

Bitki Gövdelerindeki Nem Miktarının Silindirik Kavite Rezonatörüyle Yüksek Hassasiyetle Algılanması

Burak Özbey¹, Thomas F. Eibert²

¹ Ankara Üniversitesi

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü

06830 Gölbaşı, Ankara

ozbey@ankara.edu.tr

² Münih Teknik Üniversitesi

Elektrik ve Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Yüksek Frekans Mühendisliği Kürsüsü

80290 Münih, Almanya

eibert@tum.de

Özet: Orman yangınlarının engellenebilmesi için bitkilerdeki nem miktarının (NM) gerçek zamanlı ölçümlerinin yapılabilmesi büyük önem taşımaktadır. Ayrıca, NM, ahşap malzemelerden elde edilen ürünlerin ticari değeri ve kalitesinin belirlenmesinde önemli bir faktördür. Bu çalışmada, değiştirilmiş bir silindirik kavite rezonatörü geometrisine dayanan bir sistemle, silindirik bitki örneklerinin NM değişimleri algılanmaktadır. Algılayıcı performansı, tam dalga benzetimler ve yapılan in vitro deneylerle gösterilmiştir. Önerilen yöntemin temassız ve tahribatsız olması ve rezonatörün yüksek kalite faktörü sayesinde yüksek hassasiyette ölçümü olanaklı kılması gibi avantajları mevcuttur.

Abstract: Real-time characterization of the moisture content (MC) in plants is essential for prevention of forest fires. Furthermore, for materials made of wood, MC is also an important factor in determining the commercial value and quality of the product. In this study, a system based on a modified cylindrical cavity resonator geometry is employed to sense the variation of MC of cylindrical wood samples. The sensing performance is demonstrated through full-wave simulations and experiments in vitro. The proposed method has the advantage of being contactless and non-destructive and makes ultrasensitive measurement possible due to the high quality factor of the cavity.

1. Giriş

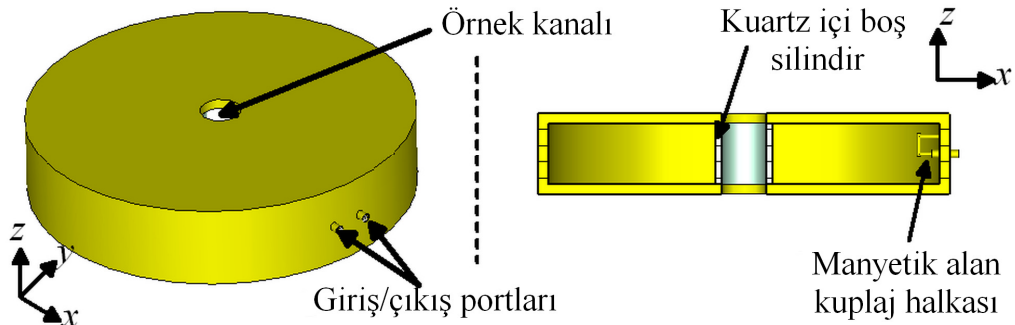
Son yıllarda, dünyanın farklı bölgelerinde yaşanan orman yangınlarının sayısında küresel iklim değişikliğine bağlı olduğu düşünülen ciddi bir artış gözlenmektedir [1]. Bitkilerin su içeriği doğrudan doğruya çevresel koşullara bağlı olduğundan, ağaçlardaki nem miktarlarının (NM) izlenmesi, orman yangınlarının zamanında tespit edilebilmesi ve engellenmesi açısından büyük önem taşımaktadır [2]. NM algılanması sadece ağaçlarla sınırlı olmayıp, organik ve sentetik malzemelerin çoğu için de önemlidir. Örneğin, ticari değeri olan ahşap gibi malzemelerde, rutubete maruz kalma oranı, ürünün değerini belirleyen önemli bir faktördür. Literatürde çok sayıda farklı NM algılayıcı yöntem önerilmiştir. Bu yöntemler, temelde tahribatlı ve tahribatsız olarak sınıflandırılabilirler. Tahribatlı yöntemler, hem ağaçlara zarar verdikleri hem de yoğun iş gücü gerektirdiklerinden tercih edilmemektedirler. Tahribatsız yöntemlerden olan manyetik rezonans görüntüleme ve gama dansitometrisi sıklıkla kullanılmaktadır. Fakat bu yöntemlerin de insan sağlığı açısından tehlike oluşturmaları, yeterince pratik olmamaları ve yüksek maliyetli olmaları gibi nedenler yüzünden alternatif ölçüm yöntemleri arayışına gidilmiştir [2]. Bu arayışın sonucunda akustik [3] ve kapasitans [4] tabanlı NM sensörleri geliştirilmiştir. Yine aynı amaçla, daha önce yapısal sağlık izleme alanında gerinim ve yer değiştirme sensörü olarak gösterilen [5-8] yüksek hassasiyetli kompakt NSRR rezonatör geometrisinden, ağaçların in vivo ve in vitro NM ölçümlerinde yararlanılabileceği gösterilmiştir [9]. Bu yöntem, rezonatörün yapılandırıldığı bitkinin elektriksel geçirgenliğinin NM'ye bağlı olarak değişmesi esasına dayanmaktadır.

Bu çalışmada, TM_{010} modunda çalışan bir silindirik kavite rezonatörü, çeşitli silindirik bitki gövdesi örneklerindeki NM değişimlerinin gerçek zamanlı olarak izlenebilmesi amacıyla kullanılmıştır. Örnekler, kavite rezonatörünün ortasında açılan dikey bir kanala yerleştirilmiş ve zamanla değişen örnek NM'sinin, geometrinin efektif elektriksel geçirgenliğini değiştirmesi nedeniyle oluşan rezonans frekansı (f_{res}) kaymaları bir vektör network analizörü (VNA) ile kaydedilmiştir. Farklı çapa ve NM'ye sahip kuru bitki örneklerindeki NM- f_{res} ilişkisi incelenmiştir. Elde edilen benzetim ve deney sonuçları, kullanılan yöntemden, bitki örnekleri başta olmak üzere her tür doğal veya sentetik silindirik örnek

için yüksek hassasiyette NM algılanabilmesi amacıyla yararlanılabileceğini göstermektedir.

2. Kavite Rezonatörü Algılayıcı Yapısı

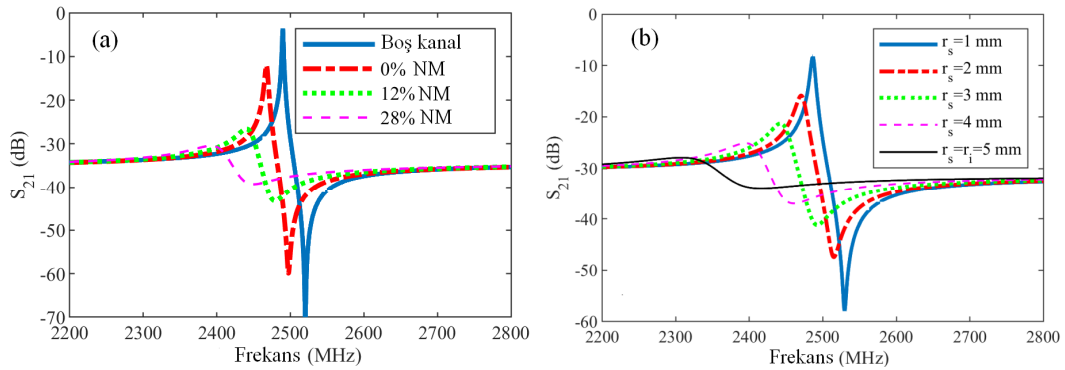
Temel algılayıcı yapısı olarak klasik silindirik kavite rezonatörü geometrisinin farklı bir versiyonu geliştirilmiştir. Bu versiyonda, rezonatörün ortasında tüp şeklinde bir örneğin girebileceği şekilde dikey bir kanal açılmış (bkz. Şekil 1) ve elektrik alan homojenliğini artırmak amacıyla bu kanalı içten kaplayan, içi boş bir kuartz ($\epsilon_r = 3.75$, $\tan\delta = 4.0 \times 10^{-4}$) silindir kullanılmıştır. Bu sayede, TM_{010} modunda çalışan silindirik kavitede, örnek kanalının içinde daha yoğun bir elektrik alan elde edilmiş ve yarıçapı kanal yarıçapından farklı örneklerin kanal içerisindeki pozisyon farklılıklarının algılayıcının elektriksel özelliklerini fazla etkilememesi amaçlanmıştır [10]. Giriş ve çıkış portları kavitenin içinde küçük bir manyetik halka oluşturacak şekilde uzatılmış ve bu şekilde teğet manyetik alan ile bir kuplaj (coupling) halkası oluşturulmuştur. Kullanılan kavite yapısı Şekil 1’de gösterilmektedir. Bu tasarımda rezonatör malzemesi olarak pirinç kullanılmış ve kavite yarıçapı 46.5 mm, örnek kanalı yarıçapı 6.5 mm, kavite yüksekliği ise 14 mm olarak seçilmiştir. Bu değerler, 2.5 GHz civarında bir f_{res} yaratmaktadır. Bu değerler için kavite kalite faktörü (Q) ise 1780 civarında elde edilmiştir [11].



Şekil 1. NM algılama için optimize edilen silindirik kavite rezonatör geometrisi

3. Tam Dalga Benzetimleri

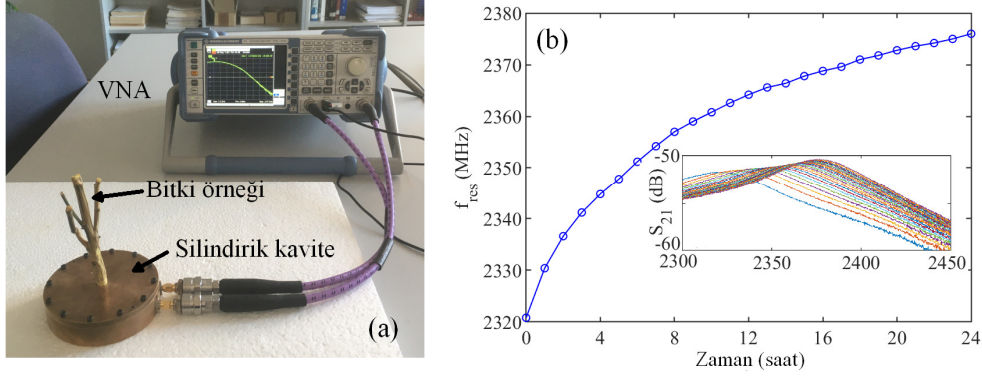
CST Microwave Studio programı kullanılarak sistemin algılayıcı performansı incelenmiştir. Bu amaçla gerçekleştirilen farklı benzetimlerin sonuçları Şekil 2-a ve 2-b’de sunulmaktadır. Şekil 2-a’daki düz çizgi, örnek kanalının boş olduğu durumda elde edilen kavite iletim katsayısı S_{21} ’i frekansa bağlı olarak göstermektedir. Örnek kanalına tamamen kuru halde 4 mm yarıçapında bir kavak ağacı örneği ($\epsilon_r = 1.52$) yerleştirildiğinde, f_{res} ’in 2490 MHz’den 2467 MHz’e düştüğü görülmektedir. Aynı şekilde, %12 NM’ye ($\epsilon_r = 2.03$) ve %28 NM’ye ($\epsilon_r = 3.02$) sahip örneklerde de, rezonans frekansının sırasıyla 2440 ve 2390 MHz’e düştüğü gözlemlenmektedir. Yani, %28’lik bir NM değişiminin, f_{res} ’de 98 MHz’e karşılık gelen %3’lük bir değişim yarattığı anlaşılmaktadır. Şekil 2-b’de ise örnek yarıçapının f_{res} üzerindeki etkileri gösterilmiştir. Bu benzetimde, %28’lik nem oranına sahip bir kavak örneğinin, farklı örnek yarıçapları (r_s) için meydana getirdiği NM- f_{res} değişimleri gösterilmiştir. En düşük hassasiyetin, örnek yarıçapının kanal yarıçapına (r_i) eşit olduğu durumda elde edildiği görülmektedir.



Şekil 2. Benzetim sonuçları: a) $r_s = 4$ mm’lik bir örnek için farklı NM’lerde elde edilen f_{res} - S_{21} değişimleri, b) %28 NM’ye sahip farklı yarıçaplarda örnekler için elde edilen f_{res} - S_{21} değişimleri [11].

4. Ölçüm Sonuçları

Kavite rezonatörünün NM algılayıcısı olarak performansının test edilmesi amacıyla oluşturulan deney düzeneği Şekil 3-a'da gösterilmektedir. Bu deneyde, dutgiller ailesinden *ficus benjamina* türüne ait bir bitkinin bir dalı kesilmiş ve örnek kanalı içine yerleştirilerek oda sıcaklığında bitkinin NM değişimi 24 saat süreyle izlenmiştir. Deneyin başında ve sonunda bitkinin NM'leri, ticari bir nemölçer ile sırasıyla %63 ve %31 olarak ölçülmüştür. Gerçek bir orman yangını sırasında gözlemlenebilecek hızlı NM değişimlerine benzer bir değişimin gözlemlendiği bu deney sırasında elde edilen f_{res} , Şekil 3-b'de verilmektedir. Bitkinin doğal kuruma rejiminin de görülebildiği bu deneyde algılayıcı hassasiyeti $(2375 - 2320) \text{ MHz} / \%32 = 1.72 \text{ MHz} / \%NM$ olarak elde edilmiştir. Oldukça yüksek olan bu hassasiyet değeri, kavite rezonatör geometrisinin yüksek Q 'su ile ilişkilidir.



Şekil 3: a) Bitki örneğinin zamana bağlı NM'sinin algılanması için oluşturulan deney düzeneği, b) Zamana bağlı f_{res} değişimi. Küçük resim: Kavite iletim katsayısının deney sırasındaki değişimi [10].

5. Sonuç

TM_{010} modunda çalışan bir silindirik kavite rezonatörü, bitki örneklerinin zamana bağlı NM değişimlerinin ölçülmesinde kullanılmıştır. Bitki örnekleri, rezonatörünün ortasında açılan dikey kanala yerleştirilmekte ve rezonatörün yüksek kalite faktörü sayesinde oldukça yüksek hassasiyette NM algılaması yapılabilmektedir. Yöntemin tahribatsız ve temassız olması, bu yöntemi orman yangınlarının önceden anlaşılabilmesi ya da farklı örneklerin rölatif NM ölçümlerinin yapılması gibi uygulamalar açısından elverişli kılmaktadır.

Kaynaklar

- [1]. Stevens-Rumann C. S. vd., "Evidence for declining forest resilience to wildfires under climate change," *Ecol. Lett.*, 21(2), s. 243–252, Şubat 2018.
- [2]. Malavasi U. C., Davis A. S. ve Malavasi M. D. M., "Estimating water in living woody stems—A review," *Cerne*, 22(4), s. 415–422, Aralık 2016.
- [3]. Matsudaira K., vd., "Wood monitoring using MEMS acoustic sensor," *Proc. IEEE 29th Int. Conf. Micro Electro Mech. Syst. (MEMS)*, Şangay, Çin, s. 1122–1124, Ocak 2016.
- [4]. Kandala C. V., Holser R., Settaluri V., Mani S. ve Puppala N., "Capacitance sensing of moisture content in fuel wood chips," *IEEE Sensors J.*, 16(11), s. 4509–4514, Haziran 2016.
- [5]. Ozbey B. vd., "Wireless displacement sensing enabled by metamaterial probes for remote structural health monitoring," *Sensors*, 14(1), s. 1691–1704, Ocak 2014.
- [6]. Ozbey B., Erturk V. B., Demir H. V., Altintas A. ve Kurc O., "A wireless passive sensing system for Displacement/Strain measurement in reinforced concrete members," *Sensors*, 16(4), s. 496, Nisan 2016.
- [7]. Ozbey B., Erturk V. B., Kurc O., Altintas A. ve Demir H.V., "Multi-point single-antenna sensing enabled by wireless nested splitting resonator sensors," *IEEE Sensors J.*, 16(21), s. 7744–7752, Kasım 2016.
- [8]. Ozbey B., Altintas A., Demir H.V. ve Erturk V. B., "An equivalent circuit model for nested split-ring resonators," *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.*, 65(10), s. 3733–3743, Ekim 2017.
- [9]. Ozbey B. ve Eibert T. F., "Wireless non-destructive moisture content characterization of trees by highly-sensitive compact resonating probes," *IEEE Sensors J.*, 21(5), s. 6125–6132, Mart 2021.
- [10]. Faz U., Siart U., Eibert T. F. ve Hermann T., "Electric field homogeneity optimization by dielectric inserts for improved material sensing in a cavity resonator", *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 64(8) s. 2239–2246, 2015.
- [11]. Ozbey B., Faz U., Wolf B. ve Eibert T. F., "Ultrasensitive moisture content characterization of wood samples by a cylindrical cavity resonator," *Sens. Actuators A, Phys.*, cilt 315, Makale no. 112298, Kasım 2020.