

Keyfi Şekilli Dielektrik Yüklü Dalga Kılavuzları için Saçılma Parametrelerinin Belirlenmesi

Determination of Scattering Parameters for Waveguides Loaded with Arbitrarily Shaped Dielectric Materials

Alican Uysal¹, Ahmet Aydoğan^{1,2}, Sedat Kılınç^{1,3}, Tuđhan Çađlayan¹, Funda Akleman¹

¹Elektronik Haberleşme Mühendisliği Bölümü
İstanbul Teknik Üniversitesi
uysala@itu.edu.tr, caglayant@itu.edu.tr, akleman@itu.edu.tr

²Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü
Marmara Üniversitesi
ahmet.aydogan@marmara.edu.tr

³Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü
İstanbul Üniversitesi
sedat.kilinc@istanbul.edu.tr

Öz

Keyfi şekilli cisimle yüklenmiş dikdörtgen kesitli dalga kılavuzlarında en genel halde TE ve TM tipi modlar uyurulmaktadır. Bu çalışmada ilk olarak keyfi şekilli manyetik olmayan dielektrik malzeme yüklü dikdörtgen kesitli dalga kılavuzları için TE tipi mod ayrıklaştırılması incelenmiştir. Dalganın ilerleme yönünde dielektrik malzemenin süreksizlik ara yüzeyleri (jonksiyon) üzerinde oluşan manyetik alanın uzunlamasına bileşeni, doğası gereği TE tipi modlara aittir. Bu sayede yalnızca jonksiyon üzerinde oluşan manyetik alanın uzunlamasına bileşeninden TE tipi modal bileşenleri çekmek mümkün olmaktadır. İkinci aşama olarak, yapılan mod ayrıklaştırma ile baskın mod bilgisine geçilmiş ve incelenen yapıya ait saçılma parametreleri ele alınan yaklaşım ile elde edilmiştir. Yapılan çalışma, keyfi şekilli dielektrik malzemeler ile yüklenmiş dalga kılavuzlarının modal analizi için temel oluşturmaktadır. Ele alınan yöntemin doğrulanması için hem ticari paket programlar kullanılmış, hem de ölçüm yapılmıştır.

Anahtar kelimeler: Dikdörtgen dalga kılavuzu, modal analiz, genelleştirilmiş saçılma matrisi

Abstract

In the most general case, arbitrarily dielectric loaded rectangular waveguides allow the excitation of TE and TM modes. In this study, TE mode extraction for arbitrarily shaped, non-magnetic, dielectric loaded rectangular waveguide is analyzed as a first step. Longitudinal component of magnetic field on the discontinuity junctions of the dielectric obstacle is of TE type modes, inherently. Hence, TE type modes can be extracted from the data of longitudinal magnetic components. By this means, extraction of dominant mode is performed and scattering parameters of the analyzed cases are obtained. This study is a basis for the analysis of a

complete modal analysis of dielectric loaded waveguides. Validation of the proposed approach is carried out by a commercial software and measurement results.

Keywords: Rectangular waveguide, modal analysis, generalized scattering matrix

1. Giriş

Dalga kılavuzları, yüksek güç taşıma kapasiteleri, termal kararlılıkları, düşük kayıp ve yüksek kalite faktörüne sahip olmak gibi özelliklerinden dolayı uydu haberleşmesi, askeri uygulamalar ve mobil haberleşme sistemlerinde tercih edilen mikrodalga araçlarıdır. Dalga kılavuzları ile mikrodalga cihazı tasarımında genel olarak izlenen yöntemler 1) kılavuz içerisine metalik süreksizlikler yerleştirmek (örn: indüktif açıklıklar, kapasitif yapılar) 2) kılavuz içerisine dielektrik süreksizlikler yerleştirmek olarak sınıflandırılabilir. Kılavuz içinde metalik süreksizliklerle tasarım yapılması imalat bakımından zor bir sürece neden olmaktadır. Ayrıca dielektrik yapıların kılavuz içerisinde sabit olarak bulunma zorunluluğu olmadığı için, cihazın kullanımında esneklik sağlanmaktadır. Örneğin metalik süreksizliklerle tasarlanmış bir dalga kılavuzu filtrenin karakteristiği sabit iken, dielektrik yüklü bir dalga kılavuzu rahatça başka dielektrik yapılar ile yüklenerek farklı amaçlar için kullanılabilir. Aynı zamanda, dielektrik yüklü dalga kılavuzları ile daha küçük boyutta filtre tasarımlarının mümkün olabileceği öngörülebilir. Bu ise hem maliyet, hem de malzeme kaynaklı kayıplardan dolayı dezavantaj oluşturmaktadır. Tüm bu nedenler göz önüne alındığında dielektrik yüklü dalga kılavuzları ile yapılan tasarımlar daha ilgi çekici olmaktadır. Dielektrik yüklü dalga kılavuzları mikrodalga mühendisliğinde faz kaydırıcı, filtre, empedans uygunlaştırıcı gibi birçok uygulama alanına sahiptir [1-4]. Bu tür cihazların tasarımı için incelenen yapıya ait saçılma parametrelerinin belirlenmesi gerekmektedir.

Dalga kılavuzlarının kesiti tamamen doldurulduğunda yapının uzunlamasına doğrultudaki süreksizlik yüzeyinde her mod yalnızca kendisi ile etkileşimdedir. Bu yüzden, baskın mod ile uyarılma durumunda yapının süreksizlik yüzeyinde sadece baskın mod etkileşimine bakmak, toplam yapının modal analizi için yeterli olacaktır. Bu durumda tüm yapı iki kapılı devre gibi modellenebilir ve yapının saçılma parametreleri cinsinden analizi, seçilen iletim matrislerinin (ABCD Matrisi, T Matrisi vb.) basit matematiksel bağıntıları ile yapılabilir. Kesiti tam doldurmayan yüklemelerde modların çapraz etkilişimi nedeni ile üst modlar uyarılabilir. Baskın mod bölgesinde çalışırken üst modlar boş kılavuz içerisinde sönümlenme özelliğinde olsa da, arka arkaya bağlı süreksizliklerin modal etkileşim analizinde gözardı edilmesi sayısal hesaplamalarda kararsızlığa neden olur. Bu durumda, incelenen yapının analizi için iki kapılı devre modeli geçerliliğini yitirmekte ve yapının N kapılı bir devre gibi modellenmesi gerekmektedir. Ele alınan modelde, her kapı hesaba katılan bir modu temsil etmektedir ve modların birbiri ile ilişkisinin tayini ile oluşmaktadır. Bu tür yapıların analizi için en çok başvurulan yöntem mod eşleştirme yöntemi olduğu için, iki kapılı yapıya ait saçılma parametrelerinin yerini, N kapılı yapıya ait Genelleştirilmiş Saçılma Matrisi (GSM) alır. GSM'nin eldesi ile beraber, kaskat süreksizliklerin analizi kolaylıkla yapılabilir. Literatürde incelenen bir çok çalışmada, analizinin kolaylığı nedeni ile TE^{m_0} tipi modların uyarıldığı durumlar ele alınmıştır [5-7]. TE^{1m} ve TM^{1m} modlarının uyarıldığı özel bir yüklem (H-düzlem dielektrik yüklem) ayrıca [8]'de incelenmiştir. Her ne kadar kaskat süreksizliklerin analizi GSM yöntemi ile kolayca yapılsa da, ele alınan birim yapıların modal analizi keyfi şekilli malzeme süreksizlikleri için oldukça karmaşık hale gelmektedir. [9] çalışmada, dikdörtgen bir dalga kılavuzu keyfi şekilli dielektrik malzeme ile yüklendiğinde oluşan alan ifadelerini tanımlayan integral denklemin Moment Yöntemi ile çözümü incelenmiştir. Her ne kadar tüm modların hesaba katıldığı etkili bir yöntem olsa da, Moment yönteminin dezavantajı, hesaplama yükünün fazla olmasıdır.

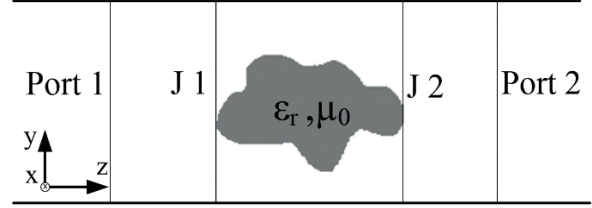
Bu çalışmada, dalga kılavuzu içerisinde keyfi şekilli dielektrik yüklem durumunda baskın mod ile oluşacak baskın mod ile yüksek dereceli TE modların etkileşimi incelenmiştir. Bu amaçla dalga kılavuzu farklı geometride dielektrikler ile yüklenmiş ve süreksizlik üzerindeki alan dağılımından TE mod bileşenleri, modların dikliği esasından faydalanılarak çekilmiştir. Elde edilen sonuçların doğruluğu yansıma ve iletim katsayıları cinsinden hem sayısal modelleme hem de ölçüm sonuçları ile karşılaştırılarak gösterilmiştir.

Sunulan çalışma şu şekilde düzenlenmiştir. İkinci kısımda problemin sunumu ve ele alınan probleme ait tanımlamalar yapılmıştır. Üçüncü kısımda, incelenen problemin çözümü için önerilen yaklaşımlar ve çözüme temel oluşturan matematiksel bağıntılar verilmiştir. Dördüncü kısımda, farklı senaryolar içeren örnekler incelenmiş ve elde edilen sonuçlar gösterilmiştir. Sonuç kısmında ise, bu çalışmada elde edilen tecrübelerden faydalanılarak incelenmesi düşünülen problemler tanımlanmış ve çalışmanın literatüre katkısı tartışılmıştır. İncelenen çalışmada zaman bağımlılığı $e^{i\omega t}$ alınmış ve ifadelerde gösterilmemiştir.

2. Problemin Tanımı

Ele alınan problemin geometrisi Şekil 1 ile verilmiştir. Dalganın ilerleme yönünde kesiti değişmeyen (tekdüze) dikdörtgen boş dalga kılavuzu içerisinde manyetik olmayan ($\mu = \mu_0$), bağıl dielektrik değeri ise ϵ_r olan bir cisim yerleştirilmiştir. En genel halde, malzemenin dielektrik değeri konumla değişebilir ve/veya cisim ayrık parçalardan oluşabilir. *Port 1* ve *Port 2* sırasıyla yansıma ve iletim katsayılarının ölçüldüğü düzlemleri, J_1 ve J_2 ise dalganın

ilerleme yönünde sırasıyla cismin başlangıç ve bitiş düzlemlerini temsil etmektedir.



Şekil 1: Problemin geometrisi.

J_1 ve J_2 jonksiyonları üzerinde tüm modlar oluşmaktadır. Bu çalışmanın amacı dalga kılavuzuna yerleştirilmiş keyfi şekilli dielektrik cisimlere ait GSM'nin elde edilmesi için temel oluşturmaktır. Çalışmanın hedefi, J_1 ve J_2 jonksiyonları üzerinde oluşan TE tipi modal bileşenleri belirlemektir. Doğrulama için hem sayısal hem de gerçek ölçüm düzeneklerinden ve önerilen yaklaşımdan elde edilen yansıma ve iletim katsayıları karşılaştırılmıştır. Bu nedenle alan gözlemlerinin yapılacağı *Port 1* ve *Port 2* zayıflayan modların yeterince sönümleneceği kadar uzağa yerleştirilmiştir. Dalga kılavuzu *Port 1*'den uyarılmış ve baskın mod bölgesinde çalışılmıştır. Bölüm 3'te çalışmanın amacına yönelik kullanılan temel bağıntılar verimiştir.

3. Temel Bağıntılar

Keyfi doldurulmuş bir dalga kılavuzunda süreksizlik nedeni ile oluşan alan bileşenleri en genel halde TE ve TM modlarına ait alanların toplamı olarak ifade edilmektedir. Bu alan ifadeleri özellikle jonksiyon bölgelerinde 6 bileşeni ($E_x, E_y, E_z, H_x, H_y, H_z$) de ihtiva eder. En genel anlamda bu bileşenlerden E_x, E_y, H_x ve H_y hem TE hem de TM polarizasyonlara ait olabilmektedir. Dolayısıyla bu alan bileşenleri doğrudan polarizasyon ayrıklaştırılması için kullanılamamaktadır. Dalganın ilerleme yönündeki E_z ve H_z bileşenleri ise polarizasyona özgü olup bu bileşenler vasıtasıyla TE ve TM modları birbirinden bağımsız olarak elde edilebilmektedir. Dikdörtgen dalga kılavuzu için TE_{mn} ve TM_{mn} modlarına ait uzunlamasına alan bileşenleri H_z ve E_z 'nin modal ifadeleri sırası ile (1a) ve (1b) bağıntıları ile verilmiştir.

$$H_{mn}(\vec{r}) = A_{mn} \cos\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \cos\left(\frac{n\pi}{b}y\right) e^{-i\beta_{mn}|z-z'|} \quad (1a)$$

$$E_{mn}(\vec{r}) = B_{mn} \sin\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \sin\left(\frac{n\pi}{b}y\right) e^{-i\beta_{mn}|z-z'|} \quad (1b)$$

Bu bağıntılarda A_{mn} ve B_{mn} ilgili moda ait kompleks modal bileşen katsayılarını, β_{mn} ilgili moda ait faz sabitini, z' ise kaynak (uyarma) düzlemini göstermektedir. Dikdörtgen dalga kılavuzunun yatay ve düşey boyutları ise a ve b ile gösterilmiştir. Herhangi bir kesit ele alındığında kesit üzerindeki uzunlamasına alan bileşenlerinin toplam ifadesi ise (2a) ve (2b) bağıntılarında gösterildiği gibi olmaktadır.

$$H_z(x, y) = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} A_{mn} \cos\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \cos\left(\frac{n\pi}{b}y\right) \quad (2a)$$

$$E_z(x, y) = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} B_{mn} \sin\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \sin\left(\frac{n\pi}{b}y\right) \quad (2b)$$

Görüldüğü üzere uzunlamasına alan bileşenleri kesit üzerinde iki boyutlu sinüs ve kosinüs Fourier serileri şeklinde yazılabilmektedir. Eşitliğin sol tarafındaki büyüklükler bilindiği takdirde bilinmeyen A_{mn} ve B_{mn} katsayıları (3a) ve (3b) bağıntılarında verildiği şekilde elde edilebilir. Bu bağıntılarda Ω dalga kılavuzunun kesit alanını göstermektedir.

$$A_{mn} = \frac{\iint_{\Omega} H_z(x,y) \cos\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \cos\left(\frac{n\pi}{b}y\right) d\Omega}{\iint_{\Omega} \cos^2\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \cos^2\left(\frac{n\pi}{b}y\right) d\Omega} \quad (3a)$$

$$B_{mn} = \frac{\iint_{\Omega} E_z(x,y) \sin\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \sin\left(\frac{n\pi}{b}y\right) d\Omega}{\iint_{\Omega} \sin^2\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \sin^2\left(\frac{n\pi}{b}y\right) d\Omega} \quad (3b)$$

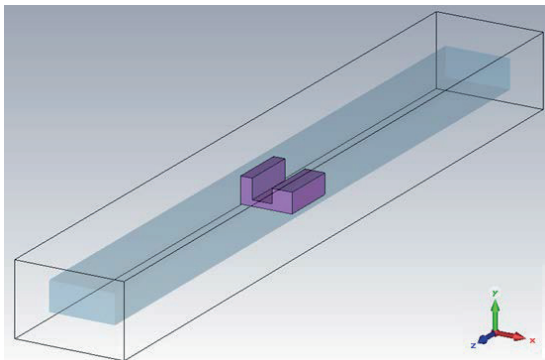
Bu bağıntılar uygun uyarma altında J1 ve J2 jonksiyonlarında kullanıldığında A_{mn} ve B_{mn} katsayıları sırası ile bu jonksiyonlar üzerinde TE_{mn} ve TM_{mn} modlarının uyarılma katsayılarına eşit olmaktadır. Dalga kılavuzu, sadece dominant mod yayılacak şekilde uyarıldığı takdirde jonksiyonda oluşacak üst modlar da sönümlü olacaktır. Bu durumda ilerleyen modun genliği ve fazı sadece TE_{10} modunun katsayısı ile yani, A_{10} ile ilişkili olacaktır. Bu durumda H^i gelen alanı ifade etmek ve d_1 ve d_2 sırası ile jonksiyonların portlara uzaklığını göstermek üzere sistemin yansıma (S_{11}) ve iletim katsayıları (S_{21}), sırasıyla (4a) ve (4b) ile verilmiştir. z_1 ve z_2 sırası ile jonksiyon düzlemlerini ifade etmektedir.

$$S_{11} = \frac{A_{10} - H^i}{H^i} e^{-i\beta_{10}d_1} \Big|_{z=z_1} \quad (4a)$$

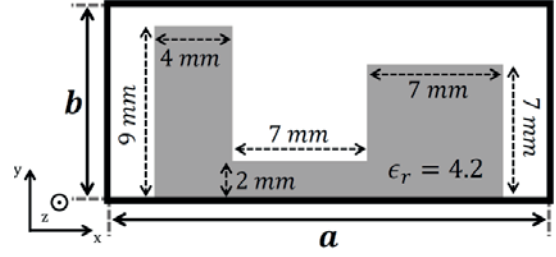
$$S_{21} = \frac{A_{10}}{H^i} e^{i\beta_{10}d_2} \Big|_{z=z_2} \quad (4b)$$

4. Sayısal Sonuçlar

Bir önceki bölümde anlatılan yöntemle elde edilen sayısal sonuçların doğruluk analizi, referans olarak alınan çözüm ve/veya ölçümler ile elde edilen değerler ile karşılaştırılarak gerçekleştirilmiştir. Bunun için öncelikle jonksiyonlardaki kesit içi uzunlamasına manyetik alan bileşeni H_z , paket program CST Microwave Studio ile elde edilmiştir. Farklı geometriler için bir önceki kısımdaki bağıntılar vasıtası ile hesaplanan S parametrelerinin genliği, CST Microwave Studio ile elde edilen S parametreleri ile karşılaştırılmıştır. (4a) ve (4b)'den görüldüğü üzere yansıma ve iletim katsayılarının hesaplanması için kaynaktan jonksiyona gelen manyetik alanın da bilinmesi gerekir. Bu ise yüksüz dalga kılavuzu için ilgilenilen z düzlemlerindeki alanlara eşdeğerdir. Gelen alan bileşenleri için boş dalga kılavuzunun benzetimi yapılmış ve H^i büyüklüğü de bu sonuçlardan elde edilmiştir. İlk örnekte kayıpsız, homojen ve bağıl dielektrik değeri $\epsilon_r = 4.2$ olan keyfi şekilli cisim, Şekil 2'de gösterildiği gibi kılavuz kesitini kısmen dolduracak şekilde yerleştirilmiştir. Dielektrik cismin kesitteki görünümü ve uzunluk değerleri Şekil 3'te gösterilmiştir. Uzunlamasına yönde cismin uzunluğu $l = 20 \text{ mm}$ 'dir. Cisim dalgakılavuzuna, x yönünde orta noktaları çakışık olacak şekilde yerleştirilmiştir.

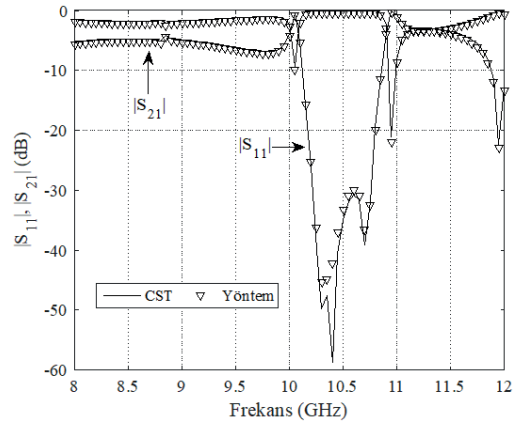


Şekil 2: Dielektrik yüklü dalga kılavuzunun 3 boyutlu görünümü.



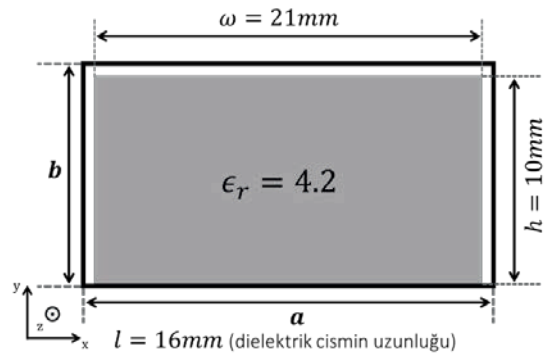
Şekil 3: Örnek 1 - Dielektrik yüklü dalga kılavuzunun kesit görünümü.

Bu probleme ilişkin S_{11} ve S_{21} büyüklükleri hem 3. bölümde anlatılan yöntemle hem de CST ile elde edilmiştir ve Şekil 4'te sunulmuştur. Görüldüğü üzere her iki yöntem de birbiri ile uyumludur.

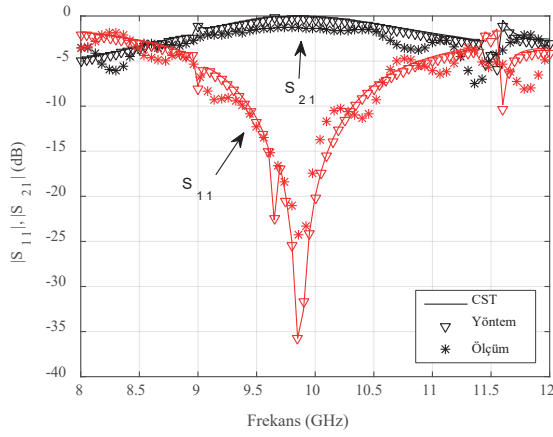


Şekil 4: Örnek 1 - Dielektrik yüklü dalga kılavuzuna ilişkin S parametreleri

İkinci örnekte ise gerçek ölçüm sonuçları ile önerilen yaklaşımın karşılaştırılması yapılmıştır. Ölçümde kullanılacak $(x,y,z) = (21\text{mm} \times 10\text{mm} \times 16\text{mm})$ boyutlarındaki düşük kayıplı malzemenin bağıl dielektrik değerinin gerçel kısmı 4.2'dir fakat iletkenliği tam olarak bilinmemektedir. Cismin kesit görünümü Şekil 5'teki gibidir ve cisim, kılavuzun ortasına $y = 0$ düzleminde x - ekseninde simetrik olacak şekilde yerleştirilmiştir. Kayıpsız olarak kabul edilen malzeme ile kısmi olarak doldurulan dalga kılavuzuna ilişkin saçılma parametreleri, öncelikle CST ile elde edilmiştir. Bu benzetimden elde edilen kesit içi alan dağılımları kullanılarak önerilen yöntemle S parametreleri yeniden hesaplanmıştır. Her iki yöntemle bulunan değerler Şekil 6'da gösterildiği gibi ölçüm sonuçları ile de karşılaştırılmıştır.

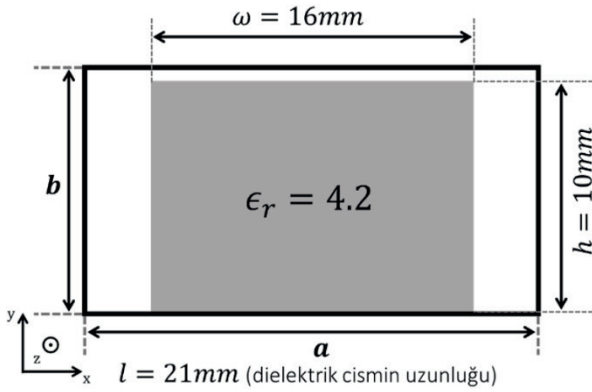


Şekil 5: Örnek 2- Dielektrik prizma yüklü dalga kılavuzu kesiti



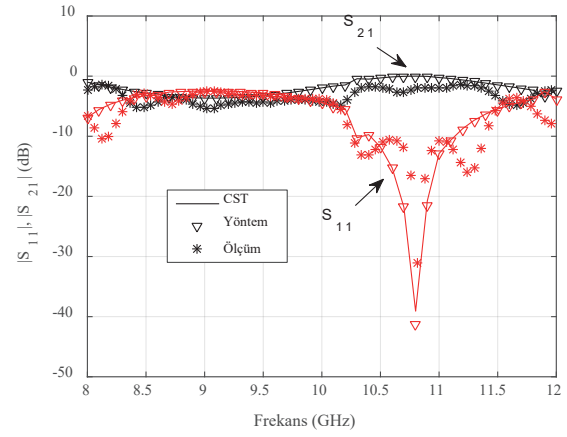
Şekil 6: Örnek 2 - Dielektrik prizma yüklü dalga kılavuzuna ilişkin S parametreleri.

Bir sonraki örnekte, aynı cisim kılavuz içerisine farklı yönlümde, (x, y, z) yönlerinde sırası ile $(16\text{mm} \times 10\text{mm} \times 21\text{mm})$ olacak şekilde yerleştirilerek benzer işlemler tekrarlanmıştır. Bu örnek için yüklü kılavuzun kesit görünümü Şekil 7'de, elde edilen S parametreleri ise Şekil 8'de gösterilmiştir.

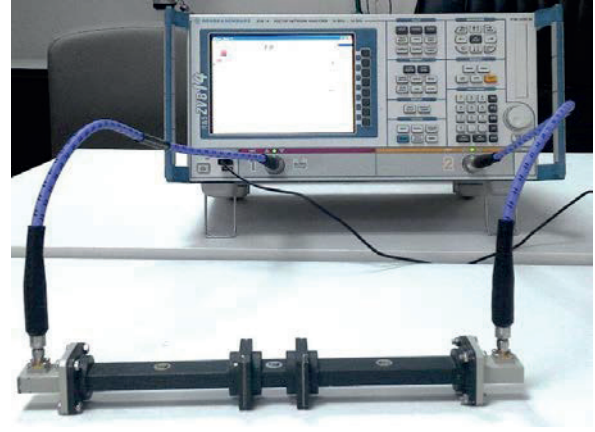


Şekil 7: Örnek 3 - Dielektrik prizma yüklü dalga kılavuzu kesiti.

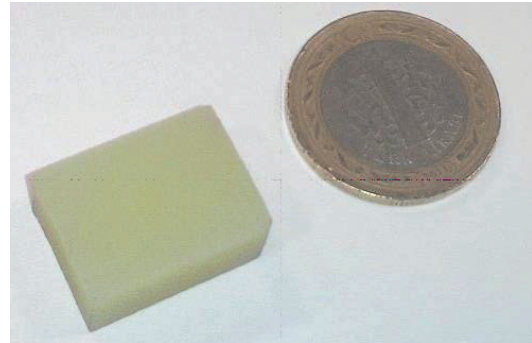
Şekil 6 ve Şekil 8 göz önüne alındığında ölçüm sonuçlarının benzetim sonuçlarına ve çalışmada önerilen yöntemle elde edilen sonuçlara yakın olduğu görülmektedir. Ölçüm sonuçlarındaki sapmalar, dielektrik malzemenin kayıp tanjantı bilgisinin bilinmemesinden ve ölçüm ortamının ideal olmamasından kaynaklanmaktadır. İkinci ve üçüncü örnekte saçılma parametrelerinin ölçümü için kullanılan "R&S ZVB14 Network Analyzer" ve ilgili düzenek Şekil 9'da, ölçülen dielektrik malzemenin fotoğrafı ise Şekil 10'da gösterilmiştir.



Şekil 8: Örnek 3 - Dielektrik prizma yüklü dalga kılavuzuna ilişkin S parametreleri.



Şekil 9: S parametrelerinin belirlenmesi için oluşturulan ölçüm düzeneği



Şekil 10: Kullanılan dielektrik cisim ve 1 TL

5. Sonuçlar

Bu çalışmada dikdörtgen kesitli dalga kılavuzuna yerleştirilmiş keyfi şekilli dielektrik cisimlere ait GSM'nin kurulması için temel oluşturulmuştur. GSM ele alınan problem için modal ilişki bilgilerini içermektedir. Bu amaçla ilk adım olarak baskın mod ile uyarılan dalga kılavuzunda, dielektrik süreksizlik yüzeyinde oluşabilecek *TE* ve *TM* tipi modların ayıklanması hedeflenmiş ve ilgili formülasyon gösterilmiştir. Önerilen yaklaşımın doğrulanması için, ayıklanan baskın mod bileşeni yansıma ve iletim portlarında gözlemlenmiş ve ticari bir paket program olan CST ile saçılma parametrelerinin genlikleri üzerinden karşılaştırma yapılmıştır. Ayrıca iletkenlik değeri bilinmeyen bir dielektrik malzeme kayıpsız kabul edilerek önerilen yöntem, CST ve ölçüm sonuçları yansıma ve iletim katsayıları cinsinden karşılaştırılmıştır.

Bu çalışmada, baskın mod ile besleme durumunda süreksizlik yüzeylerinde indüklenen sönümlü modların uyarma katsayılarının hesaplanması için gerekli formülasyon gösterilmiştir. Bunun için ilgili bileşenin jonksiyondaki kesit içi toplam alan dağılımının bilinmesi gerekmektedir. Eğer jonksiyonda sönümlü modlara ilişkin uyarımlar tanımlanabilirse, en genel halde GSM elde edilebilir. Bu çalışmada kullanılan sayısal modelleme yönteminde sönümlenen modlar ile jonksiyonun uyarılması gerçekleştirilemediğinden, incelenen probleme ait GSM bütün bir şekilde kurulmamıştır, yalnızca baskın mod ve diğer modlar arasındaki ilişki incelenebilmiştir. İlerleyen çalışmalarda, sönümlenen modlar ile uyarılmanın incelenmesi neticesinde dalga kılavuzuna yerleştirilmiş dielektrik süreksizliklere ait genelleştirilmiş saçılma matrisinin kurulması amaçlanmakta, böylece dalga kılavuzuna yerleştirilmiş keyfi şekilli kaskat dielektrik süreksizliklere ait saçılma parametrelerinin belirlenmesi için yeni bir yaklaşım ön görülmektedir.

Her ne kadar *TE* ve *TM* modlar açıklanan yöntem ile ayrıştırılabilirse de, hesaplanan mod katsayılarının doğruluğunun analizi için kaskat yapıların GSM modellemesiyle elde edilen *S* parametrelerinin aynı yapının GSM kullanmadan doğrudan (örn. paket programdan elde edilen sayısal sonuçlar veya gerçek ölçüm sonuçları ile) hesaplanan *S* parametreleri ile karşılaştırılması uygun olacaktır.

6. Kaynaklar

- [1] F. Arndt, A. Frye, M. Wellnitz ve R. Wirsing, "Double Dielectric-Slab-Filled Waveguide Phase Shifter," in *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 33, no. 5, pp. 373-381, May 1985.
- [2] M. Khalaj-amirhosseini, "Wideband Differential Phase Shifters Using Waveguides Filled by Inhomogeneous Dielectrics," *Prog. Electromagn. Res.* pp. 1513-1516, 2009.
- [3] S. Şimşek, E. Topuz, ve E. Niver, "A novel design method for electromagnetic bandgap based waveguide filters with periodic dielectric loading," *AEU - Int. J. Electron. Commun.*, vol. 66, no. 3, pp. 228-234, 2012.
- [4] Aydoğan, A.; Akleman, F., "Dielectric Loaded Waveguide Filter Design," 2016 International Symposium on Fundamentals of Electrical Engineering (ISFEE), Bucharest, 2016
- [5] Leviatan, Y. ve Sheaffer, G. S., 1987. Analysis of inductive dielectric posts in rectangular waveguide, *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, 35, 48-59.
- [6] C. Bachiller, "Hybrid Mode Matching Method for the Efficient Analysis of Metal and Dielectric Rods in H Plane Rectangular Waveguide Devices," in *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 58, no. 12, pp. 3634-3644, Dec. 2010.
- [7] Simsek, S.; Topuz, E., "Some Properties of Generalized Scattering Matrix Representations for Metallic Waveguides With Periodic Dielectric Loading," *Microwave Theory and*

- Techniques, *IEEE Transactions on*, vol.55, no.11, pp.2336,2344, Nov. 2007
- [8] W. K. McRitchie ve M. M. Z. Kharadly, "Properties of interface between homogeneous and inhomogeneous waveguides," in *Electrical Engineers, Proceedings of the Institution of*, vol. 121, no. 11, pp. 1367-1374, November 1974.
- [9] J. J. H. Wang, "Analysis of a Three-Dimensional Arbitrarily Shaped Dielectric or Biological Body Inside a Rectangular Waveguide," in *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 26, no. 7, pp. 457-462, Jul 1978.