

**ANKARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**JEOFİZİK MODEL VE HARİTALARIN GÖRÜNTÜ İŞLEME YÖNTEMLERİ
İLE İYİLEŞTİRİLMESİ**

Şerif Murat GÖLEBATMAZ

JEOFİZİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ANKARA

2021

Her hakkı saklıdır

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

JEOFİZİK MODELLERİN ve HARİTALARIN GÖRÜNTÜ İŞLEME YÖNTEMLERİ İLE İYİLEŞTİRİLMESİ

Şerif Murat GÖLEBATMAZ

Ankara Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Jeofizik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. İrfan AKCA

Jeofizikte belirli fizik esaslarına dayalı yöntemlerle ölçümler yapılır. Ölçülen bu büyüklükler çeşitli veri-işlem aşamalarından geçirildikten sonra yer altının fiziksel parametreleri kestirilmeye çalışılır. Ters çözüm işlemi ön-kestirim parametreleri kullanılarak hesaplanmış kuramsal veriler ile ölçülen veri arasında, önceden belirlenen bir duyarlılıkta uyum oluşana kadar başlangıç model parametrelerinin değiştirilmesi ile yürütülen bir parametre kestirim uygulamasıdır. Hesaplanan parametrelerin dağılımları kesit, harita veya üç boyutlu modeller halinde sunulur ve yer içinin olası en belirgin görüntüsü elde edilmeye çalışılır. Ancak görselleştirme süreçleri sırasında çeşitli istenmeyen yan etkiler oluşabileceği gibi kullanılan renk spektrumu, renk ölçeği sınırları seçimi gibi nedenlerle bazı bilgiler kesit veya modelde bulunduğu halde görüntülenemeyebilmektedir. Görüntü işleme, uygulama alanları giderek genişleyen, var olan uygulamaları da geliştirerek, uyarlanabilirliği artan bir alandır. Nitelikli veri toplamak için gerekli şartların sağlandığı durumlarda, bu verilerdeki bütün bilgiyi kullanabilmek, yorum ve karar aşamalarını kolaylaştırmak amacıyla görüntü işleme araçlarından faydalanılabilir. Bu tez kapsamında jeofizik harita ve modellerin iyileştirilmesi için görüntü işleme araçları iki farklı şekilde kullanılmıştır. İlk olarak jeofizik modeller birer görüntü olarak ele alınmış ve farklı görüntü işleme araçlarıyla iyileştirilmeye çalışılmıştır. İkinci olarak ise doğru akım öz direnç verilerinin ters çözümünde model ağırlık dizeyi olarak farklı görüntü işleme süzgeç katsayıları kullanılmış buna ek olarak yapısal benzerlik kısıtı kavramından faydalanılarak yer radarı yönteminden elde edilen bulgular ile ters çözüm işlemi kısıtlanmıştır. Uygulamalar yer radarı ve doğru akım öz direnç verileri üzerinde yapılmış ve yorumlarıyla birlikte, çok sayıda örnek ortaya konmaya çalışılmıştır.

Ocak 2021, 111 sayfa

Anahtar Kelimeler: Görüntü İşleme, Yuvarlatma Fonksiyonu, Yer Radarı, Elektrik Öz direnç Tomografisi, Yapısal Benzerlik

ABSTRACT

M. Sc. Thesis

ENHANCEMENT of GEOPHYSICAL MODELS and IMAGES by IMAGE PROCESSING METHODS

Şerif Murat GÖLEBATMAZ

Ankara University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Geophysics

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. İrfan AKCA

In geophysics, field measurements sensitive to a certain physical principle are carried out. The measured data are processed, then physical parameter distribution in subsurface is tried to be predicted. Geophysical inversion is run by updating the initial model parameters until observed and calculated data fits in a predetermined tolerance. Distribution of calculated parameters are presented as sections, maps or three-dimensional models, aiming to reconstruct the possible clearest image of the subsurface. However, it is possible to have some undesired side affects, which can occur during the data process and visualization steps. Selection of color spectrum, color scale limits and several user selective parameters can cause some information to be invisible although they exist in the numerical version of the sections or models. Image processing is a field that its application areas are constantly expanding while its present applications thriving and become more applicable. In the cases with the availability of good quality data, image processing tools can be used for extracting all information in the sections and models. Therefore, interpretation and decision stages become more easier. In this study, the image processing tools has been used in two different ways for enhancing the geophysical maps and models. First, the processed geophysical models and maps were handled as images and tried to be enhanced with different image processing tools. Second, different image processing filters were used as smoothing functional in the inversion of direct current resistivity data. In addition, inversion process was restricted with the results of ground penetrating radar surveys with the help of structural similarity concept. Example applications were done with direct current resistivity and ground penetrating radar field data sets and numerous examples are presented with interpretations.

January 2021, 111 pages

Key Words: Image Processing, Smoothing Function, Ground Penetrating Radar, Electrical Resistivity Tomography, Structural Similarity

ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR

Bu tezin ortaya çıkmasını sağlamış olan, çalışmalarımın her aşamasında bilgisi ve fikirleriyle bana yön vermiş, sadece akademik konularla sınırlı kalmayıp hayatın diğer alanlarında maddi ve manevi desteklerini benden esirgememiş, bilimsel bakış açısına olduğu kadar kişiliğine de saygı duyup örnek aldığım danışman hocam Doç. Dr. İrfan Akca'ya en derin teşekkürlerimi sunarım.

Mesleki alandaki bilgi ve becerilerini benimle paylaşmaktan asla çekinmemiş ve bu tez içinde kullanılan verilerin bir kısmını benimle paylaşmış olan arkadaşım ve meslektaşım Jeofizik Mühendisi Seçkin Sertaç LALLI'ya, lisans hayatım boyunca yetişmemde katkıları olan Ankara Üniversitesi Jeofizik Mühendisliği bölümündeki tüm hocalarıma teşekkürü borç bilirim. Ayrıca tez savunmama jüri yapmış, yorum ve önerileriyle gelecekteki çalışmalarım için fikir vermiş olan değerli hocalarım Ahmet Tuğrul BAŞOKUR ve Emin Uğur ULUGERGERLİ'ye teşekkürlerimi sunarım.

Bugünlere gelene kadar her zaman yanımda olup beni desteklemiş olan aileme en içten duygularıyla teşekkür ederim.

Şerif Murat GÖLEBATMAZ
Ankara, Ocak 2021

İÇİNDEKİLER

TEZ ONAY SAYFASI	
ETİK.....	i
ÖZET.....	ii
ABSTRACT	iii
ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR.....	iv
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ÖZETLERİ	3
2.1 Doğru Akım Özdirenç Yöntemi	4
2.1.1 DAÖ yönteminde kullanılan modeller.....	4
2.1.2 DAÖ yönteminde bazı bilinen sorunlar ve önceki çözüm önerileri.....	5
2.1.3 DAÖ verilerinin düzenlenmiş en-küçük kareler ters çözümü	8
2.2 Yer Radarı Yöntemi.....	13
2.2.1 Dewow.	15
2.2.2 Kazanç uygulama	16
2.2.3 Arkaplan düzeltmesi	18
2.2.4 Sıfır kayma zamanı düzeltmesi	19
2.2.5 Doğrudan gelen dalganın veriden atılması	20
2.2.6 Göç.....	21
2.2.7 Derinlik dilimlerinin oluşturulması ve sunumu	22
2.3 Görüntü İşleme.....	26
2.3.1 Noktasal işlemler	29
2.3.2 Yerel işlemler	31
2.3.3 Tümel işlemler	33
3. JEOFİZİK HARİTALARIN GÖRÜNTÜ İŞLEME İLE İYİLEŞTİRİLMESİ..	35
3.1 Renk Haritası ve Dönüşüm Fonksiyonları.....	35
3.2 Evrişim Süzgeçleri.....	39
3.2.1 Ortalama (mean) süzgeci	40
3.2.2 Orta değer (medyan) süzgeci.....	40
3.2.3 Gauss süzgeci	41
3.2.4 Disk süzgeci.....	43
3.2.5 Laplacian süzgeci.....	45
3.2.6 Laplacian of Gaussian (LoG) süzgeci	46
3.2.7 Keskinleştirme (sharpening) süzgeci	47
3.3 Yerel Olmayan Ortalama (Non-Local Means, NLM) Süzgeci.....	50
3.4 Histogram İşlemleri.....	54
3.5 Fourier Bölgesinde Görüntü İyileştirme	58
3.6 Morfolojik Süzgeçler.....	65
4. DAÖ VERİLERİNİN ÜÇ-BOYUTLU TERS ÇÖZÜMÜNDE GÖRÜNTÜ İŞLEME İŞLEÇLERİ	73
4.1 SSIM-Kısıtlı Üç-Boyutlu Ters Çözüm.....	73
4.1.1 Yapısal benzerlik indeksi (SSIM)	74
4.1.2 Yapısal benzerlik kısıtının ters-çözümüne katılması.....	75

4.1.3 Arazi çalışması örneği 1: Patara antik kentinden veri kümeleri	77
4.1.4 Arazi çalışması örneği 2: Side antik kentinden veri kümeleri	82
4.2 Görüntü İşleme Süzgeçlerinin Ters Çözümüne Katılması	86
4.2.1 Gaussian süzgecinin ters çözüme eklenmesi	89
4.2.2 Keskinleştirme süzgecinin ters çözüme eklenmesi	91
4.2.3 Ortalama (Box) süzgecin ters çözüme eklenmesi	94
4.2.4 Elipsoit süzgecin ters çözüme eklenmesi	97
5. SONUÇLAR	100
KAYNAKLAR	103
EK 1 Fourier Bölgesinde Süzgeç Fonksiyonu.....	110
ÖZGEÇMİŞ.....	111



SİMGELER DİZİNİ

$\Phi(m)$	Amaç Fonksiyoneli
$E(m)$	Yanılıgı enerjisi fonksiyonu
$S(m)$	Duraylayıcı fonksiyonel
$f(m)$	Düz çözüm işleci
m	Parametre dizeyi
d	Ölçülen veri dizeyi
Δd	Veri fark dizeyi
Δm	Parametre düzeltme dizeyi
J	Jacobian Dizeyi
W_d	Veri ağırlıklandırma dizeyi
W_p	Parametre ağırlıklandırma dizeyi
α	Düzenleme katsayısı
γ	Görüntünün parlaklık katsayısı
σ	İletkenlik (S/m),
ε	Dielektrik geçirgenlik.
ρ	Özdirenç (Ωm)

Kısaltmalar

MGS	Minimum Gradyen Desteği
IP	Yapay Uçlaşma
DAÖ	Doğru Akım Özdirenç
DES	Düşey Elektrik Sondajı
GPR	Yer Radarı (Ground Penetrating Radar)
SEKK	Sönümlü en küçük kareler
YSEKK	Yuvarlatılmış sönümlü en küçük kareler
1B	Bir Boyutlu
2B	İki Boyutlu
3B	Üç Boyutlu
LoG	Laplacian of Gaussian
NLM	Yerel Olmayan Ortalama (Non-Local Means)

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1 Ters çözüm akış şeması (Başokur 2015'den değiştirilerek alınmıştır).....	9
Şekil 2.2 GPR Yöntemi Çalışma İlkesi.....	14
Şekil 2.3 Yer-Radarı Yöntemi Veri-İşlem Adımları.....	15
Şekil 2.4 GPR izinin DEWOW işlemi Öncesi ve Sonrasında Görünümü	16
Şekil 2.5 Kazanç İşlemi uygulanmadan önce ve sonra radar izinin görünümü	17
Şekil 2.6 Kazanç İşlemi uygulanmadan önce ve sonra radar izinin görünümü	18
Şekil 2.7 Sıfır kayma zamanı düzeltilmesi yapılmadan önce (üstte) ve yapıldıktan sonra (altta) radargram.....	19
Şekil 2.8 Doğrudan gelen dalga veriden çıkarılmadan önce (üstte) ve çıkarıldıktan sonra (altta) radar kesiti	20
Şekil 2.9 Yer altındaki yansıtıcı bir cismin radargramda oluşturacağı hiperbol eğrisi...21	
Şekil 2.10 Gidiş geliş zamanı ve profil boyunun fonksiyonu olarak çizdirilmiş bir radar verisi.....	22
Şekil 2.11 a. Y doğrultusuna b. X doğrultusuna paralel olarak ve c. grid şeklinde düzenlenmiş ölçüm profilleri	23
Şekil 2.12 Birbirine paralel 3 adet profil ölçüsünün bir arada görüntülenmesi	24
Şekil 2.13 25 profilden oluşan bir veri grubundan alınmış 10 ns.'ye karşılık geçen zaman dilimi.....	25
Şekil 2.14 25 profillik bir veri grubundan 3 adet farklı derinliğe karşılık gelen dilimlerin birlikte çizdirilmesi	26
Şekil 2.15 a. İkili (binary) b. Kırmızı-Yeşil-Mavi (RGB) ve c. gri tonlamalı (grayscale) görüntü	28
Şekil 2.16 Farklı γ değerleri için gama dönüşüm fonksiyonu eğrileri	30
Şekil 2.17 a. $\gamma = 1$ b. $\gamma = 0.4$ ve c. $\gamma = 2.5$ için gama dönüşüm fonksiyonu uygulanmış bir görüntü	31
Şekil 2.18 Bir görüntüde a. 4 piksel b. 8 pikselden oluşan komşuluk (Marques 2011)..	32
Şekil 2.19 a. Giriş görüntüsünün 2.15 eşitliğinde verilen süzgeç çekirdeği ile evriştirilerek elde edilen b. netleştirilmiş görüntüsü	33

Şekil 3.1 Patara A6 alanında toplanan radar verilerinin işlenmesi ile elde edilen derinlik haritası a. parula, b. jet, c. bone hazır renk haritaları ve d. kullanıcı tarafından üretilmiş bir renk haritasıyla çizdirilmesi.....	36
Şekil 3.2 a. Doğrusal, b. Logaritmik olarak çizdirilmiş derinlik haritaları ve histogram grafikleri.....	37
Şekil 3.3 Farklı Transfer fonksiyonların jeofizik haritaya uygulanması.....	38
Şekil 3.4 İki adet Gaussian Fonksiyonun toplamından oluşturulmuş bir dönüşüm fonksiyonunun görüntüye uygulanması	39
Şekil 3.5 Ortalama süzgeç için evrişim çekirdeği	40
Şekil 3.6 Orta değer süzgecin uygulanması sonucu piksel yeğliliklerinin değişimi	41
Şekil 3.7 Gaussian süzgeç çekirdeğinin a. 2B ve b. 3B görünümü.....	42
Şekil 3.8 Disk Süzgecinin 3 Boyutlu Görünümü	43
Şekil 3.9 Yuvarlatıcı etkili farklı süzgeçlerin özdirenç haritasına uygulanması.....	44
Şekil 3.10 İki boyutlu LoG fonksiyonu.....	46
Şekil 3.11 Keskinleştirme süzgecinin çalışması	48
Şekil 3.12 Keskinleştirme özelliği olan farklı süzgeçlerin jeofizik haritaya uygulanması	50
Şekil 3.13 Özdirenç derinlik haritasının NLM süzgeci ile iyileştirilmesi.....	54
Şekil 3.14 Histogram eşitleme/dengeleme işlemleri ile özdirenç haritalarının iyileştirilmesi a. Orijinal harita b. uniform histogram düzenleme, c. Gaussian histogram düzenleme, d. kullanıcı tarafından ayarlanmış histogram işlemi	56
Şekil 3.15 Görüntü histogramı düzenlenerek bir yapının netleştirilmesi.....	58
Şekil 3.16 Bir Görüntüye frekans ortamında b. alçak ve c. yüksek geçişli süzgeçlerin uygulanması	61
Şekil 3.17 Bir görüntüye frekans ortamında isteğe bağlı şekilleri olan süzgeçlerin uygulanması	62
Şekil 3.18 Bir radargram görüntüsüne frekans ortamında isteğe bağlı şekilli bir süzgeç uygulanması	64
Şekil 3.19 3×3 boyutunda yapısal eleman örnekleri	66
Şekil 3.20 Aşındırma işleminin işleyişinin şematik gösterimi.....	68
Şekil 3.21 Bir jeofizik haritaya temel morfolojik işlemlerin uygulanması.....	70

Şekil 3.22 Bir jeofizik haritaya NLM süzgeci ile şapka süzgecinin ardışık olarak uygulanması	72
Şekil 4.1 Birinci satırda verilen öz direnç dağılım haritasının yapay olarak değiştirilmiş versiyonları (ikinci satır) SSIM indeks fonksiyonu kullanılarak elde edilen yapısal benzerlik haritası (üçüncü satır)	77
Şekil 4.2 a. A6 alanının Patara antik kentinde yürütülen çalışmalarda yeri (yeşil çerçeve) ve b. ölçüm hatlarının konumu	78
Şekil 4.3 Referans model olarak kullanılan yer radarı derinlik dilimleri (birinci sütun), yuvarlatıcı kısıtlı 3B ters çözümde elde edilen öz direnç derinlik dilimleri (ikinci sütun), SSIM-kısıtlı 3B ters çözümde elde edilen öz direnç derinlik dilimleri (üçüncü sütun) ve referans modeli ile sonuç modeli arasındaki SSIM yapısal benzerlik indeksi haritası (son sütun).....	80
Şekil 4.4 a. SSIM-kısıtlı ters çözümde son adımda elde edilen veri çakışmazlığı b. parametrelerin SSIM indeks değeri, c. veri hatalarının istatistiksel dağılımı ve d. yinelemeler boyunca çakışmazlık ile SSIM indeks değerinin değişimi.....	82
Şekil 4.5 Side antik kenti B alanına ait DAÖ verilerinin yuvarlatıcı kısıtlı 3B ters çözümü (birinci sütun) ve aynı alana ait yer radarı derinlik dilimleri (haritaların ait olduğu derinlikler başlıklarda verilmiştir)	84
Şekil 4.6 SSIM-kısıtlı üç boyutlu ters çözüm ile elde edilen derinlik haritaları (ilk sütun) ve bunların radar derinlik dilimleri ile karşılaştırıldığında elde edilen SSIM indeksi haritası (ikinci sütun).....	85
Şekil 4.7 a. 12 parametrelilik 2B yer modeli b. model ağırlık düzeyinde kullanılacak süzgeç katsayıları	87
Şekil 4.8 Yuvarlatıcı kısıtlı (L2-normu, ilk sütun) ve Gaussian süzgecinin ters çözüme katılması (ikinci sütun) ile elde edilen sonuçlar ile bunlar arasındaki görece fark (üçüncü sütun). Derinlikler başlıklarda verilmiştir.	90
Şekil 4.9 Gaussian süzgeç eklenmiş 3B ters çözüm sonucu a. veri çakışmazlığı, b. % bağıl hata azalım grafiği.....	91
Şekil 4.10 Yuvarlatıcı kısıtlı (L2-normu, ilk sütun) ve keskinleştirme süzgecinin ters çözüme katılması (ikinci sütun) ile elde edilen sonuçlar ile bunlar arasındaki görece fark (üçüncü sütun). Derinlikler başlıklarda verilmiştir.	93

Şekil 4.11 Keskinleştirme süzgeci eklenmiş 3B ters çözüm sonucu a. veri çakışmazlığı, b. % bağıl hata azalım grafiği	94
Şekil 4.12 Yuvarlatıcı kısıtlı (L2-normu, ilk sütun) ve ortalama süzgecinin ters çözüme katılması (ikinci sütun) ile elde edilen sonuçlar ile bunlar arasındaki görece fark (üçüncü sütun). Derinlikler başlıklarda verilmiştir.	96
Şekil 4.13 Ortalama süzgeç eklenmiş 3B ters çözüm sonucu a. veri çakışmazlığı, b. % bağıl hata azalım grafiği.....	97
Şekil 4.14 Yuvarlatıcı kısıtlı (L2-normu, ilk sütun) ve elipsoit süzgecinin ters çözüme katılması (ikinci sütun) ile elde edilen sonuçlar ile bunlar arasındaki görece fark (üçüncü sütun). Derinlikler başlıklarda verilmiştir.	98
Şekil 4.15 Ortalama süzgeç eklenmiş 3B ters çözüm sonucu a. veri çakışmazlığı, b. % bağıl hata azalım grafiği.....	99

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1 Görüntü işlemleri	29
-------------------------------------	----



1. GİRİŞ

Jeofizik biliminde, belirli bir fiziksel özelliğin yer içindeki dağılımı araştırılırken, bu fiziksel özelliğin değişiminden etkilenen fiziksel alanlar ölçülür. Bu ölçümlerin, ilgili fiziksel büyüklüğün yer içindeki dağılımının belirlenmesini sağlayacak bilgiler içermesi beklenir. Jeofizik veriler genellikle doğrudan değerlendirilemezler. Bu nedenle yer içinin model olarak adlandırılan yalınlaştırılmış bir taslağı oluşturulur. Modeli betimlemek için kullanılan geometrik ve fiziksel büyüklükler parametreleri oluşturur. Parametrelere atanan varsayımsal değerler için düz çözüm ile hesaplanan sayısal değerler kuramsal veri ya da model yanıtı olarak adlandırılır. Model uzayından veri uzayına geçişi sağlayan matematik bağıntıya ise düz çözüm işleci adı verilir. Tasarlanan bir yer modelinin nesnel olarak gerçekçi olabilmesi, ölçülen veri ile uyumlu bir model yanıtı ürettiyor olması ile olanaklıdır. Ancak bu durum gerekli olmakla birlikte yeterli koşul değildir. Sayısal olarak hesaplanan model parametrelerinin deneyin yapıldığı doğa koşullarına da uyumlu olması beklenir. Bir modelin matematiksel doğrulanması model yanıtı ile ölçülen veriler arasındaki farkın en küçüklenmesi ile yapılabilir. Söz edilen bu farkı en küçükleyen model parametrelerini bulma işlemi ters çözüm olarak adlandırılır.

Uygulamalı jeofizik araştırmaların birincil amacı belirli bir fizik ilkesine dayanan yöntemler ile ölçülen verileri kullanarak yer içinin olası en belirgin görüntüsünü elde etmektir. Bu görüntü bir fiziksel parametrenin belirli bir geometriye göre dağılımını gösteren kesit, harita veya model olabilir. Modelin değerlendirilmesiyle araştırmaya konu olan problemin çözümüne dair öneriler yapılabilir. Bu yüzden görüntünün ayrımlılığı ne kadar yüksek ise çözüm konusunda verilecek kararlar da o ölçüde rahat alınabilecektir. Ölçüm sıklığı, örnekleme aralığı gibi kavramlar yanında yüksek nitelikte veri toplanması jeofizik modellerin istenilen bu özellikleri taşıması konusunda katkı sağlayacaktır. Ancak bu aşamadan sonra modellerin sunumuna kadar yürütülen bir dizi sayısal işlem sırasında da çeşitli iyileştirmeler sağlanabilir. Bu tezin amaçlarından biri jeofizik veride bulunan tüm bilginin kullanılarak incelenmesi ve yorumlanması daha kolay modeller üretmektir.

Bu tez çalışmasında doğru akım öz direnç (DAÖ) ve yer radarı yöntemleri ile elde edilen verilerin değerlendirilmesi ve sunumunda iyileştirmeler sağlamak amacı ile çeşitli görüntü işleme yöntemleri kullanılmıştır. Bu amaca ulaşmak için iki farklı çalışma yapılmıştır. İlk olarak işlenmiş ve sunuma hazır hale getirilmiş jeofizik kesit ve haritalar

birer görüntü olarak ele alınarak, görüntü iyileştirme işlemleri uygulanmıştır. İkinci olarak da doğru akım öz direnç verilerinin üç-boyutlu ters çözümüne görüntü işleme araçları katılarak istenilen özellikleri taşıyan çıktılar üretmek amaçlanmıştır. Ters çözüme görüntü işleme araçlarının katılması model ağırlık düzeyi olarak belli başlı görüntü işleme süzgeç katsayılarının kullanılması ve farklı bir fiziksel parametreye duyarlı bir yöntemden elde edilen bulgular ile üç-boyutlu ters-çözüm süreci kısıtlanması (yapısal benzerlik kısıtı) ile gerçekleştirilmiştir. Burada konu edilen iyileştirmelerin, çizgisel ve/veya geometrik devamlılıklar gösteren belirtiler bulunan kesit/harita ve üç boyutlu modeller için daha etkin kullanılabileceği düşünülmektedir. Bu nedenle uygulama alanı olarak arkeolojik alanların araştırılması amacıyla yapılan çalışmalar seçilmiştir. Tez kapsamında geliştirilen ve uygulanan yöntemler, Side ve Patara antik kentlerinde değişik dönemlerde yapılan çalışmalarda ölçülen veriler kullanılarak denenmiştir (Akca vd. 2018, Akca vd. 2019, Kaya vd. 2018). DAÖ verilerinin üç boyutlu ters çözümü için Akca ve Gölebatmaz (2020) tarafından geliştirilen Elris3D yazılımı kullanılmıştır. Çalışmada görüntü işleme yöntemlerinden başlıca, renk haritası oluşturma veya düzenleme, dönüşüm fonksiyonlarını görüntüye uygulama, görüntü histogramları üzerinde yapılan işlemler görüntülerde bulunduğu halde seçilemeyen belirtileri ortaya çıkarmak için uygulanmıştır. Görüntüleri yuvarlatmak veya keskinleştirmek gibi işler için tasarlanmış farklı süzgeçler ters çözüm işlemine katılmış bunun yanında ters çözüm sonrası elde edilen jeofizik haritalardan oluşturulan görüntülere uygulanmıştır. Frekans ortamına geçilerek görüntülerin genlik bileşenleri üzerinden süzgeçleme işlemleri yapılmıştır. Gürültüleri bastırmak için farklı yöntemler denenmiş ve morfolojik süzgeçler ile görüntülerdeki yapılar daha belirgin hale getirilmeye çalışılmıştır.

2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ÖZETLERİ

Jeofizik çalışmaların ana adımlarını veri toplama, veri sunumu, veri işlem, parametre kestirimi, yorum ve karar aşamaları oluşturur. Yer içi fiziksel ve geometrik parametreleri ile tanımlanan kavramsal bir model ile betimlenir. Bu modele ait parametreler, doğrudan ölçülemeyen büyüklüklerdir. Bu nedenle nicel yorumlama yapılabilmesi için ters çözüm ile hesaplanması gerekmektedir. Bu çerçevede yapılan bir uygulamalı jeofizik araştırmanın amacı, belirli bir mühendislik veya arama problemini çözmek üzere yeraltının mümkün olan en net görüntüsünü / modelini elde etmektir. Çoğu jeofizik araştırmanın sonuçları, yeraltında belirli bir fiziksel parametrenin dağılımını gösteren modeller veya bu modellerden oluşturulmuş kesit ya da haritalar olarak sunulur. Bu kesit/harita veya modellerde aramaya konu hedef ile içinde bulunduğu ortam ya da yan kayaçların görüntülenen fiziksel parametresi arasında belirgin bir karşıtlık olması gereklidir. Uygulanan deneyin doğası, ölçüm parametrelerinin seçimi, veri değerlendirme ve sunum sırasında yürütülen işlemler sunulan kesit, harita ve modellerde bulanıklık ve yalancı belirtiler gibi istenmeyen özelliklerin ortaya çıkmasına neden olabilmektedir. Bunların bir bölümünün sayısal işlem ve işleçlerin uygulanması ile giderilebilmesi olanaklıdır. Tez kapsamında doğru akım öz direnç (DAÖ) verilerinin ters çözümü yanında öz direnç harita ve kesitleri ile radar derinlik haritalarında bulunan tüm bilginin yorumcunun işini kolaylaştırmak üzere netleştirilmesi üzerine uygulamalar yapılmıştır. DAÖ verilerinin üç-boyutlu ters çözümünün gerçekleştirildiği bağıntılarda elektrik öz direnç modelinde olması beklenen özellikleri öne çıkarmak üzere değişiklikler yapılması önerilmiştir. Elektrik öz direnç parametresinden farklı bir parametreye duyarlı bir yöntemden elde edilen bulgular ters-çözüm algoritmasının kısıtlanması için de kullanılmıştır. Diğer taraftan uygulamalarda kullanılmak üzere yer radarı verileri işlenmiş ve jeofizik haritalar oluşturulmuştur. Her iki yöntemden elde edilen model ve haritalar ise görüntü işleme yöntemleri ile iyileştirilmeye çalışılmıştır. Bu nedenle burada sayılan yöntem ve uygulamalar ile ilgili kuramsal altyapı ve güncel çalışmaları özetlemekte yarar vardır.

2.1 Doğru Akım Özdirenç Yöntemi

Doğru akım özdirenç (DAÖ) özellikle sığ araştırmalar için çok kullanılan jeofizik yöntemlerden birisidir (örn. Overmeeran and Ritsema 1988, Dahlin 1996, Candansayar ve Başokur 2001, Akca vd. 2019). Yöntemde çeşitli problemleri çözmek amacıyla ölçülen görünür özdirenç değerlerinden yer altındaki özdirenç dağılımı hesaplanmaya çalışılmaktadır. Ölçülen verilerin değerlendirilmesi ve yorumlanması amacı ile üç tür model kullanılmaktadır. İzleyen bölümlerde DAÖ yönteminde kullanılan modeller açıklanmış ve yöntemin bazı bilinen sorunları ile literatürde bunlara getirilmiş olan çözüm önerilerine değinilmiştir. Son olarak DAÖ verilerinin düzenlenmiş en küçük kareler ters çözümü detaylandırılmıştır.

2.1.1 DAÖ yönteminde kullanılan modeller

Bunlardan ilki bir-boyutlu model olarak tanımlanırken uzun yıllar boyunca Wenner ve Schlumberger gibi gelenekselleşmiş elektrot dizilimleri kullanılarak yürütülen düşey elektrik sondajı (DES) verilerinin yorumlanması için kullanılmıştır Slichter (1933), derinliğe bağlı bir-boyutlu özdirenç fonksiyonu için ilk düz çözüm bağıntısını çıkarmıştır. Bhattacharya ve Patra (1968), düşey elektrik sondajının jeofizik ve jeokimyadaki uygulamalarına değinmiştir. Ghosh (1971) doğrusal süzgeç kuramının bir uygulamasıyla DES eğrilerinin doğrudan yorumlanabileceğini göstermiştir. Inman (1975) ters çözüm işleminde sönümlü en küçük kareler yöntemini kullanmıştır. Hoversten ve diğ. (1982) en küçük kareler algoritması içindeki çeşitli terimlerde değişiklikler yaparak bunun çözüme etkisini araştırmışlardır. DES verilerinin değerlendirilmesi ve yorumu hakkında daha detaylı bilgi edinmek için Başokur (2004)'e bakılabilir. Günümüzde bir-boyutlu (1B) modeller çoğunlukla yer altı suyu araması gibi yataya yakın katmanlardan oluşan tortul ortamların incelenmesinde kullanılmaktadır (Overmeeran 1988; Beeson ve Jones 1988; Hazel vd. 1988).

DAÖ yönteminde iki boyutlu (2B) ölçüm ve değerlendirmenin temelleri 1970'lerin sonlarından itibaren oluşturulmuştur (Pelton vd., 1978, Sasaki 1981, Tripp vd. 1984, Sasaki 1989). Genel uygulamaları sığ araştırmalar konusunda olsa da (<50 m; Mazac vd.

1987; Linde vd. 2006; Johnson vd. 2010), volkan ve fay araştırmaları ya da jeotermal aramalar gibi birkaç km derinliği hedefleyen ve büyük ölçekli yapıları belirlemek için kullanıldığı örneklerde bulunmaktadır (Storz vd. 2000; Caputo vd. 2003; Gelis vd. 2010). Su kaynaklarının ve jeotermal alanların araştırılmasında DAÖ uygulamalarına ilişkin Revil vd. (2012) tarafından yapılan çalışmaya bakılabilir.

DAÖ verilerinin değerlendirilmesi için üç boyutlu (3B) modeller kullanmak deneyin doğasına en uygun durum olmakla birlikte bu modelin parametrelerini çözmek için gerekli verinin toplanması kimi durumlarda güç olmaktadır. Buna karşın giderek daha fazla araştırmacı tarafından uygulanmaktadır. Papadopoulos vd. (2010), 3B bir Gauss-Newton en küçük kareler yöntemi kullanarak tümölüs üzerinde ölçtükleri verileri değerlendirmişlerdir. İkinci ve Kaya (2007) Türkiye’deki Parion antik mezarlığında 3B elektrik özdirenç görüntülemesi yapmışlardır. Nieto vd. (2019) düşük entalpili jeotermal sistemlerde kuyu ve sondaj yerlerinin en iyi şekilde konumlandırılması için 3B elektrik özdirenç modellemesi yapmışlardır. Osinowo ve Falufosi (2018) Nijerya’da bulunan Ibadan Üniversitesi’nin kampüsünde yeni bir inşaat sahası için temel araştırması yapmak amacıyla 3B elektrik özdirenç görüntüleme yöntemini kullanmışlardır.

2.1.2 DAÖ yönteminde bazı bilinen sorunlar ve önceki çözüm önerileri

Genel anlamda DAÖ yönteminin uygulamalarında doğal ve / veya insan yapımı yer altı hedeflerinin elektriksel özdirençlerinin, içinde gömölü bulunduğu ortama göre belirgin bir zıtlık göstermesi beklenir. Bu yöntem ile yerin kavramsal bir modele bağlı olarak özdirenç dağılımları belirlenebilir. Böyle bir dağılım, DAÖ verilerinin ters çözümü ile ortaya konulabilmektedir. DAÖ verilerinin ters-çözümü eşdeğerlilik ve verideki gürölü içeriği nedeni ile kötü-durumlu doğrusal olmayan bir problemidir. Bu nedenle bu verilerin ters-çözümü ancak yinelemeli olarak parametrelerin güncellenmesi ve bu sırada bir tür yuvarlatma ya da düzenleme işlevi kullanılması ile duraylı olarak yürütülebilir (Loke ve Barker, 1996a, 1996b; Binley ve Kemna, 2005; Gündoğdu ve Candansayar, 2018). DAO yönteminde 2B ters çözüme uygulanan düzenleme yöntemleri; Levenberg-Marquardt veya “ridge-regression” olarak da bilinen sönümlü en-küçük kareler (SEKK) (damped least-squares), yuvarlatılmış sönümlü en-küçük kareler (YSEKK) (OCCAM-Smoothness

Constraint inversion) ve Tikhonov düzenleme (Tikhonov ve Arsenin, 1977) şeklinde sıralanabilir. Tikhonov model düzenleme algoritmasında duraylayıcı olarak model parametrelerinin minimum normu kullanılmaktadır (deLugao vd. 1997, Mackie vd. 1997). YSEKK algoritmalarında ise parametrelerin Laplacian'lerinin minimum normu kullanılır (Constable vd., 1987; Smith ve Booker, 1988; Zhdanov ve Fang, 1996; Jupp ve Vozoff ,1977; Zhang ve Hobbs, 1992). Jupp ve Vozoff (1977), Zhang ve Hobbs (1992) SEKK yöntemini 2B yer elektrik modelinin çözümünde kullanmışlardır. DAÖ verilerinin 3B ters çözümünde kullanılan düzenleme ve duraylama işleçlerinin karşılaştırmalı bir özeti için Gündoğdu ve Candansayar (2018)'e bakılabilir. Model parametrelerine doğrudan veya dolaylı olarak kısıtlamalar getirilmesi ya da önsel (*a priori*) bilgi eklenmesi de ters çözümü duraylama ve modelde istenilen bazı özelliklerin (keskin sınırlar, bir referans modele benzerlik vb.) öne çıkarılması için önerilen yöntemlerdir (örneğin: Singh vd., 2018). Ters çözüm işlemi ölçülen ve düz çözümden elde edilen kuramsal veriler arasındaki çakışmazlığı en küçükleme temelinde yürütülür. Ancak kimi durumlarda veri farkları yanında model parametrelerine bağlı bir şekil fonksiyonun optimizasyonu da yapılır. Bu sayede model parametrelerine bağlı bir model şekil fonksiyonu ve veri çakışmazlığı fonksiyonu eş zamanlı olarak en küçüklenebilir çalışılır. Model şekil fonksiyonu, istenen özellikli bir modeli öne çıkarmanın yanı sıra ters çözüm sürecini duraylayan bir terim olarak da adlandırılabilir. Örneğin, x-, y- veya z-yönlerindeki ani öz direnç değişikliklerini önlemek ve komşu model parametrelerini birbirleriyle ilişkilendirmek üzere birinci dereceden bir fark operatörü (deGroot-Hedlin ve Constable, 1990) veya beş noktalı bir Laplace işleci kullanılabilir (Akca, 2016). Böylece, model parametrelerinin uzamsal değişimleri yuvarlatılmış veya dereceli bir geçiş gösterecek şekilde sınırlandırılmış olur (Ellis ve Oldenburg, 1994; Tsourlos ve diğerleri, 1998; Loke ve Barker, 1995). Bu yaklaşım, yuvarlatıcı kısıtlı ters çözüm olarak adlandırılır ve genellikle yeraltının bulanık bir öz direnç dağılımı elde edilir (Loke ve Barker, 1996a; Başokur ve Akca, 2011). Düzenleme kısıtlamalarının kullanımı (OCCAM, Constable vd., 1987), ters çözüm algoritmasını duraylamasına karşın fiziksel olarak her zaman anlamlı modeller üretmesi beklenemez. Öyle ki bazı araştırmacılar bir yuvarlatma kısıtı kullanmanın ters-çözüme önyargı getirdiği ve sonuçta ortaya çıkan modellerin fiziksel olarak anlamlı olmayabileceğini iddia etmektedir (Zhou vd., 2014; Mosegaard, 2011).

Ters-çözüm işleminin duraylılığını sağlarken yuvarlatma veya düzenleme nedeni ile oluşan bulanıklığı ortadan kaldırmak ve modelde belirtileri daha keskin geçişler ile sunabilmek için çeşitli öneriler yapılmıştır. Başokur ve Akca (2011) 2B özdirenc kesitlerinde gömülü geometrik cisimlerin keskin kenarlarını ortaya koyabilmek için nesne tabanlı bir model doğrulama algoritması önermiştir. Benzer şekilde Elwaseif ve Slater (2012), gömülü hedeflerin keskin sınırlarını görüntülemek için yinelemeli bir bağlantı kesme sürecini kullandıkları 3B ters çözüm yöntemi geliştirmişlerdir. Elwaseif ve Slater (2013), bir yuvarlatıcı kısıtlı özdirenc modelinden ayrık hedeflerin geometrisini ve özdirencini tanımlamak için “watershed” görüntü işleme aracını yapay bir sinir ağıyla birleştirmişlerdir. Zhou vd. (2014), görünür özdirenc verilerinin 2B ters çözümü için bir görüntü güdümlü (*image-guided*) yöntem önermiştir. Yaklaşımlarında, yüksek çözünürlüklü bir jeofizik görüntüden (örneğin, yer radarından (GPR) alınan radargram) veya bir jeolojik enine kesitten elde edilen yapısal bilgileri ters çözüm işlemini güdümlmek için kullanmışlardır. Yapısal bilgiyi, dört doğrultulu bir yuvarlatma düzeyi ile 2B ters çözüm algoritmalarına katmışlardır.

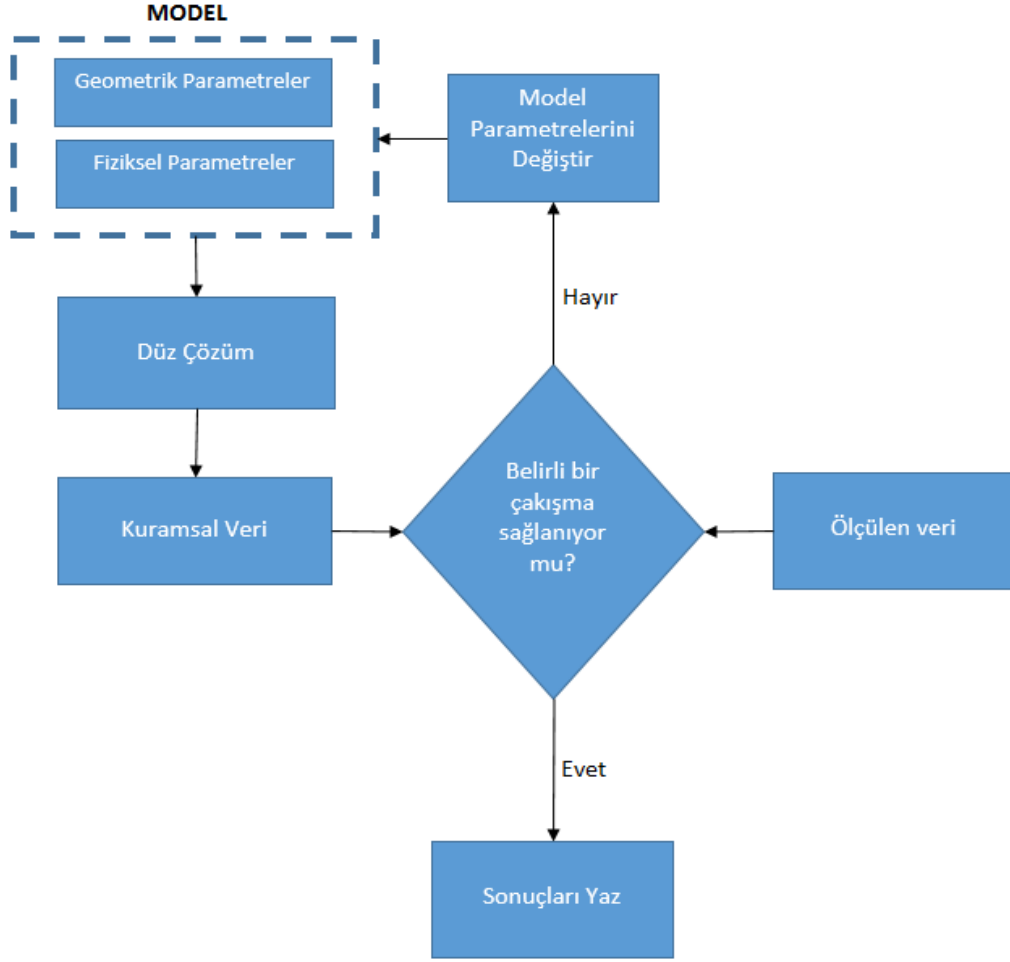
DAÖ verilerinin ters çözümü için uygulanan bir başka model düzenleme yöntem grubu, odaklanmış ters-çözüm (*focusing inversion*) olarak adlandırılabilir. Örneğin Pagliara ve Vignoli (2006) belirti veren cisimleri keskin sınırlarla ortaya koyabilmek için minimum gradyen desteği (MGS) düzenleyicisi kullanmışlardır. Blascheck vd. (2006), yapay uçuşma (IP) verilerinin ters çözümünde benzer bir yaklaşım uygulamışlardır. MGS düzenleyicisine dayanan, duyarlılık kontrollü ters çözüm algoritmaları ile gömülü hedeflerin sınırlarını hassas bir şekilde belirlemişlerdir. Fiandaca vd. (2015), odaklamalı ters çözüm algoritmasını zaman aralıklı (time-lapse) DAÖ-IP verilerinin ters-çözümünde kullanmıştır. Çalışmalarında gerçekleştirdikleri yapay veri denemeleri, odaklanmış ters çözüm algoritmasının hedef cisim ve yapıların boyut, şekil ve büyüklük tahminlerini önemli ölçüde iyileştirdiğini göstermiştir.

2.1.3 DAÖ verilerinin düzenlenmiş en-küçük kareler ters çözümü

Ters çözüm, ölçülen veri ile belirli bir ölçüt çerçevesinde çakışan kuramsal veriyi üretecek modeli arayan dolaylı bir hesaplama yöntemidir. Ters çözüm işlemi için önerilen çeşitli yöntemler iki grupta toplanabilir. Bunlar:

- Parametreleri verinin kendisinden çözmeye çalışan türev tabanlı yöntemler (yerel yöntemler),
- Organizmaların evrimi ya da belirli biyolojik ya da fiziksel süreçlerin benzeşimi ile üretilen modellerden hesaplanan kuramsal verinin, ölçülen veri ile yakınlığını denetleyen tümel arama veya model gerçekleştirme yöntemleri (global yöntemler) (Başokur, 2015)

şeklinde sıralanabilir. Global yöntemler birçok üstünlüğünün yanında gerektirdiği hesaplama zamanı ve bilgisayar altyapısı nedeniyle çoğunlukla 1B problemler için seçenek oluşturabilirlerken 2B ve 3B problemler için türeve dayalı yöntemler tercih edilmektedir. Yerel yöntemler parametreleri verinin kendisinden çözmeye çalışır. İşlemin ilk adımında model parametreleri için bir ön-kestirim kullanıcı tarafından sağlanır ve ön-kestirime karşılık gelen kuramsal veri hesaplanarak, ölçülen veri ile karşılaştırılır. Sonraki adımlarda ölçülen ve kuramsal verinin çakışma derecesini artırmak amacıyla parametreler değiştirilir. Bu işlem iki veri kümesi arasında önceden belirlenmiş bir çakışma eşik değerine ulaşıncaya veya kullanıcı tanımlı başka durdurma ölçütleri sağlanıncaya kadar devam eder (Şekil 2.1).



Şekil 2.1 Ters çözüm akış şeması (Başokur 2015’den değiştirilerek alınmıştır)

Doğrusal olmayan ters çözüm işleminin ilk adımı kullanıcı tarafından belirlenen ön kestirim parametrelerine bağlı bir başlangıç modeli oluşturmaktır. Model, fiziki bir sistemin işleyişinin ve parametreleri arasındaki nedensellik ilişkilerinin fiziksel kavramlar kullanılarak betimlenmesi olarak tanımlanabilir. Jeofizik modellemede, tasarlanan bir modelden hareketle yapay verilerin veya model tepkisinin hesaplanması düz çözüm olarak adlandırılır. Düz çözüm, bir modelin parametreleri ile ölçülmesi beklenen veriyi birbirine bağlayan matematik bağıntıdır.

Veri ve parametreler arasındaki ilişki, dizey denklemleri ile ifade edilemezse, problem doğrusal değildir ve parametreleri çözmek için dolaylı ve yinelemeli yöntemler kullanmak gereklidir. Jeofizik veriler ile kavramsal modelin parametrelerini ilişkilendiren bağıntılar genellikle bir dizey denklemi ile ifade edilemezler. Bu nedenle ele alınan

problemler genelde doğrusal değildir. Bu tür problemlerin çözümü bir ön kestirim modelinin yinelemeli olarak iyileştirilmesiyle yürütülür.

İzleyen kısımda doğrusal olmayan problemlerin Gauss-Newton ya da en-küçük kareler çözümü verilmiştir. Ardından ters çözüm işleminin düzenlenmesi anlatılmıştır. Tezin ilerleyen bölümlerinde kullanılan algoritmalar burada verilen model kısıtı üzerine kurulduğundan kuramsal temellerinin bilinmesinde yarar vardır.

Doğrusal olmayan problemlerin ölçülen veri ve model parametreleri birbirlerine doğrusal olmayan bir fonksiyonel ile bağlıdır ve bu ilişki,

$$\mathbf{d} = f[\mathbf{m}] + \mathbf{e} \quad (2.1)$$

Burada f verilen bir model yöneyi için kuramsal verinin hesaplanmasına olanak sağlayan düz çözüm işleci, $\mathbf{e}$ ise ölçülen ve hesaplanan veriler arasındaki fark vektörüdür. Denklem 2.1’de $\mathbf{m}$ ile gösterilen model parametreleri bilinmediğinden kuramsal veriyi ve amaç fonksiyonun değerini hesaplamak olanaklı değildir. Bu yüzden $f(\mathbf{m})$, ön kestirim modeli ($\mathbf{m}^0$) civarında Taylor serisine açılarak problem doğrusallaştırılmaya çalışılır. İkinci ve daha yüksek dereceden terimler ihmal edilerek gerçek model parametrelerinden hesaplanan kuramsal veriye bir yaklaşım

$$f(\mathbf{m}) = f(\mathbf{m}^0) + \sum_{j=1}^M \frac{\partial f(\mathbf{m}_j^0)}{\partial \mathbf{m}_j^0} (\mathbf{m}_j - \mathbf{m}_j^0) \quad (2.2)$$

bağıntısı ile verilebilir. Bağıntıda $f(\mathbf{m}^0)$ ön kestirim modelinden hesaplanan kuramsal veridir. Bağıntının sağ yanındaki ikinci terim kuramsal verinin her bir ön kestirim model parametresine göre kısmi türevlerini içermekte olup model ile ön kestirim model parametreleri arasındaki fark ile çarpılmaktadır. Bağıntı her bir veri noktası ve her bir parametreyi de dikkate alarak dizey denklemi şeklinde aşağıdaki gibi verilebilir:

$$\mathbf{f} = \mathbf{f}^0 + \mathbf{J}\Delta\mathbf{m}. \quad (2.3)$$

Burada $\mathbf{J}$ duyarlılık veya Jacobian dizeyi, $\Delta\mathbf{m}$ ise ön kestirim parametrelerine yapılacak düzeltmeleri içeren dizeydir. Jacobian dizeyi verinin, parametrelerin değişiminden ne ölçüde etkilendiğini gösterir.

En küçük kareler (EKK) duyarlılığında veri çakışmazlık fonksiyoneli, ölçülen ve hesaplanan veriler arasındaki fark vektörünün bileşenlerinin karelerinin toplamı ile ifade edilir.

$$E(m) = \|(\mathbf{d} - f[\mathbf{m}])\|_2^2. \quad (2.4)$$

Denklem 2.4'ü en küçükleyen parametre kümesini bulmak, ters çözüm probleminin Gauss-Newton veya kısıtsız EKK çözümü olarak anılır ve denklemin parametrelere göre türevinin sıfıra eşitlenmesi ile gerçekleştirilir.

Ölçülen verideki olası gürültü içeriği ve DAÖ verilerinin ters çözümünün kötü-durumlu olması iki olası olumsuz duruma neden olabilir. İlk olarak ters-çözüm algoritmasında duraysızlıklar ortaya çıkabilir. İkinci olarak ise matematiksel olarak hesaplanan model parametrelerinin gerçekçi fiziksel sınırlar dışına çıkması olasıdır. Bu iki probleme çözüm, ters çözüme ön bilginin eklenmesi ve/veya model parametrelerinin kısıtlanması yoluyla bulunabilir. Bu uygulamaya düzenleme, duraylama gibi isimler verilebilmektedir (Gündoğdu ve Candansayar, 2018).

Bu tez çalışmasında model parametrelerinin bir referans model aracılığı kısıtlanması yoluna gidilmiştir. Bu tür bir kısıtın probleme eklenerek çözülmesi amacı ile düzenlenmiş optimizasyon probleminin amaç fonksiyonu (Tikhonov ve Arsenin, 1977)

$$\Phi(m) = E(m) + \alpha S(m) \quad (2.5)$$

şeklinde yeniden yazılabilir. Burada $E(m)$ 2.4 denklemi ile verilen veri çakışmazlık fonksiyoneli, α düzenleme katsayısı, $S(m)$ ise duraylayıcı fonksiyoneldir. Duraylayıcı fonksiyonel ters çözüm algoritmasının duraylılığını sağlamanın yanında model parametreleri üzerinde kullanıcının beklentileri doğrultusunda kısıtlar içerecek ya da probleme ön bilgi eklenecek şekilde düzenlenebilir. Bu nedenle 2.5 denkleminin sağ yanındaki bu ikinci terim model şekil fonksiyonu olarak da anılır. Düzenleme katsayısı α ise ters çözüm işleminde model amaç fonksiyonunun tek başına baskın hale gelmesini önlemek ya da veri çakışmazlık fonksiyoneli ile model şekil fonksiyoneli arasında bir denge kurmak amacıyla kullanılmaktadır. Duraysızlık probleminin bir diğer nedeni de verideki belirsizlikler ve gürültü içeriğidir. Bu durumun ters çözümde dikkate alınması da ağırlıklandırma ile olanaklıdır. Diğer taraftan istenilen özellikleri taşıyan bir sonuç

modeli elde edilmesi veya bir referans modelin ters çözümü ön bilgi olarak eklenmesi amacıyla bir model kısıtı tanımlanabilir. Bunlar dikkate alınarak 2.4 ile verilen veri çakışmazlık fonksiyoneli

$$E(m) = \|\mathbf{W}_d(\mathbf{d} - f(\mathbf{m}))\|_2^2 \quad (2.6)$$

şeklinde yeniden yazılabilir ve düzenleyici fonksiyonel

$$S(m) = \|\mathbf{W}_p(\mathbf{m} - \mathbf{m}_{ref})\|_2^2 \quad (2.7)$$

şeklinde tanımlanabilir. Burada $\mathbf{W}_d$ ve $\mathbf{W}_p$ sırasıyla veri ve parametre ağırlık dizeyleridir.

Ölçüm sırasında kaydedilen standart sapmalar $\mathbf{W}_d$ dizeyinin ana köşegenine $diag(1/\varepsilon_i)$ şeklinde yerleştirilerek ağırlık dizeyi olarak kullanılabilir. Ölçümler ile ilgili böyle bir bilgi bulunmuyorsa veri ağırlık dizeyi

$$W_d = \exp\left(-\frac{(d_i - f_i)^2}{2\beta^2}\right) \quad (2.8)$$

şeklinde atanabilir. Burada $\bar{d}$ ölçülen verilerin ortalaması β ise

$$\beta = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |d_i - f_i| \quad (2.9)$$

şeklinde verilebilir (Başokur, 2015). Model parametrelerinin ağırlıkları ise model çözünürlük dizeyinin ana köşegenindeki elemanlar ile atanabilir. Verilen tanımlar ışığında 2.12 denklemi ile verilen problemin Gauss-Newton çözümü

$$(\mathbf{J}^T \mathbf{W}_d^T \mathbf{W}_d \mathbf{J} + \alpha \mathbf{W}_p^T \mathbf{W}_p) \Delta \mathbf{m}_k = \mathbf{J}^T \mathbf{W}_d^T \mathbf{W}_d \Delta \mathbf{d} - \alpha \mathbf{W}_p^T \mathbf{W}_p (\mathbf{m}_k - \mathbf{m}_{ref}) \quad (2.10)$$

şeklinde verilebilir. Burada k yineleme adımının numarasını göstermektedir. Denklemin en sağdaki ifade ile ters çözüme bir ön bilginin eklenmesi ya da model parametreleri üzerinde bir kısıt tanımlanması sağlanmış olur. Referans model aynı alanda daha önce yapılmış çalışmaların sonuçları olabileceği gibi, homojen bir yer modelini tanımlamak üzere sabit bir öz direnç model yöneyi şeklinde de tanımlanabilir. Öte yandan bir ön bilgi bulunmuyorsa sıfıra da eşitlenebilir.

Denklem 2.10 ters çözüm işleminin her bir yineleme adımında çözülerek parametrelere yapılacak düzeltmeler hesaplanır ve güncellenmiş model elde edilir. Bu işlem durdurma koşullarından biri sağlanıncaya kadar sürdürülür. Bu çerçevede model çözünürlük düzeyi ise

$$\mathbf{R}=(\mathbf{J}^T \mathbf{W}_d^T \mathbf{W}_d \mathbf{J} + \alpha \mathbf{W}_p^T \mathbf{W}_p)^{-1} \mathbf{J}^T \mathbf{W}_d^T \mathbf{W}_d \mathbf{J} \quad (2.11)$$

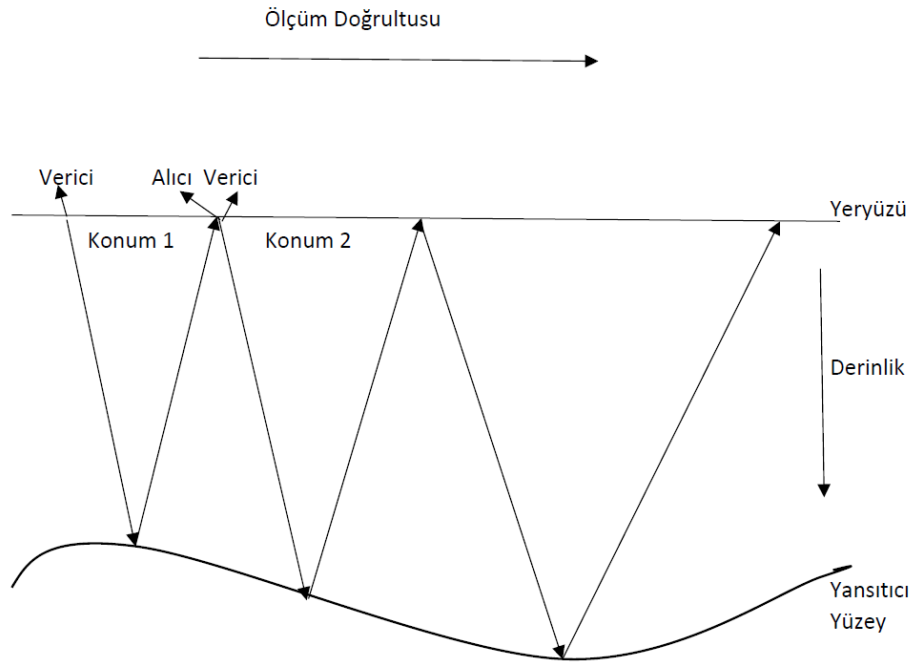
şeklinde hesaplanabilir (Menke, 1984).

2.2 Yer Radarı Yöntemi

Yer radarı (GPR), görece yeni olmasıyla birlikte, sığ araştırmalar için kullanılan başlıca jeofizik yöntemlerden biridir. Yer içini görüntülemek için radyo dalgalarının kullanılması fikrinin ortaya çıkması 1950'lere kadar uzanmasına karşın GPR yönteminin kullanımı asıl olarak 1990'lardan sonra hız kazanmıştır. Davis ve Annan (1989) yüzeye yakın stratigrafik istifin ortaya çıkarılmasında GPR yöntemini kullanmıştır. Sayısal sinyal işleme (Maijala, 1992; Gerlitz ve diğ., 1993) ve 2B sayısal yöntemlerin kullanılması (Zeng ve diğ., 1995; Cai ve McMechan, 1995) gibi konularda gelişmeler 1990'ların ilk yıllarında gerçekleşmiştir. Ayrıca arkeolojik alanlarda (Goodman, 1994), çevre araştırmalarında (Brewster ve Annan 1994), jeolojik yapı araştırmalarında (Jol 1996) ve daha pek çok alandaki uygulamaları genişlemiştir. Bu yıllardan günümüze gelinceye kadar GPR araştırmalarına yön veren bilgisayar teknolojilerinde gelişmeler olmuştur. Üç-boyutlu modellerin sayısal olarak hesaplanması mümkün hale gelmiştir (Holliger ve Bergmann, 2000; Lampe ve Holliger, 2000). Yöntemin başka uygulama alanlarına örnek olarak; fay ve kırık gibi süreksizliklerin haritalanması (Grandjean ve Gaury, 1999; Green ve diğ., 2003; Kadioğlu, 2008), karstik boşluklarının aranması (Kadioğlu ve diğ., 2006), yeraltı suyu seviyesinin belirlenmesi (Harrari, 1996; Dannowski ve Yaramancı, 1999; Aspron ve Aigner, 1999), yüzeye yakın sıvı hidrokarbon aramaları (Changryol ve diğ., 2000), yeraltında gömülü boru, boru hattı, su veya akaryakıt tankı ve eski endüstriyel atık alanlarının belirlenmesi (Kadioğlu ve Daniels, 2008) sayılabilir.

Yer radarı yöntemi, yakın yüzey araştırmaları için kullanılan yüksek frekanslı elektromanyetik ilkeyle çalışan bir jeofizik yöntemdir. Yakın yüzey tanımı, yapı

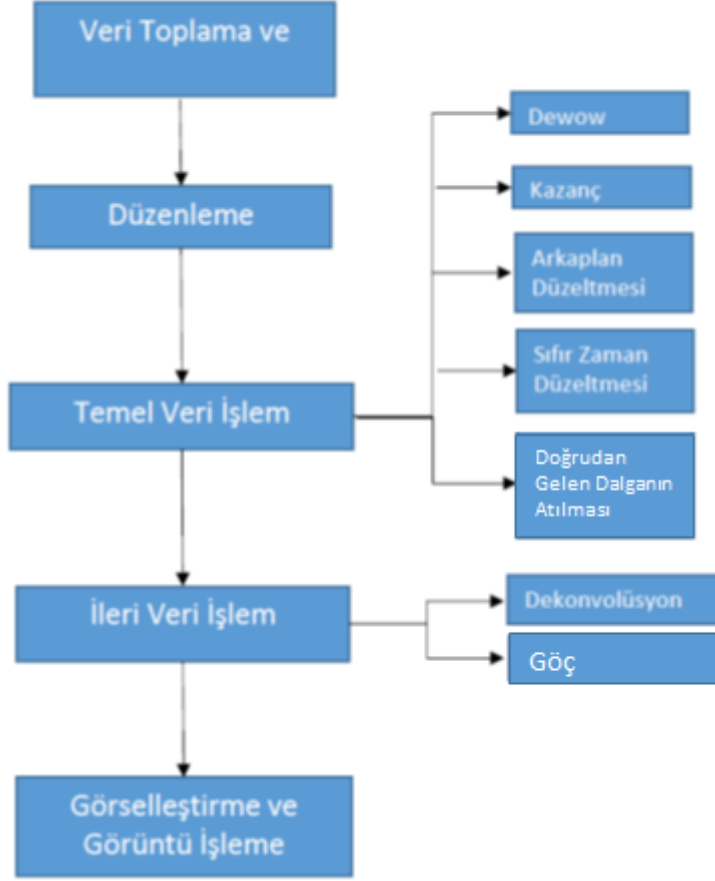
araştırmalarından derin yeraltı suyu ve maden araştırmalarına kadar değişir (0-90m). Bir yer radarı sistemi alıcı, verici ve kayıtçıdan oluşur. Verici anten yeraltına yüksek frekansta elektromanyetik dalgalar gönderir. Gönderilen sinyal yer içinde gömülü bir nesneye veya dielektrik sabiti farklılaşan katmanların sınırlarına rastladığında yansıtılarak geri döner ve alıcı anten ile kayıt birimi tarafından kaydedilir (Şekil 2.2). Kayıt edilen izlere “radar izi” denmektedir. Bir profil boyunca tüm ölçü noktalarındaki radar izleri, profil üzerindeki konumları ile sıralanarak 2B radar kesitleri veya radargramlar elde edilir (Annan, 2000; Daniels, 1989; Kadioğlu ve Kadioğlu, 2006). Gönderilen sinyalin seyahat zamanı ve genliği ölçülerek yer içindeki süreksizliklerin konumu ile şeklinin belirlenmesinde kullanılır. Yansıyan sinyalin genliği ortamın elektriksel iletkenliği ve dielektrik geçirgenliğine, gömülü cismin büyüklük ve şekline ve yansıtıcı yüzeydeki süreksizliğin derecesine bağlıdır (Daniels ve diğ. 1988).



Şekil 2.2 GPR Yöntemi Çalışma İlkesi

GPR verilerinden yer içi hakkında yorum üretilirken bazı temel ve gerek görüldüğü takdirde ileri veri-işlem adımları bulunmaktadır. Bunlarla ilgili bir akış şeması Şekil 2.3’de verilmiştir. Veriler toplandıktan sonra yapılacak ilk işlem verilerin düzenlenmesidir. Veri toplama sırasında yapılan hatalar eksik veya fazlalıklar belirlenip düzenlenmelidir. Bu aşama verilerin düzenlenmesi, veri dosyalarının birleştirilmesi, dosya başlıklarının ve arkaplan bilgisinin eklenmesi yeniden konumlandırma ve eğim

bilgisinin eklenmesi gibi adımları içerir. Bundan sonra yapılması gereken veri işlem adımlarına sonraki bölümlerde kısaca değinilecektir.

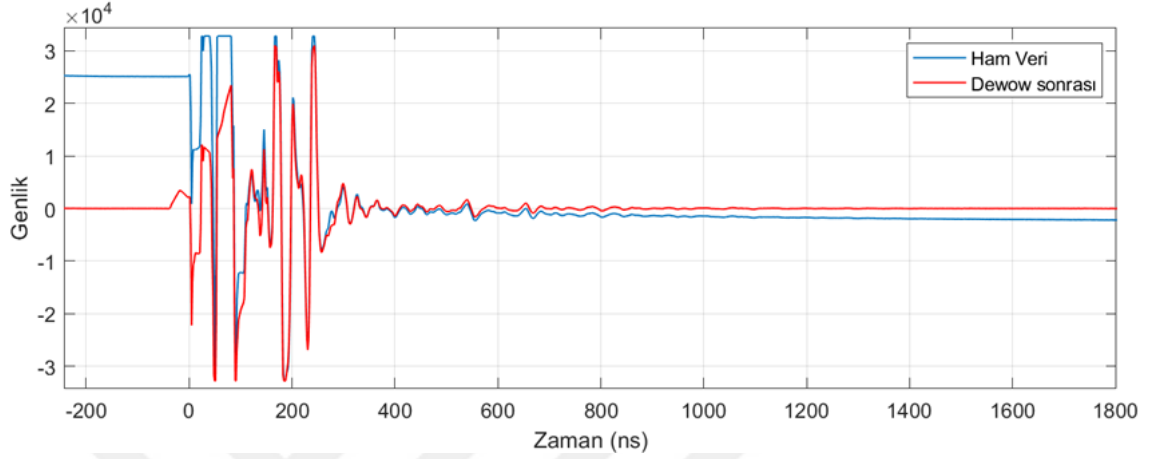


Şekil 2.3 Yer-Radarı Yöntemi Veri-İşlem Adımları

2.2.1 Dewow

GPR verilerine uygulanan ilk veri işlem adımı her bir radar izinde DC bileşeninin çıkarılması yani radar izlerinin genliklerinin sıfır ortalamalı olmasının sağlanmasıdır. Radar izlerinin DC bileşeninin olması özellikle ölçümün başlarında gelen çok alçak frekanslı gürültüler ile ilişkilidir. Çok alçak frekanslı bileşenler GPR verisinde gerçek olayları örtmektedir, buna “wow” etkisi denir dolayısıyla bu işlem adımı “de-wow” olarak adlandırılır. Bu düşük frekanslı veri bileşenleri cihazların dinamik aralık sınırlandırmasıyla ve uyarılma (*inductive*) yoluyla oluşan etkiler ile ilişkilendirilmektedir. Radar izlerinde DC bileşenlerini sıfırlamak için yapılması gereken çok alçak frekansların

veriden çıkarılması olduğundan dewow işlemini, veriye yüksek geçişli bir süzgeç uygulanması olarak düşünebiliriz. Dewow işlemi tarihsel olarak analog süzgeçler kullanılarak gerçekleştirilmekteyken günümüzde bir dijital veri-işlem aşaması haline gelmiştir (Gerlitz ve diğ., 1993).

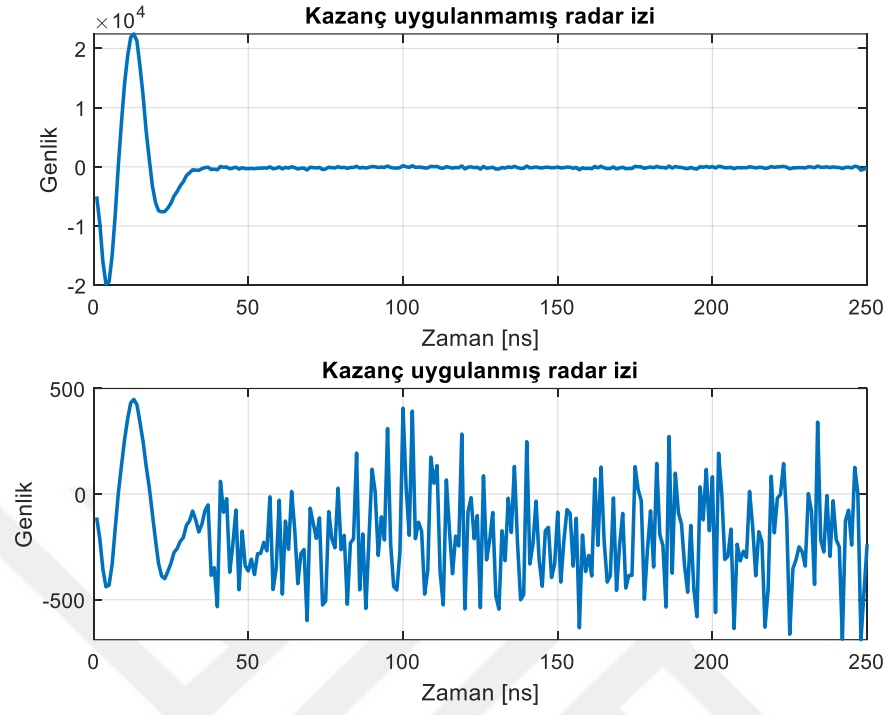


Şekil 2.4 GPR izinin DEWOW işlemi Öncesi ve Sonrasında Görünümü

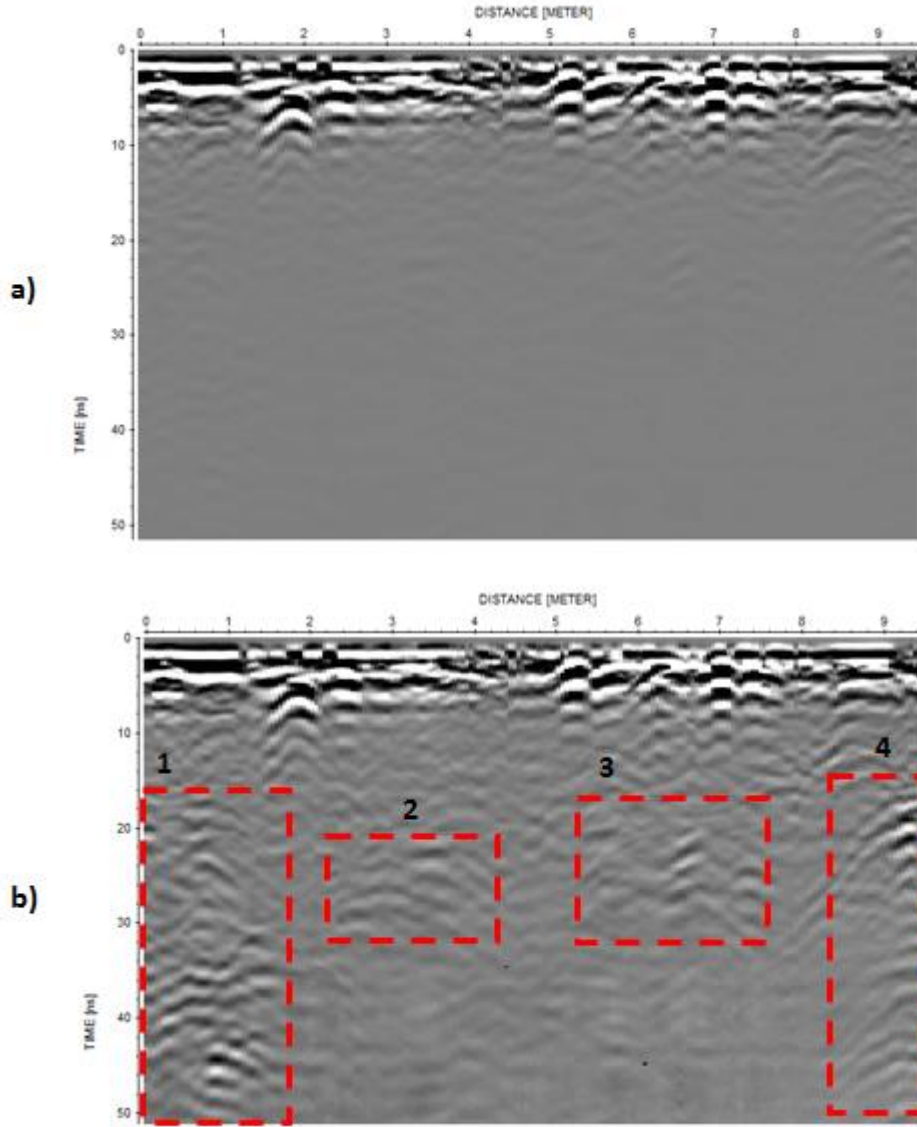
2.2.2 Kazanç uygulama

Elektromanyetik dalgalar yayıldıkları ortama bağlı olarak zamanla enerji kaybederler, bu enerji kaybı dalga genliğinin küçülmesine karşılık gelir. Kaynak dalğanın yer içinde seyahat ederken dalga genliğinde meydana gelen bu azalma kazanç uygulama (*gain*) işlemi ile geri kazanılmaya çalışılır. Veri işlem adımları arasında en kişiye özgü ve görsel yöntemlerle seçime dayalı olanı kazanç uygulama işlemi olarak bilinse de bu adım için de sistematik yollar bulunmaktadır. Genellikle ilk adım, zamana karşı genlik azalımı oranını incelemektir. Bu işlem her bir iz için veya bölümler halinde yapılabilir (Annan 2001).

Şekil 2.5a'da kazanç uygulanmamış bir radar izi, Şekil 2.5b'da ise kazanç uygulandıktan sonraki bir radar izi görülmektedir. Yaklaşık 30 ns'den sonra neredeyse düz bir çizgi haline gelen radar izinin kazanç uygulandıktan sonraki genliğindeki artış kolayca seçilebilir. Şekil 2.6 ise kazanç uygulanmamış bir radar kesiti ile aynı kesitin kazanç uygulanmış halinin karşılaştırılması görülebilir. 2.6b'de kesitin kazanç işlemi sonrasındaki halinde işaretlenmiş olan bölgeler, 2.6a'ya göre çok daha belirgin hale gelmiştir.



Şekil 2.5 Kazanç İşlemi uygulanmadan önce ve sonra radar izinin görünümü



Şekil 2.6 Kazanç İşlemi uygulanmadan önce ve sonra radar izinin görünümü

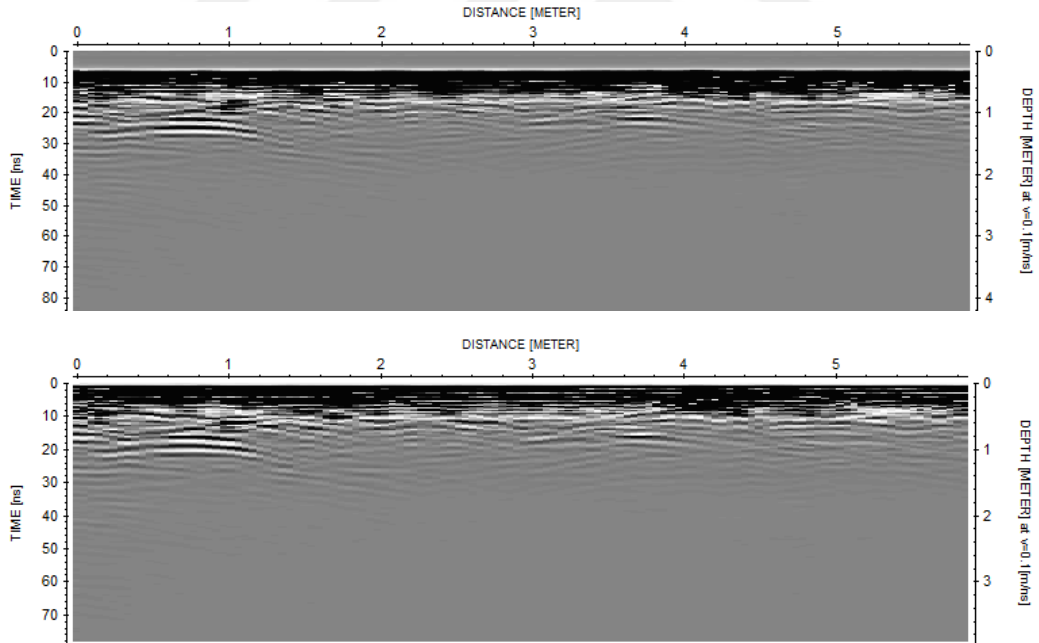
2.2.3 Arkaplan düzeltmesi

Neredeyse Tüm GPR kesitleri yatay bir arkaplan gürültüsü içermektedir. Tekrarlı yansımalar veya yankı gürültüsü (*ringing noise*) adı verilen bu etkiler GPR verilerindeki uyumlu gürültü türlerinden biridir, genelde izler boyunca devamlılık gösteren düz yapılar olarak ortaya çıkarlar ve radar anteninin hareketi boyunca hareketi boyunca yatay çizgiler olarak radargramda yerlerini alırlar. Bu gürültüler, EM dalganın yer içindeki bir yansıtıcıdan yansdıktan sonra, yer-hava arayüzeyinden yansayıp tekrar yer içine dönmesi ve bu şekilde aynı yolu birkaç kez alması nedeniyle oluşan, radargramda kendini

tekrarlayan olaylardır. Yeterince kuvvetli düzeyde ise derinden gelen zayıf yansımalar tamamen baskılanır ve araştırma derinliği sığlaşır. 2B yüksek geçişli süzgeç yardımı ile ya da ortalama izin veriden ayrılması (Nobes, 1999) ile bu tür gürültülerin ayıklanması gerçekleştirilir (Wilchek, 2000; Annan, 2003). Bu gürültülerin ayıklanması ile yeraltından gelen izlerin daha görünür hale gelmesi sağlanmaktadır.

2.2.4 Sıfır kayma zamanı düzeltmesi

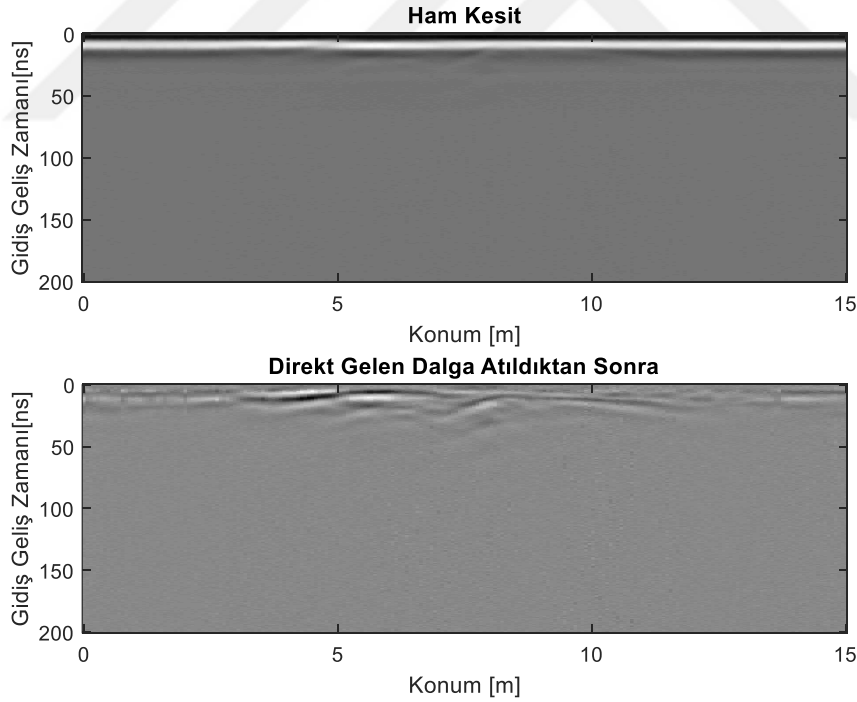
Elektromanyetik dalga kaynaktan alıcıya ulaşana kadar belirli bir zaman geçer. Bu zaman kayıt üzerinde sıfır-zaman gecikmesi olarak adlandırılır. Sıfır zamanı için belirli bir standart olmayıp kullanılan alet düzeni, elektromanyetik duraysızlık ve ortam koşullarına göre değişen değerler alır. Bu düzeltme yapılırken gecikme zamanı radargram üzerinden belirlenerek bu bölüm veriden atılır ve başlangıç zamanı zaman ekseninin başına taşınır (Şekil 2.7).



Şekil 2.7 Sıfır kayma zamanı düzeltmesi yapılmadan önce (üstte) ve yapıldıktan sonra (alttta) radargram

2.2.5 Doğrudan gelen dalganın veriden atılması

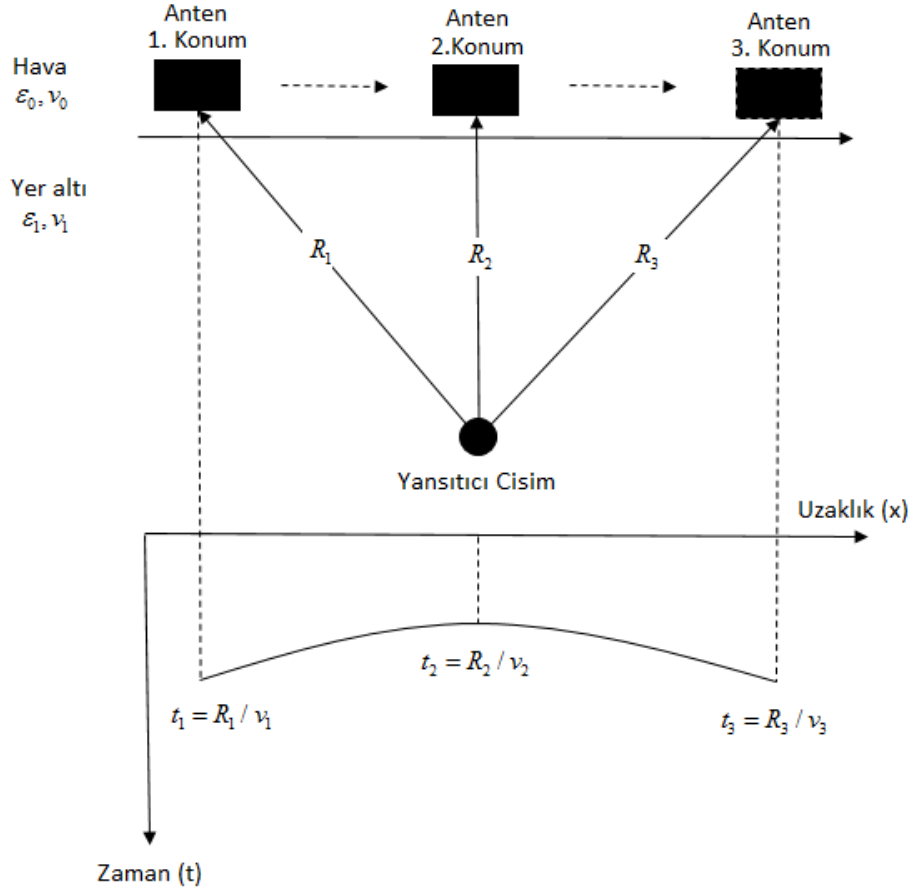
Sismik kayıtlarda olduğu gibi radargramlarda da ortama nüfuz etmeden doğrudan vericiden alıcıya gelen dalgalar gözlenir. Özellikle sığ derinliklerde gömülü nesneler varsa yer altından gelen sinyallerle doğrudan gelen sinyal üst üste binerek aranan belirtilerin görülmesini zorlaştırabilir. Profil boyunca alıcı ve verici antenler arası uzaklığın hep aynı kaldığı düşünülürse doğrudan gelen dalga radargramda hep aynı görülecektir. Oysa ortamda kusursuz bir şekilde bütün profil boyunca uzanan yatay bir cisim yoksa – böyle bu durumla nadiren karşılaşılrsa da bu ihtimal göz önüne alınmalıdır – yer altından gelen sinyaller farklılık gösterecektir. Yeraltı farklılık gösterirken doğrudan gelen dalganın bütün izlerde aynı olması nedeniyle, kaydedilen bütün izlerin ortalamasının doğrudan gelen dalgaya benzemesi beklenir. O halde bu dalgaların veriden çıkarılması için bütün izlerin ortalaması hesaplanır ve bütün izlerde aynı olan kısım veriden çıkarılır (Şekil 2.7).



Şekil 2.8 Doğrudan gelen dalga veriden çıkarılmadan önce (üstte) ve çıkarıldıktan sonra (altta) radar kesiti

2.2.6 Göç

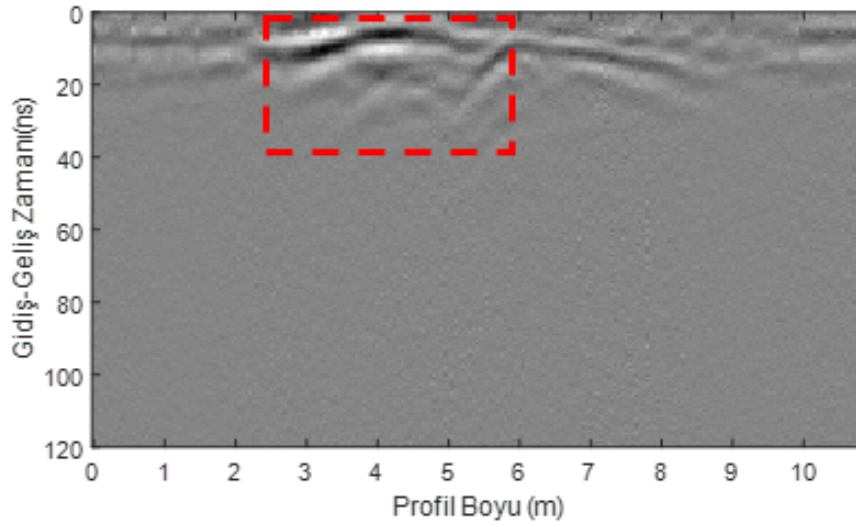
Göç yöntemleri ilk olarak sismik görüntüler için geliştirilmiştir fakat akustik ve elektromanyetik dalgalar arasındaki benzerlik sayesinde yer radarı yöntemine de uyarlanabilmiştir. Sismik ya da yer radarında kaydedilen bir yansıma izi sadece yansımanın zamanını ve genliğini gösterir fakat yansımanın nereden geldiği konusunda doğrudan bir bilgi içermez. Bir radar ölçümünde, anten ölçüm doğrultusu boyunca hareket ettirilirken EM dalganın farklı gidiş-geliş sürelerinden dolayı, yer altındaki her yansıtıcı radargramda bir hiperbol şeklinde görülecektir (Şekil 2.9). Göç yöntemleri kullanılarak radargramdaki bu eğimli olaylar gerçek yerlerine taşınarak yanal çözünürlüğün artırılması amaçlanır.



Şekil 2.9 Yer altındaki yansıtıcı bir cismin radargramda oluşturacağı hiperbol eğrisi

2.2.7 Derinlik dilimlerinin oluşturulması ve sunumu

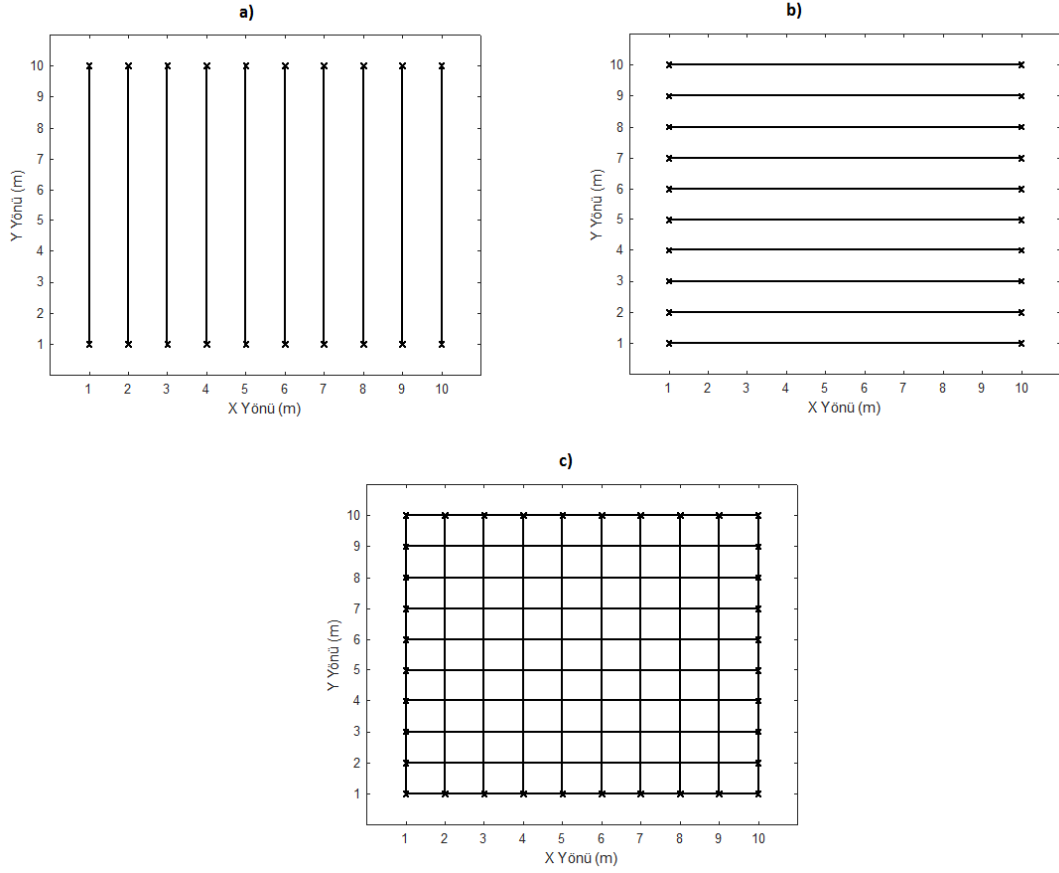
Bir profil boyunca kaydedilen radar izlerinin profil üzerindeki konumlarına göre sıralanarak radar kesitleri veya radargramların elde edildiğinden ve yer içinde gömülü nesneler olması durumunda bunların radar kesitinde hiperboller şeklinde belirtiler vereceğinden önce söz edilmişti. Örnek olması açısından şekil 2.10'daki radargrama bakılabilir.



Şekil 2.10 Gidiş geliş zamanı ve profil boyunun fonksiyonu olarak çizdirilmiş bir radar verisi

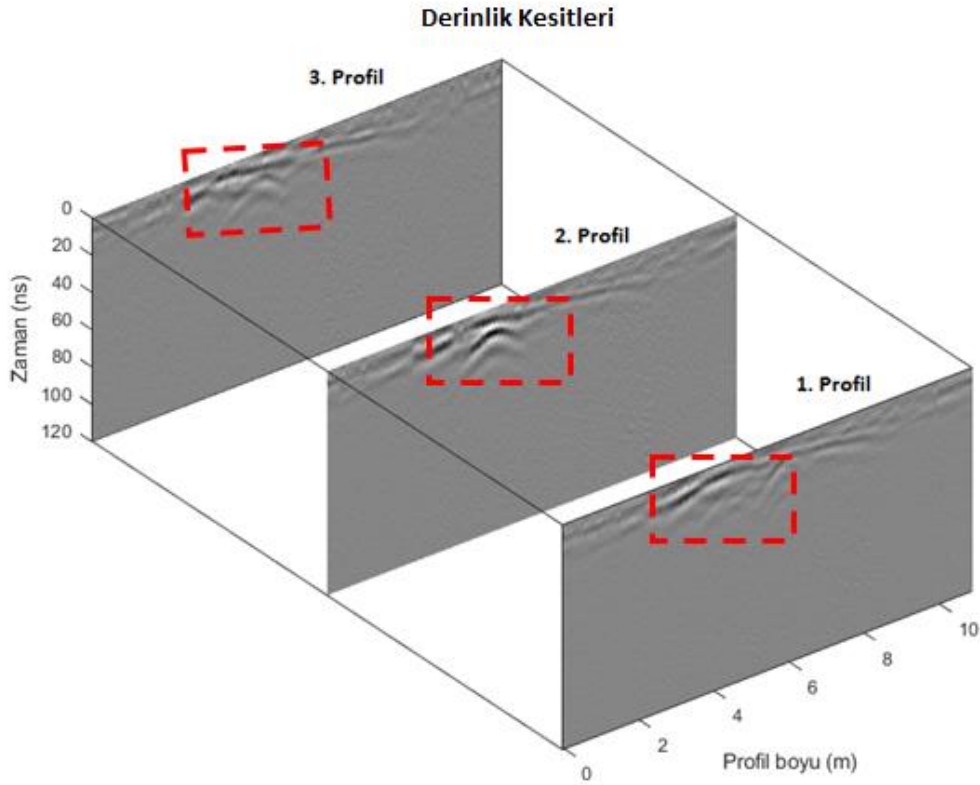
Burada kırmızı kesik çizgi ile işaretlenmiş alanda bir belirti göze çarpmaktadır. Ancak sadece bir profildeki belirtiye bakılarak yapının şekli ya da uzanımı hakkında bir fikir yürütmek mümkün olmayacaktır. Arkeolojik bir alanda çalışma yapıldığı düşünülürse, radargramda görülen belirtinin noktasal bir hedefe mi yoksa çizgisel bir hedefe mi ait olduğu tek bir profil ile anlaşılmaz. Bunun için arazi şartları izin verdiği sürece birbirine paralel hatlar boyunca hatta grid şeklinde ölçü almak faydalı olacaktır (Şekil 2.11).

Ölçüm Profilleri



Şekil 2.11 a. Y doğrultusuna b. X doğrultusuna paralel olarak ve c. grid şeklinde düzenlenmiş ölçüm profilleri

Paralel hatlar boyunca ölçü alındığında radargram üzerindeki diğer profilde de görülüp görülmediği, eğer görülüyorsa hangi konumda ve hangi zamanda görüldüğü incelenerek yapının şekli hakkında yorum yapılabilir. Tecrübeli bir yorumcu için paralel profillerdeki hiperbollerin takibini yapmak çok zor olmayacaktır. Örnek olarak Şekil 2.12 incelenirse, burada daha önce Şekil 2.10'da gösterilen profil kendisi takip eden y yönünde 0.5 metre aralıklı profillerle birlikte çizdirildiğinde (profillerin rahat görülmesi açısından y yönündeki uzaklık abartılmıştır) hiperbollerin neredeyse aynı x konumlarında t zamanlarında ortaya çıktığı dolayısıyla bu belirtilerin yaklaşık olarak profil yönünün 4-6 m'si civarlarında ve 10 ns zamanında y yönü boyunca devam eden çizgisel bir yapıya ait olduğu yorumu kolayca yapılabilir.

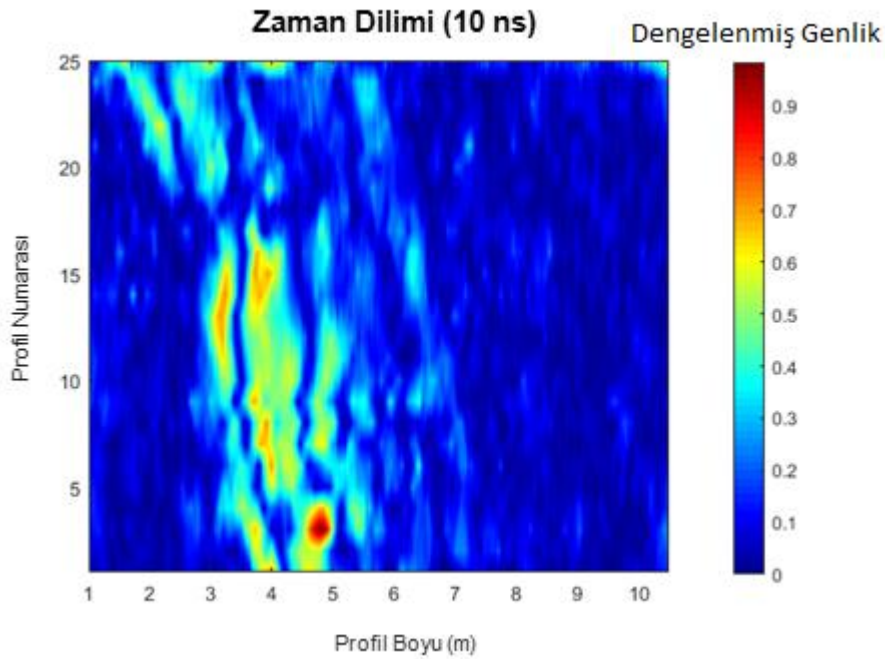


Şekil 2.12 Birbirine paralel 3 adet profil ölçüsünün bir arada görüntülenmesi

Yukarıdaki örnek açıklayıcı olmakla birlikte GPR sonuçlarının mesleğin içinden olmayan üçüncü kişiler tarafından da kolayca anlaşılması gerekir. Bunun da haricinde yer içi her zaman bu kadar sade olmaz. Birbirine yakın konum ve derinliklerde birçok hiperbolün olması durumunda bunların hangisilerinin tek bir profille sınırlı olduğunu, hangilerinin profiller boyunca devam ettiğini takip etmek zorlaşabilir. Bu zorluğu aşmak için derinlik ya da zaman dilimi şeklinde gösterimler kullanılabilir. Bu gösterimin oluşturulması, paralel hatlar ya da grid ölçüsü şeklinde toplanmış GPR verilerini 3B bir veri küpü haline getirmek ve istenilen zaman değerleri için, her bir profile o zaman değerine karşılık gelen veri satırlarını alıp birleştirerek ara değerleri interpolate etmek esasına dayanır. Sonuçta belirli zaman değerlerine (derinliklere) ait dilimler oluşturulup çizdirildiğinde bunlar üzerinde belirtileri birbirinden ayırmak hiperbollerini takip etmekten çok daha kolay olacaktır.

Yukarıdaki örneklerde kullanılmış GPR verileri birbirine paralel hatlar boyunca toplanmış toplam 25 profile oluşmaktadır ve Plattner ve Robbins (2018)'den alınmıştır. İlk profillerde hiperbol şeklindeki belirti 10 ns civarında görülmektedir. Bu belirtinin

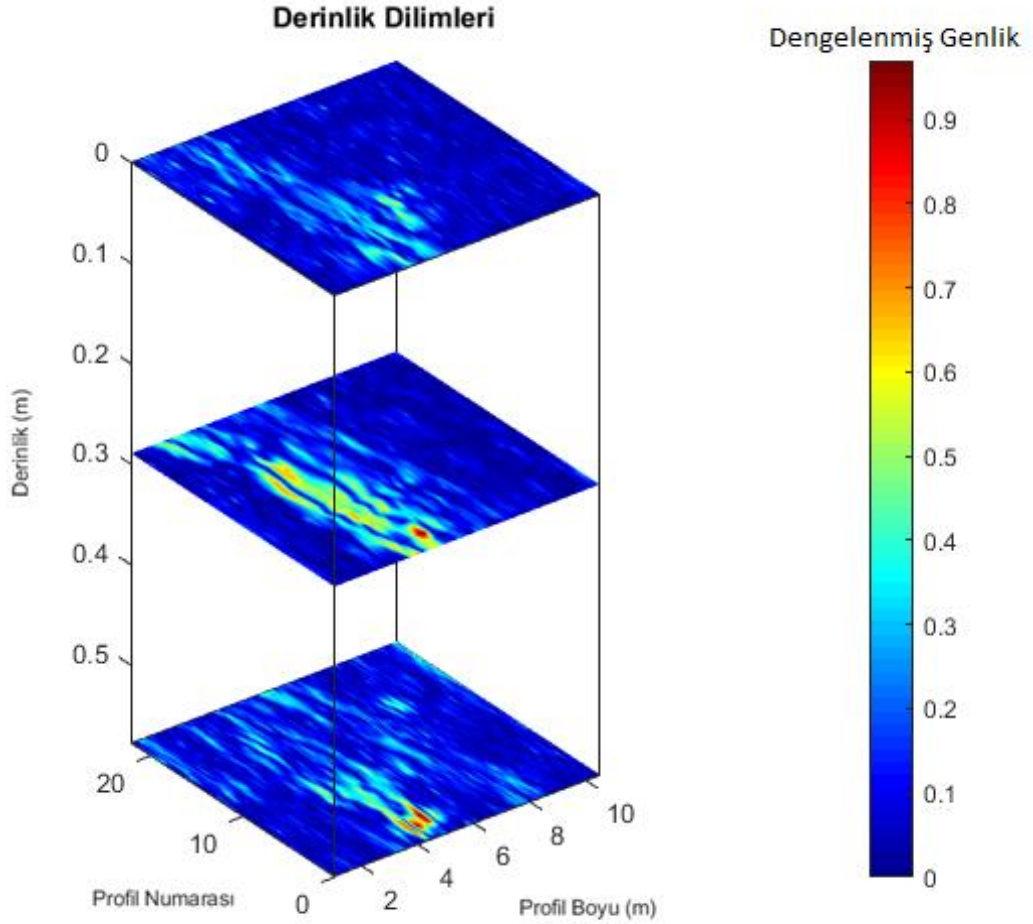
diğer profiller boyunca da devam edip etmediğini anlamak için elimizdeki bütün profil verilerinin 10 ns civarına karşılık gelen satırlarını birleştirip MATLAB’da `contourf` komutu yardımıyla çizdirirsek Şekil 2.13’deki harita elde edilmektedir. Burada belirtinin diğer profiller boyunca devam eden çizgisel bir yapı olduğu kolayca görülebilir. Ancak zaman dilimi migrasyon öncesi çizdirildiğinden, hiperbol kanatlarının belirtinin her iki yanında çizgisel yapılar olarak görüldüğü yorumlama aşamasında dikkate alınmalıdır.



Şekil 2.13 25 profilden oluşan bir veri grubundan alınmış 10 ns.'ye karşılık geçen zaman dilimi

Buraya kadar GPR verileri hep çift yönlü gidiş geliş zamanının bir fonksiyonu olarak çizdirilmiştir. Ancak günün sonunda tespit ettiğimiz belirtilerin hangi derinliklerde olduğunu bilmek isteriz ve bunun için ortam hızını belirlememiz gerekir. Ortam hızının belirlenmesi için burada detaylarına girilmeyecek farklı yöntemler bulunmaktadır. En yaygın olarak kullanılan yöntem hiperbol çakıştırma yöntemidir. Radargramda görülen hiperbollerin kanat açıklıkları ortamın hızıyla ilişkili olduğundan REFLEXW veya EKKO Project gibi veri-işlem programlarında interaktif olarak hiperbol çakıştırarak ortam hızını belirleme özelliği bulunmaktadır. Zaman eksenini derinlik eksenine dönüştürülerek istenilen derinlikler için kuşbakışı haritalar oluşturulabilir. Şekil 2.13’de 10 ns için çizdirilen haritanın derinlik dönüşümü yapıldığında 0.3 m’ye karşılık geldiği

görülmüştür. Bu harita Şekil 2.14’de, yüzeyin hemen altına karşılık gelen bir derinlik dilimi ve yaklaşık olarak 20 ns. yani 0.6 m.’ye karşılık gelen derinlik dilimleriyle birlikte çizdirilmiştir.



Şekil 2.14 25 profillik bir veri grubundan 3 adet farklı derinliğe karşılık gelen dilimlerin birlikte çizdirilmesi

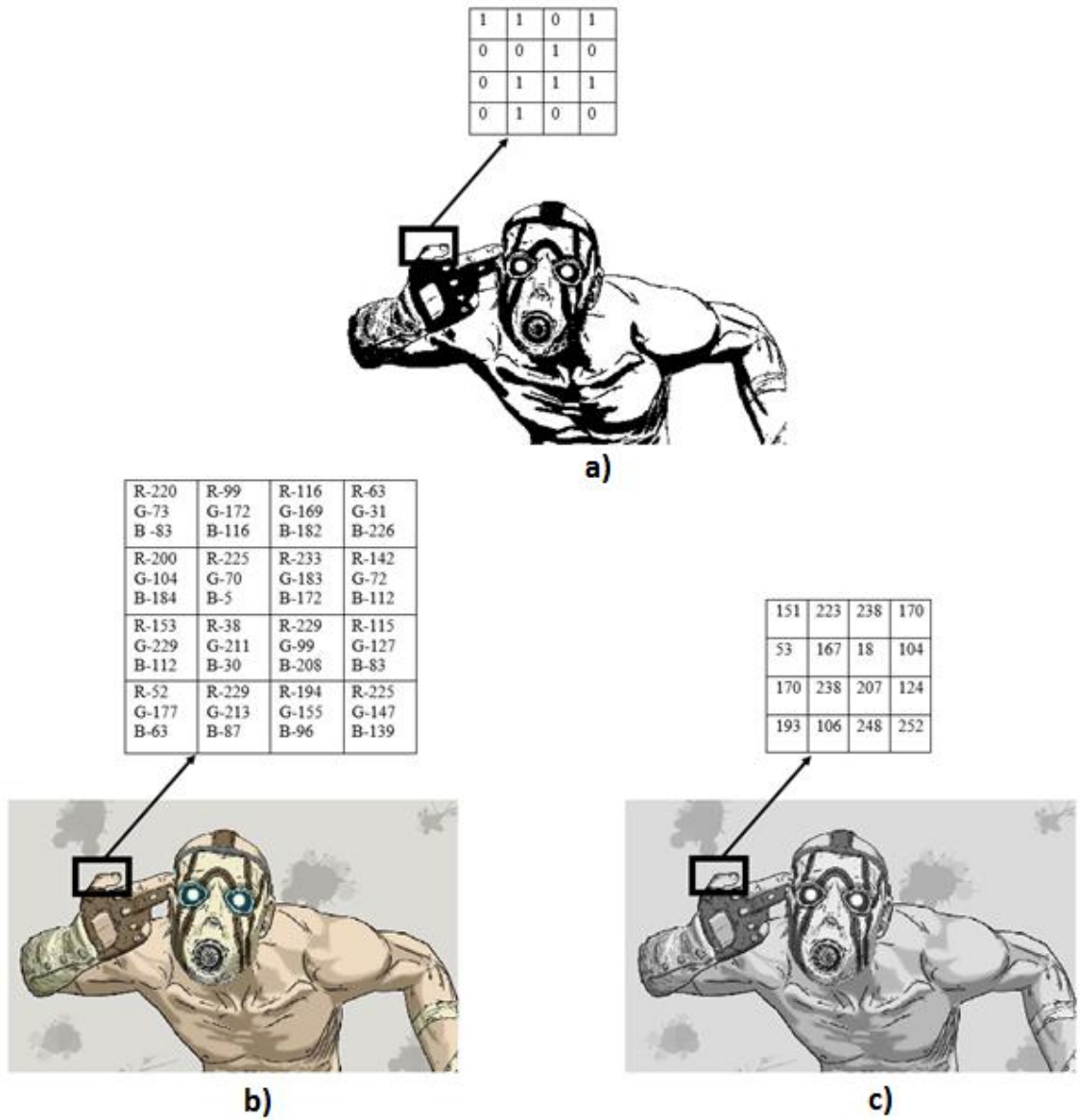
2.3 Görüntü İşleme

Görüntü işleme son birkaç on yılda büyük önem kazanmış ve kazanmaya devam eden bir alandır. Bilgisayar bilimlerindeki ve teknolojiadaki gelişmeler sinyal ve görüntü işleme algoritmalarının gerçek zamanlı olarak uygulanmasına olanak vermiş yeni uygulama alanları ortaya çıkarken eskilerin de genişlemesini sağlamıştır. İletişim, tıp, savunma, robotik ve jeofizik görüntü işleme uygulamalarının geniş yer bulduğu alanlardan sadece birkaçıdır.

Görüntüler sayısal ortamda iki boyutlu dizeler olarak kaydedilirler. Piksel, en küçük görüntü birimi olup, görüntüyü oluşturan dizelerin tek bir elemanı ile temsil edilir. Bu elemanın düzey içindeki konumu koordinat bilgisine, elemanın skaler büyüklüğü ise “yeğinlik” (*intensity*) değerine karşılık gelmektedir. Görüntüler özünde 2B dizeler olduğundan görüntü işleme, temelde 2B sinyal işleme uygulamasıdır. Kavramsal olarak 1B sinyal işleme ile 2B sinyal işleme büyük benzerlikler içerir. 1B sinyallere uygulanan süzgeçleme, Fourier Dönüşümü, Ayrık Fourier Dönüşümü (DFT), kosinüs dönüşümü, Karhunen-Loeve Dönüşümü gibi uygulamaların 2B sinyal işlemede de doğrudan karşılığı vardır. Bununla birlikte çalışılan veri gurubunu büyüklüğü, sistemi tanımlayan matematiksel bağıntıların karmaşıklığı gibi konularda 1B ve 2B sinyal işleme arasında ciddi farklılıklar da bulunmaktadır.

Sayısal görüntü işleme uygulamaları dört ana başlıkta toplanabilir. Bunlar; görüntü iyileştirme (*enhancement*), restorasyon (*restoration*), sıkıştırma (*coding*) ve kavramadır (*understanding*). Görüntü iyileştirmede görüntüler insan gözü için veya makine verimliliğini artırmak için işlenir. Restorasyon işleminde herhangi bir nedenle bozulmuş görüntü işlenerek bozulmanın etkisi azaltılmaya çalışılır. Tipik bozulmalara örnek olarak bulanıklaşma, rastgele gürültüler veya geometrik kaymalar verilebilir. Görüntü sıkıştırmanın amacı görüntüyü mümkün olduğunca az bit ile temsil edebilmektir. Kavrama işlemindeki hedef ise görüntünün içeriğinin sembolik olarak temsil edilmesidir bilgisayar görüşü ve robotik alanlarında uygulamaları vardır.

Sayısal görüntüler analog görüntülerin örneklenmesi ve nicelenmesi ile oluşturulur. Örneklem (*sampling*) işlemi ile sayısal görüntüyü oluşturacak her pikselin konumu, niceme (*quantization/kuantalama*) ile ise piksellerin renk derinliği (*yeğinlik*) bilgisi elde edilir. Sayısal bir görüntüyü $f(n_1, n_2)$ ile şeklinde gösterirsek n_1, n_2 koordinat değerlerini, bu noktalarda fonksiyonun değeri ise yeğinlik değerini verir. Görüntünün yeğinliği genellikle 0-255 arasındaki bir sayıyla gösterilir, 0 en karanlık seviyeyi, 255 ise en parlak seviyeyi simgeler. Her n_1, n_2 noktası bir piksele karşılık gelir ve 8 bit ile ifade edilebilir. Renkli görüntüler ise, kırmızı yeşil ve maviyi temsil eden üç sayısal dizelerden oluşur (Şekil 2.15).



Şekil 2.15 a. İkili (binary) b. Kırmızı-Yeşil-Mavi (RGB) ve c. gri tonlamalı (grayscale) görüntü

Görüntü işlemleri, $f(n_1, n_2)$ şeklindeki bir giriş görüntüsünü $g(n_1, n_2)$ şeklinde bir çıkış görüntüsüne çevirir. Görüntü işlemleri için evrensel bir sınıflama sistemi bulunmamasına karşın izleyen şekilde iki ana başlık altında incelenebilir:

- Aritmetik hesaplamaların ve/veya mantıksal işlemlerin gerçek piksel değerleri üzerinde yapıldığı uzamsal işlemler,
- Görüntü işlemlerinin, görüntü matematiksel bir operatör ile dönüşüme sokulduktan sonra (örneğin, Fourier dönüşümü veya ayrık kosinüs dönüşümü gibi) uygulandığı dönüşüm uzayı işlemleri.

Bir Başka sınıflama ise Çizelge 2.1’de görüldüğü gibi nokta, yerel ve tümel işlemler olarak uygulanan işlemin karakteristiğine göre yapılabilir.

Çizelge 2.1 Görüntü işlemleri

İşlem	Karakteristik
Noktasal	Bir koordinatın çıkış değeri sadece giriş değerine bağlı
Yerel	Bir koordinatın çıkış değeri giriş değerine ve onun komşuluklarına bağlı
Tümel	Bir koordinatın çıkış değeri, tüm görüntü elemanlarına bağlı

2.3.1 Noktasal işlemler

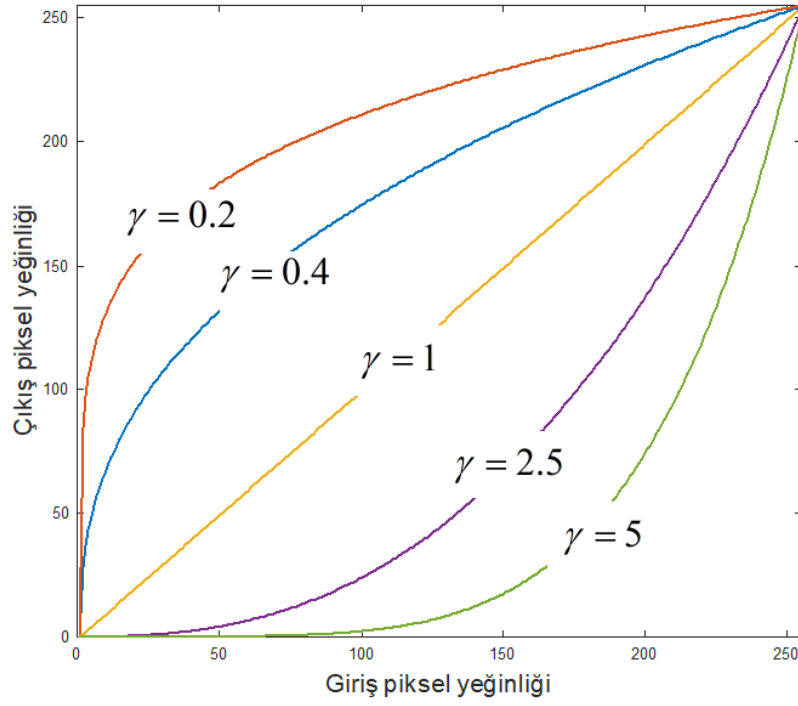
Nokta işlemler, genellikle “dönüşüm fonksiyonu” olarak adlandırılan bir matematiksel fonksiyonu, görüntü içerisindeki konumlarına veya komşuluklarının değerlerine bakılmaksızın bütün piksellere uygulayan işlemlerdir (Marques, 2011). Dönüşüm fonksiyonları genel olarak,

$$g(x, y) = T[f(x, y)] \quad (2.12)$$

şeklinde ifade edilebilirler. Burada $g(x, y)$ çıkış görüntüsü, $f(x, y)$ giriş görüntüsü, T ise dönüşüm fonksiyonudur. Görüntülere uygulanan nokta işlemlerin bir örneği gama dönüşümleridir. Gama dönüşüm fonksiyonu:

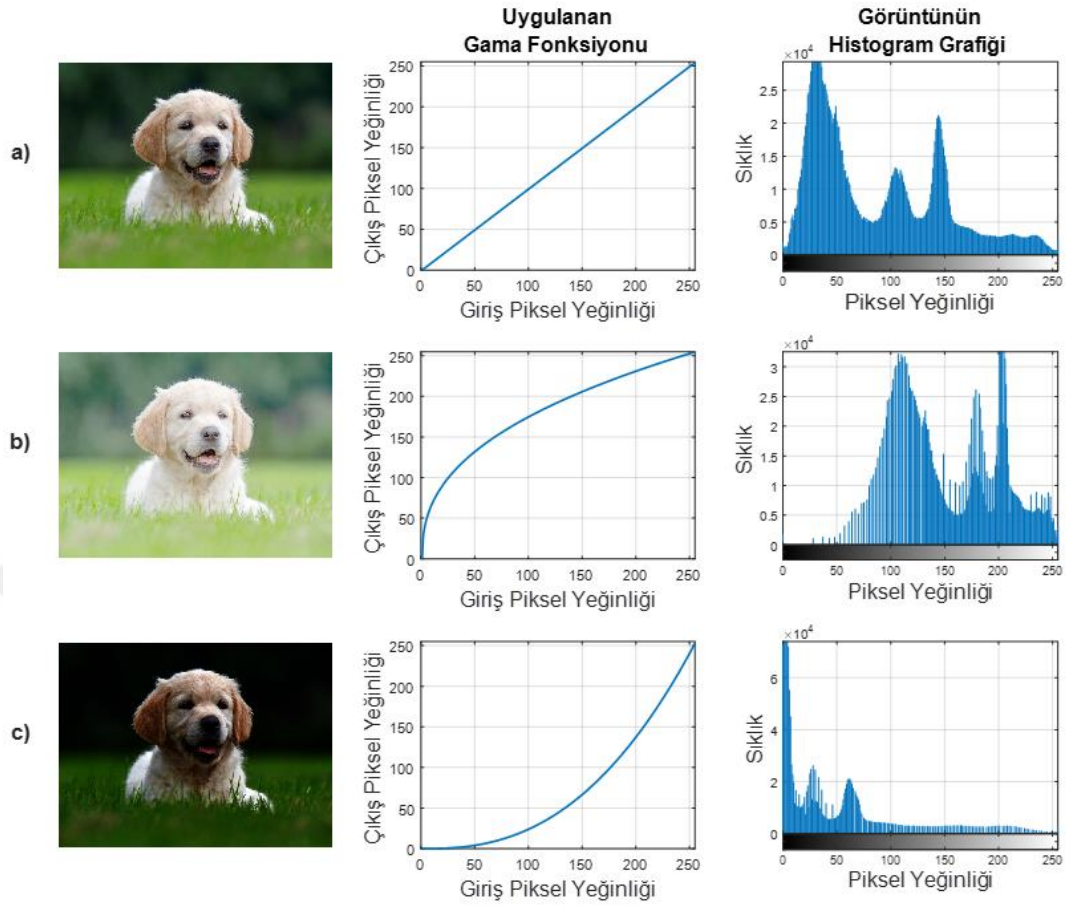
$$s = c + r^\gamma \quad (2.13)$$

şeklinde verilir. Burada s ve r sırasıyla çıkış ve giriş piksel yeğinlikleri, c ölçeklendirme sabiti γ ise gama değerini ifade eder. Şekil 2.16’da gama dönüşüm fonksiyonu eğrileri görülmektedir.



Şekil 2.16 Farklı γ değerleri için gama dönüşüm fonksiyonu eğrileri

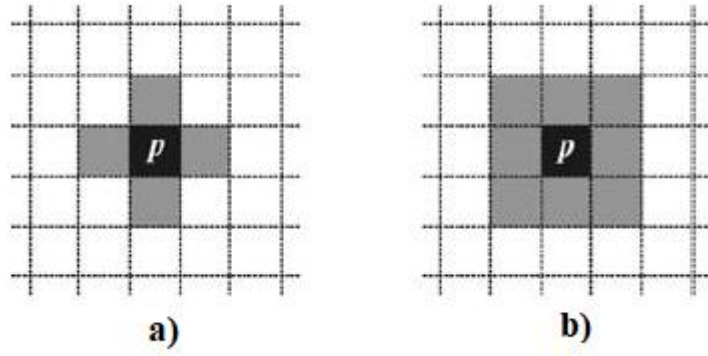
Şekil 2.17’da ise farklı γ değerleri için gama dönüşümü uygulanmış bir görüntü gösterilmiştir. Burada, 1’den daha küçük γ değerleri için görüntünün renk tonunun açılacağı, 1’den büyük γ değerleri için ise koyulaşacağı açıkça görülebilir. $\gamma = 1$ için çıkış giriş görüntüsünün aynısı olacaktır.



Şekil 2.17 a. $\gamma = 1$ b. $\gamma = 0.4$ ve c. $\gamma = 2.5$ için gama dönüşüm fonksiyonu uygulanmış bir görüntü

2.3.2 Yerel işlemler

Görüntülere uygulanan yerel işlemlerde (x, y) koordinatlarındaki orijinal pikselin çıkış değeri kendi değerinin ve komşuluğundaki piksellerin değerlerinin bir fonksiyonu olarak belirlenir. Bir pikselin komşuluğu kendisini çevreleyen pikselleri ifade eder. Üst, alt, sağ ve sol piksellerden oluşabileceği gibi çaprazdakiler de dahil edilebilir. Daha uzaktaki pikseller de dahil edilerek komşuluk istenilen şekilde büyütülebilir. Görüntü işleme algoritmalarında komşuluk, genellikle merkezinde referans pikselin bulunduğu 3×3 'lük kare dizey olarak seçilir.



Şekil 2.18 Bir görüntüde a. 4 piksel b. 8 pikselden oluşan komşuluk (Marques 2011)

Görüntülere uygulanan yerel işlemler genellikle evrişim (*convolution*) temellidir. Evrişim süzgeçlerine sonraki bölümlerde ayrıntılı olarak değinilecektir. Ancak genel olarak h belirli bir amacı yerine getirmek üzere tasarlanmış süzgeç çekirdeği (*kernel*) olmak üzere bir f sayısal görüntüsü ile evrişimi

$$g(n_1, n_2) = \sum_{i=-\infty}^{\infty} \sum_{j=-\infty}^{\infty} h(i, j) f(n_1 - i, n_2 - j) \quad (2.14)$$

şeklinde ifade edilir. Buradaki süzgeç belirtkeni evrişim çekirdeği, süzgeç veya nokta dağılım fonksiyonu gibi isimler de alır. Görüntülere evrişim işleminin uygulanması, evrişim çekirdeğinin görüntü üzerinde kaydırılması ve değerinin uygun piksel değerleriyle çarpılması işlemidir. Süzgeçlerin görüntülere uygulanması evrişim işlemiyle olanaklı olur. Örneğin Şekil 2.19.a'da verilen görüntü

$$h = \begin{bmatrix} 0 & -2 & 0 \\ -2 & 11 & -2 \\ 0 & -2 & 0 \end{bmatrix} \times \frac{1}{3} \quad (2.15)$$

şeklindeki bir çekirdek dizeyi ile evriştirildiğinde şekil 2.19.b'de verilen çıkış görüntüsü elde edilir. Uygulamada kullanılan her pikselin üst, alt, sağ ve solundaki pikselleri de dikkate alarak değişimin olmadığı yerler aynı değerde kalırken sınırların olduğu bölgelerdeki piksel değerleri büyütülür. Yani sınırlar belirginleşmiş olur. Böyle bir süzgeç görüntüleri netleştirmek için kullanılabilir.



a)



b)

Şekil 2.19 a. Giriş görüntüsünün 2.15 eşitliğinde verilen süzgeç çekirdeği ile evriştirilerek elde edilen b. netleştirilmiş görüntüsü

2.3.3 Tümel işlemler

Görüntüyü oluşturan piksellerden birinin, görüntüye işlem uygulandıktan sonra alacağı çıkış değerinin görüntüdeki bütün piksel değerlerine bağlı olarak belirlendiği işlemlerdir. Tümel işlemlerin bir kısmına daha sonraki bölümde ayrıntılı olarak değinilecek olup histogram eşitleme ve dengeleme gibi işlemler, ‘Non-Local Means’ süzgeci gibi görüntü yuvarlatılırken bir pikselin çıkış değerinin sadece pikselin komşuluklarının değil görüntüdeki bütün piksellerin ağırlıklarından hesaplandığı süzgeçler ve başta Fourier dönüşümü olmak üzere görüntü dönüştürme işlemleri tümel işlemler arasında sayılabilir.

Tümel işlemlerin ana ilkeleri, yerel komşuluk işlemlerinin genişletilmiş hali olarak görülebilir. Çıkış pikseli giriş görüntüsünün bir ağırlık (çekirdek) dizeyi ile çarpılmasıyla elde edilir.

Görüntü işleme tekniklerinin jeofizik verilerine uygulanması ile ilgili literatürde bazı çalışmalar bulunmaktadır. Morozov ve Smithson (1996) histogram dengeleme tekniğini sismik sinyallere uygulamıştır. Bergeron ve Yuen (2000) dalgacık dönüşümü ile üç boyutlu sismik verilerde baca tipi yapıların ayrıştırılabilmesini sağlamıştır. Al-Nuaimy

ve diğ. (2000) gömülü nesnelerin tespiti amacıyla GPR kesitleri üzerinde yapay sinir ağları ve desen tanıma algoritmalarını kullanmışlardır. Carter ve Lines (2001) görüntü işleme algoritmaları ile sismik ve elektrik verilerinde fay yapılarının otomatik olarak belirlenmesini sağlamışlardır.

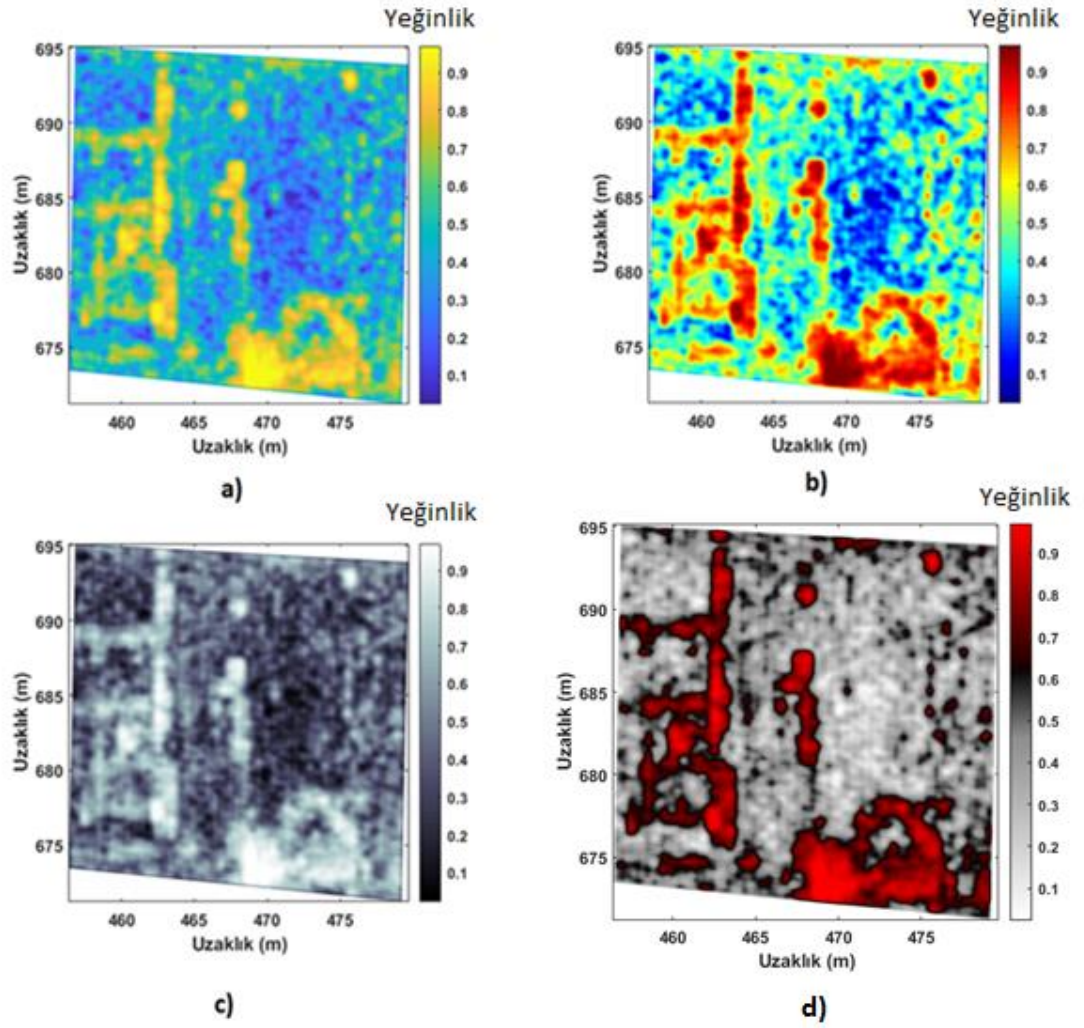


3. JEOFİZİK HARİTALARIN GÖRÜNTÜ İŞLEME İLE İYİLEŞTİRİLMESİ

Jeofizik yöntemlerle toplanan verilerin işlenip modellenmesiyle, jeofizik kesit ve haritaları oluşturulur. Bu haritaların bizzat yorumcu için olduğu gibi mesleğin içinden olmayan kişiler tarafından da kolayca anlaşılabilmesi, fiziksel durumun açıklanmasını ve anlaşılmasını kolaylaştırması gerekmektedir. Bu durum, toplanan veri-işlem aşamalarından geçirilip elde edilen parametrelerin olduğu gibi çizdirilmesiyle her zaman sağlanamamaktadır. Bazı durumlarda, harita üzerinde önem arz eden belirtilerin göz ile daha rahat seçilebilmesi, önem arz etmeyen veya gürültülü olan yerlerin bastırılması gibi amaçlarla jeofizik haritalar üzerinde görüntü işleme araçları uygulanabilir. Bu araçlar, doğrudan haritayı oluşturan parametrelere uygulanıp parametre değerlerinin yeniden düzenlenmesi için kullanılabileceği gibi, parametre düzeyleri 0-255 veya 0-1 değerleri arasında ölçeklendirilerek gri seviye görüntülere dönüştürülüp ondan sonra bu görüntüler üzerine de uygulanabilir. İzleyen başlıklarda jeofizik haritalar üzerinde kullanılabilecek bazı görüntü işleme araçları tanıtılıp uygulamalarıyla ilgili örnekler verilecektir.

3.1 Renk Haritası ve Dönüşüm Fonksiyonları

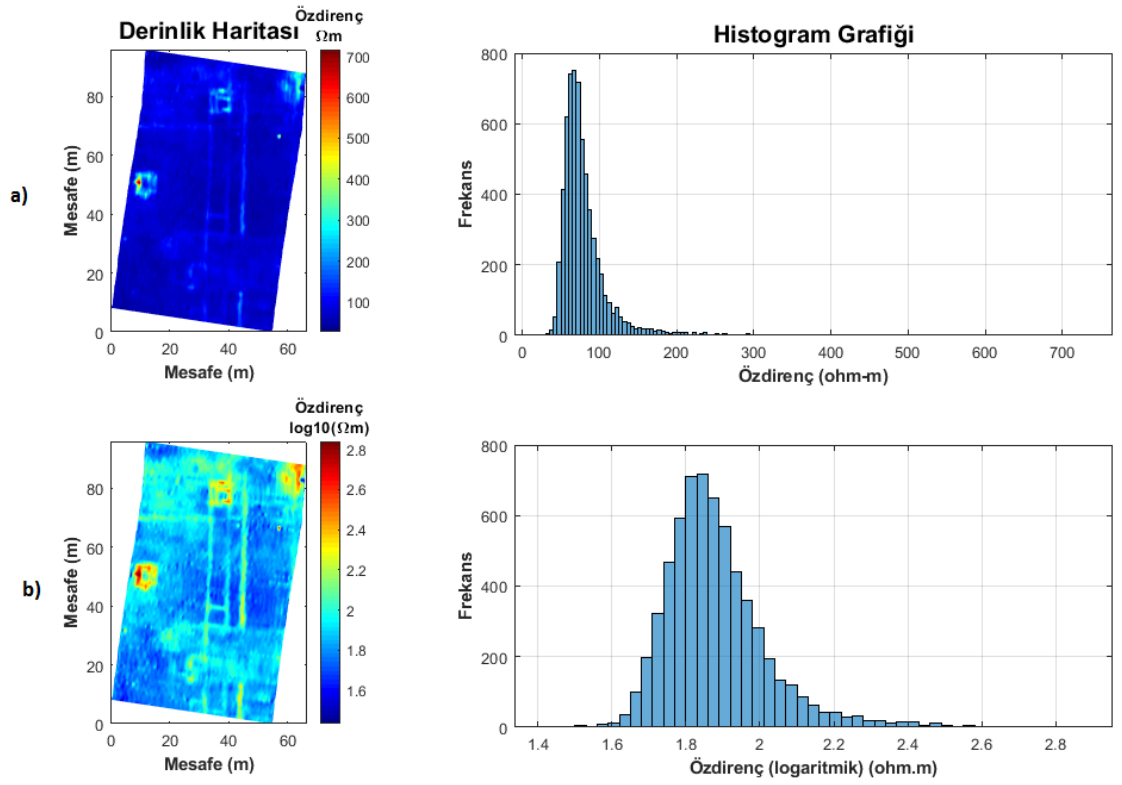
Bir resmi sayısal olarak görüntüleyebilmek için piksellerin sayısal değerleri ile temsil edilecekleri renk arasındaki ilişkinin tanımlanması gerekir. Bunun için renk ölçeği dizeyi kullanılır. Renk haritası dizeyi farklı renklerin kırmızı yeşil ve mavi (RGB) bileşenlerinin bilgisini içeren 3 sütundan oluşan bir dizeydir. Tanımlanacak renk sayısı kadar satıra bölünebilir. Görüntüleme yapılırken hazır renk haritaları kullanılabileceği gibi istenilen şekilde bir renk haritası dizeyi kullanıcı tarafından da oluşturulabilir. Jeofizik kesit ve haritaların gösterimi için uygun renk haritasının seçimi başlı başına bir görüntü işleme aşaması olarak düşünülebilir. Örneğin Patara antik kentinde yapılan jeofizik incelemelerden (Kaya vd., 2018) alınan işlenmiş yer radarı veri hacminden oluşturulmuş 1 m. derinliğine ait derinlik dilimi, farklı renk haritaları kullanılarak çizdirilerek şekil 3.1'de verilmiştir. Şekil 4.1 a, b ve c'de MATLAB programlama dili içerisinde hazır olarak tanımlanmış renk haritaları kullanılmış şekil 3.1.d'de veri içeriğine ve vurgulanmak istenen alanlara göre hazırlanmış bir renk haritası kullanılmıştır.



Şekil 3.1 Patara A6 alanında toplanan radar verilerinin işlenmesi ile elde edilen derinlik haritası a. parula, b. jet, c. bone hazır renk haritaları ve d. kullanıcı tarafından üretilmiş bir renk haritasıyla çizdirilmesi

Jeofizik haritalar çizdirilirken uygun dönüşüm fonksiyonları kullanılarak dönüştürülebilir. Bu sayede modelin görselleştirilmesi sırasında amaca uygun denetimler yapılabilir. Örneğin derinlik haritaları çizdirilirken parametre dağılımlarını olduğu gibi çizdirmek ayrıntıların görünmesini zorlaştırabilir. Bunun sebebi parametre dağılımını gösteren haritanın histogramının küçük bir aralıkta sıkışması ve görüntü kontrastının düşük olmasıdır. Bu durum renk ölçeğinin çok dar bir bölgesinin kullanılmasına neden olur.

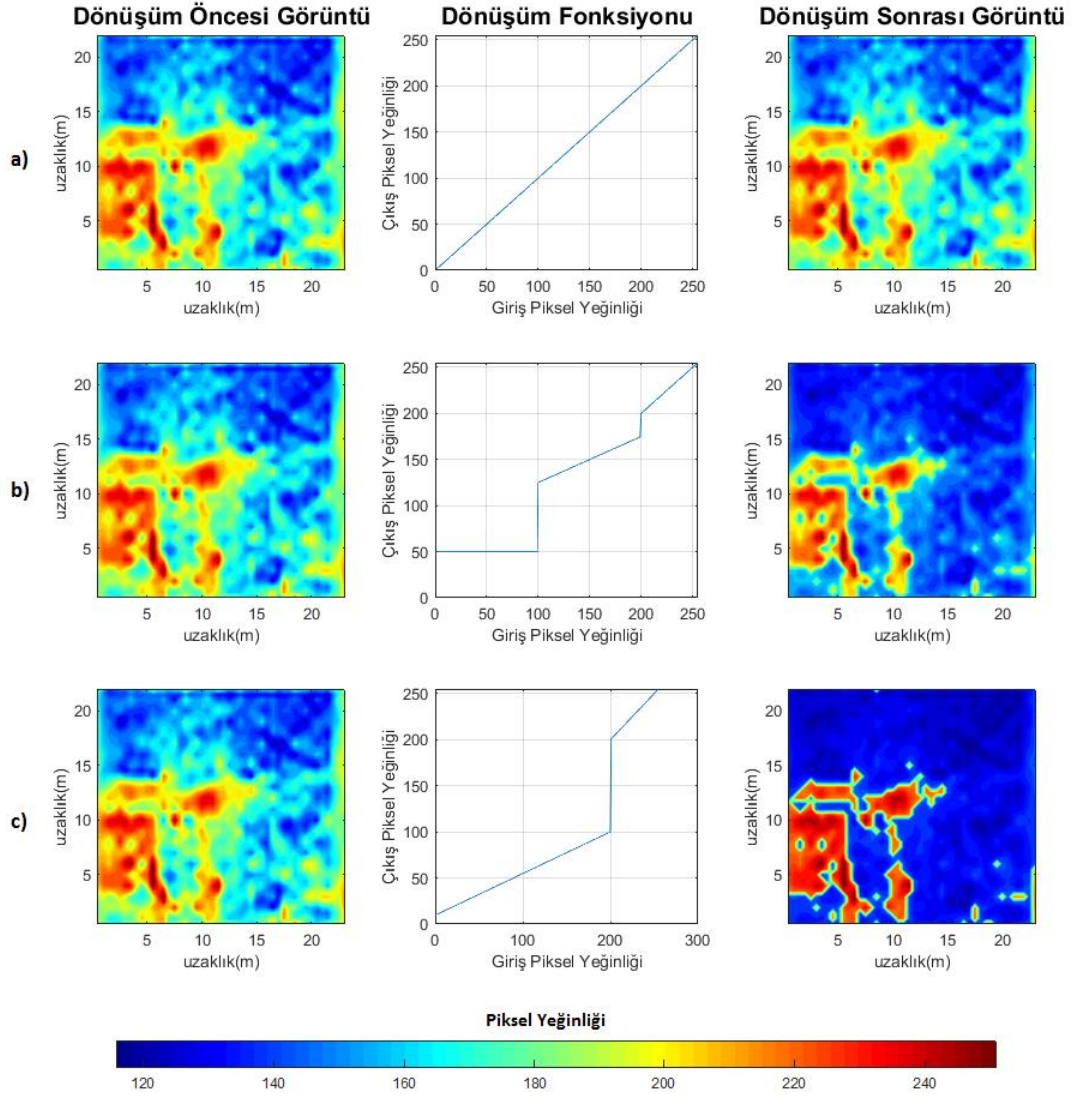
Haritaları oluşturan parametre dağılım değerlerinin logaritmasının çizdirilmesi ile bu sorunun üstesinden gelinebilir (Şekil 3.2).



Şekil 3.2 a. Doğrusal, b. Logaritmik olarak çizdirilmiş derinlik haritaları ve histogram grafikleri

Parametrelerin logaritmasının alınarak çizdirilmesi aslında logaritmik bir dönüşüm fonksiyonunun uygulanması işlemidir. Buna ek olarak belirtilerin görüldüğü yerlerdeki değerleri abartmak ve diğer yerleri sönmüleyerek belirtileri daha ayırt edilir hale getirmek için istenilen özellikli dönüşüm fonksiyonları da üretilerek haritaya uygulanabilir.

Kullanıcı tanımlı iki farklı dönüşüm fonksiyonlarının uygulama sonuçları şekil 3.3’de verilmiştir. Şekilde yukarıdan aşağıya sırasıyla giriş ile çıkış aynı olan doğrusal bir dönüşüm fonksiyonu, fonksiyonu ve veride istenen yerleri belirginleştirmek için tasarlanmış kullanıcı tanımlı iki dönüşüm fonksiyonu kullanılmıştır. Gösterimde kullanılan jeofizik harita, Patara antik kentinde yapılan jeofizik araştırmalar sırasında elde edilen üç-boyutlu yer-elektrik öz direnç modelinin 0.50 m derinliğini göstermektedir (Akca, 2018).



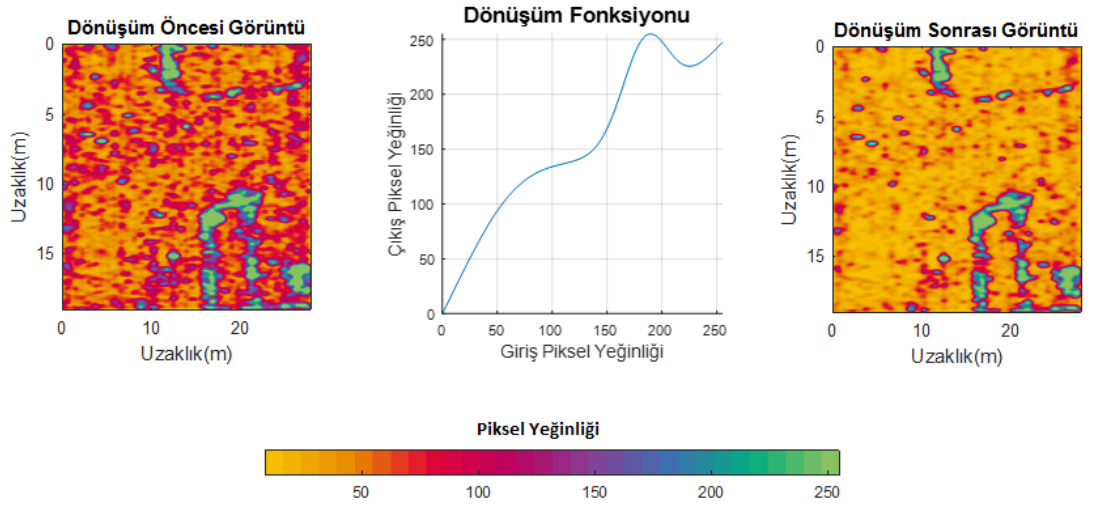
Şekil 3.3 Farklı Transfer fonksiyonların jeofizik haritaya uygulanması

Şekil 3.3a'daki gibi bir dönüşüm fonksiyonunun tanımlanıp bir görüntüye uygulanması, I sekiz bitlik bir giriş görüntü ve $I2$ çıkış görüntüsü olmak üzere MATLAB programlama dili içerisinde,

```
t1(0:255)=uint8(0:255)
I2 = t1(I + 1)
```

komutlarıyla basitçe gerçekleştirilebilir. Burada t fonksiyonu dönüşüm fonksiyonudur ve yukarıda şekil 3.3a'daki gibi doğrusal bir dönüşüm fonksiyonu oluşturmak için kullanılmıştır.

Dönüşüm fonksiyonlarının görüntüye uygulanmasına bir başka örnek için şekil 3.4'e bakılabilir. Burada, ilk sütunda radar verilerinden elde edilen bir derinlik diliminden oluşturulmuş görüntüyü, ikinci sütunda uygulanan dönüşüm fonksiyonu ve üçüncü sütunda bu dönüşüm fonksiyonu uygulandıktan sonraki çıkış görüntüsü görülmektedir. Dönüşüm fonksiyonu, verinin içeriğine göre parametreleri seçilmiş, iki adet Gaussian fonksiyonun toplamı ile oluşturulmuştur. Çıkış görüntüsü incelendiğinde yüksek yeşinlikli belirtiler herhangi bir bozulmaya uğramazken bunların dışında kalan arkaplanın daha homojen ve gürültüsüz görüldüğü söylenebilir.



Şekil 3.4 İki adet Gaussian Fonksiyonun toplamından oluşturulmuş bir dönüşüm fonksiyonunun görüntüye uygulanması

3.2 Evrişim Süzgeçleri

Önceki bölümde değinilen evrişim işleminin görüntü üzerinde yapılmak istenen etkiye göre seçilen bir çekirdek dizey kullanılarak görüntüye uygulanması yoluyla uygulanan süzgeçlerdir. Görüntüler üzerinde evrişim süzgeçleri; bulanıklaştırma, netleştirme, kenar bulma veya gürültü giderme gibi etkileri vardır. Bundan sonraki başlıklarda bu süzgeçlerin bazıları incelenecektir.

3.2.1 Ortalama (mean) süzgeci

Görüntüyü yumuşatmak ve gürültüyü azaltmak için kullanılan süzgeçlerden birisidir. Amaç her pikselin kendisine komşu olan piksellerle arasındaki farkı azaltmaktır. Bunu için görüntünün her piksel değeri kendisi ve komşularının ortalama değeri ile değiştirilmektedir. Ortalama filtresi olarak kullanılan evrişim çekirdeği şekil 3.5’de verilmiştir.

1/9	1/9	1/9
1/9	1/9	1/9
1/9	1/9	1/9

Şekil 3.5 Ortalama süzgeç için evrişim çekirdeği

Evrişim süzgeçlerinin MATLAB programlama dilinde oluşturmak için `fspecial` fonksiyonu kullanılır. Bir ortalama süzgecin oluşturulup görüntüye ya da 2B veri grubuna uygulanması için,

```
h=fspecial('average')  
I_filtered=imfilter(ImageFile,h)
```

komutları kullanılabilir.

3.2.2 Orta değer (medyan) süzgeci

Orta değer süzgeci de ortalama süzgeci gibi görüntüdeki gürültüleri azaltmak için kullanılmaktadır. Ancak ortalama süzgecine göre bulanıklaşma etkisi daha az olur.

Her pikselin değeri hesaplanırken yakınındaki komşularına bakılır. Komşu piksellerin değerleri sıralanarak sıranın ortasındaki değer alınır. Şekil 3.6’da değeri 23 olan pikselin yeni değeri bulunurken öncelikle çevresindeki değerler sıralanır. Bunlar 16, 20, 22, 25, 25, 36, 37, 39’dur ortadaki sayı ise 25’dir. Bu nedenle bu pikselin yeni değeri olarak 25 seçilir. Orta değer, komşu piksellerin birinin değeri olması gerektiği için, kenar boyunca

hareket ettiğinde gerçekçi olmayan piksel değerleri oluşturmaz. Bu nedenle, orta değer süzgeç, keskin kenarları ortalama süzgeçten daha iyi korur.

10	15	17	21	24
12	16	20	25	99
15	22	23	25	45
18	37	36	39	11
34	2	40	41	47

→

10	15	17	21	24
12	16	20	25	27
15	22	25	25	45
18	37	36	39	11
34	2	40	41	47

Şekil 3.6 Orta değer süzgecin uygulanması sonucu piksel yoğunluklarının değişimi

3×3'lük bir orta değer Süzgecini MATLAB programala dili içerisinde uygulamak için,

```
I_filtered=medfilt2(ImageFile, [3 3])
```

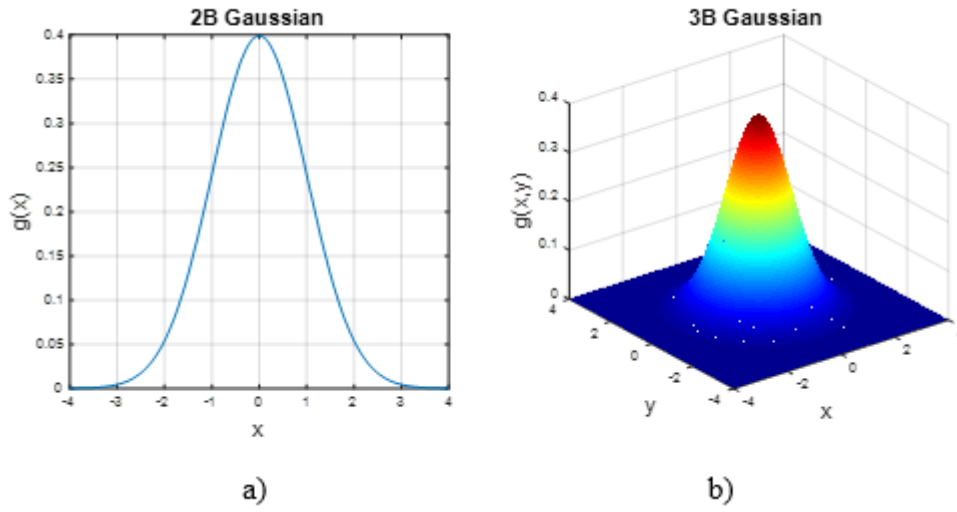
komutu kullanılabilir.

3.2.3 Gaussian süzgeci

Görüntüyü yumuşatmak, detayları ortadan kaldırmak, gürültüleri gidermek için kullanılan süzgeçlerden biridir. Gauss fonksiyonu 2B düzlem ve 3B uzay için aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$g(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} \quad (3.1)$$

$$g(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} \quad (3.2)$$



Şekil 3.7 Gaussian süzgeç çekirdeğinin a. 2B ve b. 3B görünümü

Burada σ standart sapmadır. 3.1 denkleminde 2B ve 3.2 denklemindeki 3B gauss fonksiyonları standart sapma (σ) 1, dağılımın ortalaması 0 olmak üzere $x = -4, +4$ aralığında MATLAB ile çizdirilmiştir (Şekil 2.11). Dağılımın ortalamasının sıfır olması grafiklerin $x = 0$ çizgisine ortalanması anlamına gelir. 3×3 'lük ve 5×5 'lik Gaussian evrişim çekirdekleri aşağıdaki gibidir:

$$h_{3 \times 3} = \begin{bmatrix} 0.0113 & 0.0838 & 0.0113 \\ 0.0838 & 0.6193 & 0.0838 \\ 0.0113 & 0.0838 & 0.0113 \end{bmatrix},$$

$$h_{5 \times 5} = \begin{bmatrix} 0.0000 & 0.0000 & 0.0002 & 0.0000 & 0.0000 \\ 0.0000 & 0.0113 & 0.0837 & 0.0113 & 0.0000 \\ 0.0002 & 0.0837 & 0.6187 & 0.0837 & 0.0002 \\ 0.0000 & 0.0113 & 0.0837 & 0.0113 & 0.0000 \\ 0.0000 & 0.0000 & 0.0002 & 0.0000 & 0.0000 \end{bmatrix}.$$

Standart sapması $\sigma = 1$ olan bir Gaussian süzgeci MATLAB programlama dili içerisinde uygulamak için

```
I_filtered=igaussfilt(ImageFile,2)
```

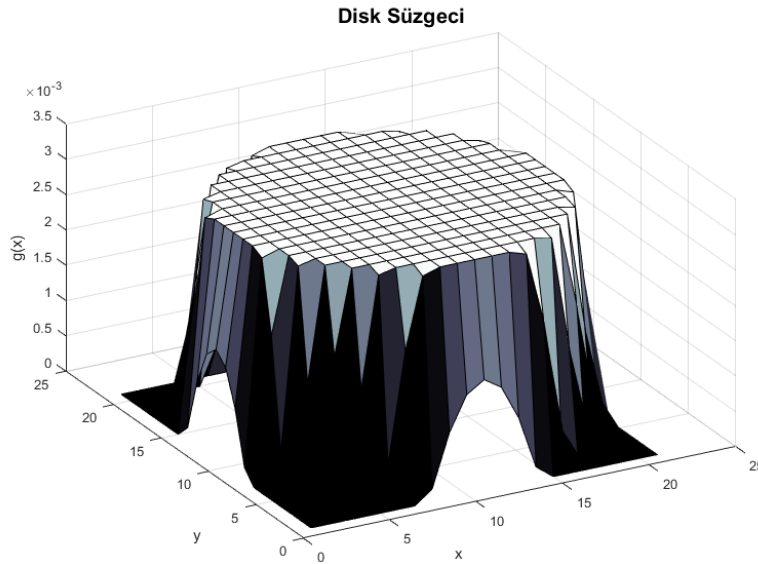
komutu yeterli olacaktır.

3.2.4 Disk süzgeci

Görüntüyü yumuşatma amacıyla pikseller arası ağırlıklandırma yapan dairesel şekilli bir süzgeçtir. Boyutları 5×5 olan disk süzgecinin evrişim çekirdeği gibidir:

$$h = \begin{bmatrix} 0 & 0.0170 & 0.0381 & 0.0170 & 0 \\ 0.0170 & 0.0784 & 0.0796 & 0.0784 & 0.0170 \\ 0.0381 & 0.0796 & 0.0796 & 0.0796 & 0.0381 \\ 0.0170 & 0.0784 & 0.0796 & 0.0784 & 0.0170 \\ 0 & 0.0170 & 0.0381 & 0.0170 & 0 \end{bmatrix}.$$

Şekil 3.8’de disk süzgecinin 3 boyutlu görünümü görülmektedir.



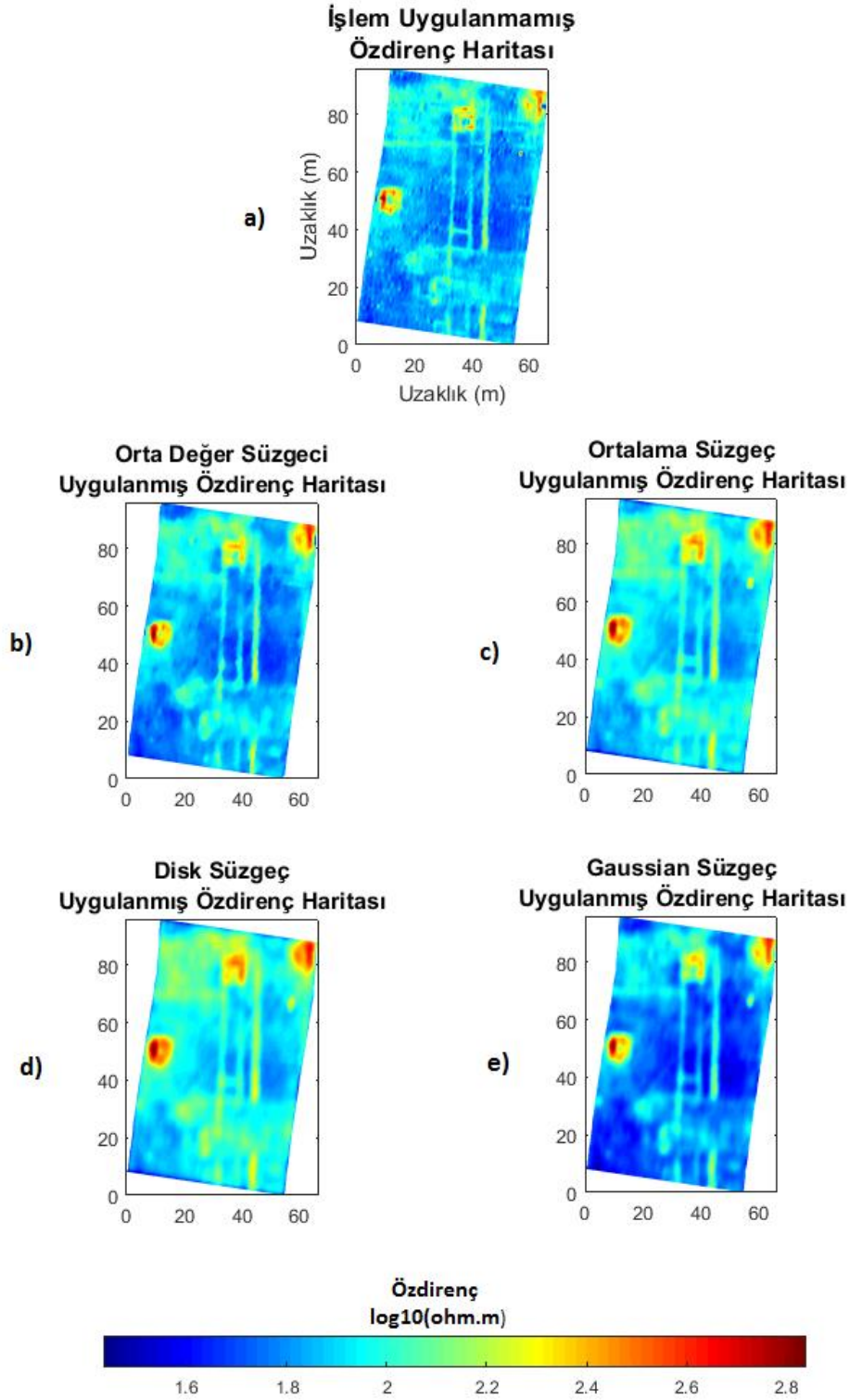
Şekil 3.8 Disk Süzgecinin 3 Boyutlu Görünümü

Şekil 3.9’da ortalama, orta değer ve Gauss süzgeçlerinin Side antik kentinde toplanarak 3B değerlendirilmiş yer elektrik modelinden alınan 0.7m derinliğe ait öz direnç haritasına uygulanması görülmektedir.

Bir görüntüye ya da 2B veri grubuna yarıçapı iki olan (5×5’lik) disk süzgeci uygulamak için, MATLAB programlama dilinde

```
h=fspecial('disk',2)
I_filtered=imfilter(ImageFile,h)
```

komutları kullanılabilir.



Şekil 3.9 Yuvarlatıcı etkili farklı süzgeçlerin özdirenç haritasına uygulanması

3.2.5 Laplacian süzgeci

Bir fonksiyonun Laplacian'ı fonksiyonun uzamsal olarak 2. dereceden türevine karşılık gelir. Laplacian operatörü ∇^2 simgesi ile gösterilir.

$$\nabla^2 f(n_1, n_2) = \frac{\partial^2 f}{\partial n_1^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial n_2^2} \quad (3.3)$$

Laplacian operatörünün ayırık versiyonu ise aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\frac{\partial^2 f}{\partial n_1^2} = f(n_1 + 1, n_2) + f(n_1 - 1, n_2) - 2f(n_1, n_2) \quad (3.4)$$

$$\frac{\partial^2 f}{\partial n_2^2} = f(n_1, n_2 + 1) + f(n_1, n_2 - 1) - 2f(n_1, n_2) \quad (3.5)$$

$$\nabla^2 f(n_1, n_2) = [f(n_1 + 1, n_2) + f(n_1 - 1, n_2) + f(n_1, n_2 + 1) + f(n_1, n_2 - 1) - 4f(n_1, n_2)] \quad (3.6)$$

Laplacian evrişim çekirdeğinin genel hali,

$$h = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & -4 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

evrişim çekirdeğinin diyagonal komşulara genişletilmesiyle,

$$h = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -8 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

elde edilebilir. Laplace süzgeci nesneleri arkaplandan ayıran keskin geçişleri ortaya çıkarmak için kullanılan bir operatördür. Genelde yumuşatıcı bir süzgecin ardından kullanılarak gürültü genliğinin büyümesinin önüne geçilmeye çalışılır.

MATLAB proglamlama dilinde laplacian süzgecin oluşturulup görüntüye uygulanması için,

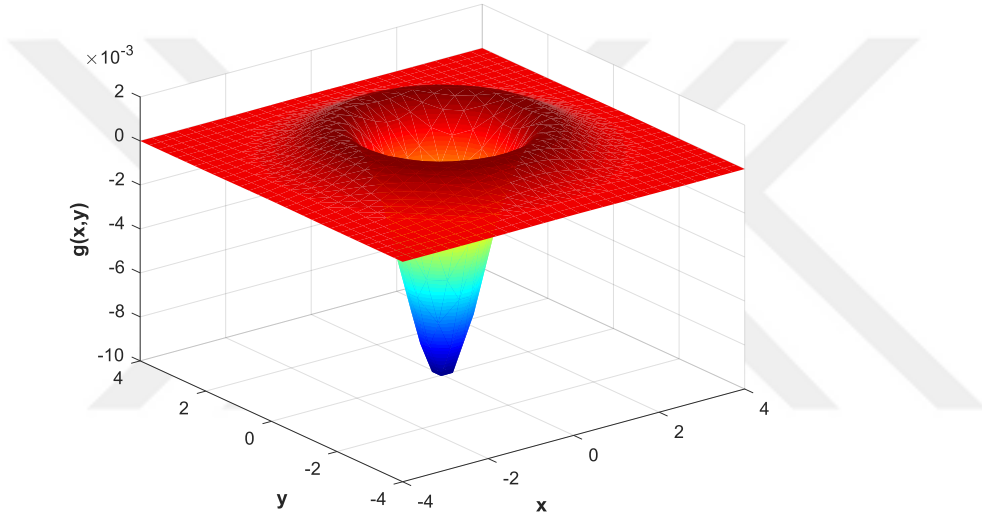
```
h=fspecial('laplacian')
I_filtered=imfilter(ImageFile,h)
```

komutları kullanılabilir.

3.2.6 Laplacian of Gaussian (LoG) süzgeci

Bu süzgeç de keskin geçişleri ortaya çıkarmak için kullanılır, Laplace operatörünün Gaussian fonksiyonuna uygulanmasıyla elde edilir. İki boyutta LoG fonksiyonu, σ standart sapma olmak üzere aşağıdaki gibi verilir. şekil 3.10'de σ değeri 1 alınarak (-4,4) aralığında LoG fonksiyonu çizdirilmiştir.

$$LoG(x,y) = -\frac{1}{\pi\sigma^4} \left[1 - \frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2} \right] e^{-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}} \quad (3.7)$$



şekil 3.10 İki boyutlu LoG fonksiyonu

MATLAB'da LoG süzgecinin oluşturulup görüntüye uygulanması için,

Boyutları 3×3 ve standart sapması $\sigma=0.5$ olan bir LoG evrişim çekirdeğı,

$$h = \begin{bmatrix} 0.4038 & 0.8021 & 0.4038 \\ 0.8021 & -4.8233 & 0.8021 \\ 0.4038 & 0.8021 & 0.4038 \end{bmatrix}$$

şeklinde olup, böyle bir süzgeci MATLAB'da oluşturup bir görüntüye uygulamak için

```
h=fspecial('log',[3 3],0.5);  
I_filtered=imfilter(ImageFile,h);
```

komutları kullanılabilir.

3.2.7 Keskinleştirme (sharpening) süzgeci

Bu süzgeç, orijinal görüntüden görüntüden yumuşatılmış halini çıkararak belirgin kenarların görüntüsünü ortaya çıkarır daha sonra orijinal görüntüyle belirginleştirilmiş kenarların görüntüsü birleştirilerek keskinleşmiş görüntü elde edilir.

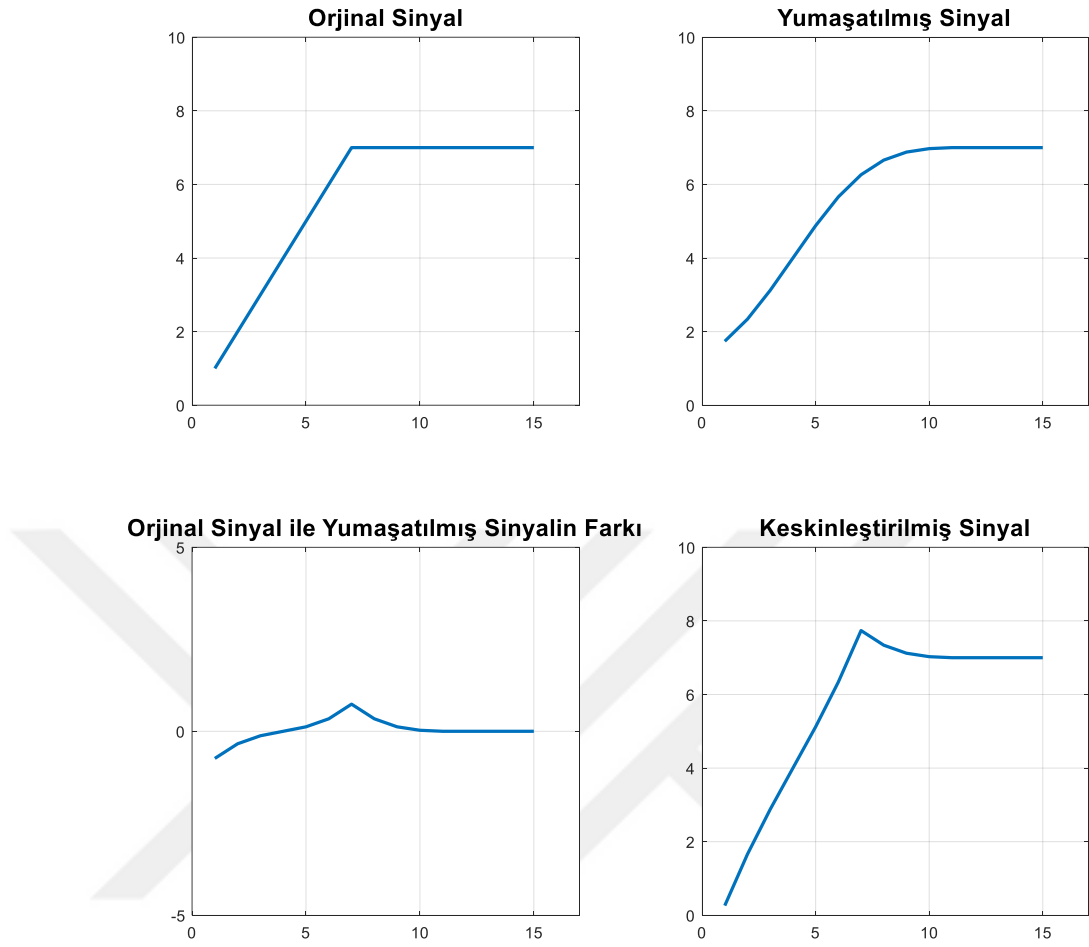
$g(n_1, n_2)$ çıkış görüntüsü, $f(n_1, n_2)$ giriş görüntüsü ve $f_{smooth}(n_1, n_2)$ görüntünün yumuşatılmış hali olmak üzere bu işlem,

$$g(n_1, n_2) = f(n_1, n_2) - f_{smooth}(n_1, n_2) \quad (3.8)$$

$$f_{sharp}(n_1, n_2) = f(n_1, n_2) + k * g(n_1, n_2) \quad (3.9)$$

denklem çiftiyle yürütülür. Burada k ölçekleme sabitidir. Bu sabite atanan değer büyüdükçe keskinleşme miktarı artar. Görüntünün yumuşatılmış halini elde etmek için daha önce tanıtilen ortalama süzgeci veya gauss süzgeci kullanılabilir.

Keskinleştirme süzgecinin nasıl çalıştığını daha iyi anlama için şekil 3.11 incelenebilir. Şekildeki (a) grafiği orijinal sinyelimiz olsun (b)'de alçak geçişli bir süzgeç yardımıyla bu sinyalin yumuşatılmış halini görmekteyiz, (c)' de yumuşatılmış sinyal orijinal sinyalden çıkarılmış, (d)'de ise (c) bileşeni orijinal sinyale eklenerek keskinleşmiş sinyal elde edilmiştir.



řekil 3.11 Keskinleřtirme sűzgecinin alıřması

Keskinleřtirme sűzgecini MATLAB’da uygulamak için,

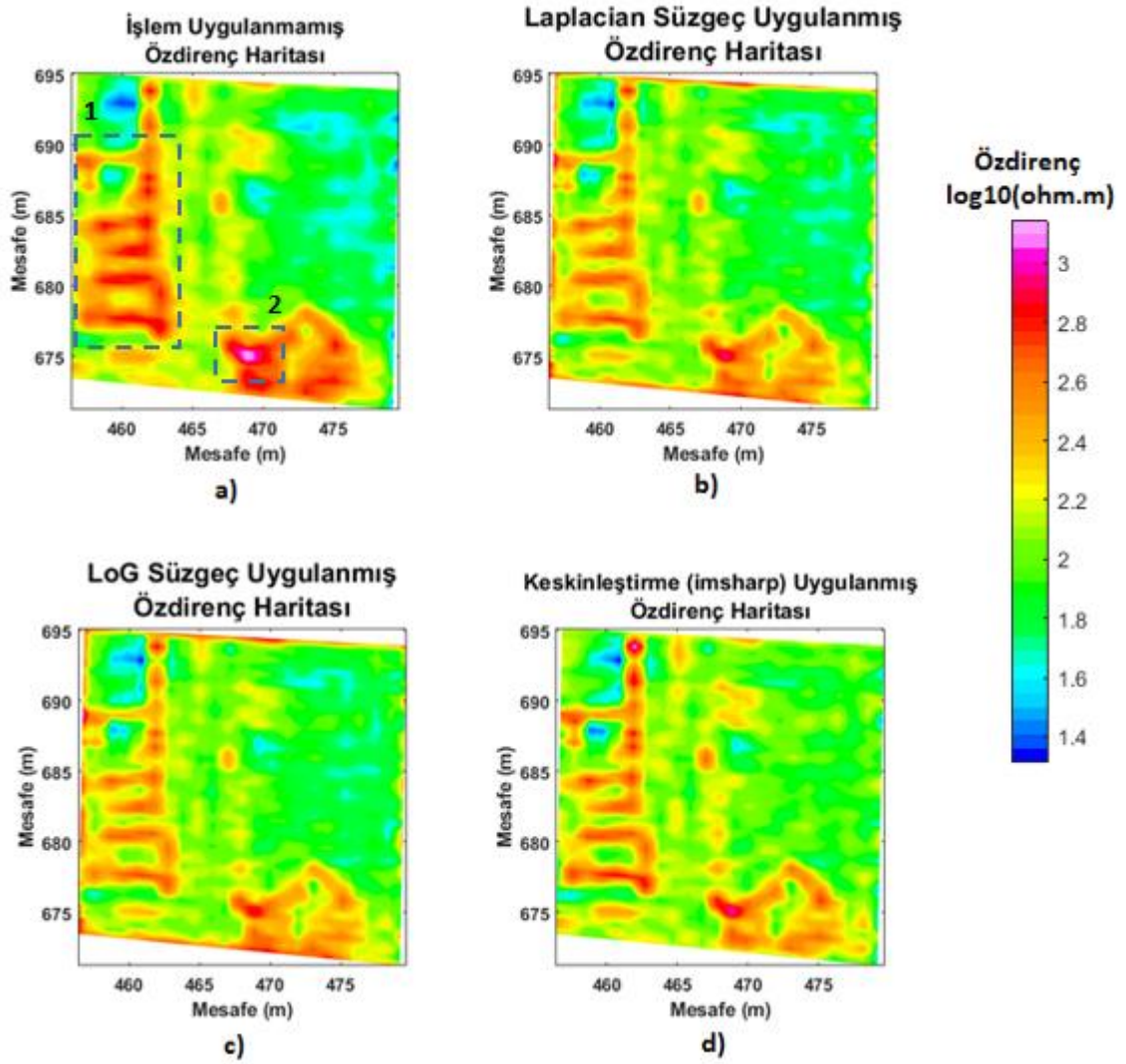
```
I_filtered=imsharpen(ImageFile,'Radius',2,'Amount',2)
```

komutu kullanılabilir. Burada ‘*Radius*’ algoritmanın kullanacağı Gaussian sűzgecinin yarıçapını, ‘*Amount*’ ise keskinleştirme derecesini belirler.

Buraya kadar anlatılan Laplacian, Log ve keskinleřtirme sűzgelerinin bir uygulaması Patara A6 alanında yapılan DAÖ alıřması sonucu elde edilmiř 0.70 m derinliđe ait özdirenç haritaları üzerinde yapılmıřtır (řekil 3.12). Bu sonuçlarda ilk göze çarpan řekil 3.12a ve řekil 3.12b’de gördüğümüz laplacian ve LoG sűzgelerinin ürettiđi sonuçlarda özdirenç haritasının kenarlarına yűksek özdirençli bir çerçevenin gelmiř gibi grűnmesidir. Bunun sebebini açıklayacak olursak; sűzge çekirdeđi ile grűntű dizeyi

(bu örnek için parametre dizeyi) evrişime sokulurken süzgeç çekirdeği görüntü dizeyinin sol üst köşesine yerleştirilir ve görüntü boyunca kaydırılarak ilerlenir, eğer bir düzenleme yapılmamışsa çıkış görüntüsünün boyutları giriş görüntüsünden, kullanılan evrişim çekirdeğinin yarıçapı kadar daha küçük olacaktır. Bunun önüne geçebilmek için genellikle işlemden önce giriş görüntüsünün boyutları genişletilir. Şekil 3.12a ve şekil 3.12b’de bu genişletme dizeyin dış sınırlarına sıfır değerleri ekleyerek yapılmış bu da çıkış görüntüsündeki çerçeveye sebep olmuştur. Şekil 3.12c’de ise genişletme, dizeyin en dışındaki satır ve sütunlar istenilen miktarda kopyalanarak yapılmış dolayısıyla bu etki görülmemiştir.

Her üç süzgeç uygulamasında da şekil 3.12a’da çerçeve içine alınmış 1. Bölge yapı sınırları daha net belli olacak şekilde incelmış ve aynı bölgede alınmış şekil 3.1’deki radar görüntüsüyle daha uyumlu hale gelmiştir. Şekil 3.12a’da çerçeve içine alınmış 2. bölgede ise verinin geri kalanına göre çok daha büyük öz dirençli bir kısım gözlemlenmekte iken süzgeç uygulamaları sonucu bu bölge daha makul değerlere indirgenmiştir.



Şekil 3.12 Keskinleştirme özelliği olan farklı süzgeçlerin jeofizik haritaya uygulanması

3.3 Yerel Olmayan Ortalama (Non-Local Means, NLM) Süzgeci

Görüntü işleme algoritmalarının büyük çoğunluğu, gürültü giderme “denoising” işlemini içermektedir.

$$v(p) = u(p) + n(p) \quad (3.10)$$

Eşitlik 3.10’da $v(p)$ gözlemlenen görüntü elemanı, $u(p)$ orjinal görüntü elemanı ve $n(p)$ gürültüyü göstermektedir. Gürültü gidermede amaç ölçülen veriden (gözlemlenen görüntüden) ölçüm sırasında oluşan istenmeyen etkileri çıkararak orjinaline mümkün olduğunca yakın görüntüyü elde etmektir. Görüntüleri yumuşatma etkili evrişim

süzgeçleri bu amaçla kullanılabilse de görüntüdeki detaylarını yok olmasına sebep olmaları gibi dezavantajları vardır. Bunun sebebi bu süzgeçlerin her pikseli kendi komşulundaki piksellerin ortalaması ile ağırlıklandırarak yeniden hesaplamasıdır. Bu durum gürültüleri giderici etkili olmasına karşın, bu algoritmalar için görüntüdeki yapı sınırları ile gürültüler arasında bir fark yoktur dolayısıyla gürültüler bastırılırken yapı sınırları da bulanıklaşır.

Görüntülere gürültü giderme işlemi uygulanırken Gaussian ve türevleri süzgeçlerin neden olduğu bulanıklaştırma etkisini en aza indirmeyi amaçlayan yöntemlerden biri Baudes (2005) tarafından önerilmiş yerel olmayan ortalamalar (*Non-Local Means, NLM*) süzgeçidir. Süzgecin temel prensibi her giriş pikselini, bütün görüntüdeki, komşuluğu kendi komşuluğuna en yakın olan piksel değerleri ile ağırlıklandırarak bir çıkış pikseli üretmektir. Bu şekilde benzer alanların yeni piksel değerine katkısı daha fazla, aykırı alanların ise daha az olur ve bulanıklaşma etkisi azalır. Bunu daha açık ifade edecek olursak NLM algoritması ile;

- Görüntü boyutları kullanıcı tarafından belirlenen parçalara (*patch*) bölünür. Her parçanın merkezinde görüntünün bir pikseli vardır.
- Bu parçalar, büyüklüğü yine kullanıcı tarafından belirlenecek bir pencere içinde kalan diğer parçalarla kıyaslanarak benzerlikleri ölçülür. Bu benzerliklere göre bir ağırlık dizeyi oluşturulur. Birbirine benzeyen parçalardan gelecek ağırlık katsayıları, dolayısıyla çıkış piksellerinin değerlerinin hesaplanmasına katkıları daha büyük olacaktır.
- Oluşturulan ağırlık dizeyi kullanılarak yeni piksel değerleri hesaplanır.

Matematiksel olarak NLM algoritması, $v = \{v(p) \mid p \in I\}$ olmak üzere

$$NL[v](p) = \sum_{j \in I} w(p, q) v(p) \quad (3.11)$$

denklemleriyle verilir. Burada $\{w(i, j)\}_j$ ağırlık katsayılarını temsil eder ve i ile j pikselleri arasındaki benzerliğe bağlıdır. Ayrıca $0 \leq w(p, q) \leq 1$ ve $\sum_q w(p, q) = 1$ koşulları sağlanmalıdır. Ağırlık katsayılarının hesabı

$$w(p, q) = \frac{1}{C(p)} \exp\left(-\frac{\|v(N_p) - v(N_q)\|_2^2}{h^2}\right) \quad (3.12)$$

denklemleri ile yapılır. Burada $\|v(N_p) - v(N_q)\|_2^2$ iki piksel arasındaki benzerliğin ölçütüdür, N_k , k numaralı pikselin merkezinde olduğu seçilen bir büyüklükteki kare komşuluğu göstermektedir, $\|\cdot\|_2^2$ ise öklidyen uzaklığı belirtir. $C(p)$ normalizasyon parametresidir ve aşağıdaki gibi verilir:

$$C(p) = \sum_q \exp\left(-\frac{\|v(N_p) - v(N_q)\|_2^2}{h^2}\right) \quad (3.13)$$

3.12 ve 3.13 denklemlerindeki h parametresi ise üstel fonksiyonun sönümünü kontrol eder ve süzgeç derecesi görevi alır.

NLM algoritmasının etkisini görmek için Şekil 4.13'e bakılabilir. Algoritma, Side antik kentinde yapılmış DAÖ çalışmalarından elde edilmiş öz direnç haritasına uygulanmıştır. Şekil 3.13a ve şekil 3.13b'de karşılaştırma yapılabilmesi açısından sırasıyla haritanın işlem görmemiş hali Gaussian süzgeç ile yumuşatılmış hali verilmiştir. Şekil 3.13c, Şekil 3.13d' ve Şekil 3.13e'de ise s parametresi kare şeklindeki arama penceresinin boyutunu belirtmek üzere $s = 5$, $s = 25$ ve $s = 51$ için haritanın NLM süzgeç uygulanmış hali görülmektedir. Haritanın bölündüğü parçaların boyutları 5×5 süzgeç derecesi ise 1 olarak seçilmiştir. Parça boyutları ve süzgeç derecesi için farklı değerler denenmiş olmakla birlikte hem hesaplama süresi hem de haritanın orijinalinde bulunan belirtilerin korunması açısından en iyi sonuçlar verilen değerlerle elde edilmiştir. Öncelikle NLM süzgeci ile elde edilmiş sonuçların hepsinde haritanın orijinal haline göre daha temiz görüldüğü açık olmakla birlikte yapı sınırlarının Gaussian süzgece göre daha iyi korunduğu söylenebilir. Arama penceresinin büyüklüğünün sonuca etkisi ile ilgili ise c, d ve e şıkları karşılaştırılabilir. Kırmızı kesik çizgi ile işaretlenmiş olan alanlara dikkat edilirse arama penceresinin büyüklüğü arttıkça buralardaki parlaklığın azaldığı ve orta seviyeli öz dirençli belirtilerin daha iyi seçilebildiği farkedilmektedir. Bunun sebebi küçük bir arama penceresi kullanıldığında bu bölgelerdeki parametre değerlerinin yeni değerleri sadece yakın çevresinde kendilerine benzeyen parametrelerden aldıkları ağırlıklarla oluşturulduğundan bölge tekdüzeleşmiş ve sınırlar belirginsizleşmiştir. Daha geniş arama

pencereleri içinde parametrelerin yeni değerleri hesaplanırken her ne kadar en büyük ağırlıklar kendilerine yakın olan değerlerden gelse de diğer parametrelerden gelen ağırlıklar bölgelerin arkaplana daha yakın olmasını ve içerlerindeki orta öz dirençli belirtilere ait sınırların daha iyi görülmesini sağlamıştır.

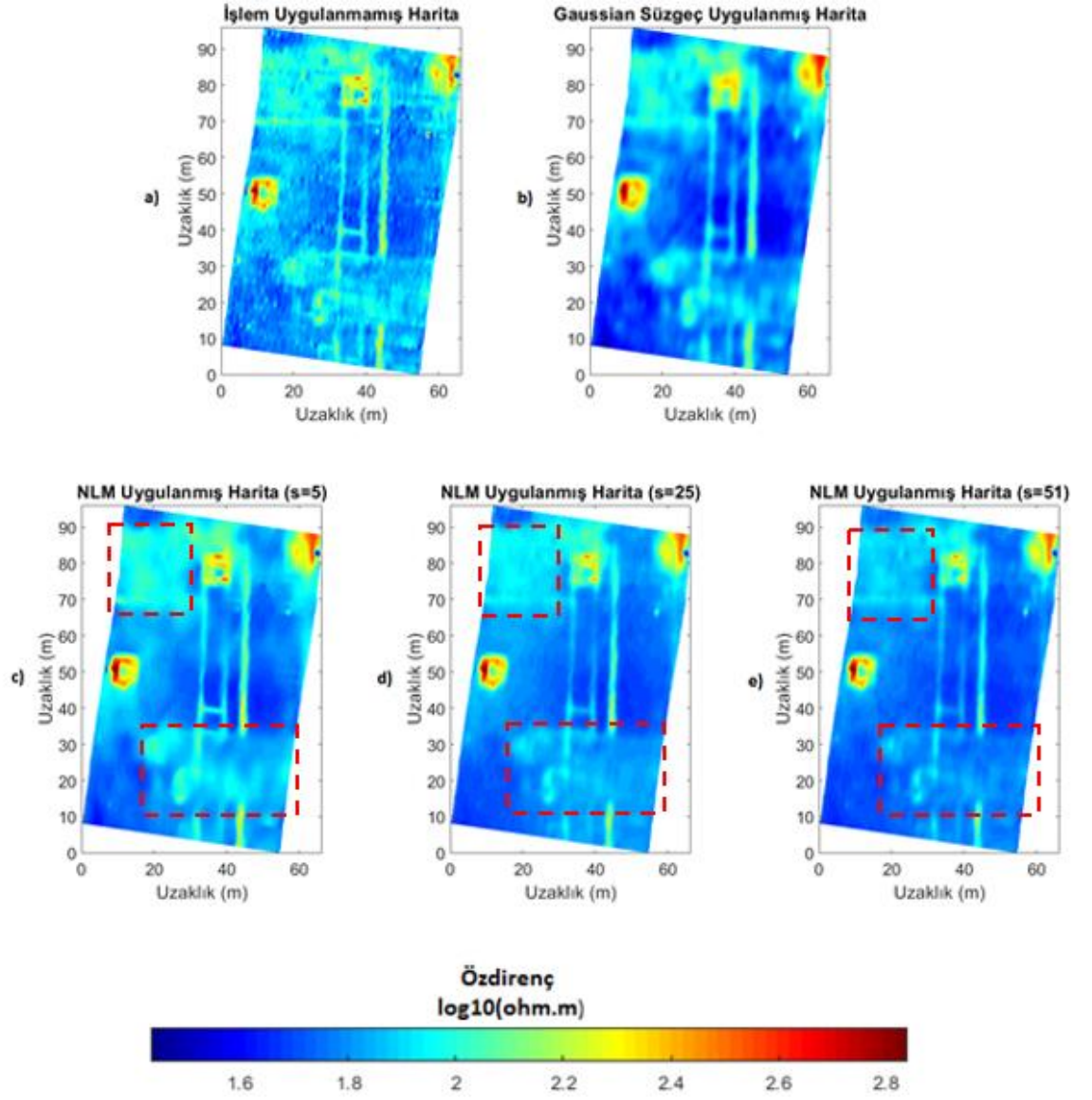
MATLAB görüntü işleme araç kutusu içerisinde NLM süzgeç için de bir fonksiyon bulunmaktadır. Bu fonksiyon I giriş ve J çıkış görüntüsü olmak üzere,

```
J=imnlmfilt(I)
```

komutu kullanılarak varsayılan ayarlarda çalıştırılabilir. Bununla birlikte eğer istenirse görüntünün bölüneceği parçaların boyutu, hangi parçaların birbirleriyle kıyaslanacağını belirleyen arama penceresinin boyutu ve süzgeç derecesi gibi parametreler kullanıcı tarafından ayarlanabilir. örneğin görüntünün 5×5 parçalara bölüneceği arama penceresinin 25×25 piksel boyutlarında ve süzgeç derecesinin 1 olduğu bir süzgeçleme işlemi

```
J=imnlmfilt(I, 'DegreeOfSmoothing', 1, 'SearchWindowSize', 25, ...  
             'ComparisonWindowSize', 5)
```

komutuyla gerçekleştirilebilir.



Şekil 3.13 Özdirenç derinlik haritasının NLM süzgeci ile iyileştirilmesi

3.4 Histogram İşlemleri

Histogram, gruplandırılmış bir veri dağılımının sütun grafiğiyle gösterimidir, bir görüntünün histogramı görüntüdeki renk değerlerinin sayısını gösteren grafikdir. Histogramı matematiksel olarak aşağıdaki gibi gösterebiliriz.

$$h(r_k) = n_k \quad (3.14)$$

r_k : k'ncı parlaklık değeri

n_k : k'inci parlaklık değerinin görüntüdeki sayısı

8 bitlik bir görüntüde 256 parlaklık seviyesi vardır. Eğer tüm değerler küçük bir aralıkta toplanırsa renkleri fark etmek zorlaşır ve görüntünün düşük kontrastlı olduğu söylenir.

Şekil 3.14'de Side verilerinden elde edilen özdirenç derinlik haritası üzerinde görüntü histogramının görüntüye olan etkisi görülebilir. Şekil 3.14a'da Side antik kentinde yapılmış DAÖ çalışmalarından elde edilmiş özdirenç haritasının MATLAB'da `uint8` fonksiyonu kullanılarak 8 bitlik bir görüntüye dönüştürülmüş hali verilmiştir. Şekil 3.14b'de bu görüntüye uniform histogram dengeleme uygulanmıştır. Bu işlem kısaca görüntünün histogram grafiğini yaklaşık olarak düz bir hale getirerek kontrastı artırmayı amaçlar ve MATLAB'da `histeq` fonksiyonu kullanılarak yapılabilir. Sonuçta kontrast artmış olmakla birlikte işlemin bizim açımızdan önem taşıyan belirtileri öne çıkardığı söylenemez. Şekil 3.14c'de görüntünün histogram grafiğini Gaussian fonksiyonuna benzetmek amacıyla piksel değerlerini düzenleyen bir histogramı işlemi uygulanmıştır. Bu işlem de MATLAB'da `adapthisteq` fonksiyonu ile uygulanabilir. Bu işlem sonucunda ara değerler fazlalaşarak görüntünün arkaplanının ve bu arkaplan üzerindeki parlak nesnelerin belirlenmesini zorlaştırmıştır. Son olarak Şekil 3.14d'de kullanıcı tarafından belirlenmiş bir aralıkta histogram düzenlenmesi MATLAB'da `imadjust` fonksiyonu kullanılarak yapılmıştır. Bu fonksiyonun genel kullanım şekli,

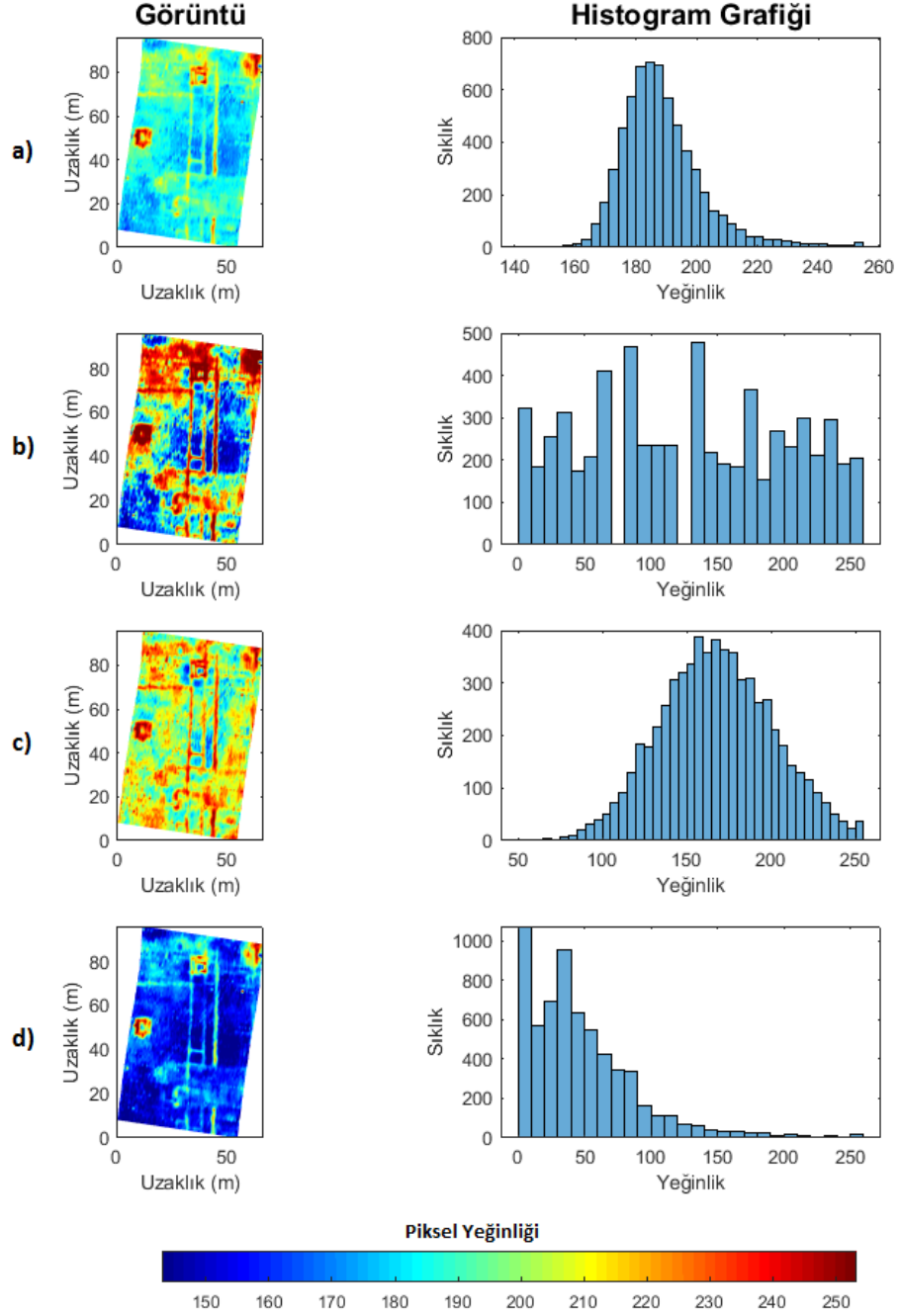
```
J = imadjust(I,[low_in high_in],[low_out high_out])
```

şeklindedir. Fonksiyon elimizdeki görüntünün giriş değer aralıklarını çıkış değer aralıklarına göre ölçeklendirir. Örneğin özdirenç haritasından dönüştürülmüş görüntüde 0-255 arası piksel değerleri varken burada yüksek özdirenç belirtisine karşılık gelen yerlerin ön plana çıkarmak istenildiği düşünülürse, Şekil 3.14d'de ilgilenilen kısımların 175-255 piksel değerleri arasında olduğu varsayılmış ve,

```
J = imadjust(I,[175/255 1],[0 1])
```

kodu kullanılmıştır. Böylece orjinal görüntüdeki 175-255 arasındaki pikseller 0-255 arasına ölçeklenmiştir ve bu sayede görüntünün histogram grafiği sola yaslanırken arkaplan düzenlenmiş ve arkaplan üzerindeki parlak nesnelerin seçilmesi kolaylaşmıştır.

Özdirenç Haritasından Oluşturulmuş

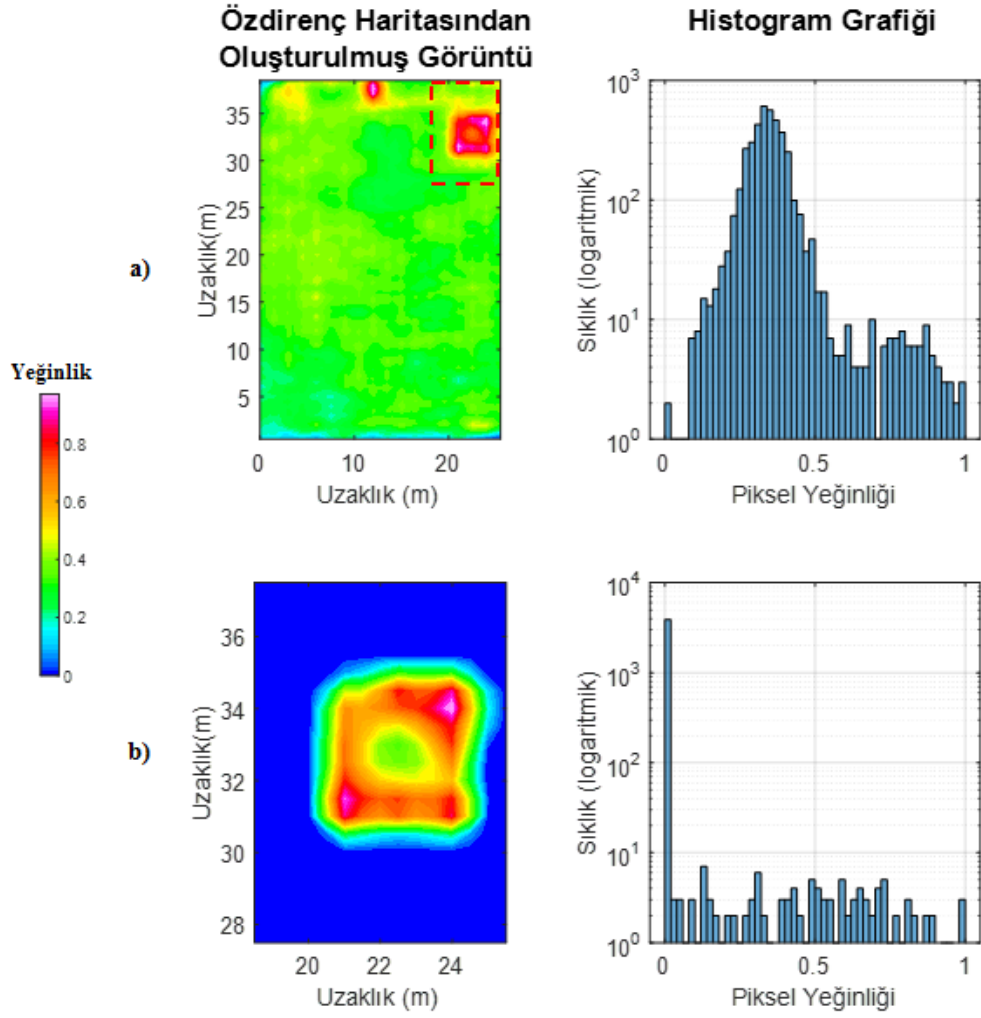


Şekil 3.14 Histogram eşitleme/dengeleme işlemleri ile özdirenç haritalarının iyileştirilmesi a. Orijinal harita b. uniform histogram düzenleme, c. Gaussian histogram düzenleme, d. kullanıcı tarafından ayarlanmış histogram işlemi

MATLAB kütüphanesindeki `imadjust` fonksiyonu kullanılarak histogram düzenleme uygulamasına bir başka örnek Şekil 3.15’de görülmektedir. Burada kullanılan görüntü Patara bölgesinde yapılan DAÖ çalışmaları (Akca, 2018) sonucu elde edilen haritalardan birinin MATLAB’da `mat2gray` fonksiyonu kullanılarak piksel yeğlilikleri 0-1 arasında değişen gri seviye bir görüntüye dönüştürülmesiyle oluşmuştur. Görüntünün oluşturulduğu harita patara antik kentinin agorasında yapılan ölçümlerle elde edilmiştir. Bu bölgede herhangi bir yapı bulunması beklenmezken kontrol amaçlı yapılan bir çalışmada, görüntüden de seçilebileceği gibi yaklaşık $4m^2$ alanında ve 50cm derinliğinde olduğu düşünülen oldukça düzgün geometrili bir yapı olduğu görülmüştür. Daha sonra bölgede gerçekleştirilen kazıda bu belirtinin tam da tahmin edilen boyutlarda ve derinlikte bulunan ve agoranın ortasında anıtsal bir yapının temeli olduğuna kanaat getirilen bir yapı olduğu ortaya çıkmıştır. Elde edilen belirti ile bulunan yapı arasındaki tek fark, yapı içi boş bir kare şeklindeyken Şekil 3.15a’da belirti içi dolu gözükmektedir. Aslında elde edilen belirtide de yapının içi boş olduğu bilgisi bulunmasına karşın görüntünün histogram dağılımı bunun gözle seçilmesine izin vermemektedir. Şekil 3.15b’da, Şekil 3.15a’daki görüntünün kesikli kırmızı çizgi ile işaretlenmiş olan belirtiyi içeren kısmının büyütülmüş ve amaca göre histogramının düzenlenmiş bir hali görülmektedir. Burada yapının içinin boş olduğu net bir şekilde farkedilir. Önceki örnekte olduğu gibi burada da ilgilendiğimiz yapıyı içeren pikseller yüksek yeğlilikli olduğundan 0.55 ve daha küçük yeğlilikli pikseller sıfıra eşitlenip geriye kalan kısım 0 ve 1 arasında ölçeklenerek bu sonuca ulaşılmıştır. Bu işlem için kullanılan MATLAB komutu, J Şekil 3.15b’deki ve I Şekil 3.15a’daki görüntü olmak üzere,

```
J = imadjust(I,[0.55 1],[0 1])
```

şeklinde dir. Görüntülerin histogram grafikleri karşılaştırılırsa işlenmiş olan görüntünün histogram grafiğinde, görüntünün arkaplanını oluşturan sıfır değerli piksellerin en fazla sayıda olduğu, diğer değerlerin ise uniform histogram düzenleme işlemine benzer şekilde grafikteki stunlar yaklaşık düz bir çizgiyi andıracak şekilde düzenlendiği görülebilir.



Şekil 3.15 Görüntü histogramı düzenlenerek bir yapının netleştirilmesi

3.5 Fourier Bölgesinde Görüntü İyileştirme

Fourier Dönüşümü ile bir görüntü; farklı genliklerin, frekansların ve fazların karmaşık üstel ifadelerinin toplamı şeklinde ifade edilir. Giriş görüntüsü uzamsal ortamı temsil ederken Fourier dönüşümü ile frekans ortamına geçer. Fourier dönüşümü, iyileştirme, analiz etme, yeniden oluşturma ve sıkıştırma gibi görüntü işlemenin birçok alanında önemli bir rol oynar. Ayrıca bir görüntünün uzamsal ortamdaki geometrik özelliklerine ulaşmak için Fourier dönüşümü kullanılır. Fourier ortamında görüntü sinüzoidal bileşenlerine ayrıldığı için, görüntüyü belli frekanslar için işlemek ya da analiz etmek kolaylaşır.

Sayısal görüntülerle uğraşıldığı sürece ayrık Fourier dönüşümünden söz edilmesi yeterli olacaktır. Ayrık Fourier dönüşümü, örneklenmiş bir Fourier dönüşümü işlemi olup görüntünün uzamsal bileşenlerini temsil edebilecek kadar frekansı içerir. Frekans sayısı görüntünün uzamsal bileşeninde kullanılan piksel sayısına eşittir.

$N \times N$ boyutundaki bir kare görüntüyle uğraşıldığı düşünülürse bu görüntü için ayrık Fourier dönüşümü

$$F(k, l) = \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} f(i, j) \exp \left(-i2\pi \left(\frac{ki}{N} + \frac{lj}{N} \right) \right) \quad (3.15)$$

ile verilir.

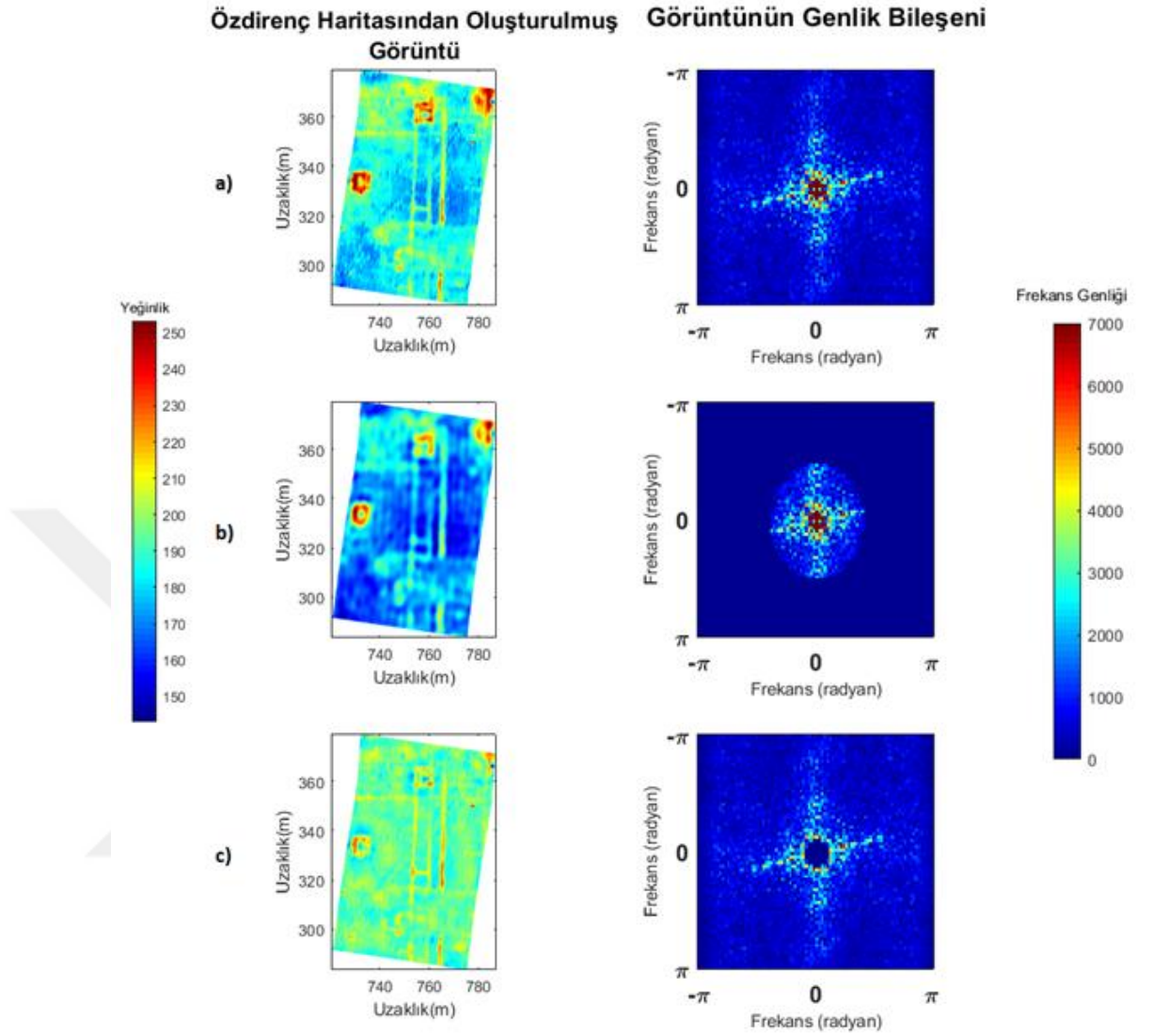
Burada $f(i, j)$ uzamsal ortamdaki görüntüye karşılık gelirken üstel bileşen ise Fourier uzayında $F(k, l)$ noktalarına karşılık gelen temel fonksiyondur. Yani her bir $F(k, l)$ değeri uzamsal görüntünün o noktaya karşılık gelen fonksiyon ile çarpılması ve bu sonuçların toplanması ile elde edilir. Benzer şekilde Fourier dönüşümü alınan bir görüntüyü uzamsal gösterimine geri döndürmek için;

$$f(a, b) = \frac{1}{N^2} \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{l=0}^{N-1} F(k, l) \exp \left(i2\pi \left(\frac{ka}{N} + \frac{lb}{N} \right) \right) \quad (3.16)$$

şeklindeki ters Fourier dönüşümü kullanılabilir. Burada $\frac{1}{N^2}$ terimi, ters dönüşüm için normalizasyon terimidir. Fourier dönüşümü alınmış bir görüntünün sadece genlik spektrumuna bakmak görüntünün uzamsal ortamdaki geometrik özellikleri hakkında bilgi verir. Fourier dönüşümü sonrası genlik spektrumundaki çizgiler ana resimdeki çizgilere diktir. Pikseller arasındaki ani değişimler genlik spektrumunda yüksek frekanslı olaylara karşılık gelmektedir. Piksellerin birbirlerine yakın değer aldığı kısımlar ise genlik spektrumunda düşük frekanslı kısımlara karşılık gelir.

Bir görüntünün Fourier dönüşümü alındığında karmaşık değerli bir çıkış görüntüsü elde edilir. Çıkış görüntüsünden gerçel ve sanal kısımlarından genlik ve faz bileşenleri oluşturulur. Şekil 3.16a'da ilk sütunda daha önceki örneklerde de kullanılan öz direnç haritasının 8 bitlik görüntüye dönüştürülmüş hali görülmektedir. Öncelikle görüntünün ayrık Fourier dönüşümü alınıp daha sonra genlik bileşeni, DC bileşen (görüntü ortalaması, sıfır frekanslı bileşen) şeklin merkezine gelecek şekilde kaydırıldıktan sonra

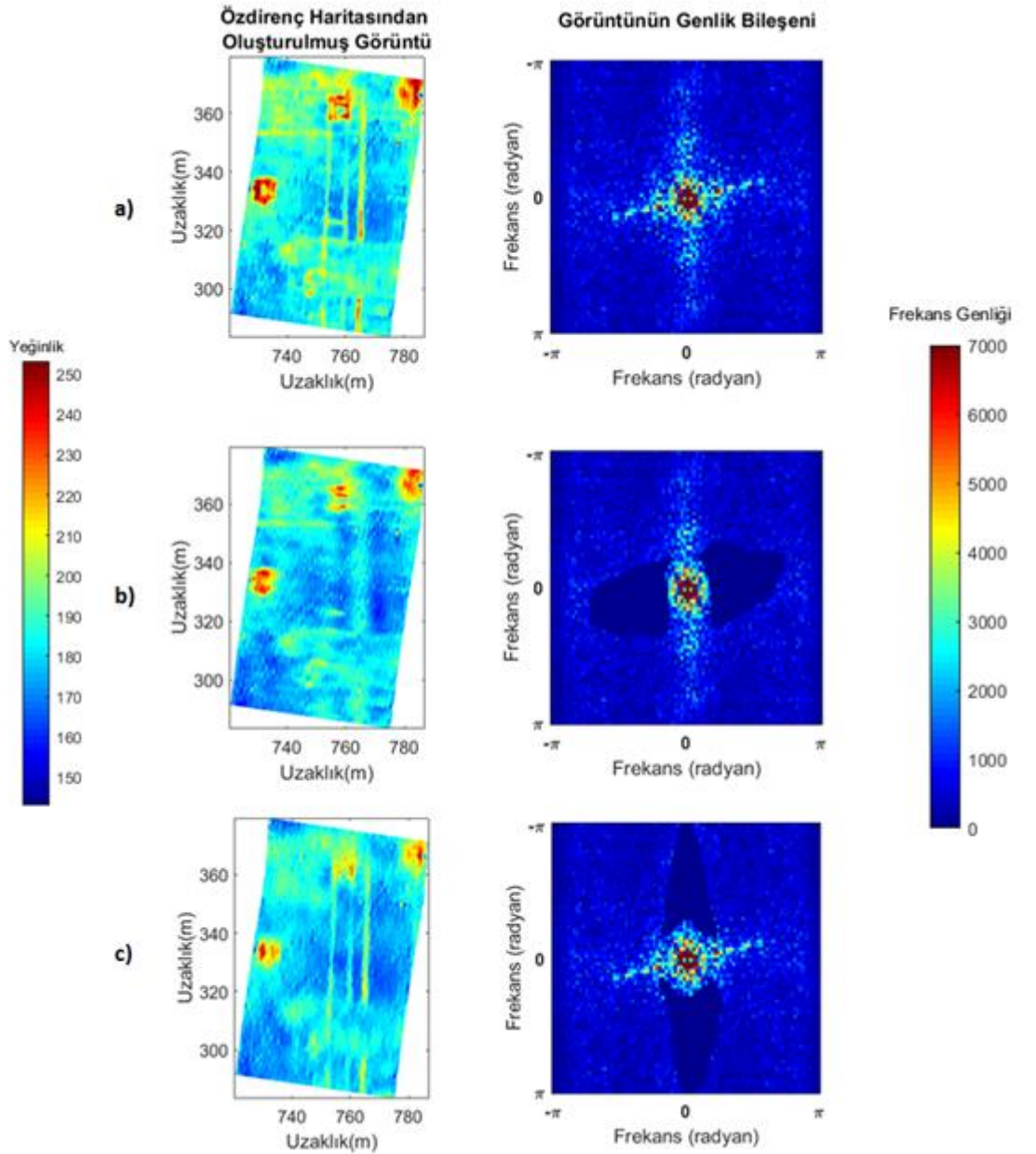
görsellik açısından 0-7000 genlik değerleri arasına ölçeklendirilmiş ve çizdirilmiştir. DC bileşen zamanın tüm anları boyunca değişmeyen sinyaldir, 1B durum için bu doğrusal bir sinyale karşılık gelir. 2B sinyaller yani görüntüler içinse DC bileşen pikseller arası değişimin olmadığı sıfır frekansa karşılık gelir. Genlik bileşenindeki piksellerin parlaklığı o piksele karşılık gelen frekans değerinin genliği ile ilişkilidir. Fourier dönüşümü sonrasında genlik bileşeninin ortasındaki parlaklık ne kadar fazla ise görüntünün arkaplanı o kadar güçlü demektir. Sıfır fazlı bileşen merkezde en parlak değeri alırken merkezden uzaklaştıkça frekans değerleri büyür ve buna karşılık genlik azalır. Bu düşük frekanslı bileşenlerin görüntü ile ilgili daha fazla bilgi içerdiği anlamına gelir. Yüksek frekanslar ise görüntüdeki ince detaylara bir başka deyişle ani değişimlerin olduğu sınır bölgelerine karşılık gelir. Şekil 3.16b'de görüntünün genlik bileşenine alçak geçişli bir süzgeç uygulanmıştır. Süzgecin şekli merkezi genlik bileşeni görüntüsünün merkezine karşılık gelen ve genlik bileşeni elemanlarının %20'sini kapsayacak yarıçapta bir çember olarak seçilmiş ve çemberin içinde kalan frekans değerleri aynen alınırken dışında kalanlar sıfıra eşitlenmiş ve görüntü yeniden oluşturulmuştur. Şekil 3.16b'nin sağ sütununda görüntünün yeniden oluşmuş haline bakılırsa frekans ortamındaki alçak geçişli bir süzgecin uzamsal ortamdaki yumuşatıcı özelliği olan evrişim süzgeçleriyle aynı işi yaptığı görülebilir. Şekil 3.16c'de ise merkezi yine genlik bileşeninin merkezinde olan tüm frekans değerlerinin %5'ini kapsayacak yarıçapta bir çember şeklinde bir süzgeç oluşturulmuş, bu kez bu çemberin içinde kalan frekans değerleri sıfıra eşitlenmiş dışındakiler ise aynen alınarak görüntü yeniden oluşturulmuştur. İkinci sütunda görüntünün yeniden oluşturulmuş haline bakılırsa, atılmış olan düşük frekanslar görüntünün pikselleri arası değişimin az olduğu kısımlarına karşılık geldiğinden görüntünün arkaplanının bozulduğu buna karşılık yüksek frekanslara karşılık gelen yapı sınırlarının belirginleştiği görülebilir.



Şekil 3.16 Bir Görüntüye frekans ortamında b. alçak ve c. yüksek geçişli süzgeçlerin uygulanması

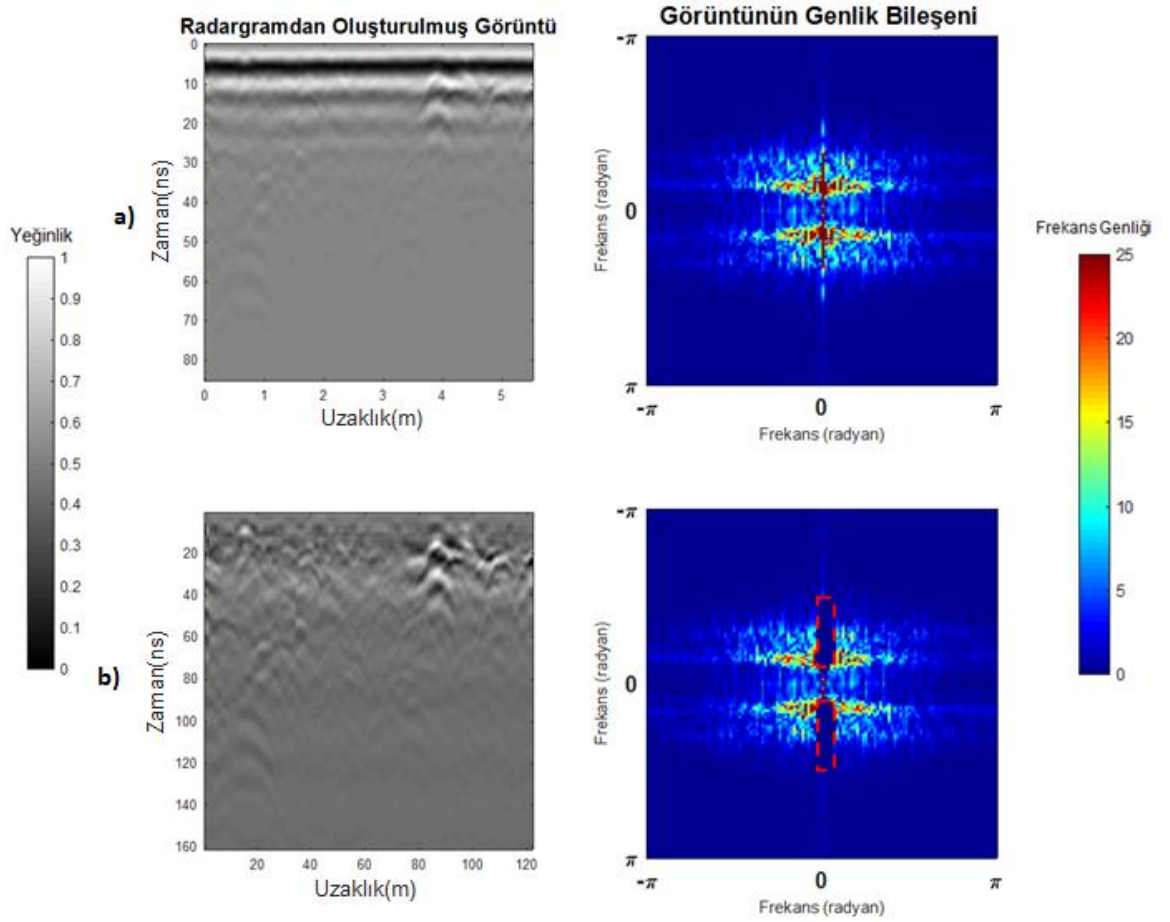
Bu başlık altında vurgulanmak istenen bir başka nokta ise Fourier dönüşümü sonunda elde edilen genlik spektrumu üzerindeki çizgilerin ana görüntüdeki çizgilerle olan bağlantısıdır. Bir görüntüdeki çizgisel yapılar Fourier dönüşümü sonrası elde edilen genlik spektrumunda, gerçek doğrultularına dik olarak DC bileşenin iki yanında birbirine simetrik çizgiler olarak görünürler. Söylenenin daha iyi anlaşılması için şekil 3.17'e bakılabilir. Şeklin birinci kolonunda özdirenç haritasından elde edilen görüntü ikinci kolonunda ise bu görüntüye ait genlik bileşeni görülmektedir. Şekil 3.17a'da işlem uygulanmamış görüntü, şekil 3.17b ve şekil 3.17c'de ise kullanıcı tarafından elle oluşturulan bir süzgeçler yardımıyla genlik bileşeninin değiştirilmesinin görüntüye olan

etkisi incelenebilir. Öncelikle şekil 3.17b’de DC bileşenin sağ ve sol yanındaki frekansların genlikleri sıfıra eşitlenmiş ve beklenildiği gibi bu durum görüntüdeki düşey yapıların ortadan kaybolmasına yol açmıştır. Şekil 3.17c’de ise DC bileşenin alt ve üstündeki çizgiler genlik spektrumundan çıkarılmış ve yine beklentiler doğrultusunda bu işlemin görüntüdeki yatay bileşenlerin kaybolmasına ya da belirsizleşmesine neden olmuştur.



Şekil 3.17 Bir görüntüye frekans ortamında isteğe bağlı şekilleri olan süzgeçlerin uygulanması

Bir başka örnek için şekil 3.18'e bakılabilir. Şekil 3.18a'nın birinci sütununda veri işlem yapılmamış bir radargramdan oluşturulmuş görüntü ikinci sütunda ise bu görüntünün genlik bileşeni bulunmaktadır. Görsellik açısından frekans genlikleri 0-25 arasına ölçeklendirilmiştir. Radargram görüntüsü üzerinde daha önceki bölümlerde değinilen, yer içine girmeden doğrudan kaynaktan alıcıya gelen dalgaların sebep olduğu yatay bileşenlerin özellikle zamanın ilk anlarında ilgilenilen sinyalleri kapattığı gözlemlenmektedir. Görüntüdeki yatay bileşenlerin genlik spektrumunda düşey çizgilere karşılık geldiğini bildiğimizden şekil 3.18b'nin ikinci sütununda görüldüğü gibi görüntünün genlik spektrumundan DC bileşenin alt ve üst kısmında birbirine simetrik, kesikli kırmızı çizgilerle işaretlenmiş dikdörtgensel alanların çıkarılıp (sıfıra eşitlenip), yeni genlik spektrumuyla görüntü tekrar oluşturulduğunda Şekil 3.18b'deki radargram görüntüsü elde edilmektedir. Özellikle yakın zamanlarda (düşük derinliklerde) asıl ilgilendiğimiz sinyalleri görmeyi zorlaştıran yatay bileşenlerin görüntüden çıktığı görülebilir.



Şekil 3.18 Bir radargram görüntüsüne frekans ortamında isteğe bağlı şekilli bir süzgeç uygulanması

Bu bölümde anlatılan uygulamalar MATLAB programlama dili içerisinde oluşturulan bir fonksiyon ile gerçekleştirilmiştir. Bu fonksiyona EK1’de ulaşılabilir ve MATLAB içerisinde çalışılan klasör konumuna kopyalandığında,

```
[FI, F_Mag, F_MagS]=fouriersuzgec(I,suztip,yuzde)
```

komutu ile çalıştırılabilir. I elimizdeki görüntü (ya da parametre dizeyi) olmak üzere *suztip* parametresi için 'AG', 'YG' ve 'IN' seçenekleri vardır. 'AG' seçildiğinde fonksiyon *yuzde* parametresi için girilen 0-100 arası değere göre genlik parametresinin merkezinden başlayarak çember şeklinde bir süzgeç oluşturur ve süzgecin içindeki kalan frekansları alıp dışarıdakileri sıfıra eşitleyerek görüntüyü tekrar oluşturur. Yeni oluşturulan görüntü FI , görüntünün eski genlik bileşeni F_Mag , görüntünün

süzgeçlenmiş genlik bileşeni ise F_{MagS} değişkenlerine çıktı olarak atanır. *suztip* parametresi 'YG' olarak seçildiğinde yine aynı işlemler yapılır, bu kez oluşturulan süzgecin içinde kalan frekanslar atılıp dışında kalan (daha yüksek) frekanslar alınarak görüntü yeniden oluşturulur. 'IN' seçeneğinde ise bir *yuzde* değeri girilmez ve açılan figür ile gelen görüntünün genlik bileşeni üzerinde fare yardımıyla interaktif olarak çıkarılmak istenen kısımlar seçilir. Seçim yapmadan önce farenin sol tuşuna bir kez tıklanması, atılacak alanların seçimi bittiğinde çıktılar almak için ise sağ tuşa bir kez tıklanması gerekmektedir.

3.6 Morfolojik Süzgeçler

Görüntü içerisindeki bölgeleri birbirinden ayırmak, birbirine bağlamak, istenilen yapıları diğer yapı ve bölgelerden ayırt etmek gibi amaçlarla morfolojik süzgeçler kullanılabilir. Morfolojik süzgeçler komşuluk temelli görüntü işlemlerindendir yani işlem sonrasında bir pikselin alacağı değer, pikselin hem kendi değerine hem de komşuluğundaki piksellerin değerlerine bağlıdır. Morfolojik süzgeçler temelde ikili görüntüler için tasarlanmış olsa da 8 bit görüntülere de uygulanabilecek şekilde genişletilmiştir. Bu süzgeçler genel olarak iki temel işlemden türetilmiştir. Bunlar: aşındırma (*erosion*) ve (*genişletme*) işlemleridir.

Genişletme işlemi ile görüntü içindeki nesne sınırları genişler, nesneler arası boşluklar azalır. Böylece görüntüde bulunan bir nesne gürültü sebebiyle birbirinden ayrılmış iki nesne gibi görünüyorsa bunlar birleştirilmiş olur. Aşındırma işlemi ile ise görüntü içerisindeki nesnelerin sınırları daralır ve nesneler arasındaki boşluklar artar, birbirine ince bir gürültü tabakasıyla bağlı olan iki ya da daha nesne ayrılır. Bu işlemler bir yerde birbirlerinin tersi olarak düşünülebilirler, görüntü üzerindeki alanlarda bu işlemlerden birini uyguladığımızda komşu alanlara diğer işlemi uygulamış sayılırız (Çayıroğlu, 2018). İkili bir görüntü için aşındırma işlemi matematiksel olarak

$$A \ominus B = \{z | B_z \subseteq A\}, \quad (3.17)$$

genişletme işlemi ise,

$$\mathbf{A} \oplus \mathbf{B} = \{z | \hat{\mathbf{B}}_z \cap \mathbf{A} \subseteq \mathbf{A}\} \quad (3.18)$$

ile verilir. Burada $\mathbf{A}$ ikili bir görüntü $\mathbf{B}$ kullanılacak yapısal elemanı gösterir. Yapısal eleman boyutları ve şekli kullanıcı tarafından belirlenen mantıksal bir işlemci olup morfolojik süzgecin etkisinin derecesini belirler (Şekil 3.19). 8 bit görüntüler için bu bağıntılar sırasıyla,

$$\mathbf{A} \ominus \mathbf{B}(x, y) = \min \{ \mathbf{A}(x + x', y + y') - \mathbf{B}(x', y') | (x', y') \in D_B \} \quad (3.19)$$

ve

$$\mathbf{A} \oplus \mathbf{B}(x, y) = \max \{ \mathbf{A}(x - x', y - y') - \mathbf{B}(x', y') | (x', y') \in D_B \} \quad (3.20)$$

haline gelir.

1	1	1
1	1	1
1	1	1

0	1	0
1	1	1
0	1	0

1	0	1
0	1	0
1	0	1

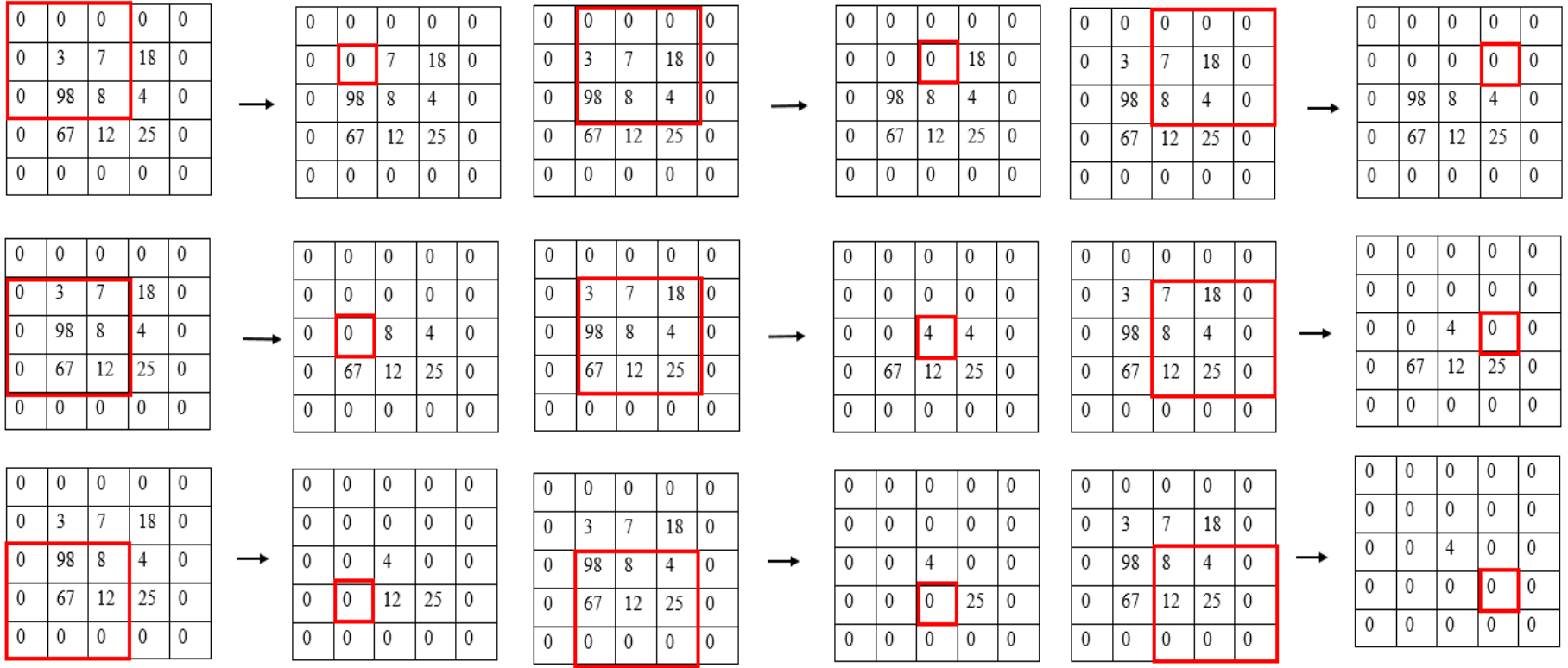
Şekil 3.19 3×3 boyutunda yapısal eleman örnekleri

Görüntülere genişletme ve aşındırma işlemleri yapılırken öncelikle bir yapısal eleman seçilir ve yapısal eleman görüntünün sol üst köşesinden başlanarak sağa doğru kaydırılır. Aşındırma işlemi uygulanıyorsa yapısal elemanın “1” değerlerinin altında kalan piksellerin yeğlilik değerlerine bakılır ve en küçük değer, yapısal elemanın merkezinin altında kalan pikselin değeriyle değiştirilir. Dikkat edilmesi gereken her kaydırmada görüntünün orjinal değerleri üzerinden işlem devam edilmesidir. Eğer yeni piksel değerleri üzerinden devam edilirse piksel değerleri giderek küçülür. Genişletme işleminde ise tam olarak aynı yol izlenir bu kez piksel değerlerinin en büyüğü merkez piksele atanır.

Örneğin şekil 3.19a’daki gibi bir yapısal eleman kullanarak bir görüntü dizeyine aşındırma işlemi yapmak istersek şekil 3.20’deki gibi bir şema izlenir. İlk satırda ilk adımda yapısal elemanın sınırları içerisinde kalan en küçük değer sıfır olduğu için merkez piksele bu değer atanır ve birinci satır boyunca bu devam eder. Dikkat edilirse ikinci satıra

geçildiğinde yeni atanan piksel değerleriyle devam edilecek olsa bütün pikseller sıfır değerini alacaktır bu nedenle görüntünün orjinal değerleri üzerinden işleme devam edilir. İşlem sonunda görüntünün merkezindeki 3×3'lük nesnenin 1×1 boyutuna aşındığı görülebilir.

Genişletme ve aşındırma işlemlerinin görüntüye ardışık olarak uygulanmasıyla açma (*opening*) ve kapama (*closing*) işlemleri gerçekleştirilmiş olur. Açma işleminde önce aşındırma uygulanarak görüntü içindeki nesnelerin kenarları inceltir, ardından genişletme işleme uygulanarak nesneler eskisine yakın boyutlara getirilmeye çalışılır bu sırada görüntünün genelindeki küçük parçalar kaybedilmiş olur. Kapama işleminde ise öncelikle genişletme uygulanarak birbirine yakın alanlar birleştirilir ve aradaki gürültülü alanlar kaybolur. Ancak bu sırada görüntü içindeki nesneler büyümüş olacağından hemen ardından aşındırma işlemi yapılarak bir anlamda ölçeklendirme yapılmış olur.

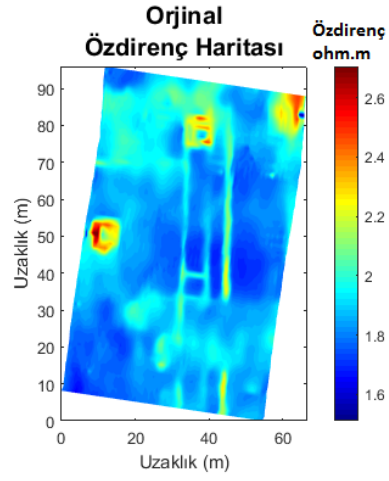


Şekil 3.20 Aşındırma işleminin işleyişinin şematik gösterimi

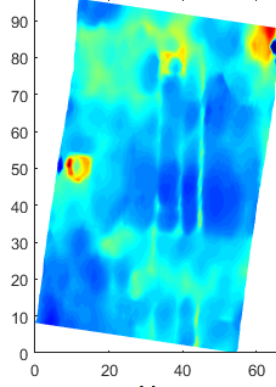
Şekil 3.13’de Side antik kentinde toplanan verilerle oluşturulmuş 0.6 m derinliğine ait öz direnç haritasına NLM süzgeci uygulanarak gürültü giderme uygulaması yapılmıştır. Şekil 3.21a’da ise bu sonuç giriş görüntüsü olarak kullanılarak morfolojik süzgeçler denenmiştir. Şekil 3.21b’de giriş parametrelerine aşındırma işlemi uygulanmış ve beklenacağı gibi bu işlem çevresine göre çok farklı değerli küçük noktaların yok olmasını sağlamış bununla birlikte ortalama öz dirençli alanlar birbirleriyle birleşerek genişlemiş, ince detaylar silinmiş ve yüksek öz dirençli belirtiler incelmıştır. Şekil 3.21c’de genişletme işlemi uygulanmıştır burada da beklentilerle uygun olarak birbirinden belli belirsiz sınırlarla ayrılan orta öz dirençli bölgeler daha da küçülmüş ayrıca yüksek belirti veren yapı sınırları genişleyerek kalınlaşmıştır. Aşındırma ve genişletme işlemlerin ardışık olarak uygulanmasıyla ulaşılan açma işlemi Şekil 3.21d’de görülmektedir . Burada aşınma işlemi ile birbirine birleşmiş orta öz dirençli bölgelerin artık genişletme uygulansa bile tekrar ayrılmadığı görülürken yapı sınırları genişletme işleminin etkisiyle kalınlaşmıştır. Şekil 3.21e’de ise derinlik haritasına kapama işlemi uygulanmış yani önce genişletme sonra aşınma işlemi ardışık olarak uygulanmıştır. Burada da genişletme işlemi ile birbirinden ayrılan orta öz dirençli alanlar aşınmadan sonra tekrar birleşmezken aşınmanın yapı sınırları üzerindeki inceltici özelliği etkili olmuştur.

MATLAB programlama dili kullanılarak bir *I* görüntüsüne aşınma, genişletme, açma ve kapama işlemlerinin uygulanması aşağıda verilen komutlarla gerçekleştirilebilir..

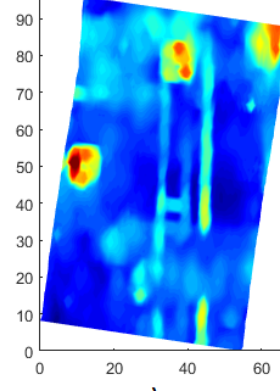
```
se = strel('disk',5) %Yapısal eleman oluşturuluyor
dilatedI = imdilate(I,se); %Genişletme işlemi
erodedI = imerode(I,se); %Aşındırma işlemi
openedI = imdilate(erodedI,se); %Açma İşlemi
closedI = imerode(dilatedI,se); %kapama İşlemi
```



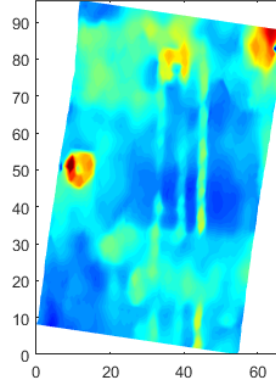
**Aşındırma Uygulanmış
Özdirenç Haritası**



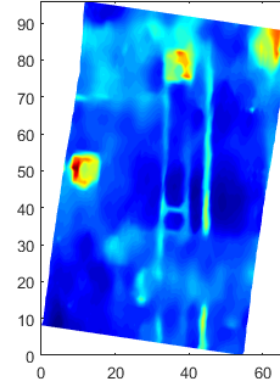
**Genişletme Uygulanmış
Özdirenç Haritası**



**Açma Uygulanmış
(Aşındırma+Genişletme)
Özdirenç Haritası**



**Kapama Uygulanmış
(Genişletme+Aşındırma)
Özdirenç Haritası**



Şekil 3.21 Bir jeofizik haritaya temel morfolojik işlemlerin uygulanması

Bu tez kapsamında değinilecek olan bir başka morfolojik süzgeç ise yine temelde aşınma ve genişletme işlemlerinin birlikte kullanımından türetilmiş olan şapka (*Top-Hat*) süzgecidir. Süzgeç, görüntünün açma uygulanmış halinin görüntünün kendisinden çıkarılması esasına dayanır ve

$$T_{hat}(A) = A - A \ominus B \quad (3.21)$$

bağıntısıyla gösterilebilir. Şapka süzgeci ile arkaplan tekdüzeleştirilirken görüntü üzerindeki parlak nesnelerin iyice belirginleştirilmesi hedeflenir. Şekil 3.22’de önce NLM uygulanarak gürültü giderme yapılmış öz direnç haritasına top-hat süzgeç uygulandıktan sonraki hali görülmektedir. Görüldüğü gibi arkaplan oldukça koyulaşmış arkaplan üzerindeki noktasal ve çizgisel belirtiler iyice belirgin hale gelmiştir. Burada NLM süzgecin parça boyutları 5×5, süzgeç derecesi 1, arama penceresi boyutu ise 5×5 olarak seçilmiştir. Daha önce değinildiği gibi NLM süzgecin arama penceresinin boyutunun artırılması arkaplanın daha iyi düzenlenmesini sağlasa da burada top-hat filter ile arkaplandaki yayılmalar temizleneceğinden NLM için seçilen arkaplan boyutu yeterli olmuştur.

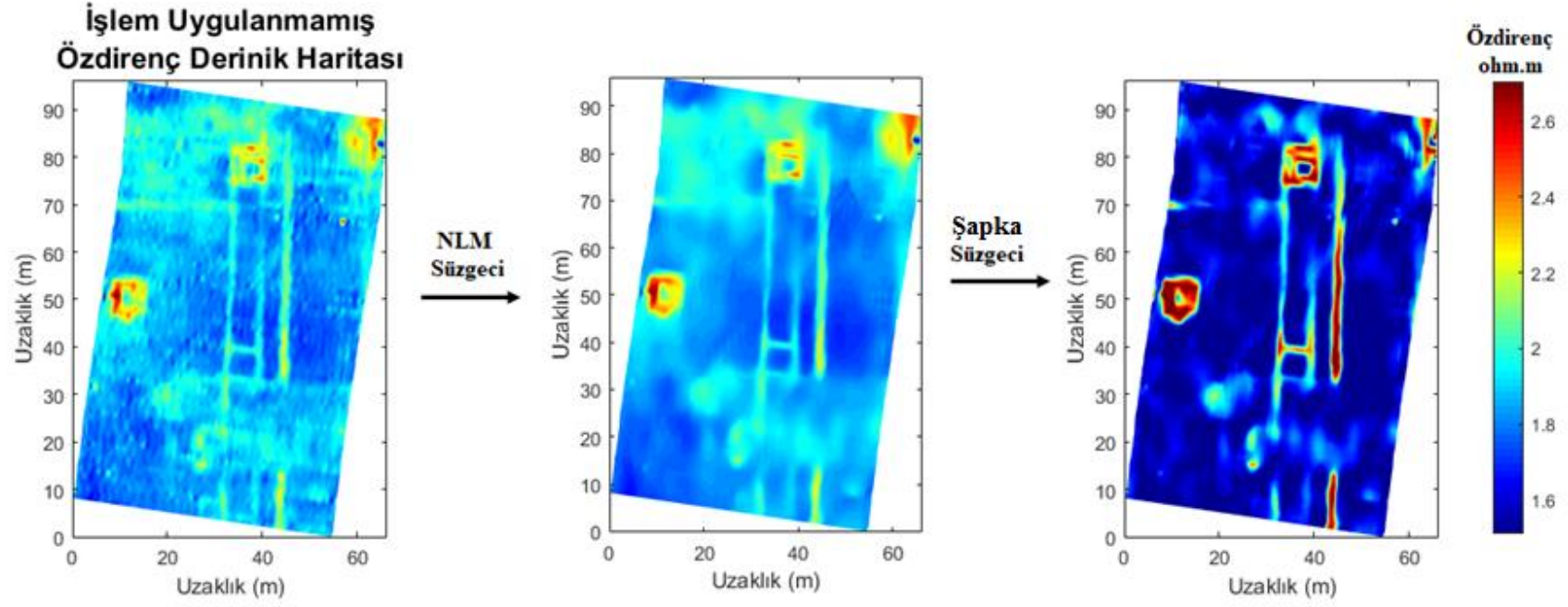
Şapka süzgecini MATLAB proglama dili içerisinde uygulamak için,

```
se = strel('disk',5) %Yapısal eleman oluşturuluyor
erodedI = imerode(I,se); %Aşındırma işlemi
openedI = imdilate(erodedI,se); %Açma işlemi
tophatI=(I-openedI);%Top-hat süzgeci
```

komut dizisi kullanılabileceği gibi,

```
se = strel('disk',5)
tophatFiltered = imtophat(I,se)
```

satırları da tercih edilebilir.



Şekil 3.22 Bir jeofizik haritaya NLM süzgeci ile şapka süzgecinin ardışık olarak uygulanması

4. DAÖ VERİLERİNİN ÜÇ-BOYUTLU TERS ÇÖZÜMÜNDE GÖRÜNTÜ İŞLEME İŞLEÇLERİ

4.1 SSIM-Kısıtlı Üç-Boyutlu Ters Çözüm

İkinci bölümde anlatılan düzenlenmiş ters çözüm için, görüntü işleme temelli yeni bir yöntem önerilmiştir. Buna göre öz direnç parametresine bağlı olma zorunluluğu bulunmadan bir referans model tanımlamak olanaklı hale gelecektir. Bu sayede yorumcu farklı bir yöntemde elde ettiği bulguları da ters çözümü kısıtlamak için kullanabilecektir. Bu çalışmada elektrik öz direnç modeli yer radarından (GPR) elde edilen görece daha yüksek çözünürlükte yer altı görüntüleri kullanılarak kısıtlanmıştır. Kullanılan yöntem birbirinden farklı fiziksel parametreye duyarlı iki yöntemden elde edilen bulguların yapısal benzerlik indeksinin hesaplanması üzerine kuruludur. Yöntem Wang ve diğ. (2004) tarafından önerilen yapısal benzerlik indeksi (structural similarity index, SSIM) aracından esinlenilerek geliştirilmiştir. Yapısal benzerlik indeksi bozulmamış ve mükemmel kalitede olduğu kabul edilen referans bir görüntü ile başka bir görüntünün karşılaştırılarak, incelenen görüntünün kalitesinin değerlendirilmesi amacıyla tasarlanmıştır. Bu çalışmada bozulmamış iyi kalitede olduğu düşünülen referans görüntü yer radarından elde edilen derinlik kesitleri olarak belirlenmiştir. Her ne kadar yer için mükemmel bir görüntüsünü vermese de yer radarının DAÖ yöntemi ile karşılaştırıldığında daha yüksek çözünürlük sağladığı açıktır. Bu nedenle uygun referans görüntüsü olarak kullanılabileceği düşünülmüştür.

Görüntü işleme ve kalite değerlendirme algoritmaları sayısal görüntüler üzerinde çalışmaktadır. Bu nedenle yapısal benzerlik indeksine geçmeden önce sayısal görüntünün ne olduğunu açıklamak yararlı olacaktır. Gonzalez (2018) sayısal görüntüyü şu şekilde tanımlamaktadır: her birinin belirli aralıkta değişen yeğirliği olan ve piksel olarak adlandırılan resim elemanlarından oluşan, gri veya RGB benzeri renk tonlamaları ile betimlenen, her bir pikselin x- ve y- koordinatları ile konumlandırıldığı görüntülerdir. Jeofizik verilerin değerlendirilmesi ile elde edilen sonuçlar belirli bir fiziksel parametrenin konumsal dağılımını göstermektedir. Bunlar bir-, iki- veya üç-boyutlu kavramsal modeller ile sunulmaktadır. İki ve üç-boyutlu sonuçlar raporlanırken genellikle bir renk ölçeği (*colormap*) dahilinde renk kodlamalı grafikler olarak sunulurlar. Başta

yapısal benzerlik indeksi olmak üzere görüntü işleme araçlarının bu tür kesit ve haritalar üzerinde kullanılabilmesi için birer sayısal görüntüye dönüştürülmeleri gerekir. SSIM-indeksi farklı iki görüntünün karşılaştırılması temelinde yürütüldüğünden farklı fiziksel parametrelerin dağılımını gösteren jeofizik kesit veya haritalar aynı dinamik yeğinlik aralığı için sayısal görüntüye dönüştürülmelidir (örneğin 0-255). Bu tez çalışmasında sayısal hesaplama ve uygulamalar MATLAB programlama dili kullanılarak yapıldığından anılan dönüştürme işlemi için `mat2gray` veya `rescale` fonksiyonları kullanılabilir.

4.1.1 Yapısal benzerlik indeksi (SSIM)

Yapısal benzerlik indeksi (SSIM) istatistik temelli bir görüntü kalitesi değerlendirme aracıdır. Aynı dinamik yeğinlik aralığı için üretilmiş x ve y görüntüleri arasındaki yapısal benzerlik indeksi

$$SSIM(x, y) = [l(x, y)]^\alpha \cdot [c(x, y)]^\beta \cdot [s(x, y)]^\gamma \quad (4.1)$$

şeklinde verilir. Burada α , β ve γ sıfırdan büyük katsayılar olup sırasıyla ışıltama (l , *luminescence*), karşıtlık (c , *contrast*) ve yapı (s , *structure*) bileşenlerinin katkılarını belirler. Karşılaştırma yapılan görüntüler için SSIM indeksinin üç bileşeni aşağıdaki şekilde hesaplanabilir:

$$l(x, y) = \frac{2\mu_x\mu_y + C_1}{\mu_x^2 + \mu_y^2 + C_1}, \quad (4.2)$$

$$c(x, y) = \frac{2\sigma_x\sigma_y + C_2}{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + C_2} \text{ ve} \quad (4.3)$$

$$s(x, y) = \frac{2\sigma_{xy} + C_3}{\sigma_x\sigma_y + C_3}. \quad (4.4)$$

Bu denklemlerde σ ve μ karşılık gelen görüntünün standart sapması ve ortalamasını, σ_{xy} ise iki görüntünün ortak değişintisini göstermektedir. Görüntülerin ortak değişintisi:

$$\sigma_{xy} = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu_x)(y_i - \mu_y) \quad (4.5)$$

bağıntısı ile hesaplanabilir. Denklem 4.2, 4.3 ve 4.4'deki C_1 , C_2 ve C_3 sabitleri paydanın sıfıra yakın bir değer olması durumunda ortaya çıkacak duraysızlıkları önlemek için kullanılan sabitlerdir. Bu sabitlerin değeri görüntülerin dinamik aralığının karesine bağlı sabitlerdir. Bu çalışmada görüntüler 0-1 aralığında kodlandığından bu katsayılar oldukça küçük sayılardır. Wang vd. (2004) tarafından verilen bağıntılar kullanılarak bu katsayılar sırasıyla $1e-04$, $9e-04$ ve $4.5e-04$ olarak hesaplanmış ve kullanılmıştır. SSIM indeksinin alabileceği en büyük değer 1 olup yalnızca karşılaştırılan iki görüntünün bir birinin aynı olması durumunda elde edilir ($x = y$). Denklem 4.1 hesaplandığında iki görüntünün yapısal benzerliğine dayalı bir $SSIM \leq 1$ koşulunu sağlayan kalite katsayısı elde edilir. Burada verilen bilgiler SSIM indeksinin bir model kısıtı tasarlanmasında kullanımı için yeterli olup daha ayrıntılı bilgiler için Wang vd. (2004)'e bakılabilir. Bundan sonraki bölümde SSIM indeksinin ters çözümde bir kısıt tanımlamak üzere kullanımına değinilecektir.

4.1.2 Yapısal benzerlik kısıtının ters-çözüme katılması

Doğru akım öz direnç verilerinin üç-boyutlu yinelemeli ters-çözümünde parametrelere yapılacak düzeltmeler 2.10 bağıntısı ile verilmişti. Bu bağıntıda $\mathbf{m}_{ref}$ model parametrelerini kısıtlamak üzere tanımlanmış bir referans modelini göstermektedir. Bu işlem ayrıca ters-çözüme bir önsel bilginin (*a priori* information) eklenmesi yoluyla duraylılaştırılması anlamına da gelir. Kendisinden önceki tanımlamalar ile birlikte yinelemeli ters çözüm algoritmasından hesaplanan model parametreleri ($\mathbf{m}_k$) ile referans modeli ($\mathbf{m}_{ref}$) arasındaki farkı dereceli olarak düşürmesi beklenir. Bu sayede son adımda elde edilen modelin referans modele benzemesi sağlanabilir. Bu aşamada ters çözümü kısıtlamak için bir referans model kullanma anlayışına bağlı kalarak Denklem 2.10 aşağıdaki şekilde düzenlenebilir:

$$(\mathbf{J}^T \mathbf{W}_d^T \mathbf{W}_d \mathbf{J}^T + \alpha \mathbf{W}_p^T \mathbf{W}_p) \Delta \mathbf{m}_k = \mathbf{J}^T \mathbf{W}_d^T \mathbf{W}_d \Delta \mathbf{d} - \alpha \mathbf{W}_p^T \mathbf{W}_p \mathbf{m}_k [1 - SSIM(m_{res}, m_{gpr})]. \quad (4.6)$$

Burada m_{res} ve m_{gpr} sırasıyla derinlik haritaları şeklinde düzenlenmiş öz direnç ve yer radarı görüntüleri olup gri tonlamalı sayısal görüntülerdir. SSIM fonksiyonunun tanımı gereği en büyük değeri 1 olduğundan her iki görüntünün aynı olması durumunda 4.6

denkleminin son terimi sıfır olacaktır. SSIM indeksinin sıfır olması durumunda ise köşeli parantez içindeki bölüm 1 değerini alacaktır.

Denklem 4.6'nın işletilebilmesi için her bir elektrik öz direnç model parametresi için bir adet SSIM indeksine gerek vardır. Ancak, 4.1 denklemi, karşılaştırılan görüntülerin yapısal benzerlik indeksi için yalnızca bir adet değer üretmektedir. Bu yüzden SSIM indeksi her bir model hücresi (görüntü pikseli) için yerel olarak hesaplanabilir. Bu işlem ilgili model parametresinin belirli bir çaptaki komşuluğu dikkate alınarak 4.2, 4.3, 4.4 ve 4.5 denklemleri ile verilen istatistiksel büyüklüklerin yerel olarak hesaplanması ve 4.1 denkleminde yerine yazılması ile gerçekleştirilebilir. Örneğin, 5×5 boyutlarındaki bir pencere kullanılarak bir derinlik diliminin içerisindeki tüm model parametreleri için SSIM indeksi hesaplanabilir. Daha büyük bir komşuluk çapı kullanılması durumunda, istatistiksel hesaplamalara katılacak piksel sayısı artacağından, oluşacak SSIM indeks haritasının daha yumuşak olacağı açıktır. Yer radarı ve elektrik öz direnç kesitlerinin düzeyde genel bir benzerlik göstermediği düşüncesi ile karşılaştırma derinlik haritaları üzerinde gerçekleştirilmiştir.

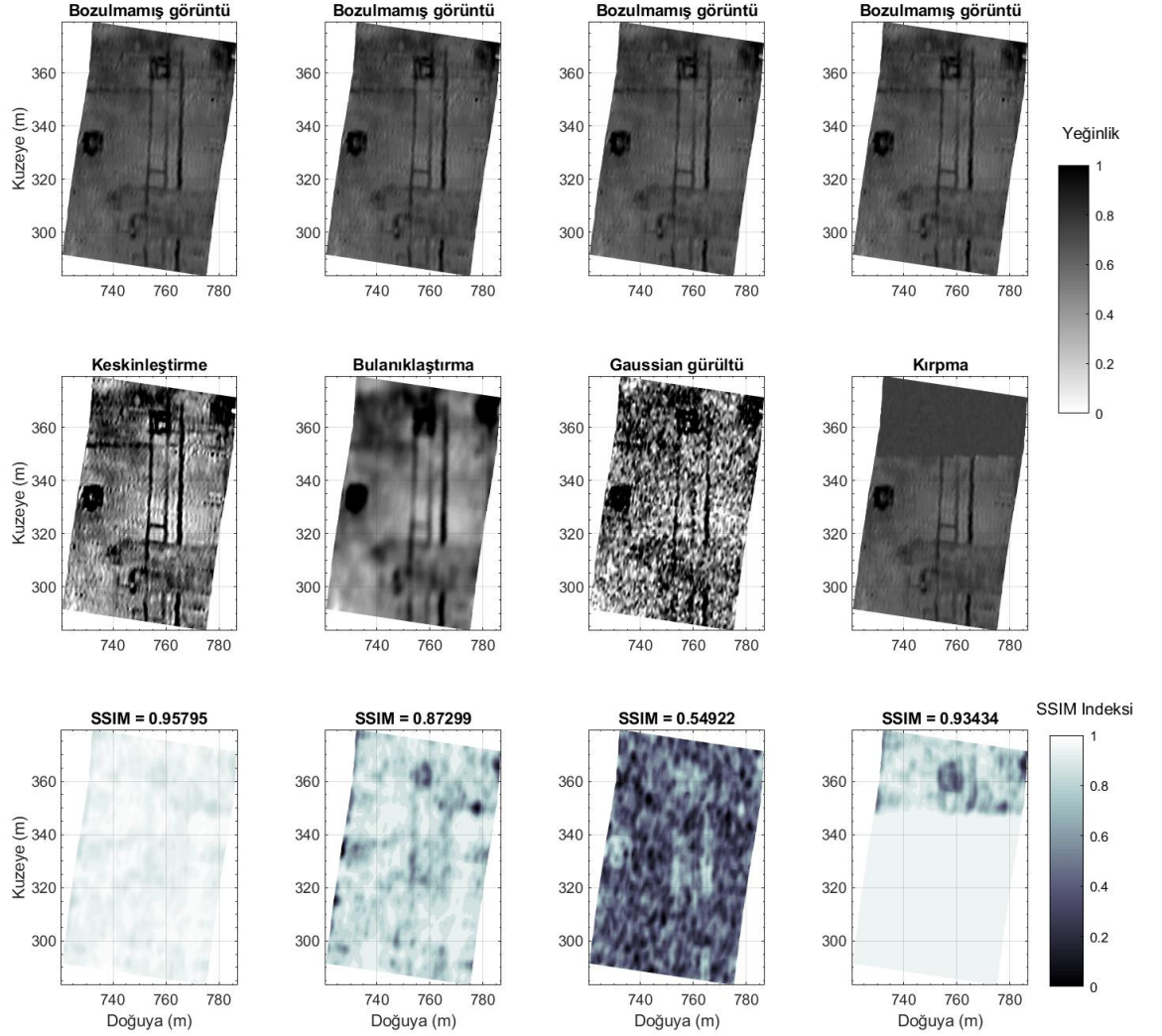
Denklem 4.1 ile verilen SSIM indeksi MATLAB görüntü işleme araç kutusunda bulunan `ssim` fonksiyonu ile hesaplanabilir. Bu fonksiyon bağıntılarda verilen tüm sabit ve değişkenleri dikkate almakta, yerel ve global indeks değerlerini vermektedir. Fonksiyonun örnek kullanımı aşağıdaki gibidir:

```
[SSIM, val]=ssim(m_i,mref_i,'Exponents',[1 1 1],'Radius',2)
```

Ancak hesaplamalarda kullanılan bağıntılar oldukça sade olduğundan aynı işlevi yerine getiren bir fonksiyon kolayca yazılabilir.

Buraya kadar anlatılan işlemlerin daha kolay anlaşılabilmesi için bir uygulama yapılması yerinde olacaktır. Bu amaçla daha önce yayınlanmış ve arkeolojik kalıntıların yer altındaki durumunu ortaya koymayı amaçlayan bir çalışmada (Akca vd. 2019) elde edilen veri kümesi yeniden değerlendirilmiştir. Side antik kentinde bulunan 60 m × 90 m boyutlarında bir alanda gerçekleştirilen ölçümlerden elde edilen DAÖ verileri yuvarlatıcı kısıtlı üç-boyutlu ters çözüm ile değerlendirilmiştir. Önceki çalışmadan farklı olarak ardışık elektrotlar arasına 2 model hücresi yerleştirilerek daha sık bir model ağı oluşturulmuştur. Son yineleme adımı elde edilen modelin 0.6 m derinliğine ait

özdirenç dağılım haritası alınarak SSIM indeks hesaplamalarında kullanılmıştır (Şekil 4.1 ilk satır). Önceki bölümlerde değinildiği üzere özdirenç değerlerini gösteren düzey mat2gray fonksiyonu kullanılarak gri tonlamalı sayısal bir görüntüye çevrilmiştir.

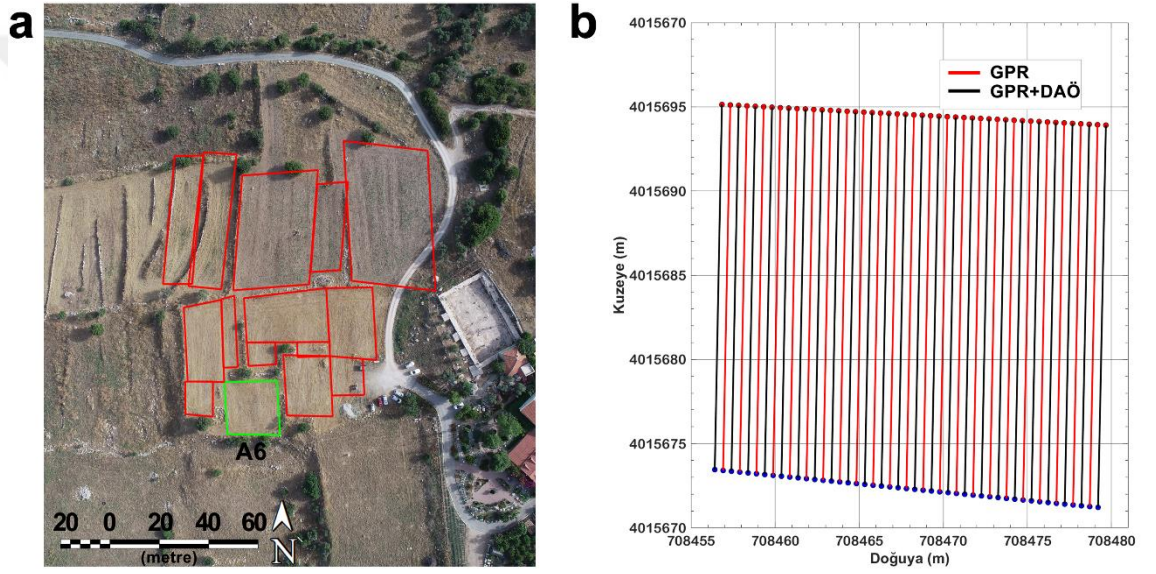


Şekil 4.1 Birinci satırda verilen özdirenç dağılım haritasının yapay olarak değiştirilmiş versiyonları (ikinci satır) SSIM indeks fonksiyonu kullanılarak elde edilen yapısal benzerlik haritası (üçüncü satır)

4.1.3 Arazi çalışması örneği 1: Patara antik kentinden veri kümeleri

Doğru akım özdirenç verilerinin SSIM-kısıtlı üç-boyutlu ters-çözümü algoritmasında referans model tanımlamak için ikinci yöntem olarak yer radarı seçilmiştir. Bu nedenle yöntemin arazi verileri üzerindeki uygulamasının gösterilebilmesi için aynı alanda her iki yöntem ile de veri toplanmış olması gereklidir. Bu koşulu sağlayan iki örnek alandan ilki

Antalya ili Kaş ilçesi Gelemiş Mahallesi yakınlarında bulunan Patara antik kentinde bulunmaktadır. Çalışma alanında yapılan kapsamlı jeofizik çalışmalardan A6 adıyla adlandırılan bölgenin DAÖ ve GPR verileri, burada sunulan ters-çözüm yöntemini sınamak amacıyla kullanılmıştır (Kaya ve diğ. 2018). Çalışma alanı 22 m × 22 m boyutlarında olup Şekil 4.2a'da yeşil çerçeveye işaretlenmiştir. Bu alanda DAÖ ve GPR ölçümlerinin yapıldığı hatların konumları ise Şekil 4.2b'de verilmiştir. Buna göre yaklaşık kuzey-güney doğrultulu hatlar üzerinde DAÖ verileri 1m profil ve 1m elektrot aralığı ile GPR ölçümleri ise 0.5 m profil aralığı ile ölçülmüştür. Bu sayede ardışık her iki GPR hattından biri DAÖ hattı ile çakışmaktadır.



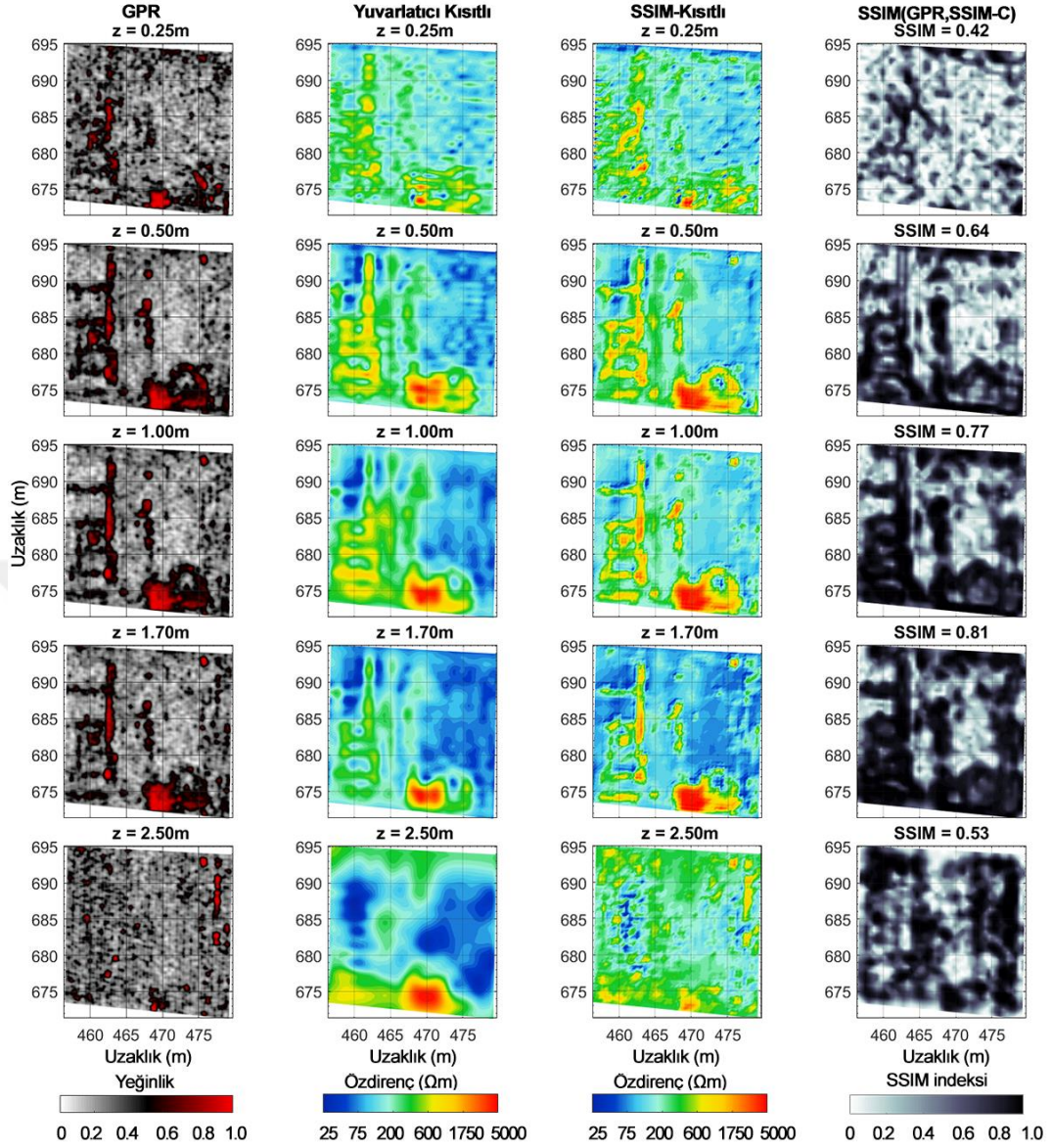
Şekil 4.2 a. A6 alanının Patara antik kentinde yürütülen çalışmalardaki yeri (yeşil çerçeve) ve b. ölçüm hatlarının konumu

GPR ölçümlerinde 500 MHz frekansında çalışan kapalı bir anten sistemi kullanılmıştır. Veri boyu 80 ns, ölçüm doğrultusundaki mekânsal örnekleme ise 5 cm olarak belirlenmiştir. DAÖ verileri ise 1m aralıklı yerleştirilmiş 23 elektrot kullanılarak 23 profil üzerinde Wenner-Schlumberger diziliminde ölçülmüştür. Bu veriler akım ve en yakın gerilim elektrotu arasındaki en uzak mesafe 5 m ($n=5$) olacak şekilde elektrot açıklıkları ile ölçülmüştür.

Yer radarı verilerine sırasıyla statik düzeltme → DC giderme → dewow → bant geçişli süzgeçleme (kesme frekansları 100 - 800 MHz) → kazanç (AGC) → arkaplan kaldırma →

göç → zarf (*envelope*) alma işlemleri uygulanmıştır. Hiperbol çakıştırma yöntemi ile ortamdaki ortalama elektromanyetik dalga yayılma hızı 0.08 m/ns olarak belirlenmiştir.

SSIM-kısıtlı 3B ters çözüm yer içinin x-yönünde 44, y-yönünde 44 ve z yönünde 6 model hücresiyle ayrıklaştırılmasından elde edilen modelin parametrelerini çözmek üzere kullanılmıştır. Bu ayrıklaştırmada her iki yönde ardışık elektrotlar arasına 2 model hücresi yerleştirilmiştir. Derinlik ile giderek kalınlaşan model hücrelerinin orta derinlikleri için GPR işlenmiş veri hacminden dilimler alınarak referans model oluşturulmuştur. Buna göre 0.25, 0.5, 1, 1.7 ve 2.5 m derinliklerinden alınan dilimler [0 1] aralığında gri tonlamalı görüntülere dönüştürülmüş ve Şekil 4.3'ün birinci sütununda verilmiştir. GPR derinlik dilimleri incelendiğinde yer içinde gömülü insan yapımı kalıntıların varlığı açıkça görülmektedir. Bu yapılar DB-KG eksenleri üzerinde yer almakta ve yerleşimleri genel Roma şehir planına uymaktadır. Yaklaşık 500 m² alanı kaplayan haritalardan ikinci sütunda verilen yuvarlatıcı kısıtlı ters çözüm sonuçlarında benzer yapılar olarak görülmekle birlikte beklendiği şekilde belirtilerin sınırları daha geçişli ve bulanık olarak belirlenmiştir. Bu sonuç beklenmeyen bir durum değildir. Bu yüzden adil bir karşılaştırma için düzenleme katsayısının başlangıç değeri değiştirilerek olası en iyi veri çakışması elde edilmeye çalışılmıştır. Her yinelemede düzenleme katsayısı (α)nın değeri düşürülerek yakınsama sağlanmıştır. Bu sayede algoritmanın izin verdiği en keskin görüntüler elde edilmeye çalışılmıştır. Bu sonuçlar Şekil 4.3'ün üçüncü sütununda sunulan SSIM-kısıtlı ters çözüm sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Buna göre GPR görüntülerinin referans model olarak belirlenmesi ile kısıtlanan ters çözüm görsel olarak radar görüntülerine oldukça yakındır. Yuvarlatıcı kısıtlı ters-çözüm sonuçları ile karşılaştırıldığında ise daha keskin kenarlı yapı izlerinin seçilebildiği kolaylıkla söylenebilir. SSIM indeksi her bir parametre için 5×5 bir pencere kullanılarak hesaplanmış ve son sütunda sunulmuştur. Özellikle yapı kalıntılardan kaynaklanan izlerin bulunduğu bölgelerde benzerlik indeksinin değeri olası en büyük değeri olan bire yaklaşımaktadır.

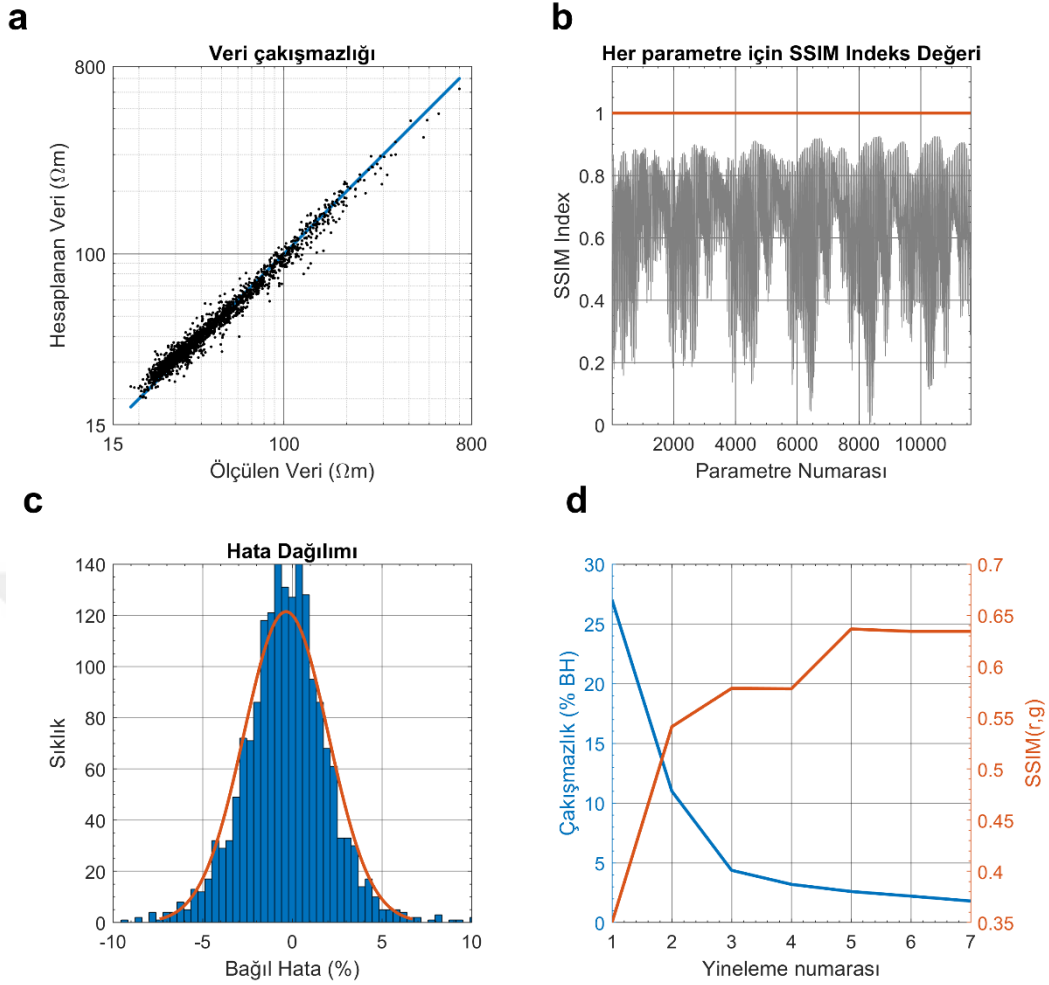


Şekil 4.3 Referans model olarak kullanılan yer radarı derinlik dilimleri (birinci sütun), yuvarlatıcı kısıtlı 3B ters çözümden elde edilen özdirenç derinlik dilimleri (ikinci sütun), SSIM-kısıtlı 3B ters çözümden elde edilen özdirenç derinlik dilimleri (üçüncü sütun) ve referans modeli ile sonuç modeli arasındaki SSIM yapısal benzerlik indeksi haritası (son sütun)

Yorumlanması daha kolay ve keskin sınırlı belirtiler gözlemlememize olanak sağlamakla birlikte SSIM-kısıtlı ters çözüm işleminin veri çakışmazlığı anlamında da değerlendirilmesi gerekir. Yuvarlatıcı kısıtlı ve SSIM-kısıtlı ters çözüm işlemlerinin sonunda birbirine yakın çakışmazlık değerleri hesaplanmıştır. SSIM-kısıtlı ters-çözümde yedinci yinelemenin sonunda %2.4, yuvarlatıcı kısıtlı ters çözümde ise %2.8 görecel hata hesaplanmıştır. Yüzde bağıl yanlışlığı,

$$misfit = 100 \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n W_i (d_i - f_i)^2 / d_i}{n}} \quad (4.7)$$

bağıntısı ile hesaplanmaktadır. Veri çakışmazlığı ve SSIM indeksinin değeri bağlamında SSIM-kısıtlı ters-çözümü değerlendirmek üzere Şekil 4.4 hazırlanmıştır. Şekil 4.4a'da yedinci yineleme sonunda ölçülen ve kuramsal veriler arasındaki veri çakışmazlığı, Şekil 4.4b'de yine yedinci yinelemede SSIM indeksinin her parametre için hesaplanmış değerleri verilmiştir. Benzerlik indeksinin en büyük değeri 0.9 ortalama değeri ise 0.64 olarak hesaplanmıştır. Bu indeks için hesaplanacak en büyük değerin 1 olduğu hatırlanmalıdır. Son adımda elde edilen veri farklarının (*data residuals*) dağılımı Şekil 4.4c'de görülmektedir. Buna göre veri farkları Gaussian olarak dağılmakta, ters-çözüm işleminin rastgele gürültüler dahilinde yakınsadığı, sistematik bir hata içermediği söylenebilir. Şekil 4.4d'de yinelemeler boyunca çakışmazlığın nasıl değiştiği ve yer elektrik modeli ile yer radarından elde edilen referans model görüntülerinin yapısal benzerlik değeri görülmektedir. Toplam yapısal benzerlik indeksinin yinelemeler boyunca dereceli olarak iyileştirildiği söylenebilir. Son adımda ortalama yapısal benzerlik indeksi 0.64 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.4 a. SSIM-kısıtlı ters çözümde son adımda elde edilen veri çakışmazlığı b. parametrelerin SSIM indeks değeri, c. veri hatalarının istatistiksel dağılımı ve d. yinelemeler boyunca çakışmazlık ile SSIM indeks değerinin değişimi

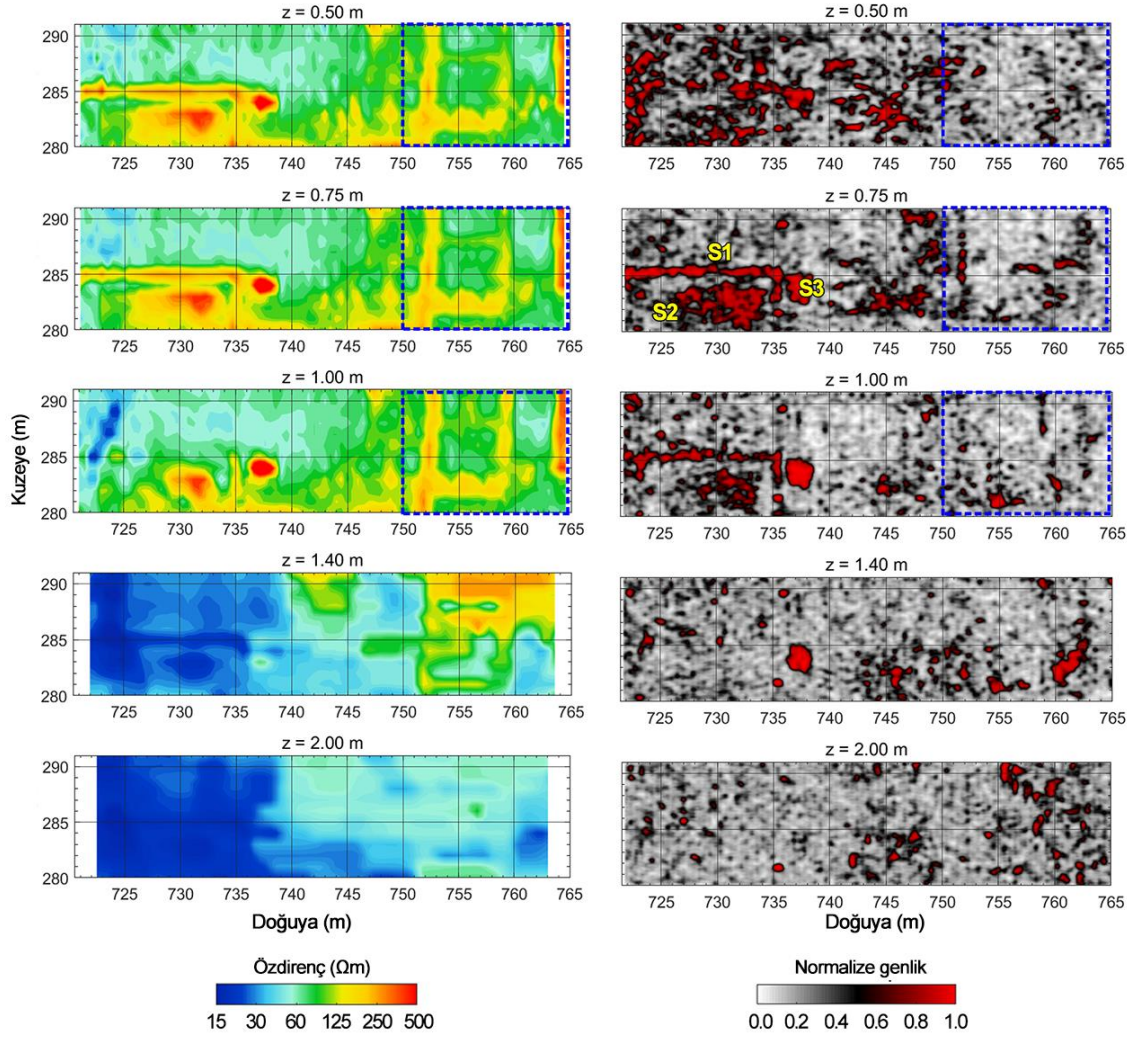
4.1.4 Arazi çalışması örneği 2: Side antik kentinden veri kümeleri

Önerilen SSIM-kısıtlı ters çözüm algoritmasının denenmesi için ikinci arazi veri kümesi daha önce yayınlanmış bir çalışmadan alınmıştır (Akca vd. 2019). Yine arkeolojik kalıntıların aranması amacıyla yürütülen çalışmalarda Side antik kentinde (Antalya) bulunan 6000 m² büyüklüğünde bir alanda jeofizik araştırmalar yürütülmüştür. Ana yöntem olarak DAÖ kullanılmış ve alanının 3B doğru akım öz direnç modeli üretilmiştir. Görece daha küçük bir alanda (11 m × 47 m) ise DAÖ ile birlikte yer radarı da uygulanmıştır. Burada bu son alanda yapılan DAÖ ve GPR ölçümlerinden elde edilen veriler uygulama için seçilmiştir. Veriler konumsal olarak aynı alanı taramaktadır. Aralarında 1m uzaklık bulunan 12 profil üzerinde DAÖ, 0.5 m aralıklarla 23 profil

üzerinde de yer radarı verileri ölçülmüştür. Bu veri kümelerinin uygulamada kullanılmak üzere seçilmesinin özel bir amacı vardır. Bunun nedeni çalışmada sunulan DAÖ ve GPR sonuçları incelendiğinde öz direnç derinlik haritalarında görülen belirgin çizgisel belirtilerin bir kısmının radar derinlik dilimlerinde görülmemesidir. Önerilen SSIM-kısıtlı ters çözüm algoritmasında GPR derinlik dilimleri referans model olarak kullanıldığından ve bu derinlik dilimlerinden üretilen sayısal görüntülerin çözünürlük ve içerik olarak bozulmamış ideal görüntüler olduğu kabulü bu durumda geçersiz olmaktadır. Ancak alan genelindeki değerlendirmelerinden GPR derinlik dilimlerinde göremediğimiz KG doğrultulu çizgisel yapıların burada bulunduğundan bir şüphe yoktur (bakınız Şekil 4.1). Bu çerçevede bu veri kümesi, kısmen ideal koşulları taşımayan bir referans model /görüntü kullanılması durumunda SSIM-kısıtlı ters çözümün nasıl davrandığının görülmesi açısından uygun bir örnek oluşturmaktadır.

Akca vd. (2019)'den alınan verilerin değerlendirilmesi yeniden yapılarak Şekil 4.5'de sunulmuştur. Şekil 4.5'de birinci sütunda üç-boyutlu yer elektrik modelinin derinlik haritaları gösterilmektedir. Bu derinlik haritaları $94 \times 22 \times 5$ boyutlarında bir model ağından alınmıştır. Gösterilen modelin yanıtı altı yineleme sonunda %2.8 bağıl hata ile hesaplanmıştır. Yuvarlatıcı kısıtlı ters çözüm işleminde beklendiği gibi belirtiler sünmüş / bulanık olarak görülmektedir. Buna rağmen derinlik haritalarında batı sınırından 735 metre uzaklığa kadar ters L harfi şeklinde bir belirti ayırt edilebilmektedir. Bunun bir duvar/yapı temeli olduğu düşünülebilir. Yatay eksen üzerinde 738 metrede ise yuvarlak kesitli ve bütün derinlik boyunca devam eden bir belirti izlenmektedir. Bunun alanda benzerleri bulunduğundan bir kuyu olabileceği yorumlanmıştır. Öz direnç derinlik haritalarında 750 m den sonra ise KG doğrultulu çizgisel belirtiler ayırt edilebilmektedir. Bu belirtilerin önemli bir bölümü ikinci sütunda görülen radar derinlik dilimlerinde de aynı konum ve derinliklerde görülebilmektedir. 0.75 m derinlik haritasında S1, S2 ve S3 şeklinde işaretlenen belirtiler öz direnç haritaları ile çok iyi örtüşmektedir. Yer radarı haritalarında belirtiler kısmen daha net olarak seçilmektedir. Ancak unutulmamalıdır ki öz direnç modelinde hücre büyüklükleri 0.5 m'dir. Radar verileri ölçüm doğrultusunda 5cm aralıklı iken düşey yönde de oldukça sık örneklenmektedir. Bu nedenle tartışmasız şekilde yer radarı görüntüleri daha yüksek çözünürlüklüdür. Ancak buradaki en kritik nokta haritalarda mavi kesikli dikdörtgenler ile işaretlenen alanda öz direnç haritalarında görülen belirtilerin çok zayıf görülmesi veya hiç görülmemesidir. Bu çerçevede kısmen

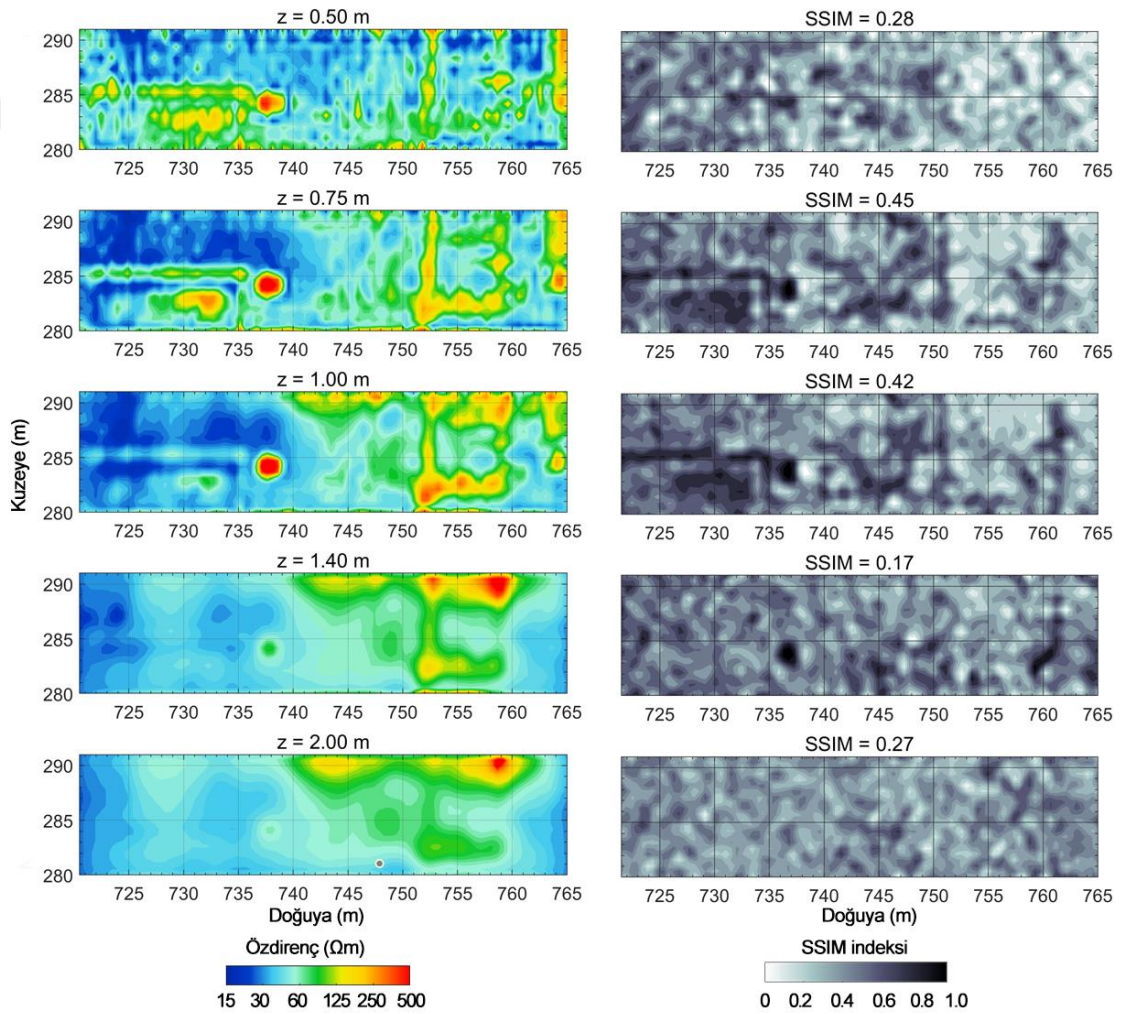
doğruluğu tartışmalı bir referans model ile SSIM-kısıtlı ters çözümün tepkisi anlaşılmaya çalışılmıştır.



Şekil 4.5 Side antik kenti B alanına ait DAÖ verilerinin yuvarlatıcı kısıtlı 3B ters çözümü (birinci sütun) ve aynı alana ait yer radarı derinlik dilimleri (haritaların ait olduğu derinlikler başlıklarda verilmiştir)

Yukarıda yuvarlatıcı kısıtlı ters çözüm sonucu verilen veriler bu kez Şekil 4.5’de gösterilen radar derinlik haritaları referans model olarak kullanılarak SSIM-kısıtlı ters çözüm ile değerlendirilmiştir. Model, ardışık elektrotlar arasına ikişer model bloğu yerleştirilerek oluşturulmuştur. Buna göre 10340 model bloğunun özdirenci çözülmeye çalışılmıştır. Radar derinlik haritaları modelin yataydaki 94×22 boyutları ile uyumlu olacak şekilde yeniden gridlenmiştir. Böylelikle her bir model bloğuna radar derinlik haritasında da birebir karşılık oluşturulmuştur. Altı yinelemenin ardından yakınsayan algoritma Şekil 4.6’da sunulan sonuçları üretmiştir. Önceki uygulamadakine benzer

şekilde sunulan sonuçlara bakıldığında belirtilerin yuvarlatıcı kısıtlı ters çözüme göre daha keskin görüldüğü söylenebilir. S1, S2 ve S3 belirtileri yer radarı derinlik haritalarından elde edilen ön bilgi sayesinde daha keskin görülmektedir. Şekil 4.6'da ikinci sütunda ise son yinelemede elde edilen model öz direnç derinlik haritaları ile radar derinlik haritalarının yapısal benzerlik indeksi görüntülenmiştir. Bu haritada S1, S2 ve S3 şeklinde isimlendirilen belirtilerin bulunduğu konumlarda benzerlik indeksinin bire yakın değerler aldığı görülmektedir. Bunun anlamı bu belirtilerin radar derinlik dilimlerinde görüldüğüne oldukça yakın hale geldiğidir.



Şekil 4.6 SSIM-kısıtlı üç boyutlu ters çözüm ile elde edilen derinlik haritaları (ilk sütun) ve bunların radar derinlik dilimleri ile karşılaştırıldığında elde edilen SSIM indeksi haritası (ikinci sütun)

Bu deneyin asıl amacı kısmen uygunsuz bir referans görüntünün (Şekil 3.5 750-765 metreler arası) neden olduğu düşük SSIM indeks değerlerinin ters çözüme etkisinin belirlenmesi idi. Şekil 4.6 birinci sütununda verilen öz direnç haritalarının ilgili bölümüne

bakıldığında burada KG yönlü belirtilerin korunduğunu, nispeten daha net görüntülediğini söyleyebiliriz. Ancak DB yönlü belirtilerde bir miktar zayıflama da görülmektedir. Buna rağmen yapılar genel hatları ile ortaya konulmuştur. Genel bir karşılaştırma ile düşük SSIM indeks değerlerinin ters çözüm sonucunu olumsuz etkilediğini söylemek güçtür. Sıfır veya sıfıra yakın SSIM indeks değerleri denklem 4.6'da en sağdaki parantez içini 1 değerine yaklaştıracığından ters çözüm yuvarlatıcı kısıtlı en küçük kareler çözümüne yaklaşacaktır. Son adımda elde edilen SSIM indeks haritasında ortalama ve en yüksek değerler önceki deneyle karşılaştırıldığında daha düşüktür. Bu değerler Şekil 4.6'da harita başlıklarında verilmiştir.

4.2 Görüntü İşleme Süzgeçlerinin Ters Çözüme Katılması

Doğru akım özdirenç verilerinin düzenlenmiş ters çözümünü veren 2.10 denkleminde model şekil fonksiyonunda $\mathbf{m}_{\text{ref}}$ yerine sıfır yazılarak

$$(\mathbf{J}^T \mathbf{W}_d^T \mathbf{W}_d \mathbf{J} + \alpha \mathbf{W}_p^T \mathbf{W}_p) \Delta \mathbf{m}_k = \mathbf{J}^T \mathbf{W}_d^T \mathbf{W}_d \Delta \mathbf{d} - \alpha \mathbf{W}_p^T \mathbf{W}_p \mathbf{m}_k \quad (4.8)$$

bağıntısı elde edilebilir. Bu denklem model kısıtı olarak kullanılabilecek bir referans model bulunmadığında kullanılabilir. Bu bağıntıda $\mathbf{W}_p$ ile ifade edilen model ağırlık dizeyi genel olarak yuvarlatıcı kısıtını tanımlamak üzere birinci veya ikinci dereceden bir Laplacian işleci ile tanımlanabilir (deGroot-Hedlin ve Constable 1990). Ters çözüme katılan bu terim sert geçişlilik (*roughness*) terimi olarak da anılır ve α katsayısının büyüklüğüne göre ters çözüme olan etkisi değişir. Örneğin α katsayısı sıfıra yaklaştıkça sert geçişliliğin en küçükleme problemine olan etkisi azalır ve giderek daha kaba modeller ortaya çıkar α çok büyük seçilmesi durumunda ise veri çakışmazlığının önemi azaltılmış olur.

Görüntü işleme süzgeçlerinin katsayıları kullanılarak $\mathbf{W}_p$ dizeyinin nasıl oluşturulacağına örnek olması açısından 2 boyutlu düşeyde üç yatayda ise 4 hücre ile temsil edilen, toplam 12 parametreden oluşan bir yer modelimiz olduğunu ve bu modelin parametrelerine Gaussian süzgeç katsayılarından oluşturulmuş bir ağırlık dizeyi atamak istediğimizi düşünelim. Şekil 4.7a'da 12 parametrelili bir yer modeli ve şekil 4.7b'de bu model parametrelerini birbirleriyle ilişkilendirecek Gaussian süzgeç katsayıları görülmektedir.

m ₁	m ₄	m ₇	m ₁₀
m ₂	m ₅	m ₈	m ₁₁
m ₃	m ₆	m ₉	m ₁₂

a)

$$h_g = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 2 & 4 & 2 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix} \times \frac{1}{16}$$

b)

Şekil 4.7 a. 12 parametrelı 2B yer modeli b. model ağırlık dizeyinde kullanılacak süzgeç katsayıları

Parametrelerin önce z sonra x yönünde numaralandırıldığı düşünölmüştür. Her parametreyi çaprazındakiler de dahil olmak üzere kendisine komşu diğır parametrelerle ilişkilendirecek $\mathbf{W}_p$ dizeyi, parametre sayısı m=12 olmak üzere 12×12 boyutundadır. $\mathbf{W}_p$ dizeyi parametre yöneyi ile çarpıldığında $\mathbf{W}_p$ 'nin her satırı o satır numarasına karşılık gelen parametrenin yeni değırini hesaplanmasını sağlar. Verdiğimiz basitleştirilmiş örnek için h_g dizeyinin $\mathbf{W}_p$ içindeki sıra numaraları

$$h_g(:,i) > \begin{bmatrix} i-(n_z+1) & i-1 & i+n_z-1 \\ i-n_z & i & i+n_z \\ i-(n_z-1) & i+1 & i+n_z+1 \end{bmatrix}$$

Şeklinededir. Böylece $\mathbf{W}_p$ dizeyi aşğıdaki gibi oluşturulabilir.

$$\mathbf{W}_p = \begin{bmatrix} 4 & 2 & 0 & 2 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 4 & 2 & 1 & 2 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 4 & 0 & 1 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 1 & 0 & 4 & 2 & 0 & 2 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 & 2 & 4 & 2 & 1 & 2 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 2 & 0 & 2 & 4 & 0 & 1 & 2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2 & 1 & 0 & 4 & 2 & 0 & 2 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 2 & 1 & 2 & 4 & 2 & 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 2 & 0 & 2 & 4 & 0 & 1 & 2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 4 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 2 & 1 & 2 & 4 & 2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 2 & 0 & 2 & 4 \end{bmatrix} \times \frac{1}{16}$$

Üç boyutlu bir örnek için ise Laplacian işleci katsayılarını $\mathbf{W}_p$ dizeyini oluşturmak için kullandığımızı düşünelim. Laplacian işleci üç boyutlu bir yer elektrik modeli için birbirine komşu (*ön, arka, üst, alt, sağ ve sol*) hücreleri ilişkilendirmek üzere

$$h_L(:, :, 1) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, h_L(:, :, 2) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & -6 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, h_L(:, :, 3) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

şeklinde verilebilir. Bu dizeyin elemanları $\mathbf{W}_p$ dizeyine yerleştirilirken parametrelerin numaralandırılmasına bağlı olarak doğru yerine yerleştirilmesi gereklidir. Buna göre nx, ny ve nz sırasıyla x, y ve z yönlerindeki model boyutları olmak üzere i numaralı parametre için h_L işlecinin katsayılarının $\mathbf{W}_p$ dizeyi içerisindeki sıra numaraları

$$h_L(:, :, 1) > \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & i - (nx \times nz) & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$h_L(:, :, 2) > \begin{bmatrix} 0 & i-1 & 0 \\ i-nz & i & i+nz \\ 0 & i+1 & 0 \end{bmatrix} \text{ ve}$$

$$h_L(:, :, 3) > \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & i + (nx \times nz) & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

şeklinde verilebilir. Burada model parametrelerinin önce z, sonra x ve sonra y yönünde numaralandırıldığı kabul edilmiştir. Laplacian operatörünün en küçüklenmesi istenen amaç fonksiyonuna eklenmesiyle model parametreleri arasında kuvvetli bir bağ oluşturulmuş olur bu nedenle ters çözüm sonunda bulanık/yuvarlatılmış bir görüntünün elde edilmesi olağandır. Bu noktadan yola çıkarak Laplacian işleci yerine görüntülerin iyileştirilmesi için kullanılan çeşitli evrişim süzgeçlerinin katsayılarının kullanılabileceği düşünülmüştür. İzleyen bölümde, genel kullanımı olan bir dizi görüntü işleme süzgecinin $\mathbf{W}_p$ dizeyinin ilgili elemanlarına atanması yoluyla modelde istenilen özelliklerin öne çıkarılması amacıyla yapılan uygulamaların sonuçları verilmiştir. Süzgeçlerin kullanımı

ile oluşan değişimlerin izlenebilmesi için bir karşılaştırma noktasına ihtiyaç bulunmaktadır. Bu çerçevede L_2 normunda yuvarlatılmış model temel alınmış, diğer süzgeçlerin etkisi bununla karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

4.2.1 Gaussian süzgecinin ters çözüme eklenmesi

Üç boyutlu Gaussian süzgeci alçak geçişli süzgeçleme amacı ile kullanılır. Çıkış görüntüsündeki yüksek frekanslı gürültülerin ayıklamasını sağlar (bkz. Bölüm 3). Bu süzgecin üç-boyutlu süzgeç çekirdeği (*kernel*) MATLAB programlama dilinde

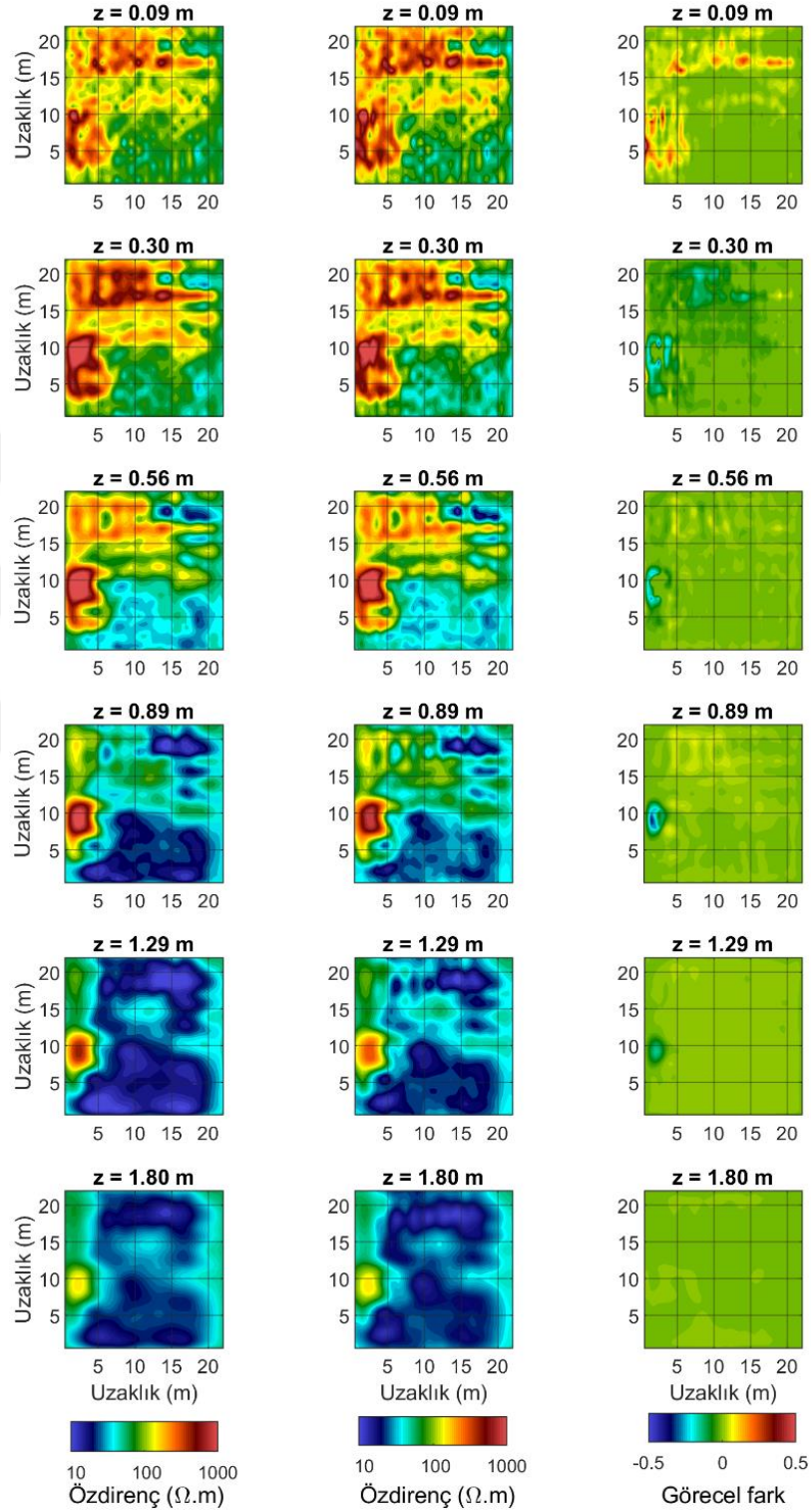
```
h3D=fspecial3('gaussian',[3 5 5],[0.5 1 1])
```

satırının çalıştırılması ile oluşturulabilir. Burada ilk köşeli parantez içindeki ifadeler süzgecin sırası ile z, x ve y yönlerindeki boyutlarıdır. İkinci köşeli parantez içindeki sayılar ise yine aynı sırayla süzgecin hesaplanmasında kullanılan standart sapma değerleridir. Derinlik yönünde (z) süzgeç boyutları ve standart sapma değerleri diğerlerine göre farklı tutulmuştur.

Bu süzgecin kullanım amacı gereği bir yuvarlatma etkisi yapması ve yüksek frekans olarak algılanacak yerel ve ani değişimleri engelleyecek beklenmelidir. Dolayısı ile L_2 normu yuvarlatıcı kısıtlı model ile benzer sonuçlar üretecektir. Şekil 4.8’de Gaussian süzgeç katsayılarının model ağırlık dizeyine yerleştirilmesi ile elde edilen ters çözüm sonuçları yuvarlatıcı kısıtlı ters çözüm sonuçları ile karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir. İşlem Patara antik kentinde yapılan DAÖ çalışmalarının A6 alanındaki verilerine uygulanmıştır.

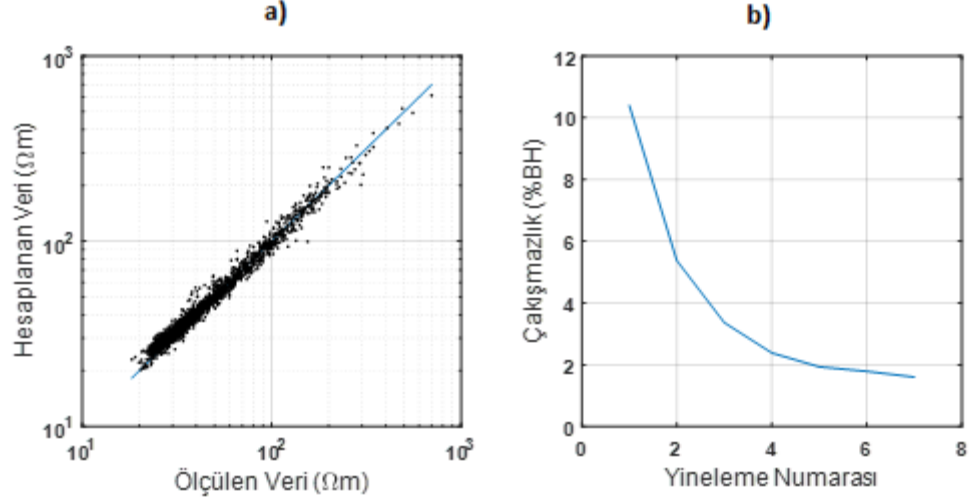
Sonuçlar beklenildiği gibi birbirine benzer çıkmıştır. Bununla birlikte 0.30m. derinliğinden itibaren Gaussian süzgeci kullanılarak elde edilen sonucun yapı sınırlarını biraz daha iyi koruduğu söylenebilir. Özellikle 0.56 ve 0.89 m’de bir yapı sınırları yuvarlatıcı kısıtlı modele göre çok daha belirgindir. Bunun sebebi Gaussian fonksiyonu ile yapılan yuvarlatmanın görece daha kontrollü olması ile açıklanabilir. Gaussian süzgeç ile parametreler ağırlıklandırılırken seçilen standart sapmaya bağlı olarak merkez

parametreden uzaklaştıkça ağırlık azalır. Bu da bir parametrenin kendisine daha yakın olan parametrelerden daha çok, uzak olanlardan daha az etkilenmesi demektir.



Şekil 4.8 Yuvarlatıcı kısıtlı (L2-normu, ilk sütun) ve Gaussian süzgecinin ters çözüme katılması (ikinci sütun) ile elde edilen sonuçlar ile bunlar arasındaki görece fark (üçüncü sütun). Derinlikler başlıklarda verilmiştir.

Gaussian süzgecinin eklendiği ters çözüm işleminin toplam 7 yinlemede %1.6 bağıl hata ile tamamlanmıştır. Ölçülen ve hesaplanan veriler arasındaki ilişkiyi gösteren veri çakışmazlığı ve % bağıl hatanın yinlemeler boyunca azalımını gösteren grafik şekil 4.9’da verilmiştir.



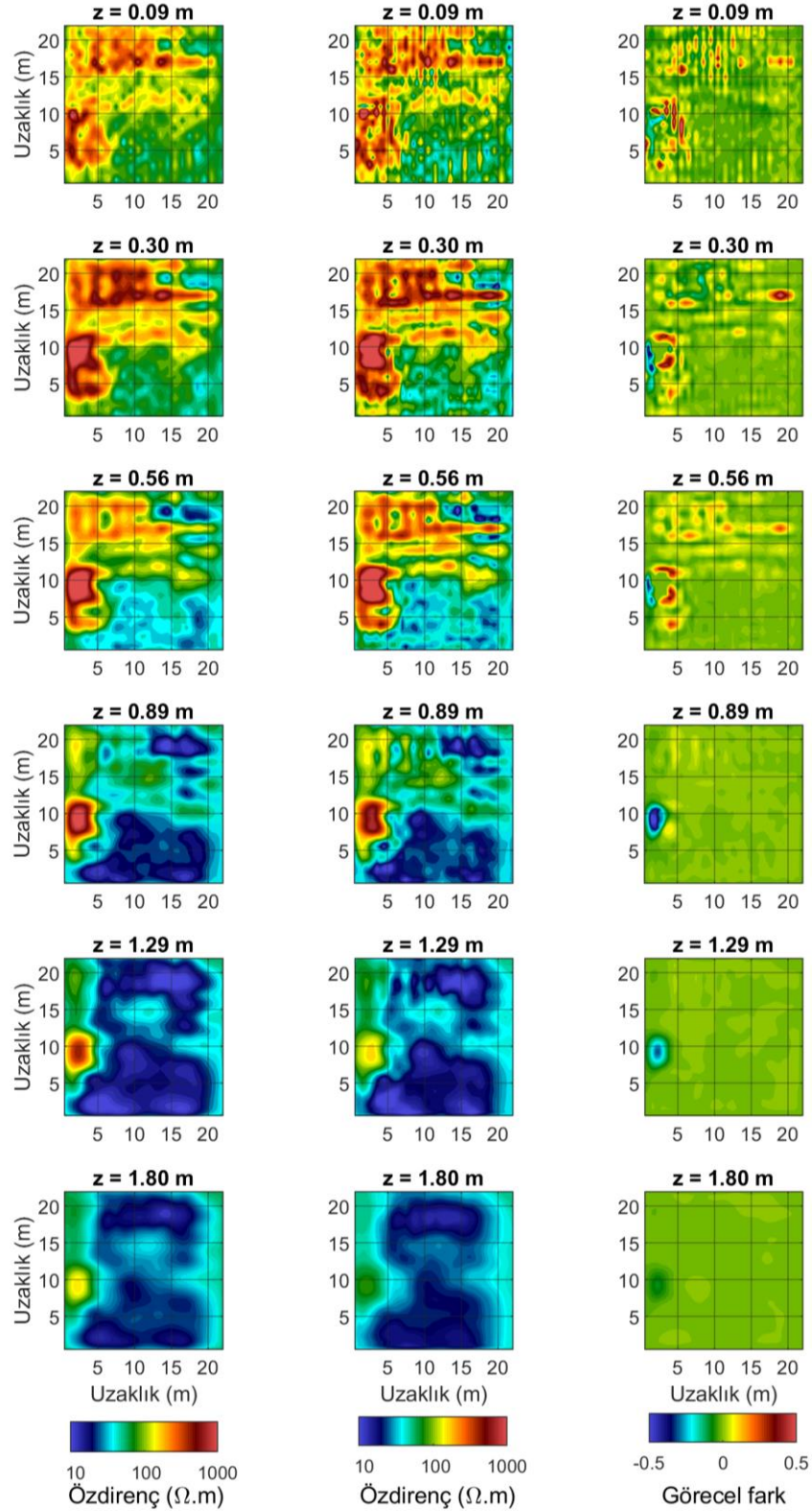
Şekil 4.9 Gaussian süzgeç eklenmiş 3B ters çözüm sonucu a. veri çakışmazlığı, b. % bağıl hata azalım grafiği

4.2.2 Keskinleştirme süzgecinin ters çözüme eklenmesi

Görüntülerdeki bulanıklığın giderilerek insan gözüne daha keskin görünmesini sağlayan çeşitli görüntü işleme süzgeçleri bulunmaktadır. Bunlardan “*unsharp masking*” olarak adlandırılan yöntemde görüntünün yuvarlatılmış (*blurred*) bir sürümünün kendisinden çıkarılması ile gerçekleştirilir. Yuvarlatılmış görüntü ise alçak geçişli bir süzgecin girişi görüntüsüne uygulanması ile elde edilebilir. Bu amaçla çalışmada Gaussian süzgeç kullanılmıştır. Bu süzgeç, yüksek geçişli bir süzme işlemi gerçekleştirmekte olup tekil bir süzgeç çekirdeği ile de tasarlanabilir. Süzgecin tasarlanmasında kullanılan MATLAB komut dizisi aşağıdaki gibi verilebilir.

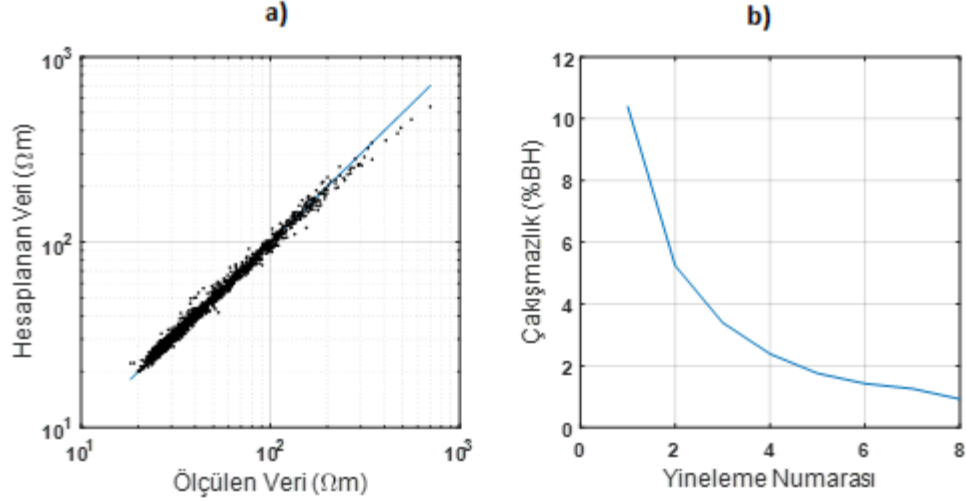
```
filtRadius = 1; % ilgili hücrenin 1 birim koşuluğunu tarar
filtSize   = 2*filtRadius + 1;
gaussFilt  = fspecial3('gaussian',filtSize,0.5);
% Yüksek geçişli süzgeç
sharpFilt  = zeros(filtSize,filtSize,filtSize);
sharpFilt(filtRadius+1,filtRadius+1, filtRadius+1) = 1;
sharpFilt = sharpFilt - gaussFilt;
% Merkezdeki elemana birim dürtü ekliyoruz
sharpFilt(filtRadius+1,filtRadius+1, filtRadius+1) + 1;
```

Bu süzgecin W_p dizeyinin elemanlarına yerleştirilmesi ile yürütülen ters çözüm işleminden elde edilen sonuçlar şekil 4.10'da verilmiştir. İşlem Patara antik kentinde yapılan DAÖ çalışmalarının A6 alanındaki verilerine uygulanmıştır. Burada yine bir referans noktası olması açısından yuvarlatıcı kısıtlı ters çözüm ile bir karşılaştırma yapılmıştır. Derinlik dilimlerinden 0.09 m'ye bakılacak olursa bu seviyede hali hazırda yüksek frekanslı gürültüler olması nedeniyle keskinleştirme süzgecinin bunların daha da çoğalmasına sebep olduğu söylenebilir. Bununla birlikte 0.30 ve 0.56 m'lerdeki derinlik dilimlerinde keskinleştirme işlemi ile yapının daha net görülmesi ve yuvarlatıcı kısıtlı ters çözümde tek bir bölgeymiş gibi görülen bazı yerlerin ayrılması sağlanmıştır.



Şekil 4.10 Yuvarlatıcı kısıtlı (L2-normu, ilk sütun) ve keskinleştirme süzgecinin ters çözüme katılması (ikinci sütun) ile elde edilen sonuçlar ile bunlar arasındaki görece fark (üçüncü sütun). Derinlikler başlıklarda verilmiştir.

Keskinleştirme süzgecinin eklendiği ters çözüm işlemi toplam 8 yinelemede %0.9 bağıl hata ile tamamlanmıştır. Ölçülen ve hesaplanan veriler arasındaki ilişkiyi gösteren veri çakışmazlığı ve %bağıl hatanın yinelemeler boyunca azalmasını gösteren grafik şekil 4.11’de verilmiştir.



Şekil 4.11 Keskinleştirme süzgeci eklenmiş 3B ters çözüm sonucu a. veri çakışmazlığı, b. % bağıl hata azalım grafiği

4.2.3 Ortalama (Box) süzgecin ters çözüme eklenmesi

Ortalama (box) süzgeç adından da anlaşılacağı gibi, merkez pikselin seçilen bir yarıçap uzaklığında, kare şeklinde bir alandaki komşuluklarının ortalamasıyla ağırlıklandırılarak yeniden hesaplanması işini yapar. MATLAB ortamında 3B ortalama süzgecin tasarlanması,

```
h = fspecial3('average',hsize)
```

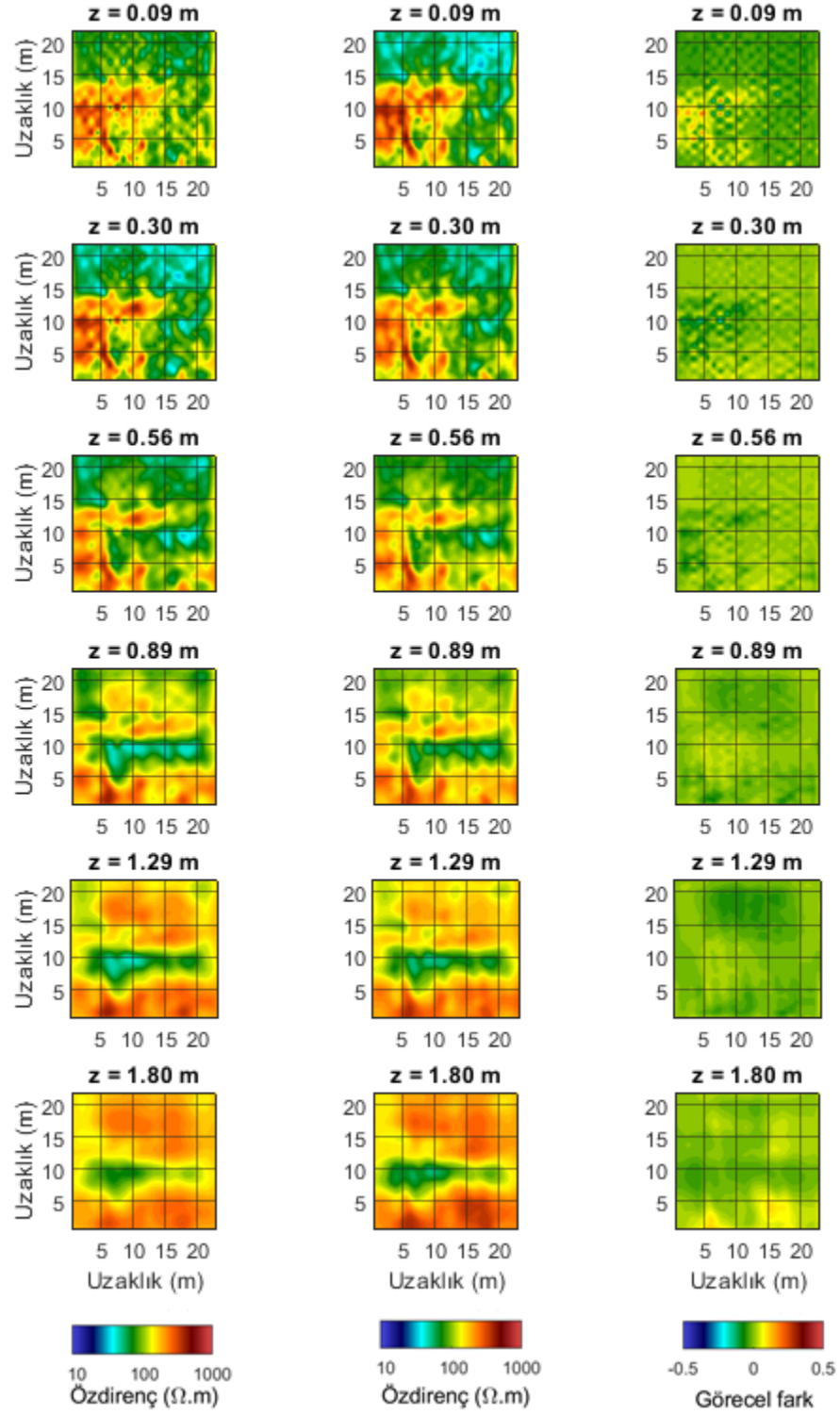
Komutu ile gerçekleştirilebileceği gibi,

```
h = imboxfilt3(I,hsize)
```

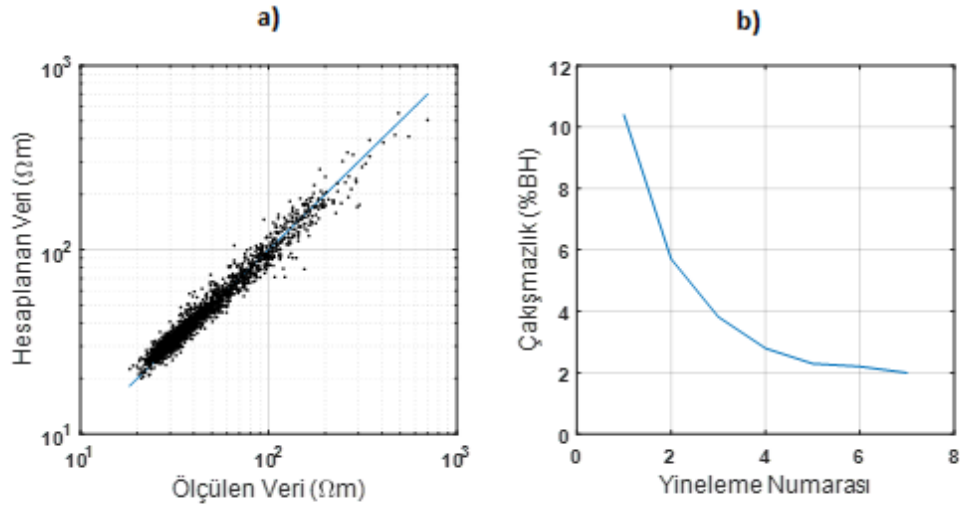
Komutuyla doğrudan I görüntüsüne veya düzeyine de uygulanabilir. Burada `hsize` süzgeç çapını belirtmektedir. Süzgeç görüntüdeki sert geçişleri yani yüksek frekansları gidermek için kullanılır. Bütün ağırlık katsayıları birbirine eşit olduğundan hesaplanması

görece daha kolay olmakla birlikte bu süzgecin uygulanacağı görüntünün neredeyse her bölgesinde yüksek frekanslı gürültü bileşenleri yoksa süzgeç görüntüye bozucu bir etki yapacaktır.

Ortalama süzgeç katılarak gerçekleştirilen 3B bir ters çözüm işleminin şekil 4.12’de verilmiştir. İşlem Patara antik kentinde A12 alanındaki DAÖ verilerine uygulanmıştır. Özellikle ilk üç seviyede süzgecin etkisi bariz şekilde görülmektedir. 0.09m derinliğindeki dilimde yuvarlatıcı kısıtlı ters çözümden elde edilen sonuçla kıyaslandığında ortalama süzgecin çözüme eklenmesiyle noktasal gürültülerin kaybolduğu, yapı sınırlarındaki ani değişimlerin daha yumuşak bir hal aldığı söylenebilir. Şekil 4.12’deki görece fark sütununa bakılırsa süzgecin belirtinin olduğu bölümde pozitif katkı yaparken çevredeki bölümlerde negatif katkıda bulunduğu görülmektedir. Bunun sebebi süzgecin parametreleri çevresindeki parametrelerin değerleriyle ağırlıklandırarak hesaplamasıdır bu sayede çevresiyle yapının içindeki küçük boşluklar kapanırken arkaplandaki noktasal gürültülerde kaybolur. Ayrıca görece fark sütununda süzgecin kare şekli de rahatça seçilmektedir. 0.89 m ve daha derin dilimlerde süzgecin etkisinin azalması, bu derinliklere ait görüntülerin çok fazla sert geçişli olmaması ile açıklanabilir. Şekil 4.12’de çizdirilen sonuçlara 7 yineleme sonunda %1.9 ortalama bağıl hata ile ulaşılmıştır. Son yinelemede ulaşılan veri çakışmazlığı ve çakışmazlık yüzdesinin yinelemeler boyunca azalmasını gösteren grafik şekil 4.13’de verilmiştir.



Şekil 4.12 Yuvarlatıcı kısıtlı (L2-normu, ilk sütun) ve ortalama süzgecinin ters çözüme katılması (ikinci sütun) ile elde edilen sonuçlar ile bunlar arasındaki görece fark (üçüncü sütun). Derinlikler başlıklarda verilmiştir.



Şekil 4.13 Ortalama süzgeç eklenmiş 3B ters çözüm sonucu a. veri çakışmazlığı, b. % bağıl hata azalım grafiği

4.2.4 Elipsoit süzgecin ters çözüme eklenmesi

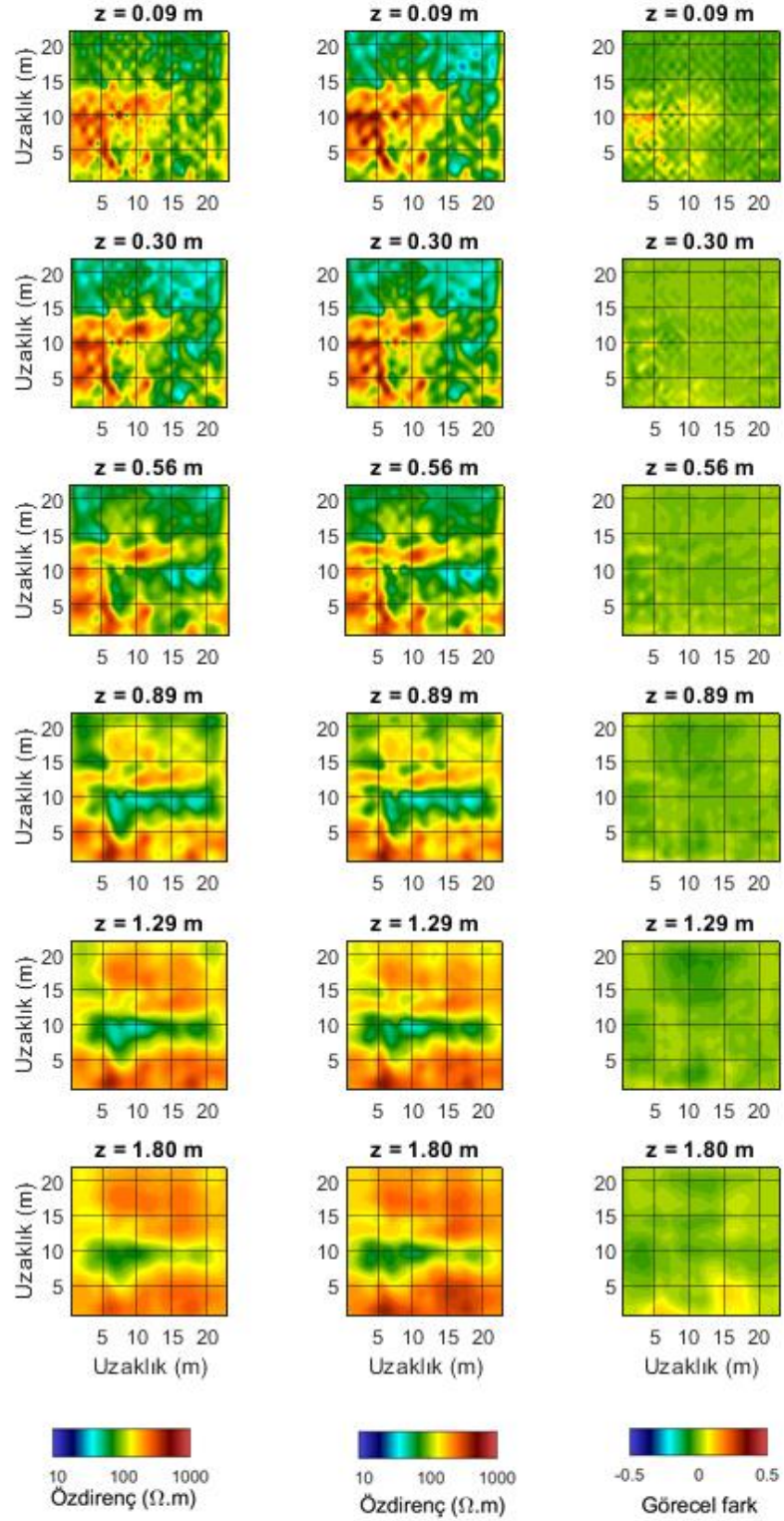
Elipsoit süzgeç bir model bloğu merkez olmak üzere üç boyutta elipsoidal bir komşuluktaki model parametreleri üzerinde çalışan bir ortalama süzgeçidir. Bu süzgecin her üç eksenindeki çapı ayrı ayrı belirlenebilir. Örneğin x, y ve z yönlerindeki süzgeç çapı 1 seçilirse süzgeç çekirdeğinin boyutları $3 \times 3 \times 3$ boyutlarında olur. Bu süzgecin katsayıları

```
hE = fspecial3('ellipsoid', [rx ry rz])
```

MATLAB komutu ile hesaplanabilir. Burada rx , ry ve rz süzgeç çekirdeğinin sırasıyla x, y ve z yönlerindeki çapını göstermektedir. Süzgecin herhangi bir yöndeki boyutu (örneğin x-yönünde)

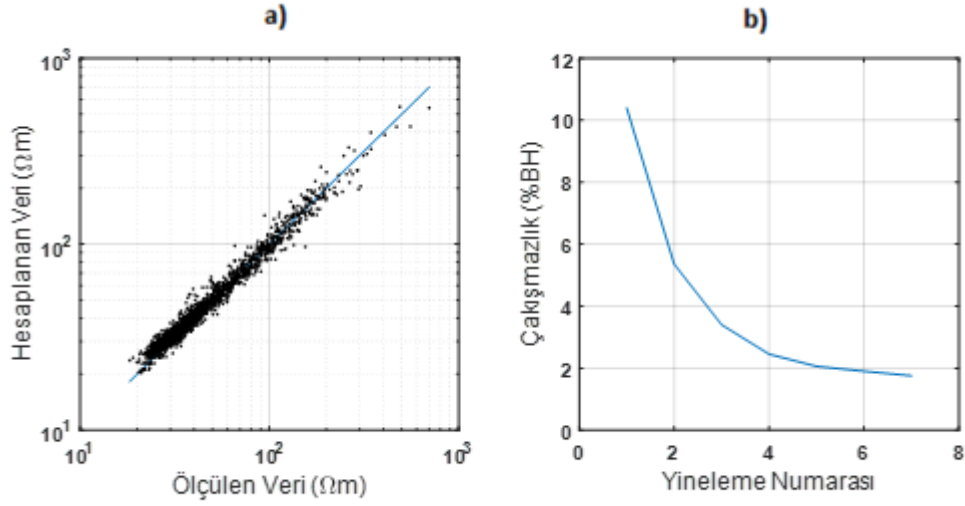
$$nx = 2 \times rx + 1$$

şeklinde olacaktır. Elipsoit süzgeç ortalama alan bir süzgeç olduğundan tüm süzgeç katsayıları eşit olup toplamı 1'e eşittir. Bu süzgeç ile işlenen bir görüntünün yüksek frekanslı bileşenlerini yitirmesi beklenir. Dolayısı ile yuvarlatma amacı ile kullanılabilir. Elipsoit süzgecin hesaplanarak W_p dizeyinin elemanlarına yerleştirilmesi bunun da 4.8 denkleminde yerine yazılması ile yürütülen ters çözüm işleminin sonuçları Şekil 4.14'de verilmiştir.



Şekil 4.14 Yuvarlatıcı kısıtlı (L2-normu, ilk sütun) ve elipsoit süzgecinin ters çözüme katılması (ikinci sütun) ile elde edilen sonuçlar ile bunlar arasındaki görece fark (üçüncü sütun). Derinlikler başlıklarda verilmiştir.

Elipsoit süzgeç ortalama süzgecin farklı şekilli bir hali olduğu için sonuçların ortalama süzgece benzer çıkması beklenen bir durumdur. Şekil 4.14’de üçüncü sütunda verilen görece farklar incelenirse özellikle 0.09m’de süzgecin şekli net olarak kendisini göstermektedir. Bu şekilden dolayı süzgecin etkisi görüntünün merkezinde en büyükken köşelere gidildikçe azalır. Yuvarlatma etkisinin ortalama süzgece daha az olduğu söylenebilir. Özellikle 0.09 ve 0.3 m’deki derinlik dilimlerinde etkili olmuştur. Elipsoit süzgecin eklendiği ters çözüm işlemi 7. yinelemede %1.7 bağıl hata ile sonuçlanmıştır. Son yinelemede ulaşılan veri çakışmazlığı ve çakışmazlık yüzdesinin yinelemeler boyunca azalmasını gösteren grafik için şekil 4.15 incelenebilir.



Şekil 4.15 Ortalama süzgeç eklenmiş 3B ters çözüm sonucu a. veri çakışmazlığı, b. % bağıl hata azalım grafiği

5. SONUÇLAR

Uygulamalı jeofizik yöntemlerle yer içinde ilgilenilen bir fiziksel parametrenin dağılımı görüntülemek amacıyla yer içinde doğal yollarla oluşan sinyaller kaydedilir ya da yapay olarak üretilmiş olan sinyallere yerkürenin tepkisi ölçülür. Ölçülen bu veriler nadir olarak doğrudan sunulurken, genellikle veri işlem ve modelleme aşamalarından geçirilerek değerlendirilir ve sonuçta yer içinin görüntüsü elde edilir. Bu çalışmada kullanılan yöntemlerden yer radarının sismik yöntemle benzerlikler gösteren bir kısmı standartlaşmış bir kısmı ise kullanıcıya kalmış bir dizi veri işlem adımı bulunmaktadır. DAÖ yönteminde ise genelde iki ya da üç boyutlu ters çözüm yapılır. Verilerin toplanması ve modellenmesi gibi, modellerin net ve anlaşılır şekilde görüntülenmesi de büyük önem taşımaktadır.

Görüntü işleme, son yıllarda giderek önem kazanan ve teknolojik gelişmelerle paralel olarak uygulama alanları genişleyen bir alandır. Görüntü işleme araçları, sayısal bir görüntü üzerinde gürültü giderme, netleştirme, yumuşatma, kenar belirleme, parlaklık ve kontrast ayarlamaları gibi amaçlarla uygulanabilir. Bu çalışmada görüntü işlemede sıklıkla kullanılan bazı araçların jeofizik yöntemler ile yer içinin görüntülenmesinde ne gibi katkılarda bulunabileceği araştırılmıştır. Araştırmada kullanılan haritalar için Side ve Patara antik kentlerinde değişik dönemlerde yapılan çalışmalarda ölçülen elektrik ve yer radarı verileri (Akca vd. 2018, Akca vd. 2019, Kaya vd. 2018) ve Akca (2020) tarafından geliştirilen, DAÖ verilerinin 3B ters çözümünü yapan Elris3D yazılımı kullanılmıştır.

Jeofizik haritaların iyileştirilmesi için görüntü işleme araçlarından faydalanmak amacıyla ilk olarak, bir jeofizik yöntemle elde edilmiş verilerin tercih edilen yöntemlerle işlenmesiyle oluşturulmuş jeofizik haritalara son bir işlem olarak çeşitli görüntü işleme araçlarının uygulanarak sonuçların görselliğinin güçlendirilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla evrişim temelli süzgeçler ile görüntü yumuşatma, keskinleştirme gibi işlemler, kontrast ve renk haritası üzerindeki işlemler, dönüşüm fonksiyonları, frekans bölgesinde süzgeç tasarlama, morfolojik süzgeçler gibi birçok görüntü işleme aracı jeofizik haritalar üzerinde denenmiştir. Bu işlemler bazı durumlarda doğrudan parametre düzeylerine uygulanmış bazı durumlarda ise parametre düzeyleri piksel değerleri 0-1 veya 0-255 arası değişen gri-seyiye görüntülere dönüştürüldükten sonra işlem yapılmıştır. Parametre

dizyellerinin içeriğine, parametreler görselleştirilirken ne gibi özelliklerin vurgulanmak istediğine, verilerin toplandığı bölgeler hakkındaki ön-bilgilere, aranan ya da netleştirilmek istenen yapıların geometrik özelliklerine göre sözü geçen görüntü işleme araçlarından biri ya da birkaçı kullanılabilir. Çalışma kapsamında denenmiş yöntemlerin etkileri ve yararlılıkları tartışılmış, orjinal haline göre belirtilerin daha net seçilebildiği ve sunumu daha kolay olacak harita ve görüntüler oluşturulabildiği değerlendirilmiştir.

Tez kapsamında yapılan çalışmalardan bir diğeri istatistik temelli bir görüntü kalitesi değerlendirme aracı olan yapısal benzerlik indeksi (SSIM) ters çözüme katılarak sonuçların iyileştirilmesi sağlanmıştır. Yapısal benzerlik indeksi görüntünün, bozulmamış olduğu varsayılan bir referans görüntüsü ile karşılaştırarak kalitesinin belirlenmesi amacıyla kullanılır. Bu çalışmada DAÖ verilerinin ters çözümü sırasında aynı bölgede toplanmış olan daha yüksek çözünürlüklü bir yöntem olan yer radarı verileri referans olarak alınarak yinelemeler boyunca her bir parametre için hesaplanan SSIM indeksi algoritmaya kısıt olarak katılmıştır. GPR verilerinin referans model olarak katılmasıyla kısıtlanan ters çözüm sonucunda GPR sonuçlarına daha çok benzeyen, yapı sınırlarının daha keskin olduğu özdirenç haritaları elde edilmiş olup hesaplanan bağıl hatalarda da düşüş yaşanmıştır. Ayrıca bu yöntemin ideal olmayan bir referans model kullanıldığında nasıl sonuç vereceği de araştırılmıştır. Bunun için aynı bölgede SSIM indeksi ile sınırlanmamış bir ters çözüm sonucu elde edilmiş özdirenç modelinde bulunan bazı belirtileri içermeyen bir GPR modeli referans alınıp ters çözüm işlemine kısıt olarak katılarak özdirenç modeli yeniden hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlarda yer radarında bulunmayan belirtiler kısmen zayıflasa da ana hatlarıyla korundukları gözlemlenmiştir. Böylece kısmen uygunsuz bir görüntünün dahi ters çözüme bariz bir olumsuz etki yapmadığı görülmüştür. Aynı bölgede GPR verisi olması durumunda DAÖ verilerine GPR verilerini referans olarak SSIM kısıtlı ters çözüm yapılması yorumlaması daha kolay özdirenç model ve haritaları elde etmek açısından önerilmektedir.

Araştırmanın son adımını, bazı belli başlı görüntü işleme süzgeçlerine ait katsayıların ters çözüm işlemine model ağırlık dizeyi olarak katılması oluşturmaktadır. Model ağırlık dizeyi olarak birinci ya da ikinci dereceden Laplacian işlecini eklendiğinde işlem OCCAM ters çözümü ya da yuvarlatıcı kısıtlı ters çözüm olarak anılır. Bu çalışmada MATLAB programlama dili kullanılarak 3B görüntü işleme süzgeçleri oluşturulmuş ve model ağırlık dizeyine Laplacian işlecinden farklı olarak *gaussian*, *box*, *ellipsoidal* ve *sharpen*

süzgeçlerinin katsayıları kullanılarak model ağırlık düzeyleri oluşturulmuş ve 3B ters çözüm işlemi yapılarak elde edilen sonuçlar yuvarlatıcı kısıtlı ters çözüm sonuçlarıyla kıyaslanmıştır. Bu süzgeçlerden ilk üçü yuvarlatıcı etkili olup verideki yüksek frekanslı bileşenlerin ayıklanmasını sağlar. *Sharpen* süzgeci ise yüksek geçişli bir süzgeç görevi yapar ve adından da anlaşılabilir gibi görüntünün keskinleştirilmesini sağlar. Bu süzgeç katsayılarının model ağırlık düzeyi olarak kullanılması, amaca yönelik olarak, analiz edilmesi daha kolay sonuçlar elde etmek için seçilmelidir. Örneğin veride ani değişimler varsa yuvarlatıcı etkili bir süzgecin katsayıları model ağırlık düzeyi olarak kullanılabilir. Bununla birlikte arkeoloji jeofiziği, çevre jeofiziği gibi alanlarda fazla yumuşatılmış/yuvarlatılmış modeller tercih edilmez. Eğer yuvarlatıcı kısıtlı ters çözüm yapıp elde edilen sonuç gerçekçi olmayacak ölçüde bulanık veya yapı sınırlarının doğru tespit edilemeyecek şekilde yayılmış olduğu düşünülürse model ağırlık düzeyi oluştururken keskinleştirici etkisi olan bir süzgeç tercih edilebilir.

Daha önce de belirtildiği gibi görüntü işleme çok geniş bir yelpazede uygulamaları olan bir konudur ve sadece jeofizik alanındaki uygulamaları bile bütünüyle kapsamak oldukça güçtür. Bu tez çalışması içerisinde görüntü işleme yöntemlerinin jeofizik model ve haritaların iyileştirilmesi için uygulanması, veri-işlem sırasında ve sonrasında olmak üzere iki farklı açıdan ele alınmış ve mümkün olduğu kadar çok örnekle desteklenerek sonuçlar tartılışılıp okuyucuya sunulmuştur. Araştırmaya konu olan uygulamalar ileriye gitmeye ve geliştirilmeye uygundur. SSIM kısıtlı ters çözüm farklı arazi verileri ile sınanabilir. Görüntü işleme süzgeçlerinin katsayılarının model ağırlık düzeyini oluşturmak için kullanılması konusunda, çalışmada değinilmemiş, önceden tanımlanmış farklı süzgeçlerin katsayıları kullanılabilir veya yeni süzgeçler tasarlanabilir. Parametre düzeylerine veya onlardan oluşturulan görüntülere yapılacak uygulamalar için arasında çalışma bu çalışmanın kapsamına alınamamış ancak son yıllarda giderek popülerleşen evrimsel sinir ağları (*convolutional neural networks*), makine öğrenmesi (*machine learning*) ve derin öğrenme (*deep learning*) gibi konular araştırılabilir ve bu konular dahilindeki araç ve yöntemler ile ilgili deneyler yürütülebilir. Ayrıca farklı görüntü işleme araçlarının jeofizik haritalara ya da onlardan elde edilen görüntülere uygulanmasını parametre içeriğindeki örüntülere göre otomatik hale getirecek algoritmalar geliştirilmesi de olanaklıdır.

KAYNAKLAR

- Akca, I. 2005. Elektrik Verilerinin Lamarckian Genetik Algoritma ile Ters Çözümü. Yüksek Lisans Tezi. Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Jeofizik Mühendisliği Anabilim Dalı, Ankara
- Akca, I. 2016. ELRIS2D: A MATLAB Package for the 2D Inversion of DC Resistivity/IP Data, *Acta Geophysica*, 64, 443-462.
- Akca I., Balkaya Ç., Pülz, A. Alanyalı, H.S., ve Kaya M.A. 2018. Side Antik Kentinde Yürütülen (Antalya, Türkiye) Jeofizik Araştırmalar. 7. Yer Elektrik Çalıştayı, 7-9 Mayıs 2018, Eğirdir, Isparta.
- Akca İ., Balkaya Ç., Pülz A., Alanyalı H.S., Kaya M.A. 2019. Integrated geophysical investigations to reconstruct the archaeological features in the episcopal district of Side (Antalya, Southern Turkey). *Journal of Applied Geophysics*, 163, 22-30.
- Al Nuamy, W., Huang, Y., Nakhkash, M., Fang, M.T.C., Nguyen, V.T., Eriksen, A., 2000. Automatic detection of buried utilities and solid objects with GPR using neural networks and pattern recognition. *Journal of Applied Geophysics*, 43, 157-165.
- Annan, A.P. 2001. Practical Processing of GPR Data. Sensors & Software, In Proceedings of the EAGE 2001 Conference, 11–15 June 2001, Delft, The Netherlands.
- Aspiron, U., Aigner, T., 1999. Towards realistic aquifer models: Three dimensional georadar surveys of Quaternary gravel deltas (Singen Basin, SW Germany), *Sedimentary Geology*, 129, 281-297.
- Başokur, A.T., 2004, Düşey Elektrik sondajı Verilerinin Yorumu, TMMOB Eğitim Yayınları No:15.
- Başokur, A.T. 2015, Türev Tabanlı Parametre Kestirim Yöntemleri, TMMOB Eğitim Yayınları No:22.
- Beeson, S and Jones, C. R. C. 1988. The combined EMT/VES geophysical method for sitting boreholes. *ground water*, 26(1), 54-63.
- Bergeron, S. Y, Yuen D. A, Vincent, A. P.. (2000a). Capabilities of 3-D wavelet Transforms to detect plume-like structures from seismic tomography, *Geophysical Research Letters*, 26, 2311-2314
- Bhattacharya, P.K., Patra, H.P. 1968 Direct current geoelectric sounding. Elsevier Publishing Co., 106, 226-227.
- Brewster, M.L. and Annan, A.P. 1994. Ground-penetrating radar monitoring of a controlled DNAPL release: 200 MHz radar. *Geophysics*, 59, 1211–1221.
- Buades, A., Coll, B., Morel, J. M. 2005. A non-local algorithm for image denoising. *Proc. of IEEE CVPR*, 2, 60–65.

- Buades, A., Coll, B., Morel, J. 2005. A review of image denoising algorithms, with a new one. *Multiscale Modeling and Simulation: A SIAM Interdisciplinary Journal*, Society for Industrial and Applied Mathematics, 4 (2), 490-530.
- Cai, J. and McMechan, G.A. 1995. Ray-based synthesis of bistatic ground-penetrating radar profiles. *Geophysics*, 60, 87-96
- Candansayar, M.,E., Başokur, A., T. Detecting small scale targets by the 2D inversion of two sided three-electrode data: application to an archeological survey. *Geophysical Prospecting*, 49(1), 13-25
- Candansayar, M.,E. 2002. Sönümü En Küçük Kareler ve Eşlenik Türev Algoritmalarının Ardışık Kullanımı ile Manyetotellürik Verilerinin Düzgünleştiricili İki Boyutlu Ters Çözümü. Doktora Tezi, Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Jeofizik Mühendisliği Anabilim Dalı, Ankara.
- Capineri, L., Grande, P., Temple, J., A., G. 1998. Advanced Image Processing Technique for Real Time Interpretation of Ground-Penetrating Radar Images. John Wiley & Sons, Inc. *Int J Imaging Syst Technol*, 9, 51-59.
- Caputo, R., Piscitelli, S., Oliverto, A., Rizzo, E. 2003. The use of electrical resistivity tomographies in active tectonics: examples from the Tyrnavos Basin, Greece. *Journal of Geodynamics*, 36(1-2), 19-35.
- Carter, N., Lines, L., 2001. Fault imaging using edge detection and coherency measures on Hibernia 3-D seismic data. *The Leading Edge*, 20 (01), 64-69.
- Changryol, K., Daniels, J.J., Guy, E., Radzevicius, S.J., Holt, J., 2000. Residual hydrocarbons in a watersaturated medium: A detection strategy using ground penetrating radar, *Environmental Geosciences*, 7, 4, 169-176.
- 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.
- Çayıroğlu, I. 2018. Görüntü İşleme Ders Notu. Karabük Üniversitesi Mühendislik Fakültesi
- Dahlin, T. 1996. 2D Resistivity Surveying for Environmental and Engineering Applications. *Firs Break*, 14(7), 275-285
- Dannowski, G., Yaramancı, U., 1999. Estimation of water content and porosity using combined radar and geoelectric measurements, *European Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 4, 71-85.
- Davis, J.L., Annan, A.P., 1989. Ground-penetrating radar for high resolution mapping of soil and rock stratigraphy, *Geophysical Prospecting*, 37, 531-551.
- Demanet, D., Pirard, E., Renardy, F., Jongmans, D. 2001. Application an Processing of Geophysical Images for Mapping Faults. *Computers & Geosciences*, 27, 1031-1037.

- deGroot-Hedlin, C., Constable, S. 1990. OCCAM's Inversion to generate smooth, Two-Dimensional Models From Magnetotelluric Data. *Geophysics*, 55, 1613-1624.
- Ekinci, Y.L., Kaya, M.A. 2007. 3D resistivity imaging of buried tombs at the Parion necropolis (NW Turkey). *Journal of the Balkan Geophysical Society*, 10, 1-8.
- Gelis, C., Revil, A., Cushing, M. E., Jougnot D., Lemeille F., Cabrera J., Hoyos, A. D., Rocher M. 2010. Potential of Electrical Resistivity Tomography to Detect Fault Zones in Limestone and Argillaceous Formations in the Experimental Platform of Tournemire, France. *Pure and Applied Geophysics*, 167, 1405-1418.
- Gerlitz, K., Knoll, M.D., Cross, G.M., Luzitano, R.D., and Knight, R. 1993. Processing ground penetrating radar data to improve resolution of near-surface targets, *Proceeding of the Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems*. San Diego, California.
- Ghosh, D.P. 1971. Inverse filter coefficients for the computation of apparent resistivity standart curver a horizontally stratified earth, *Geophysical Prospecting*, 19, 769-775.
- Gonzales, R., C., Woods R., E. 2018. *Digital Image Processing*. 2018. Pearson Education. 1024. United Kingdom.
- Goodman, D., 1994, Ground-penetrating radar simulation in engineering and archaeology. *Geophysics*, 59, 224–232.
- Grandjean, G., Gourry, J.C., 1996. GPR data processing for 3D fracture mapping in a marble quarry (Thassos, Greece), *Journal of Applied Geophysics*, 36, 19-30.
- Green, A., Gross, R., Holliger, K., Horstmeyer, H., Baldwin, J., 2003. Results of 3-D georadar surveying and trenching the San Andreas fault near its northern landward limit, *Tectonophysics*, 368, 7-23.
- Greenhalgh, S., Bing, Z., Green, A. Solutions, Algorithms and Inter-Relations for Local Minimization Search Geophysical Inversion. *Journal of Geophysics and Engineering*, 3, 101-113
- Gündoğdu, N., Y., 2013, Doğru Akım Özdirenç Verilerinin Üç Boyutlu Düzgünleştiricili Ardışık Ters Çözümü. Doktora Tezi, Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Jeofizik Mühendisliği Anabilim Dalı, Ankara.
- Gündoğdu, N. Y., Candansayar, M. E. 2018. Three dimensional regularized inversion of DC resistivity data with different stabilizing functionals. *Geophysics*, 83(6), 138-151
- Harrari, Z., 1996. Ground penetrating radar (GPR) for imaging stratigrafic features and groundwater in sand dunes, *Journal of Applied Geophysics*, 36, 43-52
- Hazell, J. R. T., Cratchley, C. R., Preston, A. M. 1988. The Location of Aquifers in Crystalline Rocks and Alluvium in Northern Nigeria using Combined

- Electromagnetic and Resistivity Techniques. Quarterly Journal of Engineering Geology, 21, 159-175.
- Hovertsen, G., M. Dey, A., Morrison H., F. Comparison of five least squares inversion techniques in resistivity sounding. Geophysical Prospecting, 30, 798-817.
- Inman, J.R. 1975. Resistivity inversion with ridge regression. Geophysics, 40, 798-817.
- Jupp, D., L., B., Vozoff, K. 1977. Resolving Anizotropy in Layered Media by Joint Inversion. Geophysical Prospecting, 25(3), 460-470.
- Johnson C. T., Versteeg R. J., Ward A., Frederick D. L., Revil, A. 2010. Improved hydrogeophysical characterization and monitoring through parallel modeling and inversion of time-domain resistivity and induced-polarization data. Geophysics. 75(4). 176-198
- Jol, H. 1996. Digital ground penetrating radar (GPR): a new geophysical tool for coastal barrier research (examples from the Atlantic, Gulf and Pacific Coasts, U.S.A.). J. Coastal Research, Fall 1996.
- Kadioğlu, S., 2008. Photographing layer thicknesses and discontinuities in a marble quarry with 3D GPR visualization. Journal of Applied Geophysics, 64(3), 109-114.
- Kadioğlu, S., and Daniels, J. J, 2008. 3D visualization of integrated ground penetrating radar data and EM-61 data to determine buried objects and their characteristics. Journal of Geophysics and Engineering, 5, 448-456.
- Kaya, M.A., Akca, I., Işık, H., Çakmak, O., Balkaya, Ç. 2018. Patara Antik Kenti (GB Anadolu) Arkeojeofizik Araştırmalarının Ön Sonuçları. 7. Yer Elektrik Çalıştayı, 7-9 Mayıs 2018, Eğirdir, Isparta.
- Lampe B. and Holliger K. 2000. Finite-difference modelling of ground-penetrating radar antenna radiation: 556 bis 560. Proceedings of the 8th International Conference on Ground Penetrating Radar, Gold Coast, Australia.
- Lanchoz C. 1961. Linear differential operators. Van Norstrand-Reinhold, Princeton, New Jersey.
- Linde, N., Binley, A., Tryggvason, A., Pedersen, L. B., Andre, Reviv. 2006. Improved hydrogeophysical characterization using joint inversion of cross-hole electrical resistance and ground-penetrating radar traveltime data. Water Resources Research, 42, 202-218.
- Maijala, P. 1992. Application of some seismic data processing methods to ground penetrating radar data: Fourth International Conference on Ground Penetrating Radar. Rovaniemi, Finland.
- Marques, O. 2011. Practical image and video processing using MATLAB. Wiley IEEE Press, 639, US

- Mazak O., Kelly W. E., Landa I. 1987. Surface geoelectrics for groundwater pollution and protection studies, 93, 277–294
- Menke W. 1984. Geophysical data analysis: Discrete Inverse Theory. Academic Press, Inc.
- Morozov, I. B., and Smithson, S. B. (1996). Instantaneous Polarization Attributes and Directional Filtering. *Geophysics*, 61, 872- 881.
- Nieto, I.M., Martin, A.F., Blazques, C.S., Aguilera, D.G., Garcia, P.G., Vasco, E.F., Garcia, J.C. 2019. Use of 3D electrical resistivity tomography to improve the design of low enthalpy geothermal systems. *Geothermics*, 79, 1-13.
- Nguyen, F., Garambois, S., Jongmans, D., Pirard, E., Loke, M., H., 2005, Image Processing of 2D Resistivity Data for Imaging Faults, *Journal of Applied Geophysics*, 57, 260-277.
- Nobes, D. C., 1999, Geophysical surveys of burial sites: A case study of Oaro urupa. *Geophysics*, 64, 357–3
- Osinowo, O.O., Falufosi, M.O. 2018. 3D Electrical Resistivity Imaging (ERI) for subsurface evaluation in pre-engineering construction site investigation. *NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics*, 2018, 309-317
- Overmeeren, R.A., and Ritsema, I.L. 1988. Continuous vertical electrical sounding. *First Break*, 6, 313-324.
- Panagiotakis, C., Kekinou, E., Sarris A. 2011. Curvilinear Structure Enhancement and Detection in Geophysical Images. *IEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 49(6), 2040-2048.
- Papadopoulos, N.G., Yi, M.J., Kim, J-H., Tsourlos, P. and Tsokas, G.N. 2010. Geophysical investigation of tumuli by means of surface 3D Electrical Resistivity Tomography. *Journal of Applied Geophysics*, 70, 192-205.
- Pasteka, R., Karcot, R., Kusnirak, D. 2012. REGCONT: A Matlab based program for stable downward continuation of geophysical potential fields using Tikhonov regularization. *Computers & Geosciences*, 49, 278-289.
- Pelton, W. H., Ward, S. H., Hallof P.G., Silli W. R., Nelson P. H. Mineral discrimination and removal of inductive coupling with multifrequency IP. *Geophysics*, 43(3), 497-638
- Perona, P., Malik, J. 1990. Scale-Space and Edge Detection Using Anisotropic Diffusion. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 12, 629-639.
- Portniaguine, O., Zhdanov M., S.. 1999. Focusing Geophysical Inversion Images. *GEOPHYSICS*, 64, 847-887

- Plattner, A., Robbins, A. 2018. GPR Data Processing and Visualization with GPR-O. NS Geophysics. Web Sitesi: <https://github.com/NSGeophysics/GPR-O/wiki>. Erişim Tarihi: 16.9.2020.
- Ralsron, J.C., Hainsworth, D.W. 2000. Use of Ground Penetrating Radar in Underground Coal Mining, *Proceedings of SPIE*, 4084, 731-736.
- Revil, A., Karaoulis, M., Johnson, T., Kemna, A. 2012. Review: Some low-frequency electrical methods for subsurface characterization and monitoring in hydrogeology. *Hydrogeology Journal*, 20, 617-658.
- Rudin, L.I., Osher, S., and Fatemi, E. 1992. Nonlinear total variation based noise removal algorithms: *Physica D*, 60, 259-268.
- Sarıççek, I., 2014, Mühendislik Problemlerinde GPR Yöntemi, Gümüşhane Üniversitesi Jeofizik Mühendisliği Sertifika Programı
- Sasaki Y. 1981. Automatic interpretation of resistivity sounding data over two-dimensional structures. *Geophysical Exploration (Butsuri-Tanko)* 34, 341-350
- Sasaki Y. 1989. Two-dimensional joint inversion of magnetotelluric and dipole-dipole resistivity data. *Geophysics* 54, 254-262.
- Slichter, L.B. 1933. The interpretation of the resistivity prospecting method for horizontal structures. *Physics*, 4, 307-322.
- Spitzer, K. 1995. A 3-D Finite-Difference Algorithm for DC Resistivity Modelling Using Conjugate Gradient Methods. *Geophysical Journal International*, 123, 903-914.
- Storz, H., Storz, W., Jacobs, F. 2000. Electrical resistivity tomography to investigate geological structures of the earth's upper crust. *Geophysical Prospecting*. 48(3). 455-471
- Tikhonov, A. N., Arsenin, V. Y. 1977. *Solutions of ill-posed problems*. Halsted Press, 258, New York.
- Vaibhav, G. K., Rao, C. S. 2016. Blind Image Quality Assessment With Local Contrast Features. *International Journal on Cybernetics & Informatics (IJCI)*, 5, 2078 – 2089.
- Van Overmeeren R.A. 1989. Aquifer boundaries explored by Geoelectrical measurements in the coastal plain of Yemen: a case of equivalence. *Geophysics*, 54(1), 38-48.
- Wang, Z., Bovik, A. C. Mean squared error: Love it or leave it? A new look at Signal Fidelity Measure. 2009. *IEEE Trans Signal processing*, 26, 98-112.
- Wang, Z., Bovik, A.C., Sheikh H., R.. 2005. Structural Similarity Based Image Quality Assessment. In: *Digital Video Image Quality and Perceptual Coding*. Wu, H. R., Rao K.R. (eds), CRC Press. 222-240. Boca Raton

- Wang, Z. 2004. Image quality assessment: From error visibility to structural similarity. IEEE Tr. Image Proc, 13, 600–612.
- Weeratunga S.K., Kamath C. 2003. A comparison of PDE-based non-linear anisotropic diffusion techniques for image denoising. Image Processing: Algorithms and Systems II, San Jose, January 2003. UCRL-JC-151493.
- Zeng, X., McMechan, G.A., Cai, J., and Chen, H.W. 1995. Comparison of Ray and Fourier methods for modeling monostatic ground-penetrating radar profiles. Geophysics, 60, 1727–1734.
- Zhou, J., Revil., A., Karaoulis., M., Hale., D., Doetsch., J., Cuttler., S. 2014. Image Guided Inversion of Electrical Resistivity Data., Geophysical Journal International, 197, 292-309.



EK 1

```
function [FI,F_Mag,F_MagS]=fouriersuzgec(I,suztip,yuzde)

F=fft2(I);
F_Mag=abs(fftshift(F));
F_Phase=exp(1i*angle(F));

if suztip=='AG'
    [row col]=size(F_Mag);
    [x,y]=meshgrid(-(row/2):(row/2-1),-(col/2):col/2-1);
    z=sqrt(x.^2+y.^2);
    yuzde=20
    radius=(length(F_Mag)*yuzde)/100;
    d=z<radius;
    F_MagS=F_Mag.*d';
    F_MagS=fftshift(F_MagS);
    FI=ifft2(F_MagS.*F_Phase);
elseif suztip=='YG'
    [row col]=size(F_Mag);
    [x,y]=meshgrid(-(row/2):(row/2-1),-(col/2):col/2-1);
    z=sqrt(x.^2+y.^2);
    radius=(length(F_Mag)*yuzde)/100;
    d=z>=radius;
    F_MagS=F_Mag.*d';
    F_MagS=fftshift(F_MagS);
    FI=ifft2(F_MagS.*F_Phase);
elseif suztip=='IN'
    imagesc(F_Mag,[0 7000]);colormap(jet)
    totMask = zeros(size(F_Mag));
    while true
        iptPointerManager(gcf, 'enable');
        enterFcn = @(gcf, currentPoint)...
            set(gcf, 'Pointer', 'cross');
        iptSetPointerBehavior(gca, enterFcn);
        k = waitforbuttonpress;
        sel = get(gcf, 'SelectionType')

        if strcmpi(sel, 'normal')

            hFH = imfreehand();
            BW = hFH.createMask();
            xy = hFH.getPosition;
            totMask = totMask | BW;
            elseif strcmpi(sel, 'alt')

        break
    end
end
F_MagS = F_Mag;
F_MagS(totMask) = 0;
F_MagS=fftshift(F_MagS);
FI=ifft2(F_MagS.*F_Phase);
F_MagS=fftshift(F_MagS);
end
```

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Şerif Murat Gölebatmaz
Doğum Yeri : Ankara
Doğum Tarihi : 19.10.1989
Medeni Hali : Bekar
Yabancı Dili : İngilizce

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise : Etimesgut Anadolu Lisesi (2007)
Lisans : Ankara Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Jeofizik Mühendisliği
(2017)
Yüksek Lisans : Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Jeofizik Mühendisliği
Anabilim Dalı (Eylül 2018 – Ocak 2021)

Yayınlar (SCI)

Akca, I., Gölebatmaz, Ş., M., Three-dimensional inversion of DCR data incorporating structural similarity constraint. 2021. Journal of Applied Geophysics, 184(1).

Hakemli Dergiler

Akca, I., Gölebatmaz, Ş., M., Three-dimensional inversion of DCR data incorporating structural similarity constraint. 2021. Journal of Applied Geophysics, 184(1).