

ÇOKLU KIRINIMLAR İÇEREN SENARYOLAR İÇİN ELEKTROMANYETİK DALGA YAYILIM MODELLERİ

*Mehmet Barış TABAKCIOĞLU **
*Ahmet CANSIZ ***

Özet: Dijital yayın sistemlerinde daha güvenilir yayın yapmak için kapsama alanı ve alıcı üzerindeki alan şiddetinin kestiriminde yayılım modelleri kullanılmaktadır. Yayılım modelleri temelde nümerik ve ışın izleme tekniğine dayanan modeller olmak üzere iki ana grupta incelenebilir. Elektromanyetik dalga yayılım modellerinde hesaplama zamanı ve kestirilen alan şiddetinin kesinliği arasında bir ödünleşme vardır. Nümerik modeller kesin sonuçlar vermesine karşın, hesaplama zamanı yüksektir, ışın izleme tekniğine dayanan modeller ise kesinliği az olmakla beraber hesaplama zamanı düşüktür. Hesaplama zamanı ve kesinlik açısından optimum olan modellere ihtiyaç duyulmuştur. Bunun için birçok model geliştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Elektromanyetik Dalga Yayılımı, Eğim Kırınımı, Düzgün Kırınım Teorisi, Çoklu Kırınım.

Electromagnetic Wave Propagation Models for Multiple-Diffraction Scenarios

Abstract: Electromagnetic wave propagation models have been used for coverage estimation and field prediction at the receiver to make more reliable and efficient digital broadcasting systems. Propagation models can be classified into two groups as numerical and ray tracing based models. There is a tradeoff between computation time and accuracy of field prediction among electromagnetic wave propagation models. Although numerical models predict accurately, it requires more computation times. Ray tracing based models predicts the field strength less accurately with lower computation time. Many propagation models have been developed to provide optimum solution for accuracy and computation time.

Keywords: Electromagnetic Wave Propagation, Slope Diffraction, Uniform Theory of Diffraction, Multiple-diffraction.

1. GİRİŞ

Geometrik optik (GO), yansıma, kırılma ve aydınlanma gibi olayları inceleyen ve elektromanyetik dalgaların doğrusal yayılmasını temel kabul eden optik dalıdır. Bu dalda ışık bir kaynaktan yayılan tanecikler gibi düşünülmektedir. Fiziksel optik (FO) ise girişim, kırınım ve kutuplanma olaylarını inceleyen ve ışığın dalga yapısında olduğunu temel kabul eden optik dalıdır. Girişim, kırınım ve kutuplanma olayları geometrik optik modeliyle açıklanamamaktadır. Elektromanyetik dalganın kırınımı, bu dalgaların karşılaştığı bazı engelleri dolanarak geçmesi veya doğrusal yolundan sapması anlamına gelir ve dalgaların küçük aralıklardan, engellerden veya keskin kenarlı yerlerden geçişi ile oluşur. Kırınım olayının gerçekleşmesi için

* Bayburt Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 69000 Bayburt.

** İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektrik Elektronik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü, Maslak 34469 İstanbul.

İletişim Yazarı: M.B. Tabakcioğlu (mbtabakcioglu@bayburt.edu.tr)

elektromanyetik dalganın geçeceği aralığın boyutunun bu dalganın dalga boyuna yakın veya ondan küçük olması gerekir. Kırınım olayı ışığın dalga karakterinin bir durumudur. Elektromanyetik dalga engel etrafından dolanır ve gölge bölgesine girer. Bunun sonucunda keskin bir gölge oluşmamaktadır. Elektromanyetik dalga yayılımında engelin boyutu, elektromanyetik dalganın dalga boyundan çok büyük olduğu durumlarda yüksek frekans asimptotik teknikler kullanılmaktadır (Balanis 1989). Elektromanyetik dalga yayılımı yüzyılı aşkın bir süredir araştırılmakta ve dalga yayılımını modellemek ve alan kestirimi yapmak için analitik ve nümerik olmak üzere birçok model geliştirilmiştir.

2. YAYILIM MODELLERİ

Fiziksel optik modeli Macdonald (1912)'de önerilmiş ve bugüne kadar kırınım teorilerinde kullanılmıştır. Bu model özellikle büyük metalik yüzeylerden saçılan elektromanyetik dalgaların analizinde kullanılır. Fiziksel optik modeli, fiziksel kırınım teorisi (FKT) modelinin temelini oluşturmuştur. Fiziksel optik modeli, geometrik optik modelinin sınırlarından uzak yerlerde bütün yansıyan ışınları ve bu sınırlara yakın kırınan ışınları tarif eder. Fiziksel optik modeli kendi başına tutarlı değildir. Gözlem noktası saçılma yüzeyine yaklaşırsa fiziksel optik integralleri yüzey alanları için hesaplama yapmaz (Ufimtsev 2007). Bazı durumlarda akustik aydınlık bölgelerde yayılır. Bu durumda alanı hesaplamak için daha genel integral formülleri gerektirir. İntegral formüllerinin en çok bilinen ve sık kullanılanı fiziksel optik modelidir (Graeme 1976). Fiziksel optik modeli, optik sistemdeki bütün kırınım etkilerini doğruca tarif etmektedir (Borovikov and Kinber 1994).

Geometrik kırınım teorisi (GKT) modeli Keller (1962)'de ileri srlmştir. Bu model mükemmel elektriksel iletkenlik gösteren i açılı kama için alan hesaplamalarında kullanılmaktadır. GKT modeli, optik sınırlar civarında geçiş bölgesinde hatalı sonuçlar vermektedir (Schneider and Luebbers 1989). Kaynak, kama ve alan hesabı yapılacak nokta aynı izđi üzerindeyse GKT modeli hatalı sonuçlar vermektedir (Luebbers 1984). GKT modeli yüksek frekans kırınım kestiriminde en önde gelen analitik tekniklerden biridir. Geometrik optik modeline kırınan alanların eklenmesiyle oluşan bir uzantısıdır (Balanis *et al.* 2013). Bu model kesin sonuçları engeller dalga boyundan daha kk olduğu durumlarda bulabilmektedir (Graeme 1976). GKT modelinin ileri sürülmesiyle geometrik optik modeliyle açıklanamayan kırınım olayı artık açıklanabiliyordu. Dar geçiş bölgelerinde kırınım olduğundan dolayı geometrik optik modeli alışmıyor fakat bu bölgelerden uzak bölgelerde geometrik optik modeli çalışır. GKT modeli sadece geçiş bölgelerinde değil her yerde geçerlidir. Geometrik optik modeli, yansıyan ve kırılan ışınları incelemektedir. GKT modeliyle kırınan alanlar geometrik optik modeline ekledi ve gölge bölgesindeki süreksizlik bir derece ortadan kaldırılmış oldu (Borovikov and Kinber 2007).

Fiziksel kırınım teorisi (FKT) modeli 1962'de Ufimtsev tarafından geliştirilmiştir (Ufimtsev 2007). FKT modeli, fiziksel optik modelinin bir uzantısıdır. Ufimtsev FKT modelini bıçak kenarlı kama yapılarına uygulamaktadır. FKT modelinin önemli zorluğu bütün integral yöntemlerindeki gibi sonuç integralinin hesaplanmasıdır. Bu zorluğuna karşın yine de GKT modelinin kullanılamayacağı yerlerde kullanılmaktadır (Graeme 1976). FKT modeli anten ve saçılma problemleri için kullanılan yüksek frekans asimptotik bir tekniktir. FKT modelinin temel fikri kırınan alanların, engelin yüzeyinde indüklenen akımlar tarafından indüklenen ışınım olduğudur. FKT modeli, fiziksel optik modeline düzgün olmayan kaynaklar tarafından üretilen ekstra alanlar eklenmesiyle oluşmuştur (Ufimtsev 2007). Ufimtsev tarafından geliştirilen ve fiziksel optik modelinin genişletilmiş hali olan bu model fiziksel optik modelinde yüzey kenarlarındaki kırınımındaki kusurları ortadan kaldırmıştır (Balanis 1989).

Deygout (1966)'da çoklu bıçak kenarlı kama yapılar için bir yayılım modeli geliştirmiştir. Bu modele göre senaryodaki bütün bıçak kenarlı kamalar için tek başına olduğu farz edilip bu bıçak kenarlı kama aktif edilerek diğerleri senaryodan çıkartılır. Senaryodaki bıçak kenarlı kamalar için kırınım kaybı hesaplanır. En çok kırınım kaybı olan bıçak kenarlı kama temel kama

olarak seçilir. Bu temel kama ile senaryo iki kısma ayrılır. Bu temel kama birinci kısım için alıcı, ikinci kısım için ise verici konumundadır. Daha sonra bu iki kısımda en büyük kırınım kaybını veren kamalar tespit edilir. Bu kamalar ile bu iki kısım tekrar ikiye bölünür. Bütün kamalar kullanılıncaya kadar bu işlem devam eder. Bu model çok fazla sayıda tekli kırınım içerir. Kırınım sayısı kullanılan senaryoya göre değişir. Bu model, kırınım kaybını olduğundan daha fazla hesaplamaktadır. Bıçak kenarlı kamalar birbirine yakın ise bu model hatalı sonuçlar vermektedir (Tzaras and Saunders 2000).

Harrington (1966)'da ileri sürülen moment metodu (MM) küçük boyutlardaki engellerle ilgili alan problemlerinin analizinde kullanılmaktadır.

Causebrook (1971)'de geliştirilen model Deygout modelinin yeniden düzenlenmiş halidir. Çünkü iki model de kırınım kaybını hesaplamak için aynı işlem sürecini takip etmektedir. Deygout modelinden farkı fazla hesaplanan yol kaybını telafi etmek için farklı doğrulama formüllerinin kullanılmasıdır.

Kouyoumjian and Pathak (1974)'te ileri sürülen düzgün geometrik kırınım teorisi (DGKT) yalnız bir iç açılı empedans kama içeren senaryolar için doğru sonuçlar vermektedir (Schneider and Luebbers 1989). Daha sonra DGKT modeli çoklu kırınımlar içeren senaryolarda alıcı üzerinde elektrik alan şiddeti kestirimi yapmada kullanılmıştır. Bu senaryolarda optik sınırlardan uzak yerlerde DGKT modeli doğru sonuçlar vermiştir. Başka bir deyişle, senaryo tek iç açılı empedans kama veya tek bıçak kenarlı kama içeriyorsa veya birden fazla kama olduğu durumda bu kamalar birbirinin geçiş bölgesini kesmediği sürece DGKT modeli doğru sonuçlar vermektedir. DGKT modelinin çoklu kırınım içeren senaryolardaki hatasını ortadan kaldırmak için birçok yaklaşımlar ileri sürülmüştür. Bu modelde gölge ve yansıma sınırlarında geçerli olan iç açılı kama için kırınım katsayısı formülü ileri sürülmüştür. DGKT modeli, geometrik optik modelinin genişletilmiş halidir ve bundan dolayıdır ki; kamanın yüzeyinden yansıyan ışınlar da hesaba katılmalıdır (Luebbers 1984). Enerji kaynaktan alan hesabı yapılacak olan noktaya çeşitli yollardan gelebilir. Bu yollar doğrudan, yansıyan ve kırınan olabildiği gibi bunların birleşimi de olabilir. DGKT modeli her yerde kullanılabilir fakat bazı durumlarda alan hesaplamalarında hatalı sonuçlar vermektedir. Bu hataları ortadan kaldırmak için eğim kırınımı (EK) modeli sürülmüştür (Wang 2005).

Mitra (1976)'da ileri sürülen spektral kırınım teorisi'ne (SKT) göre engelin yüzeyindeki akım ile saçılan alanlar arasındaki ilişki vardır. Yarı düzlem problemlerde saçılan alanlar indüklenmiş yüzey akım dağıtımının fourier dönüşümünü biçiminde ifade edilebilir (Graeme 1976).

Kouyoumian and Tiberio (1982)'de çoklu kırınımlar içeren senaryolarda alıcı üzerindeki elektrik alan şiddetini daha kesin bir biçimde kestirebilmek için 2. dereceden kırınımlar eklenerek GKT modeli geliştirilmiştir. Bu çalışmanın eksik tarafı her türlü kırınım senaryosuna uygulanamayışıdır. Bu modelin kullanılabilmesi için kama ve gözlem noktasının aynı düzlemde olması gerekmektedir (Schneider and Luebbers 1989).

Vogler (1982)'de çoklu kırınımlar içeren senaryolarda elektrik alan şiddeti kestirimi yapmak için nümerik bir model ileri sürülmüştür. Bu ileri sürülen model hata fonksiyonunun tekrarlı integralinin kullanılmasını gerektirmektedir. Vogler'in ileri sürmüş olduğu bu nümerik model en fazla 10 bıçak kenarlı kama içeren senaryolar için kullanılabilir. Vogler modeline göre yol N tane engel içeriyor ve alıcı ve verici antenler bu engellerden çok uzaktadır. Bu model nümerik hesaplamalara dayanmaktadır. Kırınan alanları tam kestirebilmek için hata fonksiyonunun integralini doğru hesaplamak gerekir. Bu model diğer modeller için referans niteliği taşımaktadır. Modelin senaryolara uygulanmasının zorluğu ve hesaplama süresinin fazlalığı nedeniyle kullanılmamaktadır. Vogler modelinin kullanımı bina sayısı 5 den fazla olursa zorlaşmaktadır (Lee *et al.* 2002).

Clarkowski (1984)'te spektral kırınım teorisini iç açılı empedans kama yapı için düzlem dalga kırınımına uygulanmıştır (Graeme 1976).

Luebbbers (1984)'te DGKT modeli iç açılı kama içeren senaryoya uygulanmıştır. Elektrik alan şiddeti kestiriminde bıçak kenarlı kama ile iç açılı kamanın kırınan alana etkilerini ortaya koymuştur. DGKT modeli iç açılı kama kırınımını fresnel integrallerine dayanmaktadır. Bıçak kenarlı kamadan farklı olarak iç açılı kama yapılarında kamanın yüzeylerinden yansıyan alanlar da alıcı üzerindeki elektrik alan şiddetine eklenmektedir. Kırınım katsayıları içine geçiş fonksiyonu eklenerek düzgün kırınım teorisi (DKT) ileri sürülmüştür. İç açılı kama yapısı, bıçak kenarlı kama yapıya göre daha karmaşıktır. Bıçak kenarlı kama yaklaşımı gerçek ölçümlere göre hatalı sonuçlar vermektedir. Bunun sebebi, kutuplanma, iletkenlik, bağıl elektrik geçirgenliği ve engelin yapısı gibi parametreler bıçak kenarlı kama modelinde hesaba katılmamaktadır.

Giovanelli (1984)'te ileri sürülen model, Deygout modelini takip etmektedir. Bu model de alıcı üzerindeki alanı hesaplamak için birçok tekli kırınım integrali içermektedir.

Walfish and Bertoni (1988)'de yüksek frekans radyo yayılımı için nümerik bir model geliştirilmiştir. Bu modele göre yayılım için çevrenin fiziksel özelliklerinin de hesaba katılması gerekmektedir. Bu kapsamda binaların yüksekliği, binalar arası mesafe ve anten yüksekliği önemlidir. Bu modelde anten yüksekliği ortalama bina yüksekliğinin üzerinde kabul edilmektedir.

Deygout (1991)'de kendi ileri sürmüş olduğu modeli tekrar revize etmiştir. Deygout, kendi modeline doğrulama terimleri ekleyerek kırınım kaybı hesabındaki hatayı bir derece azaltmıştır. Bu modelin dezavantajı, iç açılı kamalar içeren senaryoya uygulanamamasıdır (Tzaras and Saunders 2000).

Andersen (1994)'te, DKT modeline, gelen alanların türevsel bileşenleri ekleyerek EK modeli ileri sürülmüştür. Bu modele göre, çoklu bina ve tepeler üzerinden UHF radyo dalgası yayılımında engeller sıkça gölge sınırına yakın geçiş bölgesinde bulunur. Bu bölgede ışın modelleri alan büyüklüğünü hesaplamada başarısız olur. DKT modeline türevsel bileşenlerin eklenmesiyle gerçek değere yakın sonuçlar alınmakta ve böylece DKT modelinin geçiş bölgesindeki hatası telafi edilmiş olmaktadır. Bu model bıçak kenarlı kama yapılar içeren senaryolara uygulanmış ve doğruluğu literatürdeki çözümlerle karşılaştırılarak ispatlanmıştır.

Holm (1996)'da bıçak kenarlı kama için çoklu integralin asimptotik açılımını denkleştirmiştir. Bu açılım alanı tek bir bıçak kenarlı kama türünde ifade eder. Bu ifade dikkate alınarak benzer bir açılım daha yüksek mertebeden kırınmış alanlar için yapılmıştır. Geçiş fonksiyonları aracılığıyla, gelen alanın ışın optik alan olmadığı durumda DKT modelinden kaynaklanan bazı kusurlar ortadan kaldırılmıştır.

Andersen (1997)'de eğim kırınımı modeli, gölge sınırına yakın geçiş bölgelerindeki soğuran çoklu ekranlara uygulandı. Teori geçiş bölgesindeki birinci derece etki olan eğim kırınımının uygulanmasını içermektedir. Eğim ve genlik kırınımı için uzaklık parametreleri her bir noktada genlik ve eğim sürekliliği sağlanarak belirlendi. Sonuç literatürdeki bilinen yöntemlerle karşılaştırıldı ve iki ekranın birbirine çok yakın olması durumu haricindeki senaryolarla kesinlik açısından neredeyse aynı sonuçları çok daha kısa sürede verdi.

Rizk *et al.* (1998)'de eğim kırınımı modelinin bıçak kenarlı kama ve empedans kamalardan oluşan ve geliş güzel belirlenmiş bir yapıya uygulanmasının algoritması tarif edilmektedir. Bunun literatürdeki yayınlarla doğrulaması yapılmıştır. Buna ek olarak literatürde hiç olmayan empedans kamaya eğim kırınımı modeli de uygulanmıştır. Yine bunlara ek olarak kentsel bölgelerde kestirim yapılarak, EK modelinin kesinlik bakımından DKT modeline katkıları ortaya koyulmuştur. Elektrik alan şiddetinin kestirimindeki kesinlikteki kazanç, doğrudan geçiş bölgesi genişliği ile alakalıdır. Geçiş bölgesi genişliği (GBG) üç parametreyle alakalıdır. Bunlar frekans, iki ekran arasındaki mesafe ve bina yükseklikleri arasındaki farktan oluşmaktadır. Bu üç parametrenin alıcı üzerindeki alan şiddetini ayrı ayrı incelenmek yerine, Geçiş bölgesi genişliği parametresi tek başına incelenmiştir.

Holm (2000)'de mükemmel iletken olmayan iç açılı kama için, DKT modelinde kullanılmak için yeni bir buluşsal kırınım katsayısı ileri sürülmüştür. Bu katsayı Luebbbers tarafından ortaya konulan buluşsal katsayının genişletilmiş durumudur ve hesaplaması olabildiğince basittir. İleri saçılma durumunda ve yüzey dalga etkilerini ihmal ederek, yeni katsayı

Maliuzhinet (1958)'dekine yakın sonuç vermektedir. Ayrıca, bu kırınım katsayısı önceki metotlarda başarısız olunan gölge bölgelerinin derinliklerinde başarılı sonuçlar vermiştir.

Tzaras (2001)'de DKT modelini temel alan, yeni bir buluşsal çoklu kırınım modeli ileri sürülmüştür. Bu model ikinci mertebeden bir kırınım işlemi olarak tanımlanabilen eğim kırınım terimlerini de içine alır. Eğim kırınım terimleri birden fazla bıçak kenarlı kama olduğu durumlarda kesin kestirimler yapabilmek için çok önem taşımaktadır. Bu modelle yapılan alıcı üzerindeki alan kestirimleri Vogler (1982) modeliyle karşılaştırılmış ve çok farklı senaryolarda düşük işlem karmaşıklığıyla çok iyi sonuçlar alındı. Üstelik model iç açılı empedans kama modeline uyarlanmıştır.

Bertoni and Chung (2002)'de yeni bir nümerik model olan fiziksel optik modeli geliştirilmiştir. Bu model Walfish (1988) modelinin genelleştirilmiş halidir. Kirchhoff-Huygen integrallerinin çözümlerine dayanır. Çeşitli frekanslar için verici antenin yüksekliğinin ortalama yüksekliğin altında, seviyesinde ve yukarısındaki durumları için incelemelerde bulunulmuştur. Verici anten yüksekliği bina çatılarının yüksekliklerine yakın ise alıcıya ulaşan alanın şiddeti alıcı ve verici arasındaki çatıların sayısına göre azalmaktadır (Chung 2000).

Bertoni and Chung (2003)'te kendilerinin ileri sürmüş oldukları fiziksel optik modeli geliştirmişlerdir. Kırınım etkisi olmayan binaların senaryodan çıkarılması ilkesine dayanmaktadır. Kaynak ile alıcı arasındaki herhangi bir yüzeye alan ulaşırsa bu yüzey ikinci bir kaynak vazifesi yapar. Etkin olmayan binaların belirlenmesinde Fresnel bölgesi kavramı kullanılmıştır. Fresnel bölgesi alıcı ve verici arasında bu iki nokta odak noktaları olacak şekilde elipsoit bölgedir. Elipsoit bölge dışındaki cisimlerden alanlar yansır veya kırınır fakat bunun toplam alana etkisi yok denecek kadar azdır. Öte yandan Fresnel bölgesi içindeki binalar ise toplam alanı çok fazla etkiler (Bertoni 2000). Dışbükey Zarf tekniği kullanılarak, etkin olmayan binalar belirlendi ve senaryodan çıkarıldı. Etkin olmayan binaların senaryodan çıkarılmasıyla hesaplama zamanı düşürüldü. Etkin olmayan binalar çıkarıldığı için kesinlikten ödün verilmemiştir.

Holm (2004)'te çoklu bıçak kenarlı kama kırınımı içeren modeli geliştirmiştir. Sonucun kesinliğini artırmak için yüksek mertebeden kırınan alanlar seriler kullanılarak eklenmiştir. Kesin çözüm bulmak için fazla terim kullanmak gerekmektedir. Sonuç iç açılı kama modeli için de kullanılabilir. Seri açılımını toplamak çok fazla zaman almaktadır. Bunun için bu modelde zaman açısından daha verimli toplama işlemi yapılmıştır.

Umul (2004)'te mükemmel ileten cisimlerden saçılan alanları hesaplamak için PO modeli yeniden düzenlendi.

Leandro *et al.* (2005)'te DKT için yeni bir yöntem geliştirmiştir. Binalar dikdörtgen şeklinde düşünülmekte ve verici anten binalarla aynı boyda veya daha yüksek boyda olmalıdır. Aynı boyda olunca tekli kırınım olup hesaplama zamanı düşmektedir.

Koutitas and Tzaras (2006)'da çoklu kırınım art arda gelen farklı yapılara uygulanmıştır. Art arda gelen bu yapılar iç açılı kama, bıçak kenarlı kama ve silindirik yapılar olabilmektedir. Çevredeki binalar veya dağlar ve tepelerin şekilleri kendine en uygun bir yapıya göre modellenebilmektedir.

Karousos and Tzaras (2008)'de çoklu kırınımın çözümü zaman alanında incelenmiştir. Kırınım formülleri zaman alanında çıkarılmıştır. Daha sonra kırınım algoritması bıçak kenarlı kama ve iç açılı kamaya uyarlanmıştır.

Tajvidy and Ghorbani (2008)'de yeni bir geometrik kırınım teorisi geliştirilmiştir. Bu model çoklu kırınım senaryosuna uygulandı. Modelin dezavantajı ise birbirine eşit yükseklikli paralel binalar olması durumunda kullanılmaktadır.

Leandro *et al.* (2008)'de DKT için yeni bir yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntemde binalar silindir şeklinde düşünülmekte ve verici anten binalarla aynı boyda veya daha yüksek boyda olmalıdır.

Tabakcioglu and Kara (2009a)'da bıçak kenarlı kama yapılar için Dışbükey Zarf (DZ) tekniğine dayalı Eğim Kırınımı (EKDZ) modeli geliştirilmiştir. Bu model aslında Dışbükey Zarf

ve Eğim Kırınımı modellerinin birleştirildiği bir modeldir. Dışbükey Zarf tekniği kullanılarak alıcı üzerindeki toplam alana etkisi olan bıçak kenarlı kamaları tespit edilmektedir. Daha sonra Eğim Kırınımı modeli ile de etkin bıçak kenarlı kamalar üzerinden alan kestirimi yapılmaktadır. Etkin olmayan bıçak kenarlı kamalar geometriden çıkarıldığı için hesaplama süresi düşmektedir. Ortalama bir bıçak kenarlı kama elenmesi durumunda yaklaşık 5 kat hesaplama süresi düşmektedir. Aynı zamanda etkin olmayan bıçak kenarlı kama geometriden çıkarıldığı için alan hesabı kestirimindeki kesinlikten de ödün verilmemektedir.

Leandro *et al.* (2009)'da DKT için art arda gelen farklı yapılar için yeni bir yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntemde binalar silindir, iç açılı kama ve bıçak kenarlı kama olarak düşünülmekte ve verici anten binalarla aynı boyda veya daha yüksek boyda olmalıdır.

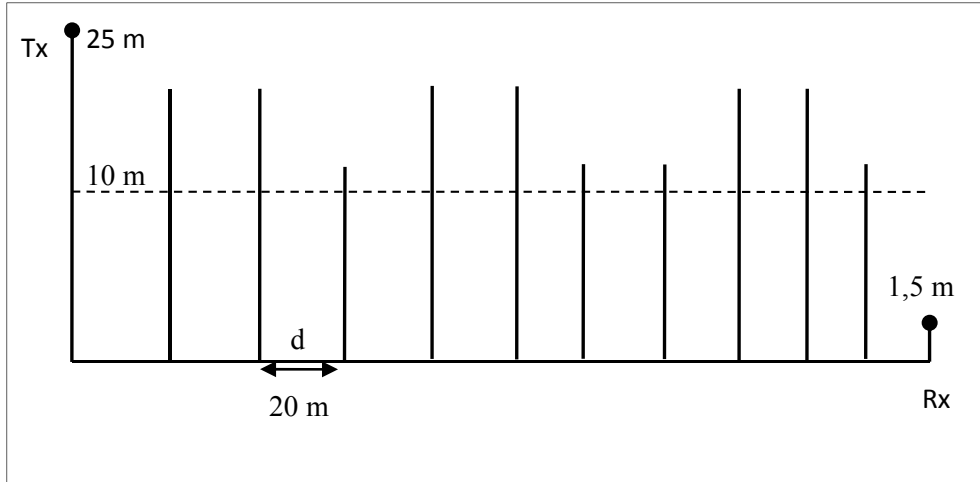
Yalcin (2009)'da mükemmel ileten yarı düzlemden saçılan düzgün alanlar çalışıldı ve model sınır kırınımına genişletildi.

Torabi *et al.* (2009)'da mükemmel iletemeyen bıçak kenarlı kama yapılar için kırınım katsayısı geliştirildi.

Tabakcioglu ve Kara (2010a)'da EKDZ modeli iç açılı kama yapılar uyarlanmıştır. Bu yeni modelde kama iç açısı, kamanın iletkenliği, kamanın elektrik geçirgenlik sabiti ve kutulanmanın türü de hesaba katılmaktadır.

Leandro *et al.* (2013)'te düzgün kırınım teorisi ile PO modeli birleştirildi ve eşit yüksekliğe sahip yapılar uygulandı.

DKT, EK ve EKDZ modellerinin avantaj ve dezavantajlarını ortaya koymak için Şekil 1'de verilen yayılım senaryosu incelendi.



Şekil 1:

Yayılım senaryosu (Tabakcioglu ve Cansiz, 2013)

Bu senaryoda 10 adet bıçak kenarlı kama bulunmaktadır. İşlem frekansı 2100 MHz olarak seçilmiştir. Ortalama bina yüksekliği 10 m olup, binalar 10 ± 4 m olarak rastgele atanmıştır. Binalar arası mesafe ise 20 ± 5 m olarak atanmıştır. Alıcı yüksekliği 1,5 m olup, verici yüksekliği 5, 10, 15, 20 ve 25 m olarak seçilmiştir. Her bir durum için 20 kez benzetimler yapılmış olup sonuçlar Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Benzetim sonuçları

DKT (s)	EK (s)	EKDZ (s)	DKT-EK (dB)	EKDZ-EK (dB)	ELENEN	T _x
0,898	157,618	0,010	0,118	0,234	7,400	25
0,969	187,709	0,026	0,501	0,259	7,050	20
1,147	235,013	0,363	0,576	0,119	6,050	15
0,959	214,041	6,129	0,605	0,151	5,000	10
0,670	160,813	0,898	0,896	0,212	4,650	5

Tablo 1’den de görülebileceği gibi, sol üç sütunda modellerin hesaplama süreleri verilmiştir. Sonraki sütunda eğim kırınımı modelinin düzgün kırınım teorisi modeline katkısı verilmektedir. Daha sonra gelen sütunda EK ve EKDZ modellerinin farkı verilmektedir. Ayrıca EKDZ modelinde etkin olmayıp senaryodan çıkarılan bina sayısı ile verici yükseklikleri de Tablo1’de verilmektedir. EK modeli referans model olup hesaplama zamanı en yüksek olan modeldir. DKT modeli kısa hesaplama süresine sahip olup, en çok hata veren modeldir. Verici yüksekliği azaldığı durumlarda binalar birbirinin geçiş bölgesine girdiğinden, EK modelinin katkısı artmaktadır. Etkin olmayan binalar senaryodan çıkarıldığı için EK ile EKDZ modeli yaklaşık sonuçlar vermekte olup EKDZ modelinde hesaplama süresi oldukça düşüktür. Verici yüksekliği aşağı çekildiği durumlarda elenen bina sayısı azalmaktadır. EKDZ modeli hesaplama süresi ve kestirimdeki kesinlik açısından optimum bir modeldir.

3. SONUÇLAR

Geometrik optik yansıma ve kırılma olaylarını açıklamaktadır. Kırınım olayı geometrik optikle ifade edilememektedir. Çoklu kırınım içeren senaryolar için alıcı üzerindeki alan şiddetini kestirmek için birçok elektromanyetik dalga yayılım modeli ileri sürülmüştür. Bu yayılım modelleri temelde nümerik ve ışın teorisine dayanan olmak üzere iki ana gruba ayrılmaktadır. Nümerik modeller hata fonksiyonunun, Kirchhoff-Huygen ve fresnel benzeri integrallerin hesaplanması ilkesine dayanır. Nümerik modeller gerçek ölçümlerle hemen hemen aynı sonucu vermektedir. Bu modeller kesin sonuç vermesine karşın hesaplama süresi çok fazladır. Işın izleme tekniğine dayanan modellerin ise işlem karmaşıklığı, dolayısıyla hesaplama zamanı düşüktür. Bu modellerin alan şiddeti kestirimindeki kesinliği de düşüktür. Hesaplama zamanı ile kesinlik arasında ödünleşme vardır. Daha güvenilir bir yayıncılık yapmak için hesaplama süresi ve kesinlik açısından optimum bir modellere ihtiyaç duyulmaktadır.

4. KAYNAKLAR

1. Andersen, J. B. (1994). “Transition zone diffraction by multiple edges”, *IEEE Proceedings Microwave Antennas and Propagation*, UK.
2. Andersen, J. B. (1997). “UTD multiple-edge transition zone diffraction”, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Cilt 45, 1093–1097.
3. Balanis, C.A. (1989). *Advanced Engineering Electromagnetics*, John Wiley & Sons, New York, USA.
4. Bertoni, H.L. (2000). *Radio Propagation for Modern Wireless Systems*, Prentice-Hall, New Jersey, USA.

5. Borovikov, V.A. and Kinber, B.E. (1994). *Geometrical Theory of Diffraction*, Institution of Electrical Engineers, London, UK.
6. Causebrook, J.H. and Davies, B. (1971). "Tropospheric radio wave propagation over irregular terrain: The computation of field strength for UHF broadcasting", *BCC Research Department Report RD 1971/43*.
7. Chung, H. K. and Bertoni, H. L. (2002). "Range-dependent path-loss model in residential areas for the VHF and UHF bands", *IEEE Transaction on Antennas and Propagation*, Cilt 50, No 1, 1-11.
8. Chung, H.K. (2000). Radio Channel Studies from 30 MHz to 5 GHz, Ph.D. Thesis. *Graduated School Polytechnic Institute of New York University*.
9. Chung, H. K and Bertoni, H. L. (2003). "Application of isolated diffraction edge method for urban microwave path loss prediction", *IEEE Vehicular Technology Conference*, USA.
10. Clarkowski, A., Boersma, J. and Mittra, R. (1984). "Plane-Wave Diffraction by a Wedge-A spectral Domain Approach", *IEEE Trans. on Antenna. Propagat.*, Cilt 32, No 1, 20-29.
11. Deygout, J. (1966). "Multiple knife-edge diffraction of microwaves", *IEEE Trans. Antennas Propagat*, Cilt 14, 480-489, 1966.
12. Deygout, J. (1991). "Correction factor for multiple knife-edge diffraction", *IEEE Trans. Antennas Propagat*, Cilt 39, 1256-1258.
13. Giovaneli, C.L. (1984). "An analysis of simplified solutions for multiple knife-edge diffraction", *IEEE Trans. on Antenna. Propagat.*, Cilt 32, 297-301, 1984.
14. Graeme, L.J. (1976). *Geometrical Theory of Diffraction for Electromagnetic Waves*, Institution of Electrical Engineers, London, UK, 1976.
15. Harrington, R.F. (1966). *Field Computation by Moment Methods*. IEEE Press Series, New Jersey, USA.
16. Holm, P. D. (1996). "UTD-Diffraction Coefficients for Higher Order Wedge Diffracted Fields", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Cilt 4, No 6, 879-888.
17. Holm, P. D. (2000). "A new heuristic UTD Diffraction Coefficients for nonperfectly conducting wedges", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Cilt 48, 1211-1219.
18. Holm, P. D. (2004). "Calculation of Higher Order Diffracted Fields for Multiple-Edge Transition Zone Diffraction", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Cilt 52, No 5, 1350-1355.
19. Karousos, A. and Tzaras, C. (2008). "Multi Time-Domain Diffraction for UWB Signals", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Cilt 56, No 5, 1420-1427.
20. Keller, J.B. (1962). "Geometrical Theory of Diffraction", *J. Opt. Soc. Amer.*, Cilt 52, No 2, 116-130, 1962.
21. Koutitas, G. and Tzaras, C. (2006). "A Slope UTD Solution for a Cascade of Multishaped Canonical objects", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Cilt 54, No 10, 2969-2976.
22. Kouyoumjian, R. G. and Pathak, P. H. (1974). "A uniform geometrical theory of diffraction for an edge in a perfectly conducting surface", *Proceedings of the IEEE*, Cilt 62, 1448-1461.
23. Lee, M.B.R., Saunders, S.R., Tzaras, C., Montiel, E. and Scrivens, J. (2002). "The Digiplan project: Coverage prediction for digital broadcast services", *BBC White Paper 047*.

24. Luebbers, R.J., (1984). "Finite conductivity uniform GTD versus knife edge diffraction in prediction of propagation path loss", *IEEE Trans. Antennas Propagat*, Cilt 32, 70-76.
25. Macdonald, H.M. (1912). "The effect produced by an obstacle on a train of electric waves", *Phil. Trans. Royal Soc. London, Series A, Math. Phys. Sc.*, Cilt 212, 299-337, 1912.
26. Maliuzhinets, G.D. (1958). "Excitation, reflection and emission of surface waves from a wedge with given face impedances", *Sov. Phys. Dokl.*, Cilt 3, No 4, 752-755.
27. Martínez-Inglés, M.T., Rodríguez, J.V., Molina-Garcia-Pardo, J.M., Pascual-García, J. and Juan-Llácer, L. (2013). "Comparison of a UTD-PO Formulation for Multiple-Plateau Diffraction with Measurements at 62 GHz", Cilt 61, No 2, 1000-1003.
28. Rahmat-Sami, Y. and Mittra, R. (1976). "On the investigation of diffracted fields at the shadow boundaries of staggered parallel plates-A spectral domain approach", *Radio Science*, Cilt 12, No 5, 659-670.
29. Rizk, K., Valenzuela, R., Chizhik, D. and Gardiol, F. (1998). "Application of the slope diffraction method for urban microwave propagation prediction", *IEEE Vehicular Technology Conference*, Canada.
30. Rodriguez, J.V., Molina-Garcia-Pardo, J.M. and Leandro, J.L. (2005). "An Improved Solution Expressed in Terms of UTD Coefficients for Multiple Building Diffraction of Plane Waves", *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, Cilt 4, 16-19.
31. Rodriguez, J.V., Molina-Garcia-Pardo, J.M. and Leandro, J.L. (2008). "A Hybrid UTD-PO Solution for Multiple-Cylinder Diffraction Analysis Assuming Spherical-Wave Incidence", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Cilt 56, No 9, 3078-3081.
32. Rodriguez, J.V., Molina-Garcia-Pardo, J.M. and Leandro, J.L. (2009). "UTD-PO Formulation for the Multiple-Diffraction of Spherical Waves by an Array of Multimodeled Obstacles", *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, Cilt 8, 379-382.
33. Schneider, M. and Luebbers, R.J. (1989). "A Uniform double diffraction coefficient", *Antennas and Propagation Society International Symposium (AP-S)*, 3, 1270-1273, Digest.
34. Tabakcioglu, M. B. and A. Kara (2009). "Comparison of improved slope UTD method with UTD based methods and physical optic solution for multiple building diffractions", *Electromagnetics*, Cilt 29, No 4, 303-320.
35. Tabakcioglu, M. B. and A. Kara (2010). "Improvements on Slope Diffraction for Multiple Wedges", *Electromagnetics*, Cilt 30, No 3, 285-296.
36. Tabakcioglu, M. B. and A. Cansiz (2013). "Application of S-UTD-CH Model into Multiple Diffraction Scenarios", *International Journal of Antennas and Propagation*, Cilt 2013, 1-5.
37. Tajvidy, A., Ghorbani, A. (2008). "A New Uniform Theory-of-Diffraction-Based Model for the Multiple Building Diffraction of Spherical Waves in Microcell Environments", *Electromagnetics*, Cilt 28, No 5, 75-387.
38. Tiberio, R. and Kouyoumjian, R.G. (1982). "An analysis of diffraction at edges illuminated by transition region fields", *Radio Science*, Cilt 17, No 2, 323-336.
39. Torabi, E., Ghorbani, R. and Tajvidy, A. (2009). "A Modified Diffraction Coefficient for Imperfect Conducting Wedges and Buildings With Finite Dimensions", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Cilt 57, No 4, 1197-1207.
40. Tzaras, C. and Saunders, S.R. (2000). "Comparison of multiple-diffraction models for digital broadcasting coverage prediction", *IEEE Trans. Broadcast.*, Cilt 46, No 3, 221-226.

41. Tzaras, C. and Saunders, S. R. (2001). "An improved heuristic UTD solution for multiple-edge transition zone diffraction", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Cilt 49, No 12, 1678–1682.
42. Ufimtsev, P.Y. (2007). *Fundamentals of the Physical Theory of Diffraction*, John Wiley & Sons, New Jersey, USA.
43. Umul, Z. (2004). "Modified theory of physical optics", *Optics Express*, Cilt 12, No 20, 4959-4972.
44. Walfisch, J. and Bertoni, H.L. (1988). "A theoretical model of UHF propagation in urban environment", *IEEE Trans. on Antenna. Propagat.*, Cilt 36, No 12, 1788-1796.
45. Wang, H. (2005). "Modeling and Wideband characterization of Radio wave propagation", Ph.D. Thesis, *The University of Texas at Austin*.
46. Vogler, L. (1982). "An attenuation function for multiple knife-edge diffraction", *Radio Science*, Cilt 17, 1541–1546.
47. Yalcin, U. (2009). "Uniform Scattered Fields of the Extended Theory of Boundary Diffraction Wave for PEC Surfaces", *Progress In Electromagnetics Research M*, Cilt 7, 29-39.

Makale 25.06.2012 tarihinde alınmış, 10.07.2013 tarihinde düzeltilmiş, 25.02.2014 tarihinde kabul edilmiştir.