

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YER RADARI YÖNTEMİ İLE KUZEY ANADOLU
FAYININ BALIKESİR YÖRESİNDEN GEÇEN
KESİMİNİN BELİRLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Jeofizik Müh. Murat SANDALCI

Enstitü Anabilim Dalı : JEOFİZİK MÜHENDİSLİĞİ

Tez Danışmanı : Yrd.Doç.Dr.Günay BEYHAN

Eylül 2009

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ


YER RADARI YÖNTEMİ İLE KUZEY ANADOLU
FAYININ BALIKESİR YÖRESİNDEN GEÇEN
KESİMİNİN BELİRLENMESİ


YÜKSEK LİSANS TEZİ

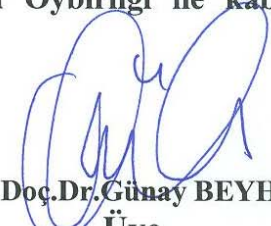
Jeofizik Müh. Murat SANDALCI

Enstitü Anabilim Dalı : JEOFİZİK MÜHENDİSLİĞİ

Bu tez 16/09/2009 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.


Prof. Dr. Cengiz KURTULUŞ
Jüri Başkanı


Doç. Dr. Murat UTKUCU
Üye


Yrd. Doç. Dr. Günay BEYHAN
Üye

TEŐEKKÖR

Bu çalıőmanın hazırlanmasında yardımlarını esirgemeyen ve çalıőmalarımı yönlendiren tez danışmanı hocam Yrd. Doç. Dr. Günay BEYHAN'a, Kocaeli Üniversitesi öğretim üyesi Prof.Dr. Cengiz KURTULUŞ'a, ve Sakarya Üniversitesi öğretim üyesi Doç. Dr. Murat UTKUCU'ya Őükranlarımı arz ederim.

Murat SANDALCI

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	vii
TABLolar LİSTESİ.....	ix
ÖZET.....	x
SUMMARY.....	xi
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ.....	1
1.1. Sismik Yöntemi.....	1
1.2. Gravite Yöntemi.....	2
1.3. Yer Radarı (GPR) Yöntemi.....	2
1.4. Yöntemlerin Karşılaştırılması.....	3
BÖLÜM 2	
ÇALIŞMADA KULLANILAN YÖNTEM.....	4
2.1. Elektromanyetik (EM) Dalga Teorisi.....	5
2.1.1. Elektromanyetik dalganın oluşumu.....	5
2.1.2. Maxwell denklemleri.....	6
2.1.3. Elektromanyetik dalganın yayılımı.....	8
2.1.4. Elektromanyetik dalgaların yayılımını etkileyen fiziksel özellikler	9
2.1.4.1. Dielektrik geçirgenlik.....	10
2.1.4.2. Elektrik iletkenlik.....	12
2.1.4.3. Toplam akım dolaşımı.....	15
2.1.4.4. Bağıl manyetik geçirgenlik.....	17

2.1.5. Elektromanyetik empedans.....	20
2.1.6. Kutuplanma.....	21
2.1.7. Elektromanyetik dalga özellikleri.....	23
2.2. Yer Radarı Kuramı.....	26
2.2.1. Yer radarı sinyallerinin oluşturulması ve yayınımlı.....	26
2.2.2. Sinyalin sönümlenmesi.....	29
2.2.3. Yer radarı sinyallerinin yansıması.....	32
2.2.4. Sinyal hızı ve derinlik belirlenmesi.....	33
2.2.5. Penetrasyon derinliği.....	35
BÖLÜM 3	
BÖLGENİN GENEL JEOLJİSİ VE TEKTONİĞİ.....	37
3.1. Bölgenin Tektonik Özellikleri	37
3.2. Ege Graben Sistemi.....	41
3.3. Çalışma Sahası Hakkında Bilgi.....	42
3.4. Çalışma Sahasının Jeolojisi.....	43
BÖLÜM 4	
YER RADARI KESİTLERİNİN YORUMLANMASI.....	45
4.1. Yer Radarı Kayıtlarına Uygulanan Veri İşlem Aşamaları.....	46
4.2. MS-1 Radar Kesiti ve Yorumu.....	47
4.3. MS-2 Radar Kesiti ve Yorumu.....	47
4.4. MS-3 Radar Kesiti ve Yorumu.....	48
4.5. MS-4 Radar Kesiti ve Yorumu.....	49
4.6. MS-5 Radar Kesiti ve Yorumu.....	49
4.7. MS-6 Radar Kesiti ve Yorumu.....	50
4.8. MS-7 Radar Kesiti ve Yorumu.....	51
4.9. MS-8 Radar Kesiti ve Yorumu.....	51
4.10. MS-9 Radar Kesiti ve Yorumu.....	52
4.11. Elde Edilen Kesitlerin İlişkilendirilmesi ve Fayların 3 Boyutlu Görüntüsü	52

BÖLÜM 5	
SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	54
KAYNAKLAR.....	56
ÖZGEÇMİŞ.....	60

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

A	: Telin Kapalı Döngü Alanı
c	: Işık Hızı
D	: Dipol Moment Yoğunluğu
GPR	:Ground Penetrating Radar
I	: Elektrik Akımı
KAF	: Kuzey Anadolu Fayı
K_0	: Elektromanyetik Dalga Yayınım Sabiti
M	: Manyetik Dipol Momenti
tf	: Geçiş Frekansı
v	: Faz Hızı
w	: Frekans
Z	: Elektromanyetik Empedans
ϵ	: Ortamın Elektrik Geçirgenliği
ϵ_0	: Boşluğun Elektrik Geçirgenliği
μ	: Ortamın Manyetik Geçirgenliği
μ_0	: Boşluğun Manyetik Geçirgenliği
σ	: Elektrik İletkenlik

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1.	Sismik Kırılma ve Yansıma Çalışması	2
Şekil 2.1.	Yer radarı sisteminin basit bir gösterimi.....	4
Şekil 2.2.	Elektromanyetik dalgalar elektrik ve manyetik alanların birleşiminden oluşur. İlerleme yönü sağ el kuralına göre ve x eksenine doğrultusundadır.....	8
Şekil 2.3.	Elektrik alan uygulandığında serbest elektrik yüklerinin hareketi.....	13
Şekil 2.4.	Uygulanan elektrik alan doğrultusunda bağlı elektrik yüklerinin yer değiştirme hareketi.....	14
Şekil 2.5.	Uygulanan elektrik alan sonucu oluşan elektrik dipol moment dağılımı	15
Şekil 2.6.	Toplam elektrik akımının frekansla değişimi	16
Şekil 2.7.	Yayınım doğrultusuna göre a ve b olarak verilen iki farklı elektromanyetik alan oluşabilir	21
Şekil 2.8.	Toplam elektrik alan E elektrik alan vektörlerinin toplamından oluşur ve kutuplanma yönü E yönündedir.....	22
Şekil 2.9.	Elektrik alan bileşenleri aynı fazda ise elektrik alan sabit bir yönde, doğrusal şekilde kutuplanmıştır.....	22
Şekil 2.10.	Sinüsoidal dalgalar için alanlar doğrusal, dairesel ve eliptik biçimde kutuplanabilir.....	23
Şekil 2.11.	Dalga cepheleri bir kaynaktan dışa doğru seyahat eden dalgalar için es seyahat süreli ya da fazlı yüzeylerdir. Isınlar (rays) dalga cephelerine diktir ve yörüngeden dışa doğru çizilir.....	25
Şekil 2.12.	Standart yer radarı anteninden yeraltına gönderilen yayınım örneği.....	27
Şekil 2.13.	Farklı bağıl dielektrik geçirgenlik değerlerine sahip bir ortamda 300 MHz merkez-frekanslı bir anten kullanılarak elde edilecek yatay çözünürlük büyüklükleri.....	28

Şekil 2.14.	Derinlikle bağıl dielektrik geçirgenlik katsayıları (a) artan ve (b) azalan yeraltı modeli için dalga kırılma etkileri.....	29
Şekil 2.15.	Elektromanyetik enerjinin yayıldığı ortamın elektrik iletkenliği ile enerjinin penetrasyon derinliği ilişkisi.....	36
Şekil 3.1.	Türkiye'nin tektonik yapısı ve levhalar	38
Şekil 3.2.	Kuzey Anadolu Fay zonunun Marmara bölgesinden geçen K ve G kolu.....	38
Şekil 3.3.	Kuzey Anadolu Fay zonunun Marmara bölgesinden geçen K ve G kolu	39
Şekil 3.4.	Balıkesir ve çevresi diri fay haritası	40
Şekil 3.5.	Çalışılan Bölge ve Yer Bulduru Haritası	43
Şekil 3.6.	Çalışılan Bölge ve Çalışma Alanının Jeolojisi ve Tektoniği	43
Şekil 4.1.	Çalışma Sahası ve Radar Profillerinin Konumu.....	45
Şekil 4.2.	MS-1 Radar Kesiti ve Yorumlanmış Hali.....	47
Şekil 4.3.	MS-2 Radar Kesiti ve Yorumlanmış Hali.....	48
Şekil 4.4.	MS-3 Radar Kesiti ve Yorumlanmış Hali.....	48
Şekil 4.5.	MS-4 Radar Kesiti ve Yorumlanmış Hali.....	49
Şekil 4.6.	MS-5 Radar Kesiti ve Yorumlanmış Hali.....	50
Şekil 4.7.	MS-6 Radar Kesiti ve Yorumlanmış Hali.....	50
Şekil 4.8.	MS-7 Radar Kesiti ve Yorumlanmış Hali.....	51
Şekil 4.9.	MS-8 Radar Kesiti ve Yorumlanmış Hali.....	51
Şekil 4.10.	MS-9 Radar Kesiti ve Yorumlanmış Hali.....	52
Şekil 4.11.	Elde Edilen GPR Kesitlerinin İlişkilendirilmesi Sonucu Yorumlanan Fayların 3-B Görüntüsü.....	53

TABLULAR LİSTESİ

Tablo 2.1. Çeşitli ortamlar ve birimler için bağıl dielektrik geçirgenlik katsayıları.....	11
Tablo 2.2. Farklı yeraltı ortamlarının bağıl dielektrik geçirgenlik katsayısı ϵ , hız V , elektrik iletkenlik a ve sönümlenme a değerleri	31
Tablo 4.1. Radar Kesitleri ve Özellikleri	46

ÖZET

Anahtar kelimeler: Yer Radarı (GPR), Fay, Deprem.

Ülkemiz birçok jeolojik ve tektonik yapının bulunduğu bir coğrafyadadır. Depremler hayatımızın gerçekleri arasındadır. Yaşadığımız alanların emniyetini sağlayabilmek için öncelikle yeraltının iyi bir şekilde bilinmesi gerekmektedir. Bu bağlamda yeraltını en doğru bir şekilde görüntüleyecek sistemler ve buna bağlı yapılacak yorumlar büyük önem kazanmaktadır. Konuyla ilgili birçok yöntem olup, yer radarı yöntemi; son yıllarda elektronik ve bilgisayar teknolojilerinde olan gelişmelere bağlı olarak birçok sahada kullanılan yöntemlerden biri olmuştur.

Bilindiği üzere Balıkesir yöresi Türkiye aktif tektonizmasında birçok sistemin bir arada çalıştığı bir bölgedir. Ege horst graben yapısının etkisi ve Kuzey Anadolu Fay Zonunun bir kısmının da bu bölgeden geçmesi bölgenin tektonik aktivite yönünden zengin olmasına sebep olmaktadır.

Çalışmada yer radarı yöntemi kullanılarak ana fayı kesen kılcal fay yapılarından bir bölümü kesilmiş ve fay yapılarının belirlenmesi amaçlanmıştır. Yer radarı kayıtlarında yapılan düzenlemeler ve veri işlemlerle kayıtlar okunur hale getirilmiş bulunan faylar arazide gözlenmiş faylarla karşılaştırılmıştır.

DETERMINATION OF THE PART OF THE NORTH ANATOLIAN FAULT CROSSING BALIKESIR DISTRICT BY THE METHOD OF GROUND PENETRATING RADAR

SUMMARY

Key Words: GPR, Fault, Earthquake

Turkey is on a geography that has many geological and tectonic structures. Earthquakes are among the realities of our lives. To ensure the safety of our living space, first you need to know underground well. In this context, the most accurate way of displaying the underground systems and their interpretations are gaining importance.

There are many methods for displaying the underground systems and in association with the developments of the electric and computer technologies in recent years, the GPR method has become a method to be used in many areas.

As known, Balikesir district, north western Turkey, is a region of active tectonics with many tectonic system in work. Affect of the Graben-Horst structure of the Aegean region and crossing of the part of the North Anatolian Fault within the region have caused high tectonic activity.

In the study the small faults that transcutting the main fault are displayed and interpreted for mapping their structural properties through utilizing GPR method. The initial data has been arranged and processed before the analysis in order to make them readable and interpretable. Finally, the interpreted faults are compared to the observed faults.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

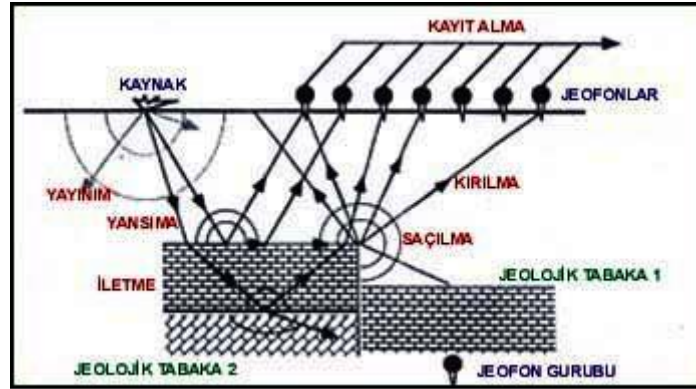
Türkiye birçok aktif tektonizma ürününün etkisi altında olan bir ülkedir. Ege bölgesinde kuzey güney yönlü açılma ve sıkışma rejimi, ülkenin kuzeyinde Arap levhasının itmesine bağlı olarak gelişen Kuzey Anadolu Fayı ve gene bu etki ile oluşan Doğu Anadolu Fayı bulunmaktadır. Bu ana yapılarla ilgili olarak gelişen tali faylarda düşünüldüğü zaman Türkiye'nin büyük bir bölümünün faylarla sarılı olduğu görülmektedir. Deprem tehdidi Türkiye'nin tamamına yakınında büyük oranda bulunmaktadır. Mühendislik yapılarının tasarımları sırasında yer özellikleri çok önemli bir yer tutar. Bu yapılarda deprem riskini yok etmek ya da en aza indirmek için yeraltında bulunan fayların türlerinin, derinliklerinin ve buna benzer bir dizi özelliklerinin çok iyi bilinmesi gerekmektedir.

Zeminin özelliklerinin belirgin hale getirilmesi için birçok araştırmacılar çeşitli yöntemler ileri sürmektedir. En yaygın olanları aşağıdaki gibi sıralanabilir.

1.1. Sismik Yöntem

Yeraltındaki jeolojik yapıların durumlarını belirlemek için elastik dalgaların yer içindeki yayılımını ve bunun bağlı olduğu fiziksel prensipleri kullanan metod olup elastik dalgalar yer yüzeyinde belirli bir kaynak tarafından oluşturulduktan sonra yer içinde seyahate başlarlar. Tabakalar arasında kırılarak ya da yansıyarak geçen dalga, geri döndüğünde seyahat ettiği jeolojik yapılardan bilgileri geri getirirler. Böylelikle yer altının jeolojik yapısı hakkında bilgi temin edilebilir.

Derin yapı araştırmalarında ve fay aramalarında sismik yöntemler sıklıkla kullanılmaktadırlar. Elastik dalgalar fay gibi süreksizlik yüzeyleri ile karşılaştıklarında saçılmaya uğrar ve izlerde farklı görüntülerin oluşmasına sebep olurlar. Aşağıda Şekil 1,1'de tipik bir sismik araştırma yöntemi verilmiştir.



Şekil 1.1 Sismik Kırılma ve Yansıma Çalışması

1.2. Gravite Yöntemi

Gravite yöntemi temel jeofizik yöntemlerden biri olup kaynağı yerçekimi olan doğal kaynaklı bir metottur. Yeraltının homojen olmayışından ötürü yer çekimi ivmesi (g)'de küçük değişimler olmaktadır. Bu değişiklikler yer yüzeyinden hassas aletlerle ölçülüp yer altı jeolojisi hakkında bilgiler temin edilebilir.

Gravite metodunda, öncelikle çalışma sahası haritası üzerinde karelamalar yapılarak ve her kareyaj noktasında alınan ölçüler sayesinde gravite anomali haritaları oluşturulur. Böylelikle yer altı özellikleri hakkında bilgiler temin edilmiş olur.

Yoğunluk farkı oluşturan kırık ve çeşitli süreksizliklerin belirlenmesinde kullanılan gravite yöntemi tek başına kullanılabileceği gibi diğer yöntemleri destekleyici bir yöntem olarak da kullanılabilir.

1.3. Yer Radarı (GPR) Yöntemi

Yer Radarı (GPR), bilinmeyen sığ yeraltı yapılarını, günümüzde en yüksek çözünürlükle resimleyen jeofizik yöntemlerden biridir. Bilindiği üzere son zamanlarda GPR metodu yeraltındaki homojen olmayan ve süreksizliklerin tespit edilmelerinde sıkça kullanılmaktadır.

İlk elektromanyetik uygulamaları, gömülü metal nesnelerin bulunması amacıyla Hulsmayer tarafından 1904 yılında gerçekleştirilmiştir [46]. Öte yandan yer radarı ile

ilk yeraltı jeolojik modellemesi Stern tarafından 1930'lu yıllarda yapıldığı bilinmektedir.

Özellikle 1990'lı yıllardan sonra bilgisayar ve görüntüleme teknolojilerinin ilerlemesine bağlı olarak yer radarı yöntemine olan ilgi artmış olup 1990'lardan itibaren yer radarı sığ jeofizik araştırmalarda yaygın uygulanmaya ve kullanılmaya başlamıştır. Bununla birlikte yer radarı yöntemi arkeoloji sahasında birçok araştırmacı tarafından kullanılmıştır [18, 26, 50]. Jeolojik araştırmalarda ve sığ yer altı hareketlerinin bıraktıkları izlerin belirlenmesinde araştırmacılar tarafından kullanılmıştır [12, 19, 30, 36]. Jeoteknik ve mühendislik jeofiziği sahasında yer radarı yöntemi son yıllarda bilim adamları tarafından incelenmeye devam edilmiştir [14, 15, 16, 28, 31].

Yeraltında gömülü malzemelerin aranması ya da maden araştırmalarının yanı sıra; kırık, çatlak ve fay araştırmalarında da yer radarı yöntemi sıklıkla kullanılmaya başlanılmıştır [7, 9, 13, 17]. Öte yandan konuyla ilgili çalışmalar devam etmektedir.

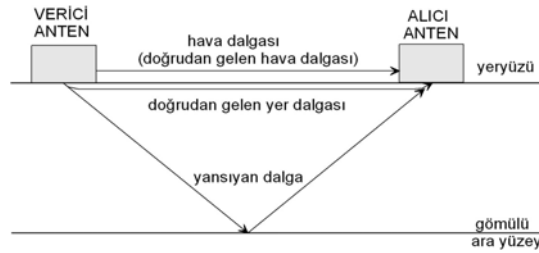
1.4. Yöntemlerin Karşılaştırılması

Jeofizik, bünyesinde birçok araştırma tekniğini barındıran bir sistemler bütünü olup araştırılacak konu fiziksel şartlara göre bu tekniklerden biri ya da birkaçı seçilerek yürütülebilir. Yöntemler çalışma sahasının özelliklerine ve imkânlarla göre belirlenebilir. Bu açıdan bakıldığında her bir yöntemin birbirine göre üstünlükleri zamana, yere ve ekonomik duruma göre farklı olabilir. Birkaç yöntemi tatbik etmek suretiyle sonuçlar hakkında daha gerçekçi veya daha hassas sonuçlar elde edinilebilir.

BÖLÜM 2. ÇALIŞMADA KULLANILAN YÖNTEM

Bu çalışmada tali fayların belirlenmesinde Yer Radarı (GPR) yöntemi kullanılmıştır. RADAR kelimesi Radio Detecting And Ranging kelimelerinin bas harflerinden oluşmaktadır ve radyo dalgalarının yankıları yardımıyla cisimlerin yerlerini ve uzaklığını bulabilen elektronik cihazlardır.

Yer radarı yöntemi, yeraltına gönderilen yüksek merkez-frekanslı (10-2000 MHz arası) elektromanyetik radar darbelerinin (puls) yer içinde yayılımı sırasında farklı dielektrik özelliklere sahip süreksizliklerle karşılaştıklarında, enerjilerinin bir kısmının geriye yansıyor yüzeydeki alıcı antende kaydedilmesi ve bu seyahat boyunca geçen toplam sürenin ölçülmesine dayanır [47]. Burada sözü geçen toplam seyahat süresi, radar dalgasının yüzeydeki verici antenden çıkıp yeraltında süreksizlikle/süreksizliklerle karşılaştığı ve bu yüzeyden yansıyor yeryüzündeki alıcı antende kaydedildiği ana kadar geçen süredir.



Sekil 2.1 Yer radarı sisteminin basit bir gösterimi [18].

Bir radar dalgası genellikle yeraltında çökellerdeki (sediment) ya da diğer jeolojik ortamlardaki litolojik değişimlerin ve stratigrafik ara yüzeylerin, arkeolojik ve mühendislik yapıların, boşlukların, gömülü yapıların ve benzeri yeraltı özelliklerinin ortam içinde oluşan fiziksel değişimlere bağlı olarak, ortamda oluşan elektriksel özelliklerdeki değişimin bir ifadesi olarak düşünülür. Bu değişimdeki ana etmenlerden biri, ortamın su ve nem içeriğindeki değişimdir. Ayrıca ortamların ve

ortamlar arasındaki ara yüzeylerin hacim yoğunluklarındaki değişimler de radar dalgasının değişiminde önemli bir etmendir [18].

2.1. Elektromanyetik (EM) Dalga Teorisi

2.1.1. Elektromanyetik dalganın oluşumu

Elektromanyetik alan, zamanla değişen elektrik ve manyetik alanların birlikte varlığından oluşur. Bu alanlardan herhangi birindeki değişimin diğer alandaki değişimi yaratması elektromanyetizma teriminin ortaya çıkmasına neden olmuştur. Elektromanyetizma temel olarak, elektromanyetik alanın fiziğidir ve elektrik iletkenlerindeki elektrik yük (elektrik akımı) akısından kaynaklanır. Temel elektromanyetizma teorisini açıklayabilmek için manyetotellürik ve tellürik dalga yayılımı kullanılabilir. Bu akımların kaynağı tamamen dünya dışında konumlanmıştır. Güneşin enerji yayımı aurora ve benzeri biçimde kaynaklanan periyodik ve geçici dalgalanmalar, dünyanın manyetik alanında günlük değişimlere neden olur. Bu etkinlikler iyonosferdeki akımlar üzerinde doğrudan bir etkiye sahiptir ve iyonosferdeki bu akımların yer içindeki tellürik akımları indüklediği düşünülür [34].

Uyarıcı mekanizma iyonosfer ve yeryüzü arasındaki uzayda büyük mesafelerde çok az sönmülmeye uğrayarak yayılan bir elektromanyetik alandır ve bu mekanizma paralel, iletici düzlemler arasında hareket eden dalgalar özelliğindedir. Bu dalgalar söz konusu sınırlar arasında ileri ve geri sıçrayarak yoluna devam eder ve bu nedenle büyük düşey bir bileşene sahiptir. Adı geçen bu dalgalar kaynaktan uzak mesafelerde değişken frekanslı düzlem dalga seklindedir [46].

Elektromanyetik dalgaların oluşumu elektromanyetik indüklenme kavramı ile açıklanabilir. Bir iletkenin bir manyetik alanla kesilmesi (iletken sabit) veya iletkenin bir manyetik alanı kesmesi (iletken hareketli) durumunda iletkende bir elektromotor kuvvet meydana gelecektir. Bu elektromotor kuvvetinin etkisiyle iletkenin uçları arasında ki bu bir kapalı devrededir, bir elektrik akımı oluşacaktır. Lenz Yasası, indüksiyon elektromotor kuvvetinin meydana getirdiği akımın bu elektromotor

kuvveti meydana getiren manyetik akı değişimine veya fiziksel harekete karşı koyacak biçimde olduğu şekilde tanımlar. Yasaya göre, indüklenen elektromotor kuvvetin yönü, bu elektromotor kuvvetinin indüklenmesine sebep olan olgu her neyse buna karşı koyacak yöndedir [34].

Manyetik akı değişimleri indüklenen motor kuvvetinin temel sebeplerindendir. Şiddeti ise; iletkenin manyetik akıyı kesmesi veya iletkenin manyetik akıyla kesilmesiyle orantılı olarak değişir. Manyetik akıdaki değişimler, statik bir iletkenin geçen manyetik akı yoğunluğunun değişmesi veya durgun bir manyetik alan içindeki iletkenin hareketiyle oluşabileceği gibi ikisinin bir arada meydana gelmesiyle de oluşur.

Bir iletken (ya da bobinde) meydana gelen indüksiyon elektromotor kuvvetinin değeri Faraday Yasası ile belirlenir. (2.1) bağıntısıyla verilen Faraday İndüksiyon Yasasına göre indüksiyon sonucu bir iletkenin meydana gelen elektromotor kuvvetin değeri, manyetik akının değişim hızı ve iletkenin (bobinin) sarım sayısı ile doğru orantılıdır ve bu elektromotor kuvvet, kapalı döngü ile çevrelenmiş yüzeysel alandan geçen manyetik akının zamanla değişme oranının negatif işaretlisidir. Yasa, herhangi bir sebeple akısı değişen ya da değiştirilebilen bir kapalı devre için geçerlidir. Denklemin sol tarafı uzayda herhangi kapalı bir döngü etrafındaki elektrik alanının çizgi integralini göstermektedir.

$$\int E dt = -\mu_0 \int \frac{dH}{dt} ds \quad (2.1)$$

2.1.2. Maxwell denklemleri

Elektromanyetik dalgaların yayını ve sönümlenmesini anlamak için elektrik ve manyetik alan vektörleriyle ilişkili Maxwell Eşitlikleri kullanılabilir.

$$\nabla * E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (2.2)$$

Bu ifade Faraday Kanununun matematiksel ifadesidir. Zamanla değişen bir manyetik alan ortamdaki elektrik yüklerin hareket etmesine ve bu yük hareketiyle, kapalı döngüsel bir elektrik alan oluşmasına neden olur. Elektrik alan, indüklenen elektromanyetik alanın manyetik akı değişiminin negatif işaretlisidir ve vektörel bir büyüklüktür.

$$\nabla * H = j + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (2.3)$$

Maxwell'in ikinci eşitliği bir elektrik akımının uzayda bir manyetik alanın vektörel kaynağını oluşturduğunu ve oluşan bu manyetik alanın bölgedeki iletkenlik (yük akısı) ve elektrik yüklerinin zamanla yer değiştirmesinden kaynaklanan toplam akıma orantılı olduğunu ifade eden Ampere Kanununun matematiksel ifadesidir ve (2.3) bağıntısı ile verilmektedir. Bunun fiziksel olarak en basit örneği, iletken bir çubuktan geçen elektrik akımının etrafında oluşan manyetik alan ve bu manyetik alanın varlığını ispat eden telin etrafındaki kağıt düzleminde manyetik alanın seklini alan demir tozlarıdır.

Doğada elektrik alanın iki kaynağı bulunmaktadır. Elektrik alanın skaler kaynağı, ya maddeler içerisindeki serbest elektrik yük yoğunluğu ya da elektrik alanın noktasal yüklerde sonlanması ile oluşur ki, bu Gauss Yasası olarak bilinir. Bir diğer elektrik alan kaynağı olan indükleme olgusu meydana geldiğinde, elektrik yükleri salınım yaparak zamanla değişim gösteren elektrik alanları (yani yüklerin hareketlenmesi) ile kapalı döngü şeklinde oluşturur. Genelde zamanla değişen sinyaller bu iki farklı kaynaktan ortaya çıkan elektrik alanın toplamından oluşur [34].

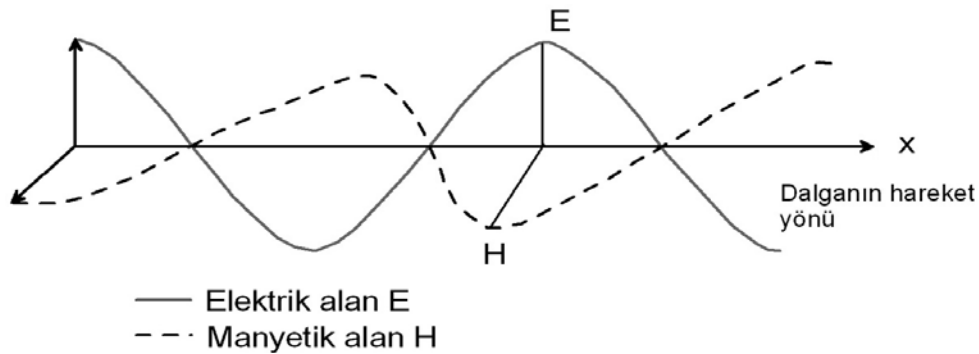
$$V \cdot D = q \quad (2.4)$$

Doğada manyetik alan, elektrik yüklerinin hareketlenmesiyle oluşan akım akısı sayesinde oluşur. Bu nedenle, manyetik alanlar sadece eşitlik 2.5'de ifade edilen kapalı döngüde oluşacaktır (ya da diğer bir deyişle hep kendi üzerinde sonlanır) ve manyetik alanın skaler kaynağı yoktur. Bu durumda herhangi bir kapalı yüzeyde oluşan manyetik alanın akısı sıfırdır.

$$V \cdot B = 0 \quad (2.5)$$

2.1.3. Elektromanyetik dalganın yayını

Şekil 2.2'de elektromanyetik dalganın kabaca şekli görünmektedir. Daha önce belirtildiği gibi elektromanyetik dalga, elektrik ve manyetik alanların bileşkesinden oluşur. Elektrik ve manyetik alanlar birbirlerine dik sinüs dalgaları şeklindedir ve dışarıdan gelen herhangi bir etki olmadığı müddetçe aynı fazdadırlar. Bu nedenle birisi maksimum olduğunda diğeri de maksimum, biri minimum olduğunda diğeri de minimumdur. Elektromanyetik dalgalar boşlukta ışık hızında hareket ederler. İlerleme yönü $E \times B$ vektörü yönünde ve z eksenine doğrudur.



Şekil 2.2 Elektromanyetik dalgalar elektrik ve manyetik alanların birleşiminden oluşur. İlerleme yönü sağ el kuralına göre ve x eksenine doğrudur [34].

Yeraltındaki elektromanyetik enerjinin hareketi, içinden geçtiği maddenin/ortamın yayını sabiti tarafından yönlendirilir. Boşlukta elektromanyetik dalgaların genel yayını sabiti (K_0), (2.6) bağıntısıyla verilir. Denklemden ω radyan cinsinden frekansı, μ_0 boşluğun manyetik geçirgenliğini ve ϵ_0 boşluğun elektrik geçirgenliğini ifade etmektedir [34].

$$K_0 = (\omega^2 \mu_0 \epsilon_0)^{0,5} \quad (2.6)$$

Yer içinde, elektromanyetik dalganın ilerleyişi, seyahat ettiği ortamın elektrik iletkenliğine bağlıdır ve yüksek elektrik iletkenlikli ortamlarda elektromanyetik dalgalar çok çabuk sönümlenir. Bu nedenle yayını katsayısının hesabı (2.7)

denklemleri ile verilir. Burada μ ortamın manyetik geçirgenliği, ϵ ortamın elektrik geçirgenliği ve σ_{DC} doğru akım elektrik iletkenliği ve $i = (-1)^{0.5}$ dir.

$$K = (\omega^2 \mu \epsilon + i \omega \sigma_{DC})^{0.5} \quad (2.7)$$

Elektrik geçirgenlik radar uygulamalarında çok büyük önem taşımaktadır ve genellikle bağıl geçirgenlik ya da bağıl dielektrik geçirgenlik katsayısı şeklinde açıklanır ve (2.8) bağıntısında gösterildiği gibi verilir. Denklemdaki K^* kompleks dielektrik katsayısı, K' dielektrik katsayısı ve K'' kayıp faktörü olarak adlandırılır. Buradan yeraltındaki elektromanyetik dalganın yayılım faktörü, (2.9) bağıntısıyla verilen şekilde tanımlanabilir. $\omega K'$ dielektrik katsayısı faktörünü, $i \omega K''$ dielektrik kayıp faktörünü ve $i \sigma_{DC}$ DC iletkenlik kayıp faktörünü ifade etmektedir.

$$\frac{\epsilon}{\epsilon_0} = K' = K' \epsilon_0 + i K'' \epsilon_0 \quad (2.8)$$

$$K = [\omega \mu_0 \epsilon_0 (\omega K' + i \omega K'' + i \sigma_{DC})]^{0.5} \quad (2.9)$$

(2.9) bağıntısı, söz konusu madde içerisinde yayılan enerji miktarını, hem doğru akım iletkenlik değerinin hem de karmaşık dielektrik geçirgenlik katsayılarının belirlediğini göstermektedir.

2.1.4. Elektromanyetik dalgaların yayılımını etkileyen fiziksel özellikler

Elektromanyetik alanlar zamanla değişen elektrik (E) ve manyetik (H) alan bileşenlerinden oluşmaktadır ve bu bileşenler içinden geçtikleri ortamların farklı fiziksel özelliklerinden etkilenirler. Bu değişim, bu alanların ortamda yayılım ve sönümlenmelerini etkilemenin yanı sıra, farklı karakterlerde yansımalar elde edilmesine de neden olur.

2.1.4.1. Dielektrik geçirgenlik

Dielektrik (ϵ) ifadesi elektriksel yalıtkanlıkla eş anlamlıdır ve dielektrik bir madde, elektrik akımına yüksek derecede direnç gösteren madde olarak tanımlanmaktadır. Dielektrik ortamlar, elektromanyetik enerjinin büyük bir kısmının saçılmadan geçişine izin verir. Dielektrik bir ortamda bir elektromanyetik alan söz konusu olduğunda, elektrik alan tarafından zorlanan yükler bu zorlamaya bir yer değiştirme hareketiyle cevap verirler. Birim elektrik alan başına düşen elektriksel yer değiştirme miktarının ölçüsü dielektrik geçirgenlik olarak tanımlanır. Birimi farad/metre ya da coulomb/volt.metredir.

$$D = \epsilon E \quad (2.10)$$

Dielektrik bir ortamda elektrik alan şiddeti arttığında, elektrik yer değiştirme hareketi bu ortamda depolanır. Daha sonra elektrik alan azaldığında, ortam depoladığı enerjiyi bırakır ve yer değiştirme akımlarını oluşturur. Bir maddenin bağıl dielektrik geçirgenliği (ϵ_r), o madde elektromanyetik enerjiyle yüklendiğinde, enerjiyi depolama ve daha sonra elektromanyetik enerjinin geçişine izin verme kapasitesi olarak tanımlanır [48].

Bir araştırmacı ise aynı parametreyi bir maddede mevcut elektromanyetik alan etkisiyle oluşan kutuplanma ve bu sebeple, yayınan elektromanyetik dalgalara yanıt verme yeteneğinin bir ölçüsü olarak tanımlamıştır [40]. Bu kutuplanma elektronik, iyonik ya da moleküler olabilir. Moleküler kutuplanma tüm yalıtkanların genel özelliğidir. İyonik yer değiştirme doğada kayaçları şekillendiren minerallerde oluşurken; su ve hidrokarbonlar moleküler kutuplanma gösteren nadir yapılar olmalarının yanı sıra, elektromanyetik alanla kutuplanmanın en büyük etkisine sahip olanlardır [46].

Bağıl dielektrik geçirgenlik katsayısı, bir maddenin elektrik geçirgenliğinin boşluğun elektrik geçirgenliğine oranı ile hesaplanabilir. Ortamların dielektrik geçirgenlikleri; onların bileşimleri, nem içeriği, hacim yoğunluğu, gözeneklilik, sıcaklık ve fiziksel yapılarına bağlıdır [40].

Bir ortam içerisinde belirli bir V hızında ilerleyen radar dalgaları için o ortamın bağıl dielektrik geçirgenlik değeri (2.11) bağıntısıyla hesaplanabilir. Burada C ışık hızını göstermektedir ve yaklaşık değeri $0,2998 \text{ m ns}^{-1}$ 'dir.

$$\sqrt{\epsilon_r} = \frac{C}{V} \quad (2.11)$$

Bağıl dielektrik geçirgenlik katsayısını arazide hesaplamak oldukça zordur. Bunun kestirimi arazide kullanılan bazı hız analizi teknikleri yardımıyla yapılabilir. Bunun yanı sıra, toprak ve çökel örnekleri üzerinde laboratuvar ölçümleri yapılarak da dielektrik geçirgenlik ölçülebilir. Bazı materyaller için verilen dielektrik geçirgenlik katsayıları Tablo 2.1'de verilmektedir.

Tablo 2.1. Çeşitli ortamlar ve birimler için bağıl dielektrik geçirgenlik katsayıları [18].

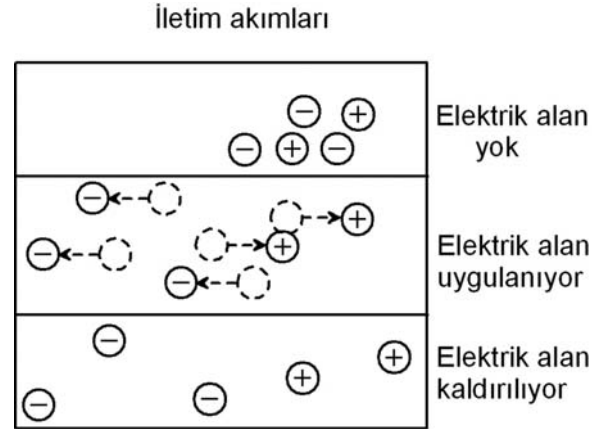
Malzeme	ϵ_r	Malzeme	ϵ_r
Hava	1	Donmuş toprak	6
Kar	1,5	Islak kumtaşı	6
Kuru toprak	2,5	Islak granit	6,5
Kuru kil	4	Islak kireçtaşı	8
Kuru kum	4-6	Islak bazalt	8,5
Buz	4	Volkanik kül	13
Kömür	4,5	Islak kum	15-25
Asfalt	5	Islak kumlu toprak	23,5
Kuru granit	5	Doygun kum	25
Donmuş kum ve granit	5,5	Islak kil	27
Beton	5,5	Turba	61,5
Kuru kireçtaşı	5,5	Organik toprak	64
Donmuş kum ve çakıl	5,5	Tatlı su	80
Kuru kumlu toprak	6	Tuzlu su	81-88

Yer radarı yönteminde, maksimum elektromanyetik enerji penetrasyonu için yeraltındaki ortamların düşük elektrik iletkenliğe sahip olması ve ortamlar arasındaki dielektrik geçirgenlik farkının yüksek olması gerekmektedir [34].

2.1.4.2. Elektrik iletkenlik

Elektrik alan (E) bir ortamda bulunan elektrik yükleri sayesinde ortaya çıkar. Elektrik alan vektörel bir büyüklüktür ve ortamın doğasına bağlı olarak iki farklı şekilde oluşabilir. Yükler, bir maddede bağlı ve serbest olmak üzere iki türde bulunabilir. Bunlar sırasıyla yer değiştirme akımları iletim akımları olarak adlandırılan akım dolaşımına neden olurlar.

2.1.4.2.a İletim Akımları. Bilindiği gibi elektrik iletkenliğe sahip ortamlarda, serbest (bağımsız) elektrik yükler bulunmaktadır. Bu yüklerin bulunduğu ortamlara bir elektrik alan uygulandığında, bu alanın etkisiyle yükler ani bir şekilde hızlanmaya başlar ve bir uç hıza ulaşırlar ve yüklerin doğası gereği ortamda bir elektrik akımı oluşur. Bu elektrik alan uygulanmaya devam ettiği sürece yüklerin hareketi devam eder ve bu esnada yükler buldukları ortama, elektrik alan etkisiyle aldıkları enerjiyi ısı enerjisi olarak transfer ederler. Bu hareketli yükler, ortamda bulunan hareketsiz nesnelere karşılaştıklarında, ısı enerjisi olarak ortaya çıkan enerji, hareketsiz yükleri hareketlendirecek biçimde mekanik enerjiye dönüşür. Elektrik alan uygulandığı sürece bu yükler hareketlerine ve dolayısıyla, elektrik enerjisi önce ısı ve daha sonra da mekanik enerjiye dönüşmeye devam eder. Elektrik alan kalktığında, bu hareketlenen yükler yavaşlar ve anlık bir sürede dururlar. Burada unutulmaması gereken, bu enerji dönüşümünün tek taraflı olduğu yani elektrik enerjisinin önce ısıya ardından mekanik enerjiye bir daha geri dönülmez şekilde dönüştüğüdür. Metal bir telde dolaşan elektronlar iletim akımlarına örnek olarak verilebilir. Metallerde, elektronlar yüklerini bir noktadan diğerine aktarmak için yapının metalik bağları içinde hareket ederler. Sulu çözeltilerde oluşan iyon hareketleri de yaygın bir iletim mekanizmasıdır ve birçok yer radarı uygulamasında en önemli iletim şeklidir [3]. Şekil 2.3 iletim akımları için elektrik yüklerinin hareketini göstermektedir.



Şekil 2.3. Elektrik alan uygulandığında serbest elektrik yüklerinin hareketi [3].

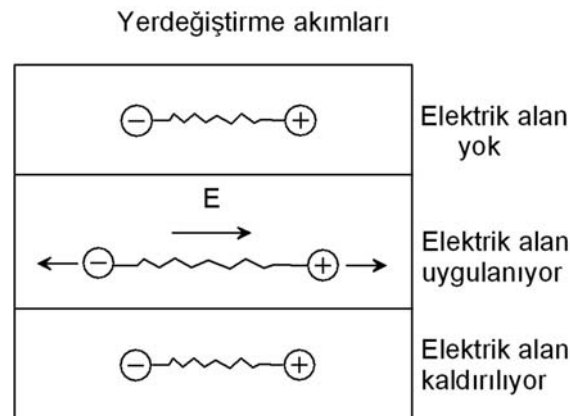
$$J = \sigma E \quad (2.12)$$

(2.12) bağıntısı, iletim akımı ile uygulanan elektrik alan arasındaki ilişkiyi ifade etmektedir ve bir elektrik alan var olduğunda, serbest yüklerin elektrik akımı oluşturabilmeleri için hareketlerini tanımlar. Burada σ , elektrik iletkenliktir.

Matematiksel olarak çözümleri basite indirgemek için, ortamın elektrik iletkenlik açısından homojen, izotrop (yönden bağımsız) ve frekandan bağımsız olduğu düşünülür. Bu durumda, ortamdaki elektrik akımı ile elektrik alan arasındaki ilişki doğrusaldır ve aralarındaki oransallık katsayısı elektrik iletkenlik değerini verir. Gerçekte iletkenlik, elektrik alandaki değişim oranı kadar sıcaklık, basınç ve diğer faktörlerin de bir fonksiyonu olabilir. Ancak bunlar yer radarından elde edilen yanıtlarda çoğunlukla ikinci derecede önem taşır.

Elektrik iletkenliğe sahip ortamların içerisine giren elektromanyetik enerji, elektromanyetik alanın elektrik alan bileşeninin bu ortam içerisinde manyetik alan bileşeninden ayrılıp enerji dönüşümüne uğraması nedeniyle, saçılıp çok çabuk şekilde sönmüştür. Yani diğer bir deyişle, bir enerji yitimi söz konusudur ve bu ortamlarda radar dalgalarının ilerleyemeyeceği anlamına gelmektedir. Bu yüzden, maksimum elektromanyetik enerji erimi (penetrasyonu) için ortam düşük elektrik iletkenliğe ve yüksek derecede dielektrik özelliklere sahip olmalıdır [34].

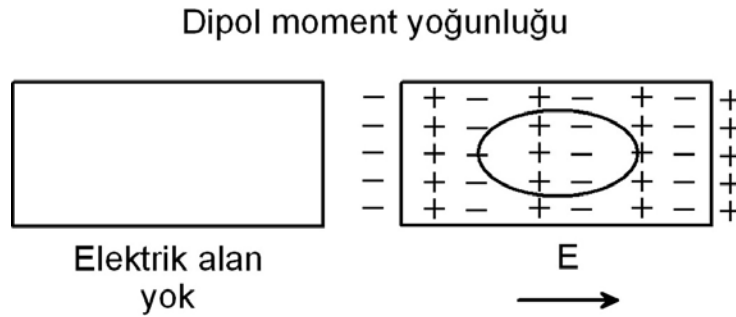
2.1.4.2.b Yer değiştirme(Kutuplanma) Akımları. Yer değiştirme akımları maddenin yapısında bulunan bağlı yüklerin dışarıdan uygulanan elektrik alan etkisiyle harekete zorlanması sonucu oluşur. Bağlı yüklere atomun çekirdeği çevresindeki elektron bulutu örnek verilebilir. Başlangıçta durağan olan bağlı yükler elektrik alan uygulandığında, bağlarının müsaade ettiği miktarda diğer bir durağan konuma hareket ederler. Yer değiştirme hareketinin tamamlanmasının hemen ardından, elektromanyetik enerji elektrik alandan ortama aktarılır ve ortamda depolanır. Uygulanan elektrik alan kaldırıldığında, yük başlangıçtaki denge konumuna geri döner ve bu esnada depolanan enerji geri bırakılır (şekil 2.4). Bu davranışa en temel örnek, kapalı bir elektrik devresindeki kondansatör verilebilir. Devrede enerji, yüklerin kondansatörde toplanması ile biriktirilir ve sonrasında yüklerin boşalmasıyla tekrar devreye aktarılır.



Sekil 2.4. Uygulanan elektrik alan doğrultusunda bağlı elektrik yüklerinin yer değiştirme hareketi [3].

Bir elektrik alan uygulandığında, hacimsel bir maddede yük hareketi o maddede dipol moment dağılımı şeklinde bir yük dağılımına neden olur (şekil 2.5). Bu dipol moment dağılımının oluşumu, bağlı yük hareketleri (diğer bir deyişle yer değiştirme akımları) ile ilgilidir. Bu yük dağılımı dipol moment yoğunluğu (D) ile tanımlanır. Dipol moment dağılımı literatürde elektrik yer değiştirme olarak da adlandırılır. Dipol moment yoğunluğunun zamanla değişimi yer değiştirme akımını (J_D) matematiksel olarak tanımlar [3].

$$J_D = \frac{\partial D}{\partial t} = \epsilon \frac{\partial E}{\partial t} \quad (2.13)$$



Sekil 2.5. Uygulanan elektrik alan sonucu oluşan elektrik dipol moment dağılımı [3].

(2.13) bağıntısı yer değiştirme akımı ile uygulanan elektrik alan arasındaki ilişkiyi tanımlar. Tıpkı iletim akımlarında olduğu gibi, çözümü basite indirgemek için, ortamın yer değiştirme akımları açısından homojen, izotrop (yönden bağımsız) ve frekandan bağımsız olduğu düşünülmektedir. Bu durumda ortamdaki indüklemiş dipol moment yoğunluğu, uygulanan elektrik alan ve oransallık sabiti olarak adlandırılan dielektrik geçirgenlik ile doğru orantılıdır.

2.1.4.3. Toplam akım dolaşımı

Herhangi bir maddede, bir elektrik alan uygulanması sonucu ortaya çıkan elektrik akımı, iletim ve yer değiştirme akımlarının toplamından oluşur. Elektrik alandaki değişime bağlı olarak, bu iki farklı türdeki akımdan biri diğerine baskın olabilir. Toplam akım, ortamın elektriksel özellikleriyle birlikte, elektrik alanın kendisinden ve elektrik alanın zamanla değişiminden oluşur. Bu kavram, sinusoidal şekilde zamanla değişen alanlar için matematiksel olarak (2.14) ve (2.15) bağıntılarında gösterildiği şekilde ifade edilebilir.

$$J = J_C + J_D \quad (2.14)$$

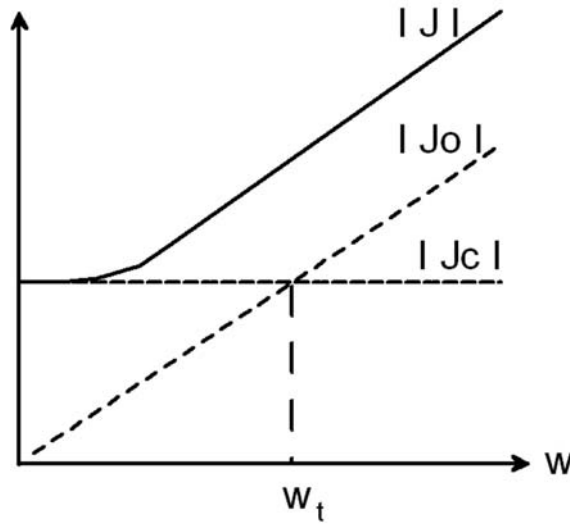
$$J = \sigma E + \varepsilon \frac{\partial E}{\partial t} \quad (2.15)$$

Bu bağıntılardan, \hat{u}) açısal frekansın yer değiştirme akımlarının açısal frekansı ile orantılı olduğu bulunur.

$$J = (\sigma + i\omega\varepsilon)E \quad (2.16)$$

Yer değiştirme akımları ile iletim akımları arasında 90° faz farkı vardır ve yer değiştirme akımı sanal bileşeni oluşturur. Akımlar arasındaki bu faz farkı, yer değiştirme akımının elektromanyetik alanlar için enerji toplayıcı bir mekanizma olduğunu gösterirken, iletim akımının ise enerji dağıtıcı bir mekanizma olduğunu göstermektedir [3].

Sekil 2.6'de toplam elektrik akımının frekansa göre değişimini gösteren basitleştirilmiş bir grafik verilmiştir. Yer radarı için tanımlanan basit ortamlarda, elektrik iletkenlik ve dielektrik geçirgenliğinin sabit, yer değiştirme ve iletim akımlarının eşit olduğu bir geçiş frekansı (ω_t) vardır. Genelde ortamlarda, yer değiştirme akımları iletim akımlarının bir miktar üzerinde olma eğilimdedir. Geçiş frekansı değerinin üzerinde yer değiştirme akımları baskın iken, bu frekans değerinin altında iletim akımları baskındır. Bu durum, elektromanyetik dalga yayınımlı konusunda dikkate alınması gereken bir konudur [3].



Sekil 2.6. Toplam elektrik akımının frekansla değişimi [3].

Geçiş frekansı açısal frekans olarak ifade edilirse, (2.17) bağıntısı elde edilir.

$$\omega_t = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (2.17)$$

Geçiş frekansı yer radarında düşük-kayıplı ortamların tanımlanmasında önem taşır. Denklem (2.18), kayıp tanjantı olarak adlandırılır ve bir maddedeki iletim akımlarının yer değiştirme akımlarına oranını verir.

$$\tan \delta = \frac{|J_C|}{|J_D|} = \frac{\sigma}{\omega \epsilon} \quad (2.18)$$

2.1.4.4. Bağlı manyetik geçirgenlik

Manyetik özellikler esasen kapalı bir yol etrafında hareketli olan bir elektrik yükten kaynaklanır [48]. Atomların yapı taşları spin denen yörüngesel bir dönüğe sahiptir ve bu hareket, maddenin atomlarında ve moleküllerinde oluştuğunda, yükün dönüşü sonucunda dairesel bir akım döngüsü ortaya çıkar ve bu manyetik dipol momentine neden olur. Örneğin bir elektron atomik bir çekirdek etrafında hareket ettiğinde, bu yük hareketi bir manyetik moment yaratabilir [3].

Maddelerin manyetik özellikleri manyetik dipol moment yoğunluğu ile ölçülür. Atom ve moleküllerin manyetik dipol momentlerinin dizilebilme ya da dışarıdan uygulanan bir manyetik alanın yönleniminden farklı şekilde hareket etme seviyesinin ölçüsü manyetik geçirgenlik olarak tanımlanmaktadır. Dizilim içerisine girebilecek ilgili momentlerin artışı, maddenin manyetik olarak daha fazla kutuplanması anlamına gelir. Ortamda bulunan bir manyetik alan, manyetik dipol momentini dizilimi değiştirmek ve uygulanan manyetik alanın yönünde sıralamak için indükler.

Manyetik geçirgenlik (μ) atom ve moleküllerin manyetik dipol momentlerinin dizilebilme ya da dışarıdan uygulanan bir manyetik alanın yönleniminden farklı şekilde hareket etme seviyesinin ölçüsüdür. Dizilim içerisine girebilecek ilgili momentlerin artışı, maddenin manyetik olarak daha fazla kutuplanması anlamına gelir.

$$B = \mu H \quad (2.19)$$

Maddelerin manyetik özellikleri manyetik dipol moment yoğunluğu ile ölçülür. Bir elektrik akım kapalı bir döngüde dolaştığında manyetik moment (2.20) bağıntısıyla verilmektedir.

$$M = IAn \quad (2.20)$$

Burada M manyetik dipol momentini, I elektrik akımını, A akımın geçtiği telin kuşattığı kapalı döngü alanı ve \vec{n} normal vektörünü göstermektedir. Hacimsel ortamlar için, ortamın moment yoğunluğu (2.21)'de verildiği şekilde tanımlanır ve birimi A/m 'dir.

$$m = \frac{M}{V} \quad (2.21)$$

k , boyutsuz bir nicelik olan manyetik duyarlılığı gösterirken, (H) manyetik alanı tarafından indüklenen manyetik moment miktarı ise (2.22)'deki bağıntıda tanımlanmıştır.

$$m = kH \quad (2.22)$$

Yer değiştirme akımı bölümünde tartışılan indüklenmiş elektrik dipol momenti ile indüklenmiş manyetik moment arasında önemli bir benzerlik vardır. Maddedeki manyetik akı;

$$B = \mu_0(H + M) \quad (2.23)$$

olarak tanımlanır. Manyetik geçirgenlik ise (2.24) bağıntısıyla verilmektedir. Burada μ_0 boşluğun manyetik geçirgenliğini gösterir ve $\mu_0 = 4\pi * 10^{-7} \frac{H}{M}$ 'dir.

$$\mu = \mu_0(1 + k) \quad (2.24)$$

Maddenin manyetik geçirgenliğinin boşluğun manyetik geçirgenliğine oranı bağıl manyetik geçirgenlik (K_m) kavramını vermektedir ve (2.25) bağıntısıyla tanımlanmıştır.

$$K_m = \frac{\mu}{\mu_0} = (1 + k) \quad (2.25)$$

Ortamda bulunan bir manyetik alan manyetik dipol momenti, dizilimi değiştirmek ve uygulanan manyetik alanın yönünde sıralamak için indükler. Bazı maddelerde dizilim uygulanan alanla aynı yönde olmasına rağmen, diğer maddelerde dizilim uygulanan manyetik alana paralel olmayan şekilde gerçekleşebilir. Bu iki davranışa sırasıyla, paramanyetizma ve diamanyetizma denir. Genelde manyetik alana verilen bu cevaplar zayıftır ve manyetik geçirgenlikte çok önemli değişikliklere yol açmazlar. Manyetik duyarlık (magnetic susceptibility) ortalama değerleri 10^{-5} 'den küçüktür [3].

Yine de bazı durumlarda, manyetik momentler domen olarak adlandırılan maddenin kristal yapısının büyük kısımlarında sıralanabilir. Domenlerin momenti, uygulanan alanla aynı yönde bulunan kristal yapıdaki moleküller ile değişebilir ve bir domenden diğerine hareket edebilir. Bu tür maddelere *ferromanyetik maddeler* adı verilir. Ferromanyetik maddelerde, kutuplanma çok büyük olabilir ve bağıl manyetik geçirgenlik değerleri çok yüksek olabilir. Demir, kobalt ve nikel gibi maddelerde bağıl manyetik geçirgenlik değeri yüzler mertebesinde olabilir. Ferromanyetik maddelerde manyetik dipol momentleri kalıcı olarak sıralanabilir ve bu tür mıknatıslanma kalıcı mıknatıslanma olarak bilinir. Bu tür ortamlarda manyetik geçirgenlik oldukça yüksektir ve maddenin dinamik davranışı karışıktır. Bu tür maddeler nadiren toprakta ya da kayaçların içerisinde büyük miktarlarda bulunabilmesine rağmen, bunların ortamdaki az miktardaki varlıkları bile geçirgenlik üzerinde çok büyük etkiye sahiptir [3].

Dipol moment yoğunluğunun davranışı çok karmaşık olabilir ve domenlerin nasıl hareket ettiği, geliştiği ve alan, frekans ile sıcaklığa bağımlı olabilen yönelim değişimi ile kontrol edilir. Çeşitli toprak ve kayaç gruplarında, manyetik davranış

magnetit, maghemit ve ilmanit gibi yüksek manyetik özelliklere sahip mineral miktarı ile belirlenir. Ortamların manyetik minerallerindeki hacimsel artış manyetik duyarlılığı arttırır. Bunun yaklaşık olarak hesaplanabilmesi için (2.26) ampirik bağıntı geliştirilmiştir. Burada θ madde içerisindeki manyetik özelliklere sahip mineralin hacimsel miktarını vermektedir.

$$k = 3.8\theta \quad (2.26)$$

2.1.5. Elektromanyetik empedans

Elektromanyetik alanların bileşenleri olan elektrik ve manyetik alanlar birbirine dik yönlerde oluşur ve her iki alana dik yöndeki doğrultu boyunca hareket ederler. Oluşacak manyetik alanın genliği, uygulanan elektrik alanın genliğine bağlıdır. Bu durumun tam tersi, alan bağlaşımı yani bir alanın diğer alan üzerindeki etkisi nedeniyle ortaya çıkabilir. Bu olgu elektromanyetik empedans kavramı ile açıklanabilir. Elektromanyetik empedans (Z),

$$z = \frac{E}{H} \quad (2.27)$$

ile verilir. Bu formülün dalga denklemleri kullanılarak geliştirilmesi ile (2.28) bağıntısı bulunur. Bu bağıntı, elektromanyetik dalga denklemlerinin çözümlerinde elektrik ve manyetik alanların bağıl genliklerinin (düzlem dalga olarak bilinen) ortam özellikleri tarafından belirlendiğini ifade etmektedir.

$$z = \mu V = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \quad (2.28)$$

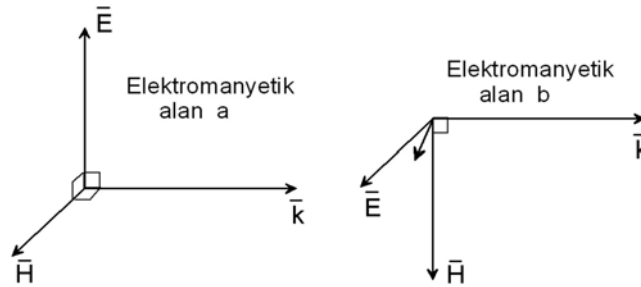
Elektromanyetik dalgaların hareket ettikleri ortamların iletkenlik özelliklerinin önemli olduğu durumlarda çözümü kolaylaştırmak amacıyla, ortamdaki yayınının sinusoidal biçimli bir dalga olduğu düşünülebilir. Düşük kayıplı ortamlarda ise elektromanyetik empedans kavramı (2.30) bağıntısı ile açıklanmıştır.

$$z = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon + i\frac{\sigma}{\omega}}} \quad (2.29)$$

$$z = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \left(1 - i\frac{\sigma}{2\varepsilon\omega} \right) \quad (2.30)$$

2.1.6. Kutuplanma

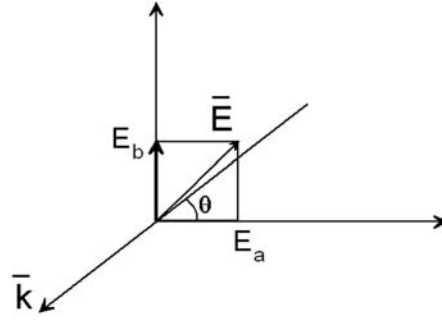
Elektromanyetik alanların yayılım yönünü belirlemede kullanılan sağ el kuralına göre, yayılım yönüne dik olarak, Şekil 2.7’de görülen farklı iki elektromanyetik alan oluşabilir. Genelde, elektromanyetik alan çözümlerinde elektromanyetik alanın yönü için elektrik alan vektörünün yönü seçilir. Elektromanyetik alanın yayılım yönündeki birim vektöre (k) dik bir düzlemde oluşan elektrik alan Şekil 2.8’de görülmektedir. Şekilde görülen elektrik alan E , E_a ve E_b elektrik alan vektörlerinin toplamından oluşur ve kutuplanma yönü gösterildiği şekildedir.



Şekil 2.7 Yayılım doğrultusuna göre a ve b olarak verilen iki farklı elektromanyetik alan oluşabilir [3]

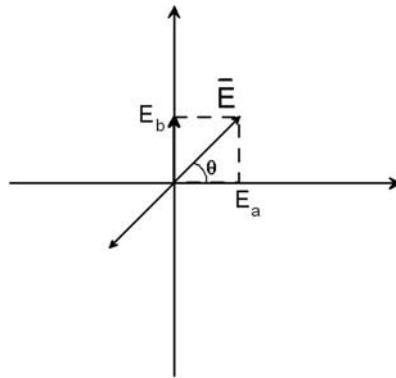
Elektrik ve manyetik alan bileşenlerinin zamanla değişimi sinüzoidal olduğunda, doğrusal, dögüsel ve eliptik kutuplanma kavramlarından söz edebilir. Bu durumda elektrik alan vektörü (2.31) bağıntısıyla tanımlanır.

$$E = E_a e^{i\delta} e^{i0x} a + E_b e^{i\delta} e^{i0x} b \quad (2.31)$$



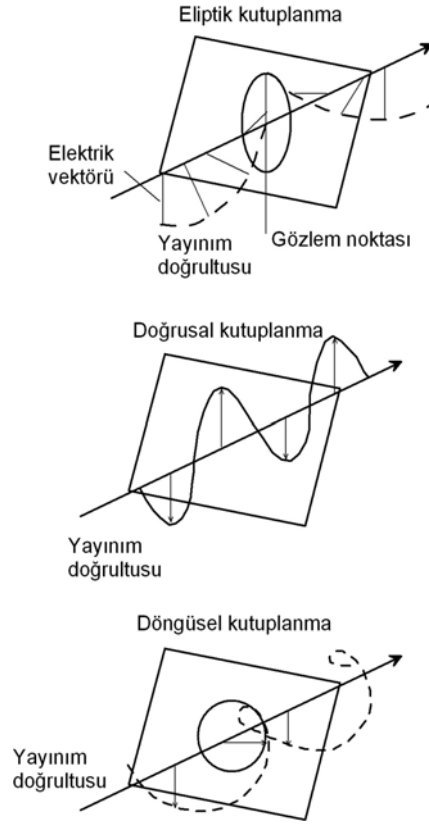
Sekil 2.8. Toplam elektrik alan E elektrik alan vektörlerinin toplamından oluşur ve kutuplanma yönü E yönündedir.

Burada E_a ve E_b elektrik alan bileşenlerinin genlikleridir ve skalar büyüklüklerdir. φ_a ve φ_b birbirine dik \hat{a} ve \hat{b} birim vektörlerine göre elektrik alan bileşenlerinin faz açılarını göstermektedir. Eğer $\varphi_a = \varphi_b$ ise elektrik alan doğrusal biçimde kutuplandığı söylenir. Elektrik alan vektörü sabit yönlüdür ($\theta = \text{sabit}$) ve genliği Şekil 2.9'da gösterildiği gibi sinusoidal olarak değişir.



Sekil 2.9. Elektrik alan bileşenleri aynı fazda ise elektrik alan sabit bir yönde, doğrusal şekilde kutuplanmıştır [3].

Eliptik biçimdeki kutuplanma durumunda, genlik ve alan yönü zamanla alan düzleminde bir elips çizen şekilde ortaya çıkar ve uzayda elipsler çizerek ilerler (Şekil 2.10). Genelde doğada alan vektörü sinusoidal şekilde kısa sürelerde ilerleyebilir. Hareket daha çok düzensiz bir şekilde gerçekleşmektedir. Bu yüzden doğrusal, dögüsel ve eliptik kutuplanma geçici (transient) alanlar için geçerlidir.



Şekil 2.10 Sinüsoidal dalgalar için alanlar doğrusal, dairesel ve eliptik biçimde kutuplanabilir [3].

2.1.7. Elektromanyetik dalga özellikleri

Elektromanyetik dalgaların yer içerisindeki hareketlerini açıklayabilmek için en önemli parametreler faz hızı (v), sönümlenme (α) ve elektromanyetik empedans (Z)'dir. Elektromanyetik teoride basit ortamlar olarak ifade edilen sabit dielektrik geçirgenlik, elektrik iletkenlik ve manyetik geçirgenliğe sahip ortamlarda dalga özelliklerinin hepsi benzer davranışlar sergilemekte ve frekans değerlerine bağlı olarak değişimler göstermektedir. Düşük frekanslarda, tüm dalga özellikleri açıl frekansa ($4\pi\sigma$) bağlıdır. Yüksek frekanslarda, eğer ϵ , μ , σ sabit ise, dalga özellikleri frekansa bağımsızdır. Yüksek frekanslarda elektromanyetik dalgaların bu davranışı yer radarının en karakteristik özelliğidir.

Düşük frekanslarda, elektromanyetik alanlar ortam içine yayılır ve elektromanyetik enerji kendini ortama ısı enerjisi şeklinde dağıtır. Bu ortamdaki bir dürtü sinyali, bu sinyalin frekans bileşenlerinin bu ortam içerisinde farklı oranlarda sönümlenmesi ve farklılaşan faz hızlarında seyahat etmesi nedeniyle saçılmaya başlar. Bu durumdaki

faz hızı, sönümlenme ve elektromanyetik empedans için matematiksel gösterim (2.32), (2.33) ve (2.34) bağıntılarıyla tanımlanmıştır.

$$v = \sqrt{\frac{2\omega}{\mu\sigma}} \quad (2.32)$$

$$a = \sqrt{\frac{\omega\mu\sigma}{2}} \quad (2.33)$$

$$z = (1+i)\sqrt{\frac{\omega\mu}{2\sigma}} \quad (2.34)$$

Yüksek frekanslarda, elektromanyetik alanlar ortam içerisinde dalgalar şeklinde yayınırlar. Tüm frekans bileşenleri aynı hızda seyahat eder ve aynı sönümlenmeden etkilenir. Bir dürtü sinyali bozulmamış şekliyle seyahat edecektir. Bu yayınımla, saçılmasız yayınımla olarak adlandırılır [2]. Yüksek frekanslı elektromanyetik dalgaların ortam içerisindeki hız, sönümlenme ve elektromanyetik empedans değerleri (2.35), (2.36) ve (2.37) bağıntıları ile bulunabilir. Burada ortamın manyetik özellikleri ihmal edilmektedir ve (2.38) bağıntısıyla verilen Z_0 boşluğun empedansını göstermektedir.

$$v = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon\mu}} = \frac{C}{\sqrt{K}} \quad (2.35)$$

$$a = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon} \frac{\sigma}{2}} = Z_0 \frac{\sigma}{2\sqrt{K}} \quad (2.36)$$

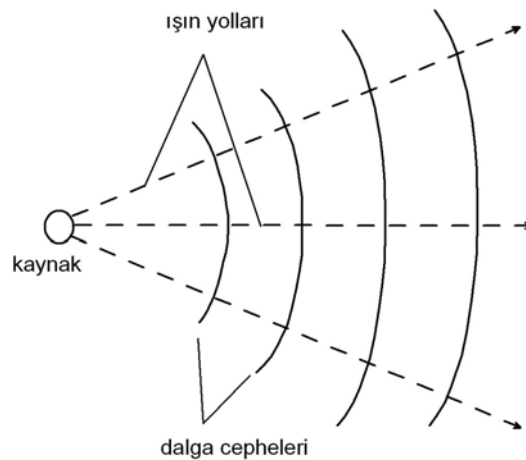
$$Z = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} = \frac{Z_0}{\sqrt{K}} \quad (2.37)$$

$$Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} \quad (2.38)$$

Yer içine yayınan elektromanyetik dalgalar farklı elektrik iletkenlikli ortamlara girdiklerinde elektrik akımları iletimsel durumdan yer değiştirme durumuna geçebilirler ve bu durumda, elektromanyetik dalgalar için, yayınımsal bir geçiş olgusu (difusion) ortaya çıkar. Ortam içerisindeki bu geçiş frekansı, (2.39) bağıntısı ile tanımlanır.

$$f = \frac{\sigma}{2\pi\epsilon} \quad (2.39)$$

Elektromanyetik bir dalga yayını temel olarak, dalga cepheleri ve ışın yolları ile karakterize edilebilir. Her iki kavram da Şekil 2.11’de gösterilmektedir. Dalga cephesi, sinyallerin tümünün aynı fazda olduğu uzamsal bir yüzeyi gösterirken, ışın yolu dalga boyu ya da geçici sinyal süresinin bir ifadesidir. Herhangi bir kaynaktan gönderilen geçici bir sinyal için uzamsal yüzeyin eş seyahat süresi, dalga cephelerini belirler.



Şekil 2.11. Dalga cepheleri bir kaynaktan dışı doğru seyahat eden dalgalar için eş seyahat süreli ya da fazlı yüzeylerdir. Işınlara (rays) dalga cephelerine diktir ve yörüngeden dışı doğru çizilir [3].

Işın yolları, dalga cephesine ve ortamdaki elektrik ve manyetik alanlara dik bir konumda bulunmaktadır. Işın yolları için en ideal durum, dalga boyu ya da geçici sinyal süresinin çok kısa olmasıdır. Elektromanyetik bir dalga yayınında ortam koşulları çok önemli olmakla birlikte, dalga özellikleri de önem taşır. Bu nedenle, elektromanyetik dalga yayınına doğasının iyi bilinmesi çözümü olası kılar.

Elektromanyetik alanlar ışınlar olarak davrandığında, kavramsal olarak, ışın tarafından tanımlanan yol boyunca seyahat eder [34].

2.2. Yer Radarı Kuramı

2.2.1. Yer radarı sinyallerinin oluşturulması ve yayını

Mevcut yer radarı sistemlerinde çoğunlukla iki oktav bant genişliğine sahip dipol antenler kullanılır. Bunun anlamı, antenden üretilen frekansların merkez-frekansın yarısı ile iki katı arasında çeşitlilik göstermesidir. Örneğin 300 MHz merkez-frekansına sahip bir anten, frekansı 150 ile 600 MHz arasında değişen dalga boylu sinyaller üretir [18].

Dipol antenler genellikle nikelle kaplı alüminyum metal çubuk şeklindedir ve çapları birkaç milimetreden 20 mm'ye kadar değişir. Anten uzunluğu, antenden çıkan darbenin genişliğine bağlıdır. 8 ile 12 ns arasında değişen darbe genişliği için gereken anten boyu 0,9 ile 1,2 m arasında iken, 1-2 ns'lik daha ince darbeler için dipol antenin boyu 0,15 ile 0,4 m arasında değişmektedir. Bu yüzden, darbe genişliğini arttırmak için daha uzun anten gereklidir [41].

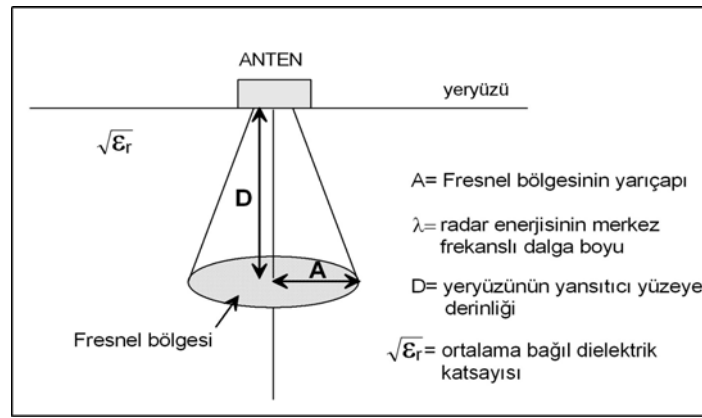
Bir yer radarı anteni sadece tek bir darbe değil, her biri aynı şekle ve süreye sahip, genellikle 2 den 50 μ s'ye değişen belirli aralıklarda ilerleyen darbeler dizisi oluşturur. Bu darbeler dizisinde arka arkaya gelen iki darbe arasındaki aralığın tersi tekrarlanma frekansı f_r olarak adlandırılır. Tipik tekrarlanma frekansı 20–500 kHz aralığındadır. Tek bir darbenin süresi genelde 1 ile 100 ns arasında değişir [41].

Standart ticari yer radarı sistemleri yeraltına Şekil 2.12'de görülen elips şeklinde bir koni biçiminde yayınan radar huzmeleri göndermektedirler ve bu yayını doğrusal bir hat değildir [4, 5, 6, 19]. Elips şeklindeki iletim konisi genellikle ilerleme doğrultusuna ya da antenin uzun eksenine paralel doğrultuda uzanmaktadır.

Işınım örüntüsü, bir antenin ışınım gücünün konum ve açıya göre dağılımının bir ölçüsüdür ve korumalı ya da korumasız yatay elektrik dipol anteni tarafından üretilir.

Korunmalı antenler, ışınım örüntüsünün yukarı yönde yayılımını azaltır. Bu tür bir mekanizmaya sahip antenden yayılım enerjisi, anten üzerinde konumlandırılan düzenekler ile (metal plakalar ve benzeri) yüzeyden geri yansıtılır [34].

Teorik ve pratik çalışmalar, radar enerjisinin en yüksek değerinin anten dipolüne dik şekilde yayındığını göstermiştir. Bunun anlamı, yapılacak herhangi bir yer radarı çalışması mümkün olduğunca uzanımı bilinen ya da kestirilen yapılara dik yönde yapılmalıdır [35].



Şekil 2.12. Standart yer radarı anteninden yeraltına gönderilen yayılım örneği [18].

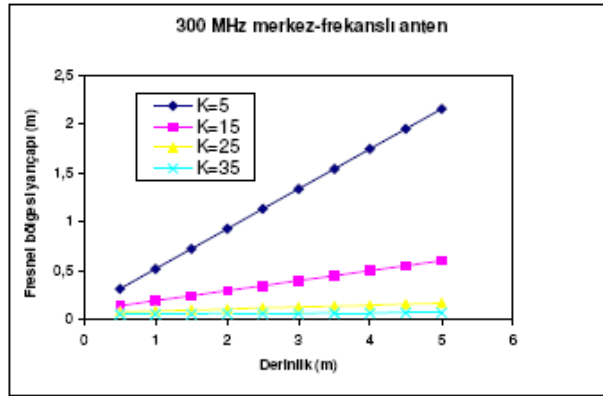
Yer radarı çalışmalarında Fresnel zonu, radar dalgasının yansıdığı alanı tanımlar ve yatay çözünürlük olarak da ifade edilir. Yatay çözünürlük, Fresnel zonunun bir fonksiyonu olarak verilmektedir. Dalga boyu, ışınım örüntüsü ve derinlik, Fresnel zonunun boyutunu belirler. Conyers ve Goodman Şekil 2.12’de gösterilen yayılım konisinin çeşitli derinliklerdeki genişliğini hesaplamak için (2.40), Annan ise (2.41) eşitliğini kullanmıştır.

$$A = \frac{\lambda}{4} + \frac{d}{\sqrt{\epsilon_r + 1}} \quad (2.40)$$

$$A = \frac{\lambda}{2} + \frac{d}{\sqrt{\epsilon_r - 1}} \quad (2.41)$$

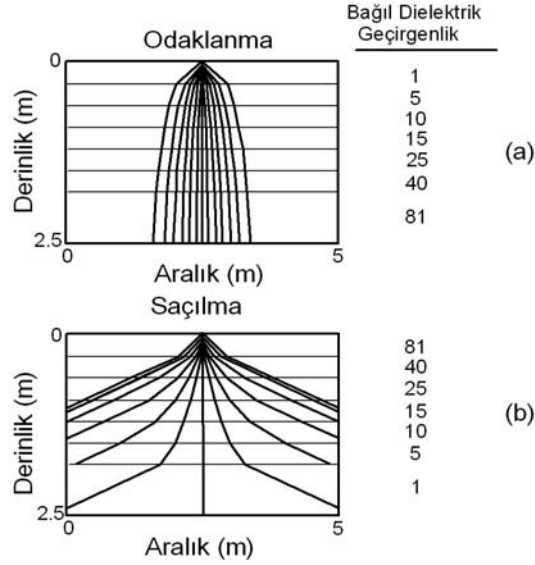
Burada A , oval Fresnel zonunun uzun ekseninin yarıçapını, d derinlik değerini ve ϵ_r ise ortamın dielektrik katsayısını göstermektedir. Oval Fresnel zonunun kısa eksenini, kabaca uzun eksen boyunun yarısı olarak verilmektedir.

Şekil 2.13, 300 MHz merkez-frekanslı bir antenden yayılan radar dalgalarının farklı bağıl dielektrik geçirgenlik değerlerine sahip ortamlarda oluşan çözünürlüklerini göstermektedir. Elde edilen bu grafikten yararlanarak, artan derinlikle iletim konisinin dolayısıyla Fresnel zonunun genişlediği görülmektedir. Yine radar huzmelerinin yüksek dielektrik geçirgenlikli bir ortamdan daha düşük bağıl dielektrik geçirgenliğe sahip bir ortama geçmesiyle de, Fresnel zonunun büyüyeceği görülmektedir.



Şekil 2.13. Farklı bağıl dielektrik geçirgenlik değerlerine sahip bir ortamda 300 MHz merkez-frekanslı bir anten kullanılarak elde edilecek yatay çözünürlük büyüklükleri [18].

Yeraltının dielektrik özelliğindeki değişimler radar dalgaların ara yüzeylerde farklı açılarda kırılmasına neden olmaktadır ve bu durum yansıyan radar dalgalarını etkilemektedir. Yeryüzünden yeraltına doğru bağıl dielektrik geçirgenlik katsayısının artışı, radar dalgalarının ara yüzeylerde daha dar bir açıyla kırılmasına ve konik radar dalgalarının yer içine daha fazla odaklanmasına yol açar [25]. Eğer radar dalgaları daha yüksek bağıl dielektrik geçirgenlikli ortamlara doğru hareket ediyorsa, bu odaklanma etkisi artan bir biçimde oluşmaya devam eder (Şekil 2.14a).



Şekil 2.14. Derinlikle bağıl dielektrik geçirgenlik katsayıları (a) artan ve (b) azalan yeraltı modeli için dalga kırılma etkileri [18].

Radar dalgaları yeraltına artan derinlikle ilerlerken, yeraltının bağıl dielektrik geçirgenlik değeri yavaş yavaş azalıyor, iletim konisi her ara yüzeyde daha geniş açıda kırılarak, genişler ve saçılır (Şekil 2.14b).

Yeraltının bağıl dielektrik geçirgenlik değeri artma eğilimi gösteriyorsa, radar huzmeleri odaklanma eğilimi gösterir. Bu nedenle, yüksek bağıl dielektrik geçirgenlik değerine sahip alanlarda çalışma yapılırken, arandılan tüm yeraltı yapılarının belirlenebilmesi için radar profillerinin aralığı sıklaştırılmalıdır [34].

2.2.2. Sinyalin sönümlenmesi

Radar huzmeleri yeraltına ilerlediklerinde artan derinlikle birlikte, hem radar dalgalarının içinden geçtiği ortamın bağıl dielektrik geçirgenlik katsayısına hem de elektrik iletkenlik ve manyetik geçirgenlik özelliklerine bağlı olarak sönümlenir. Bir grup araştırmacı radar sinyallerinin yer içinde artan derinlikle hızlı bir biçimde sönümlendiğini ve genliklerinin de çok çabuk biçimde azaldığını ifade etmiş ve bunu dalgaların küresel yayınının uzaklığı ile ters orantılı olarak azalmasıyla açıklamıştır [22, 23, 44, 35]. Leckebush'a göre, sönümlenme esasen yerin iletkenliğinin bir etkisidir. Eğer ortamın bağıl dielektriklik katsayısı ve iletkenlik değeri biliniyorsa,

herhangi bir x mesafesindeki sönümlenme (a) aşağıdaki bağıntı yardımıyla hesaplanabilir:

$$e^{-ax}, a = 1,69 \frac{\sigma}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (2.42)$$

Sönümlenme katsayısı (a) için benzer bir ifadeyi Moorman, (2.43) bağıntısıyla vermiştir.

$$\tan^2 \delta = \sigma_{DC} (\omega K' \epsilon_0)^{-1} \quad \text{ve} \quad c = k2,998 \times 10^8 \text{ ms}^{-1} \quad \text{ise}$$

$$a = \omega c^1 \left\{ \left[\frac{K' \left((1 + \tan^2 \delta)^{0,5} + 1 \right)}{2} \right] \right\}^{0,5} \quad (2.43)$$

Moorman'a göre, elektrik iletkenlik ve dielektrik etkisi baskın olan bir ortamdaki sönümlenme katsayısı ise, (2.44) ya da (2.45) bağıntısıyla elde edilebilir. Çeşitli yeraltı ortamlarının sönümlenme oranı Tablo 2.2'de verilmektedir.

$$a \approx \frac{60\pi\sigma_{DC}}{(K')^{0,5} (m^{-1})} \quad (2.44)$$

$$a \approx \frac{1,64\delta}{(K')^{0,5} (dBm^{-1})} \quad (2.45)$$

Tablo 2.2. Farklı yeraltı ortamlarının bağıl dielektrik geçirgenlik katsayısı ϵ_r , hız V , elektrik iletkenlik σ ve sönümlenme α değerleri [35].

Madde	ϵ_r	V (mns ⁻¹)	σ (mSm ⁻¹)	α (dBm ⁻¹)
Hava	1	0,3	0	0
Tuzlu su	81-88	0,033	3000	600
Tatlı su	80	0,033	0,5	0,1
Granit (kuru)	5	0,13	0,01	0,01
Kum (kuru)	5	0,13	0,01	0,01
Kil (ıslak)	10	0,095	500	300
Kumlu toprak (kuru)	2,6	0,19	1,4	1
Kumlu toprak (ıslak)	25	0,06	69	23
Killi toprak (kuru)	2,5	0,19	2,7	3
Killi toprak (ıslak)	19	0,07	500	200
Görsel çökel	50	0,04	-	-
Sualtında bulunan kültürel tabaka	70	0,04	-	-

Elektromanyetik enerjinin yeraltında sönümlenmesi, elektromanyetik enerjinin artan derinlikle yer içinde daha büyük bir yüzey alanı üzerine yayılması ve yer içindeki iletkenlik kayıpları nedeniyle, enerjideki soğurulma ile oluşur [8].

Aynı zamanda, yüzeydeki toprak tabakası içerisindeki yüksek miktarda çözünmemiş karbonat konsantrasyonu da yüksek oranda sinyalin sönümlenmesine yol açabilir [11].

Genelde düşük elektrik iletkenlik değerine sahip ortamlar, daha fazla elektromanyetik enerjinin yeraltında yayınımına izin verir ve bu ortamlar düşük bağıl dielektrik geçirgenlik değerine sahiptir. Özellikle suya doymuş ve yüksek kil içeriğine sahip ortamlar yüksek elektrik iletkenliğe sahip oldukları için, elektromanyetik dalgaların yayınımına büyük ölçüde engel olurlar. Bu tür ortamlarda radar enerjisi derinlikle çok hızlı bir biçimde sönümlenir ve radar dalgalarının maksimum penetrasyon derinliği kullanılan anten frekansı ne olursa olsun, bir metreden daha azdır [34].

2.2.3. Yer radarı sinyallerinin yansımaları

Radar yöntemindeki yansıma olayı tıpkı sismikte olduğu gibidir. Ancak yeraltına gönderilen enerji bir partikül hareketi değil EM dalga enerjisidir. Tabakalar arasında bir ara yüzey oluşumuna tabakalar arası dielektrik özelliklerin farklı olmaları sebep olur.

Alıcı radar antenine ilk ulaşan hava dalgalarıdır. İlk ulaşmasının sebebi radar dalgalarının havada ışık hızında seyretilmeleridir. Doğrudan gelen hava dalgasının seyahat süresi kolayca hesaplanabilir ve nispeten sabit bir değerdedir. Bu dalgaların varış zamanları genellikle veri işlem tekniklerinden olan statik düzeltmede kullanılır (varış süresi bir işaretleyici olarak kullanılır).

Bir sonraki geri dönüş doğrudan gelen yer dalgasıdır. Bu tür radar dalgaları yeraltının üst yüzeyi boyunca seyahat ederler. Daha sonraki geri dönüşler dielektrik ara yüzeylerden geriye dönen yansımalarıdır. Bu yansımalar yüzeydeki alıcıya yansıdıkları ara yüzeylerin yeraltında buldukları derinlik sırasına göre ulaşırlar. Bu, yüzeye yakın olanın derinde olandan daha kısa sürede alıcılar tarafından kaydedilmesi anlamına gelir.

Radar dalgaları ara yüzeylerden yansıyabileceği gibi kırılabilir. Ancak bunlar iki-boyutlu radargramlarda genellikle elde edilememektedir. Kırılan radar dalgaları radargramlarda oldukça karmaşık görüntüler oluşturmaktadır ve bunlar henüz ayrıntılı bir biçimde analiz edilememektedirler.

Radar kesitlerinde geri dönüşlerin şiddeti ve varış zamanları, radar dalgalarının yayılım hızları ve sinyalin sönümlenme oranından etkilenmektedir. Tıpkı ışığın farklı kırılma indeksleri ile farklı iki madde arasındaki bir ara yüzeyden yansımaları gibi, yeraltına gönderilen radar enerjisinin bir kısmı da farklı dielektrik özelliklere sahip iki ortam arasındaki ara yüzeyden yansır. Yansıyan enerji miktarı, farklı iki ortamın bağıl dielektrik geçirgenlik katsayılarının farkı ile orantılıdır. Kusursuz iki dielektrik madde arasındaki yansıma katsayısı (R), (2.46) bağıntısıyla verilir.

$$R = \frac{\sqrt{\epsilon_{r_1}} - \sqrt{\epsilon_{r_2}}}{\sqrt{\epsilon_{r_1}} + \sqrt{\epsilon_{r_2}}} \quad (2.46)$$

$\sqrt{\epsilon_{r_1}}$ ve $\sqrt{\epsilon_{r_2}}$ iki ortamın dielektrik geçirgenlik katsayılarıdır. Yeraltındaki ortamların bağıl dielektrik geçirgenlik değerleri arasındaki zıtlığın artması, oluşacak yansımaların genliğinin büyümesi anlamına gelmektedir.

Radargramlarda önemli bir yansımanın oluşabilmesi için iki ortam arasındaki ara yüzey çok kalın olmamalı ve ortamların elektrik özellikleri arasında büyük bir zıtlık olmalıdır. Bağıl dielektrik geçirgenlik derinlikle azar azar değiştiğinde, yansıtırlık özelliğinde küçük farklar oluşacaktır ve bu durumda sadece zayıf yansımalar üretilecektir. Yansıtırlıktan kasıt, bir yüzeyden yansıyan ışınım miktarının toplam ışınım miktarına oranıdır [18].

Yer radarı kesitlerinde genelde sürekli çizgi, hiperbolik eğri ve karmaşık olmak üzere üç esas tipte yansıma gözlenir. Sürekli çizgi olarak gözlenen yansıma sürekli, yataydan eğimli bir ara yüzeye doğru giden şekilde elde edilir. Hiperbolik yansımalar kendisini çevreleyen ortamdan tamamen farklı bir dielektrik değeri olan küçük yapılardan (yarıçapları 10^1 - 10^3 cm arasında) elde edilir. Bu tür yapılar noktasal kaynaklar gibi davranırlar. Kaotik yansımalar ise ince süreksiz katmanlar ve çok küçük nokta yansıtıcıların bir arada buldukları ortamlardan üretilirler. Buradaki küçük yapılardan kast edilen, örneğin 100 MHz merkez frekansına sahip bir anten için 10 cm boyutlara sahip olan yapılardır [38].

2.2.4. Sinyal hızı ve derinlik belirlenmesi

Yeraltındaki yapıların derinliklerinin belirlenebilmesi için geçilen katmanların hız değerlerinin bilinmesi gerekmektedir. Eğer hız belirlenebilirse, elde edilen radargrama ait bir derinlik skalası oluşturulabilir. Genelde radar yazılımları otomatikman bir radargram için tek bir derinlik skalası oluşturmaktadır. Derinlikle ya da hat boyunca çabuk hız değişimlerinin olduğu yerlerde, hat içerisindeki farklı birimler için derinlik skalası elle oluşturulabilir.

Boşlukta ya da hava içinde elektromanyetik enerji ışık hızında (yaklaşık 0.3 mns^{-1}) hareket eder. Hava içinde ışık hızında yayılan enerjinin bir kısmı kırılarak yer içinde genelde $0.01-0.16 \text{ m/ns}$ arasında değişen hızlarda hareket etmektedir. Hem dielektrik katsayı hem de elektrik iletkenlik bu ortamlarda yayılan radar dalgalarının hızlarını büyük oranda etkiler [38]. Yayınım hızının tahmini aşağıdaki bağıntılarla verilmektedir.

$$v = c \left\{ \frac{\left[K' \left((1 + \tan^2 \delta)^{0.5} + 1 \right) \right]}{2} \right\}^{-1} \quad (2.47)$$

$$v = 0,3(\epsilon_r)^{-0,5} (\text{mns})^{-1} \quad (2.48)$$

Çeşitli ortamlardaki radar enerjisinin tipik yayınım hızları Tablo 2.2’de verilmiştir. Su içerisindeki elektromanyetik dalgaların yayınım hızı çoğunlukla sabit olarak kabul edilmektedir ve tabloda görülen fiziksel parametreler kullanılarak, özellikle gölsel alanlardaki çalışmalarda suyun derinliği hesaplanabilir. Ancak özellikle yeraltında tortul tabakaları gibi farklı gözeneklilik ve su içeriğine sahip ortamların yayınım hızları çok çeşitlilik gösterir ve bu tür ortamların kalınlığının ölçülmesinde hızın belirlenmesi büyük önem taşır. Eğer sondaj açma olanağı varsa, yayınım hızı doğrudan arazide yapılan derinlik ölçümleri ile belirlenebilir. Eğer böyle bir imkan yoksa hız değeri gelen varışlar ve yatay ara yüzeylerden oluşan yansımaların kullanıldığı CMP ölçüm tekniği kullanılarak ya da sabit ofsetli ölçümler yapılarak elde edilmiş radargramlardan nokta kaynakların yansımalarının analiz edilmesiyle belirlenebilir. İkinci ve üçüncü yöntemler nispeten güçlü ve basit yansımalı ortamlardaki üst tabakaların hızlarının belirlenmesi için daha uygundur [38].

Sabit ofsetli radargramlardan yapılan hız hesaplama çalışmalarında radargramdaki nokta-kaynak yansıtıcı veya yatay ara yüzey için aynı bağıntı uygulanır. Bu durumda seyahat süresi için (2.48) bağıntısı yazılabilir.

$$t^2 = \frac{x^2}{v^2} + t_0^2 \quad (2.49)$$

Burada x hız çalışmasındaki antenler arasındaki mesafe ya da bir profildeki nokta-kaynak yansıtıcıya olan yanal ofset mesafesini, v yayılım hızını ve t_0 ofsetteki tek yönlü seyahat süresini göstermektedir [46]. Hızı hesaplamak için (2.48) bağıntısı tekrar düzenlenirse, (2.49) bağıntısına ulaşılır.

$$v = \frac{x^2}{\sqrt{t^2 - t_0^2}} \quad (2.50)$$

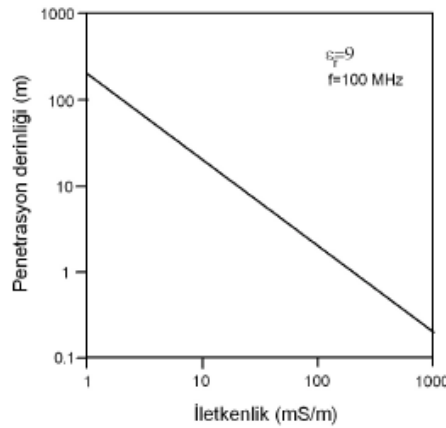
Yeraltı yapısının basit geometriye sahip olduğu yerlerde, migrasyon yazılımları kullanarak hız değişimleri için düzeltmeler yapılabilir. Bu düzeltme işlemleri, aynı zamanda yapıların geometrik şekillerinde oluşan hatalar için de uygulanabilir. Bu işlem çok vakit alan ve çok emek harcanmasına sebep olan bir işlem olmasına rağmen, kullanılan yazılımların hepsi en temel ve basit problemler için uygulanabilmektedir. Ayrıca bu işlemin bir radar çalışmasında uygulanabilmesi için çok daha ayrıntılı hız bilgisine ihtiyaç duyulmaktadır [18].

2.2.5. Penetrasyon derinliği

Radar dalgalarının yer içindeki tabakalara nüfusu birkaç parametreye bağlıdır. Radar yansımalarını oluşturan ara yüzeylerin sayısı ve her ara yüzeydeki dielektrik zıtlık, yer içinde seyahat eden sinyalin sönümlenme oranı ve kullanılan antenin merkez frekansı ile yer radarının yeraltını görüntüleyebilme yeteneğinin yanı sıra, yer içinde ilerleyen radar dalgalarının penetrasyon derinliğini de etkiler [34].

Radar dalgaları her bir ara yüzeye ulaştığında, dalgaların bir kısmı yüzeye geri dönerken, geri kalan kısım daha derindeki katman ya da katmanların içlerine doğru ilerlemeye devam eder. Ara yüzeylerin sayısı arttıkça, derinlere doğru yayılım gösteren enerji miktarında azalma meydana gelir. Özellikle çökel tabakalardaki bölgesel/kısmi dielektrik farklılıklar, karmaşık yansımalar oluşturulabilir. İlgilenilen yansımalar bu karmaşık yapı nedeniyle maskelenebilir ve bunun sonucunda araştırma derinliği azalabilir [38].

Elektromanyetik enerjinin yayıldığı ortamın elektrik iletkenliği arttığında, enerji çok hızlı şekilde sönümlenir ve bu nedenle elektromanyetik enerjinin penetrasyon derinliği azalır. Bu yüzden, yer radarı sinyalinin içerisinden geçtiği maddenin iletkenliği sinyalin penetre edeceği derinlik üzerinde büyük bir etkiye sahiptir [38]. Enerji penetrasyonu ile elektrik iletkenlik arasındaki ilişki Şekil 2.15’de verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi, ortamın iletkenliğinin artması radar dalgalarının penetrasyon derinliğini çok hızlı bir biçimde azaltmaktadır.



Şekil 2.15. Elektromanyetik enerjinin yayıldığı ortamın elektrik iletkenliği ile enerjinin penetrasyon derinliği ilişkisi [38].

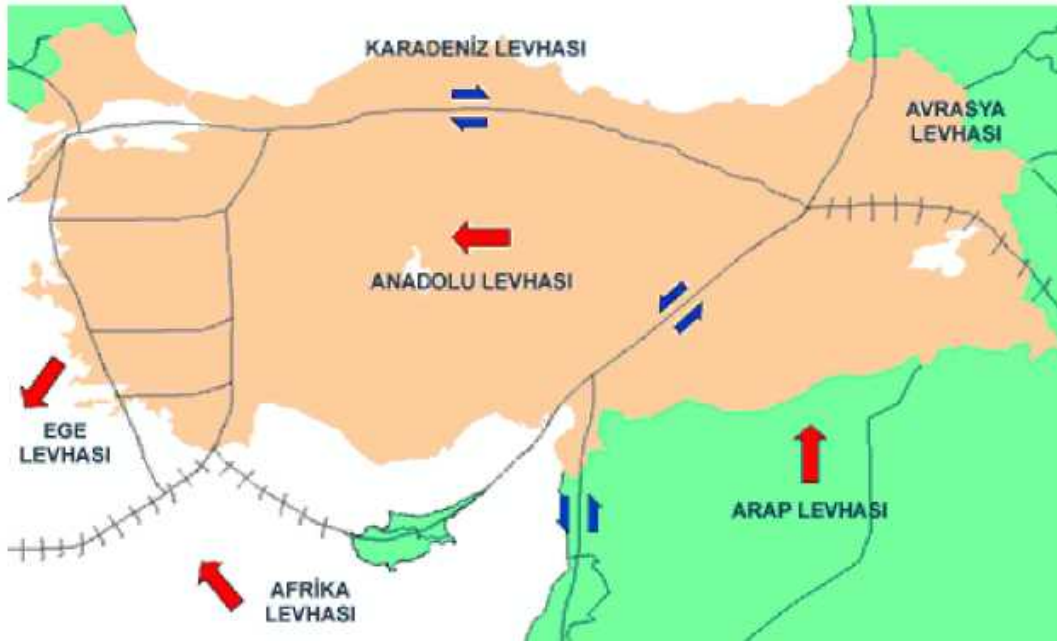
Kullanılan antenin frekansı, penetrasyon derinliğini etkileyen bir diğer önemli faktördür. Daha düşük merkez-frekanslı antenler daha uzun dalga boylu sinyaller üretir. Bunun sonucu olarak iletkenlik kayıpları ve ortamda bulunan küçük boyutlu yapılardan kaynaklanan saçılmanın azalması nedeniyle, daha az sönümlenme gerçekleşir ve dolayısıyla, radar dalgaları yerin daha derin kısımlarına ulaşabilir. Ancak düşük frekanslı dalga boyları kullanmanın en büyük dezavantajları, yeraltındaki küçük nesnelerin belirlenememesi ve ince tabaka kalınlıklarının ölçülememesinin yanı sıra, çalışılan anten boyutlarının artmasıdır. Bu durum, yeraltının çözünürlüğünü azaltır ve alanda pratik şekilde çalışmayı zorlaştırır [18].

BÖLÜM 3. BÖLGENİN GENEL JEOLJİSİ VE TEKTONİĞİ

3.1. Bölgenin Tektonik Özellikleri

Türkiye, Alp-Himalaya tektonik kuşağında yer almaktadır. Yörenin tektonik yapısının şekillenmesinde Avrasya, Afrika, Arap, Ege, Ege-Anadolu ve Karadeniz levhaları arasındaki göreceli hareketler etkili olmuştur (Şekil 3.1.). Afrika ve Arap levhalarının Avrasya levhasına göre kuzeye doğru hareket etmesi, Anadolu levhalarının batıya hareket etmesine neden olmaktadır. Balıkesir Ovası ve yakın çevresini de içine alan Batı Anadolu, Afrika levhasının Girit adasının güneyinde Ege ile Anadolu levhalarının altına dalması sonucu KKB-GGD yönlü çekme ve gerilmeye uğramıştır [1]. İnceleme alanının içinde bulunduğu Balıkesir yöresinin kuzey kısmı Kuzey Anadolu fayının yanal atımlı sıkışma ve çekme hareketinin etkisi altındadır. Anadolu, Kuzey Anadolu fayı boyunca ortalama 25 mm/yıl batı yönünde hareket ederken Batı Anadolu N-S yönünde ortalama 30 mm/yıl gerilmektedir [37]. Kuzeybatı Anadolu Bölgesi, bu iki sistemin etkisi altında tektonik olarak etkin bir alanda yer almaktadır.

İnceleme alanının aktif tektoniği ve deprenselliğinde, daha önce de belirtildiği gibi, Kuzey Anadolu fayı büyük etkiye sahiptir. Bu fay sistemi, üst Miyosen'den itibaren belirmeye başlamış; tam gelişimini pliyosen ve kuaterner'de göstermiştir [24]. Üst pliyosen sonlarında Kuzey Anadolu fayının (KAF) etkinliğinin artması, yörede aşınım yüzeyi oluşumunu sona erdirip akarsu aşınım süreçlerinin etkili olmasına neden olmuştur. Akarsu aşınım sürecinin bir sonucu olarak pliyosen vadileri derine kazılmıştır. Bu akarsu aşınım süreci günümüzde de devam etmektedir. Bu fay sistemi, Erzincan doğusundan (Karlhova) başlamakta Bolu ve Abant'a kadar Karadeniz kıyılarına paralel olarak uzanmaktadır.



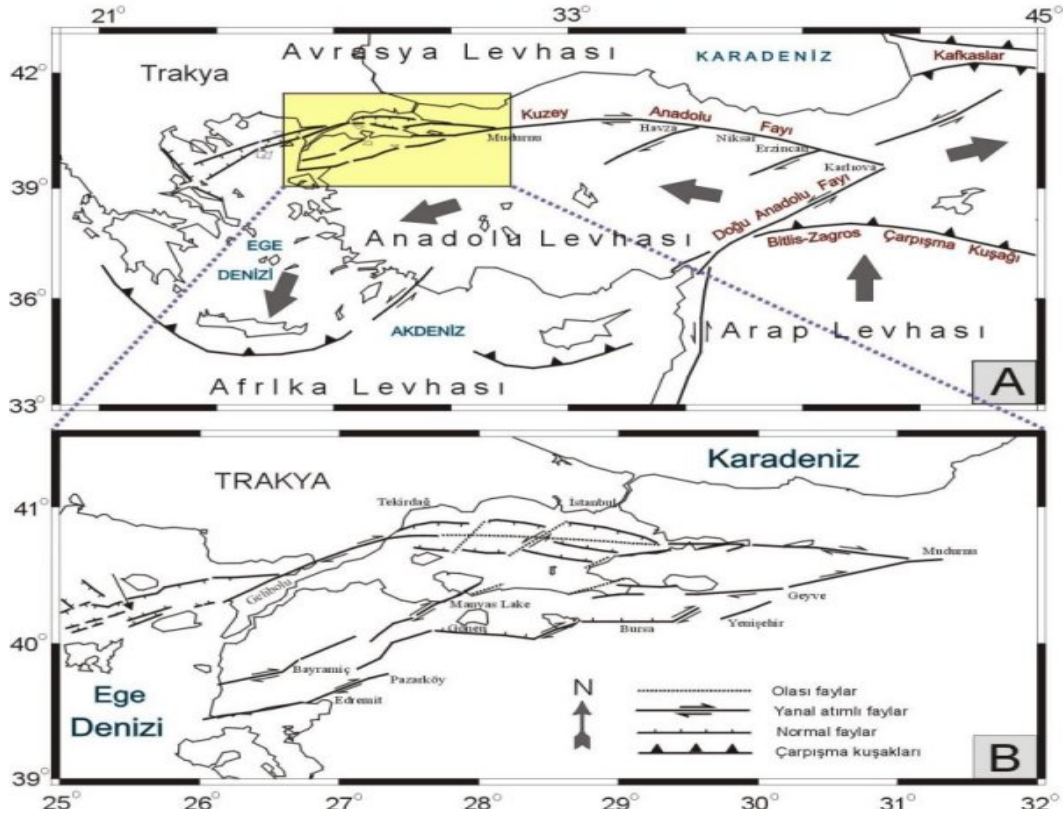
Şekil 3.1 Türkiye'nin tektonik yapısı ve levhalar [43].

KAF sistemi, Mudurnu vadisi batısında iki büyük kola ayrılmaktadır. Kuzey kol Sapanca, İzmit ve Marmara denizi içinden geçmektedir (Şekil 3.2. ve 3.3.). Güney kol ise Yenişehir, Bursa Ovası-Apollyont ve Manyas gölleri altından geçerek Biga yarımadasında Gönen ve Yenice arasından Ege denizine doğru devam etmektedir. Bu kol, zaman zaman aktif duruma geçmektedir [32].



Şekil 3.2. Kuzey Anadolu Fay zonu'nun Marmara bölgesinden geçen K ve G kolu [33].

KAF'ın Marmara Bölgesi'ndeki güney kolu ve kabul edilen orta kolu inceleme alanının kuzey sınırını oluşturmaktadır. Bu sisteme bağlı veya bağımsız olarak birçok küçük faylar gözlenmektedir.



Şekil 3.3. Kuzey Anadolu Fay zonuunun Marmara bölgesinden geçen Kuzey ve Güney Kolları [10].

Balıkesir Ovası ve yakın çevresi, kuzeyindeki Yenice-Gönen Fay Zonu dışında, batıdan Akhisar Fay Zonunun etkisi altında da bulunmaktadır. Son yıllarda yapılan bazı araştırmalarda Balıkesir-Afyon-Konya arasında uzanan Akşehir Fay Zonundan söz edilmektedir [33]. Bu fay zonu, doğuda Konya'dan başlamakta batıda Savaştepe'ye kadar uzanmaktadır. Genel uzantısı BKB-DGD olup toplam uzunluğu 420 km olarak kabul edilen bu fay zonuunun 1-50 km uzunluğunda birbirine paralel ya da yarı paralel çok sayıda normal faylardan oluştuğu kabul edilmektedir [33]. Bu fay sistemi N-S, NE-SW ve NW-SE uzantılı ikincil fay sistemlerinden oluşmaktadır. Bu faylar, çok küçük doğrultu atım bileşeni olan oblik faylarla temsil edilmektedir.



Şekil 3.4. Balıkesir ve çevresi diri fay haritası [45].

Genel olarak bölge, kuzeyden Kuzey Anadolu Fay Zonunun (KAFZ) ve güneyden Ege Graben Sisteminin etkisi altındadır.

Diğer bir deyişle, yöre KAFZ ile Ege'nin açılma rejimi arasında bir geçiş zonu özelliği taşımaktadır. Şöyle ki, kuzeydeki KAFZ' nuna ait olan Yenice-Gönen fayı, doğrultu atımlı fay çözümleri veren depremler üretmektedir. Buna karşılık batısı ve güneyi, Ege çöküntü sistemlerinin etkisi altında normal atım karakterli depremler üretmektedir. Ege çöküntü sistemlerinden Edremit çöküntüsü, Bakırçay çöküntüsü ve Simav çöküntüsü yöreyi kuzeybatıdan, batıdan ve güneyden sınırlamaktadır. Bu bütün içinde Ayvalık, İvrindi, Soma, Savaştepe ve Bigadiç'te bu sistemlere bağlı olarak depremler meydana gelmektedir. Edremit çöküntüsü, Kuzey Anadolu fayı ile Batı Anadolu'nun çekme rejimi etkisi altında bulunmaktadır [20, 21]. Diğer yandan Bakırçay çöküntüsü, Çandarlı'dan Soma'ya kadar uzanan 80 km uzunluğunda bir sistemdir [20]. Simav çöküntüsü ise Simav çayı boyunca yaklaşık 100 km uzunluğundadır [20].

3.2. Ege Graben Sistemi

Ege Graben sistemi, genel olarak D-B doğrultulu normal faylar ile sınırlandırılmış birçok bloklardan meydana gelmektedir. Bu bloklar arasında, D-B uzanımlı grabenler yer almaktadır. Bölge, genel olarak KKD-GGB yönlü bir çekme rejiminin etkisi altında bulunmaktadır. Bölgede hakim olan ana KKD-GGB genişleme yönü, bu depremlerin odak mekanizma çözümleri sonucu elde edilmiş T eksenleri yönleri ile uyumluluk göstermektedir. Bu grabenler kuzeyden güneye doğru; Edremit Körfezi, Bakırçay-Simav grabeni, Gediz-Küçük Menderes grabenleri, Büyük Menderes ve Gökova Körfezi grabenleri şeklinde sıralanabilir.

Ege Graben Sistemi içerisinde 1900–1995 yılları arasında oluşmuş yıkıcı ve yüzey kırığı meydana getirmiş depremlerin yer-zaman diyagramı incelendiğinde, depremlerin birbirine yakın segmentlerde oluştuğu görülmektedir. Bu yakın segmentlerde oluşan depremler zaman olarak birbirlerine oldukça yakındır. Bu bölgedeki depremler, genellikle birer çiftler şeklinde oluşmaktadır. Bölgenin birbirlerine bağlantılı birçok graben ve horstlardan meydana gelmesi nedeniyle, bir segmentde oluşan deprem diğer yakın segmentde tetikleme rolü oynamaktadır. Bu karakteristik özellikler, Ege graben sisteminin, normal faylar ile ilgili açıklanan tüm modelleri sunduğunu göstermektedir. Ege graben sisteminin Edremit Körfezini içine alan kuzey kesimi, Kuzey Anadolu fayı ile Batı Anadolu'daki çekme rejimin etkisi altında bulunmaktadır. Ege graben sisteminin ikinci alt bölgesini, KKD yönelimli Bakırçay grabeni ile KKB yönelimli Simav grabeni oluşturur. Bu grabenler, kenarları doğrultu atım bileşenli normal faylar olan büyük çöküntü alanlarını temsil ederler. Çandarlı Körfezi ile Soma arasında uzanan Bakırçay grabeni, 10-20 km genişliğe ve 80 km uzunluğa sahiptir. Diğer taraftan Simav grabeni, Simav çayı boyunca yaklaşık 100 km uzanır [29].

Gediz grabeni, Sarıgöl ile Turgutlu arasında uzanan 10-20 km genişlikte ve 140 km uzunlukta BKB-DGD doğrultulu büyük bir çöküntü alanını temsil eder. Bu graben boyunca Pliyosen'den günümüze kadar olan zaman aralığı içerisinde 1.5 km civarında bir düşey atımın meydana geldiği bildirilmektedir [29].

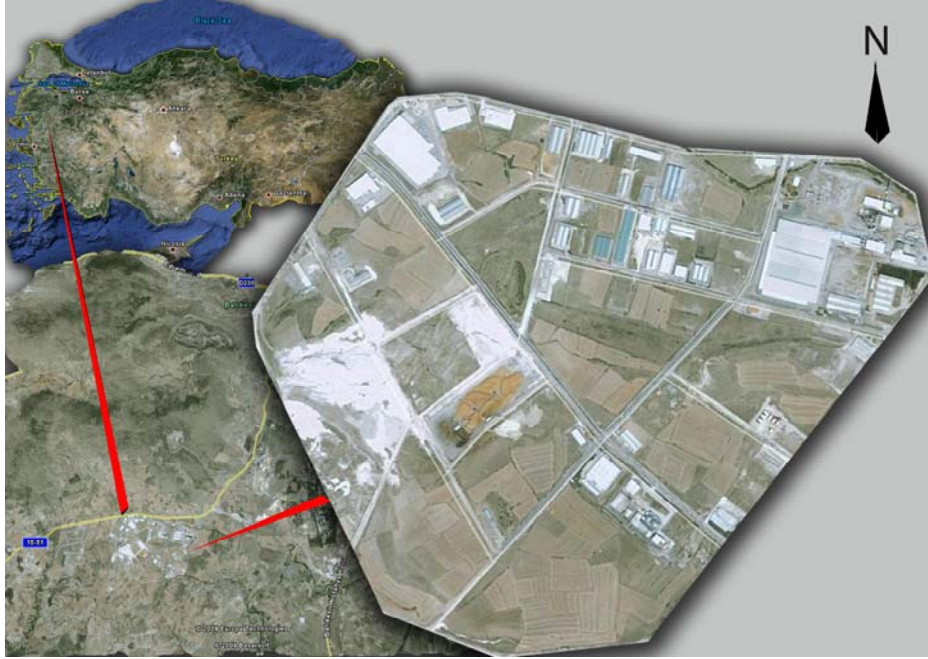
Gediz grabeninin hemen güneyinde Ödemiş-Bayındır-Torbalı-Tire ve Selçuk gibi yerleşim alanları içerisinde geçen 5-20 km genişlikte ve 100 km uzunlukta Küçük Menderes grabeni yer alır [29]. Gediz-Küçük Menderes grabenlerinin güneyinde doğrultusu doğudan batıya doğru değişen ve doğrultu atım bileşenli normal faylanmalar sunan, batıda Ege Denizi ile doğuda Sarayköy'e kadar uzanan 10-25 km genişlikte ve 200 km uzunlukta Büyük Menderes grabeni yer alır [29]. Bu bölgenin en güneyinde Güllük ile Muğla arasında uzanan BGB-DKD doğrultulu Gökova Körfezini sınırlayan faylanmalar bulunur.

Ege graben sistemi içerisinde 1900 – 1995 yılları arasında hasar yapıcı ve yüzey kırığı meydana getirmiş $M > 5,5$ olan 33 deprem meydana gelmiştir. Bu depremlerin yukarıda bahsedilen belli başlı grabenler boyunca yoğunlaştıkları açık bir şekilde görülmektedir. Bölge, oldukça karışık tektonik görünüm sunması nedeniyle sürekli depremlere maruz kalmış ve gelecekte de deprem oluşturma potansiyeli yüksek olan bir bölgeyi oluşturmaktadır. Geçmiş yüzyılda (1900 – 1995) oluşmuş depremlerin ($M_s > 4.0$) büyük bir çoğunluğunun Büyük Menderes grabeninin doğu ucu ile Simav grabeni boyunca meydana geldikleri görülmektedir.

Bu grabenlerin kenarlarını sınırlayan ana normal faylar, kısa uzunluklara sahip birçok küçük segmentlerden oluşmaktadır. Dolayısıyla, bu kısa segmentlerden birinde oluşan bir deprem, yakınlarındaki diğer komşu segmentleri tetiklemekte ve ileriki bir zamanda bu segmentlerde depremlerin oluşmasına neden olmaktadır. Bu depremler ($M_s > 5.5$) genellikle bölgede güneyden kuzeye doğru zaman içerisinde bir kayma göstermişlerdir.

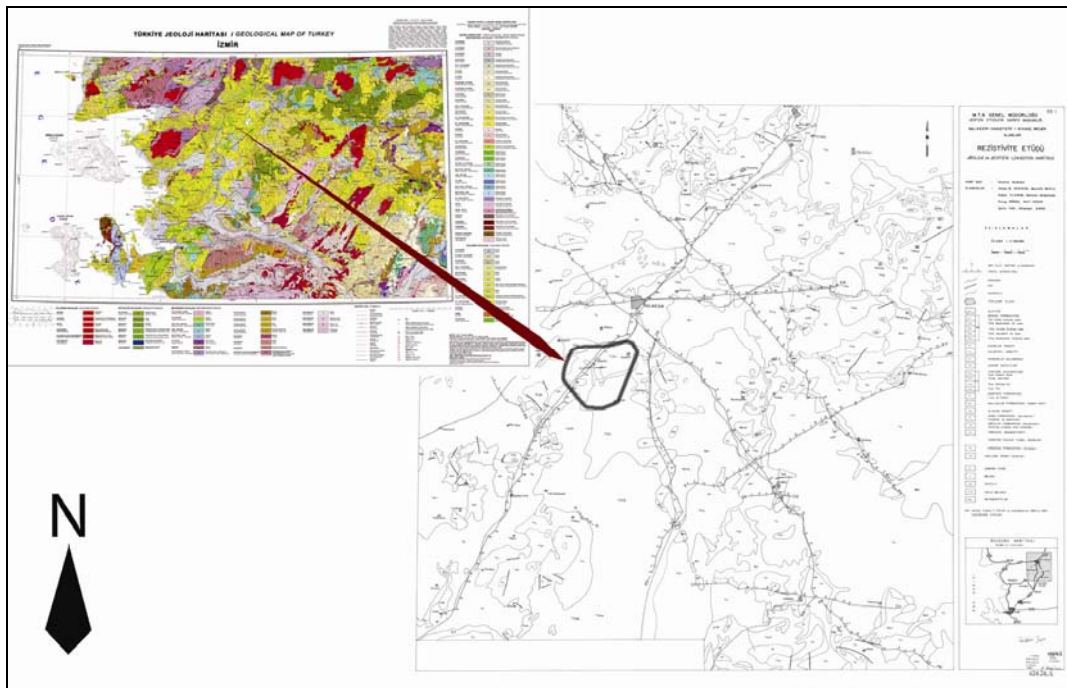
3.3. Çalışma Sahası Hakkında Bilgi

Çalışma sahası olan Balıkesir ili ülkenin kuzey batısında kuzeyinde Çanakkale, güneyinde İzmir, doğusunda Kütahya ve Bursa illerinin bulunduğu ve batı sınırı Ege denizi olan bir bölgedir (Şekil 3.5.). Çalışma alanının kuzeyinden Kuzey Anadolu Fayının Güney kolu Edremit Körfezine çıkmaktadır. Ayrıca çalışma alanı Ege bölgesinde hakim olan horst graben yapısının da etkisi altında olan bir bölgedir.



Şekil 3.5. Çalışılan Bölge ve Yer Bulduru Haritası [27].

3.4. Çalışma Sahasının Jeolojisi



Şekil 3.6. Çalışılan Bölge ve Çalışma Alanının Jeolojisi ve Tektoniği [39].

Balıkesir yöresinin kaya zeminini oluşturan genel jeolojik özellikleri incelendiğinde topografyaya %23.0 ile kuvaterner yaşta eski ve yeni alüvyonlar;

%29.0 ile üst miyosen-pliyosen yaşıta Soma formasyonuna ait konglomeralar, kumtaşları, marn ile kireçtaşları; %34.6 ile orta-üst miyosen yaşıta yuntdağ volkanitine ait lavlar, tüfler, silisleşmiş tüfler, aglomeralar ve laharlar hakimdir [49]. Geriye kalan %13.4'ü ise tersiyer'den yaşlı olan birimler oluşturmaktadır (Şekil 3.6.).

BÖLÜM 4. YER RADARI KESİTLERİNİN YORUMLANMASI

Balıkesir yöresinde bir bölgenin fay araştırma çalışması yer radarı yöntemi uygulanarak yapılmıştır. Çalışma sırasında bölge ile ilgili jeolojik haritalar ve tektonik rejim incelenmiş ve buna bağlı kalınarak muhtemel tali fay kolları üzerinde radar profil hatları belirlenmiştir. Söz konusu fay bölgesi kapalı bir alan içerisine alınarak; 9 adet radar ölçü profili 50 metre aralıklarla birbirine paralel dizilmiştir. Şekil 4.1’de çalışma sahasının konumu ve radar profillerinin uydu görüntüsü üzerindeki dizilimi görülmektedir [27].



Şekil 4.1. Çalışma Sahasının Uydu Görüntüsü ve Üzerinde Radar Profillerinin Konumu [27].

Radar profilleri bazıları topografyanın bozucu etkisini kayıtlara almamak ya da herhangi bir topografya düzeltilmesi yapmamak amacıyla bazı bölgelerde kısa kesilmişlerdir. Radar profilleri olası fayı dik ya da dike yakın kesebilmek için KB-GD yönlü olarak dizilmişlerdir. Tablo 4,1’de radar kesitlerinin özellikleri görülmektedir.

Tablo 4.1 Radar Kesitleri ve Özellikleri

Profil Adı	Anten Frekansı (Mhz)	Anten Türü	Profil Uzunluğu (m)
MS-1	250	KALKANLI	707
MS-2	250	KALKANLI	654
MS-3	250	KALKANLI	1073
MS-4	250	KALKANLI	1074
MS-5	250	KALKANLI	988
MS-6	250	KALKANLI	1700
MS-7	250	KALKANLI	476
MS-8	250	KALKANLI	360
MS-9	250	KALKANLI	304

Ham veri kesitleri yorum yapılmasına izin vermemektedir. Bu sebeple verilerin bazı derinliklerinde genlik artırımları yapılmak suretiyle okunabilir hale getirilmeleri sağlanmıştır. Daha sonra okunabilir hale getirilen kesitler aşağıdaki gibi yorumlanabilir.

4.1. Yer Radarı Kayıtlarına Uygulanan Veri İşlem Aşamaları

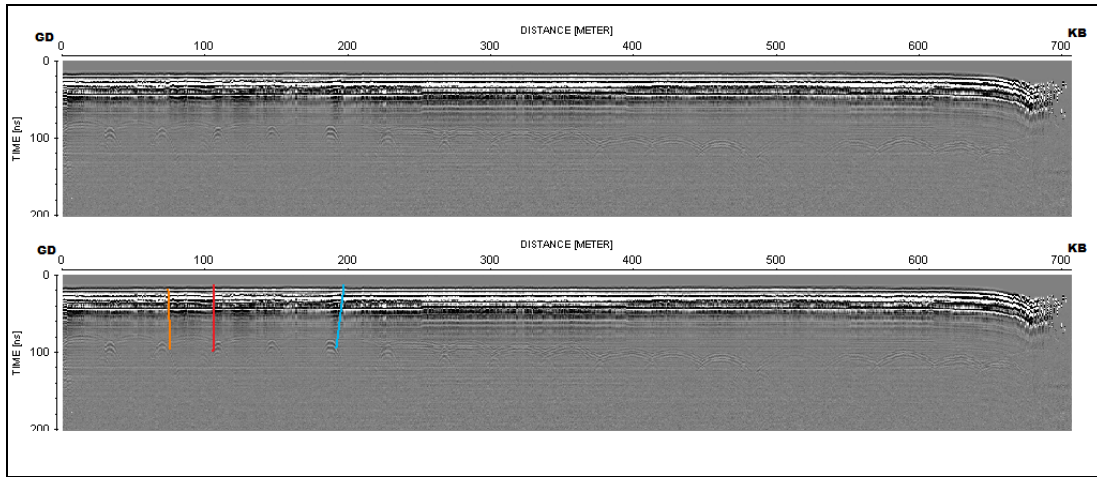
Yer radarı verileri sahadan Mala firmasına ait GPR sistemi ile alınmıştır. Ölçümler 250 Mhz’lik kapalı antenlerle alınmıştır. Kapalı anten yer içine gönderilmesi hedeflenen elektromanyetik dalgaların havaya dağılmasını engelleyen zırlı sistemlerden oluşmaktadır.

Araziden alınan yer radarı kayıtlarının görüntülenmesi ve bazı veri işlem aşamalarından geçmesi gerekmektedir. Verilerin görüntülenmesi ve veri işlem aşamaları için ayrı ayrı programlar kullanılabileceği gibi bu işlemler aynı programla da yapılabilmektedir. Bu çalışmada yer radarı kayıtları REFLEXW adlı programla açılmış ve uygulanan veri işlemlerde gene bu program sayesinde yapılmıştır.

Araziden alınan ham verilerde sadece ilk 10 ns seviyelerinde belirli belirsiz görüntüler gözlenmekteydi. Daha sonra her veride ayrı ayrı 10-20 ns seviyelerinden başlayarak genlik artırımına gidilmiştir. Yapılan bu işlemde sonra veriler daha rahat yorumlanabilir hale gelmişlerdir. Genlik artırımı sırasında verinin alt kısımlarındaki görüntünün iyileştirilmesinin yanı sıra üst tarafların görüntüsünün bozulmamasına da dikkat edilmiştir. Yapılan genlik artırımını bu sebeple bazı verilerde farklı miktarlarda uygulanmıştır.

4.2. MS-1 Radar Kesiti ve Yorumu

MS-1 radar kesiti araştırma sahasının kuzey doğusundaki başlangıç hattıdır. Profil 707 metre uzunluğunda ve 200 ns derinliğindedir.

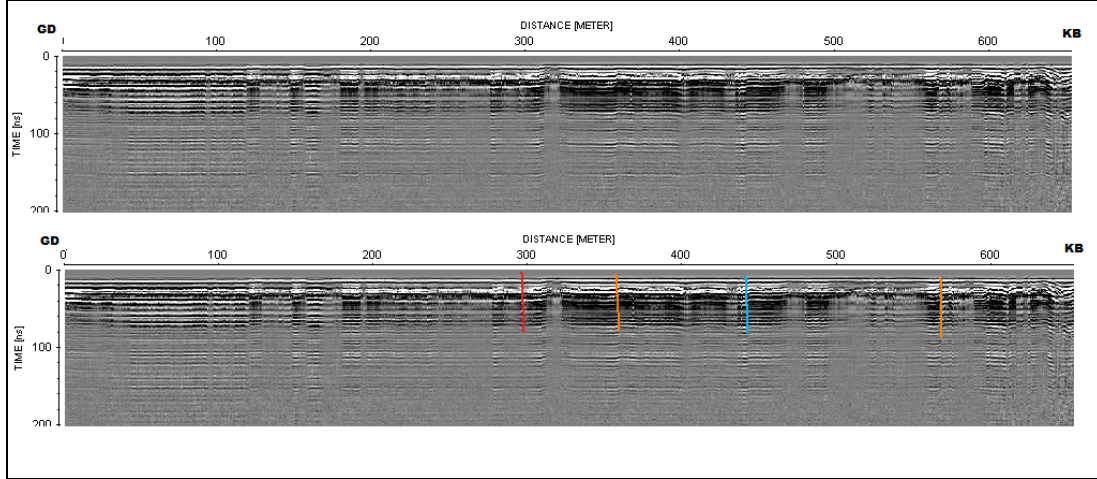


Şekil 4.2 MS-1 Veri İşlem Sürecinden Geçmiş Kesiti (üstte) ve Yorumlanmış Hali (altta)

Genlik artırımını yapıldıktan sonra oluşan kesitte fay izleri aranmıştır. Sırasıyla 75. metre, 105. metre ve 188. metrelerde fay izlerine rastlanmıştır. Bu faylar kesit üzerinde farklı renklerle işaretlenmişlerdir.

4.3. MS-2 Radar Kesiti ve Yorumu

MS-2 radar kesiti GD-KB uzanımlı ikinci profildir. Profil uzunluğu 654 metre olarak belirlenmiştir. Derinliği ise 200 ns.'dir.

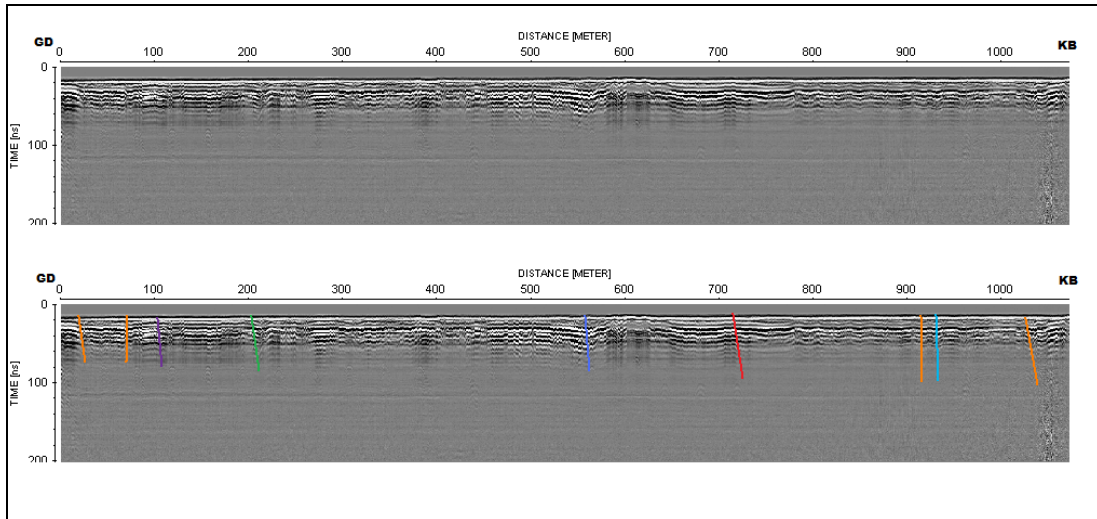


Şekil 4.3 MS-2 Veri İşlem Sürecinden Geçmiş Kesiti (üstte) ve Yorumlanmış Hali (altta)

Bu profilde yapılan yorumlamaya göre ise; faylar sırasıyla 290. metre, 356. metre, 435. metre ve 565. metrelerde Şekil 4.3'te görülmektedir.

4.4. MS-3 Radar Kesiti ve Yorumu

MS-3 radar kesiti 1073 metre uzunluğundadır. İlk iki kesite paralel bir şekilde GD-KB uzanımlıdır. Derinlik ise 200 ns.'dir. MS-3 profilinde bir çok yerde kırıklara rastlanılmıştır.

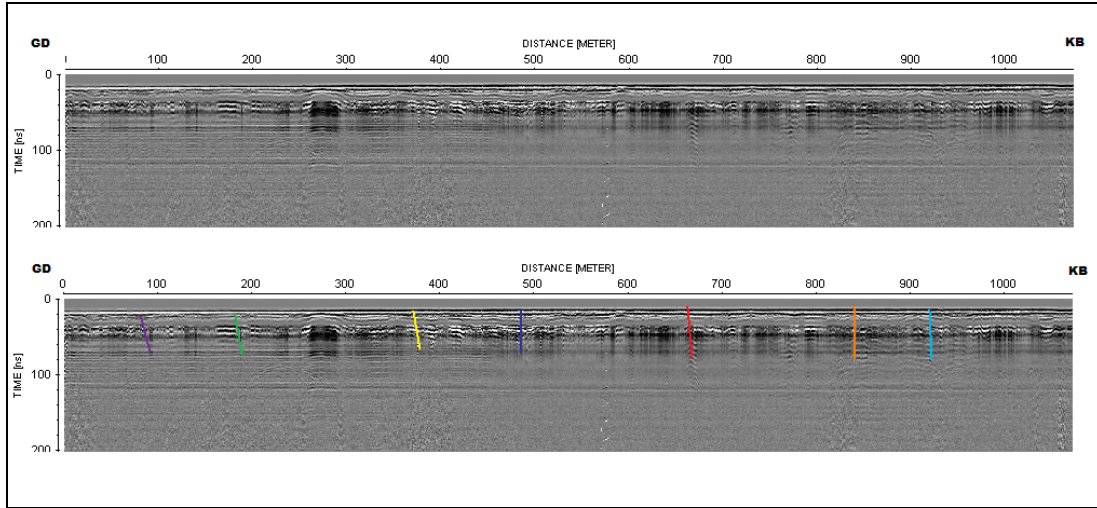


Şekil 4.4. MS-3 Veri İşlem Sürecinden Geçmiş Kesiti (üstte) ve Yorumlanmış Hali (altta)

MS-3 profilinde fay olarak yorumlanan kırıklar sırasıyla; 20. metre, 67. metre, 200. metre, 555. metre, 710. metre, 910. metre, 935. metre ve 1025. metrelerde Şekil 4.4'te görülmektedir.

4.5. MS-4 Radar Kesiti ve Yorumu

MS-4 radar profili 1074 metre uzunluğundadır. Derinlikte diğer kesitlerde olduğu gibi 200 ns.'dir. MS-4'te karşılaşılan yapı 50 metre kuzey doğusunda bulunan MS-3'ten farksızdır.

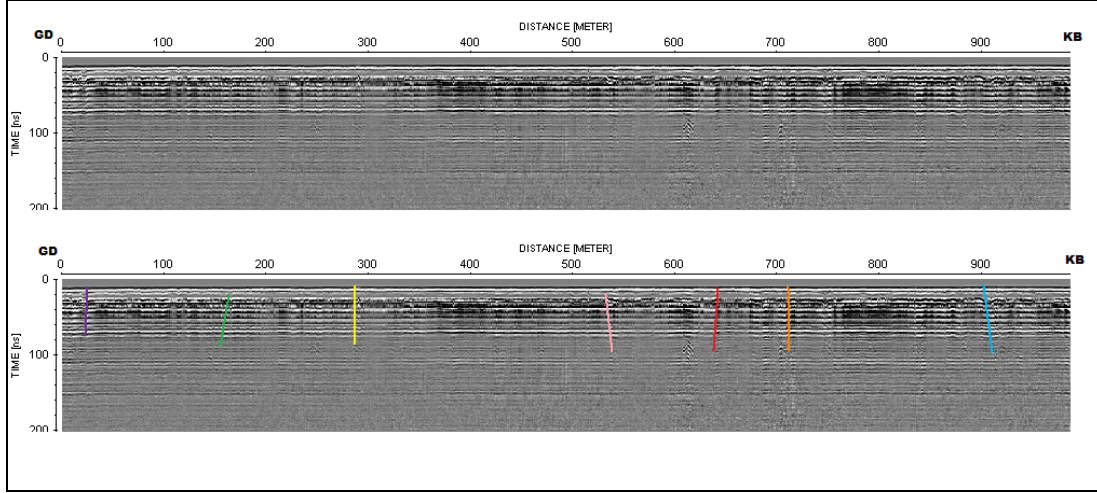


Şekil 4.5. MS-4 Veri İşlem Sürecinden Geçmiş Kesiti (üstte) ve Yorumlanmış Hali (altta)

MS-4 profilinde fay yapısı olarak yorumlanmış kırıklar sırasıyla; 85. metre, 185. metre, 377. metre, 480. metre, 660. metre, 840. metre ve 925. metrelerdedir. Şekil 4.5'te ölçüm profilinin yorumlanmamış ve yorumlanmış halleri görülmektedir.

4.6. MS-5 Radar Kesiti ve Yorumu

MS-5 radar profili 988 metre uzunluğundadır. Profilin derinliği 200ns.'dir. İnceleme alanının tam ortasından geçen kesittir.

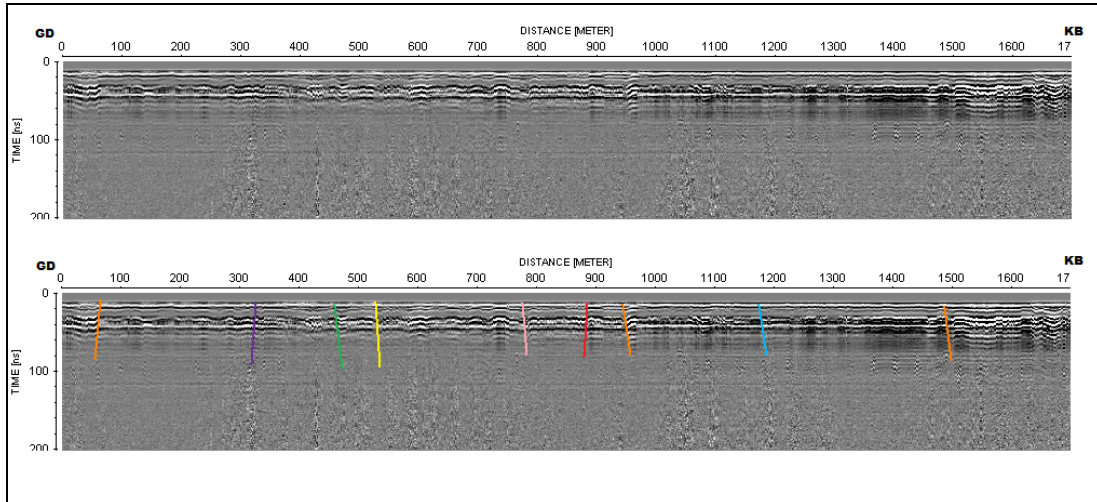


Şekil 4.6. MS-5 Veri İşlem Sürecinden Geçmiş Kesiti (üstte) ve Yorumlanmış Hali (altta)

MS-5 profilinde fay olarak yorumlanmış kırıklar sırasıyla; 160. metre, 290. metre, 530. metre, 640. metre, 710. metre ve 900. metrelerdedir. Şekil 4.6'da işaretlenmiş faylar kesit üzerinde görülmektedir.

4.7. MS-6 Radar Kesiti ve Yorumu

MS-6 radar profili kesitlerin en uzununu olup 1700 metre uzunluğundadır. Derinlik ise diğer kesitlerde olduğu gibi 200 ns.'dir.



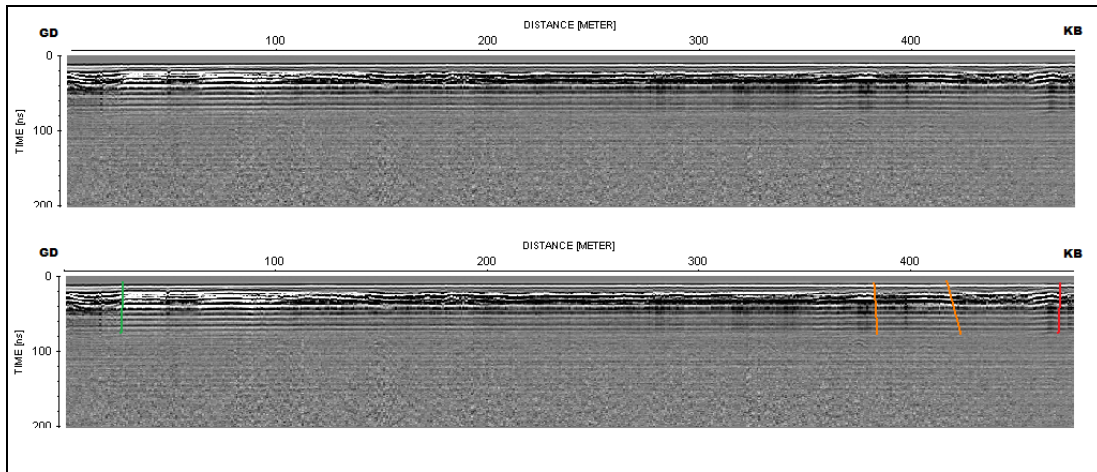
Şekil 4.7. MS-6 Veri İşlem Sürecinden Geçmiş Kesiti (üstte) ve Yorumlanmış Hali (altta)

Kayıtlar içerisindeki en uzun profil olması itibariyle üzerinde bir çok kırığa rastlanılmıştır. MS-6 profilinde belirlenen faylar; 62. metre, 320. metre, 460. metre,

530. metre, 770. metre, 890. metre, 950. metre, 1170. metre ve 1470. metrelerdedir. Şekil 4.7’de fayların çizili olduğu profil görülmektedir.

4.8. MS-7 Radar Kesiti ve Yorumu:

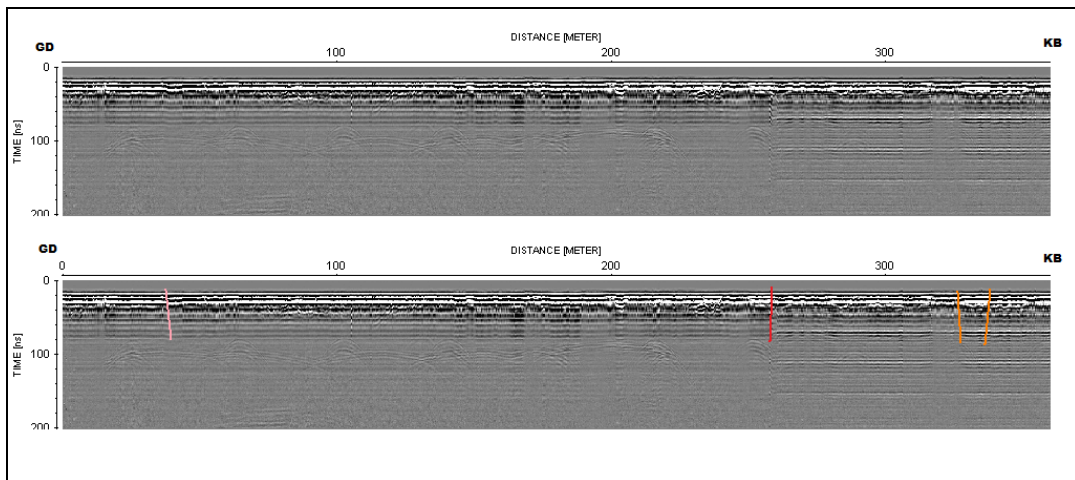
MS-7 radar profili uzunluğu 476 metredir. Derinlik ise 200 ns.’dir.



Şekil 4.8. MS-7 Veri İşlem Sürecinden Geçmiş Kesiti (üstte) ve Yorumlanmış Hali (altta)

Kayıtta belirlenen faylar sırasıyla; 24. metre, 380. metre, 420. metre ve 470. metrelerdedir. Şekil 4.8’de kesit üzerine işlenmiş faylar görülmektedir.

4.9. MS-8 Radar Kesiti ve Yorumu:

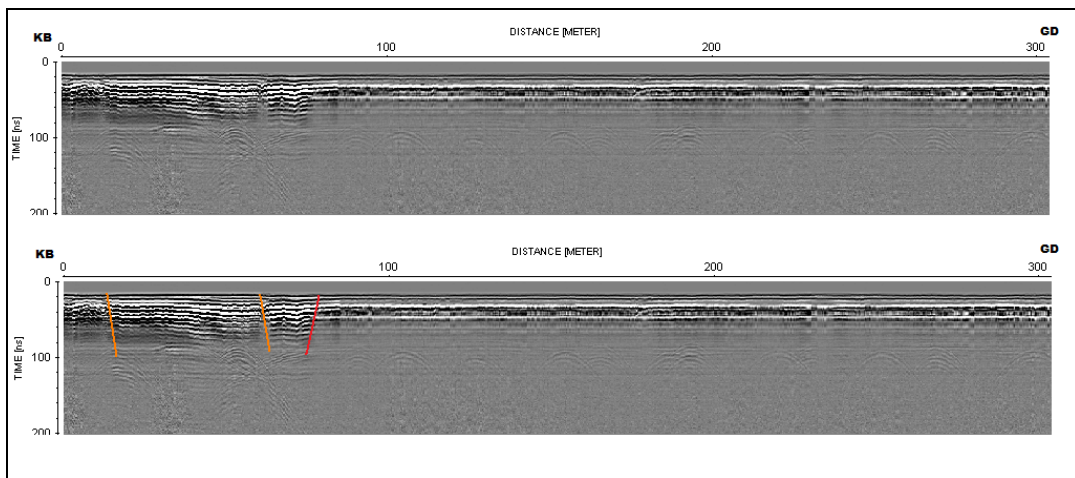


Şekil 4.9. MS-8 Veri İşlem Sürecinden Geçmiş Kesiti (üstte) ve Yorumlanmış Hali (altta)

MS-8 radar profili 360 metre uzunluğundadır. Kaydın derinliği 200 ns.'dir. Profil boyunca 4 tane fay yapısı yorumlanmıştır. Fay olarak yorumlanan bu kırıklar sırasıyla; 36. metre, 260. metre, 327. metre ve 343. metrelerdedir.

4.10. MS-9 Radar Kesiti ve Yorumu:

MS-9 radar profili 300 metre uzunluğundadır. Derinliği 200ns.'dir. Profil ölçüm alımı sırasında diğer kesitlerden farklı olarak 0 noktası KB olarak seçilmiştir.



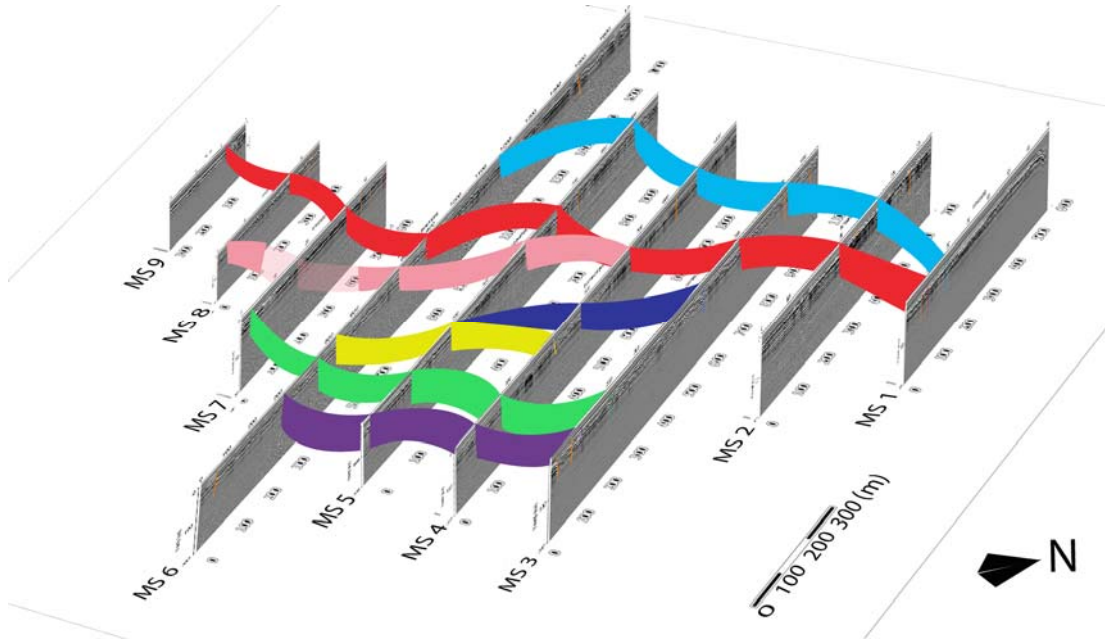
Şekil 4.10. MS-9 Veri İşlem Sürecinden Geçmiş Kesiti (üstte) ve Yorumlanmış Hali (altta)

Kesitte karşılaşılan fay yapıları sırasıyla; 18. metre, 60. metre ve 77. metrelerdedir.

4.11. Elde Edilen Kesitlerin İlişkilendirilmesi ve Fayların 3 Boyutlu Görüntüsü

Ege horst graben sistemlerinin etkisi altında kalan, Kuzey Anadolu Fayı (KAF) güney kolunun yan segmentlerinin geçtiği çalışma sahasında 9 adet KB-GD yönünde 50 metre aralıklarla dizilmiş radar profilleri sayesinde fay kesitlerinin dik ya da dike yakın kesilmeleri sağlanmıştır.

Profillerden fay olarak yorumlanan kırıkların profillerin yan yana getirilmesi ile inceleme alanındaki uzanımlarına bakılmıştır. Profiller yan yana getirildiğinde birbiri ardına gelen faylar aynı renklerde boyanmış ve birbirlerine bağlanmışlardır. Şekil 4.11'de kesitlerin ve yorumlanmış fayların üç boyutlu görüntüsü görülmektedir.



Şekil 4.11. Elde Edilen GPR Kesitlerinin İlişkilendirilmesi Sonucu Yorumlanan Fayların 3-B Görüntüsü

Öte yandan Şekil 4.11’de pembe renkle gösterilen fayın MS-7 kesitinde karşılığı bulunamamış ancak sonraki kesitte aynı fay görüldüğü için arada kalan bölge çelişkili fay olarak çizilmiştir.

BÖLÜM 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Çalışma sahasında yer radarı ile yapılan ölçümlerde 7 adet yüzeysel çatlak tespit edilmiş olup genel olarak KD-GD uzanımlı olan fayların KAF'ın güney kolundaki segmentle bağlantılı kırıkların olduğuna karar verilmiştir.

Öte yandan 9 adet radar profili belirlenmiş, bu profiller KB-GD uzanımlı 50'şer metre aralıklarla birbirlerine paralel dizilmiş ve elde edilen ölçümlerin derinlere doğru azalan genlikleri arttırılarak kayıtlar okunabilir hale getirilmiştir. Böylelikle 7 adet yüzeysel çatlak tespit edilmiştir.

Araştırmada elde edilen sonuçlar ve öneriler ise, aşağıdaki gibi maddeler halinde sıralanabilir.

- 1) Yapılan çalışmayla Kuzey Anadolu Fayı Güney kolunun bir segmenti üzerindeki kırıklar belirlenmiştir.
- 2) Belirlenen kırıkların KD-GB uzanımlı olduğu görülmüştür.
- 3) Bölgede Ege horst graben yapısının etkisi ve Kuzey Anadolu Fayının etkisinin görüldüğü bir sistem mevcuttur.
- 4) Yer radarı yöntemi, topoğrafik engeller sebebiyle uygulaması güç bir yöntem olduğu anlaşılmıştır. Dolayısıyla uzun profillerin tespitinde topoğrafik engellerle karşılaşılabileceğinden, sağlıklı bir ölçüm yapılamama ihtimali bulunmaktadır.
- 5) Tek tek yapılan yorumlamalarda radar kayıtlarında elde edilen bazı kırıkların ardından gelen diğer kayıtlarda görülmediği belirlenmiştir.
- 6) Karayolu, demiryolu, tünel, liman, mesken ve buna benzer yüzeysel yapılaşmada mevcut çatlakların yapının kararlılığı üzerinde son derece büyük bir öneme sahiptir. Dolayısıyla, bu çalışmada olduğu gibi yer radarı yöntemi ile yüzeysel çatlakların tespit edilmesi bu açıdan son derece önemli ve pratik bir çözümdür.

- 7) İleriki çalışmalarda yer radarı profil sayıları arttırılarak sonuçlar daha belirgin hale getirilebilir.
- 8) Meskun bölgelerde yüzeysel çatlakların tespit edilmesi ve bu konuda yerel yönetimlerin önlem alması gerekebilir. Bu bağlamda yerel yönetimlerin parsel bazında yapmış olduğu zemin taşıma gücünün belirlenmesi ile ilgili etütlerde yüzeysel çatlak olup olmadığının tespit edilmesine de ayrı bir önem vermesi gerekmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] ADATEPE, F.M, ‘Batı Anadolu Kıyılarının Tarihsel Dönem Deprem Etkinliği’, Deprem Araştırma Bülteni, Yıl:25, Sayı:76, syf. 63-85, 1998.
- [2] ANNAN, A.P., Transmission dispersion and GPR. The Journal of Environmental and Engineering Geophysics, 2, 125-136, 1996.
- [3] ANNAN, A.P., Ground penetrating radar workshop notes. Mississauga, Ontario: Sensors and Software Inc 2001.
- [4] ANNAN, A.P., COSWAY, S. W., Simplified GPR beam model for survey design. 62nd Annual International Meeting of the Society of Exploration Geophysicists, Extended Abstract 1992.
- [5] ANNAN, A.P., COSWAY, S.W., GPR frequency selection. Fifth International Conference on Ground-Penetrating Radar, Proceedings, 747-760, 1994.
- [6] ARCONI, S.A., Numerical studies of the radiation patterns of resistively loaded dipoles. Journal of Applied Geophysics, 33, 39-52, 1995.
- [7] AUDRU, C.J., BANO, M., BEGG, J., BERRYMAN, K., HENRYS, S. AND NÍVIERE, B., GPR investigations on active faults in urban areas: the Georise-NZ project in Wellington, New Zealand, Earth and Planetary Sciences 333, pp. 447–454, 2001.
- [8] BALANIS, C.A., Advanced engineering electromagnetics. NY: John Wiley and Sons, 1989.
- [9] BANO, M., PIVOT, F., MARTHELOT, J., Modelling and filtering of surface scattering in ground-penetrating radar waves. First Break 17 (6), 215–222, 1999.
- [10] BARKA, A.A., The North Anatolian fault Zone. Ann. Tecton. 6, 164– 195, 1992.
- [11] BATEY, R. A., Subsurface interface radar at Sepphoris, Israel. Journal of Field Archaeology, 14, 1-8, 1987.
- [12] BERES, M., GREEN, A., HUGENBERGER, P., and HORSTMAYER, H., Mapping the architecture of glaciofluvial sediments with three dimensional georadar. Geology, 23, 1090-1097, 1995.

- [13] BHOSLE, N.B., GARG, A., HARJI, R. JADHAV, S., SAWANT, S.S., KRISHNAMURTHY V. AND ANIL, C., Butyltins in the sediments of Kochi and Mumbai harbours, West Coast of India Environment International 32, pp. 252–258, 2006.
- [14] BREWSTER, M.L., and ANNAN, A.P., Ground-penetrating radar monitoring of a controlled DNAPL release: 200 MHz radar. Geophysics, 59(8), 1211-1221, 1994.
- [15] BREWSTER, M. L., ANNAN, A. P., GREENHOUSE, J. P., KUEPER, B. H., OLHOEFT, G. R., REDMAN, J. D., Observed migration of a controlled DNAPL release by geophysical methods. Ground Water, 33, 977-987, 1995.
- [16] CARCIONE, J. M., SERIANI, G., and GEI, D., Acoustic and electromagnetic properties of soils saturated with salt water and NAPL. Journal of Applied Geophysics, 52, 177-191, 2003.
- [17] CHOW, J. ANGELIER, J.J. HUA, J.C. LEE AND R. SUN, Paleoseismic event and active faulting: from ground penetrating radar and high-resolution seismic reflection profiles across the Chihshang Fault, eastern Taiwan, Tectonophysics 333, pp. 241–259, 2001.
- [18] CONYERS, L.B., and GOODMAN, D., Ground-penetrating radar: An introduction for archaeologists. California: Altamira Press, 1997.
- [19] DAVIS, J. L., and ANAN, A. P., Ground-penetrating radar for high-resolution mapping of soil and rock stratigraphy. Geophysical Prospecting, 37, 531-551, 1989.
- [20] DEMİRTAŞ, R. VE YILMAZ, R., Türkiye'nin Sismotektoniği: Sismisitedki uzun süreli değişim ve güncel sismisiteyi esas alarak deprem tahminine bir yaklaşım. Bay. ve İsk. Bak. Deprem Araştırma Dairesi Yayınları, 91s, Ankara, 1996.
- [21] DEMİRTAŞ, R.VE ERKMEN, C., 12 Kasım 1999 Düzce depremi (Mw = 7.2): Yüzey Kırık geometrisi, atım miktarı dağılımı ve gelecek deprem potansiyeli. Türkiye Jeoloji Kurultayı, Bildiri Özleri, 162-163, 2000.
- [22] DOOLITTLE, J.A., MILLER, W. F., Use of ground-penetrating techniques in archaeological investigations. In applications of space-age technology in Anthropology Conference Proceedings, (2nd ed.). NASA Science and Technology Laboratory, 1991.
- [23] DUKE, S., Calibration of ground-penetrating radar and calculation of attenuation and dielectric permittivity versus depth. M.Sc. thesis (unpublished), Colorado School of Mines, Golden, Colorado, 1990.

- [24] EROL,O., ‘Türkiye’nin Genç Tektonik ve Jeomorfolojik gelişimi’. Jeomorfoloji Dergisi., Sayı. 11, s. 1-22, Ankara, 1983.
- [25] GOODMAN, D., Ground-penetrating radar simulation in engineering and archaeology. *Geophysics*, 59, 224-232, 1994.
- [26] GOODMAN, D., NİSHİMURA, Y., ROGERS, J. D., GPR time-slices in archaeological prospection. *Archaeological Prospection*, 3, 85-89, 1995.
- [27] Google Earth, www.earth.google.com, 09, 2009.
- [28] GRANDJEAN, G., GOURRY, J. C., BİTRİ, A., Evaluation of GPR techniques for civil-engineering applications: Study on a test site. *Journal of Applied Geophysics*, 45, 141-156, 2000.
- [29] GÜLKAN P, KOÇYİĞİT A, YÜCEMEN M.S, DOYURAN V, VE BAŞÖZ V., En Son Verilere göre Hazırlanan Türkiye Deprem Bölgeleri Haritası, Rapor no: METU/EERC 93-01, Ortadoğu Teknik Üniversitesi Deprem Mühendisliği Araştırma Merkezi, 156 s, 1993.
- [30] HAMMON, W. S., ZENG, X., CORBEANU, R. M., MCMECHAN, G. A., Estimation of the spatial distribution of fluid permeability from surface and tomographic GPR data and core, with a 2-D example from the Ferron Sandstone, Utah. *Geophysics*, 67, 1505-1515, 2002.
- [31] HUGENSCHMİDT, J., Railway track inspection using GPR. *Journal of Applied Geophysics*, 43, 147-155, 2000.
- [32] KETİN, İ, 1/2500000 ölçekli Türkiye tektonik haritası hakkında açıklama: *Maden Tetkik ve Arama Enstitüsü Dergisi*, 54, 1-56, 1960.
- [33] KOÇYİĞİT, A., “Çay (Afyon) Depreminin Kaynağı ve Ağır Hasarın Nedenleri: Akşehir Fay Zonu”, *Cumhuriyet Bilim Teknik*, Sayı. 779, s. 6, 2002.
- [34] KURTULMUŞ T.Ö., Sığ Jeofizik Aramacılıkta Yer Radarı Modellemesi, Yüksek Lisans, DEÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, SF. 5-49, 2007.
- [35] LECKEBUSCH, J., Ground-penetrating radar: A modern three-dimensional prospection method. *Archaeological Prospection*, 10, 213-240, 2003.
- [36] MCMECHAN, G.A., GAYNOR, G. C., SZERBİAK, R. B., Use of groundpenetrating radar for 3-D sedimentological characterization of clastic reservoirs. *Geophysics*, 62, 786-796, 1997.
- [37] Mc CLUSKY, S., ve diğ., Global Positioning System Constraints on Plate Kinematics and Dynamics in the Eastern Mediterranean and Caucasus, *J. Geophys. Res*, 105, 5695-5719, 2000.

- [38] MOORMAN, B.J., Ground-penetrating radar applications in paleolimnology. In W. M. Last and J. P. Smol, (Ed.). Tracking environmental change using lake sediments: Physical and chemical techniques (23-47). Boston: Kluwer Academic Publishers, 2001.
- [39] MTA İzmir 1/500000 Türkiye Jeoloji Haritaları, Ankara 2002.
- [40] OLHOEFT, G.R., Electrical properties of rocks. in Y. S. Touloukian, W. R. Judd, and R. F. Roy, (Ed.). Physical properties of rocks and minerals (257-330). NY: McGraw-Hill, 1981.
- [41] PARASNIS, D.S., Principles of applied geophysics (5th ed.). Chapman and Hall, 1997.
- [42] REFLEXW software, ver. 3.5.8, Copyright by Sandmeier, User's manual.
- [43] Sayısal Grafik www.sayisalgrafik.com.tr/deprem/turkiye.htm Türkiye ve Depremler, Sayısal Grafik Sanayi ve Ticaret Ltd. Şti., 09, 2009.
- [44] SHIH, S.F., DOOLITTLE, J.A., Using radar to investigate organic soil thickness in the Florida everglades. Soil Science Society of America Journal, 48, 651-656, 1984.
- [45] ŞAROĞLU, F., EMRE, Ö. ve KUŞÇU, İ., Türkiye Diri Fay Haritası, MTA, 1992.
- [46] TELFORD, W. M., GELDART, L. P., SHERIFF, R. E., & KEYS, D. A., Applied geophysics. NY: Cambridge University Press, 1976.
- [47] VAN DER KRUK, J., SLOB, E. C., FOKKEMA, J. T., Background of groundpenetrating radar measurements. Geologie en Mijnbouw, 77, 177-188, 1999.
- [48] VON HİPPEL, A. R., Dielectric materials and applications. NY: John Wiley and Sons, 1954.
- [49] YILMAZ, Y., "Ege Bölgesinin Aktif Tektoniği", Batı Anadolu'nun Depremselliği Sempozyumu, ISBN 975-585-148-8, s:3-14, İzmir, 2000.
- [50] ZHOU, H., SATO, M., Archaeological investigation in Sendai Castle using ground-penetrating radar. Archaeological Prospection, 8, 1-11, 2001.

ÖZGEÇMİŞ

Murat SANDALCI, 11.04.1984 de Kocaeli İzmit'te doğdu. İlk, orta öğrenimini Derince'de liseyi İzmit Mehmet Akif ERSOY Anadolu Lisesinde 2002 yılında tamamladı. Aynı yıl Sakarya Üniversitesi Jeofizik Mühendisliği bölümünü kazanıp öğrenime başladı. 2005 yılında Berlin Teknik Üniversitesi Yerbilimleri Fakültesinde Prof.Dr. Uğur YARAMANCI ve Dr. Martin MÜLLER danışmanlıklarında 2 ay süreyle bilimsel çalışmalara katıldı. 2006 yılında Sakarya Üniversitesi Jeofizik Mühendisliği Bölümünü bitirdi. 2006 yılında Balıkesir Burhaniye'de başlatılan "Adramytteion Medeniyetinin (Balıkesir Burhaniye Ören) Arkeojeofizik Yöntemlerle Araştırılıp Gün Yüzüne Çıkartılması" (Kültür Bakanlığı Destekli) projede mühendis olarak yer aldı. Aynı yıl Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Jeofizik Mühendisliği EABD'da yüksek lisansa başladı. Halen yüksek lisansa devam etmektedir.