



ARAŞTIRMA MAKALESİ / RESEARCH ARTICLE

# Dielektrik Kaplı İletken Silindirden Saçılan Alanın Minimizasyonu

## Minimization of the Scattered Field from the Dielectric Coated Conductive Cylinder

Tanju Yelkenci 

Türk-Alman Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Eletronik Mühendisliği Bölümü, İstanbul, TÜRKİYE  
 Sorumlu Yazar / Corresponding Author : tanju.yelkenci@tau.edu.tr

### Öz

Bu çalışmada, TM polarize düzlem dalga ile aydınlatılan, dielektrik malzeme ile kaplı sonsuz uzun, mükemmel iletken, dairesel bir silindirin RKA (radar kesit alanı) 'nı en aza indirmek için analitik yöntemle dayalı bir analiz önerilmektedir. Silindirik yapıdan saçılan alan, farklı bölgelerde Bessel ve Hankel fonksiyonlarının sonsuz seri toplamı cinsinden ifade edilerek analitik olarak belirlenmiştir. Burada temel yaklaşım olarak kalınlık veya permittivite veya frekansın sabit olduğu varsayılarak, iki değişken parametreye bağımlı bir fonksiyonelin parametrik analizi yapılmış ve yapının RKA'nı en aza indirgeyen parametreler belirlenmiştir. Elde edilen sonuçların tutarlılığı, uzak alan ifadeleri gözlemlenerek gösterilmiş ve önerilen yöntemin başarısı çeşitli durumlar için tartışılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Kaplı silindir, Dielektrik tabaka, Mükemmel iletken, Radar kesit alanı (RKA), TM polarizasyon

### Abstract

In this study, an analysis based on the analytical method is proposed to reduce the RCS (radar cross section) of an infinite, perfectly conducting circular cylinder coated with a dielectric material, which is illuminated by a TM polarized plane wave. The scattered field of the cylindrical structure is determined analytically where the fields in different regions are expressed in terms of infinite series summation of cylindrical vector wave functions. Here, as a basic approach, the thickness or permittivity or frequency is assumed to be constant, and parametric analysis of a functional dependent on two variable parameters is performed, consequently, the relevant parameters minimizing the RCS of the structure are determined. The consistency of the obtained results is demonstrated by observing the far-field expressions, and the success of the proposed method is discussed for various situations.

**Keywords:** Coated cylinder, Dielectric layer, Perfect electric conductor (PEC), Radar cross section (RCS), TM polarization

### EXTENDED ABSTRACT

#### Introduction

Reducing the radar cross-sectional area (RCS) remains actual in applications aimed at minimizing the detectability of targets and is the subject to intensive research studies using different methods. The RCS of a target depends on the geometric and physical structure of the target as well as on the characteristics of the incident wave such as frequency, angle of incidence and polarization. In examining the scattered field of the high frequency electromagnetic waves from targets having complex geometric and physical structures such as aircraft, ships, weapon systems, etc., exact or approximate solutions are frequently obtained using models constructed with basic shapes such as cylinder, sphere, cone, ellipsoid, wedge or their combinations. RCS calculation of basic shapes herewith still continues to hold an important place in many researches.

In this study, an analysis based on the analytical method is proposed to reduce the RCS of an infinite, perfectly conducting circular cylinder coated with a dielectric material, which is illuminated by a TM polarized plane wave at a single frequency. Here, as a basic approach, one of the three parameters such as

frequency, or thickness or permittivity of the coating is assumed to be constant and a functional depending on the other two parameters is defined, consequently, the relevant parameters minimizing the functional and hence the reduced RCS of the structure in this manner are determined.

#### Materials and Methods

The scattered field from the dielectric coated cylindrical PEC (perfect electric conductor) is determined analytically where the fields in different regions of the structure are represented in terms of infinite series summation of Bessel and Hankel functions. By imposing the appropriate boundary conditions, one gets a set of linear equations involved in incident, transmitted and reflected field coefficients. By solving the system of the resulting linear equations, the scattered field outside the coated cylinder is easily determined. The asymptotic expression of the scattered field is taken into account which appears in the bistatic cylinder RCS equation with far scattered field approximation. In order to reduce the total RCS of the coated cylinder, a functional depending on two variables is defined as a definite integral of the bistatic RCS far field approximation with respect to the observation angle.

## Results and Discussion

The numerical results for the minimization procedure are based on the computations of the functional considered for three different scenarios. The image plot of the functional depending on two parameters is depicted while one of the parameters frequency, or thickness or permittivity of the dielectric layer is assumed to be a constant. The points in the yellow colored regions of the image plot represent pairs which correspond to lowest RCS, while darker blue colored regions of the image plot comply with pairs which yield highest RCS. The results that minimize RCS are verified by comparing them graphically with the plots obtained from the bistatic RCS far-zone approximation. It has been observed that the both results are consistent and also in a good agreement.

## 1. Giriş

Radar kesit alanının (RKA) düşürülmesi, hedeflerin tespit edilebilirliğinin azaltılmasına yönelik uygulamalarda güncelliğini korumakta ve farklı yöntemlerin kullanıldığı yoğun araştırma çalışmalarına konu olmaktadır ([1], [2]). Bir hedefin RKA, hedefin geometrik ve fiziksel yapısına olduğu kadar, gelen dalganın frekans, geliş açısı ve polarizasyon gibi özelliklerine de bağlıdır. Yüksek frekanslı elektromagnetik dalgaların karmaşık geometrik ve fiziksel yapıya sahip, uçak, gemi, silah sistemleri v.b. gibi hedeflerden saçılan alanın incelenmesinde, silindir, küre, koni, elipsoid, kama gibi temel şekiller veya bunların kombinasyonlarıyla oluşturulan modeller yardımıyla elde edilen tam veya yaklaşık çözümlerinden de sıklıkla faydalanılmaktadır. Temel şekillerin RKA'nın hesabı, halen birçok araştırmada önemli bir yer tutmaya devam etmektedir.

RKA tahmini için sayısal yöntemler, yüksek frekanslarda ışın teorisi yöntemleri, ve hibrit yöntemler gibi birçok hesaplama tekniği önerilmiştir ([3], [4]). Yüksek frekanslarda ışın teorisi yöntemleri içinde en dikkate değer olanlar Fizik Optik (FO), Geometrik Optik (GO), Kırınımın Geometrik Teorisi (KGT) ile bu yaklaşımları geliştirmeye yönelik Kırınımın Fizik Teorisi (KFT) ve Kırınımın Üniform Teorisi) adıyla bilinen yöntemlerdir ([5], [6]).

Mükemmel iletken bir yapının, bir veya daha fazla dielektrik tabaka ile kaplanmış olmasının, bu yapıdan saçılan alanın belirli ölçüde kontrol edilmesine olanak sağladığı yapılan klasik araştırmalarda gösterilmiştir. Örneğin, dielektrik kaplı mükemmel iletken silindirden saçılma probleminin ele alındığı çalışmalar, uzun yıllar öncesinden beri yapılmaktadır ([7], 1955), ([8], 1956), ([9], 1957), ([10], 1987)]. İlerleyen yıllarda, dielektrik kaplı, ince mükemmel iletken yapıdan saçılmayı en aza indirmeyi amaçlayan incelemelere de rastlanmaktadır ([11], [12]). Birkaç on yıldan beri, metalmalzemeler gibi doğada bulunmayan yapay malzemelerin kendine özgü elektromanyetik özellikleri kullanılarak, kapsamlı araştırmalar yoğun bir şekilde yürütülmektedir ([13], [14]). Metalmalzeme ve dielektrik kaplı mükemmel iletken silindirik yapılardan saçılmaların karşılaştırması üzerine yapılan çalışmalar da bulunmaktadır ([15]).

Bu makalede, TM polarize düzlem dalga ile aydınlatılan dielektrik kaplamalı, dairesel kesitli, mükemmel iletken, sonsuz uzun silindirin RKA'nı, en aza indirmeyi amaçlayan bir çalışma sunulmuştur. Burada, [16] da belirtilmiş olan, frekansın sabit, kalınlık ve permitivitinin değişken varsayıldığı senaryonun kapsamı genişletilerek; frekans, dielektrik tabakanın kalınlık ve

## Conclusion

The first results obtained in this study, which brings simple options to classical RCS reduction techniques, have demonstrated that according to the applied method, RCS can significantly be reduced by covering a conductive cylindrical structure with appropriate thickness and dielectric materials at a single frequency. In this context, it is anticipated that the proposed approach may have a potential to be used in real physical and practical applications. For example, numerical modeling of aircraft or similar structures and determining the physical and constitutive properties of the coating to be applied on them in a manner similar to the approaches presented here constitute an important practical problem.

permitivitesi gibi parametrelerden biri sabit iken, diğer iki parametreye bağlı bir fonksiyonel tanımlanıp, bu fonksiyoneli, dolayısıyla RKA'nı minimum yapacak bir yöntem önerilmiştir.

Bölüm 2 'de dielektrik kaplı sonsuz uzun mükemmel iletken silindirik yapının geometrisi, TM polarize düzlem dalgayla aydınlatılan yapının farklı bölgelerindeki alanların analitik ifadelerinin formülasyonu ve sınır koşullarının uygulanması sonucu belirlenmiş olan, saçılan alana ilişkin katsayının çözümü verilmiştir.

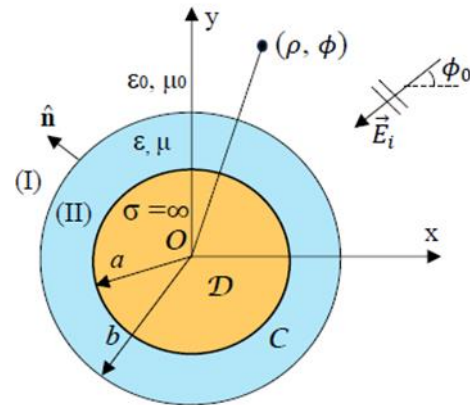
Bölüm 3'de bir önceki bölümde yapılan analiz ile elde edilen saçılan alan katsayısını içeren uzak alan RKA yaklaşımı ifadesini minimum yapacak parametrelerin belirlenmesinde kullanılacak fonksiyonellerin formülasyonları belirlenmiştir.

Bölüm 4'te yapının RKA'nı en aza indirgeyen sayısal bulgular verilmiş ve bunların uzak alan yaklaşımı sonuçlarıyla karşılaştırılarak sağlanması yapılmıştır.

Son olarak Bölüm 5'te, önerilen yöntem ve bulgular yorumlanmıştır. Bu çalışmada, zamanla değişim çarpanı  $e^{-i\omega t}$  olarak düşünülmüştür.

## 2. Problemin Geometrisi ve Formülasyonu

Şekil 1'deki yapıyı ele alalım:



Şekil 1. Dielektrik malzeme kaplı, sonsuz uzun mükemmel iletken silindirik cisim.

Figure 1. Dielectric material coated, infinitely long, perfectly conductive cylindrical body.

Bu yapıda,  $D$ , ortam parametreleri  $\epsilon_0$  ve  $\mu_0$  olan boş uzaydaki sonsuz uzun,  $a$  yarıçaplı, dairesel silindir şeklinde mükemmel iletken bir cisimdir. Mükemmel iletken cisim,  $C$  ile gösterilen,

kalınlığı  $t$ , bünye parametreleri  $\varepsilon$  ve  $\mu$  olan, dielektrik bir malzeme ile kaplanmıştır. Dielektrik malzeme ile kaplanmış olan mükemmel iletken cisim, TM polarize bir düzlem dalga ile aydınlatılmıştır. Cisim sonsuz uzun ve z-eksenine paralel olduğundan, toplam elektrik alan vektörü z-eksenine paralel olur. Gelen elektrik alanın silindirik koordinatlardaki ifadesi

$$\vec{E}^i = u^i(\rho, \phi) \vec{e}_z^-, \quad \phi \in (0, 2\pi) \quad (1)$$

şeklindedir. Bu ifadede geçen

$$u^i(\rho, \phi) = e^{-ik_0\rho \cos(\phi-\phi_0)} \quad (2)$$

olup,  $k_0 = \omega \sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}$  boş uzayın dalga sayısını,  $\phi_0$  ise gelen dalganın geliş açısını göstermektedir.

Uzayın farklı ( $\rho > b$  ve  $a < \rho < b$ ) bölgelerindeki alanların sonsuz seri açılımları, sırasıyla,

$$u^I(\rho, \phi) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left[ i^{(-n)} e^{-in\phi_0} J_n(k_0\rho) + A_n H_n^{(1)}(k_0\rho) \right] e^{in\phi}, \quad \rho > b \quad (3)$$

ve

$$u^{II}(\rho, \phi) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left[ B_n J_n(k_0\rho) + C_n H_n^{(1)}(k_0\rho) \right] e^{in\phi}, \quad a < \rho < b \quad (4)$$

olarak verilir. Burada,  $J_n$  n'yinci merteye Bessel fonksiyonunu,  $H_n^{(1)}$  ise birinci türden n'yinci merteye Hankel fonksiyonunu göstermektedir ([17]). Yukarıdaki ifadelerde gözükten  $A_n, B_n,$  ve  $C_n$  katsayıları

$$u^{II}(\rho, \phi) = 0, \quad \rho = a \quad (5)$$

$$u^{II}(\rho, \phi) = u^I(\rho, \phi), \quad \rho = b \quad (6)$$

$$\frac{1}{\mu} \frac{\partial u^{II}(\rho, \phi)}{\partial \rho} = \frac{1}{\mu_0} \frac{\partial u^I(\rho, \phi)}{\partial \rho}, \quad \rho = b \quad (7)$$

sınır koşulları dikkate alınarak belirlenecek olan bilinmeyen katsayılarıdır. Bu tür silindirik yapılara ilişkin analitik çözümlerin ifadeleri ([18]) de verilmiştir. Buna göre (3) ve (4) de verilen ifadeler (5), (6) ve (7) nolu denklemlerde yerine konularak ve  $e^{in\phi}$  fonksiyonlarının ortogonalite özellikleri de dikkate alınarak 3 bilinmeyenli 3 denklemden  $A_n$  katsayısı

$$A_n = \frac{i^{(-n)} e^{-in\phi_0} [\mu_r M J_n'(k_0 b) - N J_n(kb)]}{N H_n^{(1)}(k_0 b) - \mu_r M H_n^{(1)'}(k_0 b)} \quad (8)$$

yazılabilir. Bu ifadede gözükten  $M$  ve  $N$

$$M = J_n(kb) H_n^{(1)}(ka) - J_n(ka) H_n^{(1)}(kb), \quad (9)$$

ve

$$N = J_n'(kb) H_n^{(1)}(ka) - J_n'(ka) H_n^{(1)'}(kb) \quad (10)$$

şeklindedir. Dielektrik kaplı cismin dışında kalan bölgede saçılan alan ifadesi ise (3) no lu denklemin sağ tarafındaki serinin içindeki ikinci parça

$$\sum_{n=-\infty}^{\infty} A_n H_n^{(1)}(k_0\rho) e^{in\phi}$$

kullanılarak aşağıdaki gibi

$$u^S(\rho, \phi) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_n H_n^{(1)}(k_0\rho) e^{in\phi}, \quad \rho > b, \quad (11)$$

yazılabilir. Sonraki bölümde, (11) denkleminin asimptotik ifadesi dikkate alınarak dielektrik malzemeyle kaplı silindirik yapının RKA'nın sırasıyla  $(\varepsilon, t), (f, t)$  ve  $(f, \varepsilon)$  parametre çiftlerine göre minimizasyonu ele alınacaktır. Bu kapsamda (11) ile verilen ifadede Hankel fonksiyonunun büyük argümanlar halindeki asimptotik ifadesi yerine yazılırsa, uzak alan ifadesi  $k_0\rho \rightarrow \infty$  için

$$u^S(\rho, \phi) \cong \sqrt{\frac{2}{\pi k_0}} e^{i(k_0\rho - \pi/4)} \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_n e^{in\phi} \quad (12)$$

şeklinde elde edilir ([17]).

### 3. RKA'nın Minimizasyonu

İki boyutlu bir hedefin RKA ile temsil edilen  $\sigma$  elektromanyetik saçılımı, genellikle,

$$\sigma_{2-D} = \lim_{\rho \rightarrow \infty} 2\pi\rho \frac{|u^S|^2}{|u^I|^2} \quad (13)$$

şeklinde tanımlanmaktadır ([17]). Sabit bir frekans için, TM polarize gelen dalga durumunda, uzak alan yaklaşımı ile silindire ait bistatik RKA

$$\sigma(\phi) = \frac{2\lambda_0}{\pi} \left| \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_n(\varepsilon, t) e^{in(\phi-\phi_0)} \right|^2 \quad (14)$$

ile verilmektedir ([15]). Burada  $A_n$ , yukarıda da sözünü ettiğimiz üzere gözönüne alınan yapıya ilişkin saçılma katsayısı olup, kaplamanın dielektrik parametresine ve kalınlığına bağlıdır. Dielektrik kaplı silindirin toplam RKA'nı minimize etmek amacıyla,  $\phi$  gözlem açısına göre  $\sigma(\phi)$  fonksiyonunun integralinden ibaret aşağıda belirtilen gibi bir fonksiyonel tanımlanabilir:

$$F(\varepsilon, t) = \int_0^{2\pi} \sigma(\phi) d\phi = 4\lambda_0 \sum_{n=-\infty}^{\infty} |A_n(\varepsilon, t)|^2 \quad (15)$$

Bu fonksiyonel elde edilirken, (14) deki serinin açık halinin eşleniği ile çarpımı olduğu göz önünde bulundurulmuştur.  $\varepsilon$  ve  $t$  'nin belirli aralıklarda değişimleri dikkate alınarak,  $F(\varepsilon, t)$  fonksiyonelinin dielektrik parametresi ve kalınlığa göre 2-boyutlu grafiği kolayca elde edilebilir. Grafikten elde edilecek olan  $F(\varepsilon, t)$  fonksiyonelinin minimize eden  $(\varepsilon, t)$  çiftleri, problemin aranan çözümü olacaktır.

Benzer düşüncelerle, kaplamanın dielektrik parametresinin sabit bir değeri için, bistatik RKA

$$\sigma(\phi) = \frac{2\lambda_0}{\pi} \left| \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_n(f, t) e^{in(\phi-\phi_0)} \right|^2, \quad (16)$$

fonksiyonel ise

$$F(f, t) = \int_0^{2\pi} \sigma(\phi) d\phi = 4\lambda_0 \sum_{n=-\infty}^{\infty} |A_n(f, t)|^2 \quad (17)$$

olarak tanımlanabilir.  $F(f, t)$  fonksiyonelinin,  $f$  ve  $t$  'nin belirli aralıklarda değişimiyle elde edilecek grafiğinden hareketle,  $F(f, t)$  fonksiyonelinin minimize eden  $(f, t)$  çiftleri kolayca elde edilir.

Yine benzer şekilde, dielektrik kaplamanın kalınlığının sabit bir değeri için, bistatik RKA

$$\sigma(\phi) = \frac{2\lambda_0}{\pi} \left| \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_n(f, \varepsilon) e^{in(\phi-\phi_0)} \right|^2, \quad (18)$$

fonksiyonel ise

$$F(f, \varepsilon) = \int_0^{2\pi} \sigma(\phi) d\phi = 4\lambda_0 \sum_{n=-\infty}^{\infty} |A_n(f, \varepsilon)|^2 \quad (19)$$

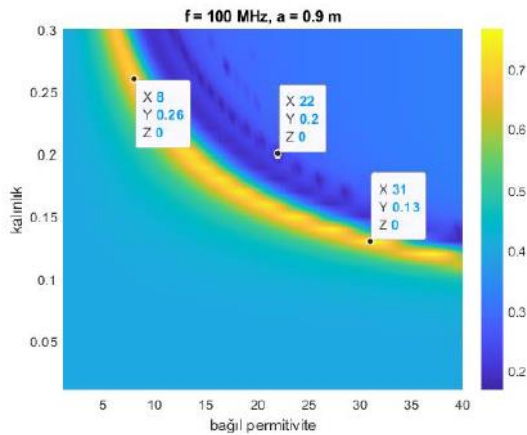
şeklinde düşünülebilir.  $F(f, \varepsilon)$  fonksiyonelinin,  $f$  ve  $\varepsilon$  'nu belirli aralıklarda değiştirmek suretiyle elde edilecek grafiğinden,  $F(f, \varepsilon)$  fonksiyonelinin minimize eden  $(f, \varepsilon)$  çiftleri kolayca bulunur.

Bundan sonraki kısımda sayısal bulgulara yer verilecektir.

#### 4. Sayısal Bulgular

Sayısal sonuçlar, önceki bölümde tartışılan, dielektrik malzemeyle kaplı, bir mükemmel iletken dairesel silindir için analitik formülasyonu yapılan fonksiyonellerin hesabına dayanmaktadır. Aşağıdaki örneklerin tümünde TM polarize düzlem dalganın geliş açısı  $\phi_0 = 0^\circ$ , mükemmel iletken dairesel silindirin yarıçapı  $a=0,9$  m ve tabakanın bağli permeabilitesi  $\mu_r = 1$  'dir.

İlk örnekte, frekans  $f=100$  MHz olarak seçilmiştir. Dielektrik kaplamanın kalınlığı 0,01 ila 0,3 m, bağli permitivitesi ise 1 ila 40 arasında değişmektedir. (15) nolu denklem uyarınca  $F(\varepsilon, t)$ 'nin grafiği Şekil 2'de gösterilmektedir.

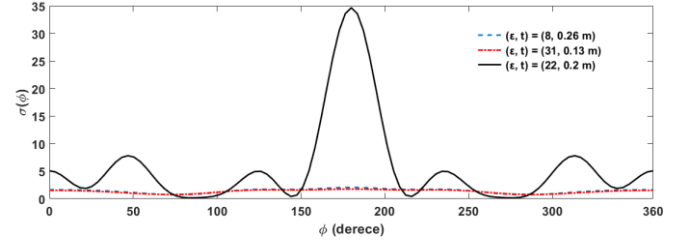


Şekil 2.  $f = 100$  MHz için  $F(\varepsilon, t)$  fonksiyonelinin grafiği.

Figure 2. Image plot of the functional  $F(\varepsilon, t)$  at  $f = 100$  MHz.

Grafiğinin sarı renkli bölgelerindeki noktalar, en düşük RKA'na karşılık gelen kalınlık ve bağli geçirgenlik çiftlerini temsil ederken, grafiğin koyu mavi renkli bölgeleri, en yüksek RKA'ni veren  $(\varepsilon, t)$  çiftlerine karşı gelmektedir.

Şekil 2' den görülebileceği gibi, sarı renkli bölgeden (8,0.26 m), (31,0.13 m) ve koyu mavi renkli bölgeden (22,0.2 m) değerlerine sahip üç  $(\varepsilon, t)$  çifti seçilmiştir. Seçilen bu değerlere göre,  $\sigma(\phi)$ 'nin  $\phi$  ile değişimi, Şekil 3' de verilmiştir:

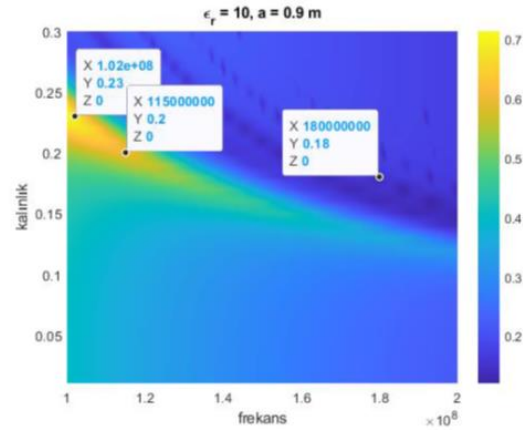


Şekil 3.  $f = 100$  MHz,  $a = 0.9$  m için RKA'nın  $\phi$  gözlem açısıyla değişimi.

Figure 3. Variation of RCS with observation angle  $\phi$  for  $f = 100$  MHz,  $a = 0.9$  m.

$F(\varepsilon, t)$  fonksiyonelinin en aza indiren  $(\varepsilon, t)$ , yani (8,0.26 m), (31,0.13 m) değerlerinin beklendiği gibi birbirine yakın olduğu ve bunların dışındaki (22,0.2 m) çiftinin ürettiği değerlerin çok farklı olduğu belirgin bir şekilde görülmektedir.

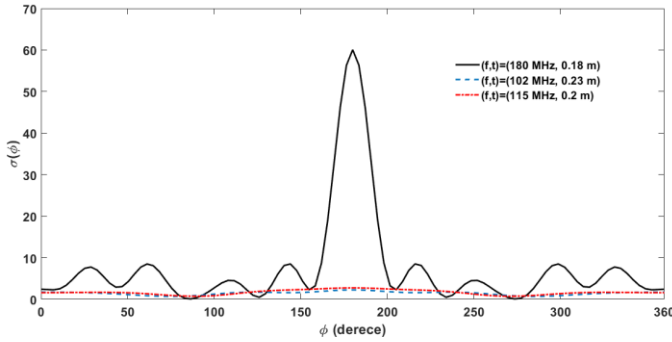
İkinci örnekte, dielektrik katmanın bağli permitivitesi  $\varepsilon_r = 10$  seçilmiştir. Frekans değişim aralığı 1 ile 2 MHz arasında olup, dielektrik kaplamanın kalınlığı 0,01 ile 0,3 m arasında değişmektedir. (17) uyarınca,  $F(f, t)$  fonksiyonelinin grafiği Şekil 4'de gösterilmektedir.



Şekil 4.  $\varepsilon_r = 10$  için  $F(f, t)$  fonksiyonelinin grafiği.

Figure 4. Image plot of the functional  $F(f, t)$  for  $\varepsilon_r = 10$ .

Şekil 4' den görülebileceği üzere, sarı renkli bölgeden (102 MHz, 0.23 m), (115 MHz, 0.2 m) ve koyu mavi renkli bölgeden (180 MHz, 0.18) değerlerine sahip üç  $(f, t)$  çifti seçilmiştir. Seçilen bu değerlere göre,  $\sigma(\phi)$ 'nin  $\phi$  ile değişimi, Şekil 5' de verilmiştir:

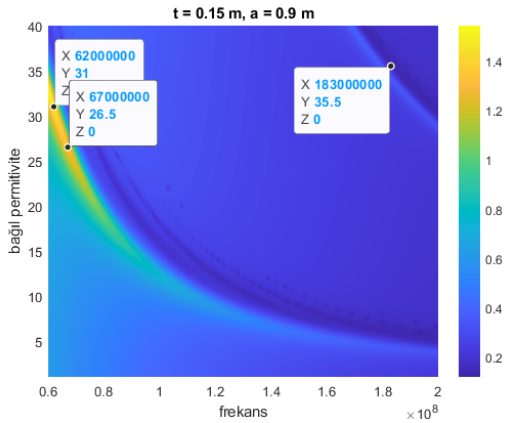


**Şekil 5.**  $\epsilon_r = 10$ ,  $a = 0.9$  m için RKA'nın  $\phi$  gözlem açısıyla değişimi.

**Figure 5.** Variation of RCS with observation angle  $\phi$  for  $\epsilon_r = 10$ ,  $a = 0.9$  m.

$F(f, t)$  fonksiyoneli en aza indiren  $(f, t)$ , yani sarı bölgeden (102 MHz, 0.23 m), (115 MHz, 0.2 m) değerlerinin birbirine çok yakın olduğu ve bunların dışındaki koyu mavi bölgeden (180 MHz, 0.18) çiftinin çok bariz bir şekilde farklı olduğu açıkça görülmektedir.

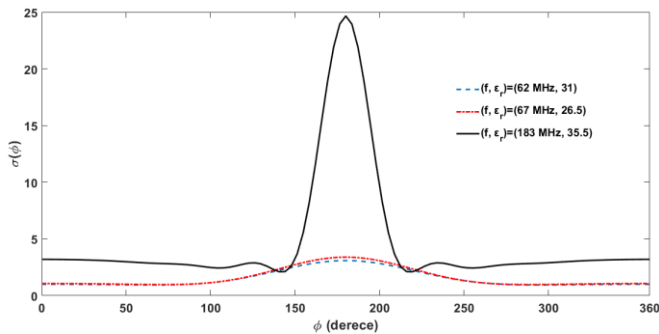
Son örnekte, dielektrik katmanın kalınlığı  $t = 0.15$  m seçilmiştir. Frekans 70 ile 100 MHz, bağıl permitivite ise 1 ile 40 arasında değişmektedir. (19) uyarınca,  $F(f, \epsilon)$  fonksiyonelinin grafiği Şekil 6'da gösterilmektedir.



**Şekil 6.**  $t = 0.15$  m için  $F(f, \epsilon)$  fonksiyonelinin grafiği.

**Figure 6.** Image plot of the functional  $F(f, \epsilon)$  for  $t = 0.15$  m.

Şekil 6' da verildiği üzere, sarı renkli bölgeden (62 MHz, 31), (67 MHz, 26.5) ve koyu mavi renkli bölgeden (183 MHz, 35.5) değerlerine sahip üç  $(f, \epsilon)$  çifti seçilmiştir. Seçilen bu değerlere göre,  $\sigma(\phi)$ 'nin  $\phi$  ile değişimi, Şekil 7' de görülmektedir:



**Şekil 7.**  $t=0.15$  m,  $a=0.9$  m için RKA'nın  $\phi$  gözlem açısıyla değişimi.

**Figure 7.** Variation of RCS with observation angle  $\phi$  for  $t=0.15$  m,  $a=0.9$  m.

$F(f, \epsilon)$  fonksiyoneli en aza indiren  $(f, \epsilon)$ , yani sarı bölgeden (62 MHz, 31), (67 MHz, 26.5) değerlerinin birbirine çok yakın olduğu ve bunların dışındaki koyu mavi bölgeden (183 MHz, 35.5) çiftinin farklı olduğu grafikte açıkça belirgindir.

## 5. Sonuçlar

Bu çalışmada, dielektrik malzeme kaplamalı, TM polarize düzlem dalga ile aydınlatılan sonsuz uzun mükemmel iletken silindirin RKA'nın azaltılması için analitik yaklaşıma dayalı bir analiz önerilmiştir. Bu amaçla, ilkönce sabit frekans halinde kaplama malzemesinin bağıl geçirgenlik ve kalınlık parametrelerine göre, sonra sabit bağıl geçirgenlik halinde frekans ve kalınlık parametrelerine göre ve son olarak sabit kalınlık halinde frekans ve bağıl geçirgenlik parametrelerine göre fonksiyoneller tanımlanmıştır. Tanımlanan her bir fonksiyonelin parametrelerinin değişim aralıklarına göre hesaplanan 2-boyutlu grafiğinden, saçılan alanı, dolayısıyla RKA'nını minimize eden parametre çiftleri elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar bistatik RKA uzak bölge yaklaşım ifadesinin sonuçlarıyla grafik olarak karşılaştırılarak doğrulanmıştır. Klasik RKA düşürme tekniklerine basit seçenekler getiren bu çalışmada elde edilen ilk sonuçlar, uygulanan yöntemin iletken bir silindirik yapıyı uygun kalınlık ve dielektrik malzemelerle kaplayarak RKA'nın ciddi oranlarda düşürülebileceğini göstermiştir. Bu kapsamda önerilen yaklaşımın gerçek fiziksel ve pratik uygulamalarda da kullanılabilme potansiyelinin olabileceği öngörülmektedir. Örneğin, uçak ya da benzeri yapıların sayısal olarak modellenmesi ve üzerine yapılacak kaplamanın burada sunulan yaklaşımlara benzer şekilde belirlenmesi pratik açıdan önemli bir problem oluşturur.

## 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.

## Kaynaklar

- [1] Knott, E. F., Schaeffer, J. F., Tuley, M. T. 2004. Radar Cross Section. 2nd Ed., SciTech Publishing, Raleigh, NC, 637s.
- [2] Skolnik, M.I. 2001. Radar Handbook, 3rd Ed., Mc-Graw-Hill Publishing Company, 772s.
- [3] Knott, E. F. 1985. A progression of high-frequency RCS prediction techniques. Proceedings of IEEE, Cilt. 73, no. 2, s. 252-264. DOI: 10.1109/proc.1985.13137
- [4] Jenn, D. C. 2005. Radar and Laser Cross Section Engineering. AIAA Press, USA, 503s.
- [5] James, G. L. 2007. Geometrical Theory of Diffraction for Electromagnetic Waves. Reprint of 3rd Ed., IET Electromagnetic Waves Series 1, London, United Kingdom, 293s.
- [6] Leader, C. J. 1982. Modern Methods of Scattering Predictions. SPIE Proceedings, Applications of Mathematics in Modern Optics, SPIE 26th Annual Technical Symposium - San Diego, August. Cilt. 358, s. 17-23. DOI: 10.1117/12.934050
- [7] Elliott, R. S. 1955. Azimuthal surface waves on circular cylinders, J. Appl. Phys., Cilt. 26, no. 4, s. 368-376. DOI: doi.org/10.1063/1.1722000
- [8] Wu, T.T. 1956. High frequency scattering. The Physical Review, Cilt. 104, no. 5, s. 1201-1212. DOI: 10.1103/PhysRev.104.1201
- [9] Tang, C. C. 1957. Back-scattering from dielectric coated infinite cylindrical obstacles. J. Appl. Phys., Cilt. 28, no. 5, s. 628-633. DOI:10.1063/1.1722815
- [10] Kim, H., Wang, N. 1987. High Frequency Analysis of EM Scattering from a Circular Conducting Cylinder with Dielectric/Ferrite Coating. The Ohio State University, ElectroScience Laboratory, Technical Report No. 717674-4, 174s.



- [11] C. A. Valagiannopoulos, Alitalo, P. and Tretyakov, S. 2012. Dielectric-coated PEC Cylinders which do not Scatter Electromagnetic Waves. IEEE Conference Paper, September, s. 90-91.  
DOI: 10.1109/ICEAA.2012.6328595
- [12] C. A. Valagiannopoulos, Alitalo, P. and Tretyakov, S.A. 2014. On the Minimal Scattering Response of PEC Cylinders in a Dielectric Cloak. IEEE Ant. and Wireless Prop. Letters, Cilt. 13, s. 403-416.  
DOI: 10.1109/LAWP.2014.2307015
- [13] Engheta, N., and Ziolkowski, R. W. 2006. Metamaterials. Physics and Engineering Explorations, Wiley-IEEE Pres, New Jersey, s. 414.
- [14] Ahmed, S. and Naqvi, Q. A. 2009. Scattering of electromagnetic waves from a nihility circular cylinder coated with a metamaterial. Journal of Infrared, Millimeter and Terahertz Waves, Cilt. 30, s. 1044–1052.  
DOI 10.1007/s10762-009-9531-5
- [15] C. Li, Shen, Z. 2003. Electromagnetic scattering by a conducting cylinder coated with metamaterials. Progress in Electromagnetics Research, Cilt. 42, s. 91-105.  
DOI:10.2528/PIER03012901
- [16] Yelkenci, T. 2023. 14th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO), IEEE. Determination of the Dielectric Coating Parameters to Reduce the Radar Cross-section of the Perfectly Conducting Cylinder. s. 1-3  
DOI: 10.1109/ELECO60389.2023
- [17] Gradshteyn, I., Ryzhik, I. 2007. 7th Ed. "Table of Integrals, Series and Products", Academic Press & Elsevier Inc., 1171s.
- [18] Balanis, C.A. 2012. 2nd Ed. "Advanced Engineering Electromagnetics", John Wiley & Sons, Inc., 1046s.