

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

GEMİ DİRENCİNİN DENEYSEL BELİRSİZLİK ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Cihad DELEN

Gemi İnşaatı ve Gemi Makinaları Anabilim Dalı

Gemi İnşaatı ve Gemi Makinaları Mühendisliği Programı

OCAK 2015

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

GEMİ DİRENCİNİN DENEYSEL BELİRSİZLİK ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Cihad DELEN
(508121004)**

Gemi İnşaatı ve Gemi Makinaları Anabilim Dalı

Gemi İnşaatı ve Gemi Makinaları Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Şakir BAL

OCAK 2015

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 508121004 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Cihad DELEN**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**GEMİ DİRENCİNİN DENEYSEL BELİRSİZLİK ANALİZİ**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Şakir BAL**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Mesut Güner**
Yıldız Teknik Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Devrim Bülent Danışman
İstanbul Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : 15 Aralık 2014

Savunma Tarihi : 20 Ocak 2015

Abime,

ÖNSÖZ

Lise yıllarında, okul müdürümüz İsmail Karahan'dan duyduğum “Tabiat boşluk kabul etmez.” sözü doğrultusunda şekillendirmeye çalıştığım hayatımda; ailemden, değerli insanlardan ve hayattan edindiğim tecrübeler ile yola çıkarak sahip olduğum bilgilerin ve tecrübelerin, şahsım adına bir nevi karşılığını alacağım, üzerimde emeği olan insanlar için ise ahde vefa olacak dönüm noktalarından birindeyim.

Bu çalışmanın ortaya çıkmasında en büyük desteği veren ve aynı zamanda bilgisiyle bana yol gösteren, yeni hedefler belirlememde yardımcı olan değerli hocam Sayın Prof. Dr. Şakir Bal'a ve akademisyen olma yolunda ilerlememe katkı sağlayan, ufuklar açan Sayın Yrd. Doç. Özgür Demir'e özellikle teşekkürü bir borç bilirim. Aynı zamanda deneysel çalışmalarımı gerçekleştirebilmem için Türkiye'de alanında ilk ve tek olan İTÜ Ata Nutku Gemi Model Deney Laboratuvarı'nın kapılarını ardına kadar açan tez danışmanım Prof. Dr. Şakir Bal'a tekrardan teşekkür ederim. Devamında da deneysel çalışmalarında yardımlarını esirgemeyen laboratuvar ekibinden başta Cemal Çelik olmak üzere bütün ekibe teşekkür ederim. Ayrıca bu çalışmayı gerçekleştirmemde bana yardımcı olan, destek veren İTÜ BAP birimine, yakın arkadaşlarıma, çalışma arkadaşlarıma ve çalışmalarından yararlandığım burada adını anmadığım bütün insanlara teşekkür ederim.

Şu an içinde bulunduğum fırsatların oluşmasında en büyük payı olan ve hayatım boyunca emeklerini ve desteklerini unutamayacağım ve daima hatırlayacağım değerli annem ve babama şükranlarımı sunarım. Ayrıca bu tez süreci içerisinde hayatımı birleştirdiğim eşime de ayrıca teşekkür ederim. Son olarak ise son zamanlarda ihmal ettiğimi düşündüğüm ve bu tezi bir özür mahiyetinde ithaf ettiğim değerli Abime de sonsuz sevgilerimi sunarım.

Ocak 2015

Cihad DELEN
(Gemi İnşaatı ve Gemi
Makineleri Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖNSÖZ.....	xvii
İÇİNDEKİLER	xix
KISALTMA LİSTESİ	xxi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xxiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xxv
SEMBOL LİSTESİ	xxvii
ÖZET.....	xxix
SUMMARY	xxxiii
1. GİRİŞ.....	1
2. BELİRSİZLİK DEĞERLENDİRME ANALİZİ	7
2.1 Belirsizlik Analizinde Kullanılan Terimler	8
2.2 Ölçüm Hataları	10
2.2.1 Rastlantısal hata	10
2.2.2 Sistematik hata	12
2.3 Ölçüm Belirsizliği	14
2.3.1 Rastlantısal belirsizliğin hesaplanması	14
2.3.2 Sistematik hatanın hesaplanması	16
2.3.3 Bileşik ve genişletilmiş standart belirsizliğin hesaplanması	17
2.4 Sonuç Belirsizliği	17
2.4.1 Duyarlılık	18
2.4.1.1 Analitik hesap.....	18
2.4.1.2 Sayısal hesap	19
2.4.2 Sonucun rastlantısal belirsizliğinin değeri	19
2.4.2.1 Tek ölçüm.....	19
2.4.2.2 Çok sayıda tekrarlanan ölçümler.....	20
2.4.3 Sonucun sistematik belirsizliğinin değeri	20
2.4.4 Sonucun bileşik ve genişletilmiş standart belirsizlik değeri	21
3. GEMİ DİRENCİ	23
3.1 Gemi Direncine Giriş	23
3.1.1 Dinamik benzerlik.....	25
3.1.2 Model-gemi ilişkisi	26
3.2 Viskoz Direnç.....	27
3.3 Dalga Direnci	29
3.4 Model Deneyleri ile Gemi Direncini Belirleme Yöntemleri.....	30
3.5 ITTC Direnç Hesabı	32
3.5.1 ITTC gemi direnci belirleme yöntemi	32
3.5.1.1 Model ölçeğindeki sonuçların analizi	34
4. GEMİ DİRENCİNİN BELİRSİZLİĞİ	37
4.1 ITTC 2002 Metodu ile Toplam Direncin Belirsizliğinin Hesaplanması.....	37
4.1.1 Model boyu	37
4.1.2 Islak alan	38

4.1.2.1 Üretimden kaynaklanan hatalar (veri toplam).....	38
4.1.2.2 Ağırlıklardan kaynaklanan hatalar (kalibrasyon)	39
4.1.3 Sıcaklık, yoğunluk, viskozite	39
4.1.3.1 Sıcaklık.....	39
4.1.3.2 Yoğunluk.....	39
4.1.3.3 Viskozite.....	40
4.1.4 Model hızı	41
4.1.5 Direnç	43
4.1.6 Sürtünme direnci katsayısı	44
4.1.7 Form faktörü.....	45
4.1.8 Toplam direnç katsayısı	45
4.1.9 Artık direnç katsayısı	45
4.1.10 Rastlantısal hata.....	45
4.1.11 Genişletilmiş standart belirsizlik	46
4.2 2014 ITTC Belirsizlik Prosedürü	47
4.2.1 Belirsizlik kaynakları	47
4.2.1.1 Model geometrisi (No:1)	47
4.2.1.2 Deney düzeneğinin kurulumu (No:2).....	49
4.2.1.3 Kalibrasyon (No:3).....	49
4.2.1.4 Ölçüm (no:4)	50
4.2.1.5 Veri indirgeme (No:5).....	52
4.2.2 Belirsizliğin hesaplanması.....	52
4.2.2.1 Form geometrisi	52
4.2.2.2 Dinamometre kalibrasyonu	53
4.2.2.3 Su sıcaklığı	53
4.2.2.4 Çekme arabası hızı	54
4.2.2.5 Tekrarlanan testler.....	54
4.2.2.6 Bileşik standart belirsizlik.....	54
5. DENEY SONUÇLARI VE BELİRSİZLİK ANALİZİ	57
5.1 Deplasman Tipi (KCS) Model Örneğinde Belirsizlik Analizi Uygulanması ...	58
5.1.1 2002 ITTC metodu ile belirsizliğin hesaplanması	62
5.1.2 2014 ITTC metodu ile belirsizliğin hesaplanması	69
5.1.3 Deplasman tipi (KCS) modelin belirsizlik sonuçları	72
5.2 Hızlı Tekne Model Örneğinde Belirsizlik Analizi Uygulanması	76
5.2.1 2002 ITTC metodu ile belirsizliğin hesaplanması	77
5.2.2 2014 ITTC metodu ile belirsizliğin hesaplanması	85
5.2.3 Hızlı tekne modelinin belirsizlik sonuçları	87
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	89
KAYNAKLAR.....	97
EK A.TEK BİLEŞENLİ (R-35) DİNAMOMETRENİN KALİBRASYONU... 101	
EK B. KCS DALGA RESİMLERİ..... 103	
ÖZGEÇMİŞ..... 105	

KISALTMA LİSTESİ

CNC : Computer Numerical Control
Fr : Froude sayısı
GUM : Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement
HSMV : High Speed Marine Vehicle
ISO : International Organization for Standardization
ITTC : The International Towing Tank Conference
İTÜ : İstanbul Teknik Üniversitesi
KCS : Krio Container Ship
NMRI : National Maritime Research Institute
Re : Reynolds sayısı

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 4.1 : 2014 ITTC yöntemi ile belirsizlik bileşenleri ve hesaplanması	56
Çizelge 5.1 : Deplasman tipi (KCS) formun ana parametreleri.....	58
Çizelge 5.2 : Sistematik belirsizlik kaynaklarının tahmin edilmesi.	63
Çizelge 5.3 : Rastlantısal belirsizlik (kesinlik).	67
Çizelge 5.4 : Genişletilmiş belirsizlik değeri ($k=2$).	67
Çizelge 5.5 : KCS direnç değerleri.	70
Çizelge 5.6 : Bileşik standart belirsizliğin hesaplanması.	70
Çizelge 5.7 : Genişletilmiş standart belirsizliğin hesaplanması.	71
Çizelge 5.8 : Deplasman tipi modelin, 2002 ve 2014 ITTC yöntemine göre genişletilmiş belirsizlik değerleri ($k=2$).	72
Çizelge 5.9 : Hızlı tekne modelinin ana parametreleri.	76
Çizelge 5.10: Hızlı tekne için sistematik (eğilim) belirsizlik kaynakları ve nicelik olarak değerleri.	78
Çizelge 5.11: Hızlı tekne modelinin direnç, direnç ortalaması ve standart sapması.	82
Çizelge 5.12: Toplam direnç katsayısının ve artık direnç katsayısının genişletilmiş belirsizlik değeri ($k=2$).	83
Çizelge 5.13: Hızlı tekne direnç değerleri.	86
Çizelge 5.14: Hızlı tekne için bileşik standart belirsizliğin hesaplanması.	86
Çizelge 5.15: Hızlı tekne için genişletilmiş belirsizlik değeri.	86
Çizelge 5.16: Hızlı teknenin 2002 ve 2014 ITTC yöntemine göre genişletilmiş belirsizlik değerleri.	88
Çizelge A.1 : Kalibrasyon değerleri.	102

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Problem çözümüne analitik yaklaşım [1].	1
Şekil 2.1 : Normal dağılımın güvenilirlik çarpanına göre dağılımı [6].	12
Şekil 3.1 : Toplam direncin bileşenleri [7].	27
Şekil 5.1 : KCS endaze planı. a) En kesitleri resmi. b) Profil resmi.	59
Şekil 5.2 : KCS modelinin üretim aşamaları. a)Kaba modelin oluşturulması. b) Sıkılmış model. c) Baş kısmın işlenmesi. d) K1ç kısmın işlenmesi.	59
Şekil 5.3 : KCS modelinin üretim aşamaları. a)Astarlama işlemi b)Boya işlemi	60
Şekil 5.4 : KCS modelinin genel görünüşü. a)Baş. b) K1ç. c) Profil.	61
Şekil 5.5 : Türbülans yapıcı pinlerin baş ve dümen üzerine yerleşimi.	61
Şekil 5.6 : KCS için Toplam direnç katsayısının sistematik (bias) hata bileşenleri. a) Fr=0.16 için. b)Fr=0.21 için. c)Fr=0.26 için.	66
Şekil 5.7 : Sistematik ve rastlantısal hatalarının deney sayısına bağlı değişimi. a)Rastlantısal (kesinlik). b)Sistematik (eğilim).	68
Şekil 5.8 : KCS formu C_T grafiği ve C_T hata çubukları (2002 ITTC).	69
Şekil 5.9 : Genişletilmiş standart belirsizliğin test sayısına göre değişimi.	71
Şekil 5.10: KCS formu C_T grafiği ve C_T hata çubukları (2014 ITTC).	72
Şekil 5.11: Deplasman tipi modelin (KCS) 2002 ve 2014 ITTC belirsizlik tahminleri.	73
Şekil 5.12: Artık direnç katsayısı karşılaştırılması.	75
Şekil 5.13: Hızlı tekne modelinin görünüşleri a) Baş görüntüsü b) K1ç görüntüsü c)Profil görüntüsü.	77
Şekil 5.14: Toplam direnç katsayısının sistematik hata bileşenleri. a) Fr=0.50 için. b)Fr=0.90 için.	81
Şekil 5.15: Genişletilmiş rastlantısal belirsizliğin deney sayısına göre değişimi.	83
Şekil 5.16: Genişletilmiş sistematik belirsizliğin deney sayısına göre değişimi.	84
Şekil 5.17: Hızlı tekne formu C_T grafiği ve C_T hata çubukları (2002 ITTC).	85
Şekil 5.18: Genişletilmiş belirsizliğin deney sayısına göre değişimi.	87
Şekil 5.19: Hızlı tekne C_T grafiği ve C_T hata çubukları (2014 ITTC).	87
Şekil 5.20: Hızlı teknenin 2002 ve 2014 ITTC belirsizlik tahminleri.	88
Şekil A.1 : Lineer kalibrasyon grafiği.	102
Şekil B.1 : KCS baş dalga görüntüsü. a) Fr=0.22 b) Fr=0.28	103
Şekil B.2 : KCS form üzeri dalga dağılımı. a) Fr=0.16 b) Fr=0.21 c) Fr=0.26.	104

SEMBOL LİSTESİ

$\bar{X}$	: X değerlerinin aritmetik ortalaması
μ	: Gerçek ortalama değeri
$1+k$	: Form Faktörü
A_{WP}	: Su hattı alanı
B	: Gemi genişliği
B_X	: X değerlerinin sistematik belirsizliği
C_{APP}	: Takıntı direnci katsayısı
C_B	: Blok katsayısı
C_F	: Sürtünme direnci katsayısı
C_S	: Islak alan katsayısı
C_T	: Toplam direnç katsayısı
C_V	: Viskoz direnç katsayısı
C_W	: Dalga direnci katsayısı
C_{WP}	: Su hattı katsayısı
D	: Tekerlek çapı
k	: Güvenirlilik katsayısı
kg	: Kilogram
L_{CB}	: Yüzme merkezinin boyuna yeri
L_M	: Model boyu
L_S	: Dikmeler arası boy
L_S	: Gemi boyu
L_{WL}	: Su hattı boyu
L_{WS}	: Islak boy
m	: Metre
mm	: Milimetre
N	: Kuvvet birimi (Newton)
N	: Test sayısı
Re	: Reynolds sayısı
R_{TM}	: Model toplam direnci
S	: Islak alan
s	: Saniye
SEE	: Standart hata tahmini değeri
s_X	: X değerlerinin standart sapması
T	: Su çekimi yüksekliği
u	: Bileşik standart belirsizlik
U	: Genişletilmiş belirsizlik değeri
u'_A	: A'nın bağıl belirsizlik değeri
V	: Hız
V_M	: Model hızı
V_S	: Gemi hızı
γ	: Kinematik viskozite
Δ	: Deplasman ağırlığı
ε	: Rastlantısal hata
θ^A_B	: B fonksiyonun A değerine göre duyarlılığı

λ	: Benzerlik ölçęęi
ρ	: Yoğunluk
σ	: Gerçek standart sapma değeri
∇	: Deplasman hacmi

GEMİ DİRENCİNİN DENEYSEL BELİRSİZLİK ANALİZİ

ÖZET

Belirsizlik analizi en çok deneysel çalışmalarda karşımıza çıkar. Mühendislikte problemlerin çözümü için en çok başvurulan yollardan bir tanesi deneysel çalışmalardır. Deneysel çalışmalarda ise deney sisteminin oluşturulmasında genellikle doğadan ilham alınarak modellenmesi yapılır daha sonra da varsayımlara ve idealleştirmelere başvurulur. Deney düzeneğinin planlanmasında, oluşturulmasında ve deneyin sonunda sonuçlarının analiz edilmesinde matematiksel ve fiziksel kurallar oldukça fazla kullanılmaktadır. Bu karmaşık sistem örgüsü içinde ise her bir deney basamağının doğru, aslında doğruya en yakın şekilde tanımlanması ve tamamlanması gerekmektedir. Çünkü bir deneyde veya üretimde, herhangi bir basamakta oluşacak bir hata diğer adımlarda etkili olacağından sonucun veya ürünün, üretim ve üretim sonrasında yapılacak test aşamalarında dizayn kriterlerini sağlamamasına yol açacaktır. Bunun önüne geçebilmek için deney düzeneğinin her basamağında yapılan işlemlerin ve bu işlemlerden doğabilecek muhtemel hataların gerçek (gerçeğe en yakın) sonucu ne kadar etkileyeceğinin nicelik olarak hesaplanma ihtiyacı doğmuştur. Bu soruna cevap olarak kullanılan belirsizlik analizi yöntemi, ölçümlerin belirsizliğini nicelik olarak belirlemek amacıyla içerisinde hem istatistik hem de mühendislik barındıran bir alandır.

Belirsizlik analizi her mühendislik alanında farklı şekilde uygulanabilmektedir. Çünkü mühendislik kollarında farklı sorunlara cevap vermesi amacıyla birbirinden farklı ve çeşitli deneyler ve hesaplamalar yapıldığından bunların belirsizliğini nicelik olarak tahmin edecek yöntemlerde farklılık göstermektedir. Her sistem için uygulanacak olan adımlar ise standarttır. İlk adım bir deney veya ölçüm düzeneği içerisinde belirsizlik oluşturabilecek kaynakların belirlenmesidir. İkinci adım ise bu belirsizlik kaynakları içerisinde mühendislik tecrübesi ile baskın olduğu düşünülen belirsizlik bileşeninden başlayarak sonuca etkisi az olan belirsizlik bileşenine doğru belirsizliğin tahmini için çeşitli yöntemler uygulanmasıdır. Deney şartlarının sonuçlar üzerine etkisini belirlemek için deney şartları aynı tutulmaya çalışılarak aynı deney çok sayıda tekrarlanır. Böylelikle sistem üzerinde oluşan muhtemel belirsizliğin sonuçlara olan etkisi istatistiksel olarak incelenir. Deney veya ölçüm sonucunun ortalaması ve standart sapması hesaplanarak kesinlik (rastlantısal) limiti tahmininde bulunulur. Ölçüm sistemi içerisinde belirsizlik kaynaklarının sınıflandırıldığında eğilim (sistemik) olarak belirlenen belirsizlik kaynaklarının nicelik olarak sonuca etkisi tahmin edilir. Özellikle deney sistemi içerisinde kullanılan cihazların sonuçlar üzerinde etkisinin incelenmelidir ve nicelik olarak belirsizlik değeri tahmin edilmelidir. Nicelik olarak hesaplanan bütün bileşenlerinin karelerinin toplamının karekökü hesaplanarak bileşik standart belirsizlik bulunur. Daha sonra ise istenilen güvenilirlik katsayısı ile değerler çarpılarak genişletilmiş belirsizlik değeri elde edilir.

Bu çalışmada, deneysel olarak hesaplanan model gemi direnci üzerinde oluşan belirsizliğin incelenmesi yapılmıştır.

Gemi direnci, ölçeklenmiş gemi modelinin sakin suda belirli, sabit bir hızda ilerlerken üzerine gelen harekete zıt yöndeki kuvvet olarak tanımlanmaktadır. Elde edilen bu direnç değeri Froude ve Reynolds yaklaşımları kullanılarak gemi ölçeğinde direnç değerinin ve efektif güç hesaplamasında kullanılmaktadır. Bu özelliğinden dolayı gemi direnci dizayn aşamasında dikkat edilen çok önemli bir parametredir. Dizayn edilen gemi projesinin sözleşmesinde yer alan şartları, özellikle hız, sağlaması açısından gemi direnci değeri hassas ve güvenilir bir şekilde tahmin edilmelidir. İstenilen özellikleri sağlayamayan bir proje, işveren (armatör) ve yüklenici (dizayn ofis veya tersane) arasında önemli sorunlara neden olabilmektedir. O yüzden üretim planlamasını ve maliyetini önemli ölçüde etkileyen bir parametre olan gemi direnci değerini belirlemek amacıyla yapılan çalışmalar içerisinde güvenli yollardan bir tanesi de deneysel çalışmalardır. Fakat deneysel çalışmalarda da ölçüm sistemi içerisinde yer alan çeşitli ve değişik belirsizlik kaynakları, sonuçlar üzerinde oluşturmaktadır. Bu belirsizliğin incelenmesi ve nicelik olarak tahminin yapılması deney sonuçlarının güvenilirliği açısından oldukça önemlidir.

Bu çalışmada, İTÜ Ata Nutku Gemi Model Deney Laboratuvarı'nda yapılan gemi direnci deneylerinde sistem üzerinde oluşan muhtemel belirsizliğin mevcut yöntemlerle nicelik olarak hesaplanması üzerine kurulmuştur. Gemi model laboratuvarlarında kullanılan prosedürler Uluslararası Çekme Tankları Konferansı (International Towing Tank Conference (ITTC)) tarafından oluşturulmaktadır. ITTC'nin gemi direncinin belirsizlik analizi başlığında 2002, 2008 ve 2014 yıllarında yayımlanmış olduğu birbirleriyle karşılaştırıldığında farklılıklar içeren prosedürleri mevcuttur. Aslında 2008 ITTC prosedürü 27. ITTC toplantısında güncellenerek 2014 ITTC olarak yayımlanmış bir prosedürdür. Bu yüzden bu çalışmada, 2008 ve 2014 ITTC prosedürü içerisinde güncel olan 2014 ITTC prosedürü dikkate alınmıştır. Diğer yandan 2002 ve 2014 ITTC belirsizlik analizi yöntemleri arasında bariz farklar mevcuttur. İki tip prosedür de ayrı ayrı incelenerek deney sonuçlarına uygulanmıştır. İki yöntem yardımıyla elde edilen belirsizlik tahminleri incelenerek prosedürlerin avantajlı ve dezavantajlı kısımları incelenmiştir.

Gemi direnci deneylerinde oluşan muhtemel belirsizlik kaynaklarının belirlenmesi için yaygın olarak üretimi yapılan iki gemi tipi seçilmiştir. Bunlardan birinci deplasman tipi diğeri ise hızlı tekne tipidir. Deplasman tipi için Kriso Container Ship (KCS) formunun modeli laboratuvar bünyesinde üretimi yapıp, deneyleri yapılmıştır. Hızlı tekne için ise laboratuvar bünyesinde daha önce deneyleri yapılmış olan bir modelin deneyleri bu çalışma için tekrar kullanılmıştır. KCS modelinin belirsizlik analizi için toplamda 12 kez, hızlı tekne modelinin ise toplamda 5 kez deneyler tekrarlanmış ve belirsizlik tahminleri yapılmıştır. Bu çalışmada, KCS modeli için düşük, orta ve yüksek Froude sayısı üzerinde belirsizlik tahmininde bulunulmuştur. Bunlar sırasıyla 0.16, 0.21, 0.26'dır. Hızlı tekne için ise iki Froude sayısı üzerinde belirsizlik analizi uygulanmıştır. Bu Froude sayıları sırasıyla 0.50 ve 0.90'dır.

Yüksek lisans tezi kapsamında incelenen bu konu, geliştirilmekte olan bir konu üzerine mevcut yöntemlerin anlaşılmasına, uygulanması sırasında karşılaşılan sorunlara ve çözüm yollarına, sağlıklı ve güvenilir bir ölçüm için nelere dikkat edilmesi gerektiğine, mevcut yöntemlerle beraber mühendislik yorumunu kullanarak bir yaklaşım sunmuştur.

Bir deney sistemi içerisinde çok fazla belirsizlik kaynağı vardır. Bunların tek tek incelenmesi mümkün değildir. O yüzden mevcut akademik birikim ile bunlardan

sınırlı belirsizlik kaynakları incelenebilir. Bu çalışmada da gemi direnci konusunda yapılan deneyler üzerinde meydana gelen belirsizlikler iki farklı yöntem ile incelenmiş olup sonuçlarına yer verilmiştir.

İTÜ Ata Nutku Gemi Model Deney Laboratuvarında KCS modeli için yapılan direnç deneylerinde, 0.16, 0.21 ve 0.26 Fr sayılarında, toplam direnç katsayısı (C_T) üzerinde oluşan tahmini belirsizlik, 2002 ITTC yöntemi kullanılarak sırasıyla % 3.86, %2.53 ve %1.46, 2014 yöntemine göre ise sırasıyla % 3.13, % 2.10 ve % 1.16 bulunmuştur. Düşük hızlarda direnç ölçme sisteminden ve çevresel şartların daha etkin olmasından dolayı belirsizlik yüksek hızlara göre nispeten daha yüksek çıkmaktadır. Aynı zamanda 2014 ITTC yöntemi 2002 ITTC yöntemine göre daha düşük değerler vermiştir. Hızlı tekne tipi için ise sonuçlar özellikle 2014 ITTC yöntemine göre oldukça iyi seviyelerdedir. Fakat 2002 ITTC yönteminde ise model boyunun küçük olması yüzünden ıslak alan belirsizliği çok yüksek çıkmaktadır. Hızdan bağımsız şekilde sonuçlar üzerinde etkili olan bu belirsizlik her iki Fr sayısı için C_T belirsizliğinin nicelik olarak %2 civarı çıkmasına neden olmaktadır. Bu yüzden ana parametreleri küçük olan modellerde 2002 yöntemine göre belirsizlik analizinin uygulanması güvenilir sonuçlar vermediği anlaşılmıştır. Aynı deney şartları ile elde edilen değerler 2014 yöntemine göre incelendiğinde belirsizlik sonuçları sırasıyla %1.33 ve %0.42 çıkmaktadır. Dizayn hızı civarında elde edilen düşük yüzde belirsizlik oldukça önemlidir.

Belirsizlik bileşenlerinin toplam belirsizliğe yaptığı katkı incelenerek yapılacak olan iyileştirmeler ile belirsizlik değeri tamamen ortadan kaldırılamasa da azalacağından sonuçların güvenilirliği artacaktır. Her iki tekne tipi için de bu yorum geçerlidir.

Son olarak, diğer çekme tankları ile sonuçlar karşılaştırılmıştır. Reynolds benzerliği sağlanamamasına rağmen hata aralığı % 6 civarı bulunmuştur. Ayrıca çeşitli hızlardaki direnç deneyinin videoları ek olarak CD içerisinde teze eklenmiştir. Çalışmanın nihai olarak tamamlanması için ilave olarak hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) ile sonuçların kıyaslanması tavsiye edilmektedir.

UNCERTAINTY ANALYSIS OF EXPERIMENTAL SHIP RESISTANCE

TESTS

SUMMARY

Uncertainty analysis is encountered in most experimental studies. When a problem in engineering modeling inspired by nature, it is created test system by assumptions and idealizations. Mathematical and physical rules are used a lot in the planning of the experimental apparatus and analyzing results. Each test step must define and complete correctly actually most closely to true value. If an error occurs in any step in experiment, the error occurred will adversely affect other results.

Errors caused by the measurement system, calculations etc. need to estimate how much will affect the real results (closest to real value). In response to this problem, uncertainty analysis in order to determine the quantity of uncertainties, which is a matter for the purpose of containing both engineering and statistics.

Uncertainty analysis can be applied in a different way in each engineering. Because various experiments and calculations are made in the various branches of engineering. There are differences in methods in order to estimate the quantity of uncertainty. The steps that will be applied to each system are standard. First, to determine the resources that may create uncertainty within a test or measurement setup. Then a variety of methods to estimate the uncertainty considered in the dominant sources of uncertainty is applied with engineering experience. Hence the effect on the result of the uncertainty that occurs on the system are analyzed statistically. The average and standard deviation of the test or measurement results are calculated and precision (random) limit is estimated. Later measurement of the uncertainty sources that affect measurement results, the bias (systematic) must estimate as the quantity. By calculating the square root of the sum of the squares of all the uncertainty components are the combined standard uncertainty. Then the results multiplied with the desired reliability coefficient. Finally, the obtained value of the expanded uncertainty.

In this study, basic and generally expressed uncertainty analysis. then the uncertainty of the model ship resistance was investigated experimentally calculated.

Ship resistance is defined as the forces in calm water and particular, constant speed. This acquired model resistance is used to calculate the value of the ship resistance and effective power with Froude and Reynolds approaches. Because of this feature, ship resistance is an important parameter that is considered in the design stage. If the ship resistance value is not estimated precisely and reliably, the main machine made the wrong choice. This situation significantly adversely affects the production planning and cost. Therefore one of the most reliable way to determine the resistance of the ship are experimental work. However, there are sources of uncertainty occurring in the test system. Sources of uncertainties should be analyzed in terms of the reliability of the test results. Especially the dominant uncertainty must be estimated quantitatively.

The procedures used for the analysis of the model resistance results generated by the ITTC. There are procedures about Uncertainty Analysis of Resistance Towing Test which were published in 2002, 2008 and 2014. 2008 ITTC procedure was revised at 27th ITTC meeting in 2014. Revised procedure (2014 ITTC) was taken into account in calculations. Then, there are obvious differences between 2002 and 2014 ITTC uncertainty analysis methods. However, as above-mentioned there is not only one method for uncertainty analysis. Purpose of the uncertainty analysis; by combining current academic knowledge and engineering review is to achieve the most accurate results. Therefore, two procedures are analyzed separately and they were applied to the experimental results. Uncertainty components were analyzed and were calculated by two methods. After that, advantages and disadvantages of the procedures were investigated.

Two common type of ship are selected to determine the potential uncertainty sources in resistance test. The first type is displacement ship and the other type is a high speed marine vehicle (HSMV). KCS, which is a container ship, is produced in the laboratory. Other model is selected for experiments performed earlier for HSMV. It is a copyrighted form. For uncertainty analysis of KCS model is tested 12 times. On the other hand HSMV model is tested 5 times for uncertainty analysis. Uncertainties are estimated on number of the low, middle and high Froude Number for KCS. They are respectively 0.16, 0.21, 0.26. For HSMV, uncertainties are estimated on two Fr numbers. They are respectively 0.50 and 0.90.

There are too many sources of uncertainty in a test system. One by one examination is not possible. However, limited sources of uncertainty can be examined through the existing academic knowledge. In this study, the uncertainties are examined occurred in resistance towing tests. Resistance tests were made in ITU Ata Nutku Towing Tank. Two different methods (2002 and 2014 ITTC) were used and the uncertainty results were estimated.

For 0.16, 0.21, 0.26 Fr, expanded uncertainty over total resistance coefficient was found respectively % 3.86, %2.53 and %1.46 according to 2002 ITTC method. Then, according to 2014 ITTC method, this expanded uncertainty was found respectively % 3.13, % 2.10 and % 1.16. In low speed, uncertainty values are relatively high compared to the high-speed due to the resistance measurement system. But uncertainty values can be reduced by improving the current experimental conditions.

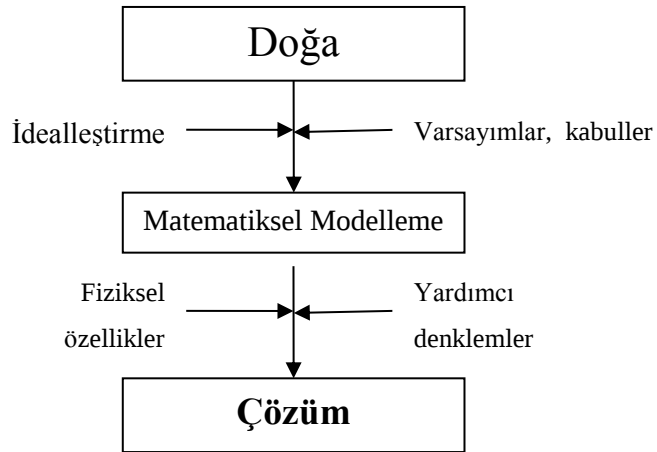
The results for the HSMV is very good, especially in 2014 ITTC method. On the other hand, in 2002 ITTC method, uncertainty of wetted surface area value was found too high because of model length was smaller than the other models. Due to speed independently of the uncertainty on the CT (about 2% for both speed) less reliability. But the results were analyzed according to the 2014 ITTC method for 0.50 and 0.90 Fr, expanded uncertainty values were found respectively %1.33 and %0.42. At design speed, low percentage uncertainty is very important and quite good results.

Uncertainty value will be reduced by improvements in the test system and towing tank conditions. However, uncertainty cannot be reset. Because each system has already uncertainties. If the uncertainty value reduces, the reliability of the results will increase. This applies to every measurement system.

Finally, the results obtained from this study were compared with other towing tank results. Results also recommend that make to compare with the computational fluid dynamics.

1. GİRİŞ

Bilimin ve teknolojinin, özellikle son yüzyılda, hızla gelişmesinde en büyük katkısı, hiç şüphesiz bilim insanlarının doğayı modelleme yollarını araştırması yapmıştır. Bir nevi doğayı taklit etme olarak ifade edilebilecek bu olay bilimin ve teknolojinin önünü açmış ve önceden imkansız olarak kabul edilen hesaplamaların, üretimlerin günümüzde çeşitli matematiksel modeller sayesinde mümkün hale getirmiştir (Şekil 1.1) [1]. Bu amacı gerçekleştirmek için sıkça başvurulan yöntem ise deneysel çalışmalardır. Son yıllarda bilgisayar programlarının bu modeller konusunda oldukça yol kat etmesine rağmen deneysel olarak olayın araştırılması ve incelenmesi günümüzde önemini hala korumaktadır. Deneysel çalışmaların en önemli dezavantajı deney ortamının oluşturulmasının ve deneyin yapılmasının hem zorluğu hem de pahalı bir yol olması, mühendisleri dizayn aşamalarını bilgisayar ortamında gerçekleştirip daha sonra istenilen dizayn koşullarını sağlayan nihai çalışmanın onaylanması maksadıyla dizayn sürecinin sonunda deneysel çalışmalara yönlendirmektedir.



Şekil 1.1:Problem çözümüne analitik yaklaşım [1].

Deney düzeneğinin planlanmasında, oluşturulmasında ve deneyin sonunda sonuçlarının analiz edilmesinde matematiksel ve fiziksel kurallar oldukça fazla kullanılmaktadır. Bu karmaşık sistem örgüsü içinde her bir deney adımı doğru

(aslında doğruya en yakın) şekilde tamamlanması gerekmektedir. Çünkü her hangi bir adımda oluşacak bir hata diğer sonuçları da etkileyeceğinden elde edilecek sonuç; ürünün, üretim ve üretim sonrasında yapılacak test aşamalarında dizayn kriterlerini sağlamamasına yola açacaktır. Bunun önüne geçebilmek için ise deney düzeneğinin her basamağında yapılan işlemlerin ve bu işlemlerden doğabilecek muhtemel hataların gerçek (gerçeğe en yakın) sonucu ne kadar etkileyeceğinin hesaplanması ihtiyacı doğmuştur. Bu soruna cevap olarak ise ölçümlerin belirsizliğini nicelik olarak belirlemek maksadıyla içerisinde hem istatistik hem de mühendislik kavramını barındıran bir bilim dalı olarak belirsizlik analizi oluşmuştur.

Gerek mevcut problemlere yaklaşım olarak oluşturulan deney düzeneklerinde gerekse mevcut ürünün üretiminde veya ürünün kalitesinin denetlenmesinde yapılan ölçümlerin belirli bir standardı olmalıdır. Bir ölçüm sonucunun raporunun oluşturulmasında sonucun gerçeğe ne kadar yakın olduğunu gösteren sayısal bir ifade olmalıdır ki bu sonucu kullanan kişi o sonucun güvenilirliğini tayin edebilsin [2]. Böyle bir gösterge olmaksızın yapılan işler kendi içinde ve mevcut sertifikalar ve standartlarla karşılaştırılması yapılamayacağından evrensel anlamda bir değer taşımamaktadır. Bu yüzden bir ölçümün veya sonucun kalitesinin belirlenmesinde hemen uygulanabilir, kolayca anlaşılabilir ve evrensel anlamda kabul gören bir şekilde düzenlenmesi ve raporlanması oldukça önemlidir. Bu da ölçüm sonundan elde edilen değer belirsizliğini yani gerçek değere ne kadar yaklaştığını tahmin etmekle mümkündür.

Bir ölçüm sonucunun belirsizliğinin hesaplanması ve ifade edilmesi için ideal bir yöntem şu özellikleri taşımalıdır [2].

- **Evrensellik:** Yöntem her çeşit ölçüme ve her ölçüm için kullanılan her çeşit veriye uygulanabilir olmalıdır.
- **Kendi içinde tutarlılık:** Ölçüm belirsizliği, belirsizliğe katkıda bulunan bileşenlerden, bileşenlerin gruplanış şekline veya alt bileşenlerine ayrılmış olmasından bağımsız olarak elde edilebilmelidir.
- **Taşıyabilirlik:** Bir ölçümün sonucunu ikinci bir ölçümde kullanmak gerektiğinde birinci ölçümün belirsizliği doğrudan bu ikinci ölçümde kullanılabilir.

Bir ölçümün yukarıda bahsedilen özellikleri taşımasına istenmesine rağmen, çevresel koşullar ve ölçme sistemlerinden kaynaklanan sebeplerden dolayı ölçüm sisteminin sonuçları üzerinde çok sayıda belirsizlik oluşacaktır. Fakat her bir belirsizlik bileşenin incelenmesi neredeyse imkansız olduğundan şu anki akademik birikim ise bunların sınırlı sayıda olanının incelenmesine olanak sağlamaktadır. Hatta hatanın kesin olarak bilinen bütün ve tahmin edilen bileşenlerinin hesaba gerekli düzeltmelerle dahil edilmesi durumunda dahi sonucun doğruluğu konusunda ihtilaflar vardır. Bu da mükemmel bir ölçme sisteminin olmayacağının, hata basamaklarının dikkatlice kontrol edilmesiyle ve belirsizlik analizi yöntemleri ile anca gerçek değere daha fazla yaklaşılabileceği sonucunu doğurmaktadır [2].

Belirsizlik analizi konusu standart, belirli bir yöntem olarak ölçümler veya sonuçlar üzerinde uygulanmayabilirler. Belirsizlik analizinde, ölçüm sistemi içerisinde yer alan belirsizlik kaynakları çeşidine ve mühendislik tecrübesi ile ortaya çıkan yöntemlerle gerçek değere en yakın şekilde doğru sonucun bulunması amaçlanır. Bu amaç doğrultusunda yapılan ölçümlerden ve kalibrasyonlardan elde edilen sonuçların içerdiği belirsizliği hesaplayabilmek için ise International Organization for Standardization (ISO)¹ tarafından hazırlanan “*Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM)*” dokümanı dünyadaki metroloji merkezlerince temel kaynak olarak kullanılmaktadır.

Gemi direnci, sakin suda gemiyi istenilen hızda çekmek için gerekli olan kuvvet olarak ifade edilebilir [7]. Gemi direnci dizayn spirali içerisinde önemli ve ilk sıralarda yer alan bir konudur. Direnç değerlerinin belirlenmesinde yapılacak hatalar geminin diğer dizayn özellikleri baskın olarak etkileyecektir. Çünkü minimum direnci veren ve istenilen özellikleri taşıyan form, hem üretim maliyetini azaltacak hem de geminin sevk performansında hissedilir iyileştirmelere neden olacaktır. Dizayn aşamalarında çeşitlik matematiksel yöntemler, bilgisayar programları ve model deneyleri ile direnç ve gün tahmini yapılabilir. Yukarıda da bahsedildiği gibi bu yöntemler kullanılarak gemi direnci gerçek sonuca en yakın şekilde tahmin edilmesi gereklidir. Bu yöntemler içerisinde gemi direncinin, model deneylerinden yola çıkarak hesaplanması uzun yıllardan beri yaygın olarak kullanılmaktadır. Model

¹Uluslararası Standartlar Teşkilatı(ISO), çeşitli teknik ve idari standartlar yayınlayan bir kuruluştur.

deneyleri kısaca, çeşitli benzerlik yöntemleri ile gerçek geminin karşıt hızdaki direnç değerlerini tahmin etmek amacıyla yapılır. Model ölçeğinde dalga direnci katsayısından yola çıkarak gemi ölçeğindeki sonuçlara geçilir. Deney sistemi içerisinde deney sonuçlarını doğru sonuçlardan uzaklaştıran belirsizlik kaynakları mevcuttur. Her ölçme de olduğu gibi bu deneylerde de ölçümü doğrudan etkileyen, etkisi tahmin edilen veya edilemeyen sayısız etmen vardır. Bu yüzden elde edilen sonucun hassasiyeti ve güvenilirliği kontrol edilmelidir. Bunun için ise deney düzeneğinde yer alan incelebilen belirsizlik kaynaklarına belirsizlik analizi uygulanır.

Belirsizlik analizi içerisinde özel bir problem olan gemi direnci, dünyada faaliyet gösteren belli başlı çekme tanklarından toplanan veriler ve standart belirsizlik analizi yöntemleri ile ITTC² tarafından direnç için özel bir prosedür geliştirilmiştir. ITTC tarafından 2002, 2008 ve 2014 yıllarında direnç deneylerinin belirsizlik analizi hakkında prosedürler yayımlanmıştır. Belirsizlik analizinde sorun aynı olmasına rağmen akademik birikim yardımıyla mevcut belirsizlik analizi yeni yaklaşımlarla sürekli güncellenmektedir. Bu duruma en güzel, 2002 ile 2008 ve 2014 yıllarında yayımlanan yöntemlerin belirsizlik kaynaklarının matematiksel olarak ifadesinde içerdiği farklılıklar verilebilir. 6. Bölümde bu farklılıklar ayrıntılı olarak incelenmiştir.

Deneyssel olarak bir olayın belirsizliğinin incelenmesi için gerekli olan deney düzeneğinin kurulmasının zor ve pahalı olduğundan bu konudaki çalışmalar incelenen problemin durumuna göre genel olarak sınırlıdır. Deneyssel olarak bir çalışmanın belirsizliğinin incelenebilmesi ve tahmini yapılan belirsizlik değerinin güvenilir olması için deney düzeneğinin çok önceden kurulmuş ve faal olarak kullanılması gereklidir. Bu çalışma için gerekli olan deneyler, Türkiye’de bu konu üzerine ilk ve tek olarak faaliyet gösteren Ata Nutku Gemi Model Deney Laboratuvarı kullanılmıştır. Deneylerde en çok üretimi yapılan gemi tipleri olan; deplasman tipi ve hızlı tekne tipi kullanılmıştır. Bu çalışmayla ülkemizde deneyssel olarak belirsizlik incelenmiş, Kriso Container Ship formunun farklı ölçekte direnç

²Uluslararası Çekme Tankları Konferansı(ITTC), gemi model deneyleri için yaklaşımlar ve yöntemler geliştiren bir kuruluştur.

değerleri literatüre kazandırılmış ve akademik, ticari projelerde faal olarak kullanılan bu laboratuvarın direnç deneylerinde ortaya çıkan belirsizliğinin nicelik olarak tahmini yapılmıştır

Bu tezde, ilk olarak belirsizlik değerlendirme analizinin temel kavramları ve belirsizliğin hesaplama yöntemlerinden bahsedilmiştir. Bir sonraki bölümde gemi direnci ve deneysel çalışmaların belirsizlik analizi üzerine durulmuştur. Son olarak, bu bilgiler doğrultusunda deplasman ve hızlı tekne tipi için yapılan direnç deneylerinde oluşan toplam belirsizlik değerinin tahmin edilmesi yer almaktadır.

2. BELİRSİZLİK DEĞERLENDİRME ANALİZİ

Deneysel çalışmaların temelinde, deney esnasında sorunun cevabına göre belirli zamanlarda ve aralıklarda ölçüm alınması vardır. Pratikte alınan ölçümlerin güvenilirliği ise sayısız etmene bağlıdır. Pek çok olası neden deneyde belirsizlik kaynağıdır [2]:

- i. Ölçülen değerin tanımında eksiklikler,
- ii. Ölçülen değerin tanımının gerçekleşmesindeki eksiklikler,
- iii. Ölçülen değeri temsil etmeyen gözlemler yapmak,
- iv. Çevre koşullarının deneye etkisinin tam olarak belirlenememesi,
- v. Analog cihazların kullanımı ve değerin okunmasında teknik personeldeki belli yöne eğilim,
- vi. Ölçüm cihazlarının üretiminden ve kullanımından dolayı oluşan hatalar,
- vii. Deneyde girdi olarak kullanılan ve deney sonunda analizde kullanılan dış kaynaklardan elde edilen sabit parametrelerin değerlerinin tam olarak bilinmemesi,
- viii. Ölçüm yöntemi veya analizinde kullanılan yaklaşımlar ve ekstrapolasyonlar,
- ix. Deney şartlarının görünürde sabit olduğu bir ortamda tekrarlanan deneylerde, ölçülen değerin farklılıklar göstermesi.

Yukarıda sıralanan ve deneyde belirsizliğe yol açan sebeplerin hepsi birbiriyle ilgilidir. Bu yüzden oluşan hata deney sürecinde diğer bir adımdaki sonucu etkileyerek zincirleme olarak hatayı artırır. Bu etmenler içerisinde kontrol edilebilen veya sonuca etkisi tahmin edilebilenler olduğu gibi fark edilemeyen veya fark edilse bile hesaplanamayan etmenler de vardır [3]. Bu yüzden deney şartlarının görünürde sabit olduğu koşulda bile oluşan hata kaynakları farklı olacağından deney sonuçları farklı çıkabilmektedir.

Yukarıda bahsedilen hata kaynaklarının sonuca etkisini tahmin etmek maksadıyla yapılan belirsizlik analizi, ölçüm parametrelerindeki ve ölçüm sonuçlarına göre hesaplanan deney sonuçlarındaki belirsizliği belirlemek için kullanılır [4]. Çeşitli yaklaşım yöntemleri ile anlamlı bir hata tahmininde bulunmasına ve ölçme

sisteminin çeşitli aşamalarında oluşan hataların sonuca etkisini incelememize olanak sağlamaktadır. Bununla birlikte ölçme ve sonuç belirsizliğini belirlemek için kullanılan bu yöntemlerin birçok avantajı vardır [4]:

- i. Hatanın başlıca kaynaklarının tanımlanması ve test sonuçları üzerindeki etkisini ve sınırlarının belirlenmesi,
- ii. Ölçüm sonuçlarının birlikte değerlendirilmesini kolaylaştırması,
- iii. Uygun ölçüm aletlerinin belirlenmesine ve prosedürün seçimine yardım etmesi,
- iv. Hatalı karar verme riskini azaltması,
- v. Değerler arasındaki bağı ve uyumu göstermesi.

Uygulamaya göre belirsizlik kaynakları sistematik veya rastlantısal olarak sınıflandırılır. Aynı zamanda uygulanacak yönetime göre de Tip A veya Tip B olarak adlandırılır [4]. Yapılan işlemler sonucunda yöntem toplam hata hakkında belli bir güven seviyesinde sayısal bir tahmin vermektedir.

2.1 Belirsizlik Analizinde Kullanılan Terimler

Belirsizlik analizinin hesaplama yöntemlerine geçmeden önce ilerleyen bölümlerde sıkça kullanılacak olan bazı kavramların açıklanmasında yarar vardır [2].

Ölçüm: Bir büyüklüğün değerinin bulunmasına yönelik işlemler dizisi.

Ölçüm metodu: Genel hatlarıyla ifade edilen ve belirli bir prensibe göre gerçekleştirilen ölçüm faaliyetleriyle ilgili olarak teorik ve uygulamalı işlemler dizisi.

Doğruluk: Ölçüm sonunu okunan değer kalibre edilmiş veya gerçek değerden sapmasıdır.

Kesinlik: Ardı ardına okunan değerlerin tekrar edilebilirliğidir. Ardı ardına alınan ölçümler neticesinde ölçümler arasındaki fark ne kadar küçük olursa sonuç o kadar kesindir. Fakat kesin olarak kabul edilen bir sonuç aynı zamanda doğru anlamına gelmez. Kesinlik sonuçların kendi içerisinde ne kadar tutarlı olduğunu gösterir.

Ölçüm hatası: Ölçüm sonucundan, ölçülen büyüklüğün gerçek değerinin çıkarılmasıyla elde edilen sonuç.

Bağıl hata: Mutlak ölçüm hatasının ölçülen büyüklüğün gerçek değerine oranı.

Rastgele hata: Aynı büyüklüğün bir dizi ölçümleri esnasında önceden tahmin edilmeyecek şekilde değişen ölçüm hatası bileşeni.

Sistematik hata: Aynı büyüklüğün bir dizi ölçümleri boyunca sabit kalan veya önceden tahmin edilebilen değişimler gösteren ölçüm hatası bileşeni.

Düzeltilme faktörü: Öngörülen sistematik hatayı telafi etmek amacıyla, ölçüme ait düzeltilmemiş sonuç ile çarpılan sayısal faktör.

Ölçüm sonuçlarının tekrarlanabilirliği: Aşağıdaki koşulların tümüne uyarak, aynı ölçülen büyüklüğe ait ardıl ölçüm sonuçları arasındaki uyuşma yakınlığıdır:

- Aynı ölçüm metodu,
- Aynı gözlemci,
- Aynı ölçme cihazı,
- Aynı konum,
- Aynı kullanım koşulları,
- Kısa zaman aralığında tekrar.

Kalibrasyon: Bilinen değerler ile ölçüm cihazının belirli bir aralıkta verdiği değerlerin incelenmesi.

Güven katsayısı: Güven aralığı veya istatistiksel olarak belirlenmiş kapsam aralığı ile ilişkili olasılık değeri

Serbestlik derecesi: Standart sapmanın hesaplanmasında kullanılan bağımsız terim sayısıdır.

Elemanter rastlantısal hata kaynağı: Toplam belirsizliği oluşturan her bir tekil rastlantısal hata kaynağıdır.

Elemanter rastlantısal hata belirsizliği: Bir elemanter rastlantısal hatanın standart sapmasının tahmin edilmesidir.

Elemanter sistematik hata kaynağı: Toplam belirsizliği oluşturan her bir tekil sistematik hata kaynağıdır.

Elemanter sistematik hata belirsizliği: Bir elemanter sistematik hatanın standart sapmasının tahmin edilmesidir.

Genişletilmiş belirsizlik: Ölçülen bir niceliğin belirlenen güven aralığında (genellikle %95 olarak belirlenir) hata limitlerini içeren aralık olarak tanımlanır.

Ortalama: N tane okuma sonucu elde edilen değerlerin aritmetik ortalamasıdır.

Varyans: Sapmanın ölçümüdür. Her bir ölçümün ortalamasından sapmasının karesinin gözlem sayısının bir eksiğine bölünmesiyle elde edilir.

Standart sapma: Varyansın pozitif kareköküdür. Elde edilen değerlerin ortalama etrafındaki dağılımı vermektedir.

Topluluk: Dikkate alınan değerlerin tümüdür.

“Student’s t”: Belirlenen güven aralığı için kullanılan t çarpanıdır.

A-tipi belirsizlik hesabı: Gözlem serilerinin belirsizlik hesaplarının istatistiksel analiz yöntemi.

B-tipi belirsizlik hesabı: Gözlem serilerinin belirsizlik hesaplarının istatistiksel olmayan analiz yöntemi.

Birleşik standart belirsizlik: Bir ölçümün çok sayıda belirsizlik sonuçlarının bir araya getirilmesiyle elde edilmiş standart toplam belirsizliktir. Belirsizlik bileşenlerinin değişimi ölçüm sonucunu nasıl etkilediği göz önüne alınarak hesaplanan varyans veya kovaryans ifadeleri toplamının pozitif kareköküne eşittir.

Sıklık: Gözlemlerin sayısı veya belli durumun meydana gelme sayısı

2.2 Ölçüm Hataları

Her ölçüm muhakkak içerisinde bir hata barındırır, sonuçlara ise gerçek değer ile ölçülen değer arasında bir fark olarak yansır. Gerçek değer bilinmediği durumlarda ise bu durum sonuca bir tahmin olarak bulunur. Toplam hatanın genel olarak iki tane bileşeni vardır. Bunlar sistematik ve rastlantısal hatadır [2]. Gerçek ölçüme en yakın sonuç bu iki hata çeşidinin minimum seviyeye indirilmesiyle elde edilebilir.

2.2.1 Rastlantısal hata

Rastlantısal hata, ϵ , toplam hatanın bir bileşeni olarak aynı şartlarda yapılan ölçümlerin ortalama etrafında sapmasını gösterir [2]. Rastlantısal hatalar, tanımlı veya tanımsız çok sayıda bağımsız küçük doğal etmenler sonucu ortaya çıkan istatistiksel bir değerdir. Rastlantısal hatayı, genel olarak ölçme sistemi, ölçme yöntemi, çevresel koşullar, veri indirgeme teknikleri vb. oluşturmaktadır. Bu yüzden görünürde aynı şartlarda yapılan her bir deney için bulunan sonuçlar farklılık gösterebilir. Bunun belirlenebilmesi ve aynı değeri okumak için deney şartları sabit tutularak çok sayıda ölçüm alınır, böylelikle, verinin ortalama değerden sapmasının dağılımı bulunarak rastlantısal hata değeri bulunur. Sapma, deney şartlarının sabit kalmamasından dolayı oluşmaktadır [2]. Bu sonuçlar ortalama değer etrafında gaussian-normal, dikdörtgen vb. dağılım gösterebilir. Gerçek sonucun bilinmediği durumlarda bu dağılımın ortalama değeri de gerçek değer olarak kabul edilir.

Sonsuz sayıda yapılan ve elde edilen ortalama değeri ($\bar{X}$), gerçek ortalama (μ) olarak kabul edilir. Böyle bir durumda rastlantısal hata aşağıdaki işlemler sonucu hesaplanır.

Tekrarlanan deneyler sonucu okunan farklı değerinin kaç kez okunduğu Gauss-Laplace normal dağılım fonksiyonuyla çok yakın bir yaklaşım olarak ifade edilebilir (2-1) [2].

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2\right]} \quad (2-1)$$

(2-1) eşitliğinde bulunan standart sapma (σ) değeri X 'in gerçek sapmasını göstermektedir. Standart sapma (σ) denklem (2-2) kullanılarak elde edilir [2,4].

$$\sigma = \left\{ \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (X_k - \mu)^2 \right\}^{1/2} \quad (2-2)$$

μ : sonsuz sayıda elde edilen değerlerin ortalamasıdır (gerçek ortalama değeri)

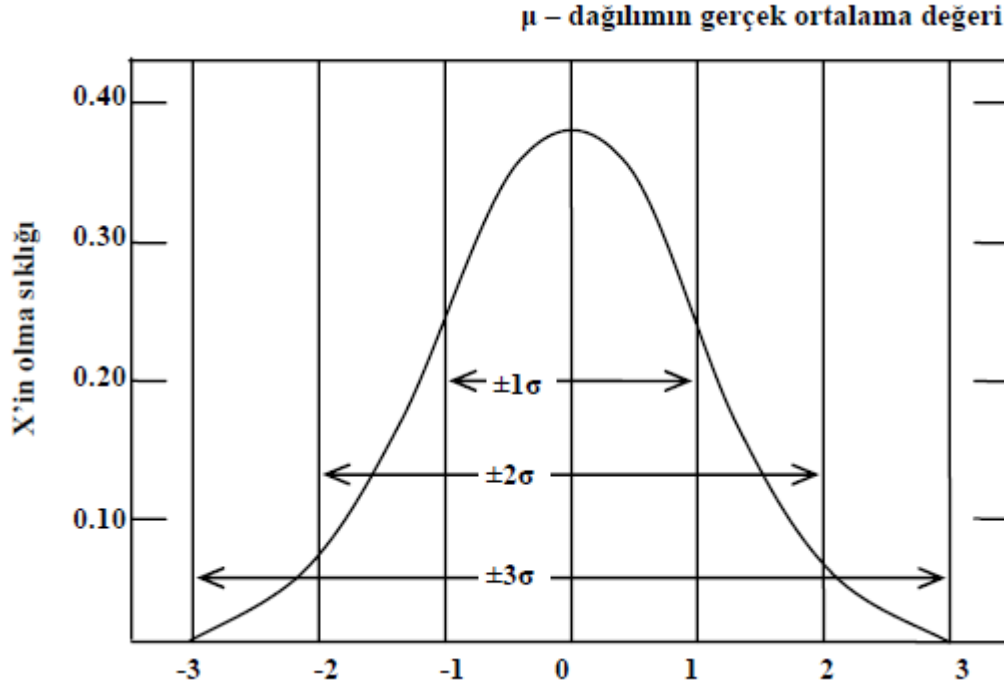
σ : ölçülen değerlerin standart sapmasıdır.

X_k : k. ölçümden edilen değerdir.

N : toplam ölçüm sayısıdır.

X 'in normal dağılımının σ değeri X değerlerinin ne kadar saçıldığının ölçüsüdür. Bir başka deyişle ε 'nin bir ölçütüdür. Aynı zamanda σ ve X aynı birime sahiptir. Sonsuz sayıda deney sonucunda alınan ortalama gerçek değeri (μ) doğru ve kesin olarak kabul edildiğinden ortalama değeri ($\bar{X}$) yerine ortalama gerçek değeri (μ) terimi kullanılmıştır [4].

Elde edilen bu değer normal dağılım grafiğinde, merkezi μ olmak üzere olası değerlerin %68.26'sının $\pm 1\sigma$ aralığında olduğu anlamına gelir. Fakat bu aralık problemlerin çözümleri için yeterli değildir. O yüzden daha büyük güvenilirliğe sahip olan aralıklar tercih edilir. Belirsizlik değeri seçilen güvenilirlik seviyesine göre değişmektedir. Örneğin aralık olarak $\pm 2\sigma$ seçilirse, bu değerlerin %95.46'sının belirlenen aralık içerisinde yer alacağını gösterir. Eğer aralık $\pm 3\sigma$ seçilirse de değerlerin %99.73'nün belirlenen aralık içerisinde yer alır (Şekil2.1). Elde edilen bu değer daha sonra gerçek ortalama değerine ek olarak bizim istediğimiz güvenilirlik seviyesine göre eklenir ve çıkartılır ($X \pm 2\sigma$ % 95.46 güvenilirlikle) [2,4]. Pratikte ise bu gruba dahil olan deney veya ölçüm sınırlıdır. Bu yüzden tek veya sonlu sayıda yapılan ölçümler için farklı bir yaklaşım kullanılmaktadır. Bu yaklaşıma Bölüm 2.3.1 'de ayrıntılı olarak değinilecektir.



Şekil 2.1: Normal dağılımın güvenilirlik çarpanına göre dağılımı [6].

2.2.2 Sistematik hata

Sistematik hata genel olarak aynı büyüklüğün bir dizi ölçümleri boyunca sabit kalan veya önceden tahmin edilen değişimleri gösteren ölçüm belirsizliği olarak ifade edilir [2,6]. Rastlantısal belirsizlikler veriyi ortalama değer etrafında sapmalar olarak etkilerken, sistematik belirsizlikler veriyi her zaman belli bir yönde ve miktarda değiştirirler. Deney boyunca sabit kabul edilir [4]. Sistematik hatalar (sabit hata) terminolojide eğilim (“bias”) olarak adlandırılır [2]. Sistematik hata niceliği olan eğilim (β) bir ölçüm içerisinde biliniyorsa, bu değer ölçülen değerlere eklenen veya çıkartılan bir düzeltme faktörü olarak kullanılır. Sistematik hatanın sıfır olması yani gerçek ortalama değer (μ) ile gerçek değer ($\bar{X}$) arasında hiç fark olmamasıdır. Fakat pratikte ise sıfır eğilimli bir ölçüm yok çok ender bir durumdur. O yüzden ölçümlerde bu belirsizlik bileşeni dikkate alınmalıdır. Bu belirsizlik bileşeni değişik yöntemlerle azaltılabilir. Örneğin ölçüm cihazlarının kalibrasyonu yenilenerek ölçüm sırasında cihazın gerçeğe daha yakın sonuç vermesi sağlanabilir. Fakat bu durumda dahi sistematik hata bileşenini ortadan kaldırmak mümkün olmadığından kalibrasyon sayesinde bu değer azaltılarak sabit olarak sonuca etkisi devam edecektir. Genel olarak toplam sistematik hata bileşeni aşağıdaki adımlar izlenir [4].

1. **Tekil sistematik belirsizliklerin belirlenmesi:** Ölçme sistemi içerisindeki tekil hata, belirsizlik analizinin belirlenmesi önemli bir adımdır. Çünkü gözden kaçırılan veya dikkate alınmayan bir hata kaynağı sonuçlara tahmin edilmeyen bir şekilde yansıyacağından sonuçları gerçek değerden uzaklaştıracaktır.
2. **Tekil hata belirsizliklerin hesaplanması:** Bütün sistematik kaynakları belirlendikten sonra yapılacak olan bu belirsizlik kaynaklarının matematiksel olarak hesaplanmasıdır. Her bir tekil belirsizlik kaynağının topluluk içerisindeki dağılımı standart sapma olarak belirlenmelidir. Bu değerlerin belirlenmesinde mühendislik tecrübesi ve yorumu, basılı kaynaklar veya özel veriler kullanılarak bu hata kaynakları değeri belirlenebilir.
3. **Mühendislik yorumu:** Basılı yayınlardan, kaynaklardan veya özel verilerden yola çıkarak yöntemler geliştirilmesine rağmen ölçme esnasında sıkça başvurulmuş yollardan biri de mühendislik tecrübesi ve yorumudur. Ölçme yapan kişi, deney sisteminin kurulumunda, ölçüm esnasında muhtemel hata kaynaklarını azaltacak etki yapacaktır. Aynı zamanda sonuçları tutarlılığını inceleyerek deney takımları arasındaki uyumu gözlemleyebilir, aksi durumla karşılaştığından sürece müdahale ederek hem sistematik hem rastlantısal hata değerlerini azaltıcı hamlelerde bulunabilir. İlave olarak hata dağılımının çeşidini (normal, dikdörtgen vb.) belirleyerek ona göre güvenilirlik aralığı ve değeri seçilmesini sağlar.
4. **Özel veriler kullanılması:** Bazı özel tekil sistematik hata değerlerinin hesaplanmasında özel veriler kullanılması gerekebilir. Bu özel veriler laboratuvar içi yapılmış test sonuçları, denenmiş yöntemler ve elde edilen sonuçların gerçekliği kabul edilen değerler gibi sonuçlardan oluşmaktadır. Birbirinden bağımsız şekilde aynı parametreler ve deney düzeneği kullanılarak bulunan sonuçlara göre yeni deney düzeneği oluşturulur. Böylelikle karşılaştırma sayesinde sonucun gerçeğe yakın olması sağlanır. Aynı zamanda kullanılan cihazların standart kalibrasyon değerleri dikkate alınarak cihazların kalibrasyonu yapılır ve karşılaştırma ile sistematik hata belirlenir.
5. **Toplam sistematik hataların hesaplanması:** Hesaplanan bütün sistematik hata değerleri bir araya getirilerek bileşik standart sistematik belirsizlik değeri

hesaplanır (Bölüm 2.3.2). Bileşik standart sistematik belirsizliğe katkı yapan bileşenler incelendiğinde bazı bileşenlerinin belirsizliğe daha çok katkı yaptığı görülür. Belirlenen bu bileşenlerden başlamak üzere hata azaltıcı tedbirlerle sonuçlar kontrol edilebilir. Sonuçlar üzerinde hata oluşturan belirsizlik kaynaklarının, toplam sonucu hangi oranda etkilediğinin tahmin edilebilmesi, genişletilmiş belirsizlik değerinin bir bileşeni olan sistematik belirsizlik konusu için önemli bir özelliktir.

2.3 Ölçüm Belirsizliği

2.3.1 Rastlantısal belirsizliğin hesaplanması

Mühendislikte sistematik hatalar ortadan kaldırılabilirse, geriye kalan diğer hataların rastlantısal hata (kesinlik) olduğu kabul edilir [2]. Böylelikle, rastlantısal hataların istatistiksel olarak incelenerek nicelik değerinin bulunması kolaylaşır.

Sonsuz sayıda yapılan ve ortalama değerin gerçek ortalama değer olarak kabul edilen ölçümlerin rastlantısal hatasının hesaplama yöntemi, Bölüm 2.2.1 'de anlatılmıştır. Bu kısımda mühendislik hesaplarında daha çok kullanılan, tekli veya az sayıda yapılan ölçümler için rastlantısal belirsizlik tahmininin hesaplanma yöntemleri anlatılmıştır.

N adet ölçüm neticesinde elde edilen sonuçların, ortalama değerinin ($\bar{X}$) yardımıyla hesaplanan standart sapma değeri (s_X) rastlantısal belirsizliğin niceliğidir. Bu yöntem A-tipi belirsizlik tahminidir.

Tek veya sonlu sayılarda yapılan ölçümlerde topluluğun gerçek ortalama değeri ve topluluğun gerçek σ değeri bilinemez ancak istatistiksel yöntemlerle tahmin edilebilir [2,6]. Ortalama değer, $\bar{X}$, eşitlik (2-3) yardımıyla hesaplanır ve sonsuz sayıda yapılan ölçümlerin standart sapma belirlemek için kullanılan μ değeri yerine kullanılır. Ölçümün serbestlik derecesi yapılan ölçüm sayısıdır. Az sayılı ölçümlerde μ yerine $\bar{X}$ alındığından meydana gelebilecek negatif eğilimleri ortadan kaldırabilmek için farklar oluşturulurken N yerine N-1 alınarak standart sapma (s) bulunur (2-4) [4].

$$\bar{X} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N X_k \quad (2-3)$$

$$s = \left\{ \frac{1}{N-1} \sum_{k=1}^N (X_k - \bar{X})^2 \right\}^{1/2} \quad (2-4)$$

Az sayıda yapılan ölçümlerden elde edilen s değeri yaklaşık değerdir. Bu yüzden sonsuz sayıda yapılan ölçümlerden elde edilen σ 'ya eşit değildir. Gerçek standart sapma (σ) değeri bu ölçümler sonucunda elde edilemediğinden, güvenilirlik aralığı genişleyecektir. Ortalama standart sapma değerinin istenilen güvenilirlik aralığında ortalama değere yansıtılabilmesi için serbestlik derecesi kullanılarak şekil 2.2'de yer alan "Student's" istatistiğinden faydalanılır (2-5). İstenilen güvenilirlik aralığına göre Şekil 2.2 kullanılarak elde edilen t değeri standart sapma (s) ile çarpılarak ortalama değere eklenir ve çıkartılır (2-6).

$$v = N - 1 \quad (2-5)$$

$$\bar{X} \pm t_{v,p} * s \text{ (istenilen } p \text{ olasılığıyla)} \quad (2-6)$$

Eğer deney şartları sabit tutularak deneyin N defa tekrarlanması durumunda elde edilen sonuçların standart sapması eşitlik (2-7) gibi hesaplanır. Normal dağılımlı bir ölçüm topluluğu için ölçüm sayısının $N > 30$ olduğu durumlarda, $\bar{X} \pm s_{\bar{X}}$ aralığı sonuçların %68'ini kapsamaktadır [4]. "Student's" grafiğine göre güvenirliliği katsayısı 2 (grafikte 1,96 olarak bulunur ama işlemlerde genel olarak 2 olarak kabul edilir.) olması durumunda $\bar{X} \pm 2s_{\bar{X}}$ değeri sonuçların yaklaşık %95'ini içerdiği kabul edilmektedir [4].

$$s_{\bar{X}} = \frac{s_X}{\sqrt{N}} \quad (2-7)$$

Genel olarak, ölçüm sayısı artıka ortalama sonuçların gerçek ortalamaya, ortalama standart sapma değerinin de (s) gerçek standart sapma değerine (σ) yaklaşmasını sağlayacaktır. Bu durumda elde edilen sonucun rastlantısal hata değerinin düşmesini sağlayacaktır. Mevcut ölçüm sonuçlarının standart sapma değerleri ile belirlenen standart sapma değerinden başka rastlantısal hatayı hesaplayan yöntemler de mevcuttur [2]. Fakat mevcut çalışmada bu yöntemler kullanılmayacağı için ayrıntılı olarak anlatılmamıştır.

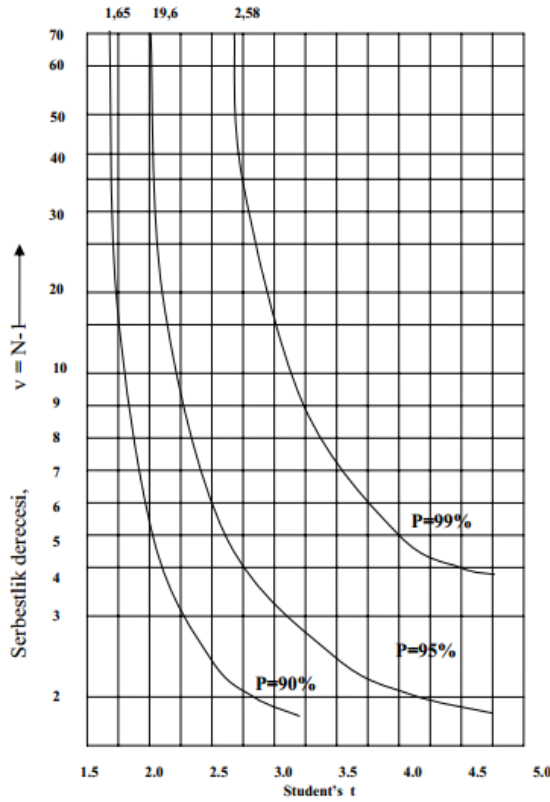
Bu yöntemlerden bir tanesi tekil rastlantısal hata kaynaklarının ($s_{\bar{X}_k}$) ayrı ayrı standart sapmasının hesaplanıp daha sonra bir araya getirilerek toplam rastlantısal hata değeri ($s_{\bar{X}}$) elde edilir (2-8) [2].

$$s_{\bar{X}} = \frac{1}{\sqrt{N}} \left\{ \sum_{k=1}^K (s_{\bar{X}_k})^2 \right\}^{1/2} \quad (2-8)$$

Diğer bir yöntem ise, eğer kullanılacak ölçüm sonuçları yok ise rastlantısal belirsizlik değeri, B-Tipi Belirsizlik analizi yöntemi yardımıyla, yapılmış olan çalışmalarda dağılımı ve mühendislik yorumu kullanılarak tahmin edilmesidir [2].

2.3.2 Sistematik hatanın hesaplanması

Gerçek sistematik hataların (β) değerleri bilinmeyen niceliklerdir. Anca muhtemel β değerlerinin dağılımı dikkate alınarak standart sapmalarının tahmin edilmesiyle yaklaşık bir sistematik hata ($b_{\bar{x}}$) değeri hesaplanabilir (2-9). Toplam sistematik hata ($b_{\bar{x}}$), tekil sistematik hataların kareleri toplamının karekökü (RSS) olarak hesaplanır [4].



Şekil 2.2:Güvenilirlik katsayısının bulunduğu "Student's" grafiği [6].

$$b_{\bar{x}} = \left\{ \sum_{k=1}^K (b_{\bar{x}_k})^2 \right\}^{1/2} \quad (2-9)$$

Denklem (2-9)'de verilen

K değeri, sistematik hata bileşenlerinin toplam sayısıdır.

$b_{\bar{x}_k}$ değeri ise tekil sistematik hata kaynağının tahmini standart sapmasıdır.

Bir ölçüm esnasında sistematik hatayı oluşturan birçok etken vardır. Bu etkenler; kalibrasyon hataları, ölçüm cihazından kaynaklanan hatalar, sensor hataları,

yöntemden kaynaklanan hatalar olarak adlandırabilir. Buna ilave olarak çevresel koşullarda (sıcaklık, basınç vb.) sistematik hataya katkı yapabilir. Sistematik hata kaynakları içerisinde sahip olduğu hata değeri incelenerek toplam hataya ne kadar katkı yaptığı anlaşılabilir. Böylelikle baskın olan hatalar kontrol edilerek hata değeri düşürülebilir [4,5].

2.3.3 Bileşik ve genişletilmiş standart belirsizliğin hesaplanması

Genişletilmiş belirsizlik, sistematik ve rastlantısal hatanın bir arada hesaplanmasıyla tek bir değer olarak ve işlemi yapan kişi tarafından belirlenen güven aralığı içerisinde ortalama değere eklenip çıkartılarak ifade edilir (2-10) [4].

$$\bar{X} \pm U_{\bar{X}} \quad (2-10)$$

Bileşik standart belirsizlik ($u_{\bar{X}}$) ise, genel olarak, toplam sistematik ($b_{\bar{X}}$) ve rastlantısal belirsizliklerin ($s_{\bar{X}}$) karelerinin toplamının karekökü olarak hesaplanır (2-11) [4].

$$u_{\bar{X}} = \sqrt{(b_{\bar{X}})^2 + (s_{\bar{X}})^2} \quad (2-11)$$

Tahmin edilen bileşik belirsizlik değerini özel bir güven aralığında ifade etmek için, bileşik standart belirsizlik değeri ($u_{\bar{X}}$) kapsam faktörü (t) ile çarpılarak elde edilen genişletilmiş belirsizlik değeri ($U_{\bar{X}}$) ortalama değere eklenip çıkartılmalıdır (2-12). Kapsam faktörü değeri Şekil 2.2’de yer alan “Student’s” grafiğinden bulunabilir [4].

$$U_{\bar{X}} = t \cdot u_{\bar{X}} \quad (2-12)$$

Serbestlik derecesi yüksek olan ölçümlerde t değeri, 1.96 (genellikle 2 alınır) alınmasıyla belirlenen aralığın içerisine sonuçların yaklaşık olarak % 95’ini içermesi anlamına gelmektedir. Çoğu mühendislik uygulamasında kapsam faktörü 2 alınmaktadır (2-13) [4].

$$U_{\bar{X}} = 2u_{\bar{X}} \quad (2-13)$$

2.4 Sonuç Belirsizliği

Sonuçların, genellikle doğrudan ölçüm sonucu olarak elde edilmesi mümkün değildir. Sonuç fonksiyonu birden fazla ölçülecek farklı ölçümlere ve dışarıdan bazı parametrelere ve katsayılar (sıcaklık ve basınç vb.)bağlı olarak elde edilir [4].Birbirinden bağımsız şekilde fonksiyonda yer alan bu parametreler sistem

üzerinde ayrı belirsizlikler oluşturur. Bu belirsizliği tahmin etmek için denklem içerisinde bulunan her bağımsız değişkenden kaynaklanan hatanın hesaplanarak sonuca taşınması gerekir [4]. Sonuç fonksiyonu (R) içerisinde birbirinden bağımsız parametrelerin (X_i) bir araya gelmesiyle oluşur ve sonuç ve girdi parametreleri arasında,

$$R = f(\bar{X}_1, \bar{X}_2, \dots, \bar{X}_I) \quad (2-14)$$

şeklinde bir ilişki vardır.

Eşitlik (2-14) içerisinde alt indis olarak bulunan I , sonuç denkleminin (R) kaç adet bağımsız parametreye bağlı olduğunu gösterir. Bu nicelikler, ölçümler sayesinde değerleri ve belirsizlikleri belirlenebilen parametrelerdir [4]. Elde edilen değerler gerekli görüldüğü durumda düzeltmeler içerebilirler. Bağımsız parametrelerin ortalama değeri eşitlik (2-15)'deki gibi hesaplanabilir.

$$\bar{X}_i = \frac{1}{N_i} \sum_{k=1}^{N_i} X_{i_k} \quad (2-15)$$

(2-15) eşitliğinde N_i tekrarlanan ölçüm sayısıdır. Bir tane yapılmış ölçümler için $N_i = 1$ olacaktır.

2.4.1 Duyarlılık

Duyarlılık, sonuç fonksiyonu içerisinde yer alan parametrenin birim değişiminin, tahmini yapılan değerin yani sonucu ne kadar etkileyeceğini gösteren bir katsayıdır. Duyarlılık katsayılarını tahmini olarak belirlemek için iki yaklaşım mevcuttur [2,4].

2.4.1.1 Analitik hesap

Sonuç fonksiyonu içerisinde yer alan parametrelerin sonuç ile olan ilişkisi bilindiği durumlarda duyarlılık katsayıları kısmi türev yardımıyla hesaplanır [4].

Sonuç fonksiyonu; $R = f(\bar{X}_1, \bar{X}_2, \dots, \bar{X}_I)$ olsun. Duyarlılık katsayısı ise mutlak olarak eşitlik (2-16)'deki gibi ifade edilir.

$$\theta_i = \partial R / \partial \bar{X}_i \quad (2-16)$$

Duyarlılık katsayısı bağıl olarak (birimsiz) ise eşitlik (2-17)'deki gibi ifade edilir.

$$\hat{\theta}_i = \frac{\partial R}{R} / \frac{\partial \bar{X}_i}{\bar{X}_i} = \frac{\bar{X}_i}{R} \left(\frac{\partial R}{\partial \bar{X}_i} \right) \quad (2-17)$$

Genelde böyle katsayıların mutlak olarak ifade edilmesi daha kolay olduğu için bileşik belirsizlik değeri sık sık kontrol edilebilir.

2.4.1.2 Sayısal hesap

Girdi büyüklükleri ve ölçülecek büyüklük arasındaki f fonksiyonu kullanmadan deneysel olarak belirlenir (2-19). Bu yöntem kullanıldığında $\bar{X}_i$ 'nin değerini değiştirerek R 'deki değişim kaydedilir (2-18). Bu işlem yapılırken diğer $\bar{X}_i$, değerleri sabit tutulur. Aslında burada elde edilen değer Taylor seri açılımının birinci dereceli bileşenleridir [4].

$$\theta_i = \frac{\Delta R}{\Delta \bar{X}_i} \quad (2-18)$$

Bağıl olarak ise eşitlik (2-19)'deki gibi hesaplanır.

$$\theta_i = \frac{\frac{\Delta R}{\Delta \bar{X}_i}}{\frac{\Delta \bar{X}_i}{\bar{X}_i}} = \frac{\bar{X}_i}{R} \left(\frac{\Delta R}{\Delta \bar{X}_i} \right) \quad (2-19)$$

Yukarıda anlatılan iki çeşit yöntemden duyarlılık katsayısının analitik olarak hesaplanması, duyarlılığın belirlenmesinde daha iyidir.

2.4.2 Sonucun rastlantısal belirsizliğinin değeri

2.4.2.1 Tek ölçüm

Bir test olarak yapılmış elde edilmiş sonucun rastlantısal hatası mutlak duyarlılık katsayısı kullanılarak eşitlik (2-20)'de, bağıl duyarlılık katsayısı kullanılarak da (2-21)'de anlatılmıştır [4].

$$s_R = \left\{ \sum_{i=1}^I (\theta_i s_{\bar{X}_i})^2 \right\}^{1/2} \quad (2-20)$$

$$\frac{s_R}{R} = \left\{ \sum_{i=1}^I \left(\theta_i \frac{s_{\bar{X}_i}}{\bar{X}_i} \right)^2 \right\}^{1/2} \quad (2-21)$$

Mutlak (θ_i) ve bağıl (θ_i) duyarlılık katsayıları yardımıyla, rastlantısal hata, ortalama değer yardımıyla sırasıyla eşitlik (2-20) ve (2-21) yardımıyla tahmin edilebilir.

2.4.2.2 Çok sayıda tekrarlanan ölçümler

Ölçüm aynı şartlar altında birden fazla tekrarlanırsa, sonucun rastlantısal belirsizliği test sayısı ile ilintili bir şekilde düşecektir. Fakat sistematik hata bir adet yapılmış ölçümde bulunan değer sabit kalacaktır [2].

Birden fazla ölçüm sonucu elde edilmiş sonuçların ortalaması (2-22)'deki gibi hesaplanır.

$$\bar{R} = \frac{1}{M} (\sum_{m=1}^M R_m) \quad (2-22)$$

M: mevcut test sayısıdır.

$\bar{R}$: ölçüm ortalamasının değeridir.

R_m : m. ölçüm değeridir.

Eşitlik (2-4)'deki gibi sonuçların dağılımının standart sapmasını tahmin etmek için eşitlik (2-23) kullanılır.

$$s_R = \left\{ \frac{1}{M-1} \sum_{m=1}^M (R_m - \bar{R})^2 \right\}^{1/2} \quad (2-23)$$

s_R değeri, testler içinde ve testler arasındaki rastlantısal hataların niceliğidir. Sonucun rastlantısal belirsizliği ise, doğrudan standart sapma değerinin ortalaması olarak elde edilir (2-24). Elde edilen bu rastlantısal belirsizlik değerinin serbestlik derecesi $\nu = M - 1$ yardımıyla belirlenir [2,4,5].

$$s_{\bar{R}} = s_R / \sqrt{M} \quad (2-24)$$

2.4.3 Sonucun sistematik belirsizliğinin değeri

Sonuca ait mutlak ve bağıl sistematik belirsizlik değeri sırasıyla eşitlik (2-25) ve (2-26) yardımıyla tahminen hesaplanır.

$$b_R = \left\{ \sum_{i=1}^I (\theta_i b_{\bar{X}_i})^2 \right\}^{1/2} \quad (2-25)$$

$$\frac{b_R}{R} = \left\{ \sum_{i=1}^I \left(\hat{\theta}_i \frac{b_{\bar{X}_i}}{\bar{X}_i} \right)^2 \right\}^{1/2} \quad (2-26)$$

Eşitlik (2-25) ve (2-26), sonucun sistematik belirsizlik değeri, sonuç fonksiyonu içerisindeki parametrelerin birbirinden bağımsız olduğu durumlar için kullanılırlar [4].

2.4.4 Sonucun bileşik ve genişletilmiş standart belirsizlik değeri

Bileşik standart belirsizlik, nicelik olarak çeşitli yöntemler mevcut olmasına rağmen genel olarak sistematik ve rastlantısal belirsizliğin karelerinin toplamının karekökü (RSS) şeklinde hesaplanmaktadır (2-27) [4].

$$u_R = \sqrt{(b_R)^2 + (s_R)^2} \quad (2-27)$$

Eşitlik (2-25) yardımıyla b_R değeri, tek ölçüm için eşitlik (2-20), çok sayıda yapılmış ölçümler için eşitlik (2-24) kullanılarak s_R değeri elde edilir.

Bulunan bileşik belirsizlik değerini, güvenli bir aralıkta verebilmek için “Student’s” grafiğinden yardım alınarak kapsam faktörü (t) değeri belirlenir [2,4,6]. Mühendislik çalışmalarının çoğunda yeterli bir aralık sağlayan ve terimlerin %95’ini içerisinde barındıran $t=2$ kullanılır (2-28b).

$$u_{R,t} = t \cdot u_R \text{ (istenilen } t \text{ olasılıkla)} \quad (2-28a)$$

$$u_{R,95} = 2u_R \text{ (yaklaşık \%95 olasılıkla)} \quad (2-28b)$$

Genişletilmiş belirsizlik değeri tahmin edildikten ölçümler neticesinde bulduğumuz sonuç, nihai olarak eşitlik (2-29)’daki gibi gösterilir.

$$\bar{X} \pm U_{R,95} \quad (2-29)$$

Bazı özel dağılımlar normal dağılım olarak değil dikdörtgen, üçgen dağılım olarak gösterilebilir. Bununla birlikte sapmalar simetrik olarak dağılım da göstermeyebilir. Böyle durumlarda belirsizlik analizi yapmak için alternatif yöntemler, farklı güvenilirlik katsayısı vb. kullanılabilir [4]. Söz konusu bu çalışmada bu gibi durumlarla fazla karşılaşmadığı için o konulara değinilmeyecektir.

3. GEMİ DİRENCİ

3.1 Gemi Direncine Giriş

Gemi direnci, sakin suda gemiyi istenen hızda çekmek için gerekli olan kuvvettir [7]. Gemi mühendisi ise hidrodinamik açıdan su yüzeyinde veya altında ilerleyen bir cismin (geminin veya denizaltının) dizayn spiralinde yer alan yüzme şartı, stabilite, denizcilik, sevk verimi, manevra gibi özelliklerinin yanında direnç faktörüne de dikkat etmelidir [11]. Oluşturulan formun minimum direnç vermesi dizayn spiralinde yer alan diğer öğelerinde hem maliyeti azaltıcı hem de gemini sevk performansını iyileştirici etki yapacaktır. Günümüzde tek başına ana makine maliyeti, yaklaşık olarak toplam maliyetin %25'ini oluşturduğu düşünülürse direnç faktörünün ne kadar önemli olduğu görülebilir. O yüzden geminin dizayn aşamasında seçilecek olan ana makine ile öngörülen hızı yapabilmesi için toplam direnç değerinin doğru bir şekilde belirlenmesi gerekir.

Dizayn aşamasında çeşitli matematiksel yöntemler, çeşitli bilgisayar programları ve model deneyleri ile bir direnç ve güç tahmini yapılabilir. Bu yöntemler içerisinde en güvenilir olanlardan biri, model deneylerinden hareketle bulunan direnç değeridir [7,11]. Günümüzde artık bilgisayar ortamında bulunan sonuçlardan yola çıkarak belirlenen nihai form belirlenmekte ve model deneyi yapılarak sonuçların kıyaslanarak sonuçların güvenilirliği artırılır.

Geminin hareketi doğrultusunda ve zıt yönde oluşan gemi direnci bileşeni en genel halinde ikiye ayrılarak incelenir [7-10].

- i. Viskoz direnç,
- ii. Dalga direnci.

Viskoz direnç, suyun viskozitesinden dolayı oluşan enerji kayıplarını temsil eder. Geminin formundan dolayı hareket esnasında oluşan kesme gerilmeleri ve çeşitli girdap durumlarından dolayı oluşan kayıpları içermektedir. Dalga direnci ise, gemi etrafındaki dalga sistemini oluşturan kayıpları temsil eder. Bunlara ilave olarak çeşitli ek direnç bileşenleri de mevcuttur [7].

- **Dalga kırılma direnci:** Özellikle gemi baş dalgasının kırılmasına harcanan enerjiyi temsil eden direnç bileşenidir.
- **Takıntı direnci:** Şaft, şaft braket, yalpa omurgası, vs. gibi çıplak tekne üzerine takılan takıntılardan dolayı oluşan direnç bileşenidir.
- **Pürüzlülük direnci:** Form üzerine korozyon ve boyadan kaynaklanan pürüzlülüğünden dolayı oluşan direnç bileşenidir.
- **Hava direnci:** Gemi su üstü formunun maruz kaldığı direnç bileşenidir.
- **Rota tutma direnci:** Geminin belirlenen rota üzerinde kalabilmesi için harcanan ilave kuvvet ve dolayısıyla ek dirençtir.
- **Karışık veya düzenli dalga direnci:** Dalgalardan dolayı oluşan gemi hareketlerinin sebep olduğu dirençtir.

Boyut analizi, akışkanlar mekaniğinde fiziksel bir olguyu detaylara girmeden fiziksel olarak modellemek için kullanılan çok önemli bir matematiksel yöntemdir [12,13]. Bu fikirle yola çıkarak geminin toplam direnci, R_T ,

$$R_T = f(\rho, \mu, V, L, g) \quad (3-1)$$

olmak üzere suyun yoğunluğuna (ρ , kg/m³), suyun dinamik viskozitesine (μ , kg/m/s), geminin hızına (V , m/s), geminin boyuna (L , m) ve yerçekimine (g) bağlı olsun. (3-1)'de verilen fonksiyondan yola çıkarak toplam direnç değeri eşitlik (3-2) şeklinde yazılabilir [7].

$$R_T \propto \rho^a, \mu^b, V^c, L^d, g^e \quad (3-2)$$

Denkleminde bulunan parametrelerin birimlerinden yola çıkarak M (kg) kütle, T (s) zaman, L (m) uzunluk gibi temel boyutlarla ifade edildiğinde, 5 bilinmeyenli 3 lineer denklem sistemi ortaya çıkar ve bu denklem sistemi aynı boyutların üstel eşitliği sağlanarak çözülür. Böylelikle elde edilen toplam direnç katsayısı eşitlik (3-3) yardımıyla bulunabilir.

$$R_T \propto \rho V^2 L^2 f \left[\left(\frac{\rho V L}{\mu} \right)^{-d}, \left(\frac{V^2}{g L} \right)^{-e} \right] \quad (3-3)$$

(3-3) denkleminde toplam direnç değeri boyutsuzlaştırılırsa eşitlik (3-4) elde edilir.

$$C_T = \frac{R_T}{0.5 \rho V^2 S} = f(Fr, Rn) \quad (3-4)$$

Eşitlik (3-4)'de yer alan $Rn = VL/\gamma$ (Reynolds sayısı), $Fn = \frac{V}{\sqrt{gL}}$ (Froude sayısı), ρ yoğunluk, V cismin hızı, S ise geminin ıslak alanıdır. Eşitlik (3-4)'ten yola çıkarak ulaşılabilecek en önemli sonuç; geometrik olarak benzer iki geminin (model-gemi, model-model (farklı ölçek), gemi-gemi (farklı ölçek) vs.) Rn ve Fr sayıları birbirine eşitse, bilinmeyen f fonksiyonu aynı olduğundan, iki geometrik benzer sistemin etrafındaki akım karakteristikleri de aynı olacaktır [7]. Kısaca iki sistemde eşit C_T değerine sahip olacaktır.

3.1.1 Dinamik benzerlik

Mevcut iki sistemin karşıt uzunluklar oranı sabit ise, bu iki sistem birbirine geometrik olarak benzerdir [7]. Geometrik olarak benzer iki sistem üzerine gelen karşıt kuvvetler oranı eşit olduğu durumlarda ise sistem dinamik olarak benzerdir. Bir denizaltı düşünülürse, yeterli derinlikte deniz altı su yüzeyinde dalga sistemi oluşturmayaacağı için denizaltının dalga direnci bileşeni sıfır olacak ve toplam direnç sadece viskoz direnç bileşenine eşit olacaktır. Bu durum göz önüne alındığında geometrik olarak benzer sistemler eşit Rn sayılarında çekilirse iki sistem dinamik olarak da benzer olacaktır [7]. Çünkü Rn sayılarının eşitliği iki sistemdeki viskoz kuvvetlerin atalet kuvvetlerine olan oranını sabit tutar. Atalet (eylemsizlik) kuvveti, kütle ile ivmenin çarpımı ile orantılıdır. Viskoz kuvvet ise viskoz kesme gerilmesi ile elemanter alanın çarpımına orantılıdır.

$$Atalet kuvveti \propto \rho L^3 \times \frac{L}{T^2} = \rho L^4 T^{-2} = \rho V^2 L^2 \quad (3-5)$$

$$Viskoz kuvvet \propto \mu \times \text{hız gradyeni} \times L^2 \quad (3-6)$$

Atalet kuvvetinin (3-5) viskoz kuvvete (3-6) oranı incelendiğinde sonucun Rn sayısı ile orantılı olduğu görülebilir (3-7).

$$\frac{Atalet kuvveti}{Viskoz kuvvet} \propto \frac{\rho V^2 L^2}{\mu VL} = \frac{VL}{\delta} = Rn \quad (3-7)$$

Benzer olarak, atalet kuvveti, yerçekimi kuvveti ile oranlanırsa, Froude sayısı bulunabilir (3-8).

$$\frac{Atalet kuvveti}{Yerçekim kuvveti} \propto \frac{\rho V^2 L^2}{\rho L^3 g} \propto \frac{V}{\sqrt{gL}} = Fn \quad (3-8)$$

Böylece, gemi direnci fonksiyonun (3-4) bileşenlerini oluşturan Rn ve Fr boyutsuz katsayıları elde edilmiş olur.

3.1.2 Model-gemi ilişkisi

Geometrik olarak benzer sistemlerin dinamik olarak da benzerliği sağlandığında sistemlerin benzer davranış göstereceği ve aynı C_T değerini vereceği belirtilmiş idi. Dinamik olarak ise R_n benzerliği sağlandığında gemi ve model aynı akışkan içerisinde yüzeceğinden $\delta_S = \delta_M$ olur [7]. Buradan yola çıkarak hızlar eşitlik (3-9)'deki gibi olur.

$$V_M = \alpha V_S \quad (3-9)$$

Eşitlik (3-9)'de yer alan $\alpha = L_S/L_M$ ölçek oranıdır. M indisi modeli, S indisi ise gerçek gemi veya denizaltıyı temsil etmektedir.

Froude benzerliği sağlandığında ise iki sistemin karşılıklı hızları,

$$V_M = V_S/\sqrt{\alpha} \quad (3-10)$$

şeklinde yazılabilir.

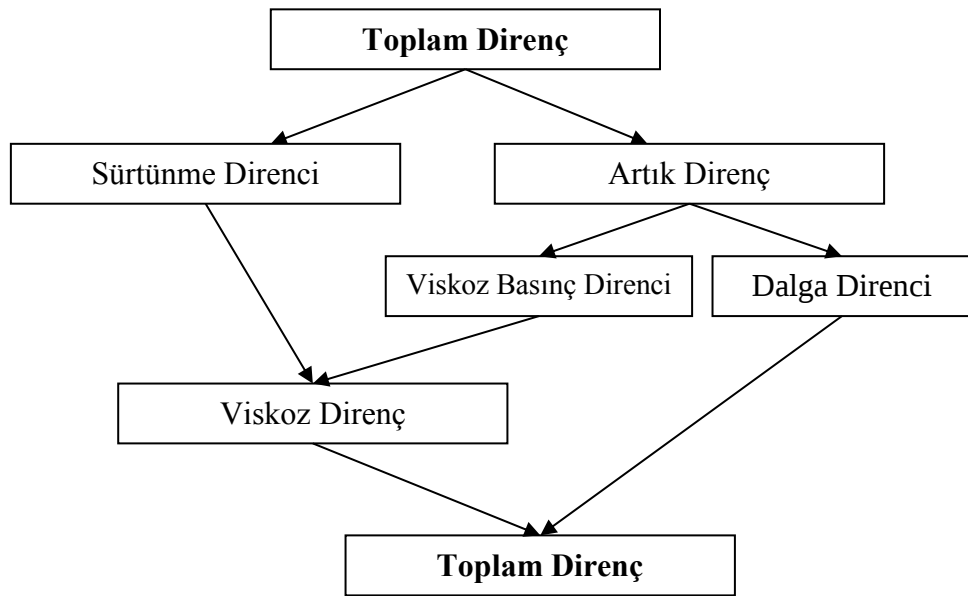
Burada dikkat edilmesi gereken önemli bir husus vardır. Toplam direnç katsayısı hem R_n sayısına hem de Fr sayısına bağlıdır. Fakat sistemler içerisinde hem R_n hem de Fr benzerliğini aynı anda sağlamak için kinematik viskozitesi daha düşük bir sıvı kullanmak gerekmektedir. Fakat kinematik viskozitesi düşük bir akışkan üretmek ise oldukça pahalı bir yöntem olduğundan iki dinamik şartı aynı anda sağlamak gerçekte pek mümkün değildir. Bu yüzden toplam direnç (3-11), sürtünme direnci ve artık direnç olarak ikiye ayrılarak ayrı ayrı incelenir [7]. Froude yöntemi denen bu yöntemde sürtünme direnci sadece R_n sayısına, artık direncin ise sadece Fr sayısına bağlı olduğu kabul edilmiştir. Froude yöntemine göre, tam ölçekli geminin veya modelin toplam direnci, Şekil 3.1'de görüldüğü gibi bileşenlerine ayrılabilir [7].

$$C_T = C_F + C_R = f_1(R_n) + f_2(Fr) \quad (3-11)$$

Şekil (3.1)'de yer alan sürtünme direnci, geminin veya modelin boyuna ve ıslak alanına eşit bir düz bir levhanın sürtünme direncine, artık direnç ise toplam direnç değerinden sürtünme direncinin çıkarılmasıyla elde edilen direnç değerine eşittir. Direnç bileşenleri Bölüm 3.1'de kısaca açıklanmıştır. Bir sonraki bölümde bu bileşenler hakkında ayrıntılı bilgi verilecektir.

3.2 Viskoz Direnç

Geminin sualtı, su üstüne göre viskozitesi daha büyük bir akışkanla etkileşim halinde olduğundan gemi direncine en büyük katkı akışkanla etkileşim halinde olan su altı formundan dolayı oluşmaktadır [7]. Bu kısımda akışkanın (suyun) viskozitesinden dolayı akışkan parçacıkları, gemi üzerine yapışır ve gemi hızıyla hareket eder. Gemi yüzeyinden uzaklaştıkça akışkanın hızı dış akım hızına eşit hale gelir. Bu arada kalan kısım ise sınır tabaka (“boundary layer”) diye isimlendirilir. Sınır tabaka içerisinde hız gradyanları büyüktür. Bu durum, gövde üzerinde kesme gerilmeleri oluşturur.



Şekil 3.1: Toplam direncin bileşenleri [7].

Kesme gerilmelerinin form boyunca integrasyonu ise o gemiye ait “toplam viskoz direnci” bileşenini verir [7,15]. Deneysel çalışmalar ve sayısal yöntemler dikkate alındığından viskoz direnç değeri düşük Froude sayılarında ($Fr < 0.30-0.35$) toplam gemi direncinin %85’ine yüksek hızlarda ise ($Fr > 0.35-0.40$) %50’sine kadar çıkabilmektedir [7]. Gemi direncinin bileşenleri içerisinde baskın bir değer olan viskoz direnci inceleyebilmek için gemi etrafındaki akımının karakteristiklerinin belirlenmesi gerekmektedir. Bunun için de düz bir levha etrafındaki akımın incelenmesi önemli bir adım ve basitleştirmedir [7].

Düz levhanın akışkan içerisindeki davranışı incelendiğinde, akışkan viskozitesinden dolayı levha üzerine yapışacak ve duracaktır. Levhanın yüzeyinden sonra ise sınır

tabaka içerisinde yüksek hız gradyenleri oluşacak ve sınır tabaka dışında akımın hızı çevresel akımın hızına eşit olacaktır. Yüksek hız değişimlerinin neden olduğu kesme gerilmeleri parçacıkları durdurmaya çalışan bir kuvvet (direnç) oluşturacaktır. Bu kesme gerilmelerinin levha üzerindeki integrasyonu da levhanın sürtünme (frictional) direncini verecektir [7,15]. Levha yüzeyinde oluşan sınır tabaka, levhanın giriş ucundan başlamak üzere levha çıkışına kadar üç farklı değişik rejim gösterir. Levhanın hemen önünde akışkan katmanları ile levha arasında enerji geçişinin olmadığından veya çok az olduğundan akım “laminer akım” davranışı gösterir. Levhanın gerisine doğru ise akım katmanları arasında enine enerji geçişleri oluşur ve akımda olası girdap, çapraz akım ve ayrılma gibi olaylar meydana gelir. Bu akım rejimi ise “türbülanslı akım” olarak isimlendirilir. Bu iki akım çeşidi arasında ise akışkan ne laminer akımın ne de türbülanslı akımın özelliklerini gösterir. Bu kısım ise “geçiş bölgesi” olarak isimlendirilir. Levha sürtünme direncinin matematiksel olarak belirlenmesi amacıyla ilk defa Prandtl tarafından sınır tabaka hipotezi oluşturulmuştur. Prandtl, Navier-Stokes denklemlerini sadeleştirerek matematiksel bir model önermiştir [14,16]. Daha sonra bu model, çok sayıda araştırmacı tarafından değişik yöntemlerle çözülmüş ve boyutsuz sınır tabaka kuvveti katsayısı hesabı geliştirilmiştir. Bu çalışmada sınır tabaka üzerine geliştirilen matematiksel ifadeler üzerinde tek tek durulmamıştır. ITTC tarafından önerilen hesaplama yöntemi deneysel sonuçların analizinde kullanılacaktır.

ITTC tarafından 1957 yılında matematiksel hesaplar ve yapılan deneyler dikkate alınarak geliştirilen ve geometrik benzer sistemlerde sürtünme direncini veren (3-12) formülasyonu geliştirilmiştir.

$$C_F = \frac{0.075}{(\log Rn - 2)^2} \quad (3-12)$$

ITTC, (3-12) formülasyonunu sadece gemi-model uyumu açısından pratik dizayn ve mühendislik ihtiyaçlarına cevap olması için önermiştir. Yoksa herhangi bir cismin sürtünme direncini veren bir ifade değildir [7]. Ancak o tarihten itibaren dünyadaki çekme tanklarında bu formülasyon kullanılmaya devam edilmektedir.

Geminin boyuna ve ıslak alanına eşit alınan levhadan yola çıkarak hesaplanan viskoz dirence dair bir yaklaşım eşitlik (3-12)’da gösterilmiştir. Bunun yanında geliştirilen bir diğer yöntem ise, üç boyutlu etkileri de göz önüne alındığı kabul edilen form faktörü yöntemidir (üç boyutlu viskoz direnç formülasyonu). Yapılan sadeleştirme neticesinde, geminin toplam direnci (C_T), viskoz direnç (C_V) ve dalga direnci (C_W)

bileşeni olmak üzere ikiye ayrılmıştır. Düşük Froude sayılarında modelin dalga direnci bileşeni çok düşük olacaktır. Bu yüzden modelin toplam direncini viskoz direnç oluşturacaktır. Bu durumda form faktörü eşitlik (3-13)'deki gibi tanımlanır.

$$1 + k = \frac{C_{Vm}(Rn)}{C_{Fm}(Rn)} \quad (3-13)$$

Eşitlik (3-12) kullanılarak, eşitlik (3-13) ile keyfi bir Rn sayısında üç boyutlu viskoz direnç hesaplanabilir. (3-13)'de yer alan $(1+k)$ form faktörü olarak adlandırılır ve akımda üç boyutlu etkileri göz önüne alır. Form faktörü değerinin Rn ile değişmediği ve gemi ölçeğinde aynı kaldığı kabul edilir. Froude yönteminde artık direnç katsayısının (C_R), modelden gemiye geçerken sabit kaldığı kabul edilmişti. Burada ise aynı şekilde dalga direnci katsayısı (C_W), gemi ölçeğinde aynı kalacaktır. Üç boyutlu form faktörü yöntemi Froude yöntemine göre sürtünme direncinin form faktörü ile çarpılacağından daha düşük direnç değerleri verecektir. ITTC tarafından önerilen form faktörü hesaplama yöntemi ise Bölüm 3.5.1.1'de ayrıntılı olarak anlatılmıştır [7,17,18].

3.3 Dalga Direnci

Sakin su yüzeyiyle etkileşim halinde olan cisim (gemi) hareket ettiğinde etrafında dalga sistemi oluşturacaktır. Su altı formunun oluşturduğu dalga sistemleri kinetik ve potansiyel enerji taşımaktadırlar [42,43]. Bu dalga sistemini oluşturan enerjiyi temsil eden direnç bileşeni, geminin dalga direnci olarak kabul edilir [7,19]. Bununla birlikte eğer cisim serbest su yüzeyinden yeterli uzaklıkta ise bu cismin hareketi su yüzeyinde dalga oluşturmayaacağı için dalga direnci bileşenine sahip olmayacaktır.

1887 ve 1904 yıllarında, Kelvin tarafından su yüzeyinde sabit hızla hareket eden bir tekil basınç noktasının oluşturduğu dalga sistemi tanımlanmış ve hesaplanmıştır. Böyle bir dalga sistemi bir dizi enine çıkan dalga sistemleri ve basınç noktasından çıkan diverjans dalga sistemleri ve bunun süperpozisyonundan oluşmaktadır [42,43]. Serbest su yüzeyindeki bütün dalga deformasyonlarının, basınç noktaları ile $19^{\circ}28'$ lık bir açı yapan diyagonal ile sınırlandırılmış bölgede olduğu gözlenmiş ve hesaplanmıştır. Oluşan enine dalgaların yüksekliklerinin ise basınç noktasından uzaklaştıkça düştüğü, dalgaların konkavlaştığı ve diverjans dalgalarıyla birleştiği görülmüştür. Enine dalgalarının, diverjans dalgalar ile birleştiği bölgelerde büyük dalga yüksekliklerinin olduğu ve bunun basınç noktasından uzaklaştıkça azaldığı

gözlemlenmiştir. Yalnız buradaki azalmanın enine dalgadaki azalma kadar kuvvetli olmadığı tespit edilmiştir. Buradan yola çıkarak diverjans dalgalarının enine dalgalara göre daha baskın olduğu söylenebilir. Bu dalga sistemi Kelvin dalga sistemi olarak isimlendirilir [7,20,21].

Dalga direncinin hesaplanması için çeşitli sayısal ve teorik yöntemler mevcuttur. Fakat bu çalışmada viskoz basınç direnci ve dalga direnci artık direnç başlığında deneysel olarak toplam direnç değerinden viskoz direnç değeri çıkartılarak elde edileceğinden, sayısal olarak dalga direncinin hesaplanma yöntemleri detaylı olarak anlatılmamıştır.

3.4 Model Deneyleri ile Gemi Direncini Belirleme Yöntemleri

Gemi dizaynında öncelikle gemi geometrisi, ana makine gücü ve bunlara bağlı olarak dizayn hızı hassas bir şekilde belirlenmelidir. Bu kriterlerin seçiminde ise en çok dikkat edilen parametre geminin direncidir. Dizayn aşamasında hem gözlem ve ölçme kolaylıkları hem de sonuçlara kısa sürede ve ucuz olarak erişme imkanları nedeniyle sayısal çözümler, bilgisayar ortamında yapılan analizler ve model deneyleri ile gemi direnci belirlenebilmektedir. Bu yöntemler arasında model deneylerinden hareketle yapılan gemi dalga direnci hesabı uzun yıllardan beri yaygın bir şekilde kullanılan ve en güvenli yollardan biridir [7,11].

Gemi model direnç deneyleri, bir geminin belirli bir ölçekte küçültülerek ağaç, parafin vs. gibi malzemelerden yapılmış modelinin değişik hızlarda çekilmesiyle model direnç değerlerini elde etmek ve bu değerlerden yola çıkarak çeşitli benzerlik yöntemlerinden yararlanarak gerçek geminin karşıt hızdaki direnç değerlerini tahmin etmek gayesiyle yapılır [11]. Model, deney sırasında batıp-çıkma ve trim yapmaya serbest diğer hareketlere karşı engellenmektedir. Tahmin edilen direnç değerleri karşılığı olan hız değeriyle çarpılmasıyla gemi efektif gücü değeri elde edilir. Böylelikle gemi için gerekli olacak ana makine seçimi yapılabilir. Aynı zamanda, model deneylerinde yapılan çeşitli akım gözleme (boya ve iplik) testleri ile formun hidrodinamik açıdan kusurlu olan bölgelerinin belirlenip düzeltilmesine olanak sağlanmış olur. Model ölçeğinde yapılan işlemler tam ölçekli gemi haline göre kıyaslandığında ölçme ve ekonomik olarak daha basit ve ucuz bir yöntemdir.

Model deneylerinde, ilk önce çekme havuzunun özelliklerine, model üretim kapasitesine göre form ölçeği belirlenir. Çünkü çekme havuzu; arabanın

ivmelenmesi, istenilen hızda yeterli bir süre gitmesi ve ölçüm bittiğinde durması için yeterli uzunlukta olmalıdır [7]. İlave olarak modelin boyutları laboratuvarın üretim kapasitesi sınırları içerisinde olmalıdır. Bu gibi başlıca kısıtlar dikkate alınarak belirlenecek ölçek ile geminin dizayn hızına karşılık gelen model hızı Froude benzerliğinden yola çıkarak belirlenir. Bu ölçek aynı zamanda model boyutlarını da etkileyeceğinden model boyutlarının blokaj etkisine neden olup olmadığı incelenmelidir. Çünkü büyük modellerde duvarlardan yansıyacak dalgalar gemi etrafındaki dalga sistemi ile etkileşim yapabilir ve bu yüzden de gerçekte olması gereken değerden daha büyük direnç değerleri elde edilebilir [7]. Hem hız değerine hem de blokaj etkisine ve çekme havuzunun üretim imkanları dikkate alınarak belirlenecek ölçek ile üretebilecek maksimum model, ölçek etkisini de azaltarak daha sağlıklı sonuçlar verecektir.

Model deneyleri yapılırken dikkat edilmesi gereken bir diğer husus ise şöyledir: Modelde laminar akımdan türbülanslı akıma geçiş gemiye göre daha geridedir. Çünkü genel olarak model Rn sayısı yaklaşık olarak 10^7 , gemi Rn sayısı ise 10^9 mertebelerindedir. Bu yüzden aynı Rn sayılarında türbülanslı akımda bir cismin direnci, laminar akıma göre daha büyüktür. Gemi-model benzerliğini sağlayabilmek için modelde türbülans yapıcılar kullanılmalıdır (Şekil 5.5) [7]. Bu türbülans yapıcılar sayesinde modelin başından itibaren akım türbülanslı olur ve laminar akımın oluşturacağı düşük direnç değerleri de telafi edilmiş olur.

Direnç deneylerinde model pervanesiz olarak çekilir. Eğer modelin takıntıları (şaft, yalpa omurgası, braket vs.) varsa takıntılı ve takıntısız olarak ayrı deney yapılabilirdiği gibi takıntısız olarak deney yapılır elde edilen sonuca sayısal olarak hesaplanan takıntı dirençleri de ilave edilebilir. Yalnız burada dikkat edilmesi gereken bir husus var. Model ölçeğinde takıntılar üzerine gelen viskoz kuvvetler yer çekimi kuvvetine göre daha büyüktürler. Bunun sebebi Rn benzerliğinin sağlamamış olmasıdır [26]. Bu yüzden ölçek etkisini ortadan kaldırabilmek için gerekli düzeltmeler yapılmalıdır.

Ölçülen model direnç deneylerinin sonuçlarını, gerçek geminin sonuçlarına çevirebilmek için aşağıdaki gibi başlıca dört yöntemden yararlanılır:

- ITTC 1957 Yöntemi
- Hughes-Prohaska Yöntemi
- ITTC 1978 Yöntemi

- Telfer'in GEOSIM Yöntemi

Bu çalışmada yukarıda bahsedilen yöntemler tek tek açıklanmamıştır. Sadece gemi direncinin belirlenmesi konusunda ITTC tarafından önerilen ve bu çalışmada kullanılan ITTC 1978 yöntemi, en son haliyle anlatılmıştır.

3.5 ITTC Direnç Hesabı

ITTC tarafından, amacı model deney sisteminin tanıtımı ve deneylerin sonuçlarının işlenmesi maksadıyla oluşturulmuş yöntemleri mevcuttur. Hem güvenilir hem de ortak bir yöntem geliştirilmesi amacıyla oluşturulan bu kurallar akredite çekme tanklarının çoğunda hassas bir şekilde uygulanmaktadır. Oluşturulan modelleme aslında gemi ölçeğindeki gerçek değerleri değil sadece yaklaşık olarak değerleri vermektedir. Diğer yöntemlerle karşılaştırıldığında fiziki deneysel çalışmalar hala en güvenilir yollardandır.

3.5.1 ITTC gemi direnci belirleme yöntemi

Direnç testleri kısaca istenilen hızda form üzerine gelen kuvvetlerin ölçülme işlemidir. Bu kuvvet sakin suda form üzerine gelen yatay kuvvettir. ITTC'nin bu testleri sağlıklı ve güvenilir bir şekilde ilerleyebilmesi için bir dizi kuralları ve önerileri vardır. Bunlara riayet edilmesi elde edilen sonuçların geçerliliği ve doğruluğu açısından oldukça önemlidir. Bu kurallar ve öneriler maddeler halinde aşağıda sıralanmıştır.

- Öncelikle imal edilecek model, ITTC standartlarına göre uygun imal edilmelidir [29]. Bu kurallar içerisinde en önemli olan ise imal edilecek modelin hassasiyetinin ± 1 mm olmasıdır. Modelle beraber eğer varsa üretilecek olan takıntılarında hassas ve dikkatli bir şekilde üretilmesi gerekmektedir. Modelin ve takıntıların gerçek gemi formundan farklı olarak imal edilmesi deneyler sırasında farklı viskoz ve dalga direnci oluşturacağından, hem modelin akışkan içerisindeki davranışını etkileyecek hem de elde edilecek verilerin güvenilirliği azalacaktır [23].
- Üretilecek model, çekme tankının kapasitesi içerisinde üretilecek en büyük form olmalıdır. Özellikle blokaj etkileri, model boyutları ve deplasmanı, çekme arabasının ulaşabileceği maksimum hız değeri, üretilecek modelin ölçeğini belirlemede oldukça önemlidir [26,32].

- Testler sırasında, takıntısız direnç katsayılarının belirlenmesinde model çıplak (takıntısız) olmalıdır. Dümen formun bir parçası olarak kabul edilir ve takıntısız form üzerinde modelin rota tutmasına katkı sağlayacağından çıplak model üzerinde olması tavsiye edilir [26,32]. Bunun dışında ilave edilecek her takıntı (yalpa omurgası, şaft, şaft braketleri vs.), modelin hem ıslak alanını hem de viskoz ve dalga karakteristiklerini etkileyeceğinden direnç katsayılarını artırıcı etki yapar. Fakat takıntıların dirence olan etkisini görmek maksadıyla model ilk önce takıntısız daha sonra takıntılı olarak çekilmeli ve hesaplara dahil edilmelidir.
- Modelin deplasmanı hassas bir şekilde hesaplanmalıdır [26,33]. Farklı bir deplasman olması durumunda modelin su hattı yüksekliği değişecektir. Bu da deney sonucunda elde edilen değerler, istenilen su hattındaki değerler olmayacağından doğruluğu ve güvenilirliği azalacaktır.
- Ölçme sisteminin modele bağlanacağı yer, modelin doğal davranışı dışında trim yapmasını önlemek maksadıyla, şaft veya şaftlar ile aynı yatay yükseklikte ve gemi boyunca ise L_{CB} ’de olmalıdır [26,32].
- Model deney esnasında yalpa ve yanal öteleme hareketine karşı sabitletmiş olmalıdır. Fakat bu işlem modelin serbest bırakıldığı hareketleri (dalıp-çıkma, trim) yapmasını engellememelidir [26]. Geminin istenilen hareketleri yapması için deneylerde model baştan ve kıçtan mafsallar yardımıyla bağlanmalıdır. Modelin hareketine artı bir yük getirmemesi için mafsalların minimum sürtünme direnci verecek şekilde bakımları yapılmalıdır.
- Model, çekme arabasının raylarına paralel olacak şekilde havuzun tam ortasına bağlanmalıdır [26].
- Model deplasmanını elde etmek için modele konulan ağırlıkların belirsizliği az ve ağırlıklar belirli bir standartta üretilmiş olmalıdır. Ayrıca bu ağırlıklar model üzerine meyilsiz ve istenilen trim durumuna göre dağıtılmalıdır.
- Deneyde kullanılacak olan dinamometrenin hassasiyeti, dinamometre kapasitesinin %2’si kadar veya 0.05 N olmalıdır [26].
- Model hızı, ideal olarak doğrudan model üzerinden ölçülmelidir. Fakat bu kullanışsız bir yoldur. Bu yüzden çekme arasının hızı hesaplanır ve bu hız model hızı olarak kabul edilir. Hızın hassasiyeti ise maksimum hızın %0.1’i kadar veya 3mm/s olmalıdır [26].

- Suyun sıcaklığı yoğunluk ve viskozite değerlerini etkileyeceğinden deneyin yapıldığı su sıcaklık değeri bilinmelidir. Bunun için modelin yarı su çekimindeki sıcaklık ölçümü işlemler için yeterlidir [24,25]. Ayrıca havuz içerisinde modelin deneylerinin yapıldığı kısımda belirli aralıklarla sıcaklık değerleri ölçülmelidir.
- Veri toplama (data acquisition) yapılan bütün işlemlerde kalibrasyona dikkat edilmelidir. Kalibrasyon işlemi sırasında voltajlara karşılık gelen niceliklerin oluşturmuş olduğu grafik lineer davranış göstermelidir [26,37,32].
- Testlere başlamadan önce deney düzeneği içerisinde yer alan bütün aletlerin sıfır okuması yapılmalıdır. Sıfır okuması ile belirlenen değer ve deney esnasında belirlenen değer arasındaki fark deney sonucunu vermektedir [11].
- Model deneylerinde Froude benzerliği kullanılmaktadır. Bu yüzden model gemi ile eş Froude sayılarında olan hızlarda deney yapılmalıdır [11,26].
- Deneyler sırasında ölçülen parametrelerin ortalama değeri alınır. Aynı zamanda her bir ölçümde verinin maksimum ve minimum değerleri ile standart sapma değerleri de bilinmelidir. Bu değerler verinin güvenilirliği açısından oldukça önemlidir [26].
- Deneyler sakın suda yapıldığı için ölçümler arası yeterli bir bekleme süresi olmalıdır. Dalgalı bir suda deney yapıldığından havuz içerisindeki dalga sistemi model üzerine ek direnç oluşturacağından ve model su içerisinde hareketinin yapmasını engelleyeceğinden bulunan değerler sağlıklı olmayacaktır.
- Direnç grafiği oluşturulurken yeterli sayıda ölçüm almak oldukça önemlidir. Direnç eğrisinin çok sık değiştiği yerlerde, daha fazla değer almak elde edilen sonuçların güvenilirliği konusunda fayda sağlayacaktır [26,32].
- Her ölçüm esnasında, model hızı ve direnci sürekli olarak kaydedilmelidir [26,33].

3.5.1.1 Model ölçeğindeki sonuçların analizi

Eşitlik (3-3)'te gösteriliği gibi direnç ve hız değerinin elde edilmesiyle, boyutsuz toplam direnç katsayısı, eşitlik (3-14) kullanılarak hesaplanabilir [26,32].

$$C_{TM} = R_{TM} / (0.5\rho_M V_M^2 S_M) \quad (3-14)$$

Toplam direnç (R_{TM}), deney sonucunda elde edilen model üzerine kuvvet değeridir. Toplam ıslak alan (S_M), modelin su hattı altında kalan alandır. Modelde takıntı olması durumunda takıntıların ıslak alanları bu değere dahil edilmelidir. Yoğunluk (ρ_M), suyun sıcaklık değerine göre hesaplanmalıdır [24].

Model deneylerinin asıl amacı, gemi artık direncini belirlemektir. Artık direnç modelin ölçek ve hız değerinden bağımsız olarak hesaplanır. 2 boyutlu artık direnç katsayısı eşitlik (3-15a) kullanılarak bulunur [26,32,39].

$$C_R = C_{TM} - C_{FM} \quad (3-15a)$$

Form etkilerini de göz önüne alarak geliştirilen, üç boyutlu artık direnç katsayısı ise eşitlik (3-15b) yardımıyla hesaplanır [26,32].

$$C_R = C_{TM} - (1 + k)C_{FM} \quad (3-15b)$$

C_{FM} değeri ITTC-1957 formülasyonu kullanılarak belirlenir (3-12). Eğer model üzerinde takıntılar mevcut ise artık direnç katsayısı eşitlik (3-16) yardımıyla hesaplanmalıdır. C_{AppM} , değeri model takıntı direnci katsayısıdır. Matematiksel olarak veya model deneyinin takıntılı ve takıntısız yapılmasıyla hesaplanır [26,32].

$$C_R = C_{TM} - C_{AppM} - (1 + k)C_{FM} \quad (3-16)$$

Form faktörü $(1+k)$, üç boyutlu viskoz basıncı hesaplamak için kullanılan bir çarpandır. Düşük Froude sayılarında modelin dalga direnci oluşturmayacağı varsayılarak toplam direnci tamamen viskoz dirençten oluştuğu kabul edilerek geliştirilen bir yöntemdir. Deneyisel olarak form faktörünün belirlenmesi için ITTC tarafından Prohaska yöntemi kullanılmaktadır [17]. Bölüm 3.1.2’de anlatıldığı gibi geminin toplam direnci, viskoz ve dalga dirençlerinden oluşmaktadır (3-17) [7].

$$C_{TM} = (1 + k)C_{FM} (Re) + C_W (Fr) \quad (3-17)$$

Froude sayısının düşük olduğu yerde ($0.1 \leq Fr \leq 0.2$), dalga direnci Froude sayısının n . ($4 \leq n \leq 6$) mertebesinde ifade edilir. Yatay eksen C_{TM} / C_{FM} , düşey eksen ise Fr^n / C_{FM} olacak şekilde noktalar çizdirilir ve bu noktalar üzerinden bir lineer regresyon analizi yapılır. Bu analiz sonucunda belirlenen denklemin n kuvvet serisi katsayısını, b katsayısı eğimi, k katsayısı ise sabiti ifade etmektedir. Denklemin $Fr=0$ olduğu durum form faktörü değerini vermektedir [7,17,26].

$$C_{TM} / C_{FM} - 1 = k + b \left(Fr^n / C_{FM} \right) \quad (3-18)$$

4. GEMİ DİRENCİNİN BELİRSİZLİĞİ

Mühendisliğin uğraştığı problemler birbirinden farklı olduğundan mevcut problemlerin belirsizliğini tahmin etmek için yapılanlar işlemlerde o probleme özgü algoritmalar içerir. Bu sorunların genel olarak nasıl irdelenmesi veya nelere dikkat edilmesi önceki bölümlerde anlatılmıştı. Bu kısımda ise geniş bir konu olan belirsizlik analizinin, özel bir konu olan gemi direncine nasıl uygulanacağı anlatılmıştır. Gemi direncinin belirsizliği konusunda ITTC tarafından geliştirilen bu metot geçerliliğini korumakta ve bu amaca hizmet etme noktasında önemli bir boşluğu doldurmaktadır. ITTC prosedürlerinden 7.5-02-02-01 başlıklı kısımda yer alan yaklaşımlar sayesinde model deneylerinde muhtemel hata kaynaklarının oluşturacağı belirsizliği nicelik olarak belirleme konusunda yardımcı olmaktadır [26,29,33,37,38]. Yalnız bu yöntem sadece model ölçeğinde yapılan işlemleri kapsamaktadır. Gemi ölçeğindeki sonuçlar dikkate alınmamıştır. Aynı zamanda özel problemlerin (takıntı direnci, blokaj etkisi, form faktörün ekstrapolasyon yapılması vs.) oluşturacağı muhtemel hatalar göz ardı edilmiştir.

Model deneylerini yapmadaki temel amaç; artık direnç katsayısının (C_R), Froude sayısı arasındaki ilişkiyi belirlemektir. Amaç doğrultusunda yapılan işlemlerde birbirine bağımlı ve bağımsız birçok hata kaynağı oluşmaktadır. Bu hataların sınıflandırılması ve nicelik olarak ifade edilebilmesi için belirsizlik analizi yöntemine başvurulur.

4.1 ITTC 2002 Metodu ile Toplam Direncin Belirsizliğinin Hesaplanması

4.1.1 Model boyu

Model boyunun (L_{WL} , L_{BP}) sistematik hatası, modelin imalat aşamasındaki hatalarından dolayı $\pm 1 \text{ mm}$ olacağı tahmini yapılır [23]. Böylelikle model boyunun sistematik hatası 2 mm olarak alınır.

$$B_{L_M} = 2 \text{ mm} \quad (4-1)$$

Gemi ölçeğinde ise boy hatası ihmal edilebilir olacağından, sistematik hata $B_{LS} = 0 \text{ mm}$ alınır.

4.1.2 Islak alan

Islak alanın sistematik hatası ise model üretiminden gelen hatalar ve deplasmanı tutturmak için koyulan ağırlık hatalarından dolayı oluşmaktadır.

4.1.2.1 Üretimden kaynaklanan hatalar (veri toplam)

Modelin ana parametreleri üzerinde oluşan hatalardır. ITTC prosedürüne göre bütün uzunluklarda hata payı $\pm 1 \text{ mm}$ olmalıdır [23,27]. Bu da gemi boyunda 2 mm, gemi genişliğinde 2 mm, su çekiminde ise 1 mm artmasına neden olacaktır. Blok katsayısı sabit kabul ederek, hata aralıkları dahil edilerek yeni deplasman bulunur (4-2).

$$\dot{\Delta} = (L + 0.002) * (B + 0.002) * (T + 0.001) * C_B * \rho \quad (4-2)$$

Böylelikle formun ağırlığı eşitlik (4-3) kadar artacaktır.

$$\Delta m = \dot{\Delta} - \Delta \quad (4-3)$$

Islak yüzey katsayısı sabit kabul edilir böylelikle Eşitlik (4-4a) ile yeni ıslak alan bulunur.

$$\dot{S} = C_S * \sqrt{\dot{V} * L_{PP}} \quad (4-4a)$$

$$\Delta S_1 = \dot{S} - S \quad (4-4b)$$

Eşitlik (4-4b) kadar ıslak alanda bir artış meydana gelir.

Bu deplasman artışını model, form özelliklerine göre belirli bir su çekimi artışıyla karşılar. Bu deplasman artışı eşitlik (4-5) kadardır.

$$\Delta T = \frac{(\dot{\Delta} - \Delta)}{A_{WP}} \quad (4-5)$$

Bu su çekimi artışı ise modelin genelinde eşitlik (4-6) kadar bir ıslak alana karşılık gelmektedir.

$$\Delta S_2 = 2 * L_{WL} * \Delta T \quad (4-6)$$

Islak alanın toplam sistematik hatası ise ana parametrelerden kaynaklanan hatadan deplasman farkını karşılamak için modelin su çekimini artırması ile değişen ıslak alanın farkı kadardır (4-8).

$$B_{S1} = \Delta S_1 - \Delta S_2 \quad (4-8)$$

4.1.2.2 Ağırlıklardan kaynaklanan hatalar (kalibrasyon)

Modelin mevcut deplasman ağırlığına modelin ağırlığı ve ilave edilecek ağırlıklarla ulaşılır. Modelin ağırlığındaki hata aralığı ± 1 kg olarak alınır. İlave edilen ağırlıkların miktarı ve sayısı adedince bir hata aralığı bulunur [27].

Modele ilave edilen 1 kg, ($\rho=1000$) $\Delta T=1/ A_{WP}$ mm kadar ilave bir su çekimi oluşturur. 1 kg ağırlığın etkisiyle oluşan su çekimi model üzerinde toplamda kadar bir ıslak alan oluşturur. 1 kg etkisiyle oluşacak ilave su çekimi değeri, bütün ağırlıklardan kaynaklanan ilave ağırlık ile çarpılarak toplam su çekimi değişimi hesaplanır (4-9). Ağırlıklardan kaynaklanan sistematik hata ise eşitlik (4-9b) ile bulunur.

$$\Delta S = 2 * L_{WL} * \left(\frac{1}{A_{WP}} \right) m^2/kg \quad (4-9a)$$

$$B_{S2} = \Delta S * (\text{Toplam Ağırlık Hatası}) \quad (4-9b)$$

Toplam Islak Alan Hatası ise bulunan sistematik hataların karelerinin toplamının kareköküdür (4-10) [27].

$$B_S = \sqrt{B_{S1}^2 + B_{S2}^2} \quad (4-10)$$

4.1.3 Sıcaklık, yoğunluk, viskozite

4.1.3.1 Sıcaklık

ITTC prosedürlerine göre deneylerde kullanılacak termometre -5 ve 50 derece aralığında ve hassasiyeti ± 0.3 derece olmalıdır [27]. Sıcaklıktan kaynaklanan sistematik hata ise ortalama sıcaklığın (15 derece) %2'sine karşılık gelen 0.3 derecedir [27]. Fakat İTÜ Ata Nutku Gemi Model Deney Laboratuvarında kullanılan termometre 0.5 derece hassasiyetinde olduğundan sıcaklık hatası 0.5 derece olarak alınmıştır (4-11).

$$B_{t^o} = 0.5 \text{ derece} \quad (4-11)$$

4.1.3.2 Yoğunluk

i. Kalibrasyon

ITTC prosedüründe yer alan sıcaklık ve yoğunluk tablosuna göre oluşturulmuş yoğunluk denklemi aşağıdaki gibidir (4-12) [27]. Buradaki duyarlılık miktarına göre

de yoğunluk hatası oluşmaktadır. Bu hata ise nicelik olarak duyarlılık miktarı ile sıcaklık hatası çarpılarak eşitlik (4-13) yardımıyla hesaplanabilir.

$$\rho = 1001.1 + 0.0552 * t^{\circ} - 0.0077 * t^{\circ 2} + 0.00004 * t^{\circ 3} \quad (4-12)$$

$$B_{\rho 1} = \frac{\partial \rho}{\partial t} * B_{t^{\circ}} \quad (4-13)$$

ii. Veri İndirgeme

Yoğunluğun sıcaklığa bağlı denklemi hesaplanırken tablo verileri ile oluşturulmuş olan sıcaklık-yoğunluk fonksiyonu arasındaki uyumsuzluktan kaynaklanan hatadır (4-14) [27,41]. Eğer yoğunluk değeri tablodan okunursa bu hata değeri ihmal edilebilir.

$$B_{\rho 2} = 2 * SEE \quad (4-14)$$

iii. Kavramsal Hata

Denklem kullanılarak bulunun yoğunluk değeri ile tablodan okunan suyun yoğunluk değeri arasındaki farktan kaynaklanmaktadır [27]. 15 derece ITTC 78 metodunda $\rho_{ITTC}=1000 \text{ kg/m}^3$ olmasına rağmen denklem kullanılarak bulundun yoğunluk değeri ise $\rho_{15^{\circ}}=999,34 \text{ kg/m}^3$ 'tür. Aynı sıcaklıktaki iki farklı yoğunluk değerinin farkı kavramsal hatayı oluşturmaktadır (4-15). Ayrıca eğer sıcaklık değerine karşılık gelen yoğunluk değeri tablo kullanılarak bulunmuşsa bu hata ihmal edilir.

$$B_{\rho 3} = \rho_{ITTC} - \rho_{15^{\circ}} \quad (4-15)$$

Toplam sistematik hata ise eşitlik (4-16) kullanılarak bulunur.

$$B_{\rho} = \sqrt{B_{\rho 1}^2 + B_{\rho 2}^2 + B_{\rho 3}^2} \quad (4-16)$$

4.1.3.3 Viskozite

i. Kalibrasyon

Tatlı suyun, sıcaklık-viskozite ilişkisi tablolar halinde ITTC prosedüründe yer almaktadır [27]. Viskozitenin denklemi ise aşağıdaki gibidir (4-17). Sıcaklık belirsizliğinin viskozite üzerinde oluşturacağı belirsizlik ise eşitlik (4-18) yardımıyla belirlenir.

$$\gamma = ((0.585 * 10^{-3}) * (t - 12.0) - 0.03361) * (t - 12) + 1.2350 * 10^{-6} \quad (4-17)$$

$$B_{\gamma 1} = \frac{\partial \gamma}{\partial t} * B_{t^{\circ}} \quad (4-18)$$

ii. Veri indirgeme

Kinematik viskozite değeri, viskozite-sıcaklık tablosundaki değer ile fonksiyon neticesinde elde edilen değer arasındaki farktan dolayı bir hesap hatası meydana gelmektedir [27]. Bu hata ise eşitlik (4-19) yardımıyla hesaplanabilir. Eğer viskozite değeri tablo kullanılarak bulunmuşsa bu hata ihmal edilir.

$$B_{Y2} = \gamma_{ITTC} - \gamma_{15^\circ} \quad (4-19)$$

Toplam sistematik hata ise eşitlik (4-20) kullanılarak bulunur.

$$B_Y = \sqrt{B_{Y1}^2 + B_{Y2}^2} \quad (4-20)$$

4.1.4 Model hızı

Model hızı ölçüm sistemi; devir sayımı (c), deney arabası tekerlek çapı (D), 12 bit DA ve AD kart zaman aralığını ölçme (Δt) gibi bireysel ölçüm sistemlerinden oluşur. Hız, deney arabasının bir tekerleğinin dönüş sayısının kodlayıcı ile okunmasıyla belirlenir. Hız devresini saniyenin onda biri zaman aralığında ölçüm okumalar yapar ve okunan sayılar 12-bit DA çevirici devir sayısı artırılarak hız çıkışı 0 -10 arası voltaj değerine yükseltilerek hız hesabı aşağıdaki denklemle yapılır. Hata değeri ise denklem içerisinde bulunan her bir bağımsız değişkenin hatası belirlenerek eşitlik (4-21) yardımıyla hesaplanır [27,40]. Bu hesaplarda blokaj etkisinin sistematik hataya katkısı ele alınmamıştır.

$$V = \frac{c\pi D}{6000\Delta t} \quad (4-21)$$

Tekerlek yarıçapı (D)

Çekme arabasının bir tekerleği hız ölçümü için kullanılır veya yine aynı görevi görecek bir sistem çekme arabası ile raylar arasına yerleştirilir. Devir ölçer sistemle devir, hız düzeneğine aktarılır. Ölçüm yapılan tekerleğin üretimden kaynaklanan yarıçap hatası ölçülen hız değerinde hataya neden olur [27]. Bu yüzden tekerlek çapındaki hata miktarı işlemlerde kullanılmak üzere nicelik olarak hata değerini verir (4-22).

$$B_D = 0,000115 \text{ m} \quad (4-22)$$

Zaman (Δt)

Devrin saniyeye çevrilmesi için sistem belirli zaman aralığında işlem yapar. Sistemin içerisindeki zaman aralığı ise kalibrasyondan dolayı hata barındırmaktadır [27]. Bu

hata da hızın hesaplanması işleminde hata oluşturmaktadır. Bu hata ise sistemin referans olarak verdiği hata payıdır (4-23).

$$B_{\Delta t} = 1.025 \cdot 10^{-5} \text{sn} \quad (4-23)$$

Devir sayımı (c)

i. Kalibrasyon

Optik kodlayıcı, üretici tarafından ± 1 atıma ayarlanmıştır. Böylelikle kalibrasyondan kaynaklanan sistematik hata eşitlik (4-24)'teki gibidir.

$$B_{C1} = 1 \text{atım} \left(\frac{10 \text{ V}}{2^{12}} \right) = 0.00244 \text{ V} \quad (4-24)$$

ii. Veri Toplama

Toplanan verilerin dönüştürücüler tarafından bilgisayara aktarılırken ortaya çıkan hatalardır. Bu sistematik hata, iki bileşenden oluşmaktadır (4-25)

$$B_{C2} = B_{C3} = 1.5 \text{ atım} = 0.00366 \text{ V} \quad (4-25)$$

iii. Veri İndirgeme

Hızda son sistematik hata kaynağı ise analog voltajın frekansa çevrilmesi sırasında ortaya çıkar. Bu voltaj çıkışına karşılık gelen frekans değerinin örtüşmesi ile mümkündür. Sistematik hata, kalibrasyonda verilerin lineer eğri oluşturma sırasında ortaya çıkan hatadır. İstatistikte, Standart Hata Tahmini olarak adlandırılan ve Coleman and Steele tarafından bulunan eşitlik (4-26) yardımıyla belirsizlik değeri nicelik olarak belirlenir (4-27) [1].

$$SEE = \sqrt{\frac{1}{N-2} \sum_{i=1}^N (Y_i - (aX_i + b))^2} \quad (4-26)$$

$$B_{C4} = 0.25 \text{ atım} = 0,000614 \text{ V} (\pm 2 * SEE) \quad (4-27)$$

Devir sayımındaki toplam sistematik hata ise eşitlik (4-28) yardımıyla hesaplanır.

$$B_c = \sqrt{B_{C1}^2 + B_{C2}^2 + B_{C3}^2 + B_{C4}^2} \quad (4-28)$$

Model hızının sistematik hatası eşitlik (4-29) gibi hesaplanır.

$$B_V = \sqrt{\left(\frac{\partial V}{\partial c} B_c \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial D} B_D \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial \Delta t} B_{\Delta t} \right)^2} \quad (4-29)$$

4.1.5 Direnç

Deney esnasında modele bağlanan dinamometre yardımıyla x eksenini (yatay) yönündeki kuvvet ölçülmektedir.

i. Kalibrasyon

Dinamometre içerisinde bulunan gerinim ölçerler (“strain-gauge”) statik halde ağırlıklar eklenerek kalibre edilir. Böylelikle kalibrasyon aralığı içerisinde değişik yük miktarlarında sistem üzerine gelen voltaj değerleri değişeceğinden sistem üzerine binen yük miktarı belirlenebilecektir. Burada önemli olan kalibrasyon yapılırken kullanılan ağırlıkların kalite standardının yüksek olmasıdır. Çünkü kalibrasyon yapılırken ağırlık toleransının yüksek olması sistematik hatayı artırıcı etki yapar. Ağırlıkların toleransı % ± 0.005 olmalıdır [27,30]. Kullanılan ağırlıklardan dolayı meydana gelen belirsizlik (4-30) yardımıyla tahmin edilir.

$$B_{R_{x1}} = (\text{Ağırlıkların hassasiyeti}) * R_X = 0.0005 * R_X \quad (4-30)$$

ii. Veri toplama

Kalibrasyon sırasında eklenen ağırlıklara karşılık gelen voltaj değerleri bir tablo halinde hazırlanır. Tablo x eksenini voltaj değerleri, y eksenini ağırlık olmak üzere çizdirilir. Hatanın olmadığı düşünülürse grafik doğru şeklinde oluşur. Fakat gerçekte ise bu noktalar doğru üzerinden sapmalar gösterir. Bu yüzden mevcut değerler üzerinden standart hata tahmini (standard error estimation (SEE)) yapılır. Eğri uyumundan dolayı meydana gelen sistematik hata ise eşitlik (4-31) yardımıyla hesaplanır [1,27].

$$B_{R_{x2}} = 2 * SEE \quad (4-31)$$

Üçüncü sistematik hata bileşeni ise ölçüm sistemin model üzerinde yanlış yerleşiminden dolayı meydana gelen hatalardır. Ölçüm sırasında dinamometre modelin hareketiyle paralel olacak şekilde durmalıdır. Sistemin model üzerinde açılı bir şekilde bağlanması ölçülen kuvvetin değerini düşürerek hata meydana getirecektir. Özellikle yüksek hızlarda bu sorun çok sık yaşanmaktadır. Bu durumdan dolayı meydana gelen hata ise eşitlik (4-32) yardımıyla hesaplanmaktadır [27].

$$B_{R_{x3}} = R_X - (R_X * \cos(0,25)) \quad (4-32)$$

Ölçüm sırasında dinamometreden gelen sinyal (-2V +2V) Analog-Dijital (AD) çevirici sayesinde dijital sinyale dönüştürülür. Bu dönüşüm sırasında bir hata meydana gelir. Ölçülen direnç değerinin dördüncü sistematik hatası bu kısımdan oluşmaktadır. 1 bitlik hata kabul edilerek yapının işlemler neticesinde kalibrasyon denkleminin eğimi, hata payının toplam bit sayısına bölümü ile çarpılarak elde edilir (4-33).

$$B_{R_{x4}} = \frac{1*4}{2^{12}} * m_{\text{kalibrasyon}} \quad (4-33)$$

iii. Veri indirgeme

Bu hata ölçüm düzeneği ile ilgilidir. Eğer direnci ölçen sistem, model ile çekme arabasının ortasına universal bir mil ile bağlanmışsa ölçüm esnasında ölçüm sistemi ile model arasında bir açı (α) oluşturacaktır. Bu açıda ölçümde hataya neden olacaktır. Baştaki ve kıçtaki batıp çıkma miktarıyla belirlenecek açı ve eşitlik (4-34a) kullanılarak direnç değeri düzeltilmelidir. Eğer sistem araca doğrudan bağlı ve dinamometre yatay kuvvet bileşenin veriyor ise bu hata çeşidi ihmal edilir [27].

$$B_{R_{x5}} = R_X - (R_X * \cos(\alpha)) \quad (4-34a)$$

Model hızın toplam hatası ise eşitlik (4-34b) yardımıyla hesaplanır.

$$B_{RT} = \sqrt{(B_{R_{x1}})^2 + (B_{R_{x2}})^2 + (B_{R_{x3}})^2 + (B_{R_{x4}})^2 + (B_{R_{x5}})^2} \quad (4-34b)$$

4.1.6 Sürtünme direnci katsayısı

Sürtünme direnci katsayısı ITTC-1957 formülasyonu kullanılarak hesaplanır (4-35).

$$C_F = \frac{0.075}{(\log \frac{V_L}{V} - 2)^2} \quad (4-35)$$

Sürtünme direncinin sistematik hatası ise eşitlik (4-35)'te yer alan bağımsız değişkenlere bağlıdır. Her bir bağımsız değişken için duyarlılık katsayısı eşitlik (2-16) yardımıyla hesaplanarak sürtünme direncinin nicelik olarak hata değeri bulunur [27].

$$B_{C_F} = \sqrt{\left(\frac{\partial C_F}{\partial V} B_V\right)^2 + \left(\frac{\partial C_F}{\partial L} B_L\right)^2 + \left(\frac{\partial C_F}{\partial \gamma} B_\gamma\right)^2} \quad (4-36)$$

4.1.7 Form faktörü

Düşük Froude sayılarından hesaplanan form faktörü değeri $Fr=0$ için eşitlik (4-37) kullanılabilir.

$$k = C_T / C_F - 1 \quad (4-37)$$

Sistematik hata değeri ise bağımsız değişkenlerin duyarlılık katsayıları ve hataları çarpılarak elde edilir (4-38). Form faktörünün rastlantısal hatası, deney setinin 15 defa tekrarlanması sonucu elde edilen değerlerin standart sapması sonucu elde edilir. Eğer örnek veri yok ise, form faktörünün belirsizliği form faktörünün %10'u kabul edilir [27].

$$B_k = \sqrt{\left(\frac{\partial k}{\partial C_T} B_{C_T}\right)^2 + \left(\frac{\partial k}{\partial C_F} B_{C_F}\right)^2} \quad (4-38)$$

4.1.8 Toplam direnç katsayısı

Toplam direnç katsayısının boyutsuz formülü eşitlik (3-14)'te gösterildiği gibidir. Bu fonksiyonda girdi olarak kullanılan bağımsız değişkenlerin (direnç, yoğunluk, yerçekimi ivmesi, ıslak alan) duyarlılıkları ve hataları yardımıyla toplam direncin belirsizliği hesaplanabilir (4-39) [27].

$$B_{C_T} = \sqrt{\left(\frac{\partial C_T}{\partial S} B_S\right)^2 + \left(\frac{\partial C_T}{\partial V} B_V\right)^2 + \left(\frac{\partial C_T}{\partial R} B_{\Delta t}\right)^2 + \left(\frac{\partial C_T}{\partial \rho} B_\rho\right)^2} \quad (4-39)$$

4.1.9 Artık direnç katsayısı

Artık direnç katsayısı eşitlik (4-40) yardımıyla hesaplanır. Artık direnç katsayısının sistematik hatanın belirlenmesinde ise diğer yöntemlerde olduğu gibi duyarlılık katsayıları hesaplanır ve daha sonra bu katsayılar hata miktarları ile çarpılarak toplam sistematik hata değeri elde edilir (4-41) [27].

$$C_R = C_T - (1 + k)C_F \quad (4-40)$$

$$B_{C_R} = \sqrt{\left(\frac{\partial C_R}{\partial C_T} B_{C_T}\right)^2 + \left(\frac{\partial C_R}{\partial k} B_k\right)^2 + \left(\frac{\partial C_R}{\partial C_F} B_{C_F}\right)^2} \quad (4-41)$$

4.1.10 Rastlantısal hata

Çevresel koşullar ve deney düzeneğinin kurulumu sırasında oluşan farklılıklardan dolayı oluşan rastlantısal hata, standart sapma yardımıyla hesaplanır. Rastlantısal

hatanın hesaplanmasına geçmeden önce direnç değerleri, deney setlerinin ortalama sıcaklığına ve standart sıcaklığa getirilmesi gereklidir [26,27]. ITTC tarafından tayin edilen standart su sıcaklığı değeri 15 derecedir. C_R değeri deney sıcaklığında bulunur ve diğer sıcaklıklarda da sabit kabul edilir. Daha sonra 15 derece sıcaklıktaki yoğunluk ve viskozite değerleri esas alınarak hesaplanan C_T ve C_F değerleri hesaplanır (4-42).

$$C_T^{15^\circ} = C_R^{15^\circ} - (1 + k)C_F^{15^\circ} \quad (4-42)$$

Sıcaklık düzeltmesinden sonra ise C_T ve C_R değerlerinin standart sapmaları bulunarak bir adet ve çoklu test için sırasıyla eşitlik (2-23) ve (2-24) kullanılarak rastlantısal hata değeri bulunur. Bulunun belirsizlik değeri istenilen güven aralığına göre güvenilirlik katsayısı ile çarpılarak bileşik standart belirsizliğin hesaplanmasında kullanılır. Mühendislik problemlerinde, %95 güven aralığı için güvenilirlik katsayısı yaklaşık olarak 2 alınır.

$$P_{C_T} = t * s_{C_T}$$

4.1.11 Genişletilmiş standart belirsizlik

Sistematik hata ile birlikte tekli ve çoklu testler için hesaplanan rastlantısal (“precision”) belirsizlik değerleri bir araya getirilerek bileşik standart belirsizlik bulunur. Toplam direnç katsayısının değeri eşitlik (4-43a) yardımıyla artık direnç katsayısının belirsizliği ise eşitlik (4-43b) yardımıyla hesaplanır.

$$U_{C_T} = \sqrt{(B_{C_T})^2 + (P_{C_T})^2} \quad (4-43a)$$

$$U_{C_R} = \sqrt{(B_{C_R})^2 + (P_{C_R})^2} \quad (4-43b)$$

Deney sayısı fazla oldukça elde edilen değer gerçek ortalama değere yaklaşacağından standart rastlantısal belirsizlik değeri düşecek ve böylelikle toplam belirsizlik değeri de düşecektir.

Hesaplanan belirsizlik değerleri dikkate alınarak sonuç üzerinde hangi hata bileşenin baskın olduğu görülebilir. Bu hata bileşenlerinin nicelikleri incelenerek mevcut olan belirsizliği azaltmak için tedbirler alınabilir [4]. Gemi direncinin sistematik belirsizlik analizi incelemesinde, baskın olan belirsizlik kaynakları özellikle model

hızı ve direnç ölçüm sistemidir [27]. Bu sistemlerde yapılacak iyileştirmeler hata miktarını önemli ölçüde düşürecektir.

4.2 2014 ITTC Belirsizlik Prosedürü

2008 yılında yayımlanan belirsizlik analizi için 2002'e göre farklı bir yaklaşım sunulmuştur [29]. 2014 yılında yapılan 27. ITTC konferansında belirsizlik analizi için yayımlanan prosedür ile belirsizlik analizi için 2002 ITTC ve 2008 ITTC yöntemine göre daha uygulanabilir ve kolaylaştırılmış bir yöntem yayımlandı [33,34,35]. Bu yaklaşım belirsizlik kaynaklarının özellikle sonuçlar üzerinde baskın olan bileşenlerini ele alarak toplam belirsizliğin nicelik olarak elde edildiği bir yöntemidir. Özellikle ihmal edilebilir seviyede olan belirsizlik kaynakları hesaba dahil edilmemiştir. 2014 ITTC yönteminin bir diğer avantajı ise, sonucu pratik yoldan ulaşma konusunda oldukça faydalıdır. Ayrıca, bu prosedürde belirsizlik kaynakları sistematik ve rastlantısal olarak ikiye ayrılmamış, genel bir belirsizlik terimi kullanılmıştır.

4.2.1 Belirsizlik kaynakları

ISO tarafından yayımlanan GUM prosedürünün mevcut sonuçlara uygulanırken yapılacak ilk iş önemli belirsizlik kaynaklarını eldeki mevcut veriler ve mühendislik yorumu ile belirlemektir [33]. Bu belirsizlik kaynakları 5 ana başlık altında toplanmıştır.

4.2.1.1 Model geometrisi (No:1)

Model geometrisi, 2014 ITTC prosedürüne göre belirsizlik kaynakları üretim hataları, üretimden ve kullanımdan sonra oluşan deformasyonlar ve model testleri sırasında oluşmaktadır [33].

Geometriden kaynaklanan hataların başında ıslak alan değerinin hesaplanması vardır. Fakat modelin deney esasında trim ve dalıp-çıkma hareketine serbest olması ıslak alan değerinin belirlenmesini zorlaştırmaktadır.

Geometriden kaynaklanan diğer bir belirsizlik kaynağı ise üretim sırasında oluşan belirsizliktir. Günümüzde modellerin CNC makinelerinde üretilmiş olmasına rağmen yüzey kalitesi açısından farklılıklar oluşturabilmektedir. Fakat bu belirsizlik bir sistematik (eğilim) olarak incelenmektedir.

Modelin deplasmanını hesaplamak için modelin yüzme su hattı altında kalan hacmin belirlenmesi gerekmektedir. Buradan yola çıkarak su yoğunluğu dikkate alınarak modelin ağırlığı elde edilmektedir (4-44).

$$\Delta = \rho \times \nabla \quad (4-44)$$

Model ağırlığının belirsizliği, doğrudan olarak gerçek deplasman hacmi ile ilintilidir. Bağlı standart belirsizlik nicelik olarak eşitlik (4-45) olarak tahmin edilebilir.

$$\dot{u}(\Delta) \equiv u(\Delta)/\Delta = \rho u(\nabla)/\rho \nabla = u(\nabla)/\nabla \equiv \dot{u}(\nabla) \quad (4-45)$$

Deplasman hacmi modelin ıslak kısımlarının boyutlarının bir araya gelerek oluşturduğu bir niceliktir. Bu yüzden karakteristik boy ve ıslak alan deplasman hacminin sırasıyla 1/3 ve 2/3 kuvvetleri olarak kabul edilir (4-46a-b).

$$L \propto (\nabla)^{1/3} \quad (4-46a)$$

$$S \propto (\nabla)^{2/3} \quad (4-46b)$$

Eşitlik (4-46a) ve (4-46b)'dan yola çıkarak karakteristik boy belirsizliği ve ıslak alanın belirsizliği sırasıyla eşitlik (4-47a) ve (4-47b) yardımıyla tahmin edilebilir.

$$\dot{u}(L) = u(L)/L = \frac{1}{3}\dot{u}(\nabla) = \frac{1}{3}\dot{u}(\Delta) \quad (4-47a)$$

$$\dot{u}(S) = u(S)/S = \frac{2}{3}\dot{u}(\nabla) = \frac{2}{3}\dot{u}(\Delta) \quad (4-47b)$$

Yukarıda bulunan karakteristik boy (L) belirsizliği Reynolds sayısını etkileyeceğinden toplam sürtünme direnci üzerinde ıslak alan (S) değeri ise toplam direnç katsayısı üzerinde belirsizlik meydana getirecektir. Modelin deney esnasında muhtemel trim yapmasının karakteristik boy değerini etkilemediği kabul edilecektir [33].

Son olarak ise eşitlik (4-44) kullanılarak hesaplanan deplasman ağırlığı üzerinde suyun yoğunluğundan kaynaklan bir belirsizlik de mevcuttur. Bu belirsizlik değeri ise pratik olarak eşitlik (4-48) yardımıyla tahmin edilebilir.

$$\dot{u}(\nabla) \equiv u(\nabla)/\nabla = u(\rho_{su})/\rho_{su} = \dot{u}(\rho_{su}) \quad (4-48)$$

Genellikle, model deneyleri eğer kapalı bir havuz içerisinde bir set halinde aynı gün içerisinde yapılıyorsa suyun sıcaklığındaki değişimler çok sınırlı olacaktır. Eğer bu sıcaklık farkı $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ kadar ise suyun yoğunluk değerini yaklaşık $\pm 0.01\%$ etkilenmektedir [32,33]. Bu yüzden, sıcaklık değerinden doğacak fark ihmal edilebilir. Eğer aynı deney, başka tarihlerde ve su sıcaklığında tekrarlanıyor ise modelin deplasman ağırlığı o günün sıcaklığına göre hesaplanmış yoğunluk değeri kullanılarak bulunmalıdır.

4.2.1.2 Deney düzeneğinin kurulumu (No:2)

2. kısma dahil olan belirsizlikler ise modelin trim yapması, modelin ve dinamometrenin yerleşiminden, çekme arabasının hareketinden doğan titreşim vs. hareketlerinden, dinamometre ile model arasında bağlanan tel veya ankastre elemanın yerleşiminden vb. kaynaklanan hatalardan oluşmaktadır [33].

Akredite tanklarda yukarıda bahsedilen belirsizlik çeşitleri kontrol altına alınarak minimuma indirilebildiğinden bu hata bileşenlerinin çoğu ihmal edilebilir. Eğer deney düzeneği için yeterli sayıda veri var ise bu veriler dikkate alınarak bu baskın olan belirsizlikler tahmin edilebilir.

4.2.1.3 Kalibrasyon (No:3)

Deney sistemi içerisinde kullanılan cihazlar (takometre, termometre, tartı vb.) gibi tüm elektronik aletlerin belirli aralıklarla kalibrasyonu yapılmalıdır. Deney sistemi içerisinde belirsizlikler dikkate alınarak deneyler yapılmalıdır.

Yukarıda bahsedilen sertifikalandırılmış sistemlerin belirsizlikleri nicelik olarak düşük seviyededir. Fakat ölçüm cihazı olarak kullanılan dinamometrenin belirsizliği sonuçları önemli ölçüde etkilemektedir. Bu yüzden direnç dinamometresi her deney öncesinde kalibre edilmeli ve deney sonunda kontrol edilmelidir [30,33]. Kalibrasyon sonuçları ise ulusal metroloji laboratuvarları ile karşılaştırılmalıdır.

Direnç dinamometresi kalibre edilirken kalibrasyon aralığı en yüksek direnç değerinin 1.5 katına kadar kalibre edilmelidir. Ağırlıklar karışık olarak dinamometre kefesine konarak gerinim ölçerin verdiği sinyal kaydedilmelidir. Daha sonra sistemin ürettiği voltaj değerleri baz alınarak bir kalibrasyon katsayısı belirlenmelidir (4-49). Sistemin verdiği değer (kalibrasyon katsayısı ile voltajın çarpılması) ile kalibrasyonda kullanılan ağırlıklar kullanılarak lineer regresyon analizi ile standart

hata tahmini değeri bulunur (4-50). Eğer kalibrasyonda belirsizliği düşük sertifikalı ağırlıklar kullanılırsa ağırlıklardan gelen belirsizlik miktarı ihmal edilebilir.

$$m_i (1 - \rho_{hava} / \rho_{ağırlık}) = K_g V_i + O(\varepsilon) \quad (4-49)$$

$$u(R_T) \equiv SEE = g \sum_{i=1}^N \sqrt{(m_i - K_g V_i) / (N - 1)} \quad (4-50)$$

m_i : i. Kalibrasyon ağırlığı

V_i : i. Ağırlıkta üretilen voltaj değeri

K_g : Kalibrasyon katsayısı (sabit)

N : kalibrasyonda kullanılan ağırlık sayısı

4.2.1.4 Ölçüm (no:4)

4 numaralı belirsizlik bileşeni, ölçüm sisteminden kaynaklanan belirsizlikleri içermektedir. Elektronik ortamda analog olarak alınan sinyalin dijitale çevrilmesi ve ayrık zamanlı olarak kullanılmasında ve çevresel etmenler neticesinde ortaya çıkan bir belirsizlik türüdür [33].

Tek bir ölçüm yapıldığında seçilen zaman aralığında okunan ortalama değer eşitlik (4-51) kullanılarak belirlenir. Filtrelenmiş zaman içerisindeki mutlak standart sapma ise eşitlik (4-52) yardımıyla belirlenir. Bağlı standart belirsizlik ise eşitlik (4-53) yardımı ile belirlenir.

$$\hat{R}_T = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \tilde{R}_{Ti} \quad (4-51)$$

$$\hat{s} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\hat{R}_T - \tilde{R}_{Ti})^2} \quad (4-52)$$

$$\hat{s}' = \frac{\hat{s}}{\hat{R}_T} \quad (4-53)$$

$\tilde{R}_{Ti}$: filtrelenmiş veri aralığındaki i. veri değeri

$\hat{R}_T$: ortalama direnç değeri

n : toplam veri sayısı

Eğer örnekleme oranı ve sinyal uzunluğu, düşük filtreleme tekniği ile filtrelenirse standart sapma değeri düşük olacağından okuma hatası ihmal edilebilir. Belirsizlik analizi uygulanacak olan deney sisteminde, sonuçların standart sapması üzerinden

belirsizlik analizi uygulamak, tek bir okumanın veriler üzerinden standart sapma belirlemekten daha çok tercih edilmektedir [33,34]

Ayrıca, eğer ölçümler çok sayıda tekrarlanıyorsa tekil okuma değerleri değil her bir ölçümün ortalama değeri alınarak belirsizlik nicelik olarak belirlenir (4-54).

$$\bar{R}_T = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (\hat{R}_T)_j \quad (4-54)$$

$\bar{R}_T$: çok sayıda ölçümün ortalama direnç değeri

$(\hat{R}_T)_j$: j. tekil direnç değeri

N : tekrarlanan deney sayısı

Toplam N adet değer in standart sapması ise eşitlik (4-55) yardımıyla elde edilir.

$$\hat{s} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^N (\bar{R}_T - \hat{R}_{Tj})^2} \equiv u(\hat{R}_{Tj}) \quad (4-55)$$

Bunların sonucunda ise standart belirsizlik değerleri tek sayıda ölçüm için eşitlik (4-56) yardımıyla, çok sayıda ölçüm için ise eşitlik (4-57) yardımıyla elde edilir.

$$u(\hat{R}_T) \equiv s, \quad u'(\hat{R}_T) = \frac{s}{\hat{R}_T} \quad (4-56)$$

$$u(\bar{R}_T) \equiv \bar{s} = \frac{s}{\sqrt{N}}, \quad u'(\bar{R}_T) = \frac{s/\bar{R}_T}{\sqrt{N}} \quad (4-57)$$

Batıp–çıkma ve trim değerleri eğer ölçülüyor ise yukarıda bahsedilen yöntem kullanılarak belirsizlik değeri elde edilebilir.

Suyun yoğunluğu ve viskozitesi ITTC prosedürlerinden 7.5-02-01-03 kullanılarak elde edilir. Suyun sıcaklığı değişimi ± 0.1 °C civarında ise yoğunluk üzerinde etkisi ihmal edilebilir fakat bu küçük aralığın viskozite üzerindeki etkisi yoğunluğa olan etkisi ile karşılaştırıldığında fazla olmaktadır. Bu durumda model sürtünme direncini hesaplarken kullanılan Reynolds sayısını etkilemektedir. Etkilemesine rağmen diğer belirsizlik bileşenleri ile karşılaştırıldığında viskozite kaynaklı belirsizlik yine düşük kalacaktır [33].

Ölçüm hızı, istenilen Fr sayısında gerçekleşmemiş olabilir. İşlemlere başlamadan önce Fr sayısına karşılık gelen hız değerinden farklı olduğu durumlarda hız düzeltilmesi yapılmalıdır. Bu işlem için eşitlik (4-58) kullanılır.

$$\hat{R}_T = R_T - \delta R_T = R_T \left(1 - 2 \frac{\delta V}{V}\right) \quad (4-58)$$

4.2.1.5 Veri indirgeme (No:5)

ITTC tarafından yayımlanan, 2014 Belirsizlik Analizi prosedüründe sadece direnç ölçümü sırasında meydana gelen belirsizlikler incelenmektedir. Bu yüzden direnç deneylerinin sonucunda elde edilen form faktörü ve artık direnç katsayısı gibi değerler üzerinde veri indirgemediği dolayısıyla meydana gelen belirsizlikler ve sonuçların ekstrapolasyonu dikkate alınmamıştır [27,33].

4.2.2 Belirsizliğin hesaplanması

4.2.2.1 Form geometrisi

Modelin toplam direnci, belirli Froude sayılarında ıslak alanın ve Reynolds sayısının bir fonksiyonu olarak hesaplanır (4-59). Bu kısımda modelin üretimden kaynaklanan hatalarının modelin artık direnç katsayısı üzerinde bir etkisi yok olarak kabul edilir.

$$\begin{aligned} R_T &= f(s, Re, Fr) = C_T(0.5\rho V^2 S) \\ &= [(1+k)C_F(Re) + C_R(Fr)](0.5\rho V^2 S) \end{aligned} \quad (4-59)$$

- Islak yüzey alanı

$$\frac{\delta R_T(S)}{R_T} \approx \frac{\partial R_T}{\partial S} \frac{\delta S}{R_T} = \frac{\delta S}{S} \quad (4-60)$$

- Uzunluk (Reynolds sayısı)

$$\frac{\delta R_T(L)}{R_T} \approx \frac{\partial R_T}{\partial C_F} \frac{\partial C_F}{\partial Re} \frac{\partial Re}{\partial L} \frac{\delta L}{R_T} = \frac{C_F}{C_T} \frac{0.87}{\log_{10} Re - 2} \frac{\delta L}{L} \quad (4-61)$$

Eşitlik (4-60) ve (4-61) yardımıyla geometriye bağlı, belirsizlik bileşenleri sırasıyla eşitlik (4-62) ve (4-63) yardımıyla hesaplanır.

$$u'_{11}(R_T) = u'(S) \approx \frac{2}{3} u'(\Delta) \quad (4-62)$$

$$u'_{12}(R_T) = \frac{C_F}{C_T} \frac{0.87}{\log_{10} Re - 2} u'(L) \approx \frac{C_F}{C_T} \frac{0.29}{\log_{10} Re - 2} u'(\Delta) \quad (4-63)$$

Reynolds sayısı model direnç deneylerinde genellikle 10^7 mertebesinde. Yaklaşık olarak ise eşitlik (4-64) gibi hesaplanabilir.

$$u'_{12}(R_T) \sim 0.05 u'(\Delta) \quad (4-64)$$

Bu yüzden u'_{12} hata bileşeni u'_{11} ile karşılaştırıldığında ihmal edilebilir değerdedir. Bu yüzden direnç değerinin geometriden dolayı oluşan bileşik standart belirsizliği eşitlik (4-65) olarak kabul edilebilir.

$$u_1'(R_T) = \sqrt{(u'_{11}(R_T))^2 + (u'_{12}(R_T))^2} \approx \frac{2}{3} u'(\Delta) \quad (4-65)$$

Model deplasman ağırlığının hassasiyeti %0.1 oranındadır. Bu belirsizliğin ise direnç üzerinde oluşturacağı belirsizlik ise % 0.05 olacaktır. Bu belirsizlik bileşeni de direnç deneylerinde ihmal edilebilir seviyededir [33,35].

4.2.2.2 Dinamometre kalibrasyonu

Model deneyleri yapılırken alınan ölçüm de oluşan belirsizlik Bölüm 4.2.1.3'te anlatıldığı gibi hesaplanır. Eşitlik (4-50) kullanılarak bulunan standart hata tahmini kalibrasyondan kaynaklanan hataları içermektedir (4-66).

$$u_2(R_T) \equiv u(R_T) \quad (4-66)$$

4.2.2.3 Su sıcaklığı

Su sıcaklığı, suyun yoğunluk ve viskozite değerleri üzerinde etkili olduğundan direnç deneyi için bir belirsizlik oluşturmaktadır [33]. Eşitlik (4-61)'e benzer olarak aşağıda yer alan eşitlik (4-67) yardımıyla sıcaklığın değişimden dolayı viskozite üzerinde oluşacak muhtemel belirsizlik tahmin edilebilir.

$$\frac{\delta R_T(\gamma)}{R_T} \approx \frac{\partial R_T}{\partial C_F} \frac{\partial C_F}{\partial Re} \frac{\partial Re}{\partial \gamma} \frac{\delta \gamma}{R_T} = \frac{C_F}{C_T} \frac{0.87}{\log_{10} Re - 2} \frac{\delta \gamma}{\gamma} \quad (4-67)$$

Eşitlik (4-67) yola çıkarak, direnç üzerinde oluşturduğu bağıl standart belirsizliği ise eşitlik (4-68) yardımıyla bulunur.

$$u'_3(R_T) = \frac{C_F}{C_T} \frac{0.87}{\log_{10} Re - 2} u'(\gamma) \quad (4-68)$$

Fakat yukarıda hesaplanan viskoziteden kaynaklı belirsizlik değeri eğer termometrenin hassasiyeti ± 0.1 °C ise bu durumun sonuçlar üzerine etkisi çok sınırlı olacağından ihmal edilebilir. Buna ilave olarak yoğunluk için de benzer kabul yapılabilir [33].

4.2.2.4 Çekme arabası hızı

Çekme arabasının hızı direnç ölçümünde dinamik basınç ve Reynolds sayısından kaynaklanan iki çeşit belirsizlik oluşturmaktadır [33]. Bu belirsizlikler ise bağlı olarak eşitlik (4-69) ve (4-70) yardımıyla hesaplanır.

- Dinamik basınç etkisi

$$\frac{\delta R_T(V)}{R_T} \approx \frac{\partial R_T}{\partial (\rho V^2)} \frac{\partial \rho V^2}{\partial V} \frac{\delta V}{R_T} = 2 \frac{\delta V}{V} \quad (4-69)$$

- Reynolds sayısı

$$\frac{\delta R_T(V)}{R_T} \approx \frac{\partial R_T}{\partial C_F} \frac{\partial C_F}{\partial Re} \frac{\partial Re}{\partial V} \frac{\delta V}{R_T} = \frac{C_F}{C_T} \frac{0.87}{\log_{10} Re - 2} \frac{\delta V}{V} \quad (4-70)$$

Dinamik basınç ve Reynolds sayısından kaynaklanan belirsizliğin deney sistemi üzerinde oluşturacağı belirsizlik nicelik olarak tahmininin yapılması için sırasıyla eşitlik (4-71) ve (4-72) kullanılır.

$$u'_{41}(R_T) = 2u'(V) \quad (4-71)$$

$$u'_{42}(R_T) = \frac{C_F}{C_T} \frac{0.87}{\log_{10} Re - 2} \frac{\delta V}{V} u'(V) \quad (4-72)$$

Eşitlik (4-71) ve (4-72) birbirleriyle karşılaştırıldığında u'_{42} değeri u'_{41} değerine göre çok küçük olduğundan ihmal edilebilir. Buradan yola çıkarak hızdan kaynaklanan bileşik standart belirsizlik, eşitlik (4-73) yardımıyla yaklaşık olarak bulunur.

$$u_4'(R_T) = \sqrt{(u'_{41}(R_T))^2 + (u'_{42}(R_T))^2} \approx 2u'(V) \quad (4-73)$$

4.2.2.5 Tekrarlanan testler

Deney düzeneği ve şartları sabit tutularak, aynı deneyin tekrarlandığı durumlarda sonuçlarda bir sapma meydana gelir. Bu sapmadan dolayı ortaya çıkan belirsizlik, ortalama direnç değeri ve standart sapma değeri sırasıyla eşitlik (4-54) ve (4-55) Bölüm 4.2.1.4'te anlatılmıştı. Eğer deney tekrarlanmamış ise önceden yapılmış benzer modellerin belirsizlik değeri kullanılarak B-tipi belirsizlik yapılabilir [33].

4.2.2.6 Bileşik standart belirsizlik

Önemli bütün belirsizlik kaynakları, hesaplanan değerler üzerinde bir belirsizlik oluşturmaktadır. Belirsizlik analizi sayesinde sistem içerisinde mevcut hata

kaynaklarının ne kadar belirsizlik oluşturduğu yorumu yapılabildiğinden baskın olan belirsizlik kaynaklarının incelenmesi ve nicelik olarak hesaplanıp bileşik standart belirsizliğin hesaplanmasıyla sonuçlar tahmin edilebilir. Standart belirsizlik bileşenleri sırasıyla duyarlılık katsayıları ile çarpılır ve devamında da karelerinin karekökleri yöntemi ile bileşik toplam belirsizlik hesaplanır (4-74) [33]. İstenilen güvenilirlik seviyesi ile de bileşik standart belirsizlik değeri çarpılarak genişletilmiş standart belirsizlik bulunur (4-75).

$$u_c'(R_T) = \sqrt{(u_1')^2 + (u_2')^2 + (u_3')^2 + (u_4')^2 + (u_A')^2} \quad (4-74)$$

$$U_p = k_p \times u_c \quad (k_p \approx 2, \% 95 \text{ güvenirlilik için}) \quad (4-75)$$

Genişletilmiş belirsizlik değeri direnç değerine ve toplam direnç katsayısı değerine eklenir ve çıkartılır.

Raporlama açısından dikkate edilmesi gereken bir husus vardır. Tekrarlanan testler içerisinde bulunan değerlerin birbiriyle kıyaslanabilmesi ve deney suyu sıcaklığında (t_i) bir belirsizlik tahmininde bulunabilmesi için deney suyu sıcaklıklarının ortalaması ($\bar{t}$) bulunarak bütün değerler o sıcaklık değerine getirilerek sıcaklık düzeltmesi yapılır. Bu işlem sonucunda belirlenen belirsizlik değeri, bütün sıcaklıklarda eşit kabul edildiğinden, deney sıcaklığında bulunan değerlerin standart su sıcaklığına (15 °C) göre tekrar hesaplanır ve nihai sonuç olarak yazılır. Hem ortak su sıcaklığına getirmek hem de standart sıcaklığa getirmek için eşitlik (4-76) ve (4-77) kullanılarak sıcaklık düzeltmesi yapılır [34].

$$\hat{R}_T = R_T + \Delta R_T \quad (4-76)$$

$$\hat{R}_T / R_T = \rho(\bar{t}) / \rho(t_i) \left[1 + \frac{C_F(\bar{t}) - C_F(t_i)}{C_T(t_i)} \right] \quad (4-77)$$

$\hat{R}_T$: düzeltmek istenilen direnç değeri

R_T : deney suyu sıcaklığındaki direnç değeri

$\rho(\bar{t})$: düzeltmek istenilen su sıcaklığının yoğunluğu değeri

$\rho(t_i)$: deney suyu sıcaklığındaki yoğunluk değeri

$C_F(\bar{t})$: düzeltmek istenilen sıcaklıktaki sürtünme direnci

$C_F(t_i)$: deney suyu sıcaklığındaki sürtünme direnci

$C_T(t_i)$: deney suyu sıcaklığındaki toplam direnç katsayısı

Gerekli olduğu durumlar hız ve sıcaklık düzeltmesi yapılmalıdır. Hız ve sıcaklık için sırasıyla (4-58) ve (4-77) kullanılarak direnç değeri istenilen hıza ve sıcaklığa çevrilir. Düzetilmiş direnç değeri ise eşitlik (4-78) gösterilmektedir [34].

$$\hat{R}_T = R_T - \delta R_T + \Delta R_T \quad (4-78)$$

Ayrıca, belirsizlik tahminini basitleştirmek için baskın olan belirsizlik bileşenlerinin belirlenmesi önemlidir. Geriye kalan küçük bileşenler toplam belirsizliğe önemli bir katkı sağlamayacağı için belirsizlik tahmininde ihmal edilebilir. Bileşenlerin baskın veya düşük şekilde sonucu etkilediğini yorumlamak ve belirlemek için eşitlik (4-79) kullanılır. Eğer baskın bileşen (U_0) ile düşük b

ileşen (U_1) arasındaki fark 3 kattan fazla ise U_1 bileşeni ihmal edilebilir (4-79) [36].

$$U_1 < 1/3 U_0 \quad (4-79)$$

Eğer laboratuvar bünyesinde deneyleri yapılan bir modele belirsizlik analizi uygulanacaksa, bütün belirsizlik bileşenleri listelenmelidir. Bir diğer adımda listelenen bileşenler nicelik olarak belirlenmeli ve devamında bileşik ve genişletilmiş belirsizlik değerleri bulunmalıdır.

Çizelge 4.1:2014 ITTC yöntemi ile belirsizlik bileşenleri ve hesaplanması [34].

Belirsizlik ve bileşeni			Denklem	Duyarlılık Katsayısı	Tip
Form	Deplasman $u'(\Delta)$	u_1'	4-65	2/3	B
Dinamometre	Kalibrasyon $u'(R_T)$	u_2'	4-66	1	A
Su sıcaklığı	Viskozite $u'(\Delta)$	u_3'	4-68	$\frac{C_F}{C_T} \frac{0.87}{\log_{10} Re - 2}$	B
Hız	Dinamik basınç $u'(\gamma)$	u_4'	4-73	2	B
Tekrarlanan testler	Tekrarlanabilirlik $u'(R_T)$	u_A'	4-55	1	A
Bileşik belirsizlik	$u_c'(R_T) = \sqrt{(u_1')^2 + (u_2')^2 + (u_3')^2 + (u_4')^2 + (u_A')^2}$				
Genişletilmiş belirsizlik	$U_P = k_p \times u_c$				

5. DENEY SONUÇLARI VE BELİRSİZLİK ANALİZİ

Gemi direnci, dizayn spirali içerisinde önemli ve ilk sıralarda yer alan bir konudur. Dizaynın diğer aşamalarını da baskın şekilde etkileyecek olan bu konu için yapılan çalışmalar ile elde edilen sonuçların güvenilirliği kontrol edilmelidir.

Sonuç belirsizliğinin nicelik olarak belirlenmesi için ITTC tarafından yayımlanan yöntemler yayımlanmıştır. Bunlardan biri 2002 yılında yayımlanmıştır. 2008-2014 yıllarında birbirinin devamı olan prosedürler yayımlanmıştır. Özellikle 2002 ITTC prosedürünün bazı sistematik belirsizliklerin nicelik olarak tahmin edilmesinde eksiklikleri vardır. Buna en güzel örnek; prosedürün hızlı tekne formu üzerinde uygulandığında form boyutlarından dolayı özellikle ıslak alan üzerinde oluşturduğu baskın olan belirsizliktir. Oysaki ana boyutları büyük olan KCS modeline uygulandığında ıslak alan belirsizliği kabul edilebilir seviyeyedir. Bu gibi sebeplerden dolayı ilk önce 2008 yılında revize edilen prosedür 2014 yılındaki 27. ITTC konferansında güncellenmiştir [36]. Son prosedür ile belirsizlik kaynakları içerisinde baskın olan bileşenler dikkate alınmıştır.

ITTC direnç komitesinde yer alan Prof. Dr. Şakir Bal ile görüşmelerimde mevcut prosedüründe geçici özellikte olduğu ve geliştirileceği üzerine alınan bilgiler doğrultusunda bu konuda yayımlanan iki ana prosedürün beraber incelenmesi ve karşılaştırma yapılarak ileride yeni yöneme katkıda bulunabilmek amaçlanmıştır [48]. Bu çalışmanın bir diğer amacı da Ata Nutku Gemi Model Deney Laboratuvarı'nda yapılan deneylerden elde edilen sonuçların güvenilirliğinin incelenmesi devamında bir hata aralığı tahmininde bulunulmasıdır. Bunun için laboratuvar imkanları ve deney düzeneğinin sonuçlara olan etkisi de incelenmiştir.

Gemi Model Deney Laboratuvarı'nın temelleri 1953 yılında Beylerbeyi Sarayının bahçesinde yer alan süs havuzlarında atılmıştır. Ord. Prof. Ata Nutku ile çalışmalar İTÜ Taşkışla Yerleşkesinde kurulan laboratuvar ile devam etmiştir. 1989 yılında ise laboratuvar İTÜ Ayazağa Yerleşkesi'ne taşınmıştır. Halen ülkemizde alanında ilk ve tek deney laboratuvarı olma özelliğini taşımaktadır. Kullanılan çekme havuzunun boyu 160, su derinliği 3.5, genişliği 6 metredir. 2014 yılı sonu itibariyle toplamda

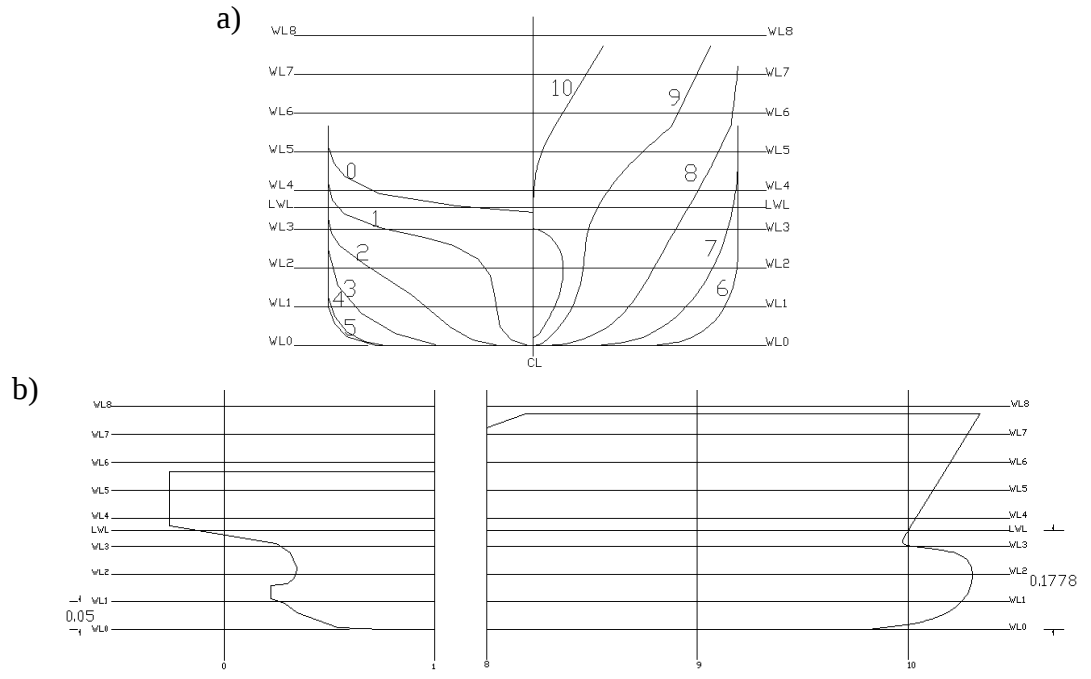
400'ün üzerinde model deneyi gerçekleştirilen bu laboratuvarında direnç, sevk, iz, akım gözleme deneyleri sıkça yapılmaktadır.

5.1 Deplasman Tipi (KCS) Model Örneğinde Belirsizlik Analizi Uygulanması

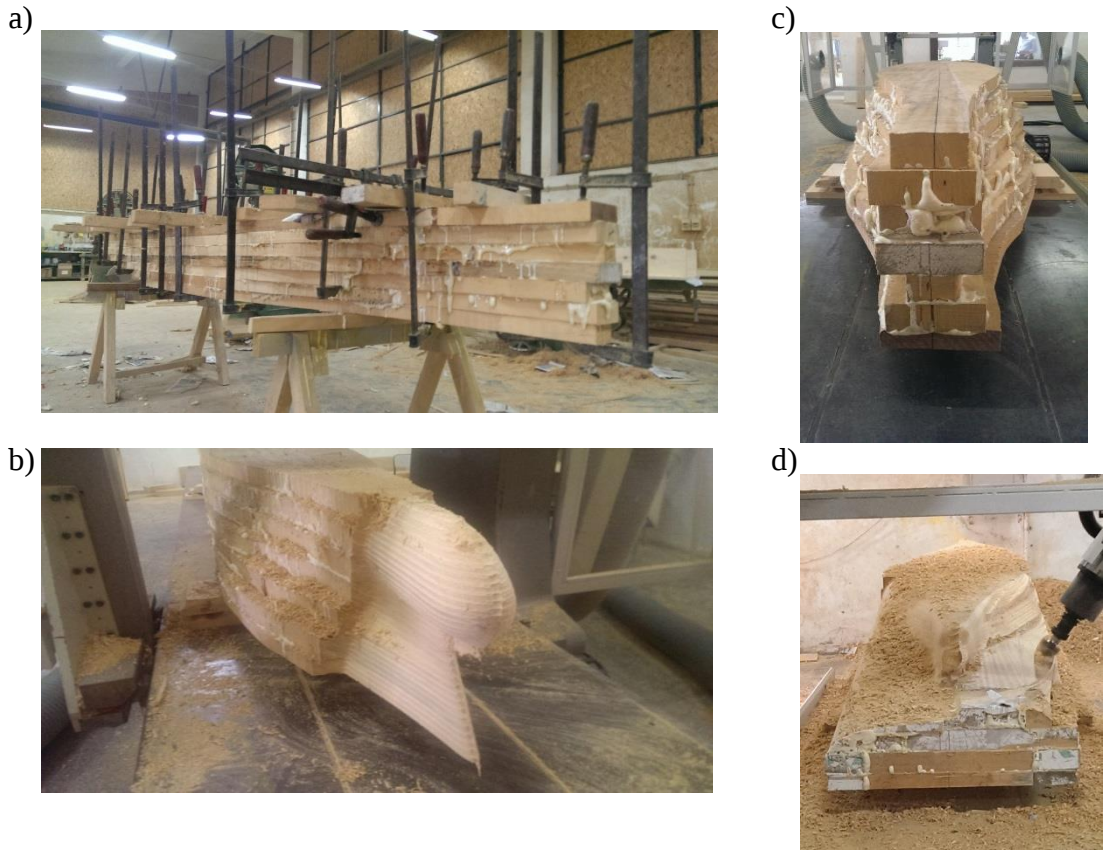
“Kriso Container Ship (KCS)”, “Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering” tarafından, balblı modern bir konteynır gemisi için hem fiziksel akışın yorumlanması hem de Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) çalışmalarının doğrulanması amacıyla tasarlanmış bir formdur. Gemi ölçeğinde üretim gerçekleştirilmemiş olup bilgisayar ortamında ve ITTC tarafından akredite kabul edilen birçok çekme havuzunda sıkça kullanılan bir modeldir. KCS modeli telifsiz ve akademik çalışmalarda yaygın olarak kullanılan bir form olması sebebiyle seçilmiştir. KCS modeli, İstanbul Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Projeleri Birimi'nin 14/10/2014 tarih ve 8080 sayılı onaya istinaben Yüksek Lisans Projelerini Destekleme fonundan maddi kaynak ayrılarak İTÜ Ata Nutku Gemi Model Deney Laboratuvarı'nda üretilmiş olup yine deneyleri aynı laboratuvar bünyesinde tamamlanmıştır. KCS formunun model ölçeğindeki değerleri Çizelge 5.1'te gösterilmektedir [49]. Deneyleri yapılan modelin üretimi, astar ve boya işlemleri, model görünüşleri ve türbülans yapıcılarının resimleri Şekil 5.1-5.2-5.3-5.4'te yer almaktadır. İmal edilen model, İTÜ Ata Nutku Gemi Model Deney Laboratuvarı kayıtlarında M392 olarak isimlendirilmektedir.

Çizelge 5.1: Deplasman tipi (KCS) formun ana parametreleri..

Açıklama	Simge	Değer (birim)
Benzerlik ölçeği	λ	60.75
Dikmeler arası boy	L_{PP}	3.786 (m)
Su hattı boyu	L_{WL}	3.826 (m)
Islak boy	L_{WS}	3.826 (m)
Genişlik	B	0.53 (m)
Su çekimi yüksekliği	T	0.178 (m)
Islak Alan (dümen dahil)	S	2.585 (m ²)
Su hattı alanı	A_{WP}	1.667 (m ²)
Deplasman hacmi	∇	0.232 (m ³)
Blok katsayısı	$C_B = \nabla / L_{PP} B T$	0.643
Su hattı katsayısı	$C_{WP} = A_{WP} / L_{PP} B$	0.822
Islak alan katsayısı	$C_S = S / \sqrt{\nabla L_{PP}}$	2.758



Şekil 5.1: KCS endaze planı. a) En kesitleri resmi. b) Profil resmi.

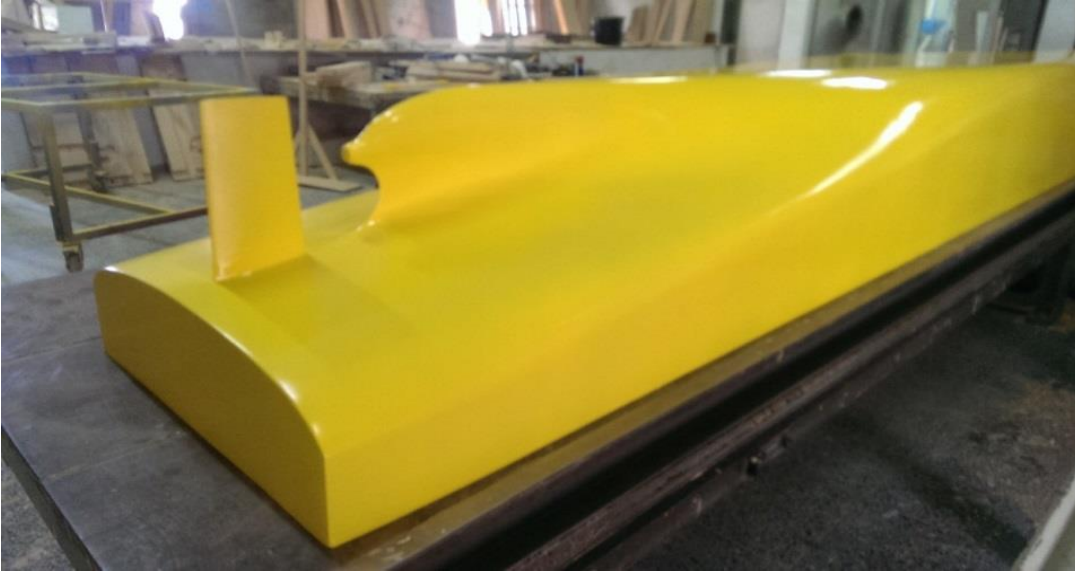


Şekil 5.2: KCS modelinin üretim aşamaları. a) Kaba modelin oluşturulması. b) Sıkılmış model. c) Baş kısmın işlenmesi. d) Kık kısmın işlenmesi.

a)



b)

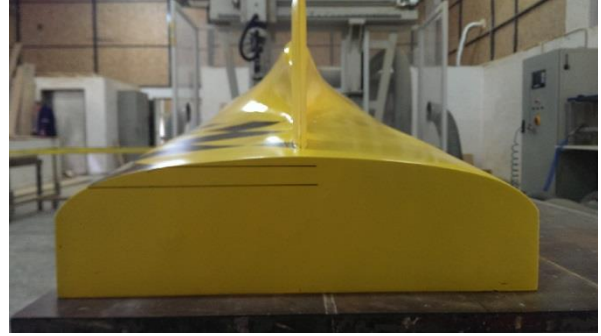


Şekil 5.3: KCS modelinin üretim aşamaları. a)Astarlama işlemi b) Boya işlemi.

a)



b)



c)



Şekil 5.4:KCS modelinin genel görünüşü. a)Baş. b) Kıç. c) Profil.

a)



b)



Şekil 5.5:Türbülans yapıcı pinlerin baş ve dümen üzerine yerleşimi.

5.1.1 2002 ITTC metodu ile belirsizliğin hesaplanması

Bölüm 4.2’te anlatılan, ITTC tarafından 2002 yılında yayımlanan ve gemi direncinin belirsizliğinin tahmin edilmesini sağlayan prosedür, deney sonucu elde edilen sonuçlara uygulanmıştır. Belirsizlik kaynakları sınıflandırılarak incelemeye tabi tutulmuştur. Blokaj ve duvar etkisi, ölçek etkisinin form faktörü üzerine etkisi, takıntı direnci gibi özel araştırma gereken ve belirsizliğe olan katkısının tahmin edilmesi zor olan sorunlar bu kısımda incelemeye alınmamıştır. Sıcaklık, direnç katsayılarının belirlenmesinde önemli bir parametredir. O yüzden sonuçların belirli bir standart halinde verilmesi için deney suyu sıcaklığında bulunan sonuçlar, 15 °C sıcaklığa göre düzeltilmiş ve belirsizlik değeri bütün sıcaklıklarda eşit kabul edilmiştir (5-1).

$$U_{CT}^{Tm} = U_{CT}^{15^{\circ}\text{C}} \quad (5-1)$$

U_{CT}^{Tm} : Deney suyu sıcaklığındaki genişletilmiş belirsizlik değeri.

$U_{CT}^{15^{\circ}\text{C}}$: Sıcaklık düzeltmesi yapılan C_T değerinin genişletilmiş değeri.

ITTC 2002 metoduna göre yapılacak olan işlemler Bölüm 4.1’te ayrıntılı olarak incelendiğinden bu kısımda sonuçlar üzerinde belirsizlik oluşturan etkenlere nicelik olarak yer verilmiştir.

Gemi direncinin belirsizliği direnç eğrisi boyunca farklılıklar içerdiğinden belirsizlik tahminleri düşük ($Fr=0.16$), orta ($Fr=0.21$) ve yüksek ($Fr=0.26$) Froude sayılarında incelenerek belirsizliğin Froude sayısına göre nasıl davranış gösterdiği incelenmiştir.

Sistemik hata grupları (geometri, hız, direnç, sıcaklık/yoğunluk/viskozite) içerisinde yer alan her bir hata bileşeni kalibrasyon, veri toplama, veri indirgeme, kavramsal hata gibi alt başlıklara ayrılırlar. Deplasman tip bir teknenin (KCS) deneyler esnasında değişik Fr sayılarında meydana gelen sistemik hataları Çizelge 5.2’de yer almaktadır. Rastlantısal hatanın nicelik olarak belirlenmesi için bulunan değerler Çizelge 5.3’de yer almaktadır.

Deneylerde direnç eğrisi toplam 12 defa tekrarlanarak çıkartılmıştır. Ayrıca deneyler 2014 yılı Temmuz ayında yapılmıştır.

Çizelge 5.2: Sistematik belirsizlik kaynaklarının tahmin edilmesi.

Hata	Denklem	Fn=0.16			Fn=0.21			Fn=0.26		
		Değer	Yüzde değeri		Değer	Yüzde değeri		Değer	Yüzde değeri	
Model boyu (m)		3.786			3.786			3.786		
B_L	4-1	0.002	0.05	% L_{pp}	0.002	0.05	% L_{pp}	0.002	0.05	% L_{pp}
Islak Alan (m²)		2.585			2.585			2.585		
B _{S1}	4-8	2.80E-03	57.65	% B _S ²	2.80E-03	57.65	% B _S ²	2.80E-03	57.65	% B _S ²
B _{S2}	4-9b	2.40E-03	42.35	% B _S ²	2.40E-03	42.35	% B _S ²	2.40E-03	42.35	% B _S ²
B_S	4-10	3.69E-03	0.14	% S	3.69E-03	0.14	% S	3.69E-03	0.14	% S
Model hızı (m/s)		0.975			1.279			1.584		
B _{C1} (bit)	4-24	1	17.99	% B _C ²	1	17.99	% B _C ²	1	17.99	% B _C ²
B _{C2} (bit)	4-25	1.5	40.47	% B _C ²	1.5	40.47	% B _C ²	1.5	40.47	% B _C ²
B _{C3} (bit)	4-25	1.5	40.47	% B _C ²	1.5	40.47	% B _C ²	1.5	40.47	% B _C ²
B _{C4} (bit)	4-27	0.25	1.12	% B _C ²	0.25	1.12	% B _C ²	0.25	1.12	% B _C ²
B_C(bit)	4-28	2.358	0.21	% c=1138	2.358	0.21	% c=1138	2.358	0.21	% c=1138
B_D(m)	4-22	1.15E-04	0.03	% D=0.381	1.15E-04	0.03	% D=0.381	1.15E-04	0.03	% D=0.381
B_{Δr}(a)	4-23	1.03E-05	0.01	% Δt=0.1s	1.03E-05	0.01	% Δt=0.1s	1.03E-05	0.01	% Δt=0.1s
θ _c ^V B _c (m/s)		3.53E-03	97.69	% B _V ²	3.53E-03	97.69	% B _V ²	3.53E-03	97.69	% B _V ²
θ _D ^V B _D (m/s)		5.14E-04	2.07	% B _V ²	5.14E-04	2.07	% B _V ²	5.14E-04	2.07	% B _V ²
θ _{Δt} ^V B _{Δt} (m/s)		-1.75E-04	0.24	% B _V ²	-1.75E-04	0.24	% B _V ²	-1.75E-04	0.24	% B _V ²
B_V(m/s)	4-29	3.57E-03	0.23	% V	3.57E-03	0.23	% V	3.57E-03	0.23	% V

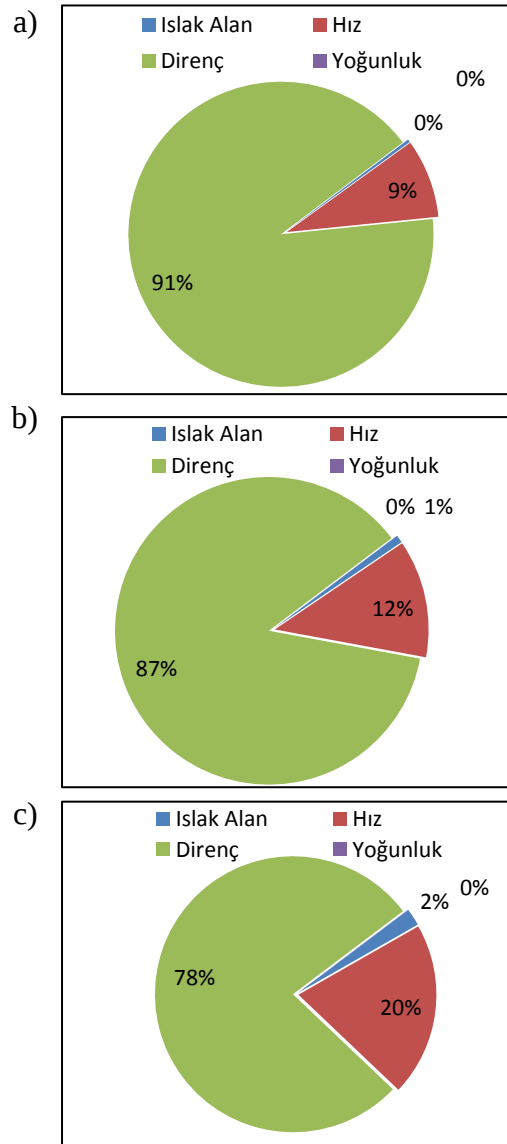
Çizelge 5.2 (devam): Sistematiik belirsizlik kaynaklarının tahmin edilmesi.

Hata	Denklem	Fn=0.16			Fn=0.21			Fn=0.26		
		Değer	Yüzde değeri		Değer	Yüzde değeri		Değer	Yüzde değeri	
Model Direnci (N)		5.07			8.29			13.90		
B _{Rx1}	4-30	2.54E-04	0.00	% B _{Rx} ²	4.14E-04	0.00	% B _{Rx} ²	6.95E-04	0.00	% B _{Rx} ²
B _{Rx2}	4-31	4.69E-02	14.62	% B _{Rx} ²	4.69E-02	14.62	% B _{Rx} ²	4.69E-02	14.62	% B _{Rx} ²
B _{Rx3}	4-32	4.83E-05	0.00	% B _{Rx} ²	7.89E-05	0.00	% B _{Rx} ²	1.32E-04	0.00	% B _{Rx} ²
B _{Rx4}	4-33	1.13E-01	85.38	% B _{Rx} ²	1.13E-01	85.38	% B _{Rx} ²	1.13E-01	85.37	% B _{Rx} ²
B _{Rx5}	4-34	0.00E+00	0.00	% B _{Rx} ²	0.00E+00	0.00	% B _{Rx} ²	0.00E+00	0.00	% B _{Rx} ²
B_{Rx}	4-35	0.12	2.42	% R_X	0.12	1.48	% R_X	0.12	0.88	% R_X
Yoğunluk (kg/m³)		996.905			996.905			996.905		
Sıcaklık (derece)		22.5			22.5			22.5		
B _T	4-11	0.5	2.22	% T=	0.5	2.22	% T=	0.5	2.22	% T=
B _{ρ1}	4-13	1.15E-01	100.00	% B _ρ ²	1.15E-01	100.00	% B _ρ ²	1.15E-01	100.00	% B _ρ ²
B _{ρ2}	4-14	0.00E+00	0.00	% B _ρ ²	0.00E+00	0.00	% B _ρ ²	0.00E+00	0.00	% B _ρ ²
B _{ρ3}	4-15	0.00E+00	0.00	% B _ρ ²	0.00E+00	0.00	% B _ρ ²	0.00E+00	0.00	% B _ρ ²
B_ρ (kg/m³)	4-16	0.12	0.01	% ρ	0.12	0.01	% ρ	0.12	0.01	% ρ
Viskozite (m/s²)		9.46E-07			9.46E-07			9.46E-07		
B _{γ1}	4-18	1.07E-08	100.00	% B _γ ²	1.07E-08	100.00	% B _γ ²	1.07E-08	100.00	% B _γ ²
B _{γ2}	4-19	0.00E+00	0.00	% B _γ ²	0.00E+00	0.00	% B _γ ²	0.00E+00	0.00	% B _γ ²
B_γ (m/s²)	4-20	1.07E-08	1.13	% γ	1.07E-08	1.13	% γ	1.07E-08	1.13	% γ

Çizelge 5.2 (devam): Sistematik belirsizlik kaynaklarının tahmin edilmesi.

Hata	Denklem	Fn=0.16			Fn=0.21			Fn=0.26		
		Değer	Yüzde değeri		Değer	Yüzde değeri		Değer	Yüzde değeri	
Toplam Direnç Katsayısı		4.14E-03			3.93E-03			4.30E-03		
$\theta_{sB_s}^{CT}$		-5.89E-06	0.32	% B_{CT}^2	-5.61E-06	0.81	% B_{CT}^2	-6.13E-06	2.03	% B_{CT}^2
$\theta_{vB_v}^{CT}$		-3.02E-05	8.36	% B_{CT}^2	-2.20E-05	12.37	% B_{CT}^2	-1.94E-05	20.34	% B_{CT}^2
$\theta_{RxB_{Rx}}^{CT}$		9.99E-05	91.32	% B_{CT}^2	5.82E-05	86.82	% B_{CT}^2	3.79E-05	77.61	% B_{CT}^2
$\theta_{\rho B_{\rho}}^{CT}$		-4.78E-07	0.00	% B_{CT}^2	-4.55E-07	0.01	% B_{CT}^2	-4.97E-07	0.01	% B_{CT}^2
B_{CT}	4-39	1.05E-04	2.52	% C_T	6.24E-05	1.59	% C_T	4.31E-05	1.00	% C_T

Şekil 5.6’da deney sisteminde toplam 3 Fr sayısı için sistematik belirsizlik kaynaklarının bileşenleri ve yüzde olarak değerleri mevcuttur. Burada dikkat edilmesi gereken kısım 3 hızında sistematik belirsizlik değerleri birbirinden farklı olduğu için sonuçlar kendi içerisinde karşılaştırılması daha sağlıklıdır. Sistematik belirsizlik bileşenlerinden özellikle direnç belirsizliği baskın olarak yer almaktadır. Yoğunluk ve ıslak alandan kaynaklanan belirsizliklerin toplam sistematik belirsizliğe olan katkısı çok düşüktür. Hatta ihmal edilebilir düzeydedir. Ayrıca genel olarak bakıldığında ise direnç ölçümünden kaynaklanan belirsizlik, dinamometrenin yüksek hızlarda sapması düşük olan değerler verdiği görülmektedir.



Şekil 5.6: KCS için Toplam direnç katsayısının sistematik (bias) hata bileşenleri.
a) Fr=0.16 için. b)Fr=0.21 için. c)Fr=0.26 için.

Çizelge 5.3: Rastlantısal belirsizlik (kesinlik).

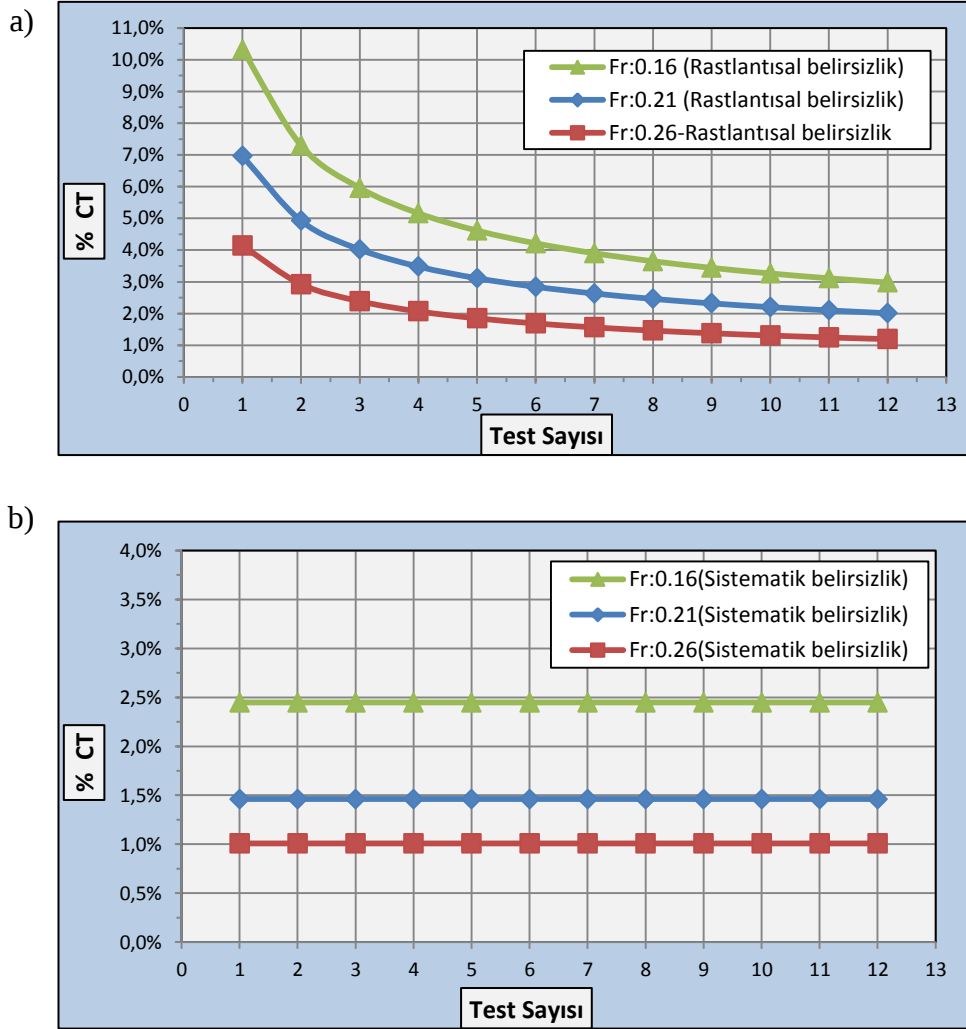
KCS-C _T (15 °C)	Fr=0.16	Fr=0.21	Fr=0.26
Deney no	C _T	C _T	C _T
1	4.34E-03	4.05E-03	4.31E-03
2	4.36E-03	3.92E-03	4.45E-03
3	4.48E-03	4.03E-03	4.39E-03
4	4.27E-03	3.99E-03	4.39E-03
5	4.50E-03	4.12E-03	4.43E-03
6	4.20E-03	4.10E-03	4.56E-03
7	4.29E-03	4.13E-03	4.57E-03
8	4.44E-03	4.21E-03	4.45E-03
9	4.51E-03	4.35E-03	4.52E-03
10	4.07E-03	3.92E-03	4.36E-03
11	3.90E-03	3.90E-03	4.39E-03
12	3.89E-03	3.88E-03	4.35E-03
Ortalama (2-23)	4.27E-03	4.05E-03	4.43E-03
S. Sapma (2-24)	2.20E-04	1.41E-04	8.38E-05

Çizelge 5.4: Genişletilmiş belirsizlik değeri (k=2).

Hata	Denk lem	Fr=0.16			Fr=0.21			Fr=0.26		
		Değer	Yüzde değeri		Değer	Yüzde değeri		Değer	Yüzde değeri	
Toplam direnc katsayısı		4.27E-03			4.05E-03			4.43E-03		
B _{CT}	4-39	1.05E-04	2.45	% C _T	6.24E-05	1.54	% C _T	4.31E-05	0.97	% C _T
P _{CT} (S)	2-23	4.41E-04	10.32	% C _T	2.82E-04	6.96	% C _T	1.68E-04	3.78	% C _T
P _{CT} (M)	2-24	1.27E-04	2.98	% C _T	8.14E-05	2.01	% C _T	4.84E-05	1.09	% C _T
U _{CT} (S)	4-43a	4.53E-04	10.61	% C _T	2.89E-04	7.13	% C _T	1.73E-04	3.90	% C _T
U _{CT} (M)	4-43a	1.65E-04	3.86	% C _T	1.03E-04	2.53	% C _T	6.47E-05	1.46	% C _T

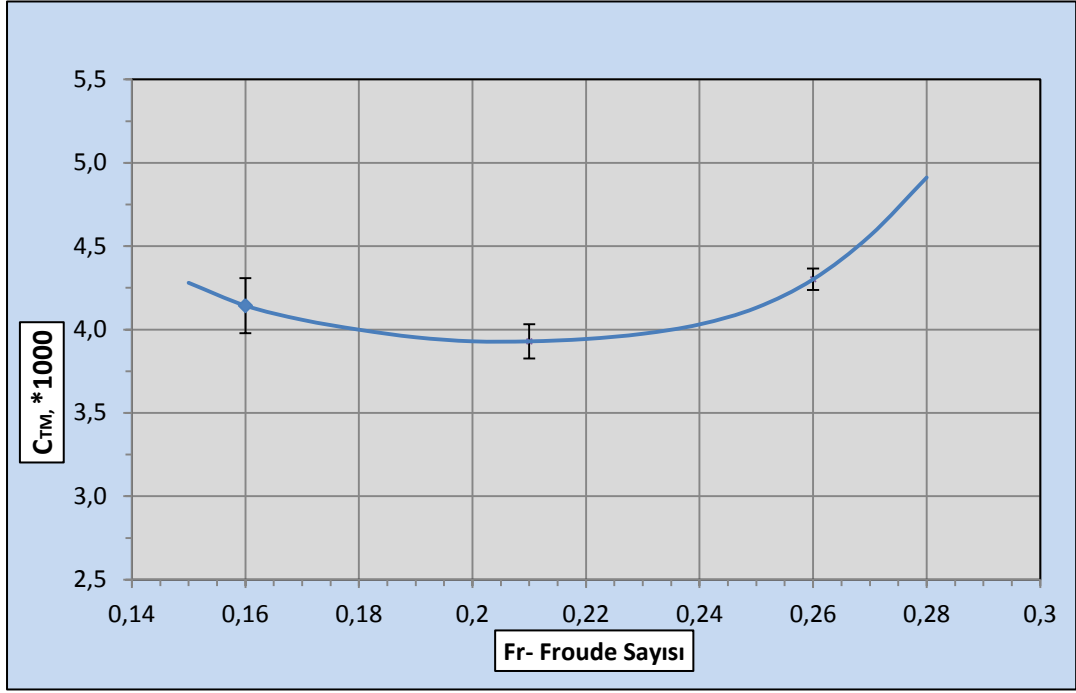
Çizelge 5.4'te yer alan belirsizliklerde yer alan S indisi, deneyin tek defa yapıldığını, M ise deneyin çok defa tekrarlandığı anlamına gelmektedir. Bu çalışmada KCS modeli için deney toplam 12 defa yapılmıştır (M=12). Rastlantısal belirsizlik değeri, deney sayısı ile ilgili olduğundan gerçek sonuca ulaşmak için deney sayısının çok fazla sayıda yapılması belirsizlik değerinin düşmesinde etkili olacaktır.

Sonuçlara 2002 ITTC yöntemi uygulandığında elde edilen belirsizlik ana bileşenleri Şekil 5.7’de gösterilmektedir. Şekil 5.7 a-b incelendiğinden laboratuvar ‘da kullanılan ölçme sistemi yüksek hızlara çıkıldıkça belirsizliklerinin etkisi bağıl olarak düştüğünden daha hassas sonuçlar elde edilmektedir. Aynı zamanda deney sayısına bağlı olarak değişen rastlantısal belirsizliğin değişimi Şekil 5.7-a incelenerek daha güzel anlaşılabilir. Sistemik hatanın ise deney düzeneğinde içerisinde sürekli olarak sabit kabul edilerek hesaplandığından grafik değerleri bütün test sayılarında aynı çıkmıştır. Ayrıca KCS model deneylerinde kullanılan tek bileşenli dinamometrenin düşük hızlarda hassasiyetinin düştüğü ve belirsizliği artırdığı yorumu da yapılabilir.



Şekil 5.7: Sistemik ve rastlantısal hatalarının deney sayısına bağlı değişimi. a) Rastlantısal (kesinlik). b) Sistemik (eğilim).

Sonuçların daha iyi yorumlanabilmesi için KCS modelinin C_T ve hesaplanan belirsizlik değerlerinin hata çubuğu şeklinde Şekil 5.8’de gösterilmiştir.



Şekil 5.8: KCS formu C_T grafiği ve C_T hata çubukları (2002 ITTC).

5.1.2 2014 ITTC metodu ile belirsizliğin hesaplanması

2014 yılında yayımlanan bu yöntem ile belirsizlik iki bileşene ayrılmadan bir başlık altında toplanarak incelenmiştir. Ayrıca sonuçlar analiz edildiğinde belirsizlik bileşenlerinin tek tek değil sadece baskın olanlar bileşenleri dikkate alınarak belirsizlik tahminde bulunulmuştur. Belirsizlik değeri mevcut ortalama havuz suyu sıcaklığı dikkate alınarak bulunmuştur. İşlem sonucunda belirsizlik, tüm sıcaklık değerlerinde sabit kabul edilmiştir. Direnç değerleri ITTC tarafından önerilen standart sıcaklık olan 15 °C'ye çevrilmiştir [33]. Çizelge 5.5'de her bir deney takımı sonucunda elde edilmiş direnç değerleri ve direnç değerlerinin ortalaması, standart sapması yer almaktadır. Çizelge 5.6'da ise belirsizlik bileşenleri incelenmiş ve nicelik olarak değerlerinin tahmini yapılmıştır. Mevcut belirsizlik bileşenleri eşitlik (4-79) kullanılarak ihmal edilebilir olan bileşenler belirlenmiş ve arda kalanlar dikkate alınarak bileşik standart belirsizlik değeri tahminen bulunmuştur (Çizelge 5.6). Çizelge 5.7'de kullanıcı tarafından belirlenen güvenilirlik katsayısı (mühendislik problemlerinde genellikle 2 alınır.) dikkate alınarak genişletilmiş belirsizliğin tahmini yapılmıştır.

Çizelge 5.5: KCS direnç değerleri.

KCS-R _T (N) (22.5 °C)	Fr=0.16	Fr=0.21	Fr=0.26
1	5.156	8.284	13.529
2	5.182	8.022	13.943
3	5.325	8.253	13.764
4	5.072	8.170	13.781
5	5.347	8.434	13.905
6	4.991	8.381	14.311
7	5.092	8.440	14.347
8	5.271	8.621	13.969
9	5.361	8.898	14.190
10	4.829	8.012	13.677
11	4.627	7.988	13.783
12	4.616	7.932	13.644
Ortalama	5.073	8.286	13.904
S. Sapma	5.16%	3.48%	1.89%
u'_A (N=1)	5.16%	3.48%	1.89%
u'_A (N>1)	1.49%	1.00%	0.55%

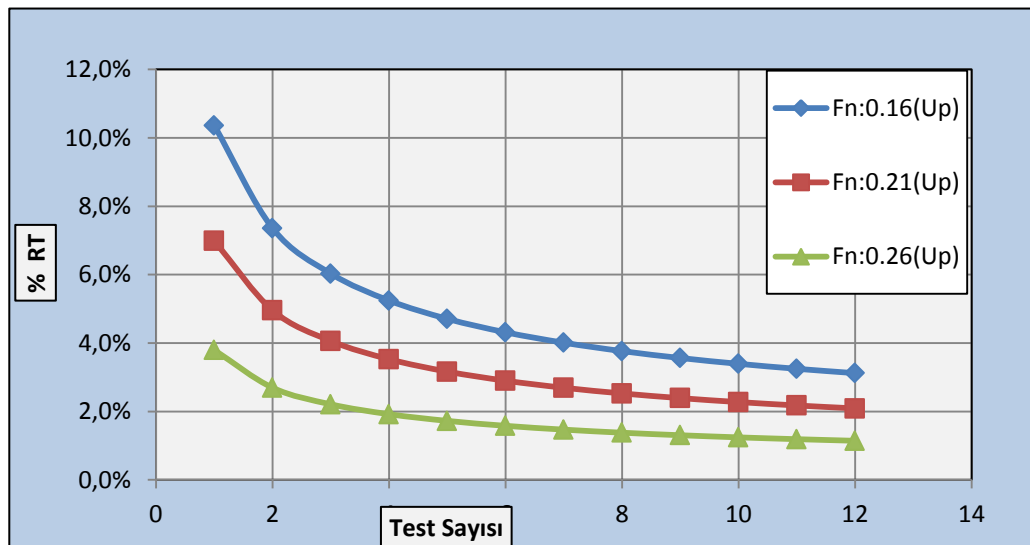
Çizelge 5.6: Bileşik standart belirsizliğin hesaplanması.

KCS-R _T (22.5 °C)	Tip	Denklemler No	Fr:0.16		Fr:0.21		Fr:0.26	
			Belirsizlik	Yorum	Belirsizlik	Yorum	Belirsizlik	Yorum
Islak alan	B	4-65	0.009%	İhmal	0.009%	İhmal	0.009%	İhmal
Hız	B	4-73	0.067%	İhmal	0.067%	İhmal	0.067%	İhmal
Su Sıcaklığı	B	4-68	0.081%	İhmal	0.079%	İhmal	0.068%	İhmal
Dinamometre	A	4-66	0.462%	Düşük	0.283%	Düşük	0.169%	Düşük
N=1; Standart sapma	A	4-55	5.16%	Baskın	3.48%	Baskın	1.89%	Baskın
N=1; Bileşik Belirsizlik		4-66	5.18%		3.49%	3.49%	1.90%	
N>1; Ortalamanın standart sapması	A	4-57	1.49%		1.00%		0.55%	
N>1; Bileşik belirsizlik		4-74	1.56%		1.05%	1.04%	0.57%	0.57%

Çizelge 5.7: Geniştirilmiş standart belirsizliğin hesaplanması.

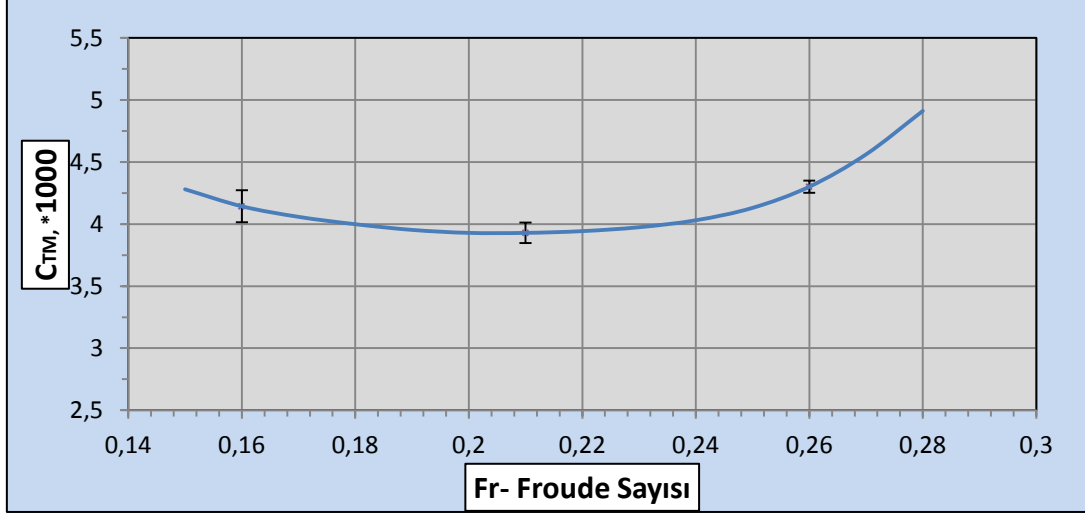
KCS Fr	Geniştirilmiş Belirsizlik (u_p) ($k_p \approx 2$) Eşitlik (4-75)	T=22.5 °C		T=15 °C	
		R_T	C_T	R_T	C_T
0.16	3.13%	5.073 ±3.13%	4.14E-03 ±3.13%	5.234 ±3.13%	4.27E-03 ±3.13%
0.21	2.10%	8.286 ±2.10%	3.93E-03 ±2.10%	8.551 ±2.10%	4.05E-03 ±2.10%
0.26	1.16%	13.904 ±1.16%	4.30E-03 ±1.16%	14.347 ±1.16%	4.43E-03 ±1.16%

KCS modelinin 2014 ITTC yöntemine göre belirsizlik değeri hesaplandığında sonuçların 2002 ITTC yöntemine göre daha düşük olduğu görülmektedir. Bunun başlıca sebebi bütün belirsizlik bileşenleri değil sadece baskın olan bileşenlerin incelenmesi ve yöntem uygulanırken yapılan kabullerin daha az olmasıdır. Böylelikle 2002 yönteminde bu kabuller dahilinde yüksek olan bazı belirsizlik bileşenlerinin yeni yöntem ile hesaplandığından ihmal edilecek boyuttadırlar. Bu yöntemde de Fr sayısı arttığında yani hız değeri arttığından oluşan belirsizliklerin sonuçlar üzerinde etkisi de azalmaktadır (Şekil 5.8). Fakat düşük hızlar için deney düzeneği kapsamlı olarak gözden geçirilmeli ve baskın olan belirsizlik bileşenlerini azaltıcı tedbirler alınmalıdır. Şekil 5.9’de ise deney sayısına bağlı olarak genişletilmiş standart belirsizliğin değişimi yer almaktadır.



Şekil 5.9: Geniştirilmiş standart belirsizliğin test sayısına göre değişimi

Şekil 5.10’de KCS formunun toplam direnç katsayısı grafiği ve hata çubukları yer almaktadır. 2014 yöntemi baskın olan belirsizliklerle ilgilendiğinden ve nicelik olarak tahmininde kullanılan yöntemin daha tutarlı olması sebebiyle hata çubukları daha küçük çıkmıştır.



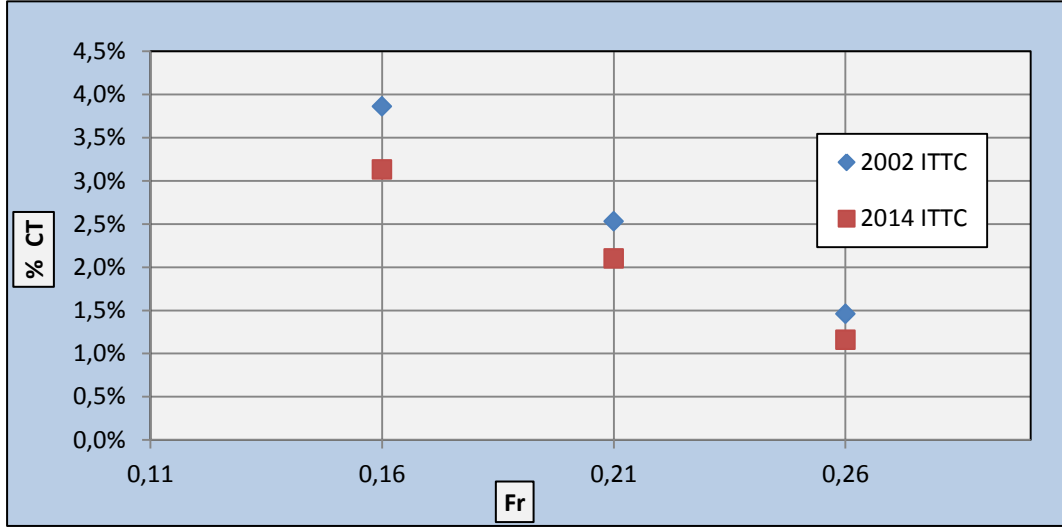
Şekil 5.10: KCS formu C_T grafiği ve C_T hata çubukları (2014 ITTC).

5.1.3 Deplasman tipi (KCS) modelin belirsizlik sonuçları

Deplasman tip tekne için C_T üzerine oluşan belirsizlik değeri her iki yöntem için Çizelge 5.8’de verilmiştir. Çok sayıda yapılmış deney sayılarını temel alınarak bir karşılaştırma yapılırsa eğer dezavantajlı kısmı daha çok olan 2002 yönteminin 2014 yöntemine göre fazla sonuç verdiği görülmektedir (Şekil 5.11). C_T fonksiyonu içerisinde yer alan ve belirsizliğe katkı yapan yoğunluk parametresinin katkısı ihmal edilebilir düzeydedir. İki yöntemin sonuçlarından yola çıkarak sistematik belirsizlik bileşenleri büyükten küçüğe sırasıyla; direnç, hız, ıslak alan parametreleridir. Aynı zamanda iki yöntem içerisinde, güvenilirlik katsayılarının toplam sonuca etkisi farklı kısımlarda devreye alındığından bu durumda sonuçların belirsizliği farklı miktarda etkilemektedir. Her iki yöntemde deney sistemi içerisinde yer alan belirsizlik kaynakları düşük hızlarda daha etkili olduğu görülmektedir.

Çizelge 5.8: Deplasman tipi modelin, 2002 ve 2014 ITTC yöntemine göre genişletilmiş belirsizlik değerleri ($k=2$).

Froude sayısı	2002 ITTC Eşitlik (4-43a)	2014 ITTC Eşitlik (4-75)
Fr=0.16	3.86%	3.13%
Fr=0.21	2.53%	2.10%
Fr=0.26	1.46%	1.16%



Şekil 5.11: Deplasman tipi modelin (KCS) 2002 ve 2014 ITTC belirsizlik tahminleri.

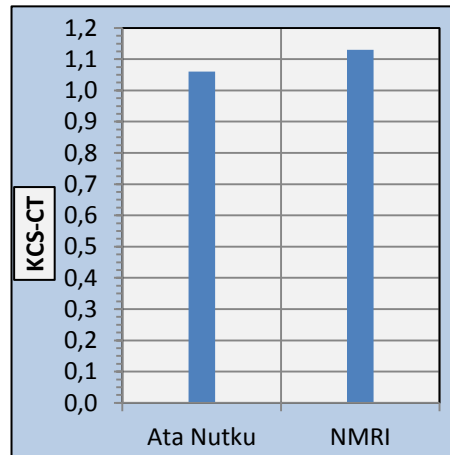
2002 yönteminin göze çarpan bir diğer ayrıntı ise deney sistemi içerisinde kullanılan dinamometrenin lineer kalibrasyon denklemi oluşturulduktan sonra B_{Rx4} belirsizlik bileşeni hesaplanırken ortaya çıkan belirsizliğin sonuçlar üzerinde gereğinden fazla etkin olmasıdır. 2002 ITTC prosedürüne göre hazırlanmış olan örnekte kullanılan dinamometrenin üretim özelliklerinden dolayı kalibrasyon ağırlıklarında üretmiş olduğu voltaj değerleri geniş bir aralıktadır (yaklaşık 6V). Bu yüzden kalibrasyon denkleminin eğim değeri küçük çıkmaktadır [27]. Fakat İTÜ Ata Nutku Gemi Model Deney Laboratuvarı'nda kullanılan R-35 dinamometresi üretim özelliklerinden dolayı benzer kalibrasyon ağırlıklarında voltaj değerlerinin aralığı yaklaşık 0.8 V civarındadır (EK A). Bu yüzden elde edilen kalibrasyon denkleminin eğimi daha büyük olmaktadır. Eşitlik (4-33) kullanılarak hesaplanan belirsizlik değeri bu çalışma kapsamının kullanılan lineer kalibrasyon denkleminin eğimi ile hesaplandığında hata değeri tahmin edilen seviyenin üstünde çıkmaktadır. 2002 ITTC prosedüründe yer alan örnekte [27], B_{Rx4} değeri bağıl olarak toplam belirsizliğe %11.47, toplam dirence ise %0.14 civarı bir katkı yaparken, bu çalışmada dizayn hızı civarında toplam belirsizliğe %85, toplam dirence ise %0.82 civarı katkı yapmaktadır (Çizelge 5.2). Bu durumun düşük hızlarda ve dolayısıyla direnç değerlerinde daha çok katkı yapacağını ve dolayısıyla sonuç üzerinde fazla oranda etkin olacağını gözden kaçırmamak gerekir.

2002 yılında İTÜ Ata Nutku Gemi Model Deney Laboratuvar araştırma grubu tarafından, direnç deneylerinin belirsizlik analizi çalışması yapılmıştır. Mevcut çalışmada benzerlik oranı 40, model boyu 2.13 m olan bir asfalt tankeri

kullanılmıştır. [44]. Hazırlanan rapor, yayımlanmamış olup fakülte içi arşivlenmiştir. Bu çalışma; 0.175, 0.23, 0.277, 0.299 Fr sayılarında direnç deneylerinde meydana gelen belirsizliği incelemiştir. Bu Fr sayılarına karşılık gelen hız değerleri ise sırasıyla 0.8 m/s, 1.051 m/s, 1.265 m/s, 1.368 m/s'dir. Atwood ölçme sistemi ile gerçekleştirilen bu çalışmada sadece rastlantısal belirsizlik diye de adlandırılan kesinlik limiti incelenmiştir. Sistematik belirsizlikler incelenmemiştir. Hem ölçme sisteminin farklılığından hem de kullanılan modellerin farklılığından dolayı kesinlik limitlerinin belirsizliklerin karşılaştırılması sağlıklı değildir. Burada sadece ölçme sistemlerinin karşılaştırılması yapılabilir. 2002 yılında, Atwood ölçme sistemiyle yapılan çalışmada, 0.277 Fr sayısının ve dizayn hızının (1.265 m/s) kesinlik limiti belirsizliği, toplam direnç katsayısının %0.49'u olarak bulunmuştur. R-35 elektronik dinamometre ile gerçekleştirilen KCS modelinde ise 0.26 Fr sayısında ve dizayn hızında (1.584 m/s) bu belirsizlik değeri %1.09 bulunmuştur. Bu fark ölçme sistemlerinin farklı olmasından kaynaklanmaktadır. R-35 elektronik dinamometresi, özellikle 2 m/s'nin altındaki hızlarda hassasiyeti az olduğundan sapması yüksek sonuçlar verir. R35, özellikle yüksek hızlarda hassas ve güvenli sonuçlar vermesinden dolayı tercih edilir.

KCS formu özellikle Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiğinde ve çekme tanklarında yaygın olarak kullanılan bir modeldir. Bu çalışmada, KCS modelinin seçilme amaçlarından biri de; belirsizlik analizi sonucu elde edilecek değerlerin mevcut çalışmalar ile kıyaslanması yapılmasıdır. Sonuçların özgün ve literatüre yeni değerler eklenmesi amacıyla ölçek değeri, mevcut model ölçekleri dışında bir ölçek seçilmiştir. Bu yüzden özellikle Reynolds benzerliğinin sağlanamamasından ve yine Reynolds sayısına bağlı olarak belirlenen form faktörü değerinin her model boyunda farklı olmasından dolayı modellerin direnç katsayılarının karşılaştırılması pek mümkün değildir. Farklı ölçekte imal edilen modellerin karşılaştırılacak tek direnç katsayısı, dalga direnci katsayısıdır (C_W). Mevcut akademik çalışmalarda genelde artık direnç katsayısı (C_R) yer almaktadır. Eğer çalışmada form faktörü kullanıldığına dair bir durum belirtilmemişse, C_R değeri, C_T değerinden C_F değerinin çıkarılmasıyla elde edilir. C_R değeri hem dalga direncini hem de form faktörü (k) miktarınca sürtünme direncini içermektedir. Form faktörü kullanılmış ise C_T değerinden C_V değeri çıkarılmasıyla elde edilen değer, C_W değerine karşılık gelmektedir. Form faktörü, Reynolds uyumsuzluğu gibi nedenlerden dolayı C_W değerlerinin aynı olması

pratikte beklenemez. Aynı C_W değerlerine sahip olması için modellerde özel çalışmalar yapılmalıdır. Bu çalışmalara en basit örnek türbülans yapıcılar ile Reynolds benzerliği sağlanması verilebilir. Bu çalışmada ölçek etkisi üzerine özel inceleme yapılmadığı için bu değerlerin birbirlerine yakınsar olması sonuçlarının karşılaştırılması ve yorumlanabilmesi için yeterlidir. Araştırmalar neticesinde literatürde, genellikle C_R değeri yer aldığından, karşılaştırma Artık Direnç Katsayısı üzerinden yapılmıştır. Karşılaştırma, “Natioanal Maritime Research Institute (NMRI)” tarafından yapılmış sevk deneylerinin sonuçları ile kıyaslanmıştır [45-46]. Adı geçen çalışmada 1.13×10^{-3} hesaplanan C_R değeri, Ata Nutku Gemi Model Deney Laboratuvar deneyleri sonucunda 1.06×10^{-3} hesaplanmıştır. Şekil 5.12’de her iki deney sonucu bir arada gösterilmektedir. Sonuçlar ölçek etkisi ve Reynolds uyumsuzluğu yüzünden farklı ve hata payı % 6 civarındır. Fakat sonuçlar birbirine yakın ve tutarlı olduğu için kabul edilebilir seviyededir.



Şekil 5.12: Artık direnç katsayısı karşılaştırılması.

KCS modeli için KRISO Çekme Tankında yapılan belirsizlik analizinde, dizayn Fr sayısında, %95 güven aralığından genişletilmiş belirsizlik değeri %1 olarak bulunmuştur [46]. 1993 yılında yayımlanan bu çalışma ve bu tez çalışmasında, benzer ölçüm sistemleri ve yöntemler kullanılmadığı ve farklı ölçeklerde deneyler gerçekleştirildiği için sonuçların kıyaslanması pek doğru değildir. Genel belirsizlik sınırlarını görebilmek için bu karşılaştırmayı yapmak daha doğru olacaktır. Bu tez çalışmasında, genişletilmiş belirsizlik değerleri 2002 ve 2014 ITTC yöntemlerine göre % 1.46 ve %1.16 olarak bulunmuştur. Mevcut sistemler arasında genel belirsizlik değerleri birbirine yakın yorumu yapılabilir fakat gelişen teknoloji ve bilim ile belirsizliğin daha düşük çıkması aslında daha tutarlı olandır. O yüzden

ölçme sistemi, gözden geçirilmeli ve deneyler daha hassas ve sağlıklı koşullarda yapılmalıdır.

5.2 Hızlı Tekne Model Örneğinde Belirsizlik Analizi Uygulanması

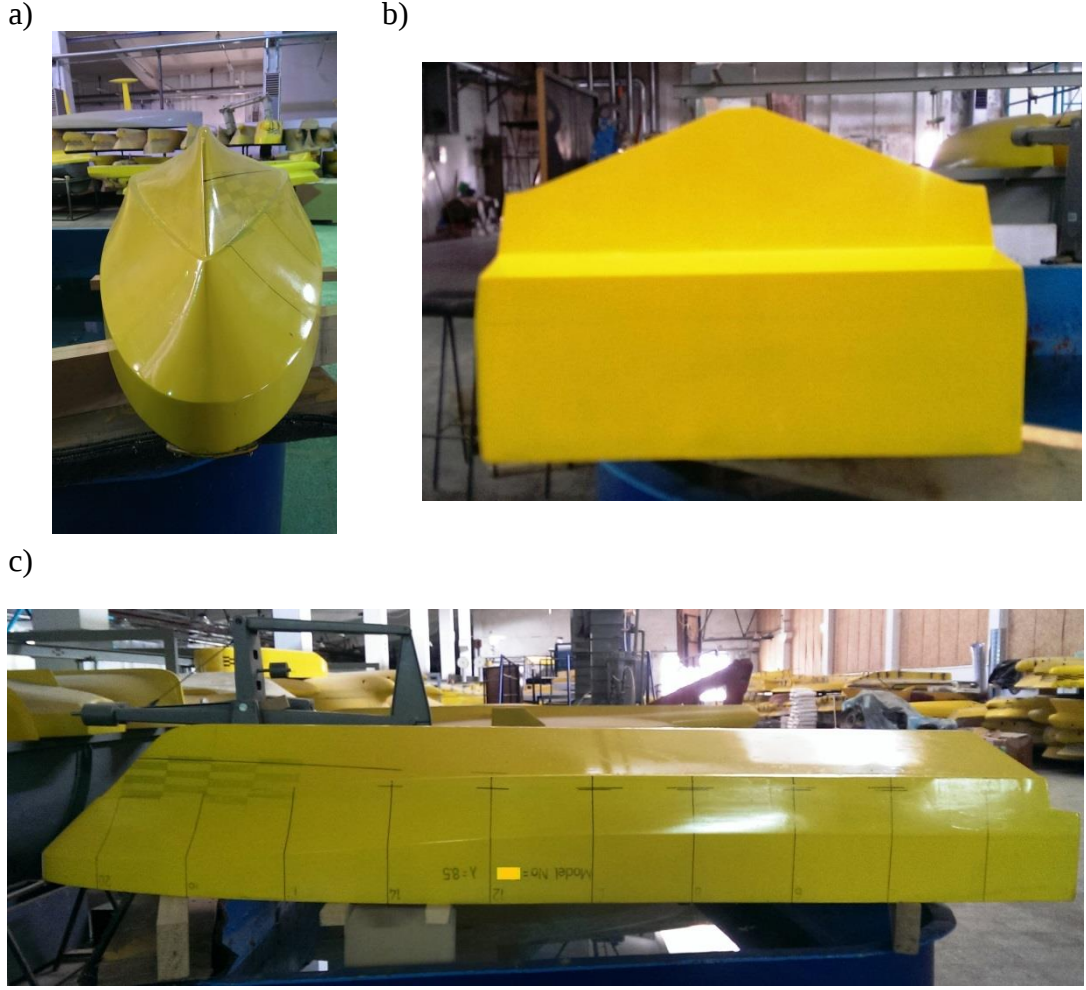
Hızlı tekne modeli için ise laboratuvar bünyesinde daha önce deneyi yapılan bir model, tez kapsamında izin alınarak kullanılmıştır. Telifli bir form olduğu için form dosyasına çalışma kapsamında verilmemiştir. Hızlı tekne formunun Çizelge 5.9'da ana parametrelerine ve Şekil 5.13'te form resimlerine yer verilmiştir.

Hızlı tekne formlarının deplasman tipi teknelerden ayıran başlıca özellik, Fr sayısına bağlı olarak form özelliği bakımından suyun kaldırma kuvvetine ek dinamik kaldırma kuvveti oluşması ve bu sayede geminin ıslak alanının azalmasıyla beraber yüksek hızlarda daha düşük direnç vermesidir. Daha başka bir söyleyişle bu tekne tipleri genellikle 0.4 Fr ve 0.6 Fr arasında kayma rejimine geçerler, bu da direnç eğrisinin (düşey eksen direnç, yatay eksen hız) dikleşmesini engeller ve direnç grafiği hız yönünde daha çok ilerlemesine neden olur. Bu yüzden form özelliklerinden dolayı daha düşük direnç değeri verirler.

Özellikle kayıcı tekne diye isimlendirilen bu tekne grubunda önem arz eden formun kayma işlemini hangi Fr sayısında ve hız aralığında oluşturduğudur. Çünkü bu tip gemiler seyirlerini genellikle kayıcı bölgede yapmaktadırlar. Bu çalışmada kayıcı rejime geçiş ve kayıcı rejim (dizayn Fr sayısı) olan bölgeler ayrı ayrı olarak incelenecektir. Bu yüzden Fr sayıları ise 0.50 Fr ve 0.90 Fr olarak belirlenmiştir. Deney, belirlenen Fr sayısı aralığında toplamda 5 kez tekrarlanmıştır.

Çizelge 5.9: Hızlı tekne modelinin ana parametreleri.

Açıklama	Simge	Değer (birim)
Benzerlik ölçeği	λ	8.5
Dikmeler arası boy	L_{PP}	1.958 (m)
Su hattı boyu	L_{WL}	1.958 (m)
Islak boy	L_{WS}	1.958 (m)
Genişlik	B	0.588 (m)
Su çekimi yüksekliği	T	0.108 (m)
Islak Alan (dümen dahil)	S	$0.975 \text{ (m}^2\text{)}$
Deplasman hacmi	∇	$0.052 \text{ (m}^3\text{)}$
Blok katsayısı	$C_B = \nabla / L_{PP} B T$	0.447
Su hattı katsayısı	$C_{WP} = A_{WP} / L_{PP} B$	0.77



Şekil 5.13: Hızlı tekne modelinin görünüşleri a) Baş görüntüsü b) Kıç görüntüsü c) Profil görüntüsü

5.2.1 2002 ITTC metodu ile belirsizliğin hesaplanması

Bölüm 4.1’te anlatılan, ITTC tarafından 2002 yılında yayımlanan ve gemi direncinin belirsizliğinin tahmin edilmesini sağlayan prosedür hızlı tekne formu için uygulanmıştır. Hızlı tekne modeli için de blokaj ve duvar etkisi, ölçek etkisinin form faktörü üzerine etkisi, takıntı direnci gibi özel araştırma gereken ve belirsizliğe olan katkısının tahmin edilmesi zor olan sorunlar bu kısımda incelemeye alınmamıştır.

Sistemik hata olarak isimlendirilen sonuçların eğilimi hakkında değerlere Çizelge 5.10’de yer verilmiştir. Aynı zamanda ardı ardına yapılan ölçümlerin kesinliğini yorumlamak maksadıyla da rastlantısal hata olarak isimlendirilen belirsizlik grubu Çizelge 5.11’te yer almaktadır. Ek bilgi olarak ise deneyler 2014 yılı Kasım ayında yapılmıştır.

Çizelge 5.10: Hızlı tekne için sistematik (eğilim) belirsizlik kaynakları ve nicelik olarak değerleri.

Hata	Denklem	Fn=0.50			Fn=0.90		
		Değer	Yüzde değeri		Değer	Yüzde değeri	
Model boyu (m)		1.958			1.958		
B_L	4-1	0.002	0.10	% L_{PP}	0.002	0.10	% L_{PP}
Islak Alan (m²)		0.975			0.975		
B _{S1}	4-8	1.91E-02	98.68	% B _S ²	1.91E-02	98.68	% B _S ²
B _{S2}	4-9b	2.21E-03	1.32	% B _S ²	2.21E-03	1.32	% B _S ²
B_S	4-10	1.92E-02	1.97	% S	1.92E-02	1.97	% S
Model hızı (m/s)		2.19			3.94		
B _{C1} (bit)	4-24	1	17.99	% B _C ²	1	17.99	% B _C ²
B _{C2} (bit)	4-25	1.5	40.47	% B _C ²	1.5	40.47	% B _C ²
B _{C3} (bit)	4-25	1.5	40.47	% B _C ²	1.5	40.47	% B _C ²
B _{C4} (bit)	4-27	0.25	1.12	% B _C ²	0.25	1.12	% B _C ²
B_C (bit)	4-28	2.358	0.21	% c=1138	2.358	0.21	% c=1138
B_D (m)	4-22	1.15E-04	0.03	% D=0.381	1.15E-04	0.03	% D=0.381
B_{Δr} (a)	4-23	1.03E-05	0.01	% Δt=0.1s	1.03E-05	0.01	% Δt=0.1s
θ _c ^V B _c (m/s)		3.53E-03	97.69	% B _V ²	3.53E-03	97.69	% B _V ²
θ _D ^V B _D (m/s)		5.14E-04	2.07	% B _V ²	5.14E-04	2.07	% B _V ²
θ _{Δt} ^V B _{Δt} (m/s)		-1.75E-04	0.24	% B _V ²	-1.75E-04	0.24	% B _V ²
B_V (m/s)	4-29	3.57E-03	0.16	% V	3.57E-03	0.09	% V

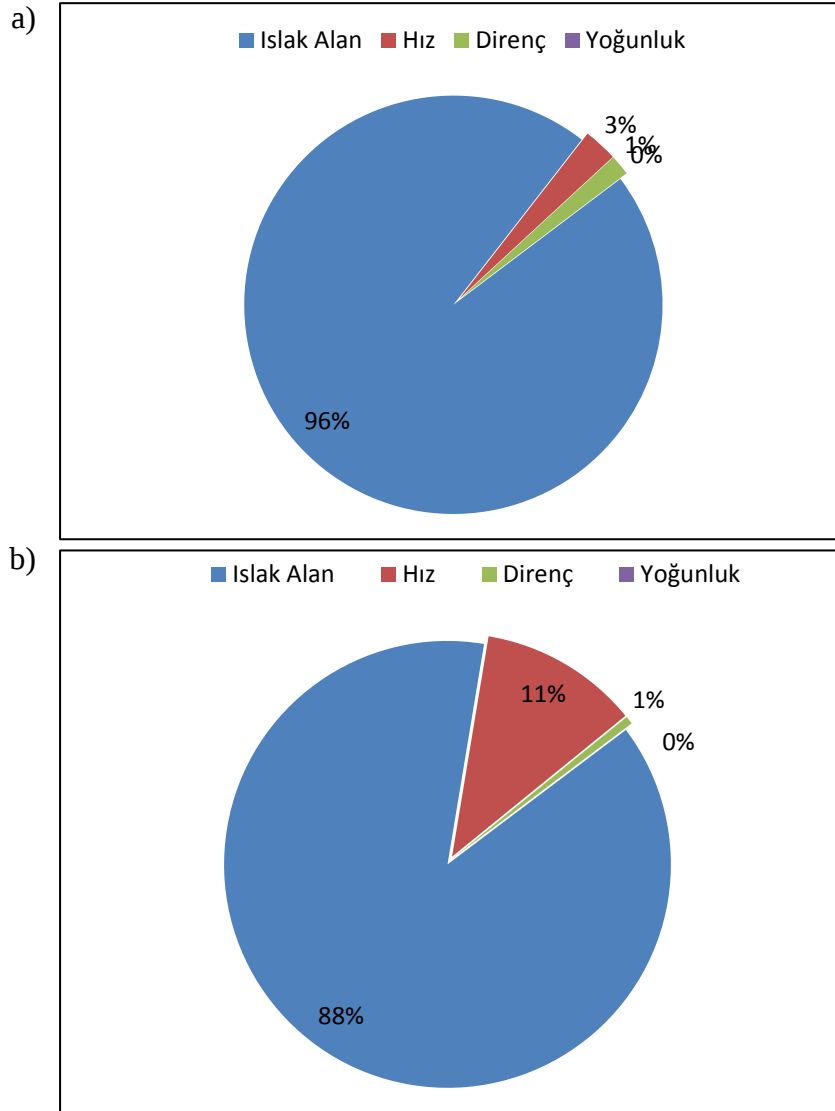
Çizelge 5.10 (devam): Hızlı tekne için sistematik (eğilim) belirsizlik kaynakları ve nicelik olarak değerleri.

Hata	Denklemler	Fn=0.50			Fn=0.90		
		Değer	Yüzde değeri		Değer	Yüzde değeri	
Model		48.33			76.63		
Direnci (N)							
B _{Rx1}	4-30	2.42E-03	0.04	% B _{Rx} ²	3.83E-03	0.10	% B _{Rx} ²
B _{Rx2}	4-31	4.69E-02	14.60	% B _{Rx} ²	4.69E-02	14.59	% B _{Rx} ²
B _{Rx3}	4-32	4.60E-04	0.00	% B _{Rx} ²	7.29E-04	0.00	% B _{Rx} ²
B _{Rx4}	4-33	1.13E-01	85.36	% B _{Rx} ²	1.13E-01	85.31	% B _{Rx} ²
B _{Rx5}	4-34	0.00E+00	0.00	% B _{Rx} ²	0.00E+00	0.00	% B _{Rx} ²
B_{Rx}	4-35	0.12	0.25	% R_X	0.12	0.16	% R_X
Yoğunluk (kg/m³)		998.032			998.032		
Sıcaklık (derece)		17			17		
B_T	4-11	0.5	2.94	% T=	0.5	2.94	% T
B _{p1}	4-13	8.60E-02	100.00	% B _p ²	8.60E-02	100.00	% B _p ²
B _{p2}	4-14	0.00E+00	0.00	% B _p ²	0.00E+00	0.00	% B _p ²
B _{p3}	4-15	0.00E+00	0.00	% B _p ²	0.00E+00	0.00	% B _p ²
B_p (kg/m³)	4-16	0.09	0.01	% ρ	0.09	0.01	% ρ
Viskozite (m/s²)		1.08E-06			1.08E-06		
B _{γ1}	4-18	1.39E-08	100.00	% B _γ ²	1.39E-08	100.00	% B _γ ²
B _{γ2}	4-19	0.00E+00	0.00	% B _γ ²	0.00E+00	0.00	% B _γ ²
B_γ (m/s²)	4-20	1.388E-08	1.28	% γ	1.388E-08	1.28	% γ

Çizelge 5.10 (devam): Hızlı tekne için sistematik (eğilim) belirsizlik kaynakları ve nicelik olarak değerleri.

Hata	Denklem	Fn=0.50			Fn=0.90		
		Değer	Yüzde değeri		Değer	Yüzde değeri	
Sürtünme Direnci Katsayısı		3.54E-03			3.18E-03		
$\theta_{VB_V}^{CF}$		1.09E-06	1.58	% B_{CF}^2	-5.14E-07	0.49	% B_{CF}^2
$\theta_{LB_L}^{CF}$		-6.72E-07	0.60	% B_{CF}^2	-5.72E-07	0.44	% B_{CF}^2
θ_B^{CF}		8.57E-06	97.82	% B_{CF}^2	7.28E-06	70.76	% B_{CF}^2
B_{CF}	4-36	8.66E-06	0.24	% C_F	7.33E-06	0.23	% C_F
Toplam Direnç Katsayısı		2.08E-02			1.02E-02		
$\theta_{SB_S}^{CT}$		-4.08E-04	95.79	% B_{CT}^2	-2.00E-04	87.89	% B_{CT}^2
$\theta_{VB_V}^{CT}$		-6.75E-05	2.62	% B_{CT}^2	-7.24E-05	11.53	% B_{CT}^2
$\theta_{RxB_{Rx}}^{CT}$		5.26E-05	1.59	% B_{CT}^2	1.62E-05	0.58	% B_{CT}^2
$\theta_{\rho B_\rho}^{CT}$		-1.78E-06	0.00	% B_{CT}^2	-8.74E-07	0.00	% B_{CT}^2
B_{CT}	4-39	4.17E-04	2.01	% C_T	2.13E-04	2.10	% C_T
Artık Direnç Katsayısı		1.72E-02			6.98E-03		
$\theta_{CTB_{CT}}^{CR}$		4.17E-04	99.96	% B_{CR}^2	2.13E-04	99.88	% B_{CR}^2
$\theta_{CFB_{CF}}^{CR}$		-8.66E-06	0.04	% B_{CR}^2	-7.33E-06	0.12	% B_{CR}^2
B_{CR}	4-41	4.17E-04	2.42	% C_R	2.13E-04	3.06	% C_R

Şekil 5.14’de deney sisteminde toplam 2 Fr sayısı için sistematik belirsizlik kaynaklarının bileşenleri ve yüzde olarak değerleri mevcuttur. Burada dikkat edilmesi gereken kısım, 2 Fr sayısının sistematik belirsizlik değerleri birbirinden farklı olduğu için sonuçlar kendi içerisinde karşılaştırılması daha sağlıklıdır. Sistematik belirsizlik bileşenlerinden özellikle ıslak alan belirsizliği baskın olarak yer almaktadır. Mutlak olarak yapılan üretim hatası, model boyunun küçük olmasından dolayı sistem üzerinde tutarsız belirsizlik oluşturmaktadır. Yoğunluk ve direnç belirsizlikleri, toplam sistematik belirsizliğe olan katkısı çok düşüktür. Hatta ihmal edilebilir düzeydedir. Ayrıca genel olarak bakıldığında ise direnç ölçümünden kaynaklanan belirsizlik, dinamometrenin yüksek hızlarda sapması düşük olan değerler verdiği görülmektedir.



Şekil 5.14: Toplam direnç katsayısının sistematik hata bileşenleri.
a) $Fr=0.50$ için. b) $Fr=0.90$ için.

Hızlı tekne modelinin ardı ardına yapılan direnç ölçümleri sonucunda elde edilen sonuçların birbirleriyle olan tutarlılığını belirlemek maksadıyla elde edilen verilerin ortalama etrafında sapması dikkate alınarak bir değer belirlenir. Standart sapma olarak adlandırılan bu değer belirlenen güvenilirlik seviyesinde elde edilen sonuçların kesinliği hakkında bilgi vermektedir. Burada dikkat edilmesi gereken konu; bu yöntem sonuçlar arasında bir kesinlik yorumu sağlar. Elde edilen değerlerin ortalamasının gerçek değer olduğu anlamına gelmez. Sadece ardı ardına yapılan ölçümlerde sonuçlarının sapmasını gösterir.

Deneyler, elektronik dinamometre (R-35) ile 5 set halinde tekrarlanmıştır. Deneyler, birbirini izleyen günlerde ve modelin bütün direnç grafiğinin bütünü oluşturulacak şekilde yapılmıştır. Deneylerin yapıldığı dönem laboratuvarın iş yoğunluğu sebebiyle için deneyler anca 5 set halinde yapılmıştır. Çizelge 5.11’de her sefer için elde edilmiş direnç değerleri ve bu değerlerin belirli bir ortalama etrafında saçılışını gösteren standart sapma değeri verilmektedir. Aynı zamanda Çizelge 5.11’de yer alan verilerde sıcaklık düzeltmesi yapılmıştır.

Çizelge 5.11: Hızlı tekne modelinin direnç, direnç ortalaması ve standart sapması.

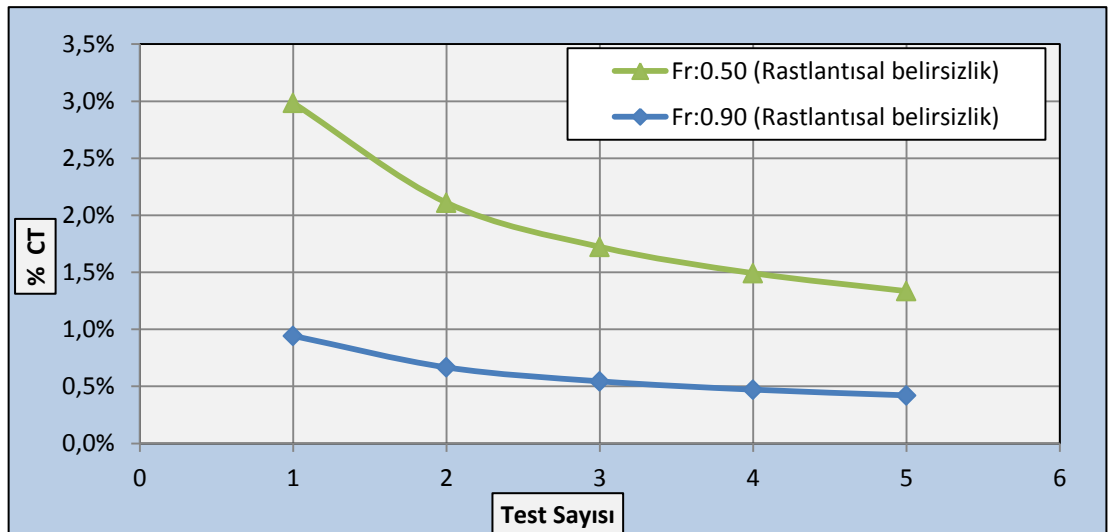
Hızlı Tekne		
R_T (N)	Fr=0.50	Fr=0.90
(15 °C)		
1	49.26	77.59
2	49.40	76.97
3	48.20	76.84
4	48.25	76.75
5	47.73	77.37
Ortalama	48.57	77.10
S. Sapma	0.725	0.364

Laboratuvar bünyesinde kullanılan elektronik dinamometrenin üretim özelliklerinden dolayı yüksek hızlarda daha hassas çalışmakta olduğundan Fr=0.90 olan sonuçlar Fr=0.50’e göre daha hassas değerler vermiştir. Aynı zamanda KCS değerleri ile karşılaştırıldığında sonuçların kesinlik limit (“precision limit”) oldukça düşük çıkmıştır.

Çizelge 5.12: Toplam direnç katsayısının ve artık direnç katsayısının genişletilmiş belirsizlik değeri ($k=2$).

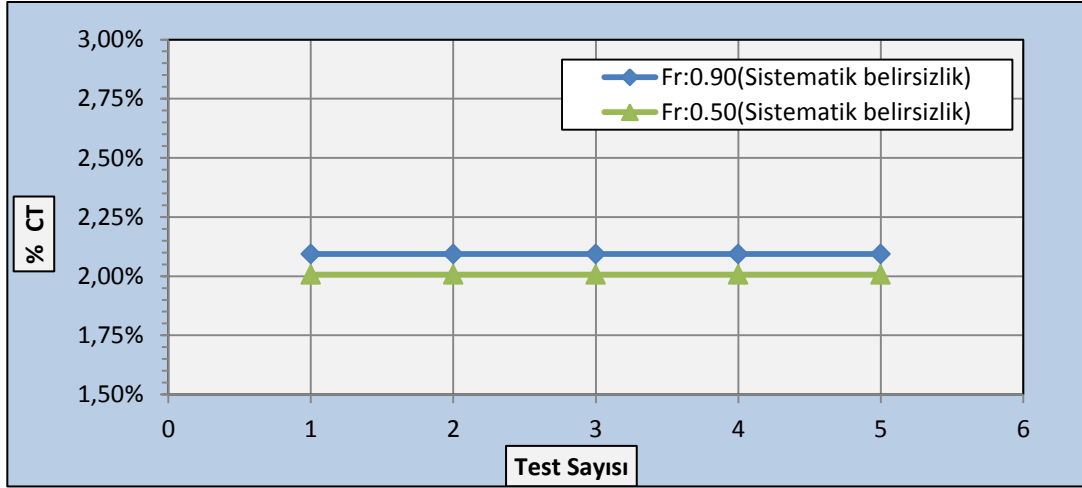
Hata	Denklem	Fr=0.50			Fr=0.90		
		Değer	Yüzde değeri		Değer	Yüzde değeri	
Toplam Direnç Katsayısı		2.08E-02			1.02E-02		
B_{CT}	4-39	4.17E-04	2.01	% C_T	2.13E-04	2.09	% C_T
$P_{CT}(S)$	2-23	6.21E-04	2.99	% C_T	9.61E-05	0.94	% C_T
$P_{CT}(M)$	2-24	2.78E-04	1.33	% C_T	4.30E-05	0.42	% C_T
$U_{CT}(S)$	4-43a	7.48E-04	3.60	% C_T	0.02%	2.30	% C_T
$U_{CT}(M)$	4-43a	5.01E-04	2.41	% C_T	0.02%	2.14	% C_T
Artık Direnç Katsayısı		1.72E-02			6.98E-03		
B_{CR}	4-41	4.17E-04	2.42	% C_R	2.13E-04	3.06	% C_R
$P_{CR}(S)$	2-23	6.21E-04	3.60	% C_R	9.61E-05	1.38	% C_R
$P_{CR}(M)$	2-24	2.78E-04	1.61	% C_R	4.30E-05	0.62	% C_R
$U_{CR}(S)$	4-43b	7.48E-04	4.34	% C_R	2.34E-04	3.35	% C_R
$U_{CR}(M)$	4-43b	5.01E-04	2.91	% C_R	2.18E-04	3.12	% C_R

Genişletilmiş belirsizlik değerleri Çizelge 5.12’de verildiği gibidir. 2002 ITTC prosedüründe yer alan ıslak alan belirsizliğinin hesaplanması için verilen kurallar özellikle küçük olan modellerde mutlak ve bağıl belirsizlik değerini artırdığı için ıslak alan belirsizliği yüksek çıkmaktadır. Bu belirsizlik, özellikle C_T değerini hesaplariken kullanılan ıslak alan değişkenini etkilemekte olduğundan sonuç üzerinde baskın bir belirsizlik oluşturmaktadır. C_T de meydana gelen bu belirsizlik baskın olarak C_R belirsizliğini etkilemektedir.



Şekil 5.15: Genişletilmiş rastlantısal belirsizliğin deney sayısına göre değişimi.

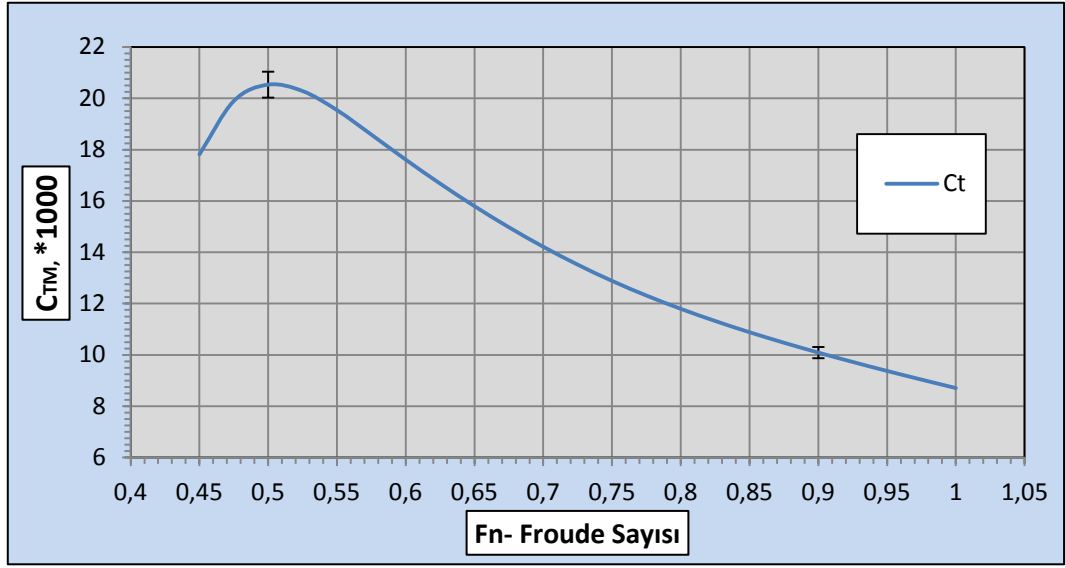
İki deney grubu üzerinde farklı belirsizlik kaynakları etkili ve baskın olduğu için sistematik ve rastlantısal belirsizlikler, Fr sayısı (yani hızlara) göre değişkenlik göstermektedir. Şekil 5.15'te, 2002 ITTC yöntemine göre iki Fr sayısı için genişletilmiş rastlantısal belirsizliklerin yani ardı ardına ölçümlerin kesinlik limitlerinin karşılaştırılması yer almaktadır. Deney düzeneğinin yüksek hızlardaki ölçümlerde belirsizliklerin azaldığı görülmektedir. Bu iki Fr sayısı için genişletilmiş sistematik belirsizliğin karşılaştırılmasında pek sağlıklı yorumlarda bulunulamayabilir. Islak alan belirsizliği sistem üzerinde oldukça baskın olduğu için sistematik belirsizliğin güvenilirliği ve karşılaştırılması zordur. Şekil 5.16'dan da anlaşıldığı gibi, sadece sistematik (eğilim) belirsizliğin yüksek hızlarda da sistem üzerinde baskın olarak etkili olduğu yorumunda bulunulabilir. Çünkü her iki Fr sayısı için bağıl belirsizlik değeri oldukça yakındır.



Şekil 5.16: Genişletilmiş sistematik belirsizliğin deney sayısına göre değişimi.

Analizler boyunca karşılaşılan hızlar arttıkça belirsizliğin düşmesi C_R 'de tersine davranış göstermiştir. Bunun sebebi ise hızlı teknelerde C_R hız arttıkça bir süre artmakta ve devamında dizayn hızı civarında C_F değerine yakınsamaktadır (Şekil 5.17). O yüzden, dizayn hızında C_R değeri küçük olduğundan bağıl belirsizliği yükselmektedir.

Şekil 5.17'de verilen hızlı tekne modeli için verilen hata çubukları incelendiğinde 2002 ITTC yöntemindeki sonuçlarda mantıklı olmayan bir fazlalık vardır. Bu durumun nedeni, küçük modellerde ıslak alan belirsizliğinin tahmin edilmesi için kullanılan yöntemin fazla belirsizlik oluşturmastır.



Şekil 5.17: Hızlı tekne formu C_T grafiği ve C_T hata çubukları (2002 ITTC)

5.2.2 2014 ITTC metodu ile belirsizliğin hesaplanması

2014 ITTC prosedürüne göre sonuçlar analiz edildiğinde belirsizlik bileşenlerinin tek tek değil sadece baskın olanların bileşenleri dikkate alınarak belirsizlik tahmininde bulunulmuştur. Belirsizlik analizi mevcut ortalama havuz suyu sıcaklığı dikkate alınarak hesaplanmıştır. İşlem sonucunda belirsizlik tüm sıcaklık değerlerinde sabit kabul edilerek direnç değerleri ITTC tarafından önerilen standart sıcaklık olan 15 °C'ye çevrilmiştir. Çizelge 5.13'te her bir deney takımı sonucunda elde edilmiş direnç değerleri ve direnç değerlerinin ortalaması, standart sapması yer almaktadır. Çizelge 5.14'te belirsizlik bileşenleri incelenmiş ve nicelik olarak değerlerinin tahmini yapılmıştır. Mevcut belirsizlik bileşenleri Eşitlik (4-79) kullanılarak ihmal edilebilir olan bileşenler belirlenmiş ve devamında bileşik standart belirsizlik değeri bulunmuştur (Çizelge 5.14). Çizelge 5.15'te kullanıcı tarafından belirlenen güvenilirlik katsayısı (Mühendislik problemlerinde genellikle 2 alınır.) dikkate alınarak genişletilmiş belirsizliğin tahmini yapılmıştır. Şekil 5.18'da ise deney sayısına bağlı olarak genişletilmiş standart belirsizliğin değişimi yer almaktadır.

Fr sayısı 0.50 ile 0.90 arasında toplamda 5 defa tekrarlanarak direnç eğrisinin hepsi elde edilmiştir. Hızlı teknenin direnç değerleri özellikle KCS sonuçları ile kıyaslandığından oldukça hassas ve sapması düşük çıkmıştır. Bunun en önemli sebebi elde tek bileşenli dinamometrenin yüksek değerlerde oldukça iyi sonuçlar vermesidir. Ayrıca Çizelge 5.14 kısaca incelendiğinde ortaya çıkan belirsizlik kaynaklarının büyük bir kısmının sistem üzerinde çok düşük bir belirsizlik

oluşturduğudur. Sadece standart sapma üzerinden gelen değer bileşik ve genişletilmiş belirsizliğe katkı yapmaktadır. Şekil 5.19, 2014 ITTC yöntemi ile sonuçlar analiz edildiğinde, hızlı tekne modeli için kullanılan ölçme sisteminin uygun olduğunu göstermektedir. Dizayn Fr sayısında, hata aralığı oldukça azdır.

Çizelge 5.13: Hızlı tekne direnç değerleri.

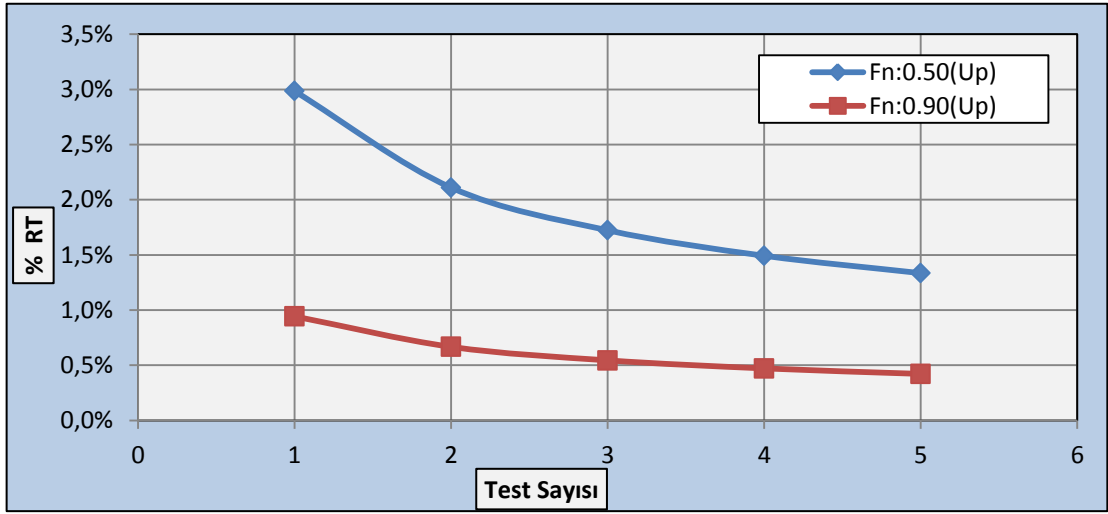
Hızlı Tekne R_T (N) (17 °C)	Fr=0.50	Fr=0.90
1	49.02	77.12
2	49.16	76.49
3	47.96	76.37
4	48.01	76.28
5	47.50	76.90
Ortalama	48.33	76.63
S. Sapma	1.49%	0.47%

Çizelge 5.14: Hızlı tekne için bileşik standart belirsizliğin hesaplanması.

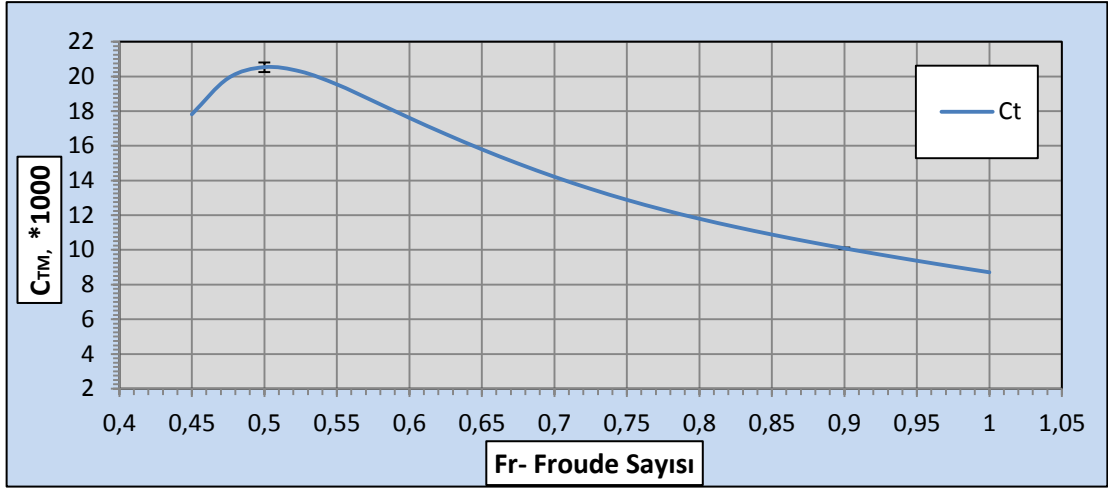
Hızlı Tekne R_T (17 °C)	Tip	Denklemler No	Fr:0.50		Fr:0.90	
			Belirsizlik	Yorum	Belirsizlik	Yorum
Islak alan	B	4-65	0.039%	İhmal	0.039%	İhmal
Hız	B	4-73	0.067%	İhmal	0.067%	İhmal
Su Sıcaklığı	B	4-68	0.018%	İhmal	0.032%	İhmal
Dinamometre	A	4-66	0.048%	İhmal	0.031%	İhmal
N=1; Standart sapma	A	4-55	1.49%	Baskın	0.47%	Baskın
N=1; Bileşik Belirsizlik		4-56	1.49%		0.47%	
N>1; Ortalamanın standart sapması	A	4-57	0.67%		0.21%	
N>1; Bileşik belirsizlik		4-74	0.67%		0.21%	

Çizelge 5.15: Hızlı tekne için genişletilmiş belirsizlik değeri.

I Froude sayısı	Denklemler	Genişletilmiş Belirsizlik (u_p) ($k_p \approx 2$)	T=17 °C		T=15 °C	
			R_T	C_T	R_T	C_T
Fr=0.50	4-75	1.33%	48.329 $\pm 1.33\%$	0.02076 $\pm 1.33\%$	48.567 $\pm 1.33\%$	0.02079 $\pm 1.33\%$
Fr=0.90	4-75	0.42%	76.632 $\pm 0.42\%$	0.01016 $\pm 0.42\%$	77.105 $\pm 0.42\%$	0.01019 $\pm 0.42\%$



Şekil 5.18: Genişletilmiş belirsizliğin deney sayısına göre değişimi.



Şekil 5.19: Hızlı tekne C_T grafiği ve C_T hata çubukları (2014 ITTC).

5.2.3 Hızlı tekne modelinin belirsizlik sonuçları

Mevcut iki prosedür karşılaştırıldığında, 2014 ITTC prosedüründe göze çarpan ilk ayrıntı; bileşenlerin, işlemlerde mutlak kabullerden ziyade bağıl kabullerin yapılmasıdır. Örneğin, bu durum üretimden kaynaklanan boy hatasında karşımıza çıkmaktadır. 2002 ITTC yönteminde boy hatası sabit olarak $\pm 1\text{mm}$ olarak kabul edilirken (4-1), 2014 ITTC yönteminde ise boy hatası mutlak bir kabulden ziyade bağıl olarak hacimle ilgili olarak verilmiştir (4-47a). Bunun önemini tez içerisinde yer alan iki tekne tipinin boy oranı iki civarındadır ($L_{KCS}/L_{Hızlı T.} \approx 2$). Bunun üretimden kaynaklanan ve ıslak alan üzerinde meydana getirdiği belirsizlik değeri, özellikle boyu küçük olan model üzerinde baskın bir belirsizlik oluşturmaktadır. Bu yüzden özellikle boyu küçük olan modellerde 2002 yönteminin uygulanması

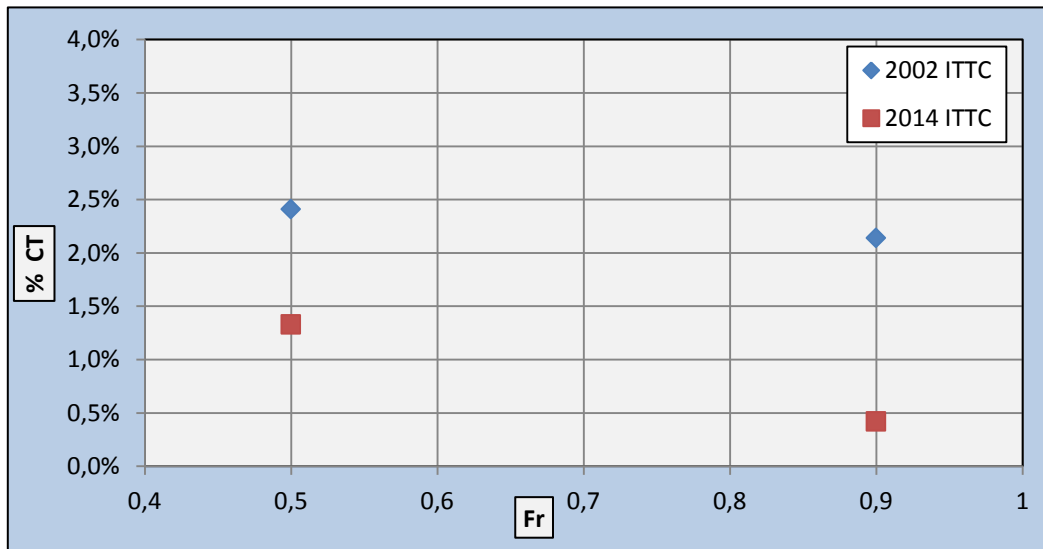
sonuçların güvenilirliğini azaltmaktadır. 2014 yönteminde bu sorun, üretim belirsizliklerinin mutlak kabul olarak alınmayıp, hacme bağlı olarak hesaplanmasıyla çözülmüştür. Çünkü 5 metre boyunda bir model ile 2 metre boyunda bir modelin üretim hataları aynı olması beklenemez.

Hızlı tekne için bu karşılaştırılma yapıldığında ise iki yöntemin çok sayıda yapılmış deney sonuçları için genişletilmiş standart belirsizlik değerleri Çizelge 5.16'da verilmiştir.

Çizelge 5.16: Hızlı teknenin 2002 ve 2014 ITTC yöntemine göre genişletilmiş belirsizlik değerleri

Froude sayısı	2002 ITTC (4-43a)	Eşitlik Eşitlik (4-75)
Fr=0.50	2.41%	1.33%
Fr=0.90	2.14%	0.42%

2014 yönteminde deplasman belirsizliği ihmal edilebilecek şekilde hesaplanırken 2002 yönteminde C_T üzerinde bağıl olarak % 4'e yakın etkilemekte ve belirsizliği aşırı miktarda artırmaktadır. Aynı zamanda yüksek Fr sayılarında sistem üzerinde etkin olan belirsizliklerin etkisinin giderek azalması beklenirken Şekil 5.20 incelendiğinde 2002 ITTC'ye göre bulunan belirsizlik değeri yüksek hız değerinde çok az azalmaktadır. Bu da ıslak alan veya üretimden kaynaklanan deplasman belirsizliklerinin baskın olmasından dolayı, 2002 ITTC yönteminde sağlıklı sonuçlar vermediğini anlaşılmaktadır.



Şekil 5.20: Hızlı teknenin 2002 ve 2014 ITTC belirsizlik tahminleri.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Belirsizlik analizinde tek bir yöntem mevcut değildir. Belirsizliği hesaplamak için yapılan akademik çalışmalar ve kullanıcının mühendislik tecrübesi ışığında çeşitli yollar kullanılabilir. Bu yüzden, 2002 ve 2014 yıllarında yayımlanan iki yöntemin kullanılması veya eski yöntemin kullanılmaması gibi bir durum söz konusu değildir. Amaç, bir ölçüm esnasında meydana gelen belirsizlikleri, hataları, kayıpları doğru ve güvenilir şekilde nicelik olarak belirlemektir. Böylece, günümüze kadar gelen birikimle mevcut deney yapısı iyi analiz edilerek sonuçlar üzerinde doğan belirsizliğin tahminiyle en yakın sonuca ulaşılmalıdır.

ITTC yönteminde prosedür incelenebilir bütün belirsizlik kaynaklarını tek tek inceleyerek sonuç üzerine etkisini tahmin etmektedir. Fakat bileşenler içerisinde sonuca etkisi olmayan, ihmal edilebilir bileşenlerin nicelik olarak belirlenmesiyle fazladan emek harcanmaktadır. Bu durum 2014 yönteminde gözden geçirilmiş ve sonuçlar üzerinde önemli olan asıl bileşenler incelemiştir. Böylelikle yöntemin uygulanabilirliği artırılmıştır.

Belirsizlik analizi hakkında tek bir yöntem olmadığı için 2002 ITTC yönteminde belirsizliğin nicelik olarak tahmininde güvenilirlik katsayısı ile sadece kesinlik limitini çarptıktan sonra eğilim değeri ile karelerinin toplamının karekökü olarak genişletilmiş standart belirsizlik bulunur. 2014 ITTC prosedüründe ise bu durum belirsizlikleri sadece hata bileşeni adı altında sınıflandırdıktan sonra, yani sistematik ve rastlantısal olarak ayırmadan, bulunan belirsizlik değerlerinden yola çıkarak bileşik standart belirsizlik bulunur daha sonra güvenilirlik katsayısı ile çarpılır. Bu durum sadece iki yöntemin toplam ve genişletilmiş belirsizliğin tahmin edilmesinde önerdiği iki farklı yaklaşımdır. 6. bölümün başında bahsedildiği gibi belirsizlik analizi tamamen mevcut akademik birikim ve mühendislik yorumu ile ortaya çıkan bir konudur. Bu yüzden mevcut yöntemlerin belirsizlik kaynaklarına yaklaşım yolları farklı olabilir. Yöntemlerin güvenilirliği veya yaklaşma şekilleri tartışılabilir fakat bu durum hata olarak algılanmamalıdır.

Bu çalışma, iki farklı tekne tipi için iki farklı yöntem çerçevesinde hesaplanmış olan toplam 4 durumu içermektedir. Yalnız burada dikkat edilmesi gereken bir konu; bu iki gemi tipinde elde edilen belirsizlik değerinin diğer tekne tiplerinde ve formlarında aynı olmayacağıdır. Benzer modellerde dahi bu çalışma çerçevesinde bulunan değerler ortak olarak kabul edilemezler. O yüzden her bir gemi tipi için belirsizlik analizi uygulanmalıdır. Bu çalışma, sadece yaygın olarak üretimi yapılan ve kullanılan iki tekne tipi için bu deneyler sonucu elde edilen değerler, benzer modeller için bir yaklaşım sunmaktadır.

Mevcut deneyler içerisinde bu iki yöntem sayesinde tahmin edilen belirsizlik değerleri karşılaştırıldığında, güncel olan yöntemin daha iyi sonuçlar vermesi beklenir. Fakat bu çalışmada, bunun aynı deney sistemine uygulanarak bu farklılığın nereden kaynaklandığı noktasında yorumlar yapılmıştır. Belirsizlik analizi, aslında fikir birliğine varılmış veya kanun derecesinde kabul edilecek bir konu olmadığı için mevcut iki durumun ayrıntılı incelemesi yapılarak gemi direnci deneylerinde oluşan belirsizliğin gerçeğe daha yakın sonuçta tahmin edilmesi amaçlanmıştır.

Ölçümlerde veya deney sistemlerinde belirsizlik analizinin uygulanmasının faydalarından biri de sistem üzerinde oluşan belirsizliklerin niceliklerinin kıyaslanmasıyla bileşik belirsizliğe yapılan katkılarının yorumlanabilmesidir. Bu sayede sistem üzerinde baskın olan belirsizlikleri azaltıcı tedbirler alınabilmektedir. Bu sonuçlar ışığında İTÜ Ata Nutku Gemi Model Deney Laboratuvarı'nda yapılan direnç deneylerinin daha sağlıklı gerçekleştirilmesi için ITTC prosedürlerine göre gözden geçirilmesi gereken kısımlar mevcuttur.

Günümüzde üretilen deplasman tipi gemilerin taşıma kapasitesinin artmasından dolayı gemilerin boy, genişlik ve derinlik gibi ana parametrelerinde artış meydana gelmektedir. Aynı şekilde model deneyleri yapılırken kullanılan formların ölçekli boy, deplasman, hız vb. parametreleri Froude benzerliği ile hesaplandığından yeni tip fazla tonajlı gemilerin laboratuvar bünyesinde deneylerinin sağlıklı bir şekilde yapılmasına izin vermemektedir. Çünkü yeni tip formların laboratuvar bünyesinde deneylerinin yapılması için ölçek değeri büyük seçildiğinden model hızları düşmektedir. Düşük hızlarda ise deney düzeneği üzerinde belirsizlik baskın olmasından ve ölçüm cihazlarının o hassasiyette olmamasından dolayı deney sonuçlarının güvenilirliği azalabilmektedir. Ölçek değerinin büyük olduğu modellerde, deney hassas ve doğru şekilde yapılsa dahi model boyutlarının havuz

içerisinde üretilebilecek ve deneyleri yapılabilir en büyük model olmadığı için sonuçların doğruluğu azalabilir. Deplasman tipi teknelerde bu tip sorunlar yaşanırken hızlı teknelerde ise genel olarak uzunluk değerleri (L, B, T vb.) küçük olduğundan model ölçek değerleri de küçük olmaktadır. Bu durum ise model hızlarının çok yüksek olmasına ve çekme arabasının hızının güvenli zaman içerisinde bu hızlara çıkamamasına ve ölçüm süresinin kısa olmasına neden olmaktadır. Bundan dolayı da ölçek, blokaj ve ölçek etkilerini en aza indirebilmek için üretilebilecek maksimum model boyuna göre belirlemeyip, çekme arabasının maksimum hızına göre ölçek değeri büyük belirlenmektedir. Bir başka deyişle mevcut koşullarda model büyük üretilebilecek olmasında rağmen çekme arabasının hızının kısıtlayıcı sebebinden dolayı deneylerde daha küçük modeller kullanılmaktadır. Bu gibi ana nedenlerden dolayı çekme havuzunun kapasitesi artırılmalıdır.

Laboratuvarında kullanılan termometre analog olarak tabir edilen gözle okuma yapılan bir termometredir. Analog olmasından dolayı sıcaklık hassasiyeti $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 'dir. Hassasiyeti oldukça düşük bir termometre olduğundan sıcaklık kaynaklı belirsizlik, sistem üzerinde fazla olmaktadır. Düşük sıcaklık hassasiyeti yoğunluk üzerinde baskın bir belirsizlik oluşturmaz fakat sıcaklık viskozite üzerinde oldukça etkilidir. Aynı zamanda gözle okunmasından dolayı insan belirsizliği de oluşmaktadır. Çünkü termometrenin konumu, bakış açısı gibi etkenler sistem üzerine tahmini zor bir belirsizlik oluşturmaktadır. Bu gibi dezavantajlarından özelliklerinden dolayı ITTC tarafından kabul edilebilir bir termometre değildir. Bu yüzden mevcut sıcaklık ölçme düzeneğinin dijital ve havuz boyunca belirli aralıklarla ve deney boyunca ölçüm alınabilecek bir sistemle değiştirilmesi gereklidir.

Modelin istenilen deplasman durumuna getirilmesi için modele deneye başlamadan önce ağırlıklar eklenmektedir. Mevcut ağırlıklar ise havuz ortamının nemli ve saklama koşullarının iyi olmamasından dolayı zaman içerisinde bozulmalar meydana gelmiştir. Kullanılan bu ağırlıkların belirli aralıklarla standartlara uygun şekilde bakımı yapılmalıdır.

Deplasman değeri tutturmak için modele eklenen ağırlıkların istenilen trim durumuna göre model içerisine meyil yapmayacak şekilde dağıtımı yapılmaktadır. Bunun için laboratuvar içerisinde klasik su terazisi kullanılmaktadır. Ama kullanılan terazinin hassasiyeti ve kullanım biçimi deneyler için uygun değildir. Trimsiz durumda terazi, gözle bakılarak dengede olup olmadığı kontrol edildiğinden ve buna ilave olarak

terazinin hassasiyetinin düşük olmasından dolayı modelin istenilen durumda yüzmesini engelleyebilmektedir. Trimli durumlarda ise terazi sadece meyil kontrolü için kullanılmakta, istenilen yüzme koşulunun kontrolü su hattı çizgisinin gözle kontrolü ile olmaktadır. Aynı zamanda terazi, model üzerine konulduğunda ilave ağırlık olmasından dolayı modelin normal meyil ve trim durumunu da etkilemektedir. Mevcut terazinin bu gibi dezavantajlarından dolayı ağırlığı düşük, elektronik olarak iki düzlemde eğim ölçen bir sistemle değiştirilmesi gereklidir.

Modelin deplasman değeri hesaplanırken yapılan bir diğer eksiklik ise suyun yoğunluğun sürekli sabit kabul ederek yaz-kış bütün değerlerde ρ değerinin 1000 kg/m^3 alınmasıdır. Oysaki sıcaklık değerinin 15°C kabul edildiğinde dahi yoğunluk değeri gerçekte 1000 kg/m^3 'e eşit değildir. Bölüm 4.1.3.2'de bu durum anlatılmış idi. O yüzden gemi-model deplasman benzerliği sağlanırken deneyin yapılacağı günkü havuz suyu sıcaklığı dikkate alınarak yoğunluk değeri belirlenmeli ve toplam deplasman değeri hesaplanmalıdır.

Çekme arabası raylarının bakımının düzenli yapılmadığı için deney sırasında titreşimden dolayı ölçüm cihazlarında gürültü diye adlandırılan belirsizlik ve sinyal üzerinde doğal olmayan bir dalgalanma meydana getirmektedir. Bu durum ölçüm sonucunda hesaplanan ortalama değeri aşırı derecede etkilememesine rağmen, ölçümün standart sapmasını artırmakta ve tekli deneyler için sonuçlar güvenilirliğini azaltmaktadır. Bu belirsizliği en aza indirmek için çekme arabasının ve yardımcı sistemlerin mekanik, elektrik bakımının sıklıkla yapılması gerekmektedir. Modele bağlanan mafsalların, fren aparatı ve dinamometrenin bu gibi titreşimlerden etkilenmemesi için de bağlantı yerlerine titreşim azaltıcı ek elemanlar takılması ölçülen belirsizliği düşürerek, değerin doğruluğunun artırmasını sağlayacaktır.

Laboratuvar içerisinde bulunan makinalardan ve teçhizatlardan (marangoz tezgahları, CNC makinası, vinçler, çekme arabası, kazan dairesi vb.) dolayı yapılan iş, tehlikeli ve ağır işler sınıfına dahil edilebilir. Çünkü mevcut makinalarda meydana gelebilecek herhangi olağan dışı bir olay, iş ve insan sağlığı önemli ölçüde etkileyecek düzeydedir. Bu yüzden mevcut sistemlerin bakımları aksatılmadan, standartlara uygun şekilde yapılmalıdır. Fakat çok sık kullanılan makinaların (marangoz tezgahları, vinçler, çekme arabası) eski teknolojiye göre imal edilmesinden dolayı arıza vermesi fazla olan kısımlardır. Onlarında şu an için bakımında ve korunmasında aksaklıklar olduğu söylenebilir. Çok geçmeden bütün

sistemler kapsamlı bir tamir ve bakımdan geçmelidir. Özellikle çekme arabasının mekanik ve elektrik aksamı süratle gözden geçirilmelidir. Çünkü elektrik taşıyan yapıların suya düşmesi veya çekme arabasının raydan çıkması gibi durumlar felaket doğurabilir. O yüzden çekme arabasının mekanik ve elektrik aksamı komple elden geçirilmeli, istenemeyen durumda devreye girecek olan akım kesicilerin bakımı yapılmalı ve şuan laboratuvarında mevcut olmayan havuz suyunun topraklaması muhakkak yapılmalıdır. Aslında gelişmiş laboratuvarlarda çekme arabaları insansız olarak çalışmakta, havuz dışındaki kontrol odasından komuta edilmektedir. Bu tarz bir yapının çok geçmeden bu laboratuvarında da uygulanması gereklidir.

Model direnç deneylerinde, çekme arabasının hızı model hızına eşit kabul edilir. Bu yüzden hız-direnç grafiği oluşturulurken kullanılan hız değeri oldukça önemlidir. Laboratuvar bünyesinde yer alan hız ölçüm cihazı Kempf-Remmers firmasının H-31 numaralı cihazıdır. Bu cihaz, araba ile raylar arasına monte edilen disk üzerinden devir ölçerek arabanın hızını belirlemektedir. Ölçülen hız değeri çekme arabasının kullanıcısı tarafından gözle anlık okunarak kaydedilmektedir. Hem anlık okunmasından hem de gözle okunarak kaydedilmesinden dolayı hız değerinin belirsizliği yüksek olmaktadır. Bu belirsizliği azaltıcı tedbirler alınmalıdır. Bu çalışmalardan biri takometrenin elektronik olarak verilerin işlendiği depolandığı ve bilgisayara aktarıldığı veri toplama sistemine (DAQ) uygun soket yardımıyla bağlanmasıdır. Böylelikle, deneyden elde edilen direnç sinyali ile aynı zaman aralığında hız sinyali de işlenerek ortalama hız değerinin elde edilmesi oldukça faydalı olacaktır.

Laboratuvar bünyesinde direnç ölçümü için yaygın olarak kullanılan iki tane ölçüm sistemi bulunmaktadır. Bunlardan birinci elektronik dinamometre (R-35), diğeri ise Atwood dinamometresidir. Bu iki dinamometre çalışma prensibi olarak birbirinden farklıdır. R-35 dinamometresi bilgisayar tarafından kontrol edilmekte ve elektronik ortamda ölçüm almaktadır. Hız artırılarak, direnç değerleri HBM firmasının veri toplama sisteminde (QuantumX) kaydedilmekte ve işlenmektedir. Atwood dinamometresi ise çift taraflı terazi mantığıyla çalışan bir ölçüm cihazıdır. Yani bir tarafına (kefe) ağırlıklar konur, diğeri tarafına ise model bağlanarak deneyler yapılır. Çekme arabasının hızının hassas ayarı sonucu, sistemin dengede olduğu anda o dirence karşılık gelen hız değeri elde edilir. Bu alet kullanıldığında hız yerine ağırlıklar artırılarak hız değerleri elde edilir ve direnç grafiği oluşturulur. Fakat hızın

ve direnç değerinin anlık eşitlenmesinden ve hızın gözle okunmasından dolayı elde edilen dirence karşılık gelen hız değerinde tahmini zor bir belirsizlik oluşmaktadır. İlave olarak yüksek hızlarda deney süresinin kısa olmasından dolayı hız ayarını yapmak o kısa sürede zor olduğundan Atwood sistemi genellikle düşük hızlarda deneyi gerçekteştirilen modellerde tercih edilmektedir. Atwood dinamometresinin bu gibi dezavantajlarına rağmen çalışma prensibi olarak yatayda hem eksi hem artı düzlemde hareket etmesi düşük hızlarda R-35'e göre daha hassas çalışmasına neden olmaktadır. Çünkü R-35'de düşük hızlarda modele bağlı tel, tam gerilmemektedir. Anca 0.9 m/s'den sonra R-35 ile düzgün sonuçlar alınmaya başlanmaktadır. Fakat R-35 dinamometresinin tercih edilen, hassas ve doğru çalıştığı hız değerleri 2 m/s ve üzeri hızlardır. Bu yüzden düşük hızlarda yapılan deneylerde genellikle Atwood ölçüm sistemi kullanılmaktadır. Bu tezde yer alan deneylerde Atwood ile yapılan ölçümlerin belirsizlik tahminin zor olduğu için elektronik dinamometre kullanılmıştır. R-35 ise dinamometresi 2 m/s'nin altında hızlarda fazla hassas olmamasından dolayı KCS modelinin deneylerinde belirsizlik yüksek çıkmıştır. Çünkü R-35 dinamometresi, hız düşük olduğundan tel gerilmeme ve çevresel şartlardan etkilenme gibi sebeplerden sonuçların standart sapma değerini yüksek sonuçlar vermektedir. Belirsizliği azaltma amacıyla düşük hızlarda hassas çalışan ve model ankastre olarak bağlı ölçüm sistemi kurulmalıdır. Yüksek hızlarda yapılan deneyler için R-35 dinamometresinin hassasiyeti yeterlidir.

Son olarak ise deneyi yapılan modellerin saklama koşulları gözden geçirilmelidir. Çünkü laboratuvar, özellikle ticari projelerde ilerleyen yıllarda farklı deplasman değerinde deneylerin tekrarlanması istenebilmektedir. Laboratuvar bünyesinde saklanan model böyle durumda tekrar deneylere hazır hale getirilmektedir. Fakat laboratuvar içerisinde 400'ün üstünde model olmasından dolayı modeller özensiz saklanabilmektedirler. Burada model deformasyonunun deneylerde önemli ölçüde belirsizlik oluşturduğu unutulmamalıdır. Bunun önüne geçebilmek için modeller düz bir zeminde ve ortalama bir sıcaklıkta korunmalıdır. Model üretiminde kullanılan Ayous kerestesinin malzeme olarak yumuşak olmasından ve deformasyona kolay uğrayabilmesinden dolayı modellerin saklama ve koruma şartları iyileştirilmelidir.

Yüksek lisans tezi kapsamında incelenen bu konu, geliştirilmekte olan bir konu üzerine mevcut kullanılan yöntemlerin anlaşılmasına, uygulanması sırasında karşılaşılan sorunlara, çözüm yollarına, sağlıklı ve güvenilir bir ölçüm için nelere

dikkat edileceği noktasında içerisine mevcut çalışmalarla beraber mühendislik yorumunu kullanarak bir yaklaşım sunmuştur. Bir deney sistemi içerisinde çok fazla belirsizlik kaynağı vardır. Bunların tek tek incelenmesi mümkün değildir. Fakat mevcut akademik birikim ile bunlardan sınırlı belirsizlik kaynakları incelenebilir. Bu çalışmada da gemi direnci konusunda yapılan deneyler üzerinde meydana gelen belirsizlikler iki farklı yöntem ile incelenmiş olup sonuçlarına yer verilmiştir. Ata Nutku Gemi Model Deney Laboratuvarı'nda yapılan deneylerin belirsizliği, tahmini olarak deplasman tipi gemide (KCS), Fr sayısı 0.16, 0.21 ve 0.26 için C_T üzerinde, %95 güven aralığında, 2002 ITTC yöntemi kullanılarak sırasıyla% 3.86, %2.53 ve %1.46, 2014 ITTC yöntemine göre sırasıyla% 3.13, % 2.10 ve % 1.16'dır. Düşük hızlarda direnç lme sisteminden ve çevresel şartların etkili olmasından dolayı belirsizlik yüksek hızlara göre nispeten yüksek çıkmaktadır. Fakat belirsizlik değerleri, bileşenler gözden geçirilerek daha da aşağı indirilebilir. Hızlı tekne tipi için ise sonuçlar özellikle 2014 ITTC yöntemine göre oldukça iyi seviyelerdedir. 2002 ITTC yönteminde ise model boyunun küçük olması yüzünden ıslak alan belirsizliğinin çok yüksek çıkmaktadır. Bu durum da C_T zerindeki belirsizliğin, hızdan bağımsız şekilde yüksek çıkmasından dolayı (iki hız için de %2 civarındır.) güvenirliliği azdır. Fakat aynı deney verileri, Fr sayıları 0.50 ve 0.9 için 2014 yöntemine göre incelendiğinde sonuçlar %95 güven aralığında sırasıyla %1.33 ve %0.42 çıkmaktadır. Dizayn hızı civarında düşük belirsizlik oldukça önemlidir. Bütün belirsizlik deney sisteminde yapılacak iyileştirmeler ile tamamen ortadan kaldırılmasa da azalacağından sonuçların güvenirliliği daha da artacaktır.

KAYNAKLAR

- [1]Coleman, H.W. ve Steele, W.G. (2009).Experimentation, Validation, and Uncertainty Analysis for Engineers.3. Baskı, John Wiley&Sons, Inc., New York, NY.
- [2]Sadikhov, E.,Kangı, R. ve Uğur S. (1995). Ölçüm Belirsizliği UME 95-014. Ulusal Metroloji Enstitüsü
- [3]Benedict, R.P. (1964). Uncertainty in Measurement,” Electro-Technol., p.51.
- [4]ASME. (2005). Test Uncertainty. American Society of Mechanical Engineers, New York.
- [5]ISO. (1995).Guide to The Expression of Uncertaintyin Measurement. Internatioanal Organization for Standardization.
- [6]Altın, M. (2010). Hassas Sıcaklık Ölçümünde Ölçüm Belirsizliği için Farklı Modellemeler ve Deneysel Karşılaştırmalar (yüksek lisans tezi).Adres: <http://eem.ankara.edu.tr/tezler.php>
- [7]Bal, S. ve Güner, M. (2011). Gemi Mühendisliği El Kitabı (ed. Yılmaz T.). 2. Baskı, Bölüm 4. Gemi Mühendisleri Odası Yayınları.
- [8]Bal Ş. (2006). Ship Hydrodynamics-Resistance Part, Ders notları. İTÜ Gemi İnşaatı ve Deniz Bilimleri Fakültesi
- [9]Lewis E.W. (1998). Principles of Naval Architecture. SNAME, Vol. II, New York
- [10]Kuiper G. (1997). Resistance and Propulsion of Ships, ders notları. Delft Üniversitesi, Hollanda.
- [11]Çelik, F.Model Deneyleri ile Gemi Direnci belirleme yöntemleri. Alındığı Tarih: 01.08.2014. Adres:<http://www.yildiz.edu.tr/~fcelik/dersler>
- [12]Roberson A.J. ve Crowe C.T. (2004). Engineering Fluid Mechanics. John Wiley Inc.
- [13]Batchelor G.K. (1967). An Introduciton to Fluid Dynamics. Cambridge Üniversitesi
- [14]Cebeci T. Ve Bradshaw P. (1997). Momentum Transfer in Boundary Layer. McGraw-HillBook Co.
- [15]Harvald S.A. (1983) Resistance and Propulsion of Ships. John Wiley and Sons Inc.
- [16]Betram V. (2000). Practical Ship Hydrodynamics. Butterworths.
- [17]Prohaska, C. W. (1966). A Simple Method for the Evaluation of Form Factor and Low Wave Speed Resistance. Proceedings, 11th ITTC.

- [18]**Faltinsen O.M.** (2005). Hydrodynamics of High Speed Marine Vehicles. Cambridge University Press
- [19]**Sabuncu T.** (1992). Gemi Hareketleri. İTÜ, 2. Baskı
- [20]**Kafalı K.** (1992). Gemi Formunun Statik ve Dinamik Esasları, Cilt II. İTÜ
- [21]**Milward A.** (2004). Effect of Channel Width and Depth on the Resistance of a High Speed Hull International Ship Building Progress.
- [22]**Baykal R. ve Dikili C.** (1999). Gemilerde Güç Hesabı. İTÜ yayınları.
- [23]**ITTC** (2002). Ship Models. 23rd International Towing Tank Conference, Venice, ITTC Recommended Procedures and Guidelines , Procedure 7.5-01-01-1, Rev.01
- [24]**ITTC** (1999a). Density and Viscosity of Water. ITTC Recommended Procedures and Guidelines, Procedure 7.5-02-01-03, Revision 00.
- [25]**ITTC** (2011). Fresh Water and Sea water Properties. ITTC Procedure 7.5-02-01-03, Revision 02.
- [26]**ITTC** (2002b). Resistance Test. ITTC Recommended Procedures and Guidelines, Procedure 7.5-02-02-01, Revision 01
- [27]**ITTC** (2002c). Uncertainty Analysis, Example for Resistance Test. ITTC Recommended Procedures and Guidelines, Procedure 7.5-02-02-02, Revision 01.
- [28]**ITTC** (2008). Model Manufacture: Ship Models. ITTC Recommended Procedures and Guidelines, Procedure 7.5-01-01-01.
- [29]**ITTC** (2008a). Guide to the Expression of Uncertainty in Experimental Hydrodynamics. ITTC Recommended Procedures and Guidelines, Procedure 7.5-02-01-01, Revision 01.
- [30]**ITTC** (2008b). Uncertainty Analysis: Instrument Calibration. ITTC Procedure 7.5-01-03-01.
- [31]**ITTC** (2008). Uncertainty Analysis, Calibration Uncertainty, ITTC Procedure 7.5-01-03-01.
- [32]**ITTC** (2011). Resistance Test, ITTC Procedure 7.5-02-02-01.
- [33]**ITTC** (2014a). General Guidelines for Uncertainty Analysis in Resistance Test, ITTC Procedure 7.5-02-02-02.
- [34]**ITTC** (2014b). Example for Uncertainty Analysis of Resistance Tests in Towing Tank, ITTC Procedure 7.5-02-02-02.1.
- [35]**ITTC** (2014c). Practical Guide for Uncertainty Analysis of Resistance Measurement in Routine Tests, ITTC Procedure 7.5-02-02-02.2.
- [36]**ITTC** (2014). Resistance Committee Report. Proceedings of 27th International Towing Tank Conference.
- [37]**Longo, J. ve Stern, F.** (2005). Uncertainty Assessment for Towing Tank Tests With Example for Surface Combatant DTMB Model 5415. Journal of Ship Research, Vol. 49, No. 1, pp. 55–68.

- [38]Wu, B.,Wang, W., Jin, Z. And Gao, L. (2013). Final Report for Benchmark Resistance Tests of Ship Hull Model of DTMB 5415, CSSRC Technical Report, Wuxi, China.
- [39]Forgach, K. M. (2001). Comparison of ITTC-78 and DTMB Standard Ship Performance Prediction Methods. Technical Report NSWCCD-50-TR-2001/033, Naval Surface Warfare Center Carderock Division.
- [40]Forgach, K. M. (2002). Measurement Uncertainty Analysis of Ship Model Resistance and Self Propulsion Tests. Technical Re-port NSWCCD-50-TR-2002/064, Naval Surface Warfare Center Carderock Division, West Bethesda, Maryland, USA.
- [41]Halis, İ. (2005). Sevk Deneylerinde Belirsizlik Hesabı (Lisans tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Gemi İnşaatı ve Gemi Makinaları Bölümü.
- [42]Bal, S. (2008). Prediction Prediction of Surface Piercing Bodies in Numerical Towing Tank. Internatioanal Journalof Offshore and Solar Engineering, Vol. 1, No 2, pp :106-111.
- [43]Bal, S. (2008). Prediction of Wave Pattern and Wave Resistance of Surface Piercing Bodies by Boundary Element Method. Internatioanal Journalfor Numerical Methods in Fluids, Vol.56 Issue 3, pp :305-329.
- [44]Goren, Ö, ve Danisman D. B. (2002). 95.32 m Asfalt Tankeri 1/40 Ölçekli Model Direnç Deneyinde Belirsizlik Analizi. Rapor No: 01.01/1. İTÜ Ata Nutku Gemi Model Deney Laboratuvarı Araştırma Raporu (yayımlanmamıştır).
- [45]Bugalski, T. and Hoffman P. (2011). Numerical Simulation of the Self-Propulsion Model Tests. 2ndInternational Symposium on Marine Propulsors. Hamburg, Germany
- [46]Hino, T. (ed.). (2005). Proceedings of CFD Workshop Tokyo 2005. NMRI Report 2005, Tokyo, Japan.
- [47]Van, SH and Park YL. (1993). Uncertainty Analysis fort he Experiments in KRISO Towing Tank. (Kore Dilinde). J Ships Ocean Eng 16:60-70
- [48] BAL, S. (2014). Kişisel görüşme.
- [49]Gemi Formu: Kriko Container Ship, KCS. Alındığı tarih: 07.07.2014. https://www.nmri.go.jp/institutes/fluid_performance_evaluation/cfd_rd/cfdws05/Detail/KCS/kcs_g&c.htm

EK A.TEK BİLEŞENLİ (R-35) DİNAMOMETRENİN KALİBRASYONU

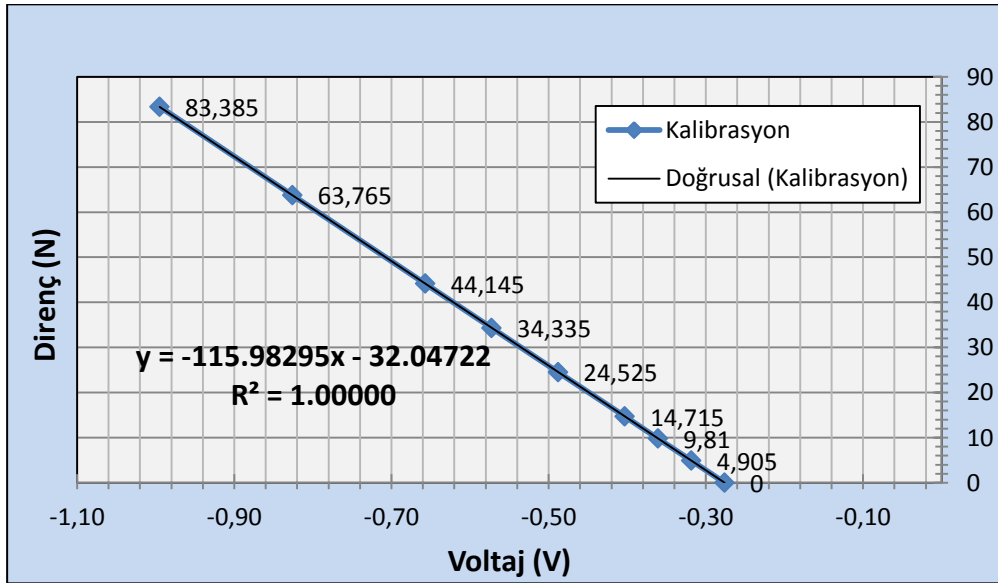
Direnç ölçümü için kurulan deney düzeneğinin temel elemanını oluşturur. Sistem modele bağlanarak üzerine yatayda üzerine gelen kuvveti dinamometre içerisindeki sensorlar sayesinde alarak sinyal yükseltici ve depolayıcısına aktarır. Direnç değerleri modelin katsayılarını belirlerken çok önemli bir parametredir bu yüzden dinamometre her deneyden önce kontrol edilmeli ve kalibre edilmelidir. Ata Nutku Gemi Model Laboratuvarında kullanılan sadece tek eksenli kuvvet ölçen dinamometre kalibrasyon düzenine getirilir. HBM CatmanEasy programı çalıştırılarak sensor veri tabanından kalibrasyon işlemine başlanır. Kalibrasyon sırasında ağırlıklar sadece kefe ile alınan ölçümden sonra sırayla eklenerek sistem içerisinde bulunan gerinim ölçerin ürettiği voltaj değerleri kaydedilir. Kalibrasyon sırasında kalibrasyon düzeneği üzerinde herhangi bir ek kuvvet oluşturacak etkenler (titreşim, ek ağırlık, kefenin hareketi vb.) en aza indirilmelidir. Kefeye eklenen her ağırlık-voltaj verileri alınır ve bu veriler yardımıyla elde edilen noktalar x eksenli voltaj, y eksenli ağırlıklar olmak üzere çizdirilir. Bu veriler lineer davranış göstermelidir. Yani veriler doğrultusunda bir doğruya ve doğru denklemine ulaşılmalıdır. Bu kısımda ağırlıklar karşısında elde edilen değerler ile doğru denklemi ile elde edilen veriler arasında bir uyumsuzluk meydana gelir. Bu durum bir belirsizlik oluşturur. Bu belirsizlik ise nicelik olarak lineer regresyon analizi yardımıyla standart hata tahmini (SEE) ile belirlenir. Aslında yapılmak istenen her bir nokta için bilinen ağırlık değeri ile kalibrasyon fonksiyonu sonucu elde edilen değerlerin farkının karesi alınır ve toplam veri sayısının 2 eksiğinin bölünür. Daha sonra elde edilen değerlerin karekökü bulunarak veri uyumundan kaynaklanan standart hata tahmini nicelik olarak belirlenir. Elde edilen değeri istenilen güvenilirlik aralığına ile çarpılarak belirsizlik tam olarak belirlenir (Çizelge EK A.1).

Çizelge A.1: Kalibrasyon değerleri.

Voltaj (V)	Kütle (kg)	Ağırlık (N)
-0.2761	0	0
-0.3184	0.5	4.905
-0.361	1	9.81
-0.4031	1.5	14.715
-0.488	2.5	24.525
-0.5726	3.5	34.335
-0.6571	4.5	44.145
-0.8261	6.5	63.765
-0.995	8.5	83.385
SEE		0.02343

$$B_{RT}(2*SEE) \quad 0.04686$$

$$R = -115.98295V - 32.04722$$



Şekil A.1: Lineer kalibrasyon grafiği.

EK B. KCS DALGA RESİMLERİ

KCS modelinin direnç deneyleri esnasında çekilmiş dalga fotoğrafları Şekil Ek B.1’de mevcuttur. Görüntüler Froude sayıları olarak analizlerde kullanılan değerlere ait olmayabilir. Mevcut görüntüler içerisinde deneye en yakın Fr sayısının görüntüleri yer verilmiştir. Su hattı (L_{WL}) çizgisinin altında ve üstünde 2’şer cm’lik dalga yüksekliğini gösteren iki sıra halinde dama bulunmaktadır. Ayrıca direnç çeşitli hızlardaki deneyi videoları ek olarak CD halinde derlenmiş olup teze eklenmiştir.

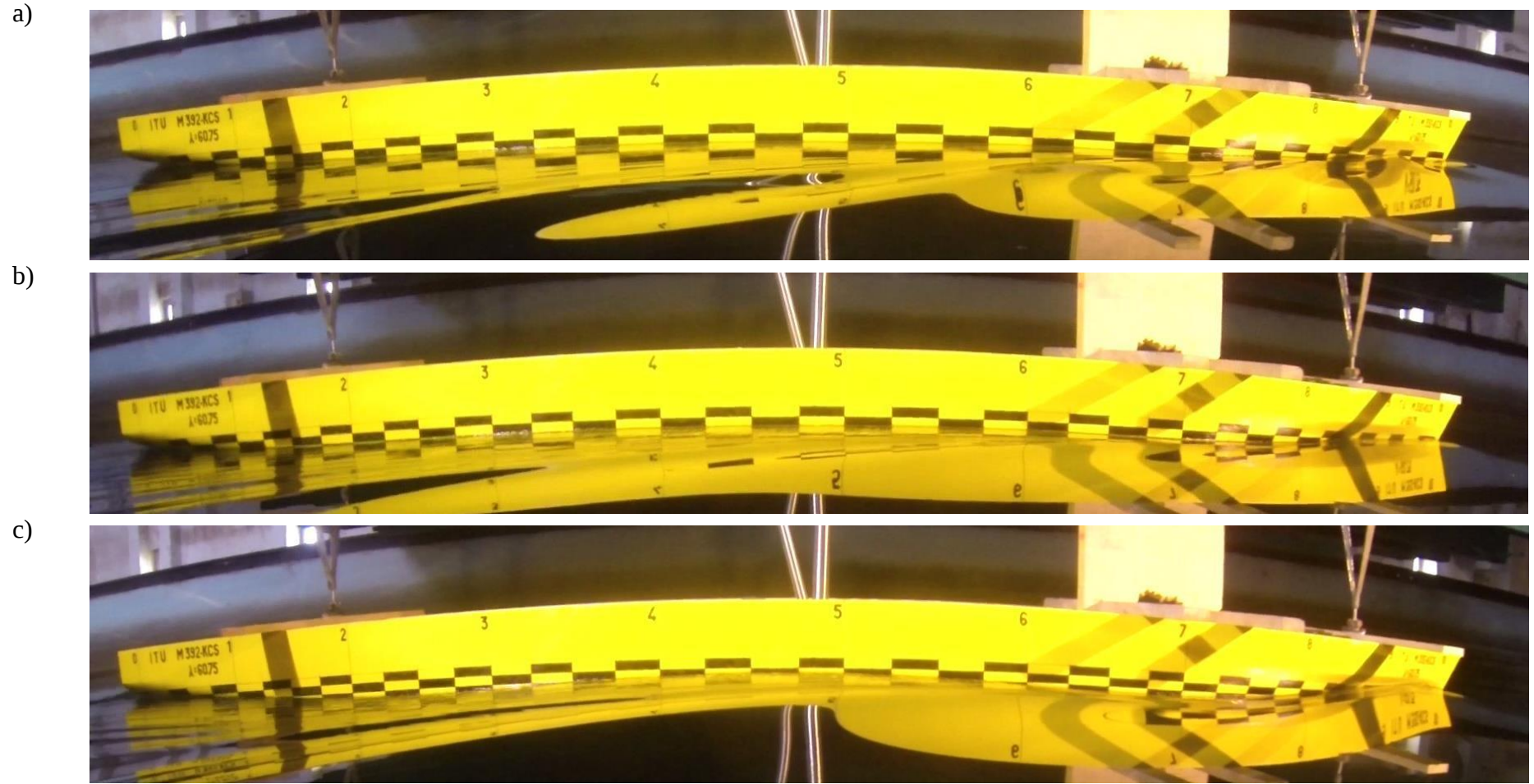
a)



b)



Şekil B.1: KCS baş dalga görüntüsü. a) $Fr=0.22$ b) $Fr= 0.28$



Şekil B.2: KCS form üzeri dalga dağılımı. a) $Fr=0.16$ b) $Fr=0.2$ c) $Fr=0.26$

ÖZGEÇMİŞ



Adı Soyadı : Cihad DELEN
Doğum Yeri ve Tarihi : İstanbul / 1989
E-Posta : cihaddelen@gmail.com
cdelen@itu.edu.tr

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2007-2012
Yıldız Teknik Üniversitesi
Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği