



II. TİP ÜSTÜNİLETKENLERİN MİKRODALGA YÜZEY DİRENCİ ÜZERİNE AKI SÜRÜKLENMESİNİN ETKİSİ

*Şükrü YILDIZ¹, Fatih YAŞAR², Fedai İNANIR³, Uğur KÖLEMEN⁴

¹Ahi Evran Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Kırşehir,

²Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü, Tokat, fzyasar@gmail.com

³Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü, Rize, fedainanir@hotmail.com

⁴Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü, Tokat, ugur.kolemen@gop.edu.tr

Geliş Tarihi:09.10.2012

Kabul Tarihi:05.02.2013

ÖZET

II. tip üstüniletkenlerde girdap hareketleri ile alakalı hala açık bazı sorunların çözümüne bir katkı olarak, mikrodalga yüzey direncinde akı sürüklenmesinin alan bağıllığı üzerine teorik bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Akım yoğunluğunun alan bağıllığı için Anderson ve Kim tarafından önerilen ve akı sürüklenmesini içeren bir teori ile mikrodalga yüzey direncinin hesaplanması için Bonura ve ark. tarafından önerilen bir model kullanılmıştır. Sonuçlar, sürüklenme etkisi düşünülerek mikrodalga yüzey direncinin kritik hal modeli ile hesaplanabileceğini ve histerezis çevrimlerinin çivilenme parametresine güçlü bir şekilde bağlı olduğunu göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Mikrodalga (md) yüzey direnci, akı sürüklenmesi, Kritik hal modeli, II. Tip üstüniletkenler.

EFFECT OF FLUX CREEP ON MICROWAVE SURFACE RESISTANCE OF TYPE-II SUPERCONDUCTORS

ABSTRACT

In an attempt to contribute to solving some still open problems concerning the vortex motion in type- II superconductors, a theoretical study has been carried out for field dependence of the flux creep in microwave surface resistance. It uses a theory proposed by Anderson and Kim for the field dependence of current density with creep effect and a model suggested by Bonura *et al.* for the microwave surface resistance. Results shows that, by considering creep effect, the microwave surface resistance can be calculated with the critical state model and the hysteresis strongly depends on the pinning parameter.

Keywords: Microwave (mw) surface resistance, flux creep, critical state models, type II superconductors.

1. GİRİŞ

Karışık durumdaki yüksek sıcaklık üstüniletkenlerinin elektromanyetik yanıtı, teknolojik uygulamalar kadar (manyetik rezonans görüntüleme için gerekli bobin ve filtreler gibi) temel fizik için de büyük ilgiye sahiptir. Girdap çivilenmesinin kontrol edilebilmesi özellikle cihazlardaki sinyal gürültüsü ve güç saçılmalarının azaltılması için gereklidir. Bu sebepten girdap parametrelerinin deneysel verilerden kesin olarak belirlenmesi arzu edilir. Yüksek sıcaklık üstüniletkenlerinin girdap dinamiği bilindiği gibi oldukça karışıktır. Bu sebepten, girdap parametrelerinin deneysel verilerden belirlenmesi deneysel düzeneklerin kendisinde mevcut saçılma etkilerinden dolayı doğru değildir. Bu saçılmaların en önemlileri içerisinde, girdap-girdap etkileşmeleri ve düzensizlikler temel rol oynamaktadır.

II. tip üstüniletkenlerin dış manyetik alana maruz kaldıkları bir durumdaki manyetik özellikleri, zayıf çivilenme enerjisinden kaynaklanan hızlı manyetik gevşemelerin yol açtığı akı sürüklenmesi ile yönetilmektedir [1]. Akım yoğunluğunun zamanla azalmasının logaritmik olacağı Anderson'un akı sürüklenmesi teorisi ile başarılı bir şekilde tanımlanmıştır [2]. Günümüze kadar altı yüzden fazla atıf alan bu çalışma, II. tip üstüniletkenlerin manyetizasyon, manyetik zorlanım ve AC alınganlık gibi manyetik özelliklerini açıklamak için oldukça yoğun bir şekilde kullanılmıştır [3-10].

Yüksek sıcaklık üstüniletkenlerinin mikrodalga yüzey direnci için birçok model önerilmesine rağmen Coffey ve Clem modeli [11] daha basit bir yaklaşıma izin vermiştir. Önerilen bu modellerde akı sürüklenmesi de göz önüne alınmıştır. Bonura ve ark.'nın [12], Coffey ve Clem teorisini genelleştirerek yüksek sıcaklık üstüniletkenlerinin mikrodalga yüzey direncinin kritik hal modelleri çerçevesinde incelenebilmesine imkan sağlaması akı sürüklenmesi davranışının kritik akım yoğunluğunda dikkate alınarak mikrodalga yüzey direncinin hesaplanabileceğini akla getirmiştir. En iyi bilgilerimize göre, yüksek sıcaklık üstüniletkenlerinin mikrodalga yüzey direncinde akı sürüklenmesi etkileri kritik hal modelleri çerçevesinde dikkate alınmamıştır.

Bu çalışmada, Anderson ve Kim'in akım yoğunluğundaki azalma için önerdiği akı sürüklenmesi teorisi göz önünde bulundurularak yüksek sıcaklık üstüniletkenlerinin mikrodalga yüzey direnci modellenmiştir.

2. MODEL

London yerel limitlerinde kompleks nüfuz derinliği $\tilde{\lambda}$ nın sanal kısmı ile verilen yüzey direnci aşağıdaki şekilde tanımlanır.

$$R_S = -\mu_0 \omega \text{Im}[\tilde{\lambda}(\omega, B, T)] \quad (1)$$

II. tip üstüniletkenlerde $\tilde{\lambda}$ nın genel davranışı ilk kez Coffey ve Clem tarafından incelenmiştir [11]. Bu incelemelerde kompleks nüfuz derinliği $\tilde{\lambda}$ için öne sürülen basit denklem şudur:

$$\tilde{\lambda}(\omega, B, T) = \sqrt{\frac{\lambda^2(B, T) + (i/2)\tilde{\delta}_v^2(\omega, B, T)}{1 - 2i\lambda^2(B, T)/\tilde{\delta}_n^2(\omega, B, T)}} \quad (2)$$

Denklem (1) deki bazı parametreler de şu şekilde tanımlanmıştır:

$$\lambda(B, T) = \frac{\lambda_0}{\sqrt{[1 - (T/T_c)^4][1 - (B/B_{c2}(T))]}}, \quad (3)$$

$$\tilde{\delta}_{nf}(\omega, B, T) = \frac{\delta_0}{\sqrt{1 - [1 - (T/T_c)^4][1 - (B/B_{c2}(T))]}}, \quad (4)$$

Burada λ_0 , $T=0$ daki London nüfuz derinliği ve δ_0 , $T=T_c$ 'deki normal-akı nüfuz derinliğidir. Girdapların hareketinden kaynaklanan etkin karmaşık deri kalınlığı, $\tilde{\delta}_v = \delta_0^2 B / B_{c2}$, geri çağırıcı çivilenme kuvveti ile akışkansız kuvvetin izafi büyüklüğüne bağlıdır.

Karışık durumda bulunan II. tip üstüniletkende enerji kayıpları genellikle, girdaplar ve onların hareketlerinden kaynaklanmaktadır. Sıcaklık kritik sıcaklıktan yeterince düşük ise çivilenme etkileri baskındır ve saçılmalar temel olarak girdapların hareketlerinden dolaydır. Bu durumda yüzey direnci R_s 'ye esas katkı, girdapların mikrodalga akımdan dolayı Lorentz kuvvetini hissettikleri yani $\vec{H}_a \times \vec{J}_\omega \neq 0$ olan numune bölgelerinden gelir.

R_s eğrilerine tekdüze olmayan girdap dağılımının etkileri R_s 'nin uygun bir ortalaması alınarak hesaplamalara dahil edilebilir. Gerçekten de, numune yüzeyi her bir bölgede $B(x)$ 'in tekdüze olduğu sonsuz küçük bölgelere ayrılabilir. Yüzeyin her bir parçası farklı yerel manyetik indüksiyondan dolayı farklı bir R_s değeri ile karakterize edilir ve tüm numunedeki enerji kayıpları her bir bölgeden yüzey direncine gelen katkı ile belirlenir. Hesaplanan yüzey direnci tüm numune üzerinden bir ortalamadır:

$$R_s = \frac{1}{S} \int_{\Sigma} R_s(B(x)) dS \quad (5)$$

Burada Σ işareti numune yüzeyi, S niceliği onun alanı ve x niceliği yüzey elemanını temsil etmektedir.

Basitlik için, x eksenini boyunca $2D$ kalınlığında olan ve $x=-D$ ile $x=D$ aralığında sonsuz uzunluktaki düzlemlerle sınırlanmış dilim şeklinde bir üstüniletken numune düşünülmüştür. Bu üstüniletken numunenin bir dış manyetik alan olmaksızın düşük sıcaklıklara soğutulduğu kabul edilmiştir. Kararlı bir dış manyetik alanın (H_a) numunenin geniş yüzeyine paralel (z -yönünde), değişken bir dış manyetik alanın (H_w) ise numunenin daha dar olan yüzeyine (x -yönünde) paralel uygulandığı yaklaşımı yapılmıştır. Mikrodalga yüzey direnci üzerine akı sürüklenmesinin etkisi Anderson ve Kim teorisi temelinde incelenmiştir [2]. Klasik Arrhenius denkleminde akı yığınlarının çivilenme engellerinden atladığı zaman olarak tanımlanan t aşığıdaki şekilde verilmektedir:

$$t = t_0 \exp[U(J)/k_B T] \quad (6)$$

Burada, t_0 etkin kurtulma zamanı, k_B Boltzmann sabiti, T sıcaklık ve $U(J)$ akıma bağlı etkin enerji engelidir. Anderson sürüklenme teorisine göre $U(J)$ 'nin akım yoğunluğuna bağlılığı şu şekilde verilmektedir:

$$U(J) = U_0(1 - J/J_c) \quad (7)$$

Burada, U_0 niceliği $J = 0$ 'daki engel ve J_c niceliği kritik akım yoğunluğudur. Denklem 6 ile Denklem 7'nin birleşiminden aşağıdaki denklem elde edilir.

$$J = J_c (1 - (k_B T / U_0) \ln(t/t_0)) \quad (8)$$

Kritik akım yoğunluğu (J_c) genellikle yerel manyetik indüksiyona (B) bağlıdır. Bu kesimde, alan bağılılığı için Fietz ve ark. [13] tarafından önerilen üstel model kullanılmıştır.

$$J_c(B) = \pm J_{c0} \exp\left[-\frac{|B|}{B_0}\right] \quad (9)$$

Burada, tahmin edilebilir pozitif parametreler J_{c0} ve B_0 , sırası ile akım yoğunluğu ve manyetik indüksiyon için birer karakteristiktir. Kritik hal modelleri bu resmi iyi bir şekilde tanımlamaktadırlar. Kritik hal modellerine göre, akının girdiği bölgeler Amper kanunu ile belirlenen bir perdeleyici akım yoğunluğu taşırlar;

$$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J} \quad (10)$$

Denklem 9 ile verilen kritik akım yoğunluğu Denklem 8 'de yerine yazılıp elde edilen ifade Denklem 10 'da dikkate alınarak numune içerisindeki manyetik indüksiyon dağılımını aşağıdaki gibi elde edilebilir;

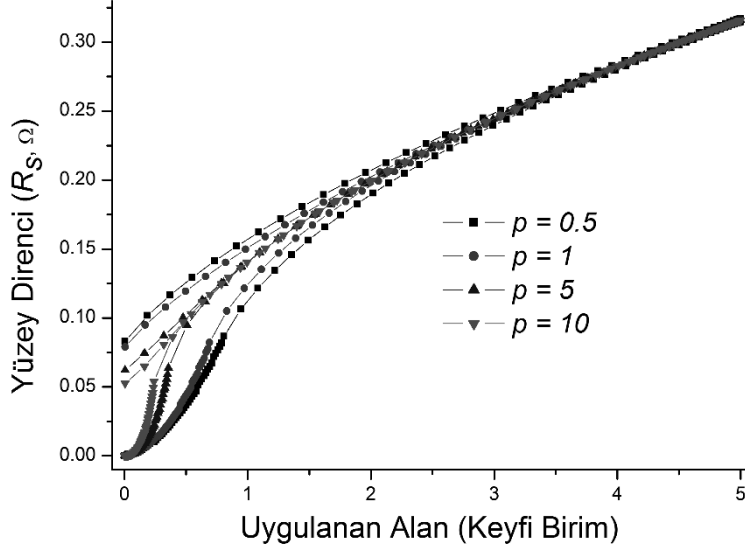
$$B_1 = B_0 \ln \left[\exp\left(\frac{B_a}{B_0}\right) - \frac{\mu_0 J_{c0}}{B_0} \left(1 - \frac{k_B T}{U_0} \ln\left(1 + \frac{t}{t_0}\right)\right) \right] (D - x) \quad (11)$$

$$B_a = B_{ac} \sin[2\pi f t] \quad (12)$$

Burada, B_1 niceliği numunenin sağ tarafındaki manyetik indüksiyon dağılımını vermektedir. Sol taraftaki dağılım da bu dağılıma benzer olacağından, hesaplamalar sadece sağ taraftaki manyetik indüksiyon için yapılarak elde edilen sonuçlar iki ile çarpılmıştır. Ancak, sınır şartlarından elde edilip hesaplamalarda kullanılacak olan bazı parametreleri (özellikle üstüniletken içerisindeki akı profillerinin kesişim noktasını belirleyen parametreleri) analitik olarak elde etmek mümkün değildir. Bu sebepten, ikiye ayırma yöntemi veya Newton-Raphson yöntemi gibi kök bulma yöntemleri burada kullanılıp hesaplamalar için gerekli parametreler nümerik olarak elde edilmiştir. Elde edilen parametreler Denklem 5 'de yerine konularak mikrodalga yüzey direnci üzerine akı sürüklenmesinin etkisi incelenmiştir.

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

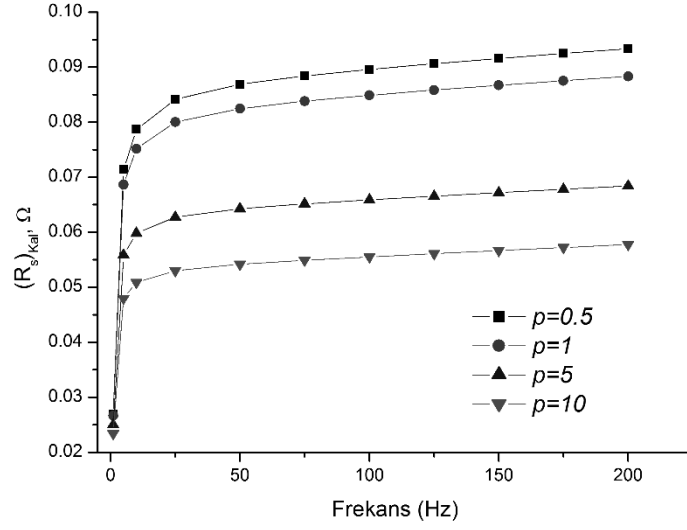
Hesaplamalarda, uygulanan dış manyetik alan tam nüfuz alanından oldukça yüksek seçilmiştir. Ayrıca, $\omega_0/\omega=1$, $\lambda_0/\delta_0=10^{-2}$ olarak seçilmiştir. ω_0/ω oranı özel bir numune için değil, bütün II. Tip üstüniletkenlerini temsil edecek şekilde seçilmiştir. Tanımlayıcı olması bakımından, öncelikli olarak, kritik hal modellerinde önemli bir parametre olan boyutsuz çivilenme parametresine odaklanılmıştır. Şekil 1 bu doğrultuda elde edilmiştir.



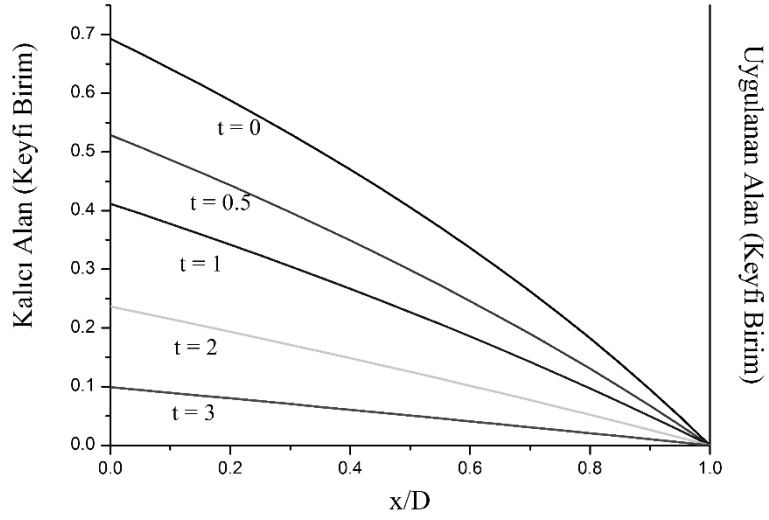
Şekil 1. Farklı çivilenme parametreleri için elde edilen yüzey direnci eğrileri.

Şekil 1'den görüldüğü gibi, çivilenme parametresi, $p = \mu_0 J_{c0} D / B_0$ 'nin artan değerleri için yüzey direncinde meydana gelen histerisizin alanı daralmaktadır. Bu durum, artan çivilenme ile II. tip üstüniletkenlerde meydana gelen kayıpların azalmasının bir sonucudur.

Şekil 2, farklı çivilenme parametreleri için kalıcı durumun frekansa bağlılığını göstermektedir. Şekilden görüldüğü gibi, belirli bir frekans değerine kadar hızlı bir şekilde artan yüzey direnci, bu frekanstan sonra artışı yavaşlayarak, bir platoya ulaşmaktadır. Bu durum, Denklem 12 ile verilen uygulanan alanın numune içerisindeki değişiminin frekansa güçlü bir şekilde bağlı olması ile açıklanabilir. Kalıcı durumun düşük frekanslarda hızlı bir şekilde artması ve frekansın belirli bir değerinden sonra değişmemesi, numune içerisinde frekansın indüklenen alana etkisini açık bir şekilde ortaya koymaktadır.



Şekil 2. Farklı çivlenme parametreleri için kalıcı yüzey direncinin frekansa bağlılığı.

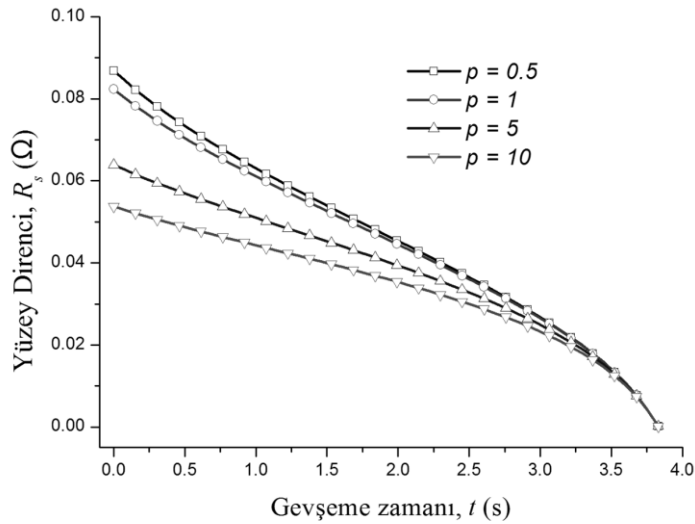


Şekil 3. Değişik kurtulma zamanları ($t = 0, 0.5, 1, 2, 3$ (s)) için numune içerisinde meydana gelen akı profili.

Diğer taraftan, uygulanan alanın tekrar sıfıra dönmesi ile çivilenmeden dolayı numune içerisinde tuzaklanan alanın zamanla gevşemesini incelemek ilgi çekicidir. Şekil 3, değişik kurtulma zamanları için numune içerisinde meydana gelen akı dağılımını temsil etmektedir. $t = 0$ için, yani ısısal olarak akı sürüklenmesi etkisinin olmadığı durumda, kalıcı durumun akı profili denklemi üstel model için elde edilen aşağıdaki denkleme indirgenir:

$$B_{kal} = B_0 \ln \left[1 + \frac{\mu_0 J_{c0}}{B_0} (D - x) \right] \quad (13)$$

Artan t değerleri için ısısal olarak akı sürüklenmesi meydana gelir ve tuzaklanan alan zamanla sıfıra indirgenir. Bu durum, Şekil 3'te açıkça görülmektedir. Böyle bir akı profili durumunda değişik çivilenme parametreleri için yüzey direncinde meydana gelecek değişim Şekil 4'te gösterilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi, yüzey direnci zamanla azalmakta ve numunede tuzaklanan akının yok olması ile sıfır olmaktadır. Ayrıca, artan çivilenme parametresine bağlı olarak ile yüzey direncinin ilk değerinin azalması, çivilenme ile kayıpların azalmasının açık bir göstergesidir.



Şekil 4. Farklı çivilenme parametreleri için kalıcı yüzey direncinin zamanla değişimi

Sonuç olarak, bu çalışmada II. tip üstüniletkenlerin mikrodalga yüzey direnci üzerine Anderson tarafından öne sürülen akı sürüklenmesinin etkisi analitik bir yöntemle incelenmiştir. Farklı çivilenme parametreleri için mikrodalga yüzey direncinin alana bağlılığı ve kalıcı durumdaki mikrodalga yüzey direncinin frekansa bağlılığı gösterilmiştir. Belirli bir frekans değerine kadar hızlı bir şekilde artan yüzey direncinin daha sonra yavaşlayarak bir platoya ulaştığı görülmüştür. Bu durum, uygulanan alanın numune içerisindeki değişiminin frekansa güçlü bir şekilde bağlı olmasının bir sonucudur. Kalıcı durumun düşük frekanslarda daha hızlı bir şekilde artması ve frekansın belirli bir değerinden sonra değişmemesi numune içerisinde indüklenen alana frekansın etkisini açık bir şekilde ortaya koymaktadır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Gaziosmanpaşa Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyonu tarafından desteklenmiştir. (Project No: 2009/10)

KAYNAKÇA

- [1] Y. Yeshurun ve A. P.Malozemoff, "Giant Flux Creep and Irreversibility in an Y-Ba-Cu-O Crystal: An Alternative to the Superconducting-Glass Model", *Phys. Rev. Lett.*, 60, 2202 (1988).
- [2] P.W. Anderson ve Y.B. Kim, "Hard Superconductivity: Theory of the Motion of Abrikosov Flux Lines", *Rev. Mod. Phys.*, 36, 39 (1964).
- [3] Y. Yeshurun, A. P.Malozemoff, F.Holtzberg ve T. R.Dinger, "Magnetic relaxation and the lower critical fields in a Y-Ba-Cu-O crystal", *Phys. Rev. B*, 38, 11828 (1988).
- [4] O. Özogul, "Frequency and Field Dependencies of Susceptibilities of High T_c Superconductor YBCO", *Journal of Superconductivity: Incorporating Novel Magnetism*, 18, 503 (2005).
- [5] S. L. Liu, G. J.Wu, L.Shan, J.Wu, X. B.Xu, X.Jin ve H. M.Shao, "Temperature dependence effective activation energy in $Tl_2Ba_2CaCu_2O_8$ thin film", *Phys. Stat. Sol. (b)*, 243, 1314 (2006).
- [6] Q. H. Chen, "Dynamics of vortex glass phase in strongly type-II superconductors", *Phys. Rev. B*, 78, 104501 (2008).
- [7] M. Reissner, S. Mohammad, P. Kovac, I. Husek ve T. Melisek, "Investigation of magnetic relaxation in MgB_2 wires", *J. Phys.: Conf. Ser.*, 150, 052219 (2009).
- [8] L. Miu, I. Ivan, P. Badica, G. Jakob, D. Miu, P. Mele, K. Matsumoto, M. Mukaida, Y. Yoshida, T. Horide, A. Ichinose ve S. Horii, "Magnetization relaxation in YBCO films with improved supercurrent transport properties", *J. Phys.: Conf. Ser.*, 234, 012026 (2010).
- [9] F. Xue, H. D. Yong ve Y. H. Zhou, "Effect of flux creep and viscous flux flow on flux-pinning-induced stress and magnetostriction in a long rectangular slab superconductor", *J. Appl. Phys.*, 108, 103910 (2010).
- [10] A. K. Pramanik, L. Harnagea, C. Nacke, A. U. B. Wolter, S. Wurmehl, V. Kataev ve B. Büchner, "Fishtail effect and vortex dynamics in $LiFeAs$ single crystals", *Phys. Rev. B*, 83, 094502 (2011).

- [11] M. W. Coffey and J. R. Clem, " Unified theory of effects of vortex pinning and flux creep upon the rf surface impedance of type-II superconductors", Phys. Rev. Lett. 67, 386 (1991); " Theory of rf magnetic permeability of isotropic type-II superconductors in a parallel field ", Phys.Rev. B 45, 9872 (1992); "Theory of rf magnetic permeability of type-II superconductors in slab geometry with an oblique applied static magnetic field" Phys. Rev. B 45, 10527 (1992).
- [12] M. Bonura, E. Di Gennaro, A. Agliolo Gallitto ve M. Li Vigni, "Critical-state effects on microwave losses in type-II superconductors", Eur. Phys. J. B 52, 459 (2006); M. Bonura, A. Agliolo Gallitto ve M. Li Vigni, "Magnetic hysteresis in the microwave surface resistance of Nb samples in the critical state", Eur. Phys. J. B 53, 315 (2006).
- [13] W. A. Fietz, M. R. Beasley, J. Silcox ve W. Webb, "Magnetization of Superconducting Nb-25%Zr Wire", Phys. Rev., 136, A335 (1964).