



KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ DERGİSİ

Dergi Sahibi

Prof. Dr. Nuh Zafer CANTÜRK - (Kocaeli Üniversitesi)

Baş Editör

Prof. Dr. K. Süleyman YİĞİT - (Kocaeli Üniversitesi)

Editörler

Prof. Dr. Beyhan PEKEY - (Kocaeli Üniversitesi)

Doç. Dr. Esra CAN DOĞAN - (Kocaeli Üniversitesi)

Doç. Dr. Mihriban CİVAN - (Kocaeli Üniversitesi)

Dr. Öğr. Üyesi Recep Kaya GÖKTAŞ- (Kocaeli Üniversitesi)

Prof. Dr. Murat HOŞÖZ - (Kocaeli Üniversitesi)

Prof. Dr. H. Hakan GÜREL - (Kocaeli Üniversitesi)

Prodüksiyon Editörü

Öğr. Gör. Yusuf YAĞCI - (Kocaeli Üniversitesi)

Editör Asistanları

Arş. Gör. Züleyha Kübra ÇAPIN - (Kocaeli Üniversitesi)

Dergi Sekreteri

Hüsnü TEMKİNER - (Kocaeli Üniversitesi)

Editörler Kurulu

Prof. Dr. A. Nilgün AKIN (Kimya Mühendisliği) (Kocaeli Üniversitesi)

Prof. Dr. Ali Bekir YILDIZ (Elektrik Mühendisliği) (Kocaeli Üniversitesi)

Prof. Dr. Ali KILIÇARSLAN (Makine Mühendisliği) (Hitit Üniversitesi)

Prof. Dr. Bülent KAYPAK (Jeofizik Mühendisliği) (Ankara Üniversitesi)

Prof. Dr. Cenk SAYIN (Otomotiv Mühendisliği) (Marmara Üniversitesi)

Prof. Dr. Cihan KARAKUZU (Bilgisayar Bil. ve Müh.) (Bilecik Şeyh Edebali Üniv.)

Prof. Dr. Fatma GÜLTEKİN (Jeoloji Müh.) (Karadeniz Teknik Üniversitesi)

Prof. Dr. Halim Aytekin ERGÜL (Biyoloji) (Kocaeli Üniversitesi)

Prof. Dr. Mehmet ARIK (Özyeğin Üniversitesi – Makine Mühendisliği)

Prof. Dr. Müslüm ARICI (Makine Mühendisliği) (Kocaeli Üniversitesi)

Prof. Dr. Tahsin ENGIN (Makine Mühendisliği) (İstanbul Teknik Üniversitesi)

Prof. Dr. Yunus Emre ERDEMLİ (Biyomedikal Mühendisliği) (Kocaeli Üniv.)

Prof. Dr. Zerrin ALADAĞ (Endüstri Mühendisliği) (Kocaeli Üniversitesi)

Doç. Dr. Canan Dilek EREN (Fen Bilgisi Eğitimi) (Kocaeli Üniversitesi)

Doç. Dr. Çağla AKGÜL (İnşaat Mühendisliği) (ODTÜ)

Doç. Dr. Emre KİSHALI (Mimarlık) (Kocaeli Üniversitesi)

Doç. Dr. Halil YİĞİT (Bilişim Sistemleri Mühendisliği) (Kocaeli Üniversitesi)

Doç. Dr. İrem BAĞLAN (Matematik) (Kocaeli Üniversitesi)

Doç. Dr. Kasım BAYNAL (Endüstri Mühendisliği) (Kocaeli Üniversitesi)

Doç. Dr. Murat Selim ÇEPNİ (Harita Mühendisliği) (Kocaeli Üniversitesi)

Doç. Dr. Mustafa TÜRKMEN (Metalurji ve Malzeme Müh.) (Gebze Teknik Üniv.)

Doç. Dr. Osman GÜNAY (Biyomedikal Mühendisliği) (YTÜ)

Doç. Dr. Ş.Hakan ATAPEK (Metalurji ve Malzeme Müh.) (Kocaeli Üniversitesi)

Doç. Dr. Ünal UYSAL (Makine Mühendisliği) (Sakarya Üniversitesi)

Doç. Dr. Ümit ÜNVER (Makine Mühendisliği) (Yalova Üniversitesi)

Dr. Öğr. Üyesi Ayşe Arzu ARI (Matematik Eğitimi) (Kocaeli Üniversitesi)

Dr. Öğr. Üyesi Erkan AKPINAR (İnşaat Mühendisliği) (Kocaeli Üniversitesi)

Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Aytaç ÇINAR (İş Sağlığı ve Güvenliği) (Kocaeli Üniv.)

Dr. Öğr. Üyesi Uğur ALBAYRAK (İnşaat Müh.) (Eskişehir Osmangazi Üniv.)

Danışma Kurulu

Prof. Dr. Adnan SÖZEN (Makine Mühendisliği) (Gazi Üniversitesi)

Prof. Dr. Ayşe BAYRAKÇEKEN (Kimya Mühendisliği) (Atatürk Üniversitesi)

Prof. Dr. Bülent ORUÇ (Jeofizik Mühendisliği) (Kocaeli Üniversitesi)

Prof. Dr. Elşen VELİ (Fizik) (Kocaeli Üniversitesi)

Prof. Dr. Engin ÖZDEMİR (Enerji Sistemleri Mühendisliği) (Kocaeli Üniversitesi)

Prof. Dr. Güralp ÖZKOÇ (Kimya Mühendisliği) (İstinye Üniversitesi)

Prof. Dr. H. Metin ERTUNÇ (Mekatronik Mühendisliği) (Kocaeli Üniversitesi)

Prof. Dr. İlyas KANDEMİR (Makine Mühendisliği) (Gebze Teknik Üniversitesi)

Prof. Dr. M. Ufuk KASIM (Bahçe Bitkileri Yetiştirme ve Islahı) (Kocaeli Üniv.)

Prof. Dr. Mustafa ÇANAKCI (Otomotiv Mühendisliği) (Kocaeli Üniversitesi)

Prof. Dr. Nil Pembe ÖZER (Su Ürünleri) (Kocaeli Üniversitesi)

Prof. Dr. R.Taygun GÜRAY (Fizik) (Kocaeli Üniversitesi)

Prof. Dr. Serdar KÜÇÜK (Biyomedikal Mühendisliği) (Kocaeli Üniversitesi)

Prof. Dr. Tamer SINMAZÇELİK (Makine Mühendisliği) (Kocaeli Üniversitesi)

Doç. Dr. Sema YURDAKUL (Çevre Mühendisliği) (Süleyman Demirel Üniv.)

Doç. Dr. Vildan ÇETKİN (Matematik) (Kocaeli Üniversitesi)

Dr. Öğr. Üyesi Dilek OKUYUCU (İnşaat Mühendisliği) (Erzurum Teknik Üniv.)

İletişim

Kocaeli Üniversitesi - Fen Bilimleri Enstitüsü Umuttepe Yerleşkesi 41001, Kocaeli/TÜRKİYE
Tel: +090 (262) 303 30 32 Fax: +090 (262) 303 30 33 E-mail: koufbd@kocaeli.edu.tr



Kocaeli Üniversitesi

Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi

<http://dergipark.org.tr/koufbd>



YAYIN VE DANIŞMA KURULLARI I

İÇİNDEKİLER..... II

Murat VONAL, Hasan KARABAY

Hidrodinamik Yapılı Numune Üzerine Etkiyen Sürüklenme Kuvvetlerinin Sayısal ve
DeneySEL Olarak İncelenmesi..... 1-8
(*Araştırma Makalesi*)



Beyza AYDOĞAN, Ali Bekir YILDIZ

Kablosuz Güç Aktarımında Kuplaj Katsayısının Analizi ve Frekans Ayrılmasına Etkisi 9-15
(*Araştırma Makale*)



Hidrodinamik Yapılı Numune Üzerine Etkiyen Sürüklenme Kuvvetlerinin Sayısal ve Deneysel Olarak İncelenmesi

Numerical and Experimental Investigation of Drag Forces Acting on Hydrodynamic Structured Sample

Murat VONAL ^{1,*} , Hasan KARABAY ² 

¹ Makine Mühendisliği, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, Türkiye, *Orcid*: 0000-0001-6960-9189

² Makine Mühendisliği, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, Türkiye, *Orcid*: 0000-0002-4556-6636

Araştırma Makalesi

Gönderilme Tarihi : 25/03/2024

Kabul Tarihi : 03/06/2024

Ahtar Kelimeler

Sayısal Analiz,
Deneysel Analiz,
Sürüklenme Katsayısı,
Akışkanlar Mekaniği,
Hidrodinamik

Research Paper

Received Date : 25/03/2024

Accepted Date : 03/06/2024

Keywords

Numerical Analysis
Experimental Analysis
Pressure Drag
Fluid Mechanics
Hydrodynamics

Özet

Bu çalışmada, torpido benzeri bir cismin düşük Reynolds sayılı akışta bünyesine etkiyen sürüklenme kuvveti deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Cisim, NACA 0012 profil kesitine sahip eksenal simetrik bir numune olup 3D yazıcı kullanılarak üretilmiştir. Deneyler, viskoz akış bölgesinde 0,37-8,00 Reynolds sayısı aralığında gerçekleştirilmiştir. Ölçümler, gliserin tankı içinde serbest düşmeye bırakılan cisim üzerinden alınmıştır. Sayısal çalışmalar numunenin gliserin havuzu içinde serbest düşme hareketi yaptığı limit hız akış koşulları için ticari bir CFD kodu kullanılarak gerçekleştirilen hesaplamalardan oluşmaktadır. Deneysel ve sayısal hesaplama çalışmaları ile elde edilen sürüklenme katsayıları karşılaştırılmış, Reynolds sayısının $Re \sim 0,37$ değeri için sürüklenme katsayısının $C_d \sim 215$ mertebelerine ulaştığı Reynolds sayısının $Re \sim 8,00$ değeri için ise $C_d \sim 11$ mertebelerine düştüğü belirlenmiştir. Deney şartlarında minimum ve maksimum sürüklenme kuvvetleri sırasıyla 0,01 N ve 0,33 N olarak elde edilmiştir. Tasarımı yapılan deney düzeneği, verilen mertebelerdeki ufak sürüklenme kuvveti değerlerini düşük maliyetle ölçebilme kabiliyetine sahiptir. Sayısal analizler, deney koşullarında basınç kaynaklı sürüklenme kuvvetinin toplam sürüklenme kuvvetine oranının Reynolds sayısı artışına bağlı olarak %3 mertebelerinden %2 mertebelerine gerilediğini göstermiştir. Basınç kaynaklı sürüklenme kuvvetinin bu denli düşük oranlarda kalması sadece viskoz kaynaklı sürüklenme kuvveti ile cisme etkiyen total sürüklenme kuvvetinin temsil edilebileceğini göstermiştir.

Abstract

In this study, drag force acting on a torpedo like sample in low Reynolds number flow was experimentally and numerically investigated. The object was an axially symmetric sample with a NACA 0012 profile, produced using a 3D printer. Experiments were conducted in the viscous flow regime within the range of Reynolds numbers from 0,37 to 8,00. Measurements were taken from the object free falling in a glycerin tank. The numerical studies consist of calculations conducted using a commercial CFD code for the terminal velocity conditions of the sample undergoing free-fall motion in the glycerin pool. When comparing drag coefficient values obtained from experimental and numerical calculations, it was found that the drag coefficient reached $C_d = 215$ levels at Reynolds number values of $Re = 0,37$, while it dropped to $C_d = 11$ levels at Reynolds number $Re = 8,00$. The minimum and maximum drag forces under experimental conditions were obtained as 0,01 N and 0,33 N, respectively. The experimental setup was capable of measuring small force values at these levels with low cost. Numerical analyses indicated that the ratio of pressure-induced drag force to the total drag force under experimental conditions decreased from the order of %3 to %2 with increasing Reynolds number. This small percentage values suggested that within the given Reynolds number range, the viscous drag force could represent the total drag force acting on the object. The fact that the pressure-induced drag force remains at such low rates shows that only the viscous drag force can represent the total drag force acting on the sample.

1. Giriş

Akışkanların katı yüzeylerle etkileşimi, endüstriyel ve mühendislik uygulamalarda sıklıkla karşılaşılan bir

konudur [1]. Özellikle, akışkanların yüzeye uyguladığı direnç, birçok tasarım ve optimizasyon sürecinde incelenmesi gereken önemli bir parametre olarak kabul edilir. Akışkan içinde hareket eden cisimlerin maruz kaldığı direnç, sıklıkla sürüklenme katsayısı ile genelleştirilir [2].

* Sorumlu Yazar (Corresponding Author): murat.vonal@gmail.com



Sürüklenme katsayısı, geometrik özellikler ve akış koşulları gibi birçok faktöre bağlı olarak değişebilmekle birlikte basınç ve viskoz kaynaklı sürüklenme olmak üzere iki bileşenle karakterize edilir [3-6]. Basınç kaynaklı sürüklenmenin büyüklüğü, cismin ön ve arka yüzeyleri arasındaki basınç farkına bağlıdır. Bu farkın artması, cisme etki eden net basınç direncinin artmasına sebep olur. Basınç direncinin azaltılması amacıyla hidrodinamik gövdeye sahip cisimler üretilmeye çalışılmakta fakat konfor şartları bu potansiyeli sınırlamaktadır. [7-8]. Viskoz kaynaklı sürüklenme ise cismin katı yüzeyi üzerinde oluşan direnci ifade eder. Cisim hızının ve akışkan viskozitesinin artması viskoz direnci arttırabilir.

Akışa paralel yöndeki uzunluk “boy”, akışa dik yöndeki uzunluk “en” olarak kabul edildiğinde, boy/en oranının düşük olduğu cisimler küt cisimler olarak kabul edilir. Küt cisimler üzerinde yapılan akış çalışmaları, Reynolds sayısına bağlı olarak değişmekle birlikte basınç direncinin viskoz dirence kıyasla daha yüksek olduğunu göstermiştir [9]. Boy/en oranının azalmasıyla cisimler hidrodinamik yapıya doğru evrilir ve cisme etkiyen basınç direnci düşmeye başlar. Hidrodinamik cisimler üzerinde yapılan literatür çalışmaları genellikle yüksek Reynolds sayıları için gerçekleştirilmiştir [10-12].

Naca profilleri, aerodinamik gövdeye sahip profillerin bir örneğidir [13]. Naca profilleri üzerindeki yüksek Reynolds sayılı akışta, basınç ve viskoz kaynaklı sürüklenme bileşenleri etkilidir. Düşük Reynolds sayılı akışta ise basınç ve viskoz kaynaklı sürüklenme bileşenlerinin büyüklükleri hakkında literatürde yeterli çalışma yer almamaktadır.

Bu çalışmada, mevcut literatürdeki çalışmalardan farklı olarak, NACA 0012 profil kesitli aksel simetrik bir gövde üzerindeki düşük Reynolds sayılı akışın sürüklenme durumu incelenmiştir. Öncelikle sürüklenme katsayısının hesaplanmasıyla ilgili genel bilgiler verilmiş devamında ise numunenin serbest düşme hareketini gerçekleştirdiği deney düzeneği açıklanarak düşük değerlerdeki sürüklenme kuvvetinin hesaplanabileceği ölçüm prosedürü verilmiştir. Sonuçlar kısmında, deney düzeneği ile sayısal simülasyon sonuçlarının uyumu incelenmiş ve sayısal simülasyonlar yardımıyla numune üzerine gelen basınç ve viskoz kaynaklı sürüklenme kuvveti bileşenleri irdelenmiştir.

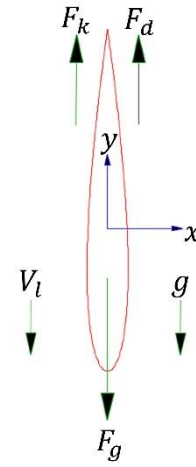
2. Temel Tanımlamalar

Akışkan ortamda ilk hızsız serbest düşmeye bırakılan cismin hareketi Denklem (1) ile bir boyutlu olarak tanımlanabilir.

$$F_g - F_k - F_d = ma_y \quad (1)$$

Burada F_g cismin ağırlığını, F_k cisme etkiyen kaldırma kuvvetini, F_d akışkanın harekete karşı gösterdiği sürüklenme kuvvetini, m cismin kütleini ve a_y ise cismin ivmesini ifade etmektedir. Kuvvetler, Şekil 1’de şematik olarak verilmiştir.

Serbest düşme esnasında ağırlık kuvveti etkisiyle hareket eden bir cismin hızı artarken, hızıyla orantılı olarak artan sürüklenme kuvveti cismi yavaşlatır ve yeterli hareket mesafesi olması durumunda cisme etki eden kuvvetler dengelenir. Limit hız durumu olarak adlandırılan bu olayda cismin ivmesi sıfırlanır, kaldırma ve sürüklenme kuvvetleri cismin ağırlığıyla dengelenir.



Şekil 1. Serbest düşme hareketi yapan bir cisme etki eden kuvvetler

Limit hızlı hareket esnasında cisme etki eden sürüklenme kuvveti Denklem (2)’de gösterildiği gibi ağırlık ve kaldırma kuvvetleri arasındaki farka eşittir.

$$F_d = F_g - F_k \quad (2)$$

Sıvı içinde hareket eden bir nesnenin maruz kaldığı bu sürüklenme kuvveti, sürüklenme katsayısı (C_d) olarak bilinen boyutsuz bir parametre ile karakterize edilir ve Denklem (3) ile tanımlanır.

$$C_d = \frac{F_d}{\frac{1}{2} \rho A_p V_l^2} \quad (3)$$

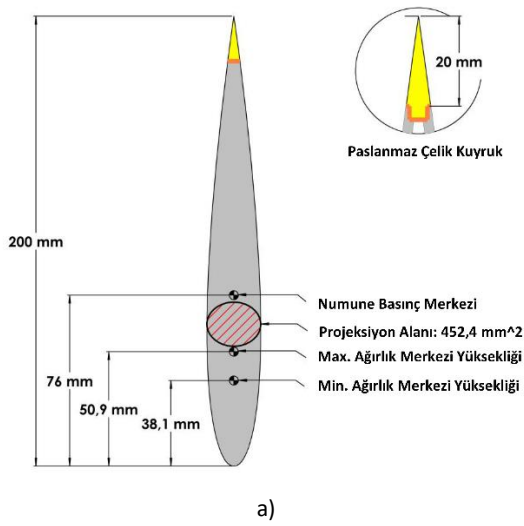
Sürüklenme katsayısı ise literatürde Reynolds sayısının (Re) bir fonksiyonu olarak verilir. Örneğin sıvının küre üzerinden $Re \ll 1$ değerlerinde akması durumunda kürenin sürüklenme katsayısı $24/Re$ ile hesaplanabilir [14]. Reynolds sayısı tanımı aşağıda verilmiştir.

$$Re = \frac{\rho V_i D}{\mu} \quad (4)$$

Denklem (3) ve (4)'de, D cismin akış yönüne dik projeksiyon çapını, ρ akışkanın yoğunluğunu, A_p cismin projeksiyon alanını, V_i cismin limit hızını ve μ akışkanın dinamik viskozitesini ifade etmektedir.

3. Deneysel Yöntem

Bir cismin Denklem (3) ile tanımlanan sürüklenme katsayısını ölçebilmek için akışkan içindeki hareketine mani olan sürüklenme kuvvetinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu çalışmada, sürüklenme kuvvetinin ölçümü serbest düşme deneyleriyle Denklem (2)'den yararlanılarak bulunmuştur. Çalışmanın konusu olan



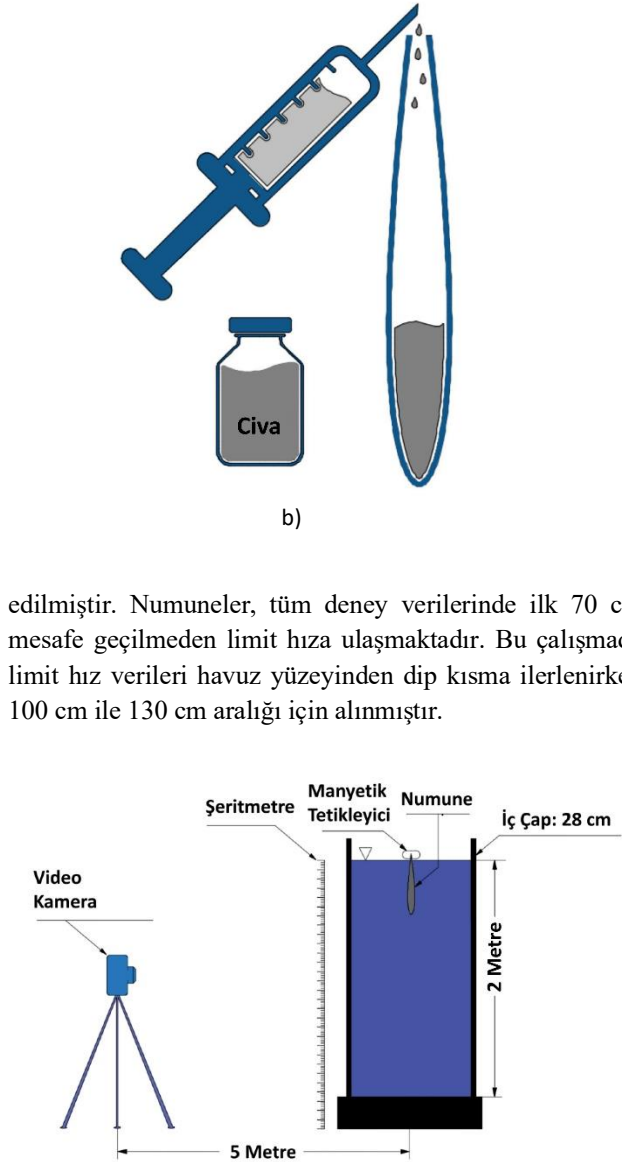
Şekil 2. a) Deneysel numunesi, b) Cıva enjektörü

Deneyler, Şekil 3'te gösterildiği gibi gliserin dolu bir tank içinde gerçekleştirilmiştir. Tank, 28 cm iç çap ve 200 cm düşey uzunluğa sahip şeffaf pleksiglas malzemeden oluşmaktadır. Diğer deney ekipmanları ise havuzun üst kısmına konumlandırılan ve cismin ilk hızsız olarak hareketine başlamasını sağlayan manyetik tetikleyici, havuzun sağ ve sol tarafına konumlandırılan 2 adet 100 W projektör ve 4K çözünürlükte görüntü alabilen Sony RX100IV kamera olarak sıralanabilir. Kamera, farklı ortamlar arası geçişte ışığın kırılmasından kaynaklı ölçüm hatalarını minimize etmek için havuzdan 5 m uzağa konumlandırılmıştır. Kamera görüntü alanı ise ölçüm alınan aralığın orta noktası hizasına ayarlanmıştır. Havuz kenarına düşey olarak konumlandırılan şerit metre, görüntüleme esnasında numune konumlarının belirlenmesini sağlamıştır.

Farklı hızlarda serbest düşme hareketi yapan numunelerin gliserin içindeki hız-zaman ölçümleri Tracker 6 isimli ücretsiz görüntü işleme yazılımı kullanılarak tespit

torpido benzeri bir numune, bir sıvı tankı içinde serbest düşüşe bırakılmıştır. Ağırlığı ve kaldırma kuvveti bilinen cismin limit hızı ölçülerek deneyler sürdürülmüştür.

Deneylerin gerçekleştirildiği deney numunesi, Şekil 2a'da gösterildiği gibi 20 cm uzunluğa ve 2,4 cm maksimum projeksiyon çapına sahip olacak şekilde ABS plastik filament kullanılarak 3D yazıcı ile üretilmiş bir torpido numunesidir. Numune, Naca 0012 profil kesimine sahiptir ve et kalınlığı 2 mm'dir. Kuyruk kısmında, paslanmaz çelik malzemeden üretilmiş açılır kapanır bir tapa bulunmaktadır. Bu sayede iç kısma Şekil 2b'de gösterildiği gibi cıva enjekte edilebilmekte ve numune ağırlıkları değiştirilerek farklı hızlarda düşüşler sağlanabilmektedir



Şekil 3. Deneysel düzeneği

Numunenin verilen aralıktaki yer değiştirmeleri ve geçiş süreleri video kayıtları üzerinden belirlenmiş, daha sonra Denklem (5) kullanılarak numune hızları hesaplanmıştır.

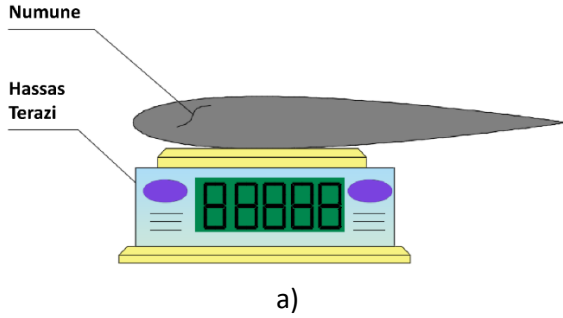
$$V_t = \frac{\Delta H}{n \cdot \Delta t} \quad (5)$$

Denklem (5)'te ΔH verilerin alındığı sabit düşey mesafeyi, n bu mesafeyi katetmek için alınan görüntü karesi sayısını, Δt ise iki görüntü karesi arasında geçen süreyi ifade etmektedir. Gliserinin dinamik viskozitesi, Stokes yasasına dayanan düşen küre yöntemi kullanılarak Denklem (6) ile ölçülmüştür [15]. Viskozite deneylerinde küre olarak 5 mm çapa sahip çelik bir bilye kullanılmıştır.

$$\mu = \frac{1}{18} \frac{(\rho_k - \rho_g)}{V_l} g D_k^2 \quad (6)$$

Denklem (6)'da ρ_k küre yoğunluğunu, ρ_g gliserin yoğunluğunu, V_l kürenin limit hızını, g yerçekimi ivmesini ve D_k kürenin projeksiyon çapını ifade etmektedir.

Uzunluk ölçümlerinde 250 mm skala uzunluğuna ve $\pm 0,05$ mm doğruluğa sahip kumpas kullanılırken, kütle



Şekil 4. a) Ağırlık ölçümü, b) Kaldırma kuvveti ölçümü

4. Belirsizlik Analizi

Denklem (3) ve Denklem (4) kullanılarak hesaplanan Reynolds sayıları ve sürüklenme katsayıları belli bir ölçüm belirsizliğine sahiptir. Bu belirsizlik, denklem içinde bulunan her bir parametrenin ölçüm belirsizliğinden ileri gelir. Denklem (9) ve Denklem (10) yardımıyla her bir parametrenin belirsizliğe olan katkısı hesaplanabilir ve böylece sürüklenme katsayısı ile Reynolds sayısının belirsizlik değerleri bulunabilir.[16].

$$W_{C_d} = \left[\left(\frac{\partial}{\partial F_d} \left(\frac{2}{\rho A_p V_l^2} \right) w_{F_d} \right)^2 + \left(\frac{\partial}{\partial \rho} \left(-\frac{2 F_d}{\rho^2 A_p V_l^2} \right) w_{\rho} \right)^2 + \left(\frac{\partial}{\partial A_p} \left(-\frac{2 F_d}{\rho A_p^2 V_l^2} \right) w_{A_p} \right)^2 + \left(\frac{\partial}{\partial V_l} \left(-\frac{4 F_d}{\rho A_p V_l^3} \right) w_{V_l} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

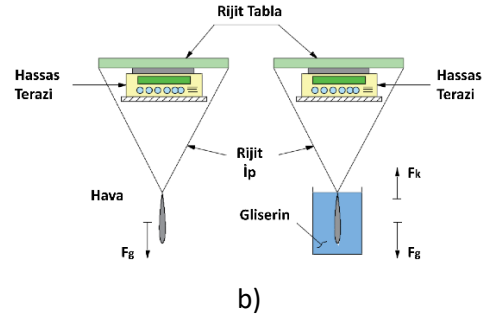
ölçümlerinde $\pm 0,01$ g doğruluğa sahip hassas terazi kullanılmıştır. Cisme etkiyen ağırlık kuvveti, cismin kütesinin Şekil 4a'da gösterildiği gibi ölçülüp ilgili değerler Denklem 7'de yerine koyulmasıyla hesaplanmıştır.

$$F_g = m_c g \quad (7)$$

Denklem (7)'de F_g cismin ağırlığını, m_c cismin kütesini ve g yerçekimi ivmesini ifade etmektedir. Cisme etkiyen kaldırma kuvvetinin ölçülebilmesi için Şekil 4b'de gösterilen düzenek kurulmuştur. Cisim hava ortamında ve gliserin ortamında iken terazinin gösterge değerleri okunmuş ve cisme etkiyen kaldırma kuvveti Denklem (8) ile hesaplanmıştır.

$$F_k = (m_h - m_g) g \quad (8)$$

Denklem (8)'de F_k cisme gliserin içinde etkiyen kaldırma kuvvetini, m_h cisim hava ortamında iken terazide okunan gösterge değerini, m_g cisim gliserin ortamında iken terazide okunan gösterge değerini ve g yerçekimi ivmesini ifade etmektedir.



$$W_{Re} = \left[\left(\frac{\partial}{\partial \rho} \left(\frac{V_l D}{\mu} \right) w_{\rho} \right)^2 + \left(\frac{\partial}{\partial V_l} \left(\frac{\rho D}{\mu} \right) w_{V_l} \right)^2 + \left(\frac{\partial}{\partial D} \left(\frac{\rho V_l}{\mu} \right) w_D \right)^2 + \left(\frac{\partial}{\partial \mu} \left(-\frac{\rho V_l D}{\mu^2} \right) w_{\mu} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (10)$$

Denklem (9) ve Denklem (10)'da W_{C_d} , w_{F_d} , w_{A_p} , w_{V_l} , W_{Re} , w_D değerleri sırası ile numune sürüklenme katsayısının, sürüklenme kuvvetinin, projeksiyon alanının, limit hızın, Reynolds sayısının ve projeksiyon çapının ölçüm belirsizliğini ifade ederken w_{ρ} , w_{μ} değerleri ise akışkan yoğunluğunun ve viskozitesinin ölçüm belirsizliğini ifade etmektedir.

Çalışmada belirsizlik oluşturan ölçüm cihazları kumpas ve hassas terazidir. Görüntü işleme yardımıyla numunenin kat ettiği mesafenin ve geçen sürenin belirlenmesi de belirsizlik oluşturur. Bu belirsizlikler, görüntünün bir pikselinin kenar uzunluğuna ve bir görüntü karesinin

kaydedilmesi için geçen süreye eşittir. Direk olarak belirlenebilen bu ölçüm belirsizlikleri Tablo (1)'de verilmiştir.

Denklem (5) ile hesaplanan numune hızının belirsizliği ve Denklem (6) ile hesaplanan akışkan viskozitesinin belirsizliği direk ölçümler ile belirlenemeyen ve Denklem (9)'da gösterildiği gibi hesap edilmesi gereken parametrelerdir. Fakat bu çalışmada işlem karmaşası olmaması açısından bu değerlerin hesaplanması ayrı ayrı gösterilmemiştir. Dolaylı olarak belirlenebilen bu ölçüm belirsizlik sonuçları Tablo (1)'de verilmiştir.

Tablo 1. Belirsizlik kaynağı ve değerleri

Belirsizlik bileşeni	Belirsizlik değeri
Kumpas	$\pm 0,00005$ m
Hassas terazi	$\pm 0,00001$ kg
Piksel kenar uzunluğu	$\pm 0,00006250$ m
Görüntü süresi	$\pm 0,01666667$ s
Minimum numune hızı	$\pm 0,00001295$ m/s
Maksimum numune hızı	$\pm 0,00584700$ m/s
Akışkan viskozitesi	$\pm 0,05817055$ kg/ms

Denklem (9) ve Denklem (10) kullanılarak gerçekleştirilen hesaplamalar sonucunda minimum ve maksimum Reynolds sayılarının belirsizlik değerleri sırasıyla $0,37 \pm 0,02$ ve $7,84 \pm 0,39$ olarak minimum ve maksimum sürüklenme katsayılarının belirsizlik değerleri ise sırasıyla $215,64 \pm 1,08$ ve $11,68 \pm 0,05$ olarak belirlenmiştir.

5. Sayısal Yöntem

Yukarıda tanımlanan deney düzeneğinin doğruluğu bir sayısal çalışma yürütülerek sorgulanmıştır. Sorgulama işlemi, deney düzeneğinde testleri yapılmış numunelere ait sürüklenme kuvveti ve sürüklenme katsayısı verilerinin sayısal analizlerden elde edilen sonuçlarla karşılaştırılması şeklindedir. Analizlerde numune hızı düşük, akış laminar ve Reynolds sayısı $0,37 < Re < 8,00$ aralığında kaldığından

Navier-Stokes denklemindeki non-linear terimler (ivme terimleri) viskoz terimlerin yanında ihmal edilebilir mertebelindedir. Bu durum, yeterince ince bir çözüm ağı yapısı ile analitik çözümlere yakın bir sayısal çözümün elde edilebilmesine ve sayısal yöntem çözümünün deney düzeneğini doğrulama amacıyla kullanılabilmesine olanak sağlamıştır. Sayısal sonuçlar, sonlu hacimler esasına dayanan yöntemle çözüm yapan ANSYS FLUENT ticari çözücü ile elde edilmiştir. Analizler, laminar çözücü ile zamandan bağımsız ve iki boyutlu (eksenel simetrik) olarak gerçekleştirilmiştir. Akışkanın fiziksel özellikleri sabit alınmış, hız-basınç geçişleri için SIMPLER seçilmiştir.

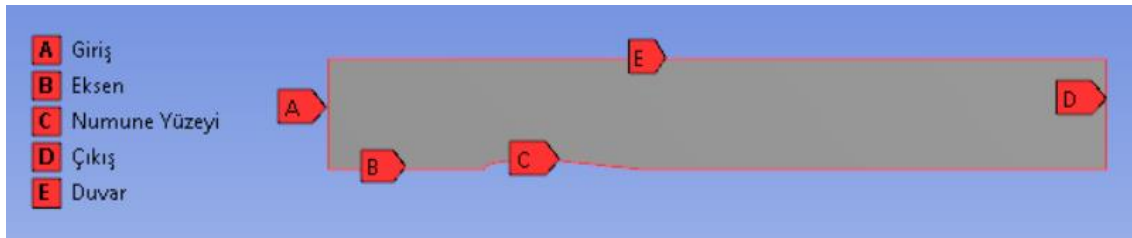
Ticari çözücü, hesaplamalarda korunum denklemlerini çözmektedir. Sıkıştırılmaz Newtonian akışkanın daimi laminar akışı için çözülen süreklilik ve Navier-Stokes denklemleri sırasıyla Denklem (11) ve Denklem (12)'de verilmiştir.

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{V} = 0 \quad (11)$$

$$(\vec{\nabla} \cdot \vec{\nabla})\vec{V} = -\frac{1}{\rho}\vec{\nabla}P + \vec{g} + \frac{\mu}{\rho}\nabla^2\vec{V} \quad (12)$$

Denklemlerde V akışkan hızını, ρ akışkan yoğunluğunu, P akışkan basıncını ve μ akışkan dinamik viskozitesini ifade etmektedir.

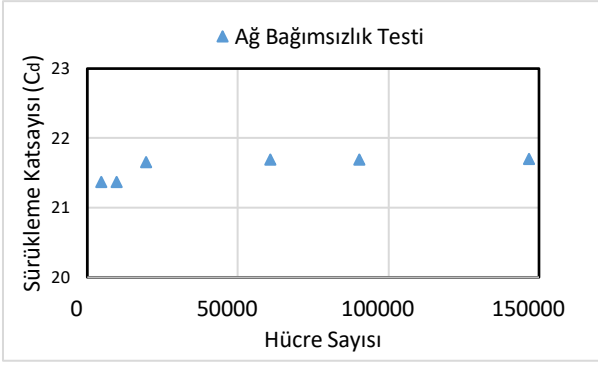
Sayısal analizler için oluşturulan domain Şekil 5'te verilmiştir. Şekilde gösterilen B çizgisi eksen, E çizgisi havuz yan yüzeyini (kaymaz duvar sınır şartı), C çizgisi numune duvarlarını (kaymaz duvar sınır şartı), A çizgisi akışkan giriş yüzeyini (hız sınır şartı), D yüzeyi ise akışkan çıkış yüzeyini (basınç sınır şartı) göstermektedir. Numune boyu $L=0,2$ m olmak üzere, domain uzunluğu numune uzunluğunun 5 katı olacak şekilde 1 m alınmıştır. Bu mesafenin $0,2$ m'lik (L) kısmı numune baş kısmı ile havuz dip yüzeyi arasındaki mesafedir. $0,6$ m'lik ($3L$) kısmı ise numune kuyruk kısmı ile havuz üst yüzeyi arasındaki mesafedir. Domain genişliği, havuz yarıçapı olan $0,14$ m olarak alınmıştır.



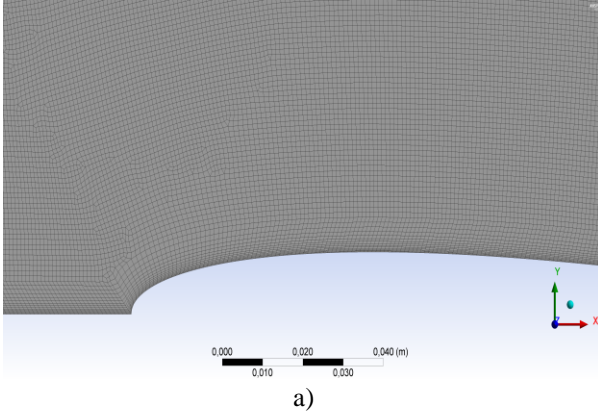
Şekil 5. Hesaplama domaini

Sonuçların çözüm ağındaki hücre sayısına bağlılığının tespiti için ağ bağımsızlık testi gerçekleştirilmiştir. Şekil 6'da Reynolds sayısının $3,76$ değeri için farklı hücre sayısı

değerlerine karşılık gelen sürüklenme katsayısı değerleri görülmektedir.



Şekil 6. Hücre sayısı ve sürüklenme katsayısı ilişkisi

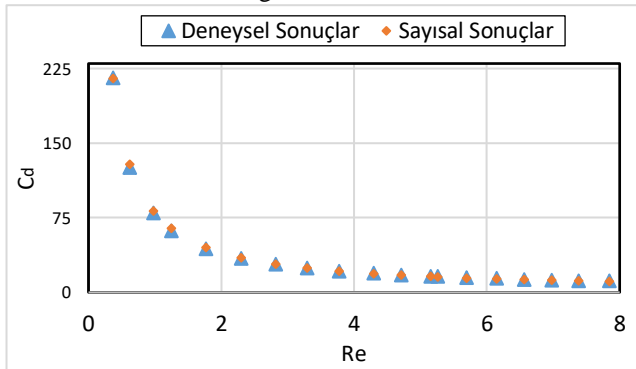


Şekil 7. a) Ağ yapısı, b) Yüzey ağ yapısı

6. Bulgular ve Tartışma

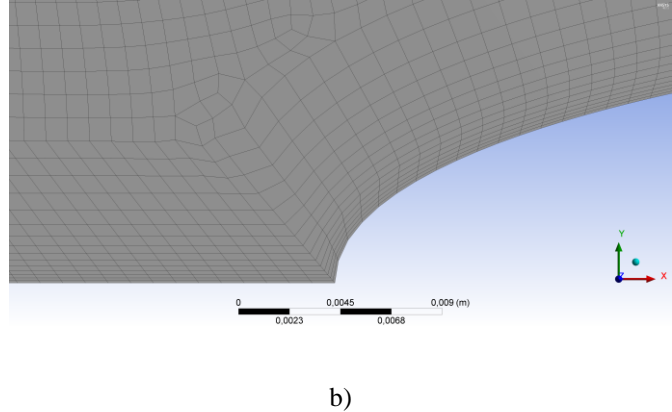
Reynolds sayısının 0,37 ile 8,00 aralığında değiştiği laminar akış koşullarında Naca 0012 profil kesitli torpido şekilli bir cismin akış direnci deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Deneysel serbest düşen bir cismin limit hız ölçümleri üzerinden gerçekleştirilmiştir. Sayısal çözümler ise kütle ve momentum denklemlerinin sonlu hacimler metodu kullanılarak çözülmesiyle elde edilmiştir.

Şekil 8'de torpido şekilli cisme, serbest düşme esnasında etki eden sürüklenme katsayısının Reynolds sayısına bağlı olarak değişimi gösterilmiştir. 64 g ile 97 g aralığında değişen numune kütlelerine karşılık gelen 19 veri seti için gerçekleştirilen deneylere ait veriler ile aynı koşullarda elde edilmiş sayısal veriler birlikte değerlendirilmiştir. Verilen koşullarda Reynolds sayısı 0,37-8 aralığında değişmekte, sürüklenme katsayısı ise Reynolds sayısı artışına bağlı olarak 215 mertebelerinden 11 mertebelerine kadar gerilemektedir.



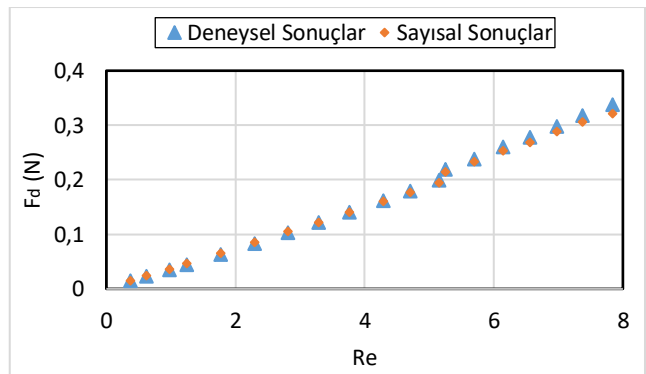
Sonuçlar, 20020 ve 146784 hücre sayısı aralığı için elde edilen sürüklenme katsayısı değerlerinin kararlı hale geldiğini göstermiştir.

Hesaplamalarda Şekil 7a'da gösterildiği gibi dörtgen ağ yapısı kullanılmıştır. Hesaplama ağı toplam 146784 hücreden oluşan ince bir ağ yapısına sahiptir. Maksimum hücre boyu 1 mm'dir. Sınır tabakanın daha iyi analiz edilmesi amacıyla kanat yüzeyindeki ağ Şekil 7b'de gösterildiği gibi sıklaştırılmış olup en düşük ağ kalınlığı 0,1 mm'ye kadar düşürülmüştür. İterasyonlar, RMS değerleri 10^{-9} mertebesinde iken durdurulmuştur.



Şekil 8. Deneysel ve sayısal sürüklenme katsayılarının karşılaştırılması

Verilen akış koşullarında cisme etki eden sürüklenme kuvveti verileri Şekil 9'da gösterilmiştir. Deneysel ve sayısal olarak elde edilen değerler 0,01 N ile 0,33 N mertebeleri aralığında değişmektedir.

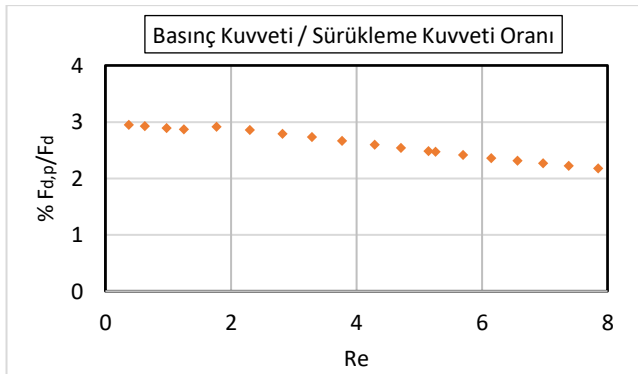


Şekil 9. Deneysel ve sayısal sürüklenme kuvvetlerinin karşılaştırılması

Burada ölçülen 0,01 Newton kuvvet değeri kütlesi yaklaşık 1 g olan bir cismin ağırlığına tekabül etmektedir. Bir akışkan içinde hareket eden bir cisme etki eden bu mertebelerde zayıf bir kuvveti deneysel olarak ölçmek zor ve pahalı bir işlem gerektirir. Eğer numune akışkan bir kanal içinde tutulup cisme etkiyen kuvvetin ölçüleceği bir deney planlansaydı, kanalda oluşabilecek çalkantılar ve bağlantı elemanlarının sebep olabileceği çalkantılar bu

denli zayıf bir kuvvetin ölçümünün doğruluğunu etkileyecekti. Bu çalışmada kullanılan yöntemle, zayıf kuvvetleri ölçmek için bir sensöre ihtiyaç duyulmadan, sadece görüntü analizi ile doğru sonuçlara ulaşılabileceği gösterilmiştir. Grafikte sunulan deneysel ölçümlerin sayısal çalışmalardan elde edilen değerlerle örtüşmesi deney düzeneğinde tespit edilen sürüklenme kuvvetlerinin doğruluğunun çok iyi olduğunu göstermektedir. Sayısal ve deneysel değerler arasındaki sapmaların ortalaması 0,0047 N olarak hesaplanmıştır.

Akışkan içinde hareket eden bir cisim üzerinde oluşan sürüklenme kuvveti, cidarlarında oluşan viskoz kuvvetler ile ön ve arka kısımlardaki basınç farkı kaynaklı kuvvetlerin toplamından oluşmaktadır. Şekil 10, basınç kaynaklı sürüklenme kuvveti ($F_{d,p}$) ile toplam sürüklenme kuvveti (F_d) oranının Reynolds sayısına bağlı olarak yüzdesel değişimini göstermektedir.



Şekil 10. Sürüklenme kuvveti bileşenleri

Reynolds sayısının 0,37 değeri için basınç kaynaklı sürüklenme kuvveti toplam sürüklenme kuvvetinin %3 ünü oluşturmaktadır. Bu oran Reynolds sayısı büyüdükçe azalmakta ve Reynolds sayısının 7,84 değeri için %2 mertebelerine düşmektedir.

7. Sonuçlar

Bu çalışmada NACA 0012 profil kesitine sahip torpido şekilli bir cismin düşük Reynolds sayılarındaki (0,37-8,00) akış içinde maruz kaldığı sürüklenme kuvvetleri deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Numunenin C_d sürüklenme katsayısı düşük Reynolds sayılarında ($Re=0,37$) 215 mertebelerine kadar çıkmışken Re sayısı 8,00 mertebelerine arttığında 11 mertebelerine düşmektedir. Akışkanın cisme uyguladığı harekete ters yönlü sürüklenme kuvvetlerinin ölçümü, serbest düşüş yapan cismin gözlemleri üzerinden hesaplanmıştır. Ölçülen sürüklenme kuvvetinin büyüklüğü 0,01 N ile 0,33 N aralığında kalmıştır. Bu değerler sayısal olarak da elde edilerek düzeneğin doğrulaması yapılmıştır. Ölçülen değerlerle hesaplanan değerler arasındaki standart sapma 0,0047 N

mertebelerindedir. Numuneye etki eden basınç kaynaklı sürüklenme kuvvetinin verilen aralıkta yaklaşık %2,5 mertebelerinde olduğu cisme etkiyen baskın kuvvet bileşeninin ise yaklaşık %97 oranıyla viskoz kuvvet olduğu belirlenmiştir. Oluşturulan deney düzeneğinin, düşük Reynolds sayılarında karşılaşılabilecek düşük sürüklenme kuvvetlerini yüksek hassasiyetle ve düşük maliyetle ölçme potansiyeli bulunmaktadır. Çalışma, hidrodinamik yapıların tasarımı ve optimize edilmesi üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Özellikle, düşük Reynolds sayılarında sürüklenme kuvveti ve bileşenlerinin belirlenebilmesi, hidrodinamik performansın geliştirilmesinde kritik bir rol oynar. Bununla birlikte, sürüklenme kuvveti bileşenlerinin ayrı ayrı belirlenebilme potansiyeli, tasarımcılara hangi faktörlerin daha belirleyici olduğunu anlaşılacak optimum dizayn kriterlerinin belirlenebilmesinde yardımcı olacaktır.

Teşekkür

Bu çalışma Kocaeli Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Proje Birimi (BAP) tarafından desteklenmiştir (Proje No: KOU/BAP/2019/029 ve KOU/BAP/2018/114)

Etik Standartlar Beyanı

Bu makalenin yazarları, bu çalışmada kullanılan materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve / veya yasal-özel izin gerektirmediğini beyan etmektedir.

Çıkar Çatışması

Yazarlar, bu makalede bildirilen çalışmayı etkilemiş gibi görünebilecek, bilinen rakip mali çıkarları veya kişisel ilişkileri olmadığını beyan ederler.

Yazar Katkı Beyanı

Yazar 1: Veri düzenlemesi, elde edilen sonuçların değerlendirilmesi, tasarımın yapılması, makalenin kontrol edilmesi, gerekli literatür taraması ve sonuçların değerlendirilmesi

Yazar 2: Metodoloji (Fikrin oluşması), tasarımın yapılması, makalenin kontrol edilmesi

Kaynaklar

- [1] Çengel, Y. A., Cimbala, J. M., & Engin, T., 2008. Akışkanlar mekaniği: temelleri ve uygulamaları. Güven Kitabevi.
- [2] Sadraey, M., Müller, D., 2009. Drag force and drag coefficient. M. Sadraey, Aircraft Performance Analysis. VDM Verlag Dr. Müller.

- [3] Yow, H. N., Pitt, M. J., Salman, A. D., 2005. Drag correlations for particles of regular shape. *Advanced Powder Technology*, 16(4), 363-372.
- [4] Goossens, W. R., 2019. Review of the empirical correlations for the drag coefficient of rigid spheres. *Powder Technology*, 352, 350-359.
- [5] Alam, M. M., Zhou, Y., 2008. Alternative drag coefficient in the wake of an isolated bluff body. *Physical Review E*, 78(3), 036320.
- [6] Sooraj, P., Agrawal, A., Sharma, A., 2018. Measurement of drag coefficient for an elliptical cylinder. *J. Energy Environ. Sustainability*, 5, 1-7.
- [7] Sivaraj, G., Parammasivam, K. M., Suganya, G., 2018. Reduction of aerodynamic drag force for reducing fuel consumption in road vehicle using basebleed. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 11(6), 1489-1495.
- [8] Ahmadzadehtalatapeh, M., Mousavi, M., 2015. A review on the drag reduction methods of the ship hulls for improving the hydrodynamic performance. *International Journal of Maritime Technology*, 4, 51-64.
- [9] Homsy, , GM, Koseff, , J, Robertson, , C, Aref, , H, Thoroddsen, , S, Breuer, , K, Hochgreb, , S, Munson, , B, Powell, , K, & Balsa, , TF., 2001. Multi-Media Fluid Mechanics. *Applied Mechanics Reviews*, 54(4), B69–B71.
- [10] Panda, J. P., Mitra, A., Warrior, H. V., 2021. A review on the hydrodynamic characteristics of autonomous underwater vehicles. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*, 235(1), 15-29.
- [11] Blanco, M., & Wilson, P. A., 2012. A review of external hydrodynamics with experimental data assessment for low-speed ocean flows. *Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME*, 134(3).
- [12] Kibar, A., Karabay, H., Yiğit, K. S., Ucar, I. O., Erbil, H. Y., 2010. Experimental investigation of inclined liquid water jet flow onto vertically located superhydrophobic surfaces. *Experiments in fluids*, 49, 1135-1145.
- [13] Abbott, I. H., Von Doenhoff, A. E., Stivers Jr, L., 1945. Summary of airfoil data. No. NACA-TR-824 .
- [14] Blevins, R. D., 1984. *Applied fluid dynamics handbook*. New York.
- [15] Stokes, G. G., 2009. On the Effect of the Internal Friction of Fluids on the Motion of Pendulums. *Mathematical and Physical Papers*, 1–10.
- [16] Kline, S.J. & McClintock, F.A., 1953. Describing uncertainties in single-sample experiments. *Mechanical engineering*, 75(1), 3–8.



Kablosuz Güç Aktarımında Kuplaj Katsayısının Analizi ve Frekans Ayrılmasına Etkisi

Analysis of Coupling Coefficient in Wireless Power Transfer and Its Effect on Frequency Splitting

Beyza AYDOĞAN¹ , Ali Bekir YILDIZ^{2,*} 

¹ Elektrik Mühendisliği, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, Türkiye, *Orcid*: 0000-0000-9463-9208

² Elektrik Mühendisliği, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, Türkiye, *Orcid*: 0000-0003-4043-7859

Araştırma Makalesi

Gönderilme Tarihi : 31/03/2024

Kabul Tarihi : 07/06/2024

Anahtar Kelimeler

Kablosuz Güç Aktarımı,
Bobin Tasarımı
Kuplaj Katsayısı
Frekans Ayrılması

Özet

Kablosuz Güç Aktarımı, kablo bağlantısı olmadan, herhangi bir kaynaktan herhangi bir yüke enerji aktarma yöntemidir. Kablosuz enerji transferi, birincil (primer) ve ikincil (sekonder) bobinler arasında hava boşluğu üzerinden elektrik iletimini mümkün kılar. Bobinler arasındaki mesafenin değişmesiyle kuplaj (bağlantı) katsayısı ve ortak endüktans gibi verimi doğrudan etkileyen parametreler de değişiklik göstermektedir. Bu makalede kuplaj katsayısının kablosuz güç aktarımı sistemine etkisi araştırılmıştır. Bobinler arası mesafe değiştirilerek kuplaj katsayısının değişimi ve sistemin verimine etkisi irdelenmiştir. Bobinler arası mesafenin arttırılması sonucu kuplaj katsayısının ve sistemin veriminin azaldığı görülmüştür. Ayrıca, kuplaj katsayısının değişiminin neden olduğu frekans ayrılması incelenmiştir. Sistemin aşırı (sıkı) ve zayıf (seyrek) kublajlı bölgedeki maksimum verim noktaları grafiklerle açıklanmıştır.

Research Paper

Received Date : 31/03/2024

Accepted Date : 07/06/2024

Keywords

Wireless Power Transfer
Coil Design
Coupling Coefficient
Frequency Splitting

Abstract

Wireless Power Transfer is a method of transferring energy from any source to any load without cable connection. Wireless energy transfer enables electrical conduction across the air gap between the primary and secondary coils. As the distance between the coils changes, parameters that directly affect the efficiency, such as coupling coefficient and mutual inductance, also change. In this article, the effect of the coupling coefficient on the wireless power transfer system is investigated. It has been observed that the coupling coefficient and efficiency decrease as a result of increasing the distance between the coils. By changing the distance between the coils, the change in the connection coefficient and its effect on the efficiency of the system were examined. Additionally, frequency splitting caused by the change of coupling coefficient is examined. The maximum efficiency points of the system in the extreme (tight) and weak (sparse) regions are explained with graphics.

1. Giriş

Kablosuz Güç Aktarımı (KGA), kablo bağlantısı olmadan herhangi bir kaynaktan yüke enerji aktarma yöntemidir. KGA, birincil ve ikincil bobinler arasında hava boşluğu üzerinden elektrik iletimini mümkün kılar. KGA'nın günümüzde bu kadar popüler hale gelmesinin nedeni, insan hayatını kolaylaştıran etkileri, kablo karmaşıklığını azaltması şeklinde sıralanabilir. KGA, ilk

kez 1891 yılında Nikola Tesla tarafından ortaya atılmış bir kavramdır. Nikola Tesla, dünya çapında kablosuz güç dağıtım sistemi kurmak amacıyla manyetik alan ile kablosuz enerji aktarımı üzerine çalışmalar yapmıştır. Lee ve Lorenz, 3.7MHz'de 30cm mesafeden %95 verim oranıyla 200W değerinde elektriksel gücü kablosuz bir şekilde başarıyla iletmiştir [1]. Günümüzde KGA, teknolojik aletler ve günlük ev eşyaları, insansız hava aracı (İHA), elektrikli araçlar [2-5], uzay uygulamaları,

* Sorumlu Yazar (Corresponding Author): abyildiz@kocaeli.edu.tr



biyomedikal cihazlar [6-7] gibi birçok alanda kullanılmaktadır.

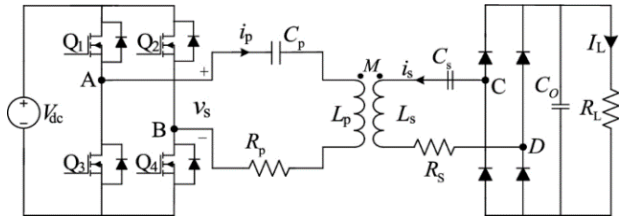
KGA sisteminin amacı bir bobinde enerji biriktirmek ve biriken enerjiyi çeşitli yöntemler kullanarak ikincil (sekonder) bobine aktarmaktır. Birincil (primer) bobinden akan zamanla değişen akım, manyetik alan üretir. Üretilen manyetik alan ile ikincil bobinde gerilim indüklenir. Buradan hareketle, akan akımın yüksek frekansta zamanla değişmesi (sinüzoidal), iki bobin arasındaki ortak endüktansın olabildiğince yüksek olması ve bobinlerden akan akımın neden olduğu güç kaybının en az olması yüksek sistem verimi için gereklidir. Kablosuz enerji transferi için günümüze kadar birçok yöntem geliştirilmiştir. Bunlar; mikrodalga güç transferi (MGT), lazer güç transferi (LGT), endüktif güç transferi (EGT), endüktif kuplajlı güç transferi (EKGT) yöntemleridir [8-9]. Bu yöntemlerden en çok tercih edilen EKGT kısa mesafede yüksek verimlilikle çalışabilmektedir, ancak mesafe arttıkça manyetik alan azaldığı için bu yöntemde verim düşmektedir. Kullanılacak olan yöntem uygulama alanına göre belirlenir. Elektrikli araçlarda, yüksek verime sahip endüktif kuplajlı güç transferi yöntemi kullanılır [5,10]. Bu yöntemde endüktif güç transferi yönteminden farklı olarak, akan akım sonucu güç kaybını en aza indirmek amacıyla sistem rezonans durumuna getirilerek, birincil ve ikincil sargılara kondansatör bağlanır [11]. Bu işlem, kondansatörün sargılara bağlanma şekline göre değişiklik gösterir. Bu makalede seri-seri endüktif kuplajlı güç transferi yöntemi incelenmiş ve analizi yapılmıştır.

Sistemin verimini, rezonans frekansı, kuplaj katsayısı, kalite faktörü ve bobinler arası ortak endüktans değeri belirler [8, 12-13]. Ortak endüktans değeri değişen manyetik akı ile orantılıdır. Akı, sargılar arası mesafeye ve hizalanmalara göre değişir [14]. Bobinlerin boyutları ortak endüktans değerini doğrudan etkiler. Bobinler arası mesafeye göre bobin parametre değerleri belirlenir [15].

Kuplaj katsayısı bobinler arasındaki mesafe ve hizalanma ile ters orantılı olarak değişir [16]. Gerçek uygulamalarda iletim mesafesinin tam olarak ayarlanması oldukça zordur. Verim, kuplaj katsayısının bir fonksiyonu olarak elde edilirse, iletilen çıkış gücü sabit tutulabilir. Bunu sağlamak için çeşitli uygulamalar geliştirilmiştir. Bu makalede kuplaj katsayısının kablosuz güç aktarımı sistemine etkisi araştırılmıştır. Bobinler arası mesafe değiştirilerek kuplaj katsayısının değişimi ve sistemin verimine etkisi irdelenmiştir. Bu çalışmada Ansys Maxwell-3D kullanılarak bobin tasarımı yapılmıştır. Sistemin çıkış gücü 1757W, sistemin verimi %90,84 olarak elde edilmiştir.

2. Malzeme ve Yöntem

KGA sistemi için en çok tercih edilen seri-seri topoloji devresi Şekil 1'de verilmiştir. Sistemin maksimum verimde çalışabilmesi için birincil (primer) devreden akan akım yüksek frekansta zamanla değişim göstermelidir. Frekansın yüksek seviyede tutulması için şebekeden çekilen 220V 50Hz gerilim evirici devre ile 85kHz seviyesine çıkartılmıştır. Elektromanyetik indüksiyon prensibiyle ikincil (sekonder) devreye aktarılan enerji doğrultucu kullanılarak yüke aktarılmıştır.



Şekil 1. Seri-Seri EKGT Devre Şeması

R_p ve R_s birincil (primer) ve ikincil (sekonder) bobinlerin iç direncidir. I_p ve I_s sırasıyla birincil (primer) ve ikincil (sekonder) bobinden geçen zamanla değişen akımlardır. L_p ve L_s birincil (primer) ve ikincil (sekonder) bobinlerin öz endüktanslarıdır. C_p ve C_s kondansatörleri sırasıyla birincil (primer) ve ikincil (sekonder) bobinleri kompanze etmek için kullanılır. f_0 sistemin rezonans frekansı olmak üzere kondansatör değerleri aşağıdaki denklemdeki gibi hesaplanır.

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (1)$$

$$C_p = \frac{1}{\omega_0^2 \times L_p} \quad (2)$$

$$C_s = \frac{1}{\omega_0^2 \times L_s} \quad (3)$$

İkincil bobinde indüklenen gerilim miktarı ortak endüktans değerine bağlı olarak değişiklik gösterir. Ortak endüktans değeri iterasyon yöntemleri kullanılarak elde edilebilir. Kuplaj katsayısının değeri ortak endüktans ile birincil ve ikincil bobinlerin endüktanslarının geometrik ortalamasıdır. Bu ilişki denk.(4)'te gösterilmiştir. Kalite faktörü (Q), rezonans frekansındaki bobin ve kondansatör empedanslarının dirence oranı olarak ifade edilir (denk.5).

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_p \times L_s}} \quad (4)$$

$$Q = \frac{\omega_0 \times L}{R} \quad (5)$$

Seri-seri devre topolojisi kullanan KGA sistemi için eşdeğer empedans denk.(6)'da, aktarılabilecek maksimum güç ise denk.(7)'de gösterilmiştir.

$$Z_T = (j\omega L_p) + \left(\frac{1}{j\omega C_p} \right) + \left(\frac{M^2 \times \omega^2}{j\omega L_s + \frac{1}{j\omega C_s} + R_L} \right) \quad (6)$$

$$P_{max} = \left(\frac{j\omega M I_p}{R_L} \right)^2 \times R_L \quad (7)$$

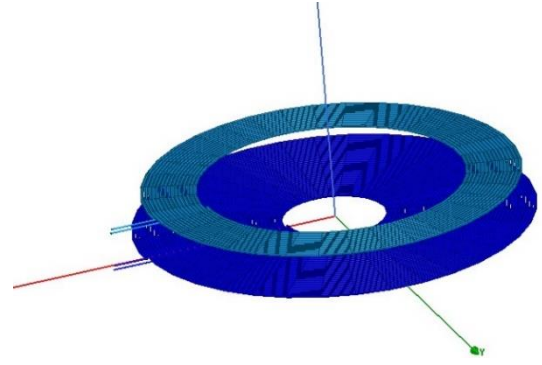
2.1. KGA Sisteminin Tasarımı

Yapılan bobin tasarımında birincil bobin yarıçapı 25cm, ikincil bobin yarıçapı 24cm olacak şekilde tasarlanmıştır. KGA sisteminde maksimum verim elde etmek için Tx (birincil bobin) boyutu, hem Rx (ikincil bobin) boyutuna hem de bobinler arasındaki mesafeye göre belirlenmelidir. Devrenin rezonans frekansı 85kHz olarak belirlenmiştir. Yapılan araştırmalara göre KGA sisteminin optimum rezonans frekansı 85 kHz'dir. Kondansatörlerin kapasite değerleri ise denk.(2) ve denk.(3)'de gösterildiği gibi hesaplanmıştır. Birincil devre için kondansatör kapasite değeri 12,52nF, ikincil devre için kondansatör kapasite değeri 26,94nF olarak hesaplanmıştır. Çıkış gücü 1,75 kW olan KGA sisteminin bobin tasarımı için Ansys Maxwell 3D simülasyon programı kullanılmıştır. Tasarlanan bobinler Şekil (2)'de gösterilmiştir. Devrenin analizi Matlab

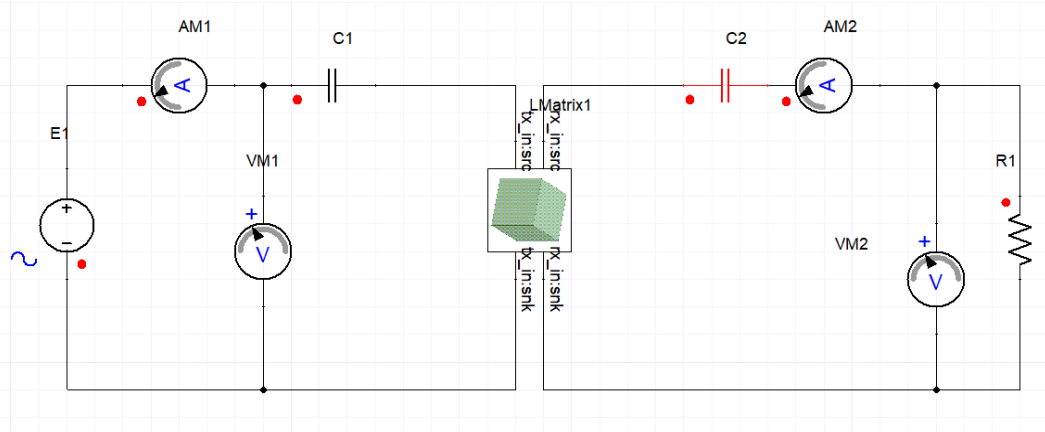
programında yapılmıştır, çıkış gücü ve verim değerleri burada hesaplanmıştır. Bobinler arası mesafe 5cm'den. 14cm'ye kadar arttırılmış ve kuplaj katsayısının değişimi gözlemlenmiştir. Kuplaj katsayısının frekansa ve mesafeye göre değişimini gözlemlemek için Ansys Simplorer programı kullanılmıştır. Tasarımı yapılan Tx ve Rx bobinlerinin parametre değerleri Tablo 1'de gösterilmiştir.

Tablo 1. Birincil ve İkincil Bobin Parametreleri

	Tx-Birincil	Rx-İkincil
Sarım Sayısı (N_1, N_2)	40	15
Sargı Kesitleri (mm^2)	4	4
Sargı Yarıçapı (mm)	256	241



Şekil 2. KGA Sistemine ait Bobin Tasarımı



Şekil 3. KGA Sisteminin Devre Tasarım

3. Bulgular ve Tartışma

Tablo 1'de belirtilen değerlere göre birincil ve ikincil bobinler tasarlanmıştır. KGA sistemine ait bobinlerin öz

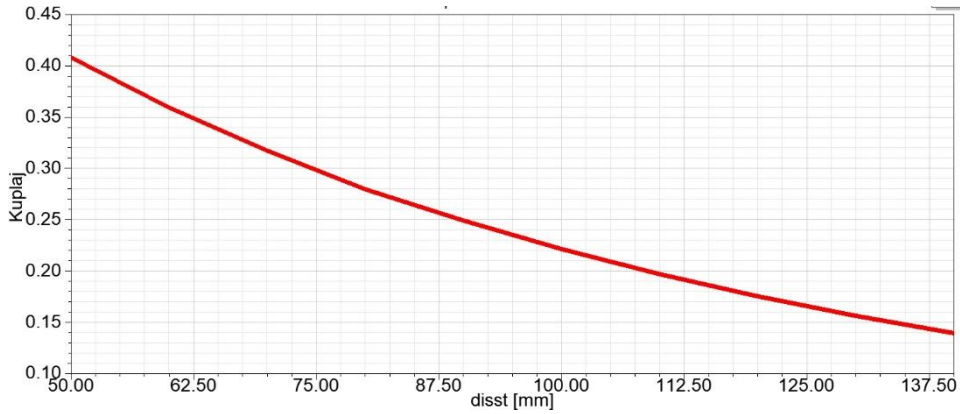
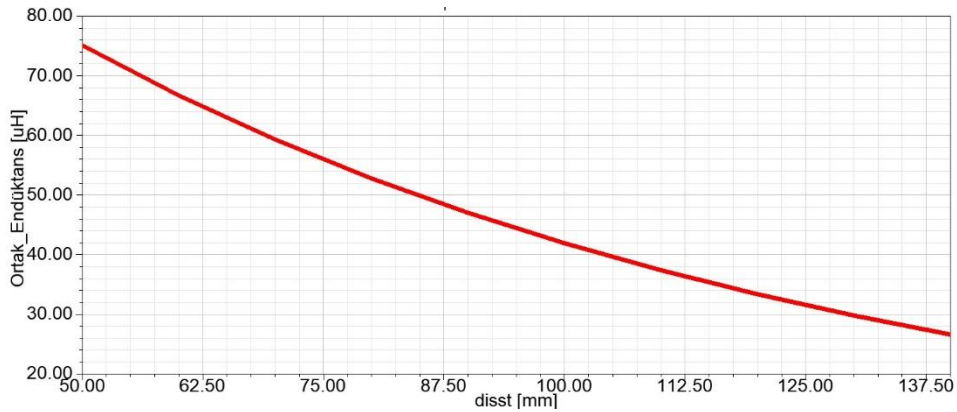
endüktansları (L_p, L_s), ortak endüktansı (M) ve bobinler arasındaki kuplaj katsayısı (k) değerleri farklı mesafe (d) değerleri için elde edilmiştir. Simülasyon sonucu elde edilen bu değerler Tablo 2' de gösterildiği gibidir.

Tablo 2. Ansys Maxwell Simülasyon Sonuçları

Mesafe (cm)	d=5	d=6	d=7	d=8	d=9	d=10	d=11	d=12	d=13	d=14
Tx - öz endüktans	280.88 uH	280.88 uH	280.87 uH	281.85 uH	280.88 uH	280.88 uH	280.88 uH	280.88 uH	280.88 uH	280.88 uH
Rx - öz endüktans	120.52 uH	124.68 uH	124.36 uH	126.35 uH	126.77 uH	127.65 uH	128.35 uH	128.97 uH	129.41 uH	129.82 uH
Ortak Endüktans	75.09 uH	66.69 uH	59.31 uH	52.79 uH	47.04 uH	41.95 uH	37.43 uH	33.41 uH	29.85 uH	26.67 uH
Kuplaj Katsayısı	0.41	0.36	0.32	0.28	0.25	0.22	0.2	0.17	0.16	0.14

Birincil ve ikincil bobinler arasındaki mesafenin kuplaj katsayısına ve ortak endüktansa olan etkisi incelenmiştir. Mesafe arttıkça kuplaj katsayısının ve ortak endüktansın

azaldığı gözlemlenmiştir. Simülasyon sonuçları Şekil 4 ve Şekil 5’de gösterilmiştir.

**Şekil 4.** Mesafe-Kuplaj Katsayısı Grafiği**Şekil 5.** Mesafe-Ortak Endüktans Grafiği

3.1. Kuplaj Katsayısı Analizi ve Frekans Ayrılması

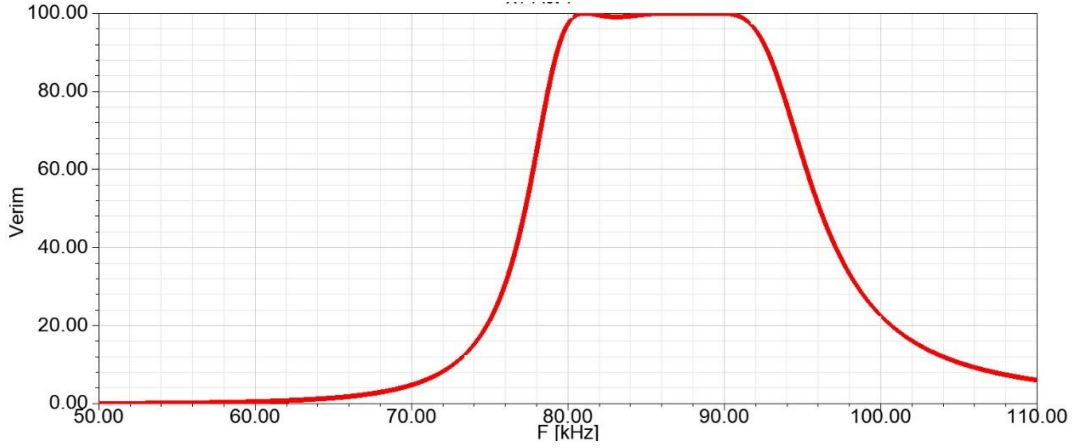
Kuplaj katsayısı birincil ve ikincil bobinler arasındaki manyetik akı transferini temsil eder, 0 ile 1 aralığında değer alır. Verim çıkış gücünün giriş gücüne oranı olarak tanımlanır. Verimin yüksek olması için k maksimum değerinde olmalıdır. Kuplaj katsayısının değeri bobinlerin sargı şekli, sarım sayısı ve sargı boyutu gibi parametrelere

bağlı olarak farklılık gösterir [17]. Akı, sargılar arası mesafeye ve hizalanmalara göre değişir. Kaynak ile cihaz yakın mesafede olduğunda ortak akı artar, bu duruma bağlı olarak da kuplaj katsayısının değeri artar.

Optimum iletim mesafesinde bobinler kritik olarak bağlanır ve maksimum enerji transferi sağlanır. Bobinler arası mesafe arttırılırsa kuplaj katsayısının değeri azalır ve buna bağlı olarak verim de azalır. Tam tersi durumda, bobinler arası mesafe azaltılırsa kuplaj katsayısının değeri

artar ve sistem aşırı (sıkı) kublajlı bölgeye geçer. Sıkı kublajlı bölgede frekans ayrılması olarak bilinen olay meydana gelir. Rezonans frekansından farklı birden fazla frekansta verimin maksimum olduğu görülür. Verim, kuplaj katsayısının bir fonksiyonu olarak elde edilirse iletilen çıkış gücü sabit kalır. Verimi sabit tutmak için kaynak frekansının değiştirilmesi gibi geri bildirim mekanizmaları önerilmiştir [18]. Bu yaklaşımlar karmaşıktır ve sistemin maliyetini artırır. Bunun yerine lineer olmayan kondansatör kullanılarak verimin mesafeden bağımsız maksimum değerinde kalması sağlanır [19-20].

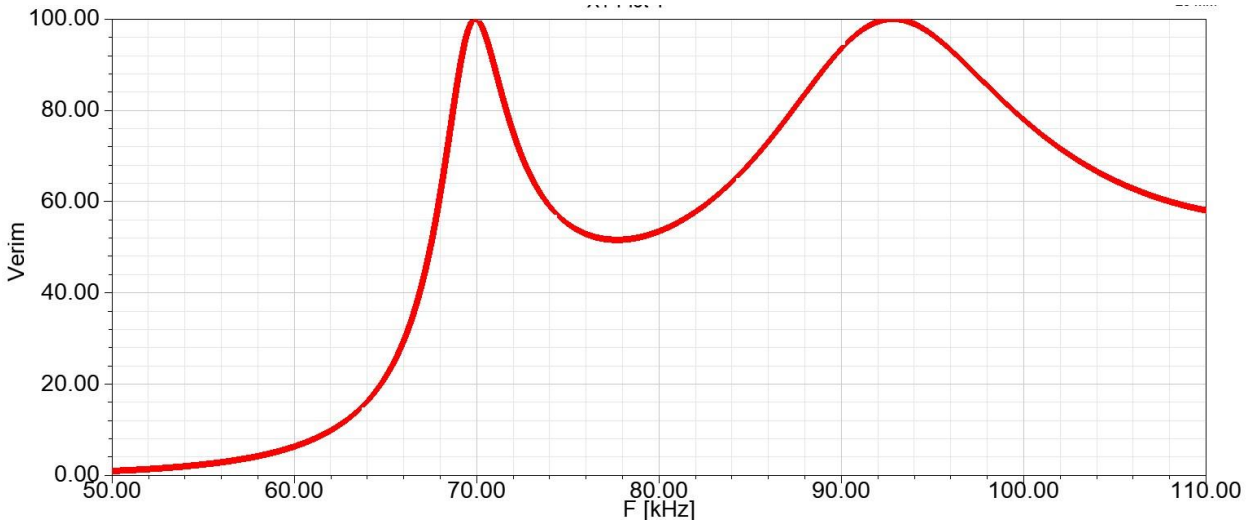
Bobinler arası mesafe 14cm ve kuplaj katsayısı 0.14 iken sistemin verimi, 50kHz ile 110kHz aralığında incelenmiştir. Sistemin frekansı 85kHz olarak belirlenmiş ve kondansatörlerin kapasite değerleri rezonans durum için hesaplanmıştır. Sistemin analizi Matlab program ile yapılmış ve frekans 85kHz iken maksimum verim değeri %90.84 olarak hesaplanmıştır. Frekans-verim grafiği Şekil 6'de gösterildiği gibidir. Grafik, Ansys Simplorer programı kullanılarak elde edilmiştir. KGA sistemi 85kHz frekansında maksimum verime ulaşmıştır. Sistemin frekansı rezonans frekanstan uzaklaştıkça verimin azaldığı görülmüştür.



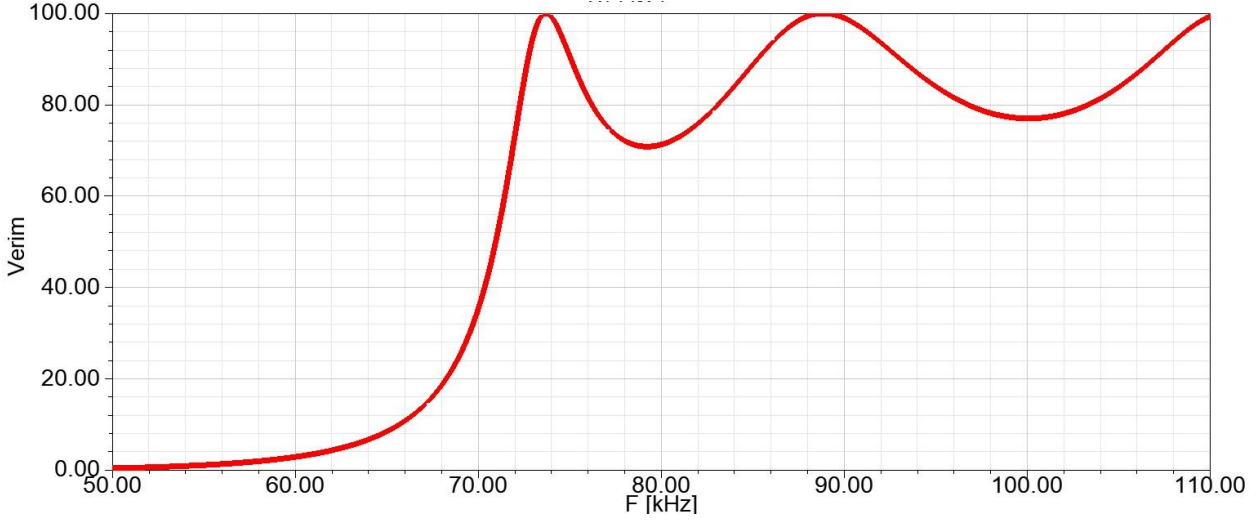
Şekil 6. Frekans-verim grafiği

Sistem zayıf kublajlı şekilde bağlandığında verimin maksimum olduğu nokta rezonans frekansıdır. Sistem aşırı kublajlı bağlı durumdayken rezonans frekansının çok az altında ve çok az üstünde w_{odd} ve w_{even} olarak adlandırılan iki ayrı frekans oluşur [19-21]. Bu iki frekans değerinde de verim maksimum değerindedir. Mesafe azaldıkça bu iki frekans noktası birbirinden uzaklaşır. Mesafe arttığında bu iki frekans birbirine yaklaşır ve tek bir rezonans frekansı olur.

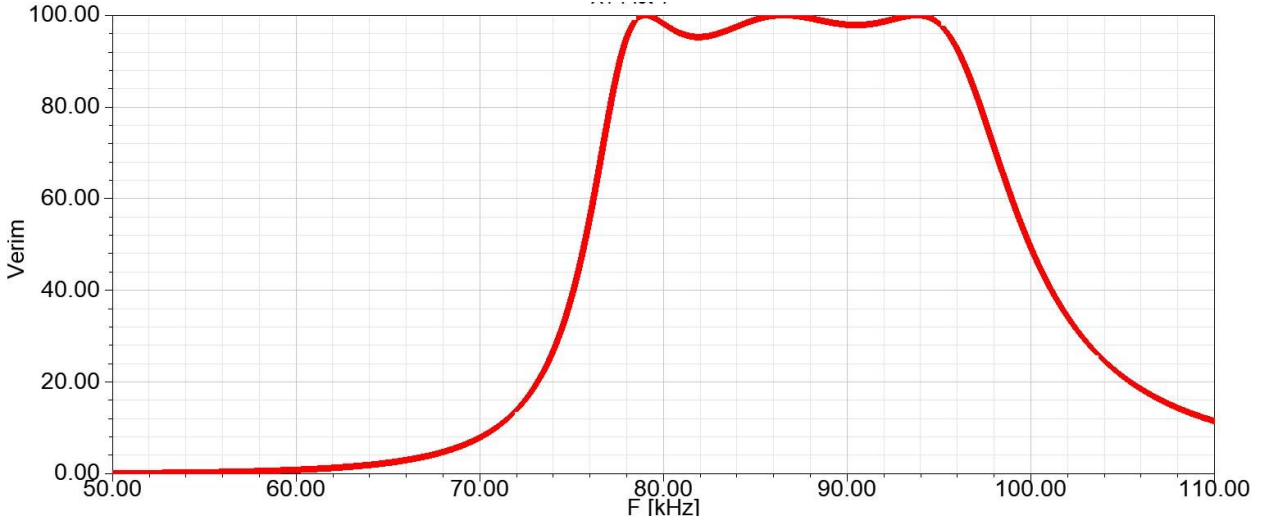
Bobinler arası mesafe 2cm iken kuplaj katsayısı 0,615 olarak bulunmuştur ve iki ayrı rezonans frekansı olduğu görülmüştür. Mesafe arttıkça kuplaj katsayısının değeri azalmıştır. Sistem aşırı (sıkı) kublajlı bağlı bölgeden zayıf (seyrek) kublajlı bağlı bölgeye geçmiştir. Bunun sonucu olarak w_{odd} ve w_{even} noktaları birbirine yaklaşmış ve en sonunda tek bir rezonans noktası haline gelmiştir. Simülasyon sonuçları Şekil 7, Şekil 8 ve Şekil 9'da gösterilmiştir.



Şekil 7. Mesafe 2cm iken frekans-verim grafiği



Şekil 8. Mesafe 5cm iken frekans-verim grafiği



Şekil 9. Mesafe 10cm iken frekans-verim grafiği

4. Sonuçlar

Bu çalışmada seri-seri endüktif kuplajlı kablosuz güç aktarımı yönteminin simülasyonu yapılmıştır. Bobin tasarımı için Ansys Maxwell programı kullanılmıştır. Rezonans devresinde bobinler arası mesafe 14cm ve yük direnci 10Ω olarak belirlenmiştir. Devrenin çıkış gerilimi 132V, çıkış akımı 13.2A, sistemin verimi %90.84 olarak elde edilmiştir. Bobinler arası mesafe arttırılarak mesafenin kuplaj katsayısına ve ortak endüktans değerine olan etkisi incelenmiştir. Verimi etkileyen parametrelerin simülasyonu yapılmıştır. Bobinler sıkı kublajlı bağlıyken meydana gelen frekans ayrılması olayı grafiklerle açıklanmıştır.

Etik Standartlar Beyanı

Bu makalenin yazarları, bu çalışmada kullanılan materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve / veya yasal-özel izin gerektirmediğini beyan etmektedir.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar, bu makalede bildirilen çalışmayı etkilemiş gibi görünebilecek, bilinen rakip mali çıkarları veya kişisel ilişkileri olmadığını beyan ederler.

Kaynaklar

- [1] Lee, SH., Lorenz, RD., 2011. Development and validation of model for 95%-efficiency 220-W wireless power transfer over a 30-cm air gap. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 47(6), 2495-2504.
- [2] Aydın, E., Pashaei A., Yıldırım E., Aydemir MT., 2018. Elektrikli araçlar için 2.2 kW gücünde bir kablosuz güç aktarım sisteminin tasarımı, *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 30(3) 1-6.
- [3] Fincan, B., 2015. Elektrikli araçlar için kablosuz şarj cihazı tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [4] Kızıldağ, U., 2021. Elektrikli Araçlarda Kablosuz Şarj Devrelerinin İncelenmesi ve Modellenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Kahramanmaraş Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kahramanmaraş.
- [5] Fincan B., 2015. Elektrikli Araçlar İçin Kablosuz Şarj Cihazı Tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [6] Khan, S.R., Pavulari, S.K., Cummins, G., Desmullies, M.P.Y., 2020. *Wireless Power Transfer Techniques for Implantable Medical Devices*, National Library of Medicine
- [7] Avan, O., 2017. *Wireless Power Transfer with Bidirectional Telemetry for Active Implantable Medical Devices*, MSc. Thesis, METU
- [8] Boztepe, M., Ünal, H., Tezcan Y., 2022. Endüktif Kuplajlı Kablosuz Güç Aktarımı Sistemlerinin Analizi ve Tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, İzmir.
- [9] Kaplan O., 2020. Manyetik Rezonans Kuplajlı Kablosuz Enerji Transfer Sistemi için Empedans Analizi ve Değişken Kapasite Dizisi Uygulaması. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, Part C*, 8(4), 1005-1020.
- [10] Erol, M., Ateş, K., Özen, Ş., 2023. Elektrikli Araçlarda Kablosuz Güç Transferi Sistem Tasarımı ve Elektromanyetik Alan Maruziyetinin Değerlendirilmesi, *Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 6(1), 605-618.
- [11] Lee, H.C., Jung, G., Hosani, A.K., Song, B., Seo, D., Cho, D., 2020. Wireless Power Transfer System for an Autonomous Electric Vehicle, *IEEE Wireless Power Transfer Conference (WPTC)*
- [12] Ağçal, A., Doğan, T.H., 2021. 1kW gücünde kablosuz enerji transfer sistemi tasarımı ve insan sağlığına etkileri. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 9(3), 856-865.
- [13] Arslan, E., Özüpak, Y., 2021. Kablosuz Güç Transferi İçin Q Faktörü Etkisinin Simülasyonla Analizi, *NÖHÜ Müh. Bilim Dergisi*, 11(2).
- [14] Sampath, J.P.K., Alphones, A., and Shimasaki, H., 2016. Coil design guidelines for high efficiency of wireless power transfer (WPT), 2016 *IEEE Region 10 Conference (TENCON)*, Singapore.
- [15] Kaplan O., 2019. Kablosuz güç aktarımı için karşılıklı endüktans hesaplama aracının geliştirilmesi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 7(1), 37-48.
- [16] Tel Ö., Kuşdoğan Ş., 2019. Elektrikli araçların kablosuz güç iletimi ile şarj edilmesi, *Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 2(1), 15-26.
- [17] Özder Ö., 2020. Kablosuz güç transferinde kullanılan bobbin yapılarının incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- [18] Özdemir C., 2017. Kablosuz Güç Aktarım Sistemlerinde Maksimum Güç Aktarımı İçin Bir Adaptif Frekans Kontrol Sistemi Tasarlanması ve Gerçeklenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Düzce Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [19] Abdelatty, O., Wang, X. and Mortazawi, A., 2019. Position-Insensitive Wireless Power Transfer Based on Nonlinear Resonant Circuits, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*.
- [20] Chai, R., and Mortazawi, A., 2020. A Coupling Factor Independent Wireless Power Transfer System Employing Two Nonlinear Circuits, *IEEE/MTT-S International Microwave Symposium (IMS)*, Los Angeles
- [21] Bıçakçı, S., Sis S.A., 2017. Rf Uygulamalarda Genel Amaçlı Tınlama Frekansı Takip Edici Sistem Tasarımı, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C*, 5(2).
- [22] Çelik M., Abut N., 2022. Elektrikli Araçlar için Kablosuz Şarj Sistemi Simülasyonu, *ELECO 2022*, Bursa.