



# Maden Tetkik ve Arama Dergisi

<http://dergi.mta.gov.tr>

| MADEN TETKİK VE ARAMA<br>DERGİSİ |     |
|----------------------------------|-----|
| KURULUŞ                          |     |
| 1. Sayı                          | 157 |
| 2. Sayı                          | 158 |
| 3. Sayı                          | 159 |
| 4. Sayı                          | 160 |
| 5. Sayı                          | 161 |
| 6. Sayı                          | 162 |
| 7. Sayı                          | 163 |
| 8. Sayı                          | 164 |
| 9. Sayı                          | 165 |
| 10. Sayı                         | 166 |
| 11. Sayı                         | 167 |
| 12. Sayı                         | 168 |
| 13. Sayı                         | 169 |
| 14. Sayı                         | 170 |
| 15. Sayı                         | 171 |
| 16. Sayı                         | 172 |
| 17. Sayı                         | 173 |
| 18. Sayı                         | 174 |
| 19. Sayı                         | 175 |
| 20. Sayı                         | 176 |
| 21. Sayı                         | 177 |
| 22. Sayı                         | 178 |
| 23. Sayı                         | 179 |
| 24. Sayı                         | 180 |
| 25. Sayı                         | 181 |
| 26. Sayı                         | 182 |
| 27. Sayı                         | 183 |
| 28. Sayı                         | 184 |
| 29. Sayı                         | 185 |
| 30. Sayı                         | 186 |
| 31. Sayı                         | 187 |
| 32. Sayı                         | 188 |
| 33. Sayı                         | 189 |
| 34. Sayı                         | 190 |
| 35. Sayı                         | 191 |
| 36. Sayı                         | 192 |
| 37. Sayı                         | 193 |
| 38. Sayı                         | 194 |
| 39. Sayı                         | 195 |
| 40. Sayı                         | 196 |
| 41. Sayı                         | 197 |
| 42. Sayı                         | 198 |
| 43. Sayı                         | 199 |
| 44. Sayı                         | 200 |
| 45. Sayı                         | 201 |
| 46. Sayı                         | 202 |
| 47. Sayı                         | 203 |
| 48. Sayı                         | 204 |
| 49. Sayı                         | 205 |
| 50. Sayı                         | 206 |
| 51. Sayı                         | 207 |
| 52. Sayı                         | 208 |
| 53. Sayı                         | 209 |
| 54. Sayı                         | 210 |
| 55. Sayı                         | 211 |
| 56. Sayı                         | 212 |
| 57. Sayı                         | 213 |
| 58. Sayı                         | 214 |
| 59. Sayı                         | 215 |
| 60. Sayı                         | 216 |
| 61. Sayı                         | 217 |
| 62. Sayı                         | 218 |
| 63. Sayı                         | 219 |
| 64. Sayı                         | 220 |
| 65. Sayı                         | 221 |
| 66. Sayı                         | 222 |
| 67. Sayı                         | 223 |
| 68. Sayı                         | 224 |
| 69. Sayı                         | 225 |
| 70. Sayı                         | 226 |
| 71. Sayı                         | 227 |
| 72. Sayı                         | 228 |
| 73. Sayı                         | 229 |
| 74. Sayı                         | 230 |
| 75. Sayı                         | 231 |
| 76. Sayı                         | 232 |
| 77. Sayı                         | 233 |
| 78. Sayı                         | 234 |
| 79. Sayı                         | 235 |
| 80. Sayı                         | 236 |
| 81. Sayı                         | 237 |
| 82. Sayı                         | 238 |
| 83. Sayı                         | 239 |
| 84. Sayı                         | 240 |
| 85. Sayı                         | 241 |
| 86. Sayı                         | 242 |
| 87. Sayı                         | 243 |
| 88. Sayı                         | 244 |
| 89. Sayı                         | 245 |
| 90. Sayı                         | 246 |
| 91. Sayı                         | 247 |
| 92. Sayı                         | 248 |
| 93. Sayı                         | 249 |
| 94. Sayı                         | 250 |
| 95. Sayı                         | 251 |
| 96. Sayı                         | 252 |
| 97. Sayı                         | 253 |
| 98. Sayı                         | 254 |
| 99. Sayı                         | 255 |
| 100. Sayı                        | 256 |

**Üç Boyutlu cevher kütle modellemesi yardımı ile bir maden galerisinin planlanması: Çulfa Çukuru Pb-Zn-Cu-Ag yatağından örnek bir çalışma**

**An ore adit planning with the help of three dimensional ore body modeling: A case study from Çulfa Çukuru Pb-Zn-Cu-Ag deposit**

Sinan AKISKA<sup>a</sup> ve Elif AKISKA<sup>b\*</sup>

<sup>a</sup>Ankara Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 06830, Gölbaşı, Ankara. [orcid.org/0000-0001-8262-7349](https://orcid.org/0000-0001-8262-7349)

<sup>b</sup>Ankara Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 06830, Gölbaşı, Ankara. [orcid.org/0000-0002-6180-4710](https://orcid.org/0000-0002-6180-4710)

Araştırma Makalesi

Anahtar Kelimeler:

Modelleme, jeostatistik, cevher, krigleme, idw.

**ÖZ**

Çulfa Çukuru Pb-Zn-Cu-Ag cevherleşmesi, Biga Yarımadası'nda Sakarya zonuna ait metamorfitletler ile metamorfite-volkanik kayaç dokanıkları boyunca ortaya çıkmıştır. Bu kayaçların dokanıkları ve kırık-çatlak düzlemleri boyunca gelişmiş baz metal (Pb-Zn-Cu-Ag±Au) cevherleşmeleri, kalsilikatik kayaç toplulukları içerisinde damar, mercek, saçınımlı cevher geometrileri şeklinde gözlenmektedir. Baz metal cevherleşmeler esas olarak yan kayaç (litoloji) kontrollü olup genellikle rekrystalize kireçtaşları ile ilişkili olarak bulunmaktadır. Bu çalışmada Kalkım (Çanakkale) ilçesinin 20 km güney-güneydoğusunda yer alan Çulfa Çukuru bölgesine ait topoğrafik veriler yardımı ile yeryüzü ve yine bu bölgede gözlenen Pb-Zn yatağında yapılmış olan 42 adet yer üstü ve yer altı sondajlarında kesilen cevherli zonlar ve bunlara ait %Pb ve %Zn değerleri modellenmiştir. Yüzey ve yeryüzü verileri sırasıyla "Krigleme" ve "Ters Mesafe Ağırlıklı" yöntemlerle interpolate edilmişlerdir. Yapılan her iki modelleme çalışması da çapraz doğrulama yöntemi ve tahmin hataları ile denetlenmiştir. Bu çalışmadan elde edilen %Pb ve % Zn verilerinden, işletme sınırı üzerinde kalan alanlar 4 farklı sektöre ayrılarak kesişim alanları tespit edilmiştir. Bunların yer altındaki konumları da kullanılarak muhtemel galeri hatları belirlenmeye çalışılmış ve 450 katı için de yorumlanmış bir galeri haritası çizilmiştir. Yapılan bu modelleme çalışması, bir bölgede açılacak olan maden galerilerinin planlanmasına yardımcı olmaktadır. Ayrıca günün koşullarında meydana gelebilecek önemli değişikliklere göre (örn. maliyetlerin artması ya da azalması, metal fiyatlarındaki değişiklikler) işletme sırasında da modeller üzerinde değişiklik yapılabilir.

Geliş Tarihi: 26.05.2017

Kabul Tarihi: 11.02.2018

Keywords:

Modeling, geostatistics, ore, kriging, idw.

**ABSTRACT**

Çulfa Çukuru Pb-Zn-Cu-Ag mineralization has occurred along the metamorphic and metamorphic-dacitic volcanic rock contacts of the Sakarya zone on the Biga Peninsula. The base metal mineralizations (Pb-Zn-Cu-Ag±Au) developed along the contact and fracture planes of these rocks can be observed as veins, lenses and disseminated ore geometries in the calc-silicate rock assemblages. Base metal mineralizations are mainly controlled lithologically and are generally associated with recrystallized limestones. In this study, the surface and the subsurface were modeled using the topographical data and the geochemical data (%Pb and %Zn) collected from 42 boreholes of Çulfa Çukuru which is located 20 km South-Southeast of Kalkım (Çanakkale). The surface and the subsurface data were interpolated by Kriging and Inverse Distance Weighted methods, respectively. The intersectional areas of %Pb and %Zn modeling data obtained from this study were determined by dividing the areas above the cut-off grade into 4 different sectors (low, intermediate, high, and very high). Using the distribution of the intersections of these sectors, the possible adit lines were determined and also an interpreted map of the adit was drawn for 450 level. This modeling study helps to plan the ore adit to be opened in a mining area. Moreover, according to the important changings that may occur in conditions (e.g. fluctuations in metal prices or decreasing-increasing costs), models can also be modified during operations.

\* Başvurulacak yazar: Elif AKISKA, [egunen@eng.ankara.edu.tr](mailto:egunen@eng.ankara.edu.tr)

<http://dx.doi.org/10.19111/bulletinofmre.372510>.

MTA Dergisi hem İngilizce hem Türkçe olarak yayımlanmakta olup makalelere yapılacak atıfların İngilizce baskısına yapılması gerekmektedir.

## 1. Giriş

Maden yataklarının değerlendirilmesinde karşılaşılan en önemli problemlerden birisi yeraltının tamamına ait gözlem olmamasıdır. Ancak sondajlar, kuyu logları ve jeofiziksel ölçümlerden elde edilen veriler bize yeraltı hakkında önemli bilgiler sağlayabilmektedir. Sondajlardan elde edilen verilerin yeraltının tamamının yorumlanması için kullanımı ancak bu verilerin uygun interpolasyon yöntemleri ile bir araya getirilmesi ile mümkün olabilmektedir. Bu sebeple uygun interpolasyon yöntem seçimi doğruya en yakın tahmin için oldukça önemlidir. Yapılan interpolasyon çalışmaları ile birlikte elde edilen hata tahmin verileri ve çapraz doğrulama teknikleri ile yapılan interpolasyon çalışmalarının doğrulukları denetlenebilmektedir.

Son birkaç on yılda özellikle bilgisayar teknolojisinin gelişmesi ile birlikte kompleks yapıların 3B modelleme çalışmaları oldukça hız kazanmıştır. Yüksek işlemci gücüne sahip bilgisayarlar yardımı ile çok sayıda veri bir arada değerlendirilip yorumlanabilmektedir. Bunların desteği ile üretilen 3B yüksek çözünürlüklü modeller kullanılarak gerçek hayatta karşılaştığımız birçok probleme çözüm üretilebilmektedir. Teknolojinin gelişmesi ile birlikte diğer dallarla birlikte yerbilimlerinde de önemli değişimler yaşanmıştır. Yerbilimlerinde modelleme çalışmaları özellikle maden yatakları (Saraç ve Tercan, 1996; Chen vd., 2007; Feltrin vd., 2009; Wang vd., 2011; Liu vd., 2012; Wang ve Huang, 2012; Xiao vd., 2012; Akıska vd., 2013; Kashani vd., 2016), petrol, doğalgaz ve kömür (Sims, 1992; Saraç vd., 2004; Kaufmann ve Martin, 2008; Jian vd., 2012; Dağ ve Özdemir, 2013) gibi doğal kaynakların yer altındaki konumlarının belirlenmesinde ve bunların değerlendirilmelerinde oldukça sık kullanılmaktadır. Ayrıca, hidroloji ve hidrojeoloji çalışmalarında (Turner, 1992; Watt vd., 2007; Ahmed, 2009; Gallerini ve Donatis, 2009), yapısal unsurların modellenmesinde (Renard ve Courrioux 1994; de Kemp, 2000; Galera vd., 2003; Bistacchi vd., 2008; Calcagno vd., 2008; Zanchi vd., 2009; Dhont vd., 2012) ve yol, tünel ve baraj ile ilgili problemlerin çözümünde (Veldkamp vd., 2001; Elkadi ve Huisman, 2002; Rengers vd., 2002; Özmutlu ve Hack, 2003; Zhu vd., 2003; Hack vd., 2006; Choi vd., 2009) de uygulama alanı bulmaktadır.

Bu çalışmada Çulfa Çukuru Pb-Zn-Cu-Ag cevherleşmesinde gerçekleştirilen sondajlardan (42 adet) elde edilen Pb-Zn jeokimyasal analiz verileri

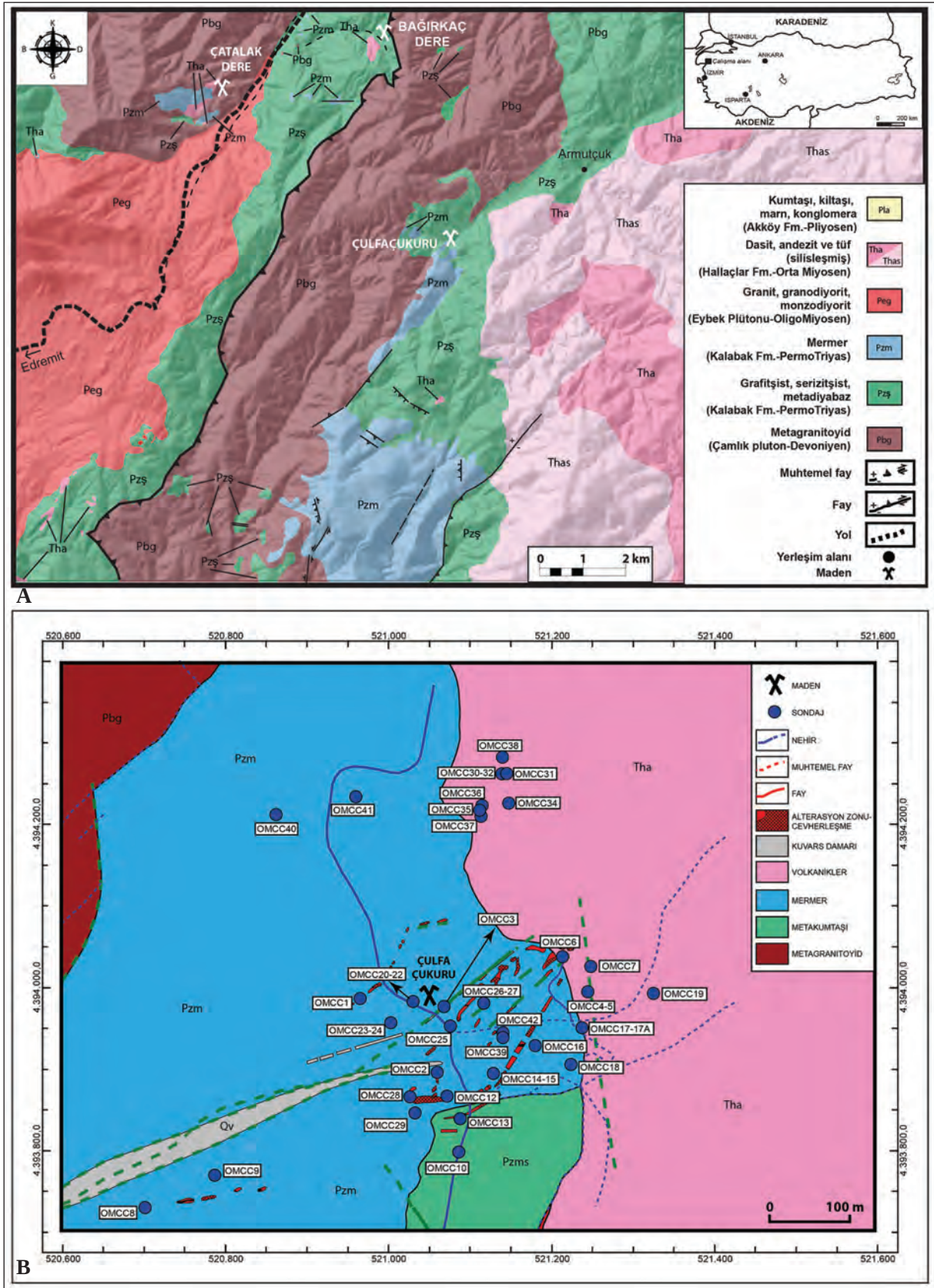
yardımları ile yer altında 3B cevher modelleme çalışması yapılmış olup oluşturulan modeller kullanılarak da işletme sınırı üstündeki alanlar belirlenmiş ve bunların yardımı ile yer altında açılacak optimal galeri hatları belirlenmiştir. Yapılan modelleme çalışmaları istatistiksel ve çapraz doğrulama teknikleri ile denetlenmiştir. Bu temel çalışma ele alınıp çalışılan yatağa ait jeolojik, yapısal vs. unsurlar ile çalışma dönemindeki yatağa ait ekonomik koşullar birlikte yorumlanarak uygun parametreler tespit edilebilir. Bu parametreler kullanılarak gerek yer altı işletmesi açılmadan önce gerekse de sırasında modelleme çalışmaları yapılarak yer altından cevherin en optimal şekilde nasıl çıkartılabileceği tespit edilebilir.

## 2. Bölgesel Jeoloji

Biga Yarımadası'nın jeolojisini çalışan araştırmacıların (Siyako vd., 1989; Okay vd., 1990, 1996, 2008; Dönmez vd., 2005, 2008; Altunkaynak ve Genç 2008; Dilek vd., 2009) verilerine göre bölgenin temelini Tersiyer öncesi Permo-Triyas yaşlı metamorfikler ve ofiyolitler ile Üst Kretase yaşlı ofiyolitik melanjlardan oluşmaktadır. Bölge Tersiyer sırasında Paleosen-Eosen'den başlayarak Miyosen sonuna kadar magmatizma ve volkanizma etkisi altında kalmıştır. Bu sırada çoğunlukla granodiyorit bileşimli birçok granitoid kütlesi temel kayalarına sokulum yaparken, benzer zaman aralıklarında temel kayaları andezit-dasit-riyodasit-riyolit bileşimli volkanik kayalarla kesilerek uyumsuz olarak örtülmüşlerdir. Yine bu dönemde Biga Yarımadası'nda volkanik aktiviteyle çoğu zaman eş yaşlı olarak yoğun bir sedimantasyon meydana gelmiştir. Bölgede ürünlerine rastlanan son volkanizma Pliyosen yaşlı bazaltlarla temsil olunmaktadır. Bölgedeki tüm birimler en son olarak Pliyo-Kuvaterner yaşlı akarsu çökelleri tarafından uyumsuz olarak örtülmüştür (Şekil 1a).

Çalışma alanının jeolojisine yönelik detaylı çalışmalar Akıska (2010), Akıska vd. (2010, 2013), Akıska ve Demirela (2014) tarafından yapılmıştır. Buna göre, çalışma alanında izlenen birimler, yaşlıdan gence doğru, Çamlık granitoidi (Devoniyen), metakumtaşı ve kalk şist-mermer mercekleri içeren Kalabak şistleri (Permo-Triyas), Eybek plütunu (Oligo-Miyosen) ve Kalkım volkanitleridir (Orta Miyosen) (Akıska, 2010).

Çamlık granitoidi, bölgede daha önce maden jeolojisi çalışmaları yapmış Yücelay (1976), Çetinkaya vd. (1983a, b), Tufan (1993) ve Biga Yarımadası'nın



Şekil 1- A) Çulfa Çukuru bölgesi ve çevresinin jeoloji haritası (Duru vd., 2007), B) Çulfa Çukuru Pb-Zn yatağının jeoloji haritası (Yücelay, 1975) ve sondaj noktaları (koordinat değerleri UTM koordinat sistemi 35-N zonuna aittir).

jeolojisi ve tektonik evrimi üzerine çalışma yapmış olan Okay vd. (1990) tarafından incelenmiştir. Kalabak şistleriyle birlikte bölgesel metamorfizma geçirdikleri belirtilen bu birimler ile şistler arasında da bir tektonik dokanağın varlığından bahsetmişlerdir. Makroskobik olarak gri-kahverengi ve bej renklere sahip olan Çamlık granitoyidi esas olarak kuvars, plajiyoklaz ve kloritten oluşur; lökokratiktir, sıkça aplit ve kuvars damarları tarafından kesilmiştir (Akıska, 2010).

Kalabak formasyonu, ilk defa Radelli (1970) tarafından Kalabak Köyü (Edremit-Balıkesir) yöresinde “Kalabak şistleri” olarak tanımlanmıştır. Bu formasyon, çalışma sahasının dışında Prekambriyen yaşlı Kazdağ masifinin litolojik birimlerini açısız uyumsuzlukla üzerler. İnceleme alanının güneyinde ise üzerine bindirmeli olarak Çamlık granitoyidi gelmektedir. Kuzeyde ise Kalkım volkanitleri ve Akköy formasyonu ile açısız uyumsuzlukla örtülmüştür (Tufan, 1993). Yücelay (1976), Çetinkaya vd. (1983a, b), Tufan (1993)’e göre; kayaç birlikteliği olarak çoğunlukla killi şist, biyotit şist, serizit-klorit şist, klorit şist ve serizit-grafit şist şeklinde görülen Kalabak şistleri, metakumtaşı, mermer, serpantin ve metadiyabaz mercekleri içerir (Akıska, 2010).

Eybek plütönu, Tufan (1993), Andiç ve Kayhan (1996), Pehlivan ve Çetin (1997) ve Genç ve Altunkaynak (2007) tarafından ayrıntılı olarak çalışılmıştır. Bileşimsel olarak granit, kuvars monzonit ve granodiyoritlerden oluşan plütönda ana mineral bileşimi olarak kuvars, alkali feldispat, plajiyoklaz (çoğunlukla albit-andezin türünde), biyotit, hornblend ve ojit, tali mineral olarak ise sfen, zirkon, apatit ve opak mineraller bulunmaktadır (Akıska, 2010).

Kalkım volkanitleri, Yücelay (1976), Çetinkaya vd. (1983a, b), Tufan (1993), Andiç ve Kayhan (1996) ve Pehlivan ve Çetin (1997) tarafından ayrıntılı olarak çalışılmıştır. Tufan (1993) tarafından isimlendirilen “Kalkım volkanitleri”, bölgede çalışan Krushensky (1976) tarafından “Hallaçlar formasyonu” olarak adlandırılan birime karşılık olarak kullanılmıştır (Akıska, 2010). Riyolit, dasit, andezit, trakiandezit, ignimbirit, tuf ve aglomeralarla temsil edilirler (Akıska, 2010) (Şekil 1a, b).

Çulfa Çukuru Pb-Zn-Cu-Ag cevherleşmesi, Biga Yarımadası’nda çoğunlukla Sakarya zonuna ait metamorfik kayaçlar ve volkanik kayaçlar ile ilişkili gözlenmektedir. Bu kayaçların dokanaklarında ve kırık- çatlak düzlemleri boyunca gelişmiş baz metal

cevherleşmeleri, kalsilikatik kayaç toplulukları içerisinde saçınımlı, mercek ve damar tip cevher geometrileri şeklinde gözlenmektedir. Cevher ile yan kayaç arasındaki ilişki her ne kadar volkanik kayaçlar ile metamorfik kayaçlar arasında görülse de volkanik kayaçların cevherleşme ile doğrudan bir ilişkisi kesin olarak ispatlanmamıştır. Baz metal cevherleşmeler esas olarak yan kayaç (litoloji) kontrollü olup çoğunlukla rekristalize kireçtaşları ile ilişkili olarak bulunmaktadır (Şekil 1a, b).

### 3. Yöntem

Özellikle bilgisayar teknolojisinin gelişmesi ile birlikte son yıllarda 3B yeraltı modelleme çalışmalarında bir hızlanma olmuştur. Daha önceden el ile yapılamayan karmaşık işlemler bilgisayarlar aracılığı ile rahatlıkla yapılmaktadır. Buna bağlı olarak modelleme çalışmalarında hızlı bir artış gözlenmektedir. Yeraltı cevher modellemesi bunlar arasında en sık kullanılanlardan birisidir. Özellikle yer altında bulunan cevherin mümkün olduğunca doğruya en yakın şekilde tahmini, madencilik şirketlerinin yapacakları harcamaları da minimuma indirmektedir. Bununla birlikte yeraltı madenciliği yapılacak bölgelerde yine galeri doğrultularının doğru şekilde belirlenmesi maliyet azaltmada en önemli rolü oynamaktadır.

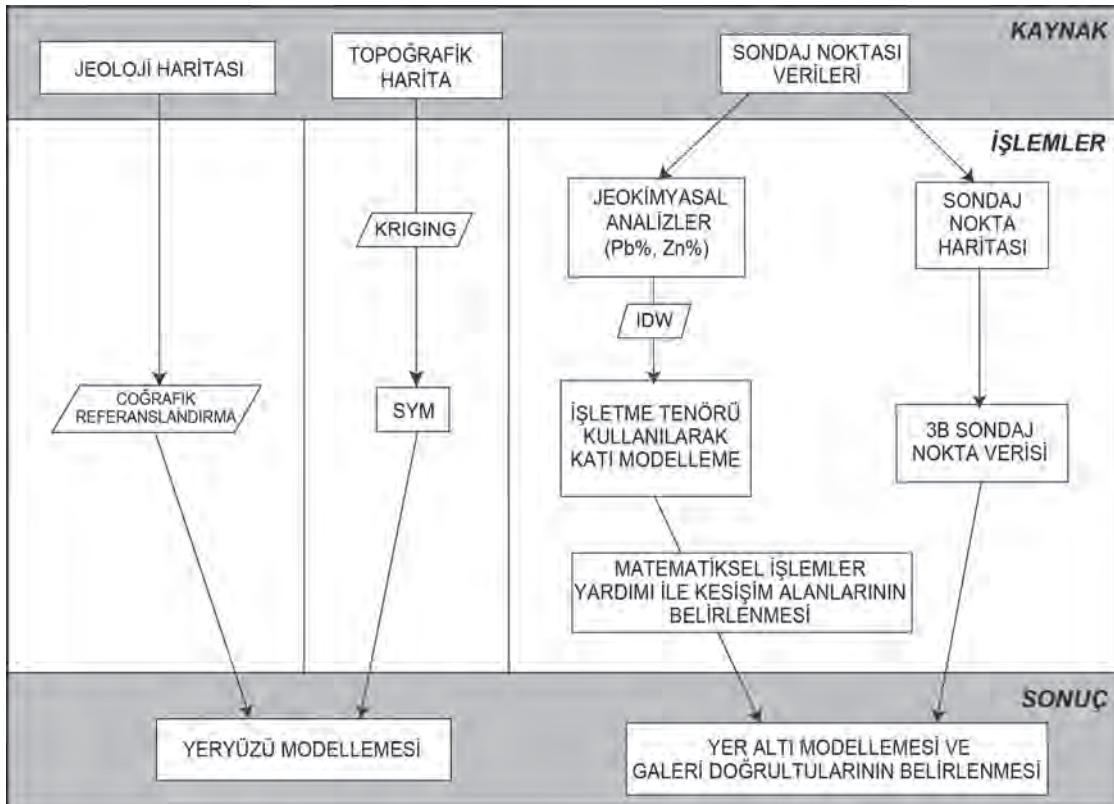
İnterpolasyon, özellikle yerbilimlerinde hem tahmin hem de görselleştirme amaçlı kullanılan bir yöntemdir (Falivene vd., 2010). İnterpolasyonu meydana getirebilmek için birçok algoritma geliştirilmiş olup bunlardan bazıları; Kriging (Krigleme) (Krige, 1951; Matheron, 1960), Spline (Splayn) (Ahlberg vd., 1967; Mitsova ve Mitsova, 1993), Inverse Distance Weighting (IDW) (Ters Mesafe Ağırlıklı) (Kane vd., 1982) ve Polynomial Regression (Polinom Regresyonu) (Wang ve Huang, 2012)’dur. Birçok durumda kriging yöntemi en iyi tahmin edici yöntem olarak tespit edilirken, bazı durumlarda ise IDW ve Spline yöntemleri uygun metodlar olarak tespit edilmiştir (Zimmerman vd., 1999; Peralvo, 2004; Chaplot vd., 2006; Binh ve Thuy, 2008; Shahbeik vd., 2014). Özellikle cevher dağılımının doğru şekilde belirlenmesi için tahmin yönteminin en iyi şekilde seçilmesi ve tahmin hatalarının minimum olması önemlidir.

Bu çalışmada Çulfa Çukuru bölgesine ait topoğrafik veriler kullanılarak yeryüzü modellemesi, aynı bölgede yer alan Pb-Zn yatağına ait jeokimyasal

veriler kullanılarak da yeraltındaki cevherin modellenmesi yapılmış ve bazı matematiksel işlemler yardımı ile yeraltında açılacak olan galerilerin doğrultuları belirlenmiştir. Bu çalışma için oluşturulan veri tabanı topoğrafik, sondaj ve jeolojik verilerden oluşmaktadır. İnterpolasyon yöntemleri olarak bu çalışmada yüzey modellenmesi için Ordinary Kriging (OK) yöntemi, yeraltı modellenmesi için ise IDW yöntemi tercih edilmiştir (Şekil 2).

Kriging, bir veri setinde yer alan noktalardan, bilinmeyen noktaları belirleme için kullanılan istatistiksel bir interpolasyon yöntem olup geliştirilmiş en küçük kareler regresyon algoritmalarının genel ismidir (Cressie, 1990; Li ve Heap, 2008). Bu algoritma bilinen değerler ve yarı-variogramlar yardımı ile bilinmeyen değerleri belirlemede kullanılan bir tahmin yöntemidir. Diğer birçok yöntemden farkı veriler arasındaki bölgesel devamlılığı kullanmasıdır (Wang ve Huang, 2012). Ayrıca, tahminler arasındaki varyansları da minimize ederek her bir bilinmeyen noktadaki tahminini en uygun şekilde yapar. Kriging varyansı verilerin gerçek değerlerine değil, veri sayısı ve veriler arasındaki mesafelerin bir fonksiyonuna bağlıdır. Bu yöntemdeki

en önemli avantaj, ağırlıkların belirli matematik işlemler yardımı ile belirlenmesidir. Veriler sistematik olarak analiz edilir ve ağırlıklara, oluşturulan yarı-variogram fonksiyonları ile ağırlıklara karar verilir. Kriging yönteminin geçerliliği, seçilen yarı-variogram modelinin uygunluğuna bağlıdır. Yarı-variogram (deneysel yarı-variogram), veriler arasındaki bölgesel bağımsızlığın tespit edilebilmesi için uygulamalı jeostatistikte kullanılan bir grafikdir (Kitanidis, 1997). Bir yarı-variogram, belirtilen tüm ayrılma mesafeleri ve yönü ile tüm gözlem çiftleri üzerindeki z-değerlerinin karesel farkının yarısının ortalaması ile hesaplanır (Wang ve Huang, 2012). Kriging yöntemi ile üretilen verilerin doğruluk oranı örnek sayısına, veri sıklığına ve yarı-variogram modelinin doğruluğuna bağlıdır (Brooker, 1986; Chaouai ve Fytas, 1991). Farklı Kriging teknikleri olup, OK bunlardan en yaygın kullanılanıdır. OK yönteminde bilinmeyen değerlerin tahmini, değişkenlerin durağan (stationary) ve ortalamasının bilinmez ve sabit olduğu varsayımına göre gerçekleştirilir. Bununla birlikte OK, lokal komşuluk yapısını temel alan lineer bir modeldir (Tahmasebi ve Hezarkani, 2010).



Şekil 2- Modelleme işlemlerinin akış şeması.

IDW yöntemi, örneklenen noktalar ile örneklenmemiş noktalar arasında uzaklığa bağlı olarak üretilen bir ters fonksiyondan elde edilen ağırlıkları kullanmaktadır (Li ve Heap, 2008). Buna göre örneklenmemiş noktaya daha yakın olan örneklenmiş noktalara daha fazla, tam tersine ise daha az ağırlık verilmektedir. Yani, bu yöntemin varsayımına göre örneklenmemiş noktaya ait değerler, kendisine daha yakın olan değerlere daha çok benzerlik göstermektedir. IDW, oldukça hassas bir yöntemdir ve geniş dağılımlı veri yorumlamalarında oldukça doğru sonuçlar vermektedir (Lam, 1983). IDW yönteminin doğruluğunu etkileyen temel faktör, formülünde yer alan  $p$  (power parameter)'dir. Ağırlıklar, mesafe arttıkça azalır.  $p$  değeri yükseldiğinde yakındaki örnekler daha fazla ağırlık alır ve sonuçta elde edilen mekânsal interpolasyon lokaldir (Isaaks ve Srivastava, 1989). Bu yöntemin en önemli özelliği düzenli gridler içerisinde dağılmış veriler veya düzensiz aralıklı verileri oldukça hızlı şekilde interpolate edebilmesidir (Li ve Heap, 2008). Kolay uygulanabilir olmasına karşın IDW yönteminde oluşturulan konsantrik konturlar sebebi ile “bull’s-eye” patternleri de görülebilmektedir (Burrough ve McDonnell, 1998; Van Dijk vd., 1999; Dressler, 2009).

Komşuluk tahmini, kullanılan verilerin kısıtlanması açısından oldukça önemlidir (Johnston vd., 2001). Tahmin edilmesi istenen nokta etrafında bir daire ya da elips çizilerek oluşturulur. Bu daire veya elips içerisinde yer alan değerler hesaba katılırken, dışındakiler ise hesaba katılmaz (Fencik ve Vajsáblová, 2006). Bununla birlikte belirlenen yönler doğru yönelim olmasını engellemek için daire ya da elips sektörlerine bölünebilir.

Çapraz Doğrulama (Cross-validation), bir çalışmanın bildirilen hedeflere uyumlu olup olmadığını test eden bir işlem olup (Olea, 1999), bir interpolasyonun doğruluğunu denetlemede kullanılan en yaygın yöntemdir (VOLTZ ve Webster, 1990). Bu yöntem, örnek noktalarındaki değerleri, çevre değerlerle tahmin ederek gerçek değerlerle, tahmin değerlerini karşılaştırıp, seçilen modelin güvenilirliğini test etmektedir (Davis, 1987). Buna göre, çalışma alanı içerisindeki veri setinden değeri bilinen bir nokta geçici olarak çıkarılıp, çevresindeki veriler yardımı ile çıkartılan noktanın değeri tahmin edilir. Böylece, gerçek değer ile tahmin edilen değer arasındaki hata payı ölçülür. Bu işlem geride kalan tüm örnekler için tekrarlanır (Isaaks ve Srivastava, 1989). Çapraz-doğrulama, gereksiz veri yükünden kurtulmak için oldukça önemlidir (Olea, 1999, Webster ve Oliver,

2001). Böylelikle elde edilen tüm veriler tahmin için kullanılabilir. Bu teknik, muhtemel modeller arasında en iyi yarı-variogram modelin seçilmesinde ve aynı zamanda da kriging varyansını minimize eden arama çapı ve adım uzaklığının seçilmesinde de kullanılabilir (Davis, 1987; Olea, 1999). Bununla birlikte, IDW ve splines yöntemleri için test edilen verilerden en iyi parametrelerin bulunmasında da yardımcı olur (Robinson ve Metternicht, 2006).

## 4. Sonuçlar

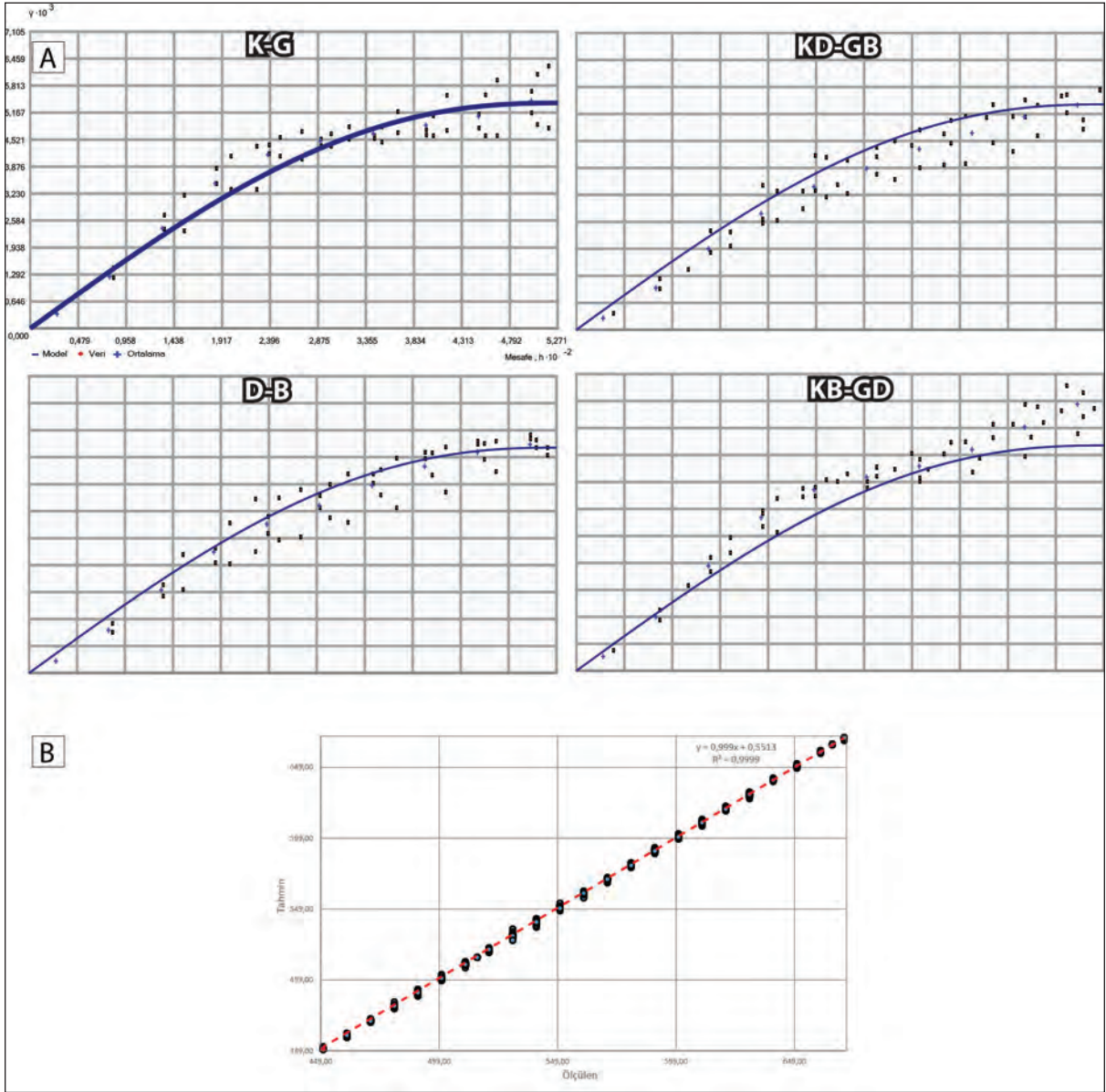
### 4.1. Yüzey Verilerinin Jeostatistiksel Analizi

Çalışma alanı Kalkım (Çanakale) şehrinin 13 km güneyinde yer almakta olup, 1000 m x 700 m (0.7 km<sup>2</sup>)'lik bir alanı kapsamaktadır. Topoğrafik veriler Yücelay (1975)'dan sayısallaştırılmış olup, yerölçme yöntemi hakkında herhangi bir bilgi verilmemiştir. Kontür çizgileri arasındaki mesafe 10 m ve sayısallaştırma yapılan haritanın ölçeği 1:2000'dir. x, y, z noktalarının toplam adeti 8502 olup yükseklikler genellikle düzensiz dağılmıştır (düz olmayan bir topoğrafya). Arazideki en düşük kot değeri 450 m, en yüksek kot değeri ise 670 metredir. Arazideki ortalama yükseklik 547.16 ve standart sapma değeri ise 55.824 olup bu çalışma için yüzey 2 x 2 x 5 metrelik bloklara bölünmüştür (toplam 2450000 hacimsel küp-voxel).

Bu çalışmada 4 yönde (K-G, D-B, KD-GB ve KB-GD) deneysel yarı-variogramlar hesaplanmış olup yarı-variogramlarda yöne bağlı herhangi bir yönsel etki gözlenmemiştir. Yarı-variogramın gecikme boyutu 52.72 m olup “Küresel Model-Spherical Model” deneysel yarı-variograma en uygun model olarak belirlenmiştir. Yarı-variogramda aralık değeri 517.52 m, eşik değeri 5396.57 m ve külçe değeri ise 0 metredir (Şekil 3a).

Bu çalışmada, verilerin mekânsal otokorelasyonu içerisinde herhangi bir yönsel etki olmaması sebebi ile komşuluk şekli daire olarak belirlenmiş ve bu daire, 45° ofsetli 4 sektöre ayrılmıştır. Komşuluk sayısı ise 2-5 arasında yer almaktadır.

Bu çalışmada kullanılan yüzey verilerin doğruluğu çapraz-doğrulama yöntemiyle test edilmiş (Şekil 3b) ve modellerin karşılaştırılmasında Ortalama Hata (ME), Karekök Ortalama Hata (RMSE), Ortalama Standardize Edilmiş Hata (MSE), Standardize Edilmiş Ortalama Karekök Hata (RMSSE) ve Ortalama Standart Hata (ASE) tahmin hataları kullanılmıştır. Çapraz doğrulama tekniği, interpolasyon oluşturulmasında kullanılan tüm veriler üzerinde yapılmıştır (8502 nokta). Yapılan çalışmaya ait



Şekil 3- A) Yönlere göre oluşturulmuş deneysel yarı-variogramlar, B) Yeryüzüne ait ölçülen-tahmin edilen verilerin dağılım grafiği.

tahmin hatalarından; ME değeri 0.25, RMSE değeri 0.52, MSE değeri 0.006, RMSSE değeri 0,09 ve ASE değeri 6.22'dir (Çizelge 1). Oluşturulan SYM'nin mümkün olduğunca en doğru değerlere sahip olması için; ME ve MSE'nin 0'a yakın olması, RMSE'nin mümkün olan en düşük değere sahip olması, ASE'nin RMSE değerine yakın olması ve RMSSE değerinin de 1'e yakın olması gerekmektedir (Johnston vd., 2001; Webster ve Oliver, 2001; Hu vd., 2004). Yapılan çapraz doğrulama tekniğinden ve tahmin hatalarından elde edilen sonuçlar, yüzey modelleme çalışmasında mümkün olduğunca gerçek değerlere benzer değerlerin ortaya koyulduğunu işaret etmektedir. Yüzey verileri

kullanılarak oluşturulan 3B yüzey haritası şekil 4'te görülmektedir.

Çizelge 1- Çulfa Çukuru bölgesine ait yeryüzü modellemesinin tahmin hataları.

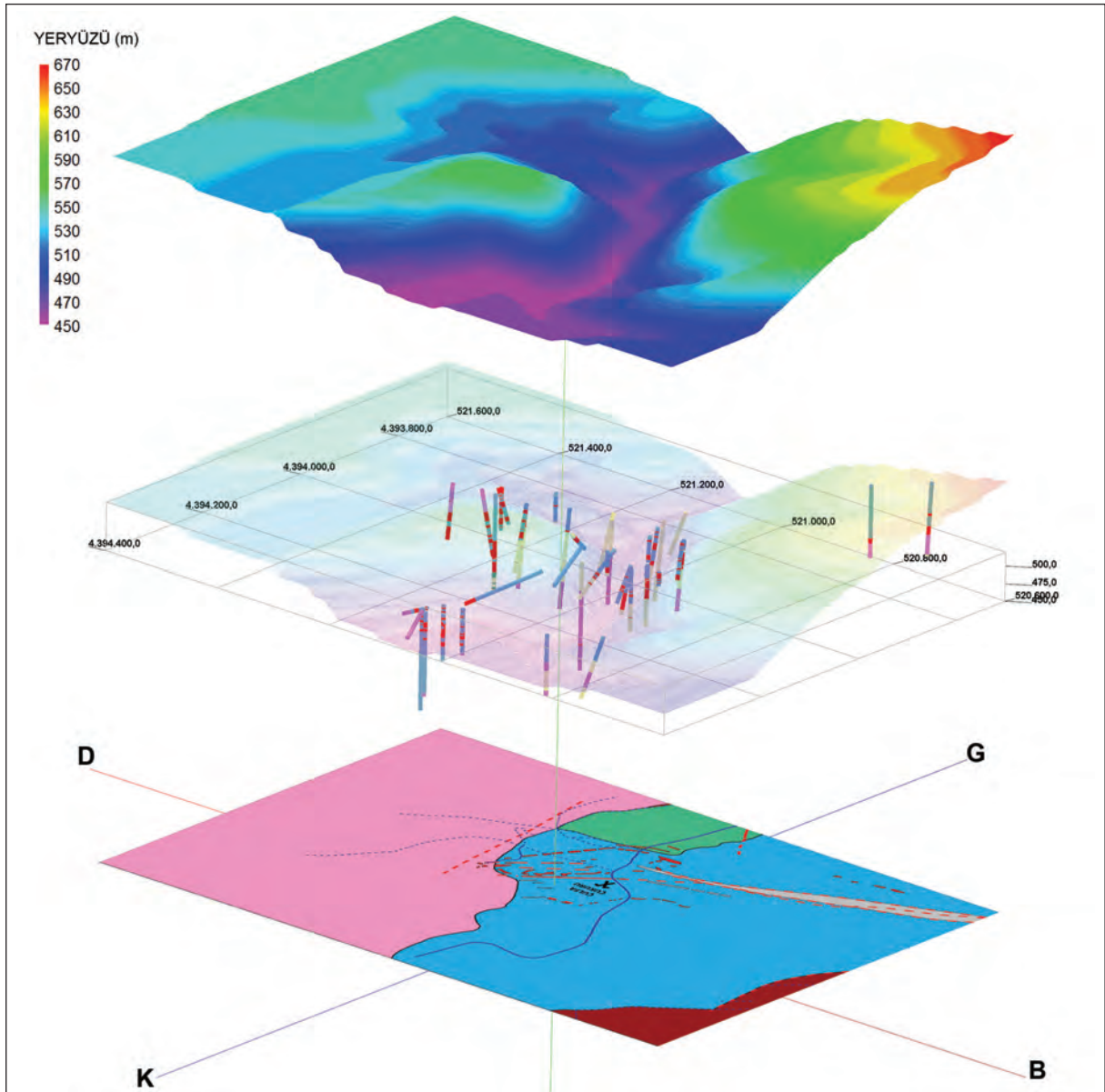
| Örnek Adeti                               | n     | 8502    |
|-------------------------------------------|-------|---------|
| Ortalama Hata                             | ME    | 0.02485 |
| Karekök Ortalama Hata                     | RMSE  | 0.51497 |
| Ortalama Standardize Edilmiş Hata         | MSE   | 0.00617 |
| Standardize Edilmiş Ortalama Karekök Hata | RMSSE | 0.08534 |
| Ortalama Standart Hata                    | ASE   | 6.21714 |

#### 4.2. Cevherleşmenin 3-Boyutlu Yer Altı Modellemesi

Çalışma alanı 0,7 km<sup>2</sup>'lik bir alanda yer almakta olup düzensiz bir topoğrafyaya sahiptir. Hem düzlük alanların hem de tepelerin bulunduğu çalışma alanında kuzeyden güneye doğru Akpınar Deresi yer almaktadır. Bölgede gözlenen ana cevherleşmeler bu dere yatağında tespit edilmiş, sonrasında ise daha ayrıntılı çalışmalar ile yer altındaki devamlılıkları bulunmuştur (Şekil 4).

%Pb ve %Zn değerlerine IDW algoritmalı blok modelleme uygulanmıştır. %Pb ve %Zn değerleri için,

Oreks Madencilik Şirketi tarafından yapılan toplam 42 adet sondajlardaki cevher-alterasyon zonlarında yapılan jeokimyasal analizlerden elde edilen değerler kullanılmıştır. En sık sondaj 19.5 m (OMCC1), en derin sondaj ise 161.5 metredir (OMCC37). Toplam sondaj 3622.4 metre, ortalama derinlik ise 86.25 metredir. Cevher-Alterasyon zonları 7 sondaj dışında (OMCC10, OMCC24, OMCC26, OMCC38, OMCC39, OMCC40, OMCC41) tüm sondajlarda kesilmiştir (Şekil 4). %Pb ve %Zn jeokimyasal analiz değerleri kullanılarak, IDW interpolasyon yöntemi ile her bir element için ayrı ayrı model dosyaları



Şekil 4- Çulfa Çukuru Pb-Zn yatağına ait 3B topoğrafik harita, sondaj noktaları ve jeoloji haritası (karışıklığı önlemek için jeoloji haritasına -1000m, topoğrafik haritaya +1000m offset uygulanmıştır) (jeolojik birimlerin lejandı için şekil 1'e bakınız).

oluşturulmuştur. Bölgedeki işletme sınırı olarak kabul edilen Pb (%7) ve Zn (%4) işletme tenörleri hesaba katılarak veriler blok modelleme ile modellenmiş olup yer altında her biri 2 x 2 x 5 metrelik 2637765 toplam hacimsel küp oluşturulmuştur.

Ters Mesafe yöntemi, sabit veya değişken üssel ağırlıklandırma kullanarak komşu veri noktalarının ağırlıklı ortalamasına dayanan bir hacimsel küp düğüm değeri atar. Bu çalışmada, verilerdeki bölgesel otokorelasyon üzerinde yöne bağlı herhangi bir etki olmaması sebebi ile dairesel sektör kullanılmış ve anizotropi faktörü “1” olarak alınmıştır. Yapılan test çalışmalarında kuvvet ve komşuluk değerleri test edilmiş bunlardan optimal olanları; %Pb için kuvvet değeri 8, komşuluk değeri 6 ve %Zn için kuvvet değeri 4, komşuluk değeri 2 olarak belirlenmiştir.

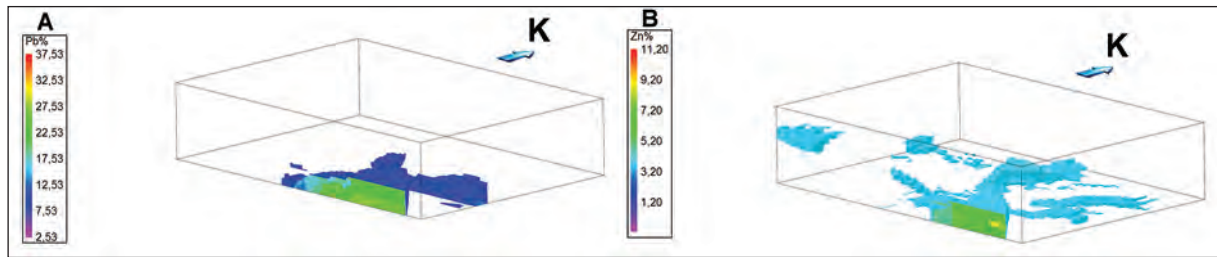
Her bir elementin jeokimyasal analiz verileri ile oluşturulan yer altı modellerinde cevherin dağılım alanları oldukça geniştir (Şekil 5). Bu şekilde hedef saha belirlemek oldukça zor görünmektedir. Bu sebeple hem Pb hem de Zn için bu işletme tenörlerinin üstünde yer alan değerler dört eşit gruba ayrılmıştır. Bunlar “düşük”, “orta”, “yüksek” ve “çok yüksek” tenörleri ifade etmektedir (Çizelge 2). Her bir sektör değeri için ayrı ayrı oluşturulan model dosyalarında da oldukça geniş alanlarda cevher izlenebilmektedir. Özellikle veri sayısının kısıtlı olduğu durumlarda (yetersiz sondaj sayısı, düzensiz aralıklı sondajlar vs.) bu duruma sıkça rastlanılmaktadır. Bu sebeple her bir elemente ait sektörü ayrı ayrı değerlendirmek yerine aynı kategorideki sektörlerin kesişim alanları hedef saha olarak daha uygun görünmektedir. Böylelikle %Pb’ye ait “düşük” tenör sektörü ile %Zn’ye ait

“düşük” tenör sektörlerinin kesişimi ile (“orta”, “yüksek” ve “çok yüksek” sektörlerine de benzer şekilde uygulanarak) daha umutlu sahalar tespit edilebilir. Her ne kadar bu alanlar dışında cevher bulma olasılığı bulunsun da en ümitli sahalar bu kesişim alanlarıdır (Akıska vd., 2013).

Kesişim alanları oluşturabilmek için öncelikle oluşturulan dosyalar boolean model dosyalarına çevrilmiştir. Bu alanlar saptanırken her bir kübün köşe koordinatı ve burada yer alan değerlerin verilen aralıkta olup olmadığı tespit edilmiştir. Bu dosyalarda, verilen aralıklardaki değerlere 1, dışında kalan değerlere ise 0 değeri atanır. Oluşturulan boolean dosyaları daha sonra MS Excel’e aktarılmıştır. MS Excel’de yazılan bir makro ile bu dosyalarda yer alan değerlerin yalnızca “1” olanları (cevherin tenörünün belirtilen aralıkta yer alanları) alınmış diğerleri ise modelleme çalışmasının dışında bırakılmıştır.

Her bir sektör (düşük, orta, yüksek, çok yüksek) ve her bir element için boolean dosyaları yukarıda anlatılan yöntemle oluşturulmuştur. Daha sonra her bir sektörün kesişim alanını tespit edebilmek için, boolean değerlerini içeren dosyalarına çarpma işlemi uygulanmıştır (Şekil 6). Kesişim alanı tespit etme işlemi tüm sektörler için ayrı ayrı yapılarak Sektör1, Sektör2, Sektör3 ve Sektör4’ün kesişim alanları bulunmuştur. Bu yöntemin ayrıntıları Akıska vd. (2013)’ten bulunabilir.

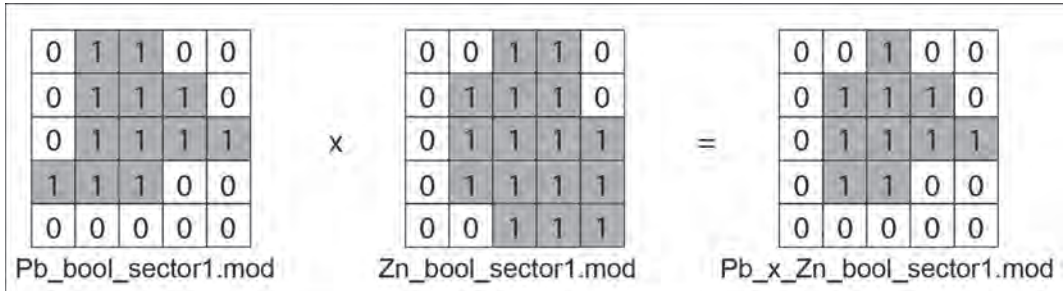
Elde edilen veriler ile bölgede; sektör1 için 382000 m<sup>3</sup>, sektör2 için 696000 m<sup>3</sup> ve sektör3 için 22000 m<sup>3</sup> olmak üzere toplam 1100000 m<sup>3</sup>’lük bir hacme sahip cevher kütlesi tespit edilmiştir. “En yüksek”



Şekil 5- %Pb (A) ve %Zn (B) değerlerinin işletme sınırı üzerinde kalan alanları.

Çizelge 2- Yeraltı modelleme çalışmasında kullanılan sektör isimleri ve özellikleri.

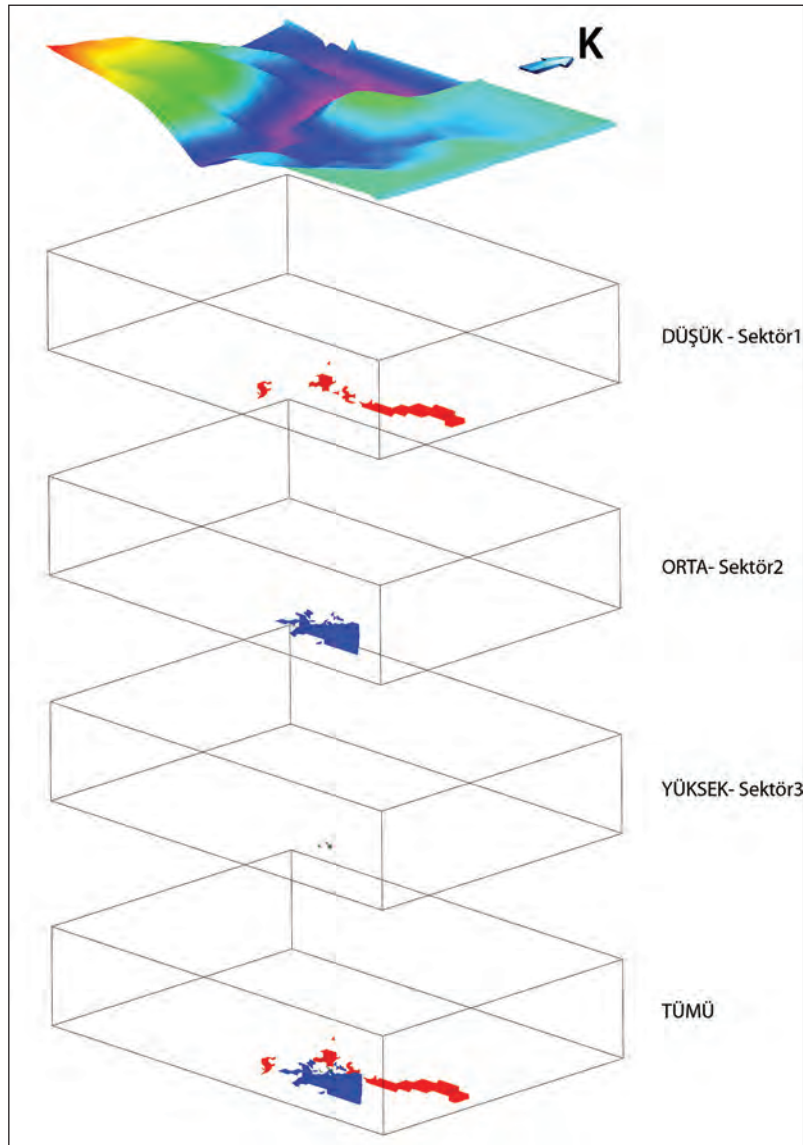
| Sektör No | Sektör Adı | %Pb Aralıkları | %Zn Aralıkları | %Pb Boolean Model Dosya Adı | %Zn Boolean Model Dosya Adı |
|-----------|------------|----------------|----------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 1         | Düşük      | 7.00–14.81     | 4–6,33         | Pb_bool_sector1             | Zn_bool_sector1             |
| 2         | Orta       | 14.81–22.62    | 6.33–8.66      | Pb_bool_sector2             | Zn_bool_sector2             |
| 3         | Yüksek     | 22.62–30.43    | 8.66–10.98     | Pb_bool_sector3             | Zn_bool_sector3             |
| 4         | Çok Yüksek | 30.43–38.24    | 10.98–13.31    | Pb_bool_sector4             | Zn_bool_sector4             |



Şekil 6- Sektör 1'e ait Boolean dosyalarına uygulanan çarpma işleminin şematik gösterimi (numaralar rastgele seçilmiştir) (Akıska vd., 2013).

olarak adlandırılmış dördüncü sektöre ait boolean dosyalarının çarpımından sıfır değeri elde edildiği

için bu aralıklarda ortak alan olmadığı sonucuna varılmıştır (Şekil 7).

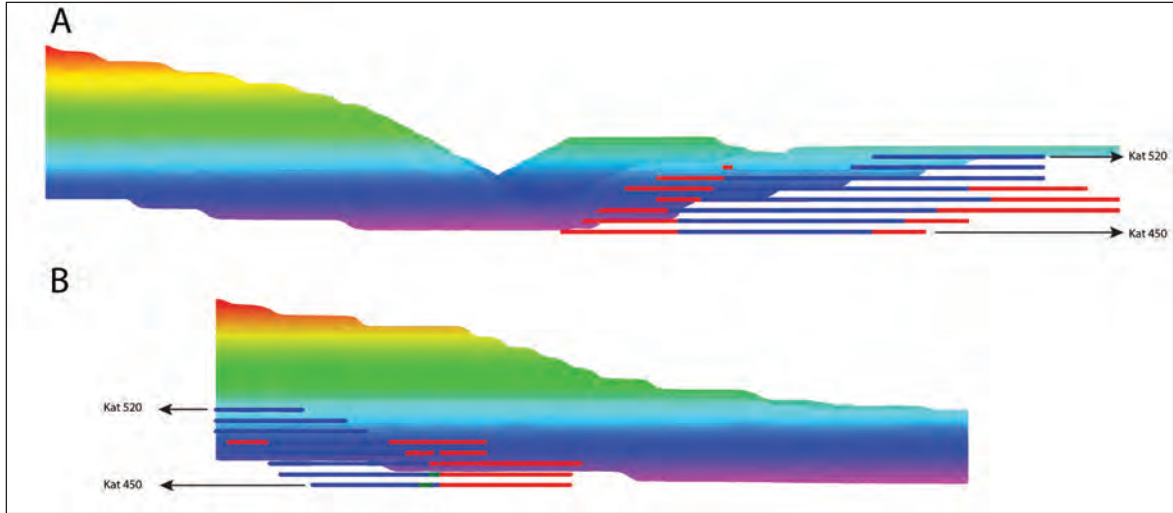


Şekil 7- İşletme sınırı üzerinde kalan %Pb ve %Zn değerlerine ait sektörlerin yer altındaki konumları.

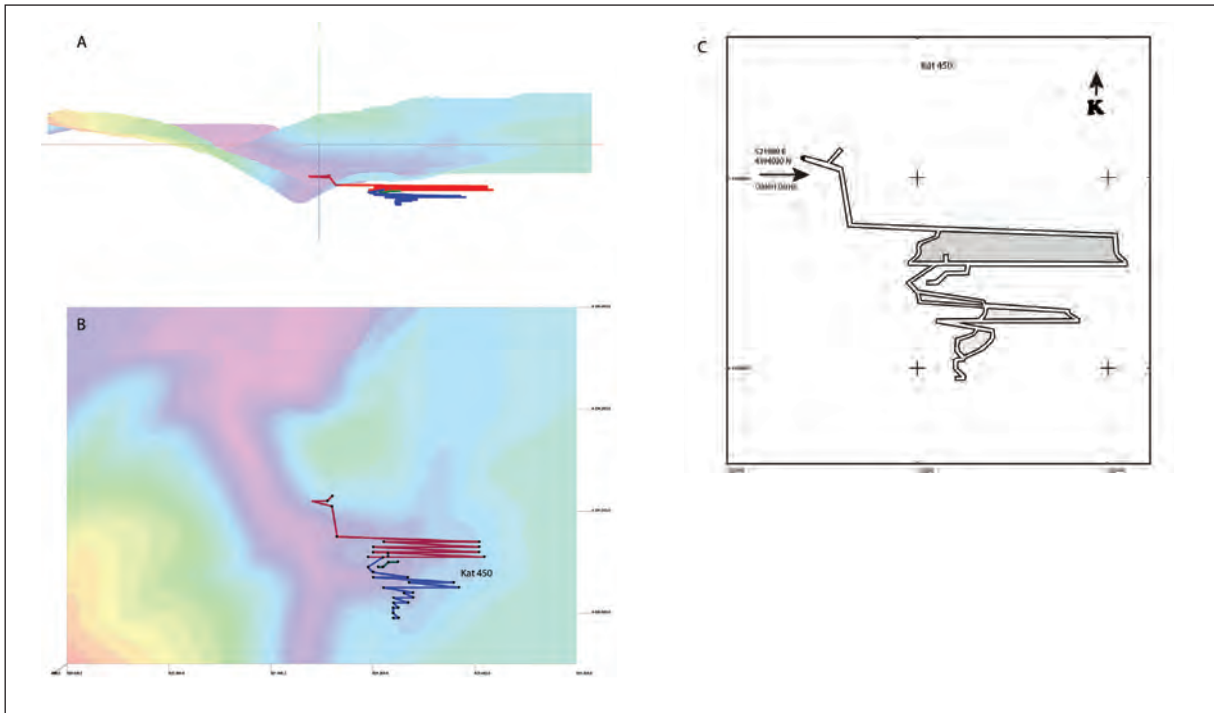
Sondajlardan tespit edilebilen derinliğe kadar yukarıda elde edilen sektörlerden geçen galeri hatları ve konumları belirlenmeye çalışılmıştır. Bu hatlar belirlenirken galerilerin kot aralıkları 10'ar metre olarak (450-520 metre), galeri boyutları da 2 x 2 metre olarak rastgele belirlenmiştir. Yapılacak galeri planlamasında arazi koşulları ve litolojik koşullara göre bu aralıklar arttırılabilir ya da azaltılabilir. Her kat için ilgili sektörler bir araya getirilerek o kata ait

galeri hattı oluşturulmuştur. Bununla birlikte, o kotta açılacak galerinin hangi metresinde hangi sektöre ait cevher olduğu da belirlenmiştir (Şekil 8).

Oluşturulan katlara ait galeri hatlarından faydalanılarak 450 katı için örnek bir çalışma yapılmıştır. 450 katına ait tüm sektörlerin bulunduğu galeri hattının üstten ve yandan görünümü şekil 9a ve şekil 9b'de sırasıyla görülmektedir. Şekil 9b'de



Şekil 8- Sektör gruplarının kesişim alanları ve modelleme çalışmasından elde edilen sonuçlar ile çizilen galeri hatlarının güneyden (A) ve doğudan (B) görünimleri (Sektör alanlarının renkleri şekil 7'de verilmiştir).

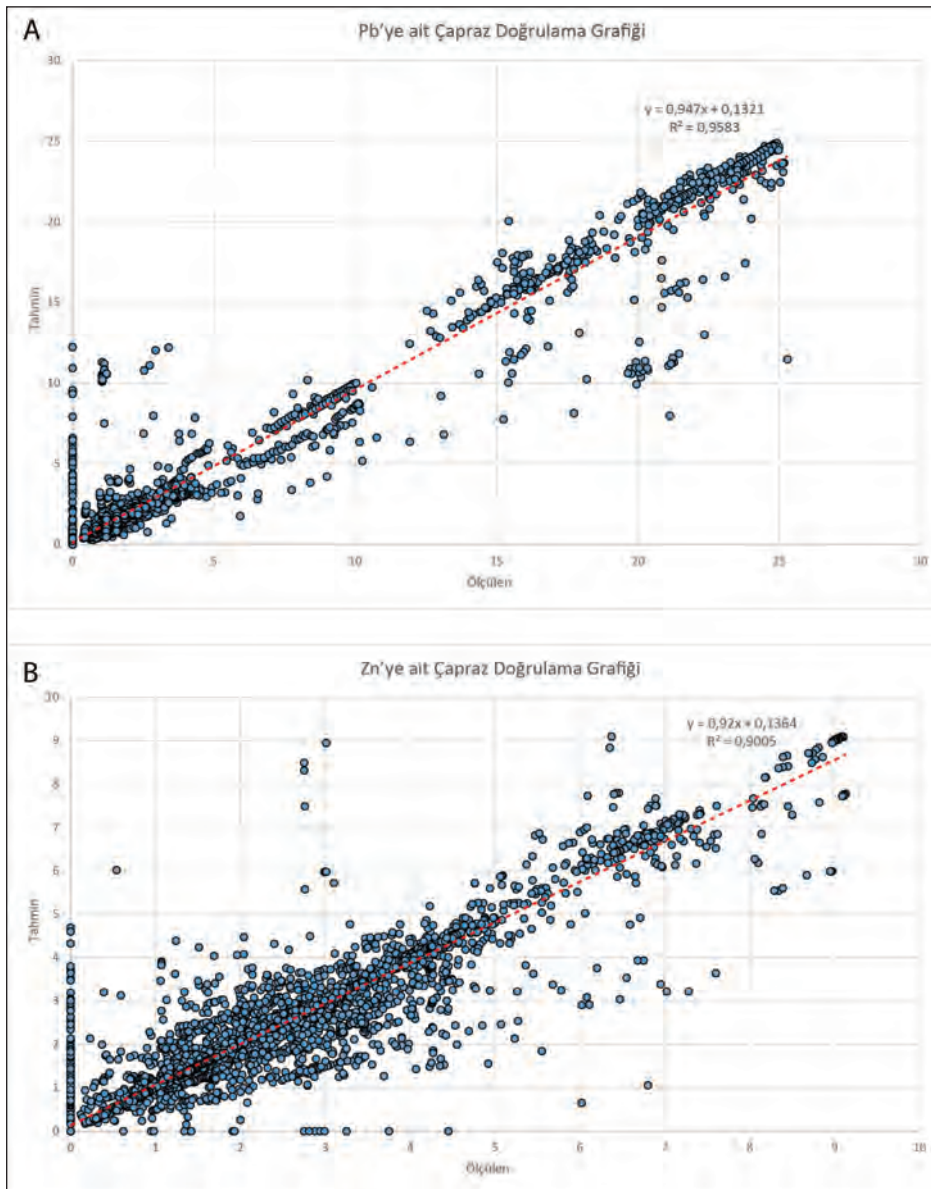


Şekil 9- A) Çalışma alanının 3B topografik haritası ve Kat 450 için çizilmiş örnek galeri hattı (3B topoğrafik haritanın opasite değeri %30'a düşürülmüş ve model x eksenı boyunca 13° yukarıya döndürülmüştür) (bakış yönü: Güneyden) (topoğrafik yükseltilerin lejandı için şekil 4'e, sektör renklerinin açıklaması için şekil 7'ye bakınız), B) Bakış yönü: Yukarıdan, C) Kat 450'nin yorumlanmış galeri haritası.

görülen hatlardaki her nokta, cevherin bulunduğu alanı işaret etmektedir. Bundan yararlanılarak yorumlanmış bir galeri haritası 450 katı için çizilmiştir (Şekil 9c). Galerinin ilk girişi K105D doğrultusundadır. Genel yönelim ise D-GD doğrultularındadır. Yorumlanan haritada ilk olarak galerinin girişinin yapılacağı yer ve galerinin genel yönelimi model dosyadan üretilen resimden (Şekil 9a) tespit edilmiştir. Daha sonra bu noktanın yeryüzü üzerindeki bir noktaya denk gelip gelmediği topoğrafik haritadan kontrol edilmiştir. Burada tespit edilen nokta tam olarak yeryüzünde değil de yer içerisinde yer alıyor olabilir. Bunun sebebi, model dosyada tespit edilen noktaların tamamen sektörlerdeki belirtilen aralıklarda cevher

içerip içerememesinden kaynaklanmaktadır. Eğer bu aralıklarda cevher içermiyor ise yeryüzüne en yakın cevher içeren nokta tespit edilerek ona uygun şekilde galeri girişi belirlenebilir. Benzer şekilde tüm katlar için de bu haritalar oluşturularak galeri planlamaları yapılabilir.

Bu çalışmada yapılan modelleme çalışmalarının doğruluğu, istatistiksel ve çapraz doğrulama teknikleri ile denetlenmiş olup çapraz doğrulama grafikleri ve tahmin hataları, sırasıyla, şekil 10 ve çizelge 3'te verilmiştir. Çapraz doğrulama tekniği, interpolasyon oluşturulmasında kullanılan tüm veriler üzerinde yapılmıştır (7170 nokta).  $R^2$  değerlerinin "1" değerine



Şekil 10- %Pb (A) ve %Zn (B)'ye ait ölçülen-tahmin edilen değerlerin çapraz doğrulama grafiği.

yakın olması, Mean Error değerlerinin 0'a oldukça yakın olması ve RMS değerlerinin de göreceli olarak düşük değerlerde olması uygulanan interpolasyon algoritmasının ve ilişkili parametrelerin doğruya oldukça yakın seçildiğine işaret etmektedir.

Çizelge 3- IDW yöntemi kullanılan yeraltı modelleme çalışmasının tahmin hataları.

|                       |      | %Pb     | %Zn     |
|-----------------------|------|---------|---------|
| Örnek Adeti           | n    | 7170    | 7170    |
| Ortalama Hata         | ME   | 0.00011 | 0.00023 |
| Karekök Ortalama Hata | RMSE | 1.02861 | 0.56252 |

## 5. Sonuçlar

Kriging yöntemi kullanılarak yapılan yüzey modelleme çalışması ve IDW yöntemi kullanılarak yapılan yeraltı modelleme çalışması, cevher zonlarının bulunduğu bölgenin mekansal eğilimlerini ve değişkenliklerini göstermek ve muhtemel galeri konum ve doğrultularını belirlemek için yapılmıştır. Yeraltı modelleme çalışması için jeokimyasal veriler ile birlikte yeraltında bulunan cevherin konumu da kullanılarak uygun galeri hatları belirlenmeye çalışılmıştır.

SYM oluşturmak için kullanılan topoğrafik veriler üzerinde yapılan jeostatistiksel analizler yardımı ile uygun interpolasyon algoritması ve uygun yarı-variogram tespit edilmiş olup, tüm sonuçlar istatistiksel ve çapraz-doğrulama teknikleri ile kontrol edilmiştir. Buna göre en uygun interpolasyon yöntemi Ordinary Kriging, en uygun yarı-variogram modeli ise "Spherical model" olarak belirlenmiş olup gecikme boyutu (lag size) 52.72 m, eşik değeri (sill value) 5396.57 m ve külçe değeri (nugget value) ise 0'dır. Komşuluk tahmini için uygun şekil, 45° ofsetli dört sektöre bölünmüş daire olarak, komşuluk sayısı ise 2-5 olarak tespit edilmiştir.

Çalışma alanında bulunan 42 adet yer üstü ve yer altı sondajında kesilen Çulfa Çukuru Pb-Zn-Cu-Ag cevherleşme zonundaki örnekler üzerinde yapılan jeokimyasal analizler sonucunda bu zonlara ait %Pb ve %Zn değerleri tespit edilmiştir. Bu verilerin yardımı ile yer altında Pb ve Zn için cevher alanları tespit edilmiştir. Tespit edilen alanlardan işletme tenörü üzerinde kalan kısımları modellenmiştir. Bu modelleme sonucunda çok geniş alanlar tespit edilmiştir. Sondaj sayısının kısıtlı olması, sondaj

mesafelerinin düzenli aralıklarla olmaması ve ayrıca da sondajların tüm çalışma alanı üzerinde düzenli olarak dağılmaması sebebi ile direkt olarak bu verilerin kullanılması pek uygun görünmemektedir. Bunun yerine, daha belirgin alanlar tespit edebilmek amacı ile her iki element için de işletme sınırı üzerinde kalan alanlar 4 sektöre ayrılmıştır (düşük, orta, yüksek ve çok yüksek). Daha sonra, yer altında Pb ve Zn için aynı sektörlerin kesişim alanları belirlenmiştir. Bu belirlenen alanlar yardımı ile de uygun galeri hatları ortaya koyulmaya çalışılmıştır. Yeraltındaki veriler için IDW interpolasyon algoritması kullanılmıştır. Her iki element için de kuvvet ve komşuluk değerleri test edilmiş, elde edilen optimal veriler; Pb için kuvvet değeri 8, komşuluk değeri 6 ve Zn için kuvvet değeri 4, komşuluk değeri ise 2 olarak belirlenmiştir.

Yapılan yüzey modelleme çalışmasından elde edilen çapraz doğrulama tekniği sonuçları şekil 3'te ve tahmin hataları da çizelge 1'de verilmektedir. Yeraltı modelleme çalışmasına ait çapraz doğrulama tekniği sonuçları şekil 10'da ve tahmin hataları da çizelge 3'te verilmektedir. Elde edilen tüm bu veriler göz önünde bulundurularak yapılan modelleme çalışmaları değerlendirilmiş ve bu değerler de dikkate alınarak modelleme çalışmalarından elde edilen sonuçlar bu çalışmada sunulmuştur.

Yapılan bu çalışmada sektör aralıkları ve adedi rastgele belirlenmiştir. Bu özellikler her çalışılan alanda değişiklikler gösterebilir. Sektör aralıkları, yatağın durumu, ekonomik koşullar, metal fiyatları vs. gibi koşullar baz alınarak belirlenebilir. Genellikle modelleme çalışmaları, bir yatak işletilmeye başlatılmadan önce yapılmaktadır ve çoğunlukla bu model çerçevesinde de yatak işletilmektedir. Ancak buradaki çalışma ile günün koşullarında meydana gelen önemli değişikliklere göre (maliyetlerin aniden artması ya da azalması, metal fiyatlarındaki değişiklikler vs.) bu modeller yeniden oluşturulabilir veya oluşturulan model üzerindeki sektör aralıkları değiştirilebilir. Böylelikle bu çalışma ile yatağın işletilme süresi boyunca aktif olarak kullanılabilen ve değiştirilebilen bir model ortaya konulabilmektedir. Her ne kadar da buraya kadar yapılan tüm çalışmalar jeostatistiksel veriler ve çapraz doğrulama yöntemleri ile denetlenmiş olsa da galeri planlaması yapılırken, litolojik veriler, cevherin genel konumu, yapısal unsurlar vs. gibi jeolojik veriler her zaman ön planda bulundurulmalıdır.

## Katkı Belirtme

Yazarlar bu çalışmanın ortaya çıkması için veri sağlayan ve arazi çalışmaları için sahalarında çalışma izni veren Oreks Madencilik şirketine teşekkür etmeyi bir borç bilirler.

## Değerilen Belgeler

- Ahlberg, J., Nilson, E., Walsh, J. 1967. The Theory of Splines and its Applications. Academic Press, New York, 280 p.
- Ahmed, A.A. 2009. Using lithologic modeling techniques for aquifer characterization and groundwater flow modeling of the Sohag area, Egypt. *Hydrogeology Journal* 17, 1189–1201.
- Akısa, S. 2010. Yenice (Çanakkale) Bölgesi'ndeki Cu-Pb-Zn Oluşumları. Doktora Tezi, Ankara Üniversitesi, 234 s. Ankara (yayımlanmamış).
- Akısa, S., Demirela, G., Sayılı, İ.S., Kuşçu, İ. 2010. Fluid inclusion and S isotope systematics of some carbonate-related Pb-Zn-Cu mineralizations in NW Anatolia, Turkey. Melfos, V., Marchev, P., Lakova, I., Chatzipetros, A. (Ed). *Geologica Balcanica Abstract Volume*, 21.
- Akısa, S., Sayılı, İ.S., Demirela, G. 2013. 3D Subsurface Modeling of Mineralization: A Case Study from Handeresi (Çanakkale, NW Turkey) Pb-Zn-Cu Deposit. *Turkish Journal of Earth Sciences* 22, 574-587.
- Akısa, S., Demirela, G. 2014. Handeresi, Bağırkaçdere ve Fırıncıkdere (Kalkım, Yenice - ÇANAKKALE) Pb-Zn±Cu Distal Skarn Yataklarında Akışkanların Kökeni. *Yerbilimleri* 35(3):, 199-218.
- Altunkaynak, Ş., Genç, Ş.C. 2008. Petrogenesis and time-progressive evolution of the Cenozoic continental volcanism in the Biga Peninsula, NW Anatolia (Turkey). *Lithos* 102, 316-340.
- Andiç, T., Kayhan, F. 1996. Havran-İvrindi (Balıkesir), Kalkım-Pazarköy (Çanakkale) yöresinde yapılmış genel ve tahkik jeokimya çalışma raporu, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü Rapor No: 9900, Ankara (yayımlanmamış).
- Binh, T.Q., Thuy, N.T. 2008. Assessment of the influence of interpolation techniques on the accuracy of digital elevation model. *VNU Journal of Science, Earth Sciences* 24, 176–183.
- Bistacchi, A., Massironi, M., Dal Piaz, G.V., Dal Piaz, G., Monopoli, B., Schiavo, A., Toffolon, G. 2008. 3D fold and fault reconstruction with uncertainty model: an example from an Alpine tunnel case study. *Computers & Geosciences* 34, 351–372.
- Brooker, P.I. 1986. A parametric study of robustness of kriging variance as a function of range and relative nugget effect for a spherical semivariogram. *Mathematical Geology* 18, 477–488.
- Burrough, P.A., McDonnell, R.A. 1998. *Principles of Geographical Information Systems*. Oxford University Press, 356 p.
- Calcagno, P., Chilès, J.P., Courrioux, G., Guillen, A. 2008. Geological modelling from field data and geological knowledge Part I. Modelling method coupling 3D potential-field interpolation and geological rules. *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 171, 147–157.
- Chaouai, N.E., Fytas, K. 1991. A sensitivity analysis of search distance and number of samples in indicator kriging. *CIM Bulletin* 84, 37–43.
- Chaplot, V., Darboux, F., Bourennane, H., Leguedois, S., Silvera, N., Phachomphon, K. 2006. Accuracy of interpolation techniques for the derivation of digital elevation models in relation to landform types and data density. *Geomorphology* 77, 126–141.
- Chen, J., Lu, P., Wu, W., Zhao, J., Hu, Q. 2007. A 3-D Prediction Method for Blind Orebody Based on 3-D Visualization Model and Its Application. *Earth Science Frontiers* 14(5), 54-62.
- Choi, Y., Yoon, S.-Y., Park, H.-D. 2009. Tunneling Analyst: a 3D GIS extension for rock mass classification and fault zone analysis in tunneling. *Computers & Geosciences* 35, 1322–1333.
- Cressie, N.A.C. 1990. The origins of kriging. *Mathematical Geology* 22, 239–252.
- Çetinkaya, N., Karul, B., Önal, R., Yenigün, K. 1983a. Çanakkale-Yenice-Kalkım Bağırkaç Dere jeoloji raporu. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü Rapor No: 7814, Ankara (yayımlanmamış).
- Çetinkaya, N., Karul, B., Önal, R., Yenigün, K. 1983b. Çanakkale-Yenice-Kalkım Handeresi Pb-Zn-Cu yatağı jeoloji raporu. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü Rapor No:7822, Ankara (yayımlanmamış).
- Dağ A., Özdemir A.C. 2013. A Comparative Study for 3D Surface Modeling of Coal Deposit by Spatial Interpolation Approaches, *Resource Geology* 63, 394-403.
- Davis, B.M. 1987. Uses and abuses of cross-validation in geostatistics. *Mathematical Geology* 19, 241–248.
- de Kemp, E.A. 2000. 3-D visualization of structural field data: examples from the Archean Caopatina Formation, Abitibi greenstone belt, Québec, Canada. *Computers & Geosciences* 26, 509–530.

- Dhont, D., Monod, B., Hervouët, Y., Backé, G., Klarica, S., Choy, J.E. 2012. 3D geological modeling of the Trujillo block: Insights for crustal escape models of the Venezuelan Andes. *Journal of South American Earth Sciences* 39, 245-251.
- Dilek, Y., Altunkaynak, Ş., Öner, Z. 2009. Syn-extensional granitoids in the Menderes core complex, and the late Cenozoic extensional tectonics of the Aegean province. *Geological Society of London, Special Publications* 321, 197-223.
- Dönmez, M., Akçay, A.E., Genç, Ş.C., Acar, Ş. 2005. Biga Yarımadası'nda Orta-Üst Eosen volkanizması ve denizel ignimbiritler. *Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü Dergisi* 131, 49-61.
- Dönmez, M., Akçay, A.E., Duru, M., Ilgar, A., Pehlivan, Ş. 2008. Türkiye Jeoloji Haritaları Çanakkale-H17 Paftası. *Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü Jeoloji Etüdları Dairesi*, 101 s.
- Dressler, M. 2009. Art of Surface Interpolation. Doktora Tezi, Technical University of Liberec, 80p. Liberec (yayımlanmamış).
- Duru, M., Pehlivan, S., Dönmez, M., Ilgar, A., Akçay, A.E. 2007. Balıkesir İ18 paftasının Jeolojik Haritası. *Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü Rapor No: 97*, Ankara (yayımlanmamış).
- Elkadi, A.S., Huisman, M. 2002. 3D-GSIS geotechnical modeling of tunnel intersection in soft ground: the second Heinenoord tunnel, Netherlands. *Tunnelling and Underground Space Technology* 17, 363-369.
- Falivene, O., Cabrera, L., Tolosana-Delgado, R., Alberto, S. 2010. Interpolation algorithm ranking using cross-validation and the role of smoothing effect. A coal zone example. *Computers & Geosciences* 36, 512-519.
- Feltrin, L., McLellan, J.G., Oliver, N.H.S. 2009. Modelling the giant, Zn-Pb-Ag century deposit, Queensland, Australia. *Computers & Geosciences* 35, 108-133.
- Fencík, R., Vajsáblová, M. 2006. Parameters of interpolation methods of creation of digital model of landscape. The 9th AGILE Conference on Geographic Information Science, 2006, Visegrad, Hungary, 374-381.
- Galera, C., Tennis, C., Moretti, I., Mallet, J.L. 2003. Construction of coherent 3D geological blocks. *Computers & Geosciences* 29, 971-984.
- Gallerini, G., De Donatis, M. 2009. 3D modeling using geognostic data: The case of the low valley of Foglia river (Italy): *Computers & Geosciences* 35, 146-164.
- Genç, Ş.C., Altunkaynak, Ş. 2007. Eybek graniti (Biga yarımadası, KB Anadolu) üzerine: Yeni jeokimya verileri ışığında yeni bir değerlendirme. *Yerbilimleri*, 28(2), 75-98.
- Hack, R., Orlic, B., Özmutlu, S., Zhu, S., Rengers, N. 2006. Three and more dimensional modelling in geo-engineering. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 65, 143-153.
- Hu, K., Li, B., Lu, Y., Zhang, F. 2004. Comparison of various spatial interpolation methods for non-stationary regional soil mercury content. *Environmental Science* 25(3), 132-137.
- Isaaks, E.H., Srivastava, R.M. 1989. *Applied Geostatistics*. Oxford University Press, New York, 561 p.
- Jian, W., Yuanhui, S., Bin, W., Yongjun, W., Lei, X., Chunmeng, D. 2012. 3D geological modeling of fractured volcanic reservoir bodies in Block DX18 in Junggar Basin, NW China. *Petroleum Exploration and Development* 39(1), 99-106.
- Johnston, K., Ver Hoef, J.M., Krivoruchko, K., Lucas, N. 2001. *Using ArcGIS Geostatistical Analyst*. ESRI Press Redlands, CA, USA, 300 p.
- Kane, V.E., Begovich, C.L., Butz, T.R., Myers, D. 1982. Interpretation of regional geochemistry using optimal interpolation parameters. *Computers & Geosciences* 8 (2), 117-135.
- Kashani, S.B.M., Abedi, M., Norouzi, G.H. 2016. Fuzzy logic mineral potential mapping for copper exploration using multi-disciplinary geo-datasets, a case study in seridune deposit, Iran. *Earth Science Informatics* 9, 167-181.
- Kaufmann, O., Martin, T. 2008. 3D geological modelling from boreholes, cross-sections and geological maps, application over former natural gas storages in coal mines. *Computers & Geosciences* 34, 278-290.
- Kitanidis, P.K. 1997. *Introduction to Geostatistics: Applications in Hydrogeology*. Cambridge University Press, Cambridge, USA, 249 p.
- Krige, D.G. 1951. A statistical approach to some basic mine valuation problems on the Witwatersrand. *Journal of the Chemical, Metallurgical and Mining Society of South Africa* 52, 119-139.
- Krushensky, R.D. 1976. Neogene calc-alkaline extrusive and intrusive rocks of the Karalar-Yeşiller area, Northwest Anatolia. *Bulletin Volcanologique* 39, 336-360.
- Lam, N.S. 1983. Spatial interpolation methods review. *The American Cartographer* 10, 129-149.

- Li, J., Heap, A. 2008. A Review of Spatial Interpolation Methods for Environmental Scientists. *Geoscience Australia Record/23*, 137p.
- Liu, L., Zhao, Y., Sun, T. 2012. 3D computational shape- and cooling process-modeling of magmatic intrusion and its implication for genesis and exploration of intrusion-related ore deposits: An example from the Yueshan intrusion in Anqing, China. *Tectonophysics* 526-529, 110-123.
- Matheron, G. 1960. Krigeage d'un Panneau Rectangulaire par sa Périphérie. *Note Geostatistique No. 28*, CG. Ecole des Mines de Paris, Paris.
- Mitasova, H., Mitas, L. 1993. Interpolation by Regularized Spline with Tension: I. Theory and Implementation. *Mathematical Geology* 25, 641-655.
- Okay, A.İ., Siyako, M., Bürkan, K.A. 1990. Biga Yarımadası'nın jeolojisi ve tektonik evrimi. *Türkiye Petrol Jeologları Derneği Bülteni* 2, 83-121.
- Okay, A.İ., Satır, M., Maluski, H., Siyako, M., Monie, P., Metzger, R., Akyüz S. 1996. Paleo- and Neo-Tethyan events in northwest Turkey: geological and geochronological constraints. Yin, A., Harrison, M. (Ed.). *Tectonics of Asia*. Cambridge University Press, Cambridge, 420-441.
- Okay, A.İ., Bozkurt, E., Satır, M., Yiğitbaş, E., Crowley, Q.G., Cosmas, K.S. 2008. Defining the southern margin of Avalonia in the Pontides: Geochronological data from the Late Proterozoic and Ordovician granitoids from NW Turkey. *Tectonophysics* 461, 252-264.
- Olea, R.A. 1999. *Geostatistics for Engineers and Earth Scientists*. Kluwer Academic Publishers, London, UK, 303 p.
- Özmutlu, S., Hack, R. 2003. 3D modelling system for ground engineering. Rosenbaum, M.S., Turner, A.K. (Ed.). *New Paradigms in Subsurface Prediction Characterization of the Shallow Subsurface Implications for Urban Infrastructure and Environmental Assessment*, Lecture Notes in Earth Sciences 99, 253-260.
- Pehlivan, A.N., Çetin, A. 1997. Edremit (Balıkesir) Ezine-Bayramiç-Yenice (Çanakkale) çevresinin altın ağırlıklı polimetallik ve ağır mineral çalışmaları raporu. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü Rapor No: 10061, Ankara (yayımlanmamış).
- Peralvo, M. 2004. Influence of DEM interpolation methods in drainage analysis. *GIS Hydro 04*, University of Texas, Austin, Texas, 26 p.
- Radelli, L. 1970. La nappe de Balya la zone plis Egéenne et extension de la zone du Vardar en Turquie occidentale. *Géologie Alpine* 46, 169-175.
- Renard, P., Courrioux, G. 1994. Three-dimensional geometric modeling of a faulted domain: the Soultz Horst example (Alsace, France). *Computers & Geosciences* 20, 1379-1390.
- Rengers, N., Hack, R., Huisman, M., Slob S., Zigterman, W. 2002. Information technology applied to engineering geology. van Rooy, J.L., Jermy, C.A. (Ed.). *Engineering Geology for Developing Countries – Proceedings of 9th Congress of the International Association for Engineering Geology and the Environment*, 121-143.
- Robinson, T.P., Metternicht, G. 2006. Testing the performance of spatial interpolation techniques for mapping soil properties. *Computers and Electronics in Agriculture* 50, 97-108.
- Saraç, C., Tercan, A.E. 1996. Grade and reserve estimation of the Tulovasi borate deposit by block kriging. *International Geology Review* 38, 832-837.
- Saraç, C., Demirel, I.H., Sen, O., Varol, N. 2004. Geostatistical Simulation of the Total Organic Carbon Values: An Example from Petroleum Source Rocks on the Coastal Area of Western Taurus Region, Turkey. *Petroleum Science and Technology* 22(3&4), 367-379.
- Shahbeik, S., Afzal, P., Moarefvand, P., Qumarsy, M. 2014. Comparison between Ordinary Kriging (OK) and Inverse Distance Weighted (IDW) based on estimation error Case study: in Dardevey iron ore deposit, NE Iran. *Arabian Journal of Geosciences* 7, 3693-3704.
- Sims, D.L. 1992. Application of 3D geoscientific modelling for hydrocarbon exploration. Turner, A.K. (Ed.) *Three- Dimensional Modelling with Geoscientific Information systems*, Kluwer Academic Publishers, 443 p.
- Siyako, M., Bürkan, K.A., Okay, İ.A. 1989. Biga ve Gelibolu Yarımadaı'nın Tersiyer jeolojisi ve hidrokarbon olanakları. *Türkiye Petrol Jeologları Derneği Bülteni* 1(3), 183-199.
- Tahmasebi, P., Hezarkhani, A. 2010. Application of adaptive neuro-fuzzy inference system for grade estimation; case study, Sarcheshmeh porphyry copper deposit, Kerman, Iran. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences* 4, 408-420.
- Tufan, A.E. 1993. Karaydın Köyü (Yenice-Çanakkale) çevresinin jeolojik ve petrografik özellikleri ile kurşun-çinko zuhurlarının jenetik incelemesi. *Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi*, 158 s. Konya (yayımlanmamış).

- Turner, A. K. 1992. Three- Dimensional Modelling with Geo-scientific Information Systems. Kluwer Academic Publishers, 468 p.
- Van Dijk, M.J., Rientjes, T.H.M., Boekelman, R.H. 1999. Interpolation schemes, H.P., Bähr and T., Vögtle (Ed.). GIS for Environmental Monitoring. Schweizerbart 183 - 189.
- Veldkamp, J.G., Hack, H.R.G.K., Özmutlu, S., Hendriks M.A.N., Kronieger, R., Van Deen, J.K. 2001. Combination of 3D-GIS and FEM modelling of the 2nd Heinenoord Tunnel, The Netherlands. Abstract to the International Symposium, EngGeoCity – 2001 ‘Engineering Geological Problems of Urban Areas’, 30 July-2 August 2001, Ekaterinburg, Russia, 1-8.
- Voltz, M., Webster, R. 1990. A comparison of kriging, cubic splines and classification for predicting soil properties from sample information. European Journal of Soil Science 41, 473–490.
- Wang, G., Huang, L. 2012. 3D geological modeling for mineral resource assessment of the Tongshan Cu deposit, Heilongjiang Province, China. Geoscience Frontiers 3, 483-491.
- Wang, G., Zhang, S., Yan, C., Song, Y., Sun, Y., Li, D., Xu, F. 2011. Mineral potential targeting and resource assessment based on 3D geological modeling in Luanchuan region, China. Computers & Geosciences 37, 1976–1988.
- Watt, J.T., Glen, J.M.G., John, D.A., Ponce, D.A. 2007. Three-dimensional geologic model of the northern Nevada rift and the Beowawe geothermal system, north-central Nevada. Geosphere 3(6), 667–682.
- Webster, R., Oliver, M.A. 2001. Geostatistics for Environmental Scientists. John Wiley and Sons, 360 p.
- Xiao, F., Chen, J., Zhang, Z., Wang, C., Wu, G., Agterberg, F.P. 2012. Singularity mapping and spatially weighted principal component analysis to identify geochemical anomalies associated with Ag and Pb–Zn polymetallic mineralization in Northwest Zhejiang, China. Journal of Geochemical Exploration 122, 90–100.
- Yücelay, M.A. 1975. Çanakkale İli Yenice İlçesi Kalkım Bucağı Güneyindeki Çulfa Çukuru Kurşun Çinko Mineralizasyonu Jeolojik Etüdü, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü Rapor No: 5617, Ankara (yayımlanmamış).
- Yücelay, M.A. 1976. Çanakkale-Kalkım-Handeresi Pb-Zn-Cu bölgesinin etüdü. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü Rapor No: 5720, Ankara (yayımlanmamış).
- Zanchi, A., Francesca, S., Stefano, Z., Simone, S., Graziano, G. 2009. 3D reconstruction of complex geological bodies: Examples from the Alps. Computers & Geosciences 35, 49-69.
- Zhu, S., Hack, R., Turner, A. K., Hale, M. 2003. How far will uncertainty of the subsurface limit the sustainability planning of the subsurface? Proceedings of Sustainable Development & Management of the Subsurface (SDMS) Conference, 5-7 Nov 2003, Utrecht, Netherlands. 203-210.
- Zimmerman, D., Pavlik, C., Ruggles, A., Armstrong, P. 1999. An experimental comparison of ordinary and universal kriging and inverse distance weighting. Mathematical Geology 31, 375–390.

