

Değişken İletkenlikli MXene Dipol Antenlerin Performans Analizi ve Eşdeğer Devre Modellemesi

Modeling and Performance Analysis of MXene-Based Dipole Antennas under Variable Conductivity

Musa Bute

Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü, Gaziantep Üniversitesi, Gaziantep
mbute@gantep.edu.tr  0000-0002-5697-6681

Özet

MXene malzemelerinin 5G ve IoT uygulamalarına yönelik esnek RF cihazlarına entegrasyonu, malzeme özelliklerinin elektromanyetik performansı nasıl etkilediğinin hassas bir şekilde anlaşılmasını gerektirmektedir. MXene filmlerinin elektriksel iletkenliği üretim süreçlerine bağlı olarak önemli ölçüde değişkenlik gösterdiğinden, performans analizi için yalnızca geleneksel tam dalga (full-wave) simülasyonlarına güvenmek, ciddi bir hesaplama darboğazı oluşturmaktadır. Bu makale, değişken iletkenliklere (0.5×10^5 S/m ile 10×10^5 S/m arası) sahip MXene dipol antenlerin rezonans davranışını modellemek amacıyla sistematik bir Eşdeğer Devre Modeli (EDM) önermektedir. CST Microwave Studio simülasyonları ile yapılan karşılaştırmalı analizler sonucunda, bu çalışma, önerilen EDM'nin geri dönüş kaybını (S_{11}) ve rezonans karakteristiklerini yüksek doğrulukla modellediğini doğrulamaktadır. Elde edilen bulgular; reaktif endüktans (L) ve kapasitansın (C) anten geometrisi tarafından belirlendiğini, ancak ısıma verimliliğinin doğrudan iletkenliğe bağlı ohmik direnç (R_{loss}) ile sınırlandığını nicel olarak ortaya koymaktadır. Sonuç olarak geliştirilen bu model, MXene antenlerin hızlı prototiplenmesi ve optimizasyonu için hesaplama açısından verimli bir alternatif sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: MXene anten, eşdeğer devre modeli, dipol anten, RLC analizi, değişken iletkenlik.

Abstract

This study presents a robust Equivalent Circuit Model (ECM) to predict the impedance characteristics of dipole antennas based on MXene ($Ti_3C_2T_x$) with variable electrical conductivity. Since the conductivity of nanomaterials like

MXenes can vary over a wide range (10^3 to 10^6 S/m) depending on fabrication methods, oxidation levels, and layer thicknesses, characterizing their RF performance using conventional methods is highly complex. In this work, the physical behavior of a dipole antenna operating in the S-band is transformed into a series RLC network consisting of conductivity-dependent parameters. The proposed model was validated against full-wave simulations performed in CST Microwave Studio and exhibited a deviation of less than 0.5% in resonant frequency prediction. The analysis revealed that in the low-conductivity regime, radiation efficiency decreases due to ohmic losses, and equivalent inductance increases due to the skin depth effect. The presented circuit model offers a computationally efficient tool that enables the rapid optimization of flexible MXene antennas for 5G/6G communication systems and the Internet of Things (IoT) by reducing the need for time-consuming 3D simulations.

Keywords: MXene, Equivalent Circuit Model (ECM), Dipole Antenna, Variable Conductivity, RLC Circuit, S-band.

1. Giriş

Nesnelerin internetinin (IoT) hızla yaygınlaşması ve beşinci nesil (5G) kablosuz ağların kurulumu, yüksek performanslı, esnek ve hafif anten sistemlerine olan talebi hızlı bir şekilde artırmıştır [1], [2]. Bakır ve alüminyum gibi metallere dayanan geleneksel antenler, gelişmekte olan giyilebilir elektroniklerin ve yumuşak robotiğin gerektirdiği mekanik esneklik ve uyumluluk gereksinimlerini karşılamakta zorlanmaktadır [3]. Sonuç olarak, karbon nanotüpler (CNT'ler), grafen ve iletken polimerler dahil olmak üzere çözelti ile işlenebilir nanomalzemelere doğru önemli bir yönelim olmuştur [4]. Bu malzemeler arasında, MXene (tipik olarak $Ti_3C_2T_x$) olarak

bilinen iki boyutlu (2D) geçiş metali karbürleri ve nitürleri; metalik iletkenlik (15.000 S/cm'ye kadar), hidrofilik yapı ve olağanüstü mekanik esnekliğin benzersiz kombinasyonu nedeniyle önde gelen bir aday olarak ortaya çıkmıştır [5], [6]. Yakın tarihli karşılaştırmalı çalışmalar, MXene'lerin grafene kıyasla üstün elektromanyetik girişim (EMI) ekranlama ve kırılma akımı yoğunluğu sunduğunu ve bu özellikleriyle özellikle yeni nesil RF bileşenleri için uygun olduğunu vurgulamıştır [7], [8].

2011 yılındaki keşiflerinden bu yana MXene'ler, mikroserit yamalardan ve dipollerden milimetre dalga uygulamaları için karmaşık faz dizilerine kadar çeşitli anten konfigürasyonlarında başarılı bir şekilde uygulanmıştır [1], [9]. Diğer çalışmalar, malzemenin yüzey hassasiyetinden yararlanarak RFID etiketleri ve gaz sensörlerindeki potansiyellerini araştırmıştır [10], [11]. Ancak, MXene antenlerin performansı, sentez yöntemlerine, hizalamasına ve çevresel oksidasyona bağlı olarak önemli ölçüde değişebilen kurucu filmlerin elektriksel iletkenliği ile doğrudan olarak bağlantılıdır [5], [12].

Günümüzde, bu antenlerin tasarımı ve analizi ağırlıklı olarak tam dalga elektromanyetik (EM) benzetimlere dayanmaktadır. Bu sayısal yöntemler doğru sonuçlar verse de, özellikle ayarlanabilir uygulamalar için malzeme parametrelerinin optimizasyonu söz konusu olduğunda hesaplama açısından maliyetli ve zaman alıcıdır. Ayrıca, tam dalga benzetimleri genellikle malzeme iletkenliğindeki değişimlerin rezonans yapısı içindeki depolanan enerjiyi ve kayıp mekanizmalarını doğrudan nasıl değiştirdiğine dair fiziksel içgörüden yoksundur. EDM, anteni toplanmış bir RLC ağı olarak temsil ederek hızlı tasarım iterasyonlarına ve daha derin bir fiziksel anlayışa olanak tanıyan güçlü bir alternatif sunar. Eşdeğer devreler metalik antenler için iyi kurulmuş olsa da, literatürde değişken iletkenlik rejimleri altında MXene dipollerinin frekansa bağlı RLC parametrelerini nicelendiren sistematik bir model eksiktir. Bu sınırlamaları ele almak için EDM güçlü bir çözüm sağlamaktadır.

Değişken kare direncine sahip MXene dipollerinin geri dönüş kaybını ve ısıma örüntülerini karakterize ettiğimiz önceki çalışmamızın [13] üzerine inşa edilen bu çalışma, değişken iletkenlikli MXene antenleri için kapsamlı bir EDM sunmaktadır. Statik malzeme özelliklerine odaklanan önceki çalışmaların aksine, bu çalışmada toplanmış devre parametrelerinin (R , L and C) iletkenliğin bir fonksiyonu olarak dinamik evrimi sistematik olarak incelenmiştir. Önerilen analitik modelin tam dalga simülasyonlarına karşı doğrulanmasıyla, çıkarılan RLC ağının rezonans davranışını ve bant genişliği değişimlerini doğru bir şekilde tahmin ettiği gösterilmiştir. Bu çalışma, esnek kablosuz iletişim sistemleri için ayarlanabilir MXene tabanlı RF cihazlarının tasarlanması adına ölçeklenebilir ve hesaplama açısından verimli bir çerçeve sağlamaktadır.

2. İLGİLİ ÇALIŞMALAR

MXene'lerin keşfinden bu yana, sahip oldukları olağanüstü metalik iletkenlik, RF bileşenleri üzerine yapılan araştırmaları yoğun bir şekilde tetiklemiştir [6]. Erken dönem çalışmalar öncelikle $Ti_3C_2T_x$ filmlerinin içsel elektriksel özelliklerini karakterize etmeye odaklanmıştır. Örneğin Zhang, geleneksel metallerle boy ölçüşen 15.000 S/cm'yi aşan iletkenliklere sahip MXene filmleri sağlayan ölçeklenebilir üretim tekniklerini göstermiştir [5]. Gogotsi ve meslektaşları tarafından yapılan karşılaştırmalı çalışmalar, MXene'lerin grafene kıyasla üstün çözelti işlenebilirliği sunduğunu ve bu durumun onları basılı elektronikler için daha uygun hale getirdiğini ayrıca vurgulamıştır [14].

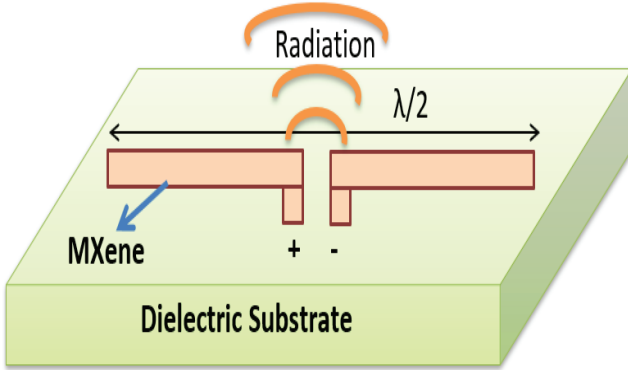
Ayrıca, anten mühendisliği alanında, yakın tarihli çalışmalar çeşitli ısıma yapan yapılar üretmek için MXene filmlerini başarılı bir şekilde kullanmıştır. Han ve ark., mikron kalınlığındaki MXene filmlerinin bakırla kıyaslanabilir ısıma verimliliklerine ulaşabileceğini kanıtlayarak, çözelti ile işlenmiş MXene dipol ve yama antenler üzerine öncü bir çalışma sunmuştur [15]. Benzer şekilde, Guo ve ark. ile Seyyedi ve ark., malzemenin yüksek frekans rejimlerindeki potansiyelinden yararlanarak bu durumu 5G uygulamaları için milimetre dalga frekanslarına taşımıştır [1], [7]. Ayrıca, MXene antenlerin algılama yetenekleri de araştırılmıştır; örneğin, mekanik deformasyona tepki olarak antenin rezonans frekansının kaydığı gerinim (strain) sensörleri gibi.

Bu gelişmelere rağmen, mevcut literatürün çoğu bu antenlerin üretimine ve fiziksel ölçümlerine odaklanmaktadır. Teorik analizler ağırlıklı olarak tam dalga sayısal simülasyonlarla sınırlıdır. Önceki çalışmamız [13] levha direncinin etkilerini incelemiş olsa da, değişken iletkenlik rejimleri altında malzemenin endüktif ve kapasitif davranışını nicelendiren sistematik bir EDM henüz araştırılmamıştır. Bu çalışma, MXene'in makroskobik iletkenliğini doğrudan devre parametreleri ile ilişkilendiren fizik tabanlı bir RLC modeli türeterek bu boşluğu doldurmayı amaçlamaktadır.

3. METODOLOJİ

A. Anten Tasarımı ve Tam Dalga Benzetimi

MXene tabanlı antenlerin empedans karakteristiklerini incelemek amacıyla, S-bandı (hedef rezonans frekansı $f_0 \approx 2.345$ GHz) için tasarlanmış standart bir yarım dalga dipol anten kullanılmıştır. Anten geometrisi; uzunluğu L_{arm} , genişliği ' W ' olan ve bir besleme boşluğu (' g ') ile ayrılan iki simetrik koldan oluşmaktadır ve Şekil 1 de gösterilmiştir. Yapı, CST Microwave Studio programında "Frekans Etki Alanı Çözücü" (Frequency Domain Solver) kullanılarak modellenmiştir.



Şekil 1: MXene dipol antenin farklı elektriksel iletkenlikleri için önerilen eşdeğer devre modeli.

Geleneksel Mükemmel Elektrik İletkeni (PEC) modellerinden farklı olarak, yayıcı elemanlar değişken elektriksel iletkenliğe (σ) sahip bir "kayıplı metal" olarak tanımlanmıştır. MXene filmlerinin düşük iletkenlikten (kusurlu veya oksitlenmiş durumlar) yüksek iletkenliğe (iyi istiflenmiş filmler) kadar sergilediği davranışı gözlemlemek için $\sigma = 0.5 \times 10^5 S/m$ ile $10 \times 10^5 S/m$ aralığındaki σ değerleri için parametrik bir tarama yapılmıştır. Malzemenin içsel tepkisini izole etmek amacıyla substrat vakum olarak modellenmiştir. Her bir iletkenlik durumu için giriş empedansı ($Z_{in} = R_{in} + jX_{in}$) ve yansıma katsayısı (S_{11}) verileri çıkarılmıştır.

B. Eşdeğer Devre Parametrelerinin Çıkarılması

İlk rezonans noktası yakınında çalışan fiziksel dipol anten; radyasyon direnci (R_{rad}), kayıp direnci (R_{loss}), anten endüktansı (L_{ant}) ve kapasitansından (C_{ant}) oluşan bir seri RLC devresi olarak elektriksel olarak modellenmiştir. Eşdeğer devrenin toplam giriş empedansı şu formülle verilir:

$$Z_{in}(\omega) = R(\sigma) + j(\omega L(\sigma) - \frac{1}{\omega C(\sigma)}).$$

Burada $\omega = 2\pi f$ açısal frekansı temsil eder. Toplu eleman parametreleri, rezonans frekansı (f_0) civarındaki tam dalga simülasyon verilerinden "vektör uydurma" (vector-fitting) yöntemi kullanılarak elde edilmiştir:

Direnç (R): Giriş empedansının, sanal kısmın sıfır olduğu ($X_{in}(f_0) \approx 0$) rezonans anındaki reel kısmıdır. Bu terim, radyasyon direnci ile ohmik kayıpların toplamını temsil eder $R = R_{rad} + R_{loss}$.

$$R(\sigma) = \text{real}(Z_{in})|_{f=f_0}$$

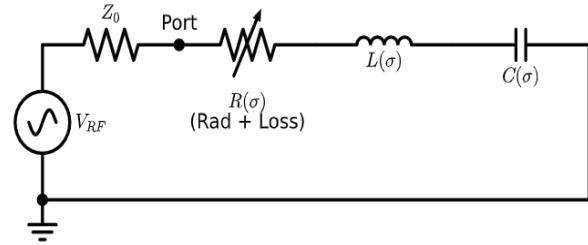
Endüktans (L) ve Kapasitans (C): Reaktif bileşenler, rezonans noktasındaki reaktans eğrisinin ($\partial X_{in} / \partial \omega$) eğiminden türetilmiştir:

$$L(\sigma) = \frac{1}{2} \frac{\partial [\text{imag}(Z_{in})]}{\partial \omega} \Big|_{f=f_0}, \quad C(\sigma) = \frac{1}{\omega_0^2 L(\sigma)}.$$

Bu parametre çıkarma prosedürü, devre parametrelerinin MXene malzeme özellikleri üzerindeki fonksiyonel bağımlılığını belirlemek amacıyla tüm iletkenlik değerleri aralığı için tekrarlanmıştır.

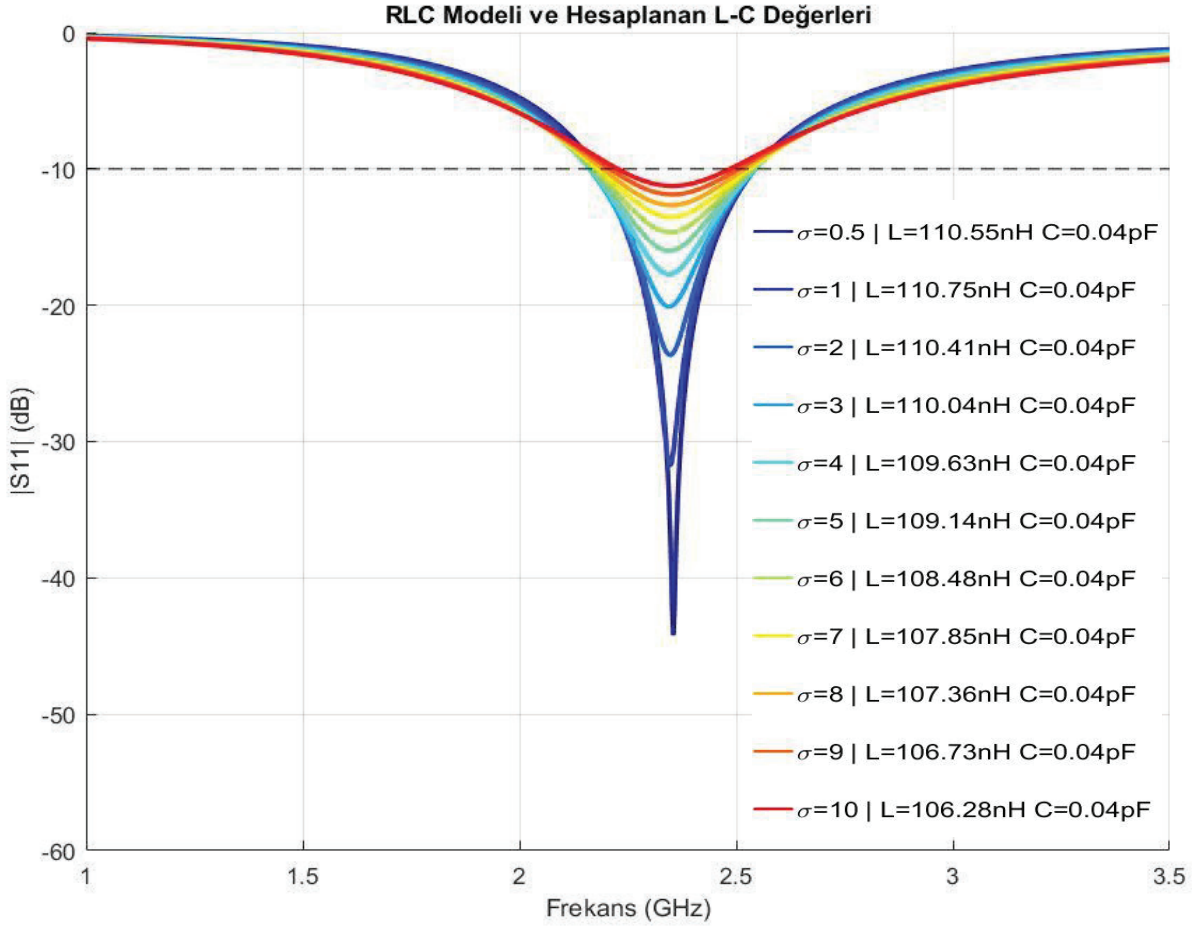
4. BULGULAR VE TARTIŞMA

İletkenlik etkilerini analiz etmeden önce, anten geometrisi ile önerilen devre modeli arasındaki fiziksel korelasyonu kurmak esastır. Temel rezonans frekansı (f_0 or $\lambda/2$) civarında çalışan bir dipol anten, bir duran dalga rezonatörü gibi davranır. Besleme noktasında akım maksimum, gerilim ise minimum seviyededir; bu da düşük bir giriş empedansı ile sonuçlanır. Bu fiziksel davranış, elektriksel olarak bir Seri RLC Devresi ile analogi olarak aynıdır.



Şekil 2: MXene dipol antenin farklı elektriksel iletkenlikleri için önerilen eşdeğer devre modeli.

Bu modelde kapasitör (C), dipol uçlarında yoğunlaşan elektrik alanında depolanan enerjiyi temsil eder. Endüktör (L), akım taşıyan kolların etrafındaki manyetik alanda depolanan enerjiyi temsil eder. Direnç (R) ise, radyasyon direnci (R_{rad}) ve malzemenin ohmik kayıplarının (R_{loss}) toplamı olan toplam güç tüketimini ifade eder. Normalde ideal olarak, bir paralel RLC devresi, empedansın maksimize edildiği (slot anten gibi) bir anti-rezonans yapısını temsil ederdi. Fakat, MXene dipolümüz akım noktasından (antinode) beslendiği için, empedans değişimlerini ($Z_{in} = R + j(\omega L - 1/\omega C)$) yakalamak adına fiziksel olarak en doğru gösterim Seri RLC topolojisidir.



Şekil 3: Farklı iletkenlik değerleri için MXene dipol antenin simüle edilen (CST Microwave Studio) ve hesaplanan (Eşdeğer Devre Modeli) yansımaya katsayısı karşılaştırması.

Önerilen Eşdeğer EDM doğruluğunu teyit etmek amacıyla, MXene dipol antenin geri dönüş kaybı (S_{11}) karakteristikleri analiz edilmiş ve CST Microwave Studio'da gerçekleştirilen tam dalga simülasyonları ile karşılaştırılmıştır. Şekil 3, MXene filminin 0.5×10^5 ile 10×10^5 S/m arasında değişen çeşitli elektriksel iletkenlik değerleri için S-bandı (1.5 – 3.5 GHz) boyunca dB ölçeğindeki yansımaya katsayısını göstermektedir. Şekildeki grafikler, yaklaşık 2.35 GHz frekansında temel bir rezonans göstermektedir. Ancak performans, malzeme iletkenliğine kritik bir şekilde bağlıdır:

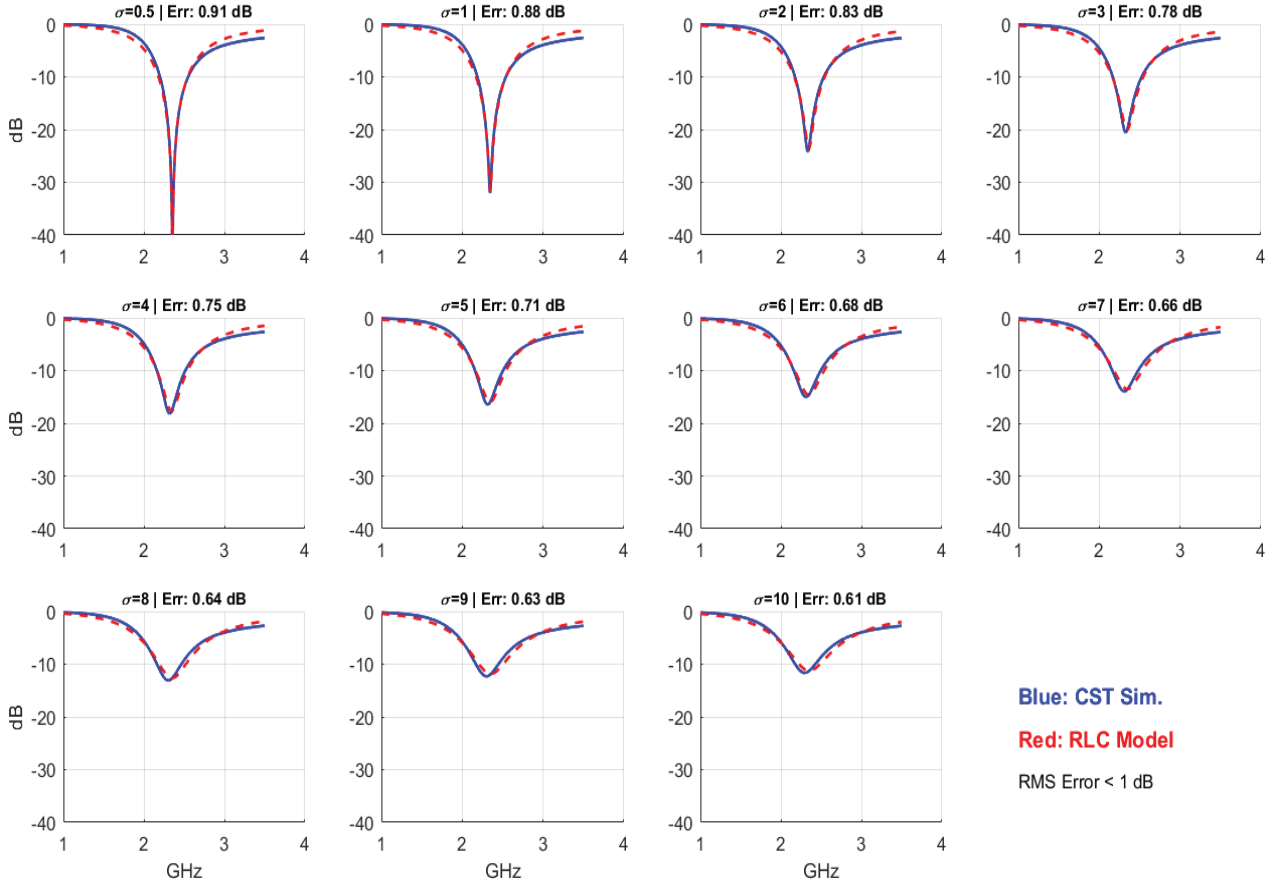
Yüksek İletkenlik Bölgesi ($\sigma \geq 5 \times 10^5$ S/m): Anten, -25 dB'nin oldukça altına inen bir geri dönüş kaybı ile keskin bir rezonans sergilemektedir. Bu durum, 50 Ω kaynak ile mükemmel bir empedans uyumuna ve verimli bir enerji radyasyonuna işaret ediyor.

Düşük İletkenlik Bölgesi ($\sigma \leq 1 \times 10^5$ S/m): İletkenlik azaldıkça, rezonans çukuru önemli ölçüde sığlaşmaktadır ve

örneğin, 0.5×10^5 S/m değerinde S_{11} genliği -44 dB seviyesine ulaşmaktadır.

Performanstaki bu düşüş, fiziksel olarak dipol kollarının seri direncinin (R) artmasına bağlanmaktadır. Düşük iletkenlik, daha yüksek ohmik (R_{loss}) kayıplara yol açarak rezonansı sönmölemekte (düşük Q faktörü), empedans uyum koşulunu bozmakta ve antene maksimum güç aktarımını engellemektedir.

Bu çalışmanın temel amacı, zaman alıcı tam dalga simülasyonlarına güvenmeden MXene dipol antenlerin elektromanyetik yanıtını doğru bir şekilde tahmin eden sağlam bir devre modeli oluşturmaktır. Önerilen Seri RLC modelini doğrulamak için; σ için 0.5×10^5 S/m (yüksek dirençli durum) ile 10×10^5 S/m (metal benzeri durum) arasındaki geniş bir MXene elektriksel iletkenlik aralığında, CST Microwave Studio simülasyonlarına karşı kapsamlı bir karşılaştırma yapılmıştır.



Şekil 4: Simüle edilen (CST) ve hesaplanan (Devre Modeli) yöntemlerin her ikisinden elde edilen geri dönüş kaybı eğrileri.

Tablo 1. Çeşitli MXene iletkenlikleri için simüle edilen (CST) ve hesaplanan (Devre Modeli) anten parametrelerinin nicel karşılaştırması.

Sigma (10^5 S/m)	f_0 (GHz)	R (Ω)	L (nH)	C (pF)
0.5	2.3550	381.6733	110.5487	0.0413
1	2.3475	396.9598	110.7513	0.0415
2	2.3475	430.0072	110.4066	0.0416
3	2.3450	459.7543	110.0439	0.0419
4	2.3450	489.6972	109.6320	0.0420
5	2.3450	518.9476	109.1367	0.0422
6	2.3475	548.5474	108.4759	0.0424
7	2.3500	578.0570	107.8510	0.0425
8	2.3500	605.7713	107.3595	0.0427
9	2.3525	634.8174	106.7333	0.0429
10	2.3525	661.3541	106.2796	0.0431

Şekil 4'te gösterildiği ve Tablo 1'de özetlendiği üzere, devre modelinden elde edilen analitik sonuçlar (Hesaplanan), sayısal verilerle (Simüle Edilen) olağanüstü bir uyum sergilemektedir. Model, tüm iletkenlik değerleri genelinde rezonans frekansını %0,5'ten daha az bir sapma ile tahmin etmektedir. Örneğin, $\sigma = 5 \times 10^5 \text{ S/m}$ değerinde simüle edilen rezonans 2,345 GHz iken, model 2,3452 GHz öngörmektedir. Bu durum, modelimizdeki reaktif bileşenlerin (L and C), dipolün fiziksel geometrisini doğru bir şekilde temsil ettiğini doğrulamaktadır.

Model, rezonans çukuru genişliğindeki değişimleri de başarıyla takip etmektedir. Simüle edilen ve hesaplanan tepe S_{11} değerleri arasındaki fark minimaldir (genellikle $< 1 \text{ dB}$); bu da modeldeki dirençli bileşenin (R), iletkenliğe bağlı ohmik kayıpları (R_{loss}) doğru bir şekilde hesaba kattığını kanıtlamaktadır.

- $\sigma \leq 5 \times 10^5 \text{ S/m}$ için anten, derin bir rezonans çukuru ($S_{11} > 17 \text{ dB}$) ile verimli bir şekilde çalışmaktadır. Yüksek Q faktörü, radyasyon direncinin ohmik kayıplara baskın geldiğini göstererek anteni standart kablosuz haberleşme için uygun hale getirmektedir.
- $\sigma > 5 \times 10^5 \text{ S/m}$ için ise uyumlamada (matching) önemli bir bozulma gözlemlenmektedir.
- $\sigma = 5 \times 10^5 \text{ S/m}$ için geri dönüş kaybı -17 dB seviyesindedir. Düşük Q faktörü (yüksek direncin sönümlenme etkisi) nedeniyle bant genişliği daha geniş görünse de, radyasyon verimliliği azalma eğilimindedir.

Sonuç olarak, önerilen EDM yalnızca yüksek iletkenliğe sahip metaller için geçerli olmakla kalmayıp, MXene gibi kayıplı ve çözelti bazlı işlenmiş malzemeler için de yüksek doğrulukta kalmaktadır. Bu güvenilirlik, tüm 3 boyutlu yapıyı yeniden ağlara bölüp (re-meshing) simüle etmek yerine, sadece devre parametrelerini (R, L and C) ayarlayarak MXene antenlerin hızlı bir şekilde optimize edilmesine olanak tanıyabilir.

5. SONUÇ

Bu çalışma, değişken iletkenliğe sahip MXene filmlerine dayalı dipol antenlerin empedans davranışını karakterize etmek için sistematik bir EDM sunmuştur. Malzeme özelliklerinin statik olduğu geleneksel metalik antenlerin aksine, MXene antenler iletkenlik durumlarına bağlı olarak dinamik performans varyasyonları sergilemektedir. Tam dalga CST simülasyonları kullanılarak iletkenlik üzerinde parametrik bir tarama yapılması ve buna karşılık gelen toplu

eleman parametrelerinin çıkarılmasıyla, antenin rezonans yanıtını doğru bir şekilde tahmin eden genelleştirilmiş bir RLC ağı başarıyla türetilmiştir.

Doğrulama sonuçları, önerilen analitik model ile S-bandı ($1.5 - 3.5 \text{ GHz}$) üzerindeki tam dalga simülasyonları arasında mükemmel bir uyum olduğunu göstermektedir. Devre analizi iki kritik fiziksel olguyu ortaya koymuştur: 1) Direnç Değişimi: İletkenlik azaldıkça, toplam giriş direnci, radyasyon direncinden ziyade temel olarak ohmik kayıpların etkisiyle bir ters kuvvet yasasını takip ederek artmaktadır. Bu durum, bant genişliği ile radyasyon verimliliği arasındaki dengeyi nicel bir şekilde açıkça ortaya koymaktadır. 2) Endüktans Etkisi: Düşük iletkenlik rejiminde eşdeğer endüktans (L) değerinde belirgin bir artış gözlemlenmiştir. Standart metalik davranıştan sapma gösteren bu durum, deri derinliğinin (skin depth) film kalınlığıyla karşılaştırılabilir olduğu durumlarda önemli hale gelen iç endüktans etkisine bağlanmaktadır.

Sonuç olarak, önerilen devre modeli, yeni nesil esnek antenlerin tasarımı için hesaplama açısından verimli ve fiziksel açıdan öngörülü bir araç sağlamaktadır. Bu model, RF mühendislerinin sadece zaman alıcı tam dalga simülasyonlarına güvenmeden MXene tabanlı bileşenlerin performansını hızlı bir şekilde tahmin etmelerine olanak tanımakta ve böylece çözeltiyle işlenebilir nanomalzemelerin 5G/6G ve IoT uygulamalarına entegrasyonunu hızlandırabilir.

Teşekkür

Musa Bute, çalışmalarına verdikleri desteklerden dolayı Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumuna (TÜBİTAK) teşekkür etmektedir.

Yazar Katkıları

Tüm çalışmadaki simülasyon ve yazılımlar yazar tarafından gerçekleştirildi.

Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur. Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır. Çalışmanın tümü CST Microwave Studio ve Matlab programında yazar tarafından yapılmıştır yalnız akıcı bir Türkçe dili olması için yapay zeka ile bazı cümleler düzenlenmiştir.

Kaynaklar

- [1] J. Guo et al., "High-Conductivity MXene Film-Based Millimeter Wave Antenna for 5G Applications," *Crystals*, vol. 13, no. 7, p. 1136, 2023.
- [2] K. K. Kazemi et al., "MXene membrane in planar microwave resonant structures for 5G applications," *Applied Materials Today*, vol. 26, p. 101294, 2022.
- [3] X. Fan et al., "Flexible two-dimensional MXene-based antennas," *Nanoscale Horizons*, vol. 8, pp. 309-320, 2023.
- [4] Y. Huang et al., "Flexible MXene films for batteries and beyond," *Carbon Energy*, vol. 4, pp. 598–620, 2022.
- [5] J. Zhang et al., "Scalable Manufacturing of Free-Standing, Strong $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene Films with Outstanding Conductivity," *Advanced Materials*, vol. 32, no. 23, p. 2001093, 2020.
- [6] Y. Gogotsi, "The Rise of MXenes," *ACS Nano*, vol. 13, no. 8, pp. 8491–8494, 2019.
- [7] J. S. Seyyedi, S. Sahab, G. Moradi, A. Ebrahimpour, and R. S. Shirazi, "The Comparison of MXene and Graphene-Based Antennas for 5G/6G Communications," in 2025 33rd International Conference on Electrical Engineering (ICEE), 2025.
- [8] A. Lipatov et al., "High electrical conductivity and breakdown current density of individual monolayer $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene flakes," *Matter*, vol. 2, no. 6, pp. 1395–1407, 2020.
- [9] J. Guo et al., "Microstrip Antenna Arrays Based on Two-dimensional Titanium Carbide (MXene) Films," in 2023 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT), Chengdu, China, 2023.
- [10] Z. S. Sourkouhi et al., "Paper-Based RFID Tag using MXene Towards Sustainable IOT," 2024.
- [11] A. Sinha et al., "MXene: An emerging material for sensing and biosensing," *Trends in Analytical Chemistry*, vol. 105, pp. 424–435, 2018.
- [12] K. Hantanasirisakul and Y. Gogotsi, "Electronic and Optical Properties of 2D Transition Metal Carbides and Nitrides (MXenes)," *Advanced Materials*, vol. 30, no. 52, p. 1804790, 2018.
- [13] M. Bute, "MXene Based Dipole Antennas Involving Effects of Sheet Resistance," [11th International Conference On Electrical and Electronics Engineering].
- [14] Y. Gogotsi, "MXene, Graphene or Their Hybrid? A Guide to Finding the Best Material for the Job," in *Graphene & 2D Materials International Conference*, 2019.
- [15] M. Han et al., "Solution-Processed $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene Antennas for Radio-Frequency Communication," *Advanced Materials*, vol. 33, no. 1, p. 2003225, 2021.

Özgeçmiş



Musa Bute, Gaziantep Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü'nde lisans derecesini 2011 yılında, yüksek lisans derecesini 2013 yılında ve Doktora derecesini ise 2018 yılında tamamlamıştır. Şu anda Gaziantep Üniversitesi, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü'nde öğretim üyesi olarak akademik çalışmalarını sürdürmektedir. Temel araştırma alanları arasında; RF ve mikrodalga mühendisliği, hesaplamalı elektromanyetik, anten teorisi ve tasarımı yer almaktadır. Özellikle yeni nesil kablosuz haberleşme sistemleri (5G/6G) ve Nesnelerin İnterneti (IoT) uygulamaları için nanomalzeme tabanlı (Metamalzeme, MXene, Grafen vb.) esnek elektronik cihazların geliştirilmesi üzerine yoğunlaşmıştır. Ulusal ve uluslararası konferanslarda sunulmuş bildirileri ve hakemli dergilerde yayınlanmış makaleleri bulunmaktadır.