştir.



Şekil 1. Örnek çalışma için oluşturulan 1 no.'lu ağ yapısının görünümü. (a) tüm tekne. (b) kıç taraf. (c) baş taraf.

Tablo 1. Tekne hidrostatik özellikleri.

Tekne dikmeler arası boyu	5.976m
Tekne su hattı genişliği	0.859m
Draft	0.244m
Narinlik Katsayısı	0.661
Hız	1.668m/s

Bu çalışmada HAD doğrulaması için 3 farklı ağ yapısı kullanılmıştır. Teknenin servis hızına tekabül eden Froude sayısı (Fr) 0.218 değeri için toplam direnç katsayısı değişkeni (C_T) doğrulama ve onaylama için kullanılmıştır. Ağ eleman sayıları Richardson Ekstrapolasyon yöntemine göre değişmektedir. Bu yöntemle göre 1, 2 ve 3 numaralı ağ yapıları oluşturulurken kullanılan kenar uzunlukları ve kenar eleman sayıları birbirleriyle orantılı olarak değişmektedir. Örneğin 1 numaralı ağdaki en küçük eleman uzunluğu m iken, 2 no.'lu ağ yapısında bu değer $m/\sqrt{2}$, 3 no.'lu ağ yapısında ise $m/2$ 'dir. Benzer şekilde kenar üzerindeki eleman sayısı, 1 no.'lu ağ yapısındaki n adet iken, 2 no.'lu ağ yapısında $\frac{n}{\sqrt{2}}$, 3 no.'lu ağ yapısında ise $\frac{n}{2}$ adettir. 1 no.'lu ağ yapısının tekne etrafındaki görünümü Şekil 1'de verilmiştir.

Yukarıda anlatıldığı şekilde oluşturulan ağ yapıları kullanılarak gerçekleştirilen simülasyonlar sonucunda elde edilen değerler Tablo 2'de verilmiştir. Bu tablodaki her ağ yapısı için verilen eleman sayılarına dikkat edildiğinde, yaklaşık olarak $\sqrt{2}$ oranında değiştiği görülecektir.

S_M değerleri (7) no.'lu denklemle elde edilmiştir. (2) no.'lu denklemden de görülebileceği gibi simülasyon belirsizliği U_S 'nin belirlenebilmesi için iteratif belirsizlik U_I ve ağ yapısı belirsizliği U_G 'nin bulunması gerekir.

Tablo 2'den görülebileceği gibi iteratif belirsizlik U_I (3) no.'lu denklem yardımıyla farklı ağ yapıları için sırasıyla $U_{I_1}=0.001 \times 10^{-3}$, $U_{I_2}=0.0275 \times 10^{-3}$ ve $U_{I_3}=0.0895 \times 10^{-3}$ olarak bulunmuştur.

Ağ yapısı belirsizliği U_G 'nin hesaplanması için bazı parametrelerin hesaplanması gerekmektedir. Bunlar; ağ düzeltme faktörü C_G , ağ yapısı doğruluk mertebesi p_G ve birinci derece Richardson Ekstrapolasyon yaklaşımı hata değeri δ_{REG_1} 'dir. Ağ

yapısı 1 için bu değerler, $\delta_{REG_1} = 2.561 \times 10^{-7}$, $p_G = 11.494$, $C_G = 52.704$ olarak bulunmuştur. C_G değeri 1'den oldukça büyük olduğu için düzeltilmiş ağ belirsizliği U_{G_c} 'yi bulmaya gerek kalmamıştır.

Tablo 2. Ağ yapıları ve elde edilen sonuçlar.

	Ağ Yapısı 3	Ağ Yapısı 2	Ağ Yapısı 1
Eleman Sayısı	447,000	1,286,000	3,468,000
$S_U \cdot 10^3$	5.236	4.449	4.409
$S_L \cdot 10^3$	5.057	4.394	4.407
$S_M \cdot 10^3$	5.1465	4.4215	4.408
$U_I \cdot 10^3$	0.0895	0.0275	0.001

$p_{G_{est}}$ ağ geometrisine bağlı bir katsayı olup, bu çalışmadaki ağ yapısına göre 2 alınmıştır. R_G ağ tasfiye katsayısıdır ve bu değer hatırlanacağı gibi Richardson Ekstrapolasyonu'na göre $\sqrt{2}$ olarak alınır. Sonuç olarak 1 nolu ağ yapısı için ağ yapısı belirsizliği $U_{G_1} = 0,267 \times 10^{-3}$ olarak bulunmuştur. Ağ yapısı belirsizlik değeri U_{G_1} , iteratif belirsizlik değeri U_{I_1} 'den yaklaşık 25 kat daha büyük olduğundan iteratif belirsizliği ihmal ederek, nümerik belirsizlik $U_{SN} \approx U_G$ denebilir. Bu durumda $U_{SN} = 0,267 \times 10^{-3}$ olarak elde edilir.

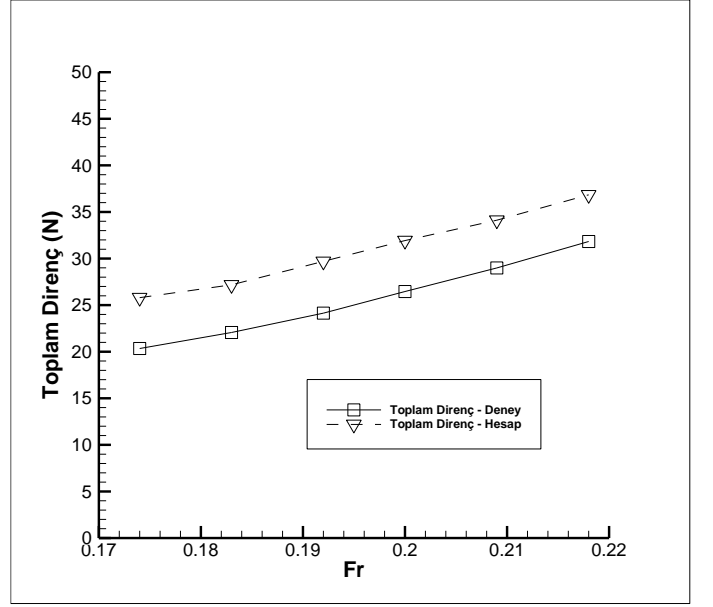
4.YAPILAN HATA VE BELİRSİZLİK ANALİZİNİN YORUMLANMASI

El Moctar ve arkadaşları tarafından DTC model çekme deneyinde $Fr = 0.218$ değeri için toplam direnç katsayısı $C_T = 3.67 \cdot 10^{-3}$ olarak bulunmuştur (El Moctar et al., 2012). Bu çalışmada 1 No.'lu ağ yapısı kullanıldığında toplam direnç katsayısı değeri $S_{M_1} = 4.408 \cdot 10^3$ bulunmuştur. Yani hata değeri $E = 0.738 \cdot 10^{-3}$ 'tür. Doğrulama için bu değer, doğrulama belirsizliği U_v 'den küçük olmalıdır. Doğrulama belirsizliği U_v için denklem (15) göz önünde bulundurularak şu sonuç elde edilir;

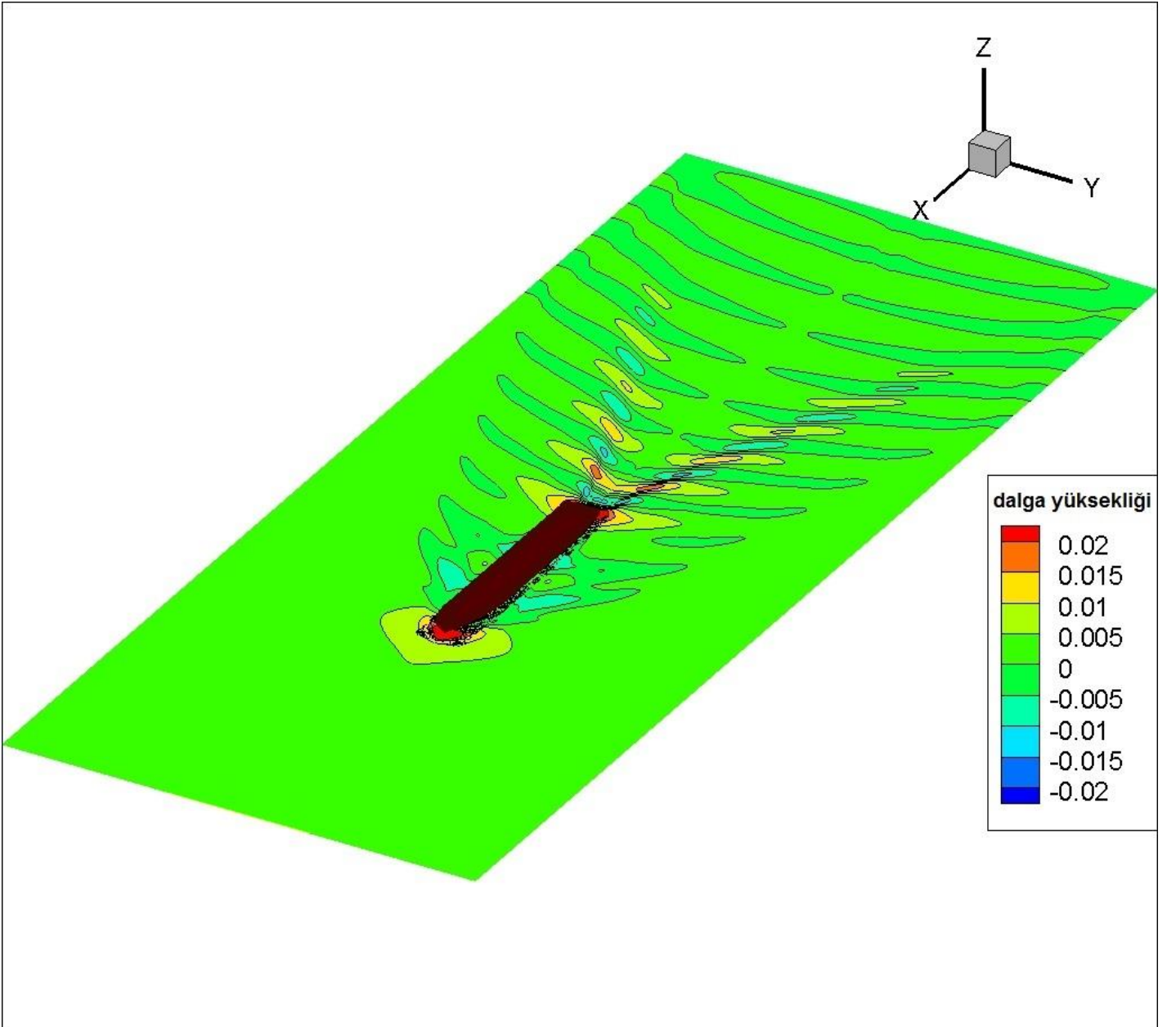
$$U_V = \sqrt{(0.0267 \times 10^{-3})^2 + U_D^2}$$

Çalışmada deney belirsizliği U_D ile ilgili bir bilgi yer almamaktadır. Doğrulama belirsizliği değeri

U_V 'nin tam olarak bulunması için deneysel belirsizlik U_D 'nin bilinmesi gerekmektedir. Ancak dikkat edilmelidir ki, simülasyon belirsizliği U_{SN} , hatayla kıyaslandığında çok küçük kalmaktadır. $|E| < |U_V|$ şartı göz önünde bulundurulduğunda U_V değerinin en iyi ihtimalle $E = 0.738 \cdot 10^{-3}$ değerinde olduğunu varsayılsa bile, deney belirsizliği U_D 'nin bu durumda oldukça yüksek olması gerekecektir. Burada iki olasılık mevcuttur. Ya deney sonuçlarındaki deneysel belirsizlikler çok büyüktür, ya da RANSE tarafından hesaplanan direnç kuvvetlerinde bir sapma bulunmaktadır. Bu farkın sebebini anlamak için 1 no'lu ağ yapısı farklı Froude sayılarında test edilmiştir. Buradan elde edilen sonuçlar ve bu Froude sayılarında yapılan deney sonuçları Şekil 2'de görülmektedir.



Şekil 2. Sayısal olarak hesaplanan toplam direncin deneyle karşılaştırılması.



Şekil 3. Tekne etrafındaki dalga deformasyonu.

Şekil 2 dikkatle incelendiğinde hesaplanan toplam dirençle deneylerle bulunan toplam direnç değerleri arasında neredeyse sabit bir fark olduğu anlaşılmaktadır. Bunun muhtemel sebebi HAD analizi yapılırken teknenin sabit cisim olarak kabul edilmesidir. Referans çalışmada (El Moctar et al., 2012) deneylerde teknenin hareketinin serbest bırakıldığı belirtilmiştir. Model gemi havuzda ilerlerken baş-kıç vurma ve batma-çıkma gibi hareketleri yaparken, HAD analizinde sabit durmaya zorlanmaktadır. Bu durumun tekneyi zorunlu olarak suyun içinde tuttuğu ve teknenin dalga direncini önemli miktarda artırdığı düşünülmektedir. HAD analizi ile elde edilen tekne etrafındaki dalga yükseklikleri Şekil 3'te verilmiştir. Teknenin hareketli halde HAD ile çözülmesi sonrasında elde edilen dalga yüksekliklerinin de değişeceği öngörülmektedir.

Ogiwara ve Kajitani (1994) Seri 60 teknesi için sabitlenmiş cisim durumunda toplam direnç katsayısının %8 arttığını belirtmişlerdir. Buradan yola çıkarak, Toda ve ark. (1992), sabit tekne için yaptıkları hesaplamalarda buldukları toplam direnç değerlerini %8 azaltarak düzeltmişlerdir. Şekil 2'de verilen değerlerin bu civarda azaltılması, deney sonuçlarına daha yakın sonuçlar alınmasını sağlayacaktır.

5.SONUÇ

Bu çalışmada, HAD yaklaşımıyla yapılan gemi direnç analizi için literatürde bulunan hata ve belirsizlik hesaplama yöntemlerinden birisi anlatılmış ve örnek bir tekne için yapılan HAD analizinin hata ve belirsizlikleri hesaplanmıştır. Sayısal çözümler sınırlı bilgisayar kapasiteleriyle yapılmaya çalışıldığında akış bölgesini daha az elemanla temsil etmek gerekebilir. Bu durumda yapılan sayısal çözümlerin sınırsız elemanla yapılacak çözüm sonuçlarından da uzak olması beklenir. Doğrulama aşamasında elde edilen sayısal değere eklenen düzeltme faktörü bu gibi durumlarda geçerlidir. Ancak gelişen bilgisayar teknolojisi sayısal çözümlerde çok yüksek eleman sayılarına çıkabilmeyi mümkün kılmıştır. Bu sebeple bu çalışmada doğrulama aşamasında elde edilen

direnç değerine düzeltme faktörü uygulamaya gerek kalmamıştır. HAD analizi zamandan bağımsız olarak yapılmış, ve dolayısıyla zaman adımının yaratacağı hata ve belirsizlikler hesap dışında bırakılmıştır. Yapılan hata ve belirsizlik analizi sonucu, HAD analizinin doğrulaması yapılmış ancak onaylanması sağlanamamıştır. Bunun sebebi ise deneylerde teknenin hareketli, HAD analizlerinde ise sabit olmasıdır. Sayısal çözümlerde tekneyi hareketli çözmek çok daha meşakkatlidir ve daha yüksek kapasiteli bilgisayarlara ihtiyaç duyulur. Bu sebeple bu çalışmada tekne sabit olarak çözülmüştür. Deneyler esnasında tekne akış içerisinde kendisini yüksek basınçtan kurtarabilecek serbestliğe sahipken, sayısal çözümlerde sabit durmaya zorlanmıştır. Bu da teknenin direncini artıran bir faktör olmaktadır. Çözüm yöntemleri gelişerek, deney koşullarına yaklaştıkça sonuçların doğruluğunun artması ve HAD analizlerinin doğrulanması beklenmektedir.

REFERANSLAR

- AIAA 1998. Guide for the Verification and Validation of Computational Fluid Dynamics Simulations, G-077-1998.
- El Moctar, O., Shigunov, V., and Zorn, T. 2012. Duisburg Test Case: Post-Panamax Container Ship for Benchmarking. *Ship Technology Research*, 59,3:50-65.
- Mehta, U.B. 1998. Credible Computational Fluids Dynamics Simulations. *AIAA Journal*, 36:665-667.
- Ogiwara, S. and Kajitani, H. 1994. Pressure Distribution on the Hull Surface of Series 60 (CB=0.60) Model. *Proceedings CFD Workshop Tokyo*, 1:350-358.
- Stern, F., Wilson, R.V., Coleman, H.W., and Paterson, E.G. 1999. Verification and Validation of CFD Simulations. *Iowa Institute of Hydraulic Research Report*, 407.
- Toda, Y., Stern, F., and Longo, J. 1992. Mean-Flow Measurements in the Boundary Layer and Wake and Wave Field of a Series 60 CB=.6 Model Ship – Part 1: Froude Numbers .16 and .316. *Journal of Ship Research*, 36,4:360-377.