

Yağmurun K_u Bant Elektromanyetik Dalgalara Etkisinin Modellenmesi

Rain Effect Modeling of K_u Band Electromagnetic Waves

Adem YAYLA, Gonca ÇAKIR, Sibel ÇİMEN

Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü
Kocaeli Üniversitesi
İzmit, Kocaeli

135103012@kocaeli.edu.tr, gonca@kocaeli.edu.tr, sibelgunduz@kocaeli.edu.tr

Özet

Atmosfer içerisinde yayılan elektromanyetik dalgalar çeşitli faktörler nedeniyle zayıflamaya maruz kalırlar. Atmosfer içinde bulunan gazlar ve hidrometeorlar (yağmur, dolu, kar, bulut, sis gibi) yayılan elektromanyetik dalgaların zayıflamasına neden olur. Yağmur nedeniyle oluşan zayıflama, özellikle 10 GHz üzerindeki frekanslarda elektromanyetik dalgaların yayılımına etki eden önemli bir faktördür ve bu frekanslarda çalışan sistemler için tasarım aşamasında dikkate alınmalıdır. Bu çalışmada, yağmur nedeniyle elektromanyetik dalgaların zayıflaması ile ilgili literatür gözden geçirilmiş ve zayıflama miktarının belirlenmesine yönelik bazı modeller, MATLAB programı kullanılarak incelenmiştir. Ayrıca, farklı yağış miktarlarının etkisinin incelenilmesi amacıyla CST programı kullanılarak yeni bir model geliştirilmiştir. Bu yeni model ile mevcut modeller arasından seçilen bir model karşılaştırılmıştır.

Abstract

The electromagnetic waves propagating through the atmosphere are attenuated by various factors. The atmospheric gases, hydrometeors (rain, hail, snow, clouds and fog etc.) cause the losses of the propagating electromagnetic waves. Rain attenuation is an important aspect of signal propagation especially at frequencies above 10 GHz and should be considered in the designing of systems operating in these frequencies. This paper reviews the literature on attenuation of electromagnetic waves due to rain and examines some of the models for prediction of rain attenuation by using MATLAB. In addition, a new model has been developed by using CST program to investigate the effects of different rainfall. This new model has been compared with the one selected from the existing models.

1. Giriş

Ses veya su dalgalarının aksine yayılım için herhangi bir ortama ihtiyaç duymayan elektromanyetik dalgaların, boşluk haricindeki diğer ortamlarda yayılımı, ortamın özelliğine bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Atmosfer içinde bulunan gazlar, meteorolojik olaylar (yağış durumu, sis, bulut vb.), fiziksel oluşumlar (toz, kuş sürüsü vb.) ve ortamdaki kozmik/yapay gürültü, elektromanyetik dalgaların etkilenmesine/zayıflamasına neden olmakta, elektromanyetik

dalgaların frekansı arttıkça etki artış göstermektedir [1]. Bununla birlikte, günümüzde özellikle iletişim sistemlerinde talep edilen iletim hızı ile kapasitesi ve radar sistemlerinde hassas bilgi ihtiyacına bağlı olarak yüksek frekansa sahip elektromanyetik dalgalar kullanılmaktadır. Yüksek frekanslı elektromanyetik dalgaların kullanımının birçok avantajının yanı sıra ortam şartlarına bağlı yayılım özellikleri, kullanım alanlarında kısıtlamalara neden olmaktadır [2].

Frekansı 10 GHz altındaki (3 cm'den daha kısa dalga boyuna sahip) elektromanyetik dalgalar için ihmal edilebilir seviyede olan hidrometeorların etkisi, 10 GHz üzerindeki frekanslarda artış göstermekte ve ihmal edilemez seviyelere ulaşmaktadır [1, 2]. Hidrometeor olarak isimlendirilen, atmosfer içindeki su damlacıkları (sis ve bulut), yağmur damlaları, kar ve buz tanelerinin (dolu) arasında elektromanyetik dalgaları en fazla etkileyen yağış türünün yağmur olduğu belirlenmiştir [1].

Elektromanyetik spektrumda, yağmur etkisinin ihmal edilemez seviyeye ulaştığı 10 GHz üzerindeki ilk frekans bandı olan K_u bant kapsadığı bölge itibarı (12-18 GHz) ile kritik bir bant olma özelliği taşır. Uydur iletişimi maksadıyla çok sık kullanılan K_u bant elektromanyetik dalgalar, hassas hedef bilgisine ihtiyaç duyulan radar sistemlerinde (altimetre, yüksek çözünürlüklü görüntüleme radarı, atış kontrol/hedef takip radarı, güdümlü mermi başlık radarı gibi) kullanılmaktadır. Atmosferik şartlara karşı hassas K_u bantta çalışan radarların hedef hassasiyeti ve menzil çözünürlüğü fazladır. Ancak çok uzun menzile sahip radar sistemleri hedeflenemez [3].

Yağmur, elektromanyetik dalgaların soğrulmasına, farklı yönlerde saçılarak dağılmasına, polarizasyonunun bozulmasına, alıcıya istenen seviyede sinyal ulaşmamasına ve radar skobunda sahte hedef/gürültü oluşmasına neden olur. Radar sistemlerinde oluşan sahte hedef/gürültü bu çalışma kapsamında ele alınmamıştır.

Yağmurun elektromanyetik dalgalara olan etkisi; dalga frekansı ve polarizasyonunun yanı sıra, yağış şiddeti, yağmur damlasının şekli ve hacimsel yoğunluğuna göre değişiklik gösterir [4]. Yağmurun elektromanyetik dalgalara etkisinin hesaplanması için birçok parametreye ihtiyaç duyulması ve bu parametrelerin kesin olarak belirlenememesi sebebiyle, fiziksel (kesin) hesaplama modelleri yerine deneysel (ampirik) hesaplama modelleri kullanılmaktadır. Yağmurun

karakteristiğine yönelik parametreler arasında belirlenmesi daha kolay olan yağmur şiddeti, yağmurun etkisinin ortaya konmasında temel parametrelerden biri olarak kullanılmaktadır [5].

Yağmurun elektromanyetik dalgalara etkisinin belirlenmesine yönelik birçok model bulunmaktadır. Bu çalışma kapsamında; yaygın olarak kullanılan deneysel modeller arasından seçilen MAHAFA [6], OLSEN/ROGERS/HODGE [7], ve International Telecommunication Union (ITU) [8] tarafından belirlenen modeller kullanılarak, farklı yağmur şiddetleri (1, 5, 10, 20, 50, ve 100 mm/sa) için, K_u bant aralığındaki (12-18 GHz) frekanslar için zayıflama değerleri incelenmiş ve CST programı kullanılarak tanımlanan model ile elde edilen zayıflama değerleri karşılaştırılmıştır.

2. Yağmurun K_u Bant Elektromanyetik Dalgalara Etkisi

Hayati bir element olan su atmosferde;

- Katı (kar, dolu),
- Sıvı (yağmur),
- Gaz (su buharı, sis),

olmak üzere üç halde de bulunmaktadır.

Elektromanyetik dalgalar, sıvı haldeki su damlalarının içinden geçerken;

- Damlalarının zayıf bir dielektrik malzeme gibi davranarak dalganın gücünü soğurması (ısınma),
 - Dalganın damlalara çarparak saçılması (farklı yönlerde dağılma),
- sonucunda zayıflama meydana gelmektedir [9].

Su, elektromanyetik dalgalar üzerinde en fazla etkiyi sıvı halde iken göstermektedir. Bünyesinde donmuş halde su içeren ve su yoğunluğu daha az olan karın, elektromanyetik dalgalara etkisi yağmura nazaran oldukça az iken, kar taneleri erimeye başladıkça elektromanyetik dalgalara etkisi de artmaktadır [10]. Yağmur, atmosferden yer yüzeyine doğru düşen ve çapı çok küçük değerlerden, 7 mm civarına kadar ulaşabilen su damlaları olarak ifade edilebilir. Çok küçük boyutlu (< 2 mm) damlalarda gaz haline dönüşme (buharlaşma) veya diğer damlalarla birleşme görülürken, büyük boyutlu (> 5 mm) damlalar maruz kaldıkları aerodinamik kuvvetler nedeniyle parçalara ayrılırlar. Bahse konu olaylara bağlı olarak yağmur damlalarının boyutlarının dağılımı artış göstermektedir [11].



Şekil 1: Yağmur Damlalarının Atmosferde Maruz Kaldığı Kuvvetler [12]

Aerodinamik kuvvetler damlaların şekillerinin değişmesine de neden olmaktadır. Küçük boyutlu damlaların şekilleri küre şekline yakın iken aerodinamik kuvvetlerden etkilenen büyük boyutlu damlaların şekilleri daha düzleşmekte ve çapı 4 mm üzerindeki damlalar konkav şekil almaktadır [13]. Yağmur damlasının şeklinde meydana gelen düzleşme, elektromanyetik dalganın polarizasyonuna göre yağmurun dalgaya olan etkisinin değişmesine neden olmaktadır. Yatay polarizasyona sahip dalgalar, büyük boyutlu (düzleşmiş) yağmur damlalarından daha fazla etkilenmektedir [11].

Yağmurun etkisi; dalganın frekansı ve polarizasyonunun yanı sıra, yağmur damlasının şekline, hacimsel yoğunluğuna (damla sayısı/m³) ve yağış şiddetine (mm/sa) bağlı olarak değişiklik göstermektedir [4].

Yağmur şiddeti hariç, yağmur damlasına ilişkin diğer parametrelerin (damlaların hızı, damla büyüklüğü dağılımları, su içeriği, hacimsel yoğunluğu, yağış kaplama yüksekliği gibi) ölçülmesi/belirlenmesi oldukça zordur ve bu işlemler için özel ölçüm aletler/radarlar gerektirmektedir. Diğer faktörlere göre ölçümü/belirlenmesi daha kolay olan yağmur şiddeti, yağmurun elektromanyetik dalgalara etkisinin belirlenmesine yönelik çalışmalarda yaygın olarak kullanılmaktadır [4].

3. Yağmurun Etkisini Hesaplama Modelleri

Yağmur nedeniyle meydana gelen zayıflama miktarının belirlenmesine yönelik metotlar;

- Yayılım ölçümlerinden elde edilen istatistiklere dayanarak yayılım yolundaki kayıpların hesaplanmasını sağlayan Deneysel (Ampirik) modeller,
- Yayılma ile ilgili fiziksel kural ve varsayımlar ile yayılım yolunu etkileyen temel süreçlere yönelik istatistiklere dayanarak yayılım yolundaki kayıpların hesaplanmasını sağlayan Fiziksel (Kesin) modeller, başlıkları altında iki grupta toplanabilir [5].

Deneysel modeller için, yağmur şiddeti ve buna bağlı ölçülen zayıflama istatistikleri kullanılarak model içinde geçen parametreler belirlenmektedir. Fiziksel modellere ait parametrelerin belirlenmesi için ise meteorolojik şartlara bağlı olarak ölçülen zayıflama istatistikleri kullanılmamakta; meteorolojik istatistikler, fiziksel kural ve varsayımlara uygulanarak parametreler türetilmektedir [14].

Deneysel modeller bağlanım metoduna, fiziksel modeller ise fizik kurallarına bağlı olarak ortaya konmaktadır. Bu nedenle fiziksel modellerin doğruluğu, ortam ve sınır şartlarının gerçek şartlara uygun olarak tanımlanmasına bağlıdır. Ortam şartlarının tam olarak belirlenebilmesi için, yağmurun yapısına ilişkin detaylı bilgilerin (yağmur damlalarının boyutları, hızı, şekli, sıcaklığı, yağış şiddeti, hacimsel yoğunluk gibi) elde edilmesine ihtiyaç bulunmaktadır. Ancak bahse konu bilgilerin, günümüz imkanlarıyla elde edilmesindeki zorluk/imkansızlıklar nedeniyle tam olarak belirlenmesi mümkün değildir. Meydana gelen zayıflamanın, fiziksel modeller kullanılarak hesaplanmasındaki güçlükler ve maliyet nedeniyle deneysel hesaplama modeller daha sık kullanılmakta ve bahse konu deneysel yöntemler ile oldukça başarılı sonuçlar elde edilmektedir [14].

Deneyisel modellerde, sadeliği ve kullanım kolaylığı nedeniyle zayıflama miktarını (A), yağış şiddeti (R) ile ilişkilendiren;

$$A=aR^b \quad (1)$$

şeklindeki genel eşitlik, yağmur nedeniyle meydana gelen zayıflamanın hesaplanması için sıklıkla kullanılmaktadır [7]. Eşitlikte yer alan “a” ve “b” ifadeleri elektromanyetik dalganın frekansına bağlı sabit değerlerdir. Deneyisel olarak elde edilmiş olan bahse konu sabitlerin değerleri, modeller arasında farklılık göstermektedir. Farklılıkların temelinde değerlerin elde edilmesinde kullanılan deneyel yöntemler (ölçü aleti sayısı, ölçüm yapılan süre vb.) yer almaktadır. Sabitlerin değerleri genellikle; deneyel sonuçlar, yağmur damlası şekli dağılım miktarı modelleri veya Mie saçılması kullanılarak, logaritmik bağlanım yöntemi ile değerler elde edilmektedir [7].

3.1. MAHAFZA Modeli [6]

Mahafza tarafından yağmur nedeniyle meydana gelen zayıflama (A_r);

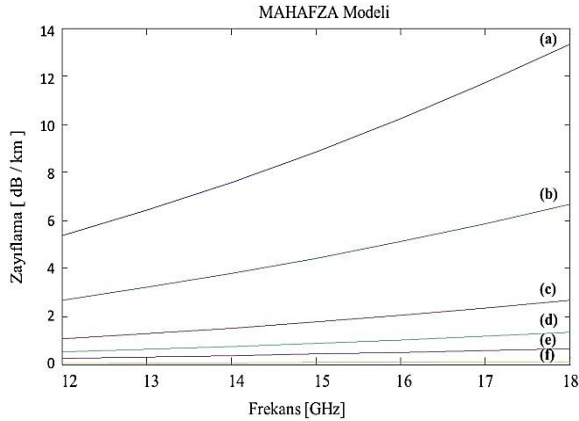
$$A_r=K_A f^{\alpha} r \quad (2)$$

eşitliği ile ifade edilmiştir.

Eşitlik içinde frekans (f) (GHz) ve yağış şiddeti (r) (mm/sa) cinsinden kullanılmıştır. Farklı kaynaklarda değeri 2,39 ile 3,84 arasında değişiklik gösteren α için 2,25 ve değeri $1,21 \times 10^{-5}$ ile $8,33 \times 10^{-6}$ arasında değişiklik gösteren K_A için 0,0002 değerleri kabul edilmiştir. Kabul edilen değerler yerlerine konularak eşitlik aşağıdaki hale dönüştürülmüştür.

$$A_r=0,0002 f^{2,25} r \quad (3)$$

Bahse konu model kullanılarak K_u bant elektromanyetik dalgaların farklı şiddetleri için hesaplanan zayıflama miktarları Şekil-2’de gösterilmiştir.



Şekil 2: MAHAFZA Modeli ile hesaplanan farklı şiddetteki yağmurların ((a)100, (b)50, (c) 20, (d)10, (e)5 ve (f)1 mm/sa) K_u bant elektromanyetik dalgaları zayıflatma miktarları.

3.2. OLSEN/ROGERS/HODGE Modeli [7]

Elektromanyetik dalgalarda yağmur nedeniyle meydana gelen zayıflama miktarı (A);

$$A=aR^b \quad (4)$$

eşitliği ile ifade edilmiştir.

Bu eşitlikte yer alan “a” ve “b” elektromanyetik dalganın frekansı ile yağmurun sıcaklığına bağlı sabit katsayı değerleridir. Modelde;

$$a=G_a f^{E_a} \quad (5)$$

$$b=G_b f^{E_b} \quad (6)$$

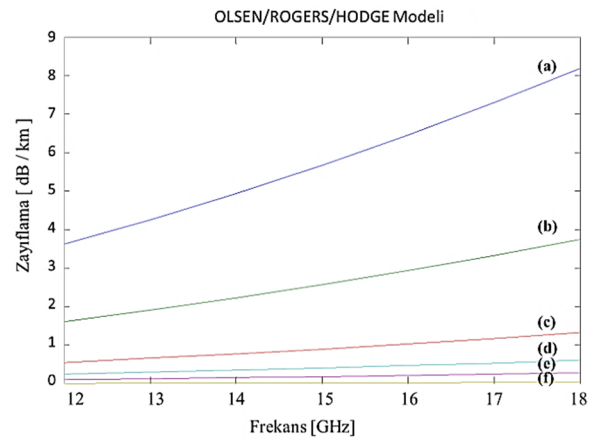
ifadeleri ile tanımlanan sabitler K_u bant elektromanyetik dalgalar için;

$$G_a = 4.21 \times 10^{-5}, \quad E_a = 2.42 \quad 2.9 \leq f < 54 \text{ GHz}$$

$$G_b = 1.41, \quad E_b = -0.0779 \quad 8.5 \leq f < 25 \text{ GHz}$$

değerleri kullanılarak hesaplanmaktadır.

Bahse konu model kullanılarak K_u bant elektromanyetik dalgaların farklı şiddetleri için hesaplanan zayıflama miktarları Şekil-2’de gösterilmiştir.



Şekil 3: OLSEN/ROGERS/HODGE Modeli ile hesaplanan farklı şiddetteki yağmurların ((a)100, (b)50, (c) 20, (d)10, (e)5 ve (f)1 mm/sa) K_u bant elektromanyetik dalgaları zayıflatma miktarları.

3.3. ITU Modeli [8]

ITU (International Telecommunication Union) tarafından tavsiye edilen model, 1-1000 GHz arasındaki farklı polarizasyona sahip elektromanyetik dalgalar için zayıflama miktarının hesaplanmasına yöneliktir.

Yağmur nedeniyle meydana gelen zayıflama miktarı (γ_R);

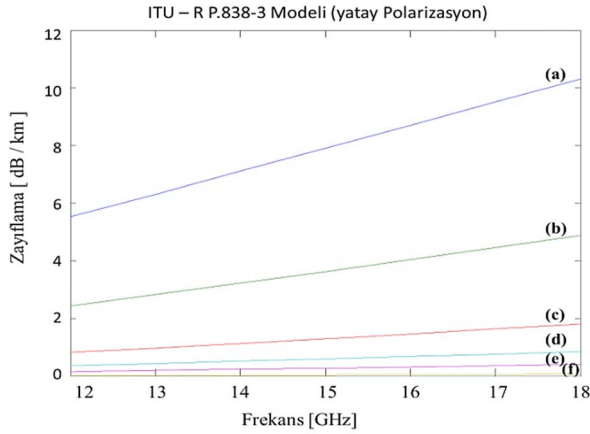
$$\gamma_R=kR^{\alpha} \quad (7)$$

eşitliği ile ifade edilmiştir.

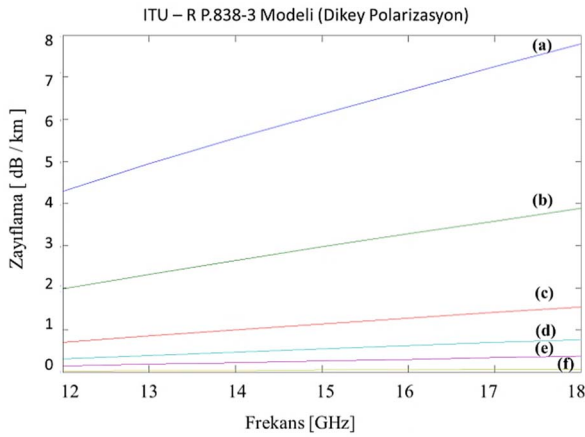
Model içerisinde, eşitlikte yer alan elektromanyetik dalganın frekansına bağlı k ve α sabitlerinin değerleri; yatay (k_H , α_H) ve dikey (k_v , α_v) polarizasyon için ayrı ayrı belirtilmiştir.

Çizelge 1: Yatay ve dikey polarizasyonlu Ku bant elektromanyetik dalgaları zayıflatma modeli katsayıları.

Frekans (GHz)	k_H	α_H	k_V	α_V
12	0.02386	1.1825	0.02455	1.1216
13	0.03041	1.1586	0.03266	1.0901
14	0.03738	1.1396	0.04126	1.0646
15	0.04481	1.1233	0.05008	1.0440
16	0.05282	1.1086	0.05899	1.0273
17	0.06146	1.0949	0.06797	1.0137
18	0.07078	1.0818	0.07708	1.0025



Şekil 4: ITU tarafından tavsiye edilen model ile hesaplanan farklı şiddetlerdeki yağmurların (a)100, (b)50, (c) 20, (d)10, (e)5 ve (f)1 mm/sa yatay polarizasyonlu Ku bant elektromanyetik dalgaları zayıflatma miktarları.



Şekil 5: ITU tarafından tavsiye edilen model ile hesaplanan farklı şiddetlerdeki yağmurların (a)100, (b)50, (c) 20, (d)10, (e)5 ve (f)1 mm/sa dikey polarizasyonlu Ku bant elektromanyetik dalgaları zayıflatma miktarları.

3.4. Yağmur Zayıflatmasının CST Programı ile Modelenmesi

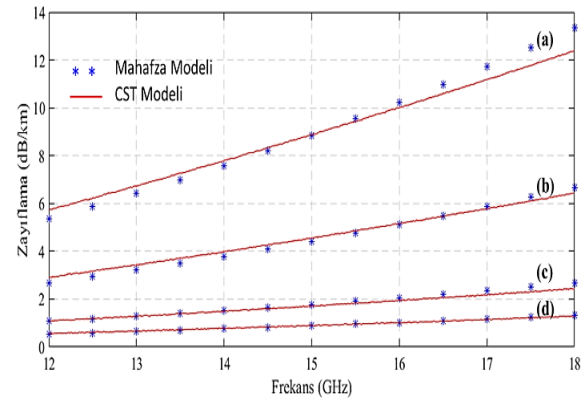
Yağmurun elektromanyetik dalgalara etkisine yönelik deneysel ve fiziksel modellerin yanı sıra, sayısal modeller

üzerinde de çalışmalara rastlanmaktadır [15]. Ancak sayıca çok az olan bu modeller, yağmurun bütün etkilerini içeren modeller değildir, deneysel modellerde olduğu gibi zayıflatma etkilerini içermektedirler. Yağmurun şiddetine, yağmur tanesinin şekline, hızına, açısına bağlı etkileri sayısal yöntemlerle incelemek mümkün, ancak bu etkileri içeren yeni modellerin tanımlanması gerekmektedir, literatürde bu etkileri içeren sayısal modellerle ilgili çalışmalara rastlanmamaktadır. Bu çalışmada, radar kesit alanı hesaplarının yağmur ortamında nasıl etkileneceğini incelemek için, yağmurlu ortamların zayıflatma etkisini gösteren bir malzeme ortamı oluşturulmaya çalışılmıştır. Bu maksatla yüksek frekans bileşenlerinin 3 boyutlu elektro manyetik simülasyonu için hazırlanmış özel bir yazılım olan CST kullanılmıştır. Çalışmanın sonraki adımları, yağmurlu ortamlarda yansıma ve saçılma mekanizmalarının incelenmesi olacaktır.

Tanımlanan malzeme, farklı yağmur şiddetlerinin frekansa bağlı zayıflatma etkilerini içeren bir malzeme olmalıdır. Referans olarak seçtiğimiz MAHAFZA modelindeki zayıflatma miktarlarını yakaladığımız malzeme özellikleri ve hangi yağmur şiddetlerine karşılık geldikleri Çizelge 2’de verilmiştir. Şekil 6’da ise, CST programı kullanılarak ilgili malzemelerin zayıflatma miktarlarının, MAHAFZA modeli ile karşılaştırması verilmiştir. Görüldüğü gibi CST ile analizleri yapılan malzemeler ile MAHAFZA modeli kullanılarak elde edilen zayıflatma karakteristikleri elde edilebilmiştir.

Çizelge 2: MAHAFZA modelindeki zayıflatma karakteristiğini veren malzemelerin özellikleri

	Yağış Şiddeti [mm/sa]	Dielektrik Katsayısı ϵ_r	Kayıp Tanjantı $\tan\delta$	Malzemenin kalınlığı [cm]
(a)	100	1.5	0.0285	1
(b)	50	1.5	0.0238	1
(c)	20	1.5	0.0184	1
(d)	10	1.5	0.0155	1



Şekil 6: CST ile analizleri yapılan malzemeler ile MAHAFZA modeli kullanılarak elde edilen zayıflatma karakteristikleri

4. Sonuçlar

Yağmurun elektromanyetik dalgalara etkisinin özellikle 10 GHz’in üzerindeki frekanslarda incelenmesi güncelliğini koruyan ve özellikle sayısal modellerinin oluşturulması için

üzerinde çalışılması gereken bir konudur. Örneğin, radar kesit alanının (RKA) sayısal tekniklerle hesaplarına ilişkin literatürde onlarca çalışma olmasına rağmen, yağmurun etkilerini de içeren RKA hesaplarına rastlanmamaktadır. Bu hesapların yapılabilmesi için öncelikle sayısal modellerde yağmur zayıflamasını modelleyecek ortamların oluşturulması ve deneysel modellerle karşılaştırılması gerekmektedir. Bu çalışmada üç farklı deneysel model ele alınarak öncelikle MATLAB kodları oluşturulup, farklı yağış şiddetlerinin elektromanyetik dalgalara etkisi frekansa bağlı olarak incelenmiş, ardından CST programında aynı zayıflatma karakteristiğini verecek malzeme ortamları üzerinde çalışılmıştır. Karşılaştırmalar, verilen modelin, istenen yağmur etkisini oluşturduğunu göstermektedir.

5. Kaynaklar

- [1] Crane R.K., Electromagnetic Wave Propagation Through Rain, 1st ed., John Wiley&Sons, New Jersey, 1996.
- [2] Haslett C., Essentials of Radio Wave Propagation, 1st ed., Cambridge University Press, Cambridge, 2008.
- [3] Skolnik M.I., Introduction to Radar Systems, 3rd ed., McGraw-Hill, New York, 2001.
- [4] Seybold J.S., Introduction to RF Propagation, 1st ed., John Wiley&Sons, New Jersey, 2005.
- [5] Tamošiūnaitė M., Žilinskas M., Tamošiūnienė M., Tamošiūnas S., Atmospheric Attenuation due to Humidity, Editor: Zhurbenko V., Electromagnetic Waves, InTech, Rijeka, 157-172, 2011.
- [6] Mahafza B.R., Radar Systems Analysis and Design Using Matlab, 3rd ed., CRC Press, Boca Raton, 2013.
- [7] Olsen R., Rogers D. ve Hodge D., “The aRb relation in the calculation of rain attenuation”, IEEE Trans. Ant. Prop., Vol.AP- 26, No. 2, 318- 329, 1978.
- [8] International Telecommunication Union Recommendation, “Specific Attenuation Model for Rain for Use in Prediction Methods” ITU-R 838-3, 2005.
- [9] Navy Electricity and Electronics Training Series Module 10—Introduction to Wave Propagation, Transmission Lines, and Antennas, NAVEDTRA 14182, 1998.
- [10] Ishimaru A., Electromagnetic Wave Propagation, Radiation and Scattering, 1st Ed., Prentice Hall, New Jersey, 1991.
- [11] Willis M.J., Propagation in Rain and Clouds, Editor: Barclay L., Propagation of Radiowaves, 3rd ed., The Institution of Engineering and Technology, London, 161-186, 2013.
- [12] https://en.wikipedia.org/wiki/Drop_%28liquid%29#cite_ref-1 (Ziyaret tarihi: 11 Temmuz 2016).
- [13] Pruppacher, H.R. ve Pitter, R.L., “A Semiempirical Determination of the Shape of Cloud and Rain Drops”, Journ. of Atmos. Sci. 28, 86–94, 1971.
- [14] Crane R.K., Propagation Handbook for Wireless Communication System Design, 1st Ed., CRC Press, Boca Raton, 2003.
- [15] Miyazaki Y., Takahashi K., and Goto N., “FDTD Parallel Computing of Microwave Scattering and Attenuation Characteristics Due to Randomly Distributed Rainfalls”, PIERS Proceedings, Hangzhou, China, March 24-28, 2008.