

T.C.
GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK FREKANS (HF) DENİZ RADARININ ZAMAN
UZAYI SONLU FARKLAR YÖNTEMİ İLE MODELLENMESİ

HALİL ALPTUĞ DALGIÇ
YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

GEBZE
2013

T.C.
GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK FREKANS (HF) DENİZ
RADARININ ZAMAN UZAYI SONLU
FARKLAR YÖNTEMİ İLE
MODELLENMESİ

HALİL ALPTUĞ DALGIÇ
YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMANI:
DOÇ. DR. SERKAN AKSOY

GEBZE
2013



**GEBZE YÜKSEK
TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS JÜRİ ONAY FORMU

GYTE Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 17/06/2013 tarih ve 2013/32 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 21/10/2013 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Halil Alptuğ DALGIÇ'ın tez çalışması Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI) : Doç. Dr. Serkan AKSOY

ÜYE

: Prof. Dr. Mansur İSMAİLOV

ÜYE

: Prof. Dr. Oleg TRETYAKOV

ONAY

GYTE Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun tarih ve/..... sayılı kararı.

İMZA/MÜHÜR

ÖZET

Bu çalışmada Hareketli Pencere Zaman Uzayı Sonlu Farklar yöntemi ile Yüksek Frekans bandında (5, 10, 15 MHz) çalışan bir deniz radarı için dalga yayılımı iki boyutlu Kartezyen koordinatlarda incelenmiştir. Böylece büyük ölçekli bir problem kabul edilebilir zaman ve hafıza gereksinimi ile çözülebilmektedir. Problem uzayı kara bölgesinde yerleştirilmiş anten, deniz ve deniz ortasında ki iletken bir adadan oluşmaktadır. Anten Gauss türü bir darbe ile uyarılmıştır. Problem uzayını sonlandırmak için Mur türü Soğurucu Sınır Koşulu kullanılmıştır. Bu tezde birinci aşamada verici anten karada konumlandırılırken gözlem noktaları deniz üzerinde alınmıştır (bistatik durum). İkinci aşamada ise verici anten ve gözlem noktaları aynı konumda (monostatik durum) konumlandırıldığı durum incelenmiştir. Birinci aşamada hareketli pencere boyutu ve yayılım frekansı için analizler yapılmış ve ikinci aşamada kullanılacak pencere boyutuna karar verilmiştir. İkinci aşamada antenden adaya kadar pencere boyutu sabit tutulmuş, ada üzerinde pencere boyutu genişletilmiş ve etkileşim tamamlandıktan sonra pencere boyutu sabit olarak geri hareket ettirilmiştir. Menzil bağımlı yol kaybı hesaplarından ve zaman uzayı alan bileşeni gözlemlerinden elde edilen veriler standart Zaman Uzayı Sonlu Farklar yöntemi ile karşılaştırılmış ve tutarlı olduğu gözlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Hareketli Pencere Zaman Uzayı Sonlu Farklar (HP-ZUSF), Deniz Yüksek Frekans Radarı, Zaman Uzayı Sonlu Farklar (ZUSF).

SUMMARY

In this work, electromagnetic wave propagation of a High Frequency, HF (5, 10, 15 MHz) radar is investigated by a Moving Window Finite Difference Time Domain method in two-dimensional Cartesian coordinates. Thus, a large scale problem is solved with a feasible computational time and memory. The problem space is constructed from a thin antenna located on the ground, sea and a conductive island on the sea. The antenna is excited by a Gaussian pulse. The problem space is terminated with a Mur type Absorbing Boundary Condition. In the first step of the thesis, the transmitter antenna is located on the land and observation points are located on the sea (bistatic case). In the second step, the transmitter and the observation point are located at the same position (monostatic case). First of all, in order to use in the second step, a window size is optimized by analyzing the parameters of the window size, frequency of operation in the first step. In the second step, the window size is fixed along the path from the antenna through the island, and then it is expanded on the island. Finally, the window size is fixed after the wave interaction finished. The calculated path losses and time dependent field variations are compared with the standard Finite Difference Time Domain method. Good agreements are observed between two methods.

Key Words: Moving Window Finite Difference Time Domain (MW-FDTD), High Frequency (HF) Naval Radar, Finite Difference Time Domain (FDTD).

TEŞEKKÜR

Başta, yüksek lisans eğitimimde ve akademik hayatımda desteğini ve yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyip bilgisi ile bu çalışmanın oluşmasının yolunu açan danışmanım Doç. Dr. Serkan AKSOY'a,

Bütün çalışmam boyunca yanımda olan, bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşan değerli arkadaşım Mehmet Burak ÖZAKIN'a,

Ve göstermiş olduğu desteklerinden dolayı sevgili eşim H. Hilal DALGIÇ'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
SUMMARY	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
TABLolar DİZİNİ	xiii
1. GİRİŞ	1
2. YÜKSEK FREKANS RADARLAR	3
2.1. Yer Yüksek Frekans Radarları	3
2.1.1. Yer Yüksek Frekans Radarları Modelleme ve Benzetimi	3
2.1.1.1. Radyo Dalga Yayılımı	6
2.1.1.2. Kablosuz Haberleşme İçin Yayılım Kaybı Hesabı	6
2.1.1.3. Çok Düşük Frekans ve Düşük Frekans Problemleri	7
2.1.1.4. Lineer Olmayan Ortamlar	8
2.2. Deniz Yüksek Frekans Radarları	8
2.2.1. Deniz Yüksek Frekans Radarları Modelleme ve Benzetimi	8
2.2.2. Radar Kesit Alanı Hesabı	9
2.3. Diğer Uygulama Alanları	9
2.3.1. Tünellerde HP ZUSF Uygulamaları	9
2.3.2. Yüksek Mertebeden HP ZUSF	10
2.3.3. Plazma İçerisinde HP ZUSF Uygulamaları	10
2.3.4. Akustik Ortamda HP ZUSF Uygulamaları	10
2.3.5. Ticari Yazılımlar	11
2.3.6. Dalga Kılavuzu İçerisinde Radyo Dalga Yayılımı	11
2.3.7. Yıldırım ve Modellenmesi	12
3. ZAMAN UZAYI SONLU FARKLAR YÖNTEMİ	13
3.1. Sonlu Farklar Yöntemi	14
3.1.1. Bir Boyutta Sonlu Farklar	14
3.2. Maxwell Denklemleri ve ZUSF	16

3.3. İki Boyutlu Kartezyen Koordinatlarda Kayıplı Ortamda ZUSF	19
3.4. Sayısal Dispersiyon	23
3.5. Sayısal Kararlılık	24
3.6. Soğurucu Sınır Koşulları	24
3.6.1. Tek Yönlü Dalga Denklemi	25
3.6.2. MUR Türü SSK	26
3.6.2.1. Birinci Mertebeden Doğruluklu MUR SSK	26
3.6.2.2. İkinci Mertebeden Doğruluklu MUR SSK	28
4. Hareketli Pencere ZUSF Yöntemi	31
4.1. Yöntemin Uygulanması	32
4.1.1. Karar Algoritması	33
5. SAYISAL SONUÇLAR	34
5.1. Anten Modelleme	36
5.2. Sağa Hareket Eden Pencere (Bistatik Durum)	38
5.2.1. Düşük İletkenlikli Ada Değeri İçin Yol Kaybı Hesabı	39
5.2.2. Yüksek İletkenlikli Ada Durumu	43
5.2.2.1. Yol Kaybı Hesabı	43
5.2.2.2. Gözlenen Zaman Uzayı İşaretleri	47
5.3. Sola Hareket Eden Pencere (Monostatik Durum)	51
5.4. HP-ZUSF Alan Dağılımları	55
6. YORUMLAR	58
 KAYNAKLAR	 60
ÖZGEÇMİŞ	63

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler ve</u> <u>Kisaltmalar</u>	<u>Açıklamalar</u>
∇	: Nabla Operatörü
ε	: Ortamın Dielektrik Sabiti
μ	: Ortamın Manyetik Sabiti
σ	: İletkenlik
c	: Işık Hızı
ω	: Açısal Frekans
k	: Dalga Sayısı
k_x^N	: Sayısal Dalga Vektörü x Bileşeni
k_y^N	: Sayısal Dalga Vektörü y Bileşeni
Δt	: Birim Zaman Adımı
n	: Zaman Adımı
t_c	: Gauss Darbesinin Oluşacağı zaman
$\mathbf{E}$	: Elektrik Alan Vektörü
$\mathbf{B}$	: Manyetik Akı Yoğunluğu Vektörü
$\mathbf{D}$	: Deplasman Alan Vektörü
$\mathbf{H}$	: Manyetik Alan Vektörü
$\mathbf{J}$	: Akım Yoğunluğu
A	: Amper
C	: Coulomb
f	: Frekans
F	: Farad
H	: Henry
Hz	: Hertz
km	: Kilometre
m	: Metre
sn	: Saniye
S	: Siemens
Wb	: Weber

BAPD	:	Bölünmüş Adımlı Parabolik Denklemler
DYD	:	Değişken Yönlü Dahili
D-YF	:	Deniz Yüksek Frekans
EMD	:	Elektromanyetik Darbe
FMSD	:	Frekans Modülasyonlu Sürekli Dalga
HP-ZUSF	:	Hareketli Pencere Zaman Uzayı Sonlu Farklar
İHY-DP	:	İletim Hatları Yöntemi- Dalga Paketi
KK-DYD	:	Koşulsuz Kararlı Değişken Yönlü Dahili
MUK	:	Mükemmel Uyumlu Katman
PD	:	Parabolik Denklem
PHY	:	Parabolik Huzme Yöntemi
RKA	:	Radar Kesit Alanı
RKTS	:	Radyo Kapsamı Tahmin Sistemi
SSK	:	Soğurucu Sınır Koşulu
YD	:	Yüzey Dalgaları
YF	:	Yüksek Frekans
Y-YF	:	Yer Yüksek Frekans
ZUPD	:	Zaman Uzayı Parabolik Denklem
ZUSEY	:	Zaman Uzayı Sonlu Elemanlar Yöntemi
ZUSF	:	Zaman Uzayı Sonlu Farklar

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil No:</u>	<u>Sayfa</u>
3.1: ZUSF zaman diyagramı.	19
3.2: İki boyutlu Kartezyen koordinatlarda birim Yee hücresi.	23
4.1: Problem uzayı ve sağ yönlü hareketli pencere.	33
5.1: İdeal ince antenin ZUSF ızgarasında elektrik alanlar uygulanarak uyarılması.	36
5.2: Örnek Gauss modülasyonlu darbe işareti.	37
5.3: 5, 10 ve 15 MHz frekansta Gauss işaretinin zaman uzayı ve frekans uzayı genlik spektrumları.	38
5.4: 5 MHz frekansta E_x , E_y ve H_z alan bileşenlerinin üç farklı pencere boyutunda (PB= 1.00, 0.75 ve 0.50) hareketli pencere için yol kaybı grafiği.	40
5.5: 10 MHz frekansta E_x , E_y ve H_z alan bileşenlerinin üç farklı pencere boyutunda (PB= 1.00, 0.75 ve 0.50) hareketli pencere için yol kaybı grafiği.	41
5.6: 5 MHz frekansta E_x , E_y ve H_z alan bileşenlerinin üç farklı pencere boyutunda (PB= 1.00, 0.75 ve 0.50) hareketli pencere için yol kaybı grafiği.	42
5.7: 5 MHz frekansında E_x , E_y ve H_z alan bileşenlerinin üç farklı pencere boyutunda (PB= 1.00, 0.75 ve 0.50) hareketli pencere için yol kaybı grafiği.	43
5.8: 10 MHz frekansında E_x , E_y ve H_z alan bileşenlerinin üç farklı pencere boyutunda (PB= 1.00, 0.75 ve 0.50) hareketli pencere için yol kaybı grafiği.	45
5.9: 15 MHz frekansında E_x , E_y ve H_z alan bileşenlerinin üç farklı pencere boyutunda (PB= 1.00, 0.75 ve 0.50) hareketli pencere için yol kaybı grafiği.	46
5.10: 5 MHz frekansta E_x , E_y ve H_z alan bileşenlerinin üç farklı pencere boyutunda (PB= 1.00, 0.75 ve 0.50) hareketli pencere için zaman uzayı gözlemleri.	48

5.11:	10 MHz frekansta E_x , E_y ve H_z alan bileşenlerinin üç farklı pencere boyutunda (PB= 1.00, 0.75 ve 0.50) hareketli pencere için zaman uzayı gözlemleri.	49
5.12:	15 MHz frekansta E_x , E_y ve H_z alan bileşenlerinin üç farklı pencere boyutunda (PB= 1.00, 0.75 ve 0.50) hareketli pencere için zaman uzayı gözlemleri.	50
5.13:	Problem uzayı ve sola hareket eden pencere.	51
5.14:	5 MHz frekansta E_x , E_y ve H_z bileşenlerinin $0.5 \times \Delta L$ pencere boyutunda sola hareket eden hareketli pencere için yol kaybı grafiği.	52
5.15:	5 MHz frekansta E_x , E_y ve H_z bileşenlerinin $0.5 \times \Delta L$ pencere boyutunda hareketli pencere için monostatik anten üzerindeki zaman uzayı gözlemleri.	54
5.16:	5 MHz frekansta $E_x(t)$ bileşeninin $0.5 \times \Delta L$ pencere boyutunda hareketli pencere için alan dağılımları.	55

TABLÖLAR DİZİNİ

<u>Tablo No:</u>	<u>Sayfa</u>
5.1: Problem uzayı parametreleri.	34
5.2: Standart ZUSF ile HP-ZUSF hafıza ihtiyacı ve hesap zamanı karşılaştırması.	57

1. GİRİŞ

Uluslararası Telekomünikasyon Birliği tarafından yayınlanan standart radar bandları arasında 3 – 30 MHz band aralığı Yüksek Frekans (High Frequency, HF) bandı olarak sınıflandırılmaktadır. Radar frekansları günümüzde mikrodalga frekansları ile eşanlamlı olarak da kullanılıyor olmasına karşın, daha düşük frekans bandında olan Yüksek Frekans (YF) radarları geçmişten günümüze kadar birçok önemli alanda kullanılmıştır.

Düşük frekanslarda kullanılan radarlar yoğun frekans uzayı, sınırlı band genişliği, yüksek gürültülü ortam vb. birçok problemle karşı karşıya kalmaktadır. İlk radarlar YF bandında yapılmış olup iyonosfer yüksekliğinin hesaplanmasında kullanılmıştır. 1920’li yılların ortalarında iyonosfer yüksekliği ölçümü yapmak için Appleton Frekans Modülasyonlu Sürekli Dalga, FMSD (Frequency Modulated Continuous Wave, FM-CW) radarlar kullanırken Breit ve Truve Darbeli (Pulsed) radarlar kullanmıştır. Bunların yanında tarihte ilk askeri radar sistemi de 1938 yılında İngiltere’de uçakların tespiti amacı ile YF bandında yapılmıştır. O yıllarda yapılan bu gözetleme radarları İngiltere’ye, Alman uçaklarına karşı, ülke savunması açısından çok önemli katkılar sağlamıştır. Bu radarların YF bandında geliştirilmesi 1938’lerde alternatif başka bir frekansta teknoloji olmamasındandır. II. Dünya Savaşının başlarında radar frekansları 200 MHz ve üstü frekanslara ulaşarak, mikrodalga frekansları başarılı bir şekilde kullanılmıştır [Skolnik and Headrick, 1974].

1.1. Tezin Amacı ve İçeriği

YF bandı radarlar günümüzde birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Dalga boyu büyük olan bu radarların konumlandırılacağı alan performans etkisi bakımından büyük önem taşımaktadır. Modelleme ve benzetim uygulamaları YF radarların konumları ve sonuçlarında oluşacak yol kayıpları hakkında kullanıcılara bilgiler vermektedir. Bu sayede az maliyetli etkin bir çözüm oluşturulabilmektedir.

YF bandında dalga boyunun büyük olması bu tür benzetimleri bilgisayarlardaki bellek ihtiyacının fazla olması nedeniyle zorlaştırmaktadır. Bu

zorluğun üstesinden gelebilmek için çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Bu tez çalışmasında da kullanılacak olan Hareketli Pencere Zaman Uzayı Sonlu Farklar (HP-ZUSF) yöntemi bu yöntemler arasında zaman uzayı çalışan bir yöntemdir.

Bu tez kapsamında, öncelikle ikinci bölümde HF radar türleri ve bu türlerin çeşitli problemler için yapılmış benzetim çalışmaları anlatılmıştır. Üçüncü bölümde, ZUSF hakkında temel bilgiler verilmiş ve Maxwell denklemlerinden yararlanarak Kartezyen koordinatlarda iki boyutlu kayıplı güncelleme denklemleri, sayısal dispersiyon, sayısal kararlılık, soğurucu sınır koşulları hakkında bilgiler verilmiştir. Dördüncü bölümde HP-ZUSF yöntemi hakkında ve yöntemin uygulanması hakkında ve karar algoritması oluşturulması hakkında geniş bilgiler verilmiştir. Beşinci ve son bölümde ise iki farklı anten konumu için HP-ZUSF yöntemi çözümü ile standart ZUSF yöntemi çözümü karşılaştırılmış ve elde edilen sonuçlar ile ilgili yorumlar ve gelecek önerileri konu başlıkları altında anlatılmıştır.

2. YÜKSEK FREKANS RADARLAR

YF radarları günümüzde mikrodalga radarlar kadar yaygın kullanılmamasına karşın kullanım alanları bakımından hala önemli konumdadırlar. Bu radarların düşük frekansta olması yayılım kayıplarını azaltmakta ve bu sayede ufuk ötesi bölgeler hakkında bilgiler edinilebilmektedir. Son zamanlarda sınır güvenliği sorunları ve okyanuslarda meydana gelen doğal afetler, YF radarlarının önemini arttırmaktadır.

YF radarları gelişen teknoloji ile birlikte temelde Yer ve Deniz YF radarları olmak üzere iki ana sınıfta incelenebilirler.

2.1. Yer Yüksek Frekans Radarları

Yer YF (Y-YF) radarları düşük frekansta yayılım yapmaları nedeniyle uzun menzilde kullanılabilmektedir. Bu sayede ufuk ötesinde yüzlerce kilometrelik uzaklıklardan hedef algılaması yapabilecek yetenektedirler. Sınır güvenliğinde ufuk ötesinin gerçek zamanlı olarak kontrol edilebilmesi ülke güvenliği açısından hayati önem taşımaktadır. Savunma sistemlerinin yanında Y-YF radarları mayın, sığınak vb. derinlerde gömülü nesnelerin algılanmasında da kullanılmaktadır [Sevgi, 2001].

2.1.1. Yer Yüksek Frekans Radarları Modelleme ve Benzetimi

Y-YF radarlarının gerçek zamanlı modellenmesi son yıllara kadar bilgisayar sistemlerinin yeterli kapasitede olmaması nedeniyle pek mümkün olmamıştır. Modelleme ve benzetim olmaksızın geliştirilen radar sistemlerinden ise yeterli performansın alınamayacağı bir gerçektir.

Son yıllarda bilgisayar sistemlerinde meydana gelen önemli gelişmeler sayesinde Y-YF radarları modellenebilmektedir. Fakat bu radarların düşük frekansta çalışması ve modellenmesi gereken uzayın büyüklüğü nedeniyle çok uzun hesap zamanına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu zamanın azaltılması için çalışmalar devam etmektedir.

Y-YF radarları çeşitli yöntemler kullanılarak modellenebilir. Bunlar arasında

- İletim Hatları Yöntemi – Dalga Paketi, İHY-DP (Transmission Line Method, TLM-WP),
- Bölünmüş Adımlı Parabolik Denklemler, BAPD (Split Step Parabolic Equations, SSPE) yöntemi,
- Işın Tübü (Ray Tube) yöntemi,
- Momentler yöntemi (Method of Moments, MoM),
- Zaman Uzayı Sonlu Farklar, ZUSF (Finite Difference Time Domain, FDTD) yöntemi,
- Hareketli Pencere ZUSF (HP-ZUSF) yöntemi

sayılabilir. ZUSF ve HP-ZUSF bu yöntemler arasında zaman uzayında çözüm yapan ve en yaygın kullanılan yöntemler olarak karşımıza çıkmaktadırlar.

Y-YF radarı modellenmesi için HP-ZUSF yönteminin kullanıldığı ilk bilimsel çalışma Fiedel tarafından yapılmıştır [Fidel et al., 1994]. Burada bir boyutta uzun menzilli problem standart ZUSF yöntemi ve Asimptotik Işın tekniğinin hibrit birleşimi ile HP-ZUSF yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Problem uzayı ise Gauss kaynaklı ve 1000 darbe genişliğindedir. Uzun menzilli problem uzaylarının ZUSF yöntemi ile çözümünde karşılaşılan en büyük problem dispersiyon hatalarının kümülatif olarak artmasıdır. Fakat HP-ZUSF yöntemi, problem alanını lokal hücrelere ayırmaya müsaade ettiğinden dispersiyon hataları azalmaktadır. HP-ZUSF yöntemi ile hesaplanan darbe hızları, sayısal grup hızı ve Gauss darbesinde meydana gelen genlik değişimleri analitik yöntemle hesaplanan değerlerle karşılaştırılmıştır. Sonuçların tutarlı olduğu gözlenmiştir [Fidel et al., 1994].

Bir diğer çalışmada örnek bir boyutlu problem olarak Gauss darbesinin zaman uzayında mesafeye göre darbe yayılımı darbe genliğinin mesafeye değişimi kapsamında incelenmiştir. Burada Maxwell denklemlerinin, HP-ZUSF yönteminde kullanılan denklemlere dönüşümü (güncelleme denklemleri) hem Euler yöntemi yaklaşımı ile ve hem de Lagrange yöntemi yaklaşımı ile sağlanmıştır. Bu iki dönüştürme yöntemi arasında karşılaştırma yapıldığı takdirde (gerçek sonuçlar karşılaştırma ölçüsü olarak değerlendirildiği bir ortam) Lagrange formülasyonu yaklaşımının gerçek değerlere çok daha yakın sonuç verdiği gözlenmiştir. Burada problem uzayını sınırlandırmak için birinci mertebeden doğruluklu Mur türü Soğurucu Sınır Koşulu (SSK) kullanılmıştır [Fiedel et al., 1997].

İlk iki boyutlu HP-ZUSF yöntemi ile, YF bandında Mükemmel Uyumlu Katman, MUK (Perfectly Matched Layer, PML) türü SSK ile sonlandırılmış problem uzayı içerisinde bir Gauss darbesinin yayılımı incelenmiştir. Bu yöntem kullanılarak yüzey kayıpları, yeryüzü değişimlerinin darbe yayılımına etkileri ve yüzey pürüzlüğü etkisi modellenmiştir. HP-ZUSF sonuçları problem uzayında yayılan dalgaların elektrik alan genliğinin yayılım katsayısına oranı bakımından İHY-DP (TLM-WP) tekniği ve BAPD (SSPE) yöntemi ile karşılaştırılmıştır. Sonuçların birbiriyle örtüştüğü gözlenmiştir [Akleman and Sevgi, 2000a]. Bu tutarlı sonuçlar, BAPD (SSPE) yöntemi ile çözümlenmesi mümkün olan bir problemin HP-ZUSF yöntemiyle aynı doğrulukta çözümlenmesinin mümkün olduğunu göstermiştir. BAPD (SSPE) yöntemi bir frekans uzayı çözüm yöntemi olduğundan, geniş bantlı problemlerde birçok kez farklı frekanslar için uygulanmasını gerektirmektedir. Buna karşın HP-ZUSF yöntemi zaman uzayında olduğundan bir kez çalıştırma ile (single-run) probleme uygulandığı takdirde geniş bir frekans spektrum çözümü elde edilebilmektedir [Akleman and Sevgi, 2000b].

HP-ZUSF yöntemi bir yer dalgası yayılımı probleminde yer dalgalarını oluşturan üç bileşen olan; direk giden dalgaları, yüzeyden yansıyan dalgaları ve yüzey dalgalarını kapsayacak şekilde çözüm üretebilir. Böylece yapılan modellemelerin sonucunda alan dağılımlarının, BAPD (SSPE) sonuçlarla karşılaştırıldığı takdirde tutarlı olması yöntemin güvenilirliğini üst düzeye çıkarmaktadır [Akleman and Sevgi, 2000c].

Yer dalgasının menzile göre alan dağılımlarını iki boyutlu değişimini HP-ZUSF yöntemi ile BAPD (SSPE) yöntemini karşılaştıran bir diğer çalışmada mevcuttur [Sevgi et al., 2002]. Aynı problem için HP-ZUSF yöntemi ile problem uzayı birkaç bin dalga boyuna kadar büyütülebilmektedir [Akleman et al., 2002].

İki boyutlu bir başka çalışmada pürüzlü arazi üzerinden uzun bir problem uzayındaki (100 km) darbe iletimi de incelenmiştir. Kaynak olarak çok geniş band (230 MHz - 9190 MHz) Gauss darbesi kullanılırken SSK olarak yeni bir çeşit olan filtreli MUK kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar ölçümlerle ve Işın Tüpü yöntemi ile karşılaştırılmış ve doğruluğu gözlemlenmiştir [Luebbers et al., 2003a].

Bir alıcı ile verici arasında yüksek frekansta yer dalgası yayılımı iki boyutlu HP-ZUSF yöntemi kullanılarak modellenmiş ve menzil bağımlı yayılım kayıpları

hesaplanmıştır. Hesaplamalar BAPD (SSPE) ve Momentler yöntemi (MoM) ile karşılaştırılmıştır [Sevgi, 2007].

2.1.1.1. Radyo Dalga Yayılımı

Literatürde, engebeli bir arazide ağaçlar ve yaprakların, YF bandındaki radyo dalga yayılımına etkisini inceleyen bir çalışma da mevcuttur. Engebeli arazide yoldan kaynaklanan elektrik alan kaybı ölçüm değerleri HP-ZUSF yöntemi kullanılarak elde edilmiş verilerle karşılaştırılmış ve sonuçların tutarlılığı gözlemlenmiştir. [Wu et al., 2004].

Bir diğer çalışmada engebeli yüzey üzerindeki radyo dalga yayılımı HP-ZUSF yöntemi ile iki boyutlu modellenmiştir. Sonuçlar bir diğer sayısal yöntem olan Radyo Kapsamı Tahmin Sistemi, RKTS (Radio Cover Prediction System, SPRAD) ile menzil yol kayıpları bakımından karşılaştırılmış ve uyumlu olduğu gözlenmiştir. HP-ZUSF modelinde SSK olarak pencerenin alt üst ve sol taraflarında MUK kullanılırken, sol tarafında herhangi bir SSK kullanılmamıştır. Bunun nedeni dalga yayılımının uzayda sağ tarafa doğru olması ve hareketli pencerenin onu daima takip etmesidir [Batista et al., 2011]. Bu çalışmanın benzeri olarak HP-ZUSF yönteminde kullanılan ZUSF yöntemi yerine Koşulsuz Kararlı Değişken Yönlü Dâhili, KK-DYD ZUSF (Unconditionally Stable Alternating Direction Implicit, ADI-FDTD) yöntemi kullanılmış ve böylece hesaplama süresi kısaltılmıştır [Batista and Rego, 2012].

2.1.1.2. Kablosuz Haberleşme İçin Yayılım Kaybı Hesabı

HP-ZUSF yöntemi kablosuz haberleşme uygulamalarında yol kayıplarını hesaplamak için kullanılmıştır. Problemlerde kırsal ve kentsel bölgelerdeki alan dağılımları incelenmiştir. Kentsel bölgede bulunan binaların kablosuz haberleşmeye etkileri, bu binaların yapı malzemelerinin etkileri, binalar arasındaki mesafenin etkileri ve bina boylarındaki değişimin etkileri ayrıntılı olarak incelenmiştir. Elektrik alan yayılımındaki değişimler HP-ZUSF yöntemi ile BAPD (SSPE) yöntemi arasında karşılaştırılmıştır. Bu çözümde 935 dalga boyunda uzun menzil çözümü hatasız yapılabilmektedir [Akleman et al., 2002].

Ölçüm sonuçları ile karşılaştırma bakımından kablosuz haberleşme uygulamalarında Gauss darbesinin engebeli arazilerde uzun menzilli yol kayıpları HP-ZUSF yöntemi ile iki boyutlu olarak modellenmiştir. Elde edilen sonuçlar, Işın Tüpü yöntemi sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Hareketli pencerenin çevresi basit filtre kullanılarak oluşturulmuş yeni bir SSK ile kaplanmıştır. Kullanılan yöntemler ile ölçüm sonuçlarının tutarlı olduğu gözlenmiştir [Luebbbers et al., 2003b].

Bir başka çalışmada kablosuz yeryüzü algılayıcı ağ sistemi (ground sensor network)'nde kullanılan antenler arasındaki yol kaybı HP-ZUSF yöntemi kullanılarak hesaplanmıştır. Engelibeli arazide yerleştirilen antenlerin yeryüzünden yüksekliğine göre yol kayıpları karşılaştırılmış ve anten yüksekliği ile yol kaybının ters orantılı olduğu gözlenmiştir. Buna göre arazinin engebeleri arttıkça yol kaybı da doğru orantılı olarak artmaktadır [Ohs et al., 2009].

2.1.1.3. Çok Düşük Frekans ve Düşük Frekans Problemleri

Dünya yüzeyi üzerindeki Çok Düşük Frekans (Very Low Frequency, VLF) ve Düşük Frekans (Low Frequency, LF) yayılım hesabı problemleri standart ZUSF yöntemi ile incelenmek istenildiği takdirde hesaplama uzayının büyük olması ve buna bağlı dispersiyon hataları nedeni ile hesaplama zorluğuna sebep olmaktadır. Standart ZUSF yerine HP-ZUSF yöntemi kullanılarak büyük olan bu hesap uzayı alt bölümlere ayrılarak küçültülmüş ve dispersiyon hataları minimuma indirilmiştir. Sonuçlar dalga kılavuzu yöntemiyle karşılaştırılmış ve tutarlı oldukları gözlenmiştir [Thevenot et al., 1999].

Çok Düşük Frekans ve Düşük Frekans radyo dalgalarının iyonosferdeki yayılımları iki boyutlu HP-ZUSF yöntemi ile modellenmiş ve menzile göre elektrik alan dağılımları, dalga kılavuzu yöntemi karşılaştırılmıştır. Alan dağılımlarının gece ve gündüz zamanında değişimleri iki farklı durum kullanılarak gösterilmiş ve bu iki durum karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmalar sonucunda doğruluğun hesaplama adım aralığına bağlı olarak değiştiği ve adım aralığı azaldıkça doğruluğun arttığı gözlenmiştir [Berenger, 2002].

Dünya üzerindeki çok düşük frekans ve düşük frekans radyo dalga yayılımının modellendiği çalışmada, menzile göre elektrik alan dağılımı incelenmiş ve diğer çalışmaya benzer olarak sonuçlar dalga kılavuzu yöntemi ile karşılaştırılmıştır.

Yeryüzü engebelerinin HP-ZUSF yöntemi ile kolayca modellenebildiği problem üzerinde gösterilmiştir [Berenger, 2006].

2.1.1.4. Lineer Olmayan Ortamlar

Lineer olmayan ortamlarda da HP-ZUSF yöntemi başarılı sonuçlar vermektedir. Değişken boyutlu hareketli pencere kullanımı kapsamında kayıplı optik ortamda darbe yayılımı incelenmiş ve elektrik alanın menzile göre değişimi gözlenmiştir. Standart ZUSF yöntemi yerine HP-ZUSF yöntemi kullanılması ile birlikte, hesaplama zamanının uzunluğu nedeniyle paralelleştirme yöntemi kullanılmaktadır [Bourgeade, 2002].

2.2. Deniz Yüksek Frekans Radarları

Deniz yüzeyinde oluşan yüzey akıntıları denizcilik uygulamaları açısından büyük önem taşımaktadır. Yüzey akıntılarının atmosferdeki değişimlerden direkt etkilenmesi, bu akıntıların gerçek zamanlı olarak hesaplanmasını zorunlu hale getirmiştir. Günümüzde deniz yüzeyindeki değişimler deniz şamandıraları kullanılarak takip edilebilmektedir. Deniz şamandıraları ve uydu tabanlı sistemler bir takım bilgiler vermesine karşın, yüzey dalgaları hakkında yeteri kadar bilgi toplanamamaktadır.

Deniz Yüksek Frekans (D-YF) radarları denizlerdeki yüzey akıntılarının hızlarını, yönlerini, dalga yüksekliklerini ve rüzgâr hızı ile rüzgâr yönlerini, gerçek zamanlı (real time) olarak, her türlü hava şartlarında gözlenmesine olanak sağlamaktadır.

Sahillere konumlandırılan D-YF radarları YF bandında yer ve gök dalga yayılımı kullanarak ufuk ötesinde birkaç yüz kilometrelik menzil hakkında bilgi verebilmektedir [Boris et al., 1994].

2.2.1. Deniz Yüksek Frekans Radarları Modelleme ve Benzetimi

Bu konuda literatürde karşımıza çıkan ilk iki boyutlu HP-ZUSF yöntemi kullanılmış çalışmada, Gauss darbesi türü bir kaynağın oluşturduğu elektromanyetik

dalga'nın elektrik alan bileşeninin denizdeki yayılımı ile karadaki yayılımı ve denizden-karaya-karadan-denize geçişlerdeki yayılımında meydana gelen değişimler incelenmiştir. Hareketli uzayın yüzey saçıcıları hariç alt yüzeyinde empedans sınır koşullu uygulanırken, diğer üç yüzeyde SSK olarak MUK kullanılmıştır. Hesaplanan yayılım kaybı, BAPD (SSPE) ve analitik yaklaşım kullanılarak elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. [Akleman and Sevgi, 2003].

2.2.2. Radar Kesit Alanı Hesabı

Doktora düzeyindeki bir çalışmada Yüzey Dalgaları (YD) ZUSF ile modellenmiş ve deniz yüzeyi üzerindeki cisimlerin Radar Kesit Alanı (RKA) hesaplanmıştır. YD için özel yakın alan uzak alan dönüşümleri çıkartılmış ve yine YD için yeni bir RKA yorumu yapılarak uygulama sonuçları verilmiştir. [Başaran, 2008].

2.3. Diğer Uygulama Alanları

HP-ZUSF yöntemi YF radar uygulamalarının dışında birçok farklı alanda kullanılmış ve başarılı sonuçlar elde edilmiştir.

2.3.1. Tünellerde HP ZUSF Uygulamaları

HP-ZUSF yönteminin kullanıldığı bir diğer uygulama tünel içinde elektromanyetik dalga yayılımının incelenmesidir. Elektromanyetik Darbe, EMD (Electromagnetic Pulse, EMP) yayılımının büyük ölçekli bir uygulaması olarak tünel içinde uzun menzilde yayılımı modellenmiştir. Menzil uzunluğu ve problem uzayının çok büyük olması nedeniyle paralelleştirilmiş HP-ZUSF algoritması kullanılmıştır. Bu uygulamada SSK olarak Konvolüsyonel MUK (Convolution PML) kullanılmıştır. Elde edilen veriler standart ZUSF yöntemi ile karşılaştırılmış ve uyumlu olduğu gözlenmiştir. Paralel HP-ZUSF yönteminin kullanıldığı ve tünellerde elektromanyetik dalga yayılımının modellendiği literatürdeki ilk uygulamadır [Xiaoshuan Y. et al., 2009].

2.3.2. Yüksek Mertebeden HP ZUSF

HP-ZUSF yöntemi genellikle standart ZUSF yöntemi kullanılarak yapılan bir çözümdür. Standart ZUSF yöntemi konum ve zamanda ikinci mertebeden doğruluklu çözüm sunmaktadır. Bunun yanında literatürde ZUSF yönteminin yüksek doğruluk mertebesi kullanılarak gerçekleştirilmiş versiyonları da bulunmaktadır. Dalga kılavuzu içerisindeki dalga yayılımını inceleyen bir çalışmada HP-ZUSF yöntemi dördüncü merteben doğruluklu ZUSF kullanılarak uygulanmıştır. Buna göre faza duyarlı ikinci harmonik oluşumu problemi incelenmiş ve dalga kılavuzu boyunca ikinci harmonikteki güç değişimi bakımından, ikinci mertebe doğruluklu çözüm ile dördüncü mertebe doğruluklu çözüm karşılaştırılmıştır [Alsunaïdi and Al-Hajiri, 2009a]. Benzer şekilde aynı problem ikinci mertebeden lineer olmayan ZUSF algoritması kullanılarak da gerçekleştirilmiştir [Alsunaïdi and Al-Hajiri, 2009b].

2.3.3. Plazma İçerisinde HP ZUSF Uygulamaları

HP-ZUSF yönteminin karmaşık ortamlar için uygulamaları da bulunmaktadır. Boşluk veya kayıplı hava ortamlarının yanında plazma (dispersif) ortamı HP-ZUSF yönteminin kullanıldığı bir diğer ortamdır. İki boyutlu HP-ZUSF yöntemiyle elektromanyetik dalga yayılımının modellendiği bir çalışmada iletim katsayısı genlik bakımından karşılaştırılmıştır. Ölçüm sonuçları, standart ZUSF yöntemi ve HP-ZUSF yöntemi arasında yapılan bu karşılaştırma sonucunda elde edilen değerlerin uyumlu olduğu gözlemlenmiştir [Liu J. et al., 2010]. Benzer bir çalışmada plazma kılıfı içerisindeki dalga yayılımı modellenmiş ve yine standart ZUSF, ölçüm sonuçları ve HP-ZUSF yöntemleri ile karşılaştırılmıştır. Hareketli pencere etrafında SSK olarak MUK kullanılmıştır [Liu J. et al., 2011].

2.3.4. Akustik Ortamda HP ZUSF Uygulamaları

Homojen olmayan bir ortamda elektromanyetik dalga yayılım problemi HP-ZUSF yöntemi ile incelenmiş ve Lagrange formülasyonu kullanılarak, akustik dalga denklemleri hareketli pencere yöntemi denklemlerine dönüştürülmüştür. Bu dönüşümün sonucunda standart HP-ZUSF çözümüne göre, dispersiyon hataları

bakımından iyileşme olduğu gözlenmiştir. Problem uzayı birinci mertebeden doğruluklu Mur türü SSK ile sonlandırılmıştır. Problem uzayında bir hareketli dalga paketi (darbe huzmesi) yayılımı HP-ZUSF yöntemi ile üç boyutlu olarak modellenmiş ve ölçüm sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Sonuçların birbirleriyle tutarlı olduğu gözlenmiştir [Pemper et al., 1997].

2.3.5. Ticari Yazılımlar

HP-ZUSF yöntemi ticari bir firma olarak faaliyet gösteren REMCOM firmasının geliştirmiş olduğu XFDTD programı tarafından elektromanyetik problemlerin çözümünde kullanılmaktadır. Yayılım kaybı hesabı, radyo dalgası yayılımı gibi problemlerin çözümleri bu program ile yapılabilmektedir [Web 1].

Bir XFDTD ve HP-ZUSF uygulaması olarak radyo dalga yayılımı problemi iki boyutta 100 MHz frekansında modellenmiştir. Problem uzayının alt bölgesi kayıplı ortamdır ve bu yüzeylerden kaynaklanan yol kayıpları hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar XFDTD ticari yazılımı ile karşılaştırılmıştır [Belmonte et al., 2008].

2.3.6. Dalga Kılavuzu İçerisinde Radyo Dalga Yayılımı

Üç boyutlu dalga paketlerinin dalga kılavuzu içerisinde yayılımının modellendiği ve HP-ZUSF yönteminin kullanıldığı bir çalışmada problem uzayı Mur türü SSK ile sonlandırılmıştır. Bu modellemede uzun menzil (10^3 darbe uzunluğu) çözümünde HP-ZUSF yönteminden elde edilen sonuçlarla deneysel sonuçların uyumlu olduğu gözlenmiştir [Pemper et al., 2000]. Bu çalışmaya benzer bir diğer çalışmada aynı problem için HP-ZUSF yönteminde kullanılan pencere boyutlarının sonuca etkisi incelenmiştir. Buna göre geniş pencere kullanılarak yapılan benzetimin dar pencereye göre değerlerle daha iyi örtüştüğü gözlemlenmiştir [Pemper, 2001].

Üç boyutlu elektromanyetik darbe modellemesinde uzun menzil çözümleri için HP-ZUSF yöntemi kullanılması hafıza ihtiyacı bakımından daha da gereklidir. Dikdörtgen bir dalga kılavuzu içerisindeki elektromanyetik darbesinin yayılımın üç boyutlu incelendiği çalışmada standart ZUSF ile HP-ZUSF yöntemleri karşılaştırılmıştır. z eksenı boyunca elektrik alan genlik değişiminin iki yöntem için de aynı olduğu gözlemlenmiştir. Bununla beraber standart ZUSF yönteminde z

ekseni uzatıldıkça benzetim süresi, uzunluğun karesiyle orantılı olarak artarken, HP-ZUSF yönteminde bu sürenin lineer olarak arttığı gözlenmiştir [Li and Wang, 2010].

2.3.7. Yıldırım ve Modellenmesi

Bir doğa olayı olan yıldırımın elektromanyetik bir darbe olarak değerlendirilerek modellendiği ve bir boyutlu HP-ZUSF yönteminin kullanıldığı bir çalışmada 5000 km gibi çok uzun bir menzil için çözüm gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada HP-ZUSF uzayının ızgara aralıklarındaki değişimlere göre dispersiyon hatalarındaki değişim 2000 km ve 5000 km menzil için incelenmiştir. Ayrıca aynı mesafeler için iyonosferdeki elektrik alan dağılımı gündüz ve gece olmak üzere iki farklı durum için incelenmiştir [Berenger, 2005].

3. ZAMAN UZAYI SONLU FARKLAR YÖNTEMİ

Günümüzde bilgisayar teknolojisinin gelişmesi ile birlikte elektromanyetik problemlerin çözümünde sayısal (nümerik) yöntemler yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Literatüre bakıldığında Zaman Uzay Sonlu Farklar, ZUSF (Finite Difference Time Domain, FDTD) yöntemi, sayısal yöntemler arasında en yaygın olarak kullanılan yöntem olarak öne çıkmaktadır. Bu yöntem ilk olarak 1966 yılında Kane S. Yee tarafından Maxwell denklemlerine uygulanmıştır [Yee, 1966].

ZUSF yöntemi diferansiyel formda bulunan Maxwell denklemlerinin zaman ve konum uzayında ayrıklaştırılarak çözüldüğü, zamanda iteratif sayısal bir yöntemdir. Bu yöntemde diferansiyel denklemlerdeki zaman ve konuma ait türevler yerine geri, merkezi veya ileri farklar vb. sayısal eş değerleri kullanılmaktadır [Yee, 1966].

Standart ZUSF yöntemi zaman ve konumda ikinci mertebeden doğruluğa sahip olup, hesaplamaların yapıldığı birim zaman adımı seçilirken “Courant kararlılık kriterine” göre seçilmesi gerekmektedir. Bu kapsamda standart ZUSF yönteminde genlik hatalarını (dissipation errors) yoktur. Bunun yanında geometrik ayrıklaştırma nedeni sayısal çözümde faz hataları (dispersion errors) bulunmaktadır.

ZUSF yöntemi zaman uzayında uygulandığı için algoritmanın tek bir defa (single run) çalıştırılmasıyla frekans uzayında geniş bir bandda çözüm sunmaktadır. Böylece elektromanyetik alan dağılımları ve frekans değerleri kolaylıkla gerçek zamanlı olarak görüntülenebilmektedir.

Standart ZUSF yönteminin avantajları arasında

- Lineer cebir kullanmaması,
- Dürtü cevabını direkt vermesi,
- Lineer olmayan çözümlerin yapılabilmesi,
- Hataları iyi anlaşılmış olduğundan doğruluğu kontrol edilebilir çözüm sunması,

sayılabilir. Bu gibi avantajlarının sonucunda her geçen yıl ZUSF yöntemi ile yapılan araştırmalar kapsamında yayın sayısı artarak devam etmektedir.

Bunun yanında standart ZUSF yönteminin bazı dezavantajları,

- Karmaşık geometriye sahip cisimlerin modellenmesinde kullanılan yöntemlerin cisim geometrisini tam olarak modelleyememesinden kaynaklanan geometrik modelleme hatalarının olması,
- Büyük ölçekli problem çözümleri için yüksek hafızalı bilgisayarların gerekmesi,

gösterilebilir.

3.1. Sonlu Farklar Yöntemi

Sayısal yöntemler temelde “ direkt yöntemler ” (Gauss eliminasyonu, Sayısal integrasyon vb.) ve “ iteratif yöntemler ” (Taylor serisi tabanlı vb.) olmak üzere iki ana başlık altında incelenebilirler. Bu ayrımında ZUSF iteratif yöntemler ana başlığının altında bulunan ve temel dayanağı bilinmeyen büyüklüklerin Taylor serisine açılarak, çeşitli mertebelerden analitik türevlerin sayısal eş değerlerinin kullanılması üzerine kurulu bir yöntemdir.

3.1.1. Bir Boyutta Sonlu Farklar

Diferansiyel denklemlerin çözümünde sonlu farklar yönteminin uygulanması için ilk adım bilinmeyen büyüklüğü temsil eden fonksiyonun ayrıklaştırılmasıdır. Buna göre bir boyutlu $f(x)$ fonksiyonun eşit Δx aralıklarla i ayrık parçalara bölünmesi sonucunda,

$$f(x) = f(x_i) = f(i\Delta x) \quad (3.1)$$

gösterimi kapsamında hareket edilerek sürekli fonksiyonlardan oluşan bir diferansiyel denklem ayrık hale getirilebilir. $f(x)$ fonksiyonu $x = x_i$ civarında Taylor serisine açılırsa

$$\begin{aligned}
f(x) &= \sum_{n=0}^{\infty} \frac{f^n(x_i)}{n!} (x - x_i)^n \\
&= f(x)|_{x=x_i} + f'(x)|_{x=x_i} (x - x_i) \\
&\quad + f''(x)|_{x=x_i} \frac{(x - x_i)^2}{2!} + \dots
\end{aligned} \tag{3.2}$$

iken $x - x_i = a$ seçilmek üzere $x = x_i + a$ olarak

$$f(x_i + a) = f(x) + f'(x_i)a + \frac{a^2}{2!}f''(x_i) + \dots \tag{3.3}$$

biçiminde ifade edilebilir. Burada özel olarak $x = x_i$ noktalarında hesap yapıldığı göz önüne alınırsa

$$f(x + a) = f(x) + af'(x) + f''(x)\frac{a^2}{2!} + \frac{a^3}{3!}f'''(x) + \dots \tag{3.4}$$

olmak üzere

$$\frac{f(x + a) - f(x)}{a} = f'(x) + \frac{a}{2!}f''(x) + \frac{a^2}{3!}f'''(x) + \dots \tag{3.5}$$

bulunur. Bu denklemde hata a 'nın limit sıfır değerine gitmesiyle azaltılabilir. Denklemin sağ tarafındaki ikinci terim olan

$$\frac{a}{2!}f''(x) \tag{3.3}$$

terimi a değerinin birinci kuvveti ile sıfıra yaklaşmaktadır. Bu tür yaklaşım ileri fark (forward difference) olarak bilinir.

Benzer şekilde geri fark (backward difference) yaklaşımı ise

$$f(x - a) = f(x) - af'(x) + f''(x)\frac{a^2}{2!} - \frac{a^3}{3!}f'''(x) + \dots \tag{3.6}$$

$$\frac{f(x-a) - f(x)}{a} = f'(x) - \frac{a}{2!}f''(x) + \dots \quad (3.7)$$

olarak gösterilir. Denklemlerin taraf tarafa toplanmasıyla da merkezi fark (central difference) olarak bilinen ve bu tezde kullanılacak yaklaşım

$$\frac{f(x+a) - f(x-a)}{2a} = f'(x) + \frac{a^2}{3!}f'''(x) + \dots \quad (3.8)$$

olarak bulunur. Benzer şekilde ikinci mertebeden türevler için, merkezi fark yaklaşım

$$\frac{f(x+a) - 2f(x) + f(x-a)}{a^2} = f''(x) + \frac{a^2}{12}f''''(x) + \dots \quad (3.9)$$

olarak bulunur. Bu durumda $O(a^2)$ ikinci mertebeden hata kabulü ile yukarıdaki ifadeler

$$\begin{aligned} \frac{f(x+a) - f(x-a)}{2a} &= f'(x) + O(a^2) \Rightarrow f'(x) \\ &\cong \frac{f(x+a) - f(x-a)}{2a} \end{aligned} \quad (3.10)$$

$$\begin{aligned} \frac{f(x+a) - 2f(x) + f(x-a)}{a^2} &= f''(x) + O(a^2) \Rightarrow f''(x) \\ &\cong \frac{f(x+a) - 2f(x) + f(x-a)}{a^2} \end{aligned}$$

halini alır.

3.2. Maxwell Denklemleri ve ZUSF

Elektromanyetik bir olay Maxwell denklemleri kullanılarak üç boyutlu konum ve tek boyutlu zamanda modellenebilir. Maxwell denklemlerinde bulunan türevler, zaman ve konum bağımlılığı fark etmeksizin, ZUSF yöntemi ile düzenlenerek

zamanda iteratif bir çözüm elde edilebilmektedir. Kayıpsız ve kaynaklı basit ortamda Maxwell denklemleri

$$\begin{aligned}\nabla \times \mathbf{E}(\mathbf{r}, t) &= -\frac{\partial}{\partial t} \mathbf{B}(\mathbf{r}, t) \\ \nabla \times \mathbf{H}(\mathbf{r}, t) &= \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{D}(\mathbf{r}, t) + \mathbf{J}(\mathbf{r}, t)\end{aligned}\tag{3.11}$$

$$\nabla \times \mathbf{D}(\mathbf{r}, t) = 0$$

$$\nabla \times \mathbf{B}(\mathbf{r}, t) = 0$$

olarak verilir. Bu denklemler sırasıyla Faraday, Ampere, Elektrik Alan Gauss ve Manyetik Alan Gauss kanunları olarak bilinir. Burada $\mathbf{E}(\mathbf{r}, t)$ $[V/m]$, $\mathbf{B}(\mathbf{r}, t)$ $[Wb/m^2]$, $\mathbf{D}(\mathbf{r}, t)$ $[C/m^2]$, $\mathbf{H}(\mathbf{r}, t)$ $[A/m]$, $\mathbf{J}(\mathbf{r}, t)$ $[A/m^2]$, değişkenleri sırasıyla elektrik alan, manyetik indüksiyon alanı, yer değiştirme alanı, manyetik alanı ve kaynak akım yoğunluğunu göstermektedir. Bu denklemlerin ZUSF uygulaması için her bir koordinat sisteminde ayrı ayrı düzenlenmesi gerekmektedir. ZUSF algoritması Maxwell denklemlerindeki ilk iki vektörel denklemi kullanılarak oluşturulmaktadır. Çünkü son iki denklem standart ZUSF hücresindeki yerleşimlerinin sonucunda otomatik olarak sağlanmaktadır.

ZUSF yönteminin zamanda iteratif bir yöntem olması nedeniyle ilk etapta Maxwell denklemlerinde zamana bağlı türevler ikinci mertebeden doğruluğa sahip merkezi farklar biçiminde ele alınmaktadır. n tamsayı olarak zaman adımı ve Δt birim zaman aralığı olmak üzere, ZUSF benzetimi için

$$T = n_{toplam} \Delta t\tag{3.12}$$

toplam hesap süresince işlem yapılmaktadır. Buna göre alan bileşenlerinin argümanları

$$f(\mathbf{r}, t) = f(i\Delta\mathbf{r}, n\Delta t) = f|_i^n \quad (3.13)$$

biçiminde gösterildiği takdirde öncelikle n zaman anlarında zaman türevi

$$\nabla \times \mathbf{E}(\mathbf{r})|_i^n + \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{B}(\mathbf{r})|_i^n = 0 \quad (3.14)$$

olmak üzere alınır, merkezi fark yaklaşımıyla

$$\nabla \times \mathbf{E}(\mathbf{r})|_i^n + \left(\frac{\mathbf{B}(\mathbf{r})|_i^{n+\frac{1}{2}} - \mathbf{B}(\mathbf{r})|_i^{n-\frac{1}{2}}}{\Delta t} \right) \cong 0 \quad (3.15)$$

denklemini bulunur. Burada zamanda en ileri bileşen olan $\mathbf{B}(\mathbf{r})|_i^{n+\frac{1}{2}}$ tek bırakılırsa

$$\mathbf{B}(\mathbf{r})|_i^{n+\frac{1}{2}} \cong \mathbf{B}(\mathbf{r})|_i^{n-\frac{1}{2}} - \Delta t [\nabla \times \mathbf{E}(\mathbf{r})|_i^n] \quad (3.16)$$

ZUSF güncelleme denklemini bulunur. Benzer şekilde ikinci Maxwell denkleminde $n + 1/2$ zamanlarında türev alınır

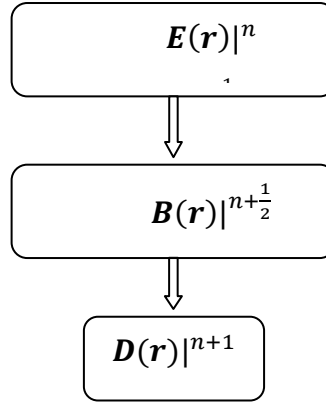
$$\nabla \times \mathbf{H}(\mathbf{r})|_i^{n+\frac{1}{2}} \cong \left(\frac{\mathbf{D}(\mathbf{r})|_i^{n+1} - \mathbf{D}(\mathbf{r})|_i^n}{\Delta t} \right) + \mathbf{J}(\mathbf{r})|_i^{n+\frac{1}{2}} \quad (3.17)$$

denklemini bulunur. Yine zamanda en ileri olan $\mathbf{D}(\mathbf{r})|_i^{n+1}$ bileşeni tek bırakılırsa, ZUSF güncelleme denklemini

$$\mathbf{D}(\mathbf{r})|_i^{n+1} \cong \mathbf{D}(\mathbf{r})|_i^n - \Delta t \left[\mathbf{J}(\mathbf{r})|_i^{n+\frac{1}{2}} - \nabla \times \mathbf{H}(\mathbf{r})|_i^{n+\frac{1}{2}} \right] \quad (3.18)$$

olarak bulunur. Burada görülen $\mathbf{J}(\mathbf{r})|_i^{n+\frac{1}{2}}$ değeri kaynak akım yoğunluğunu gösterir. Bu anlatılanlar kapsamında kayıpsız ortamda elektromanyetik alan bileşenlerinin

ZUSF yöntemi ile zamanda iteratif olarak çözümünü gösteren akış diyagramı aşağıdaki şekilde gösterilebilir.



Şekil 3.1: ZUSF zaman diyagramı.

Özel olarak kayıplı ortamlarda $J(\mathbf{r})|^{n+\frac{1}{2}}$ teriminin kaynak ve iletken ortamlarda indüklenen akım yoğunluklarını göstereceği unutulmamalıdır.

3.3. İki Boyutlu Kartezyen Koordinatlarda Kayıplı Ortamda ZUSF

ZUSF yöntemi türevlerin en basit formları nedeni ile Kartezyen koordinatlarda ele alınmıştır. Buna göre birinci vektörel Maxwell denklemi açılırsa

$$\begin{aligned}\mu \frac{\partial H_x}{\partial t} &= -\frac{\partial E_z}{\partial y} + \frac{\partial E_y}{\partial z} \\ \mu \frac{\partial H_y}{\partial t} &= -\frac{\partial E_x}{\partial z} + \frac{\partial E_z}{\partial x} \\ \mu \frac{\partial H_z}{\partial t} &= \frac{\partial E_x}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial x}\end{aligned}\tag{3.19}$$

olarak bulunurken, ikinci vektörel Maxwell denklemi açılırsa

$$\begin{aligned}
\varepsilon \frac{\partial E_x}{\partial t} &= \frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} - \sigma E_x - J_x \\
\varepsilon \frac{\partial E_y}{\partial t} &= + \frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} - \sigma E_y - J_y \\
\varepsilon \frac{\partial E_z}{\partial t} &= + \frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} - \sigma E_z - J_z
\end{aligned} \tag{3.20}$$

halini alır. Denklemler z yönünde değişim olmadığı kabulü $\partial/\partial z = 0$ iki boyuta indirilir ve yayılım olarak da TE_z modu seçilirse denklemler

$$\begin{aligned}
\mu \frac{\partial H_z}{\partial t} &= \frac{\partial E_x}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial x} \\
\varepsilon \frac{\partial E_x}{\partial t} &= \frac{\partial H_z}{\partial y} - \sigma E_x - J_x \\
\varepsilon \frac{\partial E_y}{\partial t} &= - \frac{\partial H_z}{\partial x} - \sigma E_y - J_y
\end{aligned} \tag{3.21}$$

olarak elde edilir.

Buna göre iki boyutta birinci Maxwell denklemi

$$\frac{\partial H_z}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left[\frac{\partial E_x}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial x} \right] \tag{3.22}$$

olarak yazılır. Bu denklem n zaman anlarında ve i ve j konumlarında ayrıklaştırılarak düzenlenirse

$$\left. \frac{\partial H_z}{\partial t} \right|_{i,j}^n = \frac{1}{\mu_{i,j}} \left[\left. \frac{\partial E_x}{\partial y} \right|_{i,j}^n - \left. \frac{\partial E_y}{\partial x} \right|_{i,j}^n \right] \tag{3.23}$$

denklemini elde edilir. Bu denklemdeki zaman ve konum türevleri merkezi farklar ile değerlendirilirse

$$\frac{H_z|_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - H_z|_{i,j}^{n-\frac{1}{2}}}{\Delta t} \cong \frac{1}{\mu_{i,j}} \left[\frac{E_x|_{i,j+\frac{1}{2}}^n - E_x|_{i,j-\frac{1}{2}}^n}{\Delta y} - \frac{E_y|_{i+\frac{1}{2},j}^n - E_y|_{i-\frac{1}{2},j}^n}{\Delta x} \right] \quad (3.24)$$

halini alır. Buradan zamanda en ileri olan $H_x|_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}$ bileşen denklemin sol tarafına atılarak düzenlenirse, ZUSF güncelleme denklemi

$$H_z|_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} \cong H_z|_{i,j}^{n-\frac{1}{2}} + \frac{1}{\mu_{i,j}} \left[\frac{E_x|_{i,j+\frac{1}{2}}^n - E_x|_{i,j-\frac{1}{2}}^n}{\Delta y} - \frac{E_y|_{i+\frac{1}{2},j}^n - E_y|_{i-\frac{1}{2},j}^n}{\Delta x} \right] \quad (3.25)$$

olarak elde edilir.

İki boyutlu kayıplı ortamlarda E_x bileşeni için Maxwell denklemi

$$\frac{\partial E_x}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \left[\frac{\partial H_z}{\partial y} - \sigma E_x - J_x \right] \quad (3.26)$$

olarak yazılır. Bu denklem n zaman anlarında ve i ve $j + 1/2$ konumlarında ayrıklaştırılarak düzenlenirse

$$\frac{\partial E_x}{\partial t} \Big|_{i,j+\frac{1}{2}}^n = \frac{1}{\varepsilon_{i,j+\frac{1}{2}}} \left[\frac{\partial H_z}{\partial y} \Big|_{i,j+\frac{1}{2}}^n - \sigma_{i,j+\frac{1}{2}} E_x \Big|_{i,j+\frac{1}{2}}^n - J_x \Big|_{i,j+\frac{1}{2}}^n \right] \quad (3.27)$$

elde edilir. Bu denklemdeki zaman ve konum türevleri merkezi farklar ile değerlendirilirse

$$\begin{aligned}
& \frac{E_x|_{i,j+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} - E_x|_{i,j+\frac{1}{2}}^{n-\frac{1}{2}}}{\Delta t} \\
&= \frac{1}{\varepsilon_{i,j+\frac{1}{2}}} \left[\frac{H_z|_{i,j+1}^n - H_z|_{i,j}^n}{\Delta y} - \left(J_x|_{i,j+\frac{1}{2}}^n + \sigma_{i,j+\frac{1}{2}} E_x|_{i,j+\frac{1}{2}}^n \right) \right]
\end{aligned} \tag{3.28}$$

biçiminde elde edilir. Buradan zamanda ileri olan $E_x|_{i,j+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}}$ bileşen denklemin sol tarafına atılarak düzenlenirse, ZUSF güncelleme denklemi

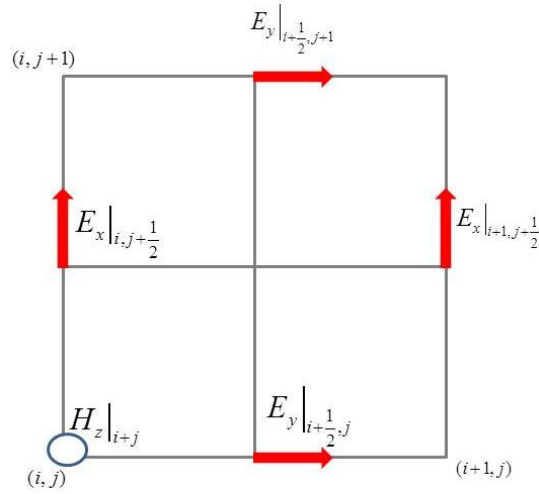
$$\begin{aligned}
E_x|_{i,j+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} &= E_x|_{i,j+\frac{1}{2}}^{n-\frac{1}{2}} \\
&+ \frac{1}{\varepsilon_{i,j+\frac{1}{2}}} \left[\frac{H_z|_{i,j+1}^n - H_z|_{i,j}^n}{\Delta y} - \left(J_x|_{i,j+\frac{1}{2}}^n + \sigma_{i,j+\frac{1}{2}} E_x|_{i,j+\frac{1}{2}}^n \right) \right]
\end{aligned} \tag{3.29}$$

olarak elde edilir. Aynı işlemler E_y bileşenine de uygulanırsa,

$$\begin{aligned}
E_y|_{i+\frac{1}{2},j}^{n+\frac{1}{2}} &= E_y|_{i+\frac{1}{2},j}^{n-\frac{1}{2}} \\
&- \frac{1}{\varepsilon_{i+\frac{1}{2},j}} \left[\frac{H_z|_{i+1,j}^n - H_z|_{i,j}^n}{\Delta x} + \left(J_y|_{i+\frac{1}{2},j}^n + \sigma_{i+\frac{1}{2},j} E_y|_{i+\frac{1}{2},j}^n \right) \right]
\end{aligned} \tag{3.30}$$

elde edilir. Bu işlemler sonucunda iki boyutlu Kartezyen koordinatlarda Maxwell denklemleri için ZUSF güncelleme denklemleri TE_z modu için elde edilmiştir.

Alan bileşenleri ZUSF birim Yee hücresine aşağıdaki şekilde görüldüğü gibi yerleştirilmiştir.



Şekil 3.2: İki boyutlu Kartezyen koordinatlarda birim Yee hücresi.

3.4. Sayısal Dispersiyon

Yee hücresi içinde elektromanyetik dalga faz hızı, boş uzaydaki dalga hızı olan ışık hızından (c) farklı değerler almaktadır. Bunun temel nedeni elektromanyetik dalga bileşenlerinin ızgaralara ayrılmış hesap uzayında ayrık olarak hesaplanamamasıdır. Faz hızında meydana gelen bu değişim sayısal dispersiyona neden olur. Bu değişimler ZUSF algoritmasında faz hatalarına yol açarak, fiziksel olmayan sonuçlar, çoklu saçılmalarda yeterli doğruluğa sahip olmayan faz sıfırlamaları, sahte kırılmalar, sayısal anizotropi vb. gibi istenmeyen sonuçlara neden olmaktadır. Sayısal dispersiyon hatası dalga boyunun değişimine, ızgarada dalga yayılım yönüne, ızgaraya ve ayırıklaştırma türüne göre farklılık göstermektedir. Maxwell denklemleri bakımından iki boyutlu ZUSF sayısal dispersiyon bağıntısı

$$\left[\frac{1}{c\Delta t} \sin\left(\frac{\omega\Delta t}{2}\right) \right]^2 = \left[\frac{1}{\Delta x} \sin\left(\frac{k_x^N \Delta x}{2}\right) \right]^2 + \left[\frac{1}{\Delta y} \sin\left(\frac{k_y^N \Delta y}{2}\right) \right]^2 \quad (3.31)$$

olarak verilir. Burada k_x^N ve k_y^N sayısal dalga vektörünün bileşenlerini, Δx ve Δy sırasıyla x ve y yönünde birim uzunluktaki değişimi, Δt ise birim zamandaki değişimi ifade etmektedir [Aksoy, 2013]. Bu kapsamda iki boyutlu kayıpsız ortamda analitik dispersiyon bağıntısı

$$k^2 = k_x^2 + k_y^2 = \frac{\omega^2}{c^2} \quad (3.32)$$

olarak yazılır. Analitik dispersiyon bağıntısı ile ZUSF sayısal dispersiyon bağıntısının birbirine eşit hale gelmesi Δx , Δy ve Δt değerlerinin sıfıra doğru yaklaşmasıyla mümkün olmaktadır. Bu da zaman ve konumda yüksek hassasiyetteki ZUSF örnekleme ile dispersiyon etkisinin minimize edilmesinin mümkün olduğunu göstermektedir. Diğer taraftan Δx , Δy ve Δt değerleri sıfıra yaklaştıkça benzetim hesap süresi ve hafıza ihtiyacı artış gösterecektir. Özellikle büyük ölçekli problemlerde sayısal dispersiyon etkisi çok kritik önem taşımaktadır. Bu kapsamda ZUSF ile Y-YF veya D-YF problemleri büyük ölçekli olduğundan, HP-ZUSF yöntemi ile bu problem aşılmaktadır.

3.5. Sayısal Kararlılık

Sayısal kararlılık zaman uzayındaki tüm yöntemler için zorunlu bir gereksinimdir. Standart ZUSF çözümünde ayrıklaştırma yapılan uzay ve zaman değerleri kapsamında, çözümün kararlı olabilmesi için Courant-Friedrichs-Lewy (CFL) kararlılık koşulunu sağlaması gerekmektedir. Buna göre iki boyutlu Kartezyen koordinatlarda ZUSF çözümünün kararlı olması için, birim zaman adımı Δt

$$\Delta t \leq \frac{1}{c \sqrt{\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2}}} \quad (3.33)$$

koşulunu sağlanması gerekmektedir. Burada x konumundaki birim değişim Δx , y konumundaki birim değişim Δy 'dir [Aksoy, 2013].

3.6. Soğurucu Sınır Koşulları

ZUSF gerçek elektromanyetik problemlerin çözümünde yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Gerçek hayattaki problemlerin çoğunda elektromanyetik dalga açık uzayda cisimlerle etkileşerek yayılmaktadır. Bu durumda problem uzayı

belirli yönlerde açık olup sonsuza kadar uzanmaktadır. Problem uzayın sonsuza kadar uzaması ilk bakışta ZUSF yöntemiyle çözüme imkân vermemektedir. Çünkü ZUSF yöntemi bu durumda sonsuz bilgisayar kaynaklarına ihtiyaç duyar. Bu tür kısıtlamalardan ötürü gerçek hayattaki sonsuz uzunluktaki problemlerin modellenmesi için belirli bir bölgede kesilen problem uzayında, kesilen bölgeden itibaren Soğurucu Sınır Koşulları, SSK (Absorbing Boundary Condition, ABC) olarak bilinen özel koşullar uygulanmaktadır.

ZUSF problemlerinin sınır koşulu olarak çeşitli SSK türleri kullanılmaktadır. Bu tez çalışmasında HP-ZUSF yöntemiyle yapılan geçmiş çalışmalarda yaygın olarak kullanılan MUR tipi SSK kullanılacaktır.

3.6.1. Tek Yönlü Dalga Denklemi

Belirli bir bölgede sonlandırılan ZUSF problem uzayında, sonlandırılan bölgede herhangi bir SSK kullanılmadığı takdirde, sınırdan istenmeyen yansımalar oluşarak problem çözümünde hatalara neden olmaktadır. Bu yansımaları önlemek için iki yönde dalga yayılımı modelleyen dalga denklemini sağa (ileri) ve sola (geri) giden bileşenlerine ayrılıp, her bir bileşen sıfırlanmakta ve problem uzayına geri yansıma önlenmektedir. Enquist ve Majda bu tip bir SSK sınır koşulu için tek yönlü dalga denklemi teorisi geliştirmişlerdir. Bu teoriye göre tek yönlü dalga denklemi problem uzayı sınırında uygulandığı takdirde üzerine gelen elektromanyetik dalgayı yansıtılmamaktadır. [Enquist and Majda, 1977].

Buna göre, iki boyutlu dalga denklemi yayılım yönlerine göre operatör boyutunda ayrıklaştırılacak olursa

$$\left[\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right] u(x, y, t) = \left[L_x^2 + L_y^2 - \frac{L_t^2}{c^2} \right] u = 0 \quad (3.34)$$

iken

$$Lu = \left[L_x^2 + L_y^2 - \frac{L_t^2}{c^2} \right] u = L^+ L^- u = 0 \quad (3.35)$$

olmak üzere, L^+ ve L^- operatörleri

$$L^+ = L_x + \frac{L_t}{c} \sqrt{1 - \left(c \frac{L_y}{L_t}\right)^2} \quad (3.36)$$

$$L^- = L_x - \frac{L_t}{c} \sqrt{1 - \left(c \frac{L_y}{L_t}\right)^2} \quad (3.37)$$

olarak düzenlenir. Burada sağa doğru yayılan elektromanyetik dalgayı L^+ operatörü temsil ederken, sola doğru yayılan elektromanyetik dalgayı L^- operatörü temsil etmektedir. Bu operatörler kullanılarak sağa veya sola doğru yayılan elektromanyetik dalga sınır değerlerinde sıfırlanarak yansımalar önlenmektedir.

3.6.2. MUR Türü SSK

Tek yönlü dalga denkleminde L^+ ve L^- operatörlerinin tam ifadelerinin SSK olarak verilen koşullar gereği direkt sayısal kullanımı uygun değildir. Bu nedenle karekök fonksiyonu yerine Taylor Serisi yaklaşık değerinin kullanılması ile güncelleme denklemleri elde edilebilir.

3.6.2.1. Birinci Mertebeden Doğruluklu MUR SSK

L^+ ve L^- operatörlerindeki karekök ifadesi, Taylor serisine açılarak ilk terimi alınır

$$\sqrt{1 - \left(c \frac{L_y}{L_t}\right)^2} \cong 1 \quad (3.38)$$

olmak üzere, tek yönlü dalga denklemi $n + 1/2$ zaman ve $i + 1/2$ konumlarında türevleri alınır

$$\left. \frac{\partial u}{\partial x} \right|_{i+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} - \frac{1}{c} \left. \frac{\partial u}{\partial t} \right|_{i+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} = 0 \quad (3.39)$$

iken merkezi farklar kuralına göre düzenlenirse

$$\left(\frac{u|_{i+1}^{n+\frac{1}{2}} - u|_i^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x} \right) - \frac{1}{c} \left(\frac{u|_{i+\frac{1}{2}}^{n+1} - u|_{i+\frac{1}{2}}^n}{\Delta t} \right) = 0 \quad (3.40)$$

elde edilir. Denklemler tekrar düzenlendiğinde

$$\frac{1}{\Delta x} \left(u|_{i+1}^{n+\frac{1}{2}} - u|_i^{n+\frac{1}{2}} \right) - \frac{1}{c\Delta t} \left(u|_{i+\frac{1}{2}}^{n+1} - u|_{i+\frac{1}{2}}^n \right) = 0 \quad (3.41)$$

olmak üzere, denklemler Δx ile çarpılır ve zaman-konum düzenlemesi yapılırsa

$$\left[\left(\frac{u|_{i+1}^{n+1} + u|_{i+1}^n}{2} \right) - \left(\frac{u|_i^{n+1} + u|_i^n}{2} \right) \right] - \frac{\Delta x}{c\Delta t} \left[\left(\frac{u|_{i+1}^{n+1} + u|_i^{n+1}}{2} \right) - \left(\frac{u|_{i+1}^n + u|_i^n}{2} \right) \right] = 0 \quad (3.42)$$

sadeleştirildiği takdirde

$$\begin{aligned} & [(u|_1^{n+1} + u|_1^n) - (u|_0^{n+1} + u|_0^n)] \\ & - \frac{\Delta x}{c\Delta t} [(u|_1^{n+1} + u|_0^{n+1}) - u|_1^n + u|_0^n] = 0 \end{aligned} \quad (3.43)$$

elde edilir. Zamanda en ileri olan çekildiği takdirde

$$\begin{aligned} & \left(-1 - \frac{\Delta x}{c\Delta t} \right) u|_0^{n+1} \\ & = - \left(1 - \frac{\Delta x}{c\Delta t} \right) u|_1^{n+1} \\ & - \left(1 + \frac{\Delta x}{c\Delta t} \right) u|_1^n - \left(-1 + \frac{\Delta x}{c\Delta t} \right) u|_0^n \end{aligned} \quad (3.44)$$

denklemleri elde edilir. Burada $u|_0^{n+1}$ yalnız bırakılırsa

$$u|_0^{n+1} = -\frac{\left(1 - \frac{\Delta x}{c\Delta t}\right)}{\left(-1 - \frac{\Delta x}{c\Delta t}\right)}u|_1^{n+1} - \frac{\left(1 + \frac{\Delta x}{c\Delta t}\right)}{\left(-1 - \frac{\Delta x}{c\Delta t}\right)}u|_1^n - \frac{\left(-1 + \frac{\Delta x}{c\Delta t}\right)}{\left(-1 - \frac{\Delta x}{c\Delta t}\right)}u|_0^n \quad (3.45)$$

olarak bulunur ve işaret düzenlemesi yapıldığında

$$u|_0^{n+1} = \frac{\left(1 - \frac{\Delta x}{c\Delta t}\right)}{\left(1 + \frac{\Delta x}{c\Delta t}\right)}u|_1^{n+1} + \frac{\left(1 + \frac{\Delta x}{c\Delta t}\right)}{\left(1 + \frac{\Delta x}{c\Delta t}\right)}u|_1^n - \frac{\left(1 - \frac{\Delta x}{c\Delta t}\right)}{\left(1 + \frac{\Delta x}{c\Delta t}\right)}u|_0^n \quad (3.46)$$

denklemleri bulunur. Sadeleştirmeler ve düzenlemeler yapılsa

$$u|_0^{n+1} = u|_1^n + \frac{\left(1 - \frac{\Delta x}{c\Delta t}\right)}{\left(1 + \frac{\Delta x}{c\Delta t}\right)}(u|_1^{n+1} - u|_0^n) \quad (3.47)$$

denklemleri ve son olarak birinci mertebeden MUR denklemleri

$$u|_0^{n+1} = u|_1^n + \left(\frac{c\Delta t - \Delta x}{c\Delta t + \Delta x}\right)(u|_1^{n+1} - u|_0^n) \quad (3.48)$$

olarak bulunur.

Birinci mertebeden doğruluklu MUR SSK 'nın eksik yönü olarak, yüzeylere dik gelen dalgaların iyi soğurulabilirken, açılı gelen dalgaların tam anlamıyla soğurulamaması kabul edilmektedir.

3.6.2.2. İkinci Mertebeden Doğruluklu MUR SSK

Karekök fonksiyonun Taylor seri açılımı

$$\sqrt{1 - \left(c \frac{L_y}{L_t}\right)^2} \cong 1 - \frac{1}{2} \left(c \frac{L_y}{L_t}\right)^2 \quad (3.49)$$

olmak üzere iki terimli olarak yaklaşık değerinin alınması durumunda, elektromanyetik dalgaların düşey bileşenleri de katılacaktır. $x = k$ düzleminde yukarıdaki yaklaşım L^+ için düzenlenirse

$$L^+ = L_x + \frac{L_t}{c} \sqrt{1 - \left(c \frac{L_y}{L_t}\right)^2} \cong L_x + \frac{L_t}{c} + \frac{c L_y^2}{2 L_t} \quad (3.50)$$

biçimini alır. Bu denklem L_t ile çarpılıp düzenlendiği takdirde

$$L^+ u|_{x=k} = 0 \quad \Rightarrow \quad \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial t} + \frac{\partial^2 u}{c \partial t^2} - \frac{c}{2} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \Big|_{x=k} = 0 \quad (3.51)$$

denklemini ile $x = k$ 'da ikinci mertebeden doğruluğa sahip SSK elde edilmiş olur. Benzer biçimde $x = 0$ 'da

$$L^- u|_{x=0} = 0 \quad \Rightarrow \quad \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial t} - \frac{\partial^2 u}{c \partial t^2} + \frac{c}{2} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \Big|_{x=0} = 0 \quad (3.52)$$

denklemini elde edilmektedir. Yine $y = 0$ ve $y = k$ düzlemlerinde

$$L^+ u|_{y=k} = 0 \quad \Rightarrow \quad \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial t} + \frac{\partial^2 u}{c \partial t^2} - \frac{c}{2} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \Big|_{y=k} = 0 \quad (3.53)$$

$$L^- u|_{y=0} = 0 \quad \Rightarrow \quad \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial t} + \frac{\partial^2 u}{c \partial t^2} - \frac{c}{2} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \Big|_{y=0} = 0 \quad (3.54)$$

olarak ifade edilir. Yukarıdaki $L^- u|_{x=0}$ denklemi 2 boyutlu $(1/2, j)$ ZUSF hücresinde uygulanır ve türevler merkezi farklar kuralına göre alınarak düzenlenirse, sayısal türevler

$$\left. \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial t} \right|_{1/2,j}^n = \frac{1}{2\Delta t} \left[\left(\frac{u|_{1,j}^{n+1} - u|_{0,j}^{n+1}}{\Delta x} \right) + \left(\frac{u|_{1,j}^{n-1} - u|_{0,j}^{n-1}}{\Delta x} \right) \right] \quad (3.55)$$

$$\begin{aligned} \left. \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \right|_{1/2,j}^n &= \frac{1}{2} \left[\left(\frac{u|_{0,j}^{n+1} - 2u|_{0,j}^n + u|_{0,j}^{n-1}}{\Delta t^2} \right) \right. \\ &\quad \left. + \left(\frac{u|_{1,j}^{n+1} - 2u|_{1,j}^n + u|_{1,j}^{n-1}}{\Delta t^2} \right) \right] \end{aligned} \quad (3.56)$$

$$\begin{aligned} \left. \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right|_{1/2,j}^n &= \frac{1}{2} \left[\left(\frac{u|_{0,j+1}^n - 2u|_{0,j}^n + u|_{0,j-1}^n}{\Delta t^2} \right) \right. \\ &\quad \left. + \left(\frac{u|_{1,j+1}^n - 2u|_{1,j}^n + u|_{1,j-1}^n}{\Delta t^2} \right) \right] \end{aligned} \quad (3.57)$$

olarak bulunur. Bu bağıntılar örneğin L^+ operatörü için yukarıdaki denklemlerde yerlerine konularak zamanda en ileri olan bileşen $u|_{0,j}^{n+1}$ çekilirse, ZUSF güncelleme denklemi

$$\begin{aligned} u|_{0,j}^{n+1} &= -u|_{1,j}^{n-1} + \frac{c\Delta t - \Delta}{c\Delta t + \Delta} (u|_{1,j}^{n+1} + u|_{0,j}^{n-1}) + \frac{2\Delta}{c\Delta t + \Delta} (u|_{0,j}^n + u|_{1,j}^n) \\ &\quad + \frac{(c\Delta t)^2}{2\Delta(c\Delta t + \Delta)} [(u|_{0,j+1}^n - 2u|_{0,j}^n + u|_{0,j-1}^n) + u|_{1,j+1}^n \\ &\quad - 2u|_{1,j}^n + u|_{1,j-1}^n] \end{aligned} \quad (3.58)$$

halini alır. Benzer yöntemle iki boyutta diğer üç düzlem içinde MUR SSK düzenlenebilir.

Maxwell denklemlerinde elektrik alan ve manyetik alan birbirleriyle etkileşimde oldukları için SSK olarak MUR türü kullanıldığı takdirde sadece elektrik alanlar üzerine uygulanması yeterli doğruluğu sağlamaktadır [Mur, 1981].

4. Hareketli Pencere ZUSF Yöntemi

Büyük ölçekli problemlerde problem uzayının fiziksel boyutları uygulanan dalga boyuna göre çok büyüktür. Bu nedenle büyük ölçekli problemlerin standart ZUSF çözümünde bilgisayarlarda yüksek hafıza ve hesap zamanına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu ihtiyaç günümüz bilgisayarları tarafından yeteri kadar karşılanamadığından standart ZUSF yöntemi kullanılarak oluşturulan bir benzetim aylarca sürececek bir iterasyon zamanına ihtiyaç duymaktadır. Ayrıca, standart ZUSF yönteminde problem uzayının bir bütün olarak ızgaralanması ve problem uzayının da çok büyük olması sayısal dispersiyon hatalarında problem sonucuna yüksek oranda etki edebilecek ölçüde artışlar meydana getirmektedir. Bu bakımdan gerçek bir yüksek frekans probleminin büyük ölçekli durum için çözümünde standart ZUSF yöntemi yetersiz kalmaktadır.

Literatürde bu yetersizliğe çözüm olarak Hareketli Pencere ZUSF, HP-ZUSF (Moving Window FDTD, MW-FDTD) yöntemi önerilmiştir. Standart ZUSF yöntemi ile çözülmesi planlanan bir problemde HP-ZUSF yönteminin kullanılmasının temel prensibi hesap yapılan problem uzayının hareketli bir pencere sayesinde küçültülerek çok yüksek olan hafıza ve hesaplama zamanının azaltılmasıdır. [Fiedel et al., 1994].

Hareketli pencere yöntemi geçmişte birçok çözüm yöntemi ile birlikte kullanılmıştır. En yaygın olanı bir çeşit frekans uzayı çözümü olan Parabolik Huzme Yöntemi, PHY (Beam Parabolic Method, BPM) olarak adlandırılan Parabolik Denklem, PD (Parabolic Equation, PE) yöntemidir. Bu yöntem Zaman Uzayı Parabolik Denklem, ZUPD (Time Domain Parabolic Equation, TDPE) olarak da zaman uzayı çözümlerinde kullanılmaktadır [Pemper et al., 2000].

Bir enerji yayılım problemi düşünüldüğünde, HP-ZUSF yönteminde yayılan enerjinin hareket eden pencere içerisinde tutulması sağlandığı için standart ZUSF yönteminde olduğu gibi yüksek bilgisayar hafızası ihtiyacı oluşmamaktadır. Böylece problem ZUSF yöntemine göre daha kısa sürede çözümlenebilmektedir. Bunun yanında HP-ZUSF yöntemi yine de diğer başka bazı benzetim yöntemlerine göre daha uzun bir zamanda çözümleme yapmaktadır. Bunun temel nedeni yapılan çözümün diğer çözümlerle karşılaştırıldığında gerçeğe daha yakın olmasıdır. Bu avantaj, HP ZUSF yönteminin gerçek problemlerde doğrulama yapılabilecek bir yöntem olarak kullanılmasına olanak sağlamaktadır [Wu et al., 2004].

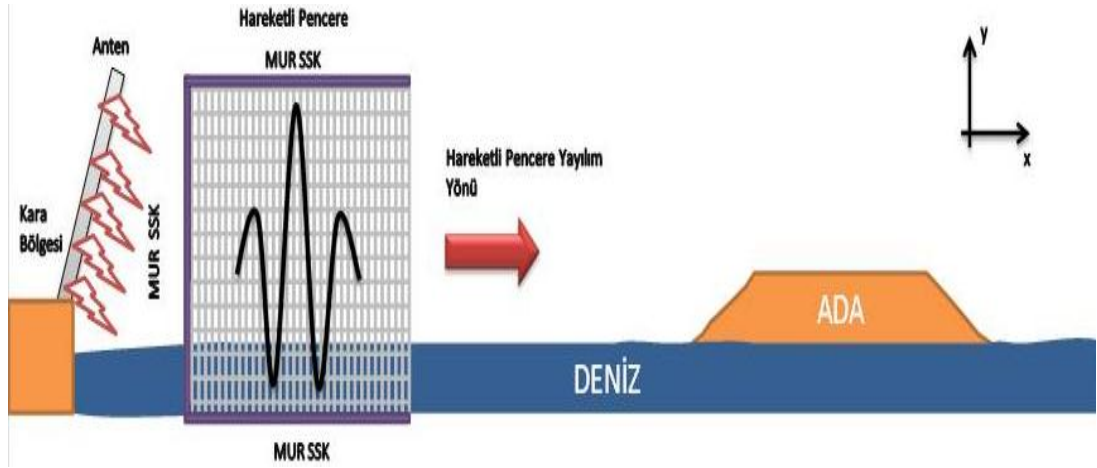
HP-ZUSF yönteminin tercih edilmesinin temel nedenleri:

- Çok büyük ve sabit koordinat düzlemi kullanılan hesaplama uzayı yerine elektromanyetik darbeyi takip edecek şekilde hareketli hesaplama uzayı (hareketli pencere) kullanılması,
- Elektromanyetik darbe hareketli pencere içerisinde olduğundan (küçük problem uzayı) sayısal dispersiyon hatalarının önemli ölçüde azalması,
- Atmosferik olayların, doğadaki ağaçların, yaprakların ve gerçek hayatta bulunan her çeşit yapıların, algoritmada herhangi bir karmaşıklığa neden olmadan benzetim modeline uygulanabilir olması nedeni ile, gerçek karmaşık bir ortamda yayılım hesabı benzetiminin doğruluğu yüksek olarak yapılabilmesi [Wu et al., 2004]. Bu bağlamda bu yöntemle yer küre kayıplarının, arazi etkilerinin ve yüzey pürüzlerinin modellenenebilmesi [Akleman and Sevgi, 2000],
- Gelişmiş uygulamalarda “Işın Tekniği” kullanılarak hareketli pencerenin zaman-uzay yörüngesinin analitik olarak hesaplanabilmesi [Pemper et al., 2000].

Bu avantajlarının yanında HP-ZUSF yönteminin, problem uzayında belli bir sınırlı alan çözümlendiği için, bazı saçılan alan bilgilerinin kaybolması gibi dezavantajı da bulunmaktadır.

4.1. Yöntemin Uygulanması

Hareketli pencere yöntemi problemin konumsal olarak tek bir döngü yerine hareketli daha küçük döngülerle çözülmesine olanak sağlamaktadır. Standart uygulamada yöntemin temel mantığı her bir adımda pencere boyutunu değiştirmeksizin pencerenin hesap uzayında iteratif olarak ilerletilmesidir. Yani hesaplama uzayı içinde küçük bir ZUSF hesap uzayı oluşturarak bu ortamı hareketli bir alt bölge gibi ilerletip bütün hesap uzayını kapsamaktır. Bu küçük ZUSF hesap uzayının, pencerenin hareket ettirilen yönü hariç, üç tarafının SSK ile kaplanarak sistem açık uzay koşullarını sağlanmaktadır. Kayarak ilerleyen bu alt bölge içinde elektromanyetik alan dağılımları hesaplanmaktadır. Bu sayede hesaplama zamanı, dispersiyon hataları azalmaktadır.



Şekil 4.1: Problem uzayı ve sağ yönlü hareketli pencere.

Şekil 4.1’de görüldüğü üzere elektromanyetik dalga yayılımı hareketli pencere içerisinde pencerenin sağa kaydırılması sonucunda gerçekleştirilmektedir. Standart uygulamada pencere içerisinde elektromanyetik alanların güncellenmesinde standart ZUSF algoritması kullanılmaktadır. Bunun yanında hareketli pencere yöntemi algoritmasının Zaman Uzayı Sonlu Elemanlar Yöntemi, ZUSEY (Time Domain Boundary Element Method, TDBEM) [Fujita et al.,2007], Değişken Yönlü Dahili, DYD (Alternating Direction Implicit, ADI) ZUSF [Batista and Rego, 2012] ile çözüldüğü vb. çalışmalar literatürde mevcuttur.

4.1.1. Karar Algoritması

Yöntemin uygulanmasında hareketli pencere ilerletme algoritması kritik önem taşımaktadır. Bu algoritma karar algoritması olarak görev yapmakta ve HP-ZUSF çözümü ile standart ZUSF çözüm algoritması arasındaki uygulama bakımından temel farkı belirlemektedir. Bu tez çalışmasında karar algoritması, elektromanyetik darbe SSK’nın oluşturulduğu hücrelerden bir önceki hücre konumuna eriştiği takdirde pencere harekete geçmekte ve ZUSF hesap uzayı elektromanyetik dalga hızında kaydırılmaktadır. Bu durumda elektromanyetik darbe her zaman hareketli pencere içerisinde kaldığı için enerji kaybı en aza inmektedir. Böylece Maxwell denklemleri büyük hesap uzayının her tarafında konumda adım adım çözdürülmektedir.

5. SAYISAL SONUÇLAR

Bu bölümde $x - y$ düzleminde iki boyutlu modellenen hava, deniz, ada ve anteni içeren bir D-YF radar benzetimi HP-ZUSF yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Buna göre Şekil 4.1’de düşünülen problem uzayında dalga yayılım problemi zaman uzayında çözülerek ileriye ve geriye doğru yayılan YF bandı elektromanyetik dalgalar için temelde

- Konuma bağlı yayılım kayıpları (propagation losses),
- Belirli noktalarda gözlenen zaman uzayı işaretleri

hesaplanmıştır. Elde edilen sayısal sonuçlar standart ZUSF yöntemi ile karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Bu aşamada öncelikle ileriye dalga yayılım kaybının doğruluğu kapsamında HP-ZUSF yönteminin pencere boyu seçilmiştir. Bu pencere boyu ile geriye dalga yayılım problemi için de çözümler elde edilmiştir. İleriye dalga yayılımı problemi bistatik, geriye dalga yayılım problemi ise monostatik olarak düşünülmüştür.

Standart ZUSF ve HP- ZUSF yöntemleri uygulanarak incelenecek problem uzayının parametreleri, birim zaman adımı, toplam iterasyon sayısı ve gözlem noktalarının konumu vd. Tablo 5.1’de verilmiştir.

Tablo 5.1: Problem uzayı parametreleri.

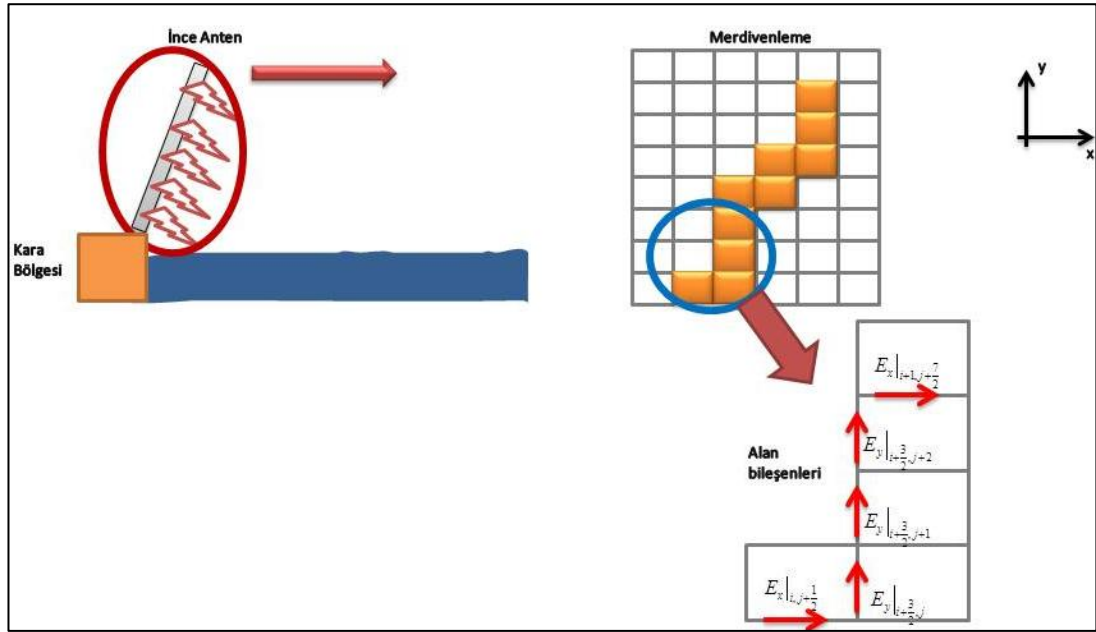
Parametre	Değer	Birim	Açıklama
f	5, 10, 15	MHz	Verici antenin çalışma frekansı
f_{max}	$1.5 \times f$	MHz	Maksimum frekans çözünürlüğü
l_x	35000	m	Problem uzayının x yönündeki uzunluğu
l_y	850	m	Problem uzayının y yönündeki uzunluğu
l_{ada_x}	10000	m	Adanın x yönündeki uzunluğu (rakım)
l_{ada_y}	386	m	Adanın y yönündeki uzunluğu
l_{kara_x}	200	m	Karanın x yönündeki uzunluğu
l_{kara_y}	10	m	Karanın y yönündeki uzunluğu (rakım)

Tablo 5.1 devamı

l_{deniz_x}	34800	m	Denizin x yönündeki uzunluğu
l_{deniz_y}	50	m	Denizin y yönündeki uzunluğu (derinlik)
Δx	$\lambda_{f_{max}}/15$	m	Birim hücrenin x yönündeki uzunluğu
Δy	$\lambda_{f_{max}}/15$	m	Birim hücrenin y yönündeki uzunluğu
N_x	$l_x/\Delta x$	—	x yönündeki toplam ızgara sayısı
N_y	$l_y/\Delta y$	—	y yönündeki toplam ızgara sayısı
ε_0	$10^{-9}/36\pi$	F/m	Boş uzayın bağıl dielektrik sabiti
μ_0	$4\pi \times 10^{-7}$	H/m	Boş uzayın bağıl manyetik sabiti
ε_{Hava}	$1 \times \varepsilon_0$	F/m	Havanın bağıl dielektrik sabiti
μ_{Hava}	$1 \times \mu_0$	H/m	Havanın bağıl manyetik sabiti
σ_{Hava}	0	S/m	Havanın iletkenliği
ε_{Kara}	$13 \times \varepsilon_0$	F/m	Karanın bağıl dielektrik sabiti
μ_{Kara}	$1 \times \mu_0$	H/m	Karanın bağıl manyetik sabiti
σ_{Kara}	5×10^{-3}	S/m	Karanın iletkenliği
ε_{Deniz}	$70 \times \varepsilon_0$	F/m	Denizin dielektrik sabiti
μ_{Deniz}	$1 \times \mu_0$	H/m	Deniz manyetik sabiti
σ_{Deniz}	5	S/m	Denizin iletkenliği
ε_{Ada}	$10 \times \varepsilon_0$	F/m	Adanın dielektrik sabiti
μ_{Ada}	$1 \times \mu_0$	H/m	Adanın manyetik sabiti
σ_{Ada}	0.02, 0.002	S/m	Adanın iletkenliği (düşük, yüksek)
Δt	6.2853×10^{-9} 3.1427×10^{-9} 2.0951×10^{-9}	sn	Her bir frekans için birim zaman adım
T	23210, 46419, 69628,	—	Her bir frekans için toplam iterasyon sayısı
l_{anten}	$\lambda_{f_{max}}/2$	m	Anten uzunluğu
θ_{anten}	37°	deg	Antenin y eksenine olan açısı (Brewster)
	15200	m	Menzilde adanın başlangıç noktası

5.1. Anten Modelleme

Elektromanyetik dalga kaynağı olarak ince anten kullanılmıştır. Elektrik alanlar kullanılarak ZUSF ızgarasında merdivenleme tekniği (staircase) ile oluşturulmuş ideal ince anten Şekil 5.1’de gösterilmiştir. Buna göre yatay oklar bulunan hücrelerde kaynak tarafından elektrik alanın E_x bileşeni uygulanırken, dikey okların bulunduğu hücrelerde elektrik alan değerinin E_y bileşeni uygulanmaktadır.



Şekil 5.1: İdeal ince antenin ZUSF ızgarasında elektrik alanlar uygulanarak uyarılması.

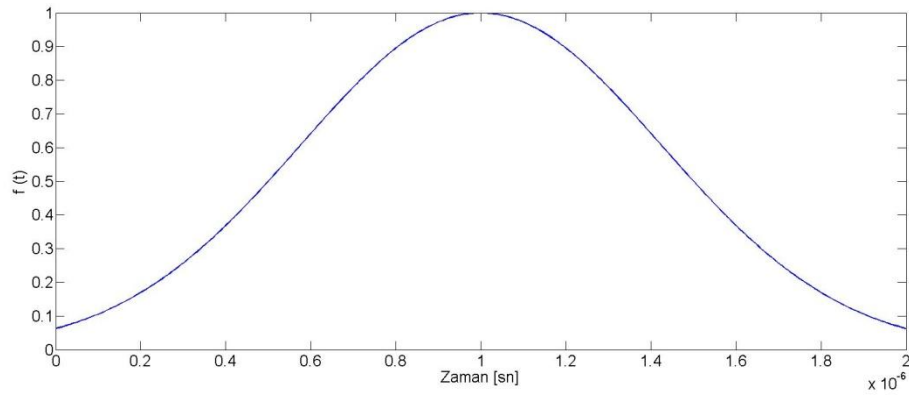
Ana karanın sağ köşesinde bulunan antenin ana karadan denize doğru huzmesi yönlendirilmiştir. Bu amaç için elektromanyetik dalganın birinci ortamdan (hava) ikinci ortama (deniz) geçebilmesini sağlayan ve yansıma katsayısını sıfır yapan bilinen “Brewster Açısı” kullanılmıştır. Antenin kaynak zaman bağımlılığı Gauss modülasyonlu darbe işareti olarak

$$f(t) = \sin(2\pi f_0 t) e^{\frac{-(t-t_c)^2}{2t_\sigma^2}} \quad (5.1)$$

biçiminde seçilmiştir. Burada t_c darbenin modülasyonlu işaret içinde oluşturulacağı zamanı belirlerken, t_σ değeri,

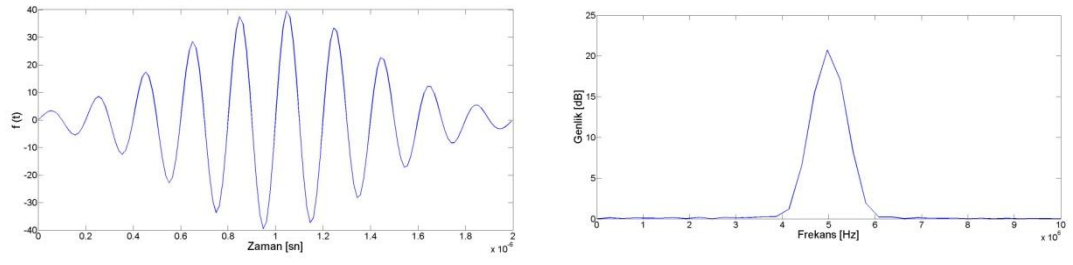
$$t_\sigma = \frac{t_c}{2\sqrt{2\ln 2}} \quad (5.2)$$

olarak verilir. [Loui, 2004]. $f = 5$ MHz ve $t_c = 10/2f$ olarak seçilmesi durumunda örnek bir Gauss (modülasyonlu) darbe işareti aşağıda gösterilmiştir.

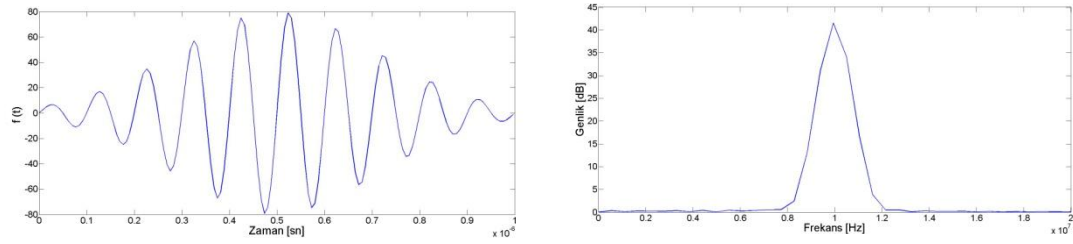


Şekil 5.2: Örnek Gauss modülasyonlu darbe işareti.

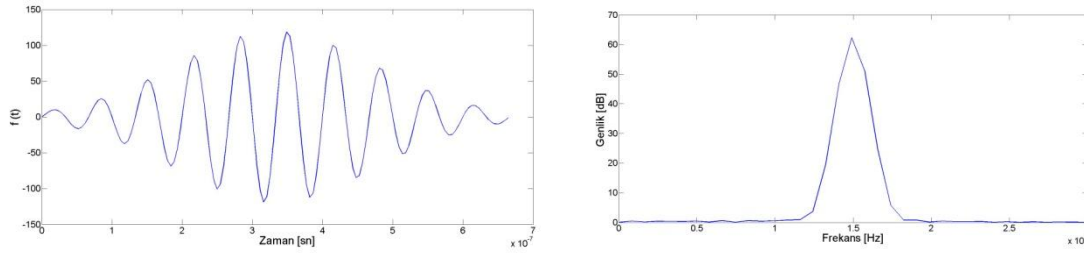
Bu çalışmada 5 MHz, 10 MHz ve 15 MHz taşıyıcı frekanslarında antenden üç farklı frekansta yayılım yapılmış ve sonuçlar bu frekanslara göre yorumlanmıştır. Bu kaynak işaretlerinin zaman uzayı ve frekans uzay genlik dağılımları Şekil 5.3'te gösterilmiştir.



a) 5 MHz kaynak durumu.



b) 10 MHz kaynak durumu.



c) 15 MHz kaynak durumu.

Şekil 5.3: 5, 10 ve 15 MHz frekansta Gauss işaretinin zaman uzayı ve frekans uzayı genlik spektrumları.

5.2. Sağa Hareket Eden Pencere (Bistatik Durum)

Hareketli pencerenin sağ yöne hareket ettirildiği bu bölümde, deniz ortasında düşük ve yüksek iletkenliğe σ (S/m) sahip iki farklı ada için ayrı ayrı inceleme yapılmıştır. Bu kısımda sadece yol kayıpları

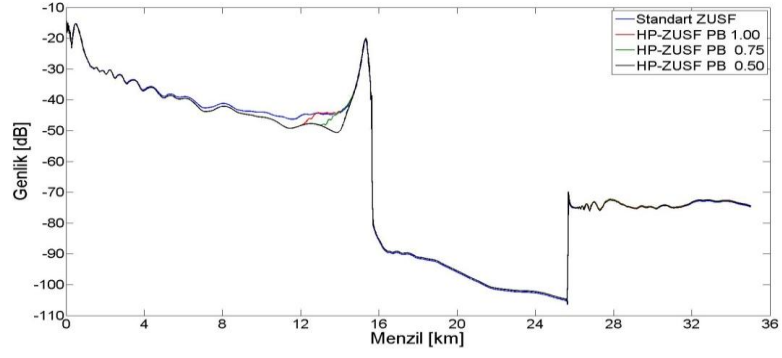
$$Y_k(r) = 10 * \log_{10} \left(\frac{P_t}{P_r} \right) [dB] \quad (5.3)$$

formülüyle hesaplanmaktadır. Burada P_t ve P_r sırasıyla verilen ve alınan güç r ise menzildir [Sevgi et al., 2002]. Öncelikle düşük iletkenlikli ada için 5, 10 ve 15 MHz olmak üzere üç farklı frekansta ve üç farklı pencere boyutunda (PB) yapılan benzetimler standart ZUSF sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Ardından yüksek iletkenlikli ada için yapılan benzetimler yol kaybı ve üç ayrı noktadan toplanan zaman uzayı işaretleri yine standart ZUSF sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

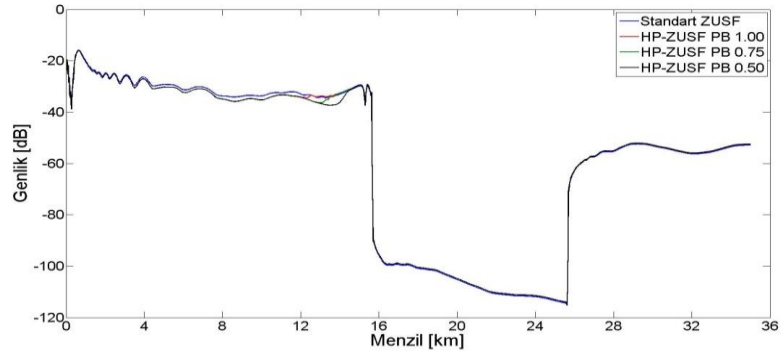
5.2.1. Düşük İletkenlikli Ada Değeri İçin Yol Kaybı Hesabı

Bu bölümde adanın $\sigma = 0.002$ S/m iletkenlik değeri için üç frekans ve üç farklı pencere boyutunda yol kaybı hesaplanmış ve standart ZUSF ile karşılaştırmalı olarak üç farklı frekans için verilmiştir. Buna göre öncelikle Şekil 5.4'te 5 MHz E_x , E_y ve H_z alan bileşenleri için üç farklı pencere boyutunda yol kayıpları gösterilmiştir.

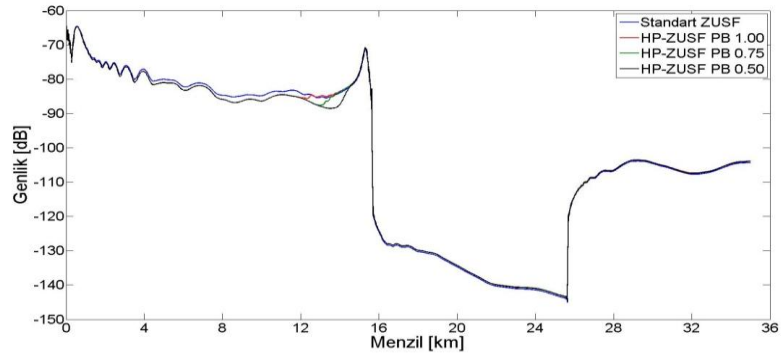
Şekil 5.4'te görüldüğü üzere 5 MHz'de standart ZUSF ile HP-ZUSF yol kayıpları birçok noktada örtüşmüşken, pencere boyutuna göre bazı farklılıklar olduğu görülmektedir. HP-ZUSF yöntemi ile problem uzayı bütünüyle çözülmediği için bu farklılıkların oluştuğu düşünülmektedir.



a) E_x alan bileşeni için yol kaybı.



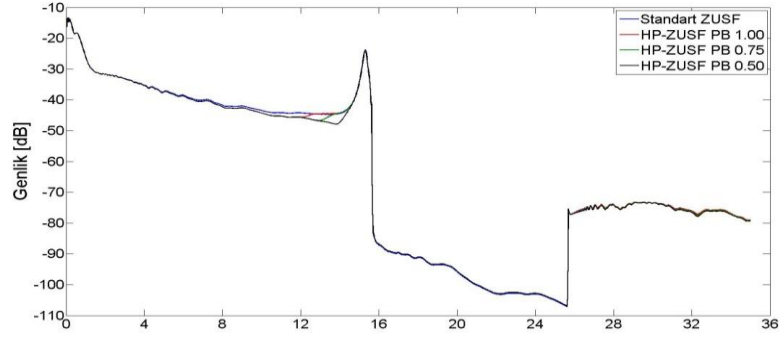
b) E_y alan bileşeni için yol kaybı.



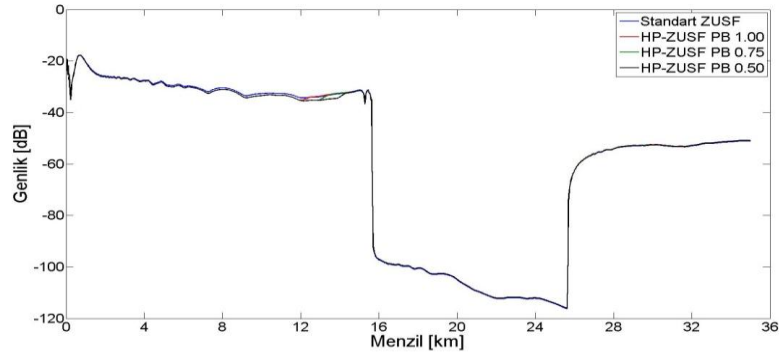
c) H_z alan bileşeni için yol kaybı.

Şekil 5.4: 5 MHz frekansta E_x , E_y ve H_z alan bileşenlerinin üç farklı pencere boyutunda (PB= 1.00, 0.75 ve 0.50) hareketli pencere için yol kaybı grafiği.

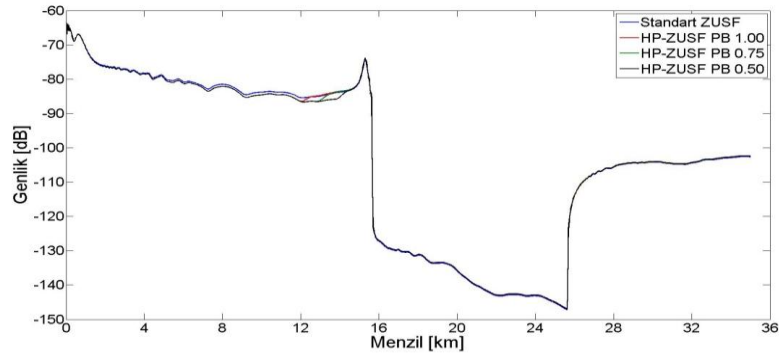
İkinci olarak 10 MHz frekansında E_x , E_y ve H_z alan bileşenleri için üç farklı pencere boyutunda yol kayıpları Şekil 5.5'te verilmiştir.



a) E_x alan bileşeni için yol kaybı.



b) E_y alan bileşeni için yol kaybı.

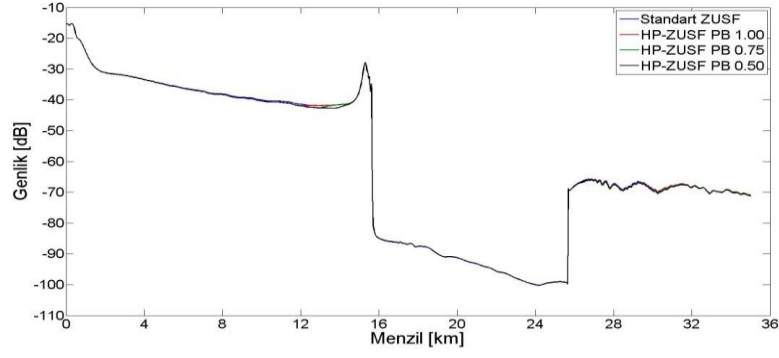


c) H_z alan bileşeni için yol kaybı.

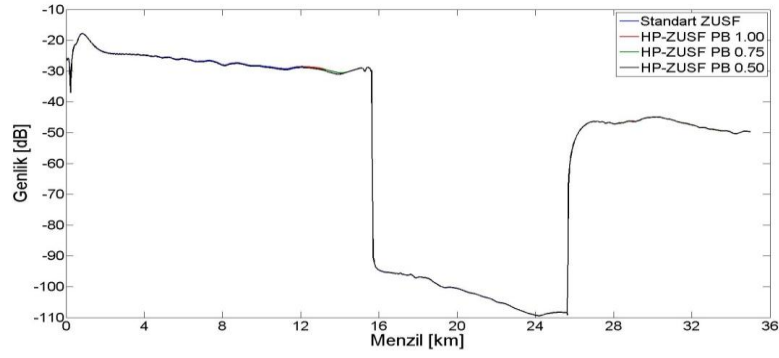
Şekil 5.5: 10 MHz frekansta E_x , E_y ve H_z alan bileşenlerinin üç farklı pencere boyutunda (PB= 1.00, 0.75 ve 0.50) hareketli pencere için yol kaybı grafiği.

Şekil 5.5'e bakıldığında 10 MHz frekansında da HP-ZUSF çözümlerinin standart ZUSF çözümüyle büyük oranda örtüştüğü görülmektedir. Pencere boyutu bakımından sonuçlar karşılaştırıldığında yine büyük farkların olmadığı açıktır.

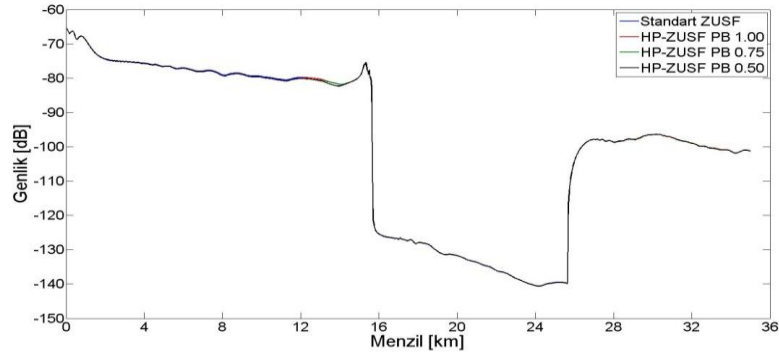
Son olarak 15 MHz frekansında yol kaybı sonuçları Şekil 5.6'da gösterilmiştir.



a) E_x alan bileşeni için yol kaybı.



b) E_y alan bileşeni için yol kaybı.



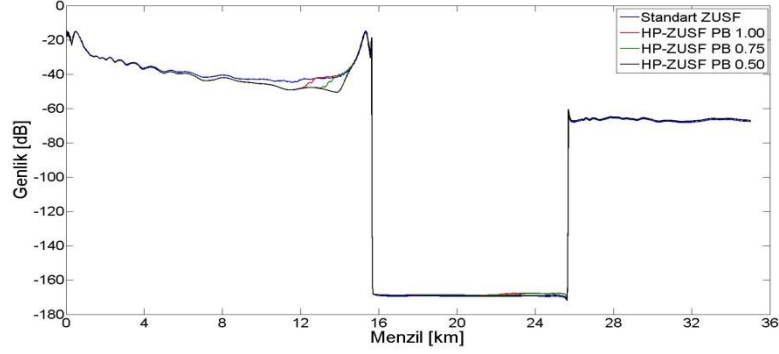
c) H_z alan bileşeni için yol kaybı.

Şekil 5.6: 15 MHz frekansta E_x , E_y ve H_z alan bileşenlerinin üç farklı pencere boyutunda (PB= 1.00, 0.75 ve 0.50) hareketli pencere için yol kaybı grafiği.

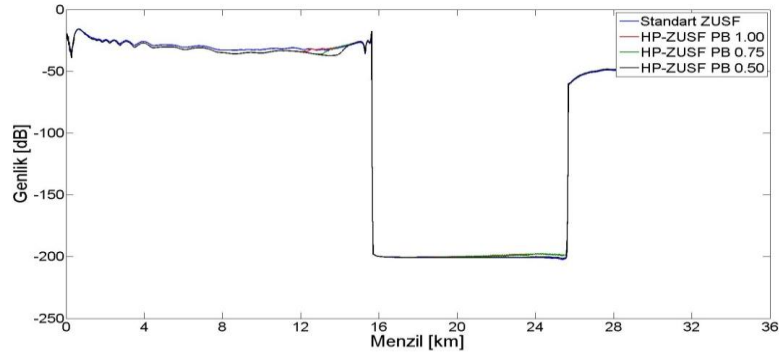
Sonuçlara göre 15 MHz HP-ZUSF çözümlerinin standart ZUSF çözümüyle en yakın sonucu verdiği ve frekans arttıkça HP-ZUSF çözümlerinin standart ZUSF çözümlerine yakınsadığı görülmektedir. Bunun sebebi Gauss türü kaynağın darbe zarfıdır. Bu zarf içinde 10 adet sinüs dalgası olacak biçimde tasarlandığı için frekans yükseldikçe zarf boyu kısalmaktadır. Bu kısalma HP-ZUSF penceresinin içerisinde zarfın yüksek frekanslarda düşük frekanslara göre daha çok yol kat etmesini sağlamaktadır. Bunun sonucunda da yüksek frekans benzetimlerde standart ZUSF sonuçlarına yakınsama görülmektedir.

5.2.2. Yüksek İletkenlikli Ada Durumu

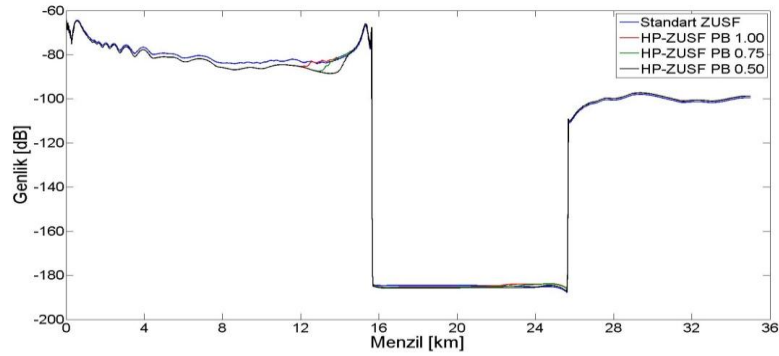
5.2.2.1. Yol Kaybı Hesabı



a) E_x alan bileşeni için yol kaybı.



b) E_y alan bileşeni için yol kaybı.



c) H_z alan bileşeni için yol kaybı.

Şekil 5.7: 5 MHz frekansında E_x , E_y ve H_z alan bileşenlerinin üç farklı pencere boyutunda (PB= 1.00, 0.75 ve 0.50) hareketli pencere için yol kaybı grafiği.

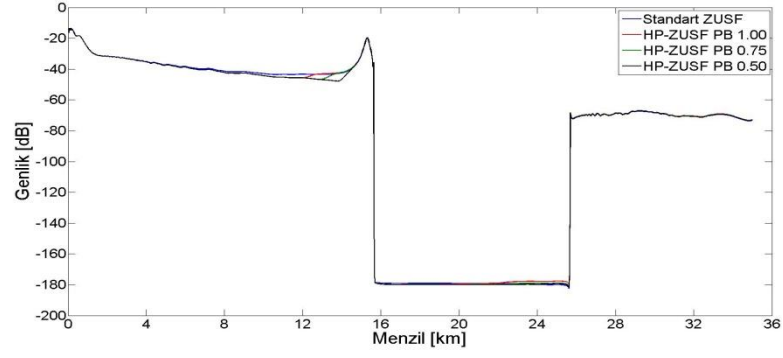
Düşük iletkenlikli ada kullanılarak yapılan benzetimlerde, adadan yansarak alıcı antene dönen elektromanyetik işaret genliğinin zayıf olması nedeniyle, daha

yüksek iletkenlikli ($\sigma = 0.02 \text{ S/m}$) bir ada kullanılarak alıcı antene ulaşan işaret seviyesi daha belirgin hale getirilmiştir. Buna göre öncelikle Şekil 5.7’de 5 MHz frekansında E_x , E_y ve H_z alan bileşenleri için üç farklı pencere boyutunda yol kayıpları gösterilmiştir.

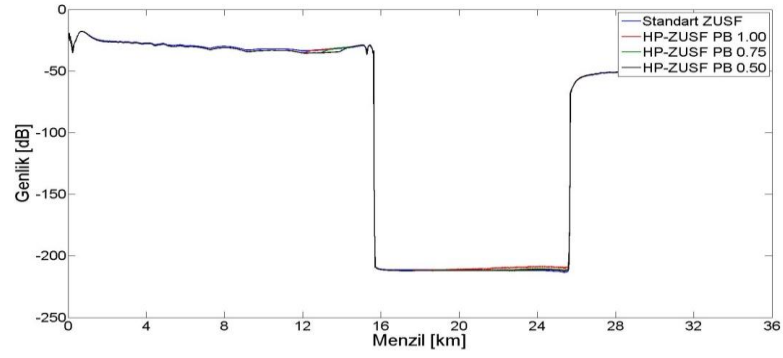
Beklendiği üzere, yüksek iletkenlikli ada kullanılarak yapılan benzetimlerde ada içindeki genlik kaybının daha fazla olduğu Şekil 5.7’de görülmektedir. HP-ZUSF çözümleri bu benzetimde de standart ZUSF çözümü ile tutarlıdır.

İkinci olarak 10 MHz frekansında E_x , E_y ve H_z alan bileşenleri için üç farklı pencere boyutunda yol kayıpları Şekil 5.8’de verilmiştir.

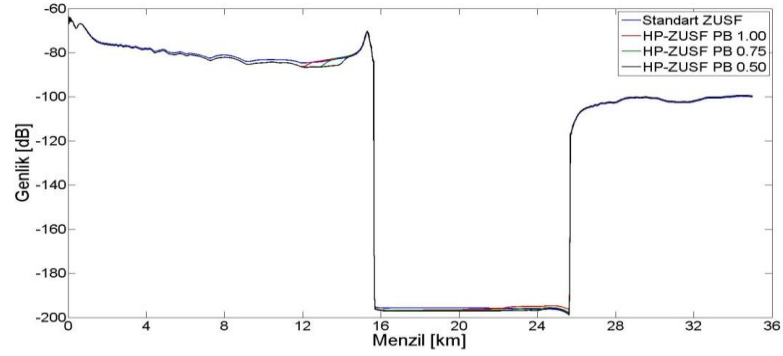
Şekil 5.8’de HP-ZUSF çözümlerinin standart ZUSF çözümüne biraz daha yakınsadığı ve pencereler arasındaki yol kaybı farkı farklılıklarının azaldığı görülmektedir.



a) E_x alan bileşeni için yol kaybı.



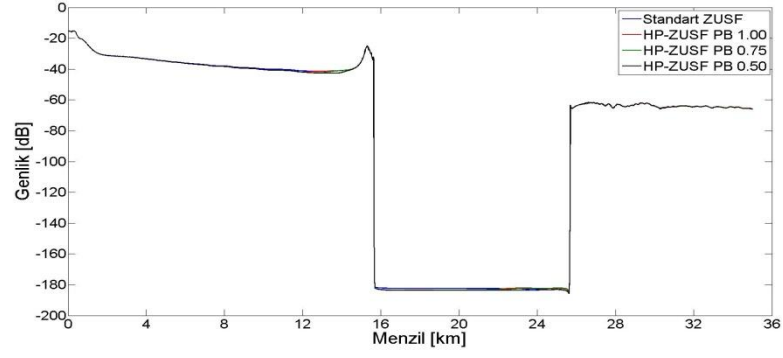
b) E_y alan bileşeni için yol kaybı.



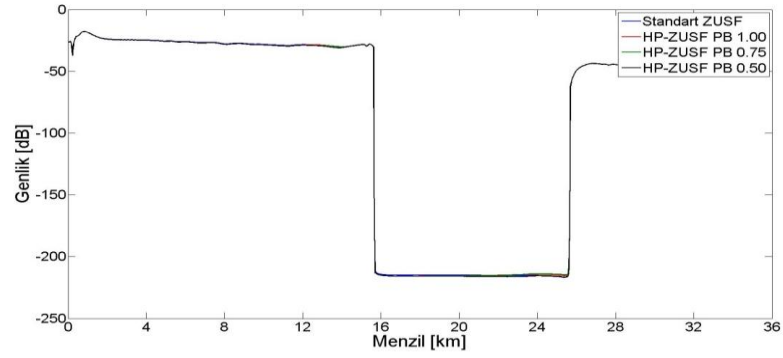
c) H_z alan bileşeni için yol kaybı.

Şekil 5.8: 10 MHz frekansında E_x , E_y ve H_z alan bileşenlerinin üç farklı pencere boyutunda (PB= 1.00, 0.75 ve 0.50) hareketli pencere için yol kaybı grafiği.

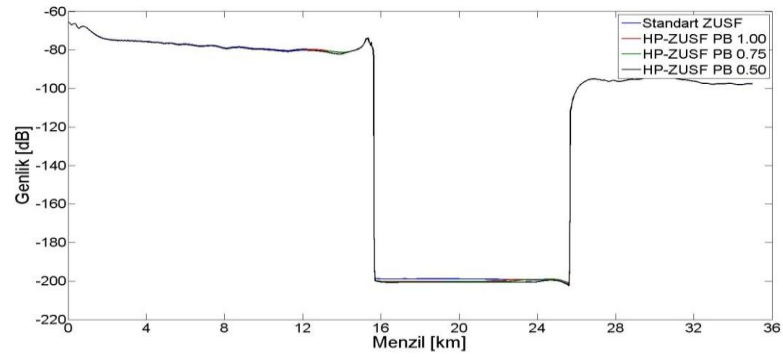
Son olarak 15 MHz frekansında yol kaybı sonuçları Şekil 5.9'da gösterilmiştir.



a) E_x alan bileşeni için yol kaybı.



b) E_y alan bileşeni için yol kaybı.



c) H_z alan bileşeni için yol kaybı.

Şekil 5.9: 15 MHz frekansında E_x , E_y ve H_z alan bileşenlerinin üç farklı pencere boyutunda (PB= 1.00, 0.75 ve 0.50) hareketli pencere için yol kaybı grafiği.

15 MHz’de yapılan benzetim sonuçlarında HP-ZUSF ile standart ZUSF çözümlerinin neredeyse birebir örtüştüğü Şekil 5.9’da açıkça görülmektedir. Pencere boyutunun değişmesine rağmen yol kaybının ihmal edilebilecek kadar az değiştiği söylenebilir.

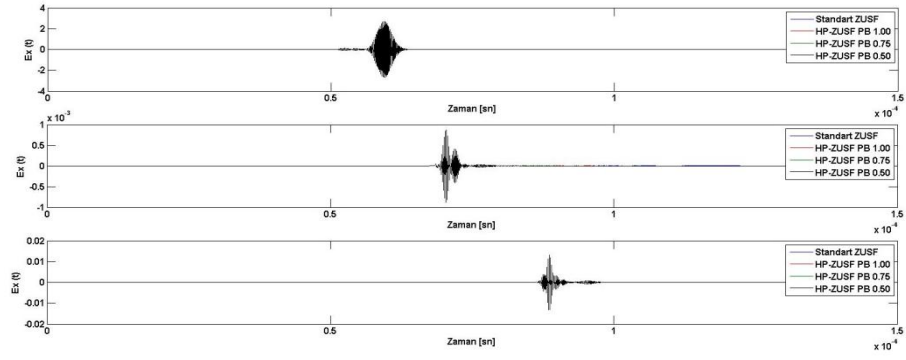
5.2.2.2. Gözlenen Zaman Uzayı İşaretleri

Yüksek iletkenlikli ada için yapılan benzetimlerde adanın sol tarafında (15200,406 m), adanın ortasında (20636,406 m) ve adanın sağ tarafında (26072,406 m) olmak üzere üç farklı noktadan alan bileşenleri zaman uzayı değerleri her üç frekans için hesaplanmıştır.

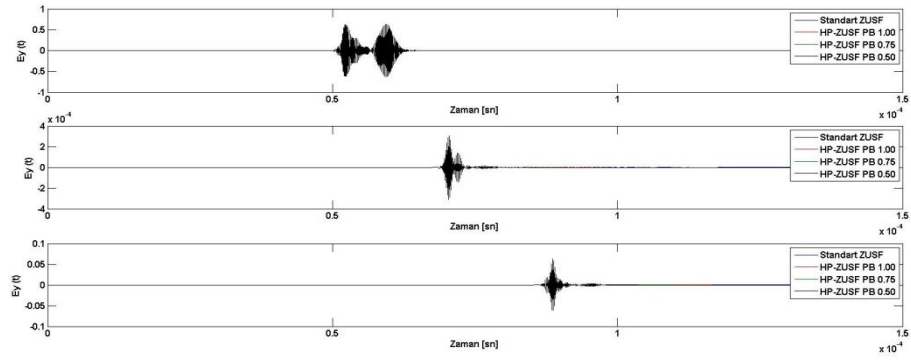
Buna göre öncelikle Şekil 5.10'da 5 MHz frekansta E_x , E_y ve H_z alan bileşenleri için üç farklı pencere boyutunda zaman uzayı işaretleri gösterilmiştir.

Şekil 5.10'da 5 MHz için gözlem değerlerinin üç farklı PB için de standart ZUSF değeri ile örtüştüğü gözlenmiştir. Bazı pencere boyutlarındaki ada ortasında bulunan gözlem noktasında görülen farklılıklar SSK'nın hareket ettirilmesinden kaynaklanmaktadır.

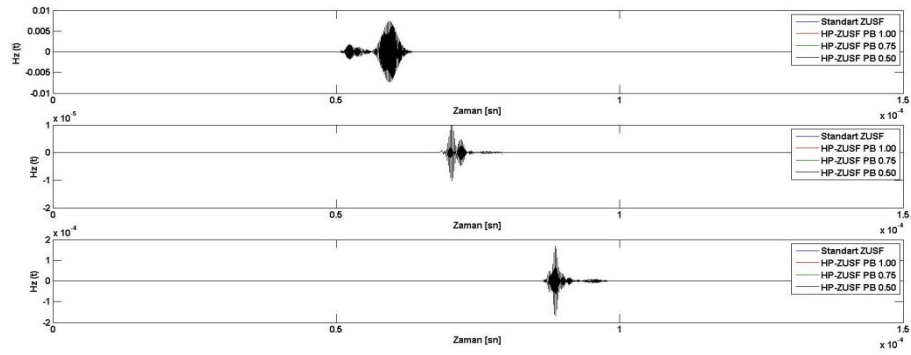
İkinci olarak 10 MHz frekansta E_x , E_y ve H_z olan bileşenleri için üç farklı pencere boyutunda zaman uzayı işaretleri Şekil 5.11'de verilmiştir.



a) Sırasıyla adanın sol, orta ve sağında gözlenen $E_x(t)$ işaretleri.

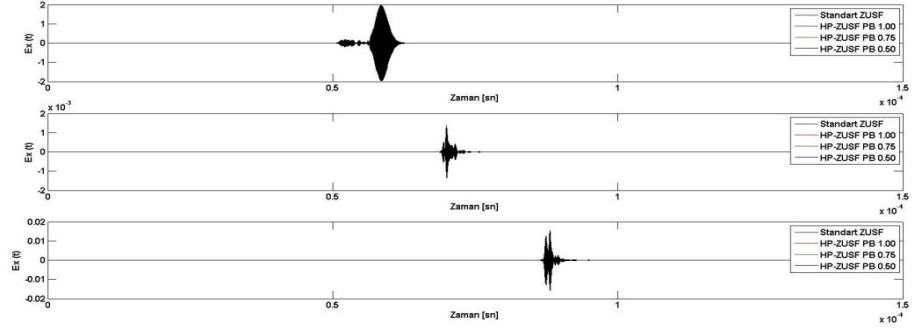


b) Sırasıyla adanın sol, orta ve sağında gözlenen $E_y(t)$ işaretleri.

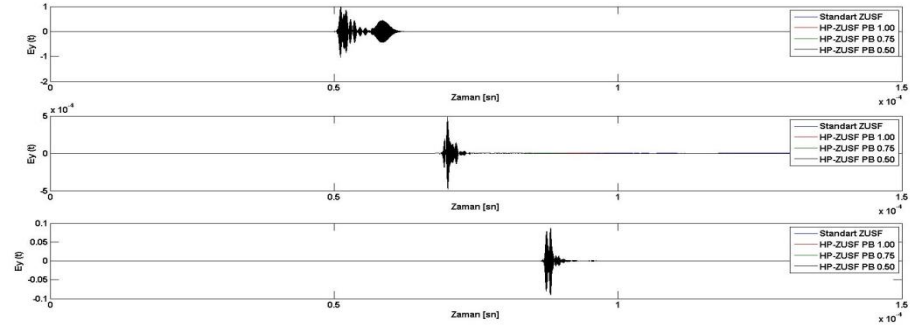


c) Sırasıyla adanın sol, orta ve sağında gözlenen $H_z(t)$ işaretleri.

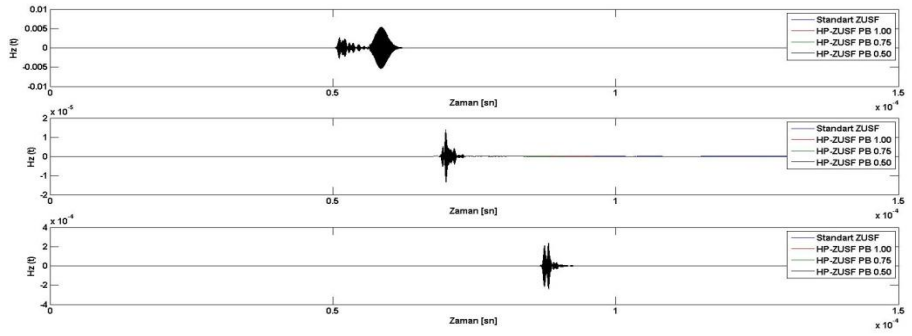
Şekil 5.10: 5 MHz frekansta E_x , E_y ve H_z alan bileşenlerinin üç farklı pencere boyutunda (PB= 1.00, 0.75 ve 0.50) hareketli pencere için zaman uzayı gözlemleri.



a) Sırasıyla adanın sol, orta ve sağında gözlenen $E_x(t)$ işaretleri.

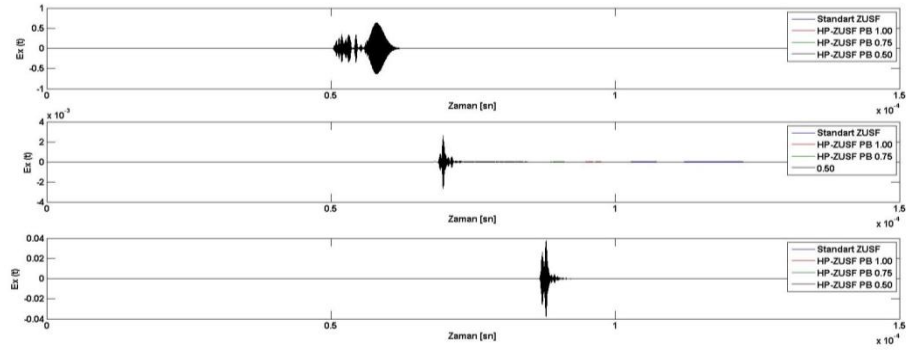


b) Sırasıyla adanın sol, orta ve sağında gözlenen $E_y(t)$ işaretleri.

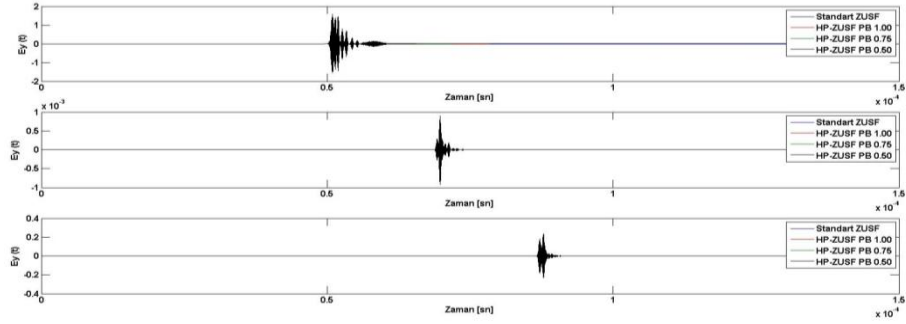


c) Sırasıyla adanın sol, orta ve sağında gözlenen $H_z(t)$ işaretleri.

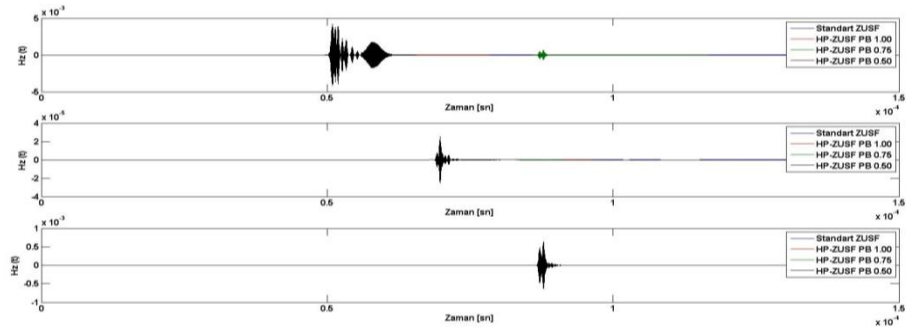
Şekil 5.11: 10 MHz frekansta E_x , E_y ve H_z alan bileşenlerinin üç farklı pencere boyutunda (PB= 1.00, 0.75 ve 0.50) hareketli pencere için zaman uzayı gözlemleri.



a) Sırasıyla adanın sol, orta ve sağında gözlenen $E_x(t)$ işaretleri.



b) Sırasıyla adanın sol, orta ve sağında gözlenen $E_y(t)$ işaretleri.



c) Sırasıyla adanın sol, orta ve sağında gözlenen $H_z(t)$ işaretleri.

Şekil 5.12: 15 MHz frekansta E_x , E_y ve H_z alan bileşenlerinin üç farklı pencere boyutunda (PB= 1.00, 0.75 ve 0.50) hareketli pencere için zaman uzayı gözlemleri.

Şekil 5.11’de 10 MHz için yapılan benzetim sonucunda yine HP-ZUSF sonuçlarının standart ZUSF ile uyumu görülmektedir.

Son olarak 15 MHz frekansta üç farklı pencere boyutu için zaman uzayı işaretleri Şekil 5.12’de gösterilmiştir.

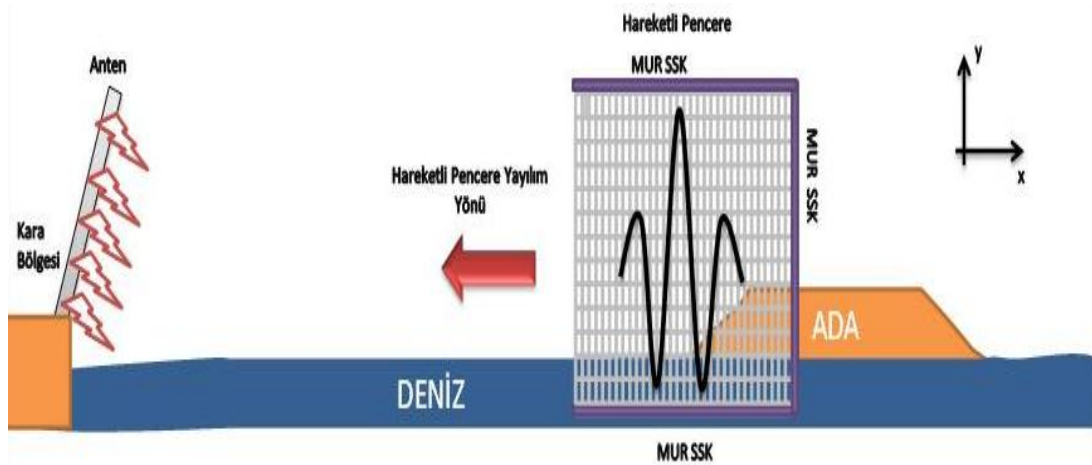
Şekil 5.12’de elde edilen benzetim sonuçları ve grafikler yorumlandığında üç farklı pencere boyutunun da standart ZUSF sonuçları ile tutarlı olduğu görülmüştür. Bu noktada benzetim için gerekli hesap zamanı bakımından pencere boyutlarının

karşılaştırılması gerekmektedir. $0.5 \times \Delta L$ boyutundaki hareketli pencere, hesaplama zamanı bakımından diğer iki pencere boyutuna nazaran daha kısa ve sonuçlar bakımından yeterli tutarlılığa sahiptir. Bu bakımdan bir sonraki bölümde sola gidecek pencere boyutu olarak $0.5 \times \Delta L$ seçilmiştir.

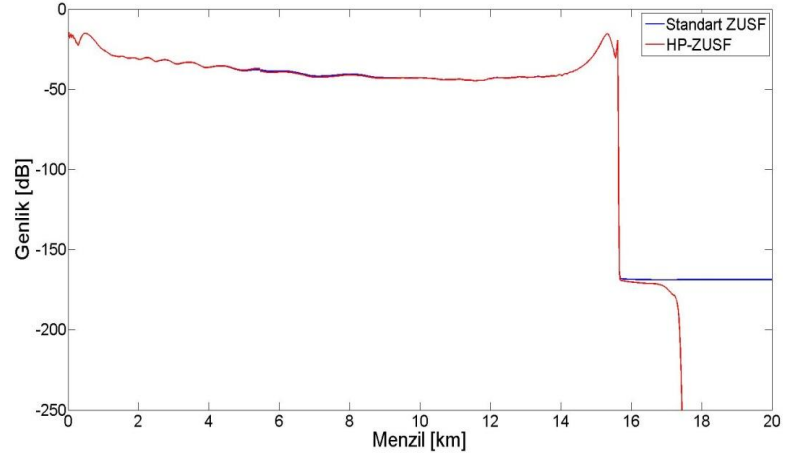
5.3. Sola Hareket Eden Pencere (Monostatik Durum)

Monostatik durumda YF radar anteninden yayılan 5 MHz'deki elektromanyetik dalga, problem uzayının 10'uncu kilometresinden (km) başlayan ve 15 km uzunlukta olan ada ile etkileşerek tekrar aynı antene geri dönmektedir.

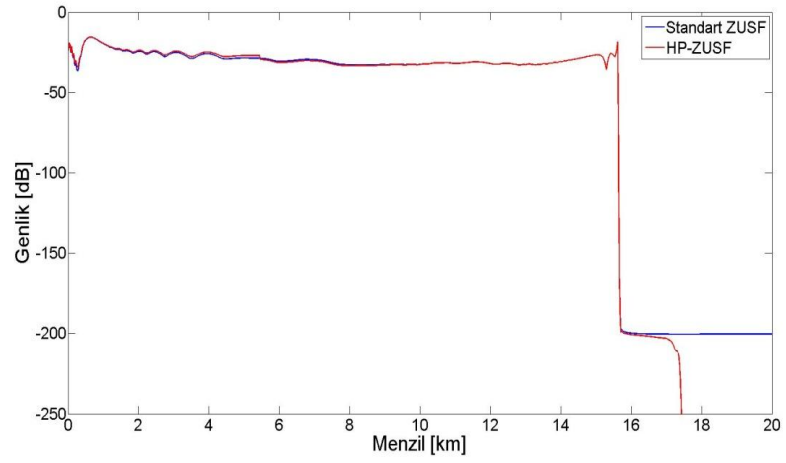
HP-ZUSF benzetiminde problem uzayı olarak sadece hareketli pencerenin içi kabul edilmekte olduğundan, diğer bölgelerdeki etkileşimler hesaba katılmamaktadır. Bunun sonucunda hesaplama zamanı kısaltılırken hareketli pencerenin bulunmadığı alanlardaki bilgilerin kaybolmasına engel olunamamaktadır.



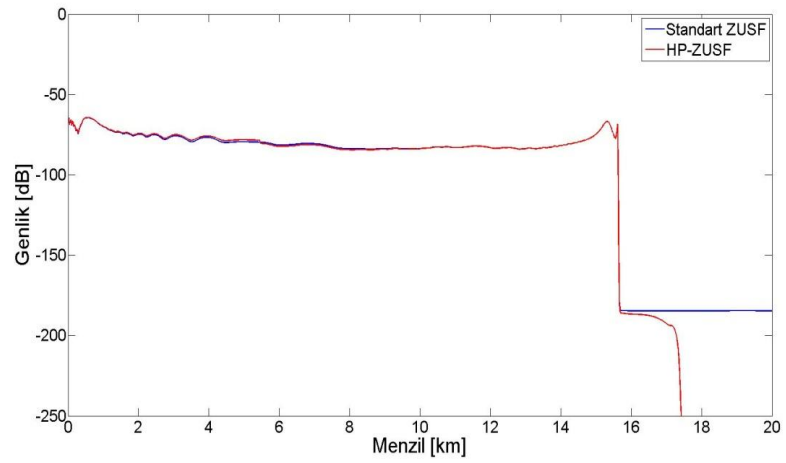
Şekil 5.13: Problem uzayı ve sola hareket eden pencere.



a) E_x alan bileşeni için yol kaybı.



b) E_y alan bileşeni için yol kaybı.



c) H_z alan bileşeni için yol kaybı.

Şekil 5.14: 5 MHz frekansta E_x , E_y ve H_z bileşenlerinin $0.5 \times \Delta L$ pencere boyutunda sola hareket eden hareketli pencere için yol kaybı grafiği.

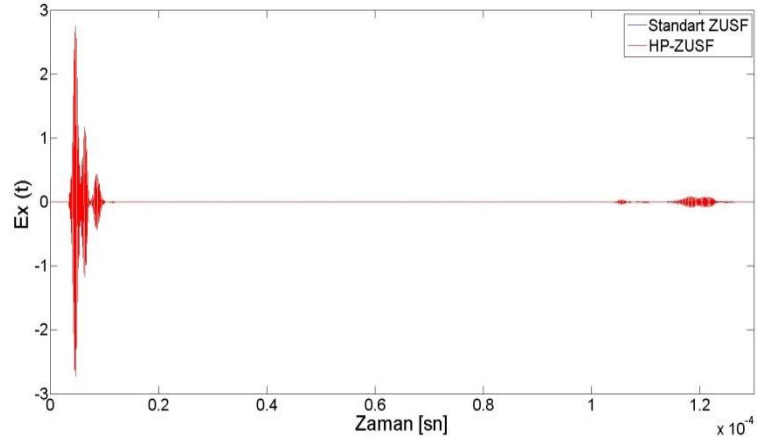
Sola hareket ettirilen pencerede ada ile etkileşerek yansıyan elektromanyetik dalganın tekrar alıcı anten üzerinde görülebilmesi temelde pencerenin anteni kapsaması ile mümkün olmaktadır. Anteni kapsayacak kadar boyutu artırılan pencere kullanıldığı takdirde ise hesaplama zamanı ve hafıza ihtiyacı çok büyük miktarda artmaktadır. Bu kısıtlamalar nedeniyle sadece sağ yöne hareket ettirilen pencere ile monostatik YF radar benzetiminin makul sürelerde yapılmasının mümkün olmadığı görülmektedir.

Bu zorluk, pencerenin önce sağ yöne ve ardından Şekil 5.13'te gösterildiği gibi geri dönerek alıcı antene doğru sola hareket ettirilmesiyle bu çalışmada çözülmüştür. Buna göre pencere ada ile etkileşiminin başladığı noktaya geldiği anda pencerenin sol kenarı sabit kalırken sağ kenarı adanın ortasına kadar genişletilmektedir (dinamik pencere boyu). Pencerenin sağ kenarı adanın orta noktasına geldiğinde pencere boyutu değiştirilmeyerek tekrar sol yöne hareket ettirilmektedir. Bu yöntem sayesinde adanın baş tarafında oluşan yansımalar pencere içerisinde tutularak kaybolmasının önüne geçilmiştir. Bu işlemin tersi pencerenin sol kenarı problem uzayının sonuna temas ettiğinde uygulanmakta ve sabit tutulan sol kenarın üzerine pencerenin sağ kenarı kapanmaktadır. Hareketli pencere hareket ettirilirken pencere etrafında bulunan Mur tipi SSK da pencereyle birlikte hareket ettirilmektedir.

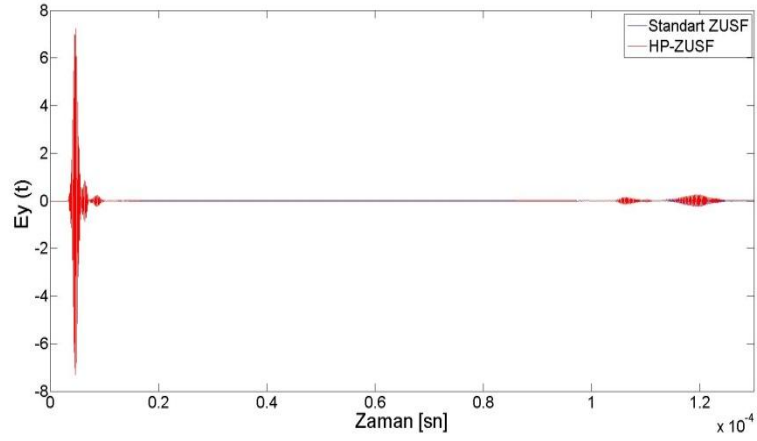
Şekil 5.13'te monostatik anten üzerinde bulunan gözlem noktasında elde edilen sırasıyla E_x , E_y ve H_z işaretlerinin yol kayıpları ve Şekil 5.14'te zaman bağımlılıkları görülmektedir.

Şekil 5.14'te sonuçların standart ZUSF ile karşılaştırıldığında adanın başlangıç bölümüne kadar birebir örtüştüğü gözlenmektedir.

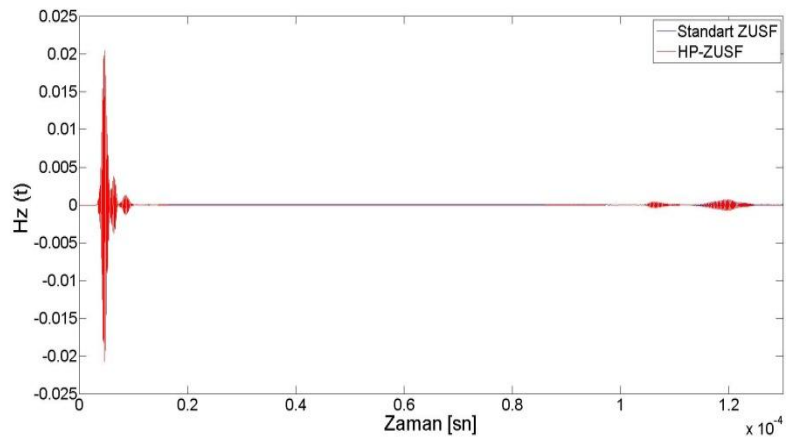
Şekil 5.14'te ise işaret kaynağı uygulandıktan yaklaşık 1 sn sonra antendeki değişim gözlenmektedir. Bu değişim adadan gelen yansımaların gözlem noktasına olan ince antene ulaşması ile meydana gelmektedir. HP-ZUSF sonucu ile standart ZUSF sonucunun birbiriyle mükemmel olarak uyumlu olduğu görülmektedir. Bu sonuçlar da standart ZUSF ile uzun zaman ve hafıza ihtiyacı gereksinimi olan problemlerin HP-ZUSF yöntemi ile çözülebildiğini kanıtlamaktadır.



a) $E_x(t)$ zaman uzayı işareti.



b) $E_y(t)$ zaman uzayı işareti.

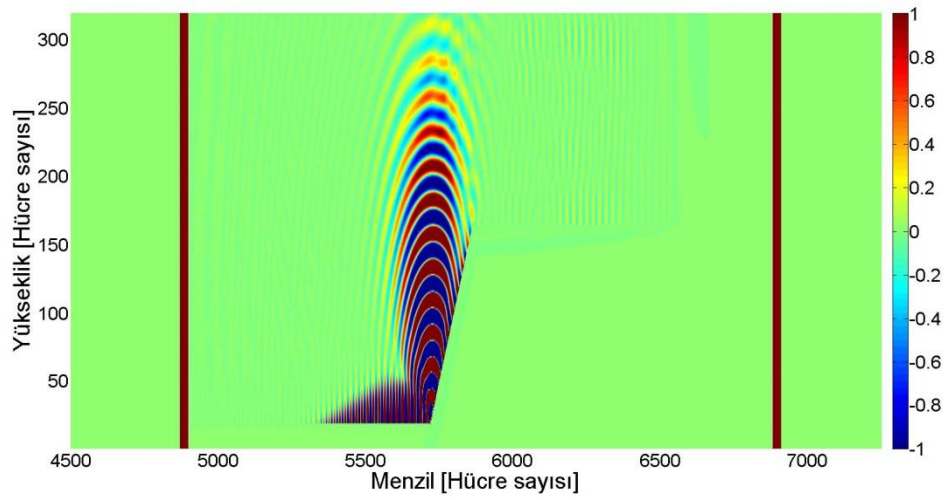


c) $H_z(t)$ zaman uzayı işareti.

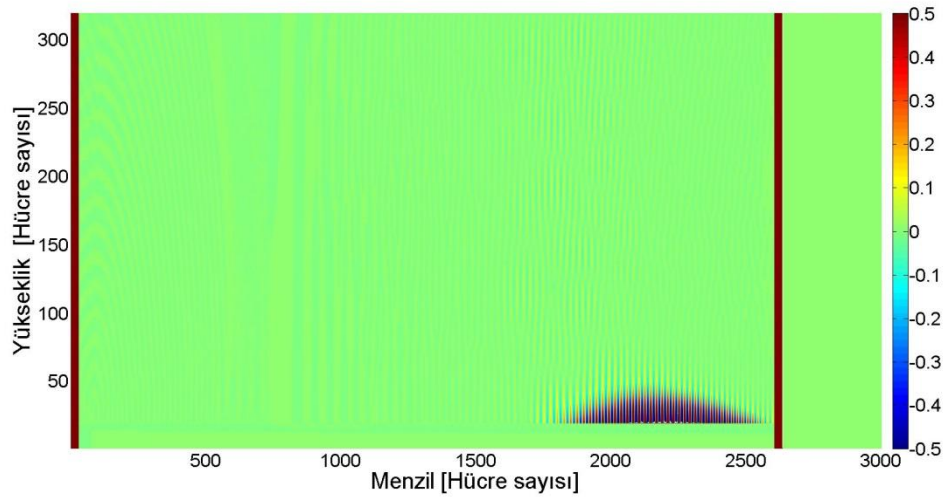
Şekil 5.15: 5 MHz frekansta E_x , E_y ve H_z bileşenlerinin $0.5 \times \Delta L$ pencere boyutunda hareketli pencere için monostatik anten üzerindeki zaman uzayı gözlemleri.

Son olarak Tablo 5.2’de standart ZUSF ile HP-ZUSF yöntemlerinin hafıza ihtiyacı ve hesap zamanı karşılaştırılması bulunmaktadır. Buna göre HP-ZUSF yöntemi ile standart ZUSF yöntemi karşılaştırıldığında, hafıza ihtiyaçları ve problem uzayının hesaplanması için geçen süre bakımından iki yöntem arasında beşte bir oranına kadar fark bulunmaktadır. Bu sayede benzetimi mümkün olmayan büyük ölçekli problemlerin HP-ZUSF yöntemi kullanılarak çözülebildiği gösterilmiştir.

5.4. HP-ZUSF Alan Dağılımları



a) Sağa giden dalga için hemen ada öncesi $E_x(t)$ alan dağılımı.



b) Sola giden dalga için ada sonrası $E_x(t)$ alan dağılımı.

Şekil 5.16: 5 MHz frekansta $E_x(t)$ bileşeninin $0.5 \times \Delta L$ pencere boyutunda hareketli pencere için alan dağılımları.

HP-ZUSF yönteminde kullanılan $0.5 \times \Delta L$ pencere boyutu için $E_x(t)$ bileşenin alan dağılımları Şekil 19’da iki durum için gösterilmiştir. Şekilde ilk olarak hemen ada öncesi konumda sağa doğru giden elektromanyetik dalganın ada ve deniz ile etkileşimi gösterilmektedir. Pencerenin sol yöne hareket ettirildiği ikinci durum da ise elektromanyetik dalganın deniz ile etkileşimi gösterilmektedir.

Tablo 5.2: Standart ZUSF ile HP-ZUSF hafıza ihtiyacı ve hesap zamanı karşılaştırması.

Frekans	Hafıza Kullanımı (MB)					Hesaplama Zamanı (saat)				
	Standart	Sağ yöne hareket eden pencere			Sol yöne hareket eden pencere	Standart	Sağ yöne hareket eden pencere			Sol yöne hareket eden pencere
	ZUSF	PB 0.50	PB 0.75	PB 1.00		ZUSF	PB 0.50	PB 0.75	PB 1.00	
5 MHz	1475.5276	235.29746	343.89629	458.45345	1475.4431	3.1329	0.5767	0.7856	1.0039	0.7287
10 MHz	4038.2900	677.5968	965.95896	1254.40825	677.5968	25.3634	4.7141	6.4150	8.1471	5.9132
15 MHz	7688.3640	1194.2103	1790.9250	2388.4207	1194.2103	86.6303	15.9286	21.8496	27.8566	19.8810

6. YORUMLAR

Büyük ölçekli problemlerde standart ZUSF yöntemi hafıza ve hesap zamanı ihtiyacı nedeniyle yetersiz kalmaktadır. YF radarlarının uzun menzilli olması benzetim uzayının da büyük ölçekli olmasını gerektirmektedir. Bu bakımdan bu tür benzetimlerin standart ZUSF yöntemi ile yapılması uzun hesap zamanı ve fazla hafıza gereksinimi ortaya çıkarmaktadır. Literatür çalışmalarında bu sorunların HP-ZUSF yöntemi kullanılarak aşılabildiği görülmektedir.

Bu tez çalışmasında 36 km uzunluğundaki problem uzayında bistatik ve monostatik durumda YF radar benzetimi HP-ZUSF yöntemi ile yapılmış ve ardından elde edilen sonuçlar standart ZUSF yöntemi ile karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmalarda standart ZUSF ile HP-ZUSF nin büyük oranlarla örtüştüğü gözlenmiştir.

Literatürde HP-ZUSF yöntemi kullanılarak yapılan YF radar benzetimlerinin hepsi bistatik radar için uygulanmış yani alıcı sistemler deniz üzerindeki platformlarda bulunduğu düşünülerek modellenmiştir. Bu kapsamda yol kaybı hesabı üzerine yoğunlaşmış fakat D-YF radarlar genellikle monostatik durumda, yani antenin hem alıcı hem de verici olduğu durumda kullanılmaktadır. Bu durumda da mevcut çalışmalar yetersiz kalmaktadır.

Bu tezde ise literatürde bir ilk olarak, tasarlanan anten hem verici hem de alıcı olarak kullanılmış ve bu sayede gerçek hayatta kullanılan monostatik YF radarlarının benzetimi yapılmıştır.

Yine geçmiş çalışmalarda HP-ZUSF yöntemindeki hareketli pencerenin boyutları tüm benzetim süresi boyunca sabit tutulmaktadır. Bu tez çalışmasında ise hareketli pencerenin boyutları benzetim esnasında değişmekte (optimize) ve bu sayede problem uzayında hesaplanmasına gerek görülmeyen bölümler için ek hafıza, ve hesap zamanı ihtiyacı önlenmektedir.

Son olarak bu tez çalışmasının literatüre katkısı D-YF radarı benzetiminde işaret kaynağı olarak antenin kullanılmasıdır. Şimdiye kadar yapılan bütün çalışmalarda kaynak olarak genellikle düzlemsel dalgalar kullanılmıştır.

İleri de yapılacak çalışmalarda HP-ZUSF penceresinin içerisinde koşturulan çekirdek standart ZUSF algoritması yerine Değişken Yönlü Dahili, DYD (Alternating Direction Implicit, ADI) ZUSF algoritması kullanılarak benzetim

süresinin kısaltılması ve ayrıca iki boyutlu bu çalışmanın üç boyutta yapılarak denizin, adanın ve karanın dispersif modellenmesi hedeflenmektedir. Yine Mur türü SSK yerine Mükemmel Uyumlu Katman, MUK (Perfectly Matched Layer, PML) uygulaması da çözümün doğruluğunu arttıracaktır.

KAYNAKLAR

- Akleman F., Sevgi L., (2000a), "A novel finite-difference time-domain wave propagator", IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 48 (5), 839-841.
- Akleman F., Sevgi L., (2000b), "Time and frequency domain wave propagators", IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 48, 839-841.
- Akleman F., Sevgi L., (2000c), "Time and frequency domain wave propagators", Applied Computational Electromagnetics Society (ACES) Journal, 15, 186-208.
- Akleman F., Özyalçın M. O., Sevgi L., (2002), "Novel time domain radiowave propagators for wireless communication systems", Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences, 10 (2), 199-217.
- Akleman F., Sevgi L., Topuz E., (2002), "Yer dalgası yayılımının zaman ve frekans domeninde sayısal modellemesi", İstanbul Teknik Üniversitesi Dergisi/d, 2, 27-38.
- Akleman F., Sevgi L., (2003), "Realistic surface modeling for a finite-difference time-domain wave propagator", IEEE Antennas and Propagation, 51 (7), 1675-1679.
- Aksoy S., (2013), "Zaman Uzayı Sonlu Farklar Yöntemi, Ders Notları", Elektronik Mühendisliği Bölümü, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Gebze, Kocaeli.
- Alsunaidi M. A., Al-Hajiri F. S., (2009a), "Efficient NL-FDTD solution schemes for the phase-sensitive second harmonic generation problem", Journal of Lightwave Technology, 27 (22), 4964-4969.
- Alsunaidi M. A., Al-Hajiri F. S., (2009b), "A new carrier-free nonlinear FDTD algorithm suitable for the moving computational window technique", Photonics Technology Letters, 21 (13), 878-880.
- Başaran E., (2008), "Zaman Uzayı Sonlu Farklar Yöntemi ile Frekans Bağımlı Dielektrik Yüklü Kavite ve Yüzey Dalgası İçin Radar Kesit Alanı Analizleri", Doktora Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü.
- Batista C. G., Rego C. G., Mello L. A. R., (2011), "A FDTD-based propagator with a material independent PML formulation", Microwave & Optoelectronics Conference (IMOC), 323-327, Belo Horizonte, Brazil, 29 October-01 November.
- Batista C. G., Rego C. G., (2012), "Moving window propagation model based on an unconditionally stable FDTD method", European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP), 1178-1182, Prague, Czech Republic, 26-30 March.
- Belmonte R., Fast S., Schuster J., (2008), "A comparison of earth propagation over layered media", Military Communications Conference, 1-6, San Diego, California, USA, 16-19 November.

Berenger J. P., (2002), "FDTD computation of VLF-LF propagation in the earth-ionosphere waveguide", *Annals Des Telecommunications*, 57 (11-12), 1059-1090.

Berenger J. P., (2005), "Long range propagation of lightning pulses using the FDTD method", *IEEE Transaction Electromagnetic Compatibility*, 47 (4), 1008-1011.

Berenger J. P., (2006), "Use of the FDTD method for computing the VLF-LF propagation in the earth-ionosphere waveguide", *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, 3785-3788, Orchard Hotel, Singapore, 01-04 November.

Bourgeade A., (2002), "Dynamic load balancing computation of pulses propagating in a nonlinear medium", *International Conference on Parallel Processing Workshops*, 246-253, Vancouver, British Columbia, Canada, 18-21 August.

Fidel B., Heyman E., Kastner R., Ziolkowski R. W., (1997), "Hybrid Ray-FDTD moving window approach to pulse propagation", *Journal of Computational Physics*, 138 (2), 480-500.

Fidel B., Heyman E., Kastner R., (1994), "Hybrid ray-FDTD moving frame approach to pulse propagation", *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, 3, 1414-1417, Seattle, Washington, USA, 20-24 June.

Fujita K., Hampel R., Müller W.F.O, Weiland T., Kawaguchi H., Tomioka S., Enoto T., (2007), "Explicit time domain boundary element scheme for dispersion-free wake field calculation of long accelerator structures", *Particle Accelerator Conference*, 3330-3332, Albuquerque, New Mexico, USA, 25-29 June.

Headrick J. M., Skolnik I. M., (1974), "Over-the-horizon radar in the HF Band", *Proceedings of the IEEE*, 62 (6), 664-673.

Li Y., Wang J., (2010), "Application of moving coordinate FDTD method on electromagnetic pulses propagation", *Progress In Electromagnetics Research Symposium*, 192-195, Xian, China, 22-26 March.

Liu J., Wan G., Xi X., (2010), "Application of MW-FDTD to simulate EM wave propagation in plasma for long distance", *International Symposium on Antennas, Propagation and Electromagnetic Theory*, 784-786, Guangzhou, China, 29 November-2 December.

Liu J., Xi X., Wan G., Wang L., (2011), "Simulation of electromagnetic wave propagation through plasma sheath using the moving-window finite-difference time-domain method", *IEEE Transactions on Plasma Science*, 39 (3), 852-855.

Luebbers R., Schuster J., Wu K., (2003a), "Full wave propagation model based on moving window FDTD", *Military Communications Conference*, 2, 1397-1401, Boston, Massachusetts, USA, 13-16 October.

Luebbers R., Schuster J., Wu K., (2003b), "Application of moving window FDTD to prediction of path loss over irregular terrain", IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, 2, 610-613, Columbus, Ohio, USA, 22-27 June.

Mur G., (1981), "Absorbing boundary conditions for the finite-difference approximation of the time-domain electromagnetic-field equations", IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 23 (4), 377-382.

Ohs R.R., Schuster J. W., Fung T.Y., (2009), "Full wave simulation of radiowave propagation in unattended ground sensor networks", Radio and Wireless Symposium, pp. 183-186, San Diego, California, USA, 18-22 Jan.

Pemper Y., Fiedel B., Heyman E., Kastner R., Ziolkowski R. W., (1997), "Absorbing boundary conditions in the context of the hybrid ray-FDTD moving window solution", IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, 2, 1006-1009, Montreal, Quebec, Canada, 13-18 July.

Pemper Y., Lomakin V., Heyman E., Kastner R., (2000), "Moving coordinate frame FDTD analysis of long range tracking of pulsed fields in graded index waveguides", Progress In Electromagnetics Research, 26, 133-164.

Pemper Y., (2001), "Hybrid ray-FDTD moving coordinate frame approach for long range tracking of collimated wavepackets", Progress in Electromagnetics Research, 30 (14), 1-32.

Sevgi L., Akleman F., Felsen L. B., (2002), "Ground wave propagation modeling - Problem matched analytical formulations and direct numerical techniques", IEEE Antennas and Propagation Magazine, 44 (1), 55-75.

Sevgi L., (2001), "HF-VHF radarları ve ulusal savunma ağındaki yeri", Silahlı Kuvvetler Dergisi, 370, 68-74.

Sevgi L., (2007), "Ground wave modeling and simulation strategies and path loss prediction virtual tools", IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 55 (6), 1591-1598.

Thevenot M., Berenger J. P., Monediere T., Jecko F., (1999), "A FDTD scheme for the computation of VLF-LF propagation in the anisotropic earth-ionosphere waveguide", Annals Des Telecommunications, 54 (5-6), 297-310.

Xiaoshuan Y., Bin C., Bihua Z., Run X., Qin Y., (2009) "Application of MW-FDTD to simulate the electromagnetic pulse (EMP) propagation in tunnel", Environmental Electromagnetics (CEEM), 200-203, Xian, China,, 16-20 September.

Web 1, www.remcom.com, (Erişim Tarihi: 16/12/2013).

Wu K. Schuster J., Ohs R., Luebbers R., (2004), "Application of moving window FDTD to modeling effects of atmospheric variations and foliage on radio wave propagation over terrain", Military Communications Conference, 3, 1515-1521, Monterey, California, USA, 31 October-3 November.

ÖZGEÇMİŞ

Halil Alptuğ Dalgıç 1986 yılında Ankara’da doğdu. 2004 yılında başladığı Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü (GYTE), Mühendislik Fakültesi, Elektronik Mühendisliği Bölümü’nü 2009 yılında başarıyla tamamlayarak, aynı yıl yüksek lisans eğitimine GYTE Elektronik Mühendisliğinde bölümünde başladı. 2009 yılından bu yana TÜBİTAK BİLGEM’de RF/Mikrodalga kaynak konularında araştırmacı ve TEMPEST Test Laboratuvarında proje yürütücüsü ve Haberleşme Teknolojileri Bölümünde Uzman Araştırmacı olarak çalışmaktadır.