

# Binalar Arası Elektromanyetik Dalga Yayılımının Nümerik Modellenmesi

## Numerical Modeling of Electromagnetic Wave Propagation Between Buildings

Özlem Özgün<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü  
Hacettepe Üniversitesi, Ankara  
ozlem@ee.hacettepe.edu.tr

### Özet

Kablosuz cihazlara olan talebin artmasıyla birlikte, kentsel alanda radyo frekansı (RF) yayılımı ile ilgili çalışmalar daha fazla önem kazanmaya başlamıştır. Verici ile alıcı arasındaki sinyal gücü, birçok faktörden özellikle yayılım yolu boyunca binalardan ve nesnelere kaynaklanan yansıma, kırınım ve gölgeleme gibi faktörlerden oldukça etkilenir. Bu nedenle, modern kablosuz haberleşme sistemlerinin planlanmasında ve geliştirilmesinde kullanılabilen, farklı ortamlardaki sinyal gücünü tahmin edebilen etkin dalga yayılım modellerine ihtiyaç vardır. Bu çalışmada, kentsel alandaki karmaşık radyo dalga yayılım problemlerinin çözümüne yönelik GO+UTD (geometrik optik+düzgün kırınım teorisi) ve iki-yönlü bölünmüş-adım parabolik denklem yaklaşımına dayanan PETOOL modelleri karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Bu modeller ayrıca, basit yayılım senaryolarında geçerli teorik bir model olan kırınım ekranlar modeli ile karşılaştırılmıştır. Çeşitli nümerik simülasyon sonuçları sunulmuştur.

**Anahtar kelimeler:** Kentsel dalga yayılımı, geometrik optik (GO), düzgün kırınım teorisi (UTD), GO+UTD yazılımı, iki-yönlü bölünmüş-adım parabolik denklem, PETOOL yazılımı, kırınım ekranlar modeli, yol kaybı, yayılım faktörü.

### Abstract

With the increased demand for wireless devices, the study of radio frequency (RF) propagation in urban area has received much attention. The signal strength from transmitter to receiver is affected by many factors, especially reflection, diffraction, and shadowing due to buildings and objects along the path of propagation. Therefore, the planning and development of modern wireless communications systems requires effective propagation models to predict received signal strength in different environments. In this study, a comparative study of the GO+UTD (geometric optics + uniform theory of diffraction) tool and the PETOOL based on the two-way split-step parabolic equation are presented in the solution of complex radiowave propagation problems in urban area. These models are also compared with the diffracting screens model that is a theoretical model used in simple propagation scenarios. Various numerical simulations and conclusions are presented.

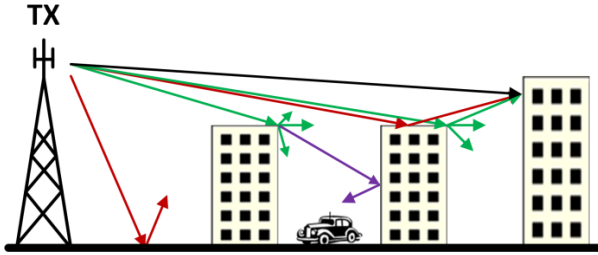
**Keywords:** Urban propagation, geometric optics (GO), uniform theory of diffraction (UTD), GO+UTD software, two-way split-step parabolic equation, PETOOL software, diffracting screens model, path loss, propagation factor.

### 1. Giriş

Kablosuz haberleşme sistemlerinin yaygınlaşması ve günlük hayatın vazgeçilmez bir parçası olması nedeniyle, elektromanyetik dalga yayılımının doğru ve hızlı bir şekilde modellenmesi ve şehir içindeki binalar arasındaki sinyal seviyelerinin tespiti önemli bir gerekliliktir. Radyo dalgaları yayılım modelleri genel olarak, bir elektromanyetik dalganın vericiden alıcıya ulaşmaya kadar yol boyunca uğradığı ve ortamdan kaynaklanan yansıma, kırılma, kırınım, vb. etkileri hesap ederek, *yol kaybı* veya *yayılım faktörü* parametrelerini hesaplar. Bu parametreler, radyo dalgalarının bir ortamda ilerlerken uğradığı kaybı ve serbest uzaydaki değerinden ne kadar farklılaştığını gösterirler ve bir haberleşme sistemindeki link bütçesi analizinin önemli bileşenleridirler. Radyo dalga yayılımı problemlerinde mesafeler dalga boyuna göre çok büyük olduğundan, momentler yöntemi, sonlu farklar ve sonlu elemanlar yöntemleri gibi iyi bilinen nümerik yöntemler (ayrıca HFSS, CST, vb. gibi bazı ticari yazılımlar) bilinmeyen sayısının çokluğu nedeniyle kullanılamaz. Geçmişte radyo dalga yayılımı modellemesi amacıyla, ölçüm sonuçlarına dayanan bazı ampirik modeller geliştirilmiştir [1,2]. Bunlar, gerçek ölçüm sonuçlarını bir eğriye uydurmaya çalışan ve fiziksel dayanağı olmayan modellerdir. Ayrıca, belirli parametreler ve ortamlar için geçerli olup, farklı yayılım senaryolarında geçerliliğini yitirmektedir. Ampirik modellerdeki zorlukların üstesinden gelmek için, binaların veya nesnelere bazı basit kanonik geometrilerle temsil edildiği teorik modeller önerilmiştir. Örneğin, Longley-Rice modeli [3], Bullington modeli [4], Lee modeli [5], ve Walfisch-Bertoni modeli [6,7] literatürde kullanılan modeller arasındadır. Bu modeller hızlı olmasına karşın, karmaşık ortamlar için geçerliliğini yitirmektedir.

Elektromanyetik dalga yayılımı modellemesinde, yüksek frekans teknikleri olarak da adlandırılan, geometrik optik (GO) [8], geometrik kırınım teorisi (GTD) [9], düzgün kırınım teorisi

(UTD) [10], fiziksel optik (PO) [11] ve fiziksel kırınım teorisi (PTD) [12] gibi bazı asimptotik teknikler de geliştirilmiştir. Bu teknikler ışın temellidir ve yansıma, kırılma ve kırınım gibi yayılım mekanizmalarını doğru bir şekilde hesaba katabilirler. Şekil 1’de, bir dizi bina içeren tipik bir kentsel yayılım probleminde dalga ışınlarının yansıması ve kırınımı gösterilmektedir. Geometrik optik yöntemi, direk gelen ve yansıyan alanları hesaplar, ancak kırınım etkilerini dahil etmez. Keller, kırınım etkilerini hesaba katabilmek için, mükemmel iletken bir kama-ya ait Sommerfeld kırınım integralini asimptotik hesaplayarak bir kırınım katsayısı tanımlamış ve böylece geometrik kırınım teorisini geliştirmiştir. Ancak bu teknik, gelen ve yansıyan dalga gölge sınırlarında tekillik göstermektedir. Bu tekilliği aşmak ve gölge sınırları boyunca düzgün dalga davranışı elde etmek amacıyla düzgün kırınım teorisi geliştirilmiştir. Geometrik optik temelli bu yaklaşımlar dışında fiziksel optik temelli yaklaşımlar da mevcuttur. Fiziksel optik modeli, yüzeydeki alanı ve akımı tahmin eder ve yüzey akımının integralini olarak saçılan alanı hesaplar. Ancak bu model de kırınım etkilerini hesaba katmaz. Fiziksel kırınım teorisi ise, yüzey üzerinde düzensiz saçak (fringe) kenar akımlarını kullanarak kırınım etkilerini dahil eder. Yakın bir geçmişte, uzun mesafe radyo dalga yayılımını modellemek için MATLAB tabanlı GO+UTD isimli açık-kaynak bir yazılım yazarlar tarafından literatüre sunulmuştur [13,14]. Ayrıca, bir kama probleminin kırınım modellemesi için geliştirilen yazılımlar literatürde mevcuttur [15,16].



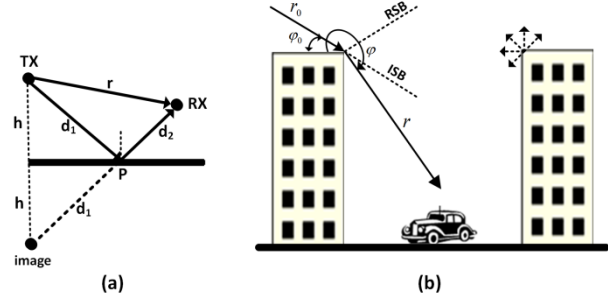
Şekil 1: Şehir içinde radyo dalgalarının yayılımı. (Siyah ışın: gelen dalga, kırmızı ışın: yansıyan dalga, yeşil ışın: kırınan dalga, mor ışın: kırınan/yansıyan dalga)

Uzun mesafe yayılım etkilerinin modellenmesi amacıyla yönelik en verimli yöntemlerden biri ise, rastgele kırılma etkilerinin ve karmaşık arazi profillerinin modellenmesine imkan sağlayan parabolik dalga denklemi modelidir [17]. Bu model, Helmholtz dalga denkleminin yaklaşık bir formuna dayanır ve menzil boyunca adımlama tipi bir algoritma ile hızlı ve doğru bir şekilde çözülebilir. Bununla birlikte, standart parabolik dalga denkleminin kısıtlarından birisi, yalnızca ileri doğru ilerleyen dalgaları dikkate almasıdır. Dolayısıyla, binalar, dik yamaçlı tepeler gibi engellerden geriye dönen dalgaları ve çoklu yansıma etkilerini hesaba katamaz. Geri dönen dalgaları da modelleyebilmek için iki-yönlü parabolik dalga denklemi modeli yazarlar tarafından geliştirilmiş ve MATLAB tabanlı açık-kaynak PETOOL yazılımı sayesinde hayata geçirilmiştir [18,19].

Bu çalışmada, binalar arası elektromanyetik dalga yayılımı problemi GO+UTD ve PETOOL modelleri kullanılarak ele alınacak, çeşitli senaryolar altında elde edilen simülasyon sonuçları sunulacaktır. Bu modeller ayrıca, basit yayılım senaryolarında kullanılabilen kırınım ekranlar modeli ile karşılaştırılacaktır. Bölüm 2’de modellerin teorik altyapısı özetlendikten sonra Bölüm 3’de nümerik sonuçlar sunulacaktır.

## 2. Teori

Bu bölümde sırasıyla GO+UTD, PETOOL ve kırınım ekranlar modellerinin teorik temelleri özetlenmiştir.



Şekil 2: GO+UTD modeli. (a) Geometrik optik (GO), (b) düzgün kırınım teorisi (UTD).

### 2.1. GO+UTD Modeli

GO+UTD yazılımı [13], binaları ve engelleri içeren araziye küçük parçalara böler ve her bir parça için farklı görüş hattı (line-of-sight) koşullarına göre geometrik optik (GO) ve düzgün kırınım teorisi (UTD) prensiplerini kullanarak çoklu yansıma ve kırınım etkilerini hesaplar. Tek bir alıcı noktası yerine ilgili bölgedeki tüm noktalarda alan değerlerini hesaplayarak verici antenin kapsama alanını oluşturur. İlk olarak, vericiden direkt gelen ışın aydınlatılmış tüm noktalar için hesaplanır. Bu sırada, verici antenin aydınlattığı yüzey parçaları ve bunlara ait görüntü (image) kaynakları belirlenir. Bu yüzeylerden yansıyan dalgalar bu görüntü kaynaklar kullanılarak hesaplanır. Daha sonra, bu yansıyan dalgaların aydınlattığı yüzey parçaları ve bunlara ait görüntü kaynakları bulunarak ikinci dereceden yansıyan dalgalar bulunur. Bu süreç, çoklu yansıma etkilerini hesaba katacak şekilde devam eder ve dalga sönümlenene veya hesaplama bölgesi dışına çıkıncaya kadar devam eder. Bununla birlikte, arazi üzerinde kırınımaya yol açan sivri tepeler belirlenir ve hesaplama bölgesi içindeki kırınan dalgalar yine görüş hattı koşullarına göre hesaplanır. Sivri tepelerin ucu yeni kaynakmış gibi düşünülerek, yukarıdaki adımlara benzer şekilde bu kaynakların aydınlattığı yüzey parçaları ve bunlara ait görüntü kaynakları belirlenir. Böylece kırınımaya uğradıktan sonra yüzeylerden yansıyan dalgalar hesaplanmış olur. Toplam alan, hesaplanan tüm alanların toplamı şeklinde ifade edilir.

GO yöntemi Şekil 2(a)’da gösterilmiştir. Düz bir yüzey üzerinde bulunan silindirik bir çizgi kaynaktan yayılan ve alıcı noktasına ulaşan ışınlar, direkt gelen ışın ve yüzeyden yansıyan ışındır. Bu noktadaki alan değeri, bu iki ışına ait alan değerlerinin toplamıdır. Yüzeyden yansıyan ışınlar, kaynağa ait görüntü kaynak kullanılarak hesaplanabilir. Aydınlatılmış bölgedeki toplam alan, aşağıda ifade edilen gelen ( $u^g$ ) ve yansıyan ( $u^y$ ) dalgaların toplamı şeklinde hesaplanır. ( $e^{i\omega t}$  zaman bağımlılığı kabul edilmiştir.)

$$u^g = u_0 e^{-jkr} / \sqrt{r} \quad (1)$$

$$u^y = u^g \Big|_P R_{y,d} \sqrt{\frac{d_1}{d_1 + d_2}} e^{-jk d_2} = u_0 R_{y,d} \frac{e^{-jk(d_1 + d_2)}}{\sqrt{d_1 + d_2}} \quad (2)$$

Burada  $u$ , sırasıyla yatay ve dikey polarizasyonda elektrik ve manyetik alanı ifade eder. Ayrıca,  $u_0$  gelen dalganın büyüklüğünü,  $k$  dalga numarasını,  $R_{y,d}$  ise yüzeyin yansımaya katsayısını ifade eder. Yatay polarizasyonda  $R_y = -1$  ve dikey polarizasyonda  $R_d = 1$ 'dir.

UTD yöntemi, kırınan alanları modellemek için kullanılır ve Şekil 2(b)'de gösterilmiştir. Binanın sivri köşelerinin verici anten veya yansıyan dalgalar tarafından aydınlatılması durumunda, her köşe için kırınan alanlar hesaplanır ve toplanır. Şekilde gösterilen tek bir köşeyi ele alalım. Köşeden kaynağa olan uzaklık ve kaynağa göre tanımlanan açı sırasıyla  $r_0$  ve  $\varphi_0$  ile gösterilsin. Benzer şekilde, köşeden alıcı noktasına olan uzaklık ve alıcı noktasına göre tanımlanan açı  $r$  ve  $\varphi$  ile gösterilsin. Dik açılı binayı modellemek için köşenin dış açısı  $\alpha = 3\pi/2$  alınır. Ancak, farklı açıdaki geometriler de benzer şekilde modellenebilir. UTD yönteminde kırınan alan aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$u_{y,d}^k = u^g D_{y,d} e^{-jkr} / \sqrt{r} \quad (3)$$

Burada,  $u^g$  köşe noktasındaki gelen dalgayı ve  $D_{y,d}$  ise yatay ve dikey polarizasyondaki kırınım katsayısını ifade eder. Kırınım katsayısı aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$D_{y,d} = \frac{-e^{-j\pi/4}}{2n\sqrt{2\pi k}} \left\{ \cot\left(\frac{\pi - \xi^-}{2n}\right) F(kLg^+ \xi^-) + \cot\left(\frac{\pi + \xi^-}{2n}\right) F(kLg^- \xi^-) \right\} \quad (4)$$

$$\mp \left\{ \cot\left(\frac{\pi - \xi^+}{2n}\right) F(kLg^+ \xi^+) + \cot\left(\frac{\pi + \xi^+}{2n}\right) F(kLg^- \xi^+) \right\}$$

Burada, (-) ve (+) sırasıyla yatay ve dikey polarizasyonda kullanılır. Ayrıca,  $n = \alpha/\pi$ ,  $\xi^{\pm} = \varphi \mp \varphi_0$ , ve  $F(X)$  is aşağıda verilen Fresnel integralidir.

$$F(X) = 2j\sqrt{X} e^{jX} \int_{\sqrt{X}}^{\infty} e^{-t^2} dt \quad (5)$$

Ayrıca,  $L$  ve  $g^{\pm}$  aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$L = \frac{rr_0}{r+r_0}, \quad g^{\pm}(\xi) = 2 \cos^2\left(\frac{2n\pi N^{\pm} - \xi}{2}\right) \quad (6)$$

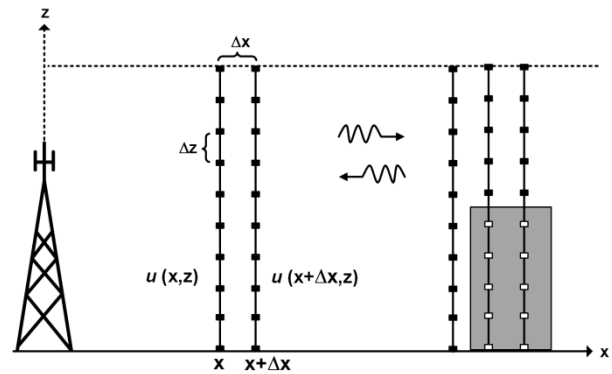
Burada  $N^{\pm} = (\pm\pi + \xi)/2n\pi$ , bu ifadeyi en yakın şekilde sağlayan tamsayıları ifade eder. Gölge sınırlarında, yani yansıyan dalga gölge sınırında (reflection shadow boundary RSB) ve gelen dalga gölge sınırında (incident shadow boundary ISB), cotanjant fonksiyonu tekillik içerdiği için, bu fonksiyonlar aşağıdaki yaklaşık ifadeyle yer değiştirebilir ( $\varepsilon \rightarrow 0$  için).

$$\cot\left(\frac{\pi \pm \beta}{2n}\right) F(kLg^{\pm} \xi) \approx n \left[ \sqrt{2\pi kL} \operatorname{sgn}(\varepsilon) - 2kL\varepsilon e^{-j\pi/4} \right] e^{-j\pi/4} \quad (7)$$

Standart yüksek frekans teknikleri, çizgi kaynak aydınlatmasına dayanır. GO+UTD ise, çizgi kaynağa ek olarak pratik uygulamalarda kullanılan Gauss tipi antenden yayılan ışınmayı da modelleyebilir. Gauss kaynak tipine ait formülasyonlar [13]'de verilmiştir.

## 2.2. PETOOL Modeli

Standart parabolik dalga denklemi, radyo dalgalarının yataya yakın açılarda yavaş değiştiği varsayımına dayanır ve bu nedenle hızlı değişen faz terimini çözümden çıkararak Helmholtz denklemini yaklaşık olarak çözmeye çalışır. Bu sayede, problem bir başlangıç değer problemine (initial value problem) dönüştürülür ve Fourier bölünmüş-adım (Fourier split-step) tekniği sayesinde hızlı bir şekilde çözülebilir. Bu teknikte, antenin bulunduğu menzilden başlanır ve menzil boyunca adım adım ilerleyerek ve düz ve ters Fourier dönüşümleri uygulayarak dikey eksen boyunca alan değerleri hesaplanır (bknz. Şekil 3). Tek yönlü Fourier bölünmüş adım tekniğinde alan değeri aşağıdaki gibi hesaplanır. ( $e^{-i\omega t}$  zaman bağımlılığı kabul edilmiştir.)



Şekil 3: PETOOL modeli.

$$u(x + \Delta x, z) = \exp[ik(n-1)\Delta x] \times F^{-1} \left\{ \exp \left[ ik\Delta x \left( \sqrt{1 - \frac{p^2}{k^2}} - 1 \right) \right] F \{ u(x, z) \} \right\} \quad (8)$$

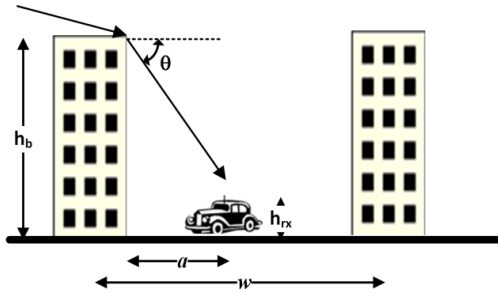
Burada,  $F$  Fourier dönüşümü,  $p = k \sin \theta$  dönüşüm dalga numarası,  $\theta$  yatayla yapılan açı ve  $n$  ise kırılma indisidir. Bu yaklaşımın bir avantajı, rastgele kırılma indisi profillerini rahatlıkla çözüme dahil edebilmesi, bu sayede dalganın kırılma (refraction) etkilerinin ve özellikle oluklama (ducting) etkilerinin kolayca modellenebilmesine imkan sağlamasıdır. Ayrıca, yataydaki adım boyutu dalga boyuna göre büyük seçilebildiğinden hızlı bir şekilde çözüme ulaşabilmektedir.

Ancak, yukarıdaki standart parabolik dalga denklemi yöntemi tek yönde ilerler ve geriye dönen dalgaları hesaba katmaz. Engellerin olmadığı uzun mesafe dalga yayılımında bu yaklaşım doğru sonuçlar vermesine rağmen, engellerden dolayı çoklu yansımaya etkilerinin baskın olduğu problemlerde doğru sonuç vermez. Geri dönen dalgaları hesaba katmak için iki-yönlü parabolik dalga denklemi modeli ilk defa ileri-geri hareket eden bir algoritmayla yazarlar tarafından hayata geçirilmiş [18] ve MATLAB arayüzlü PETOOL yazılımı geliştirilmiştir [19]. Şekil 3'de gösterildiği gibi, dalga bir engele çarptığında ikiye ayrılmakta, engelin içine düşen değerleri sıfırlanarak ileri yönde yoluna devam etmekte, aynı zamanda engel üzerinde uygun sınır koşulları uygulayarak geriye doğru da hareketine devam etmektedir. İleri-geri hareket eden bu dalgalar her engele çarptığında aynı işlem yapılmakta ve hareket eden dalgalar toplanarak toplam alan hesaplanmaktadır. Bu süreç, hareket eden dalgalar sönmelenene veya hesaplama bölgesinden çıkana dek

devam eder. Bu teknikte, alt ve üst sınırların düzgün modellenmesi, kaynağa göre başlangıç alan değerinin hesaplanması, dikey yöndeki adım boyutu gibi meseleler önemlidir ve bunların detayları [19]'da mevcuttur.

### 2.3. Kırınımlı Ekranlar Modeli

Walfish ve Bertoni tarafından geliştirilen bu teorik modelde şehir içindeki binalar, aynı yükseklikteki soğuran kırınımlı ekranlar dizisi şeklinde modellenir [6,7] (bknz. Şekil 4). Ekranların köşelerinden alıcı noktasına doğru kırınım hesaplanarak ortalama bir alan değeri hesaplanır. Bu model, polarizasyondan bağımsızdır ve yayılım kaybını kabaca aşağıdaki gibi hesaplar.



Şekil 4: Kırınımlı ekranlar modeli.

$$L_{ds} = -L_{fs} - L_1 - L_2 - 18 \log \left[ \frac{17h_{rx} + d^2}{17h_{rx}} \right] \quad (9)$$

Burada,  $h_{rx}$  metre cinsinden verici antenin yüksekliğini ve  $d$  ise antenle bina arasındaki mesafeyi ifade eder. Ayrıca,  $F$  serbest uzay yayılım kaybıdır ve aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$L_{fs} = 32.4479 + 20 \log(fd) \quad (10)$$

Burada,  $f$  MHz cinsinden frekansı temsil eder. Eşitlik (9)'daki  $L_1$  kaybı aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$L_1 = -10 \log \left[ \frac{G_{rx}(\theta)}{\pi k \sqrt{(h_b - h_{rx})^2 + a^2}} \left[ \frac{1}{\theta} - \frac{1}{2\pi + \theta} \right]^2 \right] \quad (11)$$

Burada,  $h_b$  bina yüksekliğini,  $h_{rx}$  alıcı yüksekliğini,  $a$  bina ile alıcı arasındaki mesafeyi,  $G_{rx}(\theta)$  alıcı antenin köşe yönündeki kazancını,  $k$  dalga numarasını ve  $\theta = \tan^{-1}((h_b - h_{rx})/a)$  ise köşeden alıcıya giden ışının yatayla yaptığı açığı ifade eder. Eşitlik (9)'daki  $L_2$  kaybı aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$L_2 = -10 \log[G_{rx} Q^2] \quad (12)$$

Burada,  $G_{rx}$  verici antenin köşe yönündeki kazancıdır (genelde 1 kabul edilir).  $Q$  ise aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$Q = \begin{cases} \frac{w}{\sqrt{2\pi k \sqrt{(h_b - h_{rx})^2 + w^2}} \left[ \frac{1}{\theta_1} - \frac{1}{2\pi + \theta_1} \right]}, & h_{rx} < h_b - 0.5\sqrt{\lambda w} \\ 2.35 \left[ \tan^{-1} \left( \frac{h_{rx}}{d \times 1000} \right) \sqrt{\frac{w}{\lambda}} \right]^{-0.9}, & h_{rx} > h_b + \sqrt{\lambda w} \end{cases} \quad (13)$$

Burada,  $w$  metre cinsinden binalar arasındaki mesafe,  $\lambda$  dalga boyu ve  $\theta_1 = \tan^{-1}((h_b - h_{rx})/w)$ 'dir.

### 3. Nümerik Simülasyonlar

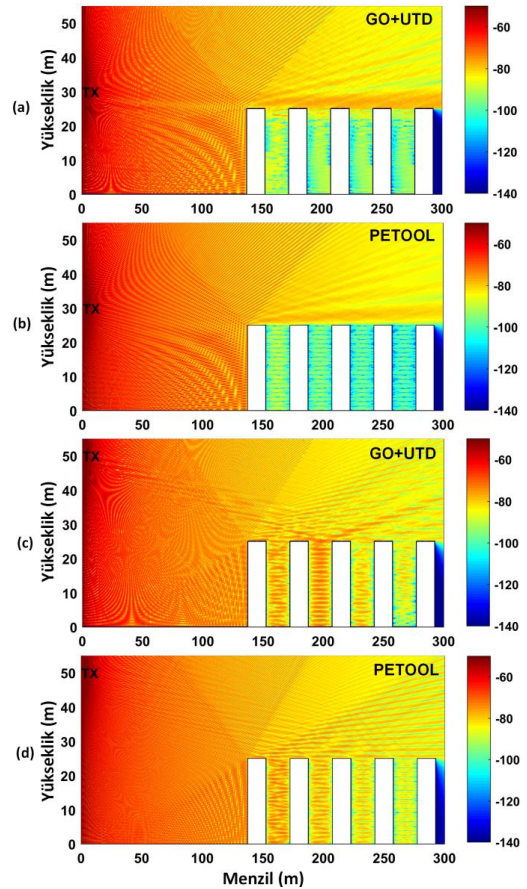
Bu bölümde yukarıda anlatılan üç yöntemle ait nümerik simülasyon sonuçları sunulacaktır. GO+UTD ve PETOOL modellerinde alan değerleri hesaplandıktan sonra yayılım faktörü (propagation factor) ve yol kaybı (path loss) hesaplanır. Yayılım faktörü, sözkonusu ortamda hesaplanan alan değerinin serbest uzaydaki değerine oranı şeklinde tanımlanır ve aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$PF = 20 \log u + 10 \log x + 10 \log \lambda \quad (\text{dB}) \quad (14)$$

Yol kaybı ise, verici antenden yayılan gücün alıcı noktasında hesaplanan güce oranı şeklinde tanımlanır ve aşağıdaki gibi hesaplanır. Burada,  $a_e$  dünyanın etkin yarıçapıdır.

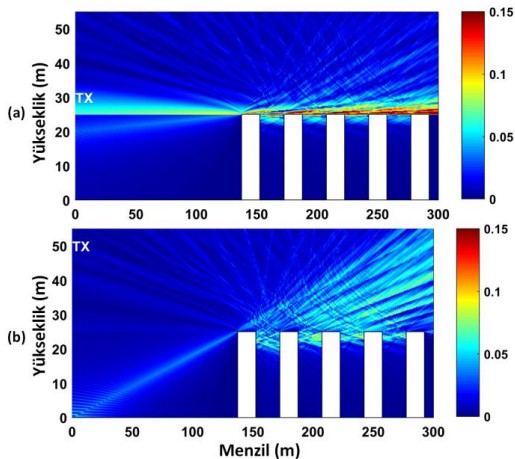
$$L = -20 \log u + 20 \log(4\pi) + 10 \log(a_e \sin(x/a_e)) - 30 \log \lambda \quad (\text{dB}) \quad (15)$$

Öncelikle, eş yüksekliğe sahip binalar ele alınmıştır. Binaların yüksekliği  $h_b = 25\text{m}$  ve aralarındaki mesafe  $w = 35\text{m}$ 'dir. Antenle ilk bina arasındaki mesafe  $145\text{m}$ 'dir. Şekil 5'de, 900 MHz'de GO+UTD ve PETOOL ile elde edilen yol kaybı haritaları iki farklı anten yüksekliği ( $h_{rx} = 30\text{m}$  ve  $h_{rx} = 50\text{m}$ ) için karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir. Polarizasyon yataydır ve omni anten kullanılmıştır. Menzil ve yükseklik adımları sırasıyla  $0.5\text{m}$  ve  $0.2\text{m}$  kabul edilmiştir. Şekil 6'da ise GO+UTD ile elde edilen kırınım alan haritaları sunulmuştur. Şekil 7'de ise yol kaybı haritaları  $1800\text{MHz}$ 'de  $30\text{m}$  anten yüksekliği için çizilmiştir. Şekil 5 ve 7'de görüleceği gibi,  $30\text{m}$  anten yüksekliğinde binalar arasındaki alan değerleri, daha

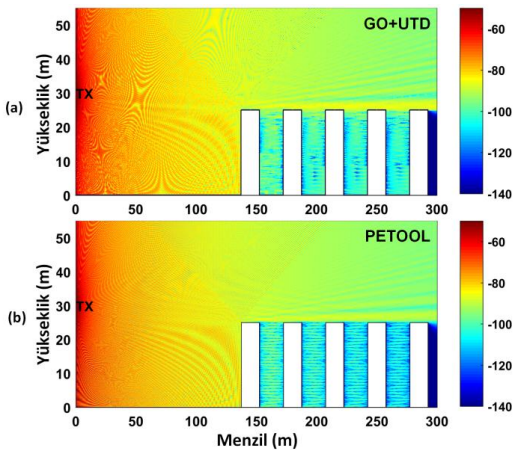


Şekil 5: 900 MHz'de yol kaybı haritaları. (a) GO+UTD,  $h_{rx} = 30\text{m}$ , (b) PETOOL,  $h_{rx} = 30\text{m}$ , (c) GO+UTD,  $h_{rx} = 50\text{m}$ , (d) PETOOL,  $h_{rx} = 50\text{m}$ .

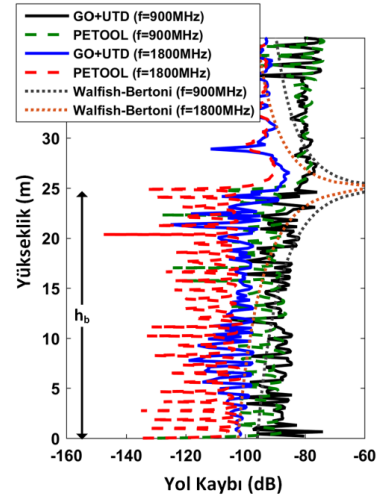
çok köşelerden kırınan dalgalardan ve az da olsa bina arasına girebilen yansıyan dalgalardan dolayıdır. Anten yükseldikçe binalar arasına girebilen dalgalar fazlaştığı için alan şiddeti artmakta ve çoklu yansıma etkilerinden dolayı girişim etkileri gözlenmektedir. Şekil 6(a)'daki kırınan alan haritasında, binaların köşeleri gölge sınırlarına denk geldiği için kırınan alanlarda düzensizlik görülebilmektedir. Şekil 5 ve 7 aynı anten yüksekliği için karşılaştırıldığında, frekans yükseldikçe binalar arasındaki yol kaybının arttığı gözlenmektedir. Yansıyan ve kırınan dalgaların şiddeti mesafeye daha hızlı azalmaktadır. Bu sonuçlardan GO+UTD ve PETOOL modellerinin beklenildiği gibi yakın sonuçlar verdiği gözlenmiştir. Şekil 8, 9 ve 10'da ise GO+UTD ve PETOOL modelleri Walfish ve Bertoni'nin kırınımli ekranlar modeliyle karşılaştırılmıştır. Şekil 8'de anten yüksekliği 30m kabul edilmiştir ve 165m'deki (yani soldan birinci ve ikinci bina arasında) dikey yol kaybı profili iki farklı frekans için çizilmiştir. Yukarıda belirtildiği gibi frekans arttıkça yol kaybı artma eğilimindedir. Kırınımli ekranlar modelinin kaba bir tahmin olduğu ve özellikle çoklu yansıma etkilerini hesaba katabildiği gözükmemektedir. Şekil 9'da ise 900 MHz'da iki farklı anten yüksekliği için sonuçlar gösterilmektedir. Anten yüksekliği arttıkça yol kaybı azalma eğilimindedir. Şekil 10'da ise antenle binalar arasındaki mesafe iki katına çıkarılmıştır. Frekans 1800 MHz ve anten yüksekliği 50m'dir. Mesafe arttıkça yol kaybı artma eğilimindedir.



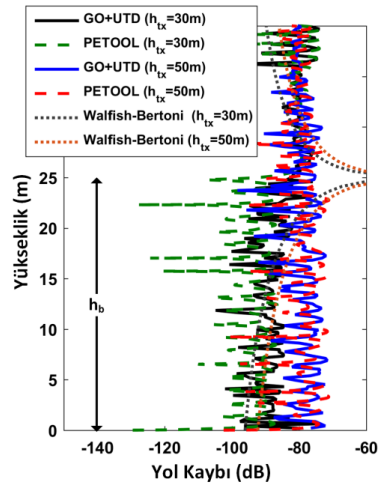
Şekil 6: GO+UTD ile hesaplanan 900 MHz'de kırınan alan haritaları. (a)  $h_{tx} = 30m$ , (b)  $h_{tx} = 50m$ .



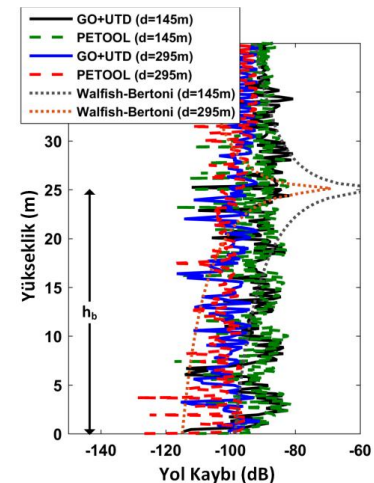
Şekil 7: 1800 MHz'de yol kaybı haritaları. (a) GO+UTD,  $h_{tx} = 30m$ , (b) PETOOL,  $h_{tx} = 30m$ .



Şekil 8: Soldan birinci ve ikinci bina arasında dikey yol kaybı grafikleri ( $h_{tx} = 30m$ ).

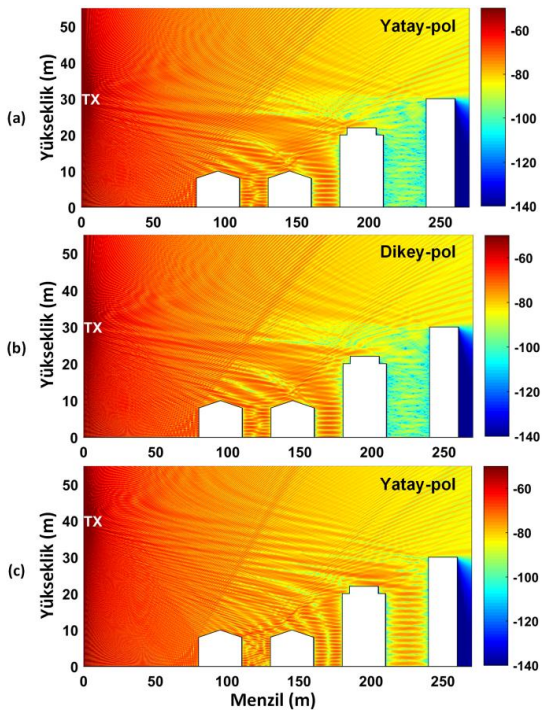


Şekil 9: Soldan birinci ve ikinci bina arasında dikey yol kaybı grafikleri ( $f = 900 MHz$ ).

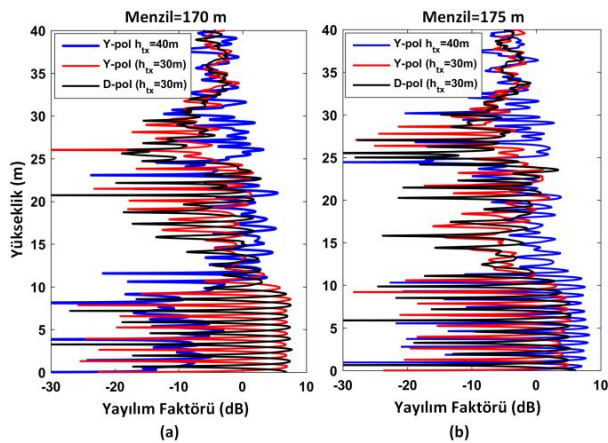


Şekil 10: Soldan birinci ve ikinci bina arasında dikey yol kaybı grafikleri ( $f = 1800 MHz$ ,  $h_{tx} = 50m$ ) ( $d$ : antenle ilk bina arasındaki mesafe).

Şekil 11, 12 ve 13'de ise farklı geometrilere sahip binalardan oluşan bir şehir içi senaryosu PETOOL ile simüle edilmiştir. Şekil 11'de farklı polarizasyon ve farklı anten yükseklikleri için yayılım faktörü haritaları gösterilmiştir. Şekil 12'de ise bu haritaların 170m ve 175m mesafesinde elde edilen dikey grafikler çizilmiştir. Yatay ve dikey polarizasyonda dünya üzerindeki sınır koşullarındaki farklılık nedeniyle, yüzeye yakın yerlerdeki alan değerlerinin minimum ve maksimum değerleri yer değiştirmektedir. Ayrıca, anten yüksekliğine bağlı olarak girişim etkileri farklılaşacağından, birbirine yakın iki yerdeki sinyal şiddetinde büyük farklar oluşabilmektedir. Örneğin, Şekil 12(b)'de anten yüksekliği 40m'ye yükseltilince sinyal şiddeti artmasına rağmen Şekil 12(a)'da azalmaktadır. Girişim etkileri-

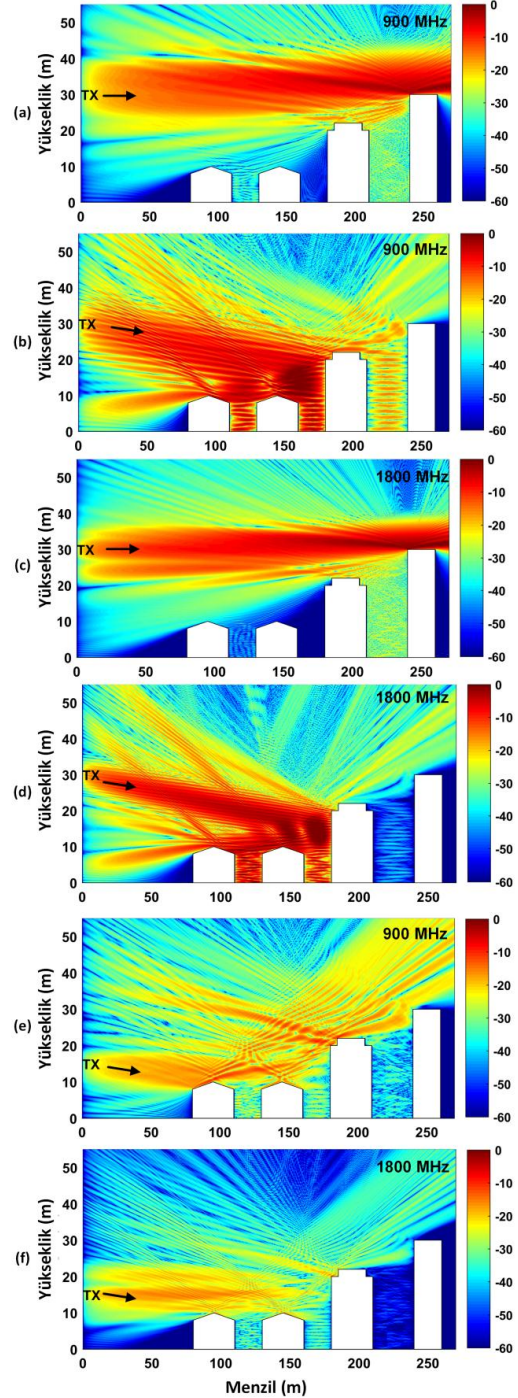


Şekil 11: PETOOL ile hesaplanan 900 MHz'de yayın yapan omni anten için yayılım faktörü haritaları. (a) Yatay polarizasyon,  $h_{tx} = 30m$ , (b) dikey polarizasyon,  $h_{tx} = 30m$ , (c) yatay polarizasyon,  $h_{tx} = 40m$ .

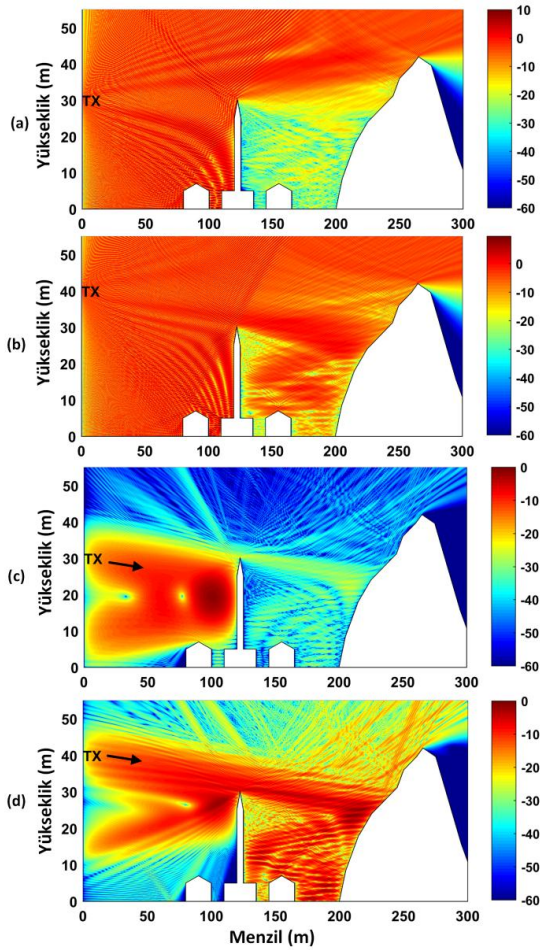


Şekil 12: Şekil 11'deki ikinci ve üçüncü bina arasında dikey yayılım faktörü grafikleri. (a) 170m menzil, (b) 175m menzil.

nin oluşturduğu bu durum Şekil 11(c)'de ikinci ve üçüncü bina arasındaki alan değerlerinden gözükmektedir. Şekil 13'de ise Gauss tipi bir antene ait yayılım faktörü farklı anten yükseklikleri ve frekanslar için gösterilmiştir. Son olarak, Şekil 14'de dağın yamacında yerleşmiş kırsal bir bölgedeki dalga yayılımı PETOOL ile simüle edilmiştir.



Şekil 13: PETOOL ile hesaplanan yatay polarizasyonda Gauss anten için yayılım faktörü haritaları. (a) 900 MHz,  $\theta_e = 0^\circ$ ,  $h_{tx} = 30m$ , (b) 900 MHz,  $\theta_e = -5^\circ$ ,  $h_{tx} = 30m$ , (c) 1800 MHz,  $\theta_e = 0^\circ$ ,  $h_{tx} = 30m$ , (d) 1800 MHz,  $\theta_e = -5^\circ$ ,  $h_{tx} = 30m$ , (e) 900 MHz,  $\theta_e = -5^\circ$ ,  $h_{tx} = 15m$ , (f) 1800 MHz,  $\theta_e = -5^\circ$ ,  $h_{tx} = 15m$ . ( $\theta_e$ : anten yükselti açısı)



Şekil 14: Kırsal bölgede PETOOL ile hesaplanan yatay polarizasyonda Gauss anten için yayılım faktörü haritaları. (a) Omni anten,  $h_{tx} = 30m$ , (b) omni anten,  $h_{tx} = 40m$ , (c) Gauss anten,  $h_{tx} = 30m$ , (d) Gauss anten,  $h_{tx} = 40m$ .

#### 4. Sonuçlar

Bu çalışmada, şehir içindeki binalar arasındaki dalga yayılımını modellemek amacıyla GO+UTD, PETOOL ve kırınımli ekranlar modelleri karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Sunulan tüm örnekler, bir haberleşme sisteminde anten yüksekliğinin ve tipinin, frekansın, arazi üzerindeki binaların veya engellerin şeklinin ve konumunun oldukça önemli olduğunu göstermektedir. Yol kaybının beklenildiği gibi frekansla ve mesafeyle arttığı gözlenmiştir. Anten yüksekliğine bağlı olarak binalar arasında girişim etkilerinin sinyal seviyesini etkileyebileceği gösterilmiştir. GO+UTD ve PETOOL modellerinin yakın sonuçlar verdiği, ancak kırınımli ekranlar modelinin kaba bir tahmin sağladığı sonucuna varılmıştır. PETOOL daha hızlı bir çözüm sağlaması nedeniyle bir avantaja sahipken, GO+UTD modeli ise kırınım ve yansıyan alanları tek başına gözleme şansını sağlaması nedeniyle avantajlıdır.

#### 5. Kaynaklar

- [1] Okumura, Y., Ohmori, E., Kawano, T., ve Fukua, K., "Field strength and its variability in UHF and VHF land-mobile radio service," *Rev. Elec. Commun. Lab.*, cilt. 16, no. 9, 1968.
- [2] Hata, M., "Empirical formula for propagation loss in land mobile radio services," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, cilt. VT-29, no. 3, s. 317–325, 1980.
- [3] Longley, A.G., ve Rice, P.L., "Prediction of tropospheric radio transmission loss over irregular terrain—A computer method," *ESSA Technical Report ERL*, 79-IOTS 67, 1968.
- [4] Bullington, K., "Radio propagation for vehicular communications," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, cilt. VT-26, no. 4, s. 295–308, 1977.
- [5] Lee, W.C.Y., *Mobile Communications Engineering*, McGraw-Hill, New York, 1982.
- [6] Walfisch, J., ve Berton, H.L., "A theoretical model of UHF propagation in urban environments," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, cilt. 36, s. 1788–1796, 1988.
- [7] Siwiak, K., *Radiowave Propagation and Antennas for Personal Communications*, Artech House, 2007.
- [8] Kline, M., ve Kay, I., *Electromagnetic Theory and Geometrical Optics*, Wiley, Newyork, 1965.
- [9] Keller, J.B., "Geometrical theory of diffraction," *J. Opt. Soc. Amer.*, cilt. 52, s. 116-30, 1962.
- [10] Kouyoumjian, R.G., ve Pathak, P.H., "A uniform geometrical theory of diffraction for an edge in a perfectly conducting surface," *Proc. IEEE*, cilt. 62, s. 1448-1461, 1974.
- [11] Bhattacharyya, A.K., *High Frequency Electromagnetic Techniques Recent Advances and Applications*, Wiley, 1995.
- [12] Ufimtsev, P.Ya., *Theory of Edge Diffraction in Electromagnetics*, Tech Science Press, 2003.
- [13] Ozgun, O., "New software tool GO+UTD for visualization of wave propagation," *IEEE Antennas Propag. Mag.*, cilt. 58, s. 91–103, 2016.
- [14] Ozgun, O., ve Sevgi, L., "Numerical techniques in modeling electromagnetic scattering from single and double knife-edge in 2D ground wave propagation problems," *ACES, Appl Comput Electrom*, cilt. 27, no. 5, s. 376-388, 2012.
- [15] Hacivelioglu, F., Uslu, M.A., ve Sevgi, L., "A MATLAB-based virtual tool for the electromagnetic wave scattering from a perfectly reflecting wedge," *IEEE Antennas Propag Mag*, cilt. 53, s. 234-243, 2011.
- [16] Apaydin, G., ve Sevgi, L., "Penetrable wedge scattering problem and a MATLAB-based fringe wave calculator," *IEEE Antennas Propag. Mag.*, cilt. 58, s. 86-93, 2016.
- [17] Levy, M.F., *Parabolic equation methods for electromagnetic wave propagation*, IEEE Electromagnetic Wave Series, London, 2000.
- [18] Ozgun, O., "Recursive two-way parabolic equation approach for modeling terrain effects in tropospheric propagation," *IEEE T Antenn. Propag.*, cilt. 57, no. 9, s. 2706-2714, 2009.
- [19] Ozgun, O., Apaydin, G., Kuzuoglu, M., ve Sevgi, L., "PETOOL: MATLAB-based one-way and two-way split-step parabolic equation tool for radiowave propagation over variable terrain," *Comput Phys Commun*, cilt. 182, no. 12, s. 2638–2654, 2011.



### Özlem Özgün

1998 yılında Bilkent Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü'nden lisans, 2000 yılında yine aynı Üniversite'den yüksek lisans, 2007 yılında ise Orta Doğu Teknik Üniversitesi (ODTÜ) Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü'nden doktora derecelerini aldı. 1998-2000 yılları arasında Bilkent Üniversitesi'nde araştırma görevlisi, 2000-2004 yılları arasında TÜBİTAK-UEKAE'de araştırmacı, 2004-2005 yılları arasında ise ASELSAN'da uzman sistem mühendisi olarak çalıştı. 2007-2008 yılları arasında Pennsylvania State University, Electromagnetic Communication Lab'da TÜBİTAK desteğiyle doktora sonrası araştırmacı olarak bulundu. 2008-2012 yılları arasında ODTÜ Kuzey Kıbrıs Kampüsü'nde yardımcı doçent, 2012-2015 yılları arasında TED Üniversitesi'nde doçent olarak çalıştıktan sonra, 2015 yılında Hacettepe Üniversitesi'ne doçent olarak katıldı. Dr. Özgün'ün araştırma alanları "sayısal hesaplamalı elektromanyetik, sonlu elemanlar yöntemi, bölge ayrışım tekniği, dönüşümlü elektromanyetik/optik, stokastik elektromanyetik problemler ve optimizasyon teknikleri"dir. Dr. Özgün'ün uluslararası ve ulusal kitap, dergi ve konferanslarda yayımlanmış 100 kadar eseri vardır. Dr. Özgün, 2007'de ODTÜ doktora tez ödülünü, 2009 yılında Leopold Felsen Vakfı elektromanyetikte üstün başarı ödülünü, 2014 yılında ise EMO Bilimsel Dergisi en iyi makale ödülünü almıştır.