

**KÜTAHYA EMET, DEREKÖY-ŞEYHLER MEVKİİNDEKİ BOR
MADENİN KAYNAK KESTİRİMİ**

**RESOURCE ESTIMATION OF BORON FIELD OF KÜTAHYA
EMET LOCATED IN DEREKOY-SEYHLER**

YAĞIZ TUNÇ

DR. ÖĞRETİM ÜYESİ FIRAT ATALAY

Tez Danışmanı

Hacettepe Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin

Maden Mühendisliği Anabilim Dalı için Öngördüğü

Yüksek Lisans Tezi olarak hazırlanmıştır.

2024

ÖZET

KÜTAHYA EMET, DEREKÖY-ŞEYHLER MEVKİİNDEKİ BOR MADENİN KAYNAK KESTİRİMİ

Yağız TUNÇ

Yüksek Lisans, Maden Mühendisliği Bölümü

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Fırat ATALAY

Şubat 2024, 77 sayfa

Bu tez çalışmasının amacı Eti Maden İşletmelerine ait Kütahya ili Hisarcık ilçesinde Dereköy-Şeyhler mevkiindeki sahada bor kaynağının kestirimidir. Bu doğrultuda sahada yapılmış sondaj raporları ve jeolojik raporlar incelenmiş, derlenmiş ve bir veri tabanı oluşturulmuştur. Jeolojik sürekliliği temsil eden katı model, bor sınır tenörü ve cevherli formasyonlar göz önüne alınarak katı model oluşturulmuştur. Sonrasında kestirimi yapılacak bor değerlerinin yatay ve düşey yönde deneysel ve model variogram analizleri yapılmıştır. Katı modeli temsil eden blok model oluşturulmuş ve bloklar ortalamasız krigleme yöntemiyle kestirilmiştir. Ardından, kestirimleri doğrulamak amacıyla yönelim grafikleri oluşturulmuştur. Sonuç olarak belirli bir sınır tenör kullanılarak kaynak kestirimi yapılmıştır. Kaynak modelin tenör tonaj eğrisi elde edilerek mevcut bölgede tenöre bağlı tonaj değişimi potansiyeli ortaya konulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Maden kaynak kestirimi, Jeostatistik, Bor

ABSTRACT

RESOURCE ESTIMATION OF BORON FIELD OF KÜTAHYA EMET LOCATED IN DEREKOY-SEYHLER

Yağız TUNÇ

Master of Science, Department of Mining Engineering

Supervisor: Asst. Prof. Fırat ATALAY

February 2024, 77 pages

The aim of this thesis study is to estimate the boron resource in the field located in Dereköy-Şeyhler location in Hisarcık district of Kütahya province, belonging to Eti Maden Enterprises. In this regard, drilling reports and geological reports made in the field were examined, compiled and a database was created. The solid model representing geological continuity was created by considering the boron cut-off grade and ore formations. Afterwards, experimental and model variogram analyzes were made for the boron values to be estimated in horizontal and vertical directions. A block model representing the solid model was created and the blocks were estimated by the ordinary kriging method. Then, trend analysis graphs were created to verify the predictions. As a result, a resource estimation was made using a certain cut-off grade. By obtaining the grade tonnage curve of the source model, the potential for tonnage change depending on grade in the current region has been revealed.

Keywords: Mineral resource estimation, Geostatistics, Boron

TEŞEKKÜR

Lisans ve yüksek lisans eğitimim boyunca bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, yalnızca bilimsel anlamda değil aynı zamanda entelektüel bilgisiyle bana ışık tutan çok değerli danışman hocam Sayın Dr. Öğretim Üyesi Fırat Atalay'a;

Tez konusu ve yazımı için bana bütün imkanları sağlayan Eti Maden'den, Üretim Koordinasyon Daire Başkanı Münir Yahşi, eski Üretim Koordinasyon Daire Başkanı Emin Türk'e ve maden mühendisleri Gökhan Türkmen'e ve Alper Entok'a;

Yapıcı eleştirileri ve katkıları nedeniyle tez jürilerinden Prof. Dr. A. Erhan Tercan, Doç. Dr. Onur Gölbaşı, Dr. Öğr. Üyesi Emre Yılmazkaya, Dr. Öğr. Üyesi Güneş Ertunç'a;

Yüksek Lisans eğitimim boyunca bana desteklerini esirgemeyen arkadaşlarıma ve kız arkadaşım Buse Geçili'ye;

Yaşamım boyunca bana her türlü desteği veren kıymetli annem Yasemin Tunç'a, kıymetli babam Yüksel Tunç'a ve kardeşim Yeliz Tunç'a

Sonsuz Teşekkürler...

Yağız Tunç

Şubat 2024, Ankara

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	iv
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	x
1. GİRİŞ	1
2. BOR'UN TANIMI.....	2
2.1. Bor Elementinin Tanımı ve Tarihçesi.....	2
2.2. Bor Mineralleri	3
2.2.1. Kolemanit	4
2.2.2. Üleksit	5
2.2.3. Tinkal	5
2.3. Ülkemizde Üretilen Bor Ürünleri	5
2.4. Bor'un Kullanım Alanları	6
2.4.1. Cam Endüstrisi.....	6
2.4.2. Seramik ve Emaye Endüstrisi	7
2.4.3. Deterjan ve Temizleyici Endüstrisi	7
2.4.4. Yanmayı Geciktirici Maddeler.....	7
2.4.5. Tarım.....	7
2.4.6. Metalürji Endüstrisi.....	8
2.4.7. Nükleer Uygulamalar.....	8
2.4.8. Diğer Kullanım Alanları	8

2.5. Bor Kaynaklarının Jeolojik Oluşumları.....	9
2.6. Dünyadaki Bor Kaynak Durumu	12
2.7. Bor Üretimi ve Tüketimi	14
3. ÖNCEL ÇALIŞMALAR.....	18
4. JEOİSTATİSTİKSEL YÖNTEM	19
4.1. Bölgesel Değişken.....	19
4.1.1. Jeostatistiğin Temel Varsayımları.....	20
4.2. Variogram.....	21
4.2.1. Variogram Fonksiyonun Özellikleri	22
4.2.2. Deneysel Variogram.....	22
4.2.3. Variogram Parametreleri ve Modelleri	23
4.2.4. Yuvalı Yapılar.....	26
4.2.5. İzotropi ve Anizotropi.....	27
4.3. Krigleme	27
4.3.1. Blokların Krigleme Yöntemi ile Kestirimi.....	29
4.3.2. Krigleme Yöntemi ile Kestirimin Özellikleri	29
4.3.3. Krigleme Yöntemi ile Variogram Modelinin Çapraz Doğrulanması.....	30
5. SAHAYLA İLGİLİ GENEL BİLGİLER	31
5.1. Çalışma Alanının Coğrafik Konumu	31
5.2. Bölgenin Jeolojisi.....	34
5.3. Stratigrafi.....	35
5.3.1. Miyosen.....	36
5.3.2. Pliyosen	37
5.3.3. Kuvarterner	37
5.4. Yapısal Jeoloji	37
5.5. Maden Jeolojisi.....	38
6. DEREKÖY-ŞEYHLER BÖLGESİNİN MADEN KAYNAK KESTİRİMİ	40

6.1. Sahadaki Sondajlar ve Konumları	41
6.2. Ham Verilerin İstatistikleri	42
6.3. Veri Tabanı Oluşturulması	44
6.3.1. Kompozitleme	44
6.4. Jeolojik Yorum ve Modelleme.....	46
6.5. Variogram Analizi ve Doğrulanması	48
6.6. Blok Model ve Kestirim	51
6.6.1. Bor Oksit (B_2O_3) tenörünün kestirimi.....	51
6.6.2. Sodyum Oksit (Na_2O) tenörünün kestirimi	53
6.6.3. Blok Modelin Doğrulanması	54
6.6.3.1 Yönelim Analizi	56
6.7. Kaynak Model.....	59
6.8. Tenör-Tonaj Eğrisi.....	61
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	63
8. KAYNAKLAR	65

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1. Başlıca bor mineralleri [7]	4
Çizelge 2. Bazı ticari bor mineralleri ve B ₂ O ₃ içerikleri [8]	4
Çizelge 3. Dünyadaki bor kaynakları ve dağılımı [8].....	12
Çizelge 4. Avrupa Komisyonu tarafından listelenen kritik hammaddeler [20]	13
Çizelge 5. Eti Maden'e ait yatakların kaynak miktarları [8].....	13
Çizelge 6. Eti Maden 2016 yılı bor üretim miktarı (ton) [21]	14
Çizelge 7. Ham verilerin özet istatistikleri	43
Çizelge 8. Katı model içinde kalan ait tenör istatistikleri (%).....	45
Çizelge 9. B ₂ O ₃ düşey variogram parametreleri	48
Çizelge 10. B ₂ O ₃ yatay variogram parametreleri	49
Çizelge 11. B ₂ O ₃ variogramı çapraz doğrulama	49
Çizelge 12. Na ₂ O düşey variogram parametreleri	50
Çizelge 13. Na ₂ O yatay variogram parametreleri	50
Çizelge 14. Na ₂ O variogramı çapraz doğrulama	51
Çizelge 15. B ₂ O ₃ kestirim parametreleri	51
Çizelge 16. Na ₂ O kestirim parametreleri	53
Çizelge 17. B ₂ O ₃ için özet istatistikler.....	55
Çizelge 18. Na ₂ O için özet istatistikler	55

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Bor elementinin periyodik tablodaki yeri [49].....	2
Şekil 2. Basitleştirilmiş rafine bor ürün üretimi [8]	6
Şekil 3. Bor ürünlerinin kullanıldığı endüstrilere göre dağılımı (%) [8]	9
Şekil 4. Bor'un oluşum tipleri ve döngüsü [15] [17]	10
Şekil 5. Batı Anadolu neojen havzalarında bor yataklarına ait genelleştirilmiş stratigrafik kesitler [15] [18].....	11
Şekil 6. Ülkemizde bulunan bor yataklarının oluşumu [15] [18]	12
Şekil 7. Bor üreten başlıca üreticilere göre dağılımı (%) [8]	14
Şekil 8. 2000-2020 arası dünya bor ürünleri tüketimi (ton) [8]	15
Şekil 9. Bor tüketiminin bölgelere göre dağılımı (%) [8]	16
Şekil 10. Eti Maden ihracatı (milyon \$) [8]	17
Şekil 11. Eti Maden'in 2020 yılında yaptığı ihracatın kıtalara göre dağılımı [8].....	17
Şekil 12. İki nokta arasındaki adım uzaklığı.....	19
Şekil 13. Variogram parametreleri	24
Şekil 14. Örnek küresel model variogram grafiği	25
Şekil 15. Örnek üssel model variogram grafiği	26
Şekil 16. Örnek gauss model variogram grafiği	26
Şekil 17. Yatay ve düşey yöndeki variogramlar	27
Şekil 18. Sahanın yer bulduru haritası	31
Şekil 19. Kütahya İli Maden Haritası [34].....	32
Şekil 20. Çalışma yapılan sahanın yaklaşık sınırları.....	33
Şekil 21. Çalışma alanı genel görünümü (Kuzeyden Güneye bakış).....	33
Şekil 22. Türkiye'nin Batısının temel morfotektonik ögeler [37]	34
Şekil 23. Bölgenin genelleştirilmiş stratigrafisi	35
Şekil 24. Bölgenin diri fay haritası [43].....	38
Şekil 25. Ülkemizde bulunan bor yataklarının dağılımı (ölçeksiz) [15] [18]	39
Şekil 26. Sahada yapılan sondajların görünümü	41
Şekil 27. Sondajların ZX ekseninden görünümü.....	42
Şekil 28. Sondajların plan görünümü	42
Şekil 29. B ₂ O ₃ ham veri dağılımı tenör histogramı	43
Şekil 30. Na ₂ O ham veri dağılımı tenör histogramı.....	44
Şekil 31. Örnek uzunlukların histogramı	45

Şekil 32. Katı model içinde kalan B_2O_3 kompozitlerinin tenör histogramı	46
Şekil 33. Katı Model içinde kalan Na_2O kompozitlerinin tenör histogramı	46
Şekil 34. Katı modelin plan görünümü	47
Şekil 35. Katı modelin ZX ekseninden görünümü	47
Şekil 36. Katı modelin A' kesitinin ZX ekseninden görünümü	48
Şekil 37. B_2O_3 düşey variogram modeli.....	49
Şekil 38. B_2O_3 yatay variogram modeli.....	49
Şekil 39. Na_2O düşey variogram modeli	50
Şekil 40. Na_2O yatay variogram modeli	50
Şekil 41. B_2O_3 kestirilen blok modelinin YZ ekseninden görünümü	52
Şekil 42. B_2O_3 kestirilen blok modelinin plan görünümü	52
Şekil 43. B_2O_3 kestirilen blok modelinin A' kesitinin ZX ekseninden görünümü	53
Şekil 44. Na_2O kestirilen blok modelinin YX ekseninden görünümü	54
Şekil 45. Na_2O kestirilen blok modelinin ZY ekseninden görünümü	53
Şekil 46. B_2O_3 X yönündeki yönelim grafiği	56
Şekil 47. B_2O_3 Y yönündeki yönelim grafiği	57
Şekil 48. B_2O_3 Z yönündeki yönelim grafiği	57
Şekil 49. Na_2O X yönündeki yönelim grafiği	58
Şekil 50. Na_2O Y yönündeki yönelim grafiği	58
Şekil 51. Na_2O Z yönündeki yönelim grafiği	59
Şekil 52. Kaynak modelin plan görünümü.....	60
Şekil 53. Kaynak modelin ZX ekseninden görünümü	60
Şekil 54. Kaynak modelin genel görünümü.....	61
Şekil 55. Blok modelin tenör-tonaj eğrisi.....	62
Şekil 56. Kaynak modelin tenör-tonaj eğrisi.....	62

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

B : Bor

O : Oksijen

$z(x)$: x noktasına karşılık gelen rassal değişken

$f(h)$: Uzaklığa bağlı ilişkinin fonksiyonu

$E[.]$: Beklenen deper işlemcisi

$\gamma(h)$: h mesafedeki variogram

$N(h)$: h uzaklığına karşılık gelen örnek çifti sayısı

C_0 : Külçe etkisi

C : Eşik değeri

α : Yapısal uzaklık

σ^2 : Varyans

σ : Standart sapma

e : Üssel değer

λ : Ağırlık

Kısaltmalar

AB Avrupa Birliği

ABD Amerika Birleşik Devletleri

USGS United States Geological Survey

1. GİRİŞ

Bor mineralleri binlerce yıldır insanoğlu tarafından kullanıp benimsenmiştir. Cam endüstrisinden uzay endüstrisine kadar yüzlerce farklı sanayide kullanılır. ABD, AB ve Japonya birçok gelişmiş ülkede önemli bir tüketim maddesi olmuştur. Gelişen teknolojiyle birlikte boratlara olan talepte paralel olarak artmıştır. Bu sebepten Türkiye ekonomisindeki önemi gittikçe değer kazanmaktadır. [1] Bazı istatistiklerde tutarsızlık olsa da dünya bor rezervinin yüzde 70'den fazlası ülkemizde bulunur. Rezerv büyüklüğünün yanında tenör yönünden de çok iyi bir konumda yer alır. 2000'lere kadar rezerv ve cevher kalitesinde diğer ülkelere göre üstünlüğümüzün bulunmasına rağmen, üretimde istenilen düzeye çıkılamamıştır. Ama son yıllarda arama faaliyetleri ve zenginleştirme faaliyetleri büyük bir ivme kazanıp bor piyasasında yabancı şirketlere üstünlük kurulmuştur. Öncel çalışmalar incelendiğinde kaynak kestirim konularında birçok farklı çalışma vardır. Fakat bor madeninin kaynak kestirimi konusunda ülkemizde erişilebilen yalnızca Tercan ve Saraç'ın "Tülovası bor yatağının kaynak kestirimi" çalışmasına rastlanır [2]. Bu çalışma dışında güncel ve erişilebilir bir çalışma yoktur. Bor madenciliği ile ilgilenen belli başlı birkaç uluslararası şirket ticari amaçlardan kendi sahalarının kaynak kestirim raporlarını paylaşmaktan sakınmaktadır.

Bu çalışma Eti Maden İşletmelerine ait Kütahya ili Hisarcık ilçesinde Dereköy-Şeyhler mevkiindeki sahada yapılmış 43 adet sondaj ve yapılan kimyasal analizler sonucu bor oksit ve sodyum oksitin kaynak kestirimini amaçlar. Bu doğrultuda sahada yapılmış sondaj logları ve jeolojik raporlar incelenerek bir veri tabanı oluşturulmuştur. Daha sonra jeolojik sürekliliği incelemek için bor oksit sınır tenörü ve cevherli formasyonlar göz önüne alınarak katı model oluşturulmuştur. Sonrasında kaynak kestiriminde kullanılacak iki mineralin yatay ve düşey yönde variogram analizleri yapıp ihtiyaç olan parametreler bulunmuştur. Katı modele blok model uyarlanmış olup ortalamasız krigleme yöntemiyle kestirimler gerçekleştirilmiştir. Ardından elde edilen modeli doğrulama amaçlı yönelim analizleri yapılmıştır. Sınır tenörler uygulanarak kaynak model ortaya çıkarılmıştır. Kaynak modelin tenör tonaj eğrisi elde edilerek mevcut bölgenin potansiyeli ortaya konulmuştur.

2. BOR'UN TANIMI

2.1. Bor Elementinin Tanımı ve Tarihi

Bor elementi B simgesi ile periyodik tabloda gösterilir. Bor elementinin atom numarası 5, atom ağırlığı 10,81 ve ergime sıcaklığı ise 2300 °C'dir. Şekil 1'de Bor'un periyodik tablodaki yeri gösterilmiştir.

1																	18
1																	2
H																	He
Hydrogen																	Helium
3	4											13	14	15	16	17	18
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
Lithium	Beryllium											Boron	Carbon	Nitrogen	Oxygen	Fluorine	Neon
11	12	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Na	Mg	Sc	Ti	Va	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Al	Si	P	S	Cl	Ar
Sodium	Magnesium	Scandium	Titanium	Vanadium	Chromium	Manganese	Iron	Cobalt	Nickel	Copper	Zinc	Aluminium	Silicon	Phosphorus	Sulfur	Chlorine	Argon
19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
K	Ca	Sc	Ti	Va	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
Potassium	Calcium	Scandium	Titanium	Vanadium	Chromium	Manganese	Iron	Cobalt	Nickel	Copper	Zinc	Gallium	Germanium	Arsenic	Selenium	Bromine	Krypton
37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
Rubidium	Strontium	Yttrium	Zirconium	Niobium	Molybdenum	Technetium	Ruthenium	Rhodium	Palladium	Silver	Cadmium	Indium	Tin	Antimony	Tellurium	Iodine	Xenon
55	56	57 - 71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86
Cs	Ba	Lanthanides	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
Cesium	Barium	Lanthanides	Hafnium	Tantalum	Tungsten	Rhenium	Osmium	Iridium	Platinum	Gold	Mercury	Thallium	Lead	Bismuth	Polonium	Astatine	Radon
87	88	89 - 103	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118
Fr	Ra	Actinides	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Cn	Nh	Fl	Mc	Lv	Ts	Og
Francium	Radium	Actinides	Rutherfordium	Dubnium	Seaborgium	Bohrium	Hassium	Mtserium	Darmstadtium	Koentgenium	Copernicium	Nihonium	Flerovium	Moscovium	Livermorium	Tennessee	Oganesson
57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71			
La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu			
Lanthanum	Cerium	Praseodymium	Neodymium	Promethium	Samarium	Europium	Gadolinium	Terbium	Dysprosium	Holmium	Erbium	Thulium	Ytterbium	Lutetium			
89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103			
Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr			
Actinium	Thorium	Protactinium	Uranium	Neptunium	Plutonium	Americium	Curium	Berkelium	Californium	Einsteinium	Fermium	Mendelevium	Nobelium	Lawrencium			

Şekil 1. Bor elementinin periyodik tablodaki yeri [49]

Periyodik cetvelde 3A grubunda bulunan bor elementi yarı metal ve yarı iletken özellik gösterir ve doğada element olarak iki farklı izotoptan oluşur. Doğada bulunma oranı yaklaşık %20 olan B₁₀ ile doğada bulunma oranı yüzde %80 olan B₁₁'dir [3]. Belirtilen bu farklı izotoplar, doğadaki bulunma oranları bölgelere göre farklılık gösterir, saptanan yataklardaki B₁₀ miktarı Türkiye'de yüksek iken ABD'deki Kaliforniya eyaletinde bu oran düşüktür [4].

Bor elementi doğada asla tek başına bulunmaz, her zaman oksijen elementiyle bağlı ve çeşitli renklere sahiptir. Bunlardan en sık karşılaşılanı, biçimsiz bir toz halinde koyu kahverengi diğeri ise katı ve gevrek yapılı olan bor minerali ise doğada sarımsı kahverengi ile doğada rastlanır. Kristalize edilmiş bor elementinin Mohs sertlik sıralamasında elmasın ardından gelen en sert elementtir ve değeri 9,3 olarak saptanmıştır [5] . İsimlendirmede “boratlar” terimi sıkça kullanılmaktadır. Boratın anlamı ise doğada rastlanan bor içeren minerallerinin tümüne denmektedir. Bor binlerce yıldır uygarlıklar tarafından benimsenmiş ve çeşitli alanlarda kullanılmıştır. Tespit edilen ilk yazılı belgeler 2000 yıl öncesine dayanır. Arap ve İran medeniyetlerinde bulunan belgelerde bor elementi “baurach” adıyla anılır ve bu kelimedede Arapçada boraks anlamına gelir. M.Ö 2300 yıllarında, mevcut dönemin gelişmiş medeniyetlerinden olan Çin ve Babil halkları boratları farklı amaçlarla kullanmıştır. Çinliler seramiklerini sağlamlaştırmak için Babilliler ise altın gibi değerli metallerin dökümünde ergitici için katkı maddesi olarak kullanmışlardır. Borun Avrupa topraklarına ayak basması ise 13.yüzyılda olmuştur. Ünlü kâşif Marco Polo Tibet’ten boraksı getirmiştir. Avrupalılar ise boraksı sırlama ve lehimleme gibi işlemlerde kullanmıştır [5] .

Elementel borun keşfi 1808 yılına dayanır. İngiliz kimyager Sir Humphry Davy ve Fransız kimyager Gay Lussac tarafından 1808 yılında keşfedilmiştir. 1808’de Davy, bir borat çözeltilisine gönderilen elektrik akımının elektrotların birinde kahverengi bir çökelti oluşturduğunu gözlemledi. Sonraki deneylerinde borik asidi azaltmak için elektroliz yerine potasyum kullandı ve bu sayede yeni bir elementi doğrulamaya yetecek kadar bor üretti ve ona “borasiyum” adını verdi. [6] Henri Moissan 1895 yılında, borik asit ve magnezyumu çeşitli işlemler sonucundan indirgeyerek büyük miktarda saf bor ve % 86 saflığa ulaşmıştır. 1909’da Amerikalı kimyager Ezekiel Weintraub bor elementindeki saflaştırma çalışmalarında % 99 gibi yüksek bir rakama ulaşmıştır. Belirtilen çalışmadan sonra sürekli modern yöntemler bulunmuştur [5] .

2.2. Bor Mineralleri

Bor elementi, oksijen elementine olan elektron ilgisinden dolayı doğada saf şekilde rastlanmaz. Bu yüzden bütün bor mineralleri çeşitli miktarlarda bor oksit içerir. Dünyada 230’dan fazla bor minerali saptanmıştır. Birçok endüstride kullanılan bor

minerallerinin, en önemlileri şunlardır : Kolemanit, üleksit, tinkal, kernit, pandemit, hidroborasittir. Başlıca bor mineralleri ve kimyasal formülleri Çizelge 1’de gösterilmiştir. Çizelge 2’de ise bazı ticari önem sahip bor minerallerinin B₂O₃ içeriği gösterilmiştir [7] . Ülkemizde ise Eti Maden tarafından üretilen başlıca bor mineralleri ise Kolemanit, Üleksit ve Tinkaldir. Çizelge 2’de görüldüğü üzere Kolemanit B₂O₃ içeriği bakımından en yüksek minerallerdendir ve en düşüğü ise Tinkaldir.

Çizelge 1. Başlıca bor mineralleri [7]

Mineral	Formülü	Mineral	Formülü
Kernit	Na ₂ B ₄ O ₇ .4H ₂ O	İnyoit	Ca ₂ B ₆ O ₁₁ . 13H ₂ O
Tinkalkornit	Na ₂ B ₄ O ₇ .5H ₂ O	Pandemit	Ca ₄ B ₁₀ O ₁₉ .7H ₂ O
Tinkal	Na ₂ B ₄ O ₇ .10H ₂ O	İnderit	Mg ₂ B ₆ O ₁₁ .15H ₂ O
Probertit	NaCaB ₅ O ₉ .5H ₂ O	Hidroborasit	CaMgB ₆ O ₁₁ .6H ₂ O
Üleksit	NaCaB ₅ O ₉ .8H ₂ O	Borasit	Mg ₃ B ₇ O ₁₃ Cl
Kolemanit	Ca ₂ B ₆ O ₁₁ .5H ₂ O	Aşarit	Mg ₂ B ₂ O ₅ .H ₂ O
Meyerhofferit	Ca ₂ B ₆ O ₁₁ .7H ₂ O	Datolit	Ca ₂ B ₂ Si ₂ O ₉ .H ₂ O

Çizelge 2. Bazı ticari bor mineralleri ve B₂O₃ içerikleri [8]

Mineral	B ₂ O ₃ içeriği (%)
Kolemanit	50,8
Üleksit	43,0
Tinkal	36,5
Kernit	51,0
Pandemit	49,8
Hidroborasit	50,5

2.2.1. Kolemanit

Ca₂B₆O₁₁.5H₂O simgesiyle gösterilen kolemanit minerali bor bileşikleri içinde en yaygın bulunanıdır. Kolemanitin özkütlesi 2,42 gr/cm³ iken Mohs sertlik tablosunda sertliği 4-4,5 civarındadır. Killer içinde boşluklarda yayılım gösterir. Parlak ve kristalsi yapıda bulunur. Suda yavaş çözünen saflığı yüksek kolemanit HCl’de çok hızlı çözünür. Bor mineralleri arasında en başlarda gelen kolemanit dünya’da

yalnızca belli başlı maden yataklarında bulunur. Ülkemizde Bigadiç, Emet ve Kestelek sahalarında yüksek miktarlarda tespit edilmiştir, ülkemiz dışında ise ABD'de Kaliforniya eyaletinde bulunur [9] .

2.2.2. Üleksit

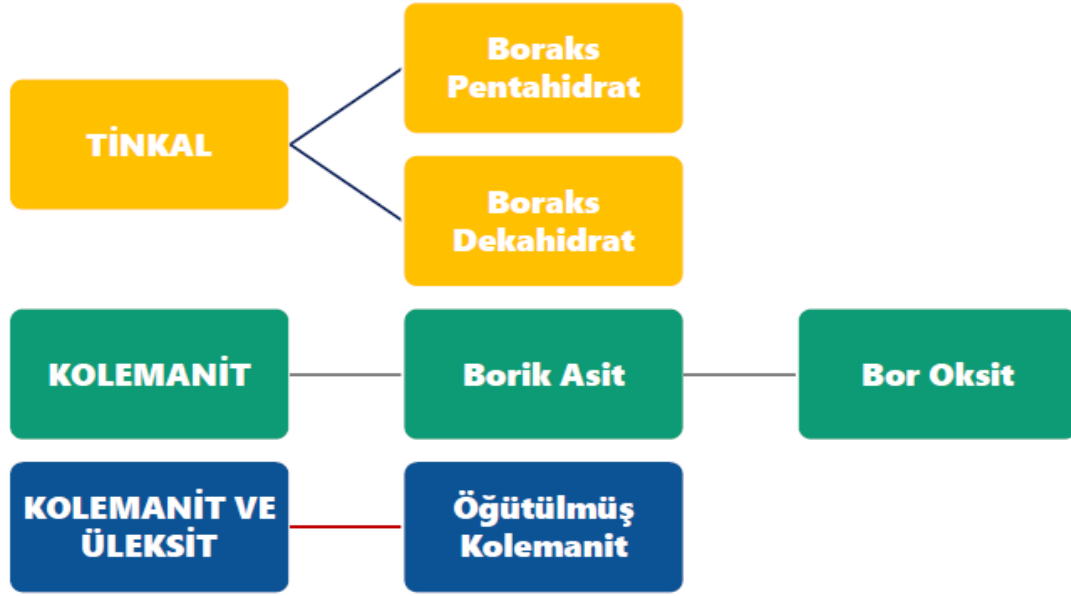
$\text{NaCaB}_5\text{O}_9 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ simgesiyle gösterilen üleksit minerali kolemanit gibi parlak ve kristalli yapı yerine masif, opak, peynir kalıbı ve çubuk görünümüne benzer şekilde doğada yer almaktadır. Üleksit mineralinin özkütlesi $1,95 \text{ gr/cm}^3$ iken Mohs sertlik tablosunda sertlik derecesi 2,5'dur. Türkiye'de Kütahya Emet'te bulunan yataklarda, kolemanit ve hidroborasit ile birlikte cevherleşmiştir. Dünya'da ise Arjantin'de bulunur [10] .

2.2.3. Tinkal

$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ simgesiyle gösterilen tinkal minerali bileşimindeki farklı safsızlıklar nedeniyle pembe, sarı, gri renklere bulunabilir. Tinkal aynı zamanda boraks olarak da adlandırılır. Tinkal mineralinin özkütlesi $1,7-1,95 \text{ gr/cm}^3$ iken Mohs sertlik tablosunda tıpkı üleksit gibi sertlik derecesi 2,5'dur. Yoğun şekilde bozunup suyunu kaybeden tinkal minerali tinkalkonit'e dönüşebilir. Tinkal, üleksit ile beraber cevherleşme gösterir. Ülkemizde Kırka'da yüksek miktarda kaynağı bulunmaktadır [11] .

2.3. Ülkemizde Üretilen Bor Ürünleri

Ülkemizde bor maden yataklarında, farklı madencilik yöntemleri kullanılarak tüvenan cevher çıkarılır. Ardından fiziksel işlem ile zenginleştirilir ve tenörleri yüksek konsantre ürünler üretilir. Tüvenan ya da konsantre cevher, tesislerde kimyasal süreçlerin ardından rafine bor ürünlerine dönüşür. Ülkemizdeki bor çıkarma ve zenginleştirme işlerini yürüten Eti Maden'in 22 adet bor ürünü vardır. Üretilen bor ürünlerinin bazıları şu şekildedir: Boraks pentahidrat, boraks dekahidrat, borik asit, çinko borat, bor oksit, öğütülmüş kolemanit ve üleksit'tir. Şekil 2'de basitleştirilmiş rafine bor ürünlerinin süreci gösterilmiştir.



Şekil 2. Basitleştirilmiş rafine bor ürün üretimi [8]

2.4. Bor'un Kullanım Alanları

Bor bileşikleri birçok sanayide ve binlerce üründe yaygın şekilde kullanılmaktadır. Yıllar geçtikçe bor bileşiklerine olan talep sürekli artmaktadır. Bor mineralleri, pazarda satışları için en önemli ölçüt içerdikleri B_2O_3 'dur. Bor ürünleri arasında diğerlerine göre en çok talep edilenler arasında "boraks pentahidrat" ve "borik asit" önde gelmektedir. Borun kullanım alanları dünyanın farklı bölgelerinde değişkenlik göstermektedir. Bor ürünleri, ABD'de en çok tekstil ve izolasyon fiberlerinde, Avrupa'da temizlik sanayiinde ve Japonya'da ise tıpkı ABD gibi tekstil fiberleri en çok kullanılan alandır [12] .

2.4.1. Cam Endüstrisi

Cam endüstrisi borun en yoğun kullanıldığı alanlardan biridir. Isıya karşı yapılan bina yalıtımlarında, cam fiberleri büyük rol oynamaktadır. Aynı zamanda PVC gibi polyester, naylon, ürünlerinin direncini güçlendirmek için kullanılır. Diğer bir önemli kullanım alanı ise borosilikat cam üretimidir. Cama bor mineralleri eklenmesiyle, cam ısıya karşı dirençli hale getirilir. Bunun sebebi ise bor minerallerinin camın genişleme katsayısını azaltmasıdır. Cam üretimi esnasında ise eklenen bor sayesinde, ergimeyi hızlandırıp camlaştırmayı kolaylaştırır. Sertleşip son halini alan camda rengini duraylaştırıp çizilmelere karşı dirençli olur. Üretilen bu bor içerikli

camların kullanımı çeşitli alanlarda çok büyük öneme sahiptir. Fırınlarda, laboratuvarlarda, masa kaplamalarında; tıbbi hassas malzemelerde muhafaza için borosilikat camlar kullanılır [5] .

2.4.2. Seramik ve Emaye Endüstrisi

Seramik endüstrisinde bor mineralleri sırlama işlemi sırasında katkı malzemesi olarak kullanılır. Kullanıldığı zaman silisin ergimesini kolaylaştırır ve seramiğin yüzeyine hızlıca yayılmasını sağlar. Ayrıca sırlama işlemi esnasında silisin miktarı azaltılıp, bor miktarı artırıldığında, sır daha katı ve dirençli bir görünüme kavuşur. Emaye sanayiinde ise emaye ürünlerinin parlaklığını ve dayanıklılığını artırır [5] .

2.4.3. Deterjan ve Temizleyici Endüstrisi

Bor minerallerinin deterjan sanayiinde kullanılmasının başlıca sebebi, yüksek oranda bakteri öldürücülüğü ve suyu daha iyi yumuşatmasından dolayı yaygın şekilde kullanılır [5] .

2.4.4. Yanmayı Geciktirici Maddeler

Selülozik maddelere eklenen bor mineralleri, malzemenin ateşe olan direncini artırır ve parlama derecesine ulaşmadan, bor mineralleri selülozdaki suyu uzaklaştırır. Meydana gelen alevin yüzeyini kapatarak, yangının büyümesine engel olur. Bor minerallerinin kullanımı plastik sektöründe gittikçe yaygınlaşarak yanmayı önleyici olarak kullanılır. Bu doğrultuda baryum metaborat, bor ve amonyum fluoborat ve çinko borat gibi bileşikler kullanılır [13] .

2.4.5. Tarım

Doğadaki tüm bitkilerin büyüüp gelişebilmesi için bor gereksinimi vardır; bitkinin bulunduğu toprakta 2-4 ppm'den daha yüksek miktarda bor minerali içermesi bitkiler için ölümcül olabilir, öbür taraftan 0,5-1 ppm altında olması bitkinin gelişimi için yetersizdir. Borun bitkiler üzerine etkisini incelemek için yapılan çalışmalarda, bor minerallerinin bitkinin çiçeğini açmasına, hormon hareketliliğine ve işlevine, hücre ve polen dölllenmesine etkilediği saptanmıştır. Bitkilerdeki bor eksikliği şunlara etki eder; yaprakları kıvrılıp sararır, tepe tomurcuk ve sürgünü ölür, kök gelişmez ve çiçeği açmaz. Bitkideki bor minerali fazla olması durumunda ise bitkinin

yapraklarında sararmalar ve yanmalar oluşur, kenarları kurur ve böylece bitkinin büyümesi ve gelişimi durur [13] .

2.4.6. Metalürji Endüstrisi

Bor mineralleri demir dışı metal sanayiinde özellikle ergitmeyi hızlandırıcı ve cüruf oluşturmanın yanında yüksek sıcaklıklarda yapışkan, düzgün, temiz ve koruyucu bir sıvı oluşturduğu için kullanılır. Bor bileşikleri elektro kaplama endüstrisi ve banyo bileşimlerinde kullanılır. Nikelin kaplanmasında borik asit; kurşun, kalay, bakır gibi metal banyo bileşimlerinin kaplanmasında ise fluoboratlara ve fluoborik asitler kullanılır. Öbür taraftan çelik sanayiinde ise kullanılan belli orandaki bor miktarı çeliğe sertlik verir. Çeliğin dışına uygulandığı ise dış yüzünü sertleştirir. Çelik sanayiinde, fluorit'den ziyade borun kullanım sebebi ise metal oksitlerin borla kolay eriyebilmesidir. Eklenen bor, yüksek fırınlardaki asitliğin azaltılmasını uzun ömürlü olmasını yardımcı olur. Boratların yüksek dayanımlı ve özgül ağırlıkları az olduğu için bunlarla üretilen fiberler birçok farklı endüstride kullanılır. Uçak kanatları, gökdelenler, köprüler, helikopter bıçakları gibi üretimlerde bor fiberleri ile üretilmiş materyallerden yapılır [5] .

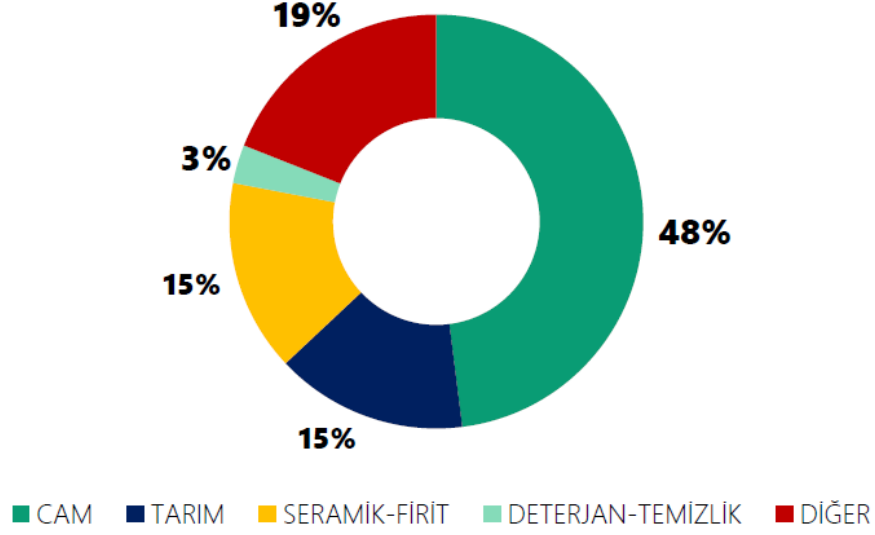
2.4.7. Nükleer Uygulamalar

Bor karbür kimyasal reaksiyonlara ve radyasyona duyarlı, 2450 °C'de eriyen oldukça sert bir malzemedir. Elmas ve bor nitrürün ardından en sert bileşik olmasının yanı sıra özgül ağırlığı 2,4 gr/cm³ olduğundan askeri araçlar ve uçak üretiminde kullanılır. Bor karbür aynı zamanda nötron emici özelliğinden nükleer enerji santrallerinde kullanılır. 26 Nisan 1986'da gerçekleşen Çernobil nükleer santrali faciası sonrası yeni patlamaların önlenmesi ve radyasyon yayılımını önlemek için ergimiş yıkıntı üstüne askeri taşıma helikopterlerinin yardımıyla 5000 ton bor atılmış ve reaktörün üzeri bor içerikli çimentoyle kapatılmıştır [14] .

2.4.8. Diğer Kullanım Alanları

Belirtilen alanlar haricinde bor minerali; ilaç endüstrisinde, dokumacılıkta, fotoğrafçılıkta, döküm ve kaynakçılıkta, boya ve kâğıt imalatında, alçı ve benzeri maddelerin katılaşmasının geciktirilmesinde, dericilikte, plastik yapımında, sondaj çamurunda katkı maddesi olarak, pH kontrolünde, lastik ve lateks üretiminde ve pek

çok farklı endüstride kullanılır [5] . Şekil 3'de bor ürünlerinin kullanıldığı endüstrilere göre yüzdelik dağılımı verilmiştir.



Şekil 3. Bor ürünlerinin kullanıldığı endüstrilere göre dağılımı (%) [8]

2.5. Bor Kaynaklarının Jeolojik Oluşumları

Yer kabuğunda nadir ve dağınık halde dağılmış elementlerden olan bor elementi, kısıtlı bölgelerde ekonomik olarak üretilebilecek varlıkları gözlemlenmiştir. Borlu mineraller farklı ortam ve koşullarda oluşur. Ekonomik değer bakımında en büyük bor yatakları orojenik kuşaklardaki tersiyer volkanik hareketleri ile ilişkilidir. Bu ekonomik bor yatakları yakınsayan levha kenarlarına yakın bölgelerde bulunur. Söz konusu kaynak bölgeleri andezitik-riyolitik volkanizma, kurak veya yarı kurak iklimler ve denizel olmayan evaporit ortamlarıyla yakından ilgilidir. ABD, Güney Amerika ve Türkiye gibi birçok ekonomik borat yatakları volkanik aktiviteyle beraber gözlemlenen denizel olmayan evaporitlerdir [15] .

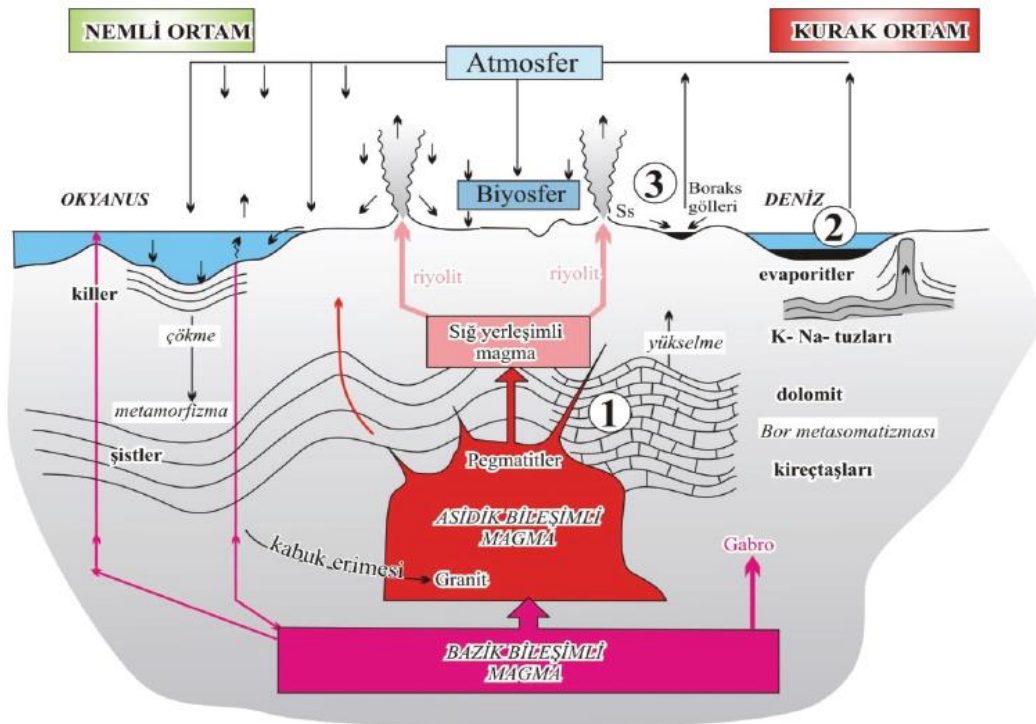
Borun konsantrasyonu, göl ve sıcak su kaynaklarında büyük oranda değişiklik gösterir. Belirtilen bu değişimlerin birçoğu volkanik aktivitelerle ilgilidir. Denizel olmayan evaporit yataklarında bor mineralleri maksimum konsantrasyon; öbür taraftan karasal kökenli kırıntılı tortularda konsantrasyon yönünden oldukça düşük olduğu saptanmıştır. Borların büyük bir kısmı, sulu boratların yoğun bulunduğu yataklarda genellikle volkanizmanın etkili olduğu kurak bölgelerdeki kapalı

havzalardan oluşur. Karasal ve denizel tortullaşma ortamlarında, bor mineralleri doğal bor çözeltisi kapsayan suların buharlaşması sonucu çökeler [15] .

Bilinen bor yatakları için birçok araştırmacı farklı sınıflandırmalar önermişlerdir. Aristarain ve Hurlbut (1972) güncel bir sınıflama ortaya koymuştur. Söz edilen araştırmacılar, borat yataklarının üç farklı ortamla ilişkili olduklarını (Şekil 4) öne sürmüşlerdir: [16]

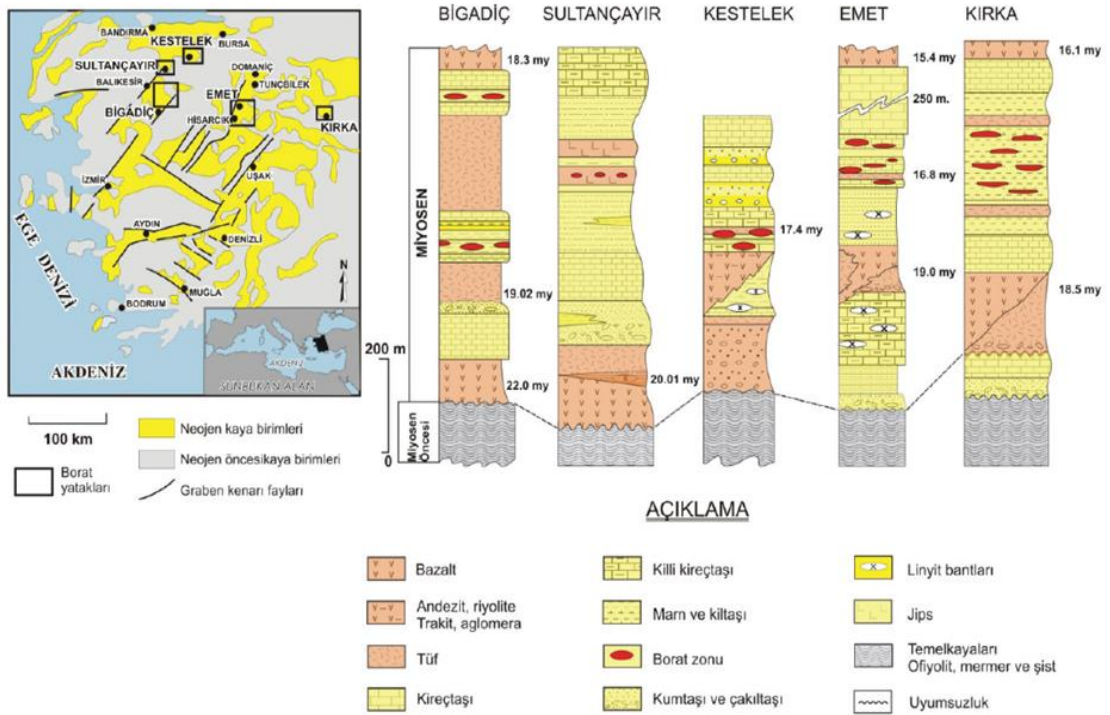
1. Derinlik kayaları ile ilişkili yataklar
2. Volkanik etkinliklerle ilişkili yataklar
3. Denizel tortullarla ilişkili yataklar

Bu kategoriler arasında ekonomik olarak en önemli olanları 1. ve 2. türdekilerdir. Rusya'daki yataklar genelde 1. tipte, Türkiye ve ABD'deki ekonomik büyük yataklar ise 2. tip oluşumla meydana gelmiştir. Türkiye'de bulunan bor yataklarının hepsi volkanik aktiviteyle ilişkisi olduğundan 2. türde toplanır. Dünyada bilinen en büyük yataklar diyajenezde uğramış veya orta derecede değişim gösteren eski playa ve göl yataklarıdır [15] .



Şekil 4. Bor'un oluşum tipleri ve döngüsü [15] [17]

Türkiye’de ise bilinen borat yataklarının tamamı Batı Anadolu’da bölgesinde bulunur. Emet, Bigadiç, Kırka gibi bor yataklarının tamamı, Marmara Denizi’nin güneyinde, doğu-batı yönünde 300 km, kuzey-güney doğrultusunda ise 150 km’lik bir bölgede bulunur. Bu yataklarını oluşumunda rol oynayan playa göllerindeki tortulların litolojisi, birbirinden minimal farklılıklar gösterir fakat çoğunlukla çakıltaşı, kumtaşı, tuf, tüfit, marn, kıltaşı ve kireçtaşlarından meydana gelir. Şekil 5’de görüldüğü üzere Türkiye’de bulunan yataklarda gözlemlenen cevherleşmenin alt ve üst kısımları kireçtaşı ve kıltaşıyla sınırlanır.

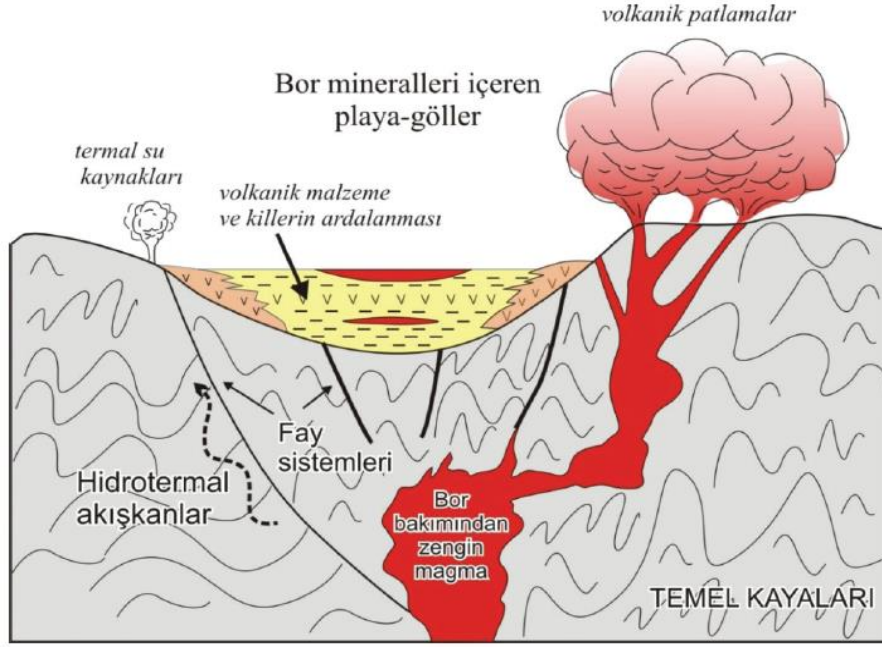


Şekil 5. Batı Anadolu neojen havzalarında bor yataklarına ait genelleştirilmiş stratigrafik kesitler [15] [18]

Bor yataklarının özellikleri şu şekilde sıralanabilir:

- Türkiye’deki borat yatakları Miyosen dönemine ait playa-göl ortamında meydana gelmiştir.
- Bor yataklarının oluşumunun tamamında, volkanik aktivite ve hidrotermal sistemler gözlemlenir.
- Yataklarda bulunun boratlar; kıltaşı, ince bantlı kireçtaşları, çamurtaşı, şeyil, tuf gibi tortul kayalar içinde cevherleşme gösterir.

-Bor yatakları, tortul kayaçlar içinde merceksel yapılar bulundurur. Şekil 6'da Türkiye'de oluşan bor yataklarının oluşumu gösterilmiştir.



Şekil 6. Ülkemizde bulunan bor yataklarının oluşumu [15] [18]

2.6. Dünyadaki Bor Kaynak Durumu

Son yıllarda rezerv miktarları değişkenlik gösterse de güncel rakamlara göre Dünya'daki bor varlığı sıralamasında Türkiye 956 milyon ton kaynak ile yeryüzündeki toplam borun % 73,6'sını oluşturmaktadır. Çizelge 3'de dünyadaki bor kaynaklarının dağılımları görülmektedir.

Çizelge 3. Dünyadaki bor kaynakları ve dağılımı [8]

Ülkeler	Toplam Kaynak (Bin ton B ₂ O ₃)	Dağılım (%)
Türkiye	956.000	73,6
Rusya	100.000	7,7
ABD	80.000	6,2
Şili	41.000	3,2
Çin	36.000	2,8
Peru	22.000	1,7
Diğer	64.000	4,8
Toplam	1.299.000	100

Dünyada bulunan önemli bor yatakları Türkiye, Rusya, Güney Amerika ve ABD’de olup üretilebilir bor yatakları 4 farklı bölgede toplanmaktadır. ABD’nin Kaliforniya eyaletindeki “Mojave Çölü”, Güney Amerika’da bulunan “And Kemerı”, Ülkemizde bulunan “Güney-Orta Asya Orojenik Kemerı” ve Doğu Rusya’dır. Türkiye dışındaki, rezervi olan ülkelerin bor rezervlerinin kullanım ömrü 60-70 yıl iken, Türkiye’deki rezerv tek başına tüm dünyanın ihtiyacının en az 500 yıl karşılayacak potansiyele sahiptir [19]. Buna rağmen Avrupa komisyonu, boratları Avrupa ekonomisi için çok kritik öneme sahip kritik hammaddeler listesine eklemiştir Çizelge 4’de bu kritik hammaddeler verilmiştir.

Çizelge 4. Avrupa Komisyonu tarafından listelenen kritik hammaddeler [20]

Antimon	Berilyum	Boratlar	Doğal Grafit
Fluşpat	Fosfat Kayası	Galyum	Germanyum
İndiyum	Kobalt	Kok kömürü	Krom
Magnezyum	Manyezit	Nadir Toprak metalleri (ağır)	Nadir Toprak metalleri (hafif)
Niyobyum	Platin grubu metaller	Silisyum	Tungsten

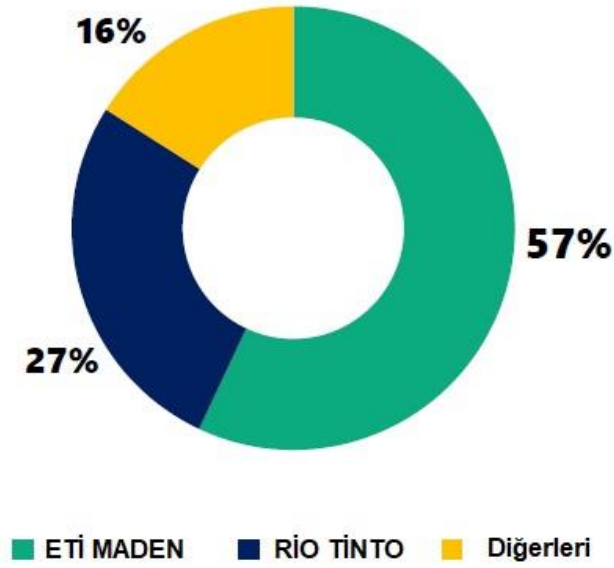
Ülkemizde bulunmuş borat yatakları şunlardır: Kırka, Bigadiç, Emet ve Kestelek’te bulunur. Bu bor yataklarındaki en fazla rezerve sahip mineraller kolemanit ve tinkaldir. Emet, Bigadiç ve Kestelek’te çok miktarda ve yüksek tenörlü kolemanit, Kırka’da ise tinkal mineraline rastlanır. Emet ve Bigadiç sahalarında kolemanitin yanında minimal oranda üleksitte bulunur. Belirtilen bu yatakların kaynak miktarları Çizelge 5’te verilmiştir. Buradan hareketle Emet havzası hem miktar olarak hemde çeşitlilik bakımından diğer havzalardan ayrılır.

Çizelge 5. Eti Maden’e ait yatakların kaynak miktarları [8]

Havza adı	Miktar (Ton)	Havza adı	Miktar (Ton)
Emet (Kolemanit-Üleksit-Probertit)	1.804.885.000	Bigadiç (Kolemanit-Üleksit)	618.760.000
Kırka (Tinkal)	815.400.000	Kestelek (Kolemanit)	5.255.000
Toplam		3.244.300.000	

2.7. Bor Üretimi ve Tüketimi

Ülkemizdeki bor minerallerin çıkarılması, üretilmesi ve satışı 2840 sayılı kanunla Eti Maden İşletmeleri'ne bırakılmıştır. 2020 yılında dünya bor üretim kapasitesi 5,4 milyon iken fiili üretilen bor miktarı 3,07 milyon ton olduğu tahmin edilmektedir. Şekil 7'de görüldüğü üzere Eti Maden'in birinci sırada %57 pay ile ilk sırada gelmektedir, ikinci sırada %27 ile Rio Tinto şirketi gelmektedir. Diğer şirketler üretimin kalan %16'lık payını oluşturmaktadır [8].



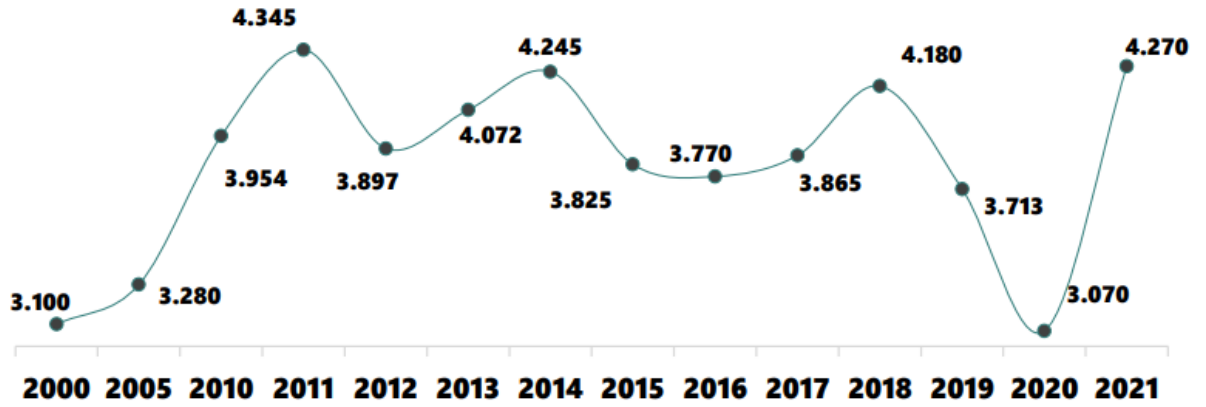
Şekil 7. Bor üreten başlıca üreticilere göre dağılımı (%) [8]

Son yıllarda yapılan yatırımlar sonucu üretim payı sürekli artmıştır. Ülkemizin 1970'te bor üretimdeki payı %21, 1980'de %31, 1992'de % 41 iken; 2020'de bu rakam %57'ye ulaşmıştır. Açılan yeni fabrikalarla konsantre bor ürün satışları, satış fiyatı daha yüksek olan rafine ürünlere doğru geçiş yapmıştır. Çizelge 6'da 2016 yılı bor üretim miktarları verilmiştir.

Çizelge 6. Eti Maden 2016 yılı bor üretim miktarı (ton) [21]

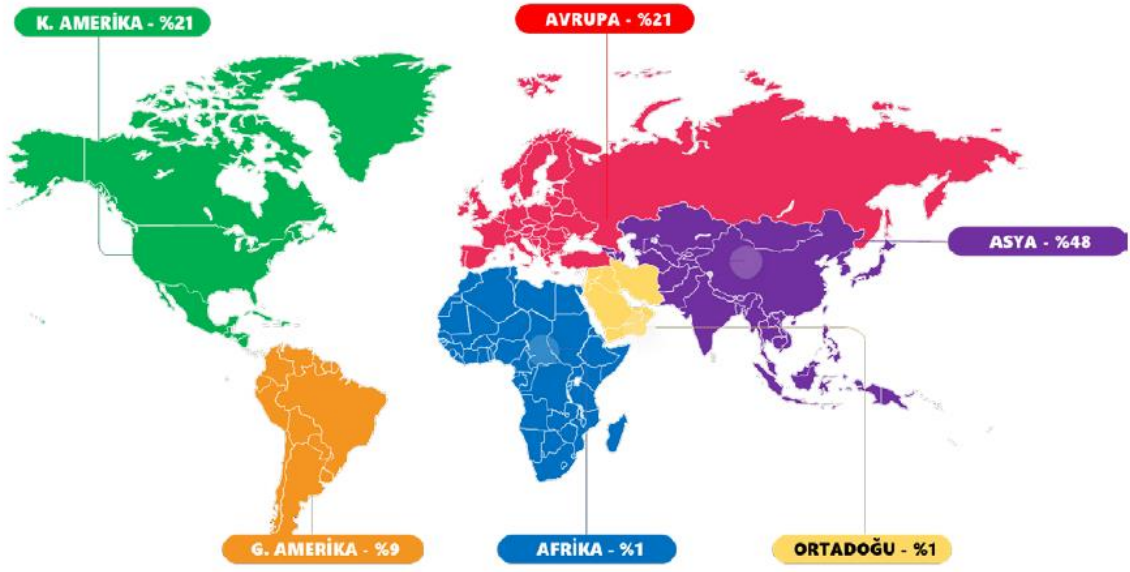
Ürün	Üretim Miktarı (ton)
Konsantre Bor ürünleri	1.607.208
Rafine Bor ürünleri	1.829.346

Şekil 8’de bor ürünlerinin tüketimi yıllara göre verilmiştir. Dünya bor tüketimi 2000 yılından itibaren küresel kriz ve yaşanan pandemilerden etkilenmiştir. 2000 yılında 3,1 milyon ton olan bor tüketimi, 2009 yılındaki krizden sonra 2014 yılında 4,3 milyon tona ulaşmıştır. 2015 yılına gelindiğinde ise küresel çapta yaşanan krizin etkisiyle ekonomik faaliyetlerde güvensizlik ve zayıflıktan dolayı dünya bor talebi 2014 yılına göre % 11 azalmış, 3,8 milyon ton olmuştur. 2016 yılında da kriz durumu sürdüğü için bor ürün tüketimi 3,77 milyon ton olarak gerçekleşmiştir.



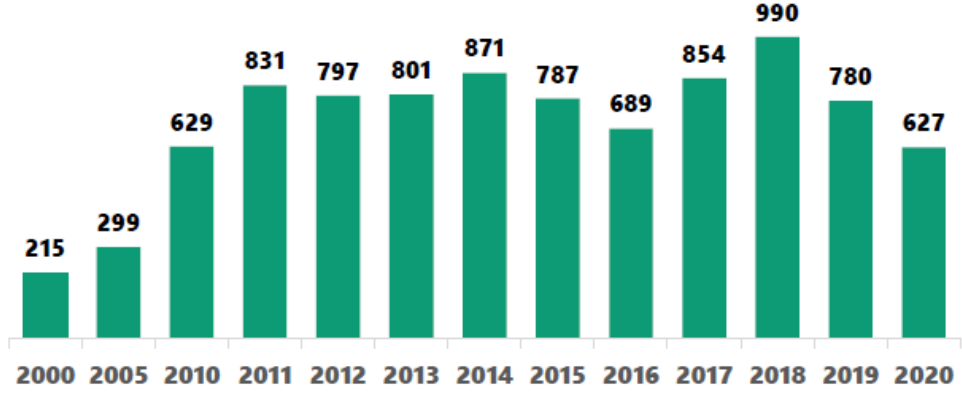
Şekil 8. 2000-2021 arası dünya bor ürünleri tüketimi (ton) [8]

2017 ve 2018 yıllarında ise kriz yerini ekonomik büyümeye bıraktığı için bu durum bor tüketimine olumlu yansımıştır. Bor tüketimi 2017 ve 2018’de sırasıyla 3,87 milyon ton ve 4,18 milyon ton olarak gerçekleşmiştir. 2019 yılında, Çin ve ABD arasındaki ticaret savaşları ve dünya çapında jeopolitik çatışmalar, dünya ekonomik büyümesini yavaşlamaya sokmuştur ve haliyle bor tüketimini bir önceki yıla %11 azalıp 3,7 milyon ton olmuştur. 2020 yılına ise, bir çok sektörde olduğu gibi bor tüketen endüstrilerde COVID-19 salgınından olumsuz etkilenmiştir. Pandeminin etkisiyle ciddi oranda azalan sanayi üretimi yanında bor talebinde olumsuz etkilemiştir. 2020 yılındaki bor tüketimi bir önceki yıla göre %17 azalarak 3,07 milyon ton civarında gerçekleştiği tahmin edilmektedir. Sonraki yılda beklenen büyümeye sanayi üretimine olumlu yansması ve bor tüketiminin artışı gerçekleşmiştir.

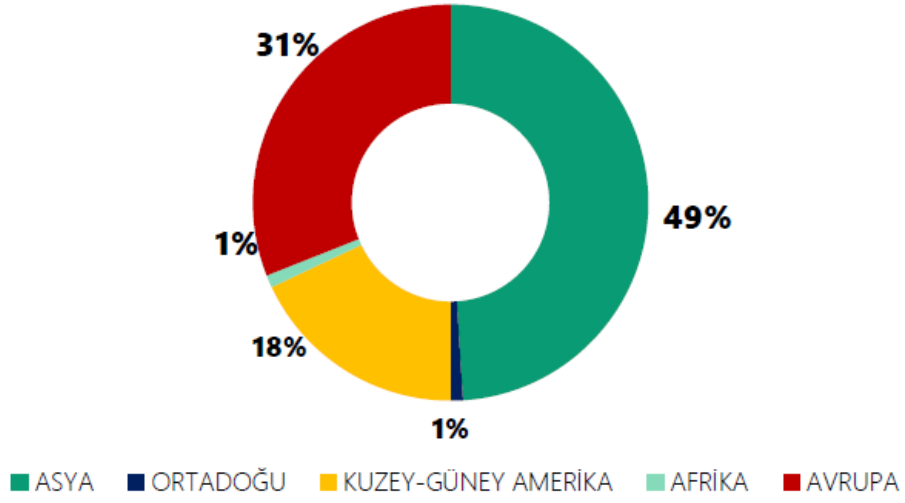


Şekil 9. Bor tüketiminin bölgelere göre dağılımı (%) [8]

Bölgesel Bor tüketim dağılımları Şekil 9'da verilmiştir. Dünya'da bor talebinin en çok olduğu bölge %48 payla Asya'dır ve Çin'in bor talebi önemli bir paya sahiptir. Asya'nın ardından %21 ile Kuzey Amerika, %21 ile Avrupa, %9 ile Güney Amerika, %1'er payla Ortadoğu ve Afrika gelmektedir. Bilindiği üzere dünyanın en büyük bor yatakları Türkiye'de bulunmaktadır bununla birlikte dünyanın en çok bor üreten ülkesidir. Yurtiçi piyasadaki bor talebinin tamamı, Dünya bor talebinin ise %57'sini karşılamaktadır. Eti Maden'in 2020 yılı toplam satış gelirlerinin %95'i yurtdışı satış gelirinden oluşmuştur ve 2020 yılı satış geliri 657 milyon \$ olarak gerçekleşmiştir. Şekil 10'da 2000-2020 dönemini kapsayan ihracat miktarları gösterilmiştir ve şekil 11'de ise 2020 yılında Eti Maden'in ihracatının yaklaşık %49'u Asya bölgesine yapılması dikkat çekicidir.



Şekil 10. Eti Maden ihracatı (milyon \$) [8]



Şekil 11. Eti Maden'in 2020 yılında yaptığı ihracatın kıtalara göre dağılımı [8]

3. ÖNCEL ÇALIŞMALAR

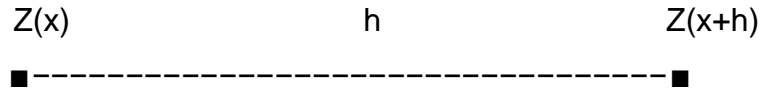
Dünyanın çeşitli yerlerinde bor mineralleri için arama, zenginleştirme ve madencilik faaliyetleri yürütülmektedir. Fakat dünya'da çok kısıtlı bölgelerde yer aldığından diğer madenlere göre çalışmalar daha kısıtlıdır ve belli başlı birkaç şirket tarafından çıkarılmaktadır. Bu yüzden internette sahalara ait NI.43.101 ve JORC kapsamındaki maden kaynak raporları bulunmamaktadır. Kullanım alanları bakımından birçok sanayide kullanıldığı için stratejik maden sınıfında yer alır. USGS verileri incelendiğinde ABD'de üretilen bor minerallerinin 2005 yılından itibaren üretim miktarları gizlenmiştir. Sebebi ise ABD'deki ana üreticinin tescilli verilerini ifşa etmekten kaçınmak olarak belirtilmiştir [22]. Türkiye'de yapılan çalışmalar incelendiğinde Tercan, Kulaksız ve Şentürk'ün "Tülovası bor yatağının kaynak kestirimi" çalışmasına rastlanır. Bu çalışmada 30 adet sondajdan veriler toplanmış ve 1.5 metre uzunluğunda kompozitler oluşturulmuştur. Blok boyutları 40*40*6 metre alınmıştır ve kestirim ortalamasız krigleme yöntemi kullanılmış ve tenör-tonaj grafiği oluşturulmuştur [2]. Bu çalışma dışında bir bor yatağının kaynak kestirimi çalışması bulunmamaktadır. Şirketler ticari sebeplerden kaynak kestirim çalışmalarını saklı tutmaktadırlar.

4. JEOİSTATİSTİKSEL YÖNTEM

Jeoistatistiğin ilk uygulanması 19.yüzyıl sonlarında Güney Afrika'da bulunan Witwatersrand havzasındaki altın madenciliğine dayanır [23] . Sonrasında bu teknik 1963'de Prof. Matheron tarafından geliştirilmiştir. Geoistatistiğin temel amacı rastlantı değişkenlerinin konuma bağlı tahminidir [24]. Geoistatistik, klasik istatistik yöntemlerinden farklı olarak örnekler arası ilişkiyi, örneklerin alındığı konumları da hesaba katar ve temelini fonksiyonlar teorisindeki durağan rastlantı teorisinden almıştır [25]. Geoistatistik ilk başta madencilik için kullanılsa da günümüzde coğrafyadan tarıma, meteorolojiden hidrojeolojiye kadar birçok farklı alanda kullanılır. Geoistatistikte, değişkenler arasındaki ilişki, uzamsal bir ilişki olabileceği gibi çeşitli minerallerin tenör değerleride olabilir. Örnek vermek gerekirse, bir sahada yapılan arama sondajlarında tespit edilen tenör değerleri, sondajlar arasındaki mesafeye göre değişir. Aradaki mesafe kısaltıldıkça tenör değerleri birbirlerine yakınlaşır, mesafe uzaklaştıkça ise tenör değerleri birbirinden uzaklaşacaktır [26].

4.1. Bölgesel Değişken

Bölgesel değişken, adından da anlaşılacağı gibi belirli bir bölgeye özgü, uzayda yayılan bir yapı gösterir. Madencilikte tenör, kalınlık bölgesel değişkenlere bir örnek olarak gösterilebilir. Bu değişkenlerin ortak noktası belirli bir konum yada bölgeye özeldir ve kordinatla ifade edilirler. Konumları bilinen değişkenlere bölgesel değişkenler denir. Bölgesel değişkenlerin aldığı değerler, maden yatağının örneklenmiş noktalarını oluşturur. Örneklenmemiş noktalardaki bilinmeyen değerler ise bilinen değerleri kullanarak yapılan kestirim işlemi ile hesaplanır [27].



Şekil 12. İki nokta arasındaki adım uzaklığı

Şekil 12'de gösterilen bir cevher yatağında x noktasındaki tenörü $Z(x)$, bu noktadan h uzaklıktaki tenör ise $Z(x+h)$ ile temsil etmektedir. Bu noktalar arasındaki tenör farkı $f(h) = Z(x) - Z(x+h)$ olur. Belirtilen bu fark h uzaklığının bir fonksiyonudur ve $f(h)$ 'nin

modellenmesi hesaplanmasında kritik öneme sahiptir. $f(h)$ fonksiyonu bilindiğinde, bilinen noktalarda değerler ile örneklenmemiş lokasyonlardaki değerler saptanabilir. Tenör değerlerinin arasındaki fark uzaklık arttıkça artması, uzaklık azaldıkça tenör değerinin farkının azalması beklenir [27]. Bölgesel değişkenlerin uzaklığa göre değişimlerini modellenmesi için durağan rastlantı fonksiyonları kullanılır. Bir cevher yatağında her x noktasında bir $Z(x)$ raslantı değişkeni tanımlanır ve bu noktadaki değer $Z(x)$ raslantı değişkeninin bir değeri olduğu varsayılır. Maden yatağı içinde tanımlanan rastlantı değişkenlerinin tümü kullanılarak rastlantı fonksiyonu oluşturulur ve bölgesel değişkende rastlantı fonksiyonunun bir değeri olarak görülür [27].

4.1.1. Jeostatistiğin Temel Varsayımları

4.1.1.1. Durağanlık

Cevher yatağında, belirli bir noktadan sadece bir adet örnek alınabilir, bu yüzden sadece bir gözlem değeri elde edilir. Gözlemlenen bu değerle temel istatistiksel veriler olan ortalama, varyans gibi veriler ortaya çıkarılamaz. Bu yüzden bu istatistiksel verilerin, durağan rastlantı fonksiyonları altında yatağın bir noktasından diğer bir noktası değişmediği varsayılır. Eşitlik (1) ile temsil edilir [27].

$$E [Z(X)] = m \quad (1)$$

ile ifade edilir. Eşitlikteki (1) m değişmeyen ortalama $E(.)$ beklenen değer işlemcisini ifade eder [27]. Kavanoz içindeki kum tanelerinin dağılımı durağanlık varsayımına örnek olarak verilebilir. Kavanozun içindeki kum taneleri üç boyutta iyi sıralanmışsa, durağan rassal fonksiyonun güzel bir örneğidir. Aksi halde kavanozun sallanması durumunda ince kum taneleri aşağıya doğru kayar ve bu durağan olmayan dikey boyut oluşturur [28] .

Kullanılan bir başka yaklaşım ise $Z(x)$ ve bu noktadan h uzaklıktaki noktada tanımlanmış $Z(x+h)$ rastlantı değişkenleri arasındaki ilişkinin, x ve $x+h$ konumlarından ziyade arasındaki h uzaklığına bağlı olduğu varsayımdır. Arasındaki bu ilişki kovaryans kullanılarak Eşitlik 2'deki gibi gösterilir.

$$Cov(h) = E[Z(x+h), Z(x)] - m^2 \quad (2)$$

Cov(h): Kovaryans değerini gösterir. Belirtilen ilk hipotez “Durağanlık”tır. Bu hipotezde uzaklığa bağlı değişkenlerin olasılığı etkilemez. Z(x) için ortalama ve varyans bütün konumlar için aynıdır ve değişmez.[29] İkinci hipotez ise ikinci dereceden durağandır. Bu hipotezde rastlantı fonksiyonu Z(x)’in beklenen değerine ek olarak Z(x)’in varyansı hesaplanabilir ve her nokta için aynıdır. [29] Belirtilen bu iki hipotez ikinci dereceden durağanlık varsayımı olarak bilinir. Kovaryans yalnızca uzaklığa bağlı olduğundan, variogramında uzaklığa bağlı olmasını gerekmektedir [30].

4.2. Variogram

Variogram, rastlantı değişkeninin konuma bağlı değişkenlerini tanımlayan bir fonksiyondur. rnek vermek gerekirse bir maden yatağında belirli mesafelerdeki numuneler arasında bir ilişki vardır. Birbirine yakın numunelerin ilişkisi yüksek, uzak olanların ise ilişkisi düşüktür. Örnekler arasındaki bu ilişki uzamsal değişkenlik kavramı ile ifade edilip bu değişkenlik variogram fonksiyonu ile tanımlanır [31].

Variogramlar jeostatistik biliminin temel taşlarındandır ve $\gamma(h)$ ile gösterilir. Variogram cevherdeki değer srekliiliğini gösteririr ve bölgesel değişkenin uzaklığa bağlı olarak değişimini açıklar. Bunlara ek olarak variogram, iki numune arasındaki değer benzerliğinin hangi mesafeden sonra ortadan kalkacağını da ortaya koyar [32]. Variogram fonksiyonu birbirinden h uzaklığı ile ayrılmış iki rastlantı değişkeni arasındaki farkın varyansı şeklinde ifade edilir. Eşitlik 3’de variogram formülü verilmiştir.

$$2\gamma(h) = \text{Var} [Z(x) - Z(x+h)] \quad (3)$$

Eşitlikte (3) h veri çiftleri arasındaki uzaklığı, $\gamma(h)$ h mesafesindeki variogramı temsil eder. İkinci dereceden durağanlık varsayımı dikkate alındığında variogram, beklenen değer cinsinden Eşitlik 4’deki gibi gösterilir.

$$2\gamma(h) = E [Z(h) - Z(x+h)]^2 \quad (4)$$

4.2.1. Variogram Fonksiyonun Özellikleri

Bir fonksiyonun variogram şeklinde nitelendirilmesi için bazı özellikleri göstermesi gerekir. Bu özellikler şu şekilde açıklanabilir;

Variogramın $h=0$ uzaklığındaki değeri sıfıra eşittir.

$$\gamma(0) = 0$$

Variogram iki rastlantı değişkeni arasındaki farkın varyansı olarak tanımlanır ve bu yüzden asla negatif değer alamaz [27].

$$\gamma(h) \geq 0$$

Variogram simetrik bir fonksiyondur.

$$\gamma(h) = \gamma(-h)$$

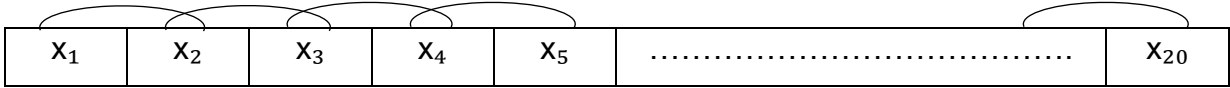
4.2.2. Deneysel Variogram

Deneysel variogram belirli uzaklıktaki verilerin ortalama variogram değerleri olarak hesaplanır [27]. Dolayısıyla her bir h uzaklığı için deneysel variogramı Eşitlik 5'deki gibi hesaplanır:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^{N(h)} [z(x_i) - (x_i + h)]^2 \quad (5)$$

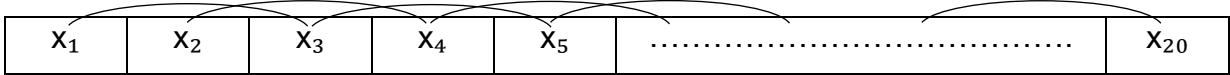
Eşitlikte (5) $N(h)$ veri çifti sayısını gösterir. Uzaklığa bağlı ilişki $f(h)$ analitik olarak biliniyorsa numune alınmamış konumdaki değişken, bilinen değerler yardımı ile hesaplanabilir. Ölçümlenmiş noktalar bir, iki ya da üç boyutlu olabilir. Variogram modeline bulmak için örnekleme kullanarak deneysel variogram değerlerini hesaplamak gerekir. Bir boyutta deneysel variogramları hesaplamak için bir örnek aşağıda verilmiştir [27].

Kömürde sürülmüş bir galeri boyunca her bir metrede toplamda konumda kömür kalınlığının ölçüldüğünü varsayalım. Bu kalınlık değerlerini de $x_1, x_2, x_3 \dots x_n$ ile gösterilsin. Eğer 20 adet kalınlık değeri ölçülmüş ise bir metredeki variogram değeri;



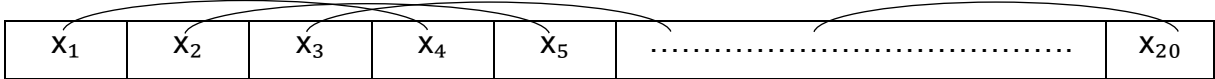
$$\gamma(1) = \frac{1}{2} \frac{1}{19} [(x_1 - x_2)^2 + (x_2 - x_3)^2 + (x_3 - x_4)^2 + \dots + (x_{19} - x_{20})^2]$$

İki metredeki variogram değeri;



$$\gamma(2) = \frac{1}{2} \frac{1}{18} [(x_1 - x_3)^2 + (x_2 - x_4)^2 + (x_3 - x_5)^2 + \dots + (x_{18} - x_{20})^2]$$

Üç metredeki variogram değeri;



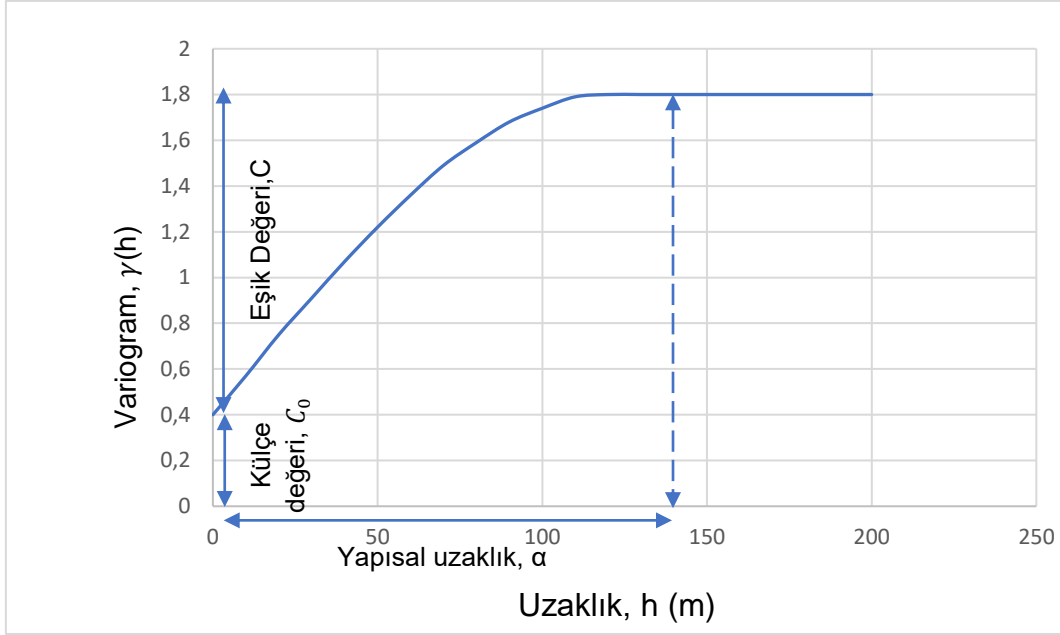
$$\gamma(3) = \frac{1}{2} \frac{1}{17} [(x_1 - x_4)^2 + (x_2 - x_5)^2 + (x_3 - x_6)^2 + \dots + (x_{17} - x_{20})^2]$$

Gösterildiği gibi deneysel variogramlar hesaplanır. Deneysel variogramların hesaplanması ile örneklenmeyen uzaklıktaki variogram değerlerinin belirlenmesi amacı ile model variogram uyarlanması yapılabilir.

4.2.3. Variogram Parametreleri ve Modelleri

"Variogramda, yapısal uzaklık (a), eşik değeri (sill), ve külçe (nugget) olmak üzere üç temel parametre belirlenir (Şekil 13). Teorik olarak, $h=0$ olduğunda variogram değeri sıfır olmalıdır. Grafikte gösterilen C_0 ise, verilere dayanarak değişimin belirlenebileceği maksimum uzaklık seviyesini ifade eder. Bu maksimum uzaklık, bütün örnekler içinde birbirine en yakın iki örnek arasındaki uzaklığı temsil eder. Pratikte, bu sınır uzaklıktan daha küçük değerlerde, veri eksikliği nedeniyle değerler arasındaki fark belirlenemez ve bu durum, variogramın orijininde belirgin bir süreksizliğe yol açar. Süreksizliğin bir diğer kaynağı ise analiz ve örnekleme hatalarıdır. Eğer bir noktadan iki numune almak mümkün olsaydı, bu örnekler arasındaki fark, örnekleme ve analiz hatalarından kaynaklı olurdu. Bu iki kaynağı

birbirinden ayırt etmek imkansızdır ve variogramda bu durum külçe (nugget) etkisi olarak gözlemlenir [27]."



Şekil 13. Variogram parametreleri

C = Variogramın eşik (C) değeri, varyansa eşittir. α = Yapısal uzaklık, bu mesafeden sonra numune değerleri arasında hiçbir ilişki kalmaz. Yapısal uzaklık, bir örneğin etki mesafesini temsil eder [33].

Deneysel variogramlarda, bilinen uzaklıklar için variogram değerleri elde edilirken, bu dışındaki uzaklıklarda variogram değerleri bilinmemektedir. Örnekleme yapılmamış noktalardaki verilerin tahmin edilmesi ve bölgesel değişkenin özelliklerinin belirlenmesi için variogramın tüm uzaklıklarda bilinmesi önemlidir. Bu nedenle, variogramı modellemek için deneysel variogram değerlerine bir fonksiyon uyarlanmalıdır. Variogram değerleri her zaman pozitif olduğundan, seçilen fonksiyon pozitif tanımlı olmalıdır [27].

Külçe etki modelinde bir konumdan başka bir konuma ani değişen bir bölgesel değişkenini ifade eder [33].

$$\gamma(h) = 0 \quad h = 0$$

$$\gamma(h) = C_0 \quad h > 0$$

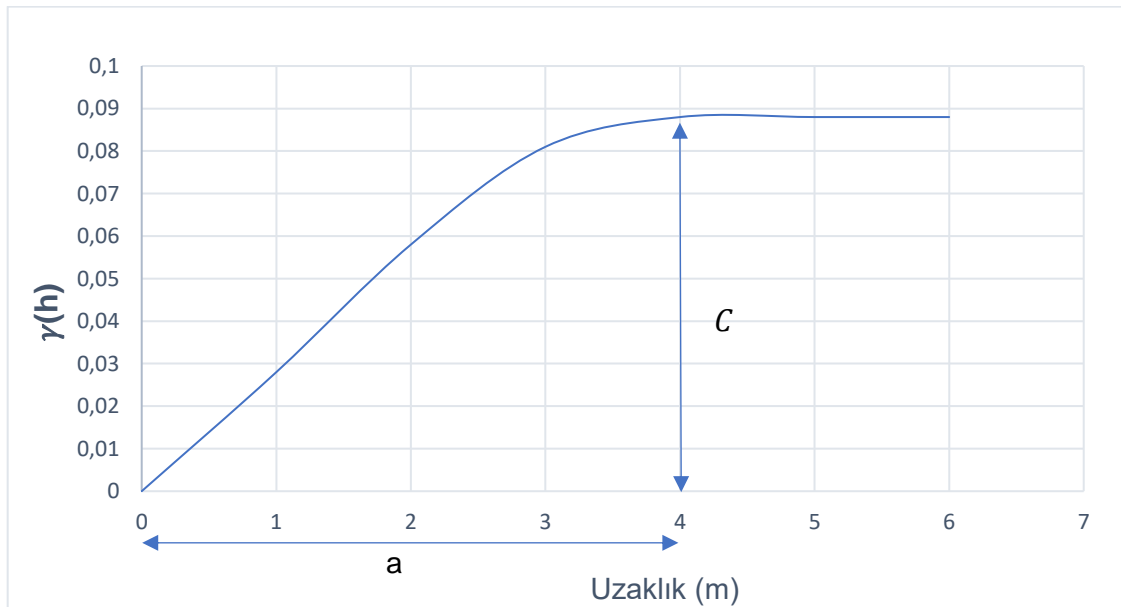
4.2.3.1. Küresel Variogram Modeli

Çokça kullanılan bir variogram modelidir.

$$\gamma(h) = C * [1,5 \left(\frac{h}{a}\right) - 0,5 \left(\frac{h}{a}\right)^3] \quad h \leq a$$

$$\gamma(h) = C \quad h > a$$

Variogramın en yüksek değeri “C” ile gösterilirken, “a” değeri ise yapısal uzaklığı ifade eder. Orijinden başlayan küresel variogram, yapısal uzaklığa ulaşana dek artan h uzaklığı ile artar. Yapısal uzaklıktan sonra ise variogram değeri sabit şekilde devam eder. Şekil 14’de örnek küresel model grafiği verilmiştir.

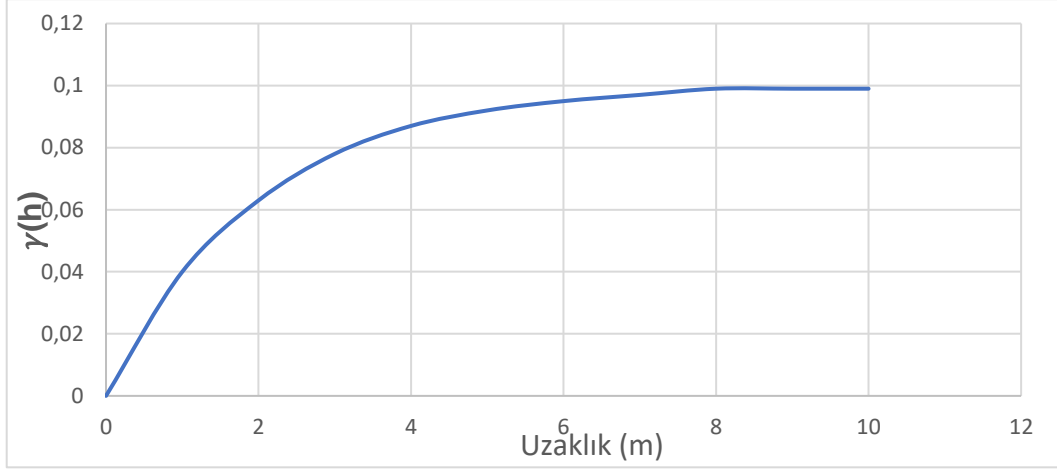


Şekil 14. Örnek küresel model variogram grafiği

4.2.3.2. Üssel Variogram Modeli

Üssel modelin variogram fonksiyonu Eşitlik’de (6) verildiği gibi hesaplanır. Yapısal uzaklık $a=3$ ’ye eşittir. Şekil 15’de örnek üssel variogram grafiği verilmiştir.

$$\gamma(h) = C(1 - e^{-\left(\frac{h}{a}\right)}) \quad (6)$$

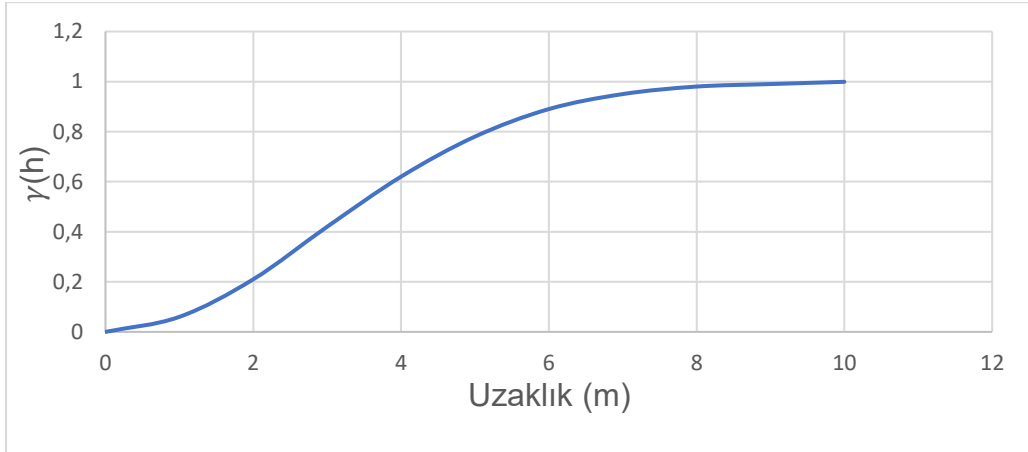


Şekil 15. Örnek üssel model variogram grafiği

4.2.3.3. Gauss Variogram Modeli

Orijinde parabolik davranış gösteren tek variogram modelidir. Yapısal uzaklık $a=71/4$ olarak tanımlanır [27] . Eşitlik 7'deki gibi hesaplanır. Şekil 16'da ise örnek gauss variogram grafiği verilmiştir.

$$\gamma(h) = C * (1 - e^{-\left(\frac{h^2}{l^2}\right)}) \quad (7)$$



Şekil 16. Örnek gauss model variogram grafiği

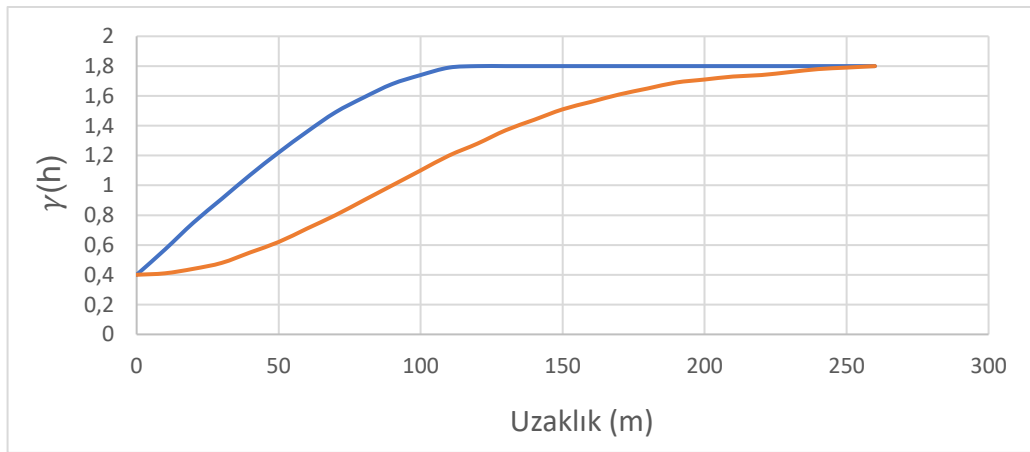
4.2.4. Yuvalı Yapılar

Bölgesel değişkenin değerlerinin arasındaki farklılıklar, mesafeye bağlı olarak birçok sebebi olabilir. Örnek vermek gerekirse, çok kısa mesafelerde ($h \approx 0$) değerler arasındaki fark ölçüm hatasından kaynaklanabilir. Bir maden yatağında değişkenler

arasındaki fark, maden yatağının birbirinden farklı şekilde dağılımlarından dolayıdır. Bölgesel değişkenin değerleri arasındaki farklar bütün bu kaynakları aynı anda ve bütün uzunlukları için geçerlidir. Bu kaynaklar ya da yapılar, yuvalı yapılar olarak ifade edilir [27] .

4.2.5. İzotropi ve Anizotropi

Belirtilen önceki variogramlarda, bölgesel değişkenin uzaklığa bağlı ilişkisi yöne göre değişmemiştir ve bunlara izotropik variogramlar denir. Fakat bölgesel değişkenin yapısının yöne göre değiştiği pek çok örnek vardır. Örneğin kum ve çakıllı malzeme yanal olarak yayılım gösterir. Bu yüzden yatay yönde birbirine yakın iki konumda ölçülen değerler arasındaki fark, ortalama olarak düşey yönde aynı uzaklıkta ölçülen değerler arasındaki farktan daha düşük olur.



Şekil 17. Yatay ve düşey yöndeki variogramlar

4.3. Krigleme

Krigleme yönteminin teorik temeli, Danie G. Krige'in yüksek lisans tezine dayanır. Tezin amacı Güney Afrika Witwatersrand maden yatağındaki altın tenörünü tahmin etmek için birkaç sondaj deliğinden alınan numunelere dayanarak altının en olası dağılımını kestirmektir. Daha sonra 1960'da Fransız matematikçi ve maden mühendisi G. Matheron tarafından geliştirilmiş ve adını İngilizcede "Kriging" olarak adlandırmıştır. Kriging kelimesi, Türkçe'ye "Krigleme" olarak çevirilmiştir.

Variogram fonksiyonu yalnızca bölgesel değişkenlerin farklı özelliklerinin sayısal olarak belirlenmesinde rol oynamaz aynı zamanda örneklenmemiş verilerin

kestiriminde de kullanılır. Kestirim işlemi bilinen değerlerin ağırlıklı ortalaması alınarak yapılır. Matematiksel olarak Eşitlikteki (8) gibi gösterilir.

$$z^*(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i z(x_i) \quad (8)$$

Eşitlik'de (8) $z^*(x_0)$; x_0 konumunda bulunmayan fakat tahmin edilecek değeri, $z(x_i)$ ise x_0 konumunun tahmininde yardımcı olacak değerleri ve son olarak λ_i , ise bu veriler için kullanılacak ağırlıkları gösterir. x_i , $i=1, \dots, n$ konumlarındaki değişkenin verisi bilinir fakat bu verilere ağırlıkların hesaplanması gerekir. Ağırlıkların hesaplanabilir olması için ise kestirim hatalarının ortalaması sıfır ve varyansı minimal olmalıdır [27] . Bu işlemlere krigleme adı verilir. Belirtilen bu iki şart sağlandığında krigleme işlemi eşitlikteki (9) değerine ulaşır.

$$\begin{aligned} \lambda_1 \gamma_{11} + \lambda_1 \gamma_{12} + \dots + \lambda_n \gamma_{1n} + m &= \gamma_{01} \\ \lambda_1 \gamma_{21} + \lambda_2 \gamma_{22} + \dots + \lambda_n \gamma_{2n} + m &= \gamma_{02} \\ \vdots & \\ \lambda_1 \gamma_{n1} + \lambda_1 \gamma_{n2} + \dots + \lambda_n \gamma_{nn} + m &= \gamma_{0n} \\ \lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_n &= 1 \end{aligned} \quad (9)$$

γ_{ij} ile gösterilen simge x_i ve x_j yerleri arasındaki mesafeye bağlı variogram değerini, m lagrange sabitini gösterir. Eşitliğin (9) matrisi alınırsa şu şekilde (10) son halini alır.

$$\begin{vmatrix} \gamma_{11} & \gamma_{12} & \cdot & \gamma_{1n} & 1 \\ \gamma_{21} & \gamma_{22} & \cdot & \gamma_{2n} & 1 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \gamma_{n1} & \gamma_{n2} & \cdot & \gamma_{nn} & 1 \\ 1 & 1 & \cdot & 1 & 0 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \cdot \\ \lambda_n \\ m \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \gamma_{01} \\ \gamma_{02} \\ \cdot \\ \gamma_{0n} \\ 1 \end{vmatrix} \quad (10)$$

Eşitlik'de (8) verilen $z(x_0)$ ile ifade edilen, kestirilmek istenen noktanın hata varyansı krigleme varyansı olarak bilinir ve σ_k^2 simgesiyle gösterilir. Krigleme varyansı ise eşitlikteki (11) gibi hesaplanır.

$$\sigma_k^2 = \sum_{i=1}^n \lambda_i \gamma(x_0 - x_i) + m \quad (11)$$

4.3.1. Blokların Krigleme Yöntemi ile Kestirimi

Krigleme sisteminde, (Eşitlik 10) bölgesel değişkenin noktasal örnekler üzerinde tanımlandığı varsayar fakat yerbilimlerinde çoğu zaman örneklenmemiş bir noktanın kestirimi de istenebilir. Bu yüzden kestirilen değişken, bir blok üzerinde tanımlanır ve daha küçük olan noktasal verilerden (karot örnekleri) kestirilir ve blok üzerine tanımlanır. Bunun için krigleme sisteminde (10) eşitliğin sağ tarafındaki vektörün elemanlarını $\bar{\gamma}(V, x_i)$ ortalama variogram değerleri ile değiştirmek yeterli olur. Sonuç olarak krigleme sistemi, blok değerlerinin kestiriminde son halini (12) alır [27].

$$\begin{vmatrix} \gamma_{11} & \gamma_{12} & \cdot & \gamma_{1n} & 1 \\ \gamma_{21} & \gamma_{22} & \cdot & \gamma_{2n} & 1 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \gamma_{n1} & \gamma_{n2} & \cdot & \gamma_{nn} & 1 \\ 1 & 1 & \cdot & 1 & 0 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \cdot \\ \lambda_n \\ m \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \gamma_{v1} \\ \gamma_{v2} \\ \cdot \\ \gamma_{vn} \\ 1 \end{vmatrix} \quad (12)$$

γ_{vi} ; V bloğu ile i veri arasındaki ortalama variogram değerini ifade eder.

4.3.2. Krigleme Yöntemi ile Kestirimin Özellikleri

Değerler ve değerlere verilen ağırlıkların toplamı krigleme yöntemini oluşturur. Belirtilen koşullar olan yansızlık, minimum varyans ve ağırlıklar göz önüne alınarak doğrusal denklemler çözümü elde edilir. Oluşturulan variogram fonksiyonu, doğrusal denklem sisteminin katsayılarını belirtir. Bu yüzden en iyi krigleme ağırlığının saptanmasında numunelerin aralarındaki mesafe kadar tahmin edilecek nokta ya da bloğa olan mesafede hesaba katılır [27]. Krigleme yönteminin diğer kestirim yöntemlerine kıyasla en önemli avantajı esnekliğidir. Bu yöntemde ağırlıklar, belirli kurallara dayanmaz; aksine, veriler önceden sistemli ve objektif bir şekilde analiz edilir. Analiz sonuçlarına dayanılarak variogram fonksiyonu belirlenir ve bu fonksiyon daha sonra ağırlıkların belirlenmesinde kullanılır [27].

Kriglemenin bir diğer üstünlüğü, krigleme varyansı aracılığıyla kestirim hatasının büyüklüğünü değerlendirmek için bir olanak sunmasıdır. Krigleme varyansı, verilerin gerçek değerlerinden bağımsız olarak daha çok veri sayısı ve veriler arasındaki uzaklıklara dayalı bir ölçüdür. Bu özelliği sayesinde, krigleme varyansı, sondaj

yapılmadan önce olası lokasyonları test etmek ve en uygun olanları belirlemek amacıyla kullanılabilir [33].

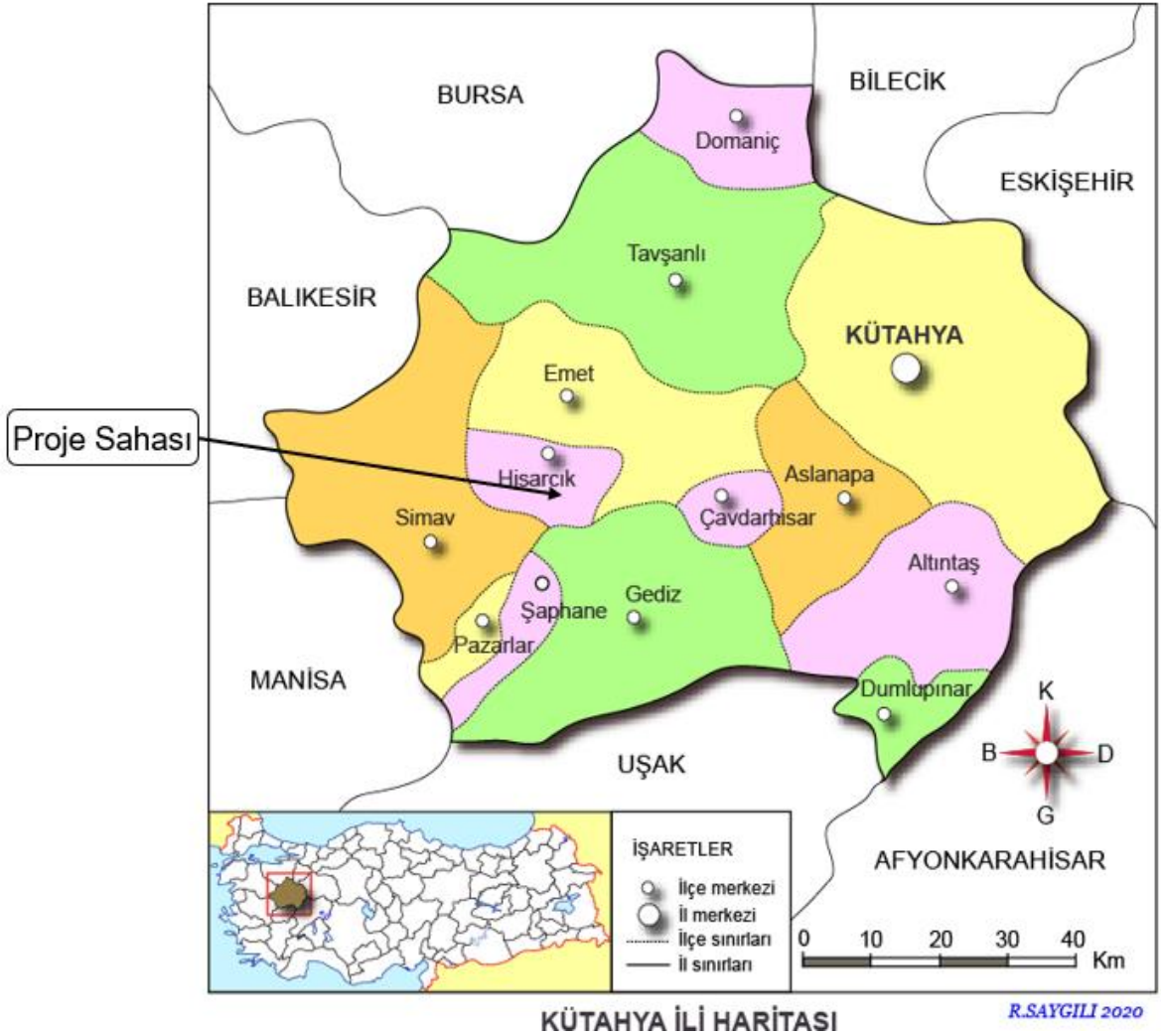
4.3.3. Krigleme Yöntemi ile Variogram Modelinin Çapraz Doğrulanması

Çapraz doğrulama tekniği, variogram model parametrelerinin belirlenmesinde sıkça kullanılan bir yöntemdir. İlk olarak, bu yöntemi kullanırken gerçek variogram fonksiyonu için bir model ve parametreler seçilir. Bu adımdan sonra, veri setinden bir örnek rastgele seçilir ve analize dahil edilmez. Seçilen variogram modeli ve geri kalan veriler kullanılarak bu konumdaki veri yeniden kestirilir. Kestirim yapılan noktada gerçek değerle kestirilen değer arasındaki fark, yani kestirim varyansı hesaplanır. Bu süreç, veri içeren diğer konumlar ve aday variogram modelleri için tekrarlanır ve kestirim hatalarının istatistiği gözlemlenir [27].

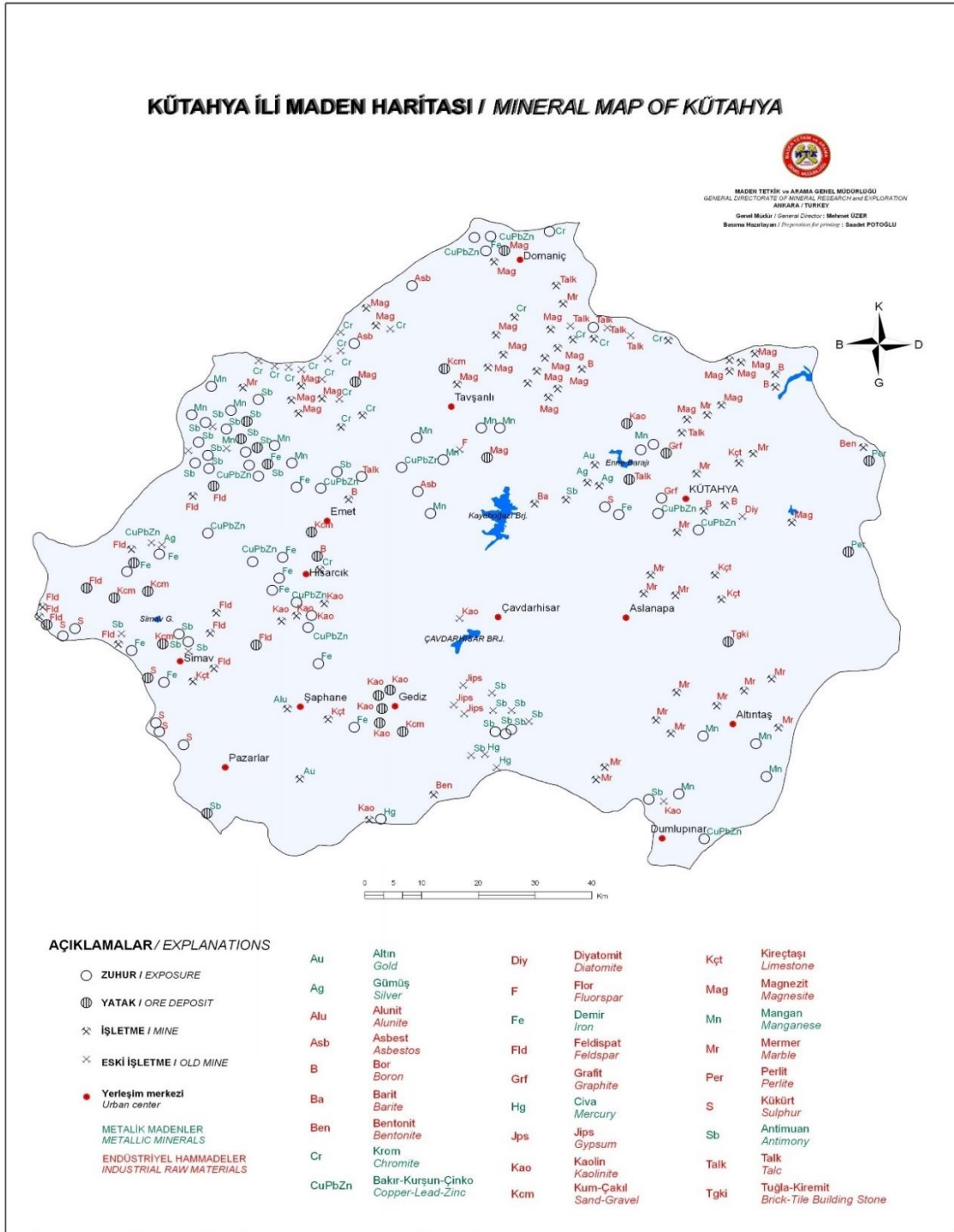
5. SAHAYLA İLGİLİ GENEL BİLGİLER

5.1. Çalışma Alanının Coğrafik Konumu

Çalışma sahası, 1/25.000 ölçekli Kütahya J22-c1 paftasında yer almaktadır ve Kütahya ili, Hisarcık ilçe sınırları içerisinde yer almaktadır. Tezin isminde geçen Emet ise bulunduğu konumdan ziyade Emet Eti Bor İşletme Müdürlüğüne bağlı olduğunu belirtir. Saha Hisarcık ilçe merkezine 8 km, Kütahya şehir merkezine 65 km, Ankara il merkezine ise uzaklığı yaklaşık 315 km'dir. İnceleme alanı Kütahya-Emet-Dereköy ve Şeyhler köyü çevresinde, Dereköy ve Şeyhler köyüne Emet'ten Emet-Gediz yolu üzerinden yaklaşık 30 km asfalt yol ile ulaşım sağlanmaktadır. Dereköy ve Şeyhler köyüne her mevsim ulaşım mümkündür. Şekil 18'de sahanın yer bulduru haritası 19'da ise il maden haritası verilmiştir.



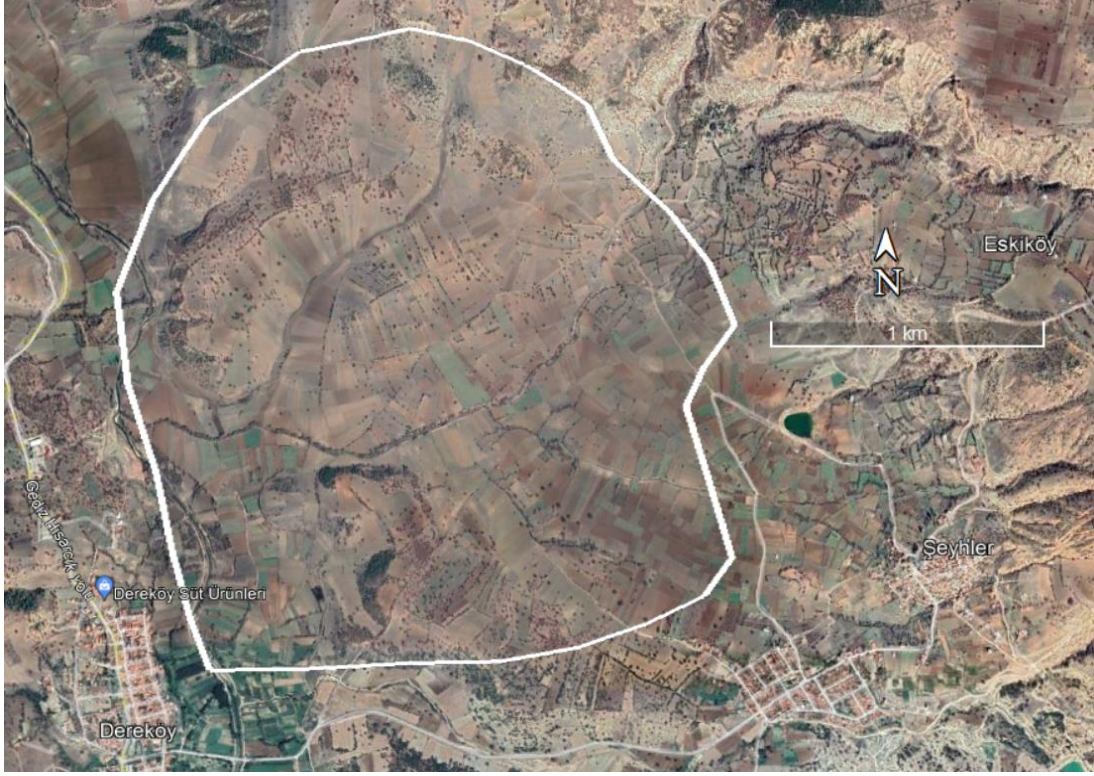
Şekil 18. Sahanın yer bulduru haritası



Şekil 19. Kütahya İli Maden Haritası [34]

Kütahya ilinde hali hazırda Eti Madenin Emet bölgesinde üretimi devam etmektedir. Bu üretim operasyonları farklı konumlarda açık ocak madenciliği ile yapılmaktadır. Ruhsat bölgesi içinde kalan alanlarda ise yoğun şekilde arama faaliyetleri gerçekleştirilmektedir. Emet-Şeyhler bölgesi Eti Maden'e ait ruhsat sahasında bulunur. Çalışma yapılan bölgenin yaklaşık sınırları Şekil 20'deki gibidir ve Şekil 21'de

arazinin genel görünümü verilmiştir. Saha, Emet ayının doğusunda yer alır. Arazinin topoğrafyası genel olarak düzlüktür. Yükseltisi 800 ile 900 kotu arasındadır.



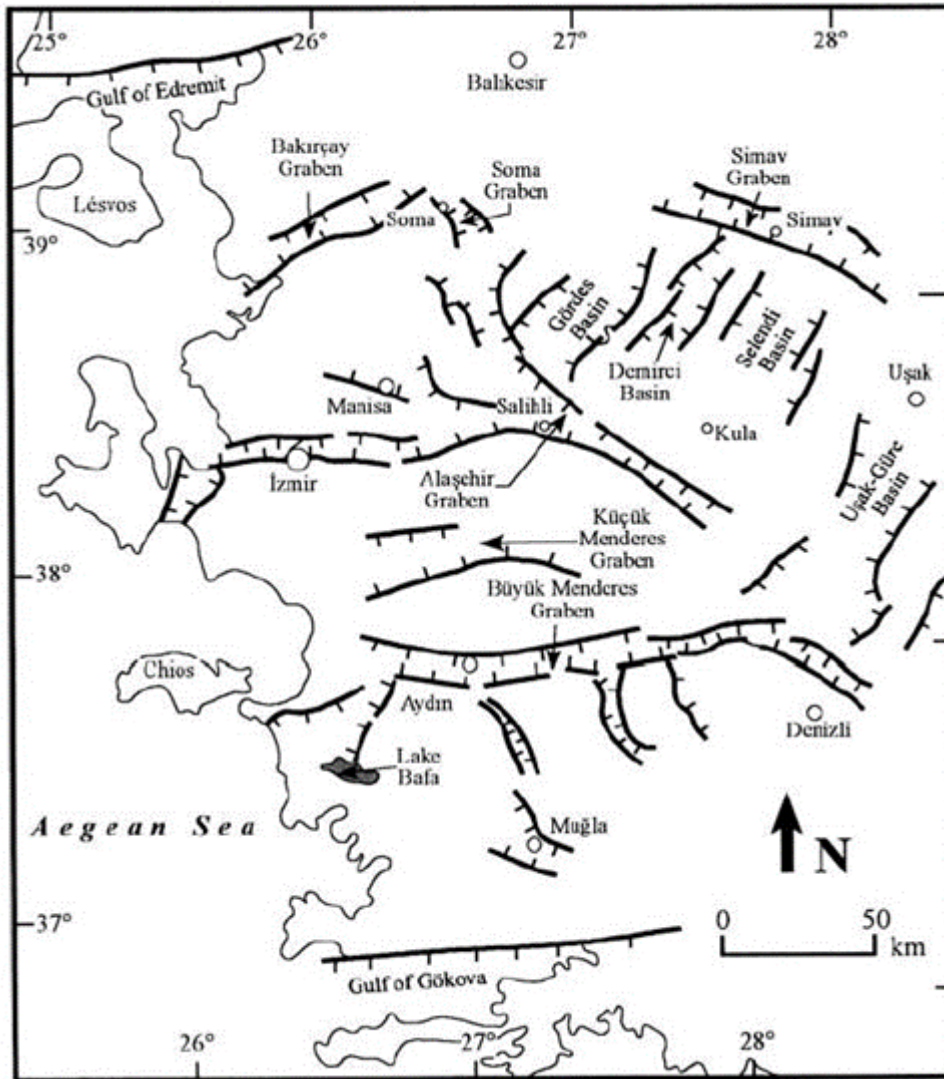
Şekil 20. Çalışma yapılan sahanın yaklaşık sınırları



Şekil 21. Çalışma alanı genel görünümü (Kuzeyden Güneye bakış)

5.2. Bölgenin Jeolojisi

Batı Anadolu'da, temel morfolotektonikler (Şekil 22) yaklaşık doğu-batı yönünde uzanan horst ve grabenlerden oluşur. Batı Anadolu'da neoteknik rejim dahilinde büyüyen en büyük tektonik yapılar Büyük menderes ve Gediz grabenleridir. Çalışma yapılan Dereköy-Şeyhler sahası, Menderes masifinin kuzey kısmındaki Simav grabeninin yaklaşık 10 km kuzey doğusunda kalır. Balıkesir'in Sındırgı ilçesinden başlayan Simav grabeni, Simav nehrini takip ederek Murat Dağında sonlanır. Bu yaklaşık 150 km'lik bir uzunluğu kapsar. Simav Grabeni, güneyinde Simav fayı ve kuzeyinde Kütahya-Emet fay zonu arasında olan, yaklaşık kuzeybatı yönlü pliyosen-kuvaterner çöküntü alanıdır [35].



Şekil 22. Türkiye'nin Batısının temel morfolotektonik öğeler [37]

Menderes Masifi'nde tabandan tavana doğrultusunda gnayslar ve şistlerden oluşur. Gnayslar, migmatitler ve biyotitli gnayslardan meydana gelir. Formasyonun üstünde, bantlı bir görünüm sunan mercerleri yüzeyler. Saha numunelerinde, belirtilen elemanların yaşı Paleozoyik öncesi olarak kabul edilmiştir [36] .

5.3. Stratigrafi

Saha gözlemleri ve proje alanında önceki yıllarda yapılan çalışmalara göre; inceleme alanında yaşlıdan gence doğru Tunçbilek Formasyonuna ait Gurağaç Üyesi (Ttg), Tunçbilek Formasyonuna ait Demirbilek Üyesi (Ttd), Karaköy Volkanitleri (Tkv), Emet Formasyonu (Te) ve Eski Alüvyon (Qy) birimleri yer almaktadır. Şekil 23'de bölgenin genelleştirilmiş stratigrafisi verilmiştir.

ÜST SİSTEM	SİSTEM	SERİ		
SENOZOYİK	KUVVARTERNER	HOLOSEN	ESKİ ALÜVYON	Kil, silt, kum, çakıl karmaşağı
			EMET FORMASYONU	Çakıltaşı-kumtaşı araseviyeli Marn, Çörtlü Kireçtaşı
	TERSİYER NEOJEN	MIYOSEN	BORAT ZONU	Kiltaşı arakesitli boratlar
			KARAKÖY VOLKANİTLERİ	Konglomera, Kumtaşı, Tüf, Marn, Killi Kireçtaşı
			DEMİRBİLEK	Kil, Marn, Kiltaşı, Kumtaşı, Çakıltaşı
			GÜRAĞAÇ	Çamurtaşı, Çakıltaşı, Kumtaşı, Silttaşı

Şekil 23. Bölgenin genelleştirilmiş stratigrafisi

5.3.1. Miyosen

5.3.1.1. Grağa Üyesi (Ttg)

Altta alüvyon yelpazesi üste doğru örgülü akarsu fasiyesi çökelimini yansıtan birim konglomera, kumtaşı ve çamurtaşı litolojilerinden oluşup farklı yaş ve kökenli ofiyolitik, metamorfik temel kayalar üzerinde yer alır. Alttaki yakınsak alüvyon yelpazesini yansıtan bölüm kızıl kahve renkli olup metrik boyutlara ulaşan yuvarlak ya da yarı yuvarlak bloklardan oluşur. Çakıllar temele ait çoğunlukla ofiyolitik kayalardan oluşun; şist mermer, kuvarsit gibi metamorfik kayalardan ve granitden oluşmaktadır. stte yer alan örgülü akarsu çökellerini yansıtan, çakıltaşı, çakıllı kumtaşı, kumtaşı ve çamurtaşları, şarabi, sarımsı, grimsi renkte olup gölssel kökenli ara düzeyler kapsar. Çakıltaşları masif, tane destekli, orta-iyi boylanmalı ve iyi yuvarlanmıştır. Yanal ve düşey yönde çakıllı kumtaşlarından, kumtaşlarına geçişler gözlenir. Kumtaşları masif ve/veya kalın tabakalı, tane destekli, iyi boylanmış ve çapraz katmanlanma gösterir. İstifin st kesiminde yer alan çamurtaşları kızıl kahve renkli, masif ve/veya kalın tabakalanmalıdır. Birim havzanın derinleşmesi ile göl çökellerine geçer [38] .

5.3.1.2. Demirbilek Üyesi (Ttd)

Çoğunlukla marn-kil ardışımından oluşun birim, Baş ve diğerleri (1983) tarafından adlanmıştır. [39] Demirbilek üyesi Seyitömer, Kükürt, Bozcahyk köyleri, İshakılar köyü doğusu ve Grlr derede yüzeyler. Birimin ana litolojisini kil-marn ardışımı oluşturur. yedeki litoloji ve kalınlıklar bölgeden bölgeye değişir. Killer gri-sarımsı-yeşilimsi kahve renkli olup tektoniğin etkili olduğu yerlerde sertleşerek kilaşlarını oluşturur ve kırılma yüzeyleri midye kabuğu şeklindedir. Marnlar genelde mavi, yeşil, gri renkli olup ince-orta tabakalıdır ve kartonumsu seviyeler yaygındır. Kil-marn seviyeleri bitki kalıntılarının yanı sıra bol miktarda yaprak izleri ve ostrea fosilleri içermektedir. Marn-kil ardışımı içinde az da olsa seviye ve mercekler halinde kumtaşı, çakıltaşı, bitümlü marn, tf ve ekonomik olarak önemli kömür seviyeleri gözlenir. Tunçbilek formasyonuna ait Demirbilek üyesi altta temele ait birimler üzerinde uyumsuz konumludur. Üst dokanağı ise Pliyosen yaşlı çökeller tarafından uyumsuzlukla üzerlenir. Formasyonun st seviyelerinde bulunan çok sayıda polen ve yaprak analizi ile marn seviyelerde tespit edilen ostrea fosilleri Geç Miyosen yaşını vermiştir [39] .

5.3.1.3. Karaköy Volkanitleri (Tkv)

Bazaltik andezit bileşimli lavlar, Baş ve diğerleri (1983) tarafından adlandırılmıştır [39]. Camiliyayla, Domaniç-Karaköy köyleri ve Orhaneli Çayı civarında yüzeyler. Karaköy volkanitleri; Miyosen yaşlı konglomera, kumtaşı, tuf marn ve killi kireçtaşı arasında kalınlığı 100,00 metreye ulaşan lav akıntıları şeklinde gözlenmektedir ve bu nedenle yaşı Erken-Orta Miyosen olarak verilmiştir. Kahverengimsi siyah renkli bazaltik andezitler ve bazaltlar yastık lavlar şeklinde gözlenmekle birlikte yer yer dayk ve dom şeklindedir. Bazen altıgen soğuma sütunları da gözlenmektedir [39] [40] . Lavların başlıca bileşenlerini plajiyoklas, klinoproksen ve ortoproksen kristalleri oluşturmaktadır. Olivin kristalleri seyrek olarak bulunur ve gaz boşlukları ikincil kuvars ve kalsit dolguludur [39]. Miyosen çökelleri içinde yer alan volkanitler, Çokköy formasyonu tarafından uyumsuzlukla örtülür. Volkanizma ilk ürünü olan tüfler, Civandağ tüfleri olarak adlandırılmıştır [36] .

5.3.2. Pliyosen

5.3.2.1. Emet Formasyonu

Akdeniz ve Konak (1979) tarafından adlandırılmış olan bu birim, çakıltaşı-kumtaşı ara seviyeli marn ve çörtlü kireçtaşlarından oluşmaktadır [36] . Emet formasyonu, sarımsı gri, bej renkli litolojileri oldukça gözenekli, orta kalınlıkta ve iyi tabakalanmalıdır ve birimin kalınlığı maksimum 200 metre civarındadır. Çokköy formasyonu üzerine uyumlu olarak gelmektedir ve diğer birimler tarafından uyumsuzlukla örtülür. Emet formasyonunun kireçtaşları bol gastropoda fosilleri içermektedir. Fosil içeriklerine ve stratigrafik konumuna göre bu birime Orta-Geç Pliyosen yaşı verilmiştir [39] .

5.3.3. Kuvarterner

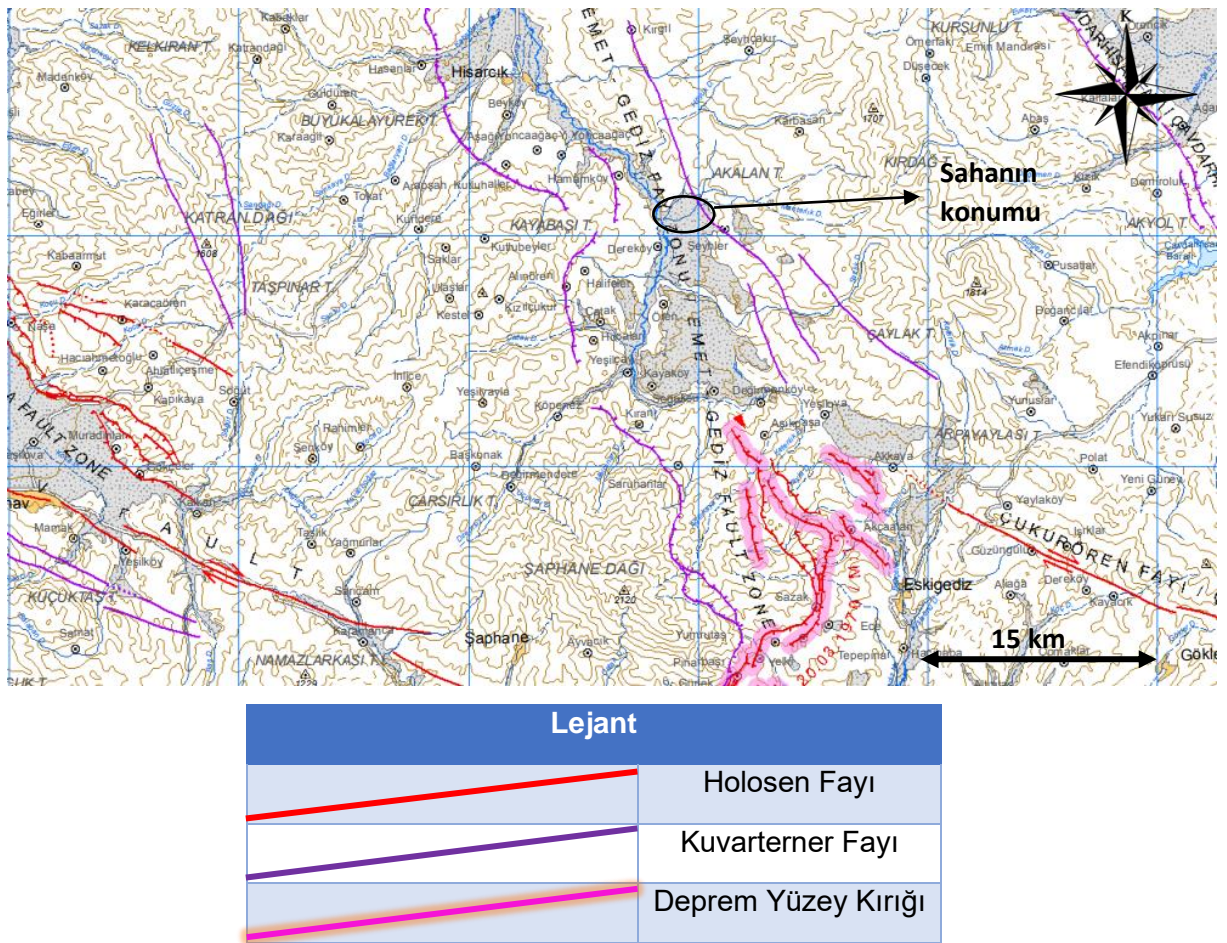
5.3.3.1. Eski Alüvyon (Qy)

Genellikle az eğime sahip tepelerin eteklerinde tutturulmamış veya az tutturulmuş çakıl, kum ve çamurlardan oluşmaktadır. Kısa süreli akarsu taşınımı ve sellenmeler yolu ile birikmiş çökellerdir.

5.4. Yapısal Jeoloji

Kuzey-Güney doğrultulu Emet neojen havzası metamorfiklik göstermeyen kayalar üzerine uyumsuz şekilde açılmıştır. Miyosen serisinin ilk zamanlarında aktif olan

epirojenik hareketler kayaçların sıklıkla kırıntılı parçalanmasına neden olmuş, denizin çekildiği alanda yapısal boşlukları dolduran sular neojen göllerini meydana getirmiştir. Belirtilen havzada volkanizmanın oluşumu, zayıf formasyonlardan sıcak artezyen sularının yüzeye ulaşması ve bundan dolayı bor tuzlarının oluşumu fay ve volkanik püskürmeler ile ilgilidir [41]. Sahada, kuzeybatı-güneydoğu yönlü Emet-Gediz Fayına paralel şekilde uzanan eğim atımlı faylara rastlanır bunu bölgenin kuzeyinde bulunan Hisarcık açık ocak işletmesinde karşılaşılan fayların doğrultusunda olduğu gözlemlenmiştir [42]. Şekil 24'de bölgenin diri faylarının haritası verilmiştir.

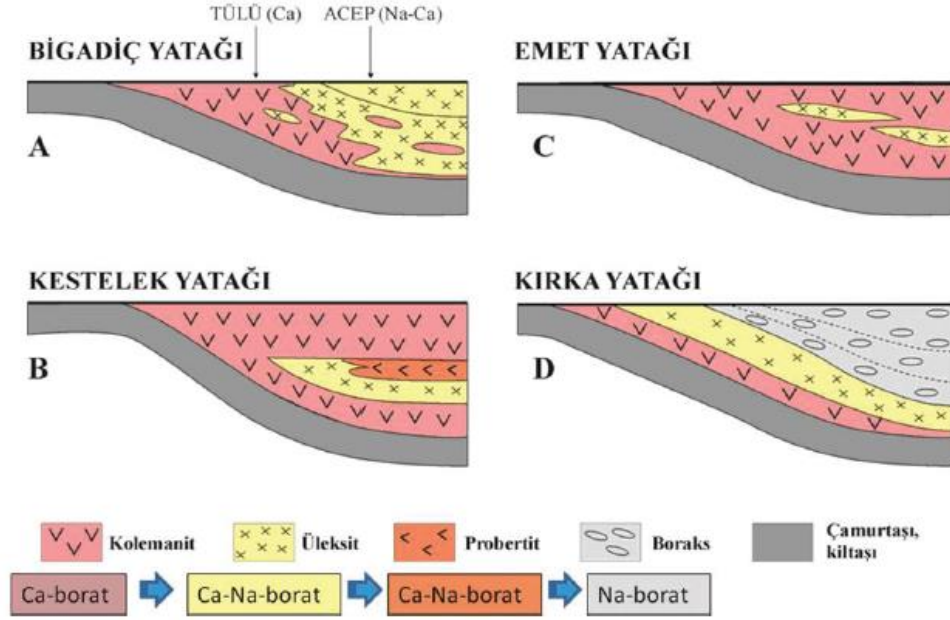


Şekil 24. Bölgenin diri fay haritası [43]

5.5. Maden Jeolojisi

1956'da Emet bölgesinde linyit için incelemeler yapan Gawlik, sahanın bulunduğu bölge olan Hisarcık'ta bor yataklarını bulmuştur. "Kırmızı seri" olarak adlandırılan kil, çakıltaşı, kumtaşı ve tüfleri içeren istifin üstünde killerle birlikte kolemanit içeren

kuşaklara rastlamıştır. Kolemanit kuşağı ise tavan kireç taşıyla çevrelenmiştir [44] . Bu bölgedeki bulunan bor mineralleri renkleri yeşil ve gri olan killerin içinde tüf, kireçtaşı marn aralanmasında meydana gelir ve formasyon içinde rastlanan bor mineralleri yaklaşık 125 metre derinliğinde bulunmuştur [45] .



Şekil 25. Ülkemizde bulunan bor yataklarının dağılımı (ölçeksiz) [15] [18]

Helvacı (2003) (Şekil 25) bor yataklarının dağılımını kıyaslamıştır ve görüldüğü üzere Emet'te kolemanit minerali, az miktarda üleksit ile birlikte cevherleşme göstermiştir. Dereköy-Şeyhler sahasında da Emet sahasındaki benzer bir cevherleşme gözlemlenmiştir. Çalışma alanında yapılan sondajlarda cevher genellikle kolemanit ve üleksit, az oranda da inderit ve hidroborasit görülmüştür. Sondajların ilk bor tuzu kesme derinliği ortalama 100 metre civarındadır. Ardından ara kesit olarak kiltası ve silttaşı tespit edilmiştir. Bölgedeki konumla değişmekle birlikte 3 ile 5 arasında cevher kesiti saptanmış ve yatay olarak cevherleşme göstermiştir. Sondajların kestiği en derin kısımdaki cevher zonu ise kiltası ile sınırlanır. Sahanın batısında yapılan 7 sondajda ise minimal kalınlıkta kömür varlığına ulaşılmıştır.

6. DEREKÖY-ŞEYHLER BÖLGESİNİN MADEN KAYNAK KESTİRİMİ

Maden kaynağı terimi birçok kez maden rezervi ile karıştırılır. Maden kaynağı, yer kabuğunda bulunmuş ekonomik açıdan bir değere sahip bir zühür ya da konsantrasyondur. Belirtilen bu kaynak son aşamada ekonomik şekilde üretilebilecek şekil ve miktarda bulunur. Maden rezervinde ise, kaynağın ekonomik bir şekilde üretilebilir kısmıdır. Maden rezervi hesabı için zenginleştirme, metalürjik, ekonomik, pazarlama, yasal, altyapı, çevresel, sosyal, yönetimsel gibi faktörleri hesaba katılarak ortaya çıkan maden varlığı olarak adlandırılır [46] .

Genel olarak Maden kaynak kestirimi işlemleri birkaç adımdan oluşur:

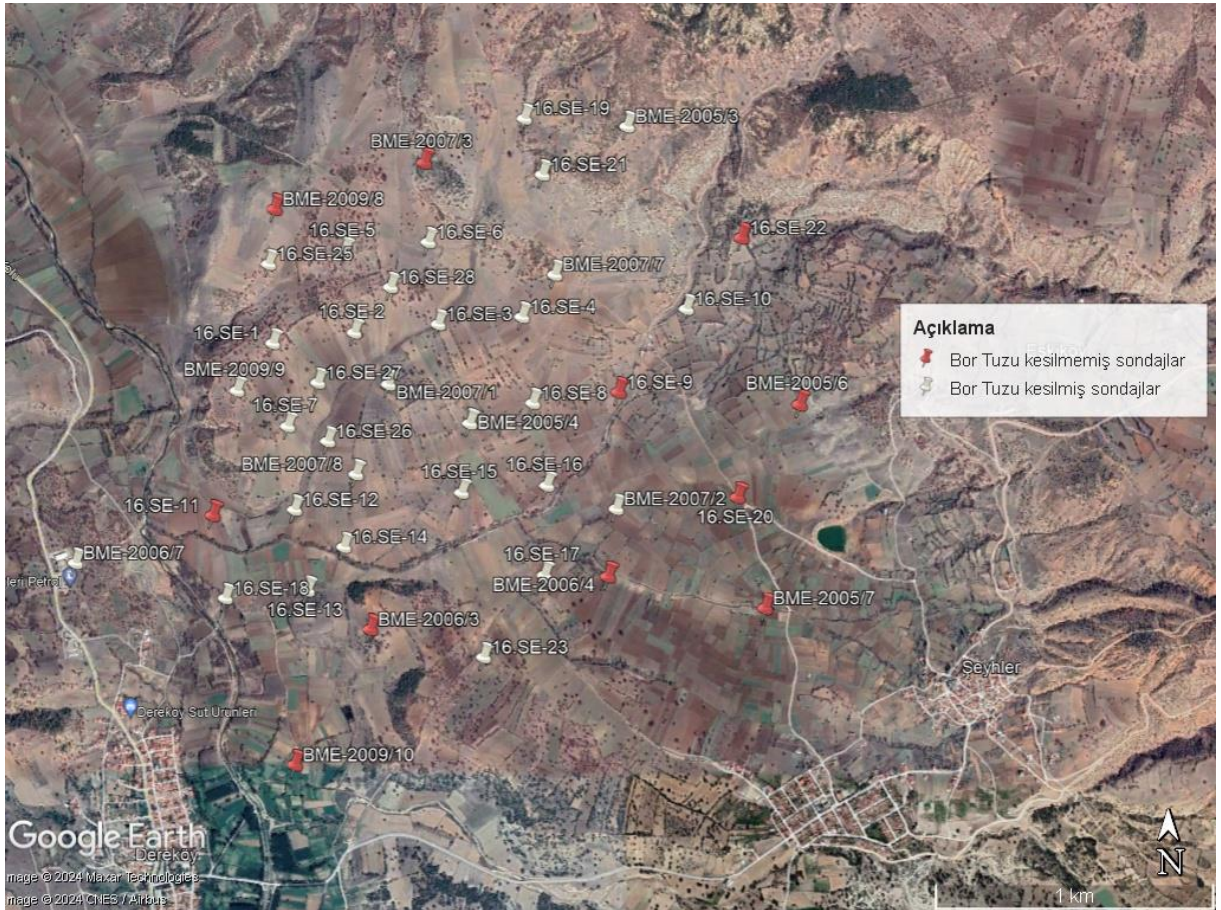
- i-) Veri tabanı oluşturulması
- ii-) Jeolojik katı modelin oluşturulması
- iii-) 3 boyutlu blok model oluşturma, kestirim işlemi ve kaynak sınıflaması
- iv-) Ekonomik üretimin değerlendirilmesi

İnceleme sahasında yapılmış 43 sondajdan 14 farklı bileşik için toplamda 17034 adet kimyasal analiz sonucunu kapsamaktadır. Sondaj loglarındaki veriler dijital ortama aktarılmış ve çalışılan tasarım destek programına yüklenmiştir. Yüklenen ham verilerin genel istatistikleri belirlenip, katı model oluşturma, kompozitleme, variogram analizi ve doğrulanması, blok model oluşturma ve ortalamasız krigleme yöntemiyle tenör kestirimi yapılmıştır. Kestirimin ardından son olarak tenör tonaj eğrisi oluşturulmuştur. Sınır tenörleri olarak B_2O_3 için %23 ve üstü, Na_2O içinse cevher zenginleştirmesini zorlaştırdığından %1,5 değerinin altı alınmıştır. Belirtilen B_2O_3 sınır tenörüne ve sondajlardaki cevher dağılımına göre bir katı model oluşturulmuştur. Ardından veriler kompozitlenmiştir. Ham veriler ve kompozit verilerinin temel istatistikleri ortaya konmuş ve kıyaslanmıştır. Bu işlem katı model içinde kalan kompozit verileri içinde yapılmıştır. Daha sonra ortalamasız krigleme için gereken parametreler, variogram modellenmesinden bulunmuştur. Kestirim işlemine tabii tutulan B_2O_3 ve Na_2O içinde ayrı ayrı düşey ve yatay variogramları modellenmiştir. Modellenme esnasında variogramın temel parametrelerinden olan eşik değeri, külçe değeri ve yapısal uzaklık verileri elde edilir ve çapraz doğrulanması yapılmıştır. Bu aşamadan sonra blok model oluşturulup ortalamasız

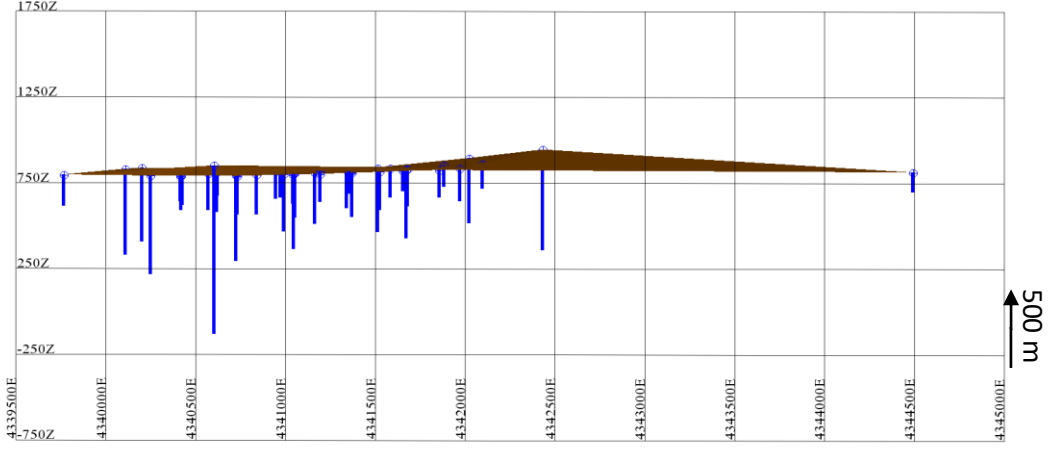
krigleme yöntemiyle kestirilmiştir. Kestirim sonunda oluşturulan maden kaynağının hacmi ve tenörü ortaya konulur ve tenör tonaj eğrisi hesaplanmıştır.

6.1. Sahadaki Sondajlar ve Konumları

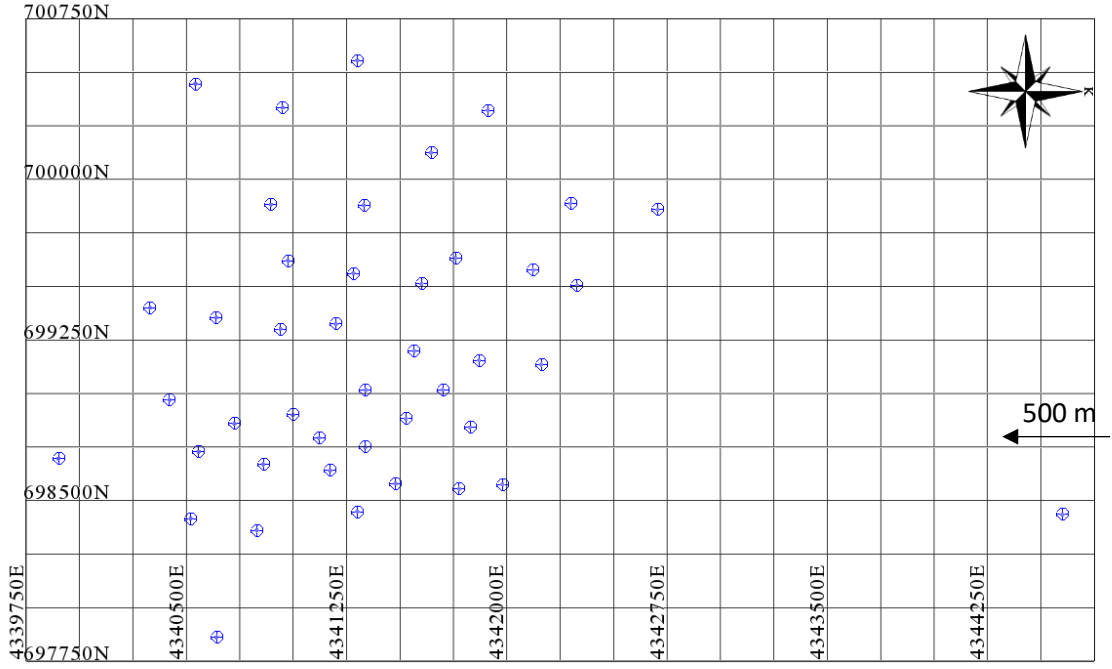
Dereköy-Şeyhler sahasında arama çalışmaları boyunca toplam 43 adet sondaj yapılmıştır. Bunların 15 tanesi 2005 ile 2009 yılları arasında yapılmış olup 2016 yılında ise bölgede 28 sondaj daha uygulanmıştır. Toplam 43 noktada 11595 metre karotlu sondaj yapılmıştır. Sondajların hepsi dik açıdır ve yaklaşık 8 km² bir alanı kapsar ve sondajlar arası ortalama mesafe yaklaşık 250 metredir. Şekil 26'da sahada yapılmış sondajların uydu görüntüsü ve Şekil 27 ve 28'de sondajların kesit ve plan görünümü verilmiştir.



Şekil 26. Sahada yapılan sondajların görünümü



Şekil 27. Sondajların ZX ekseninden görünümü



Şekil 28. Sondajların plan görünümü

6.2. Ham Verilerin İstatistikleri

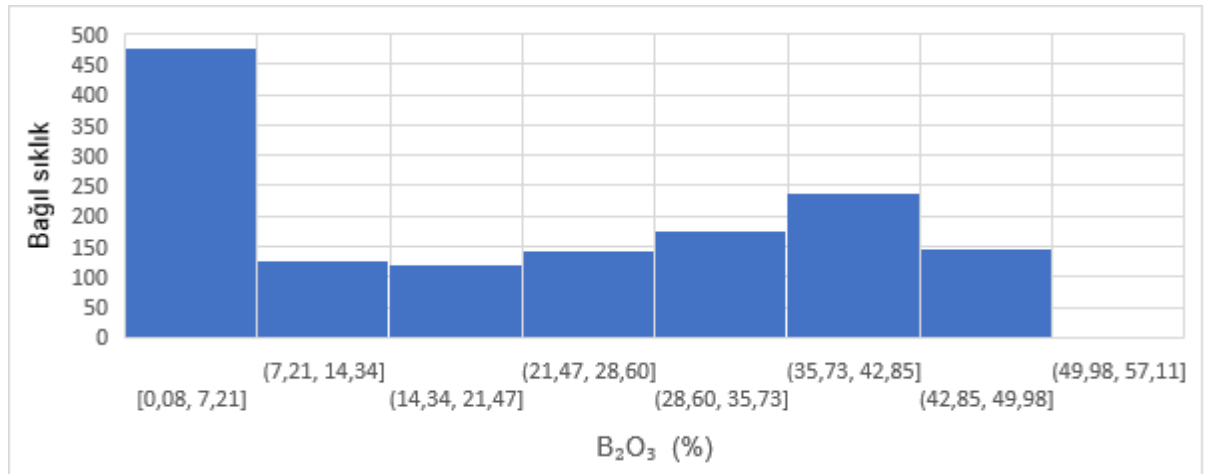
Bölgede yapılan sondajlar yalnızca borat yataklarını tespit etmekten ziyade bölgedeki farklı bileşiklerin varlığı içinde toplam 14 farklı bileşiğin kimyasal analizi yapılmıştır. Bunlar şu şekildedir: LOI (%), B_2O_3 (%), Al_2O_3 (%), CaO (%), MgO (%), Fe_2O_3 (%), Na_2O (%), SrO (%), Li_2O (%), As_2O_3 (%), SO_3 (%), SiO_2 (%), K_2O (%), TiO_2 (%) 'dir. Bu analizlerden bor üretimi için en önemlileri olan B_2O_3 ve Na_2O için analizler gerçekleştirilmiştir. Ortaya konulan incelemeler sonucunda B_2O_3 ve Na_2O

ham özet istatistikleri Çizelge 7’de verilmiştir. Uzunluk ağırlıklı ortalama ile kestirilen metrajları da hesaba katarak daha doğru bir ortalama elde edilmiştir.

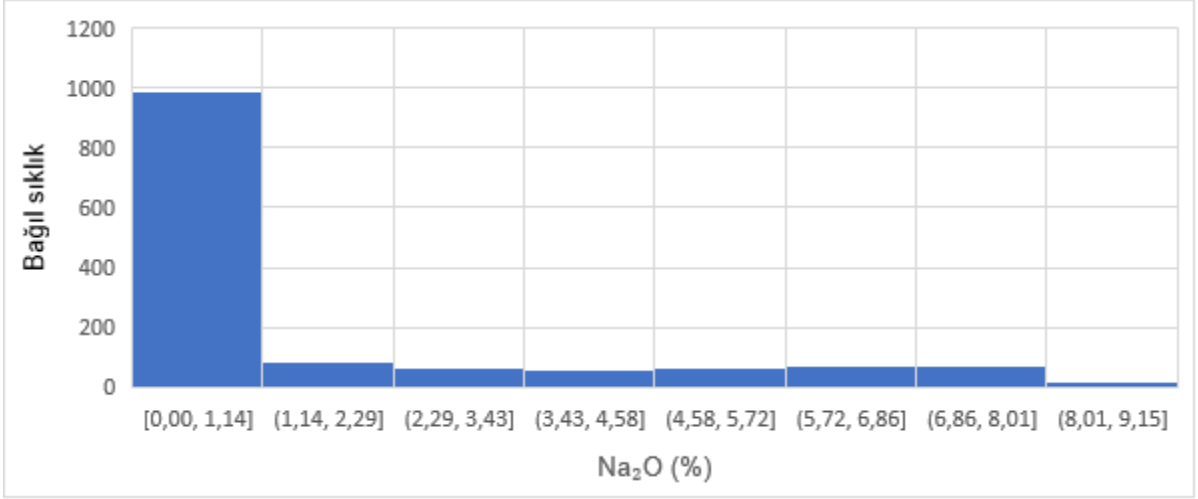
Çizelge 7. Ham verilerin özet istatistikleri

	B ₂ O ₃	Na ₂ O
Veri sayısı	1427	1426
En düşük değer (%)	0,08	0,00
Ortanca (%)	20,81	0,43
Ortalama (%)	20,94	1,67
En yüksek değer (%)	57,11	9,15
Standart sapma	16,38	2,32
Uzunluk ağırlıklı Ortalama (%)	18,52	1,28

Şekil 29’da B₂O₃ ham veri dağılımı tenör histogramı verilmiştir. Çizelge 7’de B₂O₃ ortanca ve ortalama değerleri birbirine yakın olması normal dağılım olabileceğini işaret etmektedir ancak Şekil 29’daki grafikten hareketle % 0,08 ile % 7,21 değeri arası oldukça fazla bir bağıl sıklığa sahiptir ve bu kategori harici zayıf sola çarpıklık görülebilir. Şekil 30’da ise Na₂O ham veri dağılımı tenör histogramı verilmiştir ve güçlü sağa çarpıklık görülebilir.



Şekil 29. B₂O₃ ham veri dağılımı tenör histogramı



Şekil 30. Na₂O ham veri dağılımı tenör histogramı

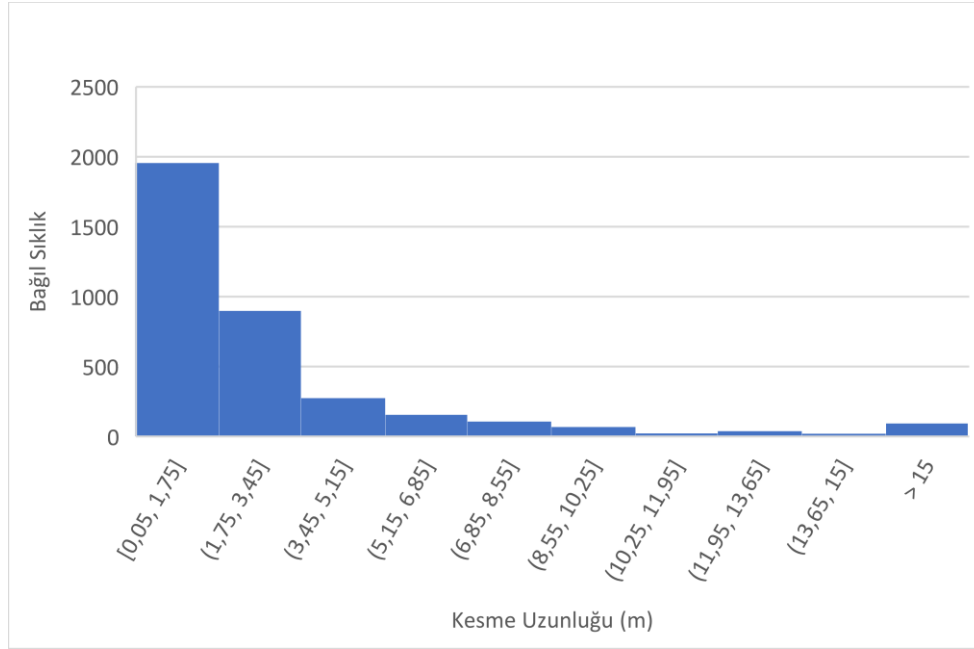
6.3. Veri Tabanı Oluşturulması

Maden kaynak kestiriminin en kritik aşaması veri tabanı oluşturulmasıdır. Sondaj işlemleriyle üretilen veriler kestirim için hayati öneme sahiptir. Bu yüzden yapılacak minimal hatalar bütün kestirim değerlerini etkileyebilir. Öncelikli olarak sondaj loglarının sanal ortama aktarılması gerekir. Kullanılacak program olan için csv. uzantılı dosya yeterli olacaktır. Kestirim için 3 adet ayrı dosya oluşturulmuştur. Bu dosyaların isimleri "collar", "survey", "sample" Bunların içeriğinde: Sondajların isimleri, X-Y-Z kordinatları derinlikleri, sondajların eğim ve eğim yönü açıları (dip, azimut) gibi verileri, numune numarası, kesilen örnek derinliği girişi, kesilen örnek derinliği çıkışı, litolojisi ve 14 farklı bileşik için tenör değerlerini içinde barındırır.

6.3.1. Kompozitleme

Sondaj her formasyonu farklı uzunluklarda keser. Bu farklı uzunluklar kestirimde doğrudan kullanılamaz. Bu yüzden uzunluk ağırlıklı ortalama kullanılarak eşit uzunluklara bölmek gerekir. Belirtilen bu işlem kompozitleme olarak adlandırılır. Kompozit boyunun belirlenmesinde ise her litoloji birim için kestirilen uzunluğun ortalaması alınır [47]. Ham verilerden elde edildiği üzere ortalama kestirim kalınlığı yaklaşık 1 metredir. Bu yüzden 1 metre kompozit boyu olarak alınmıştır. Katı model içinde kalan kompozit verilerinin özet istatistikleri hesaplanmalıdır. Bunun sebebi ise blok modeli doğrulamak için blok model istatistikleri ile katı model içinde kalan özet istatistiklerin kıyaslanması gerekir. Şekil 31'de örnek uzunlukların histogramı,

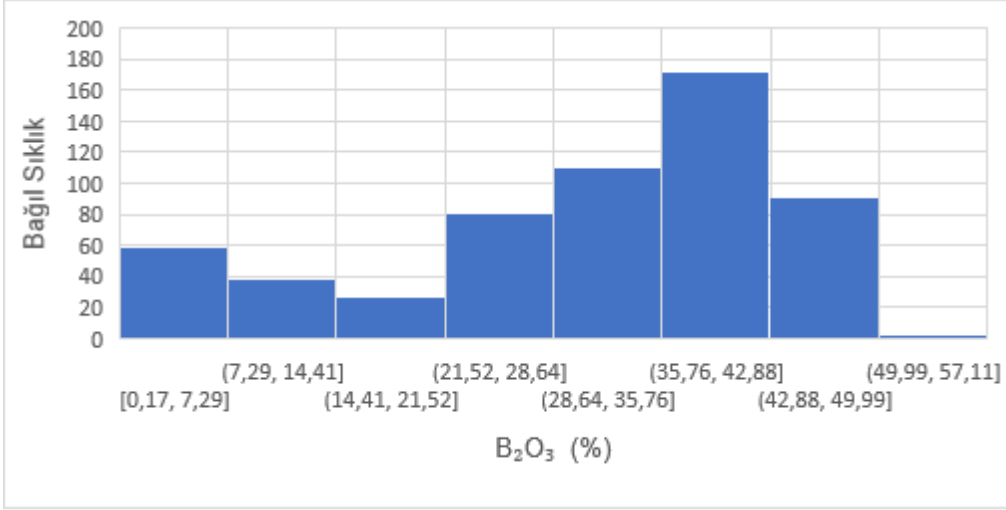
Çizelge 8'de katı model içinde kalan ait tenör istatistikleri ve Şekil 32 ve 33'de katı model içinde kalan B₂O₃ ve Na₂O kompozitlerinin tenör histogramları görülmektedir.



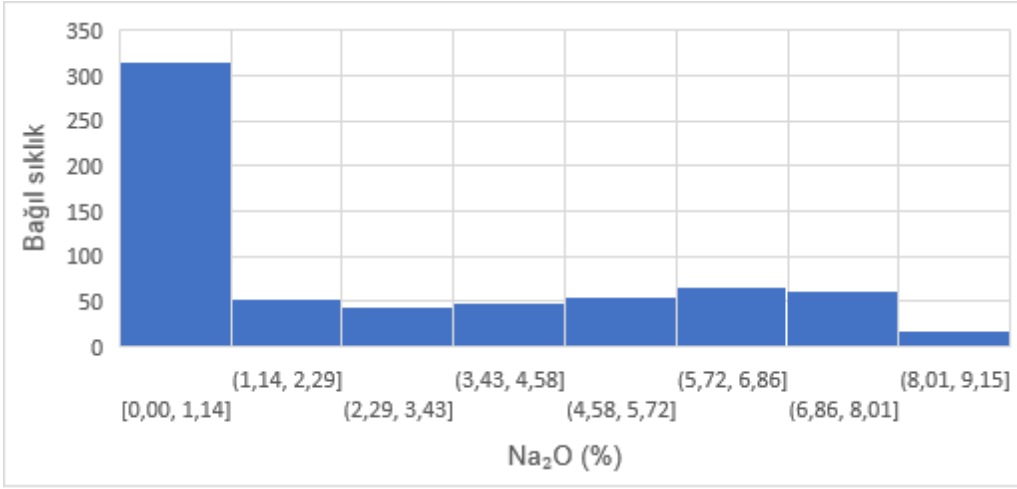
Şekil 31. Örnek uzunlukların histogramı

Çizelge 8. Katı model içinde kalan ait tenör istatistikleri (%)

	B ₂ O ₃	Na ₂ O
Veri sayısı	667	667
En düşük değer (%)	0,17	0,01
Ortanca (%)	33,37	1,93
Ortalama (%)	32,33	2,71
En yüksek değer (%)	48,92	8,37
Standart sapma	9,32	2,53



Şekil 32. Katı model içinde kalan B₂O₃ kompozitlerinin tenör histogramı

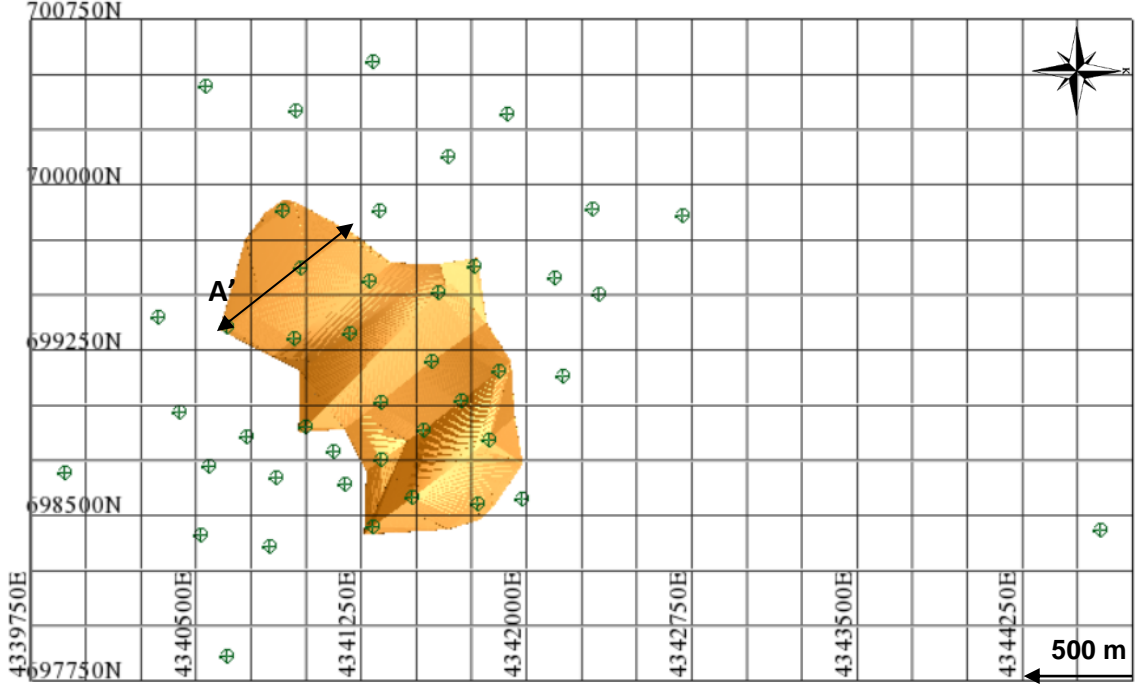


Şekil 33. Katı Model içinde kalan Na₂O kompozitlerinin tenör histogramı

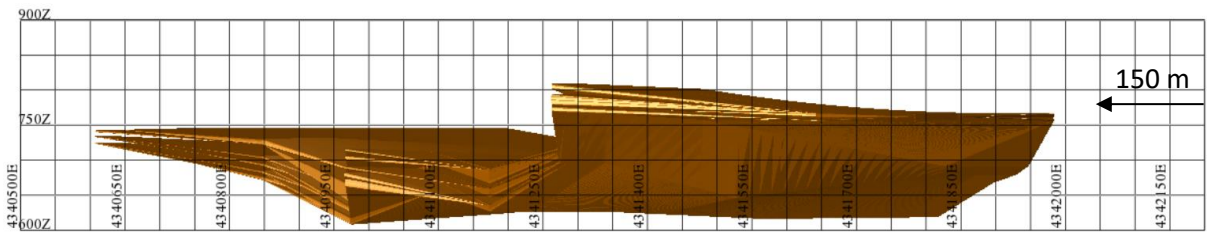
6.4. Jeolojik Yorum ve Modelleme

Katı model oluşturulması için cevher kesilen bölgede birbirine paralel kesitler alınmalıdır. Kesitin yönünde litolojik veriler ve diğer jeolojik bilgiler göz önüne alınıp seçilmelidir. Sahada kuzeydoğu-güneybatı yönünde sondaj sıklığı fazla olduğundan bu doğrultu seçilmiştir. İncelenen sahada kestirilecek olan olan B₂O₃'ün sınır tenörünü %23 kabul edilerek katı modelleme yapılmıştır. Eğer cevher arasına 1 metreye kadar istenmeyen formasyon (kıltaşı, siltaşı vb.) girdiyse, o litolojik birimde katı modelin jeolojik sürekliliğini bozmamak için dahil edilmiştir. Ayrıca jeolojik model içerisinde sürekliliği bozmamak adına sınır tenörden daha düşük B₂O₃ değerleri içeren örneklerde minimal olarak mevcuttur. Şekil 34 ve 35'de oluşturulan katı model

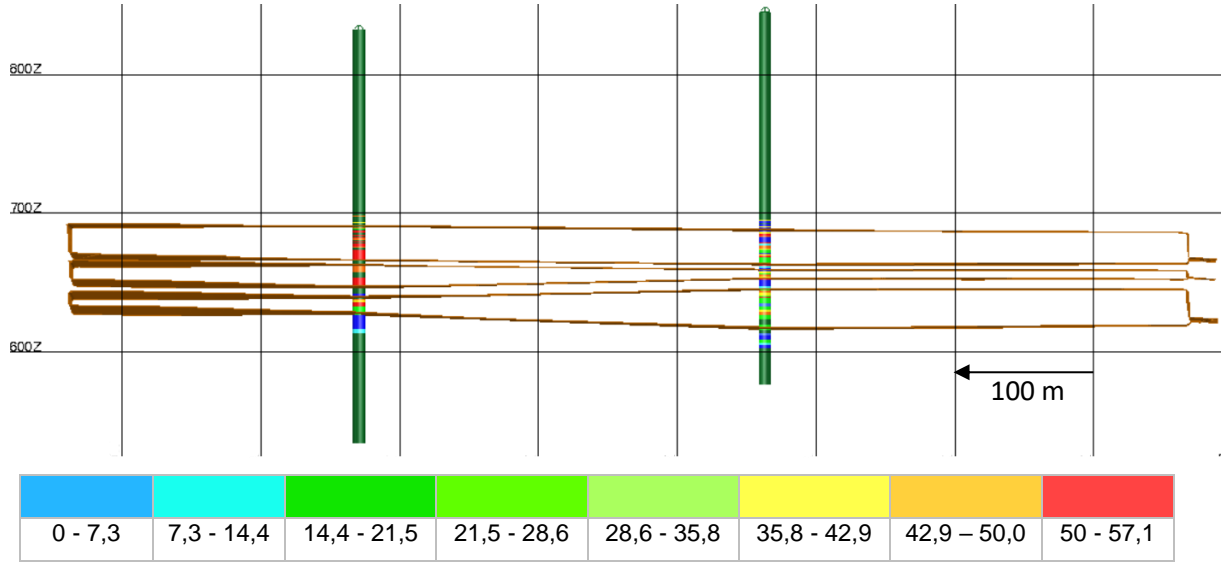
görülmektedir. Katı modelin dışında kalan sondajlar ya cevher kesmemiş ya da kesmişse de katı modele çok uzak olduğu veya oldukça kısa kalınlıkta olduğu için modele alınmamıştır. Şekil 36'de görünen alınmış A' kesitinde kırmızı ve yeşille renklendirilmiş kısım %23 ve üstü tenörlü cevheri, mavi tonlu renklerde düşük tenörlü cevher veya yan kayacı temsil eder.



Şekil 34. Katı modelin plan görünümü



Şekil 35. Katı modelin ZX ekseninden görünümü



Şekil 36. Katı modelin A' kesitinin ZX ekseninden görünümü

6.5. Variogram Analizi ve Doğrulanması

Variogram modellemede öncelikle düşey yöndeki deneysel variogram değerleri hesaplanmıştır. Bunu takiben yatay yöndeki deneysel variogram değerleri hesaplanmıştır. Son olarak düşey ve yatay yöndeki deneysel variogramlara model variogramlar uyarlanmıştır. Bu işlemler bu çalışmanın konusu olan B_2O_3 ve Na_2O için ayrı yapılmış olup diğer değişkenler dikkate alınmamıştır. Çizelge 9 ve 10'da B_2O_3 için Çizelge 12 ve 13'de ise Na_2O için, düşey ve yatay variogramların parametreleri ayrıca Şekil 37, 38, 39 ve 40'da ise variogram modelleri verilmiştir. Ayrıca her iki değişken için de elde edilen variogram modellerinin kestirim için kullanılabilir olduğunu göstermektedir. Çizelge 11 ve 14'de çapraz doğrulama sonuçları gösterilmiştir. Bu tablodan hareketle çapraz doğrulama sonuçları her iki değişken için de elde edilen variogram modellerinin kestirim için kullanılabilir olduğunu göstermektedir.

Çizelge 9. B_2O_3 düşey variogram parametreleri

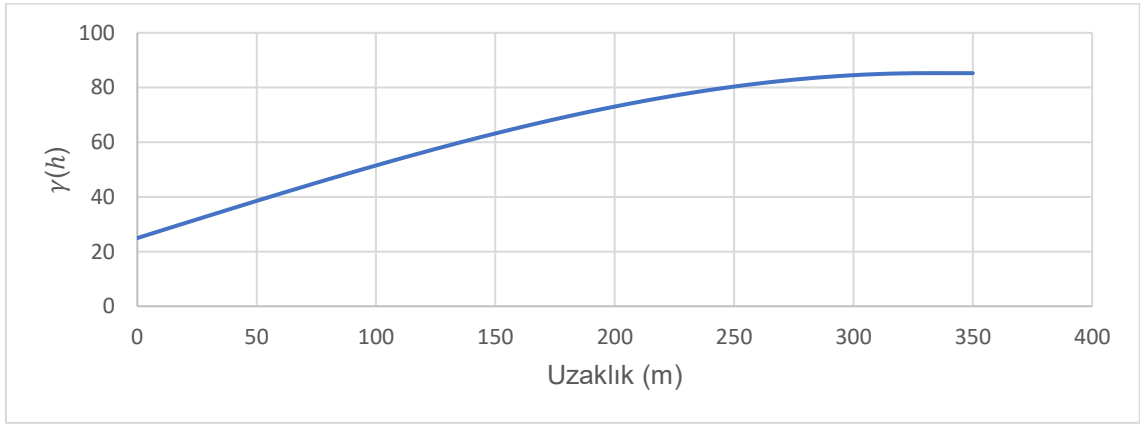
Model	Küresel
Külçe etkisi	24.94
Eşik Değeri	60.31
Yapısal uzaklık (m)	3.85



Şekil 37. B₂O₃ düşey variogram modeli

Çizelge 10. B₂O₃ yatay variogram parametreleri

Model	Küresel
Külçe etkisi	24.94
Eşik Değeri	60.31
Yapısal uzaklık (m)	330



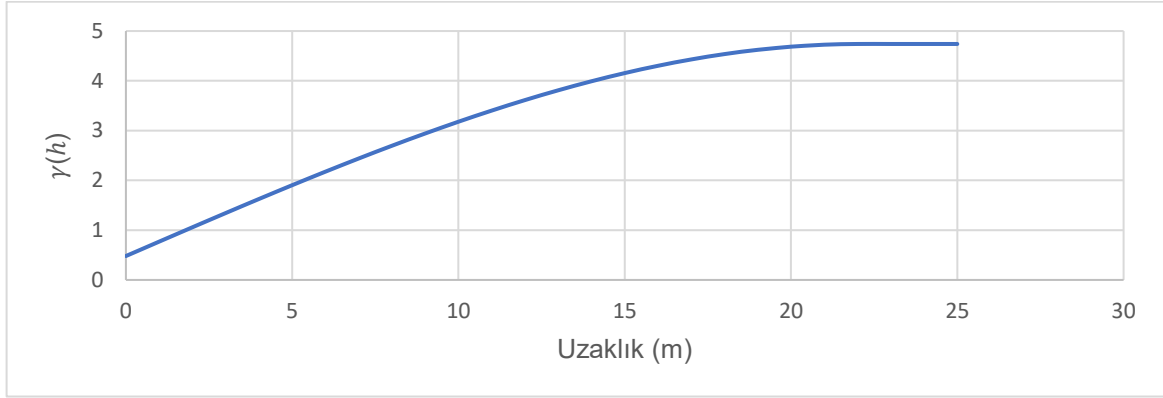
Şekil 38. B₂O₃ yatay variogram modeli

Çizelge 11. B₂O₃ variogramı çapraz doğrulama

Parametre	Değer
Ortalama Hata	0,05
Hataların Varyansı	57,78
Ortalama Krigleme Varyansı	58,66
İki standart sapma arasında bulunması (%)	93,16

Çizelge 12. Na₂O düşey variogram parametreleri

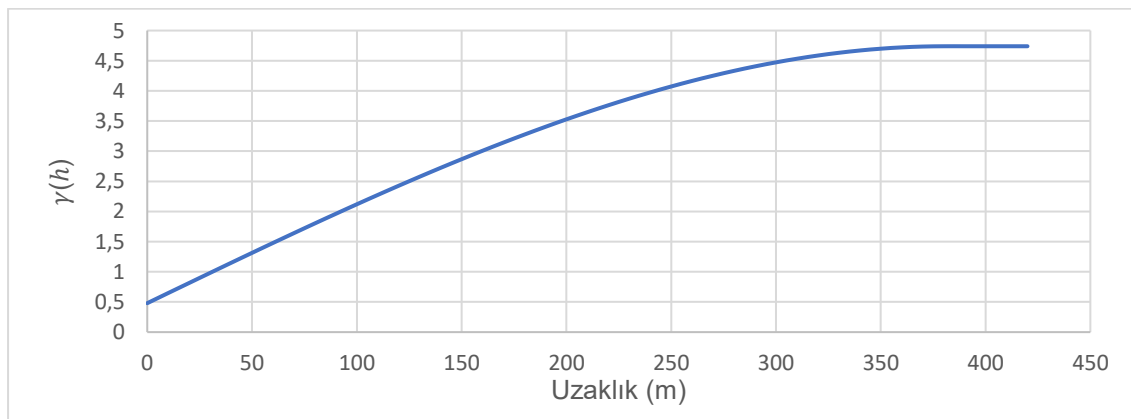
Model	Küresel
Külçe etkisi	0,48
Eşik Değeri	4,26
Yapısal uzaklık (m)	22



Şekil 39. Na₂O düşey variogram modeli

Çizelge 13. Na₂O yatay variogram parametreleri

Model	Küresel
Külçe etkisi	0,48
Eşik Değeri	4,26
Yapısal uzaklık (m)	380



Şekil 40. Na₂O yatay variogram modeli

Çizelge 14. Na₂O variogramı çapraz doğrulama

Parametre	Değer
Ortalama Hata	0,01
Hataların Varyansı	1,31
Ortalama Krigleme Varyansı	1,48
İki standart sapma arasında bulunması (%)	93,02

6.6. Blok Model ve Kestirim

Blok modelleme işleminde belirlenmesi gereken en önemli parametre blok boyutlarıdır. Blok boyutlarının saptanmasında ise olası üretim yöntemi ve kompozit boyları dikkate alınmıştır. Blok modelin “Z” değeri belirlenen kompozit değerinden düşük olmamalıdır. Düşük olması halinde tenör sürekliliğinin tespiti doğru olmaz. İkinci kriter ise üretim yöntemidir. Blok modelin değerleri üretim için uygun olmalıdır ve bu kaynak derinlik göz önünde bulundurulduğunda açık ocak ile çıkarılması öngörülmüştür. Belirtilen kriterler göz önünde bulundurularak blok boyutları basamak yüksekliği ve genişliği ayrıca kullanılacak araçlar göz önünde bulundurularak 10*10*5 metre alınmıştır. Kestirim yapılan blokların özkütlesi 2,3 t/m³ olarak alınmıştır.

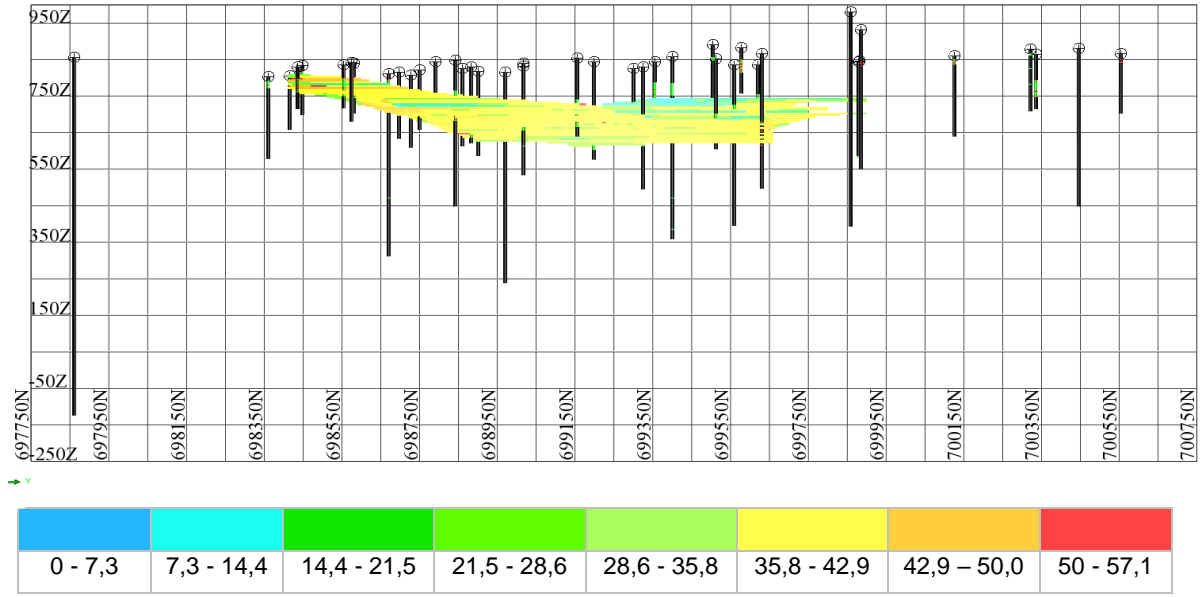
6.6.1. Bor Oksit (B₂O₃) tenörünün kestirimi

Bor Oksit'e ait kestirim parametreleri ve blok modeli görünümleri şu şekildedir:

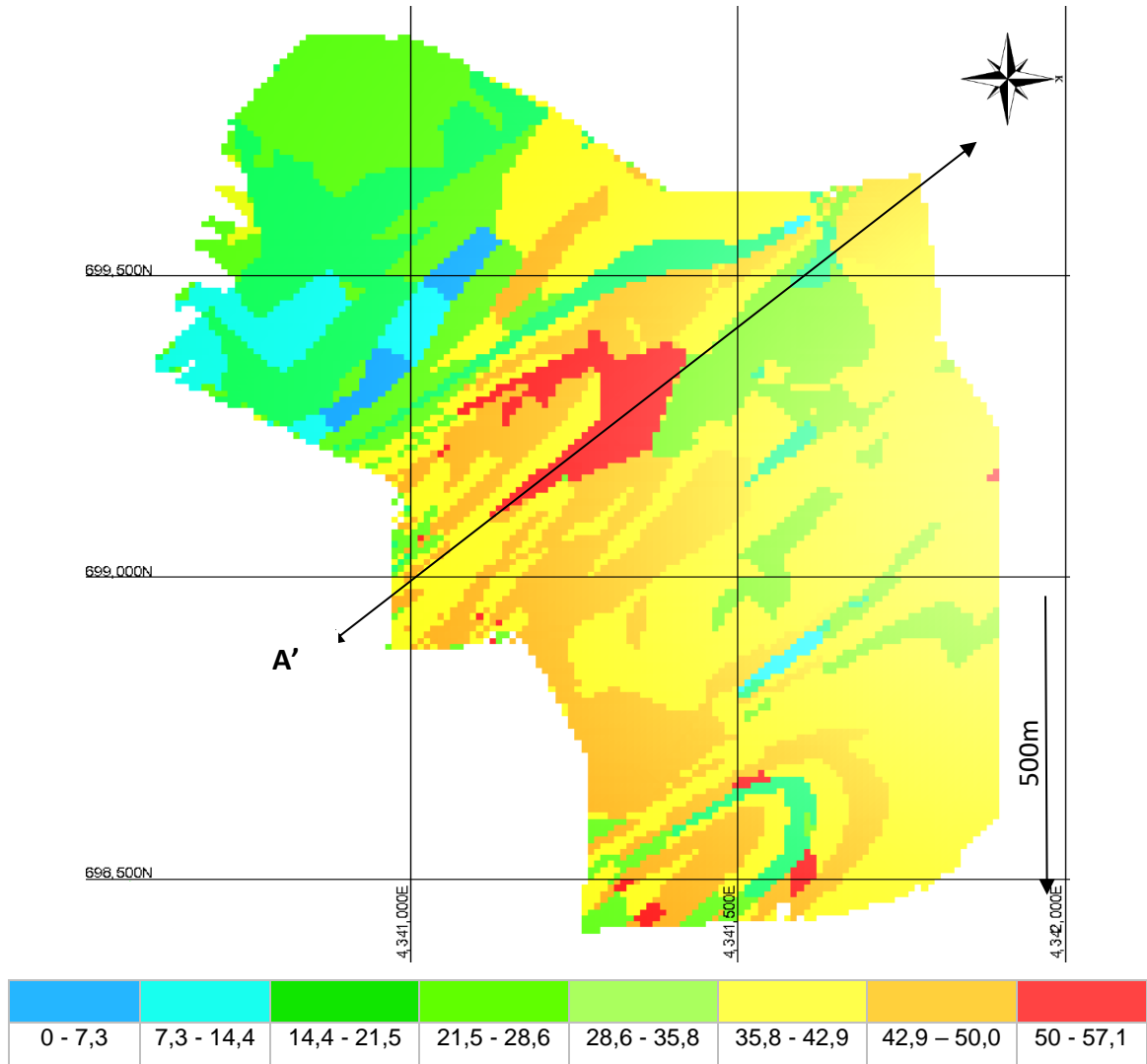
Çizelge 15 ve 16'da ki parametreler arama elipsoidinin sınırlarını belirlemek için büyük bir öneme sahiptir. Arama elipsoidi, krigleme ile kestirimi için verilerin ne kadar uzakta aranacağını belirler. Maksimum mesafe elipsoidin genişliğini, düşey arama mesafesi ise yüksekliğini belirtir. Anizotropi oranı ise bu verilerin birbirine bölünmesiyle bulunur. Şekil 41, 42 ve 43'de blok modelin görselleri verilmiştir.

Çizelge 15. B₂O₃ kestirim parametreleri

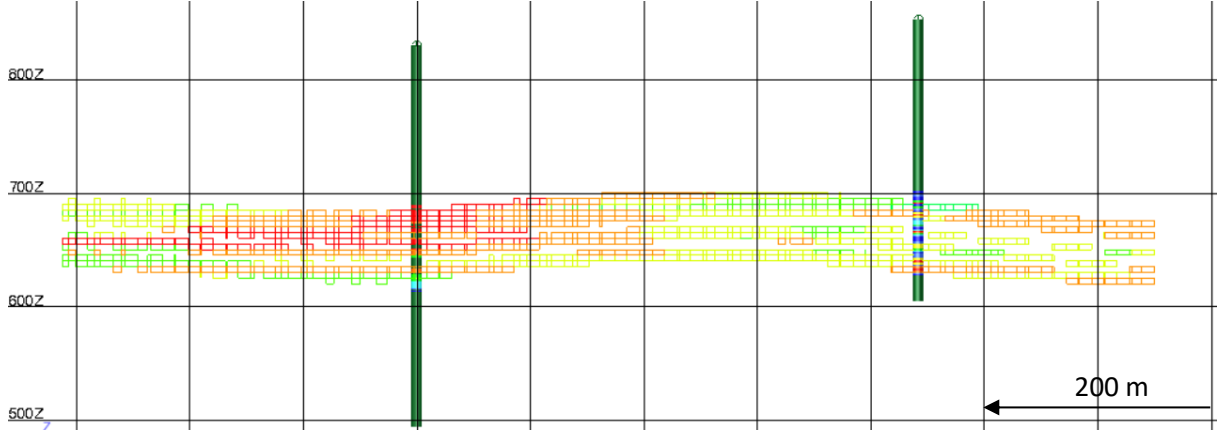
Anizotropi oranı	82
Maksimum Mesafe (m)	350
Maksimum düşey arama mesafesi (m)	5
Dalma açısı (°)	0



Şekil 41. B₂O₃ kestirilen blok modelinin YZ ekseninden görünümü



Şekil 42. B₂O₃ kestirilen blok modelinin plan görünümü



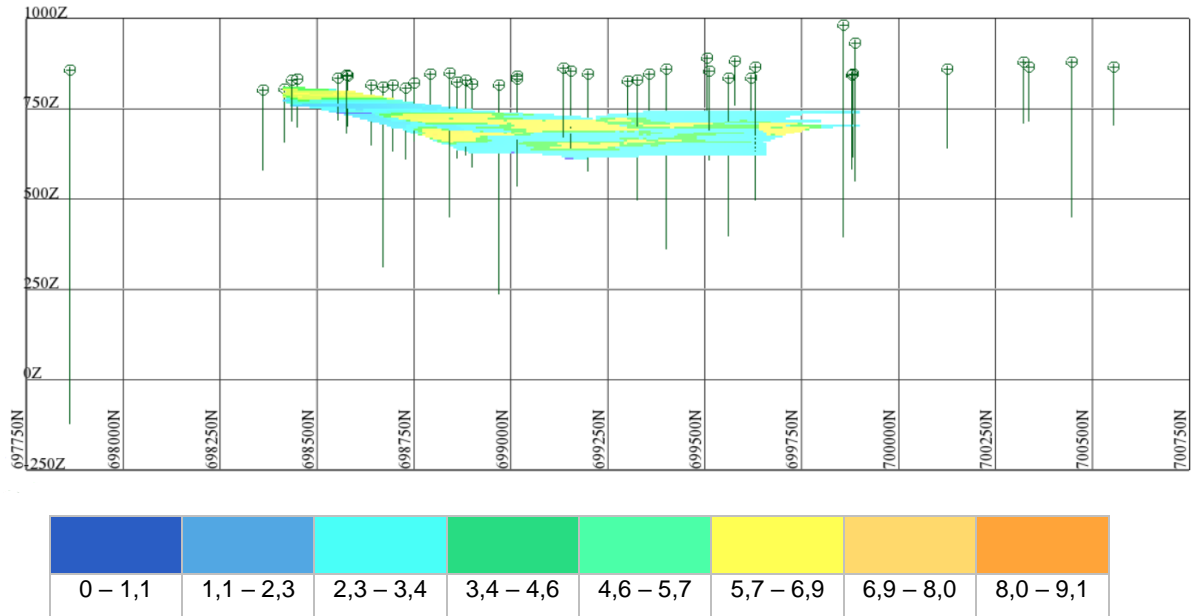
Şekil 43. B₂O₃ kestirilen blok modelinin A' kesitinin ZX ekseninden görünümü

6.6.2. Sodyum Oksit (Na₂O) tenörünün kestirimi

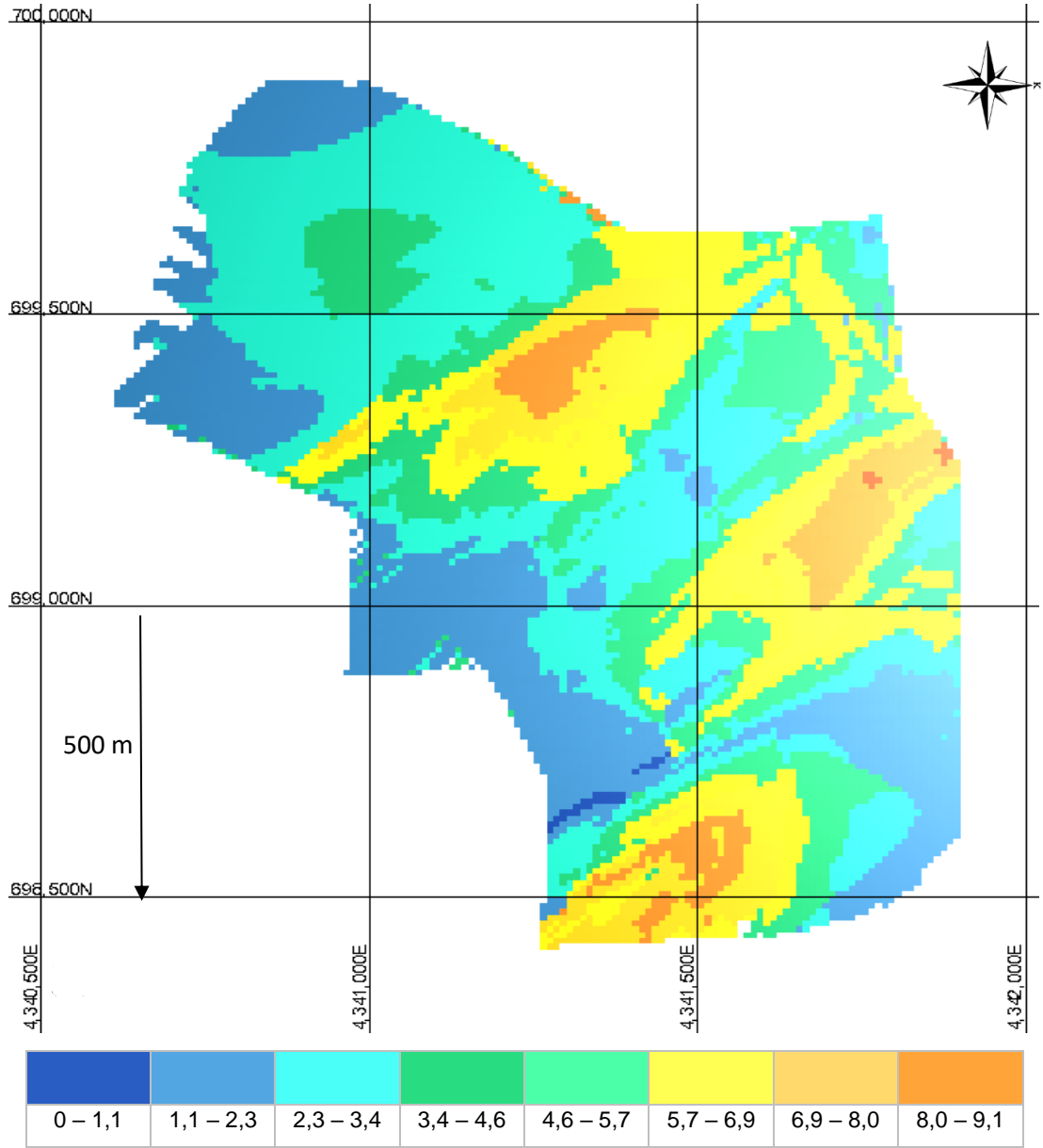
Sodyum Oksit'e ait kestirim parametreleri Çizelge 16'da, kestirilen blok modelin görünüşleri ise Şekil 44 ve 45'de verilmiştir.

Çizelge 16. Na₂O kestirim parametreleri

Anizotropi oranı	18
Maksimum Mesafe (m)	381
Maksimum düşey arama mesafesi (m)	23
Dalma açısı (°)	0



Şekil 44. Na₂O kestirilen blok modelinin ZY ekseninden görünümü



Şekil 45. Na₂O kestirilen blok modelinin YX ekseninden görünümü

6.6.3. Blok Modelin Doğrulanması

Kestirim işlemi yapıldıktan sonra doğrulanması gerekmektedir. Bu yüzden blok model özet istatistikleri ile kompozitin özet istatistikleri kıyaslanarak yapılmıştır. Kestirimlerin ortalamalarının, kompozit ortalamalarına uzaklığı \pm %5 aralığında olması durumunda kestirimlerin kabul edilebilir olduğu varsayılmıştır. Buna ek olarak yönelim analizleri de yapılmış olup kestirimlerde yöne bağlı olarak bir sapma olmadığı ortaya koyulmuştur. Çizelge 17 ve 18'de B₂O₃ ve Na₂O için özet istatistikleri verilmiştir.

Katı modeller içinde kalan ham veriler ile kompozit verileri kıyaslandığında istatistiklerinde farklılık gözlemlenir. Diğer bir deyişle krigleme ile üretilen kestirim değerlerin en düşük değeri kestirimde kullanılan en düşük değerden yüksektir. Benzer şekilde kestirimin en yüksek değeri ise kestirimde kullanılan değerlerin en yüksekinden düşüktür. Kriglemenin bu yumuşatma özelliği oldukça iyi bilinmektedir. Kriglemenin yumuşatma özelliğinden blok model standart sapmaları, kompozit standart sapmalarından düşük çıkmıştır. Ayrıca çizelgelerden ortanca ve ortalama değerler birbirine oldukça yakın çıkmıştır.

Çizelge 17. B₂O₃ için özet istatistikler

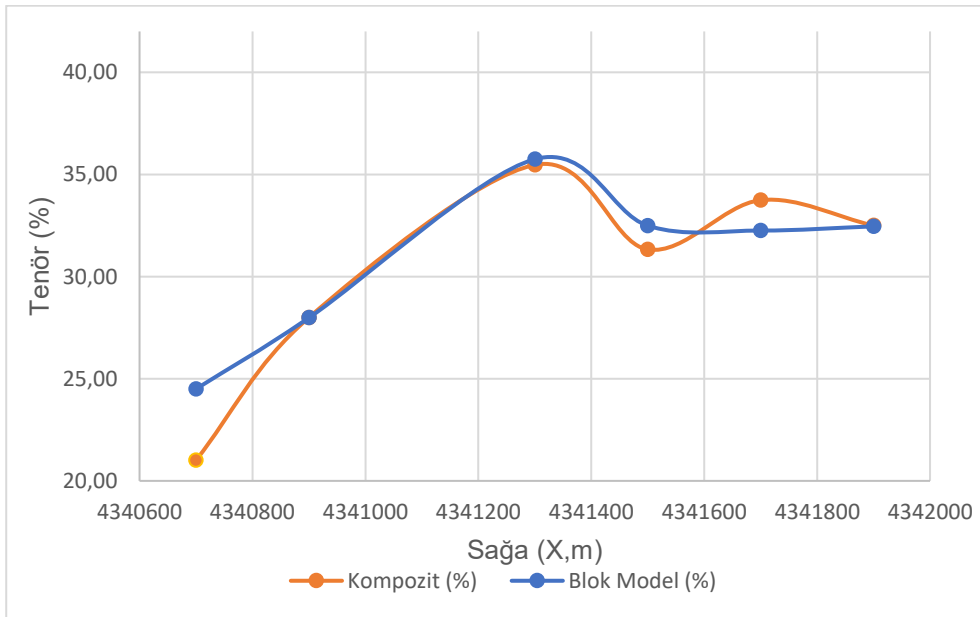
	Katı model içinde kalan ham veri istatistikleri	Katı model içinde kalan kompozit verisi istatistikleri	Blok model istatistikleri
Veri sayısı	581	667	82015
En düşük (%)	0,17	0,17	10,09
Ortanca (%)	34,05	33,37	33,09
Ortalama (%)	30,48	32,33	32,89
En yüksek (%)	57,11	48,92	44,92
Standart sapma	13,28	9,32	4,85

Çizelge 18. Na₂O için özet istatistikler

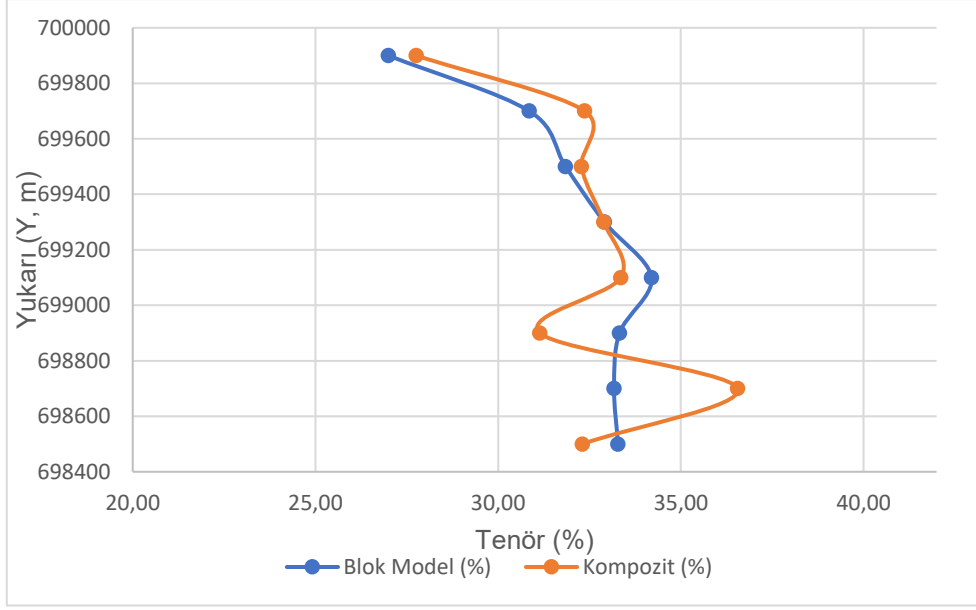
	Katı model içinde kalan ham veri istatistikleri	Katı model içinde kalan kompozit verisi istatistikleri	Blok model istatistikleri
Veri sayısı	580	667	82015
En düşük (%)	0,01	0,01	0,08
Ortanca (%)	2,34	2,93	2,91
Ortalama (%)	3,11	2,91	2,92
En yüksek (%)	9,15	8,37	7,09
Standart sapma	2,78	2,53	1,62

6.6.3.1 Yönelim Analizi

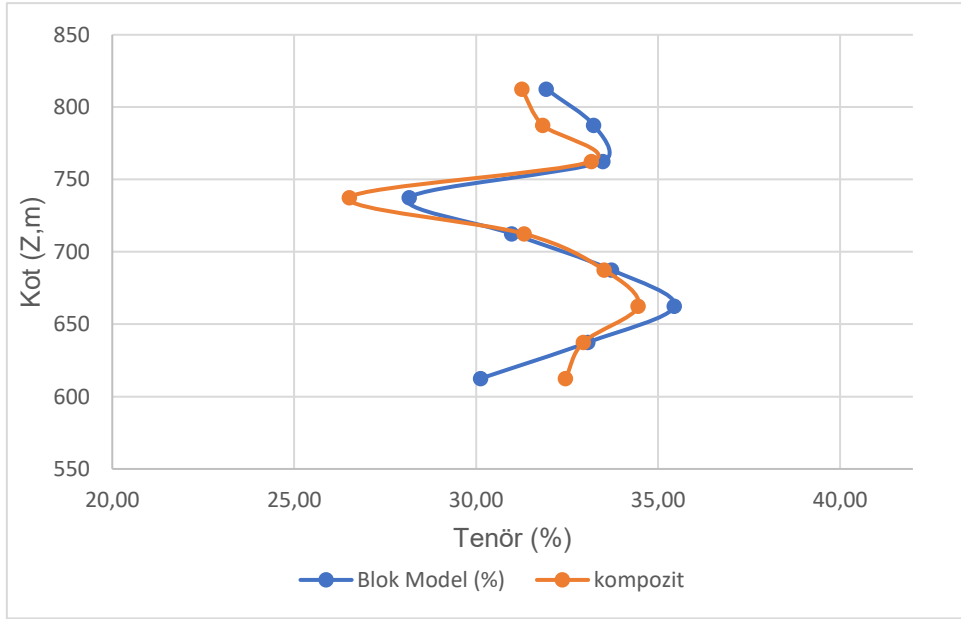
Yönelim analizi ya da trend analizi şöyle açıklanabilir. İncelenen sahanın eksenleri ya da eksenlerinde, belirli koordinat aralıklarında oluşturulmuş kompozit verilerini ve blok model verilerinin ilişkisini veya yönelimlerini inceler. Proje sahası için B_2O_3 ve Na_2O için X, Y, Z eksenlerinde yönelim analizi ortaya konulmuştur. X yönü için 200'er metrelik aralık ile 7 dilime ayrılmış. Y yönü için 200'er metrelik aralık ile 8 dilime ayrılmış ve Z yönü için ise 25'er metrelik 10 dilime ayrılıp incelenmiştir. B_2O_3 için yönelim grafikleri (Şekil 46, Şekil 47 ve Şekil 48) ve Na_2O için yönelim grafikleri (Şekil 49, Şekil 50 ve Şekil 51) incelendiğinde belirgin bir trend gözlemlenmemiştir. Yönelim analizleri incelendiğinde her iki değişken için de kestirim ve kompozit değerler oldukça benzer çıkmaktadır. Bu durum, kestirimlerin yansız olduğunu göstermektedir. Kestirimleri doğrulama amacı ile yapılan tüm çalışmalar neticesinde, elde edilen kestirim değerlerinin kaynak modelde kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.



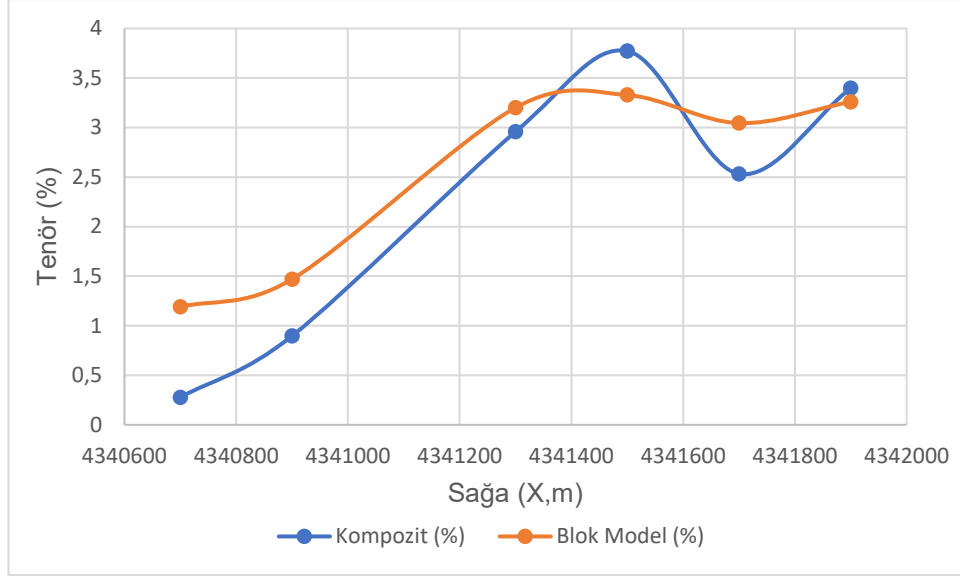
Şekil 46. B_2O_3 X yönündeki yönelim grafiği



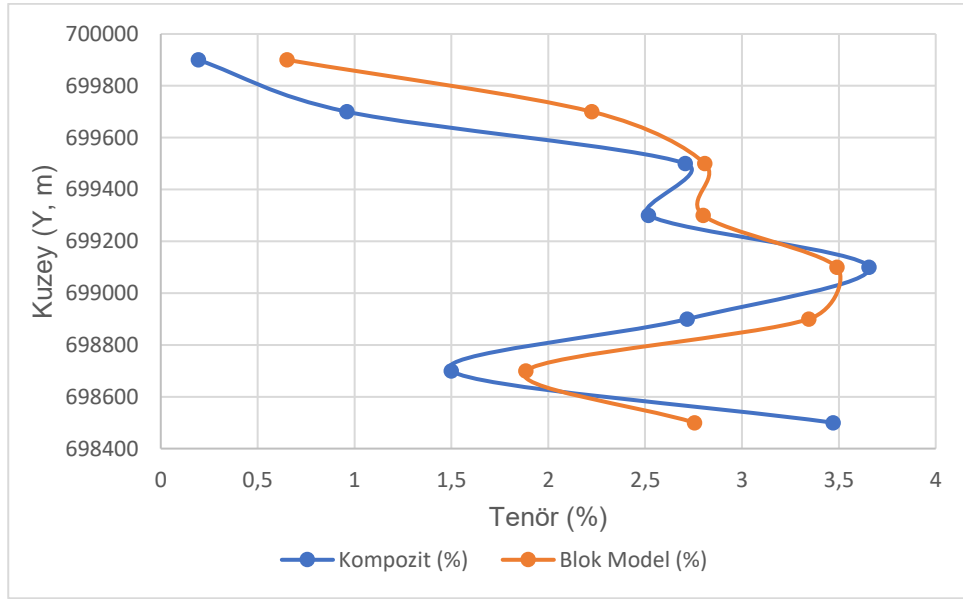
Şekil 47. B₂O₃ Y yönündeki yönelim grafiği



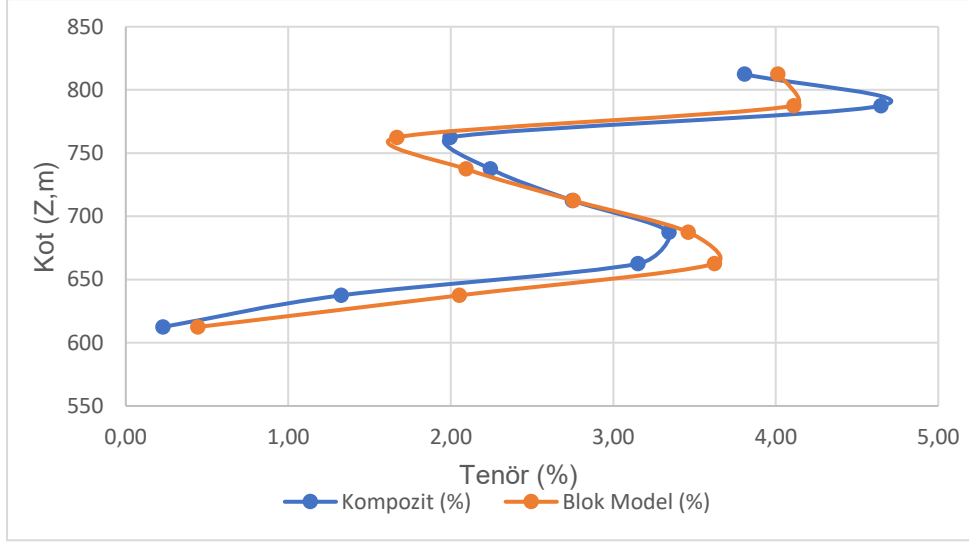
Şekil 48. B₂O₃ Z yönündeki yönelim grafiği



Şekil 49. Na₂O X yönündeki yönelim grafiği



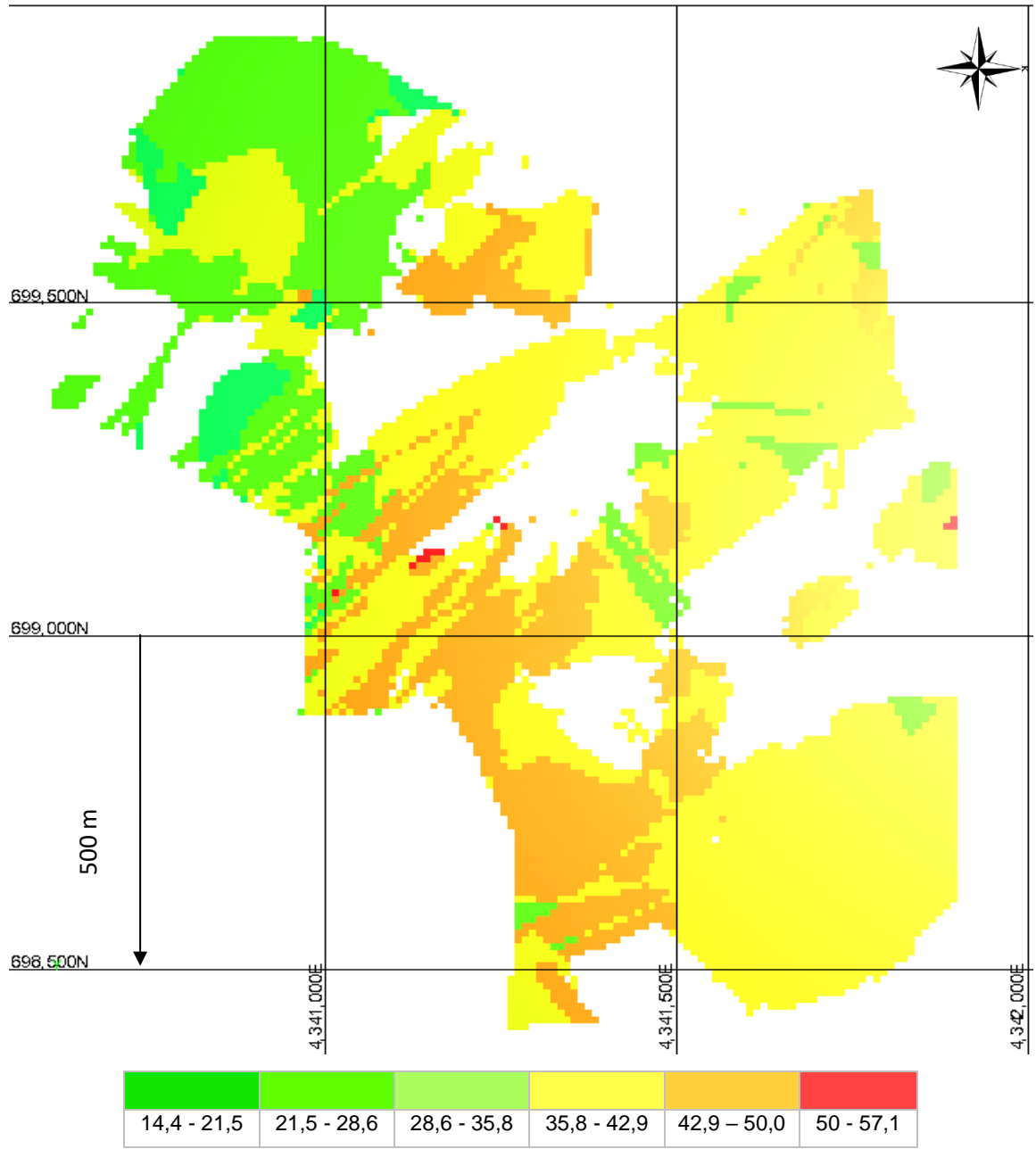
Şekil 50. Na₂O Y yönündeki yönelim grafiği



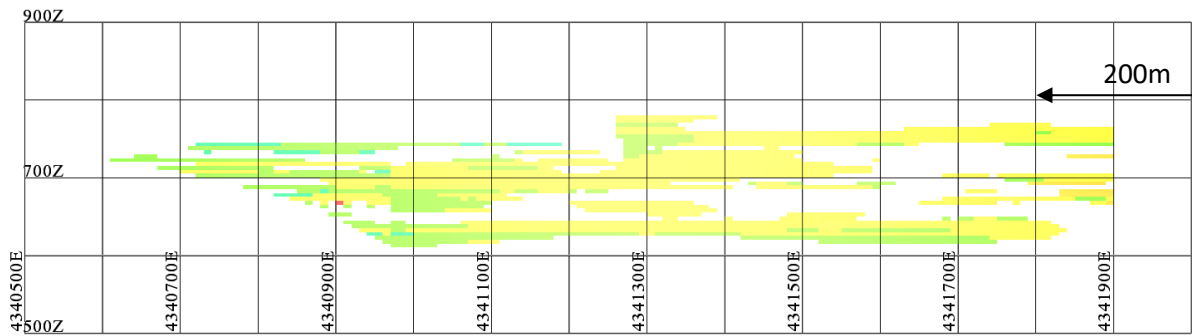
Şekil 51. Na₂O Z yönündeki yönelim grafiği

6.7. Kaynak Model

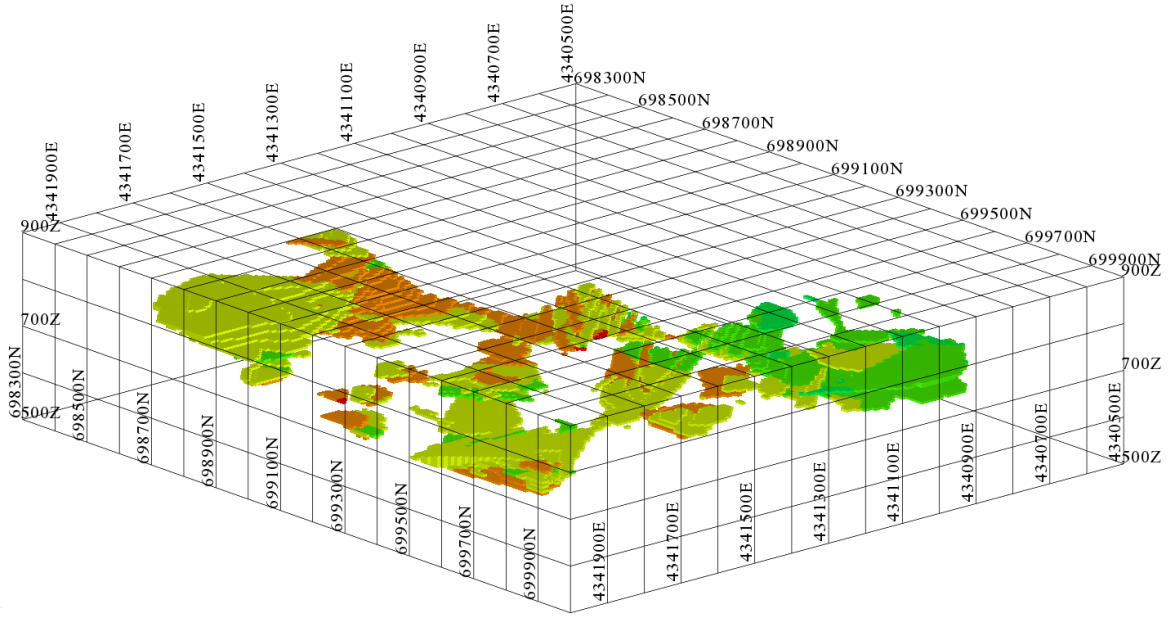
Bölgedeki maden kaynak kestirim işlemleriyle birlikte B₂O₃ için %23 ve üstü ve Na₂O için %1,5 altı sınır tenörleri uygulandığında 22 milyon 150 bin ton cevher ve ortalama %32,37 B₂O₃, %0,79 Na₂O tenöre sahip kaynak model oluşturulmuştur. Ayrıca B₂O₃ için %23 üstü ve Na₂O için herhangi bir sınır tenörü uygulanmadığından 90 milyon ton civarında cevher ve ortalama tenörü %32 civarındadır. Cevher oluşumu çok derinlerde gözlemlenmediğinden ve ekonomiklik ve iş güvenliği bakımından bölgede açık ocak madenciliği yapılması daha uygun bir seçenektir. Kaynak model 775 metre kotundan 600 metreye kadar bir yayılım gösterir. Yaklaşık 175 metre bir yüksekliği vardır. Genişliği ise 1000x1500 metrelik bir alana yayılır. Kaynak modelin yüzeye olan yakınlığı sebebiyle açık ocak madenciliğinin uygunluğu daha muhtemeldir. Bu çalışma kapsamında açık ocak madenciliğini olumsuz yönde etkileyici herhangi bir ekonomik, sosyal, hidrojeolojik ve diğer teknik bir engelin bulunduğu bilgisi mevcut değildir. Şekil 52, 53 ve 54'deki kaynak modelin görselleri incelendiğinde sınır tenör üzerindeki bor kaynağı yer yer izole bölgelere sahip olduğu gözlenmektedir. Bu bölgelerin yer yüzüne yakın olması, kaynağın diğer bölümlerinin üretilmesi için kazılmasının zorunlu olması nedeni ile bu kısımlar kaynak modelden çıkarılmamıştır. Kestirilen modelde, kaynak sınıflandırılması yapılmamıştır, ileri dönemlerde sondaj sayısının artırılması, sahada toplanan örneklerin kalite kontrol kalite güvencesinin sağlanması ile birlikte kaynak sınıflamasının da yapılması önerilmektedir.



Şekil 52. Kaynak modelin plan görünümü



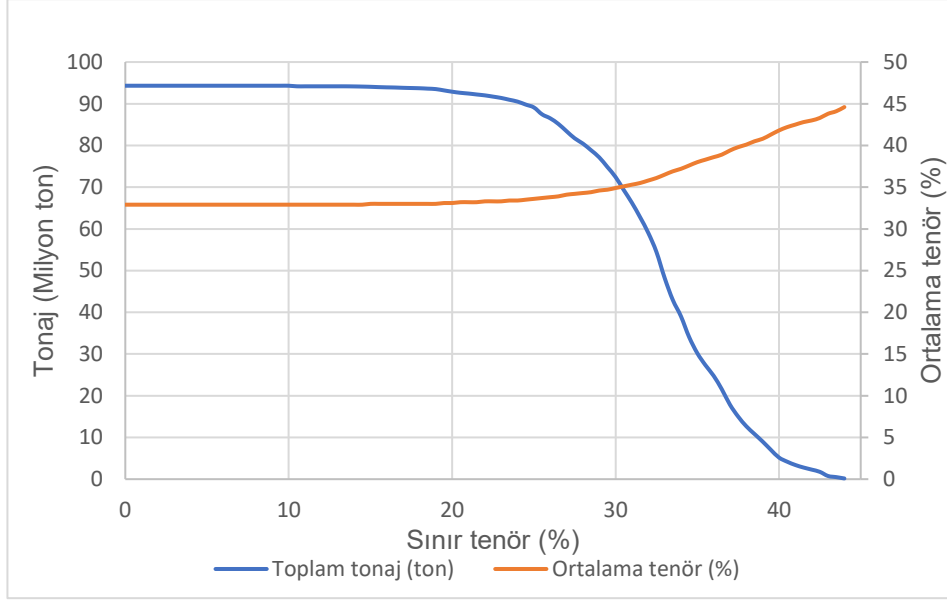
Şekil 53. Kaynak modelin ZX ekseninden görünümü



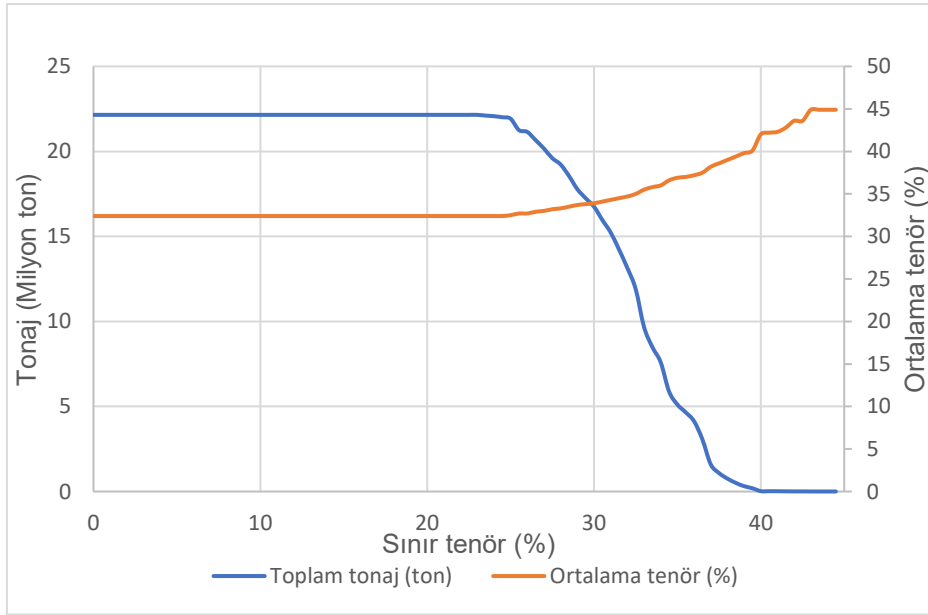
Şekil 54. Kaynak modelin genel görünümü

6.8. Tenör-Tonaj Eğrisi

Tenör-tonaj eğrisi kaynak kestirimi için en kullanışlı araçlardan biridir [48]. Tenör-tonaj eğrisi, belirlenen bir sınır tenörün, tonajını ve ortalama tenörünün ve bunların değişimlerini gösteren 3 eksenli bir grafikdir. Sınır tenör değeri artırıldığında, cevher miktarının azalması ve ortalama tenörün ise artması beklenir. Bu değişimlere göre işletmenin açılıp açılmayacağına veya açılmış ise hangi yöntem ile devam edeceği hakkında rehber veriler içerir [22]. Şekil 55'de blok modelin Şekil 56'da ise kaynak modelin tenör-tonaj eğrisi verilmiştir. Kaynak model, blok modele göre tenör değişimine daha hassastır. Bunun sebebi ise uygulanan sınır tenörlerdir. Kaynak modelinin tenör-tonaj eğrisinden hareketle, yüksek tenörlü bölgeler genellikle daha düşük tonajlara sahiptir. Bu yüksek tenörlü ancak sınırlı tonajdaki zonların ekonomik olabileceğini gösterir. Ayrıca üretime bu bölgelerden başlanması şirket ve paydaşları için önemlidir.



Şekil 55. Blok modelin tenör-tonaj eğrisi



Şekil 56. Kaynak modelin tenör-tonaj eğrisi

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Tez çalışması kapsamında Eti Maden şirketine ait Dereköy-Şeyhler sahasında B_2O_3 ve Na_2O değişkenleri için maden kaynak kestirimi yapılmıştır. Sondaj verileri, öncel çalışmalar ve raporlar incelenmiş ve dijital veri tabanı oluşturulmuştur. Jeolojik raporlar, sınır tenör değerleri göz önüne alınarak katı modelleme yapılmıştır. Oluşturulan katı model incelendiğinde cevherleşme yönünün kuzeybatı-güneydoğu yönünde olduğu görülmüştür ve kompozitleme işlemi yapılarak özet istatistiksel ortaya konulmuştur. Ardından katı model içinde kalan kompozit ayıklanmış ve bu veri variogram analizi için kullanılmıştır. Kestirilecek olan iki ayrı değişken içinde düşey ve yatay yönde variogram modellenmiştir. Sonrasında çapraz doğrulama yöntemiyle elde edilen variogram modellerinin kabul edilebilirliği belirlenmiştir. Blok model oluşturulmasında çeşitli faktörler göz önüne alınarak 10x10x5 metre boyutlarındaki bloklar katı modelin içine yerleştirilmiştir. Diğer aşama olan kestirim kısmında ortalamasız krigleme yöntemiyle B_2O_3 ve Na_2O tenörü için kestirim yapılmıştır. Ardından ikisi içinde yönelim analizi alınıp, B_2O_3 için de tenör-tonaj eğrisi oluşturulmuştur. Kestirilen bu iki değişkenin sınır tenörleri sırasıyla %23 ve üstü ve %1,5 ve altı alınmıştır. Alınan bu sınır değerleriyle kaynak model oluşturulmuştur. Çalışma sonucunda kaynak modelde ortalama %32,37 B_2O_3 ve % 0,79 Na_2O içeren 22.150.000 ton cevher belirlenmiştir. Son olarak kaynak modelin tekrar tenör-tonaj eğrisi ortaya koyulmuştur.

İncelenen saha ile ilgili öneriler şu şekildedir.

- Blok modelin bazı noktaları çok uzak kaldığından kestirilememiş ve etki mesafesi artırılmıştır. Bu yüzden bazı uzak noktalar için toplanan sondaj verileri yetersiz kalmıştır. Ortalama sondajlar arası mesafe 250 metre civarındadır. Daha doğru bir kestirim için ek sondaj yapılması gerekir.
- Cevher zenginleştirme işlemlerinde %1,5 üstü Na_2O 'lu bor mineralleri, zenginleştirilme işlemini zorlaştırdığı ve kalitesini düşürdüğünden sınır tenör %1,5 olarak alınmıştır. Fakat alınan bu sınır tenör birçok yüksek tenörlü cevherin kaynak modele alınmamasına yol açmıştır. İlerleyen dönemlerde Na_2O sınır tenörü düşmesi yatağın potansiyelinde artırır nitelikte olacaktır.

- Bu alışmada Na_2O ve B_2O_3 değişkenleri ayrı ayrı ele alınmiş olup, aralarındaki ilişki incelenmemiştir. Elde edilen kestirim sonuçlarının, bu değişkenler arasında, eğer varsa, ilişkiyi koruyup korumadiğı incelenmemiştir. İlerleyen çalışmalarda bu ilişkilerin incelenmesi tavsiye edilmektedir.
- Kestirim esnasında zktle olarak $2,3 \text{ t/m}^3$ alınmiştir. Sondaj karotlarının analizi esnasında zktle değerleride öznelik olarak eklenmesi kestirilen tonaj'ın doğrululuğunu arttıracaktır.

8. KAYNAKLAR

- [1]Kılınç, E., H. Mordoğan, and M. Tanrıverdi. "Bor minerallerinin önemi, potansiyeli, üretimi ve ekonomisi." Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu 18 (2001): 19.
- [2] Tercan, A. Erhan, Seyfi Kulaksız, and Ahmet Şentürk. "Tülovası Borat Yatağı Rezervinin Jeostatistiksel Kestirimi." Bilimsel Madencilik Dergisi 33.2 (1994): 19-24.
- [3] <https://www.etimaden.gov.tr/bor-elementi>, (Erişim tarihi 17.03.2022)
- [4] Kistler R.B., Helvacı C., 1994, "Boron and Borates", Industrial Minerals and Rocks, 6. Editin, Society of Mining, Metallurgy and Exploration Inc., pp 171-186
- [5]Nezahat, E. D. İ. Z., and Hüseyin ÖZDAĞ. "Bor mineralleri ve ekonomisi." Journal of Science and Technology of Dumlupınar University 002 (2001): 133-151.
- [6] Davy, Humphry. "III. The Bakerian Lecture. An account of some new analytical researches on the nature of certain bodies, particularly the alkalies, phosphorus, sulphur, carbonaceous matter, and the acids hitherto undecomposed; with some general observations on chemical theory." Philosophical Transactions of the Royal Society of London 99 (1809): 39-104.
- [7] www.etimaden.gov.tr/bor-mineralleri, (Erişim tarihi: 19.03.2022)
- [8] Eti Maden Bor Sektör Raporu, 2020
- [9] <https://www.etimaden.gov.tr/kolemanit>, (Erişim tarihi 20.03.2022)
- [10] <https://www.etimaden.gov.tr/uleksit>, (Erişim tarihi 20.03.2022)
- [11] <https://www.etimaden.gov.tr/tinkal>, (Erişim tarihi 20.03.2022)
- [12] Poslu K., Aslan İ.H., 1995, "Dünya Bor Mineralleri ve Bileşikleri Üretiminde Türkiye'nin Yeri", Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu, İzmir/Türkiye, s 33-42
- [13] Tolun R., 1988, "Anorganik Bor Bileşikleri ve Üretim Teknolojisi", TÜBİTAK-MAE, Kimya Araştırma Bölümü Yayını, 65 s.
- [14] Bulutçu N., 1996, "Türkiye'de Bor Bileşikleri Üretim Teknolojisinin Dünü, Bugünü ve Geleceği", Bor Bileşikleri Üretim Teknolojileri Araştırmaları Danışma Toplantısı, TÜBİTAK-MAM, Gebze
- [15] HELVACI, Cahit. "Türkiye borat yatakları jeolojik konumu, ekonomik önemi ve bor politikası." Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 5.1 (2003): 4-41.
- [16] Aristarain, L., F., ve Hurlburt, C., S. Jnr., 1972. Boron minerals and deposits. Part I-Uses, distribution and economic minerals of boron. Part II-Geological environments and classification of boron deposits: Min. Record, 3, 165-220
- [17] Watanabe, T., 1964. Geochemical cycle and concentration of boron in the earth's crust: V.I. Verdenkii Inst. Geochim and Anal. Chem. U.S.S.R., 2, 167-177.
- [18] Madencilik Türkiye Dergisi, Bor Yataklarının Mineral ve Kimyası, Haziran 2015, sayı 47, sayfa 68.
- [19] Yenmez N., Straterik Bir Maden Olarak Bor Minerallerinin Türkiye İçin Önemi, 2003

- [20] European Commission, Study on the EU's list of Critical Raw Materials–FinalReport, 2020
- [21] Eti Maden 2016 Faaliyet Raporu
- [22] Mineral Commodity Summaries 2022 - Boron (usgs.gov)
- [23] D. Krige, W. Kleingeld, The genesis of geostatistics in gold and diamond industries, Lecture Notes in Statistics, vol 183. Springer, New York,2005, p 22-34
- [24] A.G. Journel and C.H. J Huijbregts, Mining geostatistics, Academic Press, 10 p.,1978
- [25] Clark I (1979) Practical Geostatistics, First Edit. 119.
- [26] A.G. Journel, Nonparametric estimation of spatial distribution, Mathematical Geology, Volume 15, Number 3, pp. 445–468, 1983
- [27] A. E. Tercan ve C. Saraç, Maden Yataklarının Değerlendirilmesinde Jeostatistiksel Yöntemler, Jeoloji Mühendisleri Odası Yayınları, Ankara,1998
- [28] J. P. Ciles, P. Delfiner, Geostatistics: Modeling Spatial Uncertainty (Wiley Series in Probability and Statistics), A Wiley-Interscience Publication, New York, 1999
- [29] G. Ertunç, Kovaryans Eşlemeli Krigleme Yöntemi ile Kaynak Kestirimi, Doktora Tezi, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2013.
- [30] G. Matheron, Principles of Geostatistics. Economic Geology, 58, 1246-1266,1963
- [31] A.G. Journel and C.H. J Huijbregts,Mining geostatistics, AcademicPress, 10 p.,1978.
- [32] K. Erarslan, Maden Değerlendirme Ders Notları, 2008
- [33] A. Tercan, Maden Yatakları Sınır Belirsizliğinin İndikator Kriging ile Değerlendirilmesi ve Sivas-Kangal-Kalburçayırı Kömür Yatağında Bir Uygulama, Bilimsel Madencilik Dergisi, Cilt 35, sayı. 4, ss. 3-11, 1996.
- [34]<https://www.mta.gov.tr/v3.0/sayfalar/hizmetler/maden-haritalari/kutahya.pdf>, (Erişim tarihi: 22.04.2022)
- [35] https://www.mta.gov.tr/v3.0/sayfalar/bilgi-merkezi/deprem/pdf/izmir_rapor.pdf, (Erişim tarihi: 22.04.2022)
- [36] Akdeniz, N. ve Konak, N. 1979. Simav-Emet-Dursunbey-Demirci yörelerinin jeolojisi. M.T.A. Derleme Rap. No.6547 (yayınlanmamış)]
- [37] E.Bozkurt, Neotectonics of Turkey –asynthesis, GeodinamicaActa,14:1-3, 3-30,2001.
- [38] Kütahya İR:1609 Bor Tuzu Sahasında Sondajlı Maden Jeolojisi Etüdü İşİ Değerlendirme Raporu, 2016
- [39] Baş, H., 1983, Damoniç-Tavşanlı-Kütahya-Gediz yörelerinin Tersiyer jeolojisi ve volkanitlerin petrolojisi, MTA Deri, No, 7293
- [40] Küçükayman, A., Genç, Ş., Gök, L., Kar, H. ve Ateş, M. (1987). Bozüyük-Tavşanlı-Kütahya Arasının Jeolojisi, MTA Derleme Rapor No: 8356, 99s
- [41] Erdem İ. N., Emet-Hisarcık (Kütahya) Bor Yataklanmasını Oluşturan Bor Minerallerinin Dağılımları, Jeokimyası ve Oluşum Ortamlarının İncelenmesi, 2010.

- [42]Yalçın, H. 1984. Emet Neojen gölssel baseninin jeolojik ve mineralojik – petrografik incelenmesi. Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi. 269 s
- [43]https://www.mta.gov.tr/v3.0/sayfalar/hizmetler/doc/yenilenmis_diri_fay_haritalari/kutahya.pdf, (Erişim Tarihi 25.04.2022)
- [44] Gawlik, J., 1956. Emet Kütahya Neojenindeki Borat Zuhuruna Ait Rapor, MTA Derleme Raporu, No:2479.
- [45] Özpeker, L, 1969, Batı Anadolu borat yataklarının mukayeseli jenetik etüdü: İstanbul Teknik Üniv., Doktora tezi, İstanbul.
- [46] A.E. Tercan, B. Ünver, M. A. Hindistan, Üç Boyutlu Cevher Yatağı Modelleme Ve Ocak Tasarlama, Usmos 2011, Ankara, 2011
- [47] A. E. Tercan, Maden Kaynak Kestirimi Ders Notu, 2019.
- [48] A.E. Tercan, Tenör Tonaj Eğrisi Ders Notları, 2015.
- [49]<https://medium.com/periodic-table-elements/what-is-boron-e977cee06ead>, (Erişim Tarihi 10.01.2023)