



Girdap akım testinde kullanılan farklı tip bobinlerin endüktansının teorik, deneysel ve sayısal incelenmesi

The inductance of various coil types used in eddy current testing: A theoretical, experimental, and numerical analysis

Memduh Suveren¹ , Emir Esim^{2,*} , Tuğba Bakır³ , Serhat Karaca⁴ , Furkan Korkmaz⁵ ,
Ömer Enes Yıldız⁶ 

^{1,2} Erciyes Üniversitesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, 38030, Kayseri Türkiye
^{3,4,5,6} Haşçelik Kablo A.Ş, 38070, Kayseri Türkiye

Öz

Elektrik enerjisinin iletiminde Alüminyum Kaplı Çelik (ACS) teller sıklıkla kullanılmaktadır. Bu tellerin imalatı esnasında yüzeylerinde meydana gelen deformasyonları tespit etmek için tahribatsız muayene yöntemlerinden biri olan girdap akım test sistemleri kullanılmaktadır. Bu test sisteminde yer alan sensörler, malzeme yüzeyindeki kusurların tespitinde indüktans değişimlerini referans almaktadır. Sensörlerdeki indüktans değerlerinin belirlenmesinde analitik, numerik ve deneysel yöntemler tercih edilmektedir. Bu çalışmada analitik hesaplama için Harold A. Wheeler yöntemi ve numerik hesaplama için sonlu elemanlar metodundan faydalanarak COMSOL Multiphysics programı kullanılmıştır. Referans olması için aynı parametrelerle üretilen 26 adet bobinin indüktans değerleri deneysel olarak ölçülmüş ve diğer iki yöntemle hesaplanan indüktans değerlerinin doğruluğu karşılaştırılarak bobin indüktansının hesaplanmasında hangi yöntemin daha güvenilir olduğu belirlenmiştir. Harold A. Wheeler yönteminin referans olarak kullanılan LCR metre ölçümlerine göre sapma değeri %0.02 ile %6.32 aralığında, geliştirilen COMSOL Multiphysics yöntemindeki sapma değeri ise %0.18 ile %4.83 aralığında hesaplanmıştır. Önerilen bu yöntemin endüstriyel uygulamalarda daha etkin olacağı ortaya konulmuştur.

Anahtar kelimeler: Eddy akım sensörü, Bobin indüktansı, COMSOL Multiphysics, Harold A. Wheeler yöntemi

1 Giriş

Alüminyum Kaplı Çelik (ACS) teller, hem korozyona karşı dirençli olması hem de akım taşıma kapasitesinin yüksek olmasından dolayı Optik Topraklama İletkeni (OPGW) yaygın olarak kullanılmaktadır [1]. Bununla birlikte ACS tellerin üretim sürecindeki olumsuzluklar sebebiyle teller üzerinde deformasyonlar meydana gelmektedir [2-4]. Teller üzerinde meydana gelen deformasyonların tespit edilmesi, kalite kontrol süreci açısından kritik öneme sahiptir [5, 6]. Malzemelerin elektriksel iletkenlikleri ve manyetik özelliklerindeki değişime duyarlı olan girdap akım test sistemleri, bu kalite

Abstract

In the transmission of electrical energy, Aluminum Coated Steel (ACS) wires are frequently used. During the manufacturing of these wires, eddy current testing systems, which are one of the non-destructive testing methods, are used to detect deformations that occur on their surfaces. The sensors included in this test system reference inductance changes to detect defects on the material surface. In determining the inductance values in sensors, analytical, numerical, and experimental methods are preferred. In this study, the COMSOL Multiphysics program was used by employing the Harold A. Wheeler method for analytical calculations and the finite element method for numerical calculations. For reference, the inductance values of 26 coils produced with the same parameters were experimentally measured, and the accuracy of the inductance values calculated by the other two methods was compared to determine which method is more reliable for calculating coil inductance. According to the reference LCR meter measurements for the Harold A. Wheeler method, the deviation value ranges from 0.02% to 6.32%, while the deviation value for the developed COMSOL Multiphysics method is calculated to be in the range of 0.18% to 4.83%. It has been shown that this proposed method will be more effective in industrial applications.

Keywords: Eddy current sensor, Coil inductance, COMSOL Multiphysics, Harold A. Wheeler method

kontrol sürecinin uygulamasında yer alan tahribatsız muayene yöntemlerinden biridir [7-10].

Girdap akım testlerinde bobinler, elektromanyetik indüksiyon prensibi ile çalışarak malzemede girdap akımları oluşturur. Bu akımların neden olduğu indüktans değişimleri, malzemede kusurları tespit etmek için sensör olarak kullanılmaktadır [11, 12]. Girdap akımı test sisteminde kullanılan bobinin indüktans değeri, test edilen malzemenin elektriksel ve manyetik özelliklerine bağlı olarak değişir ve bu durum testin hassasiyetini ve doğruluğunu doğrudan etkiler. [13-15]. Bobin indüktans değerini hesaplamının başta numerik, deneysel ve Sonlu Elemanlar Metodu (SEM)

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: emiresim@erciyes.edu.tr (E. Esim)

Geliş / Received: 30.10.2024 Kabul / Accepted: 11.01.2025 Yayınlanma / Published: xx.xx.20xx

doi: 10.28948/ngumuh.1574899

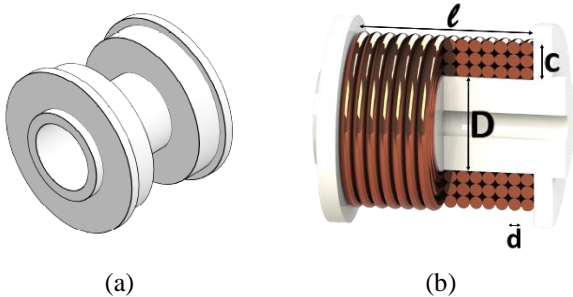
olmak üzere birçok yöntemi mevcuttur [16-19]. Analitik hesaplamalarda geometrik boyutlar ve malzemelerin elektromanyetik özellikleri ilişkilidir [13].

Bu çalışmada bobin indüktans değerinin hesaplanmasında bahsedilen yöntemlerin karşılaştırılması hedeflenmiştir. İlk aşamada analitik olarak bobin indüktans hesabı yapılması için Harold A. Wheeler formülü kullanılmıştır [20]. Wheeler formülü ile hesaplanan indüktans değerlerini karşılaştırmak amacıyla, COMSOL Multiphysics programında bobin parametreleri (karkas iç çapı, karkas iç uzunluğu, sarılan tel çapı, katman sayısı ve sarım sayısı) eş değer olacak şekilde 3 boyutlu bobin tasarımları yapılmış ve SEM simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Son aşamada ise gerçek deneysel bobinler için bobinlerin indüktans değerleri LCR (İndüktans (L), Kapasitans (C), Direnç (R)) metre ile ölçülmüştür. Bu çalışmada Bobin indüktans değeri hesaplamasında kullanılan COMSOL Multiphysics SEM tekniği ile literatürde kabul görmüş ve sıklıkla kullanılan Wheeler formülüne üstünlük sağlanmıştır. Her iki yöntemin karşılaştırılması noktasında ise deneysel olarak sarımı gerçekleştirilen bobinlerin indüktans ölçümleri, literatürde de yapıldığı gibi referans kabul edilmiştir [21].

Çalışmanın geri kalan kısmı şu şekilde düzenlenmiştir. Materyal metot bölümünde bobinlerin tasarımı, imalatı, sarımı ve LCR metre ile ölçümlere yer verilmiştir. Yine bu bölümde imalatı yapılan bobinlere ait numerik hesaplamalar ve COMSOL Multiphysics analizleri bu bölümde sunulmuştur. Sonuçlar kısmında ise elde edilen sonuçlar sunularak değerlendirilmesine yer verilmiştir.

2 Materyal ve metot

Bu çalışmada, bobin indüktans değerlerinin hesaplanması için Harold A. Wheeler formülü, COMSOL Multiphysics simülasyonları ve LCR metre ölçümleri uygulanarak üç farklı yöntem kullanılmıştır. Harold A. Wheeler formülü ve COMSOL Multiphysics simülasyonları ile hesaplanan indüktans değerleri, deneysel çalışma metodu olan LCR metre sonuçları referans olarak karşılaştırılmıştır. Yöntemlerin uygulanması için Şekil 1'de gösterildiği gibi dairesel bobinler kullanılmıştır.

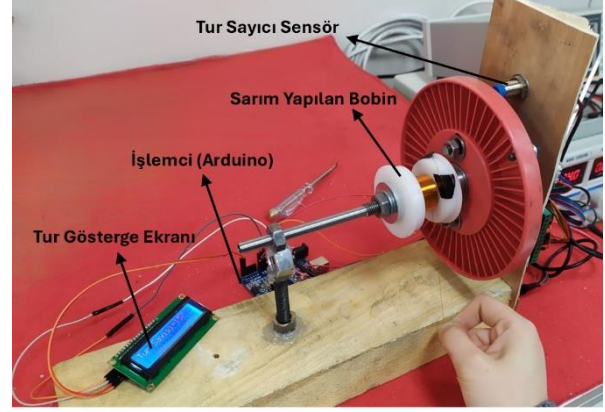


Şekil 1. Bobin karkas tasarımı a) 3D görünümü, b) Bobin parametreleri (D: Karkas iç çapı, L: Karkas iç uzunluğu, C: Sarım kalınlığı, d: Tel çapı).

2.1 Bobinlerin tasarımı ve imalatı

İndüktans değeri hesaplanacak bobinlerin üç boyutlu tasarımları Solidworks programında gerçekleştirilmiştir.

Tasarlanan bobin karkaslarında manyetik alanı bozmaması ve kolay işlenebilmesi sebebiyle derlin malzemesi seçilmiş ve talaşlı imalat yöntemiyle torna tezgâhında işlenmiştir. Bobinlerin sarımında Şekil 2'de gösterilen yarı otomatik sarım sistemi kullanılmıştır.



Şekil 2. Bobin sarma platformu.

Tablo 1. Sarımları yapılan bobinlerin parametreleri.

Sarımı Yapılan Bobinler	Karkas iç Çapı (D,mm)	Karkas İç Genişliği (L,mm)	Sarılan Tel Çapı (d,mm)	Sarılan Katman Sayısı	Sarım Sayısı (N)
Bobin 1	25.95	19.70	0.28	5	336
Bobin 2	25.90	19.80	0.28	5	344
Bobin 3	25.98	9.75	0.28	5	167
Bobin 4	26.10	9.75	0.28	5	166
Bobin 5	25.98	29.30	0.28	5	508
Bobin 6	25.92	29.75	0.28	5	506
Bobin 7	19.90	9.90	0.28	5	165
Bobin 8	19.88	9.90	0.28	5	169
Bobin 9	19.80	19.75	0.28	5	333
Bobin 10	19.85	19.70	0.28	5	345
Bobin 11	19.86	29.95	0.28	5	506
Bobin 12	19.88	29.76	0.28	5	513
Bobin 13	19.86	29.95	0.28	5	410
Bobin 14	19.86	29.95	0.28	5	509
Bobin 15	14.10	9.74	0.28	5	168
Bobin 16	14.10	9.72	0.28	5	164
Bobin 17	14.11	19.71	0.28	5	334
Bobin 18	14.08	19.78	0.28	5	331
Bobin 19	14.10	29.63	0.28	5	501
Bobin 20	14.24	29.71	0.28	5	500
Bobin 21	7.95	9.75	0.28	5	160
Bobin 22	8.00	9.65	0.28	5	156
Bobin 23	7.99	19.65	0.28	5	329
Bobin 24	8.03	19.56	0.28	5	320
Bobin 25	7.92	29.71	0.28	5	488
Bobin 26	8.60	29.64	0.28	5	500

Sarımların hassasiyetini ve doğruluğunu arttırmak için ATMEGA 328 mikrodenetleyicisi tarafından kontrol edilen step motor kullanılmıştır. Sarım esnasında sarım sayısının takibi endüktif sensör ile veri takibi ise LCD ekran ile

yapılmıştır. Şekil 1(b)'de belirtilen bobin parametreleri doğrultusunda, Tablo 1'de listelenen 26 adet bobin bu yöntem kullanılarak sarılmıştır. Buradaki değerler, farklı parametrelerin (karkas iç çapı, karkas iç uzunluğu ve sarım sayısı) indüktans değişimine etkisini görmek amacıyla seçilmiştir. Belirtilen parametreler aynı zamanda endüstride kullanılan bobinlere yakın ölçüleri de yansıtmaktadır.



Şekil 3. Örnek bir bobinin ölçümü.

2.2 LCR metre ile bobin indüktanslarının ölçülmesi

LCR metre, bobinin indüktans değerini ölçmek için belirli bir frekansta kullandığı Alternatif Akım (AC) sinyallerindeki voltaj ve akım değişimlerinden faydalanmaktadır. Bobin, uygulanan AC sinyaline karşı indüktif bir tepki göstermektedir ve bu tepki, sinyalin faz kayması ve genlik değişimi şeklinde gözlemlenmektedir. LCR metre, bu faz kaymasını ve voltaj değişimlerini analiz ederek bobinin indüktansını hesaplamaktadır. Bu çalışmada, bobinlerin indüktans değerleri LCR metre ile 10 kHz frekansta ölçülmüştür. Deneylerde 20uH-2000H indüktans aralığına ve $\pm(0.5\%+5)$ hassasiyetine sahip UT612 marka LCR metre kullanılmıştır.

Ölçüm sonuçları, bobinlerin performans ve tasarım parametrelerinin değerlendirilmesinde kritik bir rol oynamış ve örnek olarak bir bobin indüktans değerinin ölçülmesi Şekil 3'te ayrıntılı olarak sunulmuştur. Referans olarak kullanılacak olan 26 adet bobinlerin LCR metre ile ölçülen indüktans değerleri Bölüm 3'te Tablo 3'te gösterilmiştir.

2.3 Harold A. Wheeler yöntemi ile bobin indüktans değerlerinin hesaplanması

Harold A. Wheeler'in indüktans hesaplama yöntemi, yüksek frekansta çalışan devrelerde bobinlerin indüktansını belirlemede kullanılan bir yöntemdir [20]. Bu hesaplama yöntemi, bobinlerin geometrik boyutlarını dikkate alınarak indüktans değerini hesaplamaktadır. Wheeler formülündeki parametreler ve bobinin yapısı Şekil 1 (b)'de gösterilmiştir. Bobinlerin indüktans değerini hesaplamak için kullanılan Harold A. Wheeler formülü Denklem (1)'de verilmiştir [20].

$$L = \frac{(0.8)a^2N^2}{6a + 9l + 10c} \quad (1)$$

Paylaşılan denklemde N sarım sayısını, a bobin merkezinden katman sayısının orta noktasına olan uzaklığını, l sarımın yapıldığı karkas iç genişliğini, c sarım kalınlığını ve L indüktans değerini mikroHenry (uH) olarak ifade etmektedir. Uzunluk birimleri inç kabul edilmektedir.

Wheeler formülündeki a değeri, bobinin sarım çapı (D) ve sarım kalınlığı ile hesaplanmıştır. Bu ilişki Denklem (2)'de gösterilmiştir.

$$a = \frac{c + D}{2} \quad (2)$$

Denklem (1) ve Denklem (2)'de yer alan sarım kalınlığı ise sarım sayısı, sarılan telin çapı (d) ve karkas iç genişliği ile Denklem (3) kullanılarak hesaplanmıştır.

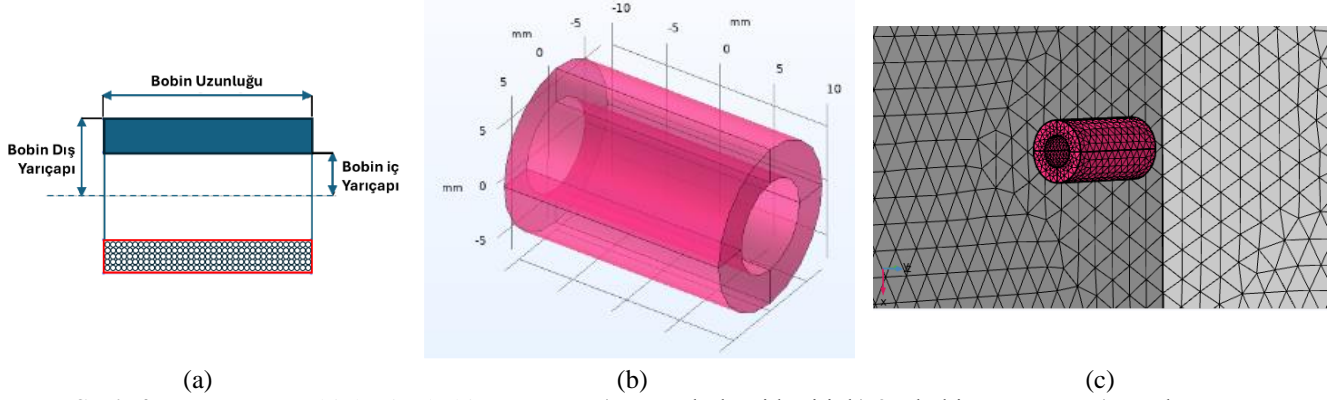
$$c = \frac{Nd^2}{l} \quad (3)$$

2.4 Sonlu elemanlar metodu ile bobin indüktans değerlerinin hesaplanması

COMSOL Multiphysics, sonlu elemanlar metodunu kullanarak 2D ve 3D simülasyonlar yapmayı sağlayan bir programdır [22-24]. Elektromanyetik alanların modellemesinde yüksek doğruluk sağladığı için geniş bir uygulama alanına sahiptir ve karmaşık elektromanyetik olayların kolaylıkla hesaplanmasını sağlamaktadır [25-27]. Bu çalışmada imalattan önce istenen indüktans değerine göre bobin parametrelerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Simülasyonlar, AC/DC fizik alanı altında bulunan Manyetik Alanlar (mf) modülü kullanılarak frekans etki alanında gerçekleştirilmiştir [28, 29]. Farklı bobin tiplerinin kolay bir şekilde simüle edilebilmesi için geometrik yapı parametrik olarak Şekil 4'teki gibi oluşturulmuştur. Ayrıca malzeme özellikleri ve voltaj-frekans değerleri ile sınır şartları Tablo 2'deki gibi belirlenmiştir. Manyetik izolasyon sağlamak için bobinler, yarıçapı 1m olan hava dolu bir kürenin tam ortasına yerleştirilerek analizler yapılmıştır.

Tablo 1'de paylaşılan parametreler kullanılarak örnek teşkil etmesi amacıyla Bobin 1 için Şekil 4(b)'de gösterilen bobin modeli oluşturulmuştur. Bobine, Şekil 4(c)'de gösterildiği gibi mesh ataması yapılmıştır. Bu bobin örneği için tüm mesh 918 alan elemanı, 80 sınır elemanından oluşmaktadır. Tüm simülasyonlarda triangular mesh yapısı kullanılmıştır. Yapılan bu işlem tüm bobin modelleri için gerçekleştirilmiş ve toplamda 26 farklı bobin için, COMSOL Multiphysics programında oluşturulan makrolar çalıştırılmıştır. Mesh bağımsızlığını sağlamak amacıyla, farklı mesh boyutlarında ön analizler gerçekleştirilmiştir. Sonucun önemli ölçüde değişmediği mesh boyutu dikkate alınarak tüm bobinlerde analizler yapılmıştır. Mesh bağımsızlığı Şekil 5'te örnek bir bobin için verilmiştir.

Bir numaralı bobin (Bobin 1) analizi için sarım çapı, sarım kalınlığı, sarım sayısı, karkas iç genişliği, frekans ve voltaj değerleri gibi parametreler Tablo 1'den alınarak bobin geometrisinin oluşturulması için program ara yüzünde tanımlanmış ve Tablo 2'deki gibi sunulmuştur.



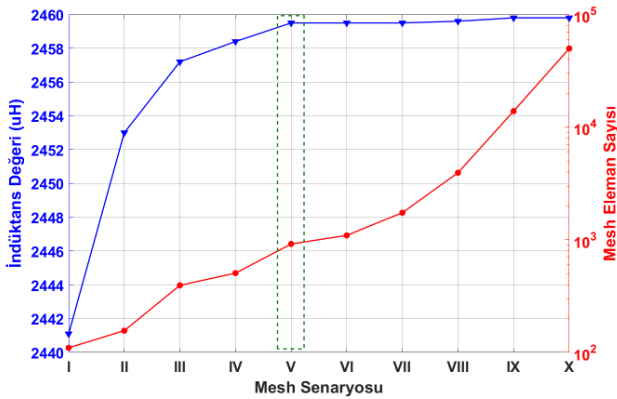
Şekil 4. COMSOL Multiphysics bobin tasarımı: a) Sarım bölgesi kesiti, b) 3D bobin görünüm, c) Mesh yapısı.

Tablo 2. Simülasyona tanımlanan “Bobin 1” parametre tablosu.

Parametre Adı	Parametre Değeri
Sarım Uzunluğu *	19.7 mm
Bobin İç Yarıçapı *	12.975 mm
Bobin Dış Yarıçapı *	14.375 mm
Bobin Sarım Sayısı *	336
Frekans	10000 Hz
Bobin Voltajı	0.85 V
Sınır Uzay tipi, Yarıçapı	Küre, 1m
Bobin Tel İletkenliği (Cu)	5.9×10^7 S/m

*: Parametrik değer

Simülasyonlar Tablo 2’deki ilgili bobin değerlerinin parametrik değişken olarak tanımlanmasıyla gerçekleştirilmiştir. Buna göre Tablo 1’de paylaşılan ve diğer 26 adet bobinin çözümleri sırasıyla bu şekilde gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5. Örnek bir bobin için mesh bağımsızlığı grafiği (I-X: 10 farklı mesh hassasiyeti).

3 Deneysel ve simülasyon bulguları

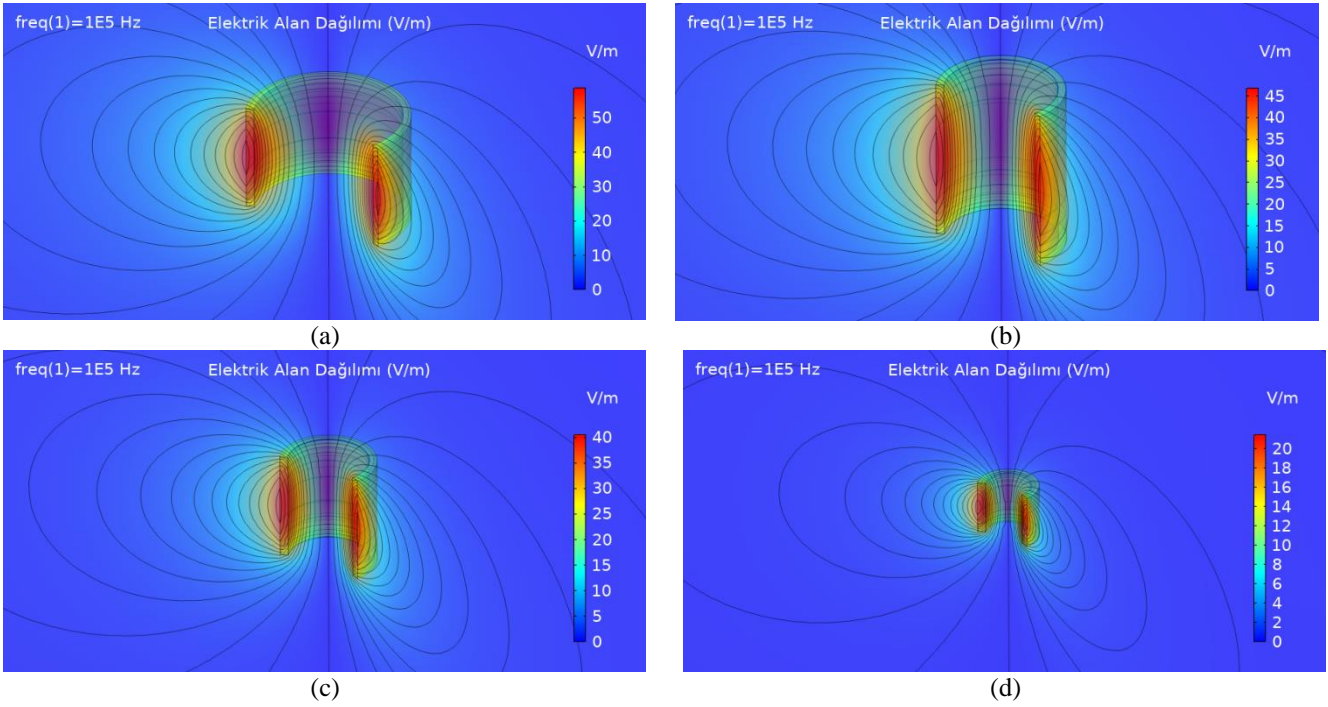
Bu çalışmada, girdap akımı test sisteminde kullanılan bobinlerin indüktans değerleri, Harold A. Wheeler formülü ve COMSOL Multiphysics programı kullanılarak hesaplanmıştır. Ayrıca, laboratuvar ortamında aynı parametrik ölçülerde sarımlar gerçekleştirilerek, teorik ve

simülasyon sonuçları LCR metre ile elde edilen deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Tablo 1’de ölçülen 26 adet bobinin Harold A. Wheeler formülü, COMSOL Multiphysics programı ile hesaplanan indüktans değerleri ve LCR metre ile ölçülerek referans olarak kullanılan indüktans değerleri Tablo 3’te detaylı olarak verilmiştir.

Tablo 3. Bobinlerin indüktans değerleri.

Sarım Yapılan Bobinler	DİD* (µH)	WHİ* (µH)	CHİ* (µH)	Sapma1* (%)	Sapma2* (%)
Bobin 1	2470.00	2432.60	2459.80	1.51	0.41
Bobin 2	2460.00	2533.55	2562.90	2.99	4.18
Bobin 3	861.80	895.23	875.50	3.88	1.59
Bobin 4	837.60	890.57	870.77	6.32	3.96
Bobin 5	4315.00	4233.32	4370.00	1.89	1.27
Bobin 6	4321.00	4137.17	4274.30	4.25	1.08
Bobin 7	586.60	582.38	576.64	0.72	1.70
Bobin 8	609.90	610.03	604.05	0.02	0.96
Bobin 9	1587.70	1536.81	1573.00	3.21	0.93
Bobin 10	1629.40	1659.31	1698.00	1.84	4.21
Bobin 11	2747.00	2623.50	2733.10	4.50	0.51
Bobin 12	2761.00	2722.21	2833.50	1.40	2.63
Bobin 13	1754.50	1727.34	1757.60	1.55	0.18
Bobin 14	2731.00	2662.22	2771.80	2.52	1.49
Bobin 15	346.00	361.11	362.71	4.37	4.83
Bobin 16	334.70	344.53	346.03	2.94	3.39
Bobin 17	912.90	891.44	919.93	2.35	0.77
Bobin 18	903.10	870.16	898.09	3.65	0.55
Bobin 19	1513.50	1457.79	1521.10	3.68	0.50
Bobin 20	1527.50	1473.12	1537.30	3.56	0.64
Bobin 21	140.720	136.54	138.77	2.97	1.39
Bobin 22	135.88	131.94	134.07	2.90	1.33
Bobin 23	341.70	345.74	354.48	1.19	3.74
Bobin 24	334.80	330.90	339.31	1.16	1.35
Bobin 25	541.20	531.07	544.89	1.87	0.68
Bobin 26	643.90	638.46	657.72	0.84	2.15

*DİD: LCR metre ile ölçülen deneysel indüktans değeri.
*WHİ: Wheeler formülü ile hesaplanan indüktans değeri.
*CHİ: COMSOL Multiphysics ile hesaplanan indüktans değeri.
*Sapma1: WHİ ile DİD arasındaki % sapma.
*Sapma2: CHİ ile DİD arasındaki % sapma.



Şekil 6. Farklı bobinlerin elektrik alan dağılımları a) Bobin 1, b) Bobin 13, c) Bobin 17, d) Bobin 21

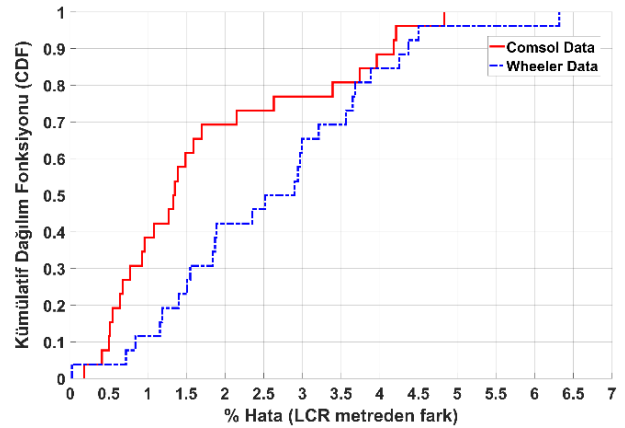
Tablo 3'e göre indüktansı hesaplanan 26 adet bobinde Wheeler formülü ile referans olarak kullanılan LCR metre ölçümleri arasındaki sapma değerleri incelendiğinde, en düşük sapma değeri Bobin 8 için 0.02% olarak hesaplanmıştır. Ancak, Bobin 4 için bu sapma değeri 6.32%'ye yükselmiştir; bu da Wheeler formülünün bazı durumlarda LCR metre ile elde edilen deneysel sonuçlardan büyük ölçüde sapabileceğini göstermektedir. Buna göre, Wheeler formülü ile elde edilen sapma değerleri 0.02% ile 6.32% arasında değişmektedir. COMSOL Multiphysics simülasyonu sonuçları ile referans olarak kullanılan LCR metre ölçümleri arasındaki sapma değerleri incelendiğinde, minimum sapma değeri Bobin 13'te 0.18% olarak hesaplanmıştır. Bu, simülasyonun deneysel verilerle oldukça uyumlu olduğunu göstermektedir. En yüksek sapma değeri ise Bobin 15'te 4.83% olarak hesaplanmıştır.

Ayrıca 4 adet farklı bobin için elektrik alan dağılımı Şekil 6'da verilmiştir. Şekil 6'da her bir sonuç aynı perspektif ve mesafeden farklı boyut ve sarımlardaki bobinlerin elektrik alan dağılımlarını göstermektedir. Bilindiği gibi elektrik alan değeri bobin indüktansına doğrudan etki eden bir ölçüm değeridir. Sonuç olarak sırasıyla bobin 1, bobin 13, bobin 17 ve bobin 21 için COMSOL Multiphysics simülasyonlarında elde edilen elektrik alan değerlerinin Tablo 3'teki indüktans değerleri ile orantılı olduğu görülmektedir.

4 Tartışma ve sonuçlar

COMSOL Multiphysics simülasyonu sonuçları, Wheeler formülü ile yapılan hesaplamalara kıyasla LCR metre ölçümlerine daha yakın sonuçlar vermektedir. Tablo 3'te hesaplanan sapma değerleri dikkate alındığında; 26 bobinin 16 tanesinde COMSOL Multiphysics programı ile LCR metre ile yapılan ölçümler arasındaki sapma değerleri, Wheeler formülüne göre daha düşük bulunmuştur. Bu,

COMSOL Multiphysics'in deneysel indüktans hesaplamalarında daha yüksek bir doğruluk sunduğunu göstermektedir. Benzer şekilde COMSOL Multiphysics ve Wheeler formülünün istatistiksel CDF (Kümülatif Dağılım Fonksiyonu) karşılaştırması Şekil 7'de verilmiştir.



Şekil 7. COMSOL Multiphysics ve Wheeler formülünün istatistiksel CDF karşılaştırması.

Şekil 7'de COMSOL ve Wheeler formülü arasındaki Kümülatif Dağılım Fonksiyonu (CDF) karşılaştırması, bu iki yöntem arasındaki hataları istatistiksel olarak incelemek amacıyla yapılmıştır. Grafik, % hata cinsinden her iki yaklaşımın LCR metreden sapmalarını göstermektedir. COMSOL ve Wheeler verisi karşılaştırıldığında, COMSOL'un düşük hata oranlarında Wheeler'a göre daha hızlı birikim gösterdiği gözlemlenmektedir. Bu da, COMSOL'un hata dağılımının genel olarak daha düşük olduğunu ve daha doğru sonuçlar ürettiğini ispatlamaktadır.

Örnek olarak, grafiğe göre ölçülen hatanın %2.5 değerinin altında olma olasılığı COMSOL yönteminde %73 olasılık ile mümkün iken Wheeler tekniğinde %46 olasılık ile mümkündür. Bu da COMSOL yönteminin istatistiksel açıdan da daha iyi olduğunu ispatlamaktadır.

Sonuç olarak;

- COMSOL Multiphysics programı, bobin sarımlarındaki tellerin arasındaki boşlukların etkisini hesaplayabilmesi ve bobinlerin 3D olarak modellenebilmesi bakımından Harold A. Wheeler yöntemine kıyasla önemli hassas hesaplama avantajı sunmaktadır [30, 31].
- Harold A. Wheeler formülü, indüktans hesaplamalarında geleneksel bir yaklaşım olarak literatürde kullanılmaya devam etse de deneysel ölçümlere kıyasla yüksek sapmaların olabileceği görülmektedir.
- COMSOL Multiphysics programı bobin indüktanslarının tespitinde daha yüksek doğruluk sağladığı bu çalışmada istatistiksel olarak da ispatlanmıştır. Bu sebeple hassas sonuçlar gerektiren uygulamalarda COMSOL Multiphysics programının Wheeler formülüne kıyasla tercih edilebileceği sonucuna ulaşılmaktadır.

Teşekkür

Bu çalışma TÜBİTAK 1505 Üniversite Sanayi iş birliği projesi kapsamında 5220140 kodu ile desteklenmektedir. Ayrıca çalışmamız Haşçelik Kablo San. Tic. A. Ş. Ar-Ge Merkezi bünyesinde gerçekleştirilmiştir. Katkılarından dolayı firmaya ve TÜBİTAK'a teşekkür ederiz.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %2

Kaynaklar

- [1] B. Li, L. Liu, P. Dang, G. Wang, L. Tang, and T. Li, Study on corrosion test of corrosion-proof steel core of high-anticorrosive conductor. In 2020 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE), pp. 1-4, Beijing, China, 6-10 September 2020.
- [2] N. A. Jaffrey and S. Hettiwatte, Corrosion detection in steel reinforced aluminium conductor cables. In 2014 Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC), pp. 1-6, Perth, Australia, 28 September - 1 October 2014.
- [3] A. S. Arman, S. W. Glass, L. S. Fifield, and M. Ali, Non-conductor-contact surface wave reflectometry for cable insulation damage detection, IEEE Sensors Journal, 22(11), 11065-11074, 2022. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2022.3167609>.
- [4] K. J. Stevens, K. Lichti, I. A. Minchington, N. Janke-Gilman, T. Mactutis, D. Rook, and P. Bondurant, Conductor damage inspection system for overhead ACSR power cables CDIS on ACSR. In 2013 Seventh International Conference on Sensing Technology (ICST), pp. 901-905, Wellington, New Zealand, 3-5 December 2013.

- [5] X. Huang, R. Ding, W. Pan, C. Yang, Y. Xu, Y. Miao, Q. Zhuang, J. Zhu, M. Wu, Z. Lei, and Y. Li, Overview of quality control issues related to submarine cables in project cycle of offshore wind power projects in Jiangsu. In 2020 12th IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), pp. 1-5, Nanjing, China, 20-23 September 2020.
- [6] T. N. Hung, Methods for fault location in high voltage power transmission lines: A comparative analysis. International Journal of Renewable Energy Development, 11(4), 1134-1141, 2022. <https://doi.org/10.14710/ijred.2022.46501>.
- [7] O. Kara, H. Erdal, ve H. H. Çelik, Tahribatsız test yöntemleri: Karşılaştırmalı bir derleme çalışması. Marmara Fen Bilimleri Dergisi, 29(3), 82-93, 2017. <https://doi.org/10.7240/marufbd.326674>.
- [8] K. Tsukada, M. Hayashi, Y. Nakamura, K. Sakai, and T. Kiwa, Small eddy current testing sensor probe using a tunneling magnetoresistance sensor to detect cracks in steel structures. IEEE Transactions on Magnetics, 54(11), 1-5, 2018. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2018.2845864>.
- [9] G. Peruñ, Advances in non-destructive testing methods. Materials, 17(3), 554, 2024. <https://doi.org/10.3390/ma17030554>.
- [10] S. K. Dwivedi, M. Vishwakarma, and P. A. Soni, Advances and researches on non destructive testing: A review. Materials Today: Proceedings, 5(2), 3690-3698, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.11.620>.
- [11] C. Wang, M. Fan, B. Cao, B. Ye, and W. Li, Novel noncontact eddy current measurement of electrical conductivity. IEEE Sensors Journal, 18(22), 9352-9359, 2018. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2018.2870676>.
- [12] J. García-Martín, J. Gómez-Gil, and E. Vázquez-Sánchez, Non-destructive techniques based on eddy current testing. Sensors, 11(3), 2525-2565, 2011. <https://doi.org/10.3390/s110302525>.
- [13] W. Cheng, Measurement of magnetic plates at a few hertz with two concentric coils and thickness estimation using mutual inductance. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 70, 1-10, 2021. <https://doi.org/10.1109/TIM.2021.3087820>.
- [14] S. She, Y. Chen, Y. He, Z. Zhou, and X. Zou, Optimal design of remote field eddy current testing probe for ferromagnetic pipeline inspection. Measurement, 168, 108306, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.108306>.
- [15] T. P. Theodoulidis and E. E. Kriezis, Impedance evaluation of rectangular coils for eddy current testing of planar media. NDT & E International, 35(6), 407-414, 2002. [https://doi.org/10.1016/S0963-8695\(02\)00008-7](https://doi.org/10.1016/S0963-8695(02)00008-7).
- [16] D. Vyroubal, Impedance of the eddy-current displacement probe: the transformer model. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 53(2), 384-391, 2004. <https://doi.org/10.1109/TIM.2003.822705>.

- [17] S. Hao and B. Li, Calculation inductance of toroidal inductor wound by rectangular cross-sectional wire. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 49(9), 2910-2915, 2021. <https://doi.org/10.1109/TPS.2021.3101570>.
- [18] T. Župan, Š. Ž, and B. Trkulja, Fast and precise method for inductance calculation of coaxial circular coils with rectangular cross section using the one-dimensional integration of elementary functions applicable to superconducting magnets. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 24(2), 81-89, 2014. <https://doi.org/10.1109/TASC.2014.2301765>.
- [19] W. Liu, S. Dai, T. Ma, Y. Shi, M. Song, and L. Li, Analytical calculation of mutual inductance of d-shaped coils applied to high-temperature superconducting magnet. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 34(5), 1-5, 2024. <https://doi.org/10.1109/TASC.2024.3358765>.
- [20] H. A. Wheeler, Simple inductance formulas for radio coils. *Proceedings of the Institute of Radio Engineers*, 16(10), 1398-1400, 1928. <https://doi.org/10.1109/JRPROC.1928.221309>.
- [21] J. Kim, K. Kim, B. Kim, and J. Kang, Experimental validation of multi-layer coil inductance estimation method. In 2017 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting, pp. 1303-1304, San Diego, California, 2017.
- [22] S. Kumar and Y. K. Jain, Simulation of circular-shaped PZT-5H sensor for train measurement using COMSOL multiphysics. *IEEE Sensors Journal*, 15(8), 4380-4387, 2015. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2015.2419281>
- [23] Z. Xia, A. A. Bhatti, X. Peng, B. Yang, H. Zhou, C. Zhao, and C. Xie, Electric field and temperature distribution of high voltage cables with the addition of particles based on COMSOL simulation. In 2020 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE), pp. 1-4, Beijing, China, 2020.
- [24] S. V. Oskin, A. V. Miroshnikov, and D. S. Tsokur, Studying the Aerodynamic Characteristics of Electric Motors in COMSOL Multiphysics. In 2021 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), pp. 350-354, Sochi, Russia, 2021.
- [25] D. S. Filip and D. Petreus, Simulation of an inductive coupled power transfer system. In IECON 2016 - 42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, pp. 6559-6564, Florence, Italy, 2016.
- [26] S. M. Mousavi and A. Ghayebloo, Design and implementation a new coil and introduction a topology for electric vehicle wireless charger. In 2024 28th International Electrical Power Distribution Conference (EPDC), pp. 1-8, Zanjan, Iran, 2024.
- [27] F. Gozalpour and M. Yavari, 2-D axisymmetric modeling of circular PCB coils and solenoids in COMSOL multiphysics. In 2023 5th Iranian International Conference on Microelectronics (IICM), pp. 102-106, Tehran, Iran, 2023.
- [28] K. Slobodnk, Detection and evaluation of subsurface defects using pulse eddy current differential probe. In 2017 18th International Conference on Computational Problems of Electrical Engineering (CPEE), pp. 1-4, Kutna Hora, Czech Republic, 2017.
- [29] R. Singh and V. Singh, Analysis of eddy current damper for suppression of vibrations using COMSOL software. *Engineering Solid Mechanics*, 3(4), 215-222, 2015. <http://dx.doi.org/10.5267/j.esm.2015.7.004>.
- [30] M. Elbaa, K. Berger, B. Douine, M. Halit, E. H. Ailam, and S. E. Bentradi, Analytical modeling of an inductor in a magnetic circuit for pulsed field magnetization of HTS bulks. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 28(4), 1-6, 2018. <https://doi.org/10.1109/TASC.2018.2809438>.
- [31] S. Balaji and P. D. Sundari, COMSOL FEA modeling of square and circular coil for inductive power transfer in electric vehicle systems. In 2023 Third International Conference on Advances in Electrical, Computing, Communication and Sustainable Technologies (ICAECT), pp. 1-4, Bhilai, India, 2023.

