



**Yer Bilimlerinde Modellemeye Genel Bir Bakış;  
Çevre Jeofiziği Uygulamalarından Çıkarımlar**

*An Overview of Modeling in Earth Sciences; Inferences from Environmental Geophysics Applications*

**Ebru Şengül Uluocak<sup>1\*</sup>** , **Emin Uğur Ulugergerli<sup>1</sup>** 

<sup>1</sup> Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü, Çanakkale, Türkiye

• Geliş/Received: 11.07.2023 • Düzeltmiş Metin Geliş/Revised Manuscript Received: 08.08.2023 • Kabul/Accepted: 31.08.2023  
• Çevrimiçi Yayın/Available online: 04.10.2023 • Baskı/Printed: 31.07.2024

*Araştırma Makalesi/Research Article*

*Türkiye Jeol. Bül. / Geol. Bull. Turkey*

**Öz:** Yer bilimleri ile ilgili bir araştırmada, jeolojik veya mühendislik problemlerini incelerken, modelleme çalışmaları iki aşamalı olarak işlev görmektedir; i) arazi çalışmasından önce ölçüm parametrelerinin elde edilmesi (kavramsal model) ve ii) arazi çalışmasından sonra, kavramsal model yardımıyla tahmini yeraltı modelinin doğruluğunun kontrol edilmesi. Sayısal modelleme süreci her iki aşamada da tek başına yeterli olmamakla birlikte, disiplinler arası çalışmalardan elde edilen ek bilgilerle sayısal modellerin gerçekçi bir yeraltı yapısına yakınsaması mümkündür.

Bu makalede yerbilimlerinde kullanılan modelleme çalışmaları ile ilgili bir iş akışı tanımlanmıştır ve Çanakkale (Türkiye) eski düzensiz katı atık depolama alanında gerçekleştirilen bir çevre kirliliği araştırması bu iş akışı takip edilerek sunulmuştur. Buna göre, kavramsal bir modele göre belirlenen doğrultularda elektrik özdirenç yöntemi ile tomografi ölçüleri alınmış, çalışma alanının yeraltı özdirenç yapısından gözeneklilik kesiti elde edilerek, varsayımsal iki boyutlu (2B) sayısal birleşik kirlilik iletim modeli üretilmiştir. Sonuçlar, jeofizik ölçümlerin yapıldığı yıllar (2004, 2008 ve 2009) ve sayısal modelleme zamanı (13,6 yıl) boyunca depolama sahasından kaynaklanan kirliliğin mekânsal ve zamansal değişimini göstermektedir. Ayrıca, sayısal modelleme sonuçları, olası araştırma profilinin uzunluğu ve derinliği ile (sırasıyla, ~40-250m ve 0-25 m), ileride bu bölgede yapılabilecek kirlilik çalışmaları için kavramsal bir model sunmaktadır. Sonuçlar, açık atık depolama alanı gibi kirlenici bir kaynaktan yayılan kirlilik bulutunun uzamsal ve zamansal yayılımına duyarlı sayısal modeller ve jeofizik çalışmaların birlikte değerlendirilmesinin önemini göstermektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Çevre kirliliği, kavramsal model, sayısal modelleme.

**Abstract:** In an earth science-related research study, while investigating geological or engineering problems, numerical modeling functions in two stages; i) prior to the fieldwork, obtaining the survey parameters (conceptual model), and ii) subsequent to the fieldwork, confirming the accuracy of the estimated subsurface structures with the help of the conceptual model. Although the numerical modeling process alone is not sufficient in both stages, it is possible to converge the numerical models into a realistic subsurface structure with additional information obtained from interdisciplinary studies.

In this article, a workflow is proposed employing modeling studies used in earth sciences. Environmental pollution studies carried out on a now-unused open waste disposal site in Çanakkale (Türkiye) are presented following this workflow. Accordingly, tomography measurements were made by using the electrical resistivity method along the profiles determined based on a conceptual model, and then a hypothetical two-dimensional (2D) combined solute transport model was produced by obtaining the porosity cross-section from the subsurface resistivity structure of the study area. The results show the spatial and temporal variation of pollution in the landfill during the years

*that geophysical measurements (i.e., 2004, 2008, and 2009) were taken, and the numerical modeling time (13,6 yrs). Besides, the numerical modeling results provide a conceptual model for future pollution studies in this area, with the length and depth of the possible survey profile (~40-250 m and 0-25 m, respectively). The results emphasize the importance of evaluating geophysical studies together with numerical models sensitive to the spatial and temporal spread of the pollution cloud emitted from a polluting source, such as an open dumpsite.*

**Keywords:** *Conceptual model, environmental pollution, numerical modeling.*

## GİRİŞ

“Tüm modeller yanlıştır” istatistikte yaygın olarak kullanılan bir özdeyiş (aphorism) ve kesinsizlik (anapodoton) ifadesidir. Box (1976); “Bütün modeller yanlıştır, bazıları faydalıdır” ünlü satırını yazdığı makalesinde, modelden elde edilecek bir bulgunun her durumda doğru olup olmadığını tartışmanın sonsuza dek sürecek bir kısır döngü olacağını, bunun yerine model sonuçlarının günlük hayatta yararlı bir şekilde uygulanıp uygulanamayacağına daha fazla odaklanılması gerektiğini belirtmiştir. Benzer bir anlayışla parametre, bağıntı ve yaklaşımlardaki kısıtlamalar nedeniyle gerek istatistiksel gerekse de sayısal modellerin her zaman gerçek yapıyı açıklamada yetersiz kalacağı, ancak dinamik dünyayı anlamada oldukça kullanışlı olabilecekleri söylenebilir. Bu nedenle, disiplinler arası araştırmalarda genellikle yeni ve hatta buluşsal denebilecek sonuçlar, modelleme süreci ve model varsayımları hakkındaki tartışmalardan ve soyutlamalardan türetilir. Böylelikle modeller aslında, gözlemlenen bilgilere neden olan karmaşık sistemler ve mekanizmalar hakkında bir düşünme biçimi sağlarlar.

Son yıllardaki bilgisayar teknolojilerindeki ilerlemelerin de etkisiyle, sayısal modeller kullanarak üretilen bilginin, yer bilimlerinde hızlı bir gelişmeye ve yorum gücünde artışa yol açtığı söylenebilir. Bu çalışmada sayısal modellemenin yer bilimlerindeki kullanımı genel olarak tanımlanmış, özgün bir çevre jeofiziği araştırması ile de örneklendirilmiştir. Örnek çalışmada 1989-2009 yılları arasında etkin olarak kullanılan Çanakkale düzensiz katı atık alanından kaynaklanan çevre kirliliği doğru akım

elektrik öz direnç yöntemi ile araştırılmıştır. Ayrıca kirliliğin zaman bağımlı yayılma örüntüsü sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak modellenmiştir. Jeofizik ölçü sonuçları ile birlikte basitleştirilmiş yer yapısı modeli, atıktan kaynaklanan kirleticinin (sızıntı suyu) yer içindeki yayılım sürecine bir yaklaşım sağlamaktadır. Buna göre izleyen bölümlerde öncelikle modelleme tanımı ele alınarak yeraltının görüntülenmesi çalışmalarında nasıl kullanıldığı özetlenecek, ardından örnek uygulama değerlendirilecektir.

## MODELLEMEDE GENEL TANIM ve YAKLAŞIMLAR

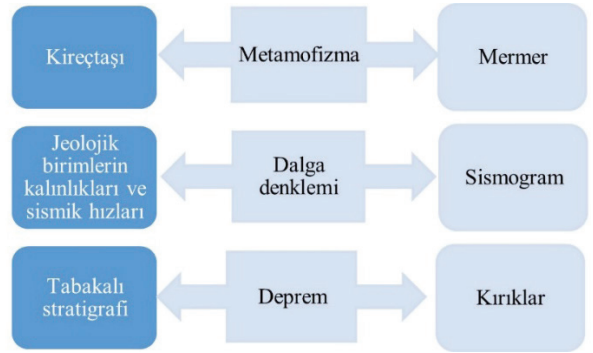
Yer bilimlerinde sayısal modellemede kullanılan terminoloji, makale içeriğine uygun biçimde genel bir çerçevede açıklanacaktır. Değinilen tanımların amaca bağlı olarak genişletilebileceği ve istatistikte önemli bir çalışma alanı olan rastgeleliğin burada göz önüne alınmadığı unutulmamalıdır. Buna göre; **i)** veri, tekrarlanabilir gözlem veya deney süreçleri ile elde edilebilen, aynı koşullar altında (yani, sabit zaman aralığı, alet ve konum gibi) tekrarlanabilir (yeniden-üretilir) özelliği olan, nicel veya anlam kaybı olmadan nicele çevrilebilen bilgiler bütünü olarak tanımlanabilir. **ii)** Parametre, modelde kullanılan ve verinin üretilmesinde etkili olan nicel veya anlam kaybı olmadan nicele çevrilebilen değiştirgenlerdir. **iii)** Deney veya gözlem, bir veya daha fazla bağıntı ile tanımlanabilen ve tekrarlanabilir nicel bilgi üreten süreçlerdir. **iv)** Modelleme, bağıntı ve/veya işlem dizileri kullanılarak, deney ve/veya gözlem sürecinin matematiksel olarak tanımlanması ve veri hacmi de dikkate alındığında bilgisayar ortamında

canlandırılması (simülasyon) çalışmasıdır. Modelleme bir veya daha fazla ardışık süreç içerebilir ve burada tüm bu süreç “dönüşüm işlemi” olarak tanımlanmıştır (Şekil 1). v) Kavramsal veya düşünsel model, çalışma alanında araştırılan soruna yönelik olarak beklentiler doğrultusunda oluşturulan yer/yapı tanımıdır. Kavramsal modelin matematik bağıntı ile tanımlanma zorunluluğu yoktur. Örneğin litolojik bilgilerden veya jeolojik birimleri temsil eden nicel değerlerden oluşabilir. vi) Bu çalışma çerçevesinde belirti, en sade tanımı ile, çevresine göre farklılık gösteren nicel veri olarak tanımlanmıştır. Gözlemden beklenen, ortalamadan farklılıkların, yani belirtilerin ortaya konmasıdır. Genelleştirilmiş bir modelleme süreci Şekil 1’de sunulmuştur. Şekilde parametre girdiyi tanımlarken, veri çıktı veya olası gözlem değerleridir. Kuramsal olarak modelleme süreci tersine döndürülebilir ve veriyi oluşturan parametre araştırılabilir. Şekil 1’de gri ve siyah oklar amaca göre farklı işlem süreçlerini tanımlamaktadır. Şekil 2’de ise parametre, dönüşüm işlemi ve veri tanımları için nicel ve nitel modelleme örnekleri yer almaktadır. Şekil 1 ile ilişkilendirildiğinde girdi bir işlem sonucunda çıktıya dönüşmektedir. Yukarıda değinildiği gibi kuramsal olarak bu işlem tersine işleyebilir. Yani Şekil 1 ve 2, parametreden verinin, veriden de parametrenin eldesinde (diğer bir ifadeyle düz ve ters çözüm işlemlerinde) sayısal modellemenin kullanımını tanımlar. Girdi ve çıktının yer değiştirebileceğini göstermek şekillerde için çift yönlü ok işaretleri kullanılmıştır.



**Şekil 1.** Bir modelleme süreci şematik gösterimi. Gri ve siyah oklar amaca göre seçilecek süreçleri tanımlamaktadır.

**Figure 1.** Schematic representation of modeling process. Gray and black arrows define selected processes according to the aim of the research.

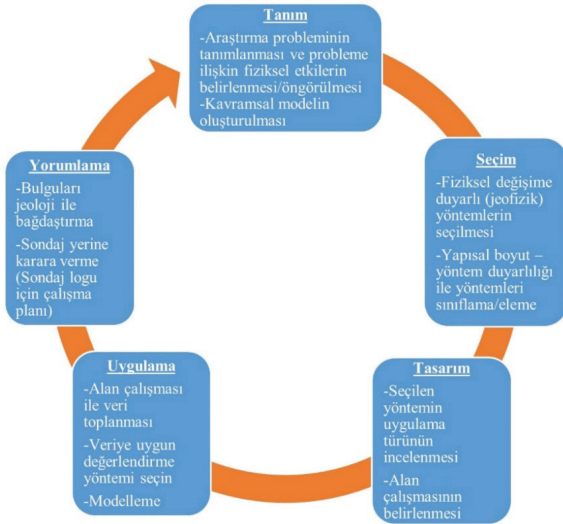


**Şekil 2.** Sayısal ve sayısal olmayan modelleme örnekleri.

**Figure 2.** Examples of numerical and non-numerical modeling.

Genelleştirilmiş bir araştırma döngüsü göz önüne alındığında, modelleme çalışmalarının yeri, diğer jeofizik aramalara da kolayca uyarlanabilir biçimde, jeotermal araştırma örneği dikkate alınarak iki evrede (düz ve ters çözüm) açıklanmıştır. Şekil 3’te sunulan süreç, araştırma probleminin ve buna bağlı olarak da kavramsal jeolojik modelin tanımlanması ile başlar. Kavramsal model olmadan araştırmanın yapılması ve sonuçlarının değerlendirilmesi sistematik bir yaklaşım olmayıp, kısır bir döngüye yol açabilir. İncelenen bölgeye ilişkin doğrudan nicel bilgiye mekanik sondaj olmadan ulaşamayacağından, önceki çalışmalardan, laboratuvar ve/veya arazi ölçümlerinden elde edilen veri ve parametreler ile (örneğin özdirenç değerleri), yani alanı tanımlayabilecek fiziksel etkilere bir yaklaşım ile kavramsal model oluşturulur (örn., Cumming, 2009). Örnek olarak bir jeotermal alandan beklenen litoloji ve özdirenç değer aralığı kavramsal model olarak Şekil 4’te sunulmuştur (Johnston vd., 1992). Uygulanacak jeofizik yöntemlerin seçimi, önerilen jeofizik ölçümlere fiziksel değişimlerin etkisi incelenerek yapılır. Bu seçimde aranan yapının olası boyutu, içeriği (örn., gözenekliliği, sıvı içeriği, mineral bileşimi vb.) gibi bilgilerin tanımlanacağı kavramsal model ile yöntem ilişkisi, yöntemin duyarlılığı ve uygulanabilirliği

de dikkate alınarak (lojistik vb. ile) analiz edilir. Diğer bir ifadeyle, kavramsal modelin sayısal ifadesi olan matematiksel model ile farklı jeofizik yöntemlerin vereceği belirti hesaplanır; yani kuramsal veri elde edilir (Şekil 1, gri oklar). Kavramsal modelden elde edilen kuramsal veriye bağlı olarak, yapısal boyut beklentileri ile yöntemin duyarlılığı karşılaştırılır ve yetersiz kalan yöntem(ler) elenir. Jeofizik yöntemler içinde yerin elektriksel özelliklerine duyarlı olan birçok yöntem olmasına karşın, Manyetotelürlük (MT) ve Doğru Akım Elektrik Öz direnç (DAÖ) yöntemleri jeotermal aramacılıkta yaygın olarak kullanılmaktadır ve hangi yöntemin kullanılacağına ve birden fazla yöntem gerekliliğine bu aşamayla karar verilir.

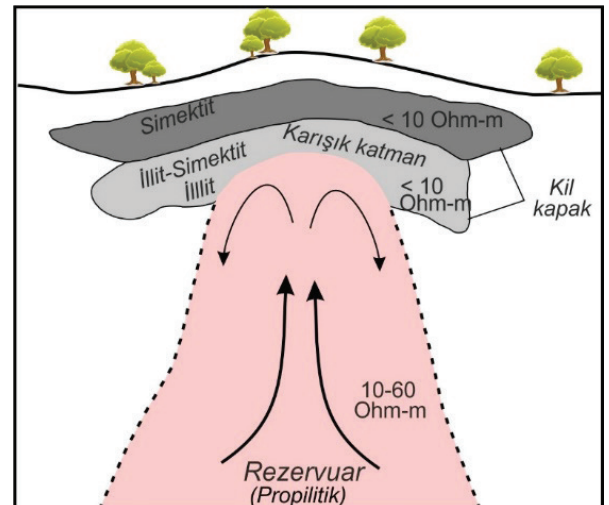


Şekil 3. Araştırma döngüsü.

Figure 3. Research cycle.

Araştırmanın izleyen aşamasında kavramsal model ve seçilen yöntemin dayandığı farklı fiziksel parametreler (gözlem süreci değişkenleri) ile elde edilebilecek en uygun veri türü (Şekil 1, gri oklar) ve bu veriden kestirilebilecek en ayrıntılı yapısal bilgi tanımlanmaya çalışılır (yapıya ilişkin

uzanım ve derinlik gibi değişkenlerin belirlendiği ters çözüm evresi, Şekil 1, siyah oklar). Veriden parametrelerin kestirimlerinde bilgi kaybı en az düzeyde olmalıdır. Yani Şekil 4 örneğindeki kil kapak model sonuçlarından elde edilemiyorsa kavramsal model değil, seçilen arazi uygulama parametreleri düzeltilmelidir (örn., MT frekans aralığı, istasyon aralığı seçimi gibi). Arazi parametreleri olarak adlandırılan bu değişkenlerin belirlenmesi ile birinci modelleme evresi tamamlanmış olur. Kavramsal modelin içerdiği ayrıntılara bağlı olarak tüm yapısal değişimlerin/ birimlerin/katmanların temsil edildiği bir kuramsal veri elde edilemeyebilir. Bu durum, ya yöntemin veya kavramsal modeldeki geniş bir aralıkta değişen parametrelerin neden olduğu kısıt olarak değerlendirilir. Jeofizik yöntemden kaynaklı alan bağımlı kısıtlamalar, daha sonraki aşamalarda göz önüne alınması gereken bir bilgi notu olarak dikkate alınır ve çalışmanın yöntemi ve/veya hedefi yeniden tanımlanır. Örneğin Şekil 4'te sunulan modelde “rezervuar” yerine kil türevlerinden oluşan kapak hedef alınır. Bu aşamaya kadar arazi çalışması yapılmamaktadır.



Şekil 4. Jeotermal alan için kavramsal model (Johnston vd., 1992'den değiştirilerek).

Figure 4. Conceptual model for a geothermal field (modified from Johnston et al., 1992).



Modelleme yapılarak belirlenen alanda uygulama parametreleri (saha/arazi/alan parametreleri) ile ölçümler gerçekleştirilir. Alan uygulama parametreleri ölçüm türü kadar ölçüm noktalarının (istasyonlarının) dağılımını da (örnekleme aralığı) belirlemektedir. Ardından ölçüm tekniği ve ölçüm istasyonlarına (ayrık ölçü durumunda, örn., düşey elektrik sondaj-DES) ve/veya ölçüm dağılımına göre (sürekli ölçü durumu-örneğin elektrik öz direnç tomografi-EÖT) veriye uygun değerlendirme yöntemi seçilir (Şekil 1, siyah oklar). İkinci evre modelleme çalışması ise arazi ölçümlerinden kavramsal modelin bileşenlerinin kestirilmesi için gerçekleştirilir (ters çözüm). Bu evrenin başarısı kavramsal modelle karşılaştırma ve “Tasarım” aşamasında (Şekil 3) ortaya çıkan kısıtlılıklar çerçevesinde değerlendirilir. Model kestirimleri (bulgular) gerçek jeoloji/yapı ile benzeştirilerek/ilişkilendirilerek sondaj yerine karar verilir. Tasarım aşamasındaki beklentilere (yapısal bilgilere) ulaşamaması durumunda “Tanım” aşamasına geri dönülür. Farklı bir yöntem veya yöntemler dizisi ile döngü tekrarlanır. Kuramsal model parametrelerinin yinelemeli olarak kestirimi ve kuramsal ile arazi verisi uyumsuzluğunun en küçüklenmesini içeren ters çözüm yöntemleri (Şekil 1, siyah oklar) hakkında literatürde oldukça fazla yayın bulunmaktadır (örn., Meju, 1994; 2009; Canitez, 2003; Zhdanov 2002; Menke, 2018) ve çalışmada bu konuya ayrıntılı değinilmeyecektir.

### Uygulamada Karşılaşılan Sorunlar

Modelleme konusunda genellikle, i) boyut kavramının anlaşılması; ii) ölçüm ile yer/yapı arasındaki ilişkinin bilinmemesi; iii) değerlendirmede kullanılan farklı yazılımların (bilgisayar kodlarının/programların) aynı işlevde olduğunun varsayılması (son kullanıcı hataları); iv) yöntem ve dolayısıyla elde edilecek veri kısıtlarının alan bağımlı olduğunun anlaşılması gibi nedenlerle hatalar yapılmaktadır.

### Boyutluluk

Modelleme aşamasında kullanılan boyut basitleştirilmiş jeolojiyi tanımlamaktadır. Tektonizma etkisinde kalmamış ve görece yatay konumda tortul birimlerden oluşan jeolojik yapılar jeofizik çalışmalarda bir boyutlu (1B) olarak tanımlanmaktadır (Şekil 5a). Burada istifteki her bir birimin kendi içinde tek düze (homojen) ve yön bağımsız (izotrop) yapıda olduğu varsayıldığından, sayısal modellerde istifteki bir birim veya birimler topluluğu tabaka olarak tanımlanır ve kalınlığı ile fiziksel özelliği (öz direnci, sismik hızı, yoğunluğu vb.) modelde sabit kabul edilir. Jeolojik yapı her yerde aynı olduğu için tek bir ölçüm noktasında toplanan jeofizik veri (DES, MT, sismik, gravite, manyetik vb.) ortamı tanımlamaya yeterli olduğu varsayılır.

Tektonizmaya maruz kalmış ve birbirinden açılacak olarak ayrılmış birimlerden oluşan jeolojik yapılar ise jeofizik çalışmalarda iki boyutlu (2B) olarak tanımlanmaktadır (Şekil 5b). Kartezyen koordinatlarda ifade edildiğinde, yapısal görüntünün y eksenini boyunca araştırma derinliği eşdeğeri yatay uzaklığa kadar değişmediği varsayılır. 1B varsayımının aksine x yönünde yapısal süreklilik olmadığından sayısal modellerde istifteki bir birim veya birimler topluluğu y eksenini boyunca sonsuza uzanan hücreler ile tanımlanır. 2B durumunda her bir hücrenin en, boy ve fiziksel özelliği (öz direnci, sismik hızı, yoğunluğu vb.) sabit kabul edilmektedir. x eksenini boyunca alınacak bir dizi ölçüm ile yer yapısı bilgisine ulaşılabilir. Bu tür ortamlarda arazi parametreleri önem kazanır. Hatalı seçilen arazi parametreleri 2B modelleme kullanılsa bile 1B benzeri sonuç üretir.

Üç boyutlu (3B) yapılar ise, farklı yönlerde tektonizma etkisinde kalmış, sokulumlar ile litolojisi değişmiş birimlerden oluşan jeolojik yapılara karşılık gelmektedir (Şekil 5c). 3B durumunda sayısal modellerde istifteki bir birim veya birimler topluluğu sonlu boyutta hücreler ile tanımlanır. Her bir 3B hücrenin eni, boyu,

derinliği ve fiziksel özelliği (özdirenci, sismik hızı, yoğunluğu vb.) sabit kabul edilir. Fiziksel parametrelerin farklılığının (kontrast) ölçülen veriye tam olarak yansıtılabilmesi için ölçümlerde örnekleme aralığı sık aralıklı ve dağılmış olarak toplanmalıdır. Hatalı seçilen arazi parametreleri toplanan verilerin değerlendirilmesinde 3B modelleme kullanılsa bile elde edilen yer modeli birçok yapısal ayrıntıyı içermeyecektir. Bu bilgiler doğrultusunda Şekil 4'te sunulan bir jeotermal alanın kavramsal modeli ele alındığında, sayısal modelin 1B olamayacağı, 2B yaklaşımının ise sınırlı olarak geçerli olabileceği kolaylıkla belirlenebilir.

Uzamsal boyut kavramına ek olarak zaman bağımlı model değişimleri çalışmalara konu olmaktadır. Yani, bir istasyondaki jeofizik ölçümün farklı zaman aralıkları ile tekrarında farklı değerler elde edilebilir ve bütün değişimler dört boyutlu (4B) olarak tanımlanıp, modellenenmektedir (örn., Dimech vd., 2022). Kıyı akiferlerine deniz suyu girişi, atık alanından kaynaklı sızıntının yer içindeki dağılımı gibi çevre kirliliği araştırılmalarında ve heyelan, deprem gibi dinamik kuvvetler altındaki yapı/zemin davranışlarının araştırılmasında ve hidrokarbon üretim sahalarında

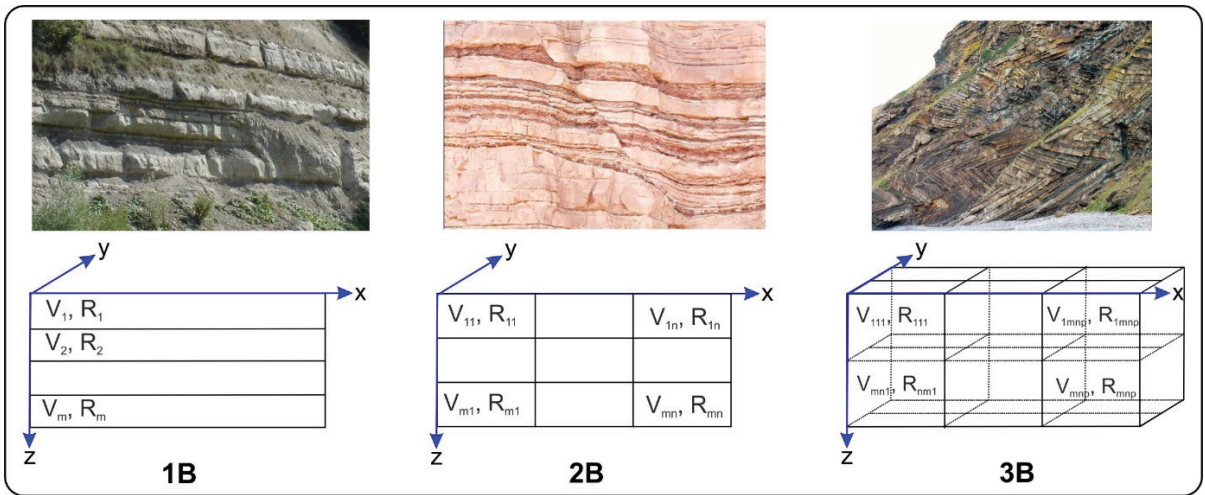
yapılan üretim izleme çalışmalarında zaman 4. değişken olarak modellerde dikkate alınmaktadır (örn., Wilkinson vd., 2016).

### Ölçüm ile yer yapısı arası ilişki

Ölçümlerden elde edilen veriler kavramsal model boyutundan bağımsızdır. Tek istasyonda ölçülmüş bile olsa verilerin her zaman karmaşık 3B yapılardan etkilendiği ve tüm jeolojik yapılara ait bilgiyi de içerdiği unutulmamalıdır. Bu nedenle modelin boyutu ölçüm istasyonu sayısına göre değil, kavramsal modele göre seçilmelidir, kavramsal modele bağlı olarak ölçüm sayısı ve ölçüm istasyonu konumları belirlenmelidir. Çalışmaların ekonomik boyutu nedeniyle ölçüm sayısının azaltılması uzak durulması gereken bir yaklaşımdır.

### Programların aynı işlevde olduğunun varsayılması

Ölçüm sayısına veya ölçüm istasyonu dağılımına göre program seçimi, uygulamada karşılaşılan yaygın diğer bir hatadır. 2B jeolojik yapı varsayılarak yapılan ölçümlerin 1B model varsayımı ile değerlendirilmesine örnek Şekil 6'da sunulmuştur.



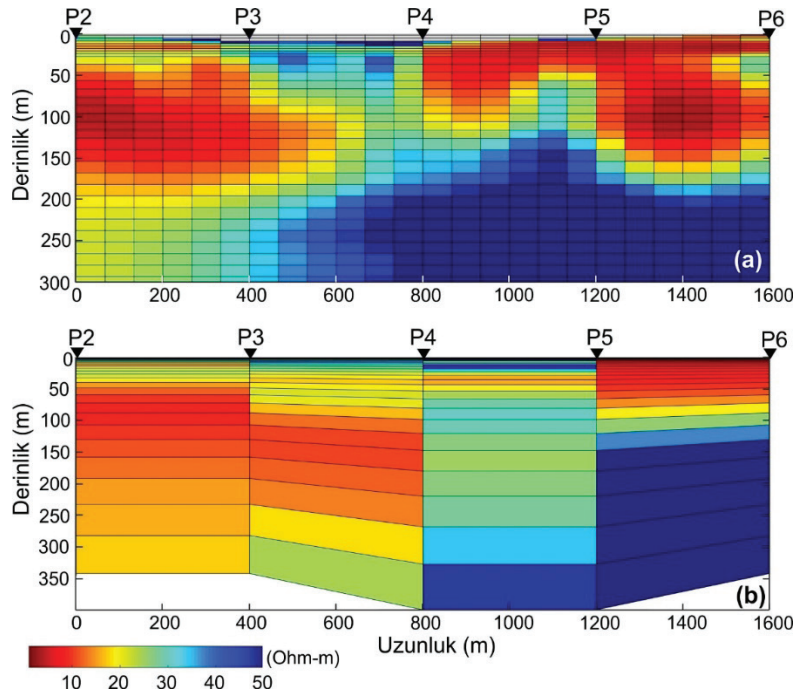
Şekil 5. Jeolojik yapı ve boyut ilişkisi (URL1, 2 ve 3).

Figure 5. Geological structure and dimension relationship (URL1, 2 and 3).

Bu örnekte yeraltı suyu aranması amacıyla DAÖ yöntemiyle ölçümler yapılmıştır (ayrıntılar için Ertekin ve Ulugergerli, 2023). Kavramsal modele uygun olarak seçilen beş istasyonda toplanan veriler 2B modelleme (Şekil 6a) ve 1B modelleme (Şekil 6b) varsayımları ile değerlendirilmiş ve görünür öz dirence bağlı yer elektrik kesitleri elde edilmiştir (Şekil 1, siyah oklar). Buna göre, 1B yapı yaklaşımı her istasyon arasında yalancı faylar (süreksizlikler) oluşmasına neden olmuştur (Şekil 6b). Uygulamada yaygın olarak kullanılan 1B sayısal modelleme yapan programların tamamında bu kuramsal sorun görülmekte ve oluşan yalancı faylar yorumlanabilir yapılar gibi algılanıp değerlendirilmektedir. Burada hatalı boyut tanımı, sayısal modelleme yapan bazı ticari ve açık kaynak kodlu programların, uygulamacılar tarafından yanlış kullanımında da sorun olmaktadır.

### Yöntemlerin kısıtlarının anlaşılabilmesi

Önceki bölümlerde değinildiği gibi arama yöntemlerinin uygulanmasında yöntemlerin doğası gereği karşılaşılan kuramsal kısıtlıkların (çözünürlük, araştırma derinliği vb.) yanı sıra arazide kullanılan ölçüm parametrelerine ve jeolojik birimlerin veya bu birimleri temsil edebilecek fiziksel değişimlerin dağılımlarına bağlı olarak ek kısıtlamalar ortaya çıkabilmektedir. Bu iki kısıt birbirine karıştırılmakta ve hatalı uygulamalar sonucu elde edilen sonuçlar yöntemin zayıflığı veya eksikliği olarak yorumlanmaktadır. Unutulmaması gereken, bu sorunlar arazi koşullarına göre değişiklik gösterebilir ve ancak kavramsal modele bağlı yapılacak hem ölçüm tasarımı (ölçüm noktası aralığı ile dağılımı, kayıt frekans veya zamanlarının belirlenmesi vb.) hem de modelleme türünün seçimi ile en aza indirilebilir.



Şekil 6. a) 2B modelleme ve b) 1B modelleme varsayımları ile düşey elektrik sondaj- DES verilerinden kestirilen yer elektrik kesitleri (Pi: ölçü istasyonu numarası,  $i=2-6$ , Ertekin ve Ulugergerli, 2023).

**Figure 6.** Electrical cross sections estimated from vertical electrical sounding-VES data based on the a) 2D and b) 1D modeling assumptions (Pi: station numbers,  $i=2-6$ , Ertekin ve Ulugergerli, 2023).

## UYGULAMA ÖRNEĞİ; ÇANAKKALE DÜZENSİZ KATI ATIK ALANI ÇEVRE KİRLİLİĞİ ARAŞTIRMASI

Jeofizik arama yöntemleri ve sayısal modelleme çalışmalarının birlikte kullanımı dünyada oldukça yaygındır, ancak özellikle çevre kirliliği araştırmaları kapsamında ülkemizdeki uygulamaları sınırlı sayıdadır (Barker, 1990; McNeill, 1990; Zheng ve Bennett, 1995; Ogilvy vd., 2009; Karlık ve Kaya, 2001; Olofsson vd., 2006; Witter ve Phillips, 2012; Uyanık, 2019; Oyeyemi vd., 2021; Boonsakul vd., 2022). Bu örnek çalışmada Çanakkale eski düzensiz katı atık alanında 4 araştırma doğrultusu (profili) üzerinde gerçekleştirilen öz direnç tomografi uygulamaları özetlenecektir. Örnek çalışma, önceki bölümlerde vurgulanan kavramlar dikkate alınarak ve Şekil 3'te sunulan basitleştirilmiş genel araştırma döngüsü izlenerek; i) Tanım ve Seçim, ii) Tasarım ve Uygulama ile iii) Yorumlama alt başlıkları ile analiz edilecektir.

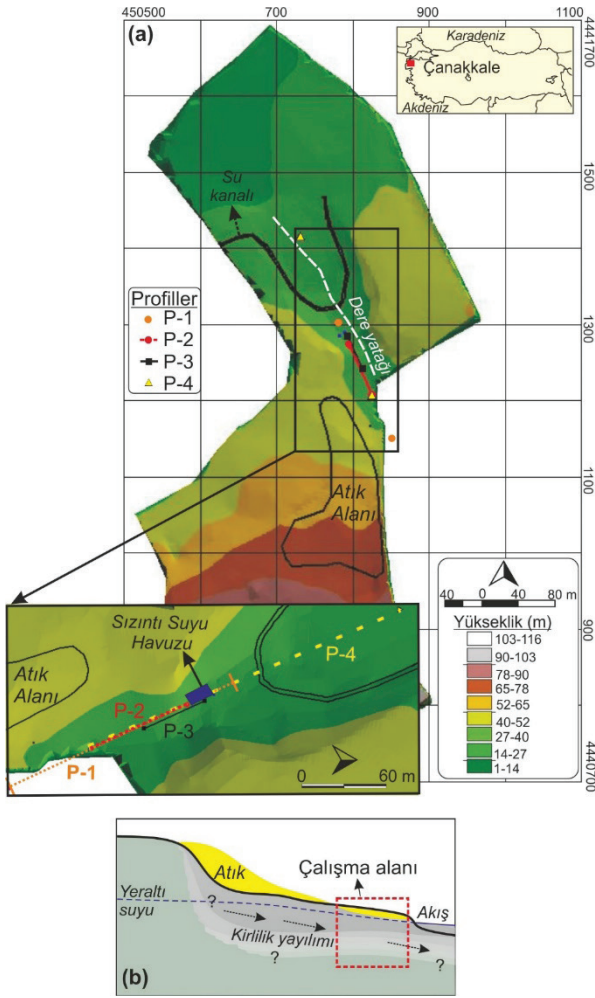
### Tanım ve Seçim

İnceleme alanı (Çanakkale Kuruçeşme Atık alanı), şehir havaalanının yaklaşık 1,5 km güneyinde, Fıstıklı vadisi içinde yer almaktadır (Şekil 7a). Atık alanı 1989-2009 yılları arasında vahşi depolama yapılarak kullanılmış olup, yüzey alanı 61.000 m<sup>2</sup>, alandaki toplam atık miktarı ise ~850.000 m<sup>3</sup>'tür (Seyfert, 2009). Bölgede stratigrafik olarak alttan üste doğru Çanakkale Formasyonu, Kuvaterner yaşlı alüvyal seki ve alüvyon sıralanırken, az pekleşmiş tortullardan meydana gelen Çanakkale formasyonu Üst Miyosen-Pliyosen yaşlıdır (Aktimur vd., 1993; Deniz, 2005). Düzensiz katı atık alanı bu Neojen yaşlı geçirgen (~10<sup>-4</sup>-10<sup>-5</sup> cm/s) tortullar üzerinde yer almaktadır ve bölgede temelde kumtaşı seviyeleri olmak üzere, siltli ve killi seviyeler de gözlenmektedir (Şengül, 2004;

Deniz, 2005; Kaya vd., 2007). Çalışma alanının ana akiferini oluşturan alüvyon birim, taneli ve serbest akifer niteliğindedir ve akiferden tarımsal sulama amaçlı yararlanılmıştır (Şengül, 2004; Aksakal, 2008). Yeraltı su seviyesi mevsimsel olarak değişmekle birlikte oldukça sığdır (~2 m, Şengül, 2004; Kaya vd., 2007).

Düzensiz atık alanlarından kaynaklı kirlilik, depo gazlarının sıkışması, yanması ve atmosfere doğrudan yayılması ile koku ve görüntü kirliliği gibi farklı başlıklar altında değerlendirilmektedir (örn., Şengül, 2004). Ancak rezidans (ikamet) süresi ve çevresel etkileri dikkate alındığında, atık kaynaklı kirliliğin en önemli unsurlarından birisi sızıntı suyudur. Yüzey ve meteorik suların da etkisiyle, atıklardaki çözünebilir ve çözünemeyen bileşikler, atıkta gelişen kimyasal ve biyolojik reaksiyonlar sonucu oluşan kirleticiler ile birlikte sızıntı suyu olarak taşınır (örn., Özkıdık, 1995; Öztürk vd., 2009). Özellikle sığ derinliklerde öz direnç zıtlıkları ile -çözünmüş iyon derişimine bağlı olarak- tanımlanabilen çöplük sızıntı suyunun, jeolojik birimler ve yeraltı suyu ile etkileşimi ve dolayısıyla sızıntı suyu kaynaklı kirlilik bulutunun mekânsal ve zamansal dağılımı jeofizik araştırmanın odağını oluşturur (genelleştirilmiş kuramsal model Şekil 7b). Diğer bir ifadeyle, kavramsal model ile basitleştirilerek sunulduğu gibi, bu uygulama izleyen kuramsal değerlendirmelere dayanmaktadır; **1**) sığ derinliklerde vadinin boyuna kesiti boyunca elektriksel olarak yanıl değişim sunan (2B) karmaşık yapı beklentisi; **2**) zamana bağlı akışkan örüntüsünü tanımlamak için yanıl geçirgenliği yüksek olan tortulardan oluşan bir ortam. Burada vadi yapısının her iki tarafı geçirimsiz birimler içerdiğinden ve uzun süreli kullanım nedeniyle tortul birimlerin kirleticiye doymunluğu nedeniyle 3B değişim öngörülemediştir.





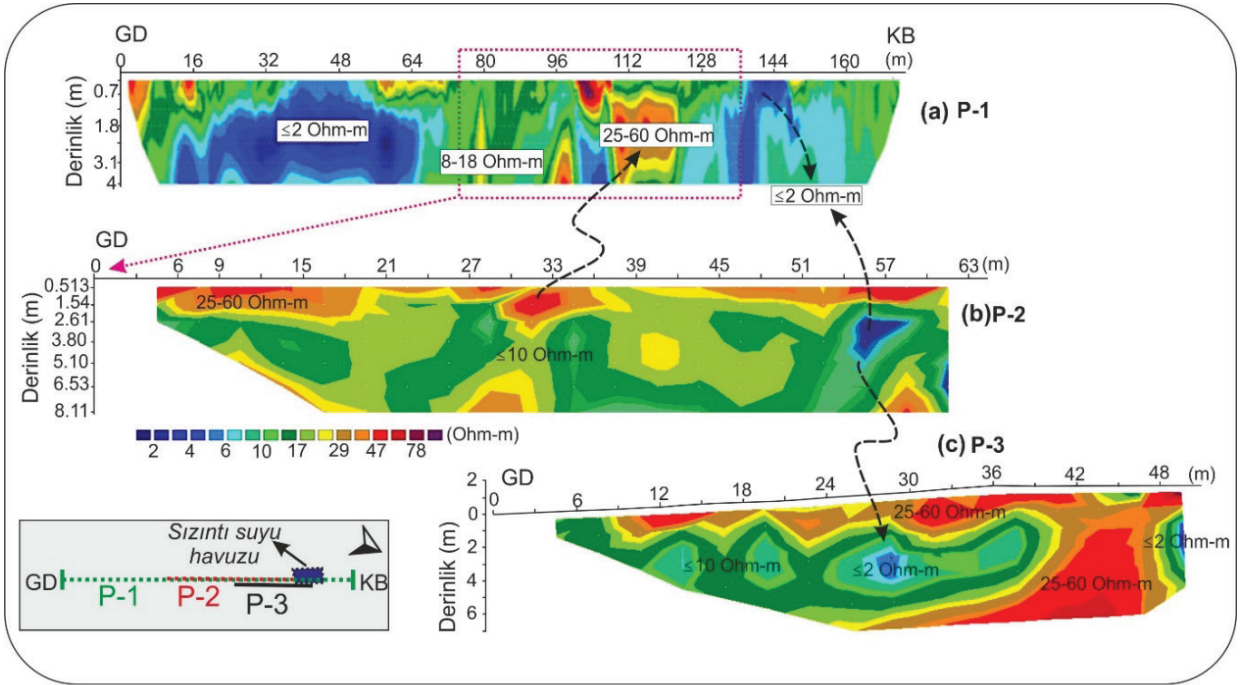
**Şekil 7. a)** Çanakkale eski düzensiz katı atık alanı ve çevresinin sayısal yükseklik modeli ve jeofizik ölçü profilleri (Aksakal, 2008'den değiştirilerek). P-1 P-2 ve P-4 ölçüleri sırasıyla 2004, 2008 ve 2009 yıllarında, aynı profil doğrultusunda (ölçümler birbirleri ile çakışacak biçimde), P-1'den P-4'e artan derinlik çözünürlüğü ile elde edilmiştir. **b)** Çalışma alanının kavramsal modeli (Şengül, 2004'ten değiştirilerek).

**Figure 7. a)** Digital elevation model of the Çanakkale old open waste disposal site and its surroundings and geophysical survey lines (modified from Aksakal, 2008). P-1, P-2 and P-4 were obtained in 2004, 2008 and 2009, respectively, in the same profile direction (overlapping measurements), with increasing depth resolution from P-1 to P-4. **b)** Conceptual model of the study area (modified from Şengül, 2004).

## Tasarım ve Uygulama

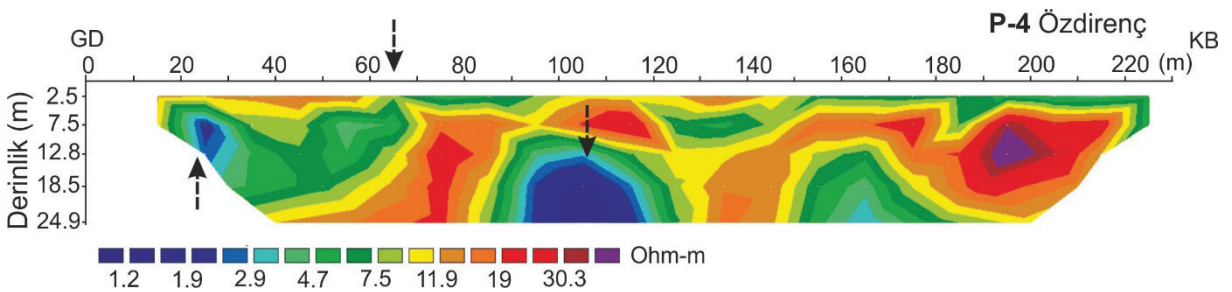
Özdirenç verileri hedeflenen en küçük yapısal değişim ve fiziksel özellikler (elektriksel iletkenlik değişimi) dikkate alınarak, farklı derinlik seviyelerine duyarlı örnekleme aralıkları 1, 3 m ve 10 m olacak şekilde tomografi tekniği ile ölçülmüştür. Jeofizik çalışmalar sırasında atık alanının kullanıma açık olması ve bölgede yürütülen iyileştirme (rehabilitasyon) çalışmaları, ölçü profillerinin seçimi ile sistematik uzamsal-zamansal örnekleme gibi süreçleri zorlaştırmıştır. Buna göre bölgede Şekil 7a ve Şekil 8a'da sunulan P-1 araştırma profili üzerinde (1 m örnekleme aralığı ile 10 derinlik seviyesi için 2004 yılı ölçüsü, Şengül, 2004; Kaya vd., 2007) aynı KB-GD doğrultulu, 3 metre örnekleme aralığı ile P-2 profili özdirenç ölçüsü alınmıştır (Aksakal, 2008). Şekil 8b'de sunulan P-2'ye paralel ve bu profilin ~1,5 metre doğusunda bulunan P-3'te ise 3 m elektrot aralıkları ile ölçüm yapılmıştır (Şekil 8c, Aksakal, 2008). P-4 profilinde (Şekil 9), diğer ölçü profillerine paralel olacak biçimde, alandaki kirliliğinin göreceli olarak bölgesel yayılımı hakkında bilgi edinmek için 10 metre örnekleme aralığı ile özdirenç ölçüsü kaydedilmiştir (Beşkardeş, 2009). Tüm ölçü profilleri eğime bağlı olarak yeraltı suyu akış yönündedir (Şekil 7). Ölçüler RES2DINV programında (Loke, 2004) değerlendirilmiştir (Şekil 1, siyah oklar). Bu programda yer elektrik iletkenlik değişimleri yinelemeli Gauss Newton yöntemi ile kestirilmiştir ( $RMS \leq \% \sim 10$ ) ve Şekil 8 ve 9'da 2B kesitler olarak sunulmuştur.

Sayısal kirlilik iletim modelinde, doymuş ortam dengeli hal kabulü ile toplam kirletici taşınımı kısmi türev denklemi sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak hesaplanmıştır (Beşkardeş, 2009). Modelleme aşamasında toplam kirletici taşınımının, hem adveksiyon (sadece yeraltı suyu ile kütle taşınımı) hem de dispersiyon ile gerçekleştiği, taşınan kirleticinin kimyasal tepkimeye girmediği ve sönümlenmediği varsayılmıştır. Buna göre düzenli bir yeraltı suyu akışı için kartezyen koordinatlarda x-yönündeki 3-boyutlu kirlilik iletim eşitliği (Istok, 1989),



**Şekil 8.** 2B yer elektrik kesitleri, **a)** P-1 2, **b)** P-2 ve **c)** P3 (küçük şekil profil konumlarını gösterir). Siyah oklar atık alanı kaynaklı kirlenmiş bölgeleri gösterir (ayrıntı için metne bakınız). 2004 (P-1) ve 2008 (P-2 ve P-3) yılı elektrik öz direnç tomografi ölçüleri sırasıyla 1m ve 3 m örnekleme aralıkları ile, Wenner-Schlumberger (Şengül, 2004, Kaya vd., 2007) ve dipol-dipol (Aksakal, 2008) elektrot dizgeleri kullanılarak elde edilmiştir.

**Figure 8.** 2D electrical resistivity cross sections, **a)** P-1, **b)** P-2 and **c)** P3 (inset figure shows the profile locations). Black arrows indicate contaminated areas from landfill (see text for details). 2004 (P-1) and 2008 (P-2 and P-3) electrical resistivity tomography measurements were obtained by using Wenner-Schlumberger (Şengül, 2004, Kaya et al., 2007) and dipole-dipole (Aksakal, 2008) electrode arrays with 1 m and 3 m sampling intervals, respectively.



**Şekil 9.** P-4 (2009) ölçü profili, yer elektrik kesiti. Wenner-Schlumberger ölçü dizgesi ve 10 m elektrot aralığı kullanılmıştır (Beşkardeş, 2009).

**Figure 9.** Profile P-4 (2009), electrical resistivity cross section. Wenner-Schlumberger array and 10 m electrode spacing were used (Beşkardeş, 2009).

$$\frac{\partial(\theta C)}{\partial t} = D_x \frac{\partial^2}{\partial x^2} (\theta C) + D_y \frac{\partial^2}{\partial y^2} (\theta C) + D_z \frac{\partial^2}{\partial z^2} (\theta C) - \frac{\partial}{\partial x} (V_x C) - \frac{\partial}{\partial t} (\rho_b K_d C) - \lambda(\theta C + \rho_b K_d C) \quad (1)$$

dir. Burada,  $\theta$ : gözeneklilik, C: kirletici madde yoğunluğu (mg/l),  $v_x$ : x yönündeki görünür yeraltı suyu hızı (m/gün),  $\rho_b$ : Bulk yoğunluğu (kg/m<sup>3</sup>),  $\lambda$ : denge dağılım katsayısı,  $K_d$ : kirletici kaynağın sönümlenme sabiti, sırasıyla x, y, z yönlerindeki saçılım katsayısıdır (m<sup>2</sup>/gün). Çalışmada,  $\theta = 0$  olarak alınmakta ve iki boyutlu çalışıldığından kabul edilmektedir. Dengeli rejim yeraltı suyu akışı için kirlilik iletim eşitliğinin düzey ifadesi sonlu elemanlar tekniği ile çözülmüştür (Istok, 1989);

$$([A] + \Delta t[D])\{C\}_{t+\Delta t} = [A]\{C\}_t + \Delta t\{K\}_{t+\Delta t} \quad (2)$$

A: global soğrulma düzeyi, D: global yeraltı suyu ile taşınım (adveksiyon- dispersiyon) düzeyi, K: belirlenmiş kirlilik bileşenleri düzeyi, C: kirlilik yoğunluğu, t: zaman, zaman aralığıdır. Model parametreleri için P-4 ölçüsünden elde edilen gerçek özdirenç değerleri kullanılarak (Şekil 9) Archie bağıntısı yardımı ile bölgeye ilişkin gözeneklilik hesaplanmıştır (Archie 1942),  $F$ : formasyon faktörü,  $R_o$ : kayaç özdirenci,  $R_w$ : formasyon suyu özdirencidir. Kirlilik iletim modelleme çalışmasında, bölgenin jeolojisi göz önüne alınarak gevşek zeminler için formasyon faktörü;  $F=0,81$ / temel alınmıştır. Ortam hem düşey hem de yatay yönde geçirimli kabul edilmiştir. Alüvyon birimlerin eğimin etkisi göz önüne alınarak yatay yönde daha fazla geçirimli olduğu varsayılmıştır (yani çözümde su akış yönü dikkate alınmıştır). Geçirimsizlik ve yoğunluk değerleri, alüvyon ve kil için literatürde önerilen değerlerdir (Istok, 1989). Buna göre alüvyon için yatay yönde geçirimsizlik 0,035 m/gün, düşey yönde 0,001 m/gün alınmıştır. Kil için ise her iki yönde 10<sup>-5</sup> m/gün başlangıç değeri tanımlanmıştır. Alüvyon birimler için bulk yoğunluğu 1,5 g/cm<sup>3</sup>, killi birimler için ise 1,2 g/cm<sup>3</sup> kabul edilmiştir. Literatürde önerilen

abaklar yardımıyla enine saçılım katsayısı (0,03 m, Gelhar vd., 1992) ve boyuna saçılım katsayısı (8,26 m, Xu ve Eckstein, 1995) değerleri çalışma alanının boyuna bağlı olarak elde edilmiştir. Yapılan 2B kirlilik iletim modellemesinde kaynak, sonlu elemanlar ağında derinliği ve genişliği olan bir alan olarak belirlenmiştir (Şekil 10a). Yani kirletici kaynak, atık alanından süzülmuş ve ölçüm alanına yanal yönde giriş yapan kirletici madde yoğunluğu oldukça yüksek olan sızıntı suyu olarak tanımlanmaktadır. Modelde kaynağın başlangıç yoğunluğu 900 mg/l olarak öngörülmüştür ve bu kirliliğin kaynaktan taşınımı için geçen süre hesaplanarak Şekil 10'da sunulmuştur. P-4 profili (Şekil 9) ile ilişkilendirilerek oluşturulan sayısal model sonucu basitleştirilmiş kavramsal modelle uyumludur ve göreceli lokal değişimlere de duyarlıdır (Şekil 8).

## Yorumlama

Çanakkale düzensiz katı atık alanından kaynaklı kirliliğin 2004-2008-2009 yıllarındaki değişimini incelemek için yapılan jeofizik araştırmanın sonuçlarına göre Şekil 8 ve Şekil 9'da sunulan 2B kesitlerde, sızıntı suyundan kaynaklanan kirletici madde yoğunlaşmasına bağlı olarak düşük özdirenç ( $\leq 10$  Ohm-m) değerleri elde edilmiştir. P-1 (2004 yılı) 2B yer elektrik kesitinin (Şekil 8a) atık alanına en yakın GD bölgesinde, atıktan sızan kirleticilerin yer içine girişimi  $\leq 2$  Ohm-m gibi oldukça düşük özdirenç değerleri ile tanımlanmıştır. Aynı kesitin GD'sindeki düşük değerlikli ( $\leq 2$  Ohm-m) değişimler, alanın o bölgesinde yer alan sızıntı suyu toplama havuzundan (Şekil 11a) kaynaklanan ve ölçü sırasında yüzeyden gözlenmeyen kirliliğe işaret etmektedir. Bu kirlilik yayılımını izleyen 4 yıl boyunca devam etmiş, P-2, P-3 ve P-4 profillerinde (2008 ve 2009 yıllarında) yapılan ölçülerde de sızıntı suyu toplama havuzu

etrafında kirlilik etkileri olarak gözlenmiştir (örn., KB yönündeki  $\leq 2$  Ohm-m değerlikli doymun bölgeler, Şekil 8b ve 8c). Ayrıca özellikle Şekil 8a ve 8b profillerinde plastik içerikli tıbbi atık çukuruyla ilişkili olarak (Şekil 11b) ~25-60 Ohm-m değerlikli (okla gösterilen) yüksek özdirençli bölgeler görüntülenmiştir.

P-4 profili yer elektrik kesitinde özdirenç farklılığı gösteren yanal geçişler özellikle yer içinde kirliliğin atıktan uzağa taşınmasını tanımlamak bakımından önemlidir (okla işaret edilen bölgeler, Şekil 9). Bu kesitte sarı ve kahverengi bölgelerin (11,4-18,5 Ohm-m) kirlilik yayılımına olanak veren alüvyon birimler, yeşilin tonlarıyla ifade edilen (4,3-6,9 Ohm-m) bölgelerin ise sızıntı suyu ile karışmış yeraltı suyuna doymun killi birimler olabileceği yorumlanmıştır (Beşkardeş, 2009). Yatay eksende 60-70 metre arasındaki yanal özdirenç değişiminin diğer profillerle de uyumlu olduğu (Şekil 8), atık alanına yakın sızıntı suyuna doymun bölgeleri işaret ettiği değerlendirilmektedir. 90-120 metreler arasındaki ölçüler, sızıntı suyunun yüzey suyuyla taşındığı bölgeye karşılık geldiğinden oldukça düşük özdirenç değerleri P-4 ölçü profilinde gözlenmektedir (Şekil 9). P-4 ölçüm sonuçları doğrultusunda sonlu elemanlar tekniği ile üretilen 2B sayısal birleşik kirlilik iletim modelinde kirlilik yoğunlaşma değerleri 500 gün (1,3 yıl) aralıklarla toplam 5000 gün (atık alanının en yoğun olarak kullanıldığı 13,6 yıl için) için hesaplanmıştır. Kirlilik yayılımı eş-kirlilik kesitleri oluşturularak Şekil 10'da sunulmuştur. Sayısal model bölgenin yeraltı jeolojisine, atığın özelliklerine (atığın içeriği, yaşı, kullanım süresi gibi) ve çevresel etkilere bağlı olarak (meteorik sularla etkileşim gibi), kirletici bir kaynaktan (atıktaki çürüme, kimyasal reaksiyonlar ve çevresel etkilerle oluşan çözünmüş kirleticilerin yoğun olarak bulunduğu sıvı, Şekil 11a) yer içine yayılan kirlilik bulutunu göstermektedir. Ayrıca elde edilen sonuçlar, uzaklık ve derinlik değişimleri dikkate alındığında, alanda yapılacak geniş ölçekli çalışmalar için kullanılabilir bir

tasarım modeli olarak oldukça işlevseldir. Diğer bir ifade ile sayısal model, kirliliğin uzamsal değişimini araştırılmasında yerel değişimler için kısa (~40 m) bölgesel değişimler için ise uzun (~250 m) ölçü profilleri seçilmesi gerektiğini ve ayrıca araştırma derinliğinin (0-25 m) öngörülmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

## SONUÇLAR ve TARTIŞMA

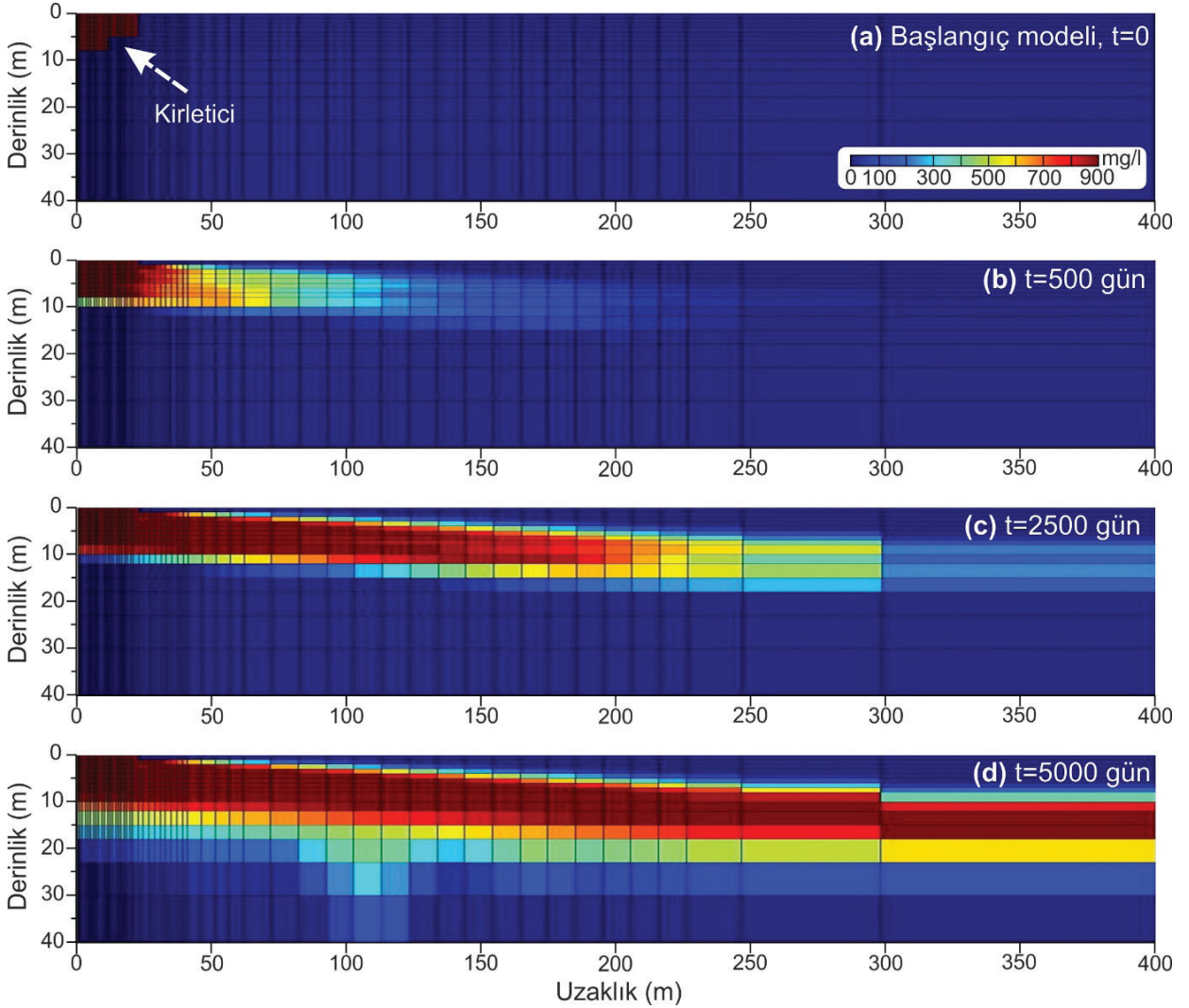
Çanakkale kenti eski düzensiz katı atık alanında gerçekleştirilen jeofizik uygulama ve sayısal model sonuçları atık alanından kaynaklı kirliliğin yer içindeki uzamsal ve zamansal etkilerini göstermektedir. Buna göre yer elektrik kesitlerindeki düşük özdirençli bölgelerle ilişkili olarak, ölçümlerin yapıldığı 2004-2008-2009 yılları süresince sızıntı suyu kaynaklı kirliliğin devam ettiği gözlenmiştir (Şekil 8 ve 9). Ayrıca 2003 yıllarında depolanan plastik içerikli atıkların (Şekil 11b), aradan geçen 6 yıl sonra bile doğada korunduğu ve yer elektrik kesitlerinde yüksek özdirençli belirti grubu olarak görüntülenen çevre kirliliğine neden olduğu belirlenmiştir. Kirliliğin etkilerinin, atıktan yayılan kirleticinin yeraltı jeolojisi ile zaman içinde etkileşimini de dikkate alan birleşik kirlilik iletim modelleri (Şekil 10) ile analiz edilebileceği, bu çalışmanın bir diğer önemli bulgusudur. Bölgede yapılacak olası kirlilik çalışmalarında sayısal model sonuçları, araştırma profillerinin öngörülen uzunluk (~40-25 m) ve derinliğini (~0-25 m) tanımlaması bakımından kavramsal bir model olarak da değerlendirilebilir.

Elde edilen bulgular ve yapılan değerlendirmeler, atıkların doğal ortama gelişini güzel bırakılması ile oluşturulan düzensiz katı atık alanlarının- rehabilitasyon çalışmaları sonrası bile- çevreye olan olumsuz etkilerine dikkat çekmesi açısından oldukça önemlidir. Ayrıca burada bir örneği sunulan sayısal modelin, özellikle eski deponilerdeki potansiyel kirliliğin belirlenmesi, kirlilik iyileştirme sistemlerinin tasarımı, en etkili deşarj kuyu yer seçimi ve



pompaj oranlarının belirlenmesi gibi amaçlar için kullanılması önerilebilir. Dahası, bir atık depolama alanı tasarımında jeofizik ölçülerle desteklenecek sayısal model kullanımının, daha sonra oluşabilecek çevre kirliliğinin önlenmesi için oldukça etkili olduğu söylenebilir. Böylelikle

kirlilik bulutunun gelecekteki ve/veya güncel durumunun kestirimi yapılabilir ve sürdürülebilir çevre yönetimi için kirlenici taşınımının belirlenmesi amacı ile geliştirilecek sayısal modeller karar vericiler olarak kullanılabilir.



**Şekil 10.** Sayısal model, 2B eş-kirlilik kesitleri, **a)** başlangıç koşulu,  $t=0$ , **b)**  $t=500$  gün, **c)**  $t=2500$  gün, **d)**  $t=5000$  gün (Beşkardeş, 2009'dan değiştirilerek).

**Figure 10.** Numerical model, 2D iso-contamination sections, **a)** initial condition,  $t=0$ , **b)**  $t=500$  days, **c)**  $t=2500$  days, **d)**  $t=5000$  days (modified from Beşkardeş, 2009).



**Şekil 11.** Araştırma alanı. **a)** P-1 elektrik öz direnç ölçü profili, vahşi (dere yatağı) ve kontrollü (havuz) sızıntı suyu toplanma alanları (fotoğrafların çekildiği yıl 2004) ve **b)** plastik içerikli hastane atık alanı (fotoğrafın çekildiği yıl 2003, bakış yönü KB'den GD'ye doğrudur, Şengül, 2004).

**Figure 11.** Survey area. **a)** P-1 electrical resistivity measurement profile, wild (stream bed) and controlled (pool) leachate gathering areas (in 2004), and **b)** hospital waste site containing plastic content (in 2003, viewed from NW to SE, Şengül, 2004).



Sonuç olarak, yer bilimleri problemlerinin çözümünde, özellikle disiplinler arası ortak çalışmalarda, katılımcılar bilinçli veya bilinçsiz olarak modelleri Box (1976)'ın başa bela mottosu ile sorgulamaktadırlar. Oysaki "Bütün modeller yanlıştır, bazıları faydalıdır" ifadesi bir modelin yararlılığının, temsilin doğruluğu ile ölçülmediğini, ancak hipotezlerin oluşturulması, test edilmesini ve iyileştirilmesindeki önemli rolünü vurgulamak içindir. Turing (1952) matematiksel bir modelin amacını açıklarken, modellemenin seçilen parametreler ve bağıntılar özelinde bir basitleştirme ve idealleştirme ve sonuç olarak bir yanlış yönlendirme süreci olacağını belirtmiştir. Dolayısıyla kullanılan yöntemin ve veri değerlendirme tekniklerini kısıtları bilindiği sürece, arazi parametrelerinin uygun seçimi ile kavramsal modeli destekleyen veya eksiklerini ortaya koyan bilgilerin elde edilmesi olasıdır. Ayrıca güncel bilgi birikimi çerçevesinde, araştırmaya konu olarak kullanılan parametrelerin ve yaklaşımların diğer ayrıntılara göre çok daha önemli olduğu düşüncesi, modellemenin gerekliliğini desteklemektedir.

Modellemenin iki ayrı evrede de kullanılması ve ölçüme kavramsal modele göre karar verilmesi hatalı bir işlem olarak algılanabilir. Ancak unutulmaması gerekir ki, tasarım aşamasında kullanılan kavramsal model, araştırılan alana ait tüm bilgileri içermeyecektir. Eğer böyle olsaydı elbette ki gerçek yeraltı modeli olarak ele alınacak ve araştırmaya gerek kalmayacaktı. Kavramsal model bölgeye ait yüzeyden gözlemlenmiş veya önceki çalışmalardan elde edilmiş bölgesel ölçekteki birimleri içeren çoğunlukla düşünsel bir tasarımdır. Bu genel bilgi arazide kullanılacak ölçüm parametrelerini belirlemek için yeterli olacaktır. İkinci evrede sayısal modeller ile ölçülen verilerden elde edilecek sonuç ise renklerden veya sayılardan ibaret görseldir. Yerel yapı/jeoloji ile olan ilişki kavramsal model yardımıyla sağlanabilir. Örneğin temel kayanın,

yüzeyde gözlenmiş bir fayın ve diğer bilinen yapıların kesitle ilişkilendirilmesinden sonra araştırmaya konu olan ayrıntılar tanımlanmaya başlanabilir. Özetle, modele bir sonuç olarak odaklanmak yerine, modelleme süreci ve nicel olarak elde edilmiş model tahminleri, karmaşık doğrusal olmayan süreçler hakkında "düşünme yolları" (örn., Apweiler vd., 2018) olarak değerlendirilmelidir.

### **EXTENDED SUMMARY**

*In this study of a site in Çanakkale province, the use of numerical modeling in Earth Sciences is reviewed in general and is exemplified by geophysics research targeting an environmental problem. In the study, the environmental pollution caused by the open waste disposal site, which was used effectively between 1989 and 2009, was investigated by using the direct current electrical resistivity method. The research steps, as given as the simplified general research cycle presented in Figure 3, are i) definition and selection, ii) design and implementation, and iii) interpretation.*

*In the first phase, as a result of the modeling work done with the conceptual model, 1) there is an expectation of a complex structure (2D) that presents an electrical lateral variation along the longitudinal section of the valley at shallow depths; and 2) a medium consisting of sediments with high lateral permeability is envisaged to describe the time-dependent fluid pattern.*

*In the design phase, studies with the conceptual model reveal that short (~40 m) and long (~250 m) profiles should be selected for local and regional changes, respectively, and also the depth of the research (0 -25m) should be predicted while investigating the spatial variation of pollution.*

*In the application of the numerical modeling phase, resistivity data were measured by the*

tomography technique with electrode spacings of 1 m, 3 m, and 10 m in order to investigate different depth levels, considering the smallest changes in the geologic structure and physical properties (electrical conductivity change). All gauge profiles are swaged in the groundwater flow direction, depending on the slope (Figure 7). Measures were evaluated in the RES2DINV program (Loke, 2004). The solute transport in the saturated porous geologic medium was modeled by using the finite element method.

For the model parameters, the porosity of the region was calculated with the help of Archie's equation (Archie, 1942) by using the recovered resistivity values obtained from the P-4 measure (Figure 9). The source is defined as leachate, with high pollutant condensation that has drained from the waste area and enters the measurement area laterally. Both the simulated solute concentrations and the subsurface electrical resistivity structure are compatible with the simplified conceptual model, and are sensitive to relative local changes. In addition, the results obtained are quite functional as a design model for future large-scale studies to be carried out in the field, considering the changes in distance and depth.

In the interpretation phase, according to the results of the geophysical research carried out to examine the change in the pollution originating from the old Çanakkale dumpsite between 2004-2008-2009, the 2D sections presented in Figure 8 and Figure 9 show low resistivity ( $\leq 10$  Ohm-m). This is due to the concentration of pollutants originating from the leachate. In the P-1 (2004) 2D ground electrical section (Figure 8a) of the SE area closest to the waste area, the penetration of pollutants leaking from the waste into the ground is defined by very low resistivity values, such as  $\leq 2$  Ohm-m. Low-value ( $\leq 2$  Ohm-m) changes in the SE of the same section indicate pollution originating from the leachate collection pool (Figure 11a) located in that part of the area and not observed

from the surface at the time of measurement. This pollution continued to spread for the following years, and pollution effects were observed around the leachate collection pool at the measurements made in the P-2, P-3 and P-4 profiles (in 2008 and 2009). In addition, high resistivity regions of  $\sim 25$ -60 Ohm-m (arrowed) are visualized in relation to the plastic-containing medical waste pit (Figure 11b), especially in Figure 8a and 8b profiles.

In conclusion, it can be suggested that the use of a numerical model together with geophysical measurements in environmental geophysical studies is highly effective in determining both ongoing environmental pollution and predicting potential pollution. Also, rather than focusing on the numerical model as an ultimate outcome, the modeling process and quantitatively-derived model estimations can be considered as ways of thinking about complex nonlinear processes (e. g., Apweiler et al., 2018).

## TEŞEKKÜR

Bu makale Türkiye Jeoloji Bülteni Yer Bilimlerinde Sayısal Modelleme Özel Sayısı için hazırlanmıştır. Özel sayıya davetleri için Editörler Erdiç YİĞİTBAŞ ve Oğuz GÖĞÜŞ'e, değerli eleştirileri ve katkılarından dolayı Coşkun SARI başta olmak üzere anonim hakeme, ölçüm aygıtlarını sağlayan ÇOMU MF Jeofizik Mühendisliği Bölümü'ne ve başta Jeofizik Mühendisi Sevgi AKSAKAL ve Didem BEŞKARDEŞ olmak üzere çalışmaya katkı sağlayan 2004-2009 öğretim yıllarındaki lisans öğrencilerimize teşekkür ederiz. Çalışmanın teknik altyapısını oluşturma aşamasında keyifli tartışmalar ile bizi aydınlatan merhum Cemal KAYA'ya teşekkürü borç biliriz

## ORCID

Ebru Şengül Uluocak  <https://orcid.org/0000-0002-6701-463X>

Emin Uğur Ulugergerli  <https://orcid.org/0000-0001-5639-1109>



## KAYNAKLAR / REFERENCES

- Aksakal, S. (2008). *Katı atık depolama sahalarından toprak ve yeraltı suyuna olan sızıntıların elektrik öz direnç ve yapay uçlaşma yöntemleri ile araştırılması* [Yayımlanmamış Lisans Tezi]. Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Jeofizik Müh. Bölümü.
- Aktimur, H. T., Uysal, Ş., Tamgaç, Ö.F., Aktimur, S., Sarıaslan, M. ve Emre, Ö. (1993). *Çanakkale İli'nin arazi kullanım potansiyeli raporu* (Rapor no: 159). Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü (yayımlanmamış).
- Apweiler, R., Beissbarth, T., Berthold, M., ... & Wolkenhauer, O. (2018). Whither systems medicine? *Experimental & Molecular Medicine*, 50, Article e453. <https://doi.org/10.1038/emm.2017.290>
- Archie, G. E. (1942). The electrical resistivity as an aid in determining some reservoir characteristics. *Transactions of the AIME*, 146, 54-62. <https://doi.org/10.2118/942054-G>
- Barker, R. D. (1990). Investigation of groundwater salinity by geophysical method. In S. H. Ward, (Ed.), *Geotechnical and Environmental Geophysics, vol.2: Environmental and Groundwater*, (pp. 201-212). Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, USA.
- Beşkardeş, G. D. (2009). Çanakkale katı atık depolama sahası için yeraltı suyu kirliliğinin modellenmesi. *Uluslararası Deprem Sempozyumu* (özet bildiri-poster, s. 89), 17-19 Ağustos, 2009, Kocaeli.
- Boonsakul, P., Buddhawong, S. & Wangyao, K. (2022). Optimization of multi-frequency electromagnetic surveying for investigating waste characteristics in an open dumpsite. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 72(11), 1290-1306.
- Box, G. (1976). Science and statistics. *Journal of the American Statistical Association*, 71(356), 791-799.
- Camtez, N. (2003). *Jeofizikte modelleme*. Literatür Yayıncılık.
- Cumming, W. (2009). Geothermal resource conceptual models using surface exploration data. In: *Thirty-Fourth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford University, Stanford, California.
- Deniz, O. (2005). *Çanakkale yerleşim alanının yeraltı suyu kalitesinin incelenmesi* [Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi]. Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Dimech, A., Cheng, L., Chouteau, M., Chambers, J., Uhlemann, S., Wilkinson, P., ... & Isabelle, A. (2022). A review on applications of time-lapse electrical resistivity tomography over the last 30 years: Perspectives for mining waste monitoring. *Surveys in Geophysics*, 43(6), 1699-1759. <https://doi.org/10.1007/s10712-022-09731-2>
- Ertekin, C. & Ulugergerli, E. U. (2022). Geoelectrical survey over perched aquifers in the northern part of Upper Sakarya River Basin, Türkiye. *Journal of Groundwater Science and Engineering*, 10(4), 335-352. <https://doi.org/10.19637/j.cnki.2305-7068.2022.04.003>
- Gelhar, L. W., Welty, C. & Rehfeldt, K. W. (1992) A Critical Review of Data on Field-Scale Dispersion in Aquifers. *Water Resource Research*, 28, 1955-1974. <https://doi.org/10.1029/92WR00607>
- Istok, J. (1989). *Groundwater Modelling By The Finite Element Method*. American Geophysical Union.
- Johnston, J.M., Pellerin, L. & Hohmann, G. W. (1992). Evaluation of Electromagnetic Methods for Geothermal Reservoir Detection. *Geothermal Resources Council Transactions*, 16, 241 – 245.
- Kaya, M. A., Özürlan, G. & Şengül, E. (2007). Delineation of soil and groundwater contamination using geophysical methods at a waste disposal site in Çanakkale, Turkey. *Environmental Monitoring and Assessment*, 135, 441-446. <https://doi.org/10.1007/s10661-007-9662-x>
- Karlık, G. & Kaya, M. A. (2001). The investigation of soil and groundwater pollution using geophysical methods in Isparta landfill. *Environmental Geology*, 40, 725-731.
- Loke, M. H. (2004) *User's manual for RES2DINV software*. Geotomo Software.
- McNeill, J. D. (1990). Use of electromagnetic methods for groundwater studies. In S. H. Ward (Ed.), *Geotechnical and Environmental Geophysics*, (pp. 191-218), vol. 1. Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, USA.
- Meju, M. A. (1994). *Geophysical data analysis: understanding inverse problem theory and*

- practice*. In: S. N. Domenico (Ed.), Society of Exploration Geophysicists. Course Notes Series, No. 6.
- Meju, M. A. (2009). Regularized extremal bounds analysis (REBA): An approach to quantifying uncertainty in nonlinear geophysical inverse problems. *Geophysical Research Letters*, 36(3), Article L03304. <https://doi.org/10.1029/2008GL036407>
- Menke, W. (2018). *Geophysical data analysis: Discrete inverse theory*. Academic press.
- Ogilvy, R. D., Meldrum, P. I., Kuras, O., Wilkinson, P. B., Chambers, J. E., Sen, M., ... & Tsourlos, P. (2009). Automated monitoring of coastal aquifers with electrical resistivity tomography. *Near Surface Geophysics*, 7(5-6), 367-376.
- Olofsson, B., Jernberg, H. & Rosenqvist, H. (2006). Tracing leachates at waste sites using geophysical and geochemical modeling. *Environ Geol.*, 49, 720–732.
- Oyeyemi, K. D., Aizebeokhai, A. P., Metwaly, M., Oladunjoye, M. A., Bayo-Solarin, B. A., Sanuade, O. A., Thompson C. E., Ajayi, F. S. & Ekhaguere, O. A. (2021). Evaluating the groundwater potential of coastal aquifer using geoelectrical resistivity survey and porosity estimation: A case in Ota, SW Nigeria. *Groundwater for Sustainable Development*, 12, Article 100488. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2020.100488>
- Özkıdık, H. (1995) *Katı Atık Yönetiminde Belediyeler İçin Yöntem ve Maliyet Analizi*, [Uzmanlık Tezi]. T.C. Başbakanlık Devlet Planlama Teşkilatı Müsteşarlığı, Sosyal Sektörler ve Koordinasyon Genel Müdürlüğü, Ankara.
- Öztürk, İ., Onay, T. T., Çallı, B., Mertoğlu, B. & Yıldız, Ş. (2009). *Sızıntı Suyu Yönetimi İhtisas Komisyonu Taslak Çalışma Raporu*. TC Çevre ve Şehircilik Bakanlığı Çevre Yönetimi Genel Müdürlüğü, Ankara, Türkiye.
- Seyfert, A. (2009). *Katı atık sahası, Çanakkale – Kuruçeşme, Katı Atık Sahası Gaz Pompalama Çalışması*, SEF Energietechnik GmbH, Rapor, 26.
- Şengül, E. (2004). *Çanakkale düzensiz katı atık depolama sahası yüzey ve yeraltı sularına etkisinin uygulamalı jeofizik yöntemlerle araştırılması* [Yayımlanmış Yüksek Lisans Tezi]. Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Turing A, (1952). The chemical basis of morphogenesis. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, 237(641), 37-72.
- URL1 (2023, 01 Temmuz). <https://www.geologieportal.ch/en/themes/fundamentals-of-geology/stratigraphy.html>
- URL2 (2023, 01 Temmuz). <https://cdn.britannica.com/91/172891-050-2093FD16/Fault-sandstone-strata.jpg>
- URL3 (2023, 01 Temmuz). [https://en.wikipedia.org/wiki/Chevron\\_%28geology%29](https://en.wikipedia.org/wiki/Chevron_%28geology%29)
- Uyanık, O. (2019). Estimation of the porosity of clay soils using seismic P- and S-wave velocities. *Journal of Applied Geophysics*, 170, Article 103832. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2019.103832>
- Wilkinson, P., Chambers, J., Uhlemann, S., Meldrum, P., Smith, A., Dixon, N. & Loke, M. H. (2016). Reconstruction of landslide movements by inversion of 4-D electrical resistivity tomography monitoring data. *Geophysical Research Letters*, 43(3), 1166-1174.
- Witter, J. D. & Phillips, N. (2012). Integrated 3D geophysical inversion and geological modelling for improved geothermal exploration and drillhole targeting. *GRC Transactions*, 36, 831-834. <https://publications.mygeoenergynow.org/grc/1030325.pdf>
- Xu, M. & Eckstein, Y. (1995). Use of weighted least-squares method in evaluation of the relationship between dispersivity and field scale. *Groundwater*, 33(6), 905-908.
- Zhdanov, M. S. (2002). *Geophysical inverse theory and regularization problems*. Vol. 36, Elsevier.
- Zheng, C. & Bennett, G. (1995). *Applied Contaminant Transport Modelling: Theory and Practice*. Wiley, pp. 464.