



Görüntü İşleme Yöntemlerinin Jeofizik Haritalara Uygulanması: Arkeoloji Jeofiziği Alanından Örnekler

Application of Image Processing Methods to Geophysical Maps: Examples From Archaeogeophysical Investigations

ŞERİF MURAT GÖLEBATMAZ^{1*} , İRFAN AKCA¹ ,

¹ Ankara Üniversitesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye

Geliş (*received*): 15 Ekim (*October*) 2021 Kabul (*accepted*): 8 Nisan (*April*) 2022

ÖZ

Uygulamalı jeofizik yöntemler ile belirli bir fizik parametresinin yerdeki dağılımına bağlı olarak yer içinin olanaklı en net görüntüsü elde edilmeye çalışılır. Bu amaçla farklı fizik ilkelerine dayanan yöntemlerle yapılan ölçümlere ait veriler, çeşitli veri işlem adımlarından geçirilerek kesit, harita ve modeller halinde görsel veya sayısal olarak sunulurlar. Yöntemlerin ve sayısal işlemlerin doğası gereği son adımda sunulan sonuçlarda yalancı belirtiler, asıl belirtiyi örten gürültüler ve bozulmalar görülebilir. Bu sorunu aşmak ve jeofizik haritaların yorumlanmasını daha kolay hale getirmek için görüntü işleme yöntemlerinden faydalanılabilir. Görüntü işleme giderek gelişen ve uygulama alanları sürekli genişleyen bir alandır. Bu çalışmanın konusu, görüntü işleme yöntemlerinin jeofizik harita ve görüntülerin iyileştirilmesi için kullanılmasını kapsamaktadır. Çok sayıda görüntü işleme yöntemi arasından, histogram işlemleri, dönüşüm fonksiyonları, yerel gürültü giderme araçları, yerel olmayan ortalama süzgeci, yapay sinir ağları, netleştirme algoritmaları ve morfolojik süzgeçler genel olarak tanıtılmış ve yakın yüzey jeofizik araştırmalardan elde edilen görüntülere uygulanarak sonuç ve etkinlikleri tartışılmıştır. Uygulama açısından daha belirgin sonuçlar üreteceğinden, çizgisellik ve yapısal unsurlar içeren arkeoloji jeofiziği çalışmalarına ait jeofizik sonuçlar tercih edilmiştir. Görüntü işleme yöntemlerin hepsi farklı amaçlara yönelik kullanışlı olsalar da özellikle yerel olmayan ortalama süzgeci ve yapay sinir ağlarının gürültü giderme konusunda oldukça başarılı olduğu dikkat çekmiştir. Histogram düzenleme işlemleri ve morfolojik süzgeçler ise bir arka plan üzerinde belirtileri ortaya çıkarmak için oldukça kullanışlıdır.

Anahtar Kelimeler: Arkeoloji Jeofiziği, Elektrik Özdirenç Tomografisi, Görüntü İşleme, Yer Radarı

ABSTRACT

In applied geophysics methods, it is attempted to obtain the clearest possible image of the subsurface, based on the distribution of a certain physical parameter. For this purpose, measured data related with different physical principles are processed and presented visually or numerically in the form of sections, maps and models. Due to the nature of the applied geophysical methods and numerical processes, artefacts, noise, and distortions blocking the actual anomaly may be observed in the presented results. Image processing methods can be used to overcome this problem and to make geophysical maps easier to interpret. Image processing is a field of study that is gradually improving, and the areas of application are widening continuously. The subject of this study covers the use of image processing methods for the improvement of geophysical maps and images. Among many image processing methods, histogram operations, transformation functions, local noise removal tools, non-local mean filtering, artificial neural networks, sharpening algorithms and morphological filters are briefly introduced and applied to images obtained from near surface geophysical surveys and their results and effectiveness are discussed. Geophysical results of archaeological geophysics studies including linear and structural elements have been preferred for the demonstration of applications, since they will produce more significant results. Although all the methods are useful for different purposes, it has been noted that especially the non-local mean filter and artificial neural networks are quite successful in noise removal. Histogram editing operations and morphological filters are very useful for distinguishing anomalies from a background.

Keywords: Archaeological Geophysics, Electrical Resistivity Tomography, Image Processing, Ground Penetrating Radar

<https://doi.org/10.17824/yerbilimleri.1006057>

*Sorumlu Yazar/ Corresponding Author: smgolebatmaz@ankara.edu.tr

GİRİŞ

Jeofizik yöntemlerin uygulanması ile elde edilen veriler işlenerek elde edilen sonuçlar, harita (x-y), derinlik kesiti (x-z) veya üç-boyutlu model (x-y-z) olarak sunulabilir. Burada, verinin nasıl bir geometri ile hangi jeofizik yöntem kullanılarak, ne yoğunlukla toplandığının yanı sıra çalışmadan elde edilmesi beklenen ayrımlılık da belirleyicidir. Görsel sunumlarda sayılan geometrik gösterimlerin farklı birleşimleri, ya da bunlardan türetilen başka görüntüleme yöntemleri (izoyüzey gibi) de kullanılır. Jeofizik veriler ilgili fiziksel parametrenin dolaylı ölçümünden elde edilir. Bunun yanı sıra verilerin değerlendirilmesi

sonucunda eşdeğer modeller üretilebileceğinden, karar adımında bir yorum süreci gereklidir. Önemli kararların alındığı bu aşamada jeofizik model veya görselin istenmeyen etkilerden arındırılmış ve olanaklı olan en net haline getirilmiş olması yorumcunun işini kolaylaştıracak, karar alma sürecini iyileştirecektir. Bu nedenle jeofizik verinin anlamlı hale getirilmesini sağlayan temel veri işlem ve sayısal yöntemlerden (süzgeçleme, genlik düzeltme, ters-çözüm vd.) hariç olmak üzere çeşitli aşamalarda görüntü işleme yöntemlerinin kullanılması akılcı bir yoldur.

Görüntü işleme tekniklerinin jeofizikte uygulamaları ile ilgili literatürde çalışmalar bulunmaktadır. Bunlar başlıca potansiyel alan yöntemlerindeki uygulamaları kapsamaktadır (Örneğin Lili vd. 2005). 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) ile Carter ve Lines (2001) tarafından geliştirilen görüntü işleme algoritmaları, sismik ve elektrik öz direnç kesitlerinde fay yapılarının otomatik olarak belirlenmesini sağlamıştır. Fayların haritalanması amacıyla jeofizik görüntülere görüntü işleme araçlarının uygulandığı diğer çalışmalar için Demanet vd. (2001) ve Nguyen vd. (2005) örnek verilebilir. Büyüksaraç vd. (2008) Türkiye Afyonkarahisar bölgesinde yürüttükleri çalışmada topladıkları manyetik verilerin işlenmesi sırasında faz-temelli kenar belirleme algoritmalarından faydalanmışlardır. Panagiotakis vd. (2011) jeofizik görüntülerdeki çizgisellikleri belirleyen bir algoritma üzerinde çalışmış ve sonuçlarını yapay ve gerçek kesitler üzerindeki uygulamalar ile tartışmışlardır. Arısoy ve Dikmen (2014) manyetik belirti haritalarının iyileştirilmesi için histogram eşitleme yöntemini kullanmışlardır. Kenar belirleme veya yapısal sınırların belirginleştirilmesi amacıyla Arısoy ve Dikmen (2015) kesirli türevler yaklaşımlarını uygulamışlardır. Wu ve Hale (2016) üç boyutlu sismik görüntülerde fayların otomatik olarak belirlenebilmesi için görüntü işleme yöntemlerinden faydalanmışlardır. Fay yapılarının otomatik olarak belirlenmesine bir başka örnek, Qi vd. (2019) tarafından, sismik nitelikler üzerinde görüntü işleme tekniklerinin uygulanmasıyla gerçekleştirilmiştir.

Jeofizik çalışmaların önemli bir bölümünün çok disiplinli olması nedeni ile sonuç olarak sunulan görsellerin, farklı disiplinlerden araştırmacı ve ilgililerce de daha kolay anlaşılabilir olması

beklenen bir durumdur. Jeofizik görüntülerin aranan hedef yapı ile kolayca ilişkilendirilebilir hale getirilebilmesi bu anlamda da gerekli ve önemlidir. Böyle durumlarda görüntü işleme araçları, haritalarda önemli kısımların belirginleştirilmesi, ilgilenilmeyen kısımların ise bastırılması amacıyla kullanılabilir. Sözü edilen görüntü işleme araçları, doğrudan ters çözüm sonucuna veya işlenmiş verinin kendisine uygulanabileceği gibi parametre düzeyi sayısal görüntüye dönüştürülerek (0-255 veya 0-1 arasında değişen değerler arasında ölçeklendirilerek) de bu işlem yapılabilir.

Bu çalışmada arkeolojik alanlarda yürütülen jeofizik çalışmalardan elde edilen jeofizik haritalar, farklı görüntü işleme araçları kullanılarak iyileştirilmeye çalışılmıştır. Görüntü histogramının amaca yönelik olarak yeniden düzenlenmesine örnek verilmiş, dönüşüm fonksiyonlarının nasıl kullanılabileceğine değinilmiştir. Görüntü işleme uygulamalarında, görüntü giderme amacıyla sıklıkla kullanılan Gaussian süzgeci ve benzeri süzgeçler tanıtılıp bunların jeofizik haritalar üzerinde nasıl kullanılabileceği üzerinde durulmuştur. Ayrıca sözü edilen süzgeçlere alternatif olarak üretilmiş yerel olmayan ortalama (NLM) süzgecinin ne gibi avantajları olabileceği tartışılmış, görüntülerde görüntü giderme amacıyla yapay zekanın kullanımına bir örnek verilmiştir. Bunlardan başka bazı görüntü netleştirme algoritmalarına değinilmiş ve son olarak, görüntünün içerisindeki farklı yapıları ayırt etmeyi kolaylaştıran morfolojik süzgeçler arasından şapka süzgecinin (top-hat filter) jeofizik harita üzerinde örnek bir uygulaması verilmiştir.

MATERYAL VE METOT

Görüntüler sayısal ortamda iki boyutlu dizeyler olarak kaydedilirler. Piksel, en küçük görüntü birimi olup, görüntüyü oluşturan dizeyin tek bir elemanı ile temsil edilir. Bu elemanın dizey içindeki konumu koordinat bilgisine, elemanın

skaler büyüklüğü ise “yeğinlik” (*intensity*) değerine karşılık gelmektedir. Görüntüler özünde iki boyutlu dizeler olduğundan görüntü işleme, temelde iki boyutlu sinyal işleme uygulamasıdır. Bu çalışmada görüntü işleme yöntemleri elektrik özdirenç ve yer radarı yöntemiyle elde edilmiş haritalar üzerinde uygulanmıştır.

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). DAÖ yönteminin uygulanması tipik olarak iki akım elektrotundan akım verilmesi ve iki gerilim elektrotundan oluşan gerilim farkı değerlerinin okunması esasına dayanır Aynı jeolojik durumda farklı elektrot dizilimleri için farklı görünür özdirenç değerleri hesaplanmaktadır. Başlangıçta uygulamalar ölçülen verilerin doğrudan yorumlanmasıyla yapılırken artık iki ve üç boyutlu veri toplama ve ters çözüm işlemleriyle daha güvenilir sonuçlar elde edilebilmektedir. Günümüzde DAÖ yönteminde veri toplama genellikle çok elektrotlu cihazlarla yapılmaktadır.

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 yansıyarak geri döner ve alıcı anten ile kayıt birimi tarafından kaydedilir. Kayıt edilen izlere “radar izi” denmektedir. Bir profil boyunca tüm ölçü noktalarındaki radar izleri, profil üzerindeki konumları ile sıralanarak iki boyutlu radar kesitleri veya radargramlar elde

edilir. Paralel hatlar boyunca oluşturulan radargramlardan aynı derinlik seviyesine karşılık gelen noktaların birleştirilmesiyle yer radarı haritaları ya da derinlik dilimleri elde edilir. Yer radarı yöntemi arkeolojik alanlarda uzun süredir kullanılmaktadır (Goodman, 1994; Zhao 2013). Ayrıca çevre araştırmalarında (Brewster ve Annan 1994), jeolojik yapı araştırmalarında (Jol 1996) ve daha pek çok alanda uygulamaları vardır.

Bu çalışmada jeofizik haritaların iyileştirilmesi için görüntü işleme araçları kullanılmıştır. Kullanılan haritalar Patara (Kaya vd., 2018) ve Side (Akca vd., 2019) antik şehirlerinde yürütülen jeofizik araştırmaların sonuçlarından alınmıştır. Bu çalışmada kullanılan görüntü işleme araçları başlıca: görüntü içindeki piksellerin değerlerini ölçeklendirmeyi amaçlayan histogram işlemleri; piksellere ya da parametre değerlerine doğrusal veya doğrusal olmayan bir dönüşüm fonksiyonunun uygulanması; her piksel değerinin komşuluğundaki pikseller ile ağırlıklandırılarak yeniden hesaplanmasına yarayan yerel görüntü iyileştirme araçları, yerel gürültü giderme araçlarının bazı zayıflıklarından kurtulmak amacıyla geliştirilmiş yerel olmayan ortalama süzgeci; günümüzde oldukça yaygınlaşmaya başlayan yapay zeka konusunun gürültü giderme amaçlı bir uygulaması; gürültü giderme işlemlerinden farklı olarak görüntüdeki yuvarlatma etkisini gidermeyi amaçlayan bazı netleştirme algoritmaları ve görüntüdeki yapısal özelliklerin belirginliklerinin değiştirilmesi için kullanılan morfolojik süzgeçler olarak sıralanabilir.

Histogram işlemleri

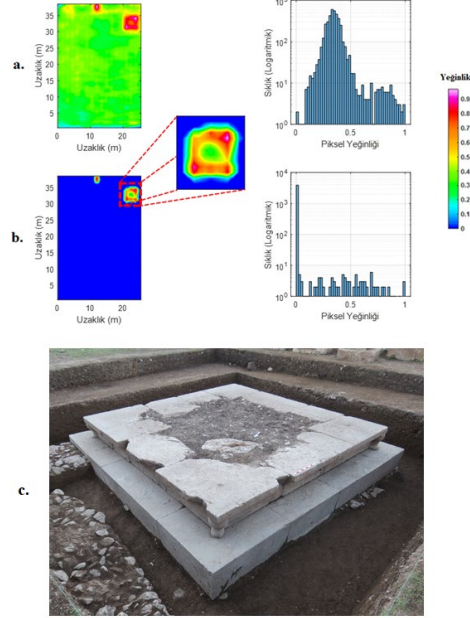
Bir görüntünün histogramı, görüntü içerisindeki farklı piksel yeğinliklerinin sıklığını veya dağılımını vermektedir. Matematiksel olarak, gri-seviye bir görüntünün histogramı

$$h(k) = n_k \quad (k = 0,1, \dots, 255) \quad (1)$$

şeklinde tanımlanabilir. Burada k piksel yeşinliğini, n_k ise yeşinliği k olan piksellerin sayısını vermektedir. Bir görüntünün histogramını farklı şekillerde düzenleyen birçok hazır algoritma bulunmaktadır. Histogram eşitleme ve histogram dengeleme algoritmaları bunların en yaygın olarak kullanılanlarıdır. Histogram eşitleme işlemi kısaca görüntünün histogramını yaklaşık düz bir hale getirerek kontrastı artırmayı amaçlar, bazı histogram dengeleme algoritmalarıyla görüntü histogramı yaklaşık olarak Gaussian fonksiyona benzeyecek şekilde düzenlenebilir (Morozof ve Smithson, 1996; Chen ve Ramli, 2003). Bunun yanında kullanıcı tarafından amaca yönelik olarak bir histogram düzenleme algoritmasının tasarlanması da oldukça kolaydır.

Bu çalışmada, uygulamanın amacına yönelik olarak histogram düzenleme işleminin etkisine dair örnekler verilmiştir. Örnekte kullanılan görüntü, Patara antik kentinde ölçülen doğru akım özdirenç verilerinin üç-boyutlu ters çözümünden elde edilmiş özdirenç haritasıdır (Şekil 1a). Kentin agorasında 2018 yılında gerçekleştirilen çalışmada yaklaşık 50 cm derinlikte 4m x 4m boyutlarında oldukça düzgün geometri bir belirti tespit edilmiştir. Bölgede yapılan kazı sonucunda bu belirtinin, tam olarak beklenen derinlikte ve aynı boyutlarda anıtsal bir yapının kalıntısına ait olduğu görülmüştür (Kaya vd.,2018). Ölçümler kullanılarak üretilmiş model ile gerçek yapı arasındaki tek fark, modeldeki belirtinin aksine kazıda ortaya çıkan yapının içinin boş olmasıdır. Aslında yapının içinin boş olduğu bilgisi sunulan haritada bulunmaktadır. Ancak ilgilenilen yapının, görüntü histogramında temsil edildiği renk aralığının çok dar olması bu bilginin ortaya çıkmasını engellemiştir. Burada sunulan elektrik özdirenç parametresinin yanal değişimi histogram düzenlemesi ile daha

belirgin hale getirilmiş bu sayede daha çok ayrıntı ayırt edilebilir bir kontrasta kavuşmuştur.



Şekil 1. a. Patara antik kenti agorasında elde edilen özdirenç derinlik haritası ve görüntü histogramı b. aynı haritanın histogram düzenleme uygulanmış hali ve yeni histogramı c. Çalışma alanında yapılan kazıda ortaya çıkarılan anıtsal yapı kaidesi

Figure 1. a. Resistivity depth slice and its image histogram from the agora of the ancient city of Patara b. same resistivity map after histogram adjustment along with the image histogram and c. monumental structure basement unearthed after the excavation in study area

Şekil 1a'da görülen görüntü Patara bölgesinde yapılan DAÖ çalışmaları (Akca, 2018) sonucu elde edilen haritalardan birinin piksel yeşinlikleri 0-1 arasında değişen bir görüntüye dönüştürülmesiyle oluşturulmuştur. 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 16 m² büyüklüğünde ve 50 cm derinliğinde oldukça düzgün geometri bir yapı belirlenmiştir. Daha sonra bölgede gerçekleştirilen kazıda bu belirtinin tam da tahmin edilen boyutlarda ve derinlikte bulunan ve agoranın ortasında anıtsal bir yapının temeli olduğu ortaya çıkmıştır (Şekil 1c). Şekil 1a'daki görüntünün histogramının düzenlenmiş bir hali Şekil 1b'de görülmektedir. Burada yapının içinin boş olduğu net bir şekilde fark edilmektedir. Burada ilgilendiğimiz yapıyı içeren piksellerin yüksek yeğlilikli oldukları düşünülmüş, bu nedenle 0.60 ve daha küçük yeğlilikteki pikseller sıfıra eşitlenip geriye kalan kısım 0 ve 1 arasında ölçekleme yoluna gidilmiştir. Görüntülerin histogram grafikleri karşılaştırılırsa, işlenmiş olan görüntünün histogram grafiğinde, görüntünün arka planını oluşturan sıfır değerli piksellerin en fazla sayıda olduğu, diğer değerlerin ise grafikteki sütunlar yaklaşık düz bir çizgiyi andıracak şekilde yeniden düzenlendiği görülebilir (Gölebatmaz, 2020).

Görüntülerin histogramları üzerinde düzenlemeler yapmak için dönüşüm fonksiyonlarından da faydalanılabilir. Jeofizik haritalar, farklı dönüşüm fonksiyonları ile dönüştürülerek verinin görselleştirilmesi için çeşitli denetimler yapılabilir. Söz gelimi parametre dağılımını olduğu gibi çizdirmek bazı ayrıntıların kaybolmasına sebep olabilir. Bunun sebebi görüntü histogramının küçük bir aralığa sıkışması ve karşıtlığın (*kontrast*) düşmesidir ki bu durum renk ölçeğinin oldukça küçük bir kısmının kullanılmasına sebep olur. Parametre değerlerinin logaritmaları çizdirilerek bu durumun üstesinden

gelinebildiği uygulamalar bulunmaktadır. Bu işlem logaritmik bir dönüşüm fonksiyonunun parametrelere (ya da piksellere) uygulanması ile eşdeğerdir. Logaritmik çizimler dışında, istenilen amaçlara göre dönüşüm fonksiyonları tasarlamak da mümkündür. Bir dönüşüm fonksiyonunun uygulandığı,

$$g(x, y) = T[f(x, y)]. \quad (2)$$

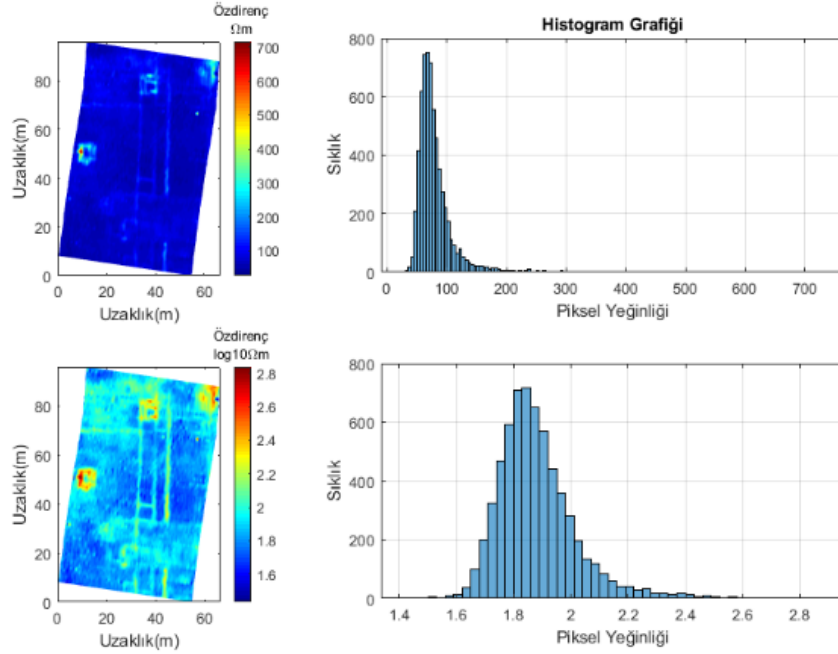
şeklinde ifade edilebilir. Eşitlik 2'de $f(x, y)$ giriş görüntüsünü, $g(x, y)$ dönüştürülmüş görüntüyü ve T $f(x, y)$ üzerinde uygulanan dönüşüm fonksiyonunu ifade eder. Eşitlik 2'yi her piksel için yeniden yazarsak,

$$s = T[r] \quad (3)$$

halini alır. Burada r orijinal piksel s ise dönüşüm sonrası elde edilen piksel değeridir (Marques, 2011).

Dönüşüm fonksiyonları, doğrusal veya doğrusal olmayan fonksiyonlar olabilir. Şekil 2'de logaritmik bir dönüşüm fonksiyonunun uygulaması verilmiştir. Burada kullanılan öz direnç haritası, Side antik kentinde yürütülen jeofizik çalışmadan alınmıştır (Akca vd. 2019).

Şekil 2a'da ters çözüm sonucu elde edilmiş parametreler (öz direnç) sağ tarafında histogram grafiğiyle birlikte herhangi bir değişiklik yapılmadan çizilmiştir. Histogram grafiğinden anlaşılabilen gibi parametre değerleri küçük bir aralığa sıkışmış bu da öz direnç haritasındaki belirtilerin görülmesini zorlaştırmıştır. Şekil 2b'de ise aynı parametrelerin logaritmalarının çizdirilmiş olması histogram grafiğini genişletmiş ve



Şekil 2. Side antik kentinde elde edilen özdirenç derinlik haritasının doğrusal (üstte) ve logaritmik (altta) parametre değerleri kullanılarak çizdirilmiş görüntüleri ve görüntü histogramları

Figure 2. Resistivity map from Side ancient city plotted using linear (top) and logarithmic (bottom) parameter values along with image histograms

haritadaki detayların görülmesini kolaylaştırılmıştır.

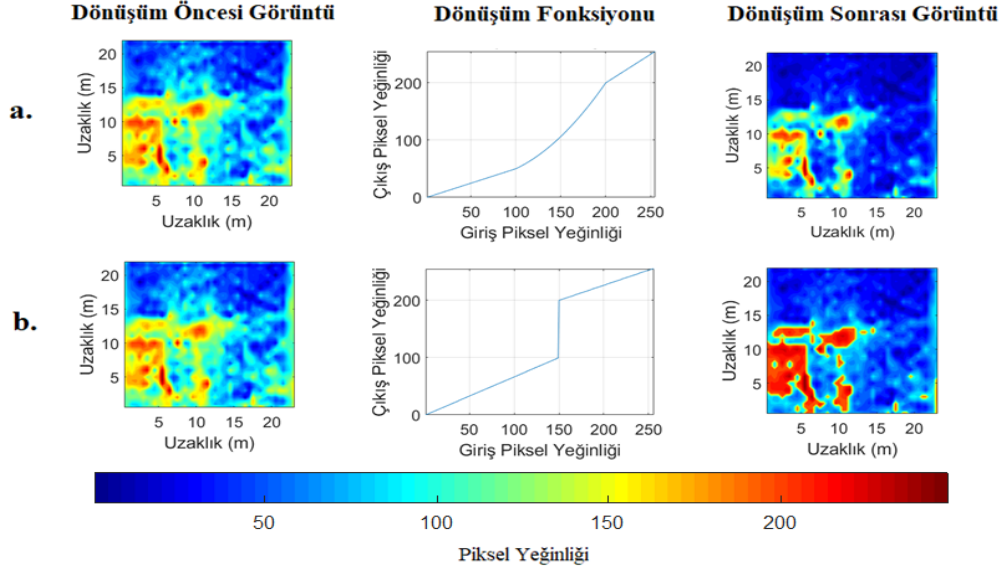
Şekil 3'de kullanıcı tanımlı dönüşüm fonksiyonlarının kullanımına örnekler görülmektedir. Bu fonksiyonlar her biri

$$s = c \cdot r + b \quad (4)$$

bağıntısı yardımıyla tanımlanmış birkaç doğrusal fonksiyonun birleştirilmesi ile tasarlanmıştır. Eşitlik 4'de r orijinal piksel değerini, s çıkış piksel değerini göstermekte, b ve c ise karşılığı kontrol eden parametreleri ifade etmektedir (Marques, 2011).

Şekil 3'deki görüntüler, Patara antik kentinde yürütülmüş jeofizik çalışmalar sonucu elde edilen üç boyutlu yer-elektrik modelinin 0.50 m derinliğinden alınmış bir derinlik kesitidir (Akca vd. 2019). Parametre değerleri 0-255 arası ölçeklendirilerek görüntüye dönüştürülmüştür.

Bizi ilgilendiren belirtilerin, yüksek özdirençli yani büyük piksel yeğİnliğine sahip olan bölgeler olduğunu düşündüğümüzden, dönüşüm fonksiyonlarını 200 ve üzeri yeğİnlikli piksel değerlerinin daha da belirginleştirmek amacıyla tasarlanmıştır. Şekil 3a'da yeğİnlikleri 0-100 arası olan pikseller 0-50 arasında yeniden ölçeklenmiş, 100-200 arası pikseller değer aralığı 50-200 arasında olan eğrisel bir fonksiyonla dönüştürülmüş, 200-255 arası pikseller ise aynen bırakılmıştır. Bu uygulama dönüştürülmemiş halinden daha net bir görüntü sağlamıştır. Şekil 3b'de ise 0-150 arası piksel değerlerini daha dar bir aralıkta ölçeklendiren 200-250 arasındaki pikselleri ise olduğu gibi bırakan bir dönüşüm fonksiyonu tasarlanarak öncekinden de açık belirtiler gözlemlemek amaçlanmıştır. Bu uygulamanın daha açık belirtiler gözlemlememizi sağladığı ortada olmakla birlikte dönüşüm fonksiyonları tasarlanırken amaca yönelik çok fazla



Şekil 3. Elektrik öz direnç parametresi kullanılarak oluşturulmuş bir görüntüye kullanıcı tanımlı iki farklı dönüşüm fonksiyonunun uygulanması

Figure 3. Applying two user defined transform functions to an image constituted from electrical resistivity parameters

uyarlama yapılması gerçekçi olmayan belirti haritalarının oluşmasıyla sonuçlanabileceği de unutulmamalıdır.

Gürültü giderme araçları

En temel gürültü giderme uygulamaları yerel görüntü işleme araçları kullanılarak yapılır. Yerel görüntü işleme araçları her piksel değerini komşuluğundaki piksellerin değerleri kullanılarak yeniden hesaplamaya dayanır. Bunlar genel olarak, gürültü giderme, keskinleştirme, kenar belirleme gibi görüntü işleme amaçlarıyla kullanılırlar. Belirli bir amaç için tasarlanmış evrişim çekirdeği h ve sayısal görüntü f ile gösterilmek üzere, süzgeçlenmiş görüntü g ,

$$g(n_1, n_2) = \quad (5)$$

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

bağıntısı ile bulunur. Görüntülerdeki gürültüleri gidermek için tasarlanmış bazı ön tanımlı süzgeçler bulunmaktadır. Bu süzgeçler doğrudan parametre değerleri üzerinde veya parametreler kullanılarak oluşturulan görüntülerdeki gürültüleri gidermek için de kullanılabilir. Bu bölümde bilinen bazı evrişim süzgeçleri ile doğrusal olmayan bir işlem olan medyan süzgeci tanıtılacak ve uygulama örnekleri verilecektir.

Ortalama süzgeç gürültü giderme amacı için tasarlanabilecek en basit süzgeçtir. Bu süzgecin temel amacı her pikselin komşuluğundaki piksellerin ortalaması alınarak aralarındaki farkın en aza indirilmesidir. Ortalama süzgecin evrişim çekirdeği,

$$h = \begin{bmatrix} 1/9 & 1/9 & 1/9 \\ 1/9 & 1/9 & 1/9 \\ 1/9 & 1/9 & 1/9 \end{bmatrix}$$

ile verilir.

Gaussian süzgeç belki de en bilinen gürültü giderme süzgeci olup görüntüyü bulanıklaştırma etkisi vardır. Gaussian süzgecin evrişim çekirdeği tahmin edilebileceği üzere Gaussian fonksiyon ile hesaplanır. Bir ve iki boyutlu Gaussian fonksiyonu

$$G_{1D}(x; \sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} \quad (6)$$

$$G_{2D}(x, y; \sigma) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}}$$

şeklinde verilir. Eşitlik 6 sırasıyla x ekseninde tanımlı standart sapması σ olan bir boyutlu Gaussian fonksiyon ile x ve y eksenlerinde tanımlı standart sapması σ olan iki boyutlu bir Gaussian fonksiyonunu tanımlamaktadır.

Örnek olması açısından 3×3 boyutlarında, standart sapması 0.5 olan Gaussian süzgecin çekirdeği

$$h = \begin{bmatrix} 0.0113 & 0.0838 & 0.0113 \\ 0.0838 & 0.6193 & 0.0838 \\ 0.0113 & 0.0838 & 0.0113 \end{bmatrix}$$

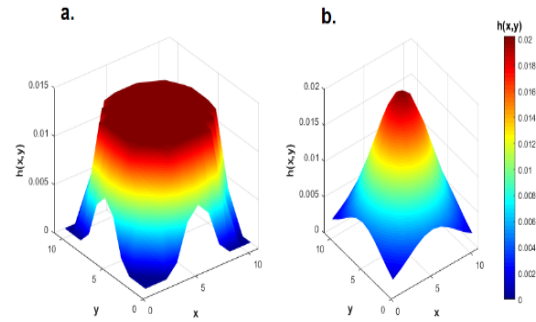
şeklinde verilir.

Evrişim çekirdeğinden de anlaşılacağı gibi Gaussian süzgeçte her piksel komşuluğundaki piksel değerlerine göre yeniden hesaplanır ancak bu kez her komşu pikselin katkısı ağırlıklandırılmaktadır. En büyük ağırlık katsayısını pikselin kendi değeri alırken, çapraz komşulukların ağırlıkları ise en küçük ağırlık değerini alır.

Bir başka yaygın kullanılan süzgeç ise disk süzgecidir. Aslında disk süzgeci Gaussian süzgeçle benzer şekilde çalışır, sadece Gaussian süzgecin çan benzeri şekline karşılık

disk süzgeç daire ya da elips şekline sahiptir. Şekil 4'de iki boyutlu disk ve Gaussian süzgecinin evrişim çekirdekleri görülmektedir.

Sözünü edeceğimiz son yerel işleç ise medyan (orta değer) süzgeç olacaktır. Medyan süzgeç görüntülerde gürültüleri kaldırmak için kullanılabilecek doğrusal olmayan yöntemlerden birisidir. Medyan süzgeç, görüntüden yüksek frekanslı gürültüleri ayıklarken, daha önce sözü edilen süzgeçlerden farklı olarak kenarları muhafaza etmek konusunda daha başarılıdır. Bu süzgeç her piksel değerinin komşuluğundaki piksellerin değerlerine göre yeniden hesaplanmasını esas alır. Medyan süzgecin nasıl çalıştığını daha iyi anlamak için Şekil 5 incelenebilir. Şekil 5a'da kırmızı dikdörtgen alanın merkezindeki pikselin değeri (23) dikdörtgen alanın içindeki bütün piksel değerlerinin orta değeri alınarak yeniden hesaplanmıştır, bu da 25 değerine karşılık gelmektedir.

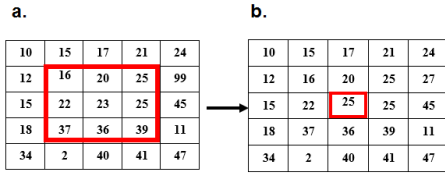


Şekil 4. İki-boyutlu a. disk ve b. Gaussian süzgecinin çekirdekleri

Figure 4. Two-dimensional kernels of a. disk and b. Gaussian filter

Yukarıda sözü edilen süzgeçlerin öz direnç haritası üzerindeki etkisi Şekil 6'da görülebilir. Burada kullanılan süzgeçler genel olarak yuvarlatıcı süzgeçler şeklinde adlandırılabilir. Bütün süzgeçler doğrudan parametre değerlerine uygulanmıştır ve hepsi için 3×3 'lük

pencere genişliği kullanılmıştır. Gaussian süzgeç için kullanılan standart sapma değeri 0.6 olarak atanmıştır. Bütün süzgeçler yapı sınırlarının keskinliğinde belirli bir ölçüde kayba sebep olmakla birlikte gürültü azaltma etkisi göstermişlerdir. Şekil 6'daki sonuçlar incelenirse ortalama süzgecin diğerlerine göre daha fazla bulanıklaştırma etkisi gösterdiği görülebilir. Medyan ve disk süzgeçleri ise yüksek frekanslı gürültüleri bastırmada etkili olurken yapı sınırlarını da kısmen korumuşlardır. Son olarak Gaussian süzgeç ile arka plan iyi ölçüde gürültüden arındırılmış ve neredeyse tüm yapıların sınırlarının da iyi ölçüde korunmuştur. Gaussian süzgecin bu uygulama için aralarında en iyi sonucu verdiğini söyleyebiliriz. Buraya kadar dört farklı yerel süzgeç, bir öz direnç haritasına uygulanmıştır.



Şekil 5. Medyan süzgeç uygulandıktan sonra piksel yeşinliklerinin değişimi

Figure 5. Variation of pixel intensities after applying the median filter

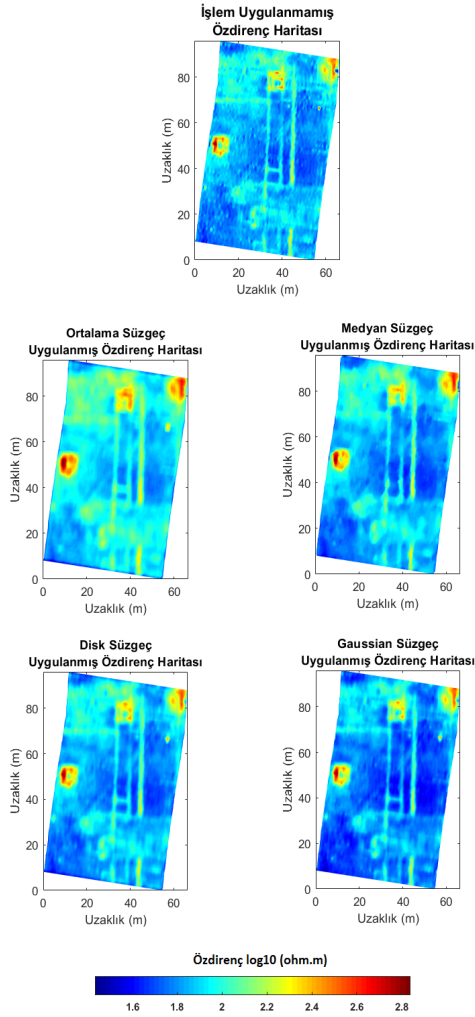
Gözden kaçırılmaması gereken bir nokta, kullandığımız öz direnç haritalarının, yapılan öz direnç çalışmaları sonucunda elde edilmiş, belirli bir hacim içerisindeki parametre kümesinin, bir derinlik seviyesinden alınmış kesitinden oluşmasıdır.

Bu haritalar üzerinde uyguladığımız süzgeçler parametre değerlerini buldukları derinlikte kendisine komşu diğer parametrelerle ilişkilendirmekle birlikte üst ve alt seviyedeki komşularıyla herhangi bir ilişkilendirme yapmamaktadır. Eğer daha tutarlı bir

süzgeçleme işlemi yapılmak isteniyorsa üç boyutlu süzgeçler kullanılabilir ve böylece parametreler bir üst ve bir alt seviyeden komşuluklarıyla da ilişkilendirilmiş olur.

Üç boyutlu yerel süzgeçlemeye örnek olarak Şekil 7 incelenebilir. Burada Patara antik kentinde yürütülen yer radarı çalışmalarından (Akca vd. 2019, Akca ve Gölebatmaz, 2021) elde edilen görüntüler kullanılmıştır. Radar verilerinin işlenmesi ile elde edilen veri hacminden (440x474x256 boyutunda bir dizey) 8 farklı derinlik seviyesine karşılık gelenler kullanılarak bir model oluşturulmuştur. Burada gösterim için bu seviyelerden üçü alınmıştır. Şekil 7a'da farklı derinlik seviyeleri için oluşturulan radar görüntüleri görülmektedir. Şekil 7b'de bu görüntülerin iki boyutlu ortalama süzgeç uygulanmış halleri, Şekil 7c'de ise görüntülerin üç boyutlu ortalama süzgeç uygulanmış halleri görülmektedir. Görüntülerin oluşturulduğu parametreler esasında bir prizma hacmi içerisinde dağılmış olduklarından, üç boyutlu bir süzgeç kullanmanın üstünlükleri olacağı ortadadır. Bu durum Şekil 7b ve şekil 7c'deki ilk seviyeleri incelendiğinde görülebilir. Kullandığımız işlem uygulanmamış görüntülerde ilk seviye yüksek oranda gürültü içermektedir ve iki boyutlu bir ortalama süzgeç uygulandığında sadece bu seviyenin pikselleri arasında bir ağırlıklandırma yapılacağından gürültü giderme işlemi sınırlı kalacaktır. Oysa şekil 7c'nin ilk seviyesinde, daha aşağı seviyelerdeki yapıların izleri daha kolay seçilebilir. Bunun sebebi ağırlıklandırma işleminin sadece o seviyenin görüntüsü ile sınırlı kalmayıp piksellerin alt seviyedeki komşularıyla da ağırlıklandırılmış olmasıdır.

Gürültü gidermenin amacı görüntülenen görüntüde (veya gözlenen veride) meydana gelen istenmeyen etkilerin giderilmesidir. Yerel görüntü işleme işlemleri bu amaçla kullanılabilirle birlikte bu süzgeçler görüntüyü yumuşatırken bazı ayrıntıların

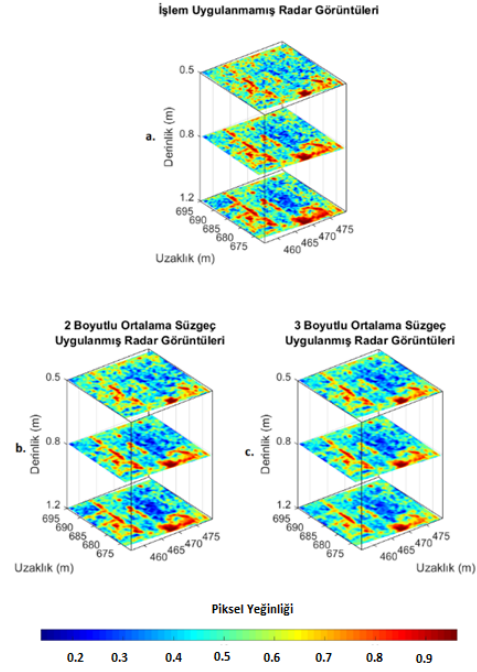


Şekil 6. Yuvarlatıcı etkiye sahip dört süzgecin özdirenç haritasına uygulanması

Figure 6: Applying four different image smoothing filter to a resistivity map

kaybolmasına yol açarlar. Bunun sebebi bu süzgeçlerin her pikselin yeni değerini komşuluğundaki piksellerin değerlerinin ortalamalarını kullanarak hesaplamaları dolayısıyla gürültüyle birlikte yapı sınırları gibi yüksek frekanslı diğer bileşenlerin de kaybedilmesidir.

Yerel işlemler için yapı sınırları ile gürültü arasında bir fark olmayışı yerel işlemlerin gürültü giderme özelliklerini korurken bulanıklaşma etkisini de en aza indirecek



Şekil 7. İki- ve üç-boyutlu ortalama süzgecin işlenmiş yer radarı veri hacmine uygulanması

Figure 7. Application of two and three-dimensional mean filter to the processed GPR data volume

yöntemler aranması ihtiyacına yol açmıştır. Bu yöntemlerden biri olan yerel olmayan ortalamalar algoritması Baudes (2005) tarafından ortaya atılmıştır. Yerel olmayan ortalamalar (NLM) algoritmasının temel prensibi her piksel değerinin, bütün piksellerden (ya da seçilen büyüklükte bir pencere içinde kalan piksellerden) gelen ağırlıklarla yeniden hesaplanmasıdır. Ağırlıklar piksellerin yerel komşulukları arasındaki benzerliğe göre belirlenir (Sarker vd., 2012). Böylece gürültü giderme işlemi sırasında

yapısal sınırlar korunmuş olur. Genel çerçevede bir görüntü matematiksel olarak:

$$v(p) = u(p) + n(p) \quad (7)$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada $v(p)$ gözlenen görüntü, $u(p)$ orijinal görüntü ve $n(p)$ gürültüyü göstermektedir. Gürültü giderme işlemleri ile $n(p)$ görüntüden uzaklaştırılmaya çalışılırken $u(p)$ olanaklı olduğu ölçüde korunmak istenir. Gürültü giderme işlemi için kullanılacak NLM algoritması ile:

- 1- Görüntü, her birinin merkezinde bir piksel bulunan ve boyutları kullanıcı tarafından belirlenen parçalara (patches) bölünür.
- 2- Her parça, yine kullanıcı tarafından bir alanın sınırları içerisinde kalan diğer parçalarla olan benzerlikleri ölçülerek karşılaştırılır ve benzerliklere göre ağırlık dizeyi oluşturulur. Birbirine benzer parçalardan gelen ağırlıklar diğerlerinden daha büyük olacaktır.
- 3- Ağırlık dizeyine göre yeni piksel değerleri hesaplanır.

Matematiksel olarak NLM algoritması,

$$NL[v](i) = \sum_{j \in I} w(i, j) v(j) \quad (8)$$

ile verilir. Eşitlik 8'de $v = \{v(i) | i \in I\}$ ayrık gürültülü görüntü, $\{w(i, j)\}_j$ ise i ve j pikselleri arasındaki benzerliğe dayalı ağırlık katsayılarıdır. Ağırlık katsayıları $0 \leq w(i, j) \leq 1$ ve $\sum_j w(i, j) = 1$ koşullarını sağlamalıdır (Baudes, 2005).

Ağırlık katsayılarının hesaplanması,

$$w(i, j) = \frac{1}{C(p)} \exp \left(- \frac{\|v(N_i) - v(N_j)\|_2^2}{h^2} \right) \quad (9)$$

eşitliği kullanılarak yapılır. Eşitlik 9'da $\|v(N_i) - v(N_j)\|_2^2$ terimi, N_i i pikselinin

merkezinde olduğu komşuluğu ve $\| \cdot \|_2^2$

Öklidyen uzaklığı göstermek üzere, iki pikselin benzerliklerinin bir ölçütüdür. $C(p)$ ise normalizasyon parametresi olup,

$$C(p) = \sum_j \exp \left(\frac{\|v(N_i) - v(N_j)\|_2^2}{h^2} \right) \quad (10)$$

ile verilir.

Eşitlik 9 ve 10'da h sönüm hızını kontrol eden üstel bir parametre olup süzgeç derecesi gibi davranır.

NLM süzgecinin etkilerini görmek için Şekil 8 incelenebilir. Algoritma Side antik kentinde Akca vd. (2019) tarafından yürütülmüş jeofizik araştırmadan elde edilmiş jeofizik haritalara uygulanmıştır. Jeofizik harita yaklaşık 90m x 60 m boyutlarında bir alanı kaplamaktadır. Harita 50cm derinliğe ait öz direnç dağılımını göstermektedir.

Bu haritanın NLM ile işlenmesi için kullanılan pencere büyüklüğü parametresi kare şekilli arama penceresini ifade eder. Harita 5x5 büyüklüğünde parçalara bölünmüş ve süzgeç derecesi 1 olarak seçilmiştir. Ayrıca kullanılan parametre dizeyi 72x88 boyutlarındadır.

Parça büyüklüğü ve süzgeç derecesi için farklı büyüklükler denenmiş ancak en iyi sonuçlar verilen değerlerle alınmıştır.

Şekil 8'de orijinal öz direnç haritasına karşılık farklı pencere büyüklükleri kullanılarak NLM ile gürültü giderme yapılmış öz direnç haritaları karşılaştırma amacıyla birlikte sunulmuştur. NLM süzgeci uygulanmış bütün sonuçların orijinale göre daha temiz görüldüğü ayrıca yapı sınırlarının da Gaussian süzgeç gibi yerel işlemlere kıyasla daha iyi korunduğu

söylenbilir. Pencere büyüklüğünün sonuca etkisini gözlemek amacıyla kırmızı kesik çizgilerle işaretlenmiş alanlara bakılabilir. Pencere büyüklüğü arttıkça, bu alanlardaki parlaklık giderek azalmış ve belirtiler giderek dala açık hale gelmiştir. Bunun sebebi daha küçük bir pencere büyüklüğü seçildiğinde parametrelerin yeni değerlerinin sadece kendilerine yakın ve benzerlikleri fazla olan parametrelerden gelen ağırlıklarla oluşturulmasıdır. Bu durum bölgelerin daha tekdüze ve sınırların belirsiz olmasına yol açmasıdır.

Bu çalışmada, gürültü giderme amacıyla kullanılan araçlar arasında son olarak yapay sinir ağlarına değinilecektir. Yapay zeka, insanın bilişsel yeteneklerini taklit ederek, geleneksel yöntemlerle çözümü oldukça zor olan mühendislik problemlerine sayısal çözümler getirmeyi amaçlar (Alavi ve Gandomi, 2012). Yapay zeka uygulamalarının alt başlıklarından biri olan makine öğrenmesi terimi, veriyi inceleyerek otomatik olarak örüntüleri tanımlayabilen ve karar alabilen sistemler için kullanılır. Makine öğrenmesi algoritmasının ortaya koyduğu ilişki 'model', bu süreç ise 'eğitim' (*training*) olarak adlandırılır. Kullanılan veri kümeleri de eğitim ve deneme verisi olarak ikiye ayrılır. Eğitim verisi ile model kurulur, deneme verisi ile ise model değerlendirilir.

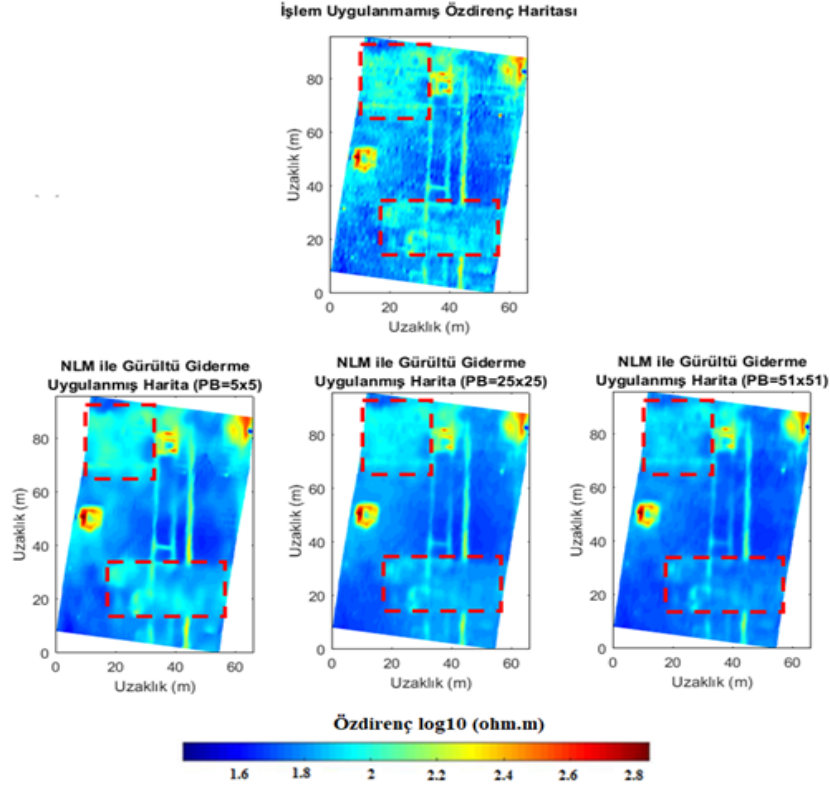
Modelin öğrenme süreci bu ağırlık katsayılarının değiştirilmesiyle olur. Nöronlardan oluşan her bir katmanda veriye farklı sayısal süzgeçler uygulanır. Evrimsel süzgeçlerin ağırlıklı olarak kullanıldığı

algoritmalar, Evrimsel Sinir Ağları (*Convolutional Neural Networks – CNN*) olarak adlandırılırlar. Şekil 9'da 3 nöronluk bir giriş katmanına 4 nöronluk bir gizli katmana ve 1 nöronluk çıkış katmanına sahip bir yapay sinir ağı modeli görülmektedir. Gizli katmanlar her yapay sinir ağı için zorunlu değildir, eğer elimizdeki veri kümesi doğrusal olarak gruplanabiliyorsa gizli katman kullanmaya ihtiyaç kalmaz.

Geleneksel makine öğrenmesi algoritmaları kullanıcı tarafından belirlenmiş nitelikleri kullanarak veriyi gruplara bölerken derin öğrenme algoritmalarında sadece verinin kendisi kullanılarak gruplama yapılır. Bunun için öncelikle sayısal süzgeçler kullanılarak algoritmanın tanıyacağı nitelikler çıkarılır, giriş verisinde bu özellikler tanınırsa algoritma bir belirti verir. Sonrasında ise bir etkinleştirme fonksiyonu kullanılarak süzgeçlenmiş ve gruplanmış olan verilerin çıkış değerleri belirlenir. Bu adımlar istenilen duyarlılığa ulaşıncaya kadar devam eder. Eğitim süresi boyunca sistemi tanımlayan parametreler yalnızca verinin kendisinden öğrenilmiş olur.

Bu makale kapsamında gürültü giderme amaçlı yeni bir evrimsel sinir ağı modeli geliştirilmemiştir. Bunun yerine MATLAB kütüphanelerinde hazır olarak bulunan dnCNN modeli kullanılmıştır. Bu model, görüntülerdeki Gaussian gürültüyü gidermek için önceden eğitilmiş olan bir evrimsel sinir ağı modelidir.

Modelin çalışma şekli görüntüdeki farklı bileşenleri tanıyarak gürültüyü, yapı sınırları vb. gibi diğer yüksek frekanslı bileşenleri ayırmak ve görüntüden çıkarmak üzerinedir.



Şekil 8. Farklı pencere genişlikleri için NLM süzgecinin jeofizik özdirenç haritasına etkileri

Figure 8. Effects of applying NLM filter with different window sizes on geophysical resistivity map

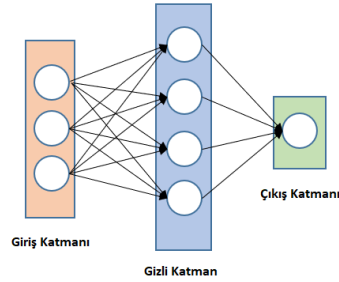
Modelin kurulması ve çalışma şeklindeki detaylar için Zhang vd. (2016)'ya bakılabilir.

Şekil 10'da Side antik kentinde yürütülen çalışmalardan alınmış özdirenç haritasının sayısal görüntüye dönüştürülmüş hali görülmektedir. Şeklin ilk satırında, verilerin ters çözümüyle elde edilmiş parametre değerlerinin '.png' uzantılı bir görüntüye dönüştürülmüş hali görülmektedir. Şeklin ikinci satırında bu görüntünün dnCNN modeli kullanılarak gürültü giderme işlemi uygulanmış hali görüntü histogramıyla birlikte görülmektedir. Görüldüğü üzere evrimsel sinir ağı modeli görüntüdeki Gaussian gürültüyü yapı sınırlarından ayırt etmek konusunda oldukça iyi bir başarıya sahiptir. Hem görüntüdeki yapı sınırları hem de

Gaussian gürültü yüksek frekanslı bileşenler olmalarına rağmen gürültüler bastırılırken yapı sınırlarında bir bozulma veya bulanıklaşma meydana gelmemiştir. Şeklin üçüncü satırında ise görüntüyü iyileştirmek konusunda bir adım daha atılarak histogram düzenleme uygulanmıştır. Bu sayede görüntünün histogramı daha geniş bir hal almış ve görüntüde özellikle yüksek piksel yoğunluğuna sahip bileşenleri ayırt etmek kolaylaşmıştır.

Netleştirme algoritmaları

Buraya kadar olan kısımda gürültü giderme amacıyla uygulan görüntü işleme araçlarından söz edilmiştir. Bozulmuş bir görüntü gürültü



Şekil 9. Bir adet gizli katmanı ve toplam 8 nöronu bulunan yapay sinir ağının şematik gösterimi

Figure 9. Schematic presentation of an artificial neural network with one secret layer and 8 neurons

içeriğine sahip olabileceği gibi bir nedenden dolayı bulanıklaşma etkisine de maruz kalmış olabilir. Optik bir sistem tarafından oluşturulan görüntünün fotoğraf filmi ya da yük bağlaşımlı aygıt tarafından kaydedildiğinde kaçınılmaz olarak bulanıklaşır. Görüntü netleştirme, bulanık bir görüntüyü eski haline getirmek için yapılmaktadır. Astronomi ve nükleer tıp gibi konularda görüntüleri netleştirmek için ters evrişim tekniğini kullanan çalışmalar bulunmaktadır (Moffat vd., 1969; Kuruc vd., 1983; King vd. 1985; Tsumuraya vd., 1994). Bu makalede kullanılan jeofizik harita ve görüntüler sözü edilen şekilde oluşturulmuş ve kaydedilmiş olmayıp parametrelerin görselleştirilmesi ile oluşturulmuş olsalar da aynı algoritmalar kullanılarak iyileştirilebilirler.

Farklı etkiler nedeniyle bulanıklaşmış bir görüntüyü matematiksel olarak,

$$v(p) = u(p) * h(p) + n(p) \quad (11)$$

şeklinde ifade edebiliriz (Dhawan 1986).

Burada $v(p)$ gözlenen görüntüyü, $u(p)$ gerçek görüntüyü, $h(p)$ görüntünün bulanıklaşmasına yol açan bir nokta yayılım fonksiyonunu, $n(p)$ ise gürültüyü temsil etmektedir. Eşitlikteki * sembolü evrişim işlemini göstermektedir ve anlaşılabilirliği üzere görüntüdeki bulanıklaşma bir nokta yayılım fonksiyonu ile gerçek görüntünün evrişime sokulması ile modellenir.

Görüntü netleştirmede ana hedef bulanıklaşmış görüntüyü, bulanıklaşma, bozulma etkisini en iyi temsil edecek bir nokta yayılım fonksiyonu (point spread function - PSF) ile ters-evrişim (*dekonvolüsyon*) işlemine sokmaktır (Rao vd. 2011). Bu amaç için önerilen algoritmalar arasında en bilindik olanlarının Wiener ve Lucy-Richardson ters evrişim algoritmaları olduğu söylenebilir. Görüntü netleştirmede kullanılan geleneksel ters evrişim yöntemlerinin zayıf yanı, bu algoritmaların çalışabilmesi için görüntüyü bozan nokta yayılım fonksiyonunun bilinmesinin gerekmesidir. Nokta yayılım fonksiyonunun bilinmesi veya çok yakın bir şekilde tahmin edilmesi her zaman mümkün olamayacağından başlangıç olarak verilen bir nokta yayılım fonksiyonunu yinelemeli olarak iyileştiren “kör ters evrişim” (*blind deconvolution*) algoritmaları önerilmiştir.

Wiener ters evrişimi veya Wiener süzgeci en bilindik ve hesaplama gücü açısından en ekonomik netleştirme algoritmalarından biridir. Eşitlik 11’i tekrar göz önüne alırsak, Wiener süzgeci gerçek görüntü $u(p)$ ’ye bir yaklaşım olan $\hat{u}(p)$ ’yi,

$$\hat{u}(p) = g(p) * v(p) \quad (12)$$

şeklinde tahmin etmek için bir $g(p)$ fonksiyonu bulmamızı sağlar.

$$G(f) = \frac{H(f)S(f)}{|H(f)|^2|S(f) + N(f)} \quad (13)$$

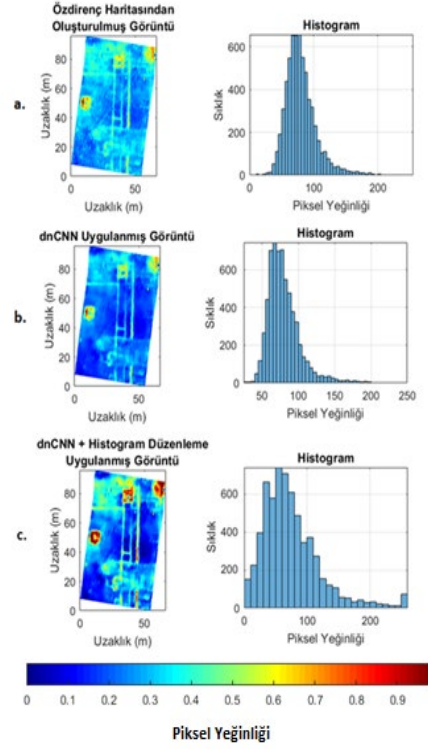
Eşitlik 13 frekans ortamında Wiener süzgecini gösterir. Burada $G(f)$ ve $H(f)$ sırasıyla $g(p)$ ve $h(p)$ 'nin Fourier dönüşümünü, $S(f)$ gerçek görüntünün güç yoğunluğunu, $N(f)$ ise gürültü bileşeninin güç yoğunluğunu göstermektedir. Eşitlik 13'den anlaşılacağı gibi Wiener süzgecinin çalışması için $h(p)$ ve $n(p)$ ile gerçek görüntünün frekans içeriğinin de bilinmesi gerekmektedir.

Bilinen bir nokta dağılım fonksiyonu kullanılarak bulanıklaşmış bir görüntüyü eski haline getirmeyi amaçlayan bir diğer algoritma Lucy-Richardson algoritmasıdır. Lucy Richardson algoritması ters evrişim işlemi için sıklıkla kullanılan bir yinelenmeli yöntem olmakla birlikte işlem süresinin uzunluğu yöntemin en önemli zayıflığıdır (Carrato vd., 2015). Richardson'un yöntemi tanıttığı orijinal makaledeki (Richardson, 1972) bağıntıyı kullandığımız notasyona göre uyarladığımızda,

$$U_i^{(r+1)} = u_i^r \sum_k \frac{h_{i,k} v_k}{h_{j,k} u_j^r} u_i \quad (14)$$

elde edilir. Eşitlik 14 ile Lucy-Richardson algoritmasını özetleyebiliriz. Burada r yineleme indisini göstermektedir. u_i gerçek görüntünün i numaralı pikselini, u_i i numaralı piksel için nokta yayılım fonksiyonunun k numaralı pikselini, v_k bulanık görüntünün k numaralı pikselini göstermektedir.

Kör ters evrişim algoritmaları görüntüyü bulanıklaştıran nokta yayılım fonksiyonu bilinmediğinde kullanılan netleştirme algoritmalarıdır. Gerçek görüntüye ve nokta yayılım fonksiyonuna dair bir ön-bilgi mevcut olmadığını düşünürsek problem ciddi şekilde kötü durumlu hale gelir ve 11 eşitliğini



Şekil 10. a. Özdirenç haritasından oluşturulmuş bir görüntünün b. dnCNN ile gürültü giderme uygulanmış ve c. dnCNN ve histogram düzenleme uygulanmış hali

Figure 10. a. An image constructed from a resistivity map and b. its denoised version by applying dnCNN and c. dnCNN and histogram adjustment applied version of the original image

sağlayacak sınırsız sayıda $u(p)$ ve $v(p)$ çifti bulunabilir. Kör ters evrişim algoritmaları görüntüyü, sadece bozulmuş olan $v(p)$ 'yi kullanarak iyileştirmeye çalışır. Bu algoritmaların çalışma şekli genel olarak nokta dağılım fonksiyonu için bir başlangıç değeri oluşturup her yinelemede yukarıda sözü edilen Wiener ve Lucy-Richardson benzeri algoritmalar ile bozulmamış görüntüye bir yaklaşım elde etmeleridir. Her yinelemede hem

nokta dağılım fonksiyonu hem de görüntüye yapılan yaklaşım yenilenir.

Bu çalışma kapsamında sözü geçen algoritmaların detaylarına daha fazla girilmeyecektir. Wiener, Lucy-Richardson ve kör ters evrişim algoritmalarının her üçü için de MATLAB programlama dili kütüphaneleri yer alan ön tanımlı fonksiyonlar bulunmaktadır. Algoritmaların uygulandığı görüntü, Patara antik kentinde yürütülen elektrik özdirenç ölçümlerinin ters çözümü sonucu elde edilmiş parametre değerlerinin 0-255 ölçeklenmesi ile oluşturulmuştur.

Şekil 11'in ilk satırında herhangi bir işlem uygulanmamış görüntü görülmektedir. Şeklin ikinci satırında ise görüntünün, sırasıyla Wiener, Lucy-Richardson ve kör ters evrişim algoritmalarıyla netleştirilmiş halleri görülmektedir. Wiener algoritmasının çalışması için bir PSF'ye ve görüntünün tahmini gürültü içeriğine ihtiyaç vardır. Algoritma sonuç olarak görüntünün netleştirilmiş versiyonunu çıkarır. Lucy-Richardson algoritmasıyla görüntünün netleştirilmiş halini elde etmek yalnızca PSF'ye ihtiyaç vardır. Kör ters evrişim algoritmasında ise PSF için bir başlangıç değeri seçilir ve algoritma görüntünün netleştirilmiş haliyle birlikte PSF'nin optimize edilmiş halini çıkış olarak verir. Yaptığımız örnek için bütün algoritmalar birbirine yakın sonuçlar üretmekle birlikte Lucy-Richardson ve kör ters evrişim algoritmalarının Wiener'e göre netleştirme etkisi bakımından daha etkili olduğunu söylenebilir. Wiener algoritmasının uygulanmasında gürültü – sinyal oranı 1/1000 olarak seçilmiştir. Bütün algoritmalar için PSF 3x3'lük standart sapması 1 olan bir Gaussian süzgeç olarak belirlenmiştir. Şekil 11'de, işlem uygulanmamış görüntüde kırmızı kesik çizgi ile işaretlenmiş yapının bileşenlerinin görüntünün netleştirilmiş versiyonlarında daha iyi ayırt edilebildiğini söyleyebiliriz. Bununla birlikte kör

ters evrişim ve Lucy-Richardson algoritmaları arasındaki fark neredeyse gözle ayırt edilemeyecek düzeydedir. Bunun sebebi kör ters evrişim algoritmasının PSF'yi optimize etmekle birlikte başlangıçta belirlediğimiz Gaussian süzgecin değerlerinden çok da fazla uzaklaşmamasıdır. Bu tür netleştirme algoritmaları fazla yuvarlatıldığı düşünülen ters çözüm sonuçlarına uygulanarak daha iyi sonuçlar alınabilir.

Morfolojik süzgeçler

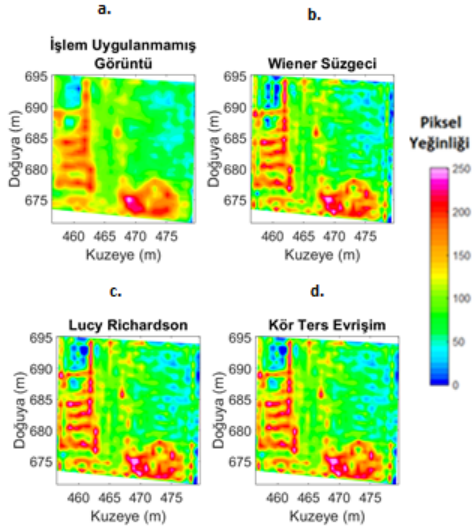
Morfolojik süzgeçler görüntü işleme uygulamalarının yerel işlemlerine örnektir. Ancak daha önce sözünü ettiğimiz yerel süzgeçlerin aksine gürültü gidermek için değil görüntü içerisindeki farklı bölgeleri birbirinden ayırmak ya da birbirine bağlamak, bazı yapıların diğerlerine göre daha belirgin olmasını sağlamak gibi amaçlarla kullanılmaktadırlar. Morfolojik süzgeçler öncelikle ikili (*binary*) görüntüler için geliştirilmiş daha sonra 8 bit görüntülere de uyarlanmıştır. Bu süzgeçler temel olarak iki farklı işlem kullanılarak türetilirler: aşındırma (*erosion*) ve genişletme (*dilation*).

Aşındırma işlemi yapı sınırlarını zayıflatarak görüntüdeki nesnelere arasındaki boşluğu artırır. Buna karşılık genişletme işlemi ise yapı sınırlarını keskinleştirirken nesnelere arasındaki boşluğu daraltır. Matematiksel olarak ikili bir görüntü için aşındırma işlemi:

$$\mathbf{A} \ominus \mathbf{B} = \{z | \mathbf{B}_z \subseteq \mathbf{A}\} \quad (15)$$

ile, genişletme işlemi ise,

$$\mathbf{A} \oplus \mathbf{B} = \{z | \hat{\mathbf{B}}_z \cap \mathbf{A} \subseteq \mathbf{A}\}, \quad (16)$$



Şekil 11. a. Özdirenç haritasından oluşturulmuş bir görüntüye b. Wiener Süzgecinin c. Lucy-Richardson algoritmasının ve d. Kör ters evrişim algoritmasının uygulanması

Figure 11. a. Image constructed from a resistivity map and outputs after applying b. Wiener filter c. Lucy Richardson algorithm and d. blind deconvolution algorithms

ile verilir. Eşitlik 15 ve 16'da \mathbf{A} ikili bir görüntüyü \mathbf{B} ise boyutları ve şekli kullanıcı tarafından belirlenen yapısal elemanı göstermektedir. Sekiz bit görüntüler için 15 ve 16 eşitlikleri

$$\mathbf{A} \ominus \mathbf{B}(x, y) = \min \{ \mathbf{A}(x+x', y+y') - \mathbf{B}(x', y') \mid (x', y') \in D_B \} \quad (17)$$

ve

$$\mathbf{A} \oplus \mathbf{B}(x, y) = \max \{ \mathbf{A}(x-x', y-y') - \mathbf{B}(x', y') \mid (x', y') \in D_B \} \quad (18)$$

halini alır.

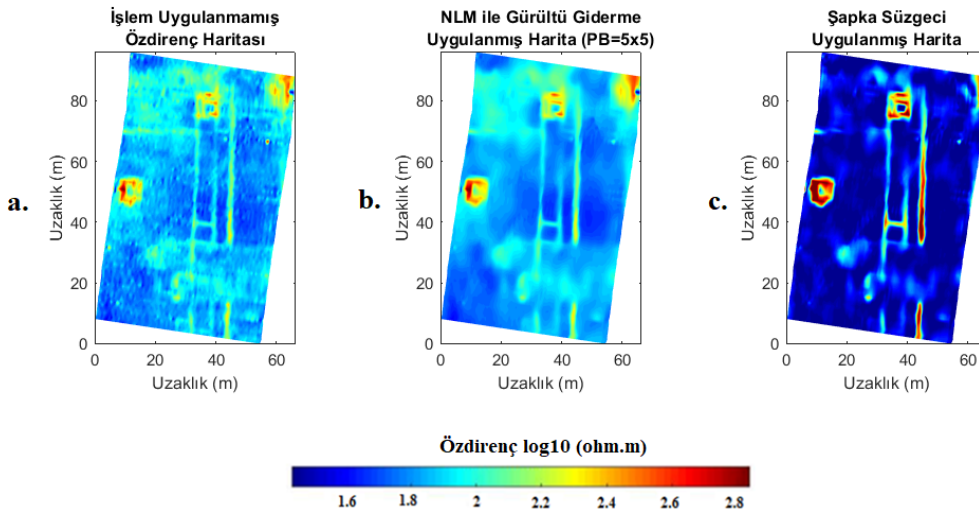
Neredeyse tüm morfolojik süzgeçler aşındırma ve genişletme işlemlerinin farklı sıralarla uygulanmasına dayanmaktadır. Bir görüntüye önce genişletme sonra aşındırma işleminin uygulanması açma (*opening*), buna karşılık önce genişletme sonra aşındırma işleminin uygulanması ise kapama (*closing*) işlemi olarak adlandırılır.

Bu çalışmada şapka süzgeci (*Top-Hat filter*) adı verilen bir morfolojik filtreden söz edilecektir. Bu süzgeç temel olarak görüntünün açılmış versiyonunun kendisinden çıkarılmasıyla elde edilir ve matematiksel olarak,

$$T_{hat}(A) = A - A \ominus B \quad (19)$$

şeklinde ifade edilir.

Şapka süzgeci bir görüntünün arka planını tekdüzeleştirirken parlak nesnelere daha da belirgin hale getirir. Şekil 12'de Şekil 10'da kullandığımız orijinal jeofizik haritaya önce NLM süzgeci ardından şapka süzgeci uygulandığındaki sonuçlar görülebilir. Öncelikle orijinal özdirenç haritasına NLM süzgeci uygulanarak gürültü giderme işlemi yapılmış sonra şapka süzgeci görüntüyü daha da iyileştirmek amacıyla uygulanmıştır. NLM süzgeci için parça büyüklüğü ve arama penceresi boyutları 5×5 , süzgeç derecesi ise 1 olarak seçilmiştir. Şekil 12'den görülebileceği gibi haritanın son halinde arka plan koyulaşmış ve tekdüzeleşmiş bununla birlikte çizgisel ve noktasal yapılar daha belirgin hale gelmiştir. Arkeolojik araştırmalar için aranan belirtiler genellikle çizgisel veya noktasal yapılar olarak belirti vereceğinden şapka süzgecinin böyle uygulamalar için faydalı bir araç olacağı söylenebilir.



Şekil 12. a. İşlem uygulanmamış bir özdirenç haritasına sırasıyla b. NLM süzgecinin ve c. şapka süzgecinin uygulanması

Figure 12. a. Original b. NLM filter applied c. NLM and top-hat filter applied resistivity map

SONUÇLAR

Uygulamalı jeofizikte ölçülen veriler genellikle veri işlem ve modelleme aşamalarından geçirilerek değerlendirilir ve sonuçta yer içinin bir görüntüsü elde edilir. Bu çalışmada görüntü işlemede kullanılan bazı yöntemlerin jeofizik model ve haritalarının görüntülenmesinde nasıl kullanılabilecekleri gösterilmiş ve etkinlikleri tartışılmıştır. Görüntü işleme yöntemleri pek çok alanda olduğu gibi jeofizik veri/model sunumunda da kullanışlı araçlar olarak karşımıza çıkmaktadırlar. Bu yöntemlerin jeofizik haritalar veya bu haritalar kullanılarak elde edilen görüntüler üzerinde, gürültü giderme, ölçeklendirme veya bazı yapıların görünürlüğünü artırma gibi amaçlarla kullanılabileceği bu çalışmada farklı örneklerle gösterilmiştir.

Çalışmada ilk olarak görüntü histogramının görüntüde bulunan bazı bilgilerin insan gözü ile seçilmesine engel olabileceği ve bu sorunun nasıl aşılabileceği bir örnekle gösterilmiştir. Daha sonra dönüşüm fonksiyonlarının

görüntüde ilgilenilen kısımları daha belirgin hale getirmek için nasıl kullanılabileceği gösterilmiştir. Görüntü işlemede gürültü gidermede sıklıkla kullanılan komşuluk temelli doğrusal ve doğrusal olmayan süzgeçlerin bir kısmı tanıtarak her biri jeofizik haritalar üzerinde denenmiş ve karşılaştırılmıştır. Bunların içinden ortalama süzgecin üç boyutlu bir uygulamasına da yer verilmiştir. Bu süzgeçler bazı durumlar için tercih edilebilir olsalar da görüntüdeki yapı sınırlarının bulanıklaşmasına neden olurlar. Yerel gürültü giderme araçlarında görünen bu etkiyi en aza indirmek için geliştirilmiş bir süzgeç olan yerel olmayan ortalama (NLM) süzgecinin jeofizik haritalarda gürültü giderme için etkin bir araç olabileceği gösterilmiştir. Günümüzde giderek yaygınlaşan ve kullanım alanları artan yapay zeka uygulamalarının görüntülerde gürültü giderme amacıyla kullanılabileceği önceden eğitilmiş bir yapay sinir ağı modeli olan dnCNN kullanılarak gösterilmiştir. Görüntülerin gürültü içeriği dışında çeşitli etkiler sonucu bulanıklaşmış olabileceği de göz önüne

alınarak, görüntü netleştirme algoritmaları olan Wiener Süzgeci, Lucy-Richardson algoritması ve kör ters evrişim algoritmaları kısaca tanıtılmış ve örnek olması açısından öz direnç haritasından oluşturulmuş bir görüntü üzerinde uygulanmışlardır. Son olarak, özellikle arkeoloji jeofiziği alanında ilgilenilen belirtilerin görülmesini kolaylaştırmak için kullanılabilecek morfolojik süzgeçlere ve bunların özel bir türü olan şapka süzgecinin nasıl çalıştığına değinilmiştir. Şapka süzgecinin NLM ile gürültü giderme yapıldıktan sonra görüntüdeki yapıları net bir şekilde ortaya koymak için iyi bir araç olduğu gösterilmiştir. Çalışmada kullanılan MATLAB programlarına ve gerekli dosyalara <https://bit.ly/3adZBon> adresinden ulaşılabilir.

KATKI BELİRTME

Çalışmada kullanılan veriler Side (Antalya) ve Patara Antik Kentlerinde (Kaş, Antalya) farklı dönemlerde yürütülen jeofizik araştırmalarda elde edilmiştir. Verileri kullanmamıza izin veren çalışma ekibinin üyeleri Prof. Dr. M. Ali Kaya, Prof. Dr. Çağlayan Balkaya, Dr. Olcay Çakmak, Jeofizik Mühendisleri Seçkin Sertaç Lallı ve Serbay Küçükduvan'a teşekkür ederiz. Her iki antik kentin kazı başkanları ve ekibine de katkı ve destekleri için teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

Akca I., 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.

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 I., Gölebatmaz, Ş., M., 2021. Three-dimensional inversion of DCR data

incorporating structural similarity constraint. *Journal of Applied Geophysics*, 184, 104237.

Akca I., Lallı, S., S. Patara Jeofizik İnceleme Raporu. 2019. Ankara Üniversitesi

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.

Arısoy ve Dikmen (2014). Manyetik Belirti Haritalarının Histogram Eşitleme Yöntemi Kullanılarak İyileştirilmesi, *Yerbilimleri*, 35 (2), 175-184.

Arısoy, MO., Dikmen, Ü., 2015 Edge enhancement of magnetic data using fractional-order-derivative filters, *Geophysics*, 80 (1), J7-J17.

Ayers G. R., Dainty G., R. Iterative Blind Deconvolution Method and It's Application. 1988. *Optics Letters*. 13, 547-549.

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

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.

- Büyüksaraç, A., Arısoy, MÖ., Bektaş, Ö., Koçak, Ö. and Çay, T. 2008. Determination of Grave Locations in Dedemezari Necropolis (Western Turkey) using Magnetic Field Derivatives Archaeological Prospection 15, 267–283
- Candansayar, M.,E., Başokur, A., T. 2001. 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
- Carrato S., Ramponi G., Marsi S., Jerian M., Tenze L. 2015. FPGA Implementation of the Lucy Richardson Algorithm For Fast Space Variant Image Deconvolution. 9th International Symposium of Image and Signal Processing and Analysis (ISPA). 15, 137-142.
- 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.
- Chen, S. D., Ramli A. R. 2003. Minimum mean brightness error bi-histogram equalization in contrast enhancement,. IEEE Trans. Consum. Electron., 49(9), 1310–1319.
- Dahlin, T. 1996. 2D Resistivity Surveying for Environmental and Engineering Applications. Firs Break, 14(7), 275-285
- Demanent D., Pirard E., Renardy F. Jongmans D. 2001. Application and processing of geophysical images for mapping faults. Computers & Geosciences 27 (2001) 1031-1037
- Dhawan A., P., Rangayyan, Rangaraj, M., Gordon., R. 1986. Image Restoration by Wiener Deconvolution in Limited View Computed Tomography. Applied Optics. 24(23), 4013-4020.
- Gandomi, A., H., Alavi, A., H. 2012. Krill Herd: A New Bio-Inspired Optimization Algorithm. Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation. 17(12), 4831-4845.
- Goodman, D., 1994, Ground-penetrating radar simulation in engineering and archaeology. Geophysics, 59, 224–232.
- Gölebatmaz, Ş., M. 2020. Jeofizik Modellerin ve Haritaların Görüntü İşleme Yöntemleri ile İyileştirilmesi. Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Jeofizik Mühendisliği Anabilim Dalı, Ankara
- 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.
- 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.
- King, M., A., Miller, T., R. Use of nonstationary temporal Wiener filter in nuclear medicine. 1985. European Journal of Nuclear Medicine. 10. 458- 461.
- Kuruc, A., Treves, S., Parker, J., A., Cheng, C., Sawan, A. 1983. An improved deconvolution technique for improvement after suboptimal bolus injection. Radiology. 148. 233-238.
- Lili, Z. Tianyoao, H., Jiansheng, W. and Jialin, W. 2005. Application of Image Enhancement Techniques to Potential Field Data. Applied Geophysics, 2, 3, 145-152.
- Lucas, A., Illiadis, M., Molina, R., Katsaggelos, A., K. 2018. Using Deep Neural Networks for Inverse problems in Imaging: Beyond Analytical Methods. IEEE Signal Process Mag 35(1). 20-36

- Marques, O. 2011. Practical image and video processing using MATLAB. Wiley IEEE Press, 639, US
- Moffat, F., J. A. 1969. Theoretical investigation of focal stellar images in the photographic emulsion and application to photographic photometry. *Astronomy and Astrophysics*. 3. 455–461.
- Morozov, I. B., and Smithson, S. B. 1996, Instantaneous Polarization Attributes and Directional Filtering, *Geophysics* 61, 872-881.
- 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.
- Overmeeren, R.A., and Ritsema, I.L. 1988. Continuous vertical electrical sounding. *First Break*, 6, 313-324.
- Panagiotakis, C., Kokinou, E. and Sarris, A. 2011. Curvilinear Structure Enhancement and Detection in Geophysical Images. *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing* 49,6, 2040-2048.
- Rao, D., S., Deepthi, K. S., Deep, K. M. S. 2011. Application of Blind Deconvolution Algorithm for Image Restoration. *International journal of Engineering Science and Technology (IJEST)*, 3(3), 1878-1884.
- Richardson W., H. 1972 Bayesian-based iterative method of image restoration. *Journal of Optical Society of America*. 62(1) 55-59
- Sarker S., Chowdhury S., Laha S., Dey D. 2012. Use of Non-Local Means Filter to Denoise Image Corrupted by Salt and Pepper Noise. *Signal and Image Processing : An International Journal*, 3(2), 223-235.
- Tsumuraya, N., M., F., Baba., N. 1994. Iterative blind deconvolution method using Lucy's algorithm. *Astronomy and Astrophysics*. 282 (2), 699–708.
- Qi, J., Lyu, B., AlAli, A., Machado, G., Hu, Y., Marfurt, K. 2019. Image processing of seismic attributes for automatic fault extraction. 84(1), 104-117.
- W. Zhao, E. Forte, M. Pipan, and G. Tian. 2013. Ground Penetrating Radar (GPR) attribute analysis for archaeological prospection. *Journal of Applied Geophysics*, 97, 107-117.
- Wu, X., Hale, D. 3D seismic image processing for faults. 2016. *Geophysics*. 81 (2). 121-132.
- Zhang, K., Wangmeng, Z., Chen, Y., Meng, D., Zhang, L. 2016. Beyond a Gaussian Denoiser: Residual Learning of Deep CNN for Image Denoising. *IEEE Transactions on Image Processing*. 26(7). 3142-3155