

# TEL YAPILARIN GEÇİCİ TEPKİ ANALİZİ

Cengiz Eken, Adnan Köksal\*  
ASELSAN A.Ş MST/TMM  
ceken@aselsan.com.tr,

\*Hacettepe Üniversitesi  
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü  
Beytepe, Ankara  
koksak@hacettepe.edu.tr

**Özet:** Bu çalışmada tel yapıların zamanda geçici tepkilerini inceleyen bir yazılım geliştirilmiş ve çeşitli yapılara uygulanmıştır. Tel yapıların elektromanyetik yayılım ve saçılım analizi için, açık tip zaman uzamı elektrik alan integral denklemi nümerik olarak çözülmüştür. Geliştirilen program ile, düğüm noktaları ve çoklu tel yapıları da içerebilen gelişigüzel tel ağ yapılar üzerinde indüklenen akım, uzak elektrik ve manyetik alanlar, radar kesit alanı, empedans ve kazanç parametreleri hesaplanabilmektedir. Elektrik alan integral denklemi moment metodu ve zamanda adımlama yöntemleri kullanılarak çözülmüştür. İlk olarak, tek bir tel yapı incelenmiş, nümerik olarak çözülmüş ve sonuçlar literatürde bulunanlarla karşılaştırılarak doğrulukları gözlenmiştir. Daha sonra yöntem gelişigüzel tel yapılara genişletilmiştir. Elde edilen sonuçlar, bildiride sunulan yöntemle modellenen tel yapıların, başarılı bir şekilde analiz edilebildiğini göstermektedir.

## 1. Giriş

Saçıcı ve anten yapıların geçici tepkilerinin analizine olan ilgi bilgisayar olanaklarının gelişmesi ile artmıştır. Bunların sonucunda zaman uzamında analiz için nümerik çözüm teknikleri konusunda çalışmalar hız kazanmıştır. Bu çalışmada gelişigüzel ince tel yapılar incelenmiştir. Tel yapılar, akım tel eksenini boyunca aktığı için üç boyutta basit yapılar olarak karşımıza çıkmaktadır. Tel antenler yaygın olarak kullanıldığından dolayı bu problemin pratik önemi büyüktür. Çalışmada gelişigüzel tel yapıları zaman uzamında inceleyebilecek bir yazılım geliştirilmiştir. Geliştirilen program MM (Moment Yöntemi) ve MoT (Zamanda Adımlama) tekniğini kullanmaktadır [1]. Bu çalışmada yayılma ve saçılma problemleri zaman uzamında İntegral denklem yöntemi ile çözülmüştür. Denklemler Moment yöntemi ve zamanda adımlama yöntemi ile açık (explicit) olarak ifade edilip çözülmüştür [1]. Çeşitli tel antenler ve saçıcıların analizi başarı ile gerçekleştirilmiştir.

## 2. Analiz Yöntemi

Zaman bağımlı elektromanyetik tepkilerin bulunması için uygulanan çeşitli yöntemler vardır. Bilinen bir yöntem frekans uzamında incelenen denklemlerin, Fourier Dönüşümünü gerçekleştirerek zaman uzamına dönmektir. Bir başka yöntem doğrudan zaman bağımlı Maxwell denklemlerini kullanarak, zamana bağımlı manyetik vektör potansiyel için bir denklem elde edilmesidir. Bu çalışmada ikinci yaklaşım seçilmiştir.

Çalışmada başlangıç olarak, zamana bağımlı Maxwell denklemlerinden yola çıkılarak, manyetik vektör potansiyelini içeren ikinci mertebeden bir integro-diferensiyel denklem elde edilir. Elde edilen bu denklemin nümerik çözümü için öncelikle tel yapı doğrusal parçalara bölünmüştür. Açılım fonksiyonları olarak (1) denkleminde verilen darbe fonksiyonları kullanılmıştır.

$$f_m(z) \equiv \begin{cases} 1 & z_m - \frac{\Delta z}{2} \leq z \leq z_m + \frac{\Delta z}{2} \\ 0 & \text{diğer durumda} \end{cases} \quad (1)$$

Bu açılım fonksiyonları, düzlemsel parça üzerindeki standart darbe fonksiyonlarıdır. Bu açılım fonksiyonları kullanarak, tel yapı üzerindeki  $I$  akımı aşağıdaki biçimde yaklaşırlabilir:

$$I \approx \sum_{k=1}^N I_k(t) f_k(z) \quad (2)$$

İntegral denklemde bu ifadeler kullanıldıktan sonra son aşamada denklem değişik test fonksiyonları yardımıyla çözüm işlemi tamamlanır. Çalışmada test fonksiyonları açılım fonksiyonları ile aynı seçilmiş, ancak işlemleri azaltmak amacıyla nümerik integral tek nokta kullanılarak alınmıştır. Böylelikle kullanılan test yöntemi ağırlıklı nokta uyumlandırma olarak görülebilir. Zaman eksenini de eşit aralıklara bölünüp herhangi iki parça arasındaki en

küçük uzaklık  $R_{\min}$  olmak üzere  $\Delta t$  zaman adımı,  $c \cdot \Delta t \leq R_{\min}$  eşitsizliğini sağlayacak şekilde seçildiğinde tel yapı üzerindeki akım açık olarak zamanda adımlama yöntemi ile çözülebilir. Bunun sonucunda herhangi bir parçadaki akım yalnızca diğer parçalarda önceki zamanlarda var olan akımların bir fonksiyonudur. Bu yöntemin yararı matris saklanması ve tersinin alınması işlemlerini gerektirmemesidir.

Antenler ve saçıcılar arasındaki fark, uyarma kaynağının yerleşim yeridir. Yapı, eğer kaynak tel yapı üzerinde ise anten, tel yapı uzağında ise saçıcı olarak adlandırılmaktadır.

Bir sistemin, gelişigüzel şekilde bir dalga biçimine cevabı, o sistemin bilinen bir dalga biçimine tepkisinden elde edilebilir. Bu nedenle bu çalışmada uyarım fonksiyonu olarak Gauss darbe fonksiyonu seçilmiştir. İncelenen her bir anten ve saçıcı durumu için, tel yapı elektromanyetik darbe ile uyarılmıştır. Saçıcı durumu için bu darbe biçimi gelen düzlem dalga şeklinde (değiştirilebilen yön ve polarizasyona sahip), anten durumu için ise yapı üzerinde uygulanan zamana bağımlı bir voltaj kaynağıdır. Her iki durumda Gauss darbesinin parametreleri değiştirilerek istenen frekans bandında analiz gerçekleştirilebilir.

### 3. Sonuçlar ve Tartışma

Birinci örnek olarak bir dipol antenin değişik uzunluk/yarıçap durumları için analizi verilecektir. Dipol anten ortasından beslenmiş ve kaynak olarak 0.2 LM genişlikte bir Gauss darbesi kullanılmıştır. Şekil 1(a) ve (b) de, sırasıyla, 1 metre uzunluğundaki bir dipol antenin değişik  $l/a$  değerleri için hesaplanan direnç ve reaktans değerleri verilmiştir. Bu sonuçlar literatürde bulunanlarla [2]-[4] uyum göstermektedir. Şekil 1(b) incelendiğinde, yatay ekseninde  $l/a \approx 0.48$  olduğunda reaktansın sıfır olduğu görülmektedir. Bu değer, dipol anten için ilk rezonans değeridir. Bu noktadaki direnç değeri Şekil 1(a) dan  $R \approx 73 \Omega$  olarak bulunmuştur. İkinci rezonans,  $0.8 \leq l/a \leq 0.9$  aralığında görülmektedir. Bu noktada besleme noktasındaki akım çok küçük olduğundan dolayı, yayılım direnci çok büyüktür, çünkü, anten giriş terminalindeki duran dalga akım değeri en küçük değere sahiptir. Daha sonraki rezonanslar, beklendiği gibi dipol antenin boyu  $l$ 'nin yaklaşık  $\lambda/2$  artışlarında oluşmaktadır. Eğer incelenen antenlerin yarıçapı daha da küçültülür yani yapı çizgisel anten haline yaklaşırsa, grafiklerdeki birinci ve ikinci rezonans değerleri  $l/a = 0.5$  ve  $1$  değerlerine daha da yaklaşacaktır ve yayılım direnci değeri bir kaç bin ohm civarına yükselecektir.

Yine Şekil 1(b) ye göre, düşük frekanslarda empedans değerinin negatif ve büyük olduğu göze çarpmaktadır. Bu karakteristik, dipol antenin düşük frekanslarda kapasitif reaktans olarak davrandığını göstermektedir. Bu davranış fiziksel olarak beklendiği gibi, tel etrafındaki elektrik alandaki enerjinin baskın olarak depolanması, manyetik alanın ve akımın çok küçük olması şeklinde açıklanabilir.

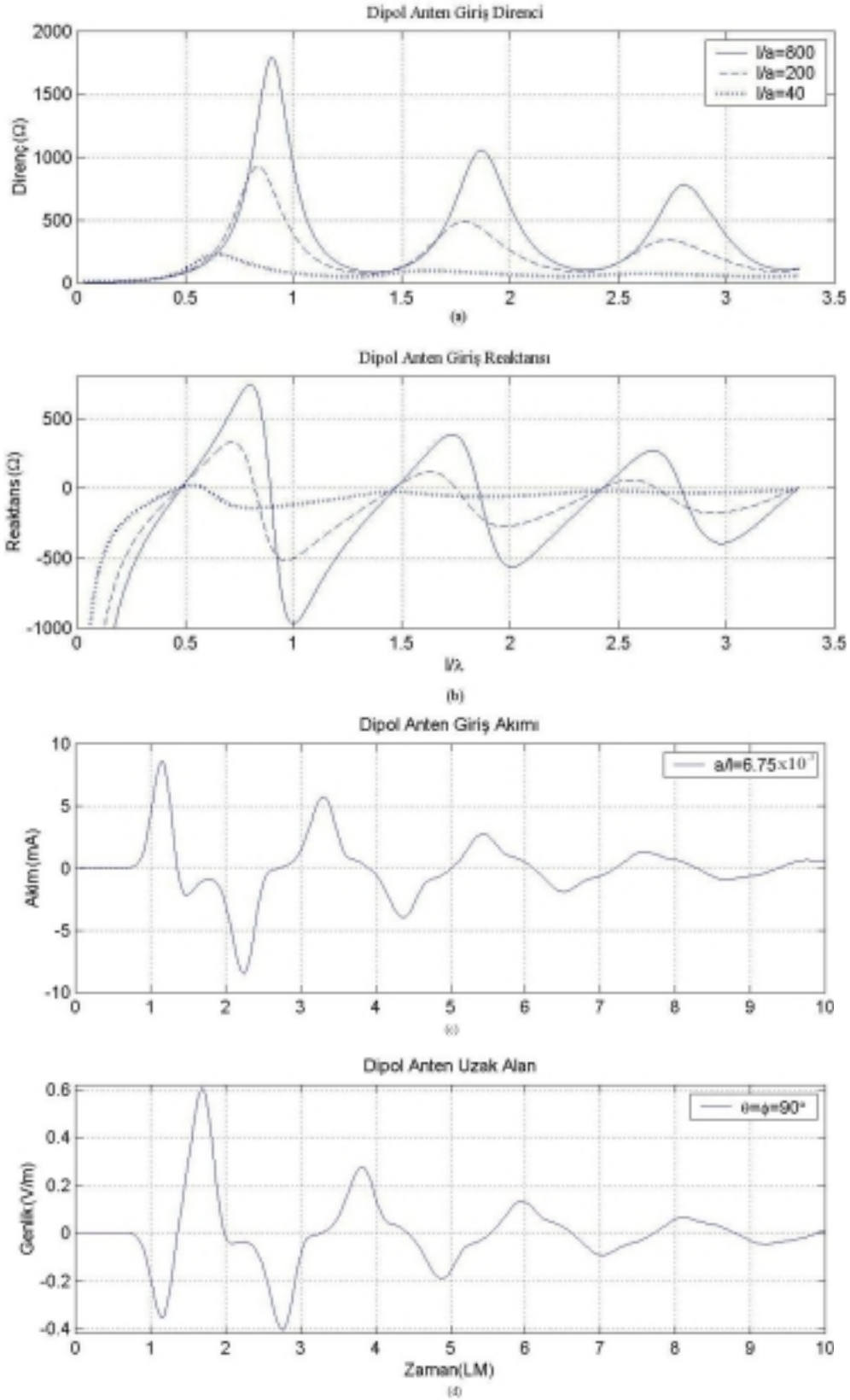
Sonuçlardan görüldüğü gibi kalın dipol antenlerin reaktans ve direnç değerleri daha düzgün dağılmaktadır. Eğer anten görece olarak geniş bir bantta kullanılacaksa,  $l/a$  değerleri azaltılarak daha uygun bir anten performansı elde edilebilir.

İkinci örnek olarak basit bir füze modeli geliştirilmiş ve yapının radar kesit alanı (RKA) incelenmiştir. Şekil 2 sonuçları ve modeli göstermektedir. Modellenen yapı 0.5 metre (150 MHz'de  $\lambda/4$ ) uzunluğunda bir silindirik kısımdan ve 15 cm uzunluğundaki konik uç kısımdan oluşmaktadır. Bu yapı Şekil 2'de gösterilen tel ağ ile modellenmiş ve iki ayrı gelen dalga polarizasyonu ( $x$  ve  $z$ ) için  $\theta$  ve  $\phi$  yüzeylerinde kesit alanı hesaplanmıştır. Gelen dalga  $-y$  yönünde ilerleyen ve 0.5 LM genişliği olan bir Gauss darbesidir. Yapının analizi zaman uzamında gerçekleştirilmiş, tel ağ üzerindeki zamana bağlı akımlar bulunmuş ve Fourier dönüşümü kullanılarak 150 MHz'deki sonuçlar elde edilmiştir. Şekil 2(a) ve (b) de  $x$  yönünde polarize olmuş gelen dalga için, sırasıyla,  $\theta=90^\circ$  ve  $\phi=90^\circ$  yüzeylerinde RKA görülmektedir. Bu polarizasyon için maksimum kesit alanı beklendiği gibi gelen dalga yönündedir. Şekil 2(c) ve (d) aynı yüzeylerdeki sonuçları bu kez  $z$  yönünde polarize olmuş gelen dalga için vermektedir. Bu polarizasyon için  $\phi=270^\circ$  yönündeki RKA  $\phi=90^\circ$  yönündeki değere çok yakındır ve modelin RKA değeri doğru olmakla birlikte gerçek problemi iyi modellemediği görülmektedir. Bu problem yatay sarımların artırılması ile çözülebilir.

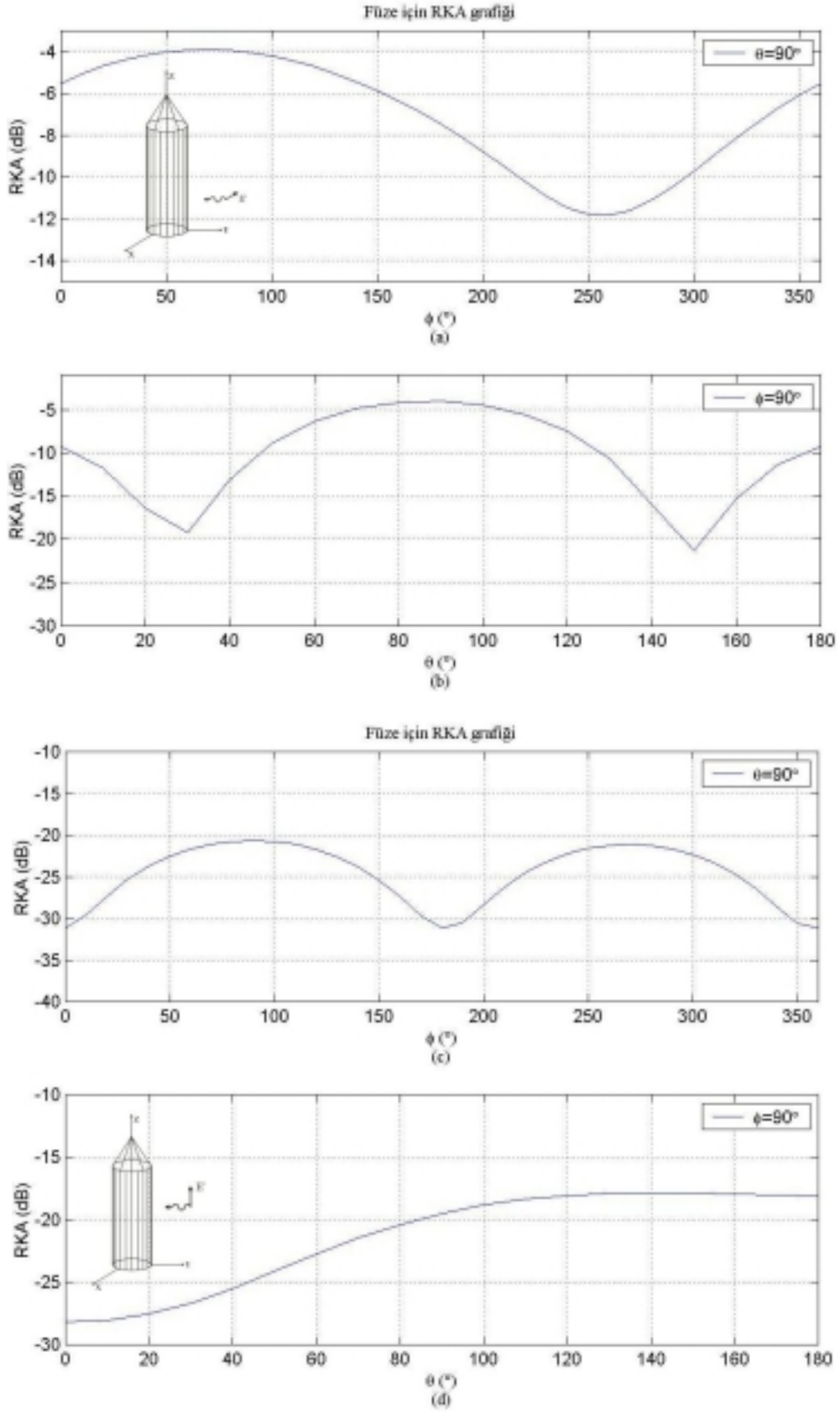
Verilen örnekler geliştirilen yazılımın tel yapıların geçici tepkilerinin doğru bir şekilde ve kabul edilebilir hesaplama zamanları ile bulunabileceğini göstermiştir.

### Kaynaklar

- [1] S.M. Rao, *Time Domain Electromagnetics*, New York: Wiley, 1997.
- [2] A.J. Poggio, E.K. Miller, G.J. Burke, "An Integro-Differential Equation Technique for the Time Domain Analysis of Thin-Wire Structures II. Numerical Results," *J. Computational Phys.* **12**, 1973.
- [3] R.F. Harrington, *Field Computation by Moment Methods*, McMillan, New York, 1968.
- [4] R.W.P. King, *The Theory of Linear Antennas*, Harvard University Press, Cambridge, 1956.



**Şekil 1.** Merkezinden uyarılan dipol anten  
 (a) giriş direnci, (b) giriş reaktansı, (c) giriş akımı, (d) uzak alan ( $\phi_{\text{obs}} = \theta_{\text{obs}} = 90^\circ$ )



**Şekil 2.** Tel ağ ile modellenmiş füze geometrisinin radar kesit alan sonuçları ( $\theta_i = \phi_i = 90^\circ$ )  
 (a)  $\theta_s = 90^\circ$ ,  $E_i$  x-yönünde, (b)  $\phi_s = 90^\circ$ ,  $E_i$  x-yönünde, (c)  $\theta_s = 90^\circ$ ,  $E_i$  z-yönünde, (d)  $\phi_s = 90^\circ$ ,  $E_i$  z-yönünde