

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**SULU-OLMAYAN FAZLI SIVILARLA (NAPL)
KİRLENMİŞ TOPRAKLARDA
JEOFİZİK ARAŞTIRMALAR**

DOKTORA TEZİ

Hafiz MOHAMMED NAZIFI

Enstitü Anabilim Dalı : JEOFİZİK MÜHENDİSLİĞİ

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Levent GÜLEN

Ocak 2022

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**SULU-OLMAYAN FAZLI SIVILARLA (NAPL)
KİRLENMİŞ TOPRAKLARDA
JEOFİZİK ARAŞTIRMALAR**

DOKTORA TEZİ

Hafiz MOHAMMED NAZIFI

Enstitü Anabilim Dalı : JEOFİZİK MÜHENDİSLİĞİ

Bu tez / /2022 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği ile kabul edilmiştir.

Jüri Başkanı

Üye

Üye

Üye

Üye

BEYAN

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.

Hafız MOHAMMED NAZIFI

TEŞEKKÜR

Hamd; Âlemlerin Rabbi olan Allah'a aittir. Bu doktora çalışmam ve hayatım boyunca sonsuz lütuf ve merhametinden dolayı Yüce Allah'a her şeyden önce şükrediyorum. Doktora eğitimimden dolayı verdiği burs için YTB'e içtenlikle teşekkür ederim. Doktora tez proje çalışmamı maddi olarak destekleyen TÜBİTAK (Proje No: 119Y193) ve Sakarya Üniversitesi BAPK'a (Proje No: 2019-7-25-37) teşekkür ederim. SARGEM'e projeleri yürütebilmemiz için laboratuvar ortamı sağladığı için teşekkür ederim. Ayrıca atık motor yağı numunesi üzerinde fiziksel ve kimyasal testleri ücretsiz olarak gerçekleştiren TÜPRAŞ'a teşekkür ederim. Bu tez çalışmasının yazımında kullanılan laptop hediyesinden dolayı Fatih OK'a içtenlikle teşekkür ederim. Doktora programım boyunca bana verdiği sonsuz manevi destek, rehberlik, akıl hocalığı, teşvik, maddi destek ve baba sevgisi için hocam ve danışmanım Prof. Dr. Levent GÜLEN'e en derin şükranlarımı sunarım. Tez İzleme Komitemin üyelerinin sayısız tavsiyeleri, yapıcı eleştirileri, önerileri ve katkıları için kendilerine teşekkür ederim. Doktora çalışmam boyunca gösterdiği dostluk, kardeşlik ve desteklerinden dolayı Arş. Gör. Ertuğrul GÜRBÜZ'e en derin şükranlarımı sunarım. Sevgili babama, rahmetli anneme, kardeşlerime, eşime, kızıma, oğluma ve çok yakın arkadaşlarıma en içten teşekkürlerimi sunarım. Çalışmam boyunca gösterdikleri sabır, destek, dua ve moral için eşime, kızıma ve oğluma teşekkür ederim. Doktora eğitimim boyunca bana verdiği desteklerinden ve yardımlarından dolayı Doç. Dr. Ertan PEKŞEN'e, Dr. Frank STEİNHOFf'a, Arş. Gör. Dr. Emrah BUDAKOĞLU'na, Yücel ERDAĞ'a, tüm FBE'deki personele, GANADER'e, İSRAR Vakfı'na, SAKVA Vakfı'na Yedirenk ÜÖD'ne, tüm hocalarıma, tüm Türkiye'deki tanıştığım ailelere ve arkadaşlarıma teşekkür ederim. Bu çalışma sonucunda ortaya çıkan tüm katkının bereketi kendimin, babamın, annemin, ailemin, hocalarıma ve eğitim hayatım boyunca bana destek olan tüm insanların üzerine olsun.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	v
ŞEKİLLER LİSTESİ	vii
TABLolar LİSTESİ	xiv
ÖZET	xv
SUMMARY	xvi

BÖLÜM 1.

GİRİŞ	1
1.1. Genel Giriş	1
1.2. Problem Tanımı	2
1.3. Amaç ve Hedefler	3
1.4. Çalışmanın Kapsamı	4
1.5. Tez Organizasyonu	4

BÖLÜM 2.

KAYNAK ARAŞTIRMASI	5
2.1. Bölüm Girişi	5
2.2. Literatür Taraması	6
2.3. Jeofizik Tepkiler	7
2.3.1. Yer radarı	8
2.3.2. ERT	10
2.4. Dökülme Şekli ve Mevsimsel Değişiklikler	13
2.5. Kirleticiler İle İlgili Bazı Araştırmaların Literatür Özetleri	14

2.6. Genelleştirilmiş LNAPL Yayılma Modeli	18
--	----

BÖLÜM 3.

MATERYAL VE YÖNTEM	23
3.1. Deneysel Kurulumlar	23
3.2. Atık Motor Yağı (AMY)	27
3.3. Yer Radarı	28
3.3.1. Yer radarının teorisi ve temel prensipleri	28
3.3.2. Jeolojik malzemelerin dielektrik özelliklerini etkileyen faktörler.....	34
3.3.3. Yer radar verileri ve veri işlemleri.....	37
3.4. ERT	39
3.4.1. ERT'in teorisi ve temel prensipleri	39
3.4.2. Jeolojik malzemelerin elektrik özelliklerini etkileyen faktörler	44
3.4.3. ERT verileri ve veri işlemleri.....	49

BÖLÜM 4.

ARAŞTIRMA BULGULARI	52
4.1. Tek Seferlik Dökülme ile AMY Kirletilmesinin Bulguları.....	52
4.1.1. Yer radar bulguları	52
4.1.2. ERT bulguları	59
4.1.3. Sıcaklık bulguları.....	69
4.2. Yarı-Sürekli Dökülme ile AMY Kirletilmesinin Bulguları	72
4.2.1. Kış mevsimi benzetim bulguları	72
4.2.1.1. Yer radar bulguları	72
4.2.1.2. ERT bulguları	77
4.2.2. Yağışlı mevsimi benzetim bulguları	85
4.2.2.1. Yer radar bulguları	85
4.2.2.2. ERT bulguları	90
4.2.3. Yaz mevsimi benzetim bulguları	99
4.2.3.1. Yer radar bulguları	99

4.2.3.2. ERT bulguları	105
4.2.4. Kontrol deneyi bulguları	114
4.2.4.1. Yer radar bulguları	114
4.2.4.2. ERT bulguları	120
4.2.5. Sıcaklık bulguları	129
BÖLÜM 5.	
TARTIŞMA VE SONUÇ	138
5.1. Tek Seferlik Dökülme ile AMY Kirletilmesi	138
5.2. Yarı-Sürekli Dökülme ile AMY Kirletilmesi	145
5.3. Sonuçlar	155
KAYNAKLAR	157
ÖZGEÇMİŞ	166

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

AMY	: Atık Motor Yağı
B_o	: Karmaşık genlik
C1-C2	: Akım elektrotlar
DNAPL	: Yoğun sulu olmayan faz sıvıları
DOI	: Araştırma derinliği yöntemi
ERT	: Elektrik Özdirenç Tomografisi
EM	: Elektromanyetik
E_o	: Karmaşık genlik
F	: Orantı sabiti
GPR	: Yer Radarı
I	: Akım
I	: Özdirenç indeksi
IP	: İndüklenen kutuplaşma
J	: Akım yoğunluğu
k	: Dalga sayısı
κ	: Dielektrik sabiti
LNAPL'ler	: Hafif Sulu-olmayan Fazlı Sıvıların
LNAPLs	: Light Non-AqAMYus Phase Liquids
MS	: Manyetik Suseptibilite
m	: Sementasyon faktörü
NAPL	: Sulu olmayan faz sıvıları
n	: Doygunluk üssü
PAH	: Polisiklik hoş kokulu hidrokarbonlar
P1-P2	Potansiyel elektrotlar
T	: Kum sıcaklığı
T_o	: Sabit 20°C

UEO	: Used Engine Oil
v	: EM dalgasının hızı
V	: Potansiyel
w	: Açısal frekans
ϵ	: Dielektrik geçirgenlik
α	: Zayıflama sabiti
β	: Faz
μ_0	: Boş alanın manyetik geçirgenlik
σ	: Elektriksel iletkenlik
$\epsilon'(\omega)$: Polarizasyon terimi
$\epsilon''(\omega)$: Polarizasyon gecikmesi
$\sigma(\omega)$: Ohm iletimi
$\sigma''(\omega)$: Faradaik difüzyon kaybı
$\epsilon_T(\omega)'$: Toplam karmaşık geçirgenlik
δL	: Uzunluk
δA	: Kare-kesit alanı
ρ	: Özdirenç
ρ_0	: Doymuş kayanın özdirenci
ρ_w	: Suyun ölçülen özdirenci
ρ_t	: Kısmen doymuş kayanın özdirenci
ρ_T	: Tamamen doymuş kayanın özdirenci
β	: Sıcaklık katsayısıdır

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Bir LNAPL kirlenmesini açıklayıcı kavramsal model.....	19
Şekil 2.2. LNAPL'nin basit şeması (a) ve LNAPL'nin uzunlamasına kesit görüntü şeması (b)	20
Şekil 2.3. Toprak neminin tipik dağılım şeması ve bir sızıntı alt yüzeyindeki hafif sulu olmayan faz sıvılarının (LNAPL) farklı halleri.....	21
Şekil 3.1. Deney tankının (A) şematik kesiti.....	24
Şekil 3.2. Deney A için tanktaki kum seviyesinin ayarlanması sırasında çekilen resim.....	24
Şekil 3.3. Deney tankı (B) modeli geometrisinin şematik gösterimi	25
Şekil 3.4. Deney tankı (B) ve tanka doldurulan malzemeleri gösteren resim ...	26
Şekil 3.5. Yer radarının prensipleri.....	29
Şekil 3.6. Deney A için yer radarı verisi alınmasında kullanılan deney düzeneği.....	38
Şekil 3.7. Deney B için yer radarı veri toplama için laboratuvar kurulumu...	38
Şekil 3.8. Homojen Bir Toprakta Akım Akışının Dağılımı.....	40
Şekil 3.9. Yeryüzünden geçen akımın şeması	41
Şekil 3.10. Özdirenç ölçümlerinde kullanılan elektrot konfigürasyonunun genelleştirilmiş modeli.....	42
Şekil 3.11. Kayaçların ve jeolojik malzemelerin Elektrik Özdirenci ve İletkenliği	45
Şekil 3.12. Küçük (mikro) özdirenç elektrot dizisinin görüntüsü	49
Şekil 3.13. Özdirenç verisi toplamak için kurulan laboratuvar düzeneği (deney A).....	50
Şekil 3.14. Profil hatlarını gösteren deney (A) tankının görüntüsü	50
Şekil 3.15. Rezistivite verisi toplamak için laboratuvar kurulumu (deney B)..	50
Şekil 4.1. Profil 1'deki AMY'nın zamana bağlı yayılım ve gelişimini gösteren 2B GPR sonuçları. Su akış yönü ok ile gösterilmiştir	53

Şekil 4.2. Profil 5'deki AMY'nın zamana bağlı yayılım ve gelişimini gösteren 2B GPR sonuçları. Su akış yönü ok ile gösterilmiştir	54
Şekil 4.3. Profil 8'deki AMY'nın zamana bağlı yayılım ve gelişimini gösteren 2B GPR sonuçları. Su akış yönü ok ile gösterilmiştir	55
Şekil 4.4. AMY'nın zamana bağlı yayılım ve gelişimini gösteren 3B GPR sonuçları. Su akış yönü ok ile gösterilmiştir	58
Şekil 4.5. Profil 1'de ölçülen elektrik özdirenç değerlerinin zamana bağlı gelişimini gösteren 2B ERT sonuçları. Su akış yönü ok ile gösterilmiştir	60
Şekil 4.6. Profil 1'de ölçülen elektrik özdirenç değerlerinin zamana bağlı yüzde değişimleri gösteren 2B ERT sonuçları. Dikey geçişler siyah okla gösterilir. Yatay geçişler mavi okla gösterilmiştir.....	61
Şekil 4.7. Profil 3'de ölçülen elektrik özdirenç değerlerinin zamana bağlı gelişimini gösteren 2B ERT sonuçları. Su akış yönü ok ile gösterilmiştir	64
Şekil 4.8. Profil 3'de ölçülen elektrik özdirenç değerlerinin zamana bağlı yüzde değişimleri gösteren 2B ERT sonuçları	65
Şekil 4.9. Profil 5'de ölçülen elektrik özdirenç değerlerinin zamana bağlı gelişimini gösteren 2B ERT sonuçları. Su akış yönü ok ile gösterilmiştir	66
Şekil 4.10. Profil 5'de ölçülen elektrik özdirenç değerlerinin zamana bağlı yüzde değişimleri gösteren 2B ERT sonuçları.....	67
Şekil 4.11. Tek seferlik dökülme ile AMY kirletilmesinin ölçülen elektrik özdirenç değerlerinin zamana bağlı özdirençli gösteren 3B ERT sonuçları.....	68
Şekil 4.12. Sıcaklık değerlerinin zamana bağlıdeğişimini gösteren grafik	70
Şekil 4.13. Hem X (0,2 m derinlik ve 0,5 m yatay mesafe (Şekil 6)) hem de Y'deki (0,2 m derinlik ve 1,5 m yatay mesafe (Şekil 6)) gerçek özdirenç değişimleri ile sadece sıcaklığın etkisini varsayarak aynı yerlerde özdirenç değerleri.....	71

Şekil 4.14. Kış mevsimi Profil 1 deki AMY'nın zamana bağlı yayılım ve gelişimini gösteren 2B GPR sonuçları. Su akış yönü ok ile gösterilmiştir	73
Şekil 4.15. Kış mevsimi Profil 5 deki AMY'nın zamana bağlı yayılım ve değişimini gösteren 2B GPR sonuçları. Anomaliler siyah döngülerde gösterilir. Dikey geçişler kırmızı okla gösterilir. Yatay geçişler mavi okla gösterilmiştir.....	74
Şekil 4.16. Kış mevsimi Profil 10'daki AMY'nın zamana bağlı yayılım ve değişimini gösteren 2B GPR sonuçları.....	75
Şekil 4.17. Kış mevsiminde elde edilen zamana bağlı 3B GPR radargramları	76
Şekil 4.18. Kış mevsiminde Profil 1'de ölçülen elektrik özdirenç değerlerinin zamana bağlı değişimini gösteren 2B ERT sonuçları. Su akış yönü ok ile gösterilmiştir	78
Şekil 4.19. Kış mevsiminde Profil 1 de ölçülen elektrik özdirenç değerlerinin zamana bağlı yüzde değişimlerini gösteren 2B ERT sonuçları	79
Şekil 4.20. Kış mevsiminde Profil 3 de ölçülen elektrik özdirenç değerlerinin zamana bağlı değişimini gösteren 2B ERT sonuçları	80
Şekil 4.21. Kış mevsiminde Profil 3 de ölçülen elektrik özdirenç değerlerinin zamana bağlı yüzde değişimlerini gösteren 2B ERT sonuçları. Anomaliler siyah döngülerde gösterilir. Dikey geçişler kırmızı okla gösterilir. Yatay geçişler mavi okla gösterilmiştir.....	81
Şekil 4.22. Kış mevsiminde Profil 6 da ölçülen elektrik özdirenç değerlerinin zamana bağlı değişimini gösteren 2B ERT sonuçları.....	82
Şekil 4.23. Kış mevsiminde Profil 6 da ölçülen elektrik özdirenç değerlerinin zamana bağlı yüzde değişimlerini gösteren 2B ERT sonuçları....	83
Şekil 4.24. Kış mevsimi kurulumunun zamana bağlı özdirenç değerlerinin değişimini gösteren 3B ERT sonuçları	84
Şekil 4.25. Yağış mevsimi Profil 1'deki AMY'nın zamana bağlı yayılım ve gelişimini gösteren 2B GPR sonuçları. Su akış yönü ok ile gösterilmiştir. Anomaliler siyah döngülerde gösterilir. Dikey geçişler kırmızı okla gösterilir. Yatay geçişler mavi okla gösterilmiştir.....	86

Şekil 4.26. Yağış mevsimi Profil 5 deki AMY'nın zamana bağlı yayılım ve gelişimini gösteren 2B GPR sonuçları	87
Şekil 4.27. Yağış mevsimi Profil 10 daki AMY'nın zamana bağlı yayılım ve gelişimini gösteren 2B GPR sonuçları	88
Şekil 4.28. Yağış mevsiminde elde edilen zamana bağlı 3B GPR radargramları.....	89
Şekil 4.29. Yağış mevsiminde Profil 1 'de ölçülen elektrik özdirenç değerlerinin zamana bağlı gelişimini gösteren 2B ERT sonuçları. Su akış yönü ok ile gösterilmiştir.....	91
Şekil 4.30. Yağış mevsiminde Profil 1 'de ölçülen elektrik özdirenç değerlerinin zamana bağlı yüzde değişimleri gösteren 2B ERT sonuçları. Dikey geçişler kırmızı okla gösterilir. Yatay geçişler mavi okla gösterilmiştir	92
Şekil 4.31. Yağışlı mevsiminde Profil 3 'de ölçülen elektrik özdirenç değerlerinin zamana bağlı gelişimini gösteren 2B ERT sonuçları...	93
Şekil 4.32. Yağışlı mevsiminde Profil 3 'de ölçülen elektrik özdirenç değerlerinin zamana bağlı yüzde değişimleri gösteren 2B ERT sonuçları.....	94
Şekil 4.33. Yağışlı mevsiminde Profil 6 da ölçülen elektrik özdirenç değerlerinin zamana bağlı gelişimini gösteren 2B ERT sonuçları...	95
Şekil 4.34. Yağış mevsiminde Profil 6 için Elektrik özdirenç değerlerinin zamana bağlı yüzde değişimlerini gösteren 2B ERT sonuçları.....	97
Şekil 4.35. Yağışlı mevsimi kurulumun zamana bağlı özdirenç değişimini gösteren 3B ERT sonuçları	98
Şekil 4.36. Yaz mevsiminde Profil 1 'deki AMY'nın zamana bağlı göç ve gelişimini gösteren 2B GPR sonuçları. Su akış yönü ok ile gösterilmiştir. Anomaliler siyah döngülerde gösterilir. Dikey geçişler kırmızı okla gösterilir. Yatay geçişler mavi okla gösterilmiştir.....	101
Şekil 4.37. Yaz mevsiminde Profil 5 'deki AMY'nın zamana bağlı yayılım ve gelişimini gösteren 2B GPR sonuçları	102

Şekil 4.38. Yaz mevsiminde Profil 10'daki AMY'nın zamana bağımlılık ve gelişimini gösteren 2B GPR sonuçları	103
Şekil 4.39. Yaz mevsiminde elde edilen zamana bağlı 3B GPR Radargramları	104
Şekil 4.40. Yaz mevsiminde Profil 1'de ölçülen elektrik özdirenç değerlerinin zamana bağlı gelişimini gösteren 2B ERT sonuçları.....	106
Şekil 4.41. Yaz mevsiminde Profil 1'de ölçülen elektrik özdirenç değerlerinin zamana bağımlılık değişimleri gösteren 2B ERT sonuçları. Dikey geçişler kırmızı okla gösterilir. Yatay geçişler mavi okla gösterilmiştir.....	107
Şekil 4.42. Yaz mevsiminde Profil 3'de ölçülen elektrik özdirenç değerlerinin zamana bağlı gelişimini gösteren 2B ERT sonuçları	108
Şekil 4.43. Yaz mevsiminde Profil 3'de ölçülen elektrik özdirenç değerlerinin zamana bağlı yüzde değişimleri gösteren 2B ERT sonuçları	109
Şekil 4.44. Yaz mevsiminde Profil 6'da ölçülen elektrik özdirenç değerlerinin zamana bağımlılık değişimini gösteren 2B ERT sonuçları	111
Şekil 4.45. Yaz mevsiminde Profil 3'de ölçülen elektrik özdirenç değerlerinin zamana bağımlılık değişimlerini gösteren 2B ERT sonuçları	112
Şekil 4.46. Yaz mevsimi kurulumunun zamana bağlı özdirenç değişimini gösteren 3B ERT sonuçları.....	113
Şekil 4.47. Kontrol deneyi Profil 1'deki AMY'nın zamana bağımlılık göç ve gelişimini gösteren 2B GPR sonuçları. Su akış yönü ok ile gösterilmiştir. Anomaliler siyah döngülerde gösterilir. Dikey geçişler kırmızı okla gösterilir. Yatay geçişler mavi okla gösterilmiştir.....	116
Şekil 4.48. Kontrol deneyi Profil 5'deki AMY'nın zamana bağımlılık göç ve gelişimini gösteren 2B GPR sonuçları	117
Şekil 4.49. Kontrol deneyi Profil 10'daki AMY'nın zamana bağımlılık göç ve gelişimini gösteren 2B GPR sonuçları	118
Şekil 4.50. Kontrol deneyinde elde edilen zamana bağlı 3B GPR radargramları	119

Şekil 4.51. Kontrol deneyi Profil 1'de ölçülen elektrik özdirenç değerlerinin zamana bağlı değişimini gösteren 2B ERT sonuçları	121
Şekil 4.52. Kontrol deneyi Profil 1'de ölçülen elektrik özdirenç değerlerinin zamana bağlı yüzde değişimlerini gösteren 2B ERT sonuçları. Dikey geçişler kırmızı okla gösterilir. Yatay geçişler mavi okla Gösterilmiştir.....	122
Şekil 4.53. Kontrol deneyi Profil 3'de ölçülen elektrik özdirenç değerlerinin zamana bağlı değişimini gösteren 2B ERT sonuçları.....	123
Şekil 4.54. Kontrol deneyi Profil 3'de ölçülen elektrik özdirenç değerlerinin zamana bağlı yüzde değişimlerini gösteren 2B ERT sonuçları	124
Şekil 4.55. Kontrol deneyi Profil 6'da ölçülen elektrik özdirenç değerlerinin zamana bağlı değişimini gösteren 2B ERT sonuçları	126
Şekil 4.56. Kontrol deneyi Profil 3'de ölçülen elektrik özdirenç değerlerinin zamana bağlı yüzde değişimlerini gösteren 2B ERT sonuçları	127
Şekil 4.57. Kontrol deneyi kurulumun zamana bağlı özdirenç değişimini gösteren 3B ERT sonuçları	128
Şekil 4.58. Kış mevsimindeki sıcaklık değerlerinin zamana bağlı değişimi.....	129
Şekil 4.59. Yağış mevsimi sıcaklık değerlerinin zamana bağlı değişimi.....	130
Şekil 4.60. Yaz mevsimindeki sıcaklık değerlerinin zamana bağlı değişimi ...	131
Şekil 4.61. Kontrol deneyindeki sıcaklık değerlerinin zamana bağlı değişimi...	132
Şekil 4.62. Kış benzetim için hem X (0,2 m derinlik ve 0,5 m yatay mesafe (Şekil 4.20)) hem de Y'deki (0,2 m derinlik ve 1,5 m yatay mesafe (Şekil 4.20)) gerçek özdirenç değişimleri ile sadece sıcaklığın etkisini varsayarak aynı yerlerde özdirenç.....	133
Şekil 4.63. Yağışlı benzetim için hem X (0,2 m derinlik ve 0,5 m yatay mesafe (Şekil 4.31)) hem de Y'deki (0,2 m derinlik ve 1,5 m yatay mesafe (Şekil 4.31)) gerçek özdirenç değişimleri ile sadece sıcaklığın etkisini varsayarak aynı yerlerde özdirenç.....	134
Şekil 4.64. Yaz benzetim için hem X (0,2 m derinlik ve 0,5 m yatay mesafe (Şekil 4.42)) hem de Y'deki (0,2 m derinlik ve 1,5 m yatay mesafe (Şekil 4.42)) gerçek özdirenç değişimleri ile sadece sıcaklığın etkisini varsayarak aynı yerlerde özdirenç.....	135

Şekil 4.65. Kontrol benzetim için hem X (0,2 m derinlik ve 0,5 m yatay mesafe (Şekil 4.53)) hem de Y'deki (0,2 m derinlik ve 1,5 m yatay mesafe (Şekil 4.53)) gerçek özdirenç değişimleri ile sadece sıcaklığın etkisini varsayarak aynı yerlerde özdirenç.....	136
Şekil 4.66. Tüm benzetimlerin yüzde farkı çizgi grafiği	137
Şekil 4.67. Tüm benzetimlerin yüzde farkı çubuk grafiği	137
Şekil 5.1. Zamana bağlı X noktasında piksel özdirenç değerinin grafiği	148
Şekil 5.2. Zamana bağlı X noktasında düzeltilmiş piksel özdirenç değerinin grafiği	149
Şekil 5.3. Zamana bağlı Y noktasında piksel özdirenç değerinin grafiği.....	150
Şekil 5.4. Zamana bağlı Y noktasında düzeltilmiş piksel özdirenç değerinin grafiği.....	150

TABLolar LİSTESİ

Tablo 3.1. Deneyde kullanılan atık motor yağının kimyasal ve fiziksel özellikleri.....	28
Tablo 3.2. Yaygın jeolojik malzemelerde gözlenen tipik bağıl geçirgenlik, elektriksel iletkenlik, hız ve zayıflama	35
Tablo 3.3. Wenner – Schlumberger Dipol – Dipol dizilerini özellikleri	43
Tablo 5.1. Tüm benzetimlerde elde edilen sıcaklık değerleri	146
Tablo 5.2. Çalışmasındaki bulguları ve yorumlama özet tablosu	155

ÖZET

Anahtar kelimeler: Atık Motor Yağı, Yer Radarı (GPR), Elektrik Özdirenç Tomografisi (ERT), LNAPL Kirlenme, Zamana Bağlı İzleme, Küçük Özdirenç dizisi.

Hafif Sulu-olmayan Fazlı Sıvıların (LNAPL) izlenmesi, karakterize edilmesi ve haritalanması için jeofizik yöntemler etkin bir şekilde kullanılmaktadır. Atık Motor Yağı (AMY), kentsel topluluklarda en yaygın LNAPL kirleticilerinden biri olmasına rağmen, AMY kirlenmesinin jeofizik yöntemlerle araştırılması ihmal edilmiştir. Bu tez çalışmasının temel amacı, bir tank akifer sistemi içinde AMY (viskoz LNAPL olarak) ile kirlenmiş kumlar üzerinde Yer Radarı (GPR) ve Elektrik Özdirenç Tomografisinin (ERT) zamana bağlı tepkilerini araştırmaktır. Tek kirlenme deneyi ve yarı-sürekli kirlenme deneyi olmak üzere iki deney grubu gerçekleştirilmiştir. Tek kirlenme deneyi 26 hafta sürmüştür. Yarı-sürekli kirlenme deneyi, üç mevsimsel benzetim ve kontrol deneyinden oluşmaktadır. Kış, yağışlı mevsim (ilkbahar, sonbahar) ve yaz dönemi için mevsimsel benzetimler yapılmıştır. Yarı-sürekli benzetim deneyindeki her deney, 5 er hafta olmak üzere toplam yirmi (20) hafta sürmüştür. GPR verilerinin toplanması için 2.0 GHz anten kullanılırken, ERT verileri özel olarak küçük bir özdirenç dizisi olarak tasarlanmış 24 elektrot kullanılarak toplanmıştır.

Her iki deneyden elde edilen zamana bağlı sonuçlar, kirlenmenin dikey ve yanal göçünü ortaya koymuştur. Tek kirlenme deneyinden elde edilen sonuçlar, GPR sinyalinin zamana bağlı aşamalı olarak zayıfladığını ve elektrik özdirençinin de zamana bağlı aşamalı olarak azaldığını göstermiştir. Bu jeofiziksel sinyallerin zamana bağlı azalması, AMY'nin zaman geçtikçe biyolojik bozunmaya uğramasıyla açıklanmıştır. Sonuçlar, uzun süre farklı LNAPL'ler üzerinde çalışan araştırmacıların ve yaşlı LNAPL kirlenmeleri üzerinde çalışan araştırmacıların bulgularına uymaktadır.

Yarı-sürekli kirlenme deneyinden elde edilen sonuçlar, zamanla GPR sinyallerinde aşamalı bir artış ve zamanla elektriksel özdirençte de aşamalı bir artış olduğunu göstermiştir. Yarı-sürekli kirlenme deneyinde gözlenen bu jeofizik davranış, AMY ve akifer sisteminin fiziksel özellikleri arasındaki zıtlıkla açıklanmıştır. Sonuçlar, kısa süreliğine taze veya yeni LNAPL kirlenmesi üzerine araştırma yapan araştırmacıların önceki çalışmalarıyla uyumludur.

Bu çalışmada gerçekleştirilen deneyler jeofizikçiler tarafından laboratuvar ortamında AMY'nin kum ortamını kirletmesinin araştırılması için yapılan ilk çalışmadır. GPR ve ERT yöntemlerinin hem küçük hem de büyük miktarda AMY'nin akifer içerisindeki zamana bağlı hareketini izlemek için çok iyi jeofizik yöntemler olduğu kanıtlanmıştır. Deneysel sonuçlar GPR ve ERT'nin AMY kirleticilerin zamana bağlı izlenmesindeki yeteneğini başarıyla göstermiştir.

GEOPHYSICAL INVESTIGATIONS OF SOILS CONTAMINATED WITH NON-AQUEOUS PHASE LIQUIDS (LNAPL)

SUMMARY

Keywords: Used Engine Oil, Ground Penetrating Radar (GPR), Electrical Resistivity Tomography (ERT), LNAPL Contamination, Time-Lapse Monitoring, Miniature Resistivity Array.

Geophysical methods are being used effectively for monitoring, characterising, and mapping Light Non-Aqueous Phase Liquids (LNAPL). Although Used Engine Oil (UEO) is one of the most common LNAPL contaminants within the urban communities, not much attention has been given for the geophysical study of UEO contamination. The main aim of this study was to investigate the time lapse responses of Ground Penetrating Radar (GPR) and Electrical Resistivity Tomography (ERT) of sands contaminated with UEO as viscous LNAPL within a tank aquifer system. Two sets of experiments namely, single contamination experiment and the semi-continuous contamination experiment were conducted. The single contamination experiment lasted for 26 weeks. The semi-continuous contamination experiment comprised of three seasonal simulation and control experiment. The seasonal simulation included winter, spring (rainy) and summer. Each experiment within the semi-continuous contamination experiment lasted for five weeks, making a total of twenty weeks. 2.0 GHz antenna was used for the GPR data collection, while the ERT data were collected using 24 electrodes arranged in a specially designed miniature resistivity array. The time lapse results from both experiments revealed vertical and lateral migration of the contaminant. The results from the single contamination experiment revealed a progressive decrease in GPR signal with time and a progressive decrease in electrical resistivity with time. These geophysical behaviours were explained by the biodegradation of the UEO in time. The results conformed to the findings of researchers who studied different LNAPL's for long time and those who studied aged LNAPL contaminations.

The results from the semi-continuous contamination experiment revealed a progressive increase in GPR signals with time and a progressive increase in electrical resistivity with time. The geophysical behaviours revealed by the semi-continuous contamination experiment were explained by the contrast between the UEO and the physical properties of the aquifer system. The results corroborate previous studies by researchers who researched fresh LNAPL contaminations for short periods. These experiments represent a first attempt by geophysicist to study UEO contamination in sand medium in a laboratory tank setting. Time-lapse GPR and ERT proved to be effective geophysical methods for studying UEO contamination. The experimental results successfully demonstrated the ability of time-lapse GPR and time-lapse ERT in delineating UEO contamination.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

1.1. Genel Giriş

Doğal ve antropojenik nedenler çevre kirliliğine neden olabilir. Bu kirleticiler çeşitli içeriklere sahip farklı sınıflara ayrılır: sentetik organik bileşikler, doğal olarak bulunan organik bileşikler, metaller, katyonlar, anyonlar, mikroorganizmalar ve radyonüklidler. Kirlenmiş bölgelerde karşılaşılan sentetik organik bileşiklerin çoğu suda az çözünür. Organik bileşikler, su ve/veya hava ile temas ettiğinde, ayrı, karışmaz faz olarak bulunurlar. Bunlara sulu olmayan faz sıvıları (NAPL) denir. Su ve NAPL'nin fiziksel ve kimyasal özelliklerindeki farklılıklar iki sıvının karışmasını engeller ve sıvılar arasında fiziksel bir ara yüz oluşmasına neden olur.

Sudan daha ağır organik sıvılar, yoğun sulu olmayan faz sıvıları (DNAPL) olarak adlandırılır. Bu sıvılar arasında klorlu çözücüler, Trichloroethene, Perchloroethene, Karbon Tetrachloride, Cresote esaslı ahşap işleme yağları, Chlorobenzene, Dichlorobenzene ve kömür katranı sayılabilir. Sudan daha yoğun olduklarından, DNAPL'lerin su tablası altında büyük derinliklere göç etme potansiyeli vardır.

Sudan daha hafif olan organik sıvılar hafif sulu olmayan faz sıvıları (LNAPL) olarak adlandırılır. LNAPL örnekleri benzin, jet yakıtı ve ısıtma yağlarını içerir. LNAPL'ler su tablasının üstünde ve biraz altında birikme eğilimindedir. LNAPL'ler genel olarak hafif doğası nedeniyle çok hızlı hareket etmezler ve su tablasının seviyesine bağlı olarak su tablasına ulaşana kadar uzun süre toprağın içinde kalırlar. En yaygın LNAPL petrol hidrokarbonları ve petrol hidrokarbonlarının ürünleridir. Motor yağları gibi petrol ürünleri, tipik olarak, suda çözünürlüğü farklı derecelerde olan kimyasallardan oluşan çok bileşenli organik karışımlardır. Bu doktora çalışmasının konusu Atık Motor Yağları (AMY) ile kirlenmiş toprağın jeofizik yöntemler kullanılarak incelenmesidir.

1.2. Problem Tanımı

Çevre insan kaynaklı faaliyetlerden büyük ölçüde zarar görebilir. Aşırı nüfus yoğunluğu, çevre kirliliği bakımından çevre problemlerinin nedenlerinden biridir.

Araçların motorlarının çalışması ve korunması için motor yağının kullanılması ve düzenli olarak değiştirilmesi gerekir. Düz zincirli (alifatik) hidrokarbon ve hoş kokulu veya polisiklik hoş kokulu hidrokarbonlar (PAH) hem yeni motor yağında hem de atık motor yağında bulunan maddelerdir. Buna ek olarak atık motor yağı az miktarda su, benzin, antifriz ve motorun içinde yanarken benzinden çıkan kimyasalları da içerir. Ayrıca motor parçaları aşınırken oluşan alüminyum, krom, bakır, demir, kurşun, manganez, nikel, silikon ve kalay gibi metalleri de içerir.

Motor yağı veya hidrokarbon genelde döküldüğü zaman, her ne kadar bir kısmı buharlaşsa da kolayca buharlaşmaz. Geriye kalan yağ uzun süre zeminde kalabilir, çünkü suda çözünmezler ve genellikle parçalanmazlar. Yağın yüzey suyu veya yeraltı suyuna giren hidrokarbon bileşenleri, çoğunlukla sudaki küçük parçacıklara bağlanır ve eninde sonunda çöker. Ancak atık motor yağındaki metal bileşenler suda çözünürler ve kolayca toprağın içinden geçerler ve yüzey suyu ve yeraltı sularında bulunabilirler. Atık motor yağı içerisindeki bu metaller, bitki, hayvan, toprak, tortu ve akmayan yüzey suyu içinde birikebilir (ATSDR, 1997).

Çevresel kirlilikten kaynaklanan sağlık riski ciddi boyuttadır. İnsanda ölüme yol açan bir araştırma raporu bulunmamasına rağmen, atık motor yağı içen sığırlarda ölümler rapor edilmiştir (Osweiler ve ark., 1973; ATSDR, 1997'de belirtilmiştir). Osweiler ve ark., (1973) ve Sas (1989); ATSDR (1997)'de belirtilen aynı çalışmada; yaklaşık bir yıldır atık motor yağı ile kirlenmiş otlakları tüketen sığırlarda bir takım nörolojik bozukluklar, körlük, kas seğirme, aşırı duyarlılık, depresyon ve konvülsiyonlar görülmüştür. Bunlar, atık motor yağı içerisindeki kurşun zehirlenmesine bağlıdır. Atık motor yağı ile kirlenmiş yer altı suyuna maruz kalmanın, insanlar ve hayvanlar için ciddi sağlık sorunlarına neden olabileceği düşünülmektedir.

Atık motor yağı ile kirlenmiş olan su, toprak ve yeraltı suları insanlar, hayvanlar ve bitkiler üzerinde büyük zararlara yol açmasına rağmen kirletilmiş alanların iyileştirilmesi amacıyla bu alanların jeofizik yöntemler kullanılarak saptanması, haritalanması ve izlenmesine yönelik bilimsel araştırmalar ihmal edilmiştir. Hemen hemen tüm çevre jeofizik çalışmaları, katı atık depolama sahaları veya petrol sızıntıları ile ilgilidir. Bu boşluğu doldurmak için, bu tez çalışmasının konusu olarak, laboratuvar ortamında atık motor yağı ile kirlenmiş akifer sisteminin jeofiziksel özelliklerinin Elektrik Özdirenç Tomografi (ERT) ve Yer Radarı (GPR) yöntemleriyle araştırılması seçilmiştir. Bu, tezden elde edilecek sonuçların, AMY ile kirlenmiş sahalarda gelecekte yapılacak araştırmalar için bir örnek çalışma olacağı, bir ışık tutacağı ümit edilmektedir.

1.3. Amaç ve Hedefler

Amaç:

Bu tez çalışmanın temel amacı, AMY ile kirlenmiş kumun (pleksiglas tankındaki kum) Yer Radarı (GPR) ve Elektriksel Özdirenç Tomografisi (ERT) tepkilerinin özelliklerinin araştırılmasıdır.

Hedefler:

1. Pleksiglas tanktaki kumun önceden belirlenmiş miktarda AMY ile tek dökülme ile kirletilmesi.
2. Pleksiglas tanktaki kumun önceden belirlenmiş miktarda AMY ile düzenli aralıklarla yarı-sürekli dökülme ile kirletilmesi.
3. Kirli kum tankının ERT verilerinin düzenli bir zaman aralığında toplanması.
4. Elde edilen ERT verilerinin işlenmesi, modellenmesi ve yorumlanması.
5. Kirlenmiş kum tankının GPR verilerinin düzenli bir zaman aralığında toplanması.
6. Elde edilen GPR verilerinin işlenmesi, modellenmesi ve yorumlanması.
7. ERT ve GPR'nin atık motor yağı ile kirlenmiş kum tankı içindeki alanları haritalama ve tespit etme kabiliyetinin belirlenmesi.
8. Mevsimsel değişikliklerin ERT ve GPR'nin kum tankındaki kirlenmiş alanı haritalama ve tespit etme kabiliyetine olan etkilerinin belirlenmesi.

9. ERT ve GPR yöntemlerinin kum tankındaki kirlenmiş bölgeyi karakterize etme, tespit etme ve haritalama yeteneklerinin karşılaştırılması.

1.4. Çalışmanın Kapsamı

Çalışma, laboratuvar ortamında yapılan tipik bir jeofizik araştırmadır. Çalışma üç aşamadan oluşmuştur; deney düzeneği tasarımı, hazırlanması ve AMY ile kirlenme, jeofizik verileri ve sıcaklık verilerinin toplanması ve son olarak da verilerin işlenmesi, modelleme ve yorumların yapılmasıdır.

Bu araştırmada iki jeofizik yöntem kullanılmıştır. 1. Yer Radarı (GPR), 2. Elektriksel Özdirenç Tomografisi (ERT). Bu jeofizik yöntemler kirlenmiş kum akifer sistemi içindeki atık motor yağının tespiti, haritalanması, izlenmesi ve karakterizasyonu amacıyla kullanılmıştır.

Bu araştırmada iki farklı kirlenme senaryosu kullanılmıştır. Bunlar: akifer sisteminin tek AMY dökülmesi ile kirlenmesi ve yarı-sürekli olarak kirlenmesidir.

1.5. Tez Organizasyonu

Bu tez beş bölüm halinde düzenlenmiştir. Birinci bölüm giriş bölümüdür. İkinci bölümde konuyla ilgili daha önce yapılmış çalışmalardan bahsedilmiştir. Üçüncü bölümde kullanılan materyaller ve yöntemler hakkında bilgiler verilmiştir. Dördüncü bölümde araştırma sonucunda elde edilen bulgular anlatılmıştır. Son olarak, beşinci bölüm tartışma ve sonuçları içermektedir.

BÖLÜM 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Bölüm Giriş

Birinci bölümde çevremizi kirleten kirleticilerin sınıflandırmaları ve türlerinden bahsedildi. Kirilenmiş toprakların veya arazinin temizlenmesi veya işlenmesinden önce, bu kirleticilerin yeraltında tespit edilmesine ihtiyaç vardır. Çevre Bilimi ve Mühendisliğinde çevresel kirleticileri tespit etmek ve karakterize etmek için kullanılan çeşitli yöntemler vardır.

Bu yöntemler genel olarak iki strateji altında sınıflandırılabilir. Doğrudan ve dolaylı yöntemler. Birincisi, kuyular veya çok seviyeli piezometreler kullanılarak sıvılardan ve topraktan ayrık noktalardan numune alma yöntemidir. Dolaylı yöntem, yüzey veya sondaj jeofizik teknikleridir. Nokta örnekleme tekniklerinin zorluğu şudur; sondaj maliyetleri, örnekleme süresi ve örnekleme analizi ve yorumlama süresi nedeniyle yeterli örnekleme pahalı olabilir. Ayrıca, nokta örnekleme teknikleri, kuyular tarafından örneklenmeyen akış yollarında taşınan kirleticileri veya geleneksel piezometre izleme ızgarası ile örneklenmeyen lenslerde depolanan kirleticileri gözden kaçırabilir.

Uzun yıllardan beri jeofizik teknikler, hidrokarbonla kirlenmiş sahaların karakterizasyonu için fırsatlar sunmaktadır. Jeofizikçiler, hidrojeolojik, maden ve petrol aramaları gibi yerleşik jeofizik uygulamalardan bu yeni araştırma alanına bilgi aktarırlar. Bu yeni alana Çevre Jeofiziği olarak adlandırılmıştır. Bu alandaki çok sayıda araştırmacı, toprakların ve yeraltı sularının petrol hidrokarbon kirliliğinden ziyade çöp depolama sahası araştırmalarıyla daha fazla ilgilenmektedir, ancak bu durum çevre jeofiziğinin bir uygulaması olan petrol hidrokarbon kirliliği çalışmalarındaki gelişmeleri engellememiştir.

Çevre Jeofiziği çalışmalarında en çok kullanılan jeofizik yöntemler; elektriksel yöntemler ve elektromanyetik (EM) yöntemlerdir. Hidrokarbon kirlenme çalışmalarında elektriksel yöntemler (elektriksel özdirenç yöntemi ve uyarılmış polarizasyon yöntemi) ve yer radarı yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yöntemler bu alanda büyük başarı elde etmiştir. Reynolds, 1997 açıkça belirtmiştir ki; özdirenç yöntemi, GPR ve diğerleri sızıntı suyu ve kirlilik alanlarının haritalanması için uygundur.

2.2. Literatür Taraması

Bu tez çalışmasında literatür taramasının yapılma nedenleri şunlardır:

1. Hali hazırda var olan araştırmaların tekrarını önlemek.
2. Kirlenme (petrol hidrokarbon) çalışmaları ile ilgili jeofizik araştırmalar hakkında eleştirel bir anlayış kazanmak.
3. Diğer araştırmacıların benzer problemlerin çözümünde kullandıkları yolları keşfetmek.
4. Mevcut yayınlanmış araştırmalar arasındaki benzerlikleri, kalıpları, eğilimleri ve farklılıkları anlamak.
5. Benzer araştırmalara uygulanan seçilmiş jeofizik yöntemlerin güçlü ve zayıf yönlerini belirlemek.

Yukarıdaki amaçlara ulaşmak ve mevcut kaynakların kullanımını en üst düzeye çıkarmak için, literatür araştırmasında dört literatür tarama sorusu hazırlandı ve kullanıldı.

1. AMY ile kirlenmiş toprak ve/veya yeraltı suları üzerinde mevcut jeofizik araştırma var mı? Evet ise, kullanılan jeofizik yöntemler nelerdir ve ilgili sonuçlar nelerdir?
2. Tek ve yarı sürekli hidrokarbon dökülmesi ile kirlenmiş topraklarda jeofizik (ERT ve GPR) tepkileri nelerdir?
3. ERT ve GPR'nin hidrokarbonla kirlenmiş toprağın tespiti ve haritalanmasındaki kapasiteleri nelerdir?

4. İki jeofizik yöntemden hangisi petrol hidrokarbonla kirlenmiş toprakları tespit etmede daha etkilidir?

Bu bölümün geri kalan kısmı bu soruların cevaplarına dayanmaktadır. Anlaşılır olması açısından bu bölümün geri kalan kısmı aşağıdaki alt başlıklar altında düzenlenmiştir; Jeofizik Tepkiler (ERT ve GPR), Dökülme şekli ve mevsimsel değişimler, Kirleticiler ile ilgili bazı araştırmaların literatür özetleri, Genelleştirilmiş LNAPL yayılma modeli.

2.3. Jeofizik Tepkiler

Araştırma, laboratuvar ortamında AMY ile kirlenmiş toprakların ve yeraltı suyunun tespiti, karakterizasyonu ve haritalanmasında jeofizik yöntemlerin kullanımına odaklandı. Jeofizik literatür araştırmasının sonuçları, şu anda yukarıda belirtilen konuyla ilgili yayınlanmış bir makalenin olmadığını ortaya koydu. Ancak, eski LNAPL (AMY) atık alanının çevresel karakterizasyonunda jeofizik yöntemlerin (ERT ve GPR) kullanımını bildiren Lago ve ark., 2009 tarafından yazılan bir makale vardır. Onların sonuçları, bir sonraki alt bölümde tartışılacak olan iletken hidrokarbon bozunma modelini desteklemektedir.

Petrol hidrokarbon sızıntısının doğrudan ve dolaylı tespiti, öz direnç, IP, EM induksiyon, GPR ve MS ve diğerleri gibi birkaç jeofizik yöntemle mümkündür. Bu saptama, petrol hidrokarbonunun tipine ve miktarına, toprak malzemesine (kil içeriği gibi), sulu faz dağılımına ve iyonik güce bağlıdır (Monier – Williams, 1995).

Genel olarak, elektriksel iletkenlik ve daha az ölçüde, GPR, kimyasal bileşiklerin neden olduğu toprak iletkenliklerindeki değişikliklere duyarlıdır. Jeofizik yöntemlerin kirlenmiş bölgelerdeki organik kirleticileri tespit etme, karakterize etme ve haritalama yeteneği kirleticilerin derinliğine bağlıdır. Konsantrasyon bir faktör olmasına rağmen kirleticilerin konsantrasyonları jeofizik yöntemlerin kapasitesi için önemli olmayabilir (USEPA, 2000; Arato ve ark., 2014; Ameen ve ark., 2014).

2.3.1. Yer radarı

Yer Radarı (GPR), elektromanyetik spektrumun radyo ve mikrodalga bölümünü kullanan bir yöntemdir. Bu yöntemde bir verici anten elektromanyetik dalgayı toprağa yayar. Dalga, yerin elektriksel özelliklerinde meydana gelen değişikliklere karşılık gelen özelliklerle iletilir, yansıtılır ve dağıtılır. Alıcı anten ile yansıtılan ve yer yüzeyine doğru geri kırılan dalga algılanır. Alıcı anten tarafından tespit edilen sinyal büyütülebilir, sayısallaştırılabilir ve daha fazla analiz için kaydedilebilir (USEPA, 1993, Daniels ve ark., 1988; Davis ve Annan 1989, Aktürk ve Doyuran, 2015'te belirtildiği gibi).

GPR kullanarak organik kirleticilerin tespiti bazı yaklaşımlara odaklanır (Grumman ve Daniels, 1995) ve bu yaklaşımlardan bazıları;

1. Kirletici alan (düşük ϵ) ile kılcal saçak ve/veya yeraltı suyu tablası (yüksek ϵ) arasındaki ara yüzde dielektrik geçirgenlik (ϵ) kontrastı (Olhoeft, 1986; Brewster ve ark., 1992; DeRyck ve ark., 1993; Redman ve ark., 1994; Barber ve Morey, 1994).
2. Su tablasının üzerindeki kirletici madde baskılanmış kapiler saçak bölgesinden geçen düşük geçirgenliğe bağlı olarak, alan üzerinde azaltılmış iki yönlü seyahat süreleri (yansıma 'çekme') (Brewster ve ark., 1992; DeRyck ve ark., 1993).
3. Doygun bölge (yüksek ϵ) içinde batan bir DNAPL alanının (düşük ϵ) dielektrik kontrastı (Brewster ve ark., 1992).
4. Dökülme kaynağında polar olmayan organik kirleticilerle birlikte bulunan çözülmüş tuzlar, metaller veya diğer iyonik bileşikler gibi polar-sulu kirleticilerin neden olduğu gelişmiş elektriksel iletkenlik ve dielektrik geçirgenlik kontrastı.
5. Kademeli dielektrik geçiş ve/veya yukarıdaki kirleticilerden ve su kılcal saçaklarına bulaşan saçılma değişiklikleri (Redman ve ark., 1994);
6. Olası kirletici buhar fazı etkilerinden vadoz bölgesi içinde artan kayıp ve/veya saçılma değişiklikleri (Daniels ve ark., 1992; Endres ve Redman, 1993; Daniels ve ark., 1995).

GPR'ın, LNAPL'nin haritalanmasında başarılı olduğu kanıtlanmış olup, organik kirleticileri ve özellikle LNAPL'arı tespit edilebilme yeteneği açısından elektriksel

yöntemlerden sonra ikinci sırada yer alır. Özdirenç yöntemi gibi, GPR ölçülen değerlerde kirlenme zamanı bazında farklı sonuçlar vermiştir.

LNAPL ile yeni kirlenmiş topraklar yüksek GPR sinyal genliği ve temiz GPR yansıması üretirken, eski kirlenmeler genellikle yüksek iletkenli 'gölge' veya iletken bölgelerin altında GPR yansıma zayıflaması ile karakterize edilir. Yansıma zonunun veya "gölge zonunun" veya genlik zayıflama zonunun azalmasının bir başka nedeni de LNAPL'lerdeki uçucu bileşenlerin buhar basıncındaki artıştır (Olhoeft, 1992; Douglas vd., 1992; Daniels ve ark., 1995; Grumman ve Daniels, 1995; Maxwell ve Schmock 1995; Bermejo ve ark., 1997; Kim ve ark., 2000; Atekwana ve ark., 2002; Werkema ve ark., 2003).

GPR araştırmalarının performansı, anten konfigürasyonlarından etkilenir. Tipik bir örnek, gömülü çukurların ve tonozların bir cross-pole konfigürasyonu ile daha açık bir şekilde tanımlandığı ancak co-pole konfigürasyonu ile daha az görünür olduğu ABD'deki Baker Woods sahasında gözlenmiştir (USEPA, 2000). Ayrıca GPR etütleri bazı hidrojeolojik çevresel koşullardan da etkilenir. Bu, kil içermeyen toprak ve kumun nem durumuna bağlıdır. Kumun nem koşullarına ilişkin iki farklı bulgu ortaya çıkmıştır. Grumman ve Daneils, 1995, GPR'ın potansiyellerini haritalayan kirleticilerin, düşük yağışlı mevsimleri içeren kurak koşullarla iyileştirilebileceğini iddia ederken, Bertolla ve ark., 2014, kuru kum sedimanlarında LNAPL'yi tespit etmenin mümkün olmadığını ve bunun su olduğunu iddia etmiştir. Suyu doymuş kum GPR kullanarak LNAPL'yi tespit etmek için iyi bir ortamdır.

GPR kullanarak LNAPL'lerin tespit edilmesi ve izlenmesi için uygun olduğu bildirilen saha koşulları arasında; kalın kirlenmiş havuzları, kil içermeyen, taneli zeminler, daha fazla taneli malzemelerde kılcal saçak kalınlıklarının azaltılması, sık derinlikler ve homojen ortam yer almaktadır (Redman ve ark.,1994; Grumman ve Daniels, 1995).

2.3.2. ERT

ERT, bir çift elektrot (akım elektrotları) kullanarak yeraltına elektrik akımı enjekte etmeye ve başka bir elektrot çifti (potansiyel elektrotlar) arasındaki potansiyeli ölçmeye dayanır.

Literatür araştırmasından, elektriksel özdirenç (iletkenlik) yönteminin NAPL'lerin varlığını doğrudan tespit edebildiği bulunmuştur. Toprakta ve yeraltı suyunda organik ve inorganik bileşiklerin varlığı, ortamın elektriksel özelliklerini arka plan seviyelerinden değiştirir. Elektrik özdirenç yöntemi, organik bileşiklerin (özellikle NAPL'ler) varlığını tespit edebilir. Çünkü NAPL'ler içinde buldukları toprakların ve yeraltı suyunun elektriksel özelliklerini değiştirir ve ERT yöntemi bu değişikliklere duyarlıdır (USEPA, 2000; Atekwana ve Atekwana, 2010).

LNAPL'lere uygulanan elektrik özdirenç yöntemi, iki zıt sonuç üretir; yüksek elektrik özdirenci (düşük iletkenlik) ve düşük elektrik özdirenci (yüksek iletkenlik). Yeni kirlenmiş alanlar veya topraklar üzerinde yapılan araştırmalar, yüksek özdirençlilik (yalıtıcı katman modeli) sonuçlarını ortaya çıkarmıştır (Mazac ve ark., 1990; Schneider ve Greenhouse, 1992, DeRyck ve ark., 1993; Kaufmann ve Deceuster, 2007; Olhoeft, 1992). Eski veya yaşlı kirlenmiş alanlar veya topraklar üzerinde yapılan araştırmalar, düşük özdirençlilik (iletken hidrokarbon bozunma modeli) sonuçları vermiştir (Sauck ve ark., 1998; Atekwana ve ark., 2000; Atekwana ve ark., 2002; Werkema ve ark., 2003; Caterina ve ark., 2017).

Yeni kirlenmeyle ilişkili olarak yüksek elektriksel özdirenç tepkisi, bir yalıtkan katman modeli terimidir. Bu modelleri destekleyen araştırmacılar, LNAPL'nin yeraltının doymuş bölgesinin üzerinde yalıtkan bir tabaka görevi gördüğünü belirtmişlerdir. Yaşlı LNAPL kirlenmeleri üzerinde çalışan araştırmacılar, mikrobiyal bozulmanın etkilerine karşı düşük özdirençliliği ve etkilenen bölgelerin ardından biyojeokimyasal modifikasyonlarla ilişkilendirmişlerdir (Bermejo ve ark., 1997; Sauck ve ark., 1998; Atekwana ve ark., 2000).

LNAPL ile kirlenmiş alanların, kirlenmenin yaşına bağlı olarak özdirençli veya iletken sonuçlar üretebileceği artık tespit edilmiştir. Birçok araştırmacı, yaşlı LNAPL kirlenmelerinin düşük özdirençliliğini yukarıda belirtildiği gibi mikroorganizmaların aktiviteleriyle ilişkilendirmektedirler.

LNAPL'lerin özdirencindeki azalma, sulu fazın artan bağlanabilirliği (ara yüzey fenomeni) ve emülsiyon oluşumu (sulu temas yüzey alanını artıran) ile ilişkilidir. Ayrıca özdirençteki azalma, LNAPL-sulu ara yüzeydeki yüzey iletkenliği artışı ile ilgilidir (Monier-Williams, 1995). LNAPL'lerin yüksek özdirenç, dökülme bölgesi içinde dinamik yer değiştirme yoluyla su içeriğinin azalması, bağımsız ürün havuzu, drenaja izin veren sulu yüzeyde azaltılmış ara yüzey gerilimi ve katı ıslatma fazı olarak sulu fazın LNAPL ile yer değiştirmesi olaylarıyla ilgilidir. Bu, özdirenç sonuçlarını yorumlamak için fiziksel bir yaklaşımdır. Bu özdirenç değişikliklerine yol açan mekanizmaları tam olarak anlamak için bu alanda daha fazla araştırma yapılması gerekmektedir.

Şu ana kadar net olmayan bir nokta, LNAPL'nin dökülme tarihinden itibaren ne kadar süre sonra yaşlı olarak kabul edildiğidir? Bazı yayınlanmış makaleler, 17, 25 ve 50 yıllık kirlenmiş alanları yaşlı olarak nitelendirmiştir. 50 yıllık kirlenmeye ilişkin yayınlanan makalelerin çoğu, düşük özdirençli sonuçlar elde etmiştir. Yaşlı LNAPL kirlenmiş alanların, LNAPL'de fiziksel, kimyasal ve biyolojik değişikliklerin meydana geldiği, birkaç yıllık süreler boyunca kirlenmiş alanlar olduğu anlaşılmaktadır. Soru, LNAPL ile kirlenmiş sahaların ne kadar süre sonra (aylar veya yıllar) taze kirlenmeden eski kirlenmeye dönüştüğüdür. Literatürdeki bu boşluğa dikkat edilmesi gerekmektedir.

Tüm "yaşlı LNAPL türleri", biyolojik bozunma ile ilişkili anormal jeofizik ayırt edici özellikler sergilemezler. Tezkan ve ark., 2005, Romanya'da Bükreş'in 60 km kuzeyindeki bir rafineride hidrokarbonla kirlenmiş "yaşlı" bir alanı araştırmıştır. Bu bölgedeki hidrokarbon kirliliği yaklaşık 25 yıl önce meydana gelmişti. Bu nedenle, bu bölgede biyolojik bozunma meydana gelirse, iletken ayırt edici özelliklerinin gözlemleneceği beklenir. Sonuçlar bunun aksine, iletken bir yüzey tabakasının altında

özdirençli bir tabaka olduğunu ortaya koymuştur. Mevcut sondajlar, özdirençli yapının hidrokarbon kirliliği ile ilişkili olduğunu göstermektedir. Ayrıca, arka plan özdirenci ile karşılaştırma, kirlenmiş alanın özdirencinin, özellikle daha yüksek frekanslarda, arka plan özdirencinden daha yüksek olduğunu göstermektedir (Atekwana ve Atekwana, 2010). Petterssen ve Nobes, 2003 tarafından yapılan bir araştırma da Scott Base, Antarktika'daki hidrokarbon kirliliğinden kaynaklanan elektromanyetik indüksiyon araştırmalarından özdirenci ayırt edici bir özellik söylemişlerdir. Aynı sahada yapılan bir GPR araştırması, kirlenmiş bölgenin haritasını çıkarmada başarılı olamamıştır. Kirlenme yaşı bilinmemekle birlikte, tabanı 1957'de inşa edilmiş ve 1962'de tam olarak kirlenmiştir (Petterssen ve Nobes, 2003). Jeofizik araştırmalar yapılmadan önce sahadaki kirlenmenin yaklaşık yaşı 46 yıldır. Bununla birlikte, kirlenmiş zonun özdirenç ayırt edici özellikleri hala belirgindir. Aşırı soğuk hava koşullarının bakterilerin aktivitesini engelleyebileceği bilinmektedir. Biyobozunma, yalnızca hidrokarbonları parçalayabilen mikrobiyal popülasyonlar uygun nem ve besin koşullarına sahip olduğunda meydana gelir (Haack ve Bekins, 2000). Sahadaki mikrobiyal koşullar hakkında bilgi sahibi olmadan, LNAPL değişiminin kapsamını ve bunun jeofizik ayırt edici özellikler üzerindeki etkisini değerlendirmek zordur.

LNAPL ile kirlenmiş bölgelerin davranışı, LNAPL'nin sabit bir hedef olmadığını göstermiştir. ERT'nin kirleticileri tanımlama yeteneği, kirleticiler türleri, konsantrasyon, sıcaklık koşulları gibi faktörlere bağlıdır (Samouëlian ve ark., 2005; Liu ve ark., 2008; Kardoš ve Pietriková, 2016; Butler, 2005). Elektrik özdirenci değerlerini etkileyen toprak parametreleri, katı bileşenlerin doğası (parçacık boyutu dağılımı, toprağın mineralojisi), toprak boşluklarının düzeni (gözeneklilik, gözenek boyutu dağılımı, bağlanabilirlik) ve toprağın su doygunluk derecesini (su içeriği) içerir. Aynı zamanda toprak sıvısının (çözünen konsantrasyonu) ve sıcaklığın elektrik direncindeki etkilerini de içerir (Samouëlian ve ark., 2005). En önemli elektrik özdirenç değişimleri, nem içeriği, kimyasal bileşim, mineralizasyon, gözeneklilik, geçirgenlik, gözenek sıvılarının iyonik içeriği, iletkenlik, sıcaklık, dikey kalınlık ve derinlik gibi toprak parametrelerinden meydana gelir (Kižlo ve Kanbergs, 2009).

Küçük öz direnç dizisinin (Depountis ve ark., 2001; Sentenac ve ark., 2015; Masy ve ark., 2016) laboratuvar deneylerinde ERT veri toplamada başarılı olduğu kanıtlanmıştır. Veri toplama için kullanılan dizi tasarımı, öz direnç sonuçlarında da rol oynar. Genel olarak, Wenner-Schlumberger ve dipol-dipol elektrik öz direnci dizisi, LNAPL kirleticilerinin tespitinde iyi sonuçlar verirler (Halihan ve ark., 2005).

2.4. Dökülme Şekli ve Mevsimsel Değişiklikler

Yapılan literatür araştırması, LNAPL ile kirlenmiş sahalarda veya laboratuvar ortamlarında araştırma yapan jeofizikçiler için LNAPL dökülme şeklinin önemli bir konu olmadığını ortaya koymuştur. İncelenen tüm yayınlara göre, bu alanda jeofizik araştırmacılar tarafından iki tür LNAPL araştırması yapılmıştır. Bunlar, (1) hidrokarbon boru hattının veya depolama tanklarının kazara bozulması sonucu oluşan tek dökülme ve (2) tek seferlik kontrol döküntüsünün gerçekleştiği kısa süreli laboratuvar deneyleridir. Daha sonraki durumda, bir kurulumda LNAPL'nin enjekte edildiği maksimum süre, DeRyck ve ark., 1993 tarafından bildirildiği gibi 33 gündür.

Mevsimsel değişikliklerin jeofizik yöntemlerin tepkileri üzerindeki etkileri ile ilgili çok fazla çalışma yapılmamıştır. Grumman ve Daneils 1995 tarafından yayınlanan bir makale, yağışın jeofizik (GPR) tepkisi üzerindeki etkisine dikkat çekmiştir. O zamandan beri, Caterina ve ark., 2017 çalışmasına kadar, mevsimsel değişikliklerin jeofizik yöntem üzerindeki etkilerini ciddi şekilde incelemek için çok fazla araştırma yapılmamıştır. Caterina ve ark., 2017, hidrokarbonla kirlenmiş çökellerin elektriksel özelliklerindeki periyodik bir değişimin jeokimyasal değişikliklerle ilgili olduğunu açıklamıştır. Yeraltı, esas olarak, toprak sıcaklığındaki mevsimsel değişiklikler ve yeraltı suyu tablasının derinliği tarafından kontrol edilen mikrobiyal aktivite tarafından indüklenir. Mevsimsel değişiklikler yeraltı suyu seviyesini etkiler ve bu da jeofizik sonuçları etkiler (Yang ve ark., 2007, Arato ve ark., 2014; Caterina ve ark., 2017).

Caterina ve ark., 2017'nin çalışmasından şu sonuç çıkarılabilir; yeraltı suyu seviyesinin yüksek (yüzeğe doğru) ve hava sıcaklığının düşük olduğu kış aylarında, hem 1,75 m hem de 3,75 m derinliklerde öz direnç değişim yüzdesi pozitiftir. Ancak, yeraltı suyu

seviyesinin düşük (yüzeyden uzakta) ve hava sıcaklığının yüksek olduğu yaz aylarında, hem 1,75 m hem de 3,75 m derinliklerde öz direnç değişim yüzdesi negatiftir. Yani mevsimsel değişiklikler, LNAPL'lerle kirlenmiş sahalardaki jeofizik tepkileri etkiler.

2.5. Kirleticiler İle İlgili Bazı Araştırmaların Literatür Özetleri

Türkiye'deki araştırmacıların incelendiğinde jeofizik, çevre ve jeoloji mühendislikleri alanlarında toprak ve yeraltı suyu kirliliği problemlerinde jeofizik yöntemler kullanan araştırmacılar petrol hidrokarbon kirliliği sorunları üzerinde herhangi bir araştırma yapmadıkları ortaya çıkmıştır. Bakıs ve Tuncan, 2011; Çınar ve ark., 2016; Kaya ve ark., 2007; Kayabalı ve ark., 1998; Şimşek ve ark., 2008; Karlık ve Kaya, 2001, gibi araştırmacılar tarafından yayınlanan makaleler, katı atık sahası (Depolama Alanı) ile ilgili çevre jeofiziği alanındaki araştırmaları içermektedir.

Organik kirleticilerin jeofizik yöntemlerle araştırılmasına ilişkin Türkiye yerel literatür eksikliği, organik kirlilik sorunlarının Türkiye'de olmadığı anlamına gelmemektedir. Baba ve Tayfur, 2011 tarafından, petrokimyasal faaliyetlerin çok yoğun olduğu Mersin çevresindeki bazı bölgelerde petrol hidrokarbon kirliliği hakkında yayınlanmış bir makale mevcuttur. Ayrıca petrol hidrokarbonuyla kirlenmiş alanlarda yaşanan problemlerden askeri üsler, petrokimya rafinerileri, petrol istasyonları, oto sanayi alanları vb. yerlerde hidrokarbon kirliliği olduğu bilinmektedir. Bu tez çalışmasından elde edilen başarılı sonuçlar ışığında yukarıda bahsedilen kirlenmiş alanlarda jeofizik yöntemler kullanılarak kirliliği tespit etmek mümkün olacaktır. Organik kirleticiler ile ilişkili sağlık riski endişe vericidir. Bu ve diğer nedenler, bazı jeofizikçilere gelecekteki organik kirlenme olan yerlerin iyileştirilmesi veya temizlenmesi için organik atıklarla kirlenmiş alanları tespit etme ve haritalama imkânı verecektir.

Kirliliği jeofizik teknikler ile bulmak için jeofiziksel ölçümlerle saptanabilen bir fiziksel veya kimyasal özellik farkının olması gerekir (Olhoeft, 1992). Jeofizik yöntemlerle yer yüzeyinden saptanabilen elektrik geçirgenlik ve iletkenlik

parametreleri hidrokarbonlar için en önde gelen fiziksel özelliklerdir. Hidrokarbonların göreceli geçirgenliği, yaklaşık 80 olan suya kıyasla 2'den 30'a kadar değişir ve iletkenlik aralıkları sıfır noktasından başlayıp 100 ve 1000 MHz frekansları arasında en az 0.02 S/m arasında başlamaktadır (Daniel ve ark., 1995).

Mwanda ve ark., 2002'ye göre, jeofizik literatürünün incelenmesi, hidrokarbon ile ilişkili eşsiz bir jeofiziksel tepki bulunmadığını ortaya koymaktadır. Bazı araştırmacılar anormal yüksek görünür özdirenç yanıtı ile GPR sinyal genliği ile karakterize edilen bir yalıtım (izolasyon) tabakası modelini tercih etmişlerdir (Kaufmann ve Deceuster, 2007; Olhoeft, 1992). Eski hidrokarbon kirliliğine sahip çok sayıda alanda çalışan diğerleri önceki izolasyon tabakası modeliyle doğrudan çelişkili olarak, etkilenen bölgenin mikrobiyal bozunumunun ve ardından biyojeokimyasal değişikliklerin etkisinden dolayı daha iletken bir yanıt verdiğini ileri sürmüşlerdir (düşük görünür özdirenç, zayıflatılmış GPR yansımaları gibi, örneğin: Atekwana ve ark., 2000; Sauck ve ark., 1998; Werkema ve ark., 2003). Yüksek özdirenç yanıtı yeni kirlenmiş topraklar üzerinde çalışan araştırmacılar tarafından rapor edilmiş, buna karşın düşük özdirenç, yaşlanmış kirli topraklar üzerinde çalışan kişiler tarafından saptanmıştır (Martinho ve ark., 2006; Deceuster ve Kaufmann 2012).

Toprakta hidrokarbon kirliliğinin haritalanması için test edilen jeofizik yöntemler arasında, ERT ve GPR büyük bir potansiyele sahiptir. ERT yöntemi çevre jeofiziği uygulamalarında yeraltı suyu ve toprak kirliticilerini araştırmak için katı atık depolama sahalarında kullanılmaktadır. Bunun nedeni, iletkenleri saptamak için en iyi sonucu vermesidir. İlgili kirliticilerin NAPL'ler gibi yalıtkan elektrik özelliği olduğu bir durumda ERT'yi kullanarak kirlitici tespiti daha zor bir problem haline gelir (Halihan ve ark., 2005). Hidrokarbon kirlenme çalışmalarına elektrik özdirenç yöntemi uygulaması konusundaki bu belirgin zorluk bir yana, birçok araştırmacı bu yöntemi diğer jeofizik tekniklerle birlikte uygulamış ve bu sayede ERT yöntemi hidrokarbon kirlitici araştırmalarında başarılı sonuçlar vermiştir.

Mwanda ve ark., 2002'ye göre görünür özdirenç hidrokarbon içermeyen yer ortamında en düşük (en yüksek iletkenlik), çözünmüş faz ortamı için kademeli olarak daha

yüksektir. Sentenac ve ark., 2015 tarafından yürütülen bir laboratuvar çalışmasında, kum ve kilden yapılmış bir toprak modeline iki kirlilik katmanı (dizel) püskürtülmüştür. Küçük gövde göçü modelinin, topraktaki özdirenç değişimlerinde geçerli olduğu kanıtlanmış, küçük bir özdirenç elektrot dizisi kullanılarak görüntülenmiş ve izlenmiştir. Yazarlara göre, bu sonuç doymamış bölgedeki dizel içeren kirlenmenin yanal olarak yayılmasını göstermektedir.

ERT'den elde edilen ölçüm değerleri, kirleticiler, konsantrasyon, sıcaklık koşulları gibi ve toprağın (gözeneklilik, su içeriği, tuzluluk ve parçacık şekli gibi) sahip olduğu özelliklere bağlıdır (Liu ve ark., 2008; Sentence ve ark., 2015).

Sauck, 2000, hafif sulu olmayan faz sıvılarının (LNAPL) özdirenç yapısı için model hakkında ayrıntılı bilgi vermiştir. Bu modelde, araştırmacı, LNAPL ile kirlenmiş alanın altındaki zemini altı bölgeye bölmüş ve her bölge belirli bir davranış sergilemiştir. Bu makaleye göre, hidrokarbonun ilk serbest ürün birikimi yalıtkan bir tabaka gibi davranabilir; ancak biyolojik bozunum oluştuğunda, karışık zon ve alttaki akifer biyolojik bozunum tamamlanıncaya kadar devam edecek olan anormal düşük özdirenç göstermektedir. Yine aynı makalede, yazar şunları belirtmiştir: LNAPL kirleticileri sabit bir özelliğe sahip olmayıp, özellikleri zaman ve mekân içinde değişebilir. Çok çeşitli başlangıç koşullarına sahip oldukları için, elde edilen jeofiziksel tepkiler, kirlenme zamanı, kirlenme tipi, iklim, son kirlenme olayından itibaren geçen süre, vadoz zon kalınlığı, litoloji ve su tablası dalgalanmasının genliğinin bir fonksiyonudur.

Halihan ve ark., 2005'e göre, sondaj analiz sonuçları ile ERT sonuçlarının karşılaştırılması, ERT'nin sığ yeraltı yüzeylerindeki hidrokarbonu tespit etmek için iyi bir teknik olduğunu ortaya koymuştur. Ancak ERT yöntemi kirlenmeden sonra zaman geçtiğinde hidrokarbonun formasyonun iletkenliğini düşürmesinden dolayı başarılı olmayabilir.

Yeraltı sularının tespiti ve haritalanmasında kullanılan en başarılı jeofizik yöntemlerden biri yer radarı (GPR)'dir. Son yıllarda, hidrokarbon kirlenme

araştırmalarında yer radarı kullanımı, yöntemin etkinliği nedeniyle oldukça yaygınlaşmıştır. Olhoeft, 1992'ye göre çoğu hidrokarbon (toluen ve benzen gibi) göreceli olarak daha düşük dielektrik geçirgenlik ve daha yüksek buhar basıncı ile ayırt edilir. Yeraltı su tablasında yüzen düşük dielektrik geçirgenli sıvılar doğrudan doğruya kalın bir tabaka (hidrokarbon = 2, silis = 4,5, su = 80) ve dielektrik karşıtlıktan yansıyan ve su tablası yansımasından (genel olarak daha yüksek yansıtma özelliğine sahip) ayırt edilerek yer radarı ile tespit edilebilir. Bu son etki en ince taneli topraklarda (kaba taneli topraklar keskin kılcal damarlı saçılmalara sahip) daha belirgindir ve su tablasında çok ince benzin katmanları bile saptanabilir. Yakın yüzeydeki bir miktar hidrokarbon sıvısından gelen yansımalar, hidrokarbon ve ortam malzemesi arasındaki titreşim kontrastının bir fonksiyonudur (Daniel ve ark., 1995). LNAPL kirlenme sahalalarında "parlak nokta" yansımaları ve sinyal zayıflaması ile birlikte alan üzerinde önemli derecede değişen bir yer radar tepkisinin elde edilmesi oldukça olağandır (Cassidy, 2007).

Çoğu LNAPL birçok benzerliğe sahip olsa da, aynı jeofizik tekniğin farklı sahalarda ve hatta aynı sahadaki farklı lokasyonlarda uygulanması önemli ölçüde farklı sonuçlar üretebilir (Atekwana ve ark., 2000). Bunun nedeni, kirlenmenin mekansal ve zamansal özelliklerinin jeofizik özellikler üzerinde önemli bir etkiye sahip olmasıdır. Bu gerçekle ilgili olarak, jeofizikçiler olarak tüm petrol hidrokarbonlarını incelememiz ve kendimizi jet yakıtı, benzin ve dizel ile sınırlamamız önemlidir. Araştırmamız gereken hidrokarbon kirlenici türü için bir sınır değildir. Amaç sorunları çözmek olmalıdır.

Bu araştırma alanı (Hidrokarbon kirlilik çalışmaları) hala gelişmektedir ve hidrokarbon kirlilik çalışmaları için jeofizik yöntemlerin kullanılmasında yeni keşifler her zaman mümkündür. Tüm literatür, organik kirlenici bölgelerinin sabit hedefler olmadığı, karmaşık süreçlerle değişmeye devam ettikleri her zaman hatırlatılmaktadır. Bu da jeofizik tekniklerle kirlenicilerin yerini tespit etmek için jeofizik ölçümlerle tespit edilebilen bir fiziksel veya kimyasal özellik kontrastının bulunmasını gerektirir (Olhoeft, 1992).

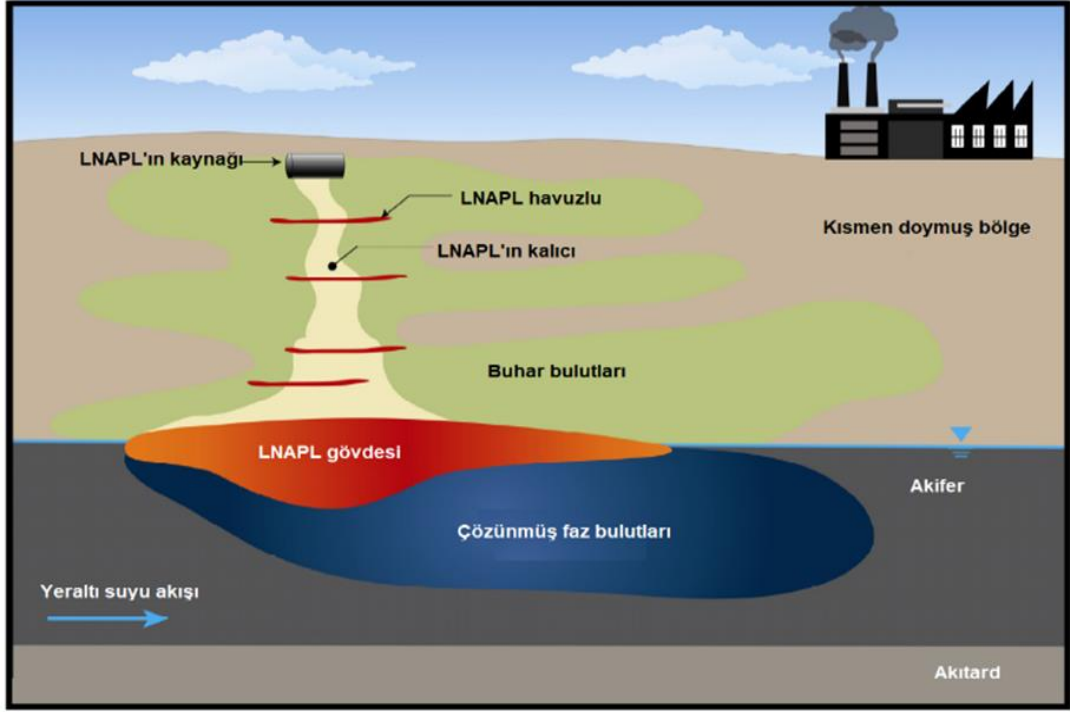
Hem yüzey (jeofizik yöntemler) hem de sondaj numunelerinin (jeokimyasal yöntemler) araştırılması, dökülme boyutunun daha iyi tanımlanmasını sağlar (Kaufman ve Deceuster, 2007). Araştırmanın bütçesi destekleyebilirse hem yüzey hem de sondaj elektrik ölçümlerinin yapılması tavsiye edilir (Atekwana ve ark., 2000). 1D Schlumberger öz direnç araştırması, kirletici madde araştırma stratejisinin ayrılmaz bir parçası olmalıdır (Frohlich ve ark., 2008). Ayrıca GPR verilerinin alınması, bir yağış döneminden kısa bir süre sonra gerçekleştirilmelidir (Bertolla ve ark., 2014).

Jeofizik literatürünün incelemesi, hidrokarbon kirlenmesiyle ilişkili benzersiz bir jeofizik tepki olmayabileceğini göstermektedir. Bu nedenle, araştırmacıların geniş çapta çevresel jeofizik ve hidrokarbon kirlenme çalışmaları konusundaki bilgilerini genişletmek için bu alanda araştırma yapmaya devam etmeleri teşvik edilmektedir. Bu, dünyadaki mevcut hidrokarbonla kirlenmiş alanların çoğunun tespit edilmesine ve düzeltilmesine yardımcı olacaktır.

2.6. Genelleştirilmiş LNAPL Yayılma Modeli

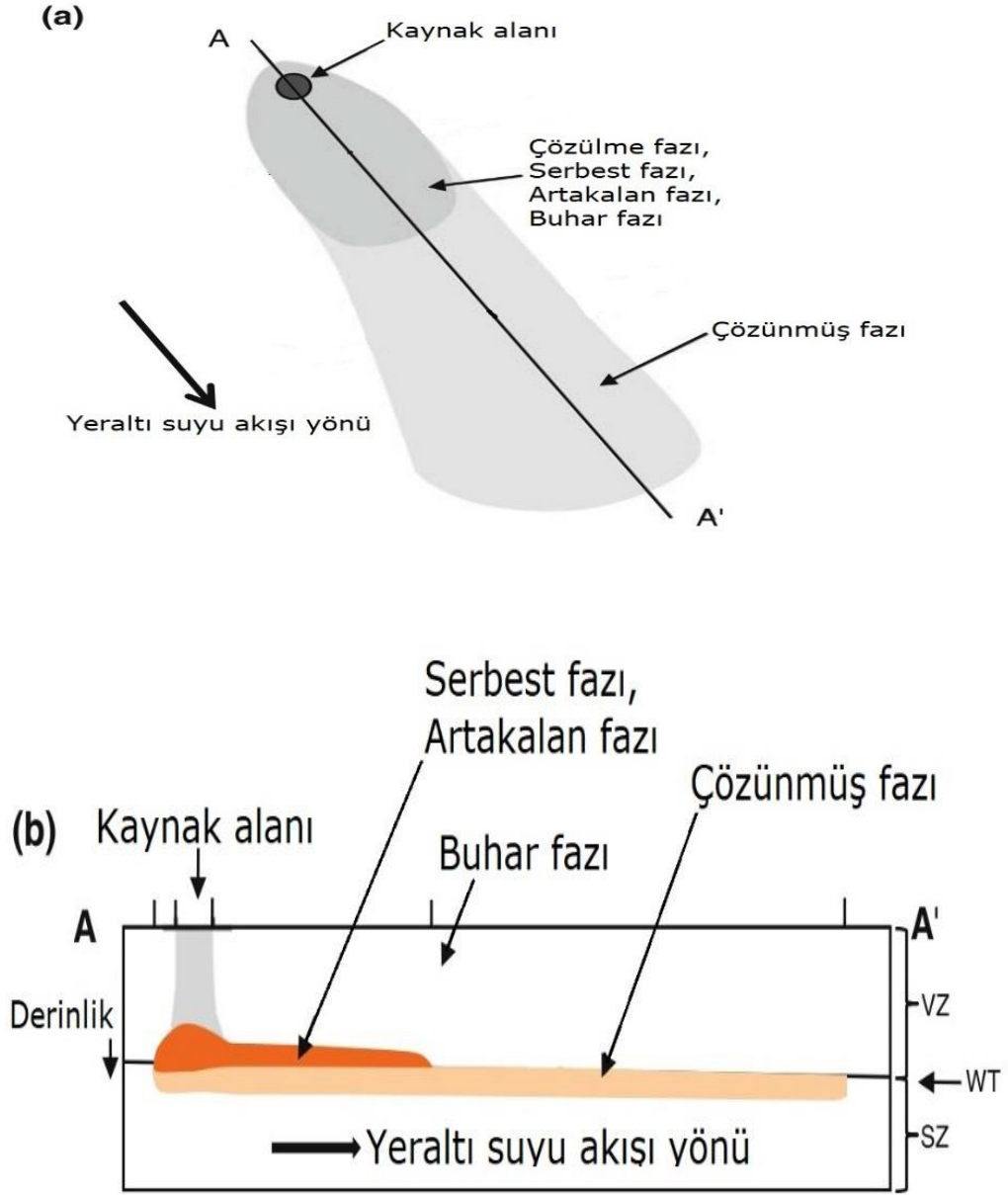
LNAPL herhangi bir mekanizma ile yere salındığında, yerçekimi kuvveti altında aşağı doğru göç eder. Şekil 2.1., yeraltı yüzeyine bir LNAPL salınmasının açıklayıcı kavramsal modelini sunmaktadır. Genel olarak, az miktarda LNAPL, alt yüzeye serbest bırakıldığında, LNAPL'nin bir kısmı kılcal kuvvetler tarafından toprak gözeneklerinde artık globüler olarak tutulduğu doymamış bölgeler arasında hareket eder ve böylece hareket sona erene kadar bitişik LNAPL kütlelerini tüketir. Ancak, yeterli miktarda LNAPL serbest bırakılması durumunda, fiziksel bir engelle karşılaşana kadar veya su tablasının yakınındaki kaldırma kuvvetlerinden etkileninceye kadar göç eder. Kılcal saçaklara ulaştığında, LNAPL, yerçekimi ve kılcal kuvvetler nedeniyle suya doymuş bölgenin üst sınırı boyunca serbest fazlı ve sürekli bir tabaka halinde yanal olarak hareket edebilir. Her ne kadar asıl göç su tablası kotunda azami düşüş yönünde olsa da, başlangıçta başka yöne doğru bazı göçler olabilir. Büyük bir sürekli faz LNAPL kütlesi kılcal (kapiller) saçak ve su tablasını hidrostatik olarak bastırabilir. Kaynak çıkarıldıktan sonra, gömülmüş LNAPL yanal olarak taşınır, LNAPL hidrostatik basıncı kaldırılır ve su tablası nihayetinde toparlar.

Çökeltinin süzülmesi ve artık veya mobil LNAPL ile temas halinde bulunan yeraltı suyunda çözülmesi, bir sulu faz kirletici akışkan oluşturacaktır (Newell ve ark., 1995; USEPA, 2009; CLAIRE, 2014).

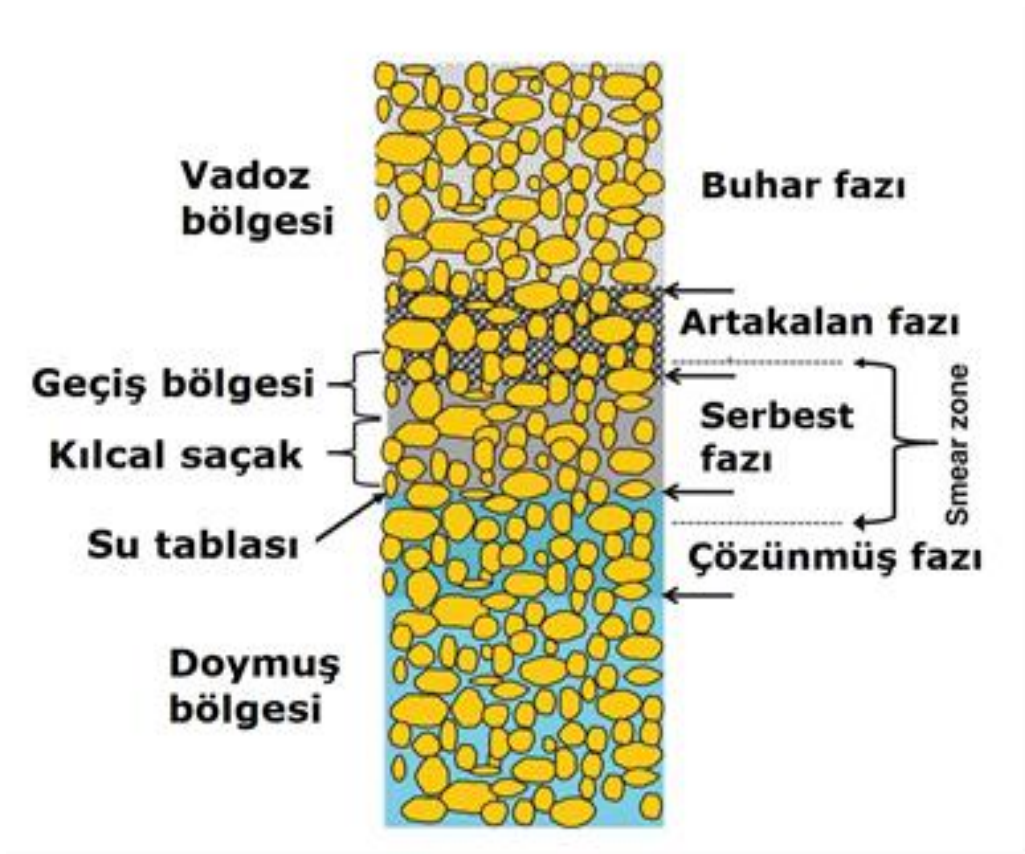


Şekil 2.1. Bir LNAPL kirlenmesini açıklayıcı kavramsal model (CLAIRE, 2014'den değiştirilmiştir).

Hidrojeoloji ve ilgili alanlarda, yakın yüzey, aralarında geçiş bölgesi ve kılcal saçak bulunan doymamış ve doymuş bölgeler olarak sınıflandırılır. Doymamış bölge aynı zamanda vadoz bölgesi olarak da adlandırılır. Geçiş bölgesi, kılcal saçak üzerinde değişken doygunluk bölgesidir. Kılcal saçak, su tablasının üzerinde gerilime doymuş bir bölgedir ve kalınlığı değişir. Jeofizik literatürüne göre, LNAPL ile kirlenmiş bir alandaki yer altı, Şekil 2.2a., 2.2b. ve 2.3'te gösterildiği gibi çoğunlukla dört farklı faza ayrılır. Bunlar: Buhar fazı, artakalan faz, serbest faz ve çözülmüş fazdır (Sauck, 2000; Lopes de Castro ve Branco, 2003; Atekwana ve Atekwana, 2010).



Şekil 2.2. (a) LNAPL'nin basit şeması ve (b) LNAPL'nin uzunlamasına kesit görüntü şeması (Atekwana ve Atekwana, 2010'dan değiştirilmiştir).



Şekil 2.3. Toprak neminin tipik dağılım şeması ve bir sızıntı alt yüzeyindeki hafif sulu olmayan faz sıvılarının (LNAPL) farklı halleri (Atekwana ve Atekwana, 2010'dan değiştirilmiştir).

Buhar fazı, hidrokarbonun uçucu fraksiyonlarından oluşur ve tipik olarak vadoz bölgesinin üst kısımlarında bulunur. Buhar fazı çoğunlukla, artakalan ve serbest fazda LNAPL'den uçuculuğun meydana gelebileceği bölgelerle sınırlıdır. Artakalan faz, vadoz bölgesi içinde kalan doygunlukta olan ve yerçekimi etkisi altında boşalmayan LNAPL'den oluşur. Kaynak bölgeyle sınırlıdır ancak kaynak bölgenin ötesine geçebilir. Artakalan faz, serbest faz LNAPL'nin vadoz bölgesine yükseldiği alanlara ulaşabilir ve dalgalanan su tablası nedeniyle tortuları kaplar. Kılcal saçak bölgesindeki (su tablasının altına da uzanabilen) serbest fazın (karışmayan faz) kalınlığı birkaç santimetreden birkaç metreye kadar değişebilir. Serbest faz ayrıca LNAPL dökülme hacmine bağlı olarak yanal olarak onlarca ila yüzlerce metre arasında uzayabilir. Kılcal saçak bölgesinde, LNAPL nadiren sürekli %100 serbest fazdır, ancak tipik olarak %50 hidrokarbon doygunluğuna sahiptir ve hava, buhar ve su ile karıştırılır. Çözünmüş faz doymuş bölgede meydana gelir. LNAPL'nin sulu fazdaki konsantrasyonu, tipik olarak düşük olan farklı fraksiyonların çözünürlüğü ile belirlenir (Sauck, 2000; Atekwana ve Atekwana, 2010).

LNAPL ile kirlenmiş yeraltı yüzeyi, dinamik ve karmaşık bir biyo-fiziko-kimyasal ortamdır ve LNAPL'nin jeofizik yöntemlerle tespiti bazı faktörlere bağlıdır. Bu faktörler aşağıda verilmiştir.

1. LNAPL tipi (ham petrol, jet yakıtı, dizel yakıt).
2. LNAPL kirlenmesinin geçmişi (örneğin, sürekli sürüm veya tek sürüm).
3. Vadoz bölgesindeki havaya veya doymuş bölgedeki suya göre LNAPL'nin dağılımı.
4. Hidrolojik süreçler (örneğin, aktif taşıma, mevsimsel yeniden kirlenme).
5. Kirlenmiş ortamın doymuşluk geçmişi.
6. Biyolojik süreçler vb.

Herhangi bir jeofizik yöntemin LNAPL ile kirlenmiş sahalarda başarılı bir şekilde uygulanması, jeofizik tepkileri yöneten faktörlerin doğru bir şekilde anlaşılmasıyla yönlendirilmelidir. Ayrıca jeofiziksel tepkilere hangi faktörlerin neden olabileceğini de anlamamız gerekir (Atekwana ve Atekwana, 2010).

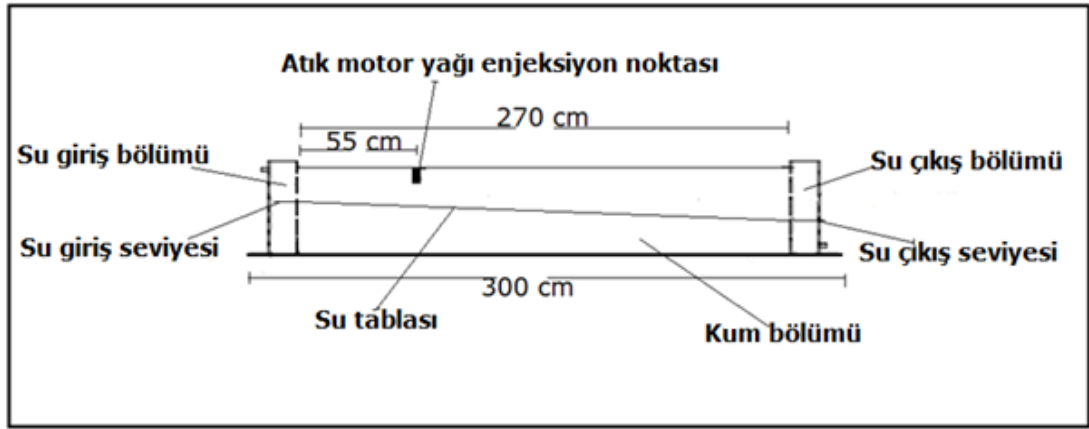
BÖLÜM 3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Deneysel Kurulumlar

Bu tez çalışmasında, iki deney seti için iki farklı deney tankı kullanıldı. İlk deney tek bir kirlenme deneyiydi ve bu deney için tank A kullanılmıştır. İki farklı simülasyondan oluşan ikinci deneyde B tankı kullanılmış ve kirlenme yarı sürekli olarak gerçekleştirilmiştir.

Birinci deney için özel olarak imal edilen şeffaf pleksiglas tankı (A) laboratuvar deneyleri için tasarlandı. Şeffaf plexiglas araştırmacıların laboratuvarda simüle edilmiş kum akiferinin net bir şekilde izlemesini sağlamıştır. Deneydeki kurulumun kirletilmesinde AMY kullanıldı. Deneyde gerçek bir motor yağı kirlenmesi senaryosuna uygun bir benzetim (simülasyon) yapılmıştır. Deney kurulumu kontrollü olarak deney süresince iki kere kirletilmiştir. Deney tankı (A) (Şekil 3.1. ve 3.2.) büyük dikdörtgen şeffaf pleksiglas büyük bir kutudur (270 x 60 x 50 cm ebatlarında). Bu deneyde kullanılan kum, Sakarya Nehri'nin Adapazarı kısmından elde edilmiştir. Kum, mümkün olduğu kadar izotropik ve homojen bir zemini temsil edecek şekilde tanka doldurulmuştur. Kum seviyesi tankın tabanından itibaren 50 cm kalınlıktadır. Deney boyunca su giriş bölümündeki su seviyesi 25 cm'de ve su çıkış bölümündeki su da 15 cm'de sabit olarak tutulmuştur. Atık motor yağı, 15 cm çapında, 20 cm derinlikte oluşturulan bir çukurdan kuma verilmiştir. Çukur, su girişi bölmesi sınırından 55 cm uzaklıkta bulunmaktadır. Deney kurulumu hazırlandıktan ve kirletmeden önce, ilk jeofizik veriler toplanmıştır. Daha sonra kurulum 1,5 litre atık motor yağı (AMY) ile kirletildi. GPR verileri, ilk kirlenmeden bir saat sonra ve ERT verileri de ilk kirlenmeden 2 saat sonra toplanmıştır. İlk kirlenmeden bir hafta sonra, 2,5 litre ilave AMY (birinci ile birlikte toplam 4,0 litre yağ) kurulumu tekrar kirletmek için aynı noktadan kuma verilmiştir. GPR ölçümleri, ilk kirletmeden 2 hafta sonra ve 2,5 litrelik ek kirletmeden bir hafta sonra tekrar edilmiştir. İlk AMY kirletmesinden 4 hafta ve 26

hafta sonra iki ek GPR ölçümü yapılmıştır. Deney önerisinde, GPR verilerinin 26 hafta boyunca iki haftalık aralıklarla alınması planlanmıştı. Ancak bu plan Covid-19 Pandemisi kısıtlamalarından dolayı değiştirilmiştir. Bunun nedeni GPR cihazının Kocaeli Üniversitesine ait olmasıdır. ERT veri toplama planlandığı gibi devam ettirildi ve 26 hafta boyunca düzenli olarak haftada bir toplandı. Jeofizik verilerin yorumlanmasına ve jeofizik veriler üzerindeki sıcaklık etkilerinin değerlendirilmesine yardımcı olmak için, deneyin 26 haftası boyunca sıcaklık verileri izlendi ve kaydedildi. İzlenen sıcaklıklar: laboratuvar, kum, su giriş ve su çıkış sıcaklıklarıdır.

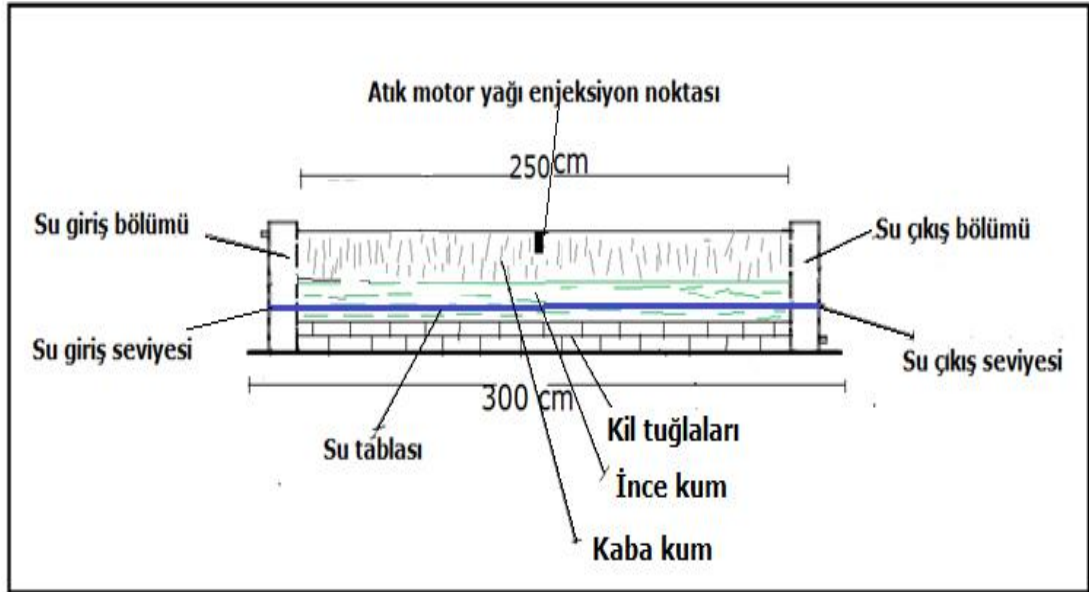


Şekil 3.1. Deney tankının (A) şematik kesiti.

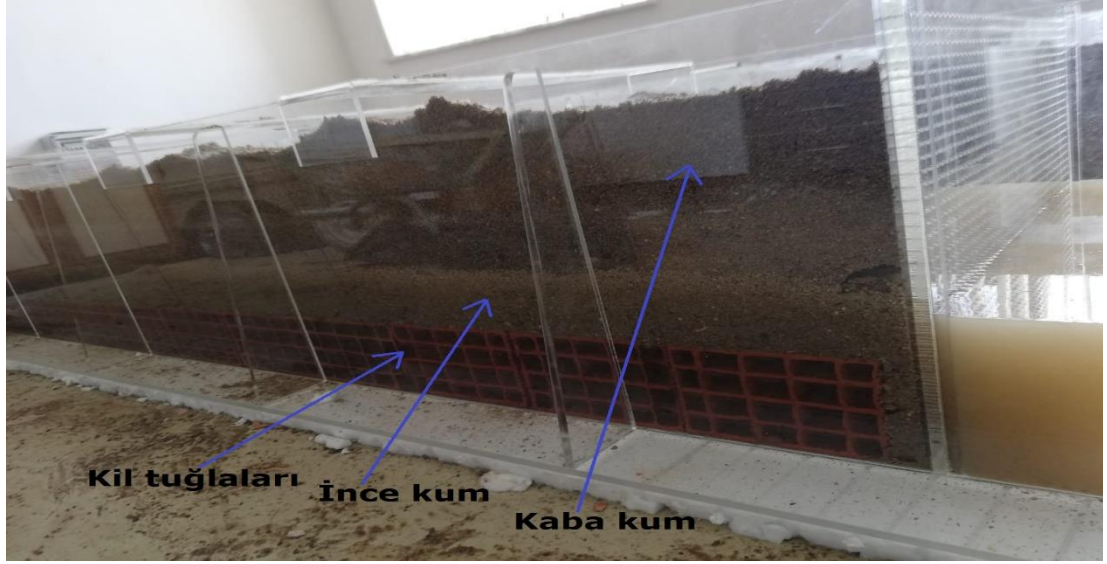


Şekil 3.2. Deney A için tanktaki kum seviyesinin ayarlanması sırasında çekilen resim.

Kum akifer sistemi, deney iki için birinci deney gibi özel olarak tasarlanmış pleksiglas bir tankta (Şekil 3.3 ve 3.4) simüle edilmiştir. Plexiglass, elektriksel yalıtkan özelliği nedeniyle tank üretiminde malzeme olarak seçilmiştir. Tank (B) kumu barındıran bir büyük bölümden (250 cm x 70 cm x 50 cm) ve su giriş ve su çıkış bölümleri olarak kullanılan iki dar bölüm (15 cm x 70 cm x 50 cm) olmak üzere üç bölümden oluşur (Şekil 3.3.). Tank (B) boyutları mevcut laboratuvar alanına ve deneyin tasarımı sırasında yapılan düz çözüm denemesine göre belirlenmiştir. Kum akifer sistemi üç katmandan oluşmuştur. Taban, 13,0 cm kalınlığa kadar kil tuğlalarla doldurulmuştur. Orta tabaka 15,0 cm kalınlığa kadar kaba kum ile doldurulmuştur. Son olarak, üst tabaka 12,0 cm kalınlığa kadar ince kumdan oluşmuştur. İki kum tabakası, homojen bir kompakt kum tabakası oluşturmak için tank içinde iyice sıkıştırılmıştır. Kum akifer sistemi doymuş ve doymamış olmak üzere iki bölüme ayrılmış kumdan oluşur. Tanktaki kum akifer sisteminin kalınlığı tankın tabanından itibaren 40 cm dir. Deney boyunca tatlı su, su giriş bölümünden kum bölümüne ve ardından çıkış bölümüne akmaktadır. Enjekte edilen suyun elektriksel iletkenliği $2,39 - 2,50 \times 10^{-4}$ S/m arasında değişmektedir. Deney boyunca hem giriş hem de çıkış bölümlerindeki su seviyesi 15 cm'de tutulmuştur.



Şekil 3.3. Deney tankı (B) modeli geometrisinin şematik gösterimi.



Şekil 3.4. Deney tankı (B) ve tanka doldurulan malzemeleri gösteren resim.

İkinci deney kurulumunda dört farklı mevsim tipi simüle edilmiştir. Her mevsim benzetimi 5 hafta sürmüştür. Her mevsim için düzenek 4 hafta boyunca haftada bir kez olmak üzere 2 litre atık motor yağı ile kirletilmiştir. Yani her mevsim için toplam 8 litre atık motor yağı ile kirletme gerçekleştirilmiştir. Sıcaklık ve toprak koşulları yaz, kış ve yağışlı mevsimlerine benzeyecek şekilde simüle edilmiştir.

Yaz sıcaklığı ve kum modeli koşulları infrared ısıtıcı kullanılarak laboratuvarında simüle edildi. 30°C sabit sıcaklık yaz mevsimi benzetimi için hedeflendi. Laboratuvarında kış mevsimi simüle etmek için laboratuvar sıcaklığı 10°C olarak sabit tutuldu. Her hafta kum modelinin yüzeyine 3 litre su ilave edildi. Yağış mevsimi 20°C sabit bir laboratuvar sıcaklığı ayarlanarak simüle edildi. Kum modelinin yüzeyine her hafta 5 litre su ilave edildi. Kontrol deneyi su ilave edilmeden gerçekleştirildi. Bu deney için sabit laboratuvar sıcaklığı 23°C olarak uygulanmıştır.

Şekil 3.3. 'de gösterildiği gibi deney tankının üzerinde atık motor yağ sızıntısı için 10 cm uzunluğunda bir PVC boru (15 cm çap) tankın tabanından 30 cm yukarıda olacak şekilde yerleştirildi. Tank içindeki kumlar mümkün olduğu kadar orijinal (in-situ) durumun temsil edildiği izotropik ve homojen bir zemin olarak oluşturuldu. Homojen model elde edildikten sonra musluk suyu modelin içine verildi (Şekil 3.4.). İkinci

deney kurulumunda giriş ve çıkıştaki su seviyesi tüm deneyler boyunca 15 cm'de sabit tutuldu.

Jeofizik veriler su girişinden 4 saat sonra ölçüldü. Her mevsim benzetiminde düzenek için jeofizik veriler atık motor yağ enjeksiyonundan 1, 8, 15, 22 ve 29 gün sonra toplandı. Bundan sonra jeofizik veriler yer radarı ve elektriksel özdirenç tomografisi bölümlerinde belirtildiği gibi işlenerek yorumlandı. Deneylerden sonra kirlenmiş kum ve deney tankının çıkış kısmından toplanan kirli su farklı kaplara alındı. Kirli su uygun şekilde bertaraf edilmek üzere Sakarya Üniversitesi'nin Atık Yönetim Merkezine teslim edildi.

3.2. Atık Motor Yağı (AMY)

Bu tez çalışmasında gerçekleştirilen deneyler için kirletici olarak atık motor yağı (AMY) seçilmiştir. Makine yağı olarak da bilinen motor yağı bazen basitçe yağlayıcı madde olarak da adlandırılır. Motor yağı, birbiriyle temas halinde olan mekanik bileşenler arasındaki sürtünmeyi, ısıyı ve aşınmayı azaltmak için kullanılan bir yağ sınıfıdır (Armstrong ve ark., 2018). Motor yağı, yağın türüne bağlı olarak düz zincirli (alifatik) hidrokarbonlar ve aromatik veya polisiklik aromatik hidrokarbonlar (PAH'lar) içerebilir.

Dört genel motor yağı türü vardır. Bunlar; tam sentetik yağ, sentetik karışım veya yarı sentetik yağ, mineral veya konvansiyonel yağ ve son olarak yüksek kilometreli yağlardır. Tam sentetik yağ, yalnızca en iyi yağ moleküllerinin tutulmasını sağlamak için karmaşık kimyasal işlemlerle kimyasal olarak yapılır ve motor performansını artırmak için katkı maddeleri eklenir. Yarı sentetik yağ, sentetik yağ ve mineral yağın bir karışımıdır. Karışımın oranı eşit değildir, hedeflenen performansa bağlıdır. Mineral yağ, rafine edilmiş ham petrolden yapılır ve esas olarak kükürt veya nitrojen gibi eser miktarda elementler içeren hidrokarbonlardan oluşur. Son olarak, yüksek kilometreli yağ, son model araçlar veya 75.000 milden daha yeni araçlar için özel olarak formüle edilmiştir. Bu yağ, yağ yanmasını azaltmaya ve eski motorlarda

meydana gelebilecek yağ sızıntılarını önlemeye yardımcı olan katkı maddeleri ve formülasyon içerir.

Motor yağlarının kalitesini, performansını ve ömrünü artırmak için hem mineral yağlara, hem de sentetik yağlara katkı maddeleri eklenir. Yaygın katkı maddeleri arasında oksidasyon önleyici, deterjan, dağıtıcı, aşınma önleyici, korozyon önleyici, viskozite indeksi düzenleyici ve antifriz katkı maddeleri bulunur (Total, 2019). Bu deneyde kullanılan AMY kirletici, çeşitli kullanılmış motor yağlarının bir karışımıdır. Deneyde kullanılan AMY'nin kimyasal ve fiziksel özellikleri Tablo 3.1.'de verilmiştir.

Tablo 3.1. Deneyde kullanılan atık motor yağının kimyasal ve fiziksel özellikleri*

Deney	Deney yöntemi	Sonuç	Birim
API Gravite (60F)	TS 1013EN ISO 3697	29,6	API
Yoğunluk Tayini, (15°C'de)	TS 1013EN ISO 3697	877,9	Kg/m ³
Kinematik Viskozite (40°C'de)	TS EN ISO 3104	78,03	mm ² / s
Karbon Kalıntısı Tayini (Mikro Metot)	TS EN ISO 10370	2,27	%(m/m)
Distilasyon ile Su Tayini	TS EN 1428	0,10	%(v/v)
Toplam Asit Sayısı	ASTN D 664	4,46	mgKOH/g
Metal Analizi;			
Demir	IP 501	59	mg/kg
Nikel	IP 501	4,2	mg/kg
Vanadyum	IP 501	< 1	mg/kg
Aluminyum	IP 501	14	mg/kg
Kalsiyum	IP 501	2424	mg/kg
Çinko	IP 501	1170	mg/kg
Fosfor	IP 501	951	mg/kg
Silis	IP 501	11	mg/kg
Sodyum	IP 501	15	mg/kg

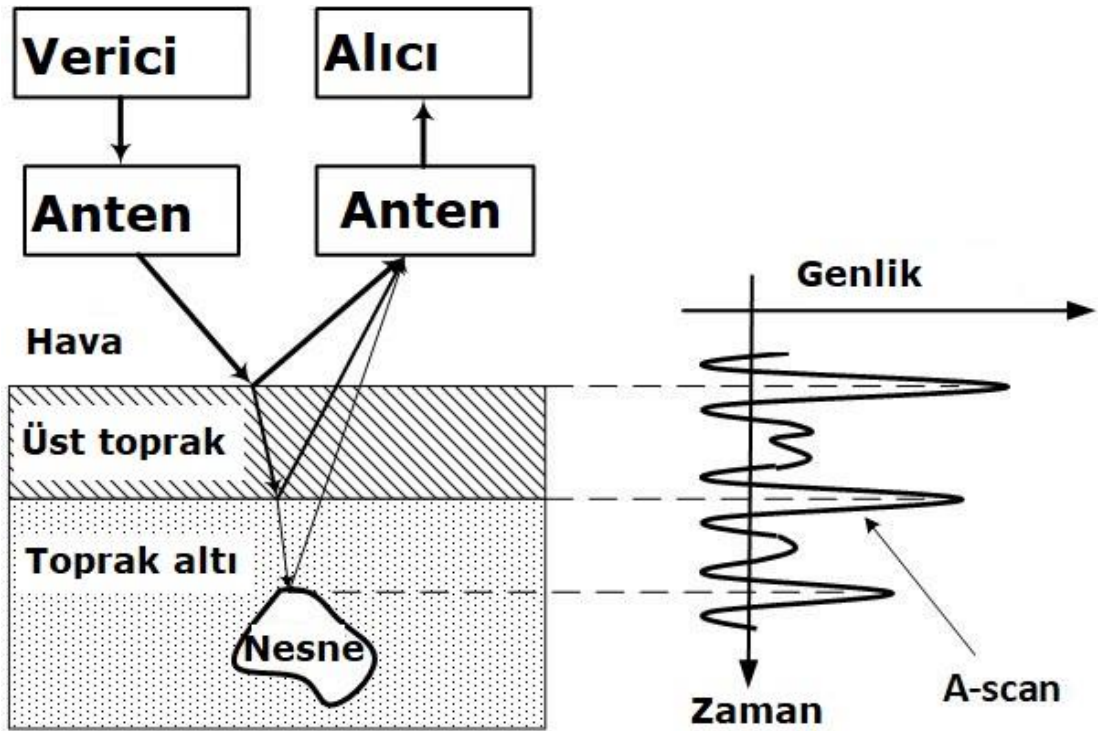
*Bu analizler TÜPRAŞ İzmit Rafinerisi Laboratuvarlarında yapılmıştır.

3.3. Yer Radarı

3.3.1. Yer radarının teorisi ve temel prensipleri

Yer radarı yöntemi elektromanyetik spektrumun radyo ve mikrodalga bölümünü kullanan jeofizik bir yöntemdir (USEPA 1993). GPR'da bir verici anten yerin

elektiriksel özelliklerinde meydana gelen değişiklikler nedeniyle iletilen, yansıtılan ve kırılan elektromanyetik bir sinyali yer içine yayar (Şekil 3.5.). Yer yüzeyine doğru geri yansıyan ve geri gelen dalgalar bir alıcı anten tarafından algılanabilir, amplifiye edilebilir, sayısallaştırılabilir, görüntülenebilir ve daha fazla analiz için kaydedilebilir. Dalganın geri dönmesi için gereken süre ölçülebilir ve hedefler ile antenler arasındaki mesafelere dönüştürülebilir (Daniels ve ark., 1988; Davis ve Annan, 1989; Aktürk ve Doyuran, 2015). Geri gelen sinyalin bazı karakteristik özelliklerini analiz ederek, hedef ve nihai olarak yeraltı yapısı hakkında küçük ayrıntılar (örneğin boyutlar) ve önemli bilgiler (örn. derinlik) elde edilebilir (Daniels ve ark., 1988; Davis ve Annan, 1989; Aktürk ve Doyuran, 2015).



Şekil 2.5. Yer radarının prensipleri (Ukaegbu ve ark., 2019'dan değiştirilmiştir).

GPR görüntüsü, iletilen EM enerjisi ile dünyanın karmaşık, frekansa bağlı EM özelliklerindeki uzaysal varyasyon arasındaki etkileşimin bir temsilidir; dielektrik geçirgenlik ϵ , elektiriksel iletkenlik σ ve manyetik geçirgenlik μ .

Maxwell denklemlerinden, tek frekanslı, lineer polarize, z yönünde hareket eden bir EM düzlem dalgası için karmaşık bir elektrik E ve manyetik B alan vektörleri için ifadeler şu şekilde verilir:

$$E(z, t) = E_0 e^{-\alpha z} e^{i(\omega t - \beta z)} \quad (3.1)$$

$$B(z, t) = B_0 e^{-\alpha z} e^{i(\omega t - \beta z)} \quad (3.2)$$

E_0 ve B_0 karmaşık genlikler olduğunda, ω açısal frekanstır, α sönümlenme sabitidir, β faz parametresidir. Zayıflama sabiti α şu şekilde verilir:

$$\alpha = \omega \sqrt{\frac{\mu \epsilon}{2}} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega \epsilon}\right)^2} - 1 \right]^{1/2} \quad (3.3)$$

Faz parametresi şu şekilde verilir:

$$\beta = \omega \sqrt{\frac{\mu \epsilon}{2}} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega \epsilon}\right)^2} + 1 \right]^{1/2} \quad (3.4)$$

Açısal hız ω olarak verilir:

$$\omega = v\beta \quad (3.5)$$

Bu nedenle

$$v = \frac{\omega}{\beta} \quad (3.6)$$

Burası v EM dalgasının hızıdır.

Yeraltındaki tüm konumlarda μ 'nin μ_0 'ya eşit olduğunu varsayalım ve ayrıca $\sigma/w\epsilon < 1$ düşük kayıplı bir durumdur. Burada μ_0 , boş alanın manyetik geçirgenliğidir ($\mu_0 = 4 \times 10^{-7}$ henries /m).

Bu varsayım, GPR'de yer alan yüksek frekansları dikkate alarak geçerlidir ve yöntemin iletkenliği çok yüksek olan bölgelerde kullanılamaması (yüksek σ değerleri yüksek oranda zayıflatıcı bir ortamla sonuçlanır). Ve dolayısıyla

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon}} \quad (3.7)$$

ve

$$\alpha = \frac{\sigma}{2} \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon}} \quad (3.8)$$

Denklem 3.7 ve 3.8 ifadelerinden, elektriksel iletkenliğin zayıflama üzerinde büyük bir etkisi olduğu halde dielektrik geçirgenlik kontrol hızının olduğu sonucuna varılabilir.

EM dalgaları bir arayüzle temas halindeyken dalğanın bir kısmı yansıtılır. Yansıyan enerji miktarı, EM özelliklerinde bir değişikliğin olduğu yeraltındaki herhangi bir arayüzde gelen enerjinin bölünmesiyle belirlenir. Yansıma katsayısı (R), yansıyan dalğanın karmaşık genliğinin gelen dalğanınkine oranıdır. Düzgün düzlemsel bir arayüze sahip normal olarak gelen bir EM dalgası durumu için yansıma katsayısı denklem 3.9'daki gibi verilir. Burada gelen dalğanın elektrik alanı, geliş düzlemine dik olarak polarize edilir.

$$R = \frac{\mu_2 k_1 - \mu_1 k_2}{\mu_2 k_1 + \mu_1 k_2} \quad (3.9)$$

Alt simgeler 1 ve 2, ara yüzün üstündeki ve altındaki bölgelere atıfta bulunur. k dalga sayısıdır ve denklem 3.10'daki gibi ifade edilir.

$$k = \beta - i\alpha \quad (3.10)$$

Düşük kayıplı ve manyetik olmayan bir ortam ($\mu = \mu_0$) varsayarsak, 3.9 ifadesi 3.11 ifadesi ile basitleştirilebilir.

$$R = \frac{\sqrt{\epsilon_1} - \sqrt{\epsilon_2}}{\sqrt{\epsilon_1} + \sqrt{\epsilon_2}} \quad (3.11)$$

Bu nedenle, dielektrik özelliklerde bir süreksizliğin olduğu herhangi bir derinlikten yüzeye geri dönen enerji ve geri dönen enerjinin genliği, arayüzler boyunca özelliklerdeki kontrast seviyesinin bir göstergesidir.

Dielektrik geçirgenlik ϵ ve elektriksel iletkenlik σ , bir malzemenin mikroskobik elektromanyetik özelliklerini tanımlayan karmaşık, frekansa bağlı parametrelerdir (Knight, 2001). Birincisi, yük polarizasyonu ile ilişkili mekanizmaları açıklarken, ikincisi yük taşınması ile ilişkili mekanizmaları açıklar. Knight, 2001'de belirtildiği gibi Ward ve Hohmann, 1988 tarafından kabul edilen işaret konvansiyonunu takiben, iletkenlik ve dielektrik geçirgenlik sırasıyla denklem 3.12 ve 3.13'te tanımlanır.

$$\sigma(\omega) = \sigma'(\omega) + i\sigma''(\omega) \quad (3.12)$$

$$\epsilon(\omega) = \epsilon'(\omega) + i\epsilon''(\omega) \quad (3.13)$$

Burada ω açısal frekanstır, $\epsilon'(\omega)$ polarizasyon terimidir, $\epsilon''(\omega)$ polarizasyon gecikmesinden kaynaklanan enerji kaybını temsil eder, $\sigma(\omega)$ omik iletimi ifade eder ve $\sigma''(\omega)$ bir faradaik difüzyon kaybıdır. Yer malzemelerinde bu dört parametreyi yöneten mekanizmaların ayrıntılı bir tartışması Powers, 1997 ve Olhoeft, 1998'de bulunabilir.

Bir malzemenin salınan bir elektrik alanına toplam tepkisi, tüm bu mekanizmaları içerecektir ve toplam karmaşık geçirgenlik veya toplam karmaşık iletkenlik açısından tanımlanabilir. Radarda dielektrik özelliklerin rolünü tartışmak amacıyla, aşağıdaki denklemde verilen toplam karmaşık geçirgenlik $\epsilon_T(\omega)$ 'nin kullanılması tercih edilir.

$$\epsilon_T(\omega) = [\epsilon'(\omega) + i\epsilon''(\omega)] - \frac{i}{\omega} [\sigma'(\omega) + i\sigma''(\omega)] \quad (3.14)$$

Bu denklemin sağ tarafı yeniden düzenlendiğinde, malzemenin polarizasyon yoluyla enerji depolama yeteneğini temsil eden gerçek bir parça ve malzemenin yük taşıma yeteneğini temsil eden hayali bir parça oluşturabiliriz. Ortaya çıkan gerçek değerli, "etkili" geçirgenlik ve iletkenlik aşağıda verilmiştir.

$$\epsilon_{ef} = \text{Re}\{\epsilon_T(\omega)\} = \epsilon'(\omega) + \frac{\sigma''\omega}{\omega} \quad (3.15)$$

$$\sigma_{ef} = -\omega \text{Im}\{\epsilon_T(\omega)\} = \sigma'(\omega) + \omega\sigma''(\omega) \quad (3.16)$$

Genellikle $\sigma''(\omega)=0$ ve $\sigma'(\omega)=\sigma_{DC}$ olduğu varsayılır. σ_{DC} , malzemenin frekanstan bağımsız doğru akım (D.C.) iletkenliğidir. Gösterimsel basitlik için, bu bölümün geri kalanında (ω) gösterimi kaldırılacaktır. Dielektrik sabiti (κ) aşağıdaki denklemde verilmiştir.

$$\kappa = \frac{\epsilon_{ef}}{\epsilon_0} \quad (3.17)$$

ϵ_0 , boş alanın geçirgenliğidir. Düşük kayıplı manyetik olmayan bir ortamda EM dalga hızı ve yansıma katsayısı için daha önce verilen ifadeler κ cinsinden yazılabilir.

$$v = \frac{c}{\sqrt{\kappa}} \quad (3.18)$$

ve

$$R = \frac{\sqrt{k_1} - \sqrt{k_2}}{\sqrt{k_1} + \sqrt{k_2}} \quad (3.19)$$

Burada c (boş uzayda ışığın hızı) 3×10^8 m/s'ye eşittir.

3.3.2. Jeolojik malzemelerin dielektrik özelliklerini etkileyen faktörler

Dielektrik sabiti, salınan bir elektrik alanının bir molekül ile etkileşiminin ölçüsü olup, malzemenin temel bir fiziksel özelliğidir (Carey 1998). Malzeme, minimum enerji kaybıyla elektrik alanı geliştirebildiğinde, bu malzemenin dielektrik olduğu söylenir.

Jeolojik malzemenin dielektrik özelliklerini etkileyen faktörler, hacim fraksiyonları ve dielektrik sabiti bileşenleri, bileşenlerin geometrisi ve son olarak geometri ve bileşenler arasındaki etkileşimi içerir (Butler, 2005; Knight 2001).

1. Hacim kesirleri ve dielektrik sabiti bileşenleri

Von Hippel, 1954'e göre (Knight ve Endres, 2005'te), tek bir bileşenin dielektrik sabiti (1 kHz ila 1 GHz frekans aralığında ölçülür), üç farklı polarizasyon işleminden kaynaklanan toplam polarizasyonun bir ölçüsüdür. Bu polarizasyon süreçleri elektronik polarizasyon, atomik polarizasyon ve dipolar polarizasyonu içerir. Aşağıdaki Tablo 3.2., yüzeye yakın bölgede bulunan bazı katı ve sıvıların dielektrik sabitlerini vermektedir. Tablo 3.2.'den, diğer katılara ve gazlara göre su için yüksek k değeri, dipolar polarizasyonun büyük katkısından kaynaklanmaktadır. Bu polarizasyon, su moleküllerinin sahip olduğu kalıcı elektrik dipollerinin dönmesi ve hizalanmasından kaynaklanır.

~ 100MHz'in üzerindeki frekanslarda karmaşık dielektrik sabiti k^* 'yi tahmin etmek için, karmaşık kırılma indeksi yöntemi ((CRIM), Wharton ve ark., 1980) olarak bilinen basit bir karıştırma yasasının makul bir doğru model sağladığı bulunmuştur. CRIM, yalnızca bir malzemedeki tek tek bileşenlerin hacim fraksiyonları ve dielektrik sabitleri hakkında bilgi içerir. Gözenekli kayaların ve toprakların gözenekliliği P, su

doygunluğu S_w ve hava ile dolu gözenek boşluğunun geri kalanı göz önüne alındığında, CRIM aşağıdaki gibi yazılabilir.

Tablo 3.2. Yaygın jeolojik malzemelerde gözlenen tipik bağıl geçirgenlik, elektriksel iletkenlik, hız ve zayıflama (Butler, 2005'ten değiştirilmiştir).

Malzeme	K	σ (mS/m)	v (m/ns)	α (dB/m)
Hava	1	0	0,30	0
Distile su	80	0,01	0,033	2×10^{-3}
Tatlı su	80	0,5	0,033	0,1
Deniz suyu	80	3000	0,01	103
Kuru kum	3-5	0,01	0,15	0,01
Doğgun kum	20-30	1-10	0,06	0,03-0,3
Kireçtaşı	4-8	0,5-2	0,12	0,4-1
Pulsu aşındırıcılar	5-15	1-100	0,09	1-100
Şilt	5-30	1-100	0,07	1-100
Kil	5-40	2-1000	0,06	1-300
Granit	4-6	0,01-1	0,13	0,01-1
Kuru tuz	5-6	0,01-1	0,13	0,01-1
Buz	3-4	0,01	0,16	0,01

$$\sqrt{k^*} = (1 - \phi)\sqrt{k_s^*} + \phi S_w \sqrt{k_w^*} + \phi(1 - S_w)\sqrt{k_a^*} \quad (3.20)$$

$\sqrt{k_s^*}$, $\sqrt{k_w^*}$ ve $\sqrt{k_a^*}$ sırasıyla katı tanelerin, boşluk suyunun ve havanın karmaşık dielektrik sabitleridir. Saha çalışmasının karmaşıklığı göz önüne alındığında, yukarıdaki denklem 3.20'deki tüm parametrelerin değerini elde etmek her zaman mümkün değildir. Topp denkleminin kullanımı, saha uygulamalarında dielektrik sabitini hesaplamanın başka bir alternatifidir. Başka bir deyişle, bir saha uygulamasında bir ölçüm dielektrik sabitinden su içeriği θ_w elde etmek için Topp denklemi kullanılır.

$$k' = 3.03 + 9.30(\theta_w) + 146.00(\theta_w)^2 - 76.70(\theta_w)^3 \quad (3.21)$$

2. Bileşenlerin geometrik düzeni.

Bileşen geometrisinin k' belirlemedeki rolü frekansa bağlıdır. Geometrinin frekansa bağımlılığı hem düşük hem de yüksek frekanslardadır. Knight ve Endres, 2005

tarafından belirtildiği gibi, k' belirlemede bileşenlerin geometrisinin rolü, frekans azaldıkça daha önemli hale gelir, ancak yine de 100 MHz'lik aralıktaki frekanslarda birçok jeolojik malzemede önemli olabilir.

Düz taneciklerin varlığı, 500 kHz ila 1.3 GHz arasında değişen frekanslarda doymuş karbonatlı suya k' değerinde bir artışa neden olur (Kenyon, 1984; Knight ve Endres 2005'te alıntılanmıştır). Ayrıca, belirli bir su doygunluğu seviyesinde, k' büyüklüğü doyma sürecinden etkilenebilir, çünkü bu süreç sıvı fazın gözenek ölçüğü geometrilerini belirler.

Sonuç olarak, iletken su ile çevrelenen aşağılayıcı havanın geometrik dağılımının k' büyüklüğü üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu söylenebilir.

3. Bileşenler arasındaki etkileşim

Çok bileşenli bir malzemede, yukarıdaki hacim fraksiyonları ve dielektrik sabiti bileşenleri bölümünde belirtilen üç tip polarizasyon dışında, frekans ~ 10 MHz'in altına düştükçe diğer polarizasyon biçimleri baskın hale gelir. Bunlar, farklı elektriksel özelliklere sahip bileşenler arasındaki ara yüzlerde yük göçü ve birikimini içerir (Knight ve Endres, 2005). Jeolojik malzemelerde ölçülen polarizasyona katkıda bulunan diğer mekanizmalar, yüklerin oluşması ve dağılması ile ilişkilidir.

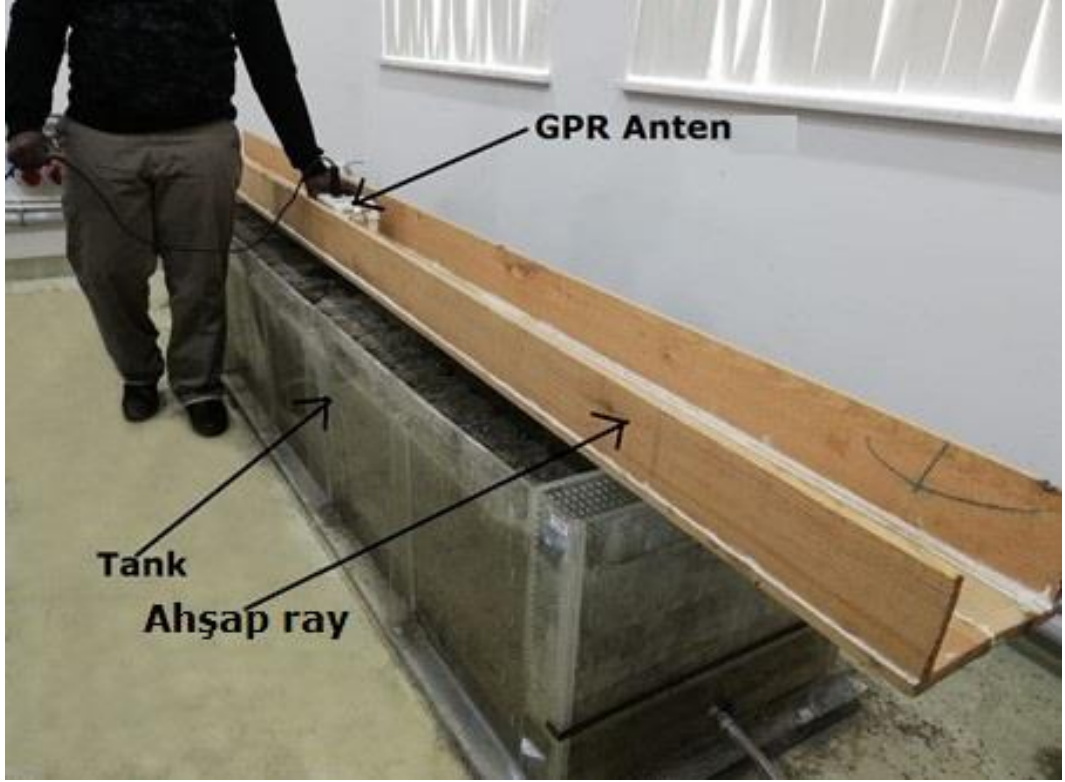
Su/katı karışımlarında, elektriksel çift katmanın hem bağlı hem de dağınık bölgelerindeki yük hareketlerini açıklayan teoriler önerilmiştir. Ayrıca bu teoriler, çift katmandaki aşırı iletkenliğin oynayabileceği rolü kabul eder (Knight ve Endres, 2005). Bu ve diğer ilgili fenomenler, (1) bir malzemedeki yığın bileşenlerin ve ara yüzlerin özellikleri ve geometrileri ve (2) Ara yüzlerde çalışan elektrokimyasal ve fizikokimyasal süreçler tarafından yönetilir. Knight ve Endres, 2005'e göre, jeolojik malzemelerde k' 'ye yapılan tüm katkıların temel nedenlerini belirlemek, devam eden bir araştırma konusu olmaya devam etmektedir.

3.3.3. Yer radar verileri ve veri işlemleri

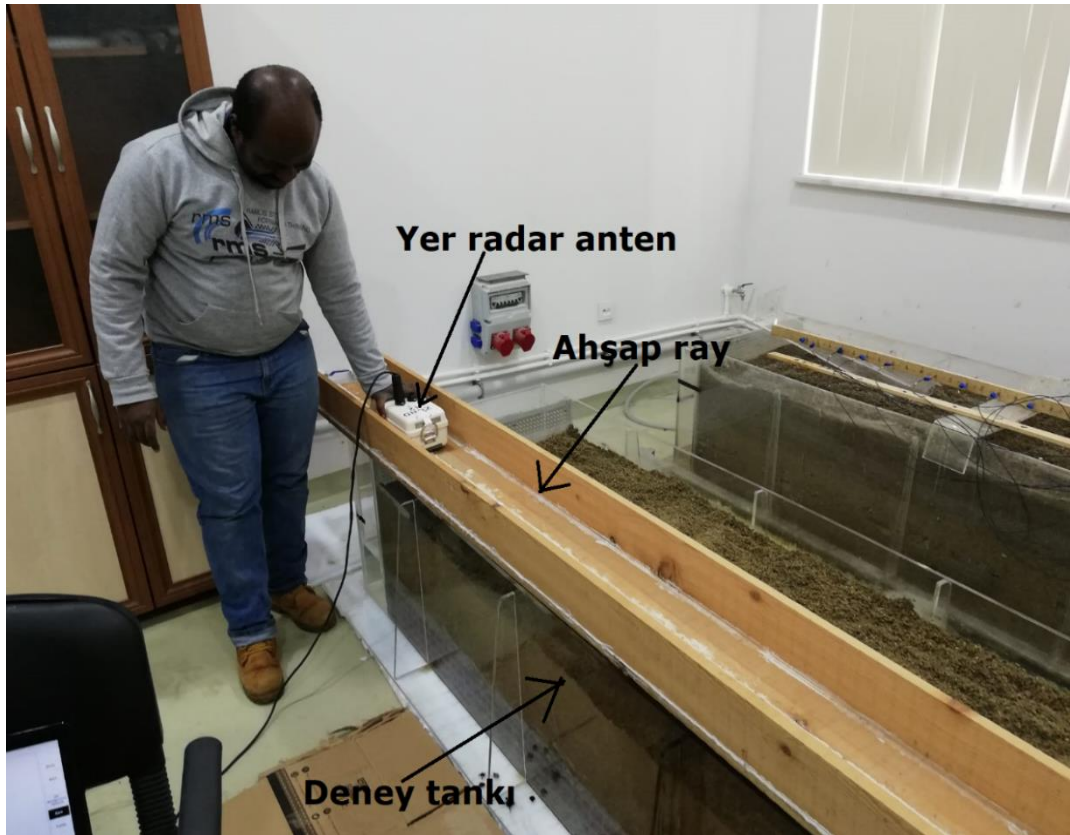
Deney A için yer radarı verileri bir (x) yönde toplanmıştır. Yer radar verileri, her profil arasında 5 cm boşluk olacak şekilde 8 profilden oluşan gruplar halinde elde edilmiştir (Şekil 3.6.).

Deney B için yer radarı verileri sadece tek (x) yönünde toplanmıştır. Yer radar verileri, her profil arasında 5 cm boşluk olacak şekilde 10 profilden oluşan gruplar halinde elde edilmiştir (Şekil 3,7).

Her iki deney için yer radarı verileri Zone-12e GPR cihazı ahşap bir oluk içinde sabit bir hızla hareket ettirilerek ve 2.0 GHz korumalı anten kullanılarak toplanmıştır (Şekil 3.6. ve 3.7.). Ahşap oluk, verilerin kaliteli olarak alınmasında önemli rol oynamıştır (Bertalla ve ark., 2014). Kum dolu ve AMY ile kirlenmiş deney tankından elde edilen GPR verileri Prism 2 v. 2.70.03 yazılımı kullanılarak işlenmiş (signal processing) ve 2B GPR görüntüleri elde edilmiştir. Veri işlemede sıfır zaman ayarı (zero-time setting), arka plan kaldırma (background removal), Yatay LP filtresi (Horizontal LP filter), Ormsby filtresi (Ormsby bandpass), verici-alıcı arası kayma düzeltmesi (move-out correction) ve göç (migration-Stolt (F-K)) işlemleri uygulanmıştır. Daha sonra kum dolu ve AMY ile kirlenmiş deney tankından alınan GPR verileri Easy 3B yazılımı ile işlenip, 3B GPR görüntüleri elde edilmiş ve sonuçlar yorumlanmıştır.



Şekil 3.6. Deney A için yer radarı verisi alınmasında kullanılan deney düzeneği.



Şekil 3.7. Deney B için yer radarı veri toplama için laboratuvar kurulumu.

3.4. ERT

3.4.1. ERT'in teorisi ve temel prensipleri

Bu jeofizik yöntem düşey elektrik sondajın hem yanal hem de düşey uzantıları hakkında bilgi vermek üzere, sondaj ve profillemeye tekniklerini birleştiren bir elektriksel özdirenç tekniğidir. ERT yöntemi klasik 4 elektrot ile uygulanan düşey elektrik sondaj yönteminin çok elektrotlu uygulanmasıdır. Klasik doğru akım özdirenç yöntemi bir çift elektrot (geçerli elektrotlar) kullanarak yere elektrik akımı uygulanır ve başka bir elektrot çifti (potansiyel elektrotlar) ile potansiyel farkının ölçülmesi esasına dayanır. Ölçülen potansiyel fark ve yere uygulanan akımın oranı, akım ve potansiyel elektrotlarının konumlarına bağlı geometrik faktör ile çarpılarak görünür özdirenç değerleri elde edilir. Geometrik faktör, kullanılan elektrot diziliminin türüne bağlıdır (Şheriff, 1999; Aktürk ve Doyuran, 2015). Görünür özdirençten daha sonra gerçek yeraltı özdirençini elde etmek ve katmanların kalınlığını ve derinliğini ortaya çıkarmak için ters çözüm tekniği kullanılır.

Bir malzemenin özdirenç, malzemenin birim küpünün karşıt yüzleri arasındaki ohms cinsinden rezistans olarak tanımlanır. δL uzunluğunda ve kare-kesit alanı δA olan bir dikdörtgen direncin elektrik direnci aşağıdaki denklemde verilmiştir.

$$\rho = \frac{\delta R \delta A}{\delta L} \quad (3.22)$$

Burada δR , direncin rezistansıdır; δL , bir yükün takip ettiği yolun uzunluğudur; δA , yükün düzgün bir şekilde dağıldığı kesit alanıdır; ve ρ (özdirenç), direnci yapmak için kullanılan maddenin fiziksel bir özelliğidir. Özdirençin SI birimi ohm-metredir (ohm m). Özdirençin tersi iletkenlik (denklem 3.23) olarak adlandırılır (birimler: metre başına siemens (S) Keary ve ark., 2002).

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (2.23)$$

Silindirik gövdenin elektrik rezistans (R), Ohm Yasası ile aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$R = \frac{V}{I} \quad (3.24)$$

Burada, V potansiyeldir (V) ve I akımdır (A).

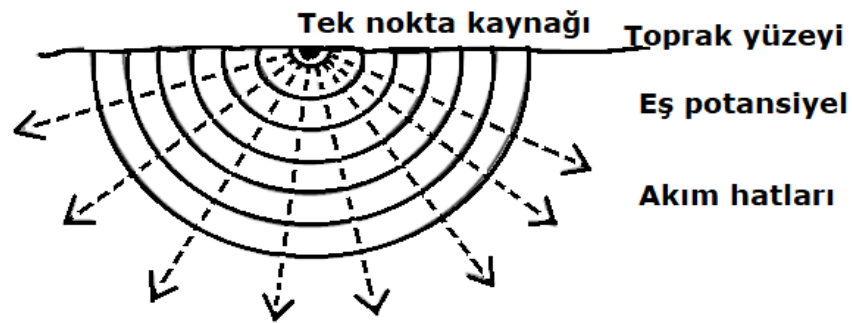
Homojen ve izotropik bir yarı uzayda, akım elektrotları Şekil 3.8.'de gösterildiği gibi toprak yüzeyine yerleştirildiğinde elektriksel eş potansiyel yarım küredir (Scollar ve ark., 1990; Kearey ve ark., 2002; Sharma, 1997; Reynolds, 1997, (Samouëlian, 2005)'de alıntılanmıştır). Tüm radyal yönler için akım yoğunluğu J (A/m²) aşağıda verilmiştir.

$$J = \frac{I}{2\pi r^2} \quad (3.25)$$

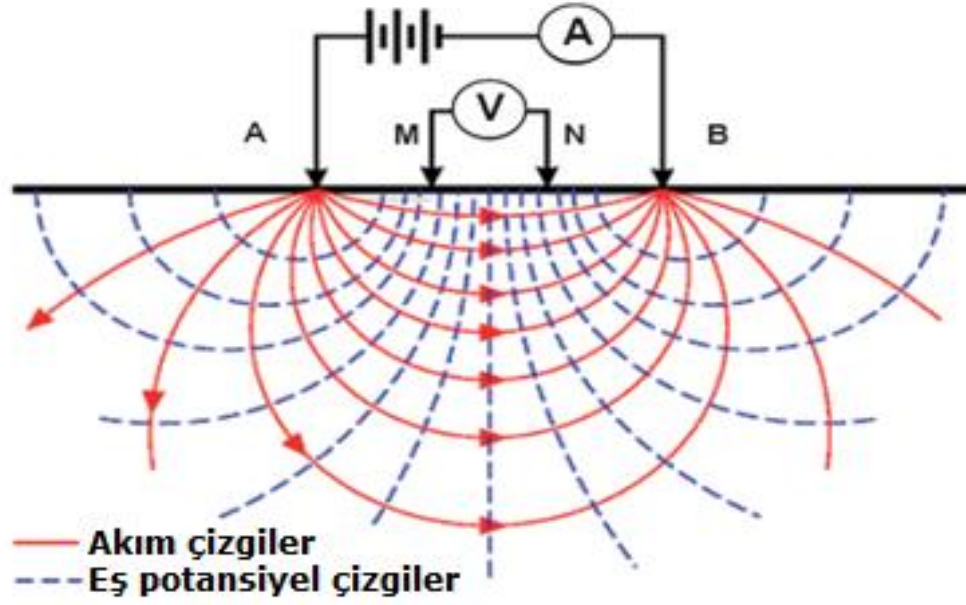
Burada $2\pi r^2$, yarıçapı r olan yarı küresel bir kürenin yüzeyidir. 3.25 denkleminde, potansiyel (V) aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$V = \frac{\rho I}{2\pi r} \quad (3.26)$$

Elektrik özdirenç ölçümlerinde dört elektrot gereklidir. Akımı toprağa enjekte etmek için iki elektrot (A ve B) kullanılır ve bunlara akım elektrotları denir. Ortaya çıkan potansiyel farkı kaydetmek için başka iki elektrot (M ve N) kullanılır ve bunlar potansiyel elektrotlar olarak adlandırılır. Toprakta geçen akımın şeması için Şekil 3.9.'e bakınız.



Şekil 3.8. Homojen Bir Toprakta Akım Akışının Dağılımı.



Şekil 3.9. Yeryüzünden geçen akımın şeması (Enrique ve ark., 2013'ten değiştirilmiştir).

Özdirenç ölçümlerinde kullanılan genelleştirilmiş bir elektrot konfigürasyonu için, elektrot M ve N, aşağıda şekil 3.10 kullanıldığı gibi C ve D olarak adlandırılır. Elektrotlar C ve D arasındaki ΔV potansiyel farkı aşağıda verilmiştir.

$$\Delta V = \frac{I\rho}{2\pi} \left\{ \left(\frac{1}{r_A} - \frac{1}{r_B} \right) - \left(\frac{1}{R_A} - \frac{1}{R_B} \right) \right\} \quad (3.27)$$

Denklem 3.27'den özdirenç aşağıdaki gibi verilmektedir.

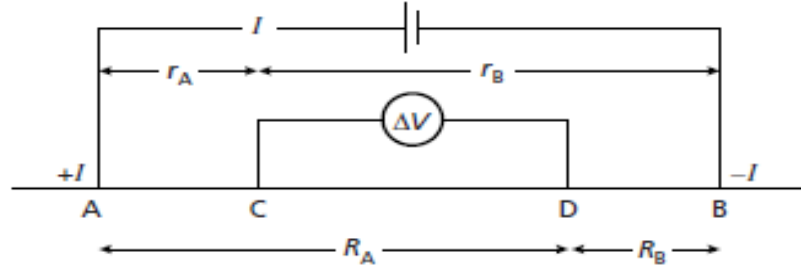
$$\rho = \left[\frac{2\pi}{1/r_A - 1/r_B - 1/R_A + 1/R_B} \right] \frac{\Delta V}{I} \quad (3.28)$$

Burada K geometrik faktördür ve aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$K = \left[\frac{2\pi}{1/r_A - 1/r_B - 1/R_A + 1/R_B} \right] \quad (3.29)$$

Kısaca özdirenç aşağıdaki gibi verilmiştir.

$$\rho = K \frac{\Delta V}{I} \quad (3.30)$$



Şekil 3.10. Özdirenç ölçümlerinde kullanılan elektrot konfigürasyonunun genelleştirilmiş modeli (Kearey ve ark., 2002).

Gerçekte zemin, özdirenç denkleminin türetilmesinde varsayıldığı gibi tek düze değildir ve yeraltı yüzeyinin homojen olmaması nedeniyle özdirenç, elektrotların nispi konumu ile değişecektir. Hesaplanan herhangi bir değer daha sonra görünen özdirenç ρ_a olarak bilinir ve homojen olmama biçiminin bir fonksiyonu olacaktır.

Üç ana elektrot dizi türü vardır ve bunlardan ikisi, yaratıcılarının adıyla anılır. Bu elektrot dizileri: Wenner dizisi (Frank Wenner'den sonra adlandırılır), Schlumberger dizileri (Conrad Schlumberger'den sonra adlandırılır) ve Dipol-dipol dizileridir. Wenner dizileri, Standart Wenner, Ofset Wennner, Lee-Partitioning dizisi, Tripotential (alfa, beta ve gama dizileri) içerir. Schlumberger dizileri, Standard Schlumberger, Brant dizisi ve Gradient dizisinden oluşur. Son olarak, Dipol – dipol dizileri Normal (axial), Azimutal, Radyal, Paralel, Dikey, Pole-Dipol, Ekvator ve Kare (ekvatoralin özel formu) oluşur.

Wenner – Schlumberger ve dipol-dipol dizileri bu tür laboratuvar tabanlı LNAPL araştırmalarında kullanılacak etkili dizilerdir (Halihan ve ark., 2005; Sentenac ve ark., 2010; Sentenac ve ark., 2015; Masy ve ark., 2016; Heenan ve ark., 2015; Caterina ve ark., 2017).

Wenner-Schlumberger, çok elektrotlu sistemlerle elektriksel görüntüleme araştırmalarından kaynaklanan Wenner ve Schlumberger dizileri arasında bir melezdir. Klasik Schlumberger dizisi, özdirenç sondaj araştırmaları için en yaygın olarak kullanılan dizilerden biridir. Bu dizinin şeması Tablo 3.3.'te gösterilmiştir. Bu

dizi için "n" faktörü, C1-P1 (veya P2-C2) elektrotları arasındaki mesafenin P1-P2 potansiyel çifti arasındaki boşluğa oranıdır. Wenner – Schlumberger dizisi hakkında daha fazla bilgi Loke, 2020'de mevcuttur.

Elektrotların dipol – dipol (axial) dizisindeki yerleşimi Tablo 3.3.'te gösterilmiştir. Mevcut elektrot çifti C2-C1 arasındaki boşluk, potansiyel elektrot çifti P1-P2 arasındaki mesafeyle aynı olan "a" olarak verilir. Bu dizi, Tablo 3.3.'te "n" olarak işaretlenmiş başka bir faktöre sahiptir. Bu, C1 ve P1 elektrotları arasındaki mesafenin C2-C1 (veya P1-P2) dipol uzunluğu "a"ya oranıdır. Bu dizili araştırmalar için, "a" aralığı başlangıçta en küçük birim elektrot aralığında sabit tutulur ve araştırma derinliğini artırmak için "n" faktörü 1'den 2'ye 3'e ve yaklaşık 6'ya kadar artırılır. Dipol – dipol'ün diğer özellikleri Tablo 3.3.'te belirtilmiştir. Dipol – dipol dizisi hakkında daha fazla bilgi Reynolds 1997 ve Loke, 2020'de mevcuttur.

Tablo 3.3.'teki bilgilerden ve literatür araştırmasının sonuçlarından hem 2B hem de 3B ERT veri alımları için Wenner – Schlumberger dizisini seçilmiştir.

Tablo 3.3. Wenner – Schlumberger Dipol – Dipol dizilerini özellikleri

Kriter	Wenner - Schlumberger	Dipol - Dipol
Dikey çözünürlük	orta	Zayıf
Nüfuz derinliği	orta	iyi
Oryantasyona duyarlılık	iyi	orta
Kullanım	Özdirenç sondaj araştırmaları için en yaygın olarak kullanılan elektrot dizisi.	Özdirenç ve IP araştırmalarında yaygın olarak kullanılır.
Elektrot düzeni ve geometrik faktör	<p style="text-align: center;">Wenner - Schlumberger</p> <p style="text-align: center;">C1 P1 P2 C2</p> <p style="text-align: center;">• ← na → • ← a → • ← na → •</p> <p style="text-align: center;">$k = \pi n(n+1)a$</p>	<p style="text-align: center;">Dipole - Dipole</p> <p style="text-align: center;">C2 C1 P1 P2</p> <p style="text-align: center;">• ← a → • ← na → • ← a → •</p> <p style="text-align: center;">$k = \pi n(n+1)(n+2)a$</p>
Yanal homojensizliklere karşı duyarlılık	orta	iyi
Dikey homojensizliklere karşı duyarlılık	orta	zayıf
Haritalama amaçları	Hem dikey yapıların (bentler ve boşluklar gibi) hem de yatay yapıların (eşikler ve tortul tabakalar gibi) haritalanması için nispeten iyidir.	Dikey yapıların (bentler ve oyuklar gibi) haritalanması için çok iyi ve yatay yapıların (eşikler ve tortul tabakalar gibi) haritalanmasında nispeten zayıf.

3.4.2. Jeolojik malzemelerin elektrik özdirencini etkileyen faktörler

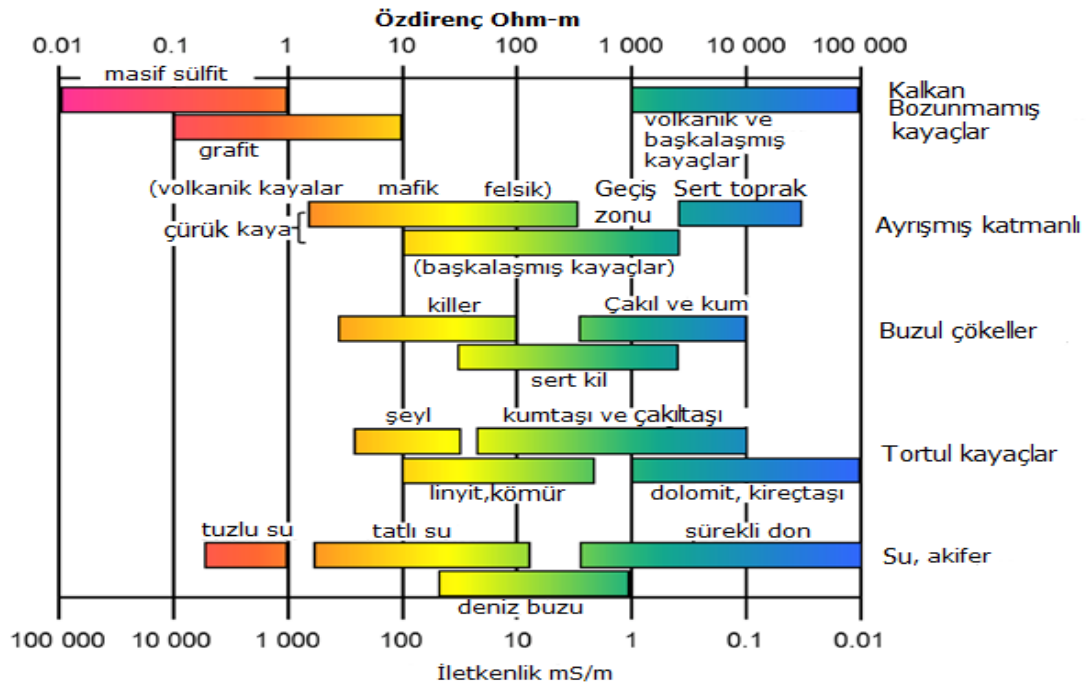
Elektrik özdirenç yöntemi en çok kullanılan jeofizik yöntemlerden biridir. Yeraltı suyu arama, maden arama, jeoteknik araştırmalar, kirlilik araştırmaları vb. ancak bunlarla sınırlı olmamak üzere çeşitli amaçlar için kullanılır.

Jeolojik bir malzemenin elektriksel iletkenliğini veya özdirencini etkileyen faktörlerin anlaşılması, elektriksel ölçümlerin sonuçlarını anlamamıza yardımcı olur. Genel olarak jeolojik malzemelerin elektriksel iletkenliğini etkileyen faktörler; bireysel bileşenlerin elektriksel iletkenliği, bileşenlerin geometrik dağılımı ve bileşenler arasındaki etkileşimler. Bu üç faktör, aşağıdaki gibi faktörlere ayrılabilir: parçacık boyutu dağılımı, mineraloji, boşlukların düzenlenmesi (gözeneklilik, gözenek boyutu dağılımı, bağlanabilirlik), su doygunluk derecesi (su içeriği), sıvının elektrik direnci (çözünen konsantrasyonu) ve sıcaklık. Bu faktörler aşağıda kısaca açıklanmıştır.

1. Bireysel bileşenlerin elektriksel iletkenliği.

Tek tek bileşenlerin mineralojisi, ortam yoluyla elektrik iletim mekanizmasının türünü belirler. Jeolojik bir malzeme üzerinden elektrik iletiminin üç mekanizması vardır ve bunlar; iyonik iletim, elektronik iletim ve yüzey iletimidir.

İyonik iletim, uygulanan bir elektrik alanına tepki olarak yüklü iyonların hareketinden kaynaklanır. Yakın yüzeydeki çoğu malzeme yalıtkan olduğundan, yeraltı suyu yoluyla iyonik iletim, ölçülen elektriksel iletkenliğin çoğunlukla nedenidir. Elektronik iletken malzemeler iyonik iletken malzemedен daha iletken ve bu nedenle mineralojisinde metal içeren malzemeler, içermeyenlere göre genellikle iletkenlerdir. Malzemenin iletkenliği genellikle metallerin ve metalik minerallerin, killerin ve yeraltı suyunun varlığıyla değişir (Butler, 2005). Jeolojik malzemelerin tipik iletkenlik ve özdirenç aralığı için Şekil 3.11.'e bakınız.



Şekil 3.11. Kayaçların ve jeolojik malzemelerin Elektrik Özdirenci ve İletkenliği (Palacky, 1987).

2. Bileşenlerin geometrik dağılımı.

Jeolojik malzeme bileşenlerinin geometrik dağılımı, malzemenin özdirencini etkileyen çok önemli bir faktördür. Bu, birkaç yıldır araştırma konusu olmuştur. Malzeme bileşenlerinin geometrik dağılımının malzemenin özdirencini nasıl etkilediğine dair çok sayıda araştırma vardır. Bazı yazarlar, çalışmalarında bu yönü ayrıntılı olarak tartışmışlardır (Butler, 2005). Aşağıda bu tez çalışmasıyla ilgili genel özet yer almaktadır.

Archie yasası ve modifikasyonu, bu araştırma alanında çalışan herkes tarafından bilinir ve bu araştırma alandaki yayınlanmış araştırmaların hemen hemen hepsinde alıntılanmıştır. Archie yasası, jeolojik malzemenin özdirencini boşlukların düzenlenmesi (gözeneklilik, gözenek boyutu dağılımı, bağlanabilirlik), su doygunluk derecesi (su içeriği) ve sıvının elektrik özdirenci (çözünen konsantrasyonu) ile ilişkilendirir. Genel olarak konuşursak, Archie yasası bize jeolojik malzemenin elektrik özdirencini veya iletkenliğini etkileyen çeşitli faktörlere bağlamanın matematiksel yollarını verir.

Archie yasasına göre, doymuş kayanın özdirenci (ρ_o), suyun ölçülen özdirenciyle (ρ_w) orantılıdır.

$$\rho_o = F\rho_w \quad (3.31)$$

Burada F orantı sabitidir.

$$F = \phi^{-m} \quad (3.32)$$

Burada m sementasyon faktörüdür. Samouëlian ve ark., 2005'e göre F, kayanın gözenekliliğidir ve gözenek geometrisine bağlıdır.

Wyllie ve Gregony, 1953, yukarıdaki 3.32 denklemini değiştirdi ve aşağıdaki 3.33 denkleminde gösterildiği gibi a sabitini dahil etmiştir.

$$F = a\phi^{-m} \quad (3.33)$$

Yukarıdaki 3.33 denkleminde, boşluk suyu özdirenci ve a ve m sabitleri bilindiğinde, özdirenç değerinden gözenekliliğin hesaplanabileceği anlamına gelir. Hesaplanan gözeneklilik, "görünür" bir gözeneklilik değeri olarak düşünülmelidir, çünkü Archie yasası, gaz mevcudiyeti olasılığı hariç tüm boşlukların suyla dolu olduğunu varsaymaktadır (Samouëlian ve ark., 2005).

Kaya örneğinin tamamen doymamış olması durumunda, denklem 3.31 aşağıdaki gibi değiştirilir.

$$\rho_t = I\rho_o \quad (3.34)$$

ρ_t kısmen doymuş kayanın özdirenci iken, ρ_o tamamen doymuş kayanın özdirencidir ve I özdirenç indeksidir. Özdirenç indeksi aşağıdaki gibi verilmiştir.

$$I = S_w^{-n} \quad (3.35)$$

Burada n doygunluk üssüdür.

Samouëlian ve ark., 2005'te S, doygunluk derecesidir ve n, doygunluk derecesi ile ilgili bir parametredir. Yukarıdaki tüm denklemleri birleştirerek ve ρ_t 'yi denklemin konusu yaparak, aşağıda yeni bir denklem elde ederiz.

$$\rho_t = a\rho_w\phi^{-m}S_w^{-n} \quad (3.36)$$

Yukarıdaki denklem 3.36'dan, ortamın özdirencinin ortamdaki çeşitli gözeneklerin ağına bağlı olduğunu görebiliriz. Ayrıca Butler, 2005'in de belirttiği gibi; Jeolojik bir malzemede çok düşük doygunluklarda suyun dağılımının elektrik direnci üzerinde büyük etkisi vardır.

3. Bileşenler arasındaki etkileşim.

Bileşenler arasındaki etkileşim, bir jeolojik malzemenin bileşenleri arasındaki fiziksel, kimyasal ve biyolojik etkileşimdir. Bu etkileşim, jeolojik malzemelerin elektriksel iletkenliğinde değişikliklere neden olur.

Bakteri toplulukları, jeolojik malzemenin katı ve sıvı bileşeni arasındaki etkileşim, malzemenin elektriksel özelliklerinde önemli değişikliklere neden olabilir (Sauck ve ark., 1998, Atekwana ve ark., 2000, Lucius, 2000, Sauck, 2000 ve Werkema ve ark., 2003).

Diğer bir etkileşim ise katı/akışkan ara yüzeyinde gerçekleşen etkileşimdir. Bazı literatürde yüzey iletimi olarak adlandırılır. Yüzey iletimi, katı ve akışkan bileşenler arasındaki ara yüzde oluşan elektriksel çift katmandaki yükün hareketini içerir. Bu tür etkileşim, jeolojik malzemenin tatlı su ve/veya geniş yüzey alanları içerdiği yakın yüzeyde özellikle önemlidir (Butter, 2005).

4. Sıcaklık

Sıcaklık, yağın iletkenliğini etkiler. Yağın özgül iletkenliğinin sıcaklıktaki artışla doğru orantılı olduğu Kardos ve Pietrikova, 2016 tarafından rapor edilmiştir. Bu nedenle, sıcaklık arttıkça elektriksel özdirenç azalır.

Sonuçların yorumlanmasına yardımcı olmak için verilerin zamana bağlı ters çevrilmesinden sonra piksel özdirenç değerlerine sıcaklık düzeltmesi uygulanır. Hermans ve ark., 2012, bir akiferin elektrik özdirencindeki azalmayı sıcaklıktaki bir artışla ilişkilendirmiştir. Hayley ve ark., 2007'ye göre, çözünen madde hareketlerini veya toprak nemini izlemek için özdirenç kullanılırken sıcaklık değişimlerinin ihmal edilmesi, ERT sonuçlarının yorumlanmasında hatalara yol açabilir. Keller ve Frischkrech, 1966'ya göre, sıcaklık arttıkça ve azaldıkça özdirenç her 1°C için sırasıyla %2,5 azalır veya artar. Bu çalışmada, 20°C referans sıcaklık kullanılarak piksel özdirenç (inversiyon sonrası) değerleri üzerinde sıcaklık düzeltmesi yapmak için aşağıdaki denklem kullanılmıştır.

$$\rho = \rho_T [1 + \beta(T - T_o)] \quad (3.37)$$

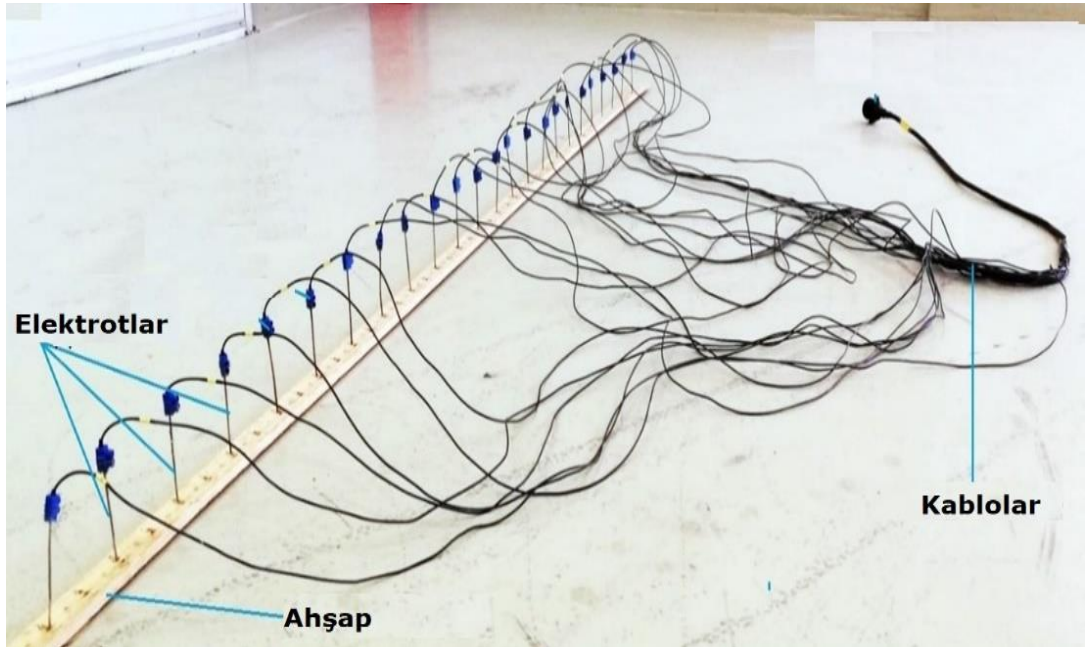
ρ_T ve T sırasıyla piksel özdirenci ve kum sıcaklığı olduğunda, $T_o = 20^\circ\text{C}$ 'dir (Shevnin ve ark., 2007; Heenan ve ark., 2015). β ise $0.0177 \text{ 1/}^\circ\text{C}$ 'ye eşit bir sıcaklık katsayısıdır (Beklenmishev, 1963, Shevnin ve ark., 2007).

Laboratuvar sıcaklığı ve kum sıcaklığı sırasıyla HTC-2 sıcaklık sensörü ve AMTAST (AMT-300) toprak ölçer ile ölçülmüştür. Giriş ve çıkış suyu sıcaklıkları ADWA AD 12 pH/sıcaklık ölçer ile ölçülmüştür. Sıcaklık verileri her beş günde bir yaklaşık 12:00 – 15:00 saatleri arasında toplanmıştır. Tüm sıcaklık verileri üç kez toplandı ve ortalaması kaydedildi. HTC-2 sıcaklık sensörü, deney boyunca laboratuvar masasına yerleştirildi. Laboratuvar sıcaklığı beş dakikalık aralıklarla üç kez kaydedildi. Ortalama laboratuvar sıcaklığı kaydedilir ve o gün için laboratuvar sıcaklığı olarak sunulur. AMTAST toprak ölçer, toprak sıcaklığı ölçümleri için kullanılan 20 cm uzunluğunda bir sensöre sahiptir. Senor, yaklaşık 20 cm derinlikte ve kaydedilen

noktanın sabit sıcaklık değerinde tam olarak kuma sokulur. Bu, kum içindeki diğer iki nokta için yapıldı ve ortalama değer kaydedildi ve kum sıcaklığı olarak sunuldu. Su giriş ve çıkış sıcaklık değerleri beşer dakikalık aralıklarla üç kez ölçölmüş ve ortalaması alınarak günün su giriş ve çıkış sıcaklığı olarak sunulmuştur. Sıcaklık düzeltmesi için sadece kum sıcaklığı kullanılmıştır. Sıcaklık ölçömleri, ERT veri toplama zamanına denk gelecek şekilde alınmıştır.

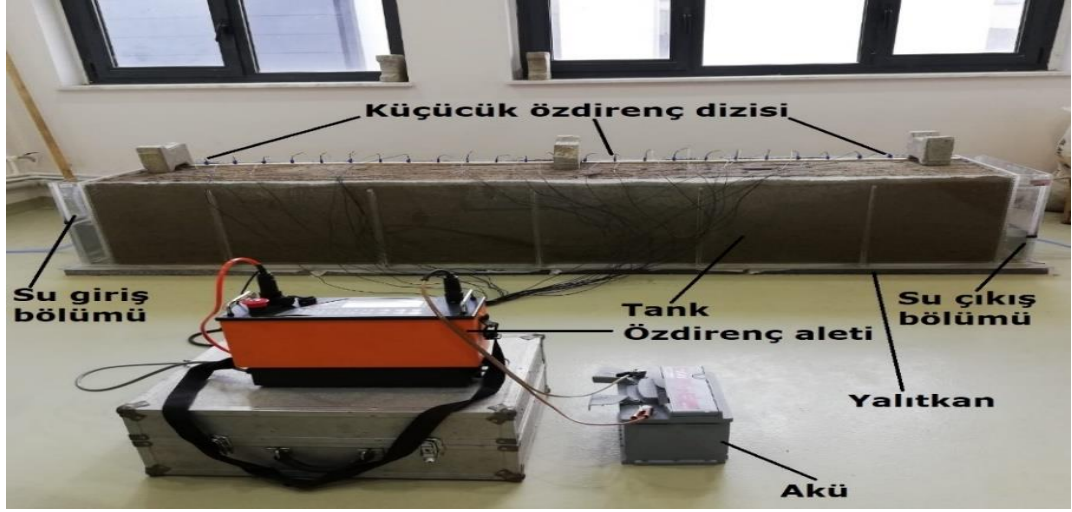
3.4.3. ERT verileri ve veri işlemleri

Her iki deney için ERT verileri ARES GF çok kanallı rezistivite aleti kullanılarak toplanmıştır. Bu alışma için 24 elektrottan oluşan küçük bir özdirenç elektrot dizisi özel olarak tasarlanmış (şekil 3.12.) ve ERT veri alımında kullanılmıştır. Küçük özdirenç elektrot dizisi kablolara vidalı terminal köprüsü ile bağlanan 24 bakır tel (ap 2 mm ve uzunluk 10 cm) kullanılarak tasarlanmıştır.

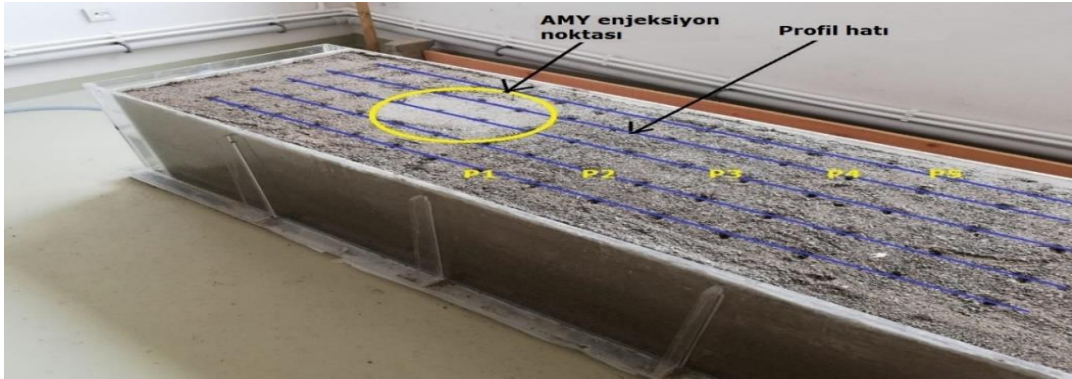


şekil 3.12. Küçük (mikro) özdirenç elektrot dizisinin görüntüsü.

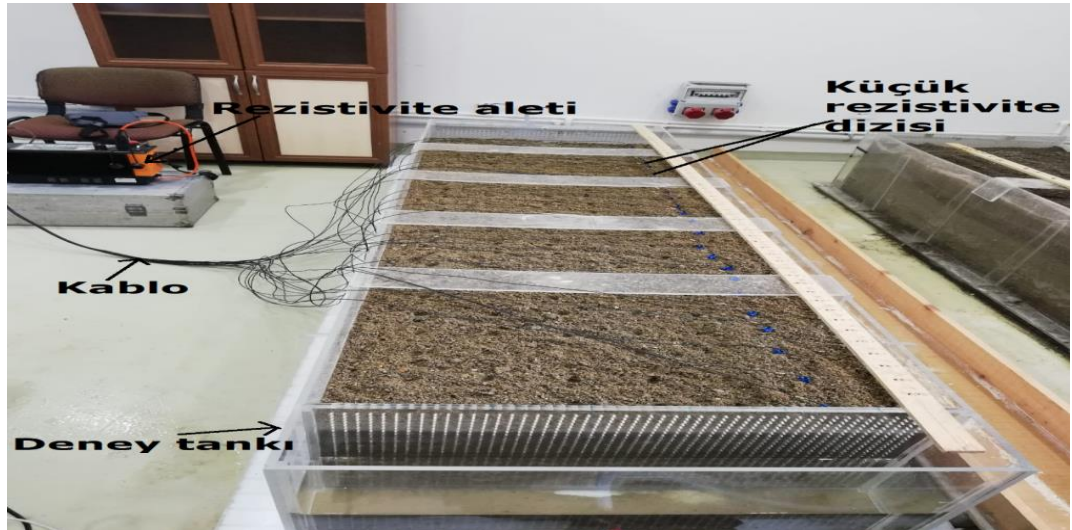
Kablolar daha sonra monte edilerek ARES GF cihazına özel bir soket ile bağlanmıştır. Her biri arasında 10 cm'lik mesafe bulunan elektrotlar kum modelinin uzunluğu boyunca yerleştirilerek sabitlenmiştir (şekil 3.13., 3.14. ve 3.15.).



Şekil 3.13. Özdirenç verisi toplamak için kurulan laboratuvar düzeneği (deney A).



Şekil 3.14. Profil hatlarını gösteren deney (A) tankının görüntüsü.



Şekil 3.15. Rezistivite verisi toplamak için laboratuvar kurulumu (deney B).

Veriler Wenner-Schlumberger dizilimi kullanılarak alınmıştır. ERT verileri üzerinde ResIpy adlı açık kaynaklı bir yazılım kullanılarak zaman-atlamalı (time-lapse) ters çözüm gerçekleştirilmiştir (Boyd ve ark., 2019). Bu yazılım, öz direnç verilerinden yeraltı yapısının 2B ve 3B modelini üretmek için kısıtlı en küçük kareler yönteminin farklı türlerini kullanmaktadır.

Yazılım, bir grafik kullanıcı ara yüzü (GUI) ve Python uygulama programı ara yüzünden oluşur (Blancly ve ark., 2020). Binley, 2020'nin R2, CR2, R3t ve CR3t (Boyd ve ark., 2019) ters çevirme kodlarına dayanmaktadır. Binley, 2020'nin tersine çözüm kodları, 2B sonlu elemanlar ağı ile 3B yük akımına dayalı olarak ölçülen görünür öz direnç verilerine ters bir çözüm sunar. Ters çözüm, ağırlıklı en küçük kare ile Occam tipi, düzenli optimizasyonu birleştiren bir objektif fonksiyonunun minimize edilmesiyle elde edilir (Constable ve ark., 1987). Occam ters çözümü, ölçüme mümkün olan en düzgün modelle uyar ve bu nedenle ters çevrilmiş modeller genellikle keskin değişiklikler göstermez (Kiflai ve ark., 2020). Modeller, elektrot noktaları arasında 2 düğüm ve 1.1 büyüme faktörü ile üçgen ağ üzerinde parametrelendirilmiştir. Tersine çevrilmiş modelin duyarlılığı, araştırma derinliği (DOI) yöntemi ile değerlendirilir. DOI, altındaki fiziksel özelliklerin veriler tarafından kısıtlanmadığı derinliği ölçmeye yardımcı olur (Oldenburg ve Li, 1999). DOI yöntemi, iki farklı homojen referans arka planına göre düzenlenmiş tek bir veri setini karşılaştırdı.

BÖLÜM 4. ARAŞTIRMA BULGULARI

4.1. Tek Seferlik Dökülme ile AMY Kirletilmesinin Bulguları

Deney, kumlu bir ortamda petrol borusunun veya tankın kazara kırılmasına benzeyecek şekilde yapılmıştır. GPR ve ERT bulguları bu bölümde sunulmaktadır.

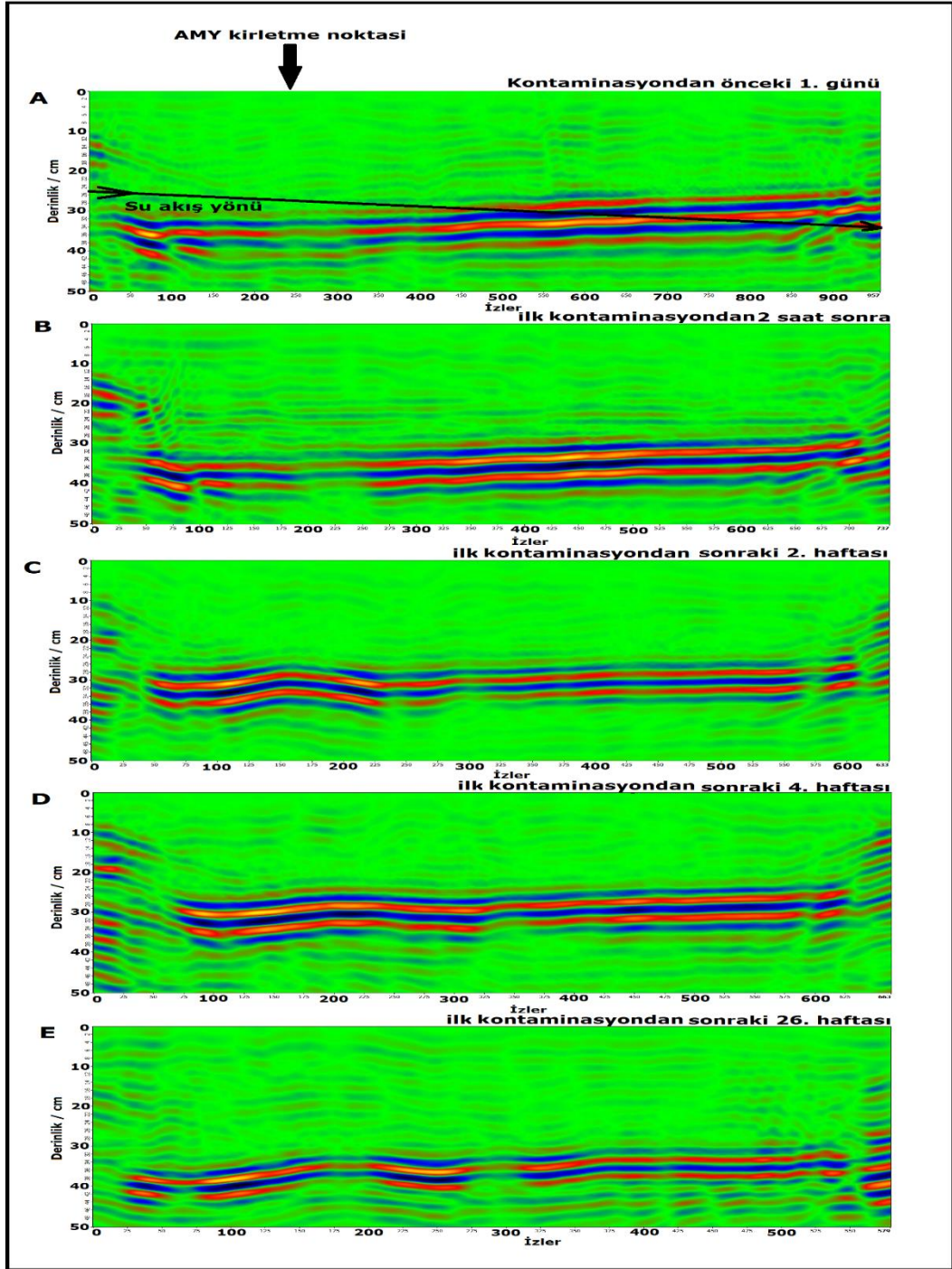
4.1.1. Yer radar bulguları

26 hafta süren deneylerimizde toplam 40 GPR profili elde edilmiştir. GPR, AMY enjeksiyonlarından önce ve sonra deneyi izlemek için kullanıldı. Her bir deney sırasında toplam beş takım GPR verisi elde edildi. Bu beş GPR ölçümü takımı, AMY enjeksiyonundan bir gün önce, ilk enjeksiyondan iki saat sonra, ilk enjeksiyondan iki hafta sonra, ilk enjeksiyondan dört hafta sonra ve son olarak ilk enjeksiyondan yirmi altı hafta sonra elde edildi. Şekil 4.1., 4.2. ve 4.3., deneylerden elde edilen 2D zamana bağlı GPR sonuçlarını göstermektedir.

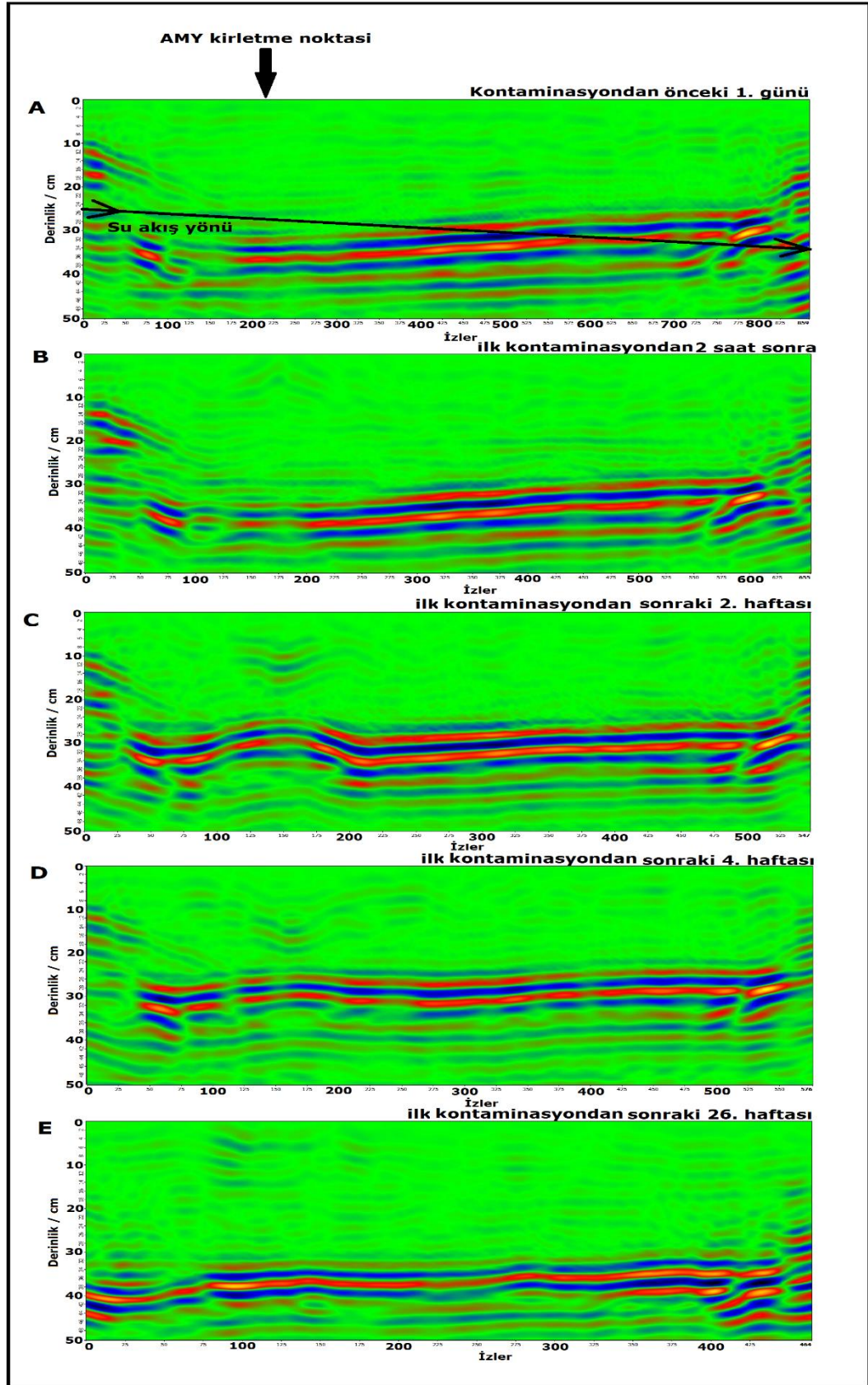
Her profil arasında 0,5 cm boşluk olacak şekilde sekiz profilli gruplar halinde 2 GHz anten ile 40 GPR profili elde edilmiştir. Bu deney sırasında kuruluma ilk olarak 1,5 litre AMY enjekte edildi. İlk enjeksiyondan 1 hafta sonra, kuruluma 2,5 litre AMY ek olarak enjekte edildi. Yani toplam 4 litre AMY kirletmesi yapıldı. Kurulum iki kez kirletilmiş olmasına rağmen, bu deney ikinci deneye kıyasla tek kirlenme olarak kabul edilir.

Sunum için 2B GPR sonuçları Profil 1 (Şekil 4.1.), Profil 5 (Şekil 4.2.) ve Profil 8'den (Şekil 4.3.) seçilmiştir. 3B GPR görüntüleri (radargramlar), birbirine paralel 8 adet 2B GPR profil verisinden elde edilmiştir. Deney sırasında elde edilen tüm 2B profillerden beş adet 3B GPR görüntüsü oluşturulmuştur (Şekil 4.4.).

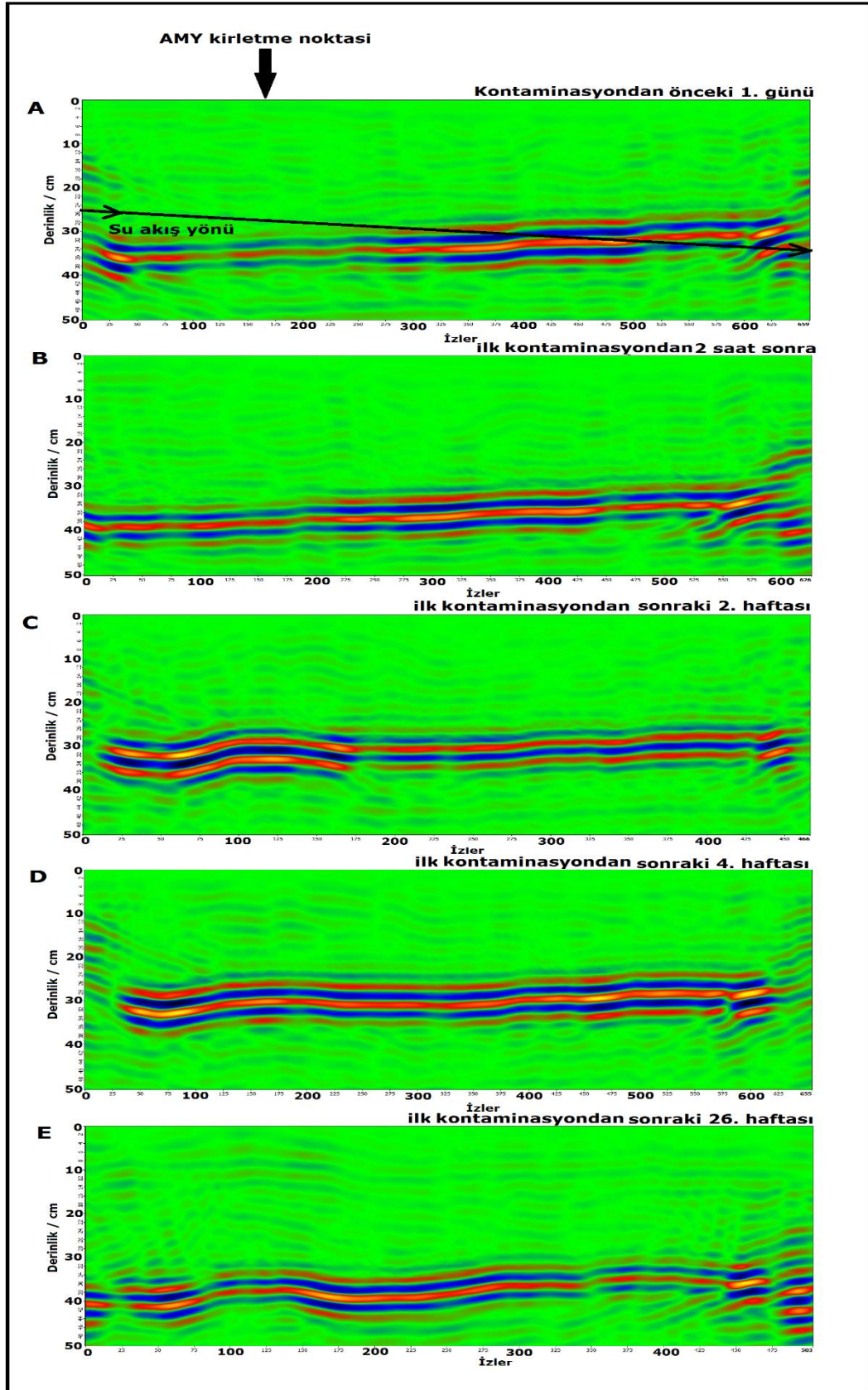
Şekil 4.1., 4.2. ve 4.3.'te gösterilen sonuçlar, (A) AMY enjeksiyonundan 1 gün öncedir, (B) ilk enjeksiyondan 2 saat sonradır, (C) ilk enjeksiyondan 2 hafta sonradır, (D) ilk enjeksiyondan 4 hafta sonra ve son olarak (E) ilk enjeksiyondan 26 hafta sonradır.



Şekil 4.1. Profil 1'deki AMY'nın zamana bağlı yayılım ve gelişimini gösteren 2B GPR sonuçları. Su akış yönü ok ile gösterilmiştir.



Şekil 4.2. Profil 5'deki AMY'nın zamana bağlı yayılım ve gelişimini gösteren 2B GPR sonuçları. Su akış yönü ok ile gösterilmiştir.



Şekil 4.3. Profil 8'deki AMY'nın zamana bağlı yayılım ve gelişimini gösteren 2B GPR sonuçları. Su akış yönü ok ile gösterilmiştir.

Şekil 4.1., 4.2. ve 4.3.'te bir takım yatay yansıma yapısını olduğunu göstermektedir. Yatay yansıma grupları, simüle edilmiş yeraltı suyu seviyesine karşılık gelmektedir. Yatay yansımalar yaklaşık 24 cm ila 46 cm arasındadırlar. Üstteki güçlü reflektörler su tablasını temsil etmektedirler. Reflektörler, radargramları üst doymamış ve alt doymuş kısımlar olmak üzere iki kısma ayırır. Güçlü yansıtıcılar, esasen doymamış kumdan doymuş kumlara geçişte yüksek geçirgenlikteki keskin değişimden kaynaklanır.

İlk AMY kirlenmesinden iki saat sonra elde edilen profil 1 ve 8 sonuçlarından (Şekil 4.1. B ve 4.3. B) yeraltı suyu seviyesi yansımasında bir bozulma olduğu gözlenmemiştir. Ancak profil 5'teki sonuçlardan (Şekil 4.2. B) 100-200 izleri arasında yeraltı suyu seviyesi yansımasında hafif bir bozulma olduğu gözlenmiştir. Profil 5'deki yeraltı suyundaki bozulma, ilk 1,5 litre AMY kirlenmesinden 2 hafta sonra yapılan 2,5 litrelik ilave kirlenmeyi müteakiben çok belirgindir (Şekil 4.2. C). Ancak o andan itibaren, yeraltı suyu seviyesi yansıması arka plana kıyasla çok fazla bozulmamıştır. Profil 1 ve 8'deki yeraltı suyundaki bozulma, ilk 1,5 litre AMY kirlenmesinden bir hafta sonra yapılan 2,5 litrelik ilave kirlenmeyi müteakiben çok belirgindir (Şekil 4.1. C ve 4.3. C). O andan itibaren, yeraltı suyu seviyesi yansıması arka plana kıyasla fazla bozulmuştur.

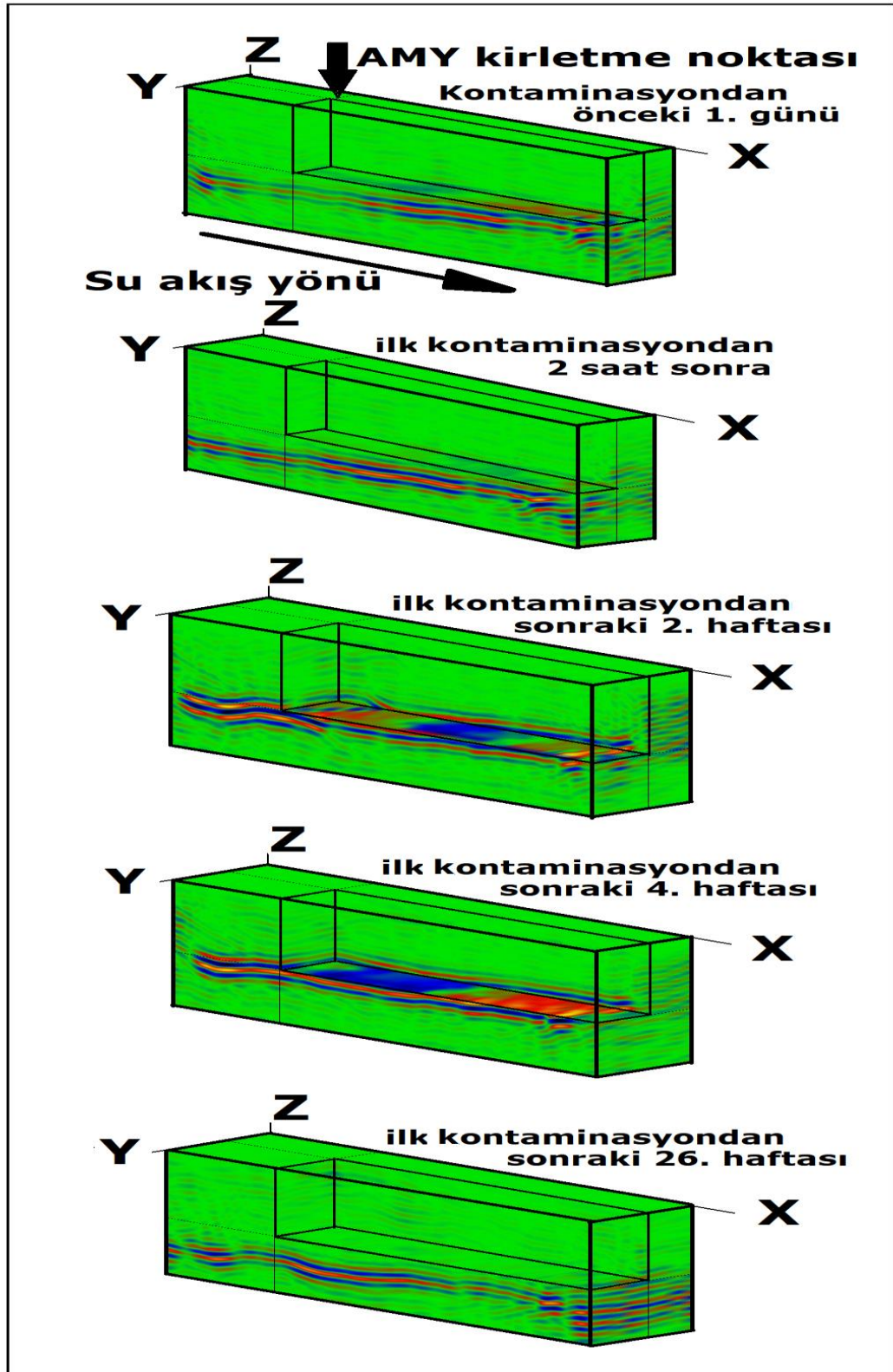
Profil 1 ve 8'deki sonuçlara göre (Şekil 4.1. B ve 4.3. B) AMY'nın ilk kirlenmesinden kaynaklanan kirlenmiş zon göstermemiştir. Ancak Profil 5 için AMY'nın ilk kirlenmesinden kaynaklanan kirlenmiş zon Şekil 4.2. B'nin derinlik ekseninde 0,0-11,0 cm arasında ve izler ekseninde 125,0-225,0 arasında görülebilir.

Profil 1 ve 8 sonuçlarından Şekil 4.1. ve 4.3.'nin C, D ve E şekillerinde AMY'nın ikinci kirlenmesinden kaynaklanan kirlenmiş zon, net olarak görülememiştir. Ancak kirlenmenin etkisi, yeraltı suyunun bozulmasının bir sonucu olarak açıkça görülebilir.

Profil 5 için AMY'nın ikinci kirlenmesinden kaynaklanan kirlenmiş zon net olarak görülmemiştir. Şekil 4.2. C, D ve E'deki anomaliler, Şekil 4.2. B'dekinden çok daha belirgindir. Çünkü C, D ve E ile işaretlenmiş şekillerden elde edilen görüntülerdeki

kirilenmiş zonun hacmi, Şekil B'dekinden daha büyüktür. Bano ve ark., 2009 tarafından öne sürüldüğü gibi kirlenme sonucu reflektörlerin deformasyonu veya bozulması, kirlenme öncesi temiz tankın dibinden gelen yansımanın, tankın kirlenmesi nedeniyle deforme olduğunu şeklinde açıklanabilir.

Deneyin zamana bağlı 3B radargramı, AMY'nın hem dikey hem de yanal göçünü açıkça göstermektedir. 3B sonuçlar, yukarıda gösterilen 2B sonuçlarla uyumludur. Hem 2B hem de 3B sonuçlardan, AMY'nın başlangıçta dikey (baskın olarak) ve biraz yatay göç ettiği anlaşılmaktadır. Bir süre sonra yanal göç baskın hale gelmiştir. Bu, Şekil 4.1.E, 4.2.E, 4.3.E ve 4.4.E'deki (ilk kirlenmeden 26 hafta sonra) radargramda profil 5'in yeraltı suyu bozulması göstermemesinin, ancak profil 1 ve 8'in önemli yeraltı suyu bozulması göstermesinin nedenlerinden biri olabilir.



Şekil 4.4. AMY'nın zamana bağlı yayılım ve gelişimini gösteren 3B GPR sonuçları. Su akış yönü ok ile gösterilmiştir.

4.1.2. ERT bulguları

26 hafta içinde toplam 100 adet 2B ERT profil verisi toplandı. Bu 100 adet 2B ERT profili 20 adet veri setinden oluşur ve her set 5 profilden oluşur. Her veri setindeki beş 2B profilden yalnızca Profil 1, Profil 3 ve Profil 5'teki veriler seçildi ve bu tezde sunuldu (Profillerin konumu Şekil 3.17.'de gösterilmiştir). 100 adet 2B verisinden toplam 20 adet 3B ERT sonucu elde edildi. Burada yalnızca altı 3B sonuç seçildi ve sunuldu.

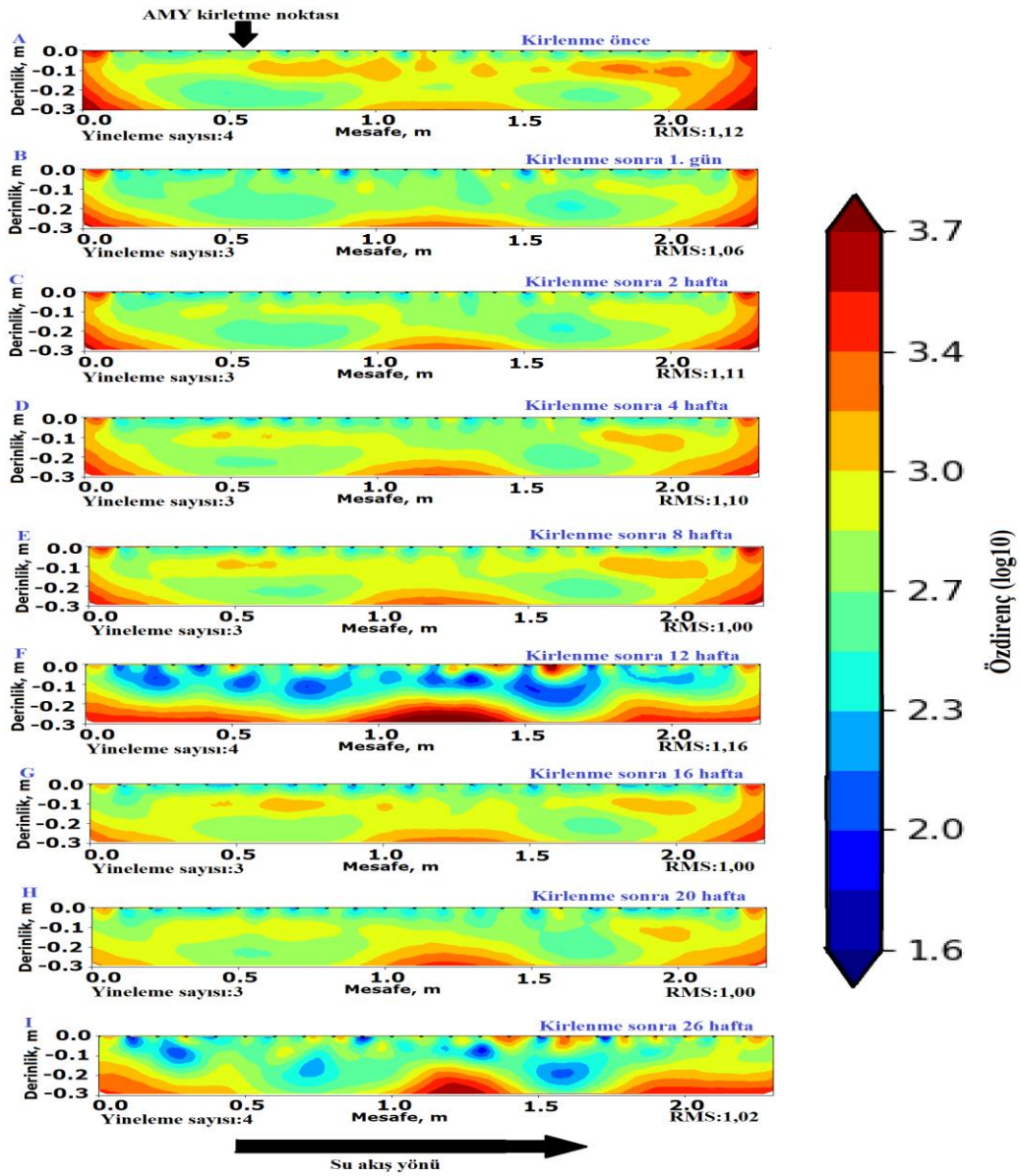
Arka plan ERT sonuçları, tank akifer sisteminin stratigrafik unsurlarını ortaya çıkardı (Şekil 4.5.-4.10.). Şekil 4.5.-4.10., yüksek (doymamış) ve düşük (doymuş) özdirenç bölgelerini göstermektedir. AMY, kum ve suya göre daha özdirençlidir ve bu nedenle akifer sistemi üzerindeki dinamik etkisi ERT sonuçları ile ortaya konmuştur. ERT sonuçları (Şekil 4.6.-4.11.) yağın hem dikey (Şekil 4.6.'deki siyah ok işareti) hem de yatay (Şekil 4.6.'deki mavi ok işareti) yönde göç ettiğini göstermiştir.

Profil 1'den elde edilen ERT sonuçları (Şekil 4.5. ve 4.6.) AMY'nin hem dikey hem de yatay göçünü göstermiştir. Şekil 3.13.'nün dikkatli bir şekilde incelenmesiyle, tankın iç duvarında AMY kirliliği görülebilir. Bu, AMY'nin Profil 1'in ötesine tankın duvarlarına doğru göç ettiğini göstermiştir. Tank duvarları AMY'nin yatay geçişini sınırlamış olabilir.

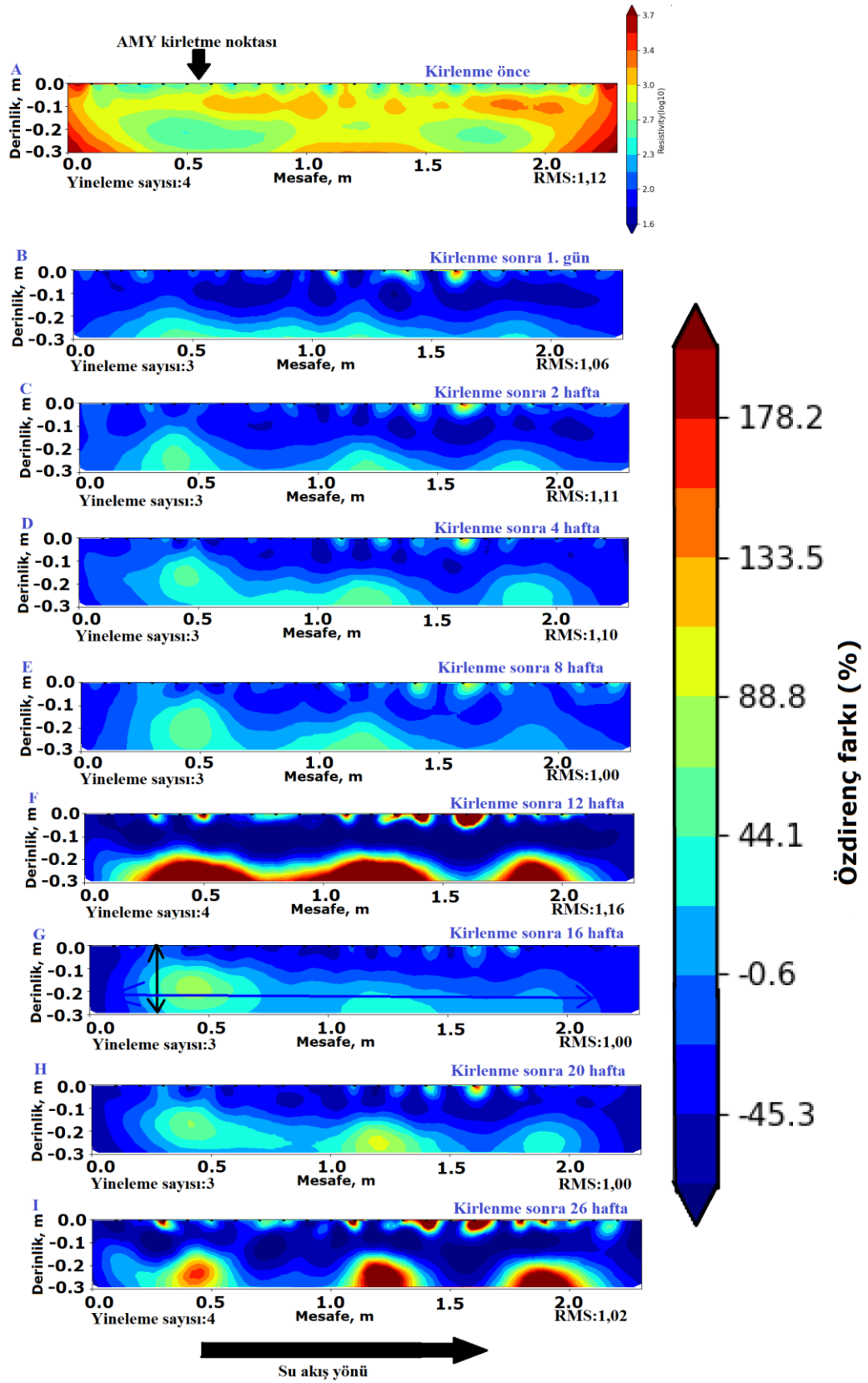
Profil 1'in ERT sonuçlarından (Şekil 4.5. ve 4.6.) hem kirlenmiş hem de kirlenmemiş bölümlerin zamana bağlı özdirençte dramatik bir değişiklik gösterdiği görülebilir. Özdirençte 1. günden 12. haftaya kadar sürekli bir artış (Şekil 4.5. ve 4.6.) gözlenmiştir. 12. hafta ile 20. hafta arasında özdirençte azalma olmuştur. 16. hafta 20. haftaya göre daha yüksek özdirenç göstermiştir. 20. hafta ile 26. hafta arasında özdirençte başka bir artış olmuştur. Şekil 4.6., Profil 1 için göreceli (değişiklikler) özdirenç haritasını gösterir ve kirlenmenin zamana bağlı davranışının daha net bir görüntüsünü verir. 12. haftada, yaklaşık %222,9 ile özdirençte en yüksek değişim (%) kaydedilmiştir. Profil 1 için özdirençteki değişim yüzdesi yaklaşık %222,9 ile yaklaşık %-90,0 arasında değişmiştir. Bu deneyin Profil 1'de kaydedilen özdirenç değerleri 1,6

– 3,7 log10 Ohm-m arasındadır. Bu sonuçlar, AMY'nin arka plana kıyasla yüksek öz dirençle ilişkili olduğunu göstermektedir.

Profil 3, deney düzeneğini 2 eşit parçaya böler. Profil, Şekil 3.13.'de görüldüğü gibi kirlenme noktasının merkezinden geçer. Şekil 4.8., açık bir göç yolunu göstermektedir, çünkü göreceli öz direnç, kesin öz dirençten ziyade kimyasal değişime duyarlıdır (Şekil 4.7.). Profil 3 için ERT sonuçları (Şekil 4.7. ve 4.8.) AMY'nin hem dikey hem de yatay yönlerde göç ettiğini göstermiştir. Yatay göç daha baskındır.



Şekil 4.5. Profil 1'de ölçülen elektrik öz direnç değerlerinin zamana bağlı gelişimini gösteren 2B ERT sonuçları. Su akış yönü ok ile gösterilmiştir.



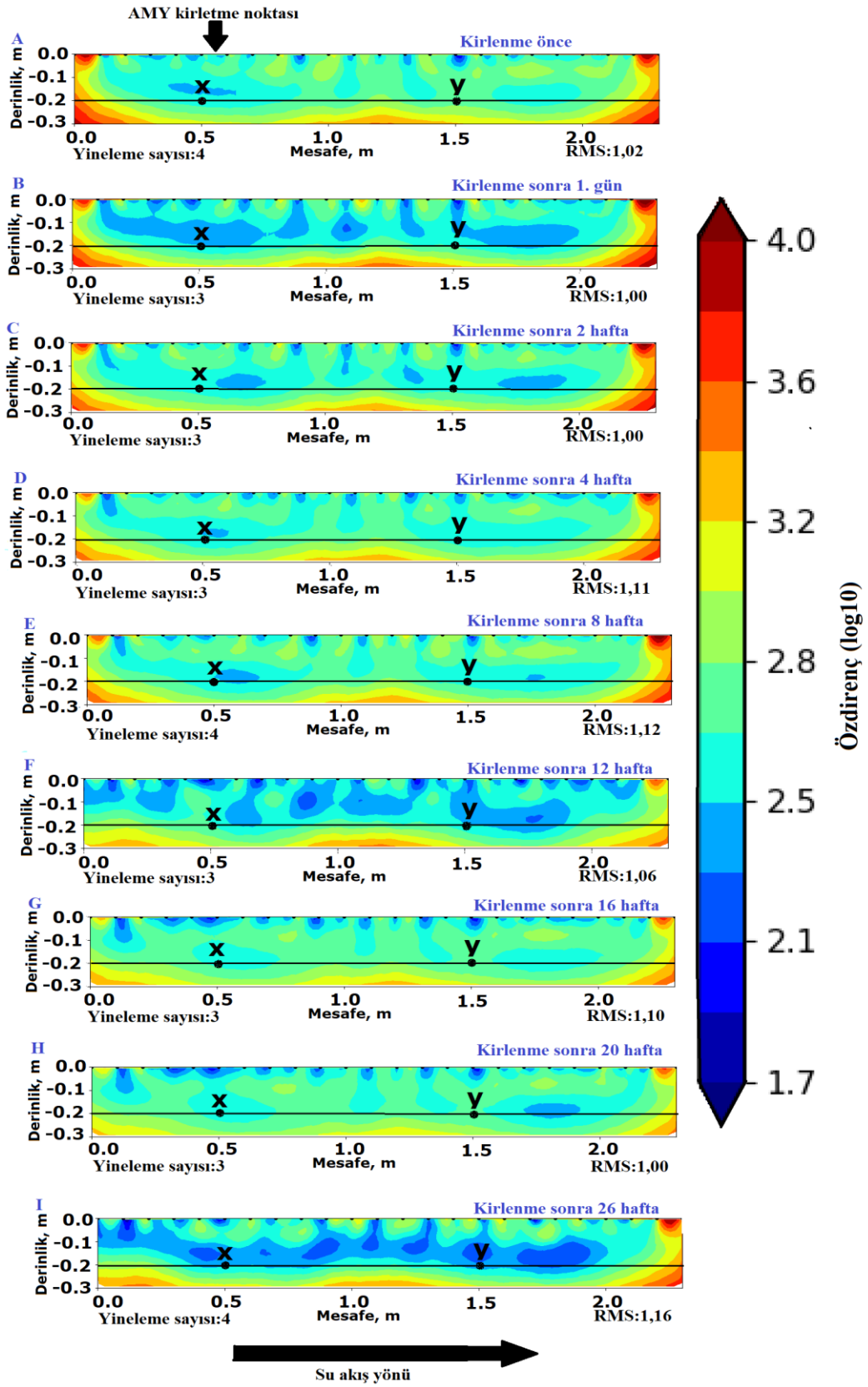
Şekil 4.6. Profil 1'de ölçülen elektrik özdirenç değerlerinin zamana bağlı yüzde değişimleri gösteren 2B ERT sonuçları. Dikey geçişler siyah okla gösterilir. Yatay geçişler mavi okla gösterilmiştir.

Profil 3'ün ERT sonuçlarından (Şekil 4.7. ve 4.8.), deney düzeneğinin hem kirlenmiş hem de kirlenmemiş bölümlerinin zamana bağlı özdirençte ciddi bir değişiklik gösterdiği görülebilir. 1. günden 2. haftaya kadar özdirençte sürekli bir artış (Şekil 4.7. ve 4.8.) vardı. 2. hafta ile 4. hafta arasında özdirençte azalma oldu. 4. hafta ile 20. hafta arasında özdirençte kademeli bir artış. 20. hafta ile 26. hafta arasında özdirençte ciddi bir değişiklik oldu. Şekil 4.8., Profil 3 için özdirençteki değişimi gösterir ve zamanla kirlenmenin davranışının daha net bir resmini verir. Kirlenme noktası ile ilgili olarak, 2. hafta özdirençte yaklaşık %105,9 ile en yüksek değişimi (%) kaydetti. Tüm kurulum göz önüne alındığında, Profil 3 için özdirençteki değişim yüzdesi yaklaşık %142,2 ile yaklaşık %-111,6 arasında değişmiştir. Bu deneyin Profil 3'te kaydedilen özdirenç değerleri $1,7 - 4,0 \log_{10}$ Ohm-m arasındadır. Bu sonuçlar, AMY'nin arka plana kıyasla yüksek dirençle ilişkili olduğunu gösterdi.

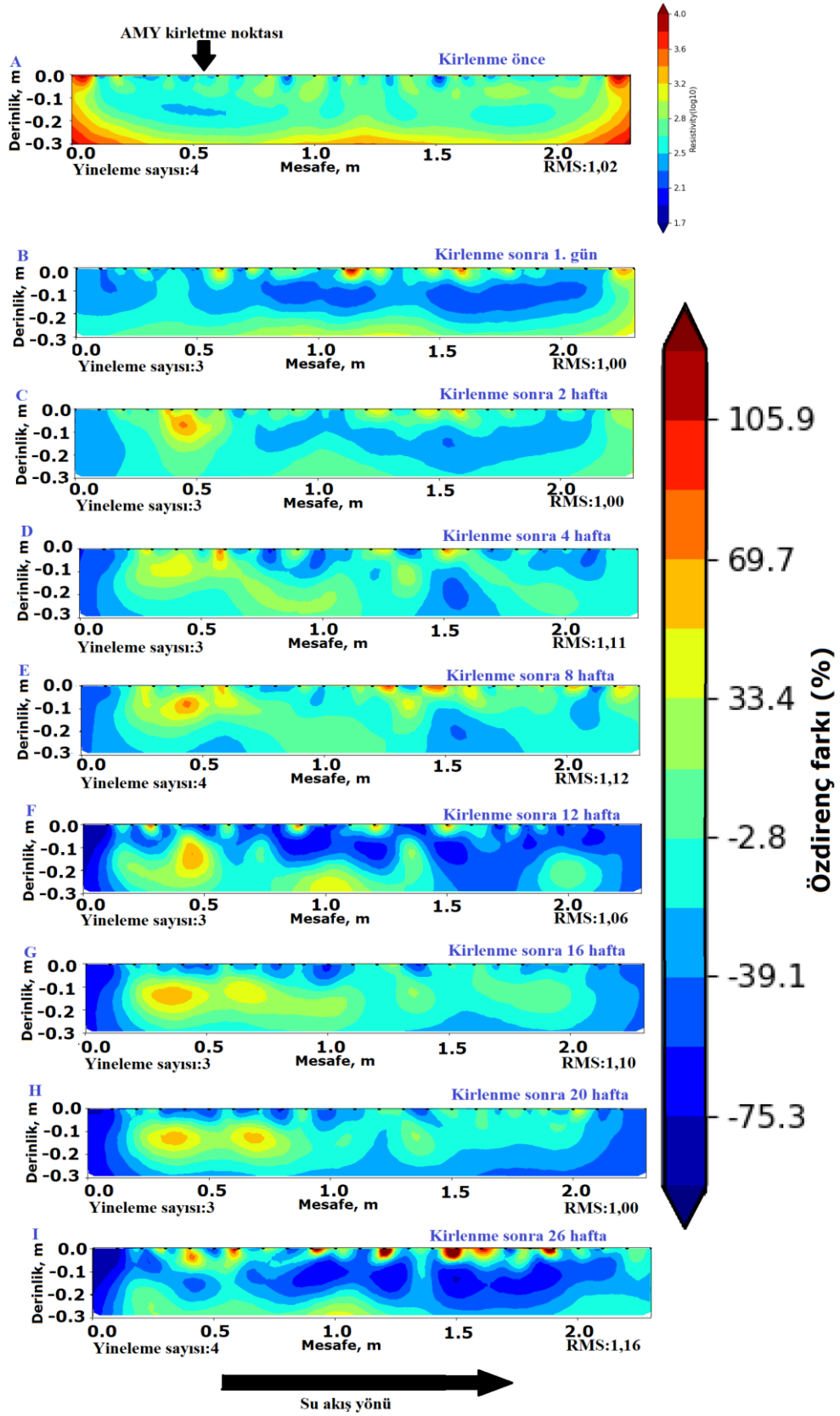
Profil 5, deney düzeneğindeki son ERT profilidir. Profil 5 sonuçlarındaki göçlerin kanıtı, AMY'nin enjeksiyon noktasından tankın her iki tarafına göç ettiği anlamına gelir. Şekil 4.10.'dan, Profil 5'teki geçişin Profil 1 ve Profil 3'e kıyasla çok fazla olmadığı öne sürülmüştür. Profil 5 için ERT sonuçları (Şekil 4.9 ve 4.10) ayrıca AMY'nin hem dikey hem de yatay yönlerde göç ettiğini ancak Profil 1 ve Profil 3'ün sonuçlarında ortaya çıkandan daha az olduğunu göstermiştir. Bu profilde de yatay göç baskındır.

Profil 5'in ERT sonuçlarından (Şekil 4.9. ve 4.10.) deney düzeneğinin hem kirlenmiş hem de kirlenmemiş bölümlerinin özdirençte zamana bağlı değişiklik gösterdiği görülebilir. Özdirençte 1. günden 2. haftaya kadar ilerleyici bir artış (Şekil 4.9. ve 4.10.) vardı. 2. hafta ile 8. hafta arasında özdirençte azalma oldu. 8. hafta ile 12. hafta arasında özdirençte ciddi bir artış oldu. Ayrıca 12. hafta 20. haftadan itibaren özdirençte ciddi bir düşüş. 20. hafta ile 26. hafta arasında özdirençte artış oldu. Şekil 4.10., Profil 5 için özdirençteki değişimi göstermekte ve zamanla kirlenmenin davranışını daha net bir şekilde göstermektedir. 12. hafta, özdirençte yaklaşık %265,7 ile en yüksek değişimi (%) kaydedildi. Profil 5 için özdirençteki değişim yüzdesi yaklaşık %265,7 ile yaklaşık % -102,5 arasında değişmiştir. Bu deneyin Profil 5'te kaydedilen özdirenç değerleri $1,8 - 3,9 \log_{10}$ Ohm-m arasındadır.

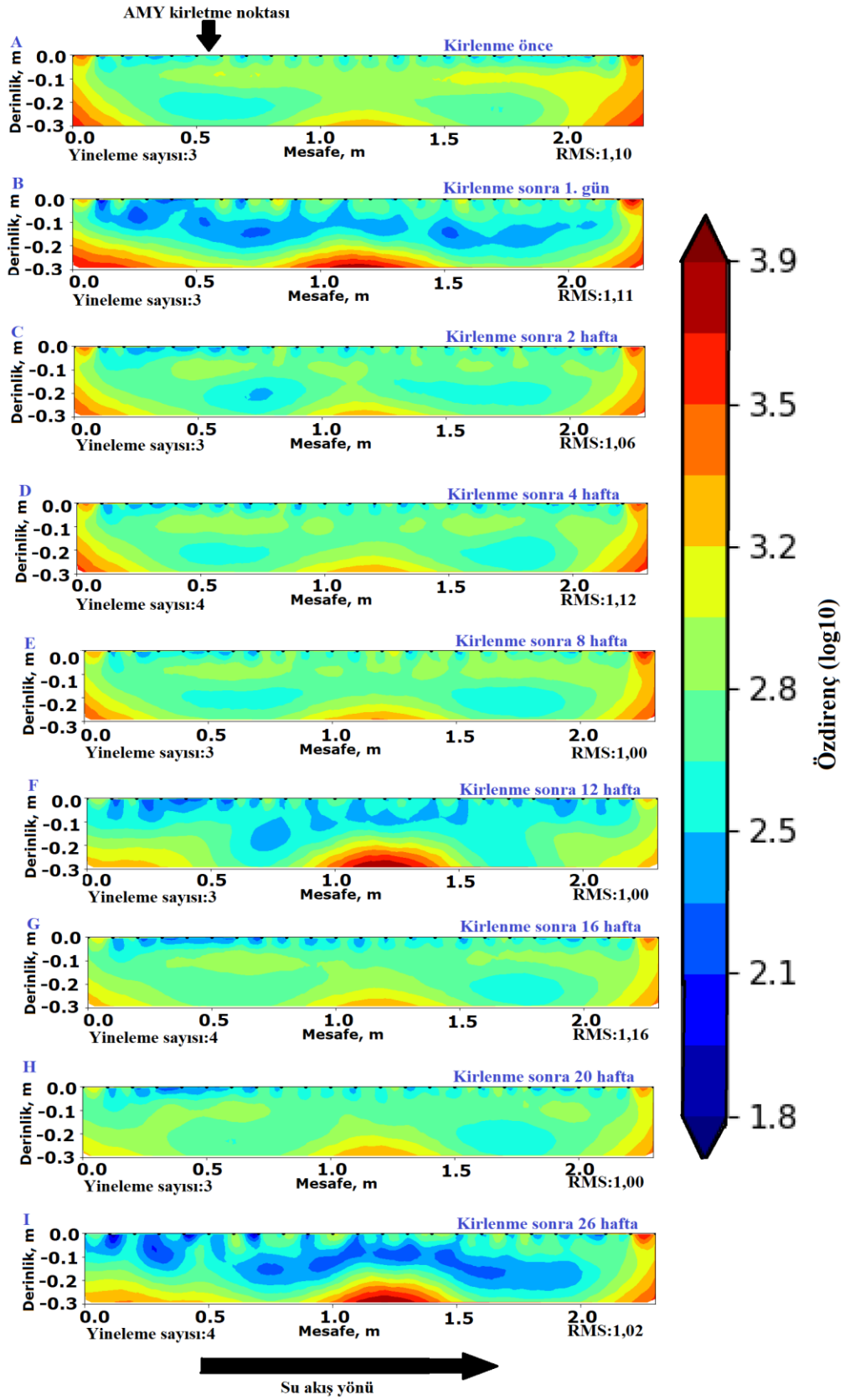
3B ERT görüntüsü (Şekil 4.11.), özdirenç değerlerinin 1,75 ile 3,65 \log_{10} Ohm-m arasında olduğunu göstermektedir. ERT sonuçlarının genel özelliklerini daha iyi anlamak için sadece 3D ERT modelinin özdirençli bölümü seçildi. 3D modelde kaydedilen özdirenç değerleri 1,75 – 3,65 \log_{10} Ohm-m aralığındadır. Özdirenç değerlerinin aralığı göz önüne alındığında orta nokta 2,70 \log_{10} Ohm-m'dir. Herhangi bir noktayı 2,70 \log_{10} Ohm-m değerinin altında ise iletken ve 2,70 \log_{10} Ohm-m değerinin üzerinde ise özdirençli olarak kabul edildi. Şekil 4.11., 26 haftalık deneyde elde edilen ERT modelinin özdirençli bölümünü göstermektedir. Şekil 4.11.'den, arka planın sonucu, diğer sonuçların herhangi birinden çok daha özdirençlidir. Kirlenme noktasından uzaktaki bölge, deney boyunca özdirenç özellikleri gösterir. 3B ERT modeli zamana bağlı özdirençte genel bir azalma olduğunu göstermektedir.



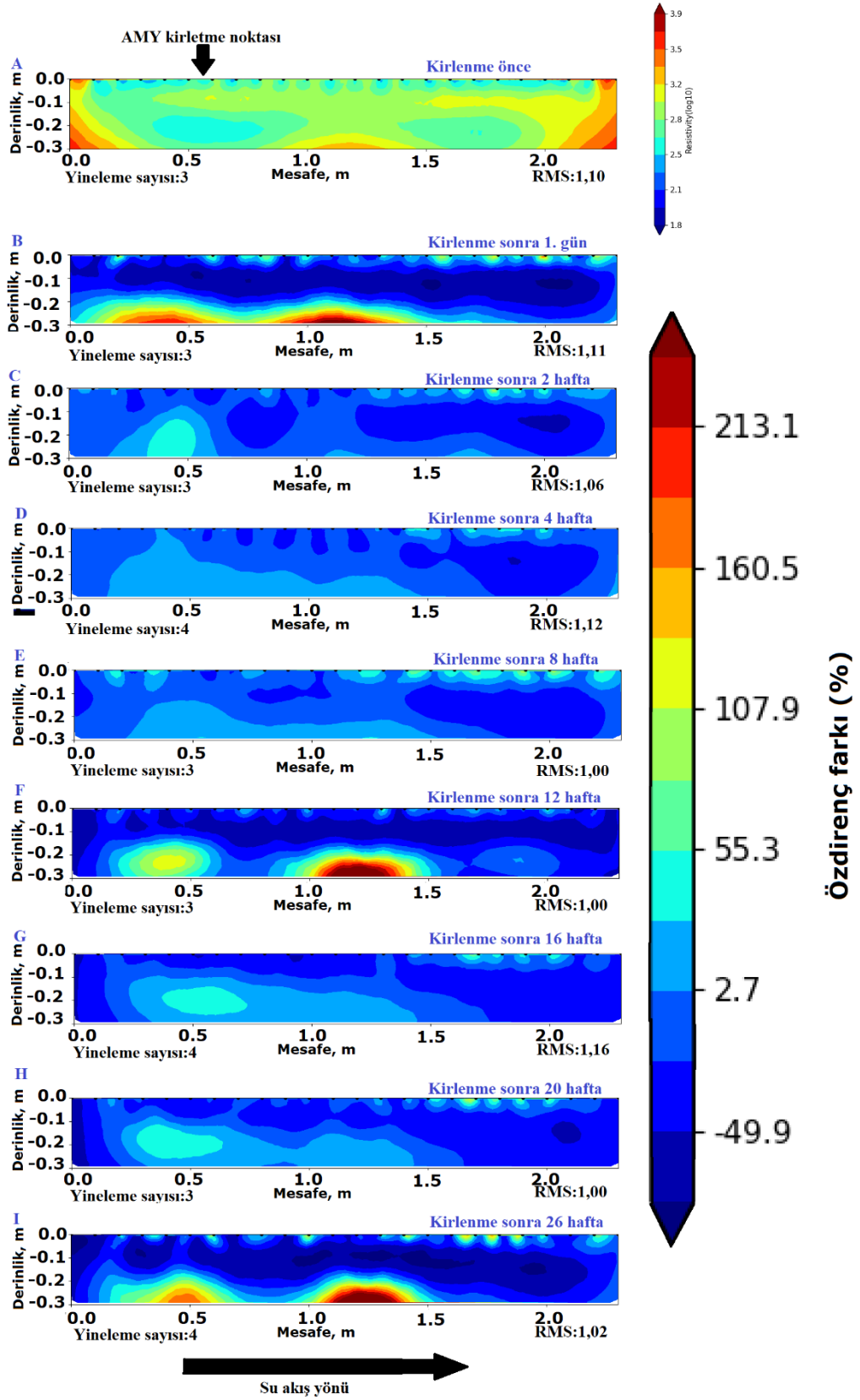
Şekil 4.7. Profil 3'de ölçülen elektrik özdirenc değerlerinin zamana bağlı gelişimini gösteren 2B ERT sonuçları. Su akış yönü ok ile gösterilmiştir.



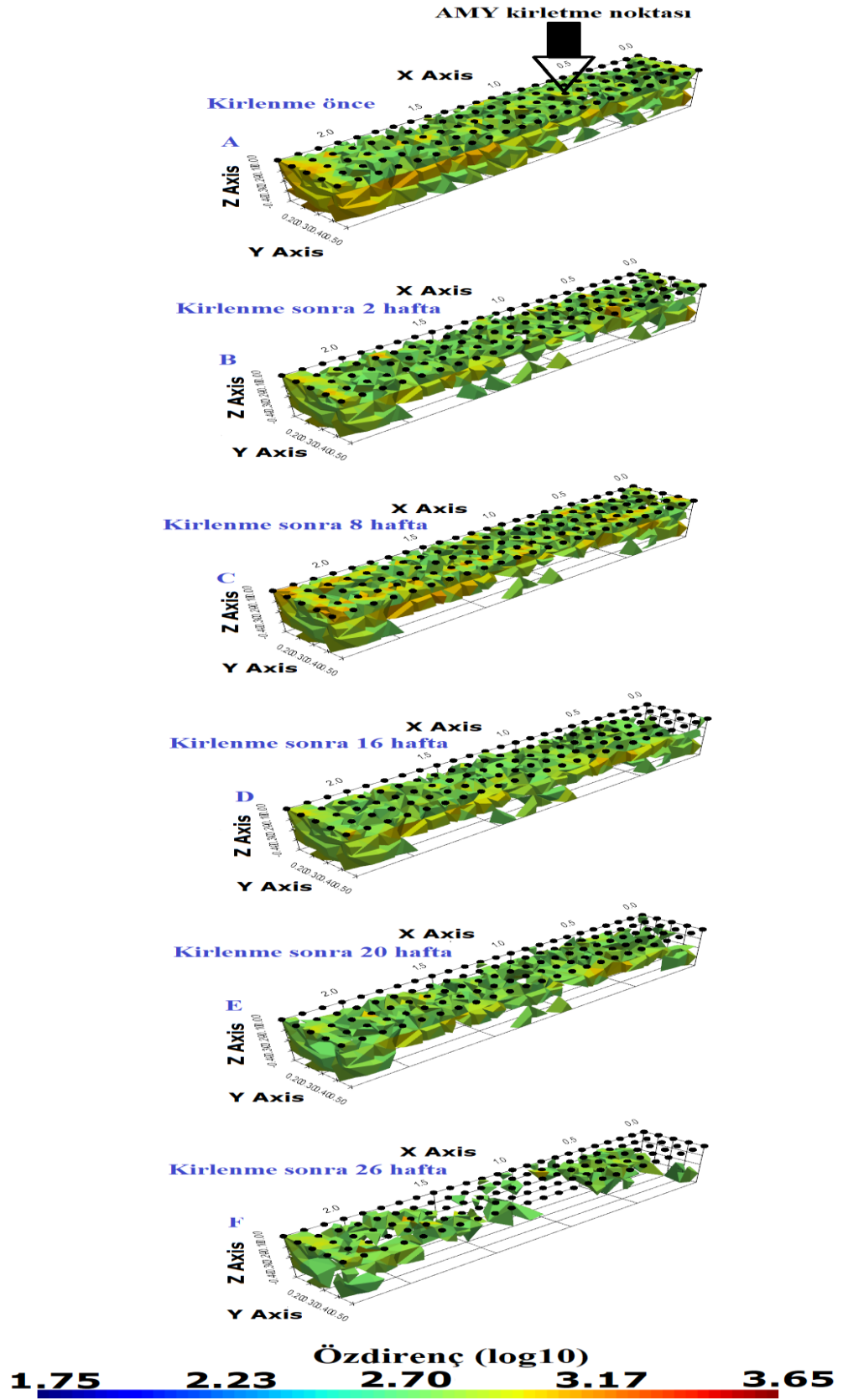
Şekil 4.8. Profil 3'de ölçülen elektrik özdirenç değerlerinin zamana bağlı yüzde değişimleri gösteren 2B ERT sonuçları.



Şekil 4.9. Profil 5’de ölçülen elektrik özdirenç değerlerinin zamana bağlı gelişimini gösteren 2B ERT sonuçları. Su akış yönü ok ile gösterilmiştir.



Şekil 4.10. Profil 5’de ölçülen elektrik özdirenç değerlerinin zamana bağlı yüzde değişimleri gösteren 2B ERT sonuçları.



Şekil 4.11. Tek seferlik dökülme ile AMY kirlenmesinin ölçülen elektrik özdirenç değerlerinin zamana bağlı özdirençli gösteren 3B ERT sonuçları.

4.1.3. Sıcaklık bulguları

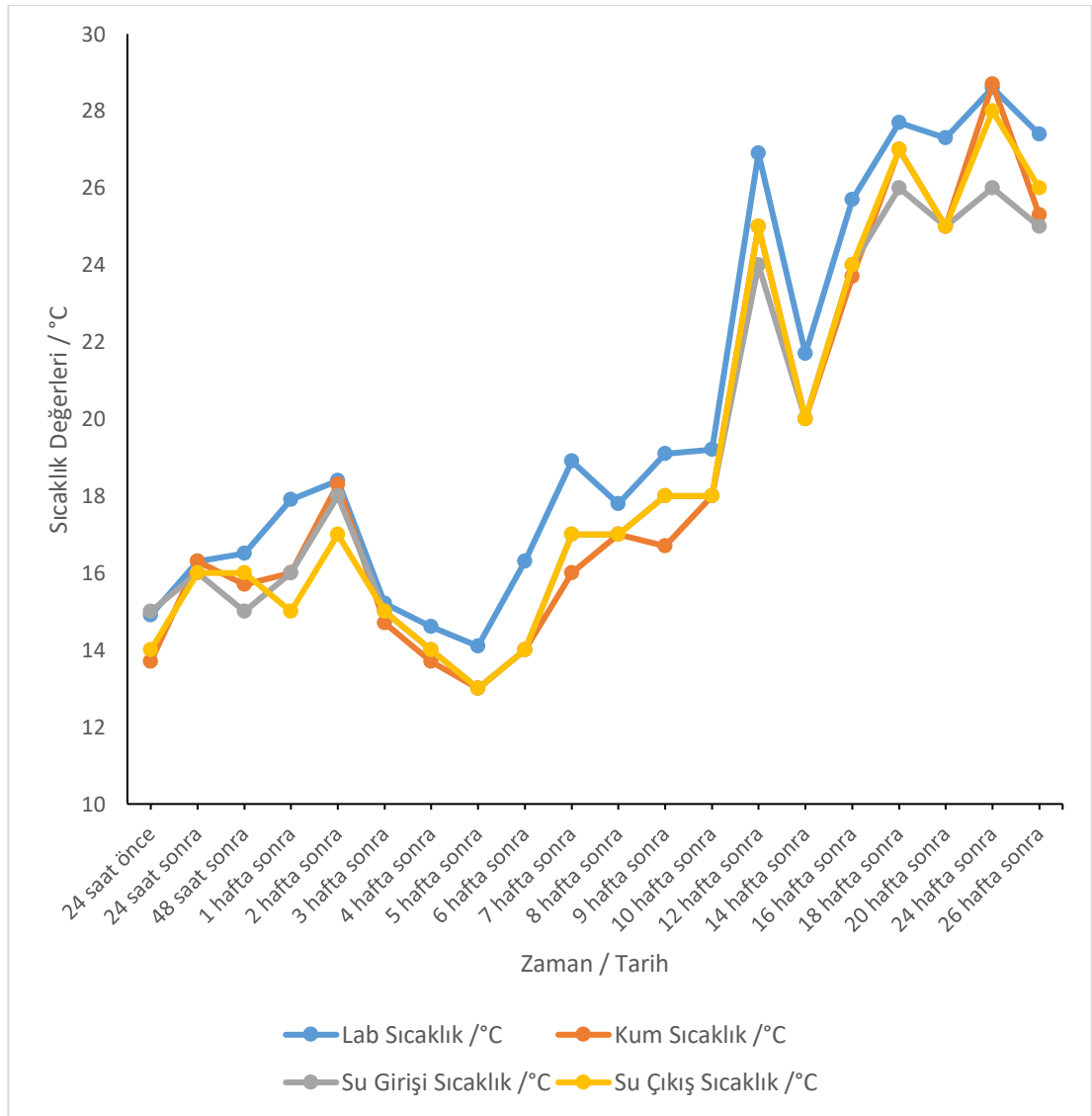
Birinci deney süresince laboratuvar sıcaklığı, kum akifer sisteminin (kum) sıcaklığı, su giriş sıcaklığı ve su çıkış sıcaklığı izlenmiştir. Deneyin başından sonuna kadar sıcaklık değerlerinde bir artış olmuştur. Bu artış genel mevsimsel sıcaklık değişimleri ile uyumludur. Deney kapalı laboratuvar ortamında gerçekleştirilmiş olmasına rağmen mevsimsel sıcaklık değişimleri deney sırasında kaydedilen sıcaklık değerlerini etkilemiştir.

Deneyle boyunca izlenen sıcaklık sonuçları Şekil 4.12.'te verilmiştir. İzlenen sıcaklık değerleri 13,0 °C ile 28,7 °C arasında değişmektedir. Laboratuvar sıcaklık değerleri 14,1 °C ile 28,6 °C arasında değişmekte olup ortalama sıcaklık 20,6 °C'dır. Kum sıcaklık değerleri 13,0 °C ile 28,7 °C arasında değişmekte olup, ortalama sıcaklık değeri 18,9 °C olmuştur. Su giriş sıcaklık değerleri 13,0 °C ile 26,0 °C arasında değişmekte olup, ortalama sıcaklık değeri 18,8 °C olmuştur. Son olarak su çıkış sıcaklık değerleri 13,0 °C ile 28,0 °C arasında değişmiş ve ortalama sıcaklık değeri 19,0 °C olmuştur.

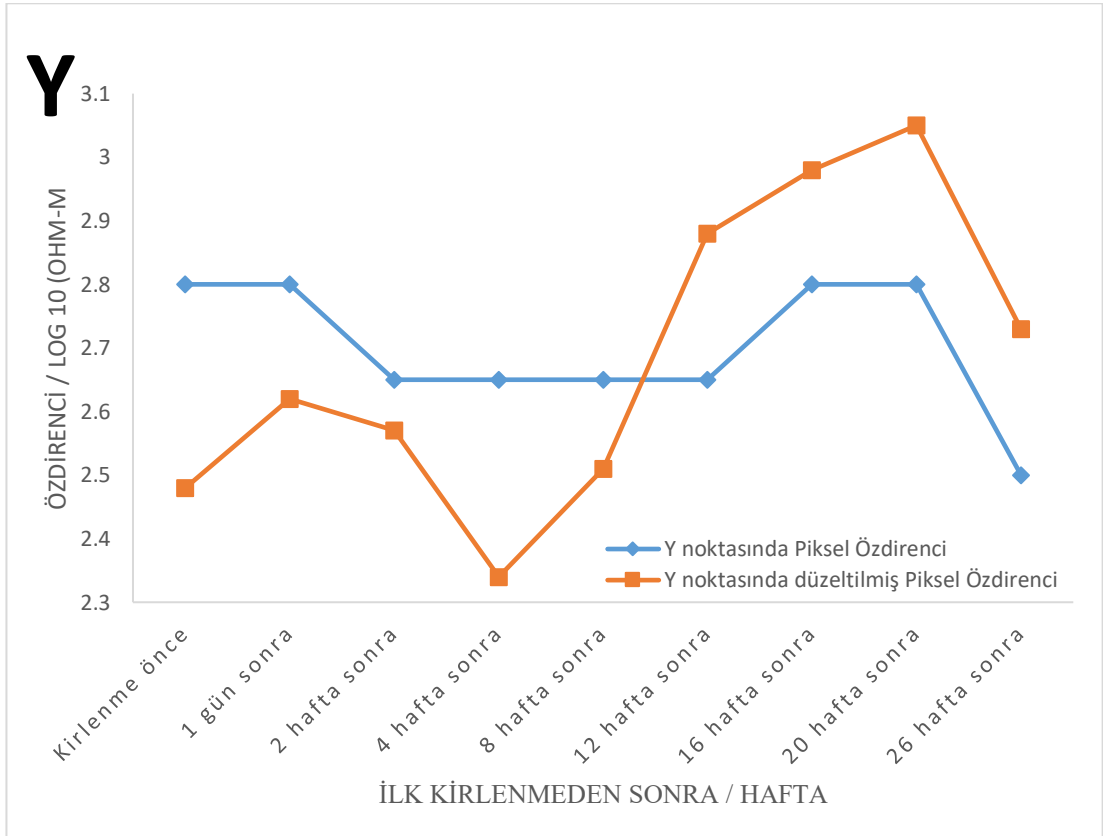
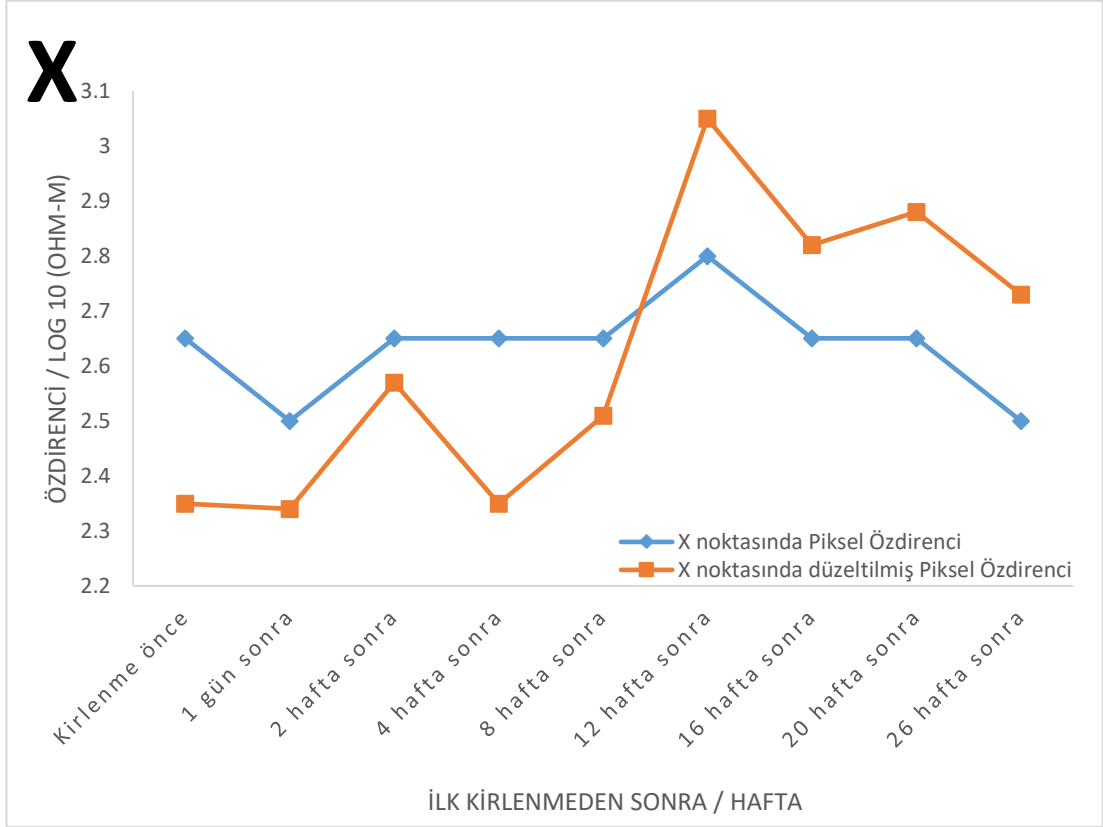
Kum akifer sistemi en yüksek (28,7 °C) sıcaklığı kaydetmiştir. Laboratuvar sıcaklığı (28,6 °C) ikinci en yüksek sıcaklık değerlerini kaydetti ve ardından su çıkış sıcaklığı (28,0 °C) değerleri geldi. Son olarak su giriş sıcaklığı (26,0 °C) en düşük değerleri kaydetmiştir. Şekil 4.12.'deki grafikten su giriş sıcaklığının genellikle su çıkış sıcaklığından daha düşük olduğu görülmektedir. Laboratuvar sıcaklığındaki değişim her iki su sıcaklığını da doğrudan etkilemekle birlikte, çıkış bölümündeki su üzerinde etkisi daha fazla olmuştur.

Özdirenç sonuçları üzerinde sıcaklığın etkisini göstermek için, seçilen piksel özdirenci üzerindeki sıcaklık düzeltmeleri (Şekil 4.13.) denklem 3.37 kullanılarak hesaplanmıştır. Akışkan ve yüzey özdirençleri artan sıcaklıkla doğrusal olarak azalır (Caterina ve ark., 2017). X ve Y grafiğindeki eğriler (Şekil 4.13.) özdirencin zamana bağlı değişimini göstermektedir. Şekil 4.13.'deki eğrilerin davranışları, büyüklük ve düzende büyük farklılıklar ortaya koymaktadır. Şekil 4.8., 4.9. ve 4.13.'deki önemli

bir gözlem, hem AMY enjeksiyon noktasının altındaki bölgenin ((X) doğrudan AMY'dan etkilendiği) hem de enjeksiyon noktasından uzaktaki bölgenin ((Y) olduğu ve enjeksiyon noktasından dolaylı olarak etkilendiği)dir. AMY zamana bağlı dirençte açık değişiklikler gösterir. Genel olarak, piksel özdirenç değerlerine dayalı olarak, X bölgesi, Y bölgesinden nispeten daha yüksek piksel özdirenç değerleri gösterir. X'in piksel özdirenç grafiği, doğası gereği Y'ninkinden daha düzensizdir. Düzeltilmiş piksel özdirenç grafikleri göz önüne alındığında hem X hem de Y düzeltilmiş piksel özdirenç grafiklerinin doğası düzensizdir ve her ikisi de özdirençte zamana bağlı değişiklik gösterir. Piksel özdirenç grafikleri ile düzeltilmiş piksel özdirenç grafikleri arasındaki farklar karşılaştırıldığında, Y'deki grafik, X'teki grafikten daha yüksek farklar gösterir.



Şekil 4.12. Sıcaklık değerlerinin zamana bağlı değişimini gösteren grafik.



Şekil 4.13. Hem X (0,2 m derinlik ve 0,5 m yatay mesafe (Şekil 6)) hem de Y'deki (0,2 m derinlik ve 1,5 m yatay mesafe (Şekil 6)) gerçek özdirenç değişimleri ile sadece sıcaklığın etkisini varsayarak aynı yerlerde özdirenç değerleri.

4.2. Yarı – Sürekli Dökülme ile AMY Kirletmesinin Bulguları

Bu deneyler, gelişmekte olan ülkedeki tipik bir atık motor yağı (çukur bertaraf yöntemi) bertaraf sahasına benzetmek için yapılmıştır.

4.2.1. Kış mevsimi benzetim bulguları

Bu bölümde, kış sezonu benzetiminin bulguları sunulmuştur. Kış, yüksek yağış ve düşük sıcaklık ile ilişkilidir. Sıcaklık değerleri düşük sıcaklıklı kış mevsimini temsil edecek şekilde simüle edilmiştir. Bölüm iki alt bölüme ayrılmıştır. Bunlar GPR ve ERT bulguları bölümleridir.

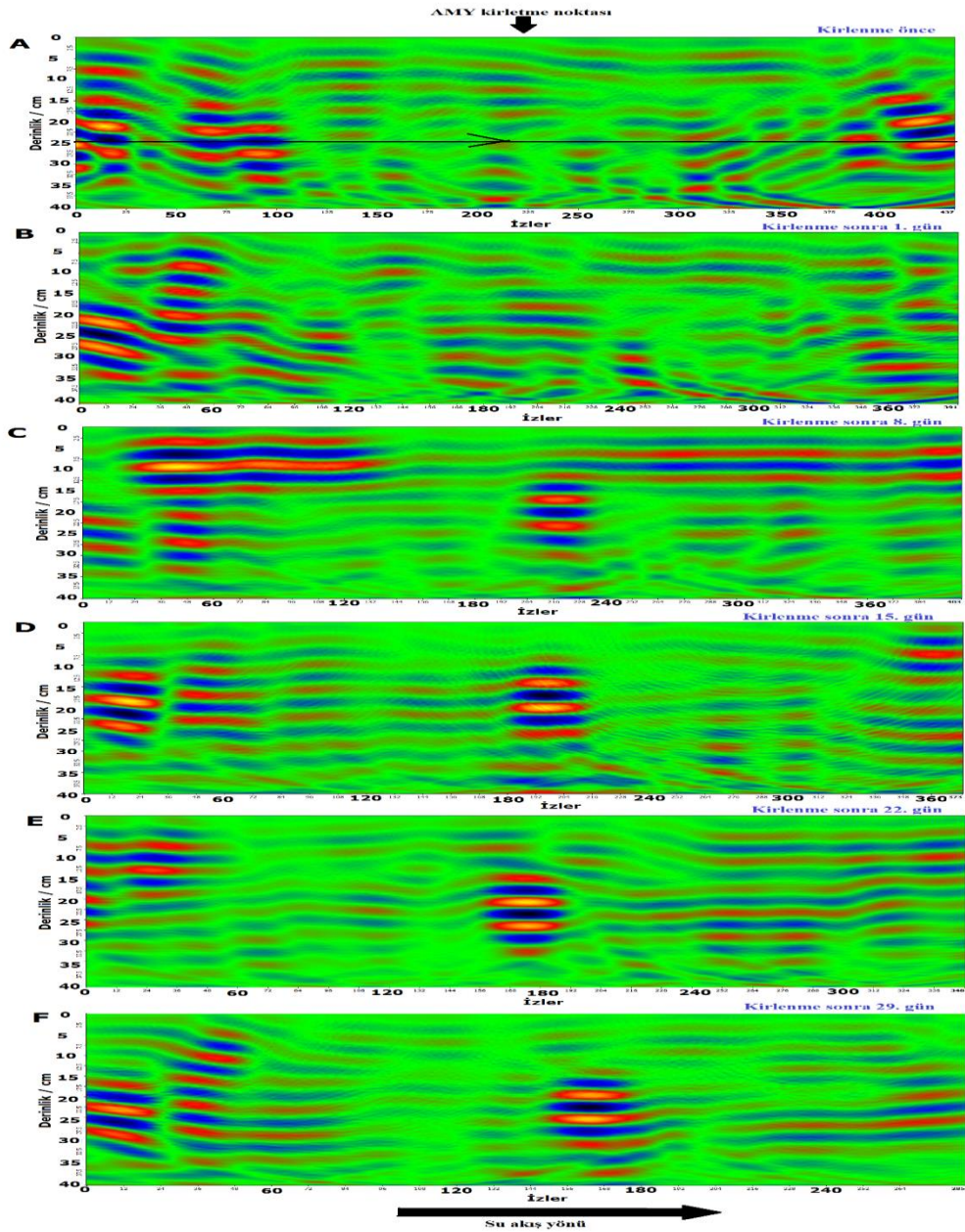
4.2.1.1. Yer radarı bulguları

Bu mevsimsel benzetim sırasında 29 günlük süre boyunca toplam 60 GPR ölçümü alınmıştır. Sunum için 2B GPR sonuçları Profil 1 (Şekil 4.14.), Profil 5 (Şekil 4.15.) ve Profil 10'dan (Şekil 4.16.) seçilmiştir. 2B GPR Profillerinden deney kurulumunun 3B radargramları (Şekil 4.17.) oluşturulmuştur. Radargram, enjeksiyondan sonra AMY birikintisinin özelliklerini ve yayılımını görüntülemek için zamana bağlı şekilde sunulmaktadır. Şekil 4.14., 4.15., 4.16. ve 4.17.'in sağ ve sol bölümlerindeki anomaliler giriş ve çıkış metalik su musluğunun bir sonucudur. İlgi alanı, AMY enjeksiyonunun gerçekleştiği radargramın orta bölümüdür.

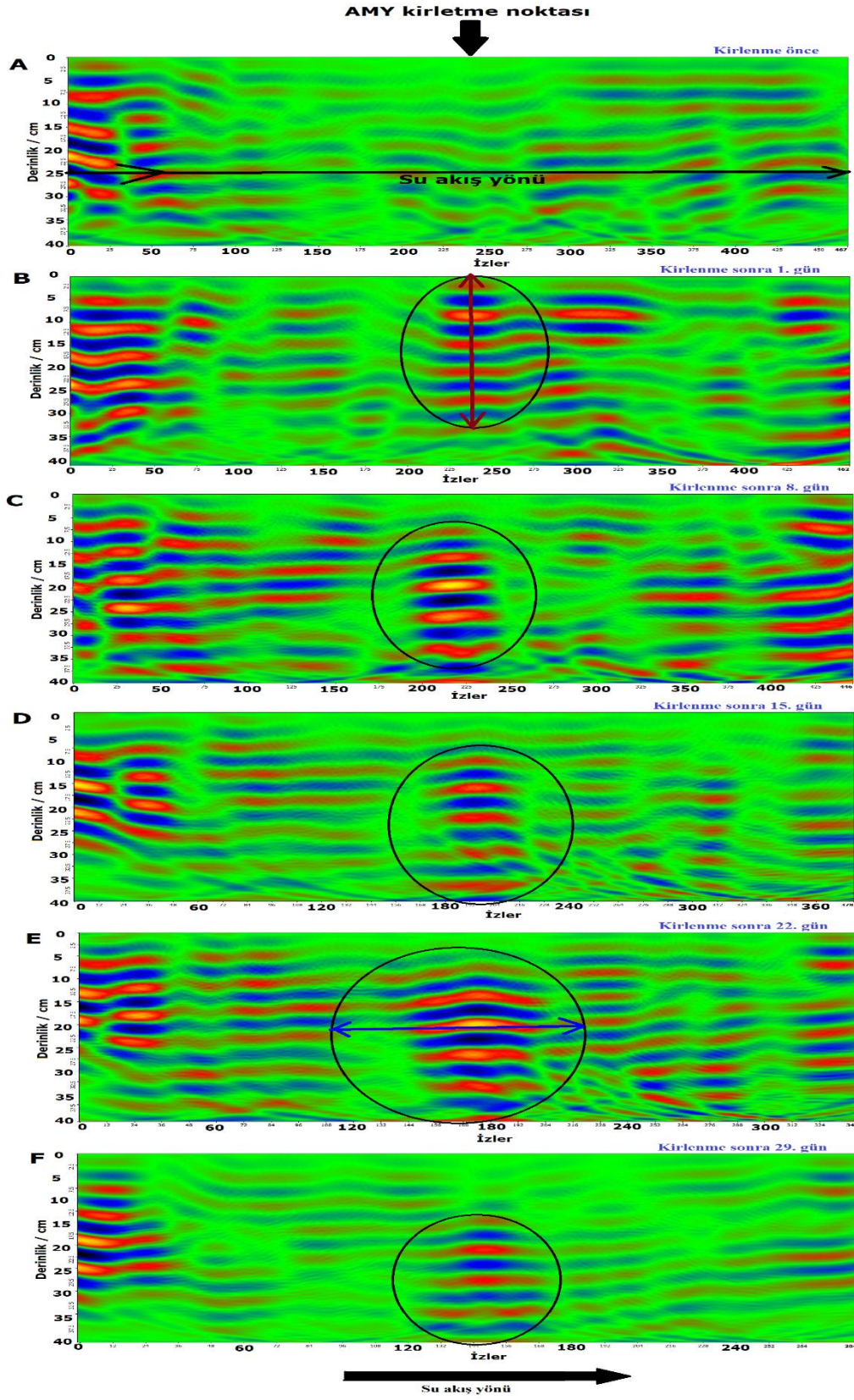
Şekil 4.14.'teki A ve B radargramlarında, AMY bulutunun net bir görüntüsü elde edilememiştir. Radargram A zemin ve B AMY enjeksiyonundan sonraki 1. gündür. Profil 1, AMY enjeksiyon noktasından yaklaşık 15 cm uzaklıktadır. C, D, E ve F radargramları AMY birikintisinin zamanla hacim olarak artış anomalisini göstermektedir. Şekil 4.15., AMY enjeksiyonundan 29 gün sonrası göstermektedir (F). Ancak, Şekil 4.15.'teki F radargramında gösterilen kirlilik hacmi, Şekil 4.14.'teki F'de gösterilenle karşılaştırıldığında çok fazla değildir. Şekil 4.16., Şekil 4.14. ve 4.15.'ten farklı olarak, AMY enjeksiyonundan sonra 1. günden (B) 29. güne (F) kadar kirlenme varlığını ortaya koymuştur. Deney boyunca miktar haftada 2 litre olmak

üzere toplam 8 litreye çıkarılmasına rağmen yağ kirliliğinin anomalisi yaklaşık olarak aynı miktarda ortaya çıkmıştır.

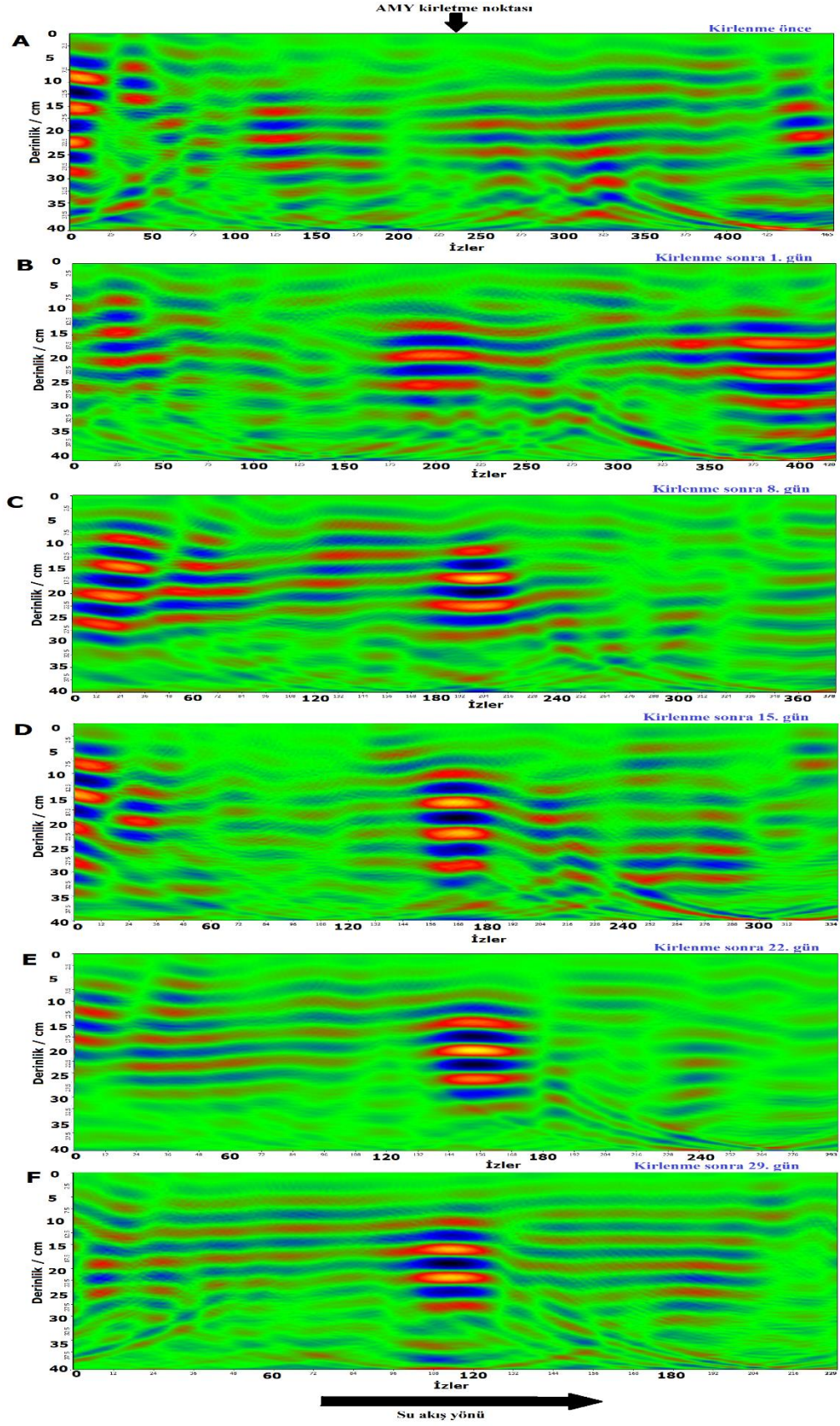
Şekil 4.5.'teki 3B zamana bağlı GPR radargramı, AMY göçünün kirlenmeden sonraki ilk hafta için başlangıçta düşey olduğunu (B), ardından ek kirlenme ve zaman geçtikten sonra göçün yanal bir yöne kaydığını ortaya koymaktadır. Bu, Şekil 4.5.'te görülebilir. Birikinti tankın orta kısmına nüfuz etmiştir.



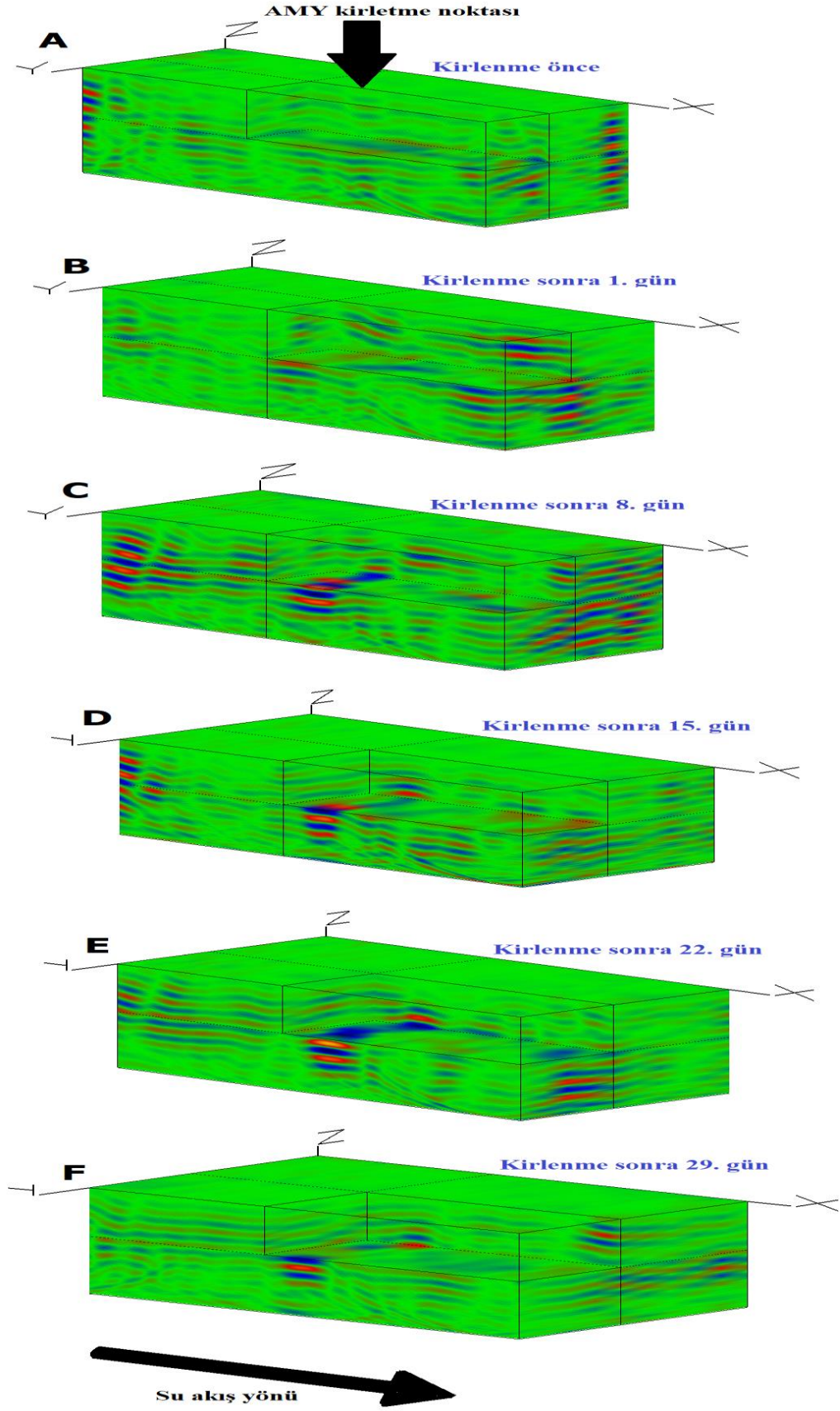
Şekil 4.14. Kış mevsimi Profil 1'deki AMY'nın zamana bağlı yayılım ve gelişimini gösteren 2B GPR sonuçları. Su akış yönü ok ile gösterilmiştir.



Şekil 4.15. Kış mevsimi Profil 5 deki AMY'nın zamana bağlı yayılım ve değişimini gösteren 2B GPR sonuçları. Anomaliler siyah elipslerle gösterilmiştir. Dikey geçişler kırmızı okla ve yatay geçişler mavi okla gösterilmiştir.



Şekil 4.16. Kış mevsimi Profil 10'daki AMY'nın zamana bağlı yayılım ve değişimini gösteren 2B GPR sonuçları.



Şekil 4.17. Kış mevsiminde elde edilen zamana bağlı 3B GPR radargramları.

4.2.1.2. ERT bulguları

Kış sezonu benzetiminde toplam 36 ERT verisi elde edilmiştir. Profil 1 (Şekil 4.18. ve 4.19.), Profil 3 (Şekil 4.20. ve 4.21.) ve Profil 6 (Şekil 4.22. ve 4.23.) olmak üzere üç profilin sonuçları 2B sonuçlarının sunumu ve tartışılması için seçilmiştir. 36 adet 2B verisinden 6 adet zamana bağlı 3B ERT görüntüsü oluşturulmuş ve Şekil 4.24.'te sunulmuştur.

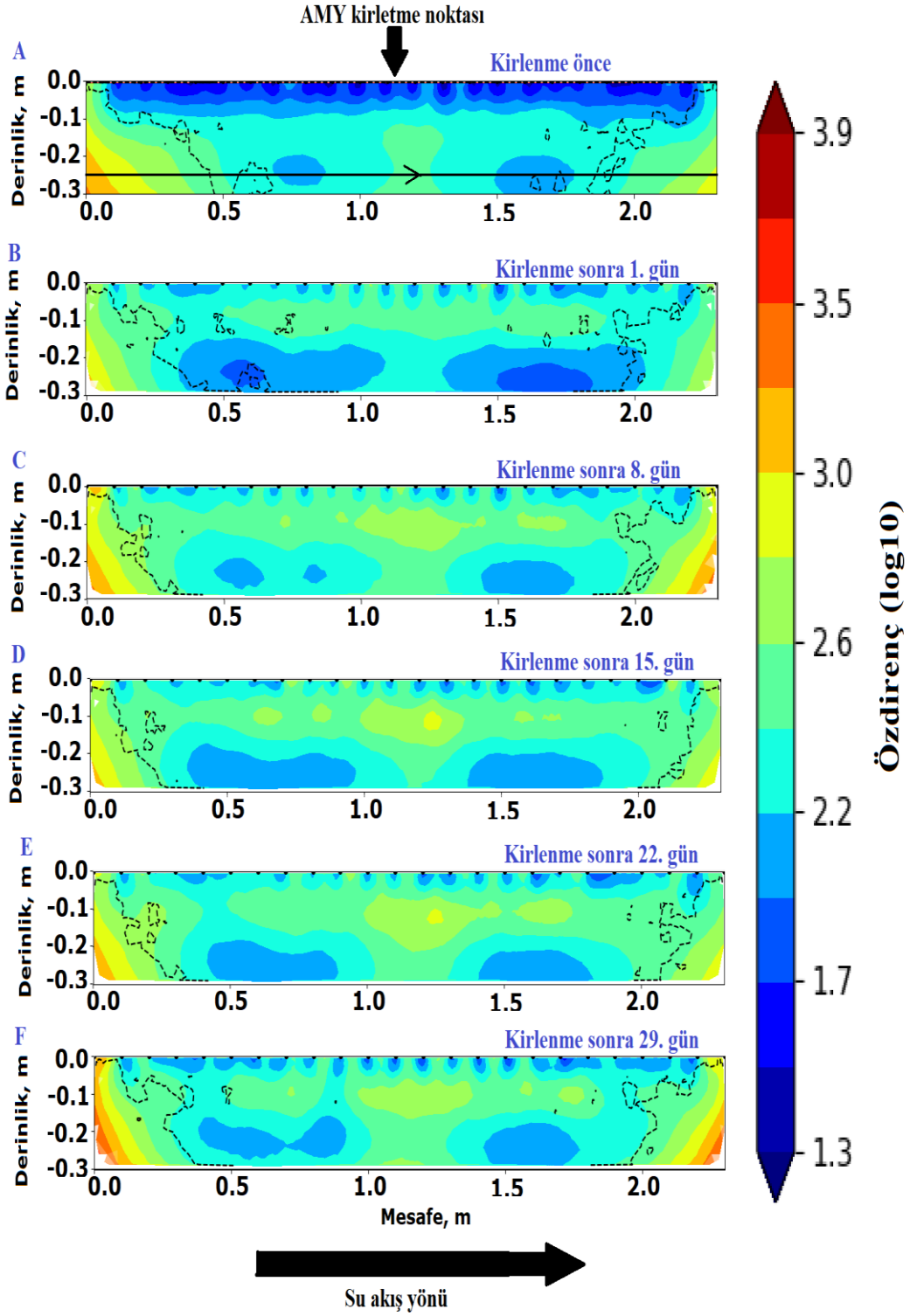
Şekil 4.18. (A)'de gösterildiği gibi AMY enjeksiyonundan önce toplanan ERT verilerinin sonucu iletken bir üst tabakayı ortaya çıkarmıştır. AMY birikintisi enjeksiyonun bir sonucu olarak 8. günden itibaren belirgin hale gelmiştir. Kaydedilen özdirenç değerleri 1,3 ila 3,9 log₁₀ Ohm-m arasındadır. Göç hem düşey hem de yanaldır. Genel olarak birikinti deney boyunca yüksek özdirenç değerleri vermiştir.

Şekil 4.19., Profil 1'in kirlilik öncesi ve sonrası özdirenç değerlerinin yüzde değişikliklerinin sonuçlarını göstermektedir. Özdirenç oranlarının % değişiklikleri %-2,0 ile %815,0 arasındadır. AMY enjeksiyon kaynağını çevreleyen alanda en yüksek % değişiklik elde edilmiştir. Şekil 4.19., bazı noktalarda düşük AMY değişimleri ile genel olarak özdirençteki homojen değişiklikleri göstermektedir.

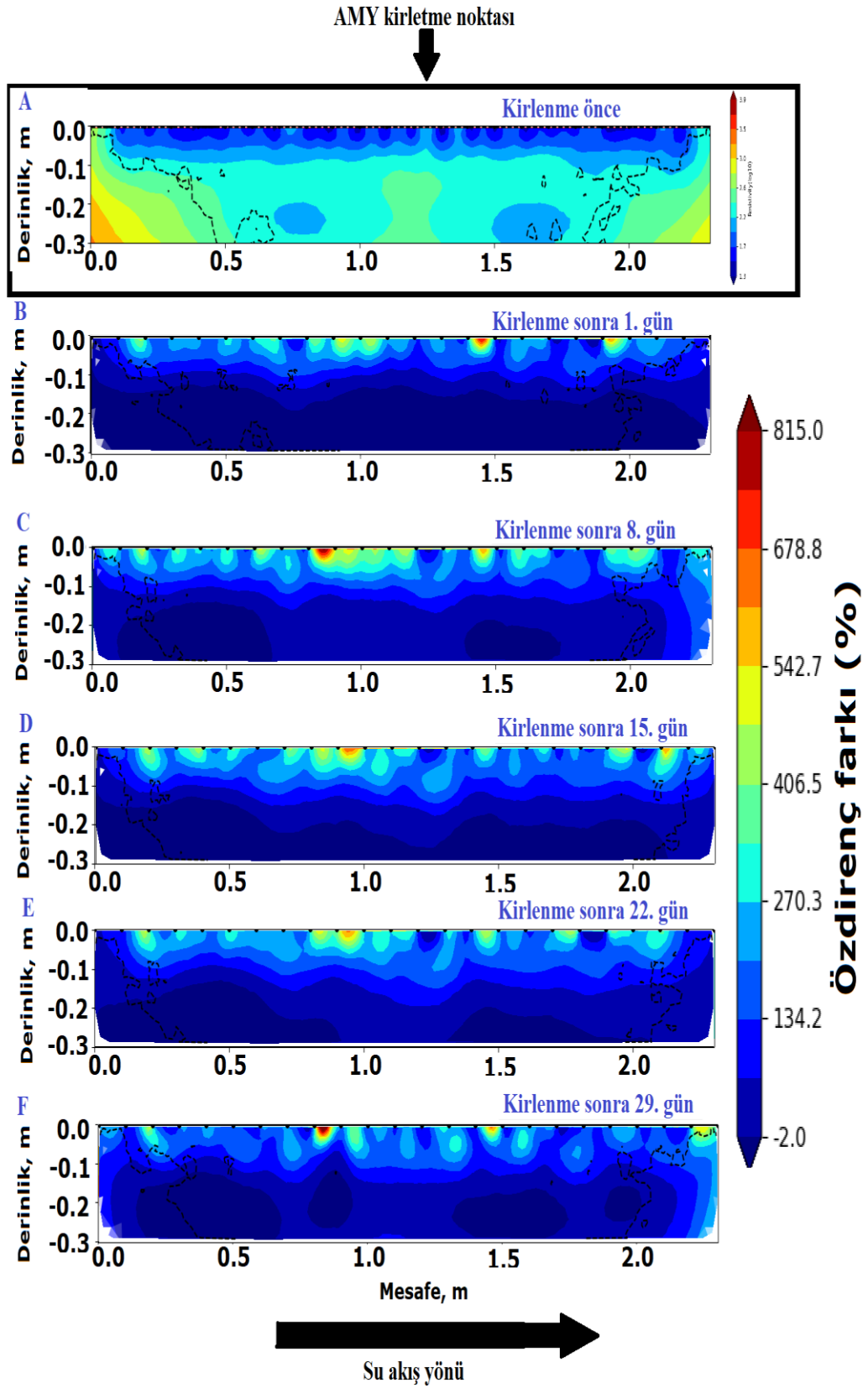
Profil 3'ten elde edilen sonuçlar (Şekil 4.20. ve 4.21.), Profil 1 ve 6'ya kıyasla farklı bir yayılım modeli ortaya koymaktadır. Profil, tankın orta kısmında alınmış ve AMY enjeksiyon kaynağından geçmesine rağmen Şekil 4.20. ve 4.21.'de AMY yayılımına dair fazla bulgu yoktur. Profil 3'te özdirenç değeri 1,1 ile 3,8 log₁₀ Ohm-m arasında değişmektedir (Şekil 4.21.). Özdirenç oranlarının % değişiklikleri %-2,0 ile %815,0 arasındadır. Özdirenç oranlarının en yüksek % değişikliği gösteren nokta deney boyunca AMY kalıntısının bulunduğu enjeksiyon noktasıdır.

Profil 1'in sonucu model olarak Profil 6'ninkine benzemektedir. Profil 6'da özdirenç değerleri 1,2 ile 3,10 log₁₀ Ohm-m arasında değişmektedir (Şekil 4.22.) ve özdirenç oranındaki % değişim %-34,7 ile %761,6 arasındadır (Şekil 4.23.). Çünkü bu iki profil

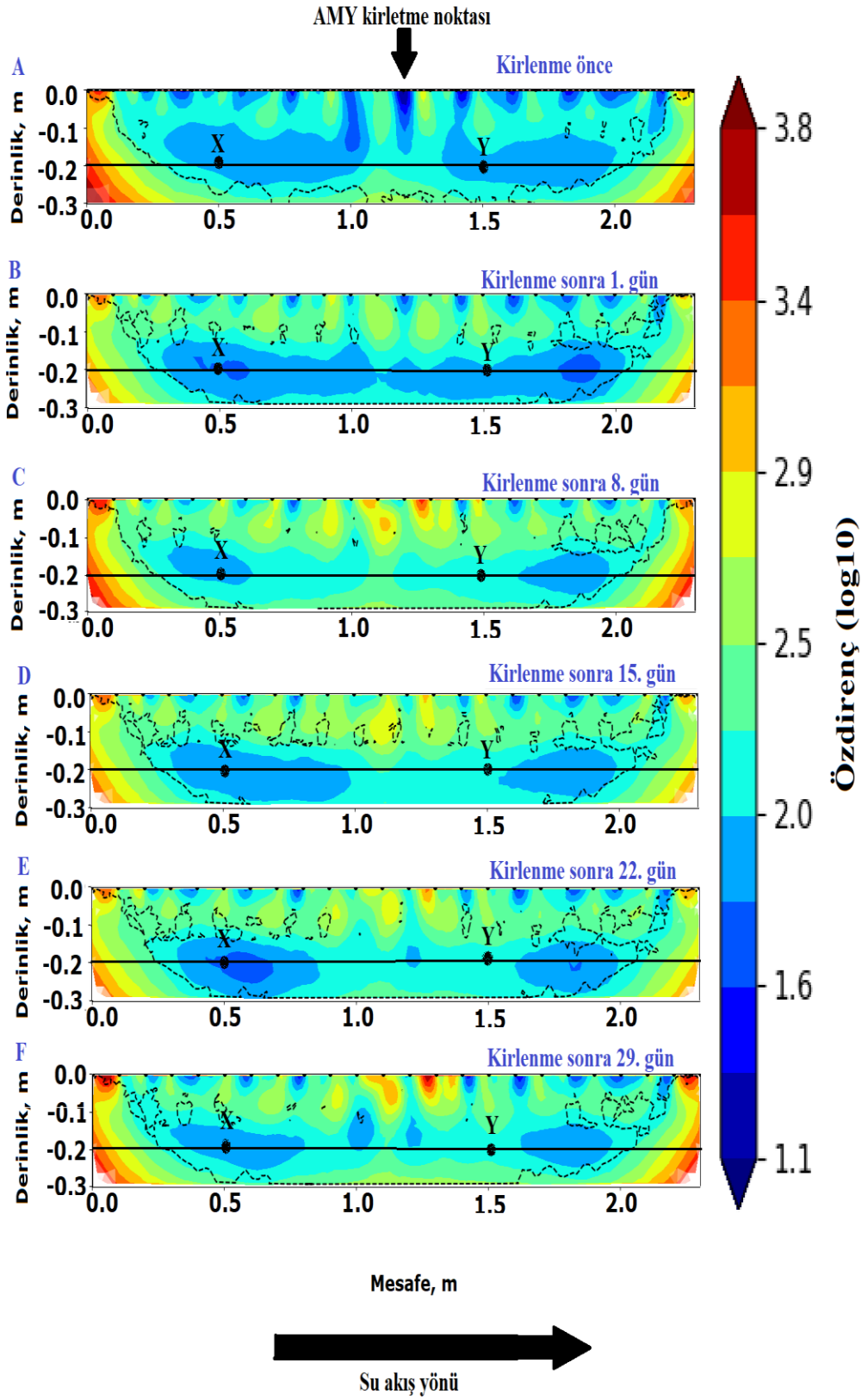
(1 ve 6) deneysel tankın en kenar bölgelerinde yer almaktadır. AMY birikintisi, 8. günden itibaren bulgu vermeye başlamıştır.



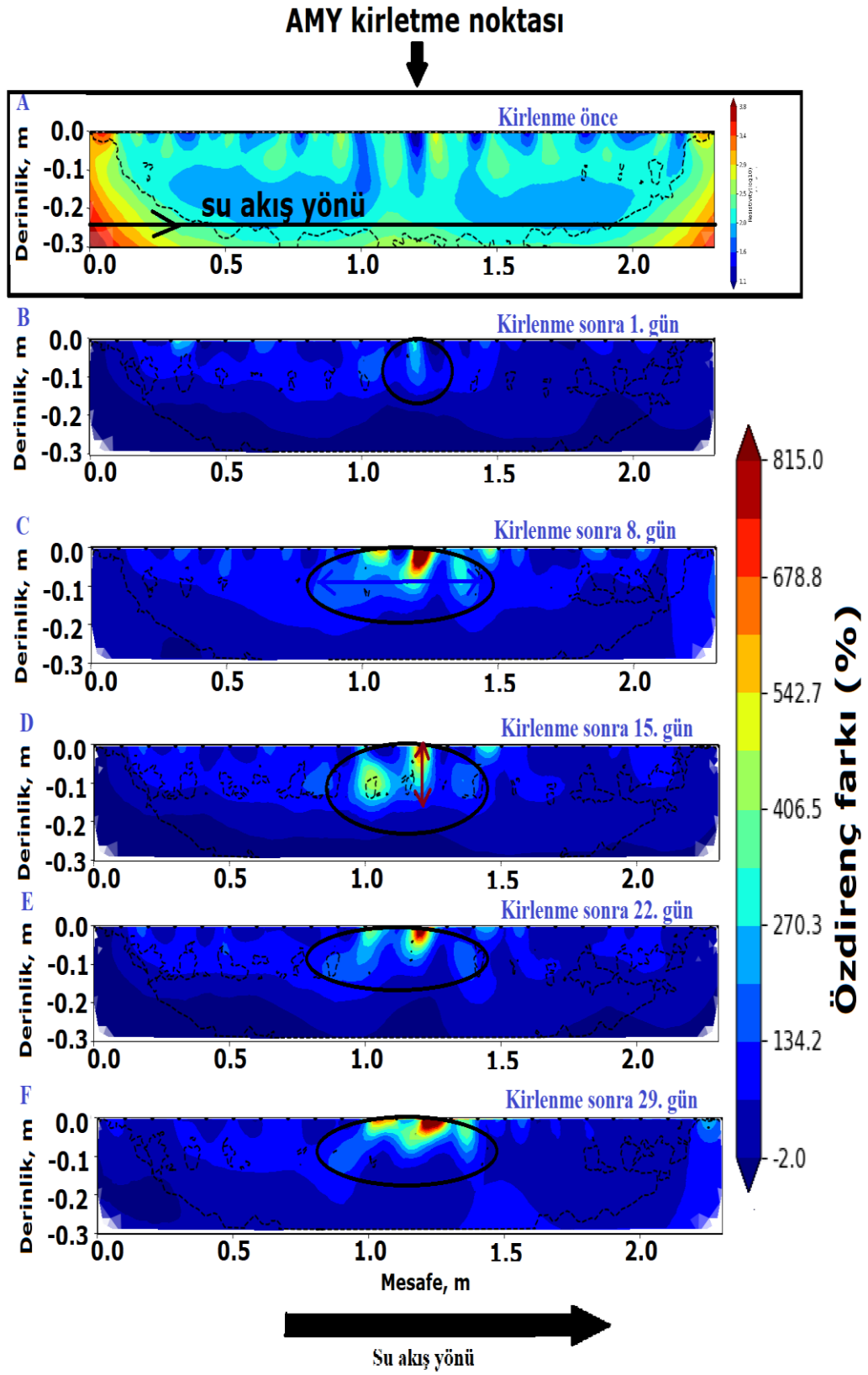
Şekil 4.18. Kış mevsiminde Profil 1'de ölçülen elektrik özdirenç değerlerinin zamana bağlı değişimini gösteren 2B ERT sonuçları. Su akış yönü ok ile gösterilmiştir.



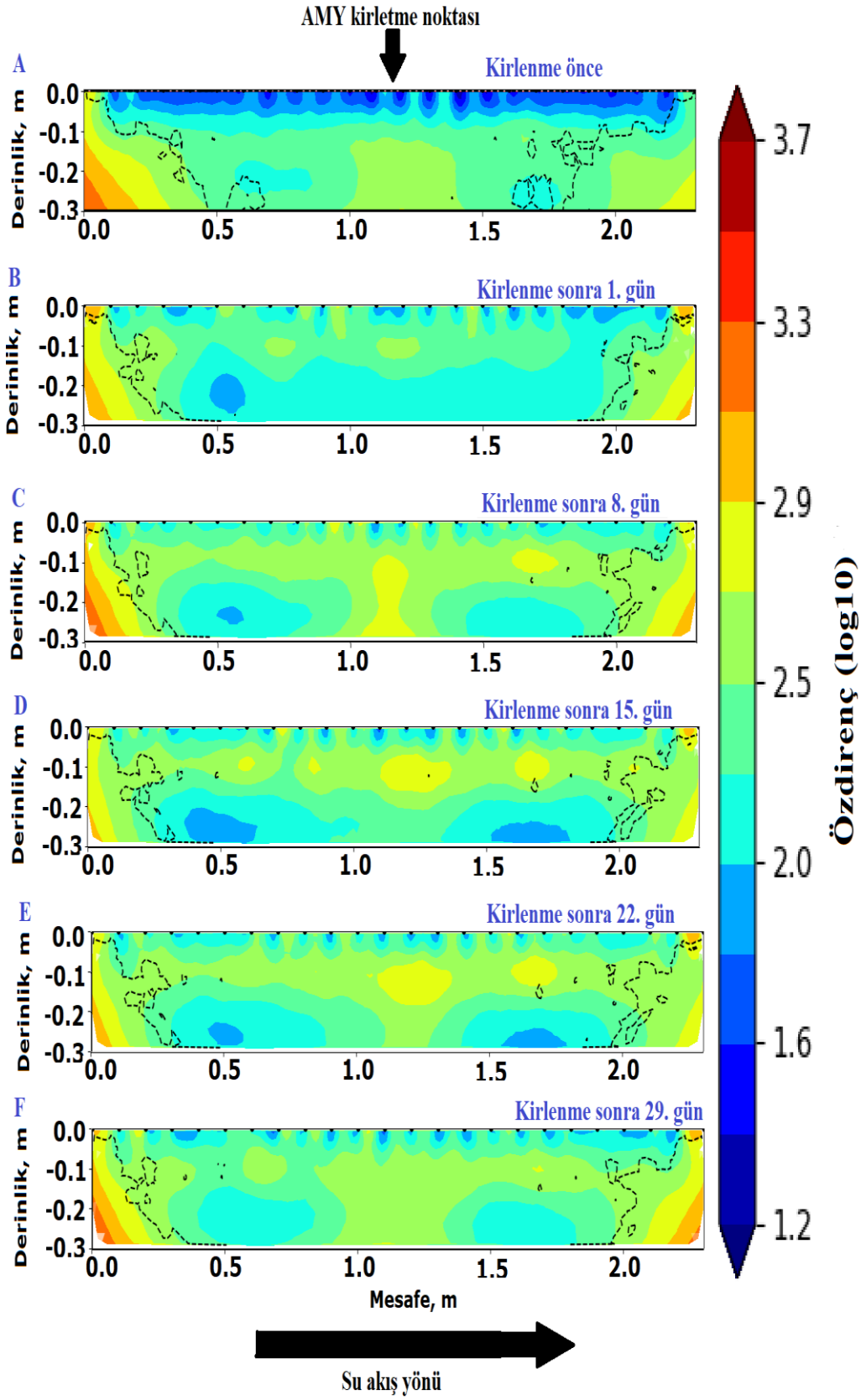
Şekil 4.19. Kış mevsiminde Profil 1 de ölçülen elektrik özdirenç değerlerinin zamana bağlı yüzde değişimlerini gösteren 2B ERT sonuçları.



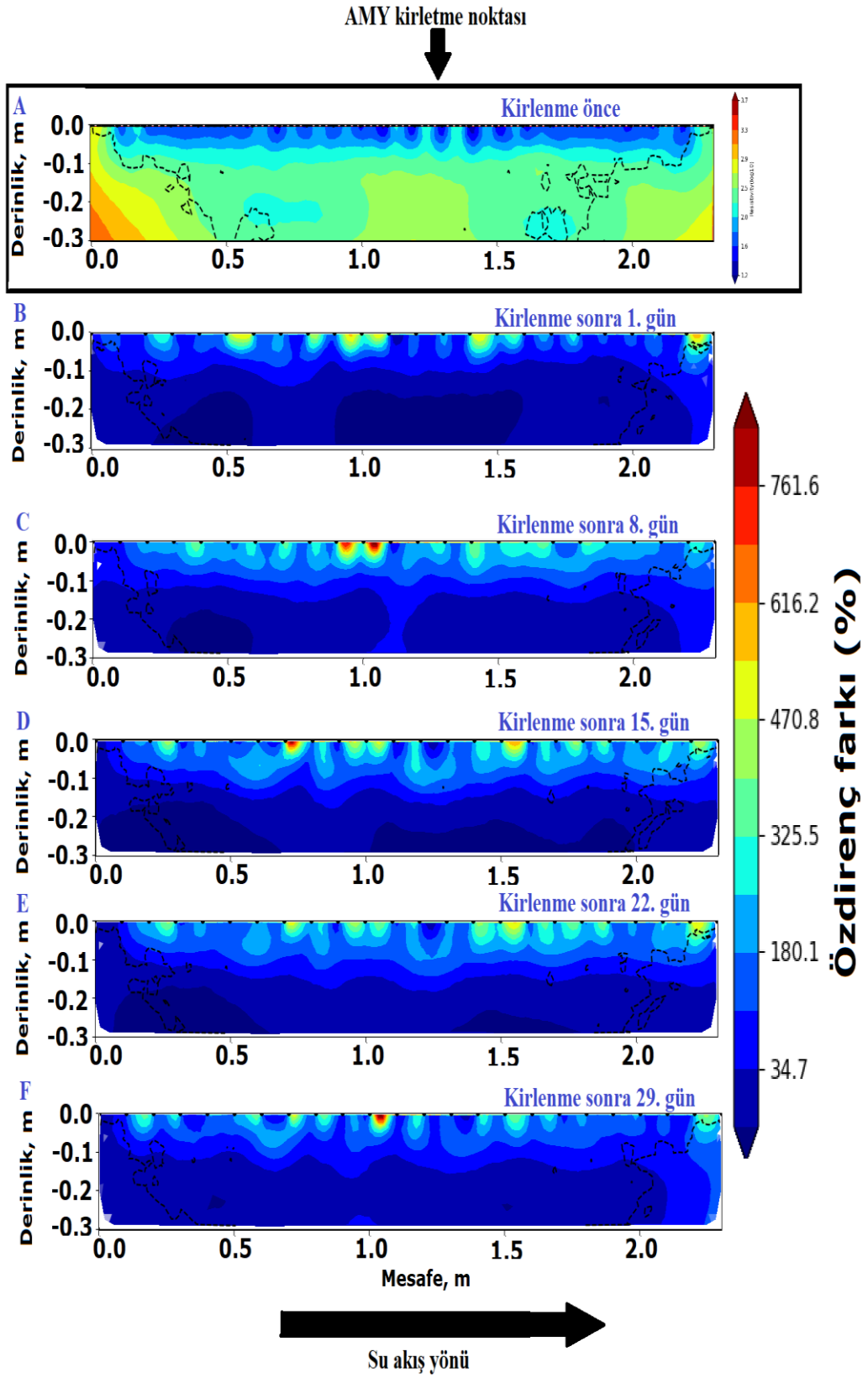
Şekil 4.20. Kış mevsiminde Profil 3 de ölçülen elektrik özdirenç değerlerinin zamana bağlı değişimini gösteren 2B ERT sonuçları.



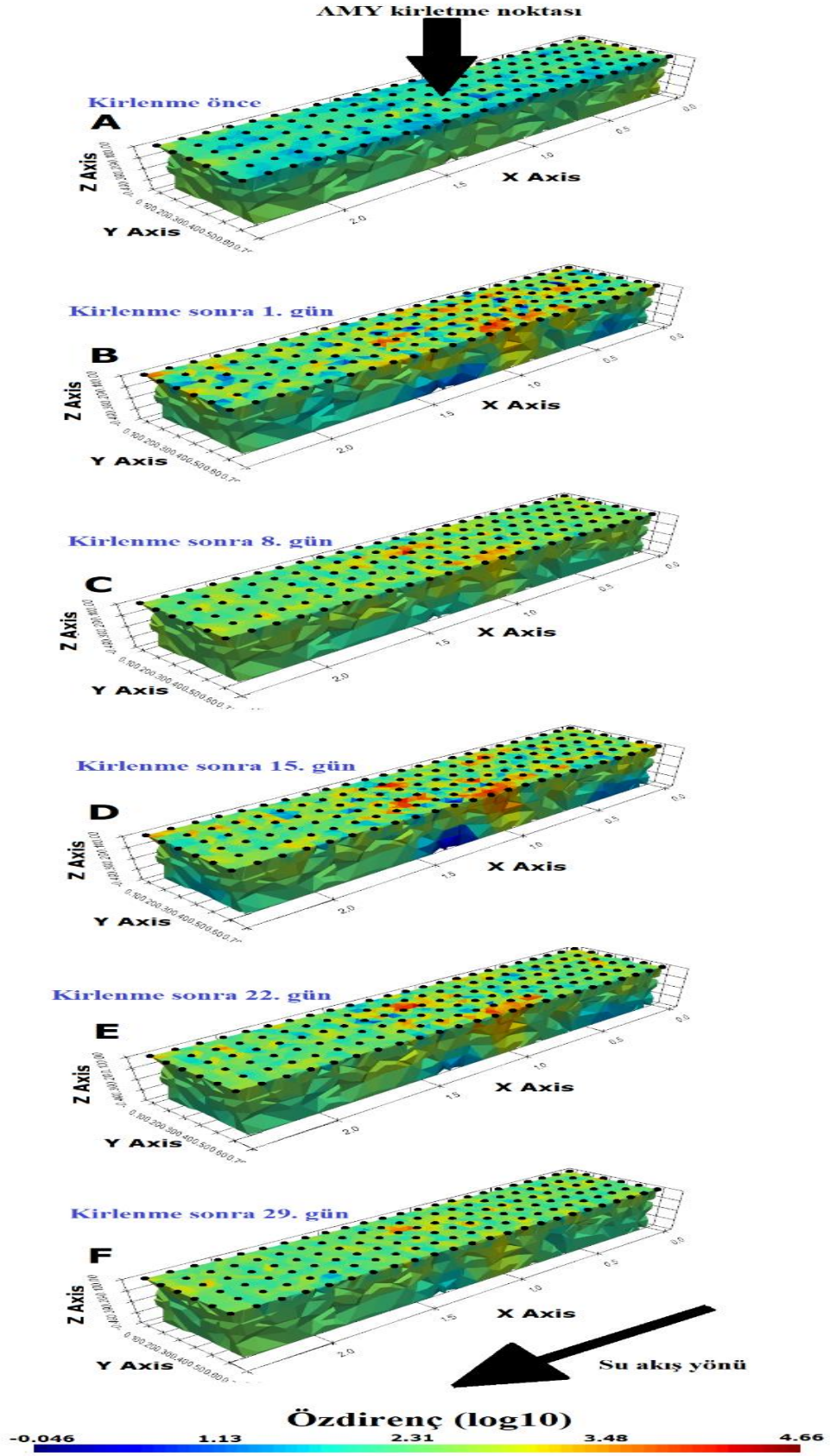
Şekil 4.21. Kış mevsiminde Profıl 3 de ölçülen elektrik özdirenç değerlerinin zamana bağlı yüzde değişimlerini gösteren 2B ERT sonuçları. Anomaliler siyah dögümlerde gösterilir. Dikey geçişler kırmızı okla ve yatay geçişler mavi okla gösterilmiştir.



Şekil 4.22. Kış mevsiminde Profil 6 da ölçülen elektrik özdirenç değerlerinin zamana bağlı değişimini gösteren 2B ERT sonuçları.



Şekil 4.23. Kış mevsiminde Profil 6 da ölçülen elektrik özdirenç değerlerinin zamana bağlı yüzde değişimlerini gösteren 2B ERT sonuçları.



Şekil 4.24. Kış mevsimi kurulumunun zamana bağlı özdirenç değerlerinin değişimini gösteren 3B ERT sonuçları.

Şekil 4.24. deneyin kış benzetiminde modellenen zamana bağlı 3B ERT görüntülerini göstermektedir. Özdirenç değerleri - 0,046 ile 4,66 $\log_{10} \Omega\text{m}$ arasında değişmiştir. Kirlenme öncesi alınan sonuçlar, kuruluma doldurulan malzemenin özdirenç modelini temsil eden üç farklı katmanını göstermektedir. Kirlenmeden sonraki 1. günün sonuçları, özellikle üst tabakada özdirençte bir artış olduğunu ortaya koymuştur. Düşey yayılım, x ekseninde 0,5 - 1,0 m arasında görülebilmektedir.

Deneyin 8. günü için ve toplam 4 litre AMY enjeksiyonu oluşturan ilave 2 litre kirlenmeden sonra, kurulum (B)'ninki gibi daha yüksek özdirenç değerleri göstermiştir. AMY'nın hem düşey hem de yanal yayılımına dair bulgular vardır. Şekil 4.24. E ve 4.24. F'den ilginç bir gözlem, her iki görüntünün de 8 litre AMY'dan sonra toplanan verilerin sonuçları olmasına rağmen, F ölçümleri, E'den bir hafta sonra yapılmıştır. Ancak E'de gösterilen sonuç F'inkinden daha yüksek özdirenç göstermiştir. Genel olarak Şekil 4.24. C, D, E ve F'den, ek kirlenmenin zamanla özdirençte bir artışa karşılık geldiği söylenebilir.

4.2.2. Yağışlı mevsim benzetim bulguları

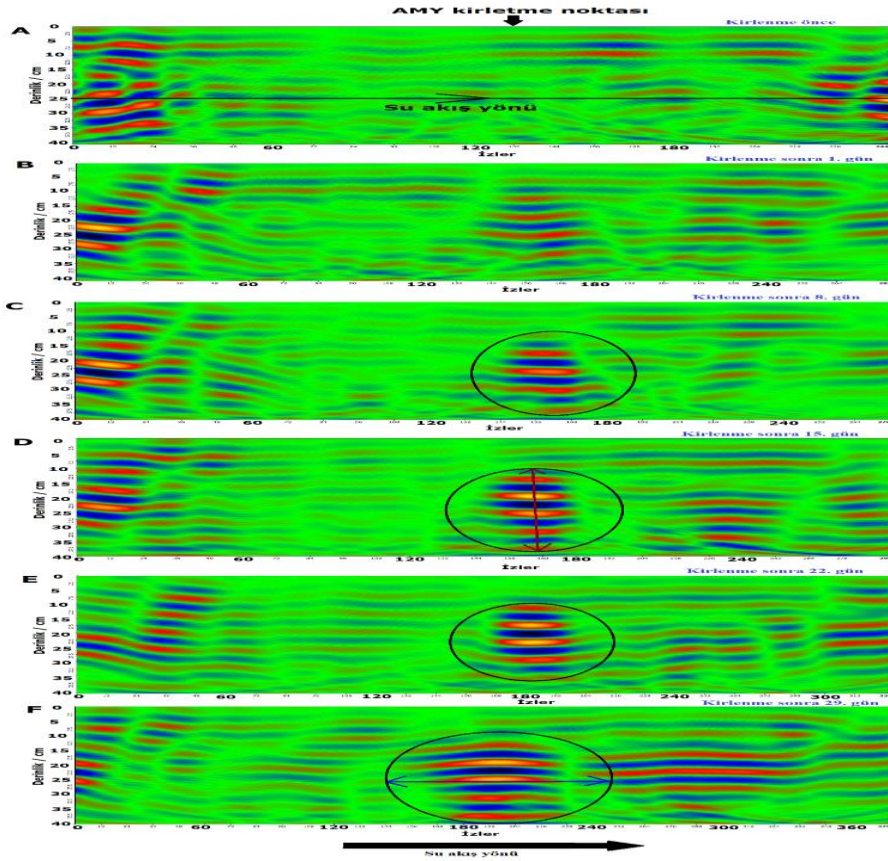
Bu bölümde yağışlı mevsim benzetiminin bulguları sunulmuştur. Yağışlı mevsim, yüksek buharlaşma ve ılıman sıcaklık ile ilişkilidir. Sıcaklık değerleri mümkün olan en iyi şekilde ve bir yağış mevsimini temsil edecek şekilde simüle edilmiştir. Bölüm iki alt bölüme ayrılmıştır. Bunlar GPR ve ERT bulguları bölümleridir.

4.2.2.1. Yer radarı bulguları

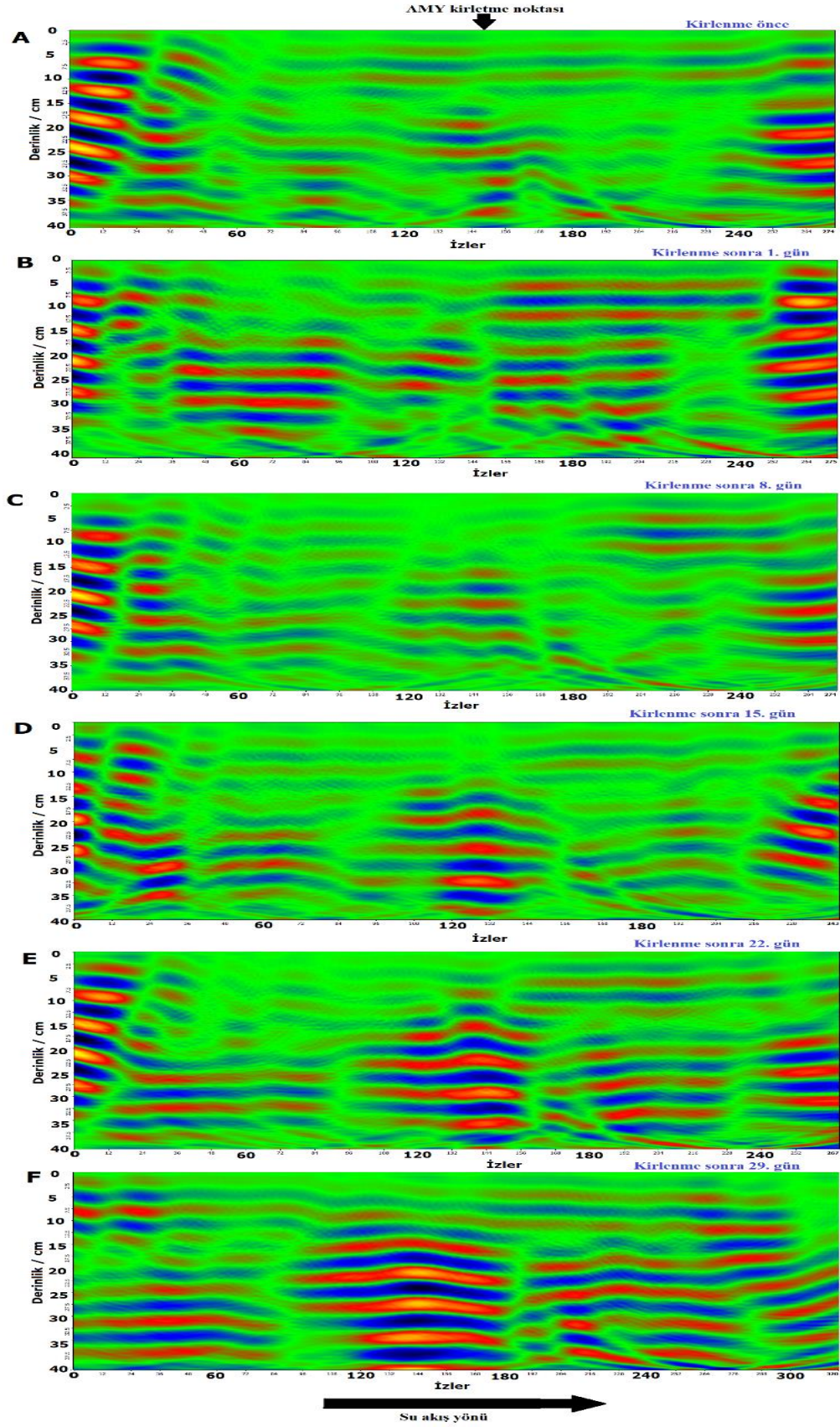
Şekil 4.25., 4.26., 4.27. ve 4.28., yağış mevsimi benzetiminde elde edilen sonuçları göstermektedir. Deney kurulumuna AMY'nın ilk enjeksiyonundan 1 gün, 8 gün, 15 gün, 22 gün ve 29 gün sonra elde edilen sonuçlar sırasıyla Şekil 4.25., 4.26., 4.27. ve 4.28. A, B, C, D, E ve F'de gösterilmektedir. Şekil 4.25., 4.26., 4.27. ve 4.28. sırasıyla Profil 1, Profil 5, Profil 10 ve 3B zamana bağlı sonuçlarına karşılık gelir.

Şekillerden görülebileceği gibi, zemine karşılık gelen radargram A (ilk AMY enjeksiyonundan önce) katmanlı yapıyı ortaya çıkarmış, ancak AMY enjeksiyonlarından sonra katmanlı yapıda bir bozulma olduğu gözlenmiştir. AMY enjeksiyon kaynağından uzakta tankın en uçlarında (45 cm aralıklı) bulunan 1 ve 10 Profillerindeki yayılım bulgularından AMY'nın hem düşey hem de yatay olarak yayıldığını görebilmekteyiz. Profil 5, kurulumu yaklaşık olarak ikiye bölmektedir.

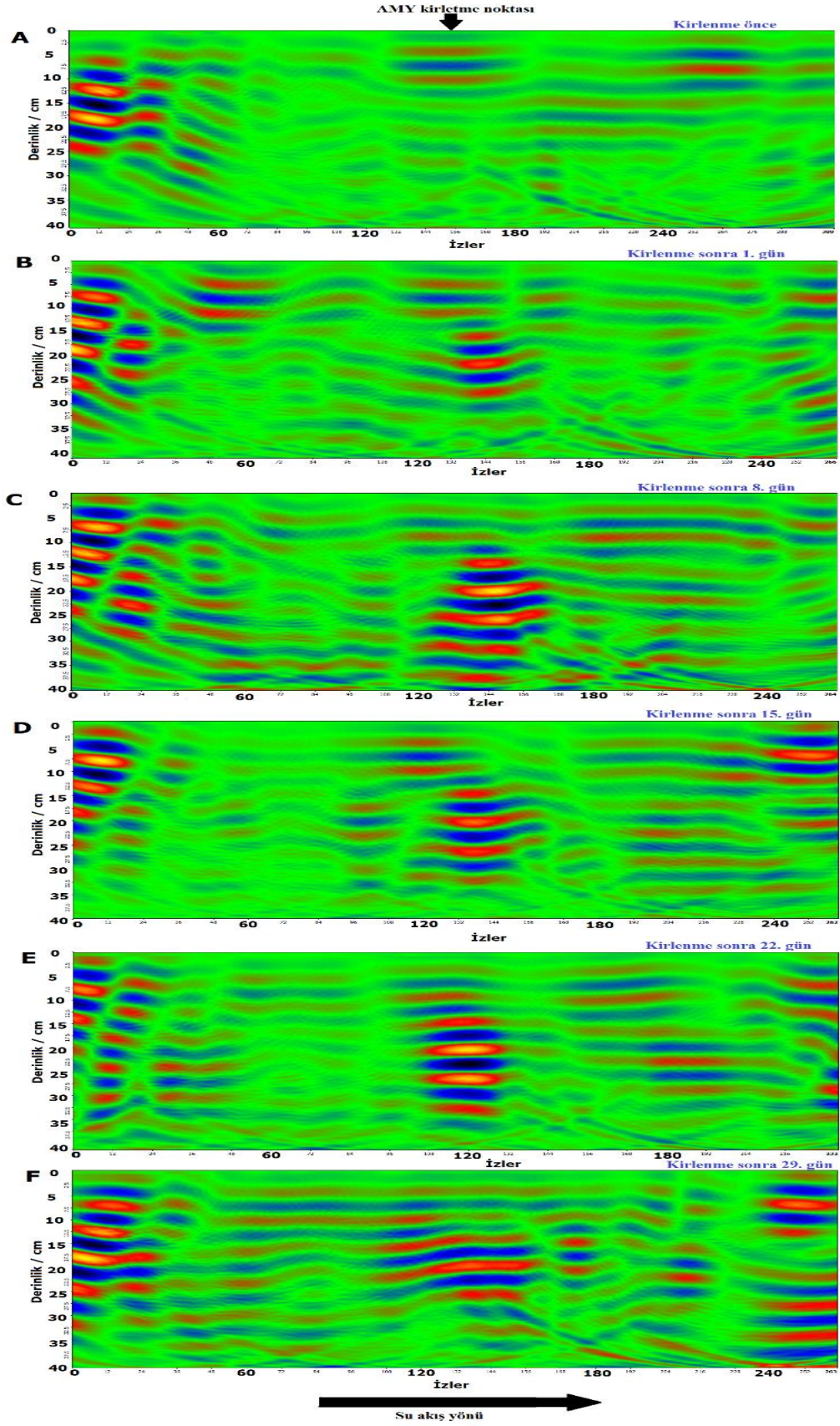
Sırasıyla 2, 4, 6 ve 8 litrelik ek AMY enjeksiyonlarından sonra sinyal genliğinde artışlar gözlenmiştir. Son kirlenmeden bir hafta sonra bile, sinyal genliği artmıştır. Şekil 4.25. ve 4.26.'teki anomaliler AMY'nın bu zonlarda biriktiğini göstermektedir. Şekil 4.28.'de görüldüğü gibi 3B GPR görüntüleri AMY kirlenmenin zamana bağlı gelişimini açıkça ortaya koymaktadır. Zamanla GPR sinyal genliğinde bir artış meydana gelmiştir. GPR sinyal genliklerindeki bu artış, kirlenme hacmindeki artışın bir sonucu olarak yorumlanabilir.



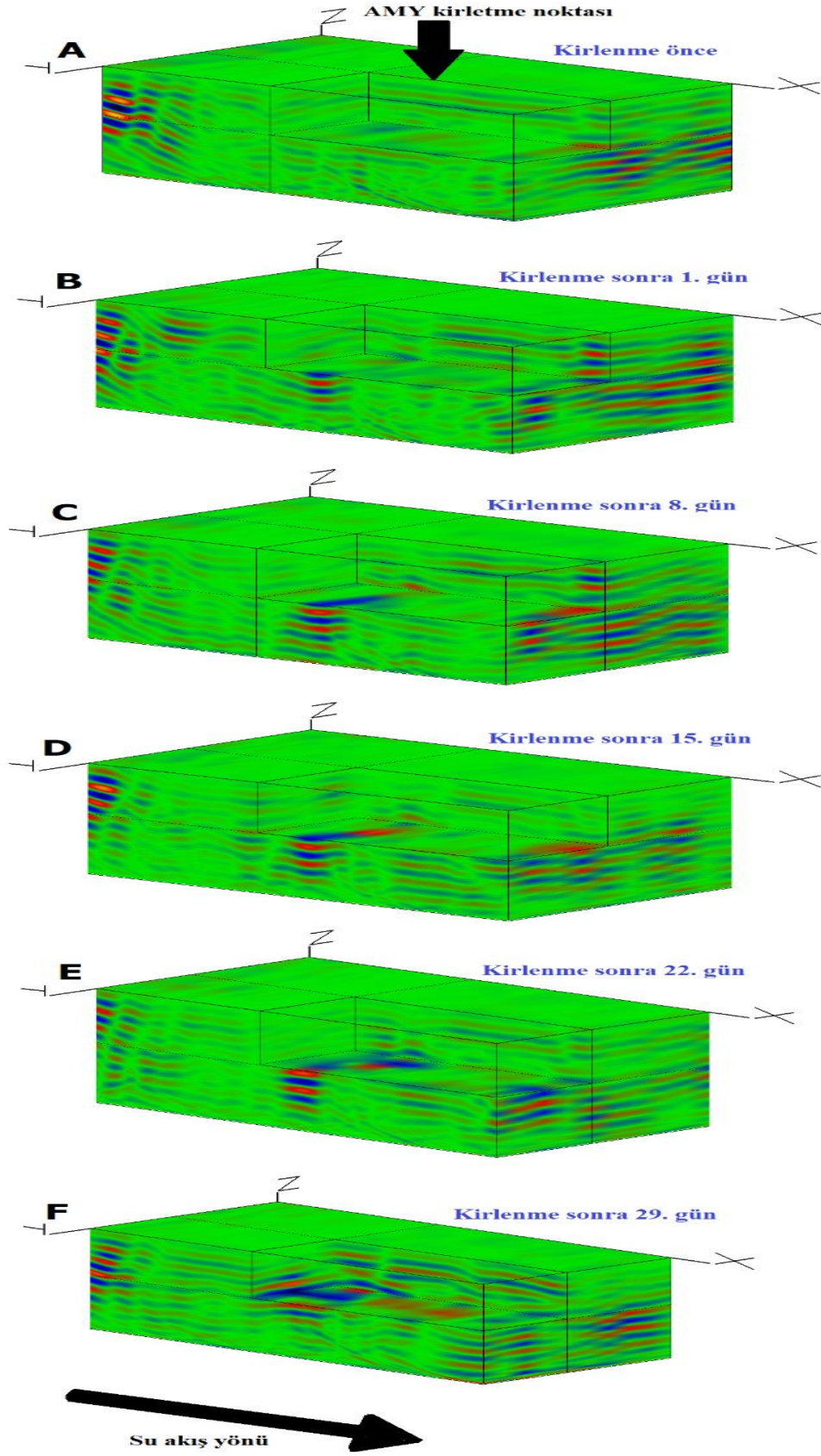
Şekil 4.25. Yağış mevsimi Profil 1'deki AMY'nın zamana bağlı yayılım ve gelişimini gösteren 2B GPR sonuçları. Su akış yönü ok ile gösterilmiştir. Anomaliler siyah elipslerle gösterilmiştir. Dikey geçişler kırmızı okla ve yatay geçişler mavi okla gösterilmiştir.



Şekil 4.26. Yağış mevsimi Profil 5 deki AMY'nın zamana bağlı yayılım ve gelişimini gösteren 2B GPR sonuçları.



Şekil 4.27. Yağış mevsimi Profil 10 daki AMY'nın zamana bağlı yayılım ve gelişimini gösteren 2B GPR sonuçları.



Şekil 4.28. Yağış mevsiminde elde edilen zamana bağlı 3B GPR radargramları.

4.2.2.2. ERT bulguları

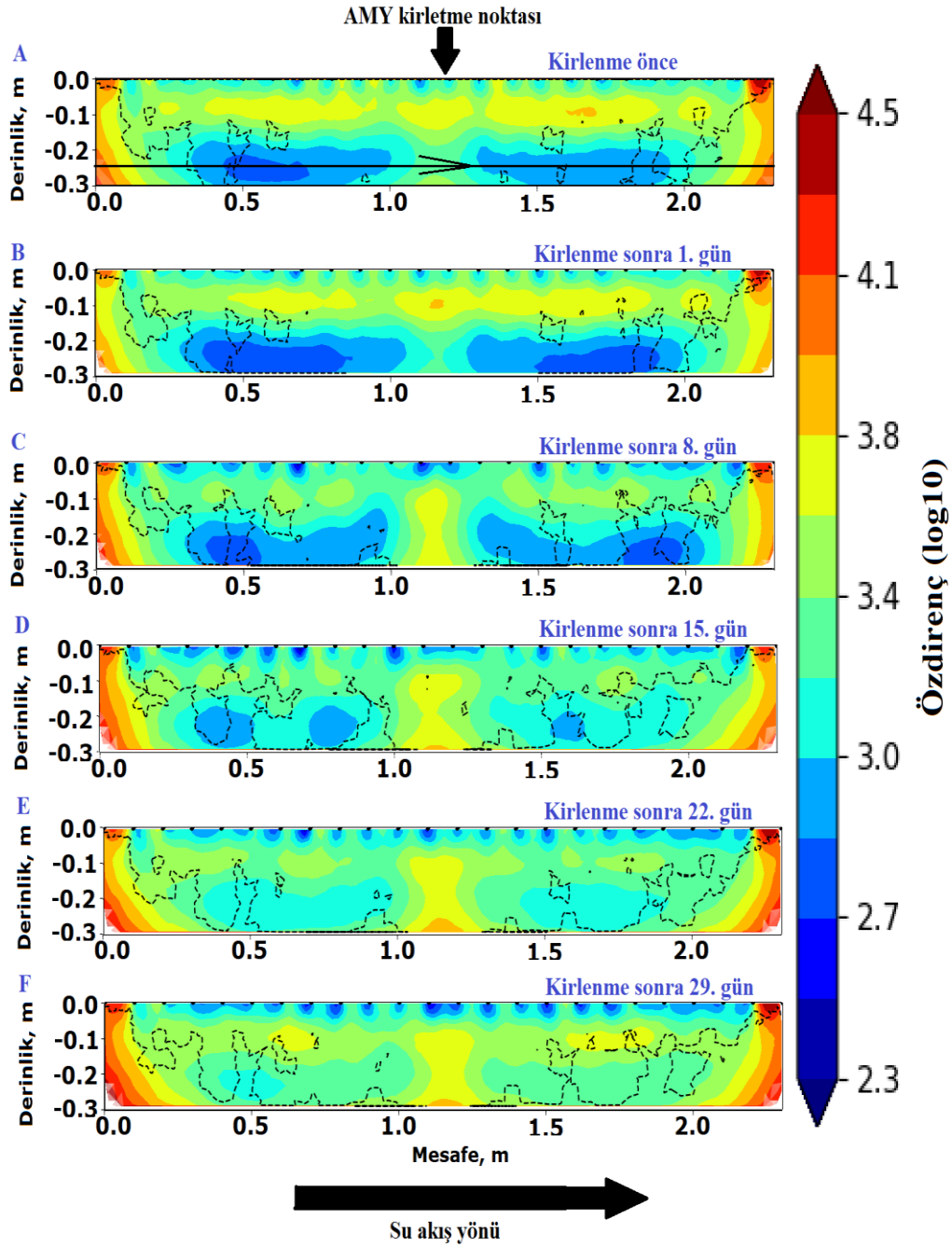
29 günlük süre boyunca 36 adet 2B ERT profilini oluşturan 6 adet ERT ölçü takımı toplandı. Profil 1 (Şekiller 4.29. ve 4.30.), Profil 3 (Şekiller 4.31. ve 4.32.) ve Profil 6'dan (Şekiller 4.33. ve 4.34.) elde edilen sonuçlar seçilerek ve bu tezde sunulmuştur. Her takımdaki 6 adet 2B profil ölçüleri 3B ERT modellerinin (Şekil 4.35.) oluşturulmasında kullanılmıştır.

Profillerin her birinde zemin ERT sonuçları, tank akifer sisteminin stratigrafik unsurlarını ortaya çıkarmıştır (Şekil 4.29., 4.30., 4.33. ve 4.35.'teki ilk, en üst görüntü A). Zemin ERT sonucu, sırasıyla doymuş ve doymamış bölgelerle ilişkili düşük ve yüksek öz dirençli bölgeleri ortaya çıkarmıştır.

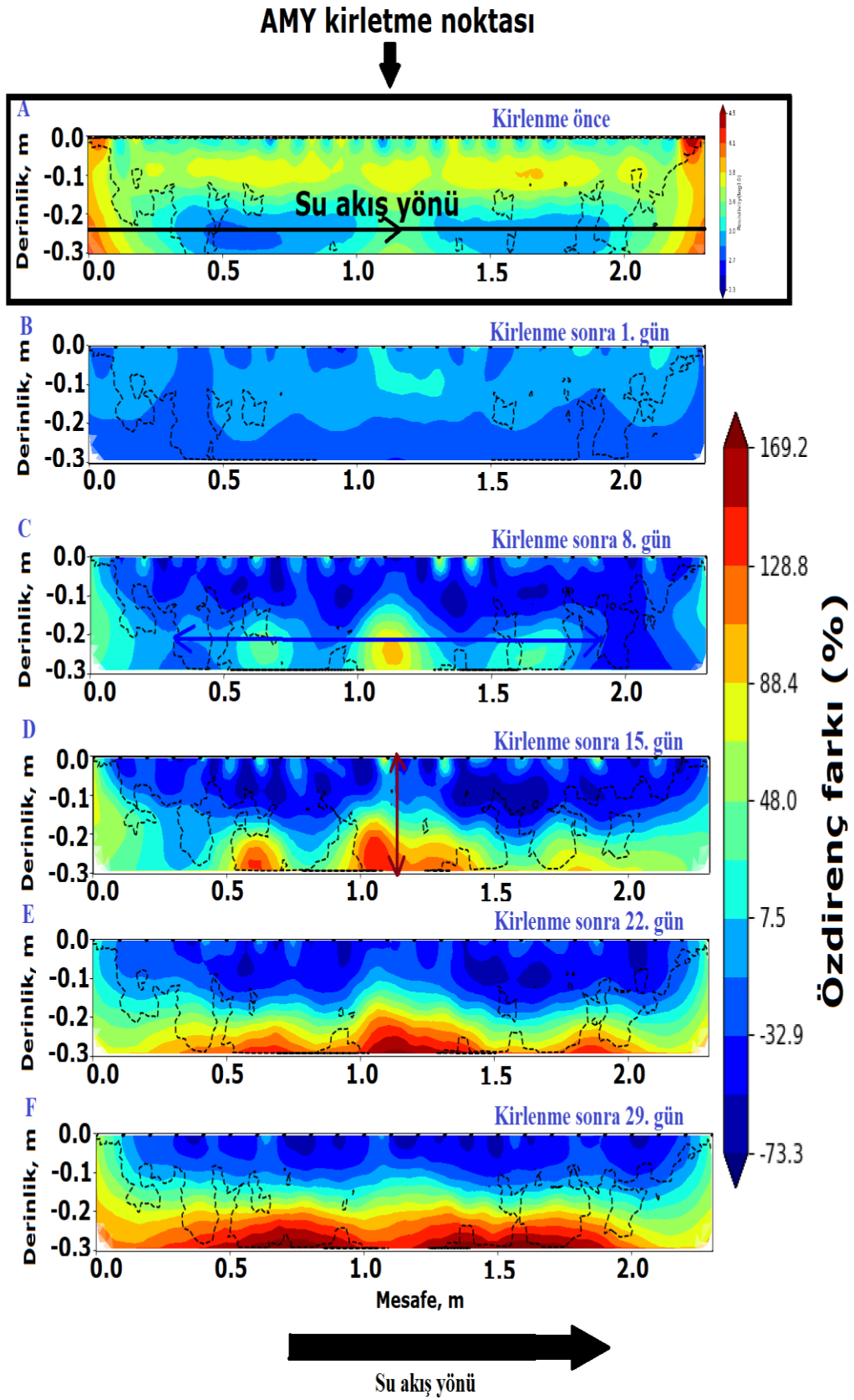
Şekil 4.29'da öz direnç değerleri 2,3 – 4,5 log₁₀ Ohm-m arasında değişmektedir. Genel olarak, Şekil 4.29. A ve 4.29. B, Şekil 4.29.'daki sonucun geri kalanlarından daha yüksek öz dirençlidir. Profil 1'de, AMY birikintisi 8. günden (Şekil 4.29. C) itibaren açıkça görülebilir. Önce Şekil 4.29.'da görüldüğü gibi birikinti dikey (baskın) olarak yayılmış ve zaman ilerledikçe yatay olarak yayılmaya başlamıştır. Zamanla birikintinin öz direnç değerlerinde artış olmuştur. Kirlilik zamanla tankın orta kısmından tankın kenarlarına doğru kademeli olarak yayılmıştır. Ölçülen öz direnç değerlerinin zamana bağlı yüzde değişimlerini gösteren 2B ERT sonuçları Şekil 4.30.'da verilmiştir. Öz direnç değerlerindeki değişim yüzdeleri, 1. günden itibaren sürekli olarak artmıştır (2 litre enjeksiyondan sonra). Öz direnç değerlerindeki yüzde değişimler -% 73,3 (azalan öz direnç) ile %169,2 (artan direnç) arasındadır. Şekil 4.30.'dan AMY'dan etkilenen alanların artan öz direnç değerleri verdiği görülebilir.

Profil 3'ün 2B öz direnç kesiti Şekil 4.31.'de gösterilmektedir. Öz direnç değeri 1,5 ile 3,8 log₁₀ Ohm-m arasında değişmektedir. Profil AMY enjeksiyon çukurunun merkezinden geçmesine rağmen zamana bağlı sonuç AMY yayılımına dair herhangi bir belirti vermemektedir. 0,0 - 0,1 m derinlikten itibaren yüksek öz direnç değerleri gösteren enjeksiyon noktası (yaklaşık 1,25 m mesafe) bir yana, yine Şekil 4.31.'de kirlenmeye dair çok fazla bulgu yoktur. Şekil 4.32.'de gösterildiği gibi öz direnç

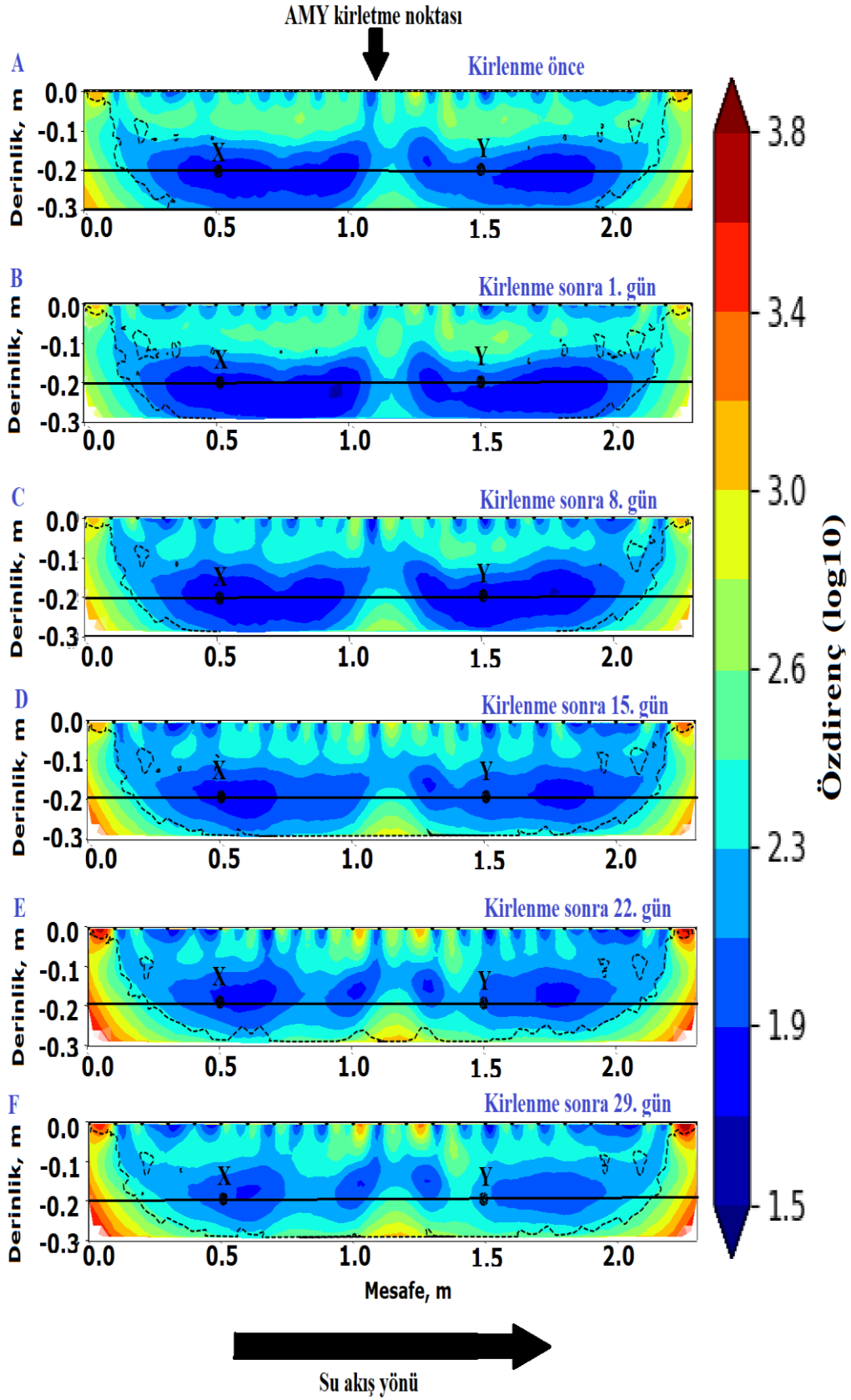
değerlerindeki yüzde değişim Profil 3 için AMY birikintisinin yayılımını ortaya çıkarmıştır. AMY yayılımı Şekil 4.32.'de Şekil 4.31.'e göre açıkça görülmektedir. Özdirenç değerindeki yüzde değişimi %-50 ile %200 arasındadır. Şekil 4.32. B en düşük yüzde değişimini gösterirken, Şekil 4.32. E ve 4.32. F en yüksek yüzde değişimini göstermektedir.



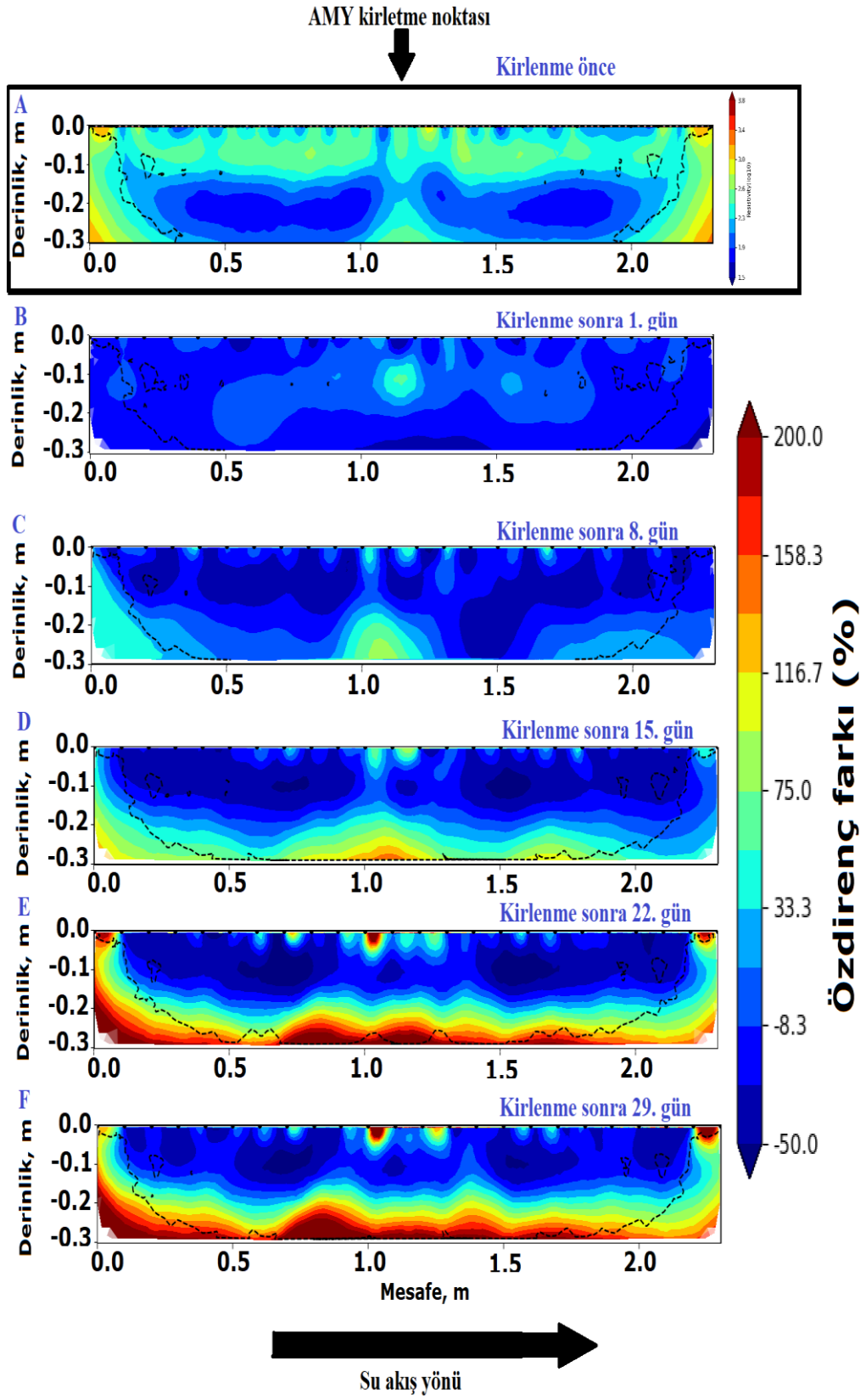
Şekil 4.29. Yağış mevsiminde Profil 1'de ölçülen elektrik özdirenç değerlerinin zamana bağlı gelişimini gösteren 2B ERT sonuçları. Su akış yönü ok ile gösterilmiştir.



Şekil 4.30. Yağış mevsiminde Profil 1’de ölçülen elektrik özdirenç değerlerinin zamana bağlı yüzde değişimleri gösteren 2B ERT sonuçları. Dikey geçişler kırmızı okla ve yatay geçişler mavi okla gösterilmiştir.



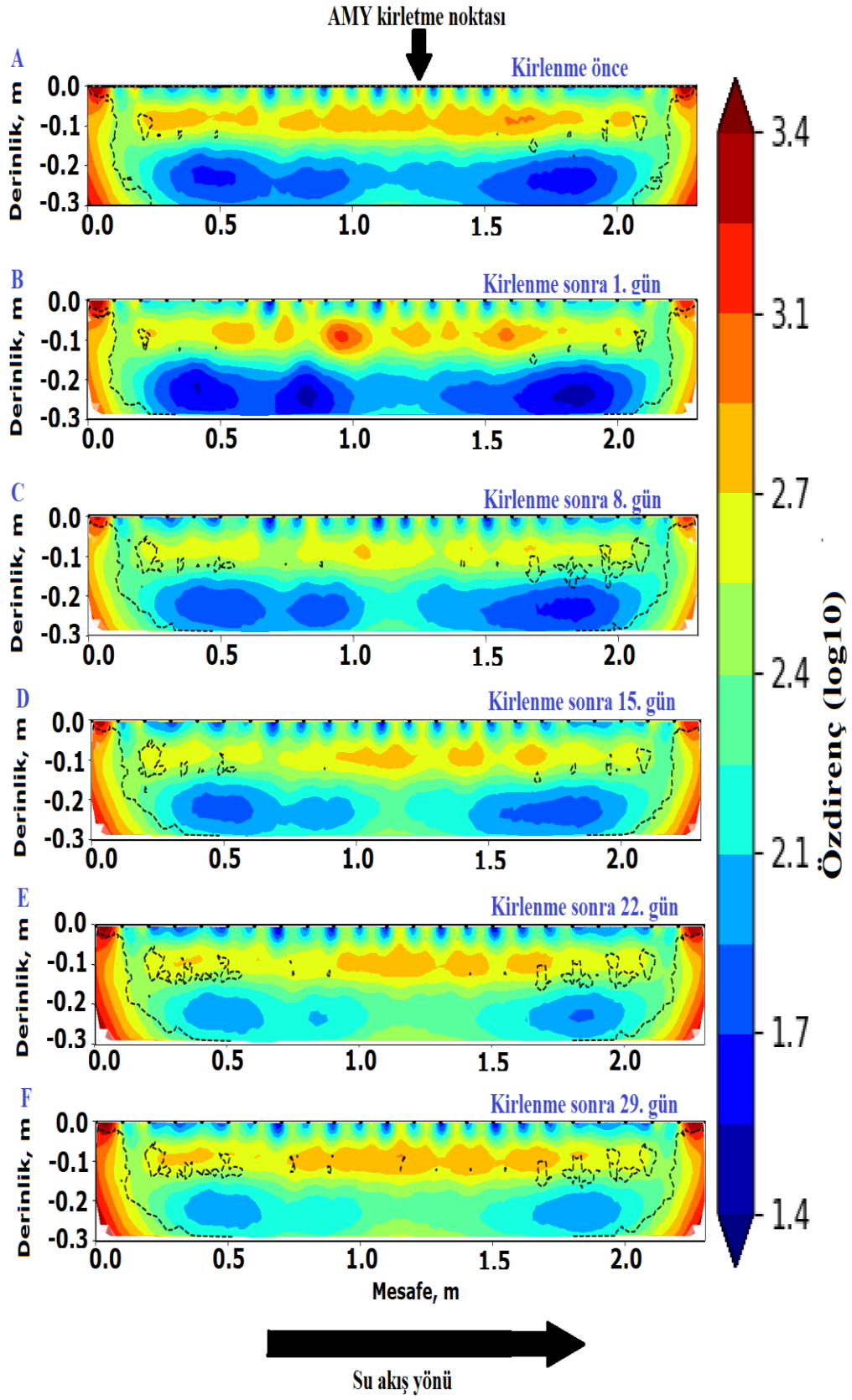
Şekil 4.31. Yağışlı mevsimde Profil 3’de ölçülen elektrik özdirenç değerlerinin zamana bağlı gelişimini gösteren 2B ERT sonuçları.



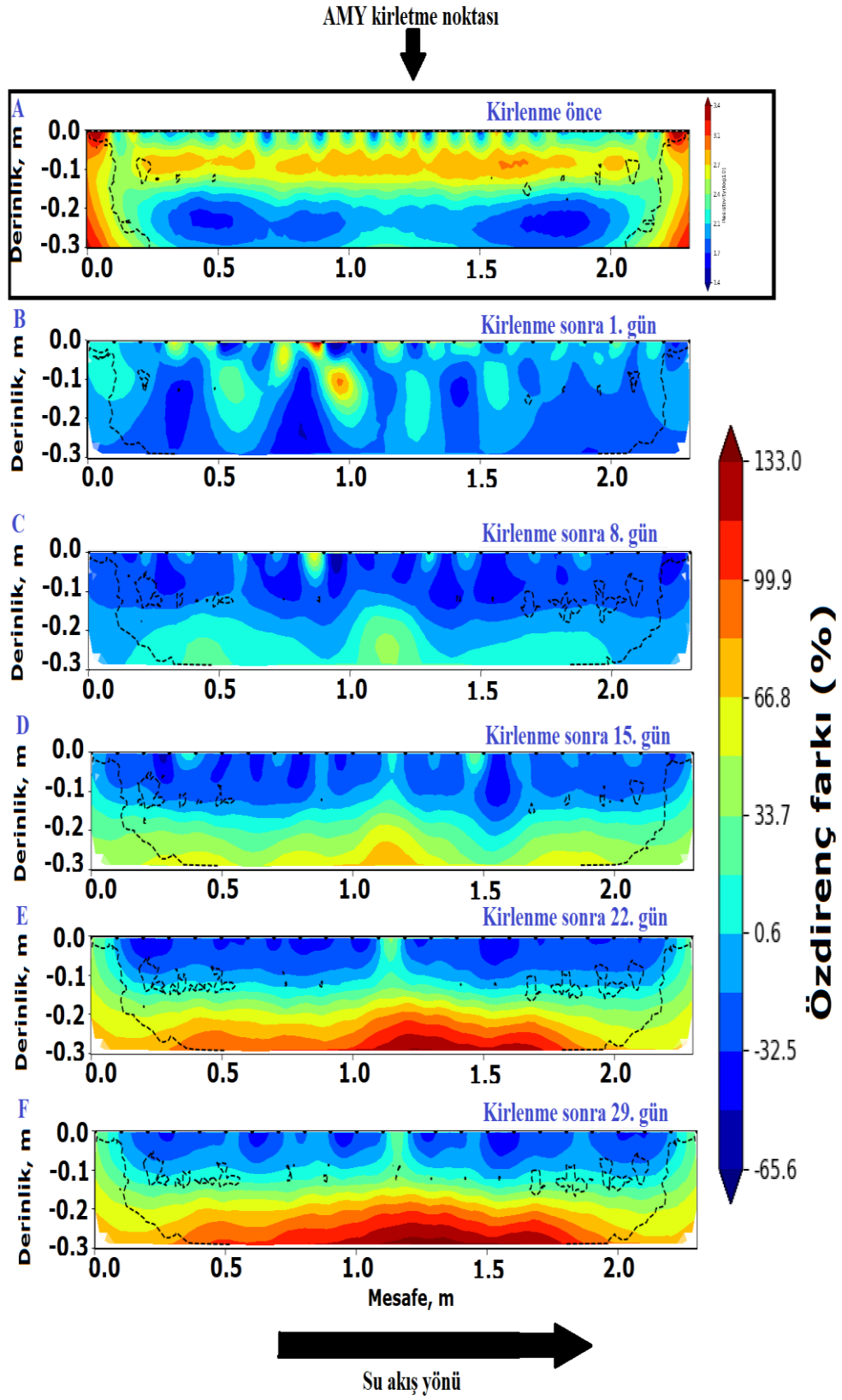
Şekil 4.32. Yağışlı mevsimde Profil 3'de ölçülen elektrik özdirenç değerlerinin zamana bağlı yüzde değişimleri gösteren 2B ERT sonuçları.

Profil 6'dan elde edilen özdirenç sonuçları (Şekil 4.33.), özellikle 1,0 ila 1,5 m arasındaki mesafede zamana bağlı özdirenç değerlerinde genel bir artış olduğunu ortaya koymaktadır. Bu, AMY yayılımının zamanla arttığını göstermektedir. Özdirenç değerleri 1,4 ile 3,4 log₁₀ Ohm-m arasında değişmiştir. Düşey yayılım 15. günden (Şekil 4.33. D) itibaren belirgin olmaya başlamıştır. AMY kirlenme ve yayılımı, katmanlı yapının özdirencini çok fazla etkilememiştir. Çünkü Şekil 4.33.'teki görüntülerin farklılıkları genellikle azdır. Ancak Şekil 4.34.'e bakıldığında, özdirençteki yüzde değişim, Şekil 4.33.'teki 2B özdirenç kesitinin gösterdiği gibi genel olarak benzer değildir. Özdirençteki yüzde değişimi %-65,6 ile %133,0 arasındadır. En yüksek değişiklik 22. ve 29. günde (Şekil 4.34. E ve 4.34. F), en düşük değişiklik ise 8. günde kaydedilmiştir (Şekil 4.34. C). Deneyin üst yüzeyinden ortaya çıkan özdirençte yüksek bir değişiklik olduğu ve Şekil 4.34. B'de (kirlenmeden sonraki 1. günde) yaklaşık 0,2 m derinliğe, aşağıya doğru hareket ettiği anlaşılmıştır. Bu nokta, AMY enjeksiyon lokasyonu değildir ve bu anomalinin kaynağı bilinmemektedir.

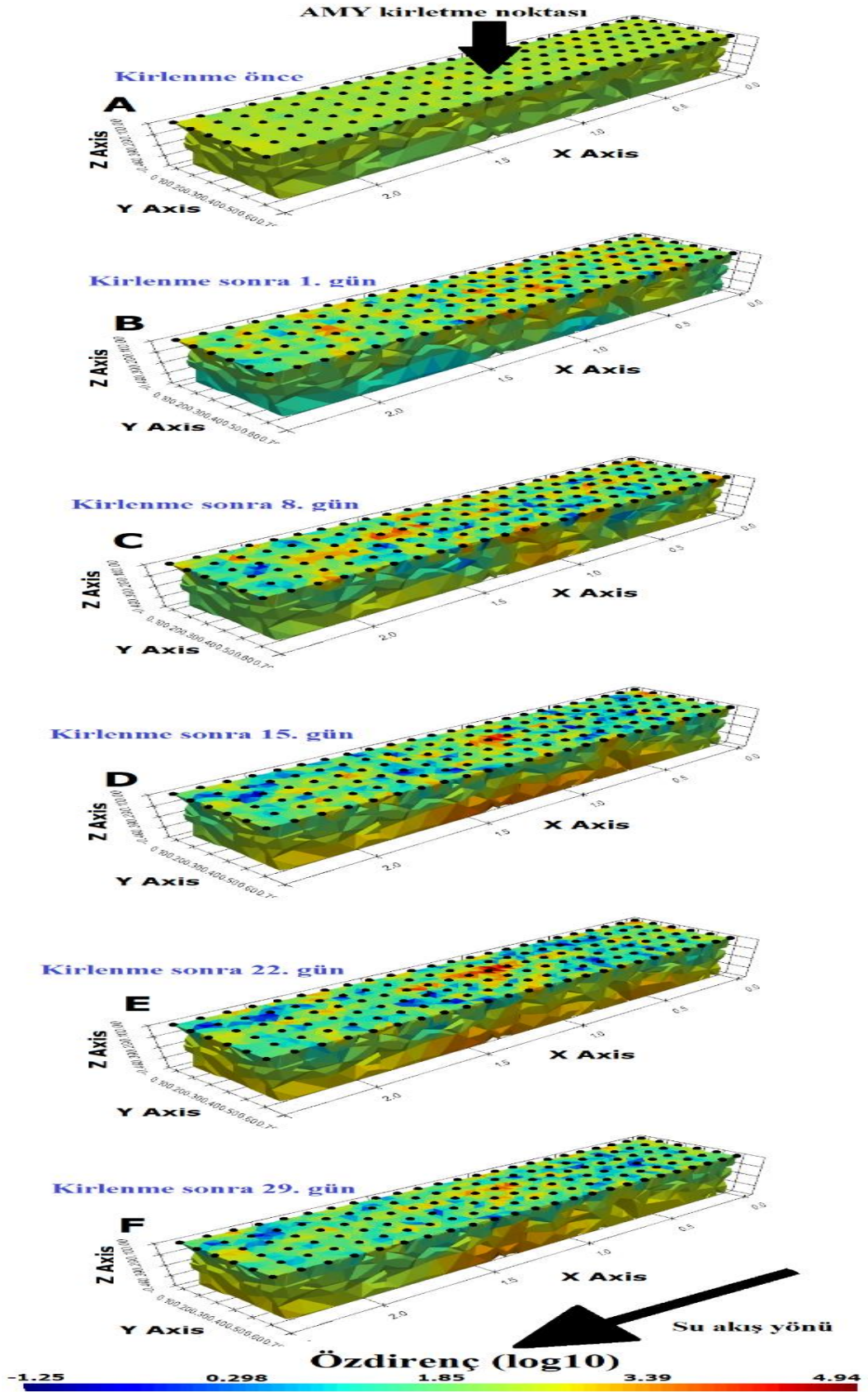
3B ERT sonuçları (Şekil 4.35.) AMY kirlenmesinin zamana bağlı gelişiminin daha açık ve net olarak göstermektedir. Zamana bağlı 3B ERT sonuçları, özdirenç değerlerinin -1,25 ile 4,94 log₁₀ Ohm-m arasında değiştiğini göstermektedir. Sonuçlar tank modelindeki üç katmanlı yapıyı ortaya çıkarmıştır. Şekil 4.35. A'da gösterildiği gibi orta katman, üst ve alt katmanlara göre biraz daha yüksek özdirenç sahiptir. Bunun nedeni simüle edilmiş yeraltı suyu tablasının 0,15 m'de olmasıdır. Ayrıca yağışlı mevsim benzetiminde kurulumun üst yüzeyine ilave su eklenmiştir. Deney süresi ilerledikçe üst katman, diğer katmanlara nispeten daha iletken hale gelmiştir. Orta katman da zemin ölçülerinde kaydedilenden biraz daha iletken hale gelmiştir. AMY'nın düşey ve yatay yayılımı 1. günden (Şekil 4.35. B) itibaren aşamalı olarak görülmektedir. Özellikle alt tabaka olmak üzere zamanla özdirenç değerlerinde genel bir artış gözlenmiştir.



Şekil 4.33. Yağışlı mevsimde Profil 6 da ölçülen elektrik öz direnç değerlerinin zamana bağlı gelişimini gösteren 2B ERT sonuçları.



Şekil 4.34. Yağış mevsiminde Profil 6 için elektrik öz direnç değerlerinin zamana bağlı yüzde değişimlerini gösteren 2B ERT sonuçları.



Şekil 4.35. Yağışlı mevsimi kurulumun zamana bağlı özdirenç değişimini gösteren 3B ERT sonuçları.

4.2.3. Yaz mevsimi benzerim bulguları

Bu bölümde yaz mevsimi benzetiminden elde edilen sonuçlar sunulmuştur. Yaz az yağış miktarı ve yüksek sıcaklık özellikleri ile tanımlanabilir. Yaz benzetimli bu iki ayırt edici özellik kullanılarak simüle edilmiştir. Bölüm iki alt bölüme ayrılmıştır. Bunlar GPR ve ERT bulguları bölümleridir.

4.2.3.1. Yer radarı bulguları

Bu benzetim döneminde toplam 60 adet 2B GPR profil ölçümü gerçekleştirilmiştir. Ölçümler 6 farklı günde 10'luk setler halinde yapılmıştır. Yani AMY enjeksiyonundan önce, ilk AMY enjeksiyonundan 1, 8, 15, 22 ve 29 gün sonra ölçüler alınmıştır. Akifer sistemi içinde AMY'nın gelişimi ve yayılımını anlamak için 2B ve 3B radargramlar elde edilmiş ve yorumlanmıştır. Bu tezde sunulmak üzere Profil 1 (Şekil 4.36.), Profil 5 (Şekil 4.37.) ve Profil 10 (Şekil 4.38.) seçilmiştir.

Profil 1 tankın merkezinden 25 cm ve AMY enjeksiyon kaynağından yaklaşık 20 cm uzaklıkta konumlandırılmıştır. Şekil 4.36.'den AMY enjeksiyonunun bir sonucu olarak anomalinin net bulgusu C'den başlayarak görülmektedir (4 litre AMY enjeksiyonundan sonra 8. gün). AMY birikintisinin sinyali artan GPR sinyal genliği ile karakterize edilir ve sinyalin gücü, zamanın ilerlemesi ile artar. AMY'nın düşey yayılımı 8. günden itibaren oldukça belirgin olmakla birlikte, yanal yayılım yalnızca Şekil 4.36. C ve 4.36. D'de belirgindir.

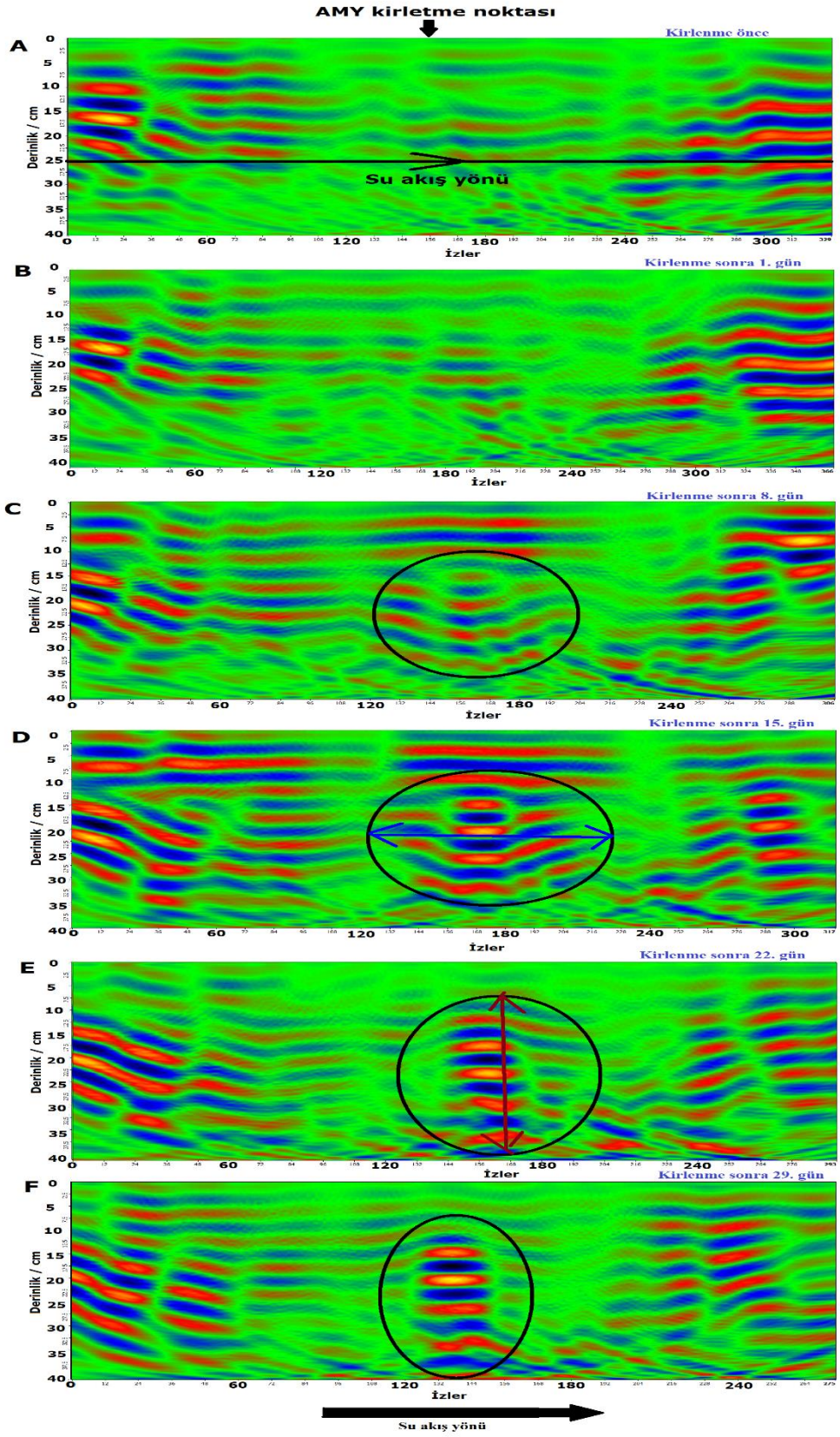
Profil 5, Profil 1'den 25 cm uzaklıkta bulunur ve deney düzeneğini yaklaşık olarak enine iki kısma ayırmıştır. Ayrıca AMY enjeksiyon kaynağının merkezinden de geçer. Profil 5'teki zamana bağlı GPR sonuçları Şekil 4.37.'te gösterilmektedir. Şekil 4.37.'de yatay reflektörler boydan boya görülmektedir. Bu reflektörler tank içindeki katmanlı oluşumları temsil eder. AMY enjeksiyonu yatay reflektörlerin bozulmasına neden olmuştur. Şekil 4.37.'den görüldüğü gibi bu bozulma, enjekte edilen AMY'nın hacmi ile doğrudan ilişkilidir. 1. güne (2 litre AMY enjeksiyonundan sonra) ve 8. güne (4 litre AMY enjeksiyonundan sonra) karşılık gelen Şekil 4.37. B ve 4.37. C için, Şekil

4.37.'deki radargramın geri kalanlarına kıyasla çok az yağ enjeksiyonu bulgusu vardır. Giriş ve çıkış metalik su muslukları ile ilişkili radargramın sol ve sağ tarafındaki anomaliler bir yana, radargramın kirlenmiş bölüme karşılık gelen orta kısmı yüksek GPR sinyal genliği ile karakterize edilir.

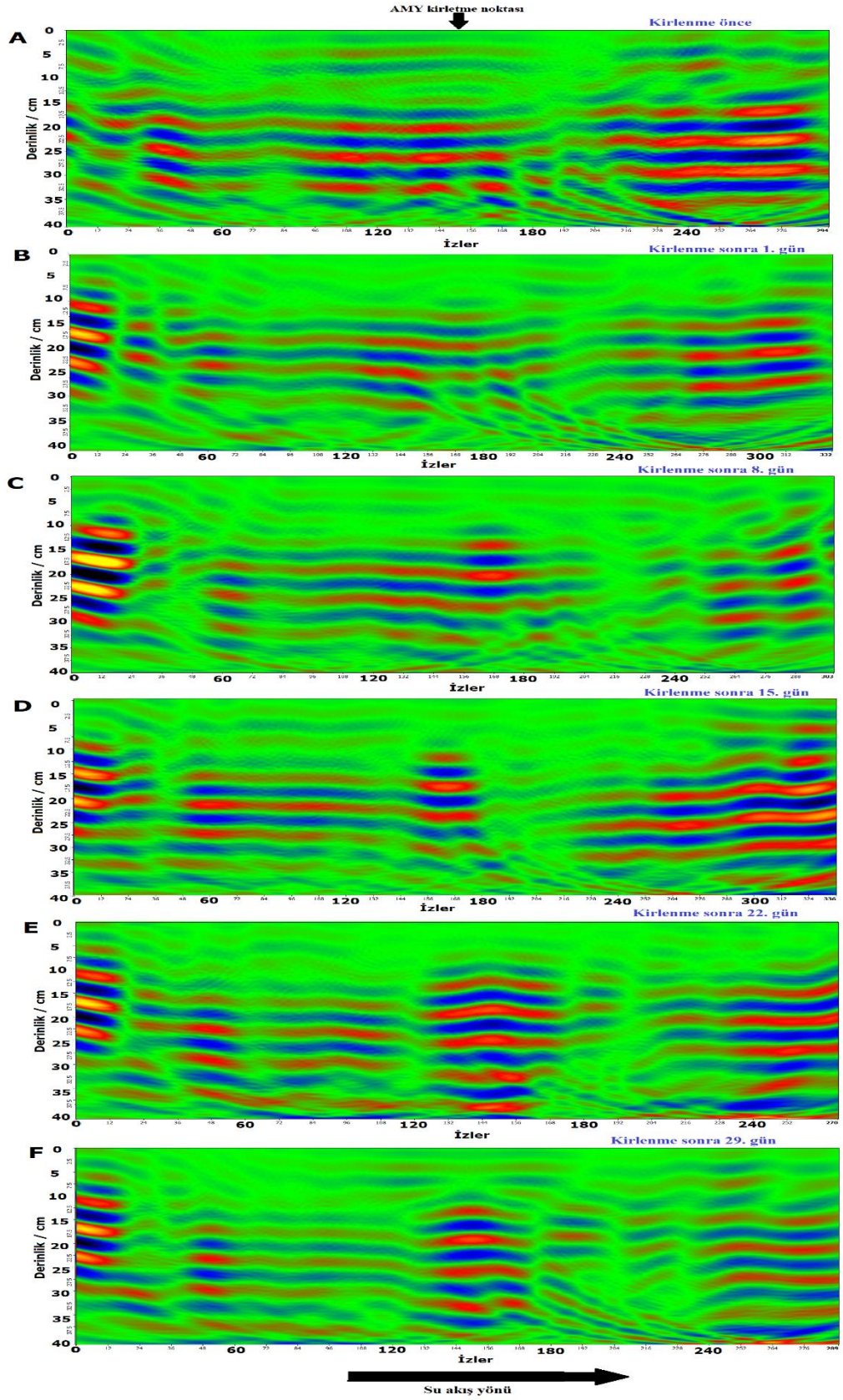
Profil 10, Profil 1'den 45 cm ve Profil 5'ten 25 cm uzaklıkta bulunmaktadır. Şekil 4.38.'de verilen, Profil 10 ölçümlerinden elde edilen zamana bağlı radargram GPR sinyallerinin genliğinde zamana bağlı artış olduğu çok belirgindir. AMY kirlenmesi bu radargramlarda açıkça görülmektedir. Şekil 4.38.'de gösterildiği gibi AMY birikinti zonu, Profil 1'e ait Şekil 4.37.'de gösterilenden daha küçüktür. Şekil 4.36., 4.37. ve 4.38.'den akifer sistemi içindeki AMY kirlenmesinin hem yanal hem de düşey yönde yayılım yapmıştır.

AMY kirlenmesinin geometrisinin ve GPR karakteristiğinin daha ayrıntılı bir görüntüsü için Şekil 4.39.'de 3B zamana bağlı radargramlar gösterilmektedir. Şekil 4.39. zemin AMY enjeksiyonundan önceki deneysel kurulumun ilk durumunu (Şekil 4.39. A) ortaya koymakta ve metalik su musluklarıyla ilişkili radargramın yanlarındaki anomaliler açıkça görünmektedir. Bu iki anomali grubu, bu yaz mevsimi benzetim deneyleri boyunca ve bu tezdeki diğer simüle edilmiş deneyler boyunca ölçülerde gürültü olarak bulunmaktadır.

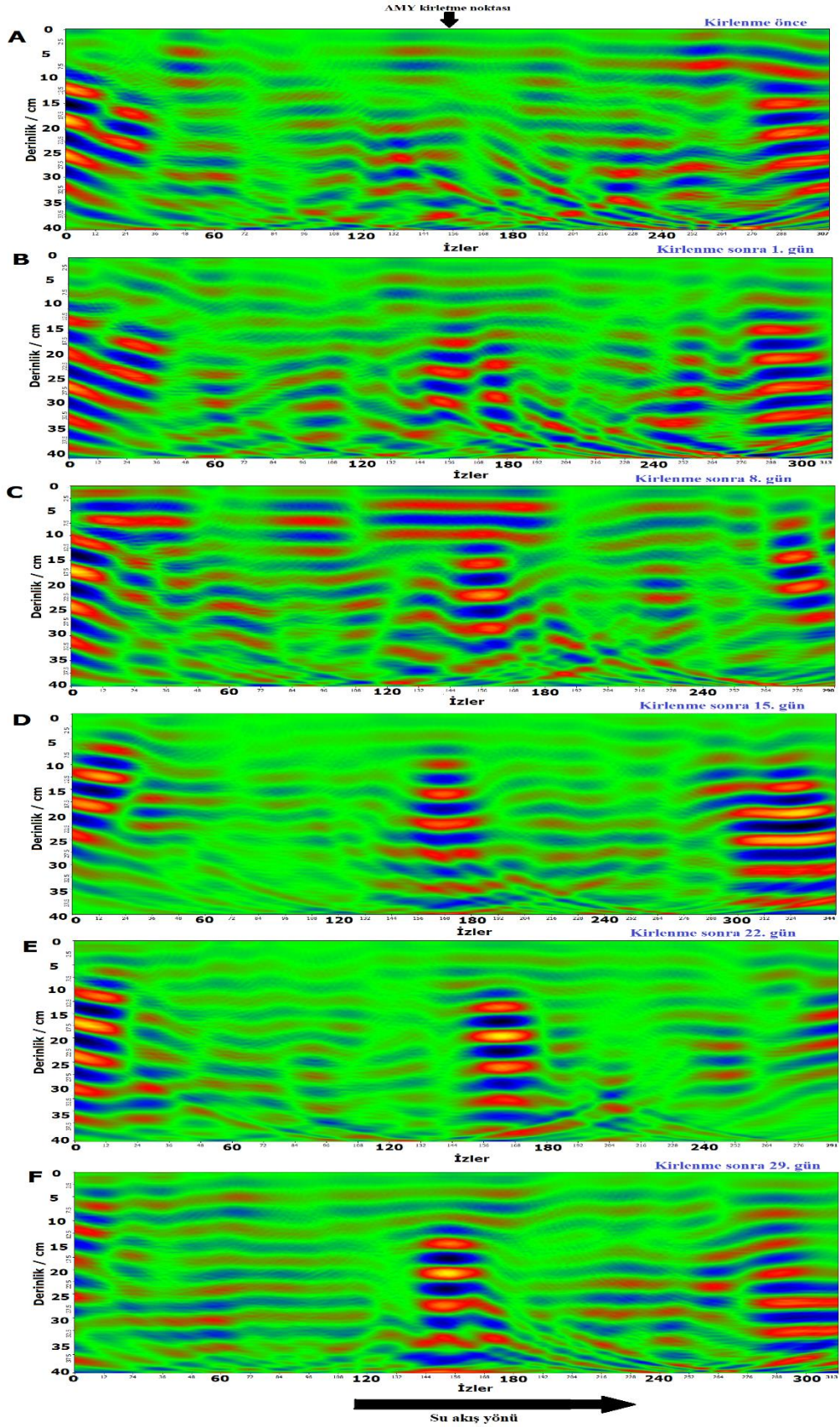
Gün 1'den (Şekil 4.39.A) 2 litre AMY enjeksiyonundan sonra, artmış GPR sinyal genliğine sahip anomaliler radargramın orta bölümünde ortaya çıkmaya başlamıştır. Zaman ilerledikçe bu sinyalin gücü artmaktadır. Bu anomaliler enjekte edilen AMY ile ilişkilidir ve genliğin artması enjekte edilen AMY hacminin zamanla artması ile açıklanabilir.



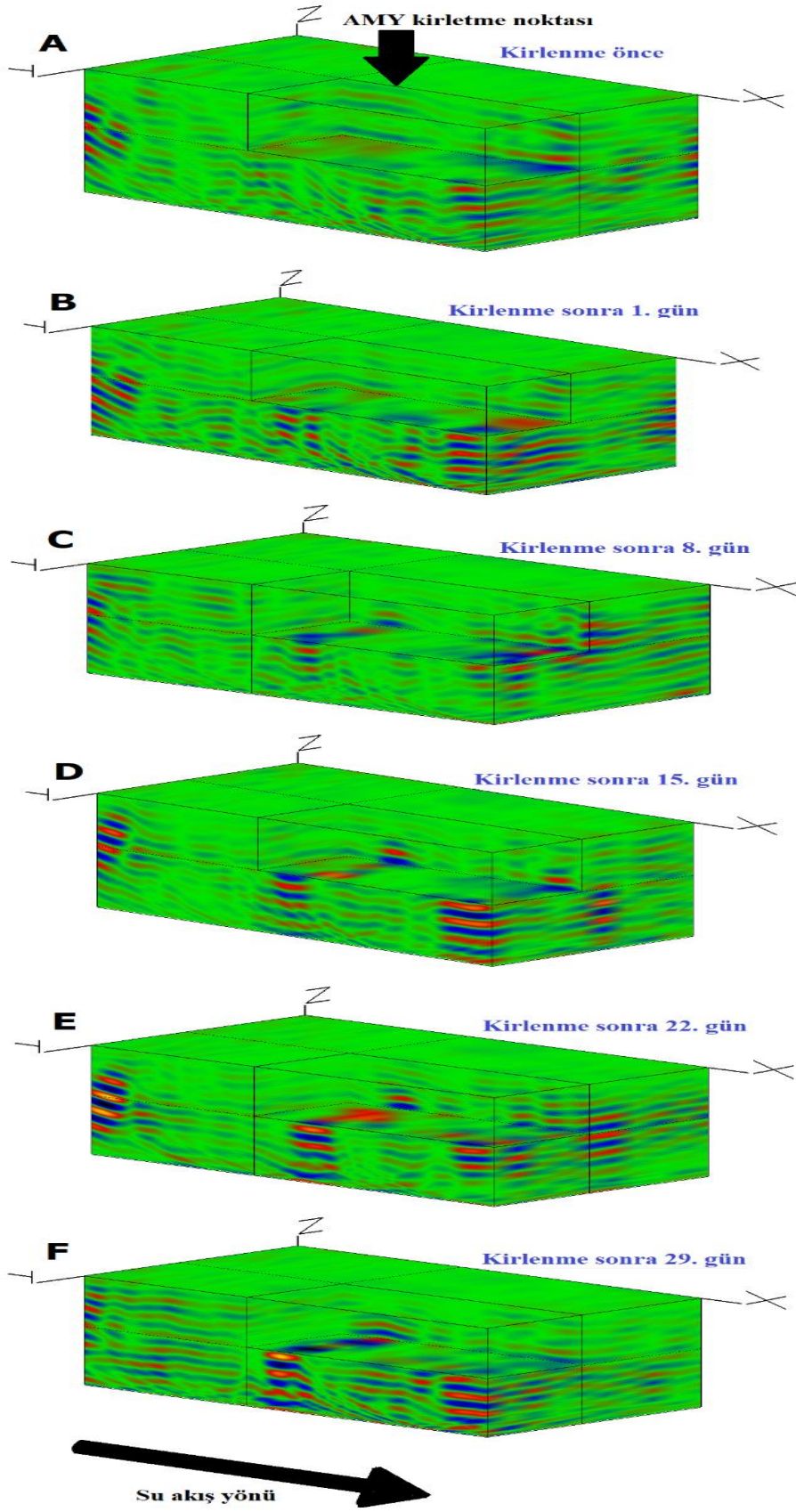
Şekil 4.36. Yaz mevsiminde Profil 1'deki AMY'nın zamana bağlı göç ve gelişimini gösteren 2B GPR sonuçları. Su akış yönü ok ile gösterilmiştir. Anomaliler siyah elipslerle gösterilir. Dikey geçişler kırmızı okla ve yatay geçişler mavi okla gösterilmiştir.



Şekil 4.37. Yaz mevsiminde Profil 5'deki AMY'nın zamana bağlı yayılım ve gelişimini gösteren 2B GPR sonuçları.



Şekil 4.38. Yaz mevsiminde Profil 10'daki AMY'nın zamana bağlı yayılım ve gelişimini gösteren 2B GPR sonuçları.



Şekil 4.39. Yaz mevsiminde elde edilen zamana bağlı 3B GPR radargramları

4.2.3.2. ERT Bulguları

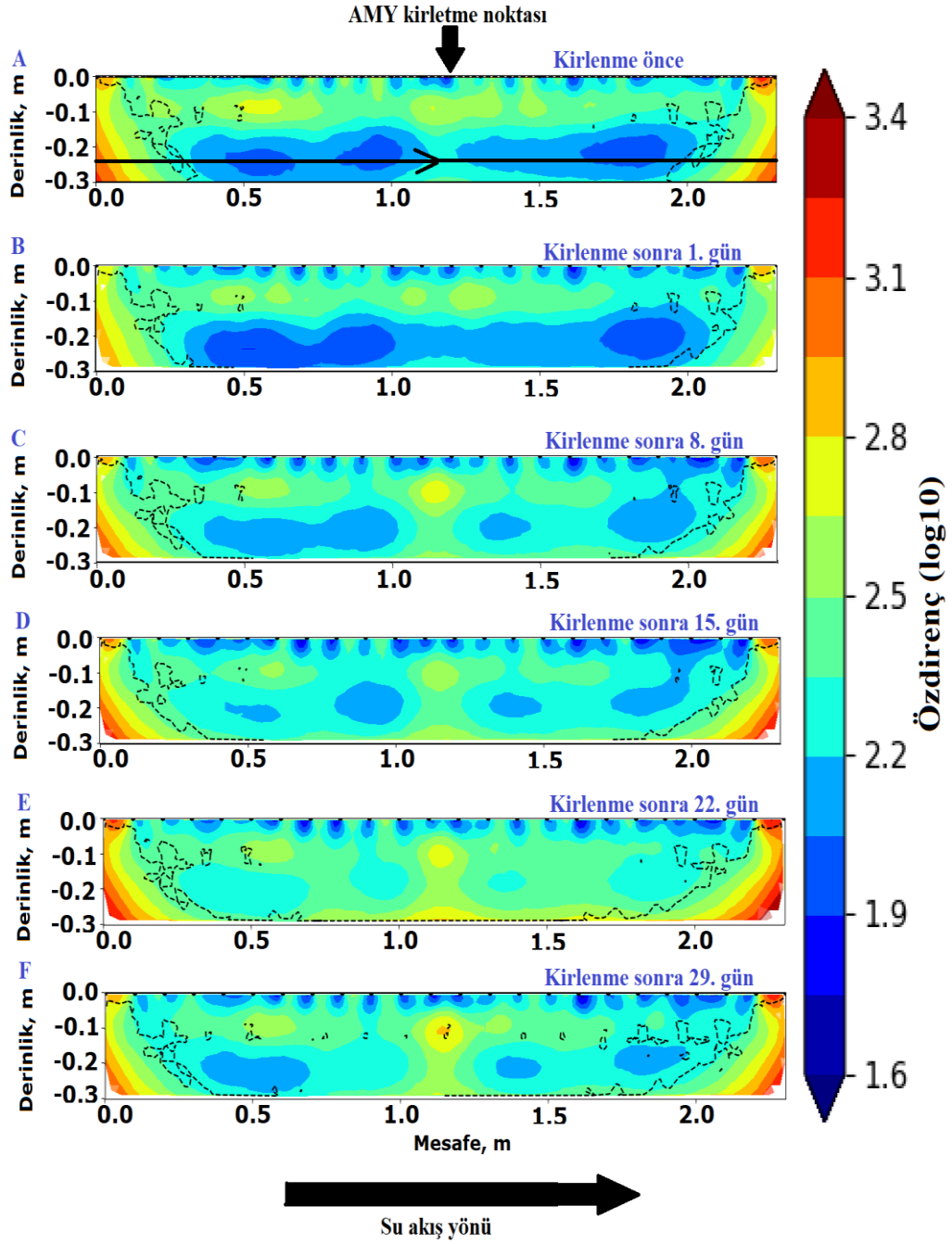
Bu yaz mevsimi benzetim deneylerinde toplam 36 adet ERT 2B profil ölçümü yapılmıştır. Bu profiller 6 adet 3B ERT görüntüsü oluşturmak için kullanılmıştır. 36 adet ERT görüntüsü, farklı günlerde toplanan 6 takım 2B profillerden oluşmaktadır. Bu tezde sunum için Profil 1, 3 ve 6 seçilmiştir.

Şekil 4.40. Profil 1'in 2B özdirenç kesitini göstermektedir. Özdirenç değerleri 1,6 ile 3,4 log₁₀ Ohm-m arasında değişmektedir. Şekil 4.40. A ve 4.40. B, şekildeki diğer sonuçlara kıyasla daha az özdirenç değerlerine sahiptir. Bu profilde gösterilen AMY yayılımı, Şekil 4.40. C'de 8. günde (ikinci 2 litre enjeksiyondan sonra toplam 4 litre) ortaya çıkmaktadır. Şekil 4.40. C'den itibaren, özdirençte genel bir artış gözlenmiştir. Ayrıca AMY yayılımı baskın olarak düşeydir. Ancak Şekil 4.40. E ve 4.40. F'de yanal bir yayılım da gözlenmiştir.

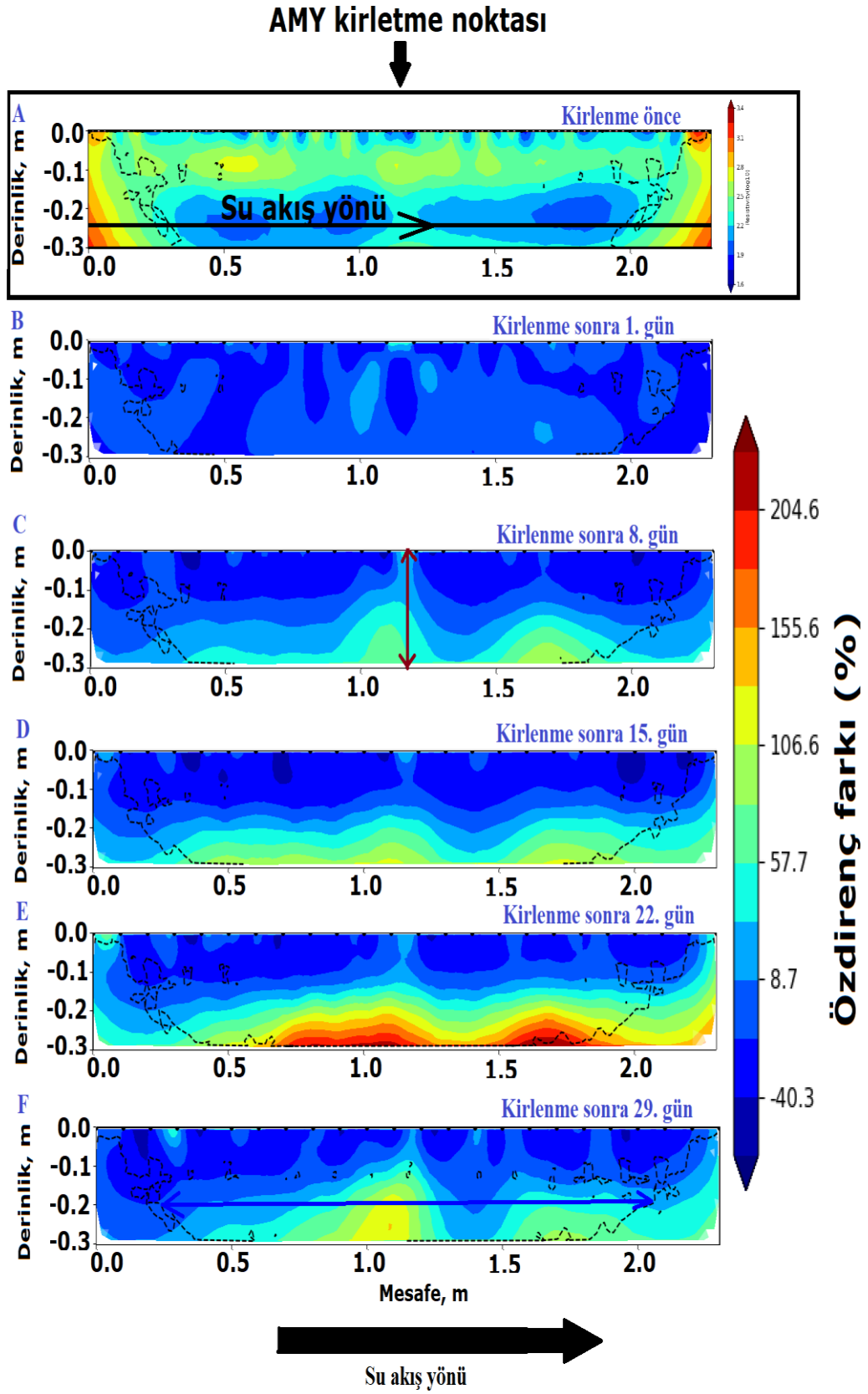
Profil 1'in ölçülen zamana bağlı özdirenç değerlerindeki % değişim Şekil 4.41.'de gösterilmiştir. Özdirençteki % değişim %-40,3 ile %204,6 arasındadır. Özdirençteki en yüksek pozitif değişiklik Şekil 4.41. E'de (toplam 8 litre AMY enjeksiyonundan sonra) ve en düşük Şekil 4.41. B'de (2 litre AMY enjeksiyonundan sonra) görülmektedir. Şekil 4.41.'de AMY'nın hem düşey hem de yanal yayılımı gözlenmiştir.

Kurulumun merkez hattında bulunan Profil 3 boyunca elde edilen sonuçlar Şekil 4.42. ve 4.43.'te verilmektedir. Şekil 4.41., Profil 3'ün 2B özdirenç kesitini gösterilmektedir. Özdirenç değerleri 1,4 ile 3,9 log₁₀ Ohm-m arasında değişmektedir. Yaklaşık 1,25 cm'de bulunan AMY enjeksiyonunun kaynağında bir miktar özdirençli anomali dışında AMY yayılımına dair çok fazla bulgu elde edilememiştir. Profil 3 doğrudan AMY enjeksiyonu kaynağından geçmesine rağmen Şekil 4.42.'de bariz düşey ve yanal yayılımın olmaması AMY birikintisinin Profil 3 yönünde görünmeyen başka bir yönde hareket ettiğini göstermektedir. Şekil 4.42.'deki özdirenç kesiti, Şekil 4.43.'teki özdirenç kesitindeki yüzde değişiminden çok farklı değildir. AMY enjeksiyonunun kaynağında özdirençte yaklaşık %497,1'lik yüksek pozitif değişiklik olmasına rağmen, kesitlerin diğerlerinde özdirençte genel bir negatif değişiklik gözlenmektedir. Bu

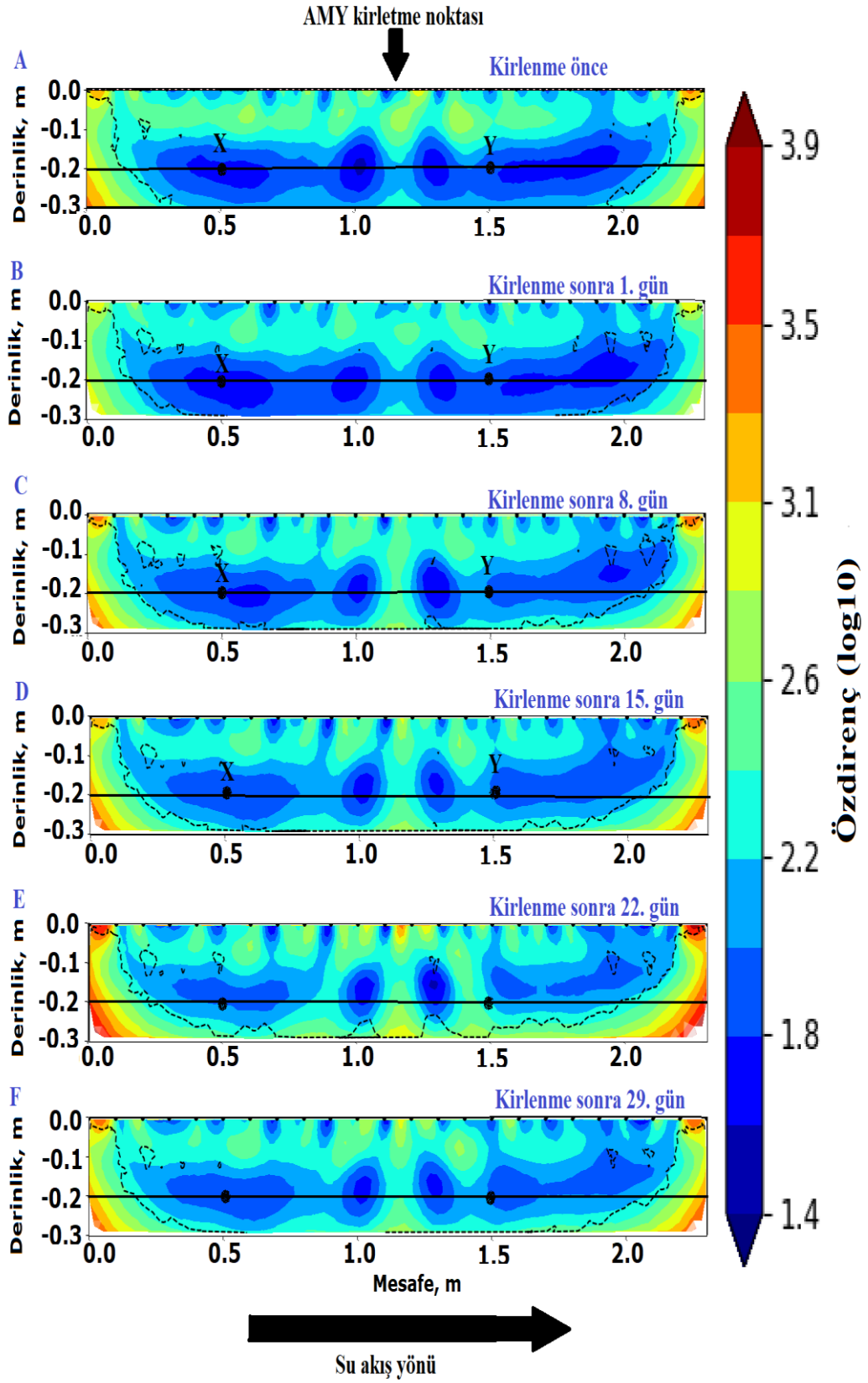
Profil 3 başka LAPNL arařtırmacılarının yaptıđı gibi tek bir profil olarak deđerlendirilse idi, kirletici maddenin dűsey ve yanal yayılımı ortaya konulamazdı. Deneilerimizde birden fazla profilden veri alınması ve bunların 3B modellenmesi kirlenmenin dűsey ve yanal yayılımının 3B olarak ayrıntılı gűrűntűlenmesini sađlamaktadır.



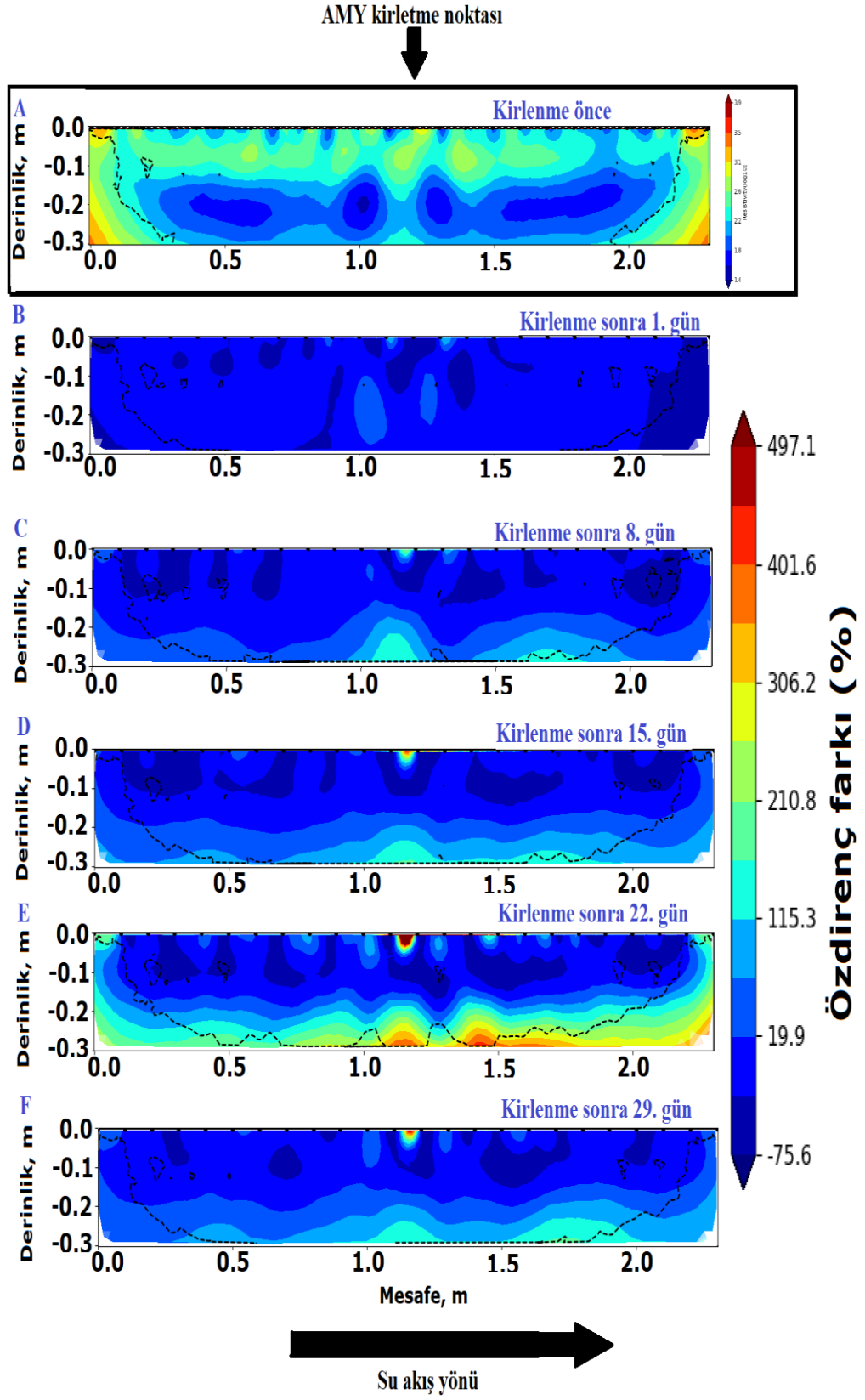
Őekil 4.40. Yaz mevsiminde Profil 1'de lűlen elektrik özdirenç deđerlerinin zamana bađlı geliřimini gűsteren 2B ERT sonuçları.



Şekil 4.41. Yaz mevsiminde Profil 1’de ölçülen elektrik özdirenç değerlerinin zamana bağlı yüzde değişimleri gösteren 2B ERT sonuçları. Dikey geçişler kırmızı okla ve yatay geçişler mavi okla gösterilmiştir.



Şekil 4.42. Yaz mevsiminde Profil 3'de ölçülen elektrik özdirenç değerlerinin zamana bağlı gelişimini gösteren 2B ERT sonuçları.

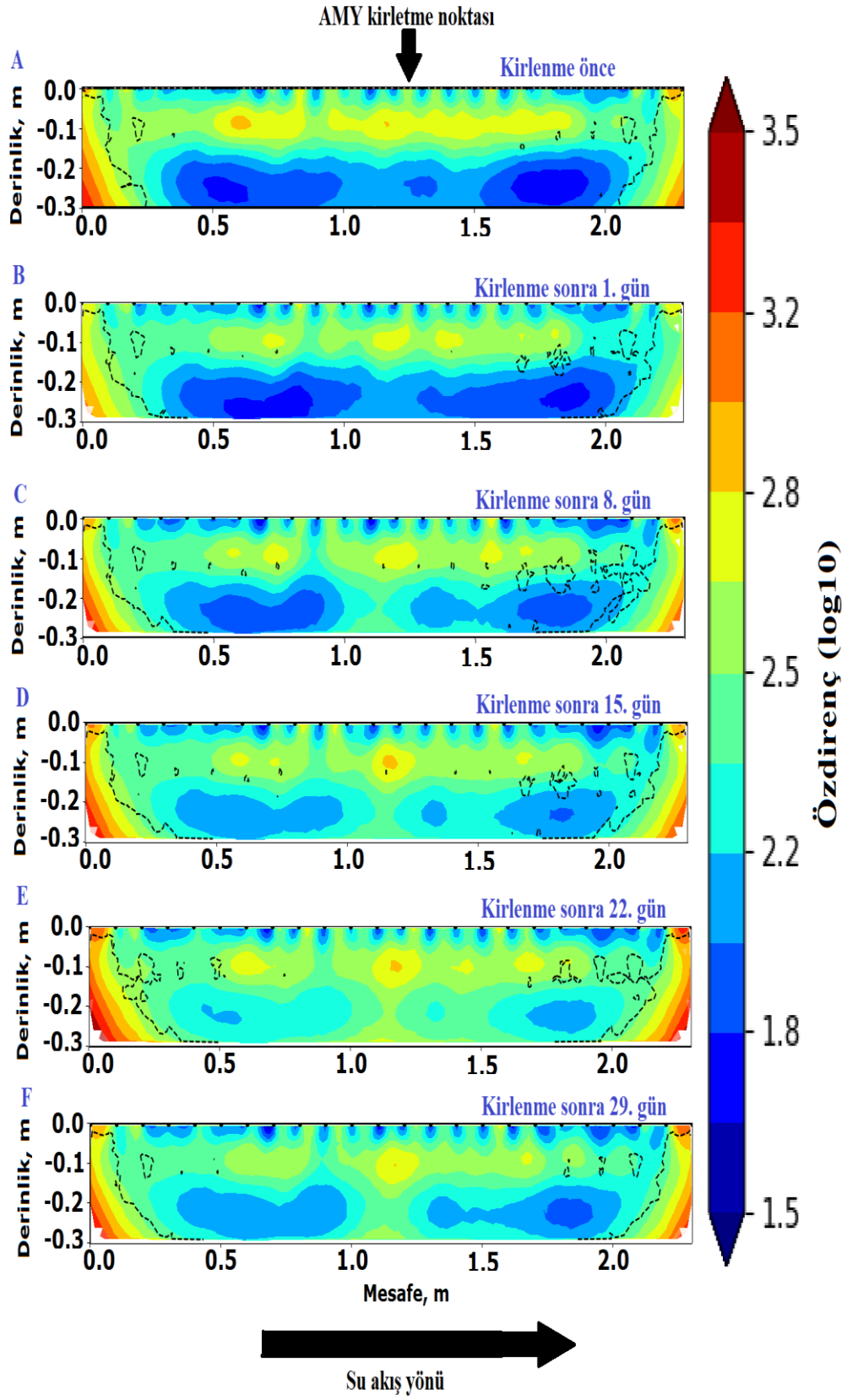


Şekil 4.43. Yaz mevsiminde Profil 3'de ölçülen elektrik özdirenç değerlerinin zamana bağlı yüzde değişimleri gösteren 2B ERT sonuçları.

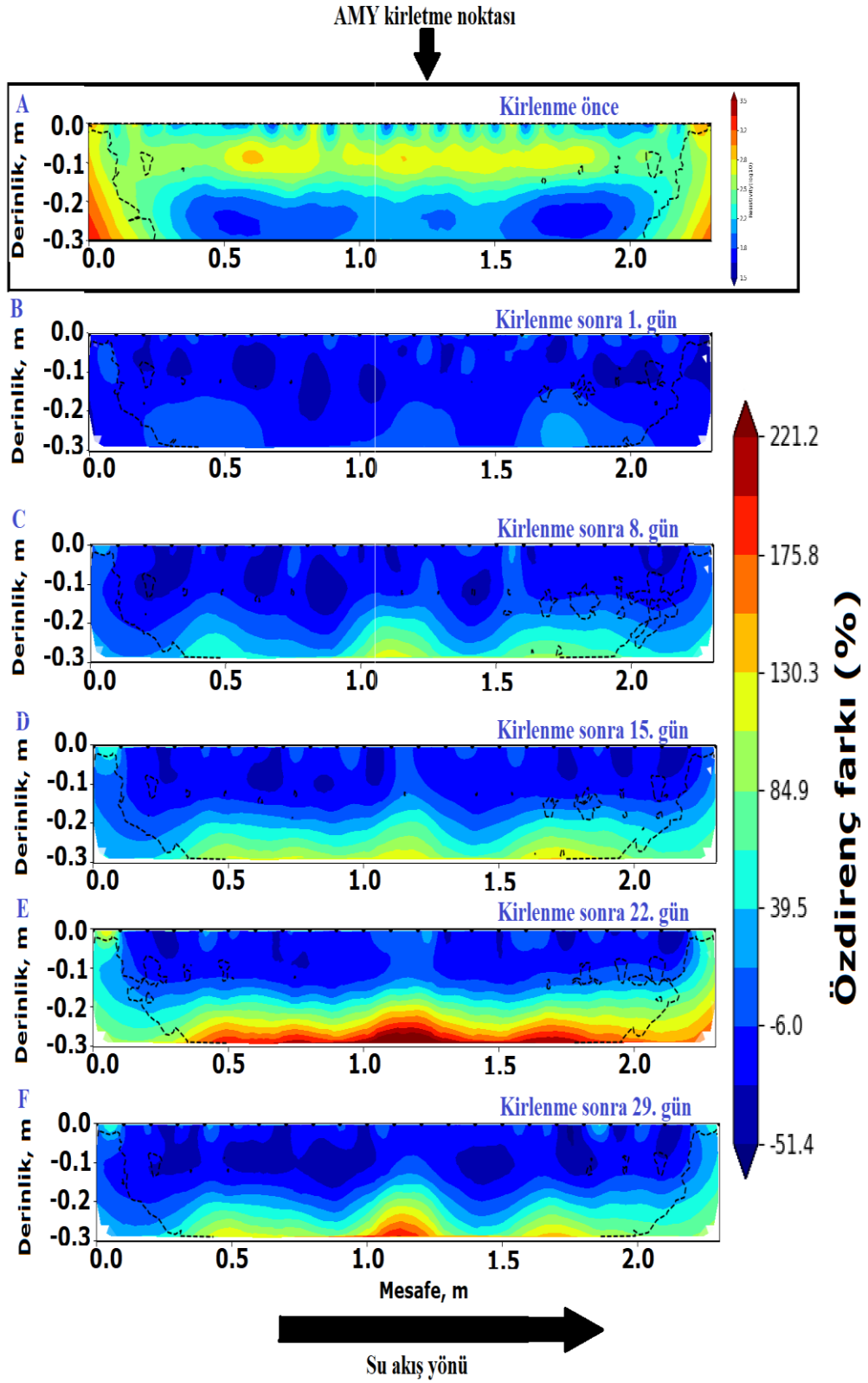
Profil 6, Profil 1'den 50 cm ve Profil 3'ten 30 cm uzaklıkta yer almakta Şekil 4.44. ve 4.45. 'de gösterilmektedir. Profil 6'nın hem özdirenç kesiti (Şekil 4.44.), hem de özdirenç değerlerindeki yüzde değişimi (Şekil 4.45.) Profil 1'inkine benzer, ancak Profil 3'ün sonuçlarından farklıdır. Şekil 4.44.'te özdirenç değerleri 1,5 ile 3,5 log₁₀ Ohm-m arasında değişmektedir. Şekil 4.44. A'daki zemin görüntüsü, alt katmanın diğer katmanlardan çok daha iletken olduğunu göstermektedir. Aşağıdan yukarıya doğru özdirenç değerlerinde artış vardır. Şekil 4.44. B'de de benzer bir yapı vardır. Ancak Şekil 4.44. C'den itibaren bu durum tankın orta bölümünde düşey yönde çöken AMY'nın neden olduğu özdirenç değerlerindeki artışla bozulmuştur. Bu AMY kirlenmesi zaman ilerledikçe yanlara doğru yayılmıştır. Bu yayılma AMY birikintisinin hacmindeki artış ile ilişkilidir.

AMY birikinti yayılmasının benzer bir modeli Şekil 4.45.'te verilmektedir. Özdirenç değerlerindeki yüzde değişimi %-51,4 ile %221,2 arasındadır. İlk AMY enjeksiyonundan sonra 1. günden 29. güne kadar geçen süre, Şekil 4.45. E'de kaydedilen en yüksek değerle (toplam 8 litre AMY enjeksiyonundan sonra 22. gün) özdirenç değerlerini artırmıştır. Şekil 4.44. ve Şekil 4.45.'ten de zamanla özdirençte bir artış olduğu görülmektedir.

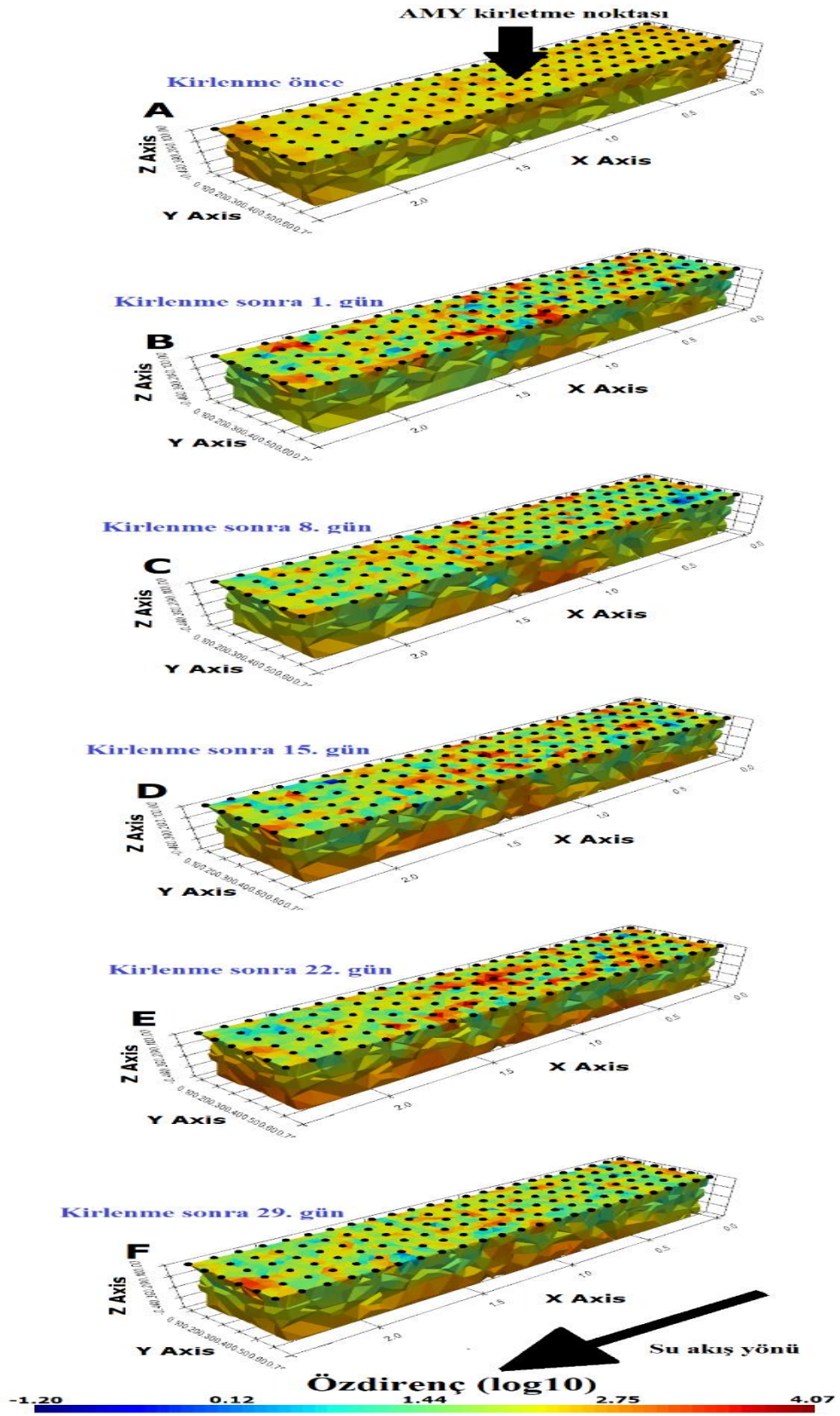
3B ERT modeli (Şekil 4.46.) özdirenç değerlerinin -1,20 ile 4,07 log₁₀ Ohm-m arasında olduğunu ortaya koymuştur. Yaz mevsimi benzetiminin 3B zamana bağlı görüntüsü, deneyler boyunca yüksek özdirenç sonuçları vermiştir. AMY enjeksiyonunun kaynağı ve AMY'dan etkilenen alanlar yüksek özdirenç değerleri ile açıkça belirgindir. 3B görüntü zaman ilerledikçe AMY hacmindeki artışla birlikte özdirenç değişiminin daha ayrıntılı olarak anlaşılmasını sağlamaktadır.



Şekil 4.44. Yaz mevsiminde Profil 6'da ölçülen elektrik özdirenç değerlerinin zamana bağlı değişimini gösteren 2B ERT sonuçları.



Şekil 4.45. Yaz mevsiminde Profil 6'de ölçülen elektrik öz direnç değerlerinin zamana bağlı yüzde değişimlerini gösteren 2B ERT sonuçları.



Şekil 4.46. Yaz mevsimi kurulumunun zamana bağlı özdirenç değişimini gösteren 3B ERT sonuçları.

4.2.4. Kontrol deneyi bulguları

Bu bölümde kontrol deneyinden elde edilen bulguları sunulmuştur. Kontrol deneyi yaklaşık 23°C'lık bir laboratuvar sıcaklığı oluşturularak simüle edilmiş ve kurak ortamı sağlamak için, kış ile yağışlı mevsim benzetiminin aksine, kurulum yüzeyine su ilave edilmemiştir. Bölüm iki alt bölüme ayrılmıştır. Bunlar GPR ve ERT bulguları bölümleridir.

4.2.4.1. Yer radarı bulguları

Bu kontrol deneyi sırasında toplam 60 adet 2B GPR profil ölçümü yapılmıştır. Profiller 6 farklı günde 10'luk setler halinde toplanmıştır. Yani AMY enjeksiyonundan önce, ilk AMY enjeksiyonundan 1, 8, 15, 22 ve 29 gün sonra veri alınmıştır. Akifer sistemi içinde AMY'nın değişimi ve yayılımını anlamak için 2B ve 3B radargramlar elde edilmiş ve yorumlanmıştır. Bu tezde sunulmak üzere üç profil: Profil 1 (Şekil 4.47.), Profil 5 (Şekil 4.48.) ve Profil 10 (Şekil 4.49.) seçilmiştir.

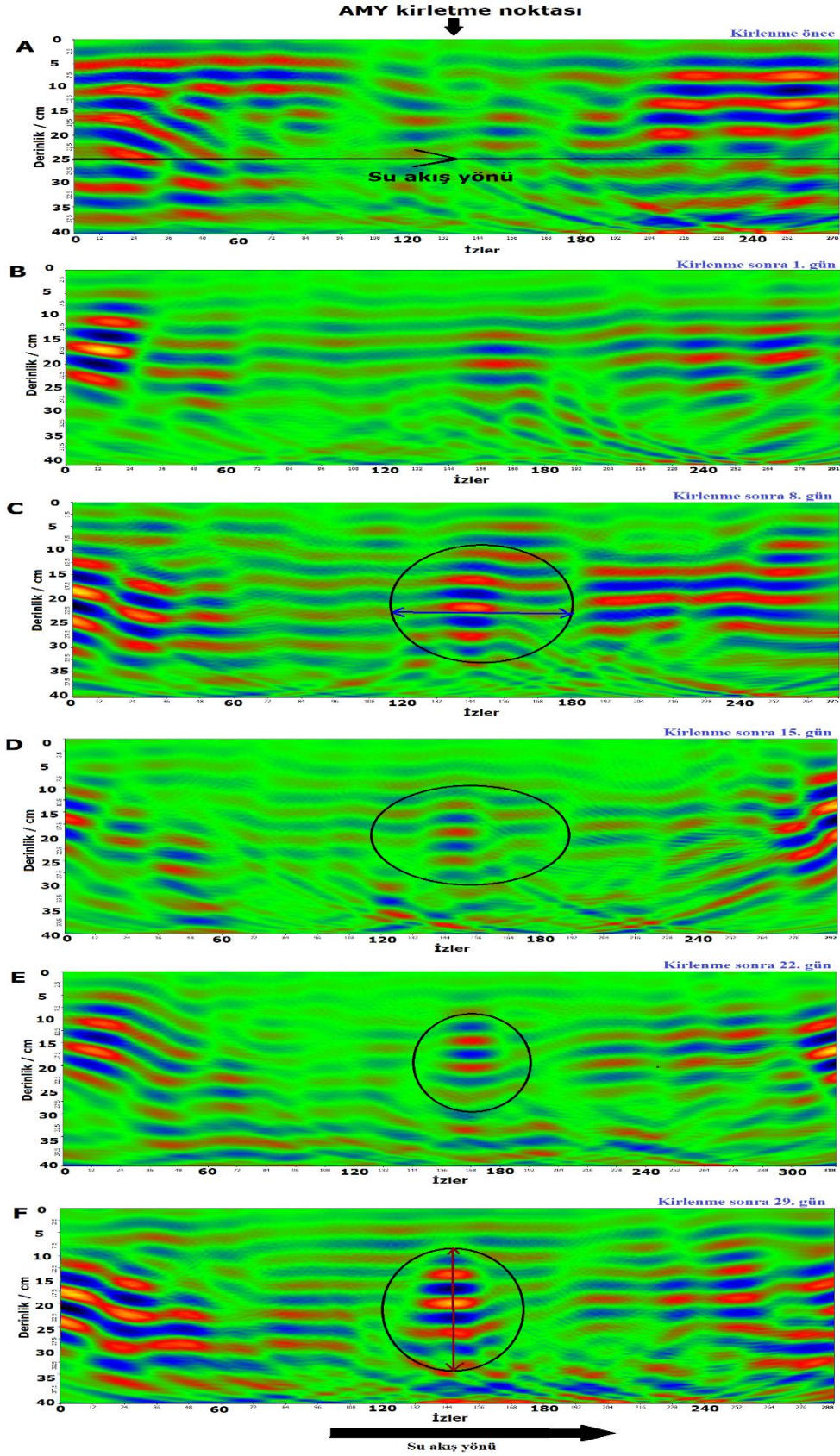
Profil 1 tankın merkezinden 25 cm ve AMY enjeksiyon kaynağından yaklaşık 20 cm uzaklıkta konumlandırılmıştır. Şekil 4.47. B-F kirlenme varlığını gösterir. AMY kirlenmesinin düşey yayılımı Şekil 4.47. B-F'de barizdir. AMY birikintisinin tepkisi artırılmış GPR sinyal genliği ile karakterize edilir ve sinyalin gücü zamana bağlı artmıştır.

Profil 5 Profil 1'den 25 cm uzaklıkta bulunur ve deney düzeneğini yaklaşık olarak ortasında yer alır ve AMY enjeksiyon kaynağının merkezinden geçer. Profil 5'in zamana bağlı GPR sonuçları Şekil 4.48.'da gösterilmiştir. Şekil 4.48.'da yatay reflektörler boydan boya görülmektedir. Bu reflektörler tank içindeki katmanlı oluşumları temsil eder. AMY enjeksiyonu yatay reflektörlerin bozulmasına neden olmuştur. Şekil 4.47.'ye kıyasla, bu Şekil 4.48 AMY enjeksiyonunun çok az bulgusunu gösterir. Su giriş ve çıkış metalik musluklarıyla ilişkilendirilen radargramın sol ve sağ tarafındaki anomaliler Şekil 4.48.'da çok belirgindir.

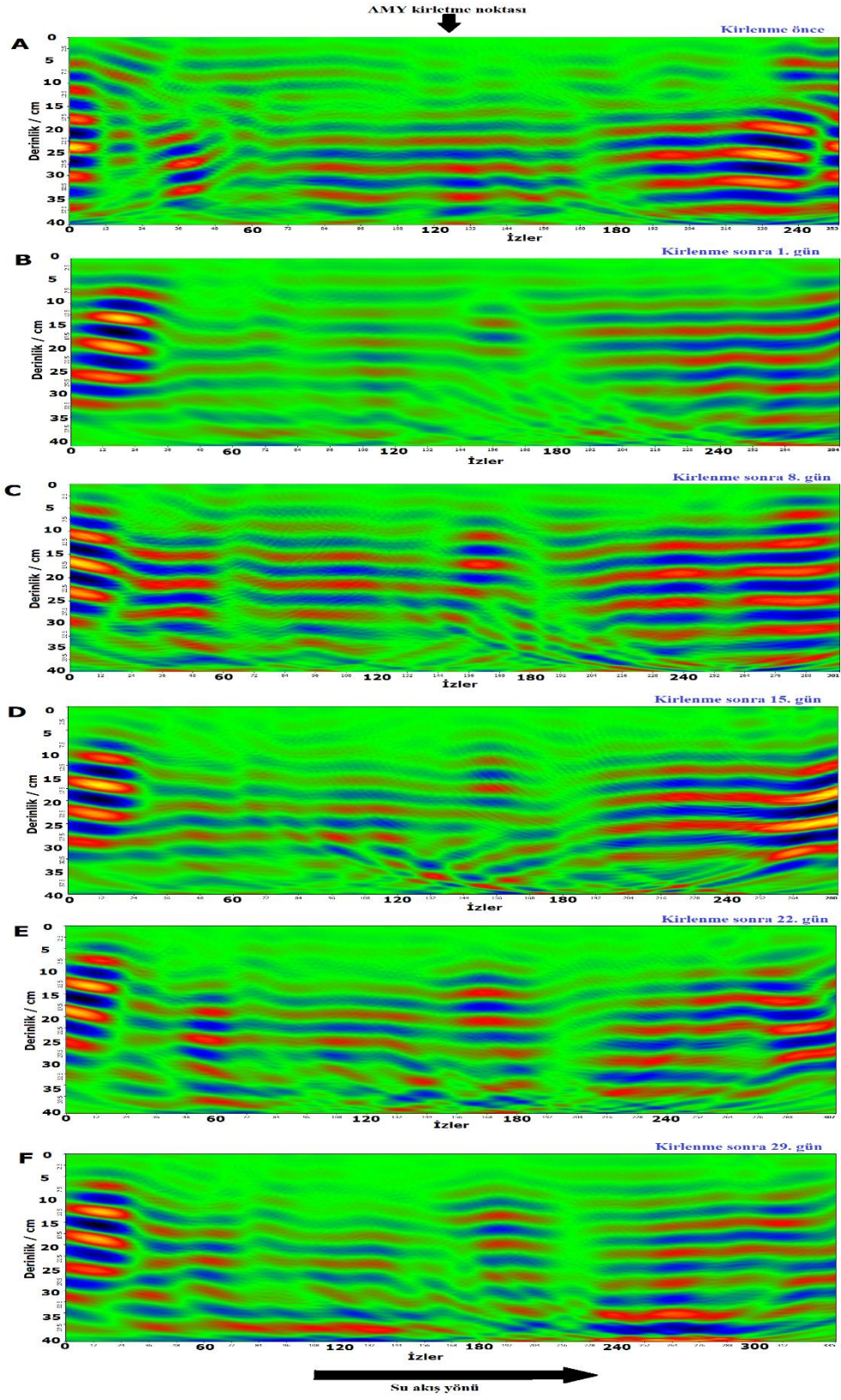
Profil 10 Profil 1'den 45 cm ve Profil 5'ten 25 cm uzaklıkta bulunmaktadır. Şekil 4.49.'ta Profil 10 ölçümlerinden elde edilen zamana bağlı radargram, GPR sinyalinin genliğinde zamana bağlı artış olduğunu ortaya koymuştur. AMY kirlenmesi bu radargramlarda bariz olarak görülmektedir. Şekil 4.49.'ta gösterildiği gibi birikintinin hacmi, Profil 1'e ait Şekil 4.48'da gösterilenden daha azdır. Şekil 4.47. ve 4.49.'da AMY kirlenmesinin baskın olarak düşey yönde yayıldığı görülmektedir.

Şekil 4.50'teki 3B zamana bağlı radargramlar kurulum içindeki AMY'nın değişimini açıkça ortaya koymaktadır. Zemin (Şekil 4.50. A), AMY enjeksiyonundan önce deney düzeneğinin ilk durumunu ortaya koyar ve metalik su muslukları nedeniyle radargramın iki yanında anomaliler mevcuttur ve bunlar tüm ölçümlerde gürültü kaynağı olmuşlardır.

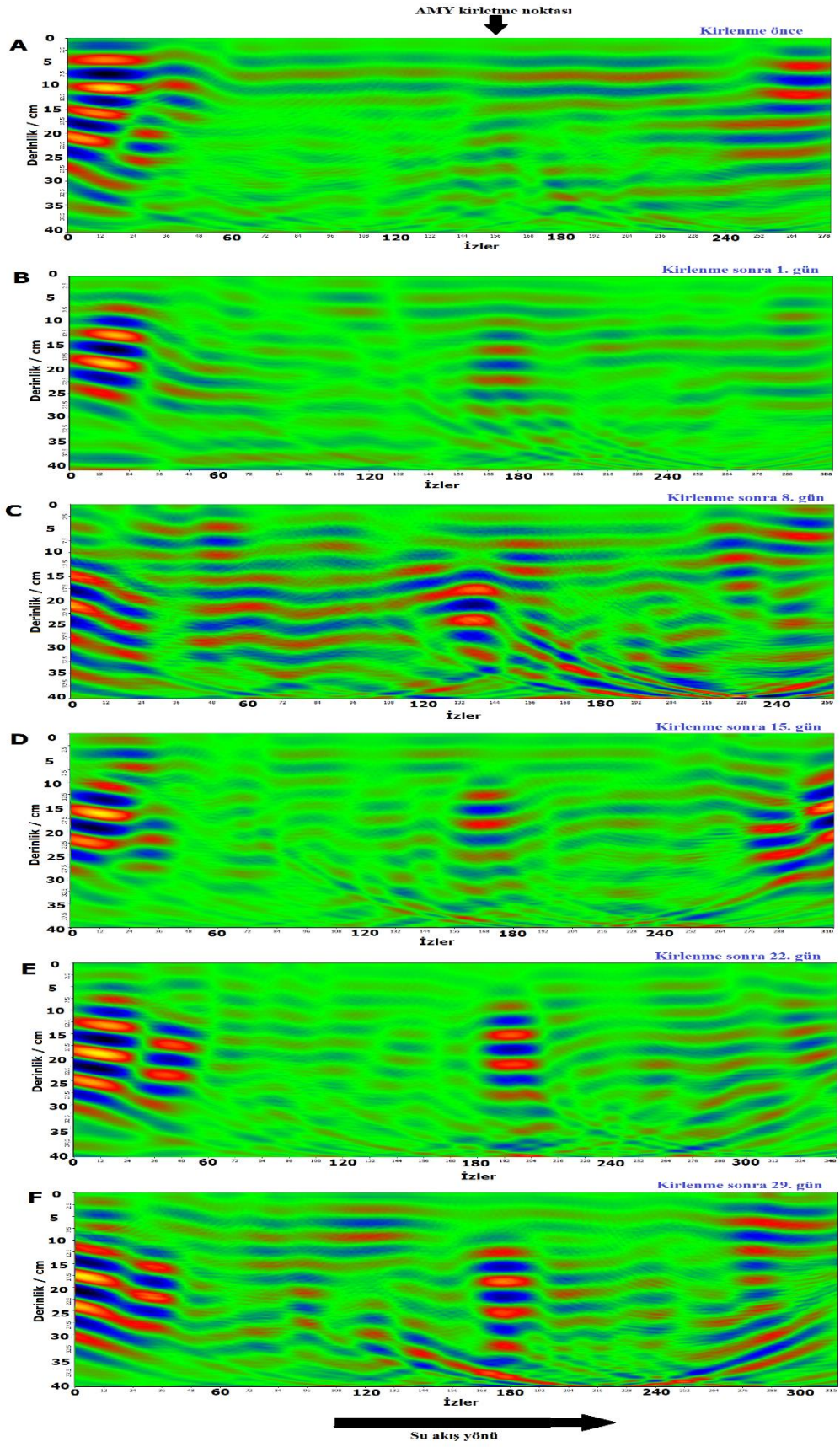
Gün 1'den (Şekil 4.50. A) 2 litre AMY enjeksiyonundan sonra, artmış GPR sinyal genliğine sahip anomaliler radargramın orta bölümünde ortaya çıkmaya başlamıştır. Zaman ilerledikçe bu sinyalin gücü artmıştır. Bu anomaliler enjekte edilen AMY ile ilişkilidir ve genliğin artması enjekte edilen AMY hacminin zamanla artması ile ilişkilidir.



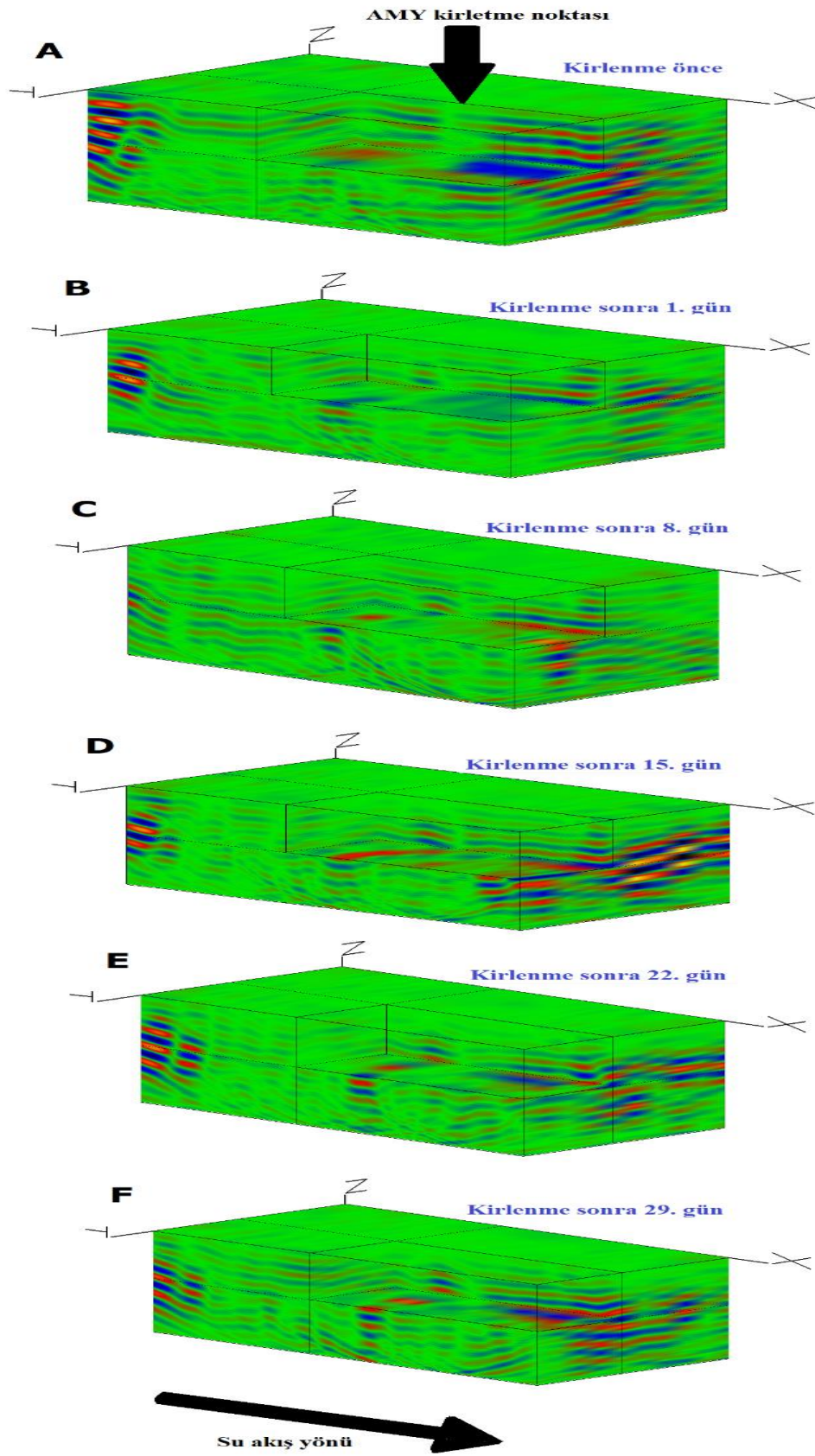
Şekil 4.47. Kontrol deneyi Profil 1'deki AMY'nın zamana bağlı göç ve gelişimini gösteren 2B GPR sonuçları. Su akış yönü ok ile gösterilmiştir. Anomaliler siyah elipslerle gösterilmiştir. Dikey geçişler kırmızı okla ve yatay geçişler mavi okla gösterilmiştir.



Şekil 4.48. Kontrol deneyi Profil 5'deki AMY'nın zamana bağlı göç ve gelişimini gösteren 2B GPR sonuçları.



Şekil 4.49. Kontrol deneyi Profil 10'daki AMY'nın zamana bağlı göç ve gelişimini gösteren 2B GPR sonuçları.



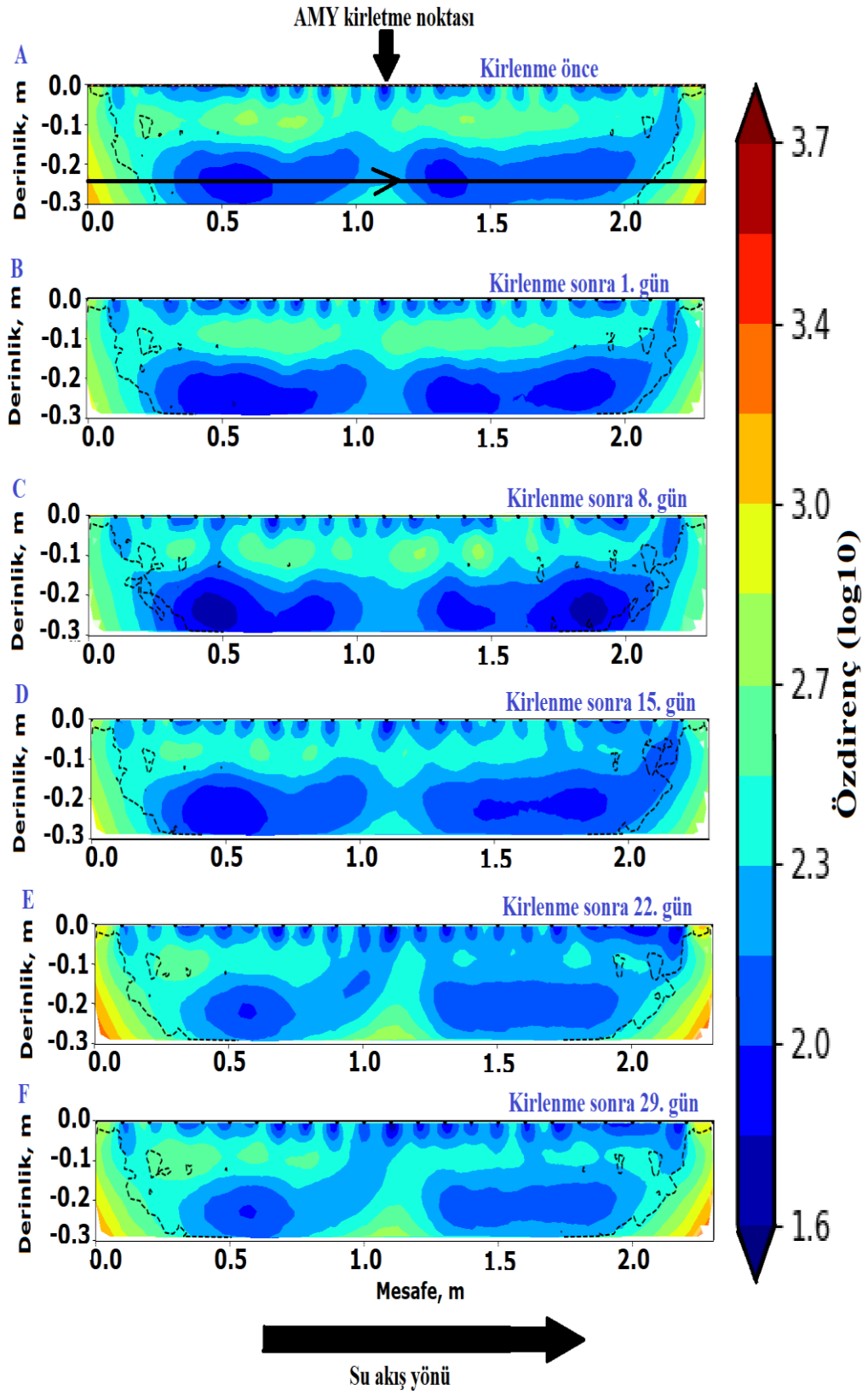
Şekil 4.50. Kontrol deneyinde elde edilen zamana bağlı 3B GPR radargramları.

4.2.4.2. ERT bulguları

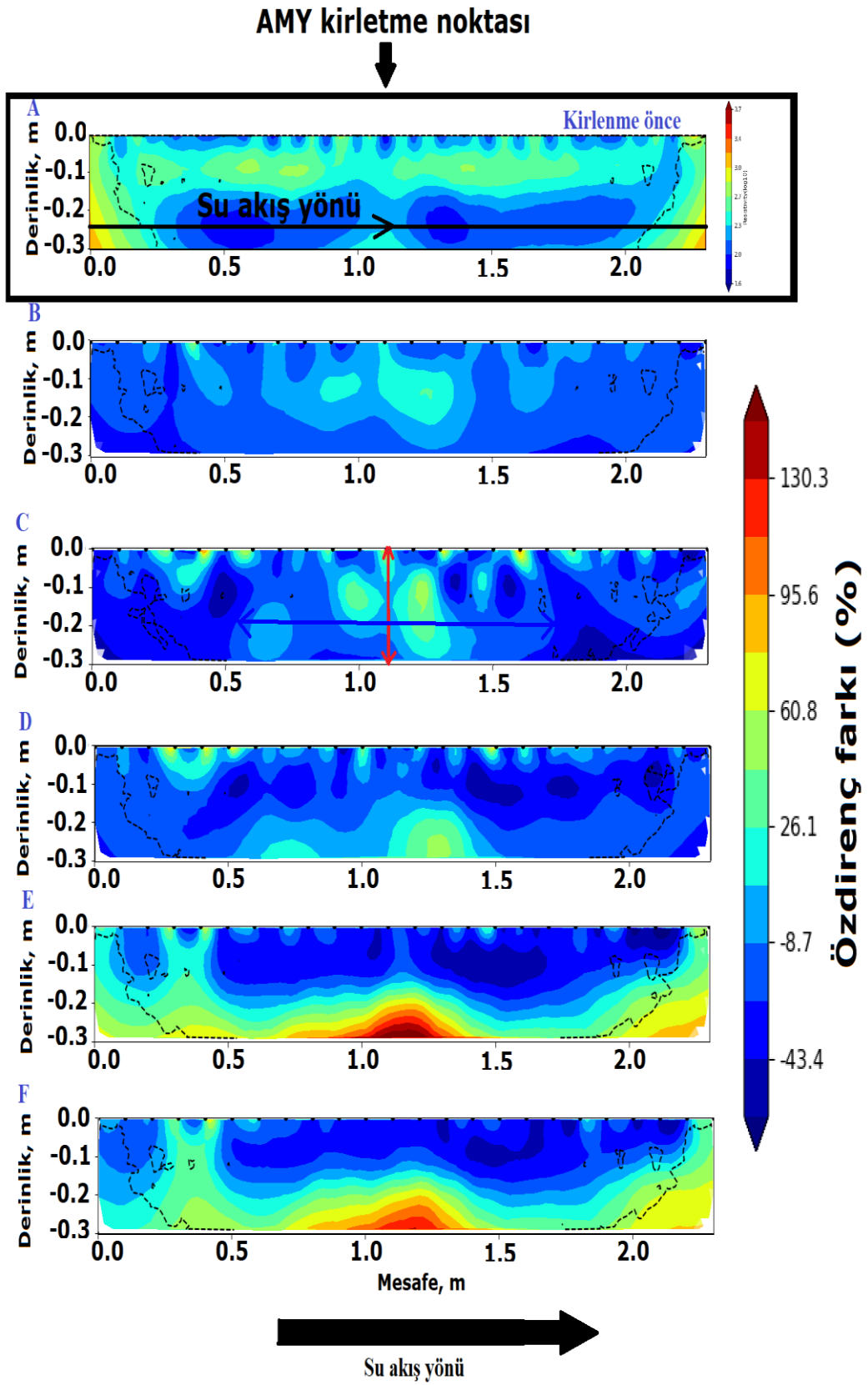
Bu benzetim kontrol deneylerinde toplam 36 adet ERT 2B profil ölçümü yapılmıştır. 2B Profiller 6 adet 3B ERT görüntüsü oluşturmada kullanılmıştır. 36 adet ERT görüntüsü farklı günlerde toplanan 6 set 2B Profilden oluşur. Bu tezde sunum için Profil 1, 3 ve 6 seçilmiştir.

Şekil 4.51. Profil 1'in 2B özdirenç kesitini göstermektedir. Özdirenç değerleri 1,6 ile 3,7 log₁₀ Ohm-m arasında değişmektedir. Şekil 4.51.'nin genel olarak büyük bölümü 1,6 ile 2,3 log₁₀ Ohm-m arasında düşük özdirenç değerlerine sahiptir. Profil 1'in diğer benzetimlerdeki özdirenç kesiti sonuçları dikkate alındığında Şekil 4.52.'daki sonuçlardan farklı olduğu görülmektedir. Görünüşe göre AMY tankın bu bölümüne yayılmamıştır. Şekil 4.52.'deki Profil 1'in zamana bağlı özdirenç değerlerindeki % değişim %-43,4 ile %130,3 arasındadır. Özdirençte değerlerindeki en yüksek pozitif değişiklik Şekil 4.52. E'de (toplam 8 litre AMY enjeksiyonundan sonra) ve en düşük Şekil 4.52. B'de (2 litre AMY enjeksiyonundan sonra) görülmektedir. Şekil 4.52.'de AMY'nın hem dikey hem de yanal yayılım yaptığı görülmektedir. 0,0 ila 0,5 m mesafe arasında özdirençte kaynağı bilinmeyen pozitif bir % değişim vardır. Bu nokta AMY enjeksiyon kaynağından 1,0 m uzaklıktadır.

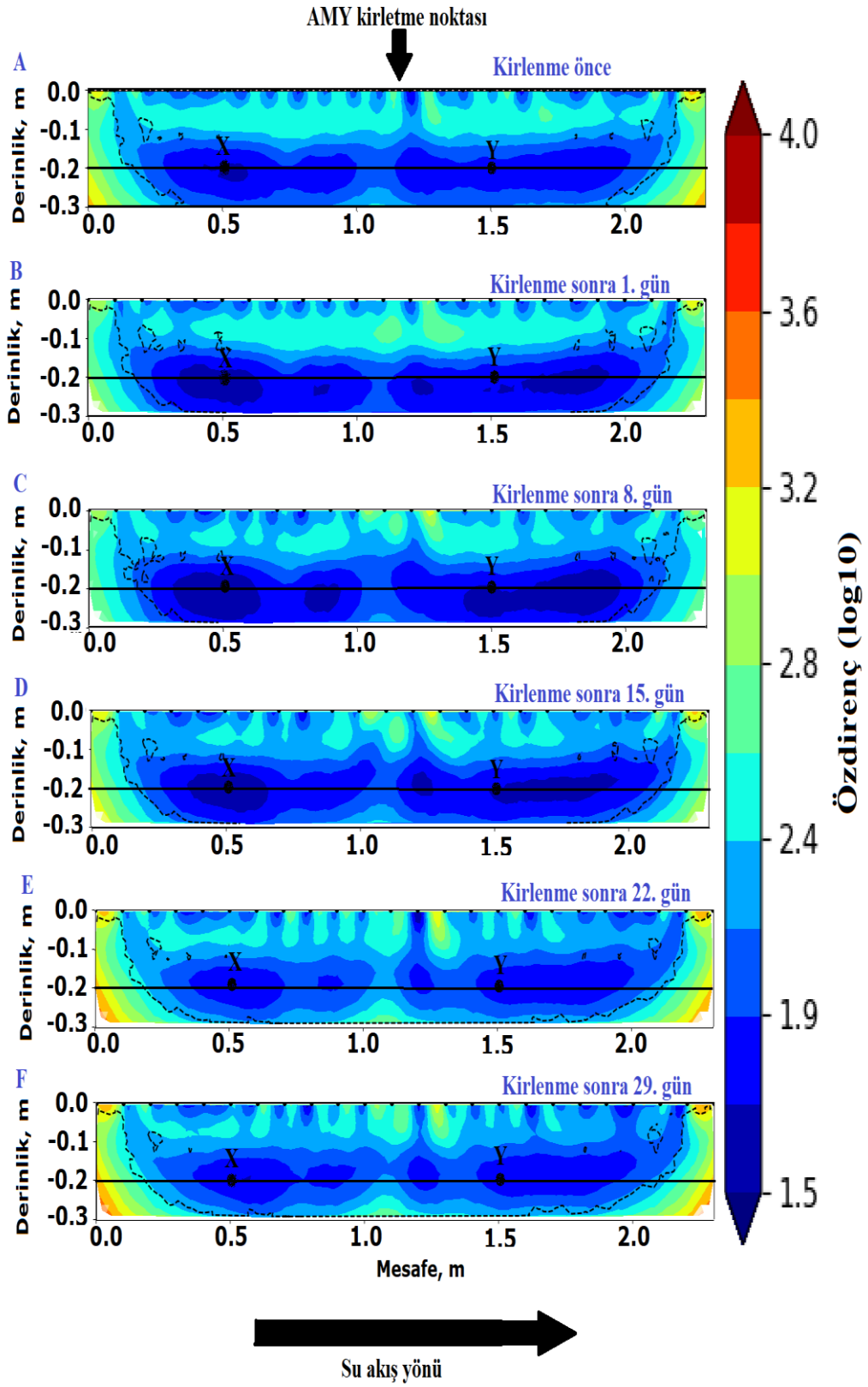
Kurulumun merkez hattında bulunan Profil 3, Şekil 4.53. ve 4.54.'te gösterilmektedir. Şekil 4.53., Profil 3'ün 2B özdirenç kesitini gösterir. Özdirenç değerleri 1,5 ile 4,0 log₁₀ Ohm-m arasında değişmektedir. Şekil 4.53. yüksek özdirençli birkaç nokta olmasına rağmen, tüm deney boyunca genel olarak düşük özdirenç değerlerini elde edilmiştir. Kenar etkisi ayrıca yüksek özdirenç katkıda bulunur. Şekil 4.53.'teki özdirenç kesiti, Şekil 4.54.'daki özdirenç kesitindeki yüzde değişiminden çok farklı değildir. AMY enjeksiyonunun kaynağında özdirençte yaklaşık %211,2'lik yüksek pozitif değişim olmasına rağmen, kesitin geri kalanı özdirençte genel bir negatif değişim göstermektedir.



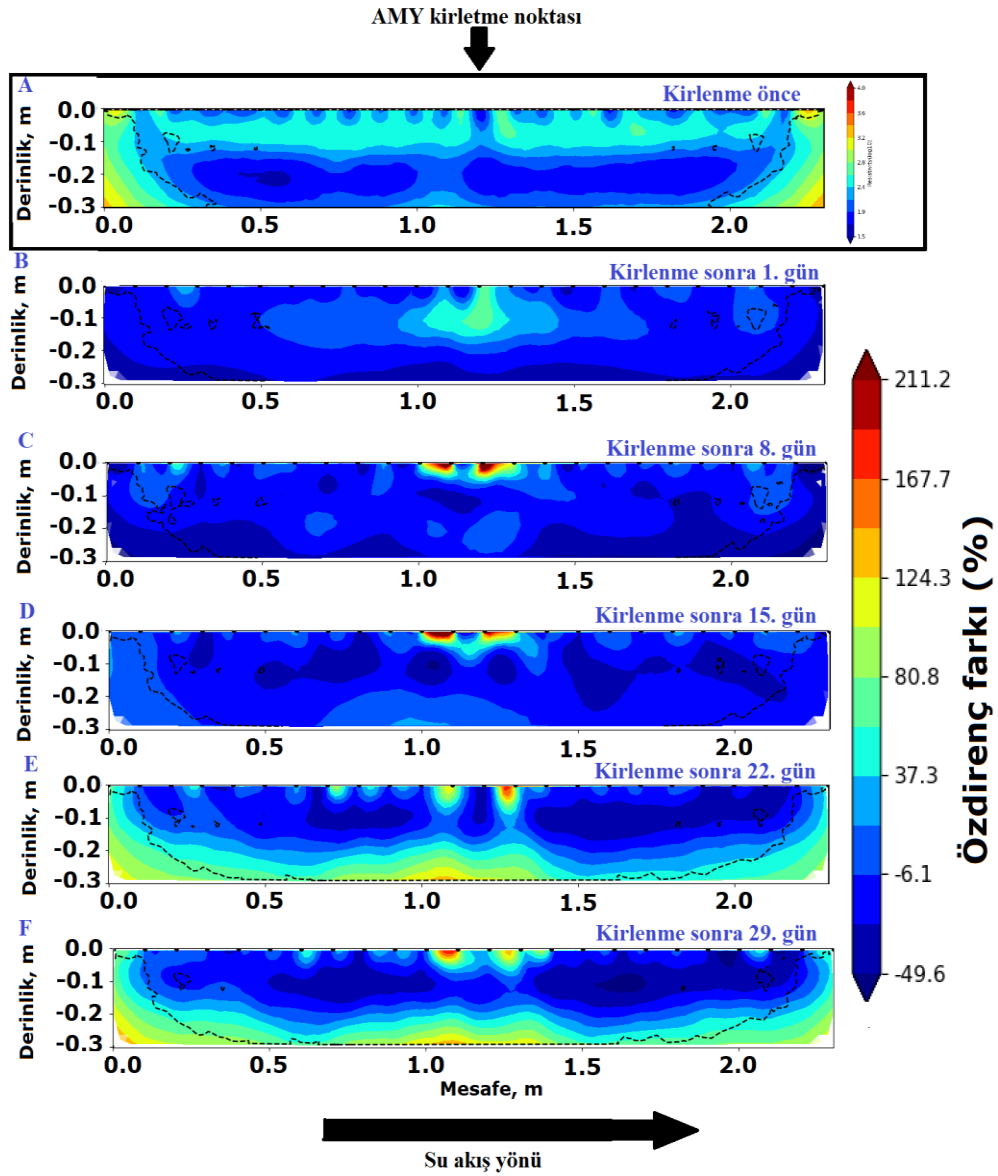
Şekil 4.51. Kontrol deneyi Profil'1de ölçülen elektrik özdirenç değerlerinin zamana bağlı değişimini gösteren 2B ERT sonuçları.



Şekil 4.52. Kontrol deneyi Profil 1’de ölçülen elektrik özdirenç değerlerinin zamana bağlı yüzde değişimlerini gösteren 2B ERT sonuçları. Dikey geçişler kırmızı okla ve yatay geçişler mavi okla gösterilmiştir.



Şekil 4.53. Kontrol deneyi Profil 3'de ölçülen elektrik özdirenç değerlerinin zamana bağlı değişimini gösteren 2B ERT sonuçları.

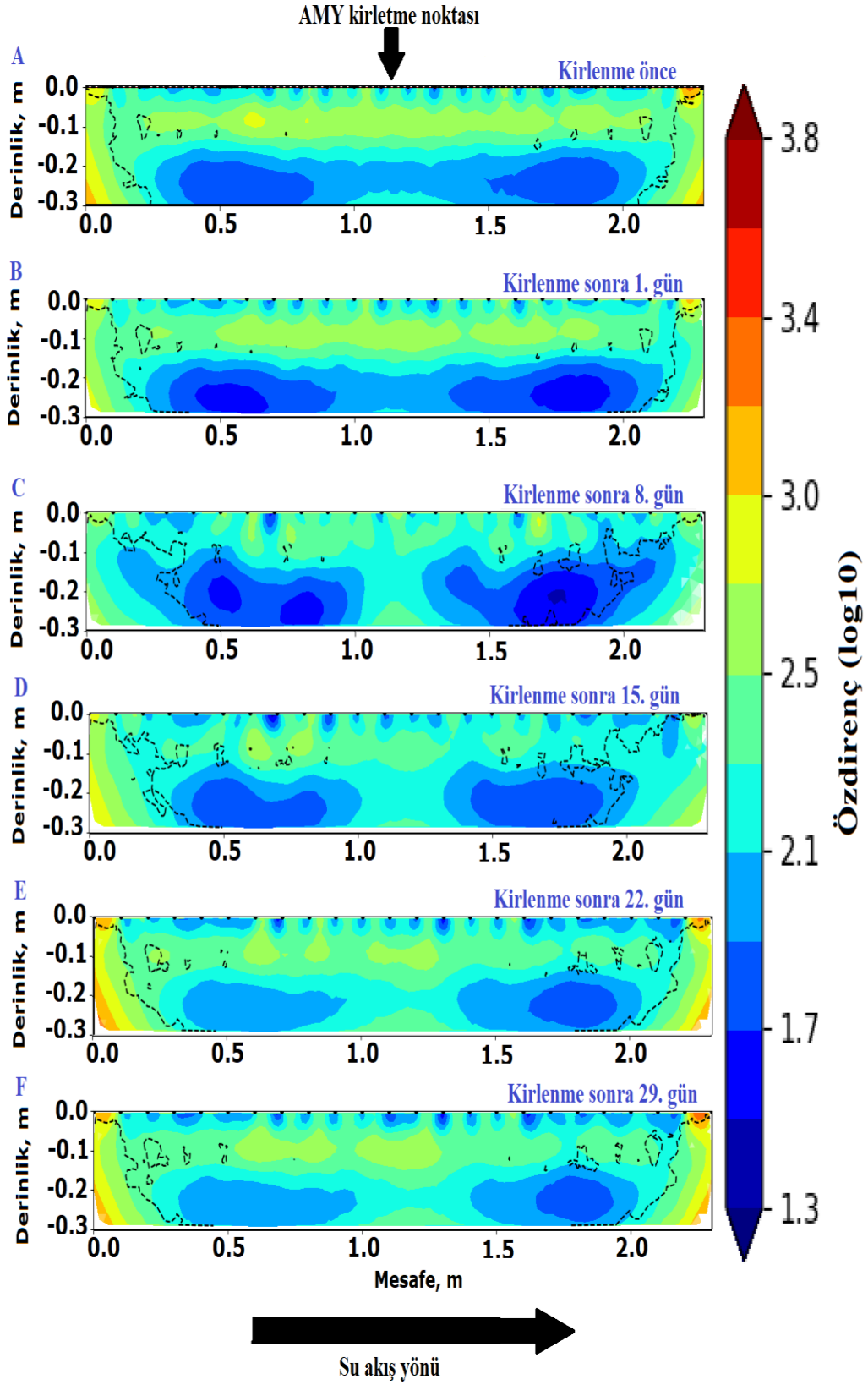


Şekil 4.54. Kontrol deneyi Profil 3'de ölçülen elektrik özdirenç değerlerinin zamana bağlı yüzde değişimlerini gösteren 2B ERT sonuçları.

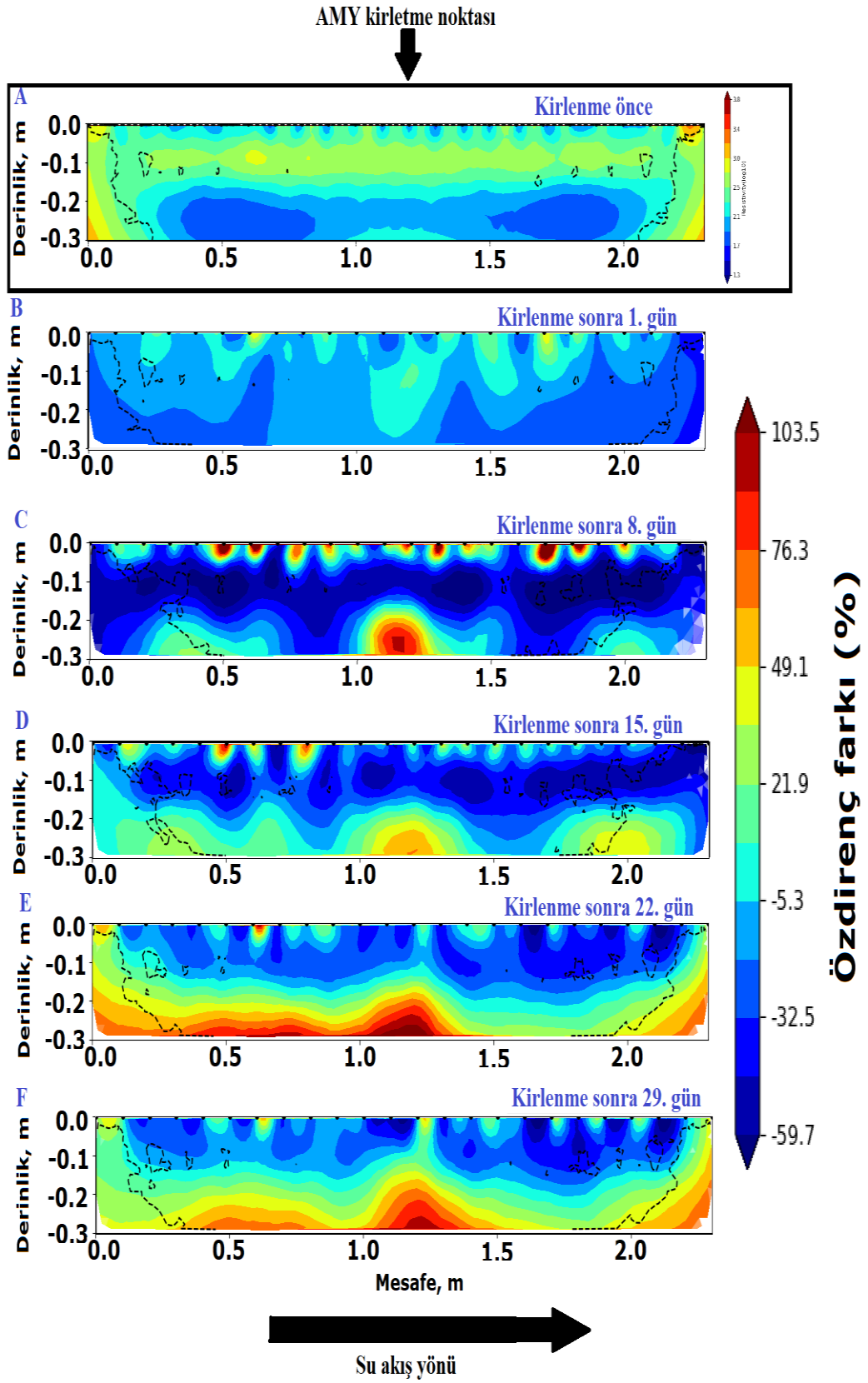
Profil 6, Profil 1'den 50 cm ve Profil 3'ten 30 cm uzaklıkta bulunur, Şekil 4.55. ve 4.56.'de gösterilmektedir. Profil 6'nın hem özdirenç kesiti (Şekil 4.55.) hem de özdirenç kesitindeki yüzde değişimi (Şekil 4.56.) Profil 1'inkinden biraz farklı olmasına rağmen, Profil 3'ün sonuçlarından tamamen farklıdır. Şekil 4.55.'te özdirenç değerleri 1,3 ile 3,8 log₁₀ Ohm-m arasında değişmektedir. Şekil 4.55. A'daki zemin görüntüsü, alt katmanın diğer katmanlardan çok daha fazla iletken olduğunu göstermektedir. Aşağıdan yukarıya doğru özdirenç değerlerinde artış vardır. Şekil 4.55. B, Şekil 4.55.A'dakine benzerdir. Şekil 4.55. C'den itibaren, yapının katmanlı

modeli, tankın orta bölümündeki özdirençteki artışla bozulmuştur. AMY kirlenmesi zaman ilerledikçe yanlara doğru yayılmıştır. Bu zamanla AMY birikintisinin hacmindeki artışla ilişkilidir. Tank içindeki katmanlı yapı üzerindeki AMY etkisinin bulgusu Profil 6'nın sonuçlarında, Profil 1 ve 3'ün sonuçlarına göre daha nettir. Özdirenç değerlerinin zamana bağlıki yüzde değişimi %-59,7 ile %103,5 arasındadır (Şekil 4.56.). İlk AMY enjeksiyonundan sonra 1. günden 29. güne kadar geçen sürede Şekil 4,47. E'de özdirenç değerleri artmıştır (toplam 8 litre AMY enjeksiyonundan sonra 22. gün). Hem Şekil 4.55., hem de 4.56.'de zamana bağlı özdirenç değerlerinde bir artış vardır.

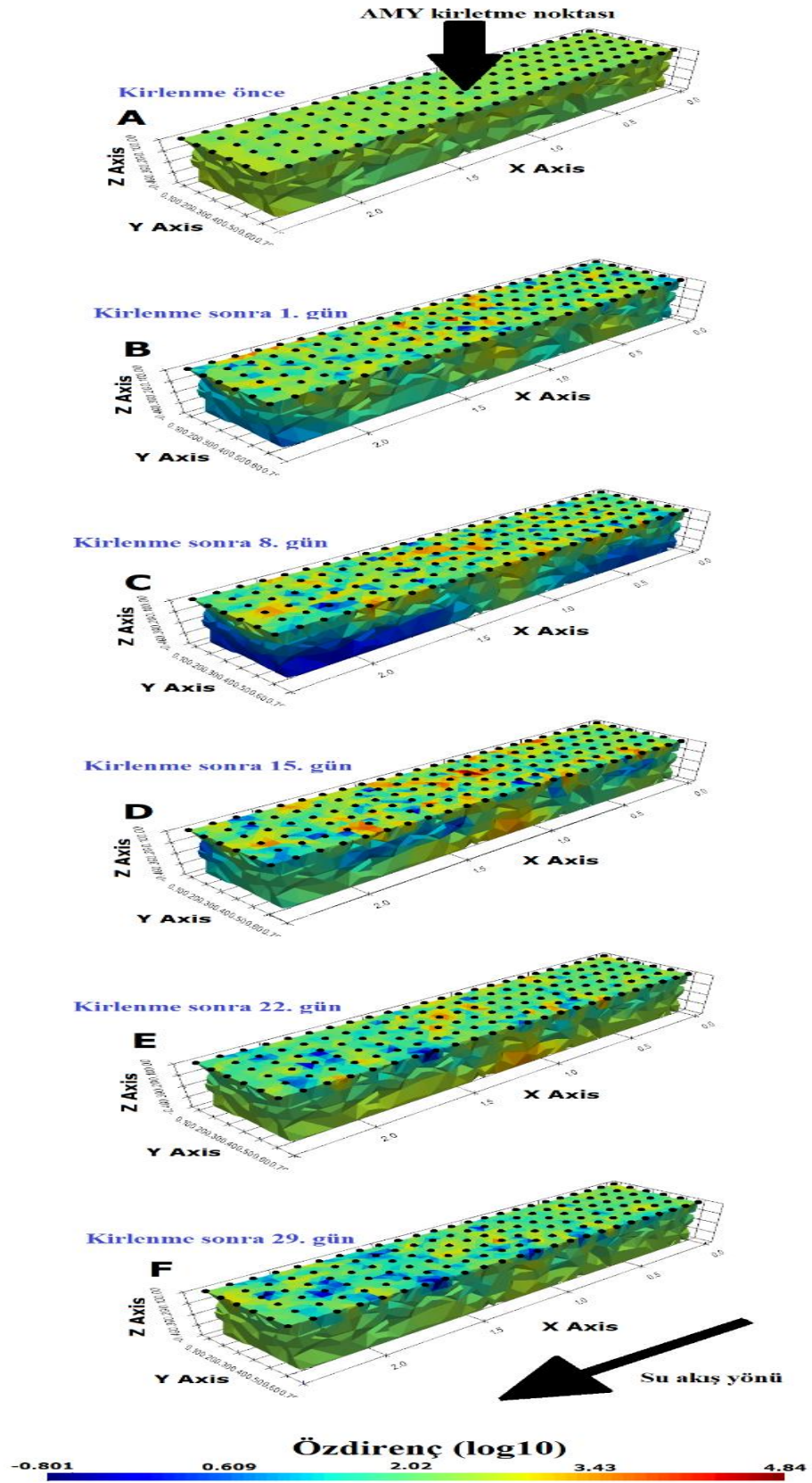
3B ERT görüntüsü (Şekil 4.57.), özdirenç değerlerinin - 0,001 ile 4,84 log10 Ohm-m arasında olduğunu ortaya koymuştur. Bu 3B ERT görüntüsünden elde edilen özdirenç değerleri herhangi bir belirli modeli takip etmemiştir. Çünkü özellikle alt katmanın (suya tamamen doymuş alan) özdirenç değerleri iletkenden dirençliye ve tam tersi şeklinde sıralanmaktadır. Bu ilk 15 gün içinde çok belirgindir. Deneyden 15 gün sonra AMY'nın alt tabaka içinde yeterince yayıldığı ve tabakanın özdirenç modelini tekrar etkilediği varsayılmıştır. AMY enjeksiyonunun kaynağı ve AMY'dan etkilenen zonlar zamana bağlı yüksek özdirenç değerleri ile açıkça belirgindir. 3B sonuçlar deney ilerledikçe AMY hacmindeki artışla birlikte özdirenç değişimini anlamamıza yardımcı olmuştur.



Şekil 4.55. Kontrol deneyi Profil 6'da ölçülen elektrik özdirenç değerlerinin zamana bağlı değişimini gösteren 2B ERT sonuçları.



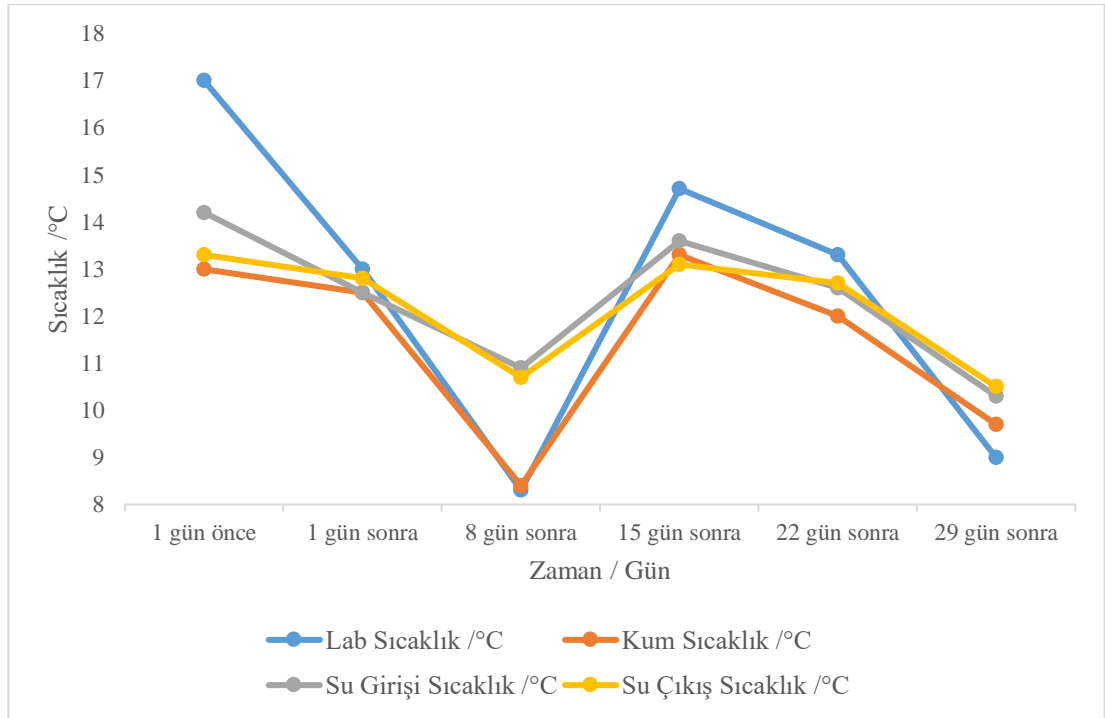
Şekil 4.56. Kontrol deneyi Profil 3'de ölçülen elektrik özdirenç değerlerinin zamana bağlı yüzde değişimlerini gösteren 2B ERT sonuçları.



Şekil 4.57. Kontrol deneyi kurulumun zamana bağlı özdirenç değişimini gösteren 3B ERT sonuçları.

4.2.5. Sıcaklık bulguları

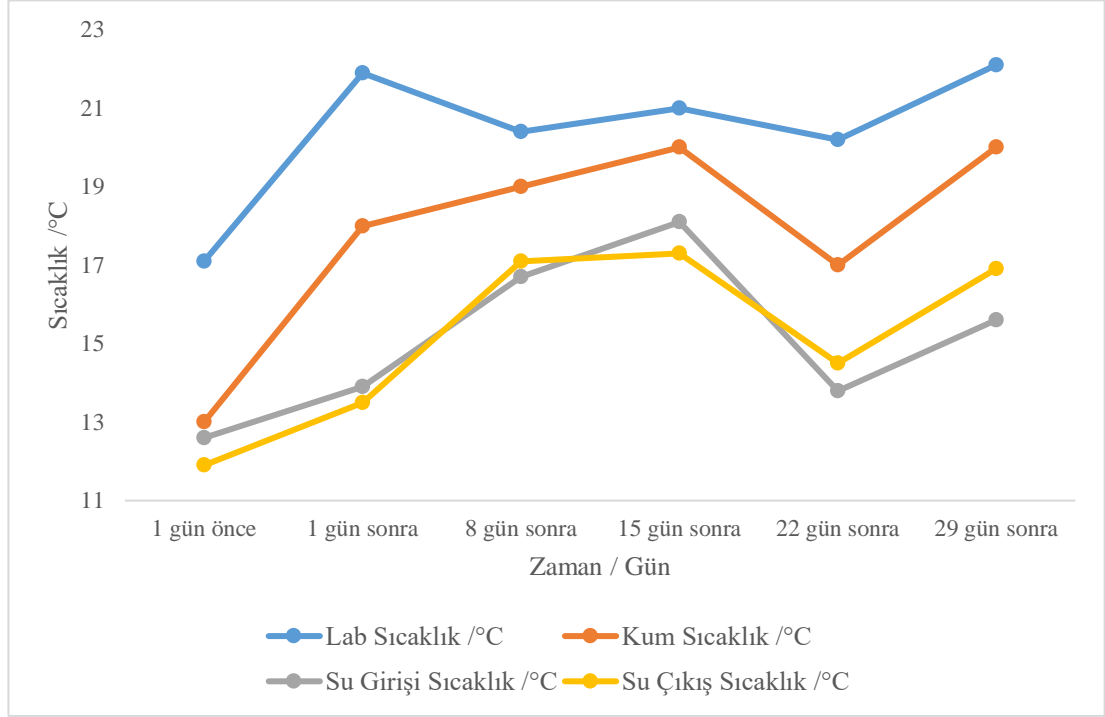
Kış mevsimindeki sıcaklık ölçümlerinin sonuçları Şekil 4.58'de gösterilmektedir. Sıcaklık, ortalama $12,1^{\circ}\text{C}$ olacak şekilde 17°C ile $8,3^{\circ}\text{C}$ arasında değişmektedir. Deneyde kaydedilen en yüksek ve en düşük laboratuvar sıcaklığı 17°C ile $8,3^{\circ}\text{C}$ arasında değişmektedir. Kumun sıcaklığı $13,3^{\circ}\text{C}$ ile $8,4^{\circ}\text{C}$ arasındadır. Su giriş sıcaklığı $14,2^{\circ}\text{C}$ ile $10,3^{\circ}\text{C}$, su çıkış sıcaklığı $13,3^{\circ}\text{C}$ ile $10,5^{\circ}\text{C}$ arasında değişmektedir. Benzetimin $10,0^{\circ}\text{C}$ 'nin altındaki sıcaklığı simüle etmesi amaçlansa da laboratuvar sıcaklığını etkileyen ortam sıcaklıklarındaki değişikliklerin bir sonucu olarak daha yüksek sıcaklıklar kaydedilmiştir. Şekil 4.58.'de görülebileceği gibi, deney boyunca sıcaklık değerlerinde bir değişim olmuştur.



Şekil 4.58. Kış mevsimindeki sıcaklık değerlerinin zamana bağlı değişimi.

Yağış mevsimi benzetimi boyunca Şekil 4.59.'de görülebileceği gibi sıcaklık değerlerinde değişiklik meydana gelmiştir. Laboratuvar ve deney tankı içindeki sıcaklık, laboratuvar dışındaki atmosferik sıcaklıktan etkilenmiştir. Sıcaklık değerleri $22,1^{\circ}\text{C}$ ile $11,9^{\circ}\text{C}$ arasında değişmiş olup, ortalama $17,15^{\circ}\text{C}$ 'dir. Kumda $20,0^{\circ}\text{C}$ ile

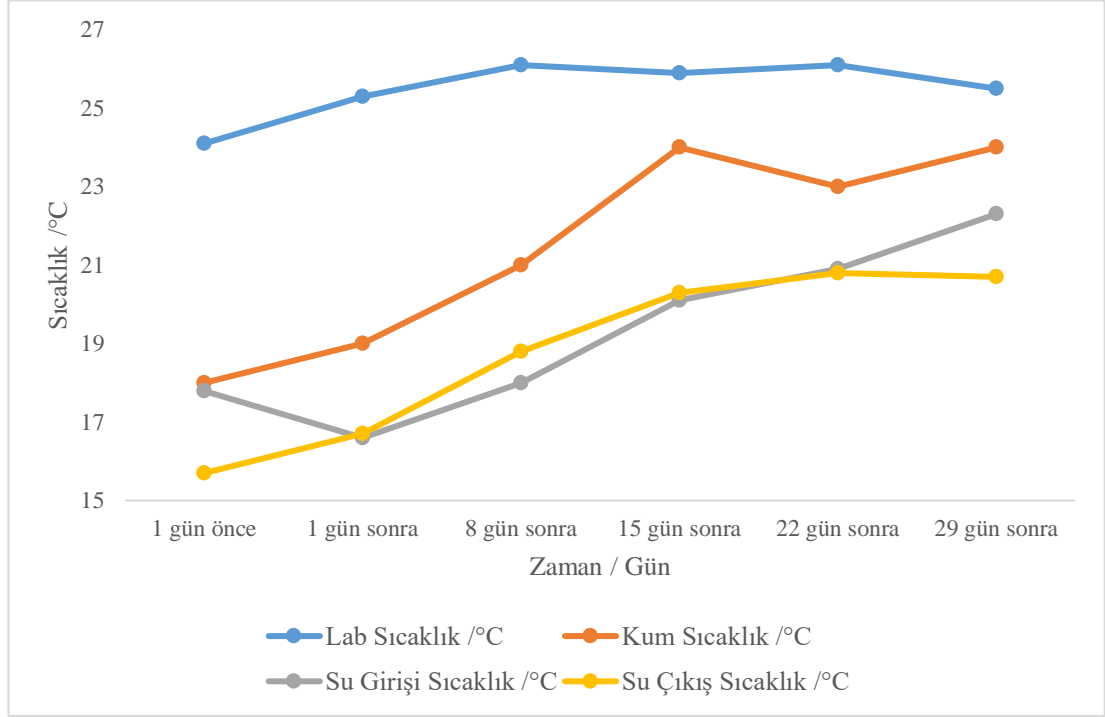
13,0°C arasında değişen sıcaklık değerleri kaydedilmiştir. Genel olarak 1. gün en düşük sıcaklık, 29. gün ise en yüksek sıcaklık kaydedilmiştir.



şekil 4.59. Yağış mevsimi sıcaklık değerlerinin zamana bağlı değişimi.

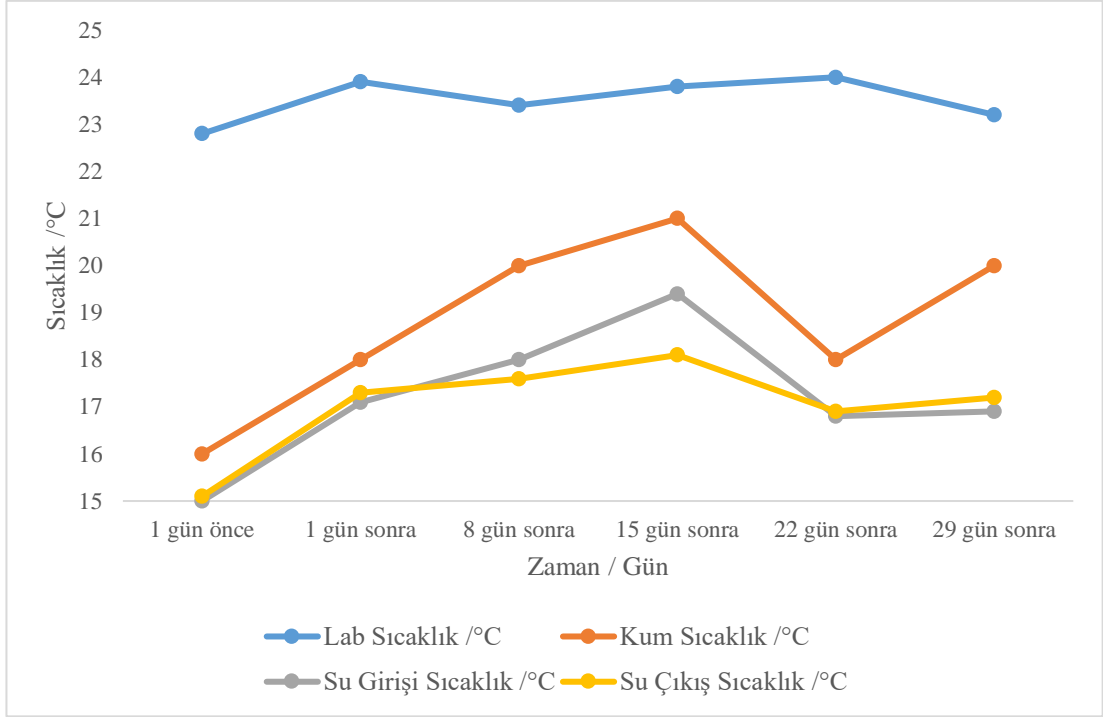
Yaz sezonu benzetim deneyleri boyunca laboratuvar sıcaklığı, kum akifer sisteminin sıcaklığı, su giriş sıcaklığı ve su çıkış sıcaklığı (şekil 4.60.) izlenmiştir. Deneyler boyunca lnen sıcaklık değerleri 15,7°C ile 26,1°C arasında olup, ortalama sıcaklık 21,3° C'dir. Orijinal olarak 30,0°C hedeflenmesine rağmen elde edilen maksimum sıcaklık bunun 4,0°C altındadır. Bunun nedeni deneylerin hava hala soğukken yapılmasıydı. Yine de yaz mevsimi benzetimi (maksimum sıcaklık 26,1°C ve ortalama sıcaklık 21,3°C), kiş mevsimi benzetimine (maksimum sıcaklık 17,0°C ve ortalama sıcaklık 12,1°C) kıyasla daha sıcak bir ortamı sağlamıştır. Yağışlı mevsim benzetimi için maksimum 22,1°C sıcaklık ve 17,2°C ortalama sıcaklık ve kontrol deneyleri için maksimum sıcaklık 24,0°C ve ortalama sıcaklık 19,1°C olarak elde edilmiştir. Kum akifer sisteminin sıcaklık değerleri 24,0°C ile 18,0°C arasında değişmiştir. Su giriş bölümü için sıcaklık 22,3°C ile 16,6°C arasındadır. Son olarak su çıkış bölümü için sıcaklık değerleri 20,8°C ile 15,7°C arasındadır. Zaman ilerledikçe sıcaklık

değerlerinin arttığı Şekil 4.60.'ta görülmektedir. Kum akifer sisteminin sıcaklığı, Şekil 4.60.'taki diğer grafiklerle karşılaştırıldığında en yüksek dalgalanmayı kaydetmiştir.



Şekil 4.60. Yaz mevsimindeki sıcaklık değerlerinin zamana bağlı değişimi.

Bu kontrol deneyinde dört sıcaklık parametresi izlenmiştir. Bunlar laboratuvar sıcaklığı, kum akifer sisteminin sıcaklığı, su giriş sıcaklığı ve su çıkış sıcaklığıdır (Şekil 4.61.). Kaydedilen sıcaklık değerleri 15,0°C ile 24,0°C arasında değişmiş olup, ortalama sıcaklık 19,1°C'dir. Laboratuvar sıcaklığı 24,0°C ile 22,8°C arasında değişirken, kum akifer sisteminin sıcaklığı 21,0°C ile 16,0°C arasında değişmiştir. Su giriş sıcaklığı 15,0°C ile 19,4°C arasında ve son olarak su çıkış sıcaklığı 15,1°C ile 18,1°C arasında değişmiştir. Şekil 4.61.'den akifer sistemi, su girişi ve su çıkışı için sıcaklık değerlerinin 1. günden 15. güne kadar aşamalı olarak arttığı ve ardından 15. gün ile 22. gün arasında sıcaklığın keskin bir şekilde düştüğü görülmektedir. Bundan sonra sıcaklık tekrar yükselmiştir. Laboratuvar sıcaklığı bazı günlerde hafif dalgalanmaya rağmen genellikle sabit kalmıştır.



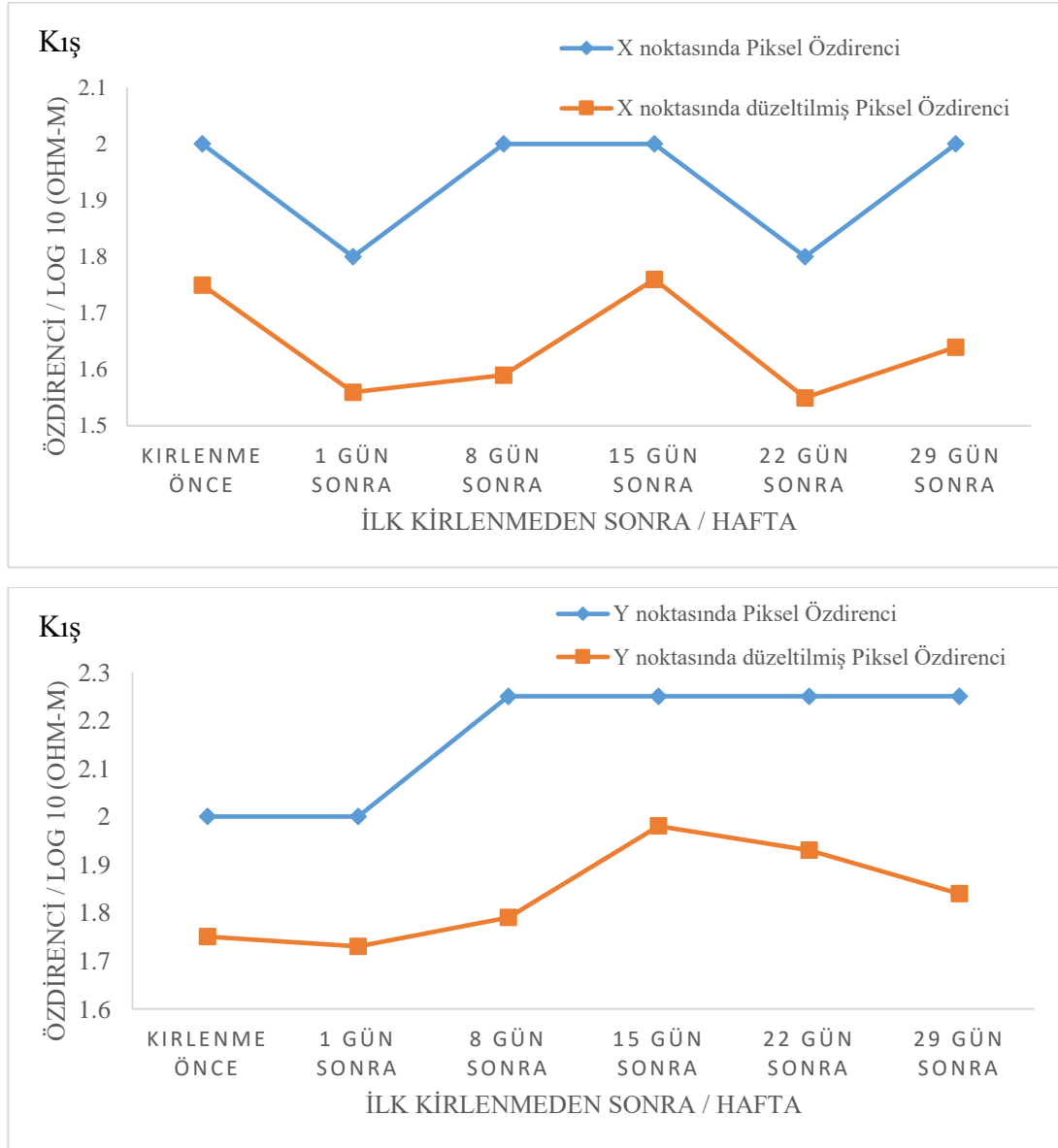
Şekil 4.61. Kontrol deneyindeki sıcaklık değerlerinin zamana bağlı değişimi

Profil 3 üzerindeki ERT görüntülerinin X (0.5, 0.2) m noktasından ve Y noktasından (1.5, 0.2) m çıkarılan piksel özdirenç değerleri üzerinde sıcaklık düzeltmesinin etkisi gösterilmiştir. Çıkarılan piksel özdirenç değerleri denklem 3.37 kullanılarak düzeltilmiştir. İki nokta, AMY enjeksiyonları noktasından tankın karşı taraflarında bulunur. AMY enjeksiyon noktasının sağ tarafında X noktası, sol tarafında ise Y noktası bulunur.

Kış mevsiminden elde edilen düzeltilmiş piksel özdirenç sonuçları, büyüklük olarak piksel özdirenç değerlerinden daha düşüktür (Şekil 4.62.). X'teki grafik hem piksel özdirenç değerleri hem de düzeltilmiş piksel özdirenç değerleri için Y'deki grafiğe göre daha çok değişim gösterir. X ve Y'deki piksel özdirenç değerleri ile düzeltilmiş piksel özdirenç değerleri arasındaki yüzde farkı sırasıyla %12,0 ila %20,5 ve %12,0 ila %20,44'tür.

Yağışlı mevsimsel benzetim durumunda, Y'deki grafik, X'teki grafiğe göre (hem piksel özdirenç değerleri hem de düzeltilmiş piksel özdirenç değerleri için) daha çok değişiklik gösterir (Şekil 4.63.). Piksel özdirenç değerleri, düzeltilmiş piksel özdirenç

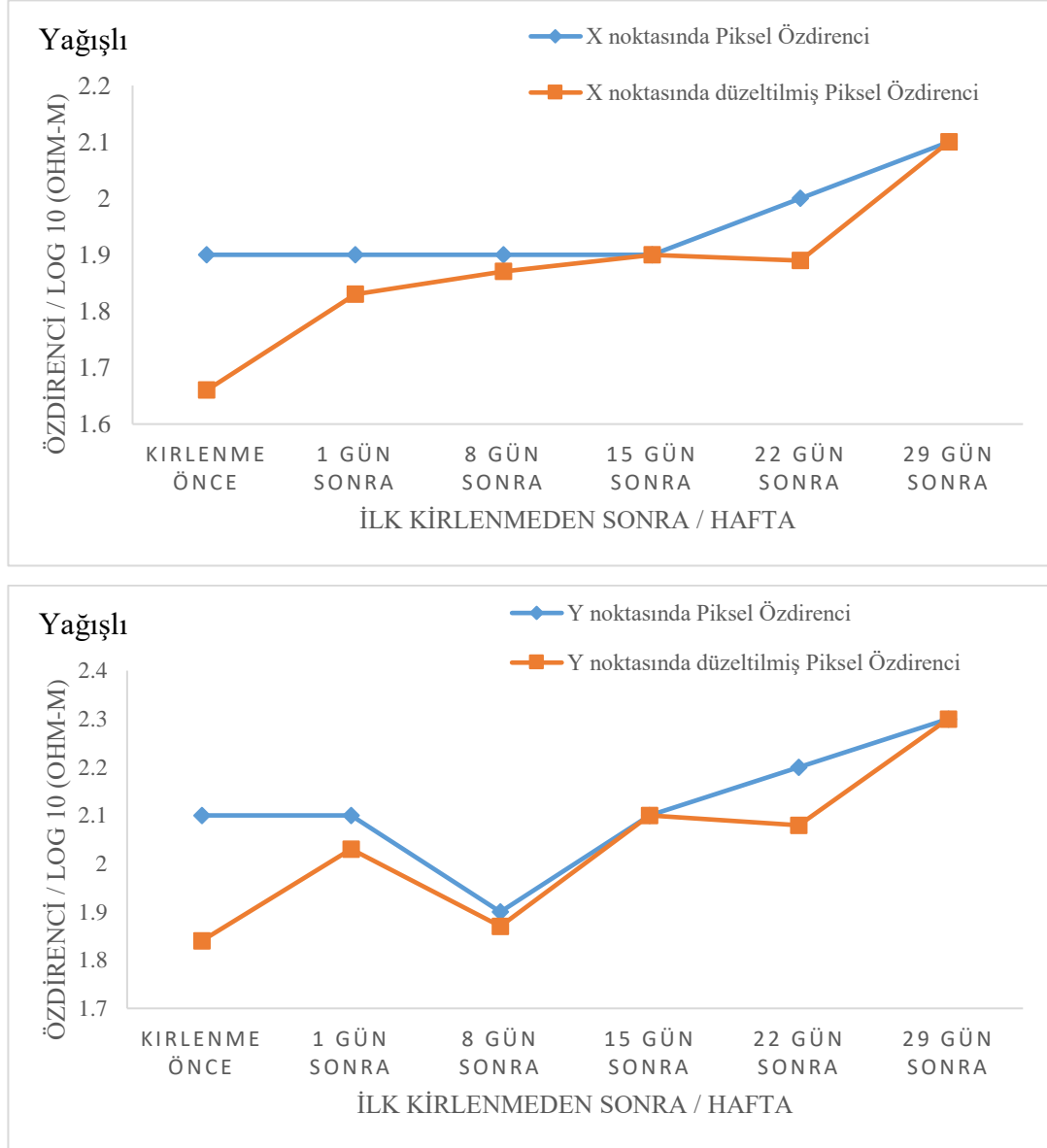
değerlerinden büyüklük olarak daha yüksektir. X ve Y'deki piksel özdirenç değerleri ile düzeltilmiş piksel özdirenç değerleri arasındaki yüzde farkı sırasıyla %0,0 ila %12,63 ve %0,0 ila %12,38'dir.



Şekil 4.62. Kış benzetimi için hem X (0,2 m derinlik ve 0,5 m yatay mesafe (Şekil 4.20)) hem de Y'deki (0,2 m derinlik ve 1,5 m yatay mesafe (Şekil 4.20)) gerçek özdirenç değişimleri ile sadece sıcaklığın etkisini varsayan aynı yerlerde özdirenç değerleri.

Yaz sezonu benzetiminden elde edilen piksel özdirenç sonuçları, genellikle düzeltilmiş piksel özdirenç değerlerinden daha düşüktür (Şekil 4.64.). Hem X hem de Y'deki grafik, zamana bağlı özdirençte genel bir artış gösterir. Ayrıca, her iki grafik de özdirençte benzer bir değişim modeli sergilemiştir. X ve Y'deki piksel özdirenç

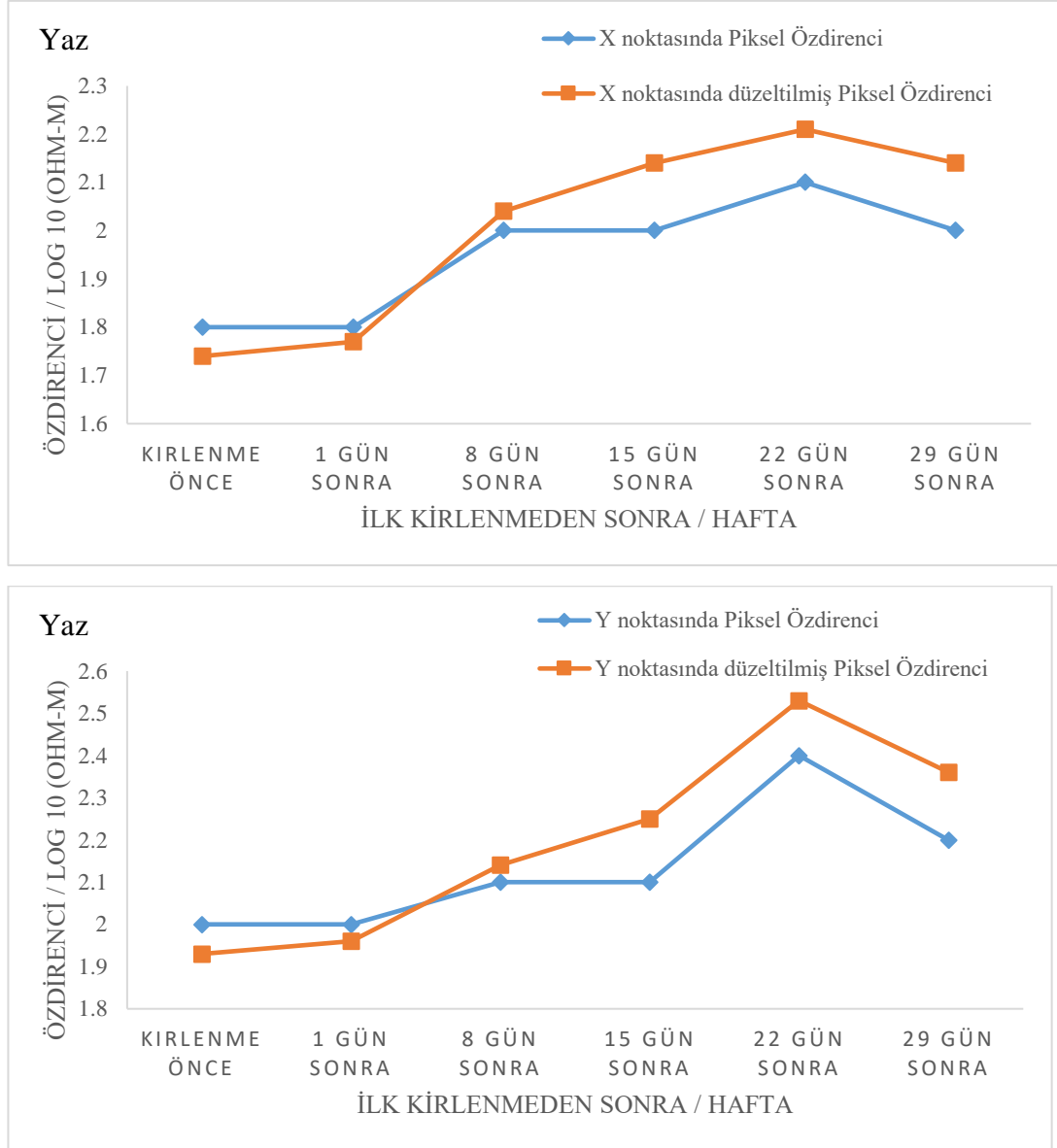
değerleri ile düzeltilmiş piksel özdirenç değerleri arasındaki yüzde farkı sırasıyla -%10,5 ila %3,33 ve -%7,27 ila %3,50'dir.



Şekil 4.63. Yağışlı mevsim benzetimi için hem X (0,2 m derinlik ve 0,5 m yatay mesafe (Şekil 4.31)) hem de Y'deki (0,2 m derinlik ve 1,5 m yatay mesafe (Şekil 4.31)) gerçek özdirenç değişimleri ile sadece sıcaklığın etkisini varsayan aynı yerlerde özdirenç değerleri.

Son olarak, kontrol deneyi durumunda, X'deki grafik hem piksel özdirenç değerlerinde hem de düzeltilmiş piksel özdirenç değerlerinde zamana bağlı genel bir artış sergilemiştir. Y'deki grafik için hem piksel özdirenç değerlerinde hem de düzeltilmiş piksel özdirenç değerlerinde bir artış, ardından bir azalma, ardından önemli bir değişiklik yok ve son olarak bir artış daha olmuştur. Genel olarak, piksel özdirenç

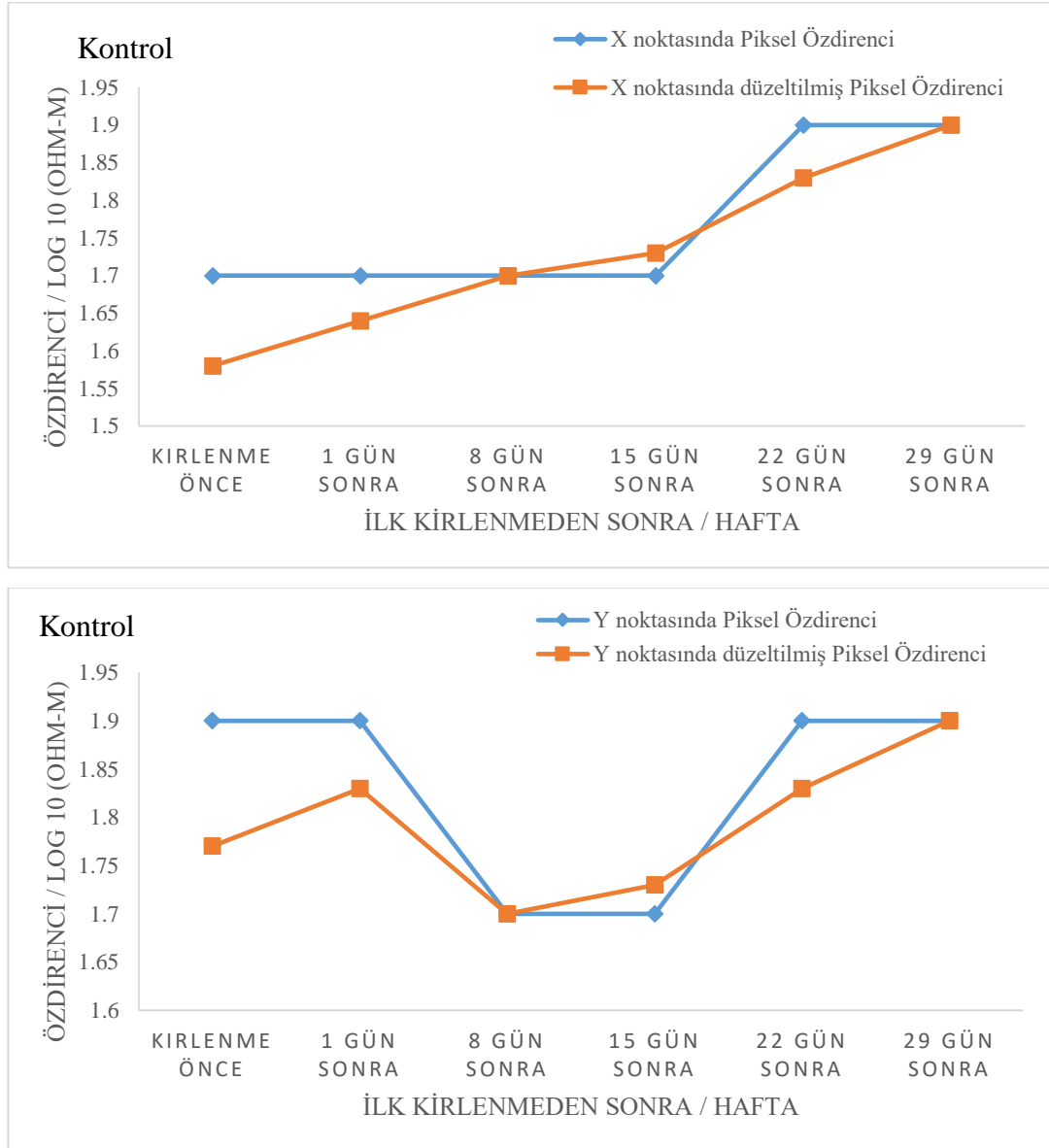
değerleri, 8. ve 29. günler hariç, düzeltilmiş piksel özdirenç değerlerinden daha yüksektir (Şekil 4.65.). X ve Y'deki piksel özdirenç değerleri ile düzeltilmiş piksel özdirenç değerleri arasındaki yüzde farkı sırasıyla %-1,76 ila %7,06 ve %-1,76 ila %6,84'tür.



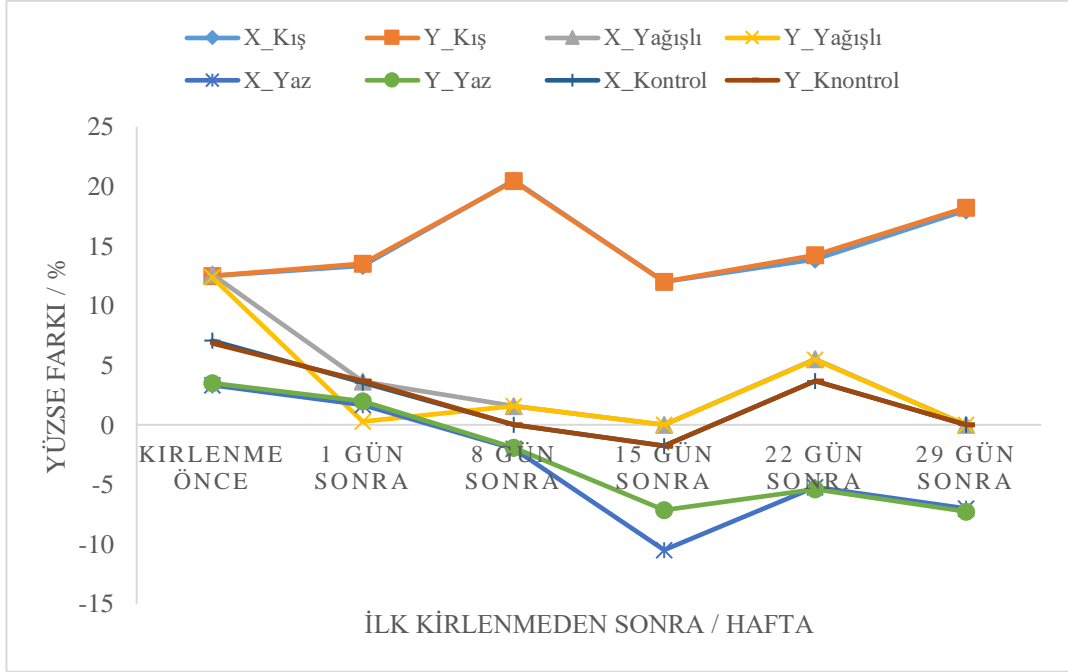
Şekil 4.64. Yaz benzetimi için hem X (0,2 m derinlik ve 0,5 m yatay mesafe (Şekil 4.42)) hem de Y'deki (0,2 m derinlik ve 1,5 m yatay mesafe (Şekil 4.42)) gerçek özdirenç değişimleri ile sadece sıcaklığın etkisini varsayan aynı yerlerde özdirenç değerleri

Şekil 4.20., 4.31., 4.42. ve 4.53.'ten X ve Y noktalarının AMY'dan dolayı olarak etkilendiği görülebilir, ancak her iki nokta da zamana bağlı özdirençte bariz değişiklikler göstermiştir. Tüm benzetimden elde edilen piksel özdirenç ve düzeltilmiş

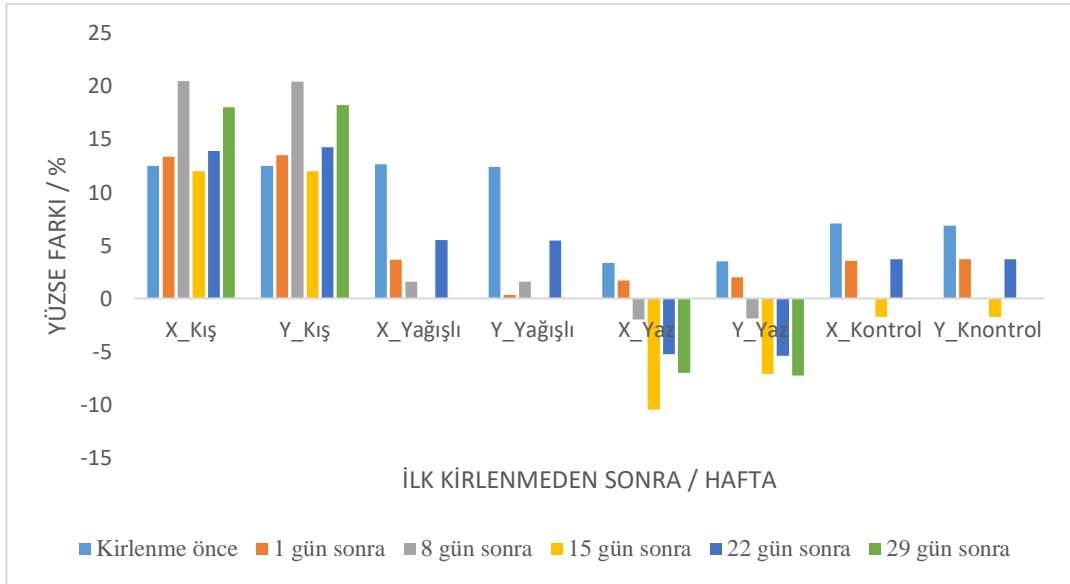
piksel özdirenç grafiklerinden, kışın pozitif, yazın ise negatif bir yüzde farkı olduğu görülebilir. Negatif yüzde farkları, piksel özdirençinin düzeltilmiş piksel özdirençinden daha yüksek olduğu anlamına gelir. Pozitif yüzde farkları için bunun tersi geçerlidir (Şekil 4.66. ve 4.67.). Kış için 8. gün en yüksek pozitif yüzde farkını kaydetmiştir. Yaz için, 15. gün en yüksek negatif yüzde farkını kaydetmiştir. Yağmur mevsimi ve kontrol deneyi nispeten benzer olup yüzde farklılıkları birbirine çok yakındır.



Şekil 4.65. Kontrol deneyi benzetimi için hem X (0,2 m derinlik ve 0,5 m yatay mesafe (Şekil 4.53)) hem de Y'deki (0,2 m derinlik ve 1,5 m yatay mesafe (Şekil 4.53)) gerçek özdirenç değişimleri ile sadece sıcaklığın etkisini varsayan aynı yerlerde özdirenç değerleri.



Şekil 4.66. Tüm benzetimlerin yüzde farkı çizgi grafiği



Şekil 4.67. Tüm benzetimlerin yüzde farkı çubuk grafiği

BÖLÜM 5. TARTIŞMA VE SONUÇLAR

5.1. Tek Seferlik Dökülme ile AMY Kirlenmesi

Kum homojen bir şekilde hazırlandı ve AMY'nin tekdüze göçünü arttırmak için tank içinde yatay olarak düzleştirildi, ancak Şekil 4.1., 4.2., 4.3. ve 4.4.'teki B'den E'ye kadar olan resimlerden görülebileceği gibi, AMY bulutunun göçü tekdüze değildir. Benzer durum Bano ve ark., 2009 tarafından da rapor edilmiştir.

Kirlenme alanının altında zamana bağlı GPR sinyal genliğinde genel bir azalma gözlemlendi. Şekil 4.1., 4.2., 4.3. ve 4.4.'ün C ila E görüntülerinden, kirlenme noktasının altında sinyal genliğinde aşamalı bir azalma görülebilir. Bu gözlem aynı zamanda Bertolla ve ark., 2014, Hagrey 2004, Bano ve ark., 2009, Kim ve ark., 2000, Lopes de Castro ve Branco 2003, Bermejo ve ark., 1997 gibi çeşitli araştırmalarla da yapılmıştır. Kurulumun doymamış kısımları o kadar ıslak olmadığı için düşük yansıtıcı özelliğe sahiptir. Doğrudan kirlenme noktasının altında görülen gelişmiş yansımalar, vadoz bölgesi içindeki AMY ile ilişkilidir. AMY'nin viskoz yapısı nedeniyle, petrolün su tablası üzerinde son bulana kadar dikey yönde yavaşça göç etmesi ve bu işlem sırasında yağın bir kısmının kum tarafından emilmesi mümkündür. Zaman geçtikçe, vadoz bölgesi içindeki kirlenmiş alan, GPR sinyal azalması (azalmış yansıma) veya gölge bölgesi özelliği gösterir. Ayrıca, kurulumun doymamış kısmının distorsiyonu zamanla küçüldü.

Jeofizik literatüründe, yeni kirlenmiş sahalar ve laboratuvar deneyleri, gelişmiş GPR sinyal genliği ve temiz GPR sonuçları üretirken, yaşlı kirlenmeler, genellikle akiferin tepesinde, iletken bölgelerin altında yüksek iletkenlik gölgesi veya GPR yansıması azalması ile karakterize edilir (Atekwena ve Atekwena, 2010). Bu deneyden elde edilen bulgular, nispeten kısa süreli (26 hafta) ancak eski kontaminasyon özelliklerini gösterdiği için yukarıdaki ifadelerden bir istisnadır. Burada bildirilene benzer bir

çalışma, Bertolla ve ark., 2014 tarafından, ıslak kumda alkilbenzenin göçünü ve karakterizasyonunu inceledikleri çalışmalar yapılmıştır. Alt vadoz bölgesi içinde sinyal genliğinde hafif bir azalma bildirdiler. Campbell ve ark., 1996 ve DeRyck ve ark., 1993, parlak noktalarla ilişkili kirlenme bölgelerinin yüzen benzin lenslerini gösterdiğini bildirdi. Campbell ve ark., 1996 göre parlaklık, artan bir genlikten kaynaklanır. Atekwena ve Atekwena 2010, nispeten yüksek dielektrik geçirgenliği ~ 80 olan suyun, nispeten düşük dielektrik geçirgenliği 2 olan benzinle değiştirilmesinin, parlak nokta ile birlikte yüksek hızlı bir GPR katmanı ile sonuçlandığını öne sürdü. Atekwena ve Atekwena 2010'un bu açıklaması Campbell ve ark., 1996'nın çalışmalarında ortaya konduğu gibidir.

Kurulumun kirlenmiş bölümünden gelen GPR sinyallerinin azalmasının sonuçlarını, AMY kirleticisinin devam eden biyolojik bozunmasının sonuçları olarak yorummaktadır. Kurulum doğal kumdan (mikrobik büyüme için iyi bir ortam), sürekli tatlı su akışından (bir besin kaynağı) ve bir karbon kaynağından (AMY) oluştuğu için, mikrobiyal faaliyetlerin elde edilen sonuçlara yol açmış olabileceğinden şüphelendim. Ayrıca, kurulumun temizlik çalışması sırasında, kurulumun kirlenmiş bölümünden gelen bir çeşit çürük kokusu vardı. Koku, kontaminasyondan önceki AMY'nin yağlı kokusuna benzemiyordu.

Deney, laboratuvar içinde atmosferik ortama açıldı. Deney, Kış (26.02.2020) ve Yaz (19.08.2020) arasında gerçekleşti ve bu sıcaklık değişimleri kurulumu etkiledi. Zhou ve Crawford, 1995'e göre, artan sıcaklık, kısa zincirli alkanların ve diğer düşük moleküler ağırlıklı hidrokarbonların buharlaşmasını artırır. Ayrıca sıcaklığın artması hidrokarbonların viskozitesini ve toprak sulu fazındaki çözünürlüklerini de azaltır. Daha yüksek sıcaklık, mikroorganizmalar için çözücü tipi membran toksisitesine neden olur (Atlas, 1994). AMY, düşük ve yüksek (C15-C50) moleküler ağırlıklı alifatik ve aromatik hidrokarbon, yağlama katkı maddeleri, metaller ve çeşitli organik ve inorganik bileşiklerin karmaşık bir karışımıdır (ATSDR, 1997). Sıcaklıktaki artış, AMY'nin viskozitesini azaltabilir ve AMY'nin düşük moleküler ağırlıklı hidrokarbon bileşenlerinin buharlaşmasına neden olmuş olabilir. Bu açıklama, GPR sinyalinin

neredeysi arka plan seviyelerine düşmesini ve temizlik sırasında kirlenmiş kumun çürük kokusunu açıklamak için tatmin edici değildir.

Blume ve ark., 2002 tarafından yüksek sıcaklıkta (Yaz) düşük sıcaklığa (Kış) kıyasla mikrobiyal aktivitelerin arttığı bildirilmiştir. Zekri ve Chaalal 2005, sıcaklıktaki artışın mikrobiyal büyümeyi arttırdığını ve bunun da hidrokarbonların bozunma süreçlerini arttırdığını bulmuşlardır. Deney boyunca sabit tatlı su akışı, kirlenmiş bölgeye besin sağlamış olabilir ve bu, AMY'nin biyolojik bozunmasının hızlandırılmasına yardımcı olabilir. Musluktan gelen tatlı su oksijen içerir ve çözücü olarak su, nitrojen ve fosfor gibi diğer besinleri kumdan çözmüş ve mikrobiyallerin büyümesine yardımcı olmak için kullanılabilir hale getirmiş olabilir. Zhou ve Crawford, 1995'e göre, buhar veya çözelti halinde sağlanan besinler, topraktaki hidrokarbonların biyolojik bozunmasını arttırmış ve uygun miktarda besin, toprakta hidrokarbon biyolojik bozunmasını sağlamıştır.

GPR sinyalinin zamanla azalmasının olası açıklaması şudur; mikroorganizmalar, kum ortamında büyümeleri ve metabolizmaları için tatlı su ilaveli mineraller çözülmüş elementlerden gelen besinler olan AMY'da bulunan organik karbonu kullanmış olabilir. Organik asitler (karbonik asitler) ve iyonik bileşenler gibi metabolik yan ürünlerin üretilmesi, kirlenmiş ortamın fiziksel özelliklerinde ve gözenek sıvısı kimyasında değişikliklere yol açmış olabilir, bu da ortamın dielektrik geçirgenliğini ve elektrolitik ve ortamın arayüzey iletkenliğini değiştirir. GPR sinyal azalmasının ve penetrasyon derinliğinin, ortamın elektriksel iletkenliğine ve dielektrik geçirgenliğine bağlı olduğu ve dolayısıyla dielektrik geçirgenliğindeki değişiklik ve iletkenlikteki artışın, sinyal indirgemesinde değişikliklere neden olduğu iyi bilinmektedir. Bunlar zamanla GPR sinyalinin azalmasına neden olmuş olabilir. Bu çalışmanın sonuçlarının bulunması ve yorumlanması, bu konuda araştırma yapan bilim insanları ile aynıdır. Sauck ve ark., 1998; Bradford, 2007; Cassidy, 2007, Lane ve ark., 2006; Atekwana ve Atekwana 2010, Schilling ve ark., 2010, LNAPL'nin biyolojik bozunması sırasında çözülmüş iyonik bileşenlerdeki artışın, zamanla GPR sinyal azalmasını artıran elektriksel iletkenlikte artışlara neden olduğu hipotezini destekler.

Yaklaşık 5. haftadan itibaren deney düzeneği üzerinde ilginç bir durum gözlenmiştir (nispeten yüksek sıcaklığın başlangıcı (Şekil 3.13. ve 4.12.). Akşam geç saatlerde ve sabah erken saatlerde, kurulum yüzeyinin AMY enjeksiyon noktası dışında kalan kısımların (kurulum yüzeyine su eklenmemiş olmasına rağmen) ıslandığı fakat enjeksiyon noktası civarının kuru kaldığı fark edilmiştir (Şekil 3.13.). Bu yüzey ıslanması, sıcaklıktaki artıştan dolayı kurulum içindeki yeraltı suyunun buharlaşmasının etkisi olarak yorumlanmıştır. AMY kalıntısı, su buharının içinden geçmesini engelleyen bir bariyer görevi görmüş olabilir. Bu nedenle, AMY enjeksiyon noktası nispeten kuru kalmıştır. Bu durum, petrolün toprağa sızmasının uçucu hidrokarbonların buharlaşarak kayıplarını önlediğini belirten Leahy ve Colwell'in 1990 çalışmalarının sonuçlarıyla desteklenmektedir.

Sentenac ve ark., 2015'in Şekil 10.b'sinin 1 litre dizel enjeksiyonundan sonra 4. haftada (yaklaşık 28 ve 30. günler arasında) en yüksek özdirenci gösterdiği anlaşılmaktadır. Bu, sonuçlarımda en yüksek özdirenci kaydettiğim 4 litre AMY enjeksiyonundan 12 hafta sonra Şekil 4.6.F, 4.8.F ve 4.10.F'ye benzerdir. Şekil 4.6.F, 4.8.F ve 4.10.F'ye dayanarak özdirencin 12. haftada daha yüksek görünmesinin açıklaması, AMY enjekte edildiğinde gözeneklerdeki suyun yerini alması olabilir. Yani ilk haftalarda gözlenen özdirenç anomalisi AMY'dan kaynaklanmaktadır. Yüksek viskozitesi nedeniyle, AMY'nin yayılımı yavaşça genişler. Anomalinin merkezinde, AMY uzaklaşıyor ama yine de etrafındaki gözenekleri tıkayarak suyun içeri girmesini engelliyor olabilir (Şekil 3.17.'de yüzeyde gözlemlediğiniz kuru zona benzer şekilde). Artık AMY ile dolu olmayan, ancak henüz yeraltı suyuna yeniden bağlanmamış olan bu boş gözenekler, AMY'dan daha özdirençli olan hava ile dolmaktadır. Zaman geçtikçe, AMY kirlenmesi uzaklaşmaya devam eder ve su, su tablasının altındaki tüm gözenekleri tekrar doldurabilir ve AMY kirleticisinin kendisinin neden olduğu dirence karşı özdirenç anomalisini azaltmaktadır.

AMY, dizel, gazyağı ve benzinlerden daha iletkenidir. AMY'nin yüksek iletkenliği, inorganik katkı maddelerine ve içerdiği metallere atfedilir (bkz. Tablo 3.1.). Literatüre dayanarak, deney sonuçlarının, benzer düzenek, ancak farklı kirleticiler kullanan diğer araştırmalarda bildirilenlerden daha az özdirençli olmasını beklenmiştir. Bu

çalışmasından elde edilen ERT sonuçları, deney boyunca beklentilerim aksine yüksek özdirenç göstermiştir. Genel olarak özdirençte 1. günden 12. haftaya kadar bir artış olmuş ve ardından 26. haftaya kadar azalmıştır. Sentenac ve ark., 2010 ve Sentenac ve ark., 2015 (kirletici olarak dizel kullanan ancak bu çalışmada kullanılan benzer bir kurulum) özdirenç aralıklarını sırasıyla 2,00 – 2,97 log₁₀ Ohm-m ve 2,60 – 3,25 log₁₀ Ohm-m olarak bildirmiştir. Bölüm 4'te görüldüğü gibi bu deneyden elde edilen sonuçlar, Sentenac ve ark., 2010 ve Sentenac ve ark., 2015'ten alınan minimum özdirençten daha düşüktür. Bu deneyden elde edilen sonuçlar, Sentenac ve ark., 2010 ve Sentenac ve ark., 2015 tarafından elde edilen maksimum değerlerden de yüksektir. Kirleticilerin hacmi de elde edilen özdirenç değerlerine katkıda bulunmuş olabilir. Hem Sentenac ve ark., 2010 hem de Sentenac ve ark., 2015'te 1,5 litre dizel enjekte edilmesine karşılık, bu çalışmada ise kurulumu 4,0 litre AMY enjekte edilmiştir.

AMY enjeksiyonundan sonra geçen süre ve tanktan sürekli su akışı göz önüne alındığında, AMY'nin tankın çıkış ucuna kadar tamamen göç etmesi beklenebilir, ancak göç baskın olarak tankın bir bölümünde olmuştur (Şekiller 4.6., 4.8. ve 4.10.). Bu durum, kirleticinin viskoz yapısını yansıtır olabilir. Bu çalışmada elde edilen göç mesafesi sonuçları, daha az viskoz bir LNAPL olan dizel yakıt kullanan Sentenac ve ark., 2010 ve Sentenac ve ark., 2015 tarafından elde edilen sonuçlara göre daha küçüktür. AMY'nin viskoz yapısı, kurulumdaki geçişini etkilemiş olabilir. Sentenac ve ark., 2015, dizelin o kadar viskoz olmamasına rağmen, dizel geçişinin yavaş bir hızda olduğunu bildirmiştir. Hem Sentenac ve ark., 2010 hem de Sentenac ve ark., 2015'ten elde edilen sonuçlar, bu çalışmanın Şekil 4.6., 4.8. ve 4.10.'da elde edilen yanal yayılmadan daha fazla baskın yanal göç sergilemiştir. Belirgin yanal göçün nedeni hem dizel hem de AMY'nin LNAPL olması ve kuma enjekte edildiğinde başlangıçta dikey olarak göç etmeleri, ancak su tablası ile temas ettiklerinde yanal olarak yayılmaları ve yeraltı suyu akışı yönünde hareket etmeleridir. Bu çalışmada, yanal yayılma süreci, AMY'nin viskoz doğasından ve vadoz bölgesindeki kumun daha fazla AMY emmesinden dolayı yavaştır.

Sıcaklığın özdirenci etkilediği bilinmektedir (Shevvin ve ark., 2007; Hayley ve ark., 2007; Hermans ve ark., 2012; Heenan ve ark., 2015; Catarina ve ark., 2017). Catarina

ve ark., 2017'ye göre sıcaklık, sıvı özdirencini (akışkan viskozitesi ve iyonik hareketlilik yoluyla) ve yüzey özdirencini (yüzey iyonik hareketliliği aracılığıyla) etkiler. Piksel özdirenci ile düzeltilmiş piksel özdirenci arasındaki yüzde farkı, X bölgesi için %-8,93 ila %11,30 ve Y bölgesi için %-9,20 ila %11,70 arasındadır. Burada negatif %, arka plan sonucuna kıyasla özdirençte azalma anlamına gelirken, pozitif %, arka plan sonucuna kıyasla özdirençte artış anlamına gelir. Bu bilgilerden ve Şekil 4.13'teki düzeltilmiş piksel özdirenç grafiklerinin davranışından, sıcaklığın özdirençler üzerindeki fiziksel etkisinin bu çalışmada ortaya konduğu gibi özdirençteki değişiklikleri yalnızca açıklayamayacağı sonucunu çıkarabiliriz.

Öte yandan, fiziko-kimyasal faktörlerden biri olan sıcaklık, düşük sıcaklıkta mikrobiyal fizyolojiyi ve çeşitliliğini değiştirerek LNAPL'lerin biyolojik bozunmasını temel olarak etkiler (Atlas, 1975; Venosa ve Zhu, 2003'ten aktaran Logeshwaran ve ark., 2018). Sıcaklığın artması hidrokarbonların mikroorganizma metabolizmasını artırır (Leahy ve Colwell, 1990). Sıcaklık artışı ile mikroorganizmanın aktiviteleri önemli ölçüde artar (Blume ve ark., 2002; Alvarez ve Illman, 2006). Blume ve ark., 2002, mikroorganizmaların aktivitelerinin yaz aylarında (yüksek sıcaklık) kışa (düşük sıcaklık) kıyasla arttığını keşfettiler. Ayrıca, 3°C'den (ortalama kış sıcaklığı) 20°C'ye (ortalama yaz sıcaklığı) sıcaklık artışı için mikrobiyal aktivitede %80'e varan artış olmuştur (Blume ve ark., 2002). Şekil 4.12.'de gösterilen bu çalışmanın sıcaklık sonuçları, ölçülen sıcaklık değerleri 13.0°C ile 28.70°C arasında değişmektedir. Bu nedenle, bu çalışmada kaydedilen daha yüksek sıcaklık, mikroorganizmaların hızla artmasına ve dolayısıyla mikroorganizma etkinliklerinin artması AMY kirleticisinin daha hızlı bozulmasına neden olmuş olabilir.

ERT sonuçlarının özdirençli yanıtta iletken yanıtta geçişi, AMY kirleticisinin buharlaşma yoluyla uzaklaştırılmasına bağlanabilir, ancak bu ana faktör olmayabilir. 12. hafta ile 26. hafta arasındaki özdirenç tepkisindeki değişikliğin, AMY kirleticisinin biyolojik bozunmasının başlangıcı ile ilişkili olabilir. LNAPL'nin biyolojik bozunması fiziko-kimyasal, çevresel ve biyolojik faktörlerden etkilenir. Önceki paragrafta, biyobozunmaya yardımcı olabilecek fiziko-kimyasal faktörlerden biri olarak sıcaklığa değinildi. Diğer bir faktör, kirlenmenin meydana geldiği kumlu ortamdır. Bu deneyde

kullanılan Sakarya Nehri kumu çok miktarda oksit içermektedir. Deneyimiz durumunda biyolojik bozunmanın erken başlamasına yol açabilecek bir diğer önemli faktör de besin içeriği olabilir (Choi ve ark., 2002; Logeshwaran ve ark., 2018). Yaklaşık $2,9 \times 10^{-3}$ l/s'lik bir akış hızında sürekli tatlı su akışı, biyobozunmanın gerçekleşmesi için akifer sistemi içindeki AMY'dan etkilenen alanlara ek besinler sağlamış olabilir.

Bermejo ve ark.,1997; Atekwana ve ark., 2000; 2000; Cassidy, 2007; Lago ve ark., 2009; Heenan ve ark., 2015; Caterina ve ark., 2017; Abbas ve ark., 2018; Fernandez ve ark., 2019 ve Atekwana ve Atekwana, 2010 tarafından yapılan tartışmada, öz direnç tepkisindeki değişikliğin, biyobozunma nedeniyle AMY kirleticisi üzerindeki bakteriyel eylemlerden kaynaklandığı ileri sürülmüştür. Hidrokarbonların biyolojik bozunması sırasında, mikroorganizmalar büyümeleri için organik maddeyi oksitler ve solunumları için terminal elektron alıcılarını (TEA'ları) azaltır. Oksijen, nitrat, manganez, demir ve sülfat gibi TEA'ların indirgenmesi, CO₂ ve H₂O gibi metabolik yan ürünler üretir. Bu yan ürünler kimyasal reaksiyonlara girerek organik ve karbonik asitler oluşturur (Abbas ve ark., 2018; Atekwana ve Atekwana, 2010; Sauck, 2000). Bu işlemler, toplam çözünmüş katıların (TDS'ler) konsantrasyonunda bir artışa ve gözenek sıvılarının iyonik içeriğinin ve elektrolitik iletkenliğinin artmasına yol açar. Bunlar da hidrokarbondan etkilenen bölgelerin öz direncini azaltmaktadır.

Hem GPR hem de ERT sonuçları zamanla elektriksel iletkenlikte genel bir artış olduğunu ortaya koymuştur. Bu sonuçlar ve tartışmalar, yaşlı kirletme kavramıyla uyumludur. Kumun içeriği ve sıcaklık gibi diğer faktörlerle birlikte deney boyunca sürekli tatlı su akışı, deneyin 26 haftası içinde erken mikroorganizma faaliyetlerinde yardımcı olabilir. Bu mikroorganizma aktiviteleri, AMY'nin biyolojik olarak bozunmasına ve dolayısıyla deneysel kurulumun jeofiziksel tepkilerinde geçişe neden olur.

5.2. Yarı-Sürekli Dökülme ile AMY Kirletilmesi

Laboratuvar sıcaklığını düşürerek veya artırarak mevsimsel benzetim yapmak çok zor bir iştir. Bunun nedeni dış hava sıcaklığının pencere ve duvarlardan ısı artışı veya kaybı yoluyla laboratuvardaki benzetimi doğrudan etkilemesidir. Benim durumumda laboratuvar yeni inşa edilmiştir ve bina inşaatı sırasında duvarlara yerleştirilen yalıtım sebebiyle duvarlardan kaybolan ısı en aza indirilebilmiştir. En büyük zorluklarım laboratuvardaki klima sistemi ve ısıtma sistemleri olmuştur. Bunlar planladığım gibi laboratuvar sıcaklığını artırıp azaltamadılar. Aralık 2020 ile Mayıs 2021 arasındaki hava koşulları doğal mevsim şartlarında değildi ve bu nedenle deneyim sırasında kaydettiğim sıcaklık değerleri etkilendi.

Şekil 4.58., 4.59., 4.60. ve 4.61.'deki sıcaklık grafikleri deneyler boyunca sıcaklık değerlerinde bir dalgalanma meydana geldi. Kış benzetimi (Şekil 4.58.) ve yağış benzetimi (Şekil 4.59.) en fazla dalgalanmayı kaydederken, yaz benzetimi (Şekil 4.60.) ve kontrol deneyi (Şekil 4.61.) en az dalgalanmayı kaydetmiştir. Rakamlardan yaz ve kontrol deneyinde laboratuvar sıcaklıklarının genellikle sabit kaldığı, bazı günlerde az miktarda artış ve azalış olduğu görülmektedir.

Kum sıcaklığını en çok laboratuvar ve su giriş sıcaklık değerleri etkilemiştir. Genel olarak su giriş sıcaklık değerleri deney boyunca düşüktür. Kum sıcaklığı, laboratuvar ve su sıcaklık değerleri arasındadır.

Tablo 5.1 tüm benzetimlerden elde edilen sıcaklık sonuçlarının özetini göstermektedir. Tablo 5.1'den genellikle yüksek sıcaklık değerlerinin yaz benzetiminde, ardından kontrol deneyi ve ardından yağış benzetimi ve son olarak kış benzetiminde kaydedildiği görülebilir. Bu Sakarya'nın doğal iklimi ile uyumludur. Bu tez çalışma sırasında kaydedilen laboratuvar sıcaklıkları 26,1°C (yaz) ile 8,3°C (kış) arasında değişmektedir. Kum sıcaklıkları 22,3°C ile 10,3°C arasında değişmiştir.

Tablo 5.1. Tüm benzetimlerde elde edilen sıcaklık değerleri.

Mevsimsel simülasyonlar	Lab Sıcaklık /°C		Kum Sıcaklık /°C		Su Girişi Sıcaklık /°C		Su Çıkış Sıcaklık /°C	
	aralık	ortalama	aralık	ortalama	aralık	ortalama	aralık	ortalama
Kış	17,0 - 8,3	12,55	13,0 - 8,4	11,5	14,2 - 10,3	12,4	13,3 - 10,5	12,2
Yağmur	22,1 - 17,1	20,45	20,0 - 13,0	17,8	18,1 - 12,6	15,1	17,3 - 11,9	15,2
Yaz	26,1 - 24,1	25,5	24,0 - 18,0	21,5	22,3 - 16,6	19,3	20,8 - 15,7	18,8
Kontrol Deney	24,0 - 22,8	23,5	21,0 - 16,0	18,8	19,4 - 15,0	17,2	18,1 - 15,1	17,0

Yirmi hafta süren araştırmada toplam 240 adet GPR 2B profil ölçümü yapılmıştır. 240 adet 2B GPR profilinden toplam 24 adet 3B GPR görüntüsü elde edilmiştir. Üç mevsim ve kontrol deneyi 20 haftalık bir süre içinde simüle edilmiştir. Her bir deney benzetimi beş hafta sürmüştür.

Tüm deneysel benzetimlerde, sunum ve tartışmalar için üç adet 2B GPR profili (Profil 1, 5 ve 10) seçilmiştir. Ayrıca her birinden elde edilen 10 profilden 3B GPR görüntüleri oluşturulmuştur. Sonuçlar AMY kirlenmesinin zamana bağlı yayılımının ve değişiminin izlenmesi için zamana bağlı kesitler şeklinde sunulmuştur. Tüm benzetimlerde kullanılan kurulumlar aynı şekilde hazırlanmıştır.

Tüm benzetimlerin radargramlarından (A) görülebileceği gibi yatay yansıtıcılar mevcuttur. Bu yansıtıcılar tanka doldurulan üç farklı malzemeye karşılık gelir. Bu tez çalışma kapsamında dört farklı benzetim oluşturulmuş olmasına rağmen elde edilen radargramların GPR sinyallerinde çok fazla farklılık bulunmamaktadır. Kuru kumun ortamın fiziksel özellikleri arasındaki düşük kontrast nedeniyle kirleticinin net bir şekilde haritalanmasına izin vermediği bilinmektedir (Bertolla ve ark., 2014). Yaz benzetiminde yüksek sıcaklıklar kaydetmemize rağmen simüle edilen yeraltı suyu içindeki sürekli su akışı nedeniyle kum nemli kalmıştır. Tüm benzetimlerde yeraltı

suyu seviyesinin yaklaşık olarak aynı olduğu unutulmamalıdır. Sadece kurulumların yüzeyine eklenen su farklılık yaratmaktadır.

Bölüm 4'te tartışılan GPR sonuçları boyunca AMY kirlenmesiyle etkilenen zonlardaki GPR sinyal genliği kirletici miktarının artırılması birlikte zamanla artmıştır. Deney düzeneklerinde AMY'nın yayılımı çok net olarak tespit edilmiştir. Çünkü bu deneylerde kullanılan AMY musluk suyunun göreceli dielektrik geçirgenliği (yaklaşık 80) ıslak veya suya doymuş kumların (20-30) geçirgenliğine kıyasla daha düşük bir geçirgenliğe (yaklaşık 2,07) sahiptir. Atekwana ve Atekwana, 2010'a göre, kirlenmiş bölgedeki gözenek suyu ve havanın LNAPL bileşenleri ile yer değiştirmesi, göreceli dielektrik geçirgenlikte değişikliklere neden olur. Bu yer değiştirme, bu tez çalışmada elde edilen GPR bulgularında gözlenen yüksek GPR yansımaları açıklamaktadır. Bu sonuçlar, LNAPL'lerin laboratuvar ortamında kısa süreli izlemesi üzerine daha önce yayınlanmış araştırmalarla uyumludur. Daniels ve ark., 1995, Campbell ve ark., 1996, Lopes de Castro ve Branco, 2003'ten elde edilen sonuçlar, bu tezdeki GPR'den elde edilen sonuçlara benzer ve esas olarak LNAPL'lerin yalıtkan özelliğini göstermektedir.

Yirmi haftalık deney süresi boyunca toplam 144 adet 2B ERT profil ölçümü yapılmıştır. Profil 1, 3 ve 6'nın sonuçları seçilmiş ve bu tezde sunulmuştur. Ayrıca 6 adet 2B ERT profilinin tamamını içeren 3B ERT görüntüleri oluşturulmuş ve sunulmuştur. Tüm ERT verileri zamana bağlı ters çözüm yöntemi kullanılarak işlenmiştir.

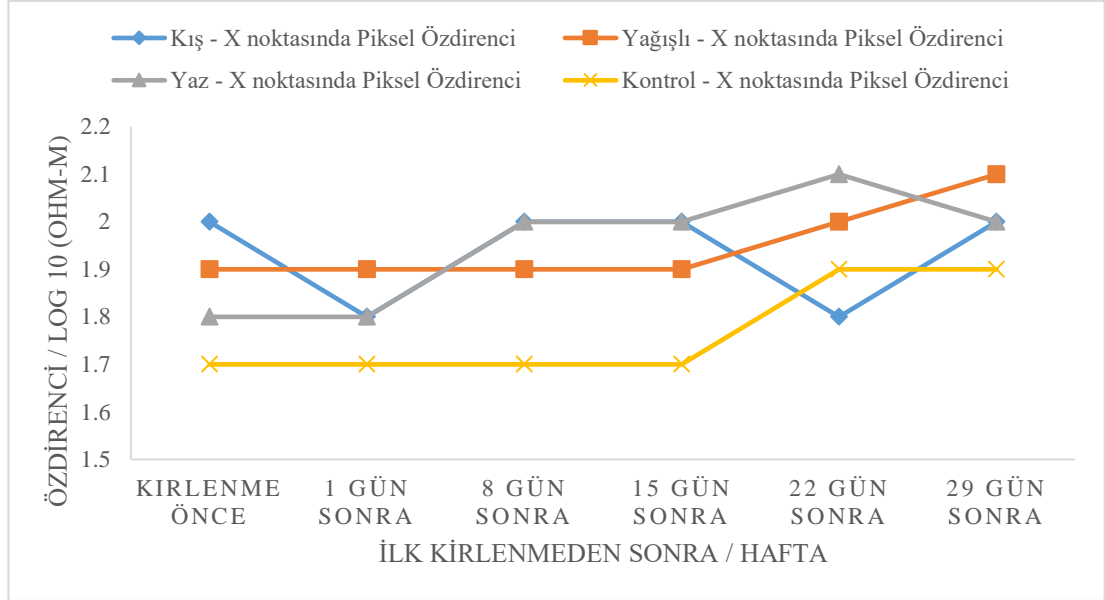
Elektrik özdirenç değerlerini etkileyen toprak parametreleri, toprağın katı bileşenlerinin doğasını (parçacık boyutu dağılımı, mineraloji), toprak boşluklarının düzenini (gözeneklilik, gözenek boyutu dağılımı, bağlanabilirlik) ve toprağın suya doygunluk (su içeriği) derecesini toprak sıvısının elektrik direnci (çözünen konsantrasyonu) ve sıcaklık içerir (Samouëlian ve ark., 2005). En önemli elektrik özdirenç değişimleri, nem içeriği, kimyasal bileşim, mineral içeriği, gözeneklilik, geçirgenlik, gözenek sıvılarının iyonik içeriği, iletkenlik, sıcaklık, dikey kalınlık ve derinlik gibi toprak parametrelerinden meydana gelir (Kižlo ve Kanbergs, 2009).

Üç mevsimsel benzetim artı kontrol deneyinde, nem içeriği ve sıcaklık hariç tüm parametreler sabit tutulmuştur. Su giriş bölümünden gelen sabit su akışının yanı sıra, kış benzetiminde deney süresi boyunca her hafta deney düzeneğinin yüzeyine 3 litre su ilave edilmiştir. Yağışlı mevsimsel süreçte, deney süresi boyunca her hafta deney düzeneğinin yüzeyine 5 litre su ilave edilmiştir. Hem yaz mevsimi hem de kontrol deneysel benzetimde, kurulumların yüzeyine ilave su eklenmedi. Çeşitli benzetimler arasındaki dirençteki farklılıklar, su içeriği ve sıcaklıktaki değişikliklerle ilişkilidir.

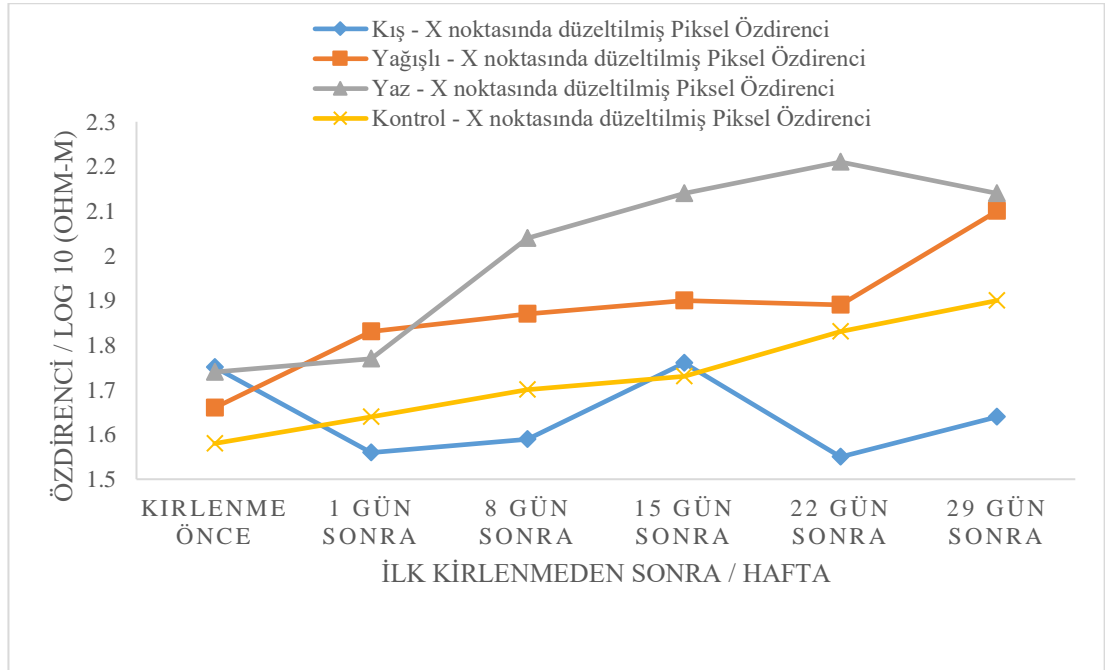
Şekil 4.62'den, sıcaklığın kış benzetimdeki piksel özdirenç değerleri üzerinde yüksek bir etkisi olduğunu görebiliriz. Düzeltilmiş piksel özdirenç değeri, piksel özdirenç değerinden çok daha azdır. Yaz benzetimde sıcaklığın da piksel özdirenç değerleri üzerinde etkisi vardır. Yaz benzetimi için düzeltilmiş piksel özdirenç değerleri, çıkarılan piksel özdirenç değerlerinden daha yüksektir (Şekil 4.64.). Şekil 4.66. ve 4.67.'deki yüzde fark grafiklerinden, sıcaklık artışı veya azalmasının mevsimsel benzetim özdirenç değerleri üzerindeki maksimum etkisini görebiliriz. Kış mevsimi benzetimi, piksel özdirenç değerleri ile düzeltilmiş piksel özdirenç değerleri arasındaki %20'den fazla farkla sıcaklık etkisinden çok etkilenmiştir.

Zamana bağlı piksel özdirenç değerinin grafiği olan şekil 5.1.'i göz önüne aldığımızda, hangi mevsimsel benzetiminin zamana bağlı genel olarak yüksek özdirençce sahip olduğunu net olarak göremiyoruz. Şekil 5.1.'den açıkça görülmektedir ki, kontrol deneyinin diğerlerine kıyasla genel olarak düşük piksel özdirenç değerleri vardır, ancak veri toplama sırasında düzeneğin yüzeyine ilave su eklenmemiştir. Kontrol deneyi için kaydedilen sıcaklıklar 15°C ve 24°C arasındadır. Kaydedilen sıcaklık değerleri 8.3°C ile 17°C arasında değişen ve veri toplamadan önce her hafta yüzeyine 3 litre ilave su eklenen kış mevsimi benzetimi, kontrol deneyinden daha yüksek piksel özdirenç değerlerine sahip görünmektedir. Yaz sezonu benzetimi için piksel özdirenç grafiği şekil 5.1.'de daha yüksek görünse de olağanüstü değildir. Mevsimsel benzetimlerin özdirençlerini sıralarken sadece piksel özdirenç değerleri dikkate alınsaydı, kontrol deneyi yanlış bir şekilde listenin sonuna yerleştirilmiş olurdu. Ayrıca sıcaklık mevsimsel değişiminin kumdaki özdirenç değerleri üzerinde önemsiz bir etkisi olduğunu yanlış yorumlanabilirdi.

Ancak, Şekil 5.2.'deki düzeltilmiş piksel özdirenci grafiği göz önüne alındığında, piksel özdirenci sonucunun tamamen farklı bir görüntüsünü görebiliriz. Şekil 5.2.'den, en yüksek özdirenc değerlerine sahip yaz, ardından yağış mevsimi, ardından kontrol deneyi ve son olarak da kışı sıralayabiliriz.

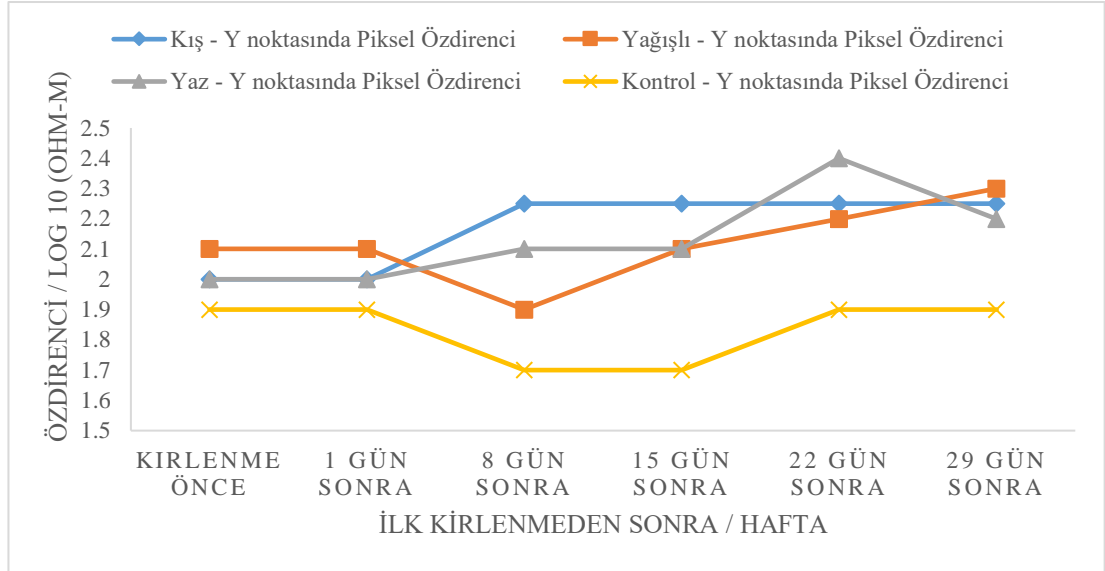


Şekil 5.1. Zamana bağlı X noktasında piksel özdirenc değerinin grafiği

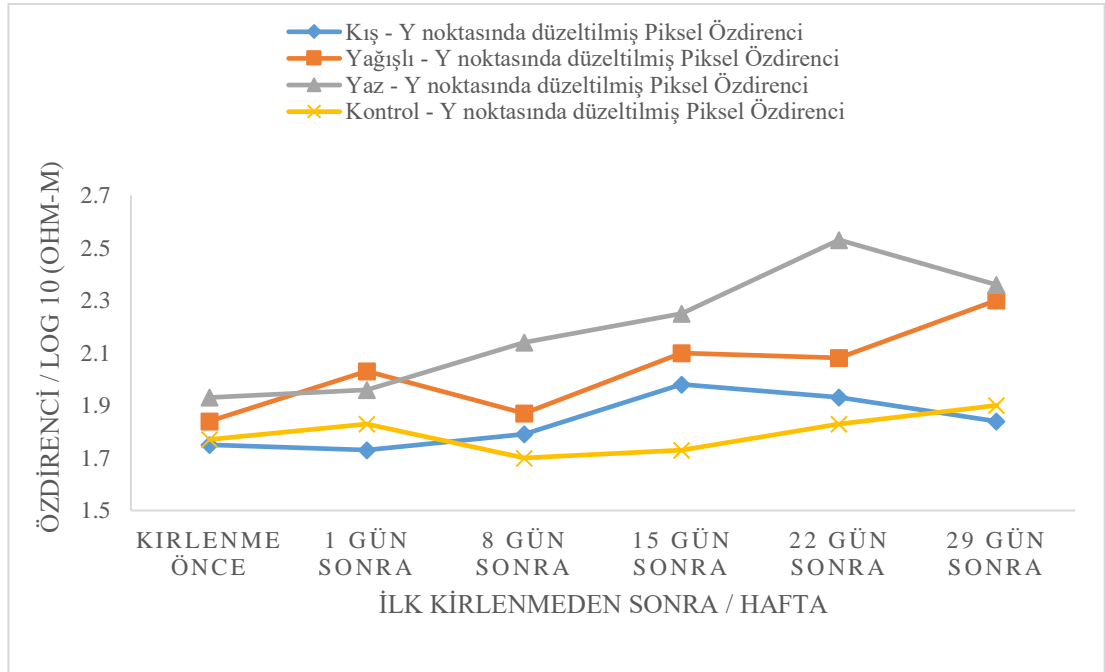


Şekil 5.2. Zamana bağlı X noktasında düzeltilmiş piksel özdirenc değerinin grafiği

Şekil 5.3.'te Y noktasındaki piksel özdirenç grafiği sunulmaktadır. Şekil 5.4. düzeltilmiş piksel özdirenç grafiğidir. Şekil 5.3. ve 5.4.'ten piksel özdirenci ve düzeltilmiş piksel özdirenç grafikleri arasında net bir fark görebiliriz. Yüksek özdirenç değerleri açısından, şekil 5.4. ilk olarak yaz, ardından yağışlı, ardından kış ve son olarak kontrol deneyi olarak sıralanmıştır.



Şekil 5.3. Zamana bağlı Y noktasında piksel özdirenç değerinin grafiği



Şekil 5.4. Zamana bağlı Y noktasında düzeltilmiş piksel özdirenç değerinin grafiği

Literatürde doymun zeminlerin kütlelele elektrik özdirencinin sıcaklığın artmasıyla azaldığı bilinmektedir (Hermans ve ark.,2014). Daha sıcak gözenekli akışkanların, daha soğuk akışkanlara göre daha düşük özdirençler verdiği saha sonuçlarından belgelenmiştir (Kean ve Rogers, 1981). Yüksek su doymunluğu, su iletkenliğinin tek tip kalması koşuluyla daha düşük özdirençlerle ilişkilendirilmelidir (Kean ve d ve ark., 1987). Yukarıdaki ifade, doymuş toprak ve kaya bölgesi için geçerlidir.

Şekil 2.3. ve 3.3.'den piksel özdirencinin çıkarıldığı noktaların (X ve Y) vadoz bölgesi içinde olduğu görülebilir. Bir önceki paragrafta yer alan ifadeler vadoz bölgesinin özdirenç özellikleri için geçerli değildir. Doymamış bölge olarak da bilinen vadoz bölgesi, su tablasının üzerinde karmaşık bir yapıdır. Vadoz bölgesinin derinliği mevsime ve su içeriğine bağlı olabilir. Vadoz bölgesindeki özdirencin ana kontrol faktörleri arasında gözeneklilik, su doymunluğu, gözenek suyu iletkenliği, tane boyutu ve tane yüzeyi iletkenliği bulunur.

Bu araştırmaya uygulanan vadoz bölgesi kum ve çakıldan oluşuyordu. Bu kaya türleri daha az su tutar ve daha yüksek özdirenç ile ilişkilidir (Daily ve ark.,1992). Sıcaklığın etkisi bir yana, deneyimizi en çok etkilemiş olabilecek en önemli parametre su içeriğidir. Daha önce de belirtildiği gibi kış ve yağmur mevsimi simülasyonunda kurulumun yüzeyine bir miktar su eklenmesine rağmen kum, yüksek geçirgen özelliği nedeniyle, suyu tutmamıştır. Su hızla sızarak doymun zona katılmıştır. Daily ve ark., 1992 de suyun kum ve çakıllardan oluşan doymamış çökellerden hızla geçtiğini bildirmiştir.

AMY miktarı dört deney boyunca aynı olduğundan, özdirençlerdeki değişiklikler su içeriğindeki ve vadoz bölgesinin sıcaklığındaki değişikliklerle ilişkilidir. Doymunluğun azalması özdirencin artmasına neden olmuştur (Frohlich ve Parke, 1989). Yüksek sıcaklık, kurulum içindeki suyun buharlaşmasını sağlamış ve vadoz bölgesi içindeki su içeriğinde bir azalmaya neden olmuş ve bu da özdirenci artırmıştır. Bu nedenle piksel özdirenci ve düzeltilmiş piksel özdirenci sonuçlarımız özdirenç teorisi ve literatür ile uyumludur.

Üç mevsimdeki ve kontrol deneyindeki yayılım yolları aynı değildir. Kış mevsimi benzetiminde AMY kirlenmesinin yayılım yönünün Profil 6'ya doğru olduğu ortaya çıkmıştır. Bu mevsimde AMY'nin düşey yayılımı, yanal yayılımdan çok daha fazladır. Yağış mevsimi benzetiminde, ERT sonuçları Şekil 4.29.'dan 4.35.'ye görüldüğü gibi, AMY'nin yayılım yönü hem Profil 1, hem de 6'ya doğrudur. AMY kirlenmesinin düşey ve yatay yayılımları yaklaşık olarak aynıdır. Yaz benzetiminde yayılım yönü yağış mevsimi ile benzerdir, ancak düşey yayılım, AMY'nin yanal yayılımına baskın olmuştur. Kontrol deneyinden elde edilen ERT sonuçları, Profil 6'ya doğru bir yayılım yönü göstermiştir. AMY'nin yanal yayılımı dikey yayılımından daha fazladır.

Bu çalışmanın ERT sonuçları, AMY enjeksiyonunu takiben zamanla özdirençte genel bir artış olduğu göstermiştir. Bu tezden elde edilen sonuçlar, aynı zamanda kısa vadeli LNAPL kirlenme araştırmaları yapan Mazac ve ark., 1990; DeRyck ve ark., 1993; Lien ve Enfield, 1998; Sentenac ve ark., 2015'in sonuçlarıyla uyumludur.

Atekwana ve Atekwana, 2010'a göre kirlenmiş bölgenin kısa vadeli jeofizik tepkisi vadoz bölgesindeki havaya ve kılcal saçak ve doymuş bölgedeki suya göre LNAPL'nin başlangıç konsantrasyonu tarafından kontrol edilir. LNAPL olarak AMY, gözenek sınırlarına (tatlı su için yaklaşık 0,1-1,0 mS/m) göre yalıtıcıdır (yaklaşık 0,001 mS/m'lik iletkenlik). Kirlenmiş bölgedeki gözenekli su ve havanın LNAPL bileşenleri ile yer değiştirmesi doğru akım veya statik iletkenlikte değişikliklere neden olur. Bu durum, tez çalışmamıdaki sonuçların neden zamanla artan elektrik özdirenç gösterdiğini açıklamaktadır. Kısa vadede LNAPL kirliliğinin jeofiziksel tepkisine ilişkin laboratuvar çalışmaları kirlenmemiş çevrenin jeofiziksel özellikleriyle LNAPL'nin fiziksel özellikleri arasındaki farklılıktan kaynaklandığını göstermektedir (Atekwana ve Atekwana, 2010). Bunun başlıca nedeni taze LNAPL kirlenmelerin ve enjeksiyonlarının kısa süre içinde kimyasal ve/veya biyolojik süreçler tarafından önemli ölçüde değişikliğe uğramamış olmasıdır.

LNAPL kirlenmesi genellikle dört farklı aşamaya ayrılır: buhar fazı, artakalan faz, serbest faz ve çözünmüş faz (Şekil 2.2. ve 2.3.). Hem GPR hem de ERT sonuçlarında özellikle 3. ve 4. haftalarda su tablasının altında görülen anomaliler, AMY'nin

çözünmüş fazının bir sonucudur. Şekil 2.3. ve 2.3.'te gösterildiği gibi, çözünmüş faz doymuş bölgede meydana gelir. LNAPL'nin çözünmüş fazdaki konsantrasyonu, LNAPL'nin farklı fraksiyonlarının çözünürlüğü ile belirlenir (Atekwana ve Atekwana, 2010). Tablo 3.1.'den, AMY büyük miktarda inorganik bileşen içermektedir. İnorganik bileşenler suda hızla çözülür ve su tablasının altında bir yer işgal etmiş olabilir. Bu nedenle, su tablasının altında gözlemlenen anomaliler AMY bileşenlerinin çözünmüş fazının bir sonucudur.

ERT görüntülerinde gösterilen anomalilerin, GPR radargramlarında gösterilenlerden daha yüksek yatay göçe sahip olduğu gözlenmiştir. Bunun nedeni, ERT'nin sistem içindeki sıvıların kimyasındaki değişime duyarlı olması, ancak GPR'nin olmamasıdır. Suyun kimyasındaki değişime, AMY'nin bazı bileşenlerinin suda çözünmesi neden olmuştur.

AMY enjeksiyonundan sonra geçen süre AMY hacmi ve tanktan sürekli su akışı göz önüne alındığında AMY'nin tankın çıkış ucuna kadar tamamen göç etmesi beklenebilir. Ancak hem 2B hem de 3B sonuçlarımızdan görüldüğü gibi AMY'nin göçü tankın sol yarısıyla sınırlıdır. Bu durum, kirleticinin viskoz yapısını yansıtır gibi görünmektedir. AMY önce dikey yönde ve sonra yanal yönde göç etmiştir. Sonuçlarımız yanal göçün (baskın göç) dikey göçten daha fazla olduğunu ortaya koymuştur. Baskın yanal göçün nedeni, LNAPL'nin kuma enjekte edildiğinde başlangıçta dikey olarak göç etmesi, ancak su tablası ile temas ettiğinde yanal olarak yayılması ve Şekil 2.3.'te gösterildiği gibi yeraltı suyu akışı yönünde hareket etmesidir. Burada AMY'nin viskoz doğası ve vadoz bölgesindeki kum nedeniyle hem dikey hem de yanal yayılma süreci yavaştır. Bu nedenle vadoz bölge içindeki kum daha fazla AMY absorbe etmiştir.

AMY dizel, jet yakıtı ve benzinden daha iletkenlidir. AMY'nin yüksek iletkenliği, inorganik katkı maddeleri ve içerdiği metallerle ilişkilidir (Tablo 3.1.). Jeofizik literatüre dayanarak deneylerimin sonuçlarının benzer düzenek ancak farklı kirleticiler kullanan diğer araştırmalarda yayınlananlardan daha az öz dirençli olması bekleniyordum. Ancak bu çalışmadan elde edilen GPR radargramlarından yüksek

sinyal genlikleri (yüksek yansıtma bölgesi veya yüksek genlikli GPR yansımaları) deneyler boyunca gözlenmiştir. Bu çalışmadan elde edilen ERT sonuçlarından ise, deneyler boyunca yüksek öz dirençli anomali bölgeleri gözlenmiştir. Bu GPR ve ERT sonuçları beklentilerime aykırıdır. Ancak hem GPR hem de ERT sonuçları LNAPL modelinin (yalıtkan katman modeli) yalıtım özellikleriyle uyumludur.

Yalıtım katmanı modeli yalnızca LNAPL ve ana kayaç ortamlarının fiziksel olarak ayrılmasına dayanır. Bu kimyasal ve biyolojik işlemlerden kaynaklanabilecek kirlenme bölgesinde LNAPL'nin değiştirilmesini içermez. Bu modelde, LNAPL, oluşum sıvılarına (tatlı su) göre bir yalıtkan olup temiz su ve suya doymuş kumlarla karşılaştırıldığında bağıl geçirgenliği düşüktür.

Kirlenmiş bölgedeki gözenek suyu ve havanın LNAPL bileşenleriyle değiştirilmesi öz direnç veya statik iletkenlik ve bağıl geçirgenlikte değişikliklere neden olmuştur. Bu, sonuçlarımda gösterildiği gibi elektriksel iletkenliğin azalmasına (öz direnç değerlerinin artmasına) ve GPR yansımalarının genliklerinin artmasına neden olmuştur. ERT sonuçları Mazac ve ark., 1990; DeRyck ve ark., 1993; Lien ve Enfield 1998; Yang ve ark., 2007 gibi farklı kirleticiler kullanan diğer çalışmaların (kısa süreli kirletici çalışmaları) sonuçlarıyla uyumludur. Ayrıca GPR sonuçları Daniels ve ark., 1995; Campbell ve ark., 1996; Lopes de Castro ve Branco, 2003; Cassidy, 2008 gibi diğer çalışmaların (kısa süreli kirletici çalışmaları) sonuçlarıyla uyumludur.

Özetle AMY dökülmesinin kısa süreli jeofizik tepkisine ilişkin laboratuvar ve saha çalışmaları kirlenmiş ortamın jeofiziksel karakteristiğinin büyük ölçüde LNAPL ve akiferin fiziksel özelliklerindeki kontrasttan kaynaklandığını göstermektedir. Bunun temel nedeni yeni AMY sızıntılarının kimyasal veya biyolojik süreçler tarafından önemli ölçüde değiştirilmemesi veya aşındırılmamasıdır.

5.3. Sonuçlar

Tablo 5.2. alışmasındaki bulguları ve yorumlama zet tablosu.

Deneyler	GPR bulguları ve yorumlama zeti	ERT bulguları ve yorumlama zeti
	Bu alışmasında, AMY hem dikey yönde hem de yanal yönde g etti. Yanal yayılma süreci, AMY'nin viskoz doğasından ve vadoz bölgesindeki kumun daha fazla AMY emmesinden dolayı yavaştır.	
	Kirlenme alanının altında zamana bağlı GPR sinyal genliğinde genel bir azalma gözlemlendi.	Kirlenme alanının altında zamana bağlı özdirenç genel bir azalma gözlemlendi.
Tek Seferlik Dökülme ile AMY Kirlenmesi	Kurulumun kirlenmiş bölümünden gelen GPR sinyallerinin azalmasının ve özdirenç azalmasının sonuçlarını, AMY kirleticisinin devam eden biyolojik bozunmasının sonuçları olarak yorummaktadır.	
	Kum kurulumun temizlik çalışması sırasında, kurulumun kirlil bölümünden gelen bir çeşit çürük kokusu vardı. Koku, kontaminasyondan nceki AMY'nin yağlı kokusuna benzemiyordu. Bu sonuçlar yaşlı kirlenme kavramıyla uyumludur. Kumun içeriği ve sıcaklık gibi diğer faktörlerle birlikte deney boyunca sürekli tatlı su akışı, deneyin 26 haftası içinde erken mikroorganizma faaliyetlerinde yardımcı olabilir.	
	Kirlenme alanının altında zamana bağlı GPR radargramlarından yüksek sinyal genlikleri (yüksek yansıtma bölgesi veya yüksek genlikli GPR yansımaları) deneyler boyunca gözlenmiştir.	Kirlenme alanının altında zamana bağlı ERT sonuçlarından ise, deneyler boyunca yüksek özdirençli anomali bölgeleri gözlenmiştir.
Yarı-Sürekli Dökülme ile AMY Kirlenmesi	Zamana bağlıGPR hem de zamana bağlıERT sonuçları LNAPL modelinin (yalıtkan katman modeli) yalıtım özellikleriyle uyumludur. AMY dökülmesinin kısa süreli jeofizik tepkisine ilişkin laboratuvar ve saha çalışmaları kirlenmiş ortamın jeofiziksel karakteriştiğinin büyük lde LNAPL ve akiferin fiziksel özelliklerindeki kontrasttan kaynaklandığını göstermektedir. Bunun temel nedeni yeni AMY sızıntılarının kimyasal veya biyolojik süreçler tarafından önemli lde değiştirilmemesi veya aşındırılmamasıdır.	

Bu tez araştırması, laboratuvar ortamında AMY ile kirlenilen kumda GPR ve ERT jeofizik yöntemlerinin kullanılmasıyla kirlenmenin saptanması, haritalanması ve karakterize edilmesini amaçlamıştır. Bunun için iki farklı deney yapılmıştır. İlk deney tek kirlenme olarak yapılmış ve 26 hafta sürmüştür. Sonuçlar, zamanla GPR sinyalinin aşamalı zayıflamasını ve zamanla elektrik özdirencinde aşamalı azalmayı ortaya koymuş ve AMY'nin zamana bağlı biyolojik bozunmasıyla açıklanmıştır. Bu sonuçlar,

uzun süre farklı LNAPL'ler üzerinde çalışan araştırmacıların ve yaşlı LNAPL kirlenmeler üzerinde çalışan araştırmacıların bulgularıyla uyumludur. İkinci deneyde, yarı-sürekli kirletme senaryosu uygulanmıştır. Yarı sürekli kirletme senaryosunda her biri beş hafta süren dört farklı deney toplam 20 haftada gerçekleştirilmiştir. Bu deneylerden elde edilen sonuçlar, zamanla GPR sinyallerinde aşamalı bir artış ve zamanla elektriksel özdirene aşamalı bir artış ortaya çıkarmıştır. Bu sonuçlar AMY ile akifer sisteminin fiziksel özellikleri arasındaki zıtlıkla ilişkilendirilmiştir. Sonuçlar, taze veya yeni LNAPL'ler kullanan araştırmacılar tarafından yapılan önceki çalışmalarla uyumludur.

Bu çalışmada gerçekleştirilen deneyler jeofizikçiler tarafından kum kullanılarak hazırlanan laboratuvar ortamında AMY kirleticisinin jeofiziksel özelliklerini incelemek için yapılan ilk çalışma olma özelliği taşımaktadır. AMY ile kirlenmiş bir tank akifer sisteminde AMY'nin yayılımını ve jeofiziksel özelliklerini incelemek için GPR ve ERT uygulanmıştır. Zamana bağlı olarak GPR ve ERT yöntemlerinin hem küçük hem de büyük miktarda AMY'nin akifer içerisindeki hareketini izlemek için çok iyi jeofizik yöntemler olduğu kanıtlanmıştır. Deneysel sonuçlar zamana bağlı GPR ve ERT'nin AMY kirleticilerin izlenmesindeki yeteneğini başarıyla göstermiştir.

Deneylerimin sınır koşulları içinde elde edilen sonuçlarım viskoz LNAPL olarak AMY'nin kumlu bir ortamda hem dikey hem de yatay olarak yayıldığını ortaya koymuştur. Bu araştırma AMY ile kirlenmiş alanlarda GPR ve ERT jeofizik yöntemleri kullanılarak yeraltında kirlenmeye maruz kalmış zonların 2B ve 3B'lu olarak başarılı bir şekilde haritalanabileceğini ve modellenebileceğini kanıtlamıştır. AMY kirlenmesinin yayılımının ve özelliklerinin kirlenme sonrası uzun zaman geçmesi durumuna bağlı olarak verdiği jeofizik tepkilerin değişmesinin nedenlerini anlamak için bir sonraki aşamada jeofizik araştırmaların kimyasal ve biyolojik araştırmaları da kapsayacak şekilde yapılması yararlı olacaktır.

KAYNAKLAR

- Abbas, M., Abderrahim J., Machour, N., Dupont, J. P., 2018. Geophysical and Geochemical Characterisation of a Site Impacted by Hydrocarbon Contamination Undergoing Biodegradation. *Near Surface Geophysics* 16(2):176–92.
- Abioye, O. P., Agamuthu, P., Abdul Aziz, A. R., 2012. Biodegradation of Used Motor Oil in Soil Using Organic Waste Amendments. *Biotechnology Research International* 2012:8.
- Aktürk, Ö., Doyuran, V., 2015. Integration of electrical resistivity imaging (ERI) and ground-penetrating radar (GPR) methods to identify soil Profile around Necatibey Subway Station, Ankara, Turkey. *Environmental Earth Sciences*, 2197–2208.
- Alvarez, P. J. J., Illman, W. A.. 2006. Bioremediation and Natural Attenuation: Process Fundamentals and Mathematical Models. In *Environmental Science and Technology*. Hoboken, John Wiley & Sons, New Jersey, USA, 609.
- Ameen, N. N., Klueglein, N., Appel, E., Petrovský, E., Kappler, A., Leven, C. 2014. Effect of Hydrocarbon-Contaminated Fluctuating Groundwater on Magnetic Properties of Shallow Sediments. *Studia Geophysica et Geodaetica* 58(3):442–60.
- Arato, A., Wehrer, M., Biró, B., Godio, A. 2014. Integration of Geophysical, Geochemical and Microbiological Data for a Comprehensive Small-Scale Characterization of an Aged LNAPL-Contaminated Site. *Environmental Science and Pollution Research* 21(15):8948–63.
- Armstrong, H., Hanania, J., Stenhouse, K., Donev, J., 2018. Energy Education - Lubricating oil. Retrieved February 23, 2021, from University of Calgary website: https://energyeducation.ca/encyclopedia/Lubricating_oil
- Atekwana, E. A., Atekwana, E. A., 2010. Geophysical signatures of microbial activity at hydrocarbon contaminated sites: A review. *Surveys in Geophysics*, 31(2), 247–283.
- Atekwana, E. A., Sauck, W. A., Werkema, D. D., 2000. Investigations of geoelectrical signatures at a hydrocarbon contaminated site", *Journal of Applied Geophysics*, 44(2– 3),167–180.
- Atekwana, E. A., Sauck, W. A., Abdel Aal, G., Werkema, D. D. 2002. Geophysical Investigation of Vadose Zone Conductivity Anomalies at a Hydrocarbon Contaminated Site: Implications for the Assessment of Intrinsic Bioremediation. *Environmental and Engineering Geophysics* 7(3):103–10.
- Atlas, R. M. 1975. Effects of temperature and crude oil composition on petroleum biodegradation. *Appl. Microbiol.* 30:396-403.

- Atlas, R. M. 1994. Microbial hydrocarbon degradation – bioremediation of oil spills. *J. Chem. Tech Biotechnol.* 52:149-156.
- ATSDR, 1997. Toxicological Profile for used mineral-based crankcase oil. Georgia, United States of America.
- Baba, A., Tayfur, G. 2011 Groundwater contamination and its effect on health in Turkey. *Environmental Monitoring and Assessment*, 183(1–4), 77–94.
- Bakıs, R., Tuncan, A., 2011. An investigation of heavy metal and migration through groundwater from the landfill area of Eskisehir in Turkey. *Environmental Monitoring and Assessment*, 176(1–4),87–98.
- Bano, M., Olivier Loeffler, O., Girard, J. F. 2009. Ground Penetrating Radar Imaging and Time-Domain Modelling of the Infiltration of Diesel Fuel in a Sandbox Experiment. *Comptes Rendus - Geoscience* 341(10–11):846–58.
- Barber, W. B., Morey, R., 1994. Radar Detection of Thin Layers of Hydrocarbon Contamination: Proc. of the 5th International Conference on Ground Penetrating Radar, v. 1, Waterloo Centre for Groundwater Research, Waterloo, Ontario, 1215-1228.
- Beklemishev, A. V. 1963. Measures and Units of Physical Values. Fizmatgiz, Moscow (in Russian).
- Bermejo, J. L., Sauck, W. A., Atekwana, E. A. 1997. Geophysical discovery of a new LNAPL plume at the former Wurtsmith AFB Oscoda, MI. *Ground Water Monitoring and Remediation*, 17: 131–137.
- Bertolla, L., Porsani J. L., Soldovieri F., Catapano I., 2014. GPR-4D monitoring a controlled LNAPL spill in a masonry tank at USP, Brazil. *Journal of Applied Geophysics*, 103: 237– 244.
- Binley, A. 2020. R2 (Version 4.02). Lancaster University. Retrieved July 17, 2020 (<http://www.es.lancs.ac.uk/people/amb/Freeware/Freeware.htm>).
- Blanchy, G., Saneivan, S., Boyd, J., McLachlan, P., Binley, A. 2020. ResIPy, an Intuitive Open Source Software for Complex Geoelectrical Inversion/Modeling. *Computers & Geosciences* 137:104423.
- Blume, E., Bischoff, M., Reichert, J. M., Moorman, T., Konopka, A., Turco, R. F. 2002. Surface and Subsurface Microbial Biomass, Community Structure and Metabolic Activity as a Function of Soil Depth and Season. *Applied Soil Ecology* 20(3):171–81.
- Boyd, J., Blanchy, G., Saneivan, S., McLachlan, P., Binley, A., 2019. 3D Geoelectrical Problems With ResiPy, an Open Source Graphical User Interface for Geoelectrical Data Processing. *FastTimes*, 24(4), 85–92. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.35381.63205>
- Bradford J. H., 2007 Frequency-dependent reduction analysis of ground-penetrating radar data, *Geophysics*, 72(3), J7–J16.

- Brewster, M. L., Redman, J. D. Annan, A. P. 1992. Monitoring a Controlled Injection of Perchloroethylene in a Sandy Aquifer with Ground Penetrating Radar and Time Domain Reflectometry. The symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems. (6): 11–18.
- Butler, Dwain K. 2005. Near-Surface Geophysics, Investigations in Geophysics, No. 13, Society of Exploration Geophysics. pp., ISBN 1-56080-130-1, Tulsa, OK.
- Carey, A. A. 1998. The Dielectric Constant of Lubrication Oils. Computational Systems Incorporated.
- Cassidy, N. J. 2007. Evaluating LNAPL contamination using GPR signal attenuation analysis and dielectric property measurements: Practical implications for hydrological studies. *Journal of Contaminant Hydrology*, 94(1–2), 49–75.
- Campbell, D. L., Lucius J. E., Ellefsen K. J., Deszcz-Pan M. 1996. Monitoring of a controlled LNAPL spill using ground penetrating radar. In: Proceedings of the symposium on the application of geophysics to engineering and environmental problems (SAGEEP), Keystone, CO, 511–517.
- Caterina, D., Flores Orozco, A., Nguyen, F. 2017. Long-Term ERT Monitoring of Biogeochemical Changes of an Aged Hydrocarbon Contamination. *Journal of Contaminant Hydrology* 201:19–29.
- Choi, S. C., Kwon, K. K., Sohn, J. H. Kim, S. J. 2002. Evaluation of Fertilizer Additions to Stimulate Oil Biodegradation in Sand Seashore Mesocosms. *J. Microbiol. Biotechn.* 12:431–436.
- CLAIRE. 2014. An Illustrated Handbook of LNAPL Transport and Fate in the Subsurface. London.
- Constable, S. C., Parker, R. L., Constable, C. G. 1987. Occam's Inversion: A Practical Algorithm for Generating Smooth Models from Electromagnetic Sounding Data. *Geophysics* 52:289–300.
- Çınar, H., Altundaş, S., Ersoy, E., Bak, K., Bayrak, N. 2016. Application of two geophysical methods to characterize a former waste disposal site of the Trabzon-Moloz district in Turkey. *Environmental Earth Sciences*, 75(1), 52.
- Daily, W., Ramirez, A., LaBrecque, D., Nitao, J. 1992. Electrical resistivity tomography of vadose water movement, *Water Resour. Res.*, 28(5), 1429–1442.
- Daniels, D. J., Gunton, D. J., Scott, H. E., 1988. Introduction to subsurface radar. *IEE Proceedings F*, 135(4), 278–320.
- Daniels J. J., Roberts R. L., Vendl, M. 1992. Site studies of ground penetrating radar for monitoring petroleum product contaminants. *Proc. Symp. Appl. Geophys. Environ. Eng. Probl.*, 5th, Englewood, Colo. Englewood, CO: Environ. Eng. Geophys. Soc, 597–609.
- Daniels, J. J., Roberts, R., Vendl, M., 1995. Ground penetrating radar for the detection of liquid contaminants. *Journal of Applied Geophysics*, 33(1–3), 195–207.
- Davis, J. L., Annan, A. P., 1989. Ground penetrating radar for high resolution mapping of soil and rock stratigraphy. *Geophysics Prospect*, 37, 531–551.

- Deceuster, J., Kaufmann, O., 2012. Improving the delineation of hydrocarbon-impacted soils and water through induced polarization (IP) tomographies: A field study at an industrial waste land. *Journal of Contaminant Hydrology*, 136–137, 25–42.
- DeRyck S. M., Redman J. D., Annan A. P., 1993. Geophysical monitoring of controlled kerosene spill. In: *Proceedings of the symposium on the application of geophysics to engineering and environmental problems (SAGEEP)*, San Diego, 5–19.
- Depountis, N., C. Harris, and M. C. R. Davies. 2001. An Assessment of Miniaturised Electrical Imaging Equipment to Monitor Pollution Plume Evolution in Scaled Centrifuge Modelling.”*Engineering Geology*, 60(1–4):83–94.
- El-Fadel, M. and R. Khoury. 2001. Strategies for Vehicle Waste-Oil Management : A Case Study.*Resources, Conservation and Recycling*, 33:75–91.
- Endres, A. L., Redman, J. D. 1993. Modelling the Electrical Properties of Porous Rocks and Soil Containing Immiscible Contaminants. In *The symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems*, 21–38.
- Enrique A., Nuñez, R. M., Chuk, D., Rossini, B. 2013. Determinación de Perfiles de Humedad En Suelos Homogéneos a Través de Un Método Geoeléctrico.*Ciencia Del Suelo* 31(02).
- Fernandez, P., Bloem, E., Binley, A., Philippe, R., French, H., 2019. Monitoring redox sensitive conditions at the groundwater interface using electrical resistivity and self potential. *Journal of Contaminant Hydrology*, 226.
- Frohlich, R. K., Parke, C. D. 1989. The electrical resistivity of the vadose zone—field survey. *Groundwater*, 27(4),524-530.
- Frohlich, R. K., Barosh, P. J., Boving, T. 2008. Investigating Changes of Electrical Characteristics of the Saturated Zone Affected by Hazardous Organic Waste. *Journal of Applied Geophysics* 64(1–2):25–36.
- Grumman, Jr. D. L., Daniels J. J. 1995. Experiments on the Detection of Organic Contaminants in the Vadose Zone. *Environmental and Engineering Geophysics* 0(1):31–38.
- Haack S. K., Bekins B. A. 2000. Microbial populations in contaminant plumes. *Hydrogeol J* 8:63–76
- Halihan, T., Paxton, S., Graham, I., Fenstermaker, T., Riley, M., 2005. Post-remediation evaluation of a LNAPL site using electrical resistivity imaging. *Journal of environmental monitoring: JEM*, 7(4),283–287.
- Hagrey S. A. Al., 2004 GPR Application for Mapping Toluene Infiltration in a Heterogeneous Sand Model. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 9(2), 79–85. <https://doi.org/10.4133/JEEG9.2.79>
- Hayley, K., Bentley, L. R. Gharibi, M. Nightingale, M. 2007. Low Temperature Dependence of Electrical Resistivity: Implications for near Surface Geophysical Monitoring. *Geophysical Research Letters* 34(18):1–5.

- Hermans, T., Vandenbohede, A., Lebbe, L., Nguyen, F., 2012. A shallow geothermal experiment in a sandy aquifer monitored using electric resistivity tomography. *Geophysics*, 77(1). <https://doi.org/10.1190/geo2011-0199.1>
- Heenan, J., Slater L. D., Ntarlagiannis, D., Atekwana, E. A., Fathepure B. Z., Sonal D., Cameron R., Werkema, D. D., Atekwana, E. A. 2015. Electrical Resistivity Imaging for Long-Term Autonomous Monitoring of Hydrocarbon Degradation : Lessons from the Deepwater Horizon Oil Spill. *Geophysics* 80(1):B1–11.
- Kardos, S., Pietrikova A. 2016. Evaluation of Motor Oil Characteristics and Degradation Factors for Possibilities of Continuous Diagnostics. *Acta Electrotechnica et Informatica* 16(2):20–24.
- Karlik, G., Kaya, M.A. 2001. Investigation of groundwater contamination using electric and electromagnetic methods at an open waste-disposal site: A case study from Isparta, Turkey, *Environmental Geology*, 40(6), 725–731.
- Kaufmann, O., Deceuster, J. 2007. A 3D resistivity tomography study of a LNAPL plume near a gas station at Brugelette (Belgium). *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 12(2), 207–219.
- Kaya, M. A., Ozürlan, G., Sengül, E. 2007. Delineation of soil and groundwater contamination using geophysical methods at a waste disposal site in Canakkale, Turkey. *Environmental monitoring and assessment*, 135(1–3), 441–6.
- Kayabalı, K., Yüksel, F. A., Yeken, T. 1998. Integrated use of hydrochemistry and resistivity methods in groundwater contamination caused by a recently closed solid waste site. *Environmental Geology*, 36(3–4), 227–234.
- Kean, W. F., Rogers R. B. 1981. Monitoring leachate in ground water by corrected resistivity methods. *Bull. Assoc. of Engineering Geologists*. V. XVIII, 101-107.
- Kean W. F., Waller M. J., Layson H. R. 1987. Monitoring moisture migration in the vadose zone with resistivity. *Ground water*, 25(5) 562-571.
- Kearey, P., Brooks, M., Hill, I. 2002. *An Introduction to Geophysical Exploration*. 3rd ed. Iowa: Blackwell Science Ltd.
- Keller, G. V. F. C. Frischknecht. 1966. *Electrical Methods in Geophysical Prospecting*. Pergamon.
- Kenyon W. E. 1984. Texture effects on mega- hertz dielectric properties of calcite rock samples. *J. Appl. Phys.* 55:3153–59
- Kiflai, M. E., Dean Whitman D., Ogurcak D. E., Ross, M. 2020. The Effect of Hurricane Irma Storm Surge on the Freshwater Lens in Big Pine Key, Florida Using Electrical Resistivity Tomography. *Estuaries and Coasts* 43(5):1032–44.
- Kim, C., Daniels, J. J., Holt, J. J., Guy E. D. 2000. A Physical Model Experiment of the GPR Response over Gasoline. In *The symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems*, 303–310
- Kižlo, M., Kanbergs, A. 2009. The Causes of the Parameters Changes of Soil Resistivity. In *The 50th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering*. Vol. 25. Latvia: Scientific Proceedings of Riga Technical University, 43–46.

- Knight, R. 2001. Ground Penetrating Radar for Environmental Applications. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 29:229–55.
- Knight, R. J., Endres, A. L. 2005. An introduction to rock physics principles for near surface geophysics, In: *Near-Surface Geophysics, Investigations in Geophysics*, No. 13, Society of Exploration Geophysics, Butler, D.K., ISBN 1-56080-130-1, Tulsa, OK, 357-438.
- Lago, A. L., Vagner, R. E., Borges, W. R., Penner, G. C. 2009. Geophysical Investigation Using Resistivity and GPR Methods: A Case Study of a Lubricant Oil Waste Disposal Area in the City of Ribeirão Preto, São Paulo, Brazil. *Environmental Geology* 58(2):407–17.
- Lane J. W., Day-Lewis F. D., Casey C. C., 2006. Geophysical monitoring of a field-scale biostimulation pilot project, *Ground Water*, 44(3), 430–443.
- Leahy, J. G., Colwell, R. R., 1990. Microbial Degradation of Hydrocarbons in the Environment. *Microbiological Reviews*, 54(3):305–15.
- Lien B. K., Enfield C.G., 1998. Delineation of subsurface hydrocarbon contaminated distribution using a direct push resistivity method. *J Environ Eng Geophys* 2–3:173–179
- Liu, S., Chen, L., Han, L., 2008. Study on Electrical Resistivity Related Parameters of Contaminated Soils. *Geotechnical Engineering for Disaster Mitigation and Rehabilitation*. In 2nd International Conference. Nanjing, China: Science Press Beijing.
- Logeshwaran, P., Megharaj M., Chadalavada S., Mark Bowman, M., Naidu R. 2018. Petroleum Hydrocarbons (PH) in Groundwater Aquifers: An Overview of Environmental Fate, Toxicity, Microbial Degradation and Risk-Based Remediation Approaches. *Environmental Technology and Innovation* 10:175–93.
- Loke, M. H., 2020. Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys. *Geotomosoft*. www.geotomosoft.com
- Lopes de Castro D., Branco R. M. G. C., 2003. 4-D ground penetrating radar monitoring of a hydrocarbon leakage site in Fortaleza (Brazil) during its remediation process: a case history. *J Appl Geophys* 54:127–144.
- Lucius J. E. 2000. Detectability of crude oil in the subsurface near Bemidji, Minnesota, using ground penetrating radar. *Proc. Symp. Appl. Geophys. Environ. Eng. Probl.*, 13th, Arlington, Va., Wheat Ridge, CO: Environ. Eng. Geophys. Soc, 311–19.
- Martinho, E., Almeida, F., Senos Matias, M. J., 2006. An experimental study of organic pollutant effects on time domain induced polarization measurements. *Journal of Applied Geophysics*, 60(1), 27–40.
- Masy, T., Caterina, D., Tromme, O., Lavigne, B., Thonart, P., Hiligsmann, S., Nguyen, F. 2016. Electrical Resistivity Tomography to Monitor Enhanced Biodegradation of Hydrocarbons with *Rhodococcus Erythropolis* T902.1 at a Pilot Scale. *Journal of Contaminant Hydrology* 184:1–13.
- Maza'c O., Benes L., Landa I., Maskova A., 1990. Determination of the extent of oil contamination in groundwater by geoelectrical methods. In: Ward SH (ed) *Geotechnical and environmental geophysics*, 2: 107–112.

- Maxwell M., Schmok J. 1995. Detection and mapping of a gasoline spill using ground penetrating radar: a case study. Proc. Symp. Appl. Geophys. Eng. Environ. Probl., 8th, Orlando, Fla. Englewood, CO: Environ. Eng. Geophys. Soc, 15–24.
- Monier-Williams, M. 1995. Properties of Light Non Aqueous Phase Liquids and Detection Using Commonly Applied Shallow Sensing Geophysical Techniques. In The symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems, 1–13.
- Mwanda, K., Atekwana, E. A., Sauck, W. A., 2002. Multi-method geophysical examination of a hydrocarbon contaminated site. In Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems. Las Vegas, Nevada.: Environment and Engineering Geophysical Society, ESC14-ESC14.
- Newell, C. J., Acree, S. D., Ross, R. R., Huling S. G. 1995. Light Non- Aqueous Phase Liquids. EPA/540/S. Washington, DC.
- Noln J. J., Harris C., Cavanaugh P. O. 1990. Used Oil: Disposal Options, Management Practices, and Potential Liability, third ed. Rockville, MD: Government Institutes.
- Oldenburg, D. W. Li, Y. 1999. Estimating Depth of Investigation in DC Resistivity and IP Surveys, Geophysics. Geophysics 64:403–416.
- Olhoeft G. R. 1986. Direct detection of hydrocarbon and organic chemicals with ground penetrating radar and complex resistivity. Natl. Water Well Assoc./API Conf. Petrol. Hydrocarb. Org. Chem. Ground Water Prev., Detect. Restor., Houston, Dublin, OH: Natl. Water Well Assoc, 284–305.
- Olhoeft, G. R. 1992. Geophysical Detection of Hydrocarbon and Organic Chemical Contamination. EEGS, 587–595.
- Olhoeft G. R. 1998. Electrical, magnetic and geometric properties that determine ground penetrating radar performance. Int. Conf. Ground Penetrating Radar, 7th, Lawrence, Univ. Kansas, 177–82.
- Osweller, G., Buck, W., Lloyd, W., 1973. Epidemiology of lead poisoning in cattle - a five-year study in Iowa. Clin Toxicol, 6(3), 367–376.
- Palacky, G. I., 1987. Resistivity characteristics of geological targets, in Electromagnetic Methods in Applied Geophysics-Theory, edited by M. Nabighian, Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, OK, 53–129.
- Petterssen J. K., Nobes, D. C. 2003. Environmental geophysics at Scott Base: ground penetrating radar and electromagnetic induction as tools for mapping contaminated ground at Antarctic research bases. Cold Reg Sci Technol 37:187–195
- Powers M. 1997. Modeling frequency- dependent GPR. Lead. Edge. 16:1657–62.
- Redman J. D., Deryck, S. M., Annan, A. P. 1994. Detection of LNAPL pools with GPR: theoretical modeling and surveys of a controlled spill. Proceedings of the Fifth International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR'94), Kitchener, Ontario, Canada, Expanded Abstract, 1283–1294.

- Reynolds, J. M., 1997. *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*. Vol. 1. West Sussex, England: John Wiley & Sons Ltd.
- Samouëlian, A., I. Cousin, A. Tabbagh, A. Bruand, and G. Richard. 2005. Electrical Resistivity Survey in Soil Science: A Review. *Soil and Tillage Research* 83(2):173–93.
- Sas, B., 1989. Secondary copper deficiency in cattle caused by molybdenum contamination of fodder : A case history. *Vet Hum Toxicol*, 31(1), 29–33.
- Sauck, W. A., 2000. A model for the resistivity structure of LNAPL plumes and their environs in sandy sediments. *Journal of Applied Geophysics*, 44(2–3),151–165.
- Sauck, W. A., Atekwana, E. A., Nash, M. S., 1998. High conductivities associated with an LNAPL plume imaged by integrated geophysical techniques. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 2, 203–212.
- Schillig P. C., Tsoflias G. P., Roberts J. A., Patterson E. M., Devlin J. F., 2010. Ground-penetrating radar observations of enhanced biological activity in a sandbox reactor, *J. Geophys. Res.*, 115, G00G10, doi:10.1029/2009JG001151.
- Schneider, G. W., Greenhouse, J. P. 1992. Geophysical Detection of Perchloroethylene in a Sandy Aquifer Using Resistivity and Nuclear Logging Techniques. In *Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems*, (6)19–28.
- Scollar, I., Tabbagh, A., Hesse, A., Herzog, I., 1990. *Archaeological Prospecting and Remote Sensing*, 674
- Sentenac, P., Montinaro A., Kulesa, B. 2010. Diesel Transport Monitoring in Simulated Unconfined Aquifers Using Miniature Resistivity Arrays. *Environmental Earth Sciences* 61(1):107–14.
- Sentenac, P., Hogson, T., Keenan, H., Kulesa, B., 2015. Small scale monitoring of a bioremediation barrier using miniature electrical resistivity tomography. *Journal of Applied Geophysics*, 115, 24–31.
- Sharma, P. V. 1997. *Environmental and Engineering Geophysics*. Vol. 20. Cambridge: Cambridge University Press.
- Sheriff, R., 1999. *Encyclopedic Dictionary of Exploration Geophysics* 3rd ed., Tulsa, USA: Society of Exploration Geophysics.
- Shevnin, V., Mousatov, A., Ryjov, A., Delgado-Rodriquez, O. 2007. Estimation of Clay Content in Soil Based on Resistivity Modelling and Laboratory Measurements. *Geophysical Prospecting* 55:265–275.
- Şimşek, C., Gemici, U., Filiz, S., 2008. An assessment of surficial aquifer vulnerability and groundwater pollution from a hazardous landfill site, Torbali / Turkey. *Geosciences Journal*, 12(1), 69–82.
- Tezkan, B, Georgescu, P, Fauzi, U. 2005. A radiomagnetotelluric survey on an oil-contaminated area near the Brazi Refinery, Romania. *Geophys Prospect* 53:311–323.

- Total., 2019. What is motor oil composed of? Retrieved February 23, 2021, from Total United Kingdom website: <https://www.total.co.uk/what-is-motor-oil-composed-of>.
- Ukaegbu, I., Gamage K., Aspinall, M. 2019. Nonintrusive Depth Estimation of Buried Radioactive Wastes Using Ground Penetrating Radar and a Gamma Ray Detector. *Remote Sensing* 11(2):141.
- USEPA, 1993. Use of Airborne, Surface, and Borehole Geophysical Techniques at Contaminated Sites, USEPA Publication, Lexington USA.
- USEPA, 2000. Innovations in Site Characterization: Geophysical Investigation at Hazardous Waste Sites. USEPA Publication EPA-542-R-(August):1–192.
- USEPA, 2009. Underground storage tank program – 25 years of protecting our land and water. EPA- 510-B-09-001. <http://www.epa.gov/swerust1/pubs/25annrpt.htm>
- Venosa, A. D., Zhu, X. 2003. Biodegradation of Crude Oil Contaminating Marine Shorelines and Freshwater Wetlands. *Spill Sci. Technol. B.* 8:163–178.
- Von Hippel, A. R. (ed.). 1954. *Dielectrics: Materials and Applications*. MIT Press, Cambridge MA, 438 pp.
- Wharton R. P., Hazen G. A., Rau R. N., Best D. L. 1980. Electromagnetic propagation logging: advances in technique and interpretation. *Annu. Fall Tech. Conf. Exhib. Soc. Petrol. Eng. AIME*, 55th, Dallas, TX. 9267
- Werkema, D., Atekwana, E. A., Endres, A. L., Sauck, W. A., Cassidy, D. P. 2003. Investigating the geoelectrical response of hydrocarbon contamination undergoing biodegradation. *Geophysics Res Lett*, 30.
- Wyllie, M. R. J., Gregory, A. R. 1953 Formation factors of un- consolidated porous media: Influence of particle shape and effect of cementation: *Trans. AIME*, 198, 103–110.
- Yang, C. H., Yu, C. Y., Su, S. W. 2007. High Resistivities Associated with a Newly Formed LNAPL Plume Imaged by Geoelectric Techniques - a Case Study. *Journal of the Chinese Institute of Engineers, Transactions of the Chinese Institute of Engineers, Series A/Chung-Kuo Kung Ch'eng Hsuch K'an* 30(1):53–62.
- Zekri, A. Y., Chaalal O., 2005. Effect of temperature on biodegradation of crude oil. *Energy Sources*, 27(1–2), 233–244. <https://doi.org/10.1080/00908310490448299>
- Zhou E., Crawford R. L, 1995. Effects of oxygen, nitrogen, and temperature on gasoline biodegradation in soil. *Biodegradation*, 6(2), 127–140. <https://doi.org/10.1007/BF00695343>

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Hafız MOHAMMED NAZIFI

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Yılı
Doktora	Sakarya Üniversitesi, Türkiye / Fen Bilimleri Enstitüsü / Jeofizik Mühendisliği	2022
Yüksek Lisans	Sakarya Üniversitesi, Türkiye / Fen Bilimleri Enstitüsü / Jeofizik Mühendisliği	2015
Lisans	Kwame Nkrumah Fen ve Teknoloji Üniversitesi, Gana / Doğal Bilimleri Fakültesi / Fizik	2011
Lise	T. I. Ahmaddiyya Lisesi, Gana / Genel Fen	2006

İŞ DENEYİMİ

Yıl	Yer	Görev
2018-2019	FGİ-Kapı ve Yükleme Teknolojileri	Pazarlama
2015-2015	K-UTEC AG Tuz Teknolojileri	Lisansüstü Stajyer
2011-2012	Kwame Nkrumah Fen ve Teknoloji Üniversitesi	Araştırma Görevlisi
2010-2010	Gana Jeolojik Araştırmalar Dairesi	Stajyer

DİL

Hausa, İngilizce, Twi, Türkçe (çok iyi seviye), Arapça (Orta seviye)

ESERLER (makale, bildiri, proje vb.)

1. Mohammed Nazifi H., Gülen L., Gürbüz E., Pekşen E. 'Time-lapse electrical resistivity tomography (ERT) monitoring of used engine oil contamination in laboratory setting', Journal of Applied Geophysics, <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2022.104531>, 2022.
2. Mohammed Nazifi H., and Lambon S. B. 'Geophysical Mapping of Groundwater Aquifers Beneath the Central Region of Ghana', J. Int. Environmental Application. 16(3), pp 113-122, 2021.
3. Mohammed Nazifi H., and Gülen L. 'The use of electromagnetic and vertical electrical sounding methods in groundwater exploration', Bull. Min. Res. Exp. 158, pp 327 - 344, 2019.
4. Mohammed Nazifi H. 'Investigation of subsurface geology in the Tano Basin of Ghana using Seismic Refraction method', OHU J. Eng. Sci. Vol. 7, No. 3, pp 1220 - 1224, 2018.
5. Mohammed Nazifi H., Gülen L., and Karavul C. 'Groundwater investigations in Ghana using Electromagnetic and Electrical Resistivity Methods', SAU Fen Bil Der, Vol. 20, No. 2, pp 133 - 139, 2016.
6. Mohammed Nazifi H., Yussif A. K., and Danuor S. K., 'The geological subsurface structure of the onshore Tano Basin', LAP LAMBERT Academic Publishing, Deutschland, 2013. (Book).
7. Mohammed Nazifi H. 'Subsurface Geological Units Investigation in the Appollonian Formation of Ghana using Seismic Refraction method' Jeofizik oturumu, Uluslararası Katılımlı Kapadokya Yerbilimleri Sempozyumu, Niğde, Türkiye, 24 -26 Ekim 2018(sözlü sunum).
8. Mohammed Nazifi H. 'Health Hazards of the Contamination of Soil and Groundwater by Used Engine Oil' Jeoloji Bilimleri ve Çevre Mühendisliği oturumu, 2. Uluslararası Öğrenciler Bilim Kongresi, İzmir, Türkiye, 4 - 5 Mayıs 2018 (sözlü sunum).
9. Mohammed Nazifi H. and Gülen L., 'Groundwater Investigations in the Granite Formation of Ghana Using Integrated Geophysical Methods', Kutup ve Çevre

Çalışmaları Oturumu, 7. IGSC, Katowice, Polonya, 11-14 Temmuz 2016 (Poster sunumu).

10. Mohammed Nazifi H. and Gülen L., 'Hydrogeological Investigations in Central Region of Ghana using Integrated Geophysical Methods', Elektromanyetik Oturum, 6. Geo-elektrik Atölyesi, Kocaeli, Türkiye, 23 -25 Mayıs 2016. (Sözlü sunum).

11. 119Y193 (TÜBİTAK 1001), Hafif Sulu Olmayan Fazlı Sıvıların (LNAPL) Karakterizasyonu, İzlenmesi ve Haritalanması için Jeofiziksel Yöntemlerin Kullanılması, Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Projelerini Destekleme Programı, Doktora Bursiyeri, 02.02.2020 – 02.06.2021.

12. 2019-7-25-37, (LÜTEP) Atık motor yağı ile kirlenmiş kumun elektriksel özdirenç tomografisi (ERT) ve yer radar (GPR) tepkilerinin özelliklerini araştırması, Sakarya Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeler Koordinatörlüğü, Doktora Öğrencisi, 24.04.2019 –24.04.2021.

13. 118B290 (TUBİTAK 4004), Yaşamda Yerbilimleri, Bilim ve Toplum, Eğitimci, BİLİM ve TOPLUM, Bilim ve Toplum Programları Müdürlüğü, Projeye Katılma/Ayrılma Tarihleri: 14.05.2018 - 14.01.2019, Proje Başlangıç/Bitiş Tarihleri: 14.05.2018 - 14.01.201.