



**ÖZÜNLÜ İLİŞKİLİ FAKTÖRLERLE ÇOKDEĞİŞKENLİ  
JEOİSTATİSTİKSEL BENZETİM**

**MULTIVARIATE GEOSTATISTICAL SIMULATION USING  
INTRINSICALLY CORRELATED FACTORS**

**ECEM KARAHAAN**

**PROF. DR. A. ERHAN TERCAN**

**Tez Danışmanı**

Hacettepe Üniversitesi  
Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin  
Maden Mühendisliği Anabilim Dalı için Öngördüğü  
YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak hazırlanmıştır.

2018

**ECEM KARAHAN**'ın hazırladığı “**Özünü İlişkili Faktörlerle Çokdeğişkenli Jeostatistiksel Benzetim**” adlı bu çalışma aşağıdaki jüri tarafından **MADEN MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Nuray DEMİREL

Başkan

Prof. Dr. A. Erhan TERCAN

Danışman Üye

Prof. Dr. Bahtiyar ÜNVER

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Güneş ERTUNÇ

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Fırat ATALAY

Üye

Bu tez Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak onaylanmıştır.

Prof. Dr. Menemşe GÜMÜŞDERELİOĞLU

Fen Bilimleri Enstitü Müdürü

## YAYINLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI BEYANI

Enstitü tarafından onaylanan lisansüstü tezimin tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı (kağıt) ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda verilen koşullarla kullanıma açma iznini Hacettepe üniversitesine verdiğimi bildiririm. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet haklarım bende kalacak, tezimin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanım hakları bana ait olacaktır.

Tezin kendi orijinal çalışmam olduğunu, başkalarının haklarını ihlal etmediğimi ve tezimin tek yetkili sahibi olduğumu beyan ve taahhüt ederim. Tezimde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanması zorunlu metinlerin yazılı izin alarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederim.

- Tezimin tamamı dünya çapında erişime açılabilir ve bir kısmı veya tamamının fotokopisi alınabilir.**

(Bu seçenekle teziniz arama motorlarında indekslenebilecek, daha sonra tezinizin erişim statüsünün değiştirilmesini talep etmeniz ve kütüphane bu talebinizi yerine getirirse bile, tezinin arama motorlarının önbelleklerinde kalmaya devam edebilecektir.)

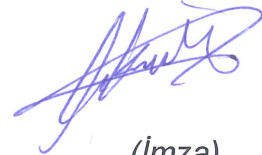
- Tezimin ..... tarihine kadar erişime açılmasını ve fotokopi alınmasını (İç Kapak, Özet, İçindekiler ve Kaynakça hariç) istemiyorum.**

(Bu sürenin sonunda uzatma için başvuruda bulunmadığım takdirde, tezimin/raporumun tamamı her yerden erişime açılabilir, kaynak gösterilmek şartıyla bir kısmı veya tamamının fotokopisi alınabilir)

- Tezimin ..... tarihine kadar erişime açılmasını istemiyorum, ancak kaynak gösterilmek şartıyla bir kısmı veya tamamının fotokopisinin alınmasını onaylıyorum.**

- Serbest Seçenek/Yazarın Seçimi**

28.10.2018...



(İmza)

Öğrencinin Adı Soyadı

ECEM KARAHAN

## ETİK

Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada,

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

28/06/2018



ECEM KARAHAN

## ÖZET

# ÖZÜNLÜ İLİŞKİLİ FAKTÖRLERLE ÇOKDEĞİŞKENLİ JEOİSTATİSTİKSEL BENZETİM

**Ecem KARAHAN**

**Yüksek Lisans, Maden Mühendisliği Bölümü**

**Tez Danışmanı: Prof. Dr. A. Erhan TERCAN**

**Haziran 2018, 78 sayfa**

Birden fazla değişkenin jeostatistiksel benzetimi madencilikte sıklıkla karşılaşılan bir durumdur. Çok metalli bir maden yatağı bunun tipik bir örneğini teşkil eder. Değişken sayısı birden çok olduğu zaman bunlar arasındaki uzaklığa bağlı çapraz ve düz ilişkileri üretecek çokdeğişkenli jeostatistiksel benzetim yöntemlerine gereksinim duyulur.

Eşbenzetim, bu amaçla geliştirilmiş bir yöntemdir ve temel olarak eşkriglemeye dayanır. Değişken sayısı dört veya daha çok olduğunda eşkrigleme yöntemini kullanmak pratik olarak mümkün olmayabilir. Özellikle çapraz variogramların modellenmesi ve yeniden üretilmesi, büyük boyutlu çok sayıda eşkrigleme sisteminin çözülmesi gibi konular bu yöntemin pratik bir şekilde uygulanmasını sınırlandırır. Bu nedenle çokdeğişkenli jeostatistiksel benzetimde daha pratik ve daha hızlı yöntemlere ihtiyaç vardır.

Bir yaklaşım, aralarında uzaklığa bağlı çapraz ilişki gösteren değişkenleri, özkriglenebilir (*autokrigeable*) faktörlere dönüştürmektedir. Özkriglenebilir faktörlerden çokdeğişkenli benzetimler daha kolay ve daha hızlı bir şekilde yapılabilir. Önce özkriglenebilir faktörler bağımsız bir şekilde benzetilir daha sonra benzetimler, orijinal veri uzayına geri dönüştürülür.

Değişkenlerin özkrişlenebilirliği, (1) bunlar arasındaki çapraz variogramların her bir uzaklıkta sıfır olması (uzaklığa bağlı diklik modeli), (2) çapraz ve düz variogramların oranlarının sabit olması (özünlü ilişki modeli) durumunda ortaya çıkar. Çokdeğişkenli benzetimi kolaylaştırmak amacıyla şimdiye kadar literatürde uzaklığa bağlı diklik modeli dikkate alınmıştır. Bu tez çalışması ile özünlü ilişkili faktör üretimine dayanan yeni bir çokdeğişkenli jeostatistiksel benzetim yöntemi üretilmiştir. Bu amaçla, özünlü ilişkili faktör üretimini sağlayan bir yöntem geliştirilmiş, bu yöntemle üretilen her bir faktörün bağımsız bir şekilde benzetimiyle çok değişkenli jeostatistiksel benzetimler gerçekleştirilmiştir.

Özünlü ilişkili faktörlerle çokdeğişkenli benzetime ilişkin geliştirilen yöntem MATLAB'da kodlanmıştır. Yöntem, iki ve üç boyutlu veri kümeleri üzerinde uygulanmıştır.

Çok değişkenli jeostatistiksel benzetim yöntemleri, tenör-tonaj eğrilerinin hesaplanmasından maden projelerinin riskliliğinin değerlendirilmesine ve maden kaynaklarının ve rezervlerinin sınıflandırılmasına kadar uzanan geniş bir alanda kullanılır. Böyle yöntemler geliştirildiğinde çok değişkenli yataklardaki işlem yoğunluğu standart yöntemlere göre oldukça azalacaktır.

**Anahtar Kelimeler:** Özkrişlenebilirlik, Eşbenzetim, Çapraz Variogram, Özünlü İlişkili Faktör Modeli

## **ABSTRACT**

### **MULTIVARIATE GEOSTATISTICAL SIMULATION USING INTRINSICALLY CORRELATED FACTORS**

**Ecem KARAHAN**

**Master of Science, Department of Mining Engineering**

**Supervisor: Prof. Dr. A. Erhan TERCAN**

**June 2018, 78 pages**

Geostatistical simulation of multiple variables is a frequently encountered situation in mining. A polymetallic mineral deposit is a typical example of this. When the number of variables is more than one, there is a need for geostatistical simulation methods that will produce cross and auto spatial relationships.

Cosimulation is developed for this purpose and it is basically based on cokriging. When the number of variables is four or more, using the cokriging method may not be practically possible. Especially modeling and reproducing cross variograms, also solving a number of large size cokriging systems limits the practicality of this method. For this reason, more practical and faster methods are needed for multivariate geostatistical simulation.

One approach would be to transform spatially cross correlated variables into autokrigeable factors so that it is easy and fast to produce multivariate simulation by using the autokrigeable factors. First of all, the autokrigeable factors are independently simulated and then the simulations are back transformed into original space.

There are two conditions causing autokrigeability. (1) cross variograms are zero at all distances (spatial orthogonality), (2) the ratio between cross and auto variograms is constant at all distances (intrinsic relationship). In order to facilitate multivariate simulations, the orthogonality method has been taken into consideration in the

literature up to now. This thesis has developed a new multivariable geostatistical simulation method based on intrinsically correlated factor production. For this purpose, a method has been suggested which enables the production of intrinsically correlated factors and multivariable geostatistical simulations have been performed by independent simulations of each factor produced by this method.

The method for geostatistical simulation of intrinsically correlated factors is coded in MATLAB. The method has been applied on 2 and 3 dimensional datasets.

Multivariable geostatistical simulation methods are used in a wide range of applications from the calculation of grade-tonnage curves, the assessment of the risk of mining projects to the classification of mineral resources / reserves. When such methods are developed, the process intensity in polymetallic deposits will be considerably reduced compared to standard methods.

**Keywords:** Autokrigeability, Cosimulation, Cross Variogram, Intrinsically Correlated Factor Model

## TEŞEKKÜR

Lisans ve yüksek lisans çalışmalarım sırasında çok değerli sabrı, özverisi ve kılavuzluğu ile yolumu aydınlatan, bu tez çalışmasının şekil almasında çok büyük paya sahip olan ve bu çalışmaya ilgi ve hevesle yaklaşmamı sağlayan Tez Danışmanım Sayın Prof. Dr. A. Erhan Tercan'a;

Çalışmalarım süresince Maden Mühendisliği Bölüm Başkanlığı görevini yürüten ve bölüm imkanlarında yararlanmamı sağlayan Sayın Prof. Dr. A. Hakan Benzer ve Prof. Dr. Zafir Ekmekçi'ye,

Olumlu görüşleri, fikirleri ve eleştirileri ile tezimin son halini almasına katkıda bulunan jüri üyelerim Prof. Dr. Bahtiyar Ünver, Doç. Dr. Nuray Demirel, Dr. Öğr. Üyesi Güneş Ertunç ve Dr. Öğr. Üyesi Fırat Atalay'a;

Süreç içerisinde fikirleri, bilgileri ve arkadaşça yaklaşımları ile yol gösterici olan Dr. Öğr. Üyesi Okay Altun, Dr. Öğr. Üyesi Emre Yılmazkaya, Dr. N. Alper Toprak ve Dr. Özgür Özcan'a;

Manevi desteklerini her zaman hissettiğim ve yanımda olan sevgili çalışma arkadaşlarım ve dostlarım Serdar Sait Çolak, Seda Özçelik ve Sarp Zencirci'ye;

Lisans ve yüksek lisans hayatım süresince sağladıkları yardımlar ve güler yüzleri için bölüm sekreterlerimiz Sıddık Yılmazoğlu ve Birgül Atay'a;

Aldığım lisans ve yüksek lisans eğitimleri boyunca sağladığı yardımlar ve güzel ortam ile bu çalışmanın gerçekleşmesinde pay sahibi olan tüm Hacettepe Üniversitesi Maden Mühendisliği personeline,

Son olarak hayatımın her aşamasında yanımda olan ve bugünlere gelmemi sağlayan babam Haluk Recep Karahan, 2003 senesinde kaybettiğim ancak hep benimle olduğunu hissettiğim annem Sacide Karahan ve sevgili kardeşim Cumhuriyet Erdem Karahan'a;

En içten duygularım ve minnettarlığım ile teşekkürlerimi sunarım.

# İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
ÖZET .....	i
ABSTRACT .....	iii
TEŞEKKÜR .....	v
İÇİNDEKİLER DİZİNİ .....	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	ix
1. GİRİŞ .....	1
1.1. Tezin Amacı ve Hedefleri .....	3
1.2. Tezin Özgün Değeri .....	3
1.3. Tezin İçeriği .....	3
2. JEOİSTATİSTİKSEL YÖNTEMLER .....	5
2.1. Bölgesel Değişkenler Teorisi ve Rastlantı Fonksiyonları .....	5
2.2. Deneysel Variogram .....	6
2.3. Model Variogram .....	7
2.4. Anizotropi .....	11
2.4.1. Geometrik Anizotropi .....	12
2.4.2. Zonal Anizotropi .....	12
2.5. Kovaryans Fonksiyonu .....	13
2.6. Kestirim .....	13
2.7. Benzetim .....	14
3. ÖZKRİGLENEBİLİRLİK VE ÖZÜNLÜ İLİŞKİLİ FAKTÖRLER .....	16
3.1. Giriş .....	16
3.2. Yöntem .....	17
3.2.1. Çok Değişkenli Durağan Rastlantı Fonksiyonu .....	17
3.2.2. Özkriylenebilirlik ve Özönlü İlişki Modeli .....	17
3.2.3. Dik Faktör Üretiminde Kullanılan Yaklaşımlar .....	19
3.2.4. Özönlü İlişkili Faktörlerin Üretimi .....	20
3.2.5. Dönüşüm Matrisinin Belirlenmesi .....	20
3.2.6. Parçacık Sürü Optimizasyonu .....	22
3.2.7. Ardışık Normal Benzetim .....	24
3.2.8. Özönlü İlişkili Faktörlerle Çokdeğişkenli Benzetim .....	24

4. ÖZÜNLÜ İLİŞKİLİ FAKTÖR ÜRETİMİ ALGORİTMASININ KODLANMASI VE TESTİ .....	26
4.1. Parçacık Sürü Optimizasyonu Parametre Seçimi .....	27
4.2. İki Boyutlu Jura Veri Kümesi Üzerindeki Test.....	28
4.2.1. Jura Veri Kümesinin Tanıtımı.....	28
4.2.2. PSO Uygulamaları ve Dönüşüm Matrisinin Bulunması .....	31
4.2.3. Özünlü İlişkili Faktörlerin Üretimi.....	32
4.2.4. Faktörlerin Benzetimi .....	34
4.2.5. Benzetilmiş Faktörlerin Geri Dönüştürülmesi .....	39
5. YÖNTEMİN BİR NİKEL SAHASINDA UYGULANMASI .....	44
5.1. Veri Kümesinin Özellikleri .....	44
5.2. PSO Uygulamaları ve Dönüşüm Matrisinin Bulunması .....	47
5.3. Özünlü İlişkili Faktörlerin Üretimi.....	48
5.4. Faktörlerin Benzetimi .....	50
5.5. Benzetilmiş Faktörlerin Geri Dönüştürülmesi .....	55
6. SONUÇLAR ve ÖNERİLER .....	60
KAYNAKÇA.....	62
ÖZGEÇMİŞ .....	65

## ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 4.1. Test fonksiyonlarının optimizasyon sonuçları .....	26
Çizelge 4.2. Değişkenlere ait özet istatistikler .....	31
Çizelge 5.1. Nikel saha verilerinin özet istatistikleri .....	47



## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Tipik bir variogram modeli.....	7
Şekil 2.2. Küresel variogram modeli.....	8
Şekil 2.3. Üssel variogram modeli.....	9
Şekil 2.4. Gauss variogram modeli.....	9
Şekil 2.5. Külçe etkisi variogram modeli.....	10
Şekil 2.6. Doğrusal variogram modeli.....	11
Şekil 2.7. Yuvalı yapı modeli.....	11
Şekil 2.8. Geometrik anizotropi.....	12
Şekil 2.9. Zonal anizotropi.....	12
Şekil 2.10. Variogram ve kovaryans arasındaki ilişki.....	13
Şekil 3.1. Özünlü ilişkili faktörle çokdeğişkenli jeostatistiksel benzetim yöntemine ilişkin akım şeması.....	25
Şekil 4.1. Tenör dağılımları ile birlikte lokasyon haritaları a) Zn, b) Ni, c) Cd.....	29
Şekil 4.2. Değişkenlere ait sıklık dağılımları.....	30
Şekil 4.3. Faktörlerin variogramlarına ait özünlü ilişki katsayıları.....	32
Şekil 4.4. Faktörlerin düz ve çapraz deneysel variogramları a) Faktör 1, b) Faktör 2, c) Faktör 3, d) Faktör 1-2, e) Faktör 1-3, f) Faktör 2-3.....	33
Şekil 4.5. Faktörlerin düz ve çapraz deneysel variogramı.....	34
Şekil 4.6. Faktörlerin ve benzetim değerlerinin özet istatistiklerinin karşılaştırılması.....	35
Şekil 4.7. Faktörler ve benzetimlerinin birikimli dağılım fonksiyonları a) Faktör 1 b) Faktör 2 c) Faktör 3.....	36
Şekil 4.8. Faktörler ve benzetimlerinin düz deneysel variogramları a) Faktör 1, b) Faktör 2, c) Faktör 3.....	37
Şekil 4.9. Faktörler ve benzetimlerinin çapraz deneysel variogramları d) Faktör 1-2, e) Faktör 1-3, f) Faktör 2-3.....	38
Şekil 4.10. Orijinal verilerin ve benzetim değerlerinin özet istatistiklerinin karşılaştırılması.....	39
Şekil 4.11. Orijinal veriler ile benzetim sonuçlarının karşılaştırması a) Zn, b) Ni ve c) Cd.....	40
Şekil 4.12. Orijinal veriler ile benzetimlerin düz variogramlarının karşılaştırması a) Zn, b) Ni, c) Cd.....	41
Şekil 4.13. Orijinal veriler ile benzetimlerin çapraz variogramlarının karşılaştırması d) Zn-Ni, e) Zn-Cd, f) Ni-Cd.....	42
Şekil 4.14. Jura verilerinden elde edilen doğrusal korelasyon katsayıları.....	43
Şekil 5.1. Tenör dağılımları ile birlikte sondaj haritaları a) Fe, b) Cr, c) Ni.....	45

Şekil 5.2. Değişkenlerin sıklık dağılımları .....	46
Şekil 5.3. Her bir uzaklıkta özünüli ilişki katsayıları .....	48
Şekil 5.4. Faktörlerin düz ve çapraz deneysel variogramları a) Faktör 1, b) Faktör 2 ve c) Faktör 3, d) Faktör 1-2, b) Faktör 1-3, c) Faktör 2-3 .....	49
Şekil 5.5. Faktörlerin düz ve çapraz deneysel variogramı .....	50
Şekil 5.6. Faktörlerin ve benzetimlerin özet istatistiklerinin karşılaştırılması.....	51
Şekil 5.7. Faktörler ve benzetimlerinin birikimli dağılım fonksiyonları a) Faktör 1 b) Faktör 2, c) Faktör 3 .....	52
Şekil 5.8. Faktörler ve benzetimlerin düz deneysel variogramları a) Faktör 1, b) Faktör 2, c) Faktör 3 .....	53
Şekil 5.9. Faktörler ve benzetimlerin çapraz deneysel variogramları d) Faktör 1-2, e) Faktör 1-3, f) Faktör 2-3 .....	54
Şekil 5.10. Orijinal verilerin ve benzetim değerlerinin özet istatistiklerinin karşılaştırılması .....	55
Şekil 5.11. Orijinal veriler ile benzetimlerin birikimli dağılım fonksiyonları a) Fe, b) Cr, c) Ni .....	56
Şekil 5.12. Orijinal veriler ile benzetimlerin düz deneysel variogramları a) Fe, b) Cr, c) Ni.....	57
Şekil 5.13. Orijinal veriler ile benzetimlerin çapraz deneysel variogramları d) Fe-Cr, e) Fe-Ni, f) Cr-Ni.....	58
Şekil 5.14. Lateritik nikel verilerinden elde edilen doğrusal korelasyon katsayıları	59

# 1. GİRİŞ

Tez konusunu temel olarak jeoistatistiksel benzetim oluşturmaktadır. Tez çalışması birden çok değişkenin dikkate alındığı çok değişkenli jeoistatistiksel benzetim alanı içinde yer almaktadır. Bu alan içinde eşbenzetim (*cosimulation*) yöntemi yerine özkriylenebilir (*autokrigeable*) özünüli ilişkili faktörlerin benzetimine dayanan yöntemler dikkate alınmıştır. Örnekleme lokasyonlarında tüm değişkenlerin ölçüldüğü (*isotopic sampling*) varsayılmıştır.

Jeoistatistik, uzaklığa bağlı olarak değişen özneliklerin (değişkenlerin) incelenmesi ile ilgili olup başlangıçta maden kaynak kestirimi problemlerini çözmek amacıyla geliştirilmiştir [1]. Geliştirilen yöntemler, kestirim ve benzetim şeklinde kabaca iki gruba ayrılabilir. Krigleme (*kriging*) yöntemi de dahil olmak üzere pek çok kestirim yöntemi, değişkenliğin gerçek verilere göre daha düşük olduğu törpülenmiş (*smooth*) değerler üretir. Kestirim, değişkenlerin global yapısını ortaya koymak gerektiğinde arzu edilen bir yaklaşımdır [2]. Ancak uzaklığa bağlı değişkenliği ve sıklık dağılımını yeniden üretmek ve ayrıca uzaklığa bağlı belirsizliği değerlendirmek gerektiğinde jeoistatistiksel benzetim yöntemini kullanmak gerekir [3]. Bu gibi durumlar tenör-tonaj eğrilerinin hesaplanmasından maden projelerinin riskliliğinin değerlendirilmesine ve maden kaynaklarının ve rezervlerinin sınıflandırılmasına kadar uzanan geniş bir alanda ortaya çıkar. Jeoistatistiksel benzetim, madencilikte son zamanlarda fazlasıyla ilgi duyulan ve kestirime göre daha zor olan bir işlemdir. Tek bir değişkenin olduğu durumlarda ardışık normal benzetim [4], olasılık alan benzetimi [5] ve doğrudan ardışık benzetim [6] gibi yöntemler kullanılabilir. Bu yöntemler, benzetim sırasında bir krigleme tekniği kullanır. Örneğin, ardışık normal benzetimde ortalamalı krigleme (*simple kriging*), olasılık alan benzetiminde indikatör krigleme, doğrudan ardışık benzetimde ise ortalamalı ya da ortalamasız krigleme (*ordinary kriging*) yöntemleri kullanılmaktadır.

Birden fazla değişkenin incelenmesi madencilikte sıklıkla karşılaşılan bir durumdur ve çok metalli bir maden yatağı bunun tipik bir örneğini teşkil eder. Değişken sayısı birden çok olduğunda bunlar arasındaki uzaklığa bağlı çapraz (*cross*) ve düz (*auto*) ilişkileri üretecek çokdeğişkenli jeoistatistiksel benzetim yöntemlerine ihtiyaç duyulur. Çokdeğişkenli ardışık normal benzetim [7] ve [8], çokdeğişkenli olasılıklı alan benzetimi [9] ve çokdeğişkenli doğrudan ardışık eşbenzetim [6] gibi yöntemler bunlara birer örnektir. Bu yöntemler, benzetim için eşkrigleme (*cokriging*) gibi bir

kestirim yöntemine gereksinim duyar. Bununla birlikte değişken sayısı dört ya da daha çok olduğunda bu gibi yöntemleri kullanmak pratik olarak mümkün olmaz [10]. Özellikle çapraz variogramların modellenmesi ve yeniden üretilmesi, büyük boyutlu çok sayıda eşkrigleme sistemlerinin çözülmesi gibi konular bu yöntemlerin pratik bir şekilde uygulanmasını sınırlandırır. Bu nedenle çokdeğişkenli jeostatistiksel benzetimde daha pratik ve daha hızlı yöntemlere gereksinim vardır.

Bir yöntem, aralarında uzaklığa bağlı çapraz ilişki gösteren değişkenleri, eşbenzetim ve tekdeğişkenli benzetimin aynı sonuçlar verdiği faktörlere dönüştürmektedir. Bu tür faktörler, Matheron [11] ve Wackernagel [12] tarafından özkriglenebilir (autokrigeable) faktörler olarak tanımlanmıştır. Subramanyam ve Pandalai [13], eşkrigleme ve krigleme yöntemlerinin eşdeğer olduğu koşulları kapsamlı bir şekilde incelemiştir.

Özkriglenebilir faktörlerden çokdeğişkenli benzetimler üretmek oldukça kolay ve hızlıdır. Bunun için özkriglenebilir faktörleri birbirinden bağımsız bir şekilde benzetmek ve benzetilmiş değerleri orijinal veri uzayına geri dönüştürmek yeterli olacaktır. Bu bakımdan uzaklığa bağlı çapraz ilişki gösteren çokdeğişkenli verileri özkriglenebilir faktörlere dönüştüren bir yöntem geliştirmek oldukça önemlidir.

Wackernagel [12], özkriglenebilirliğe (*autokrigeability*) yol açan iki durum belirlemiştir: (1) çapraz variogramların bütün uzaklıklarda sıfır olması (diklik), (2) çapraz variogramlarla düz variogramların orantılı olması (özünlü ilişkili). Özkriglenebilir faktörlerin üretiminde şimdiye kadar literatürde sadece ilk yaklaşım (dik faktör yaklaşımı) dikkate alınmıştır.

Çapraz variogramlarla düz variogramlar arasındaki oranın sabit olması, çapraz variogramların sıfır olmasını da içerdiğinden özünlü ilişkili faktör üretiminin daha avantajlı olduğu düşünülebilir. Tanım olarak her bir değişkenin geri kalan diğer değişkenlere göre özkriglenebilir olduğu çokdeğişkenli veriler, özünlü ilişki modelini (*intrinsic correlation model*) oluşturur [12].

Bu tez çalışmasında özünlü ilişki modeline yol açacak özkriglenebilir bir faktörleme yaklaşımı geliştirilmiştir. Yaklaşım, özünlü ilişki sağlayan bir hedef fonksiyonun enküçüklenmesine dayanmaktadır. Bu hedef fonksiyon, birden çok lokal optimuma sahip  $p^2$  parametrelidir (p: değişken sayısı) sürekli bir fonksiyondur. Fonksiyonun enküçüklenmesi amacıyla, lokal optimumlara takılmadan global optimuma yaklaşabilen üstsezgisel (*metaheuristic*) optimizasyon yöntemleri içerisinde

Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) dikkate alınmıştır. Bu faktörleme yöntemine dayanan benzetim yöntemine ise özünlü ilişkili faktörlerle (ÖİF) çokdeğişkenli benzetim yöntemi adı verilmiştir.

### **1.1. Tezin Amacı ve Hedefleri**

Bu tez çalışması ile özünlü ilişkili faktör üretimine dayanan yeni bir çokdeğişkenli jeostatistiksel benzetim yönteminin geliştirilmesi amaçlanmıştır.

Yöntem;

- çokdeğişkenli verilerden özünlü ilişkili faktörler üreten bir yöntemin geliştirilmesi,
- elde edilen her bir faktörün bağımsız bir şekilde jeostatistiksel benzetimi,
- benzetilmiş faktörlerin çokdeğişkenli veri uzayına geri dönüştürülmesi,

adımlarını içermektedir.

Bunlar içerisinde özünlü ilişkili faktör üretimi, yöntemin temel taşıını oluşturmaktadır. Geliştirilen yöntemin ve algoritmanın toprak alkali ağır metal verileri üzerinde test edilmesi ve daha sonra lateritik bir nikel yatağına uygulanması hedeflenmiştir.

### **1.2. Tezin Özgün Değeri**

Bu tezin özgün yanı, çokdeğişkenli jeostatistiksel benzetimde özünlü ilişkili faktörlerin benzetimine dayanan yeni bir yöntemin geliştirilmiş olmasıdır. Bu yöntem, klasik (ardışık normal eşbenzetim, çokdeğişkenli olasılıklı alan benzetimi ve doğrudan ardışık eşbenzetim gibi) yöntemlere göre daha basit ve daha hızlıdır. Yöntemin basit ve hızlı olması nedeniyle cevher modelleme ve ocak tasarımına ilişkin bütünleşik madencilik yazılımlarında kullanılma potansiyeli bulunmaktadır.

Bunu yanı sıra, dik faktörleri temel alan (MAF, Eşzamanlı Köşegenleştirme, U-WEDGE) yaklaşımları kapsamaktadır. Özünlü ilişkili faktör üretimine dayanan çokdeğişkenli jeostatistiksel benzetim tekniğine literatürde rastlanmamıştır ve yöntem hem kuramsal hem teorik olarak geliştirilmiştir. Literatürde daha önce yapılan bir çalışma olmaması nedeniyle pek çok tez çalışmasına ve yeni projelerin oluşturulmasına katkıda bulunması beklenmektedir.

### **1.3. Tezin İçeriği**

Tez çalışması altı ana bölümden oluşmaktadır.

İkinci bölüm bölgesel değişkenler teorisi, variogram modelleri, deneysel variogram, kovaryans, kestirim ve benzetim yöntemleri ile ilgili teorik bilgileri içermektedir.

Üçüncü bölümde, özünlü ilişkili faktörlerin üretilmesi, kullanılan benzetim yöntemi ve optimizasyon yöntemi hakkında teorik bilgiler verilmiştir.

Dördüncü bölümde, optimizasyon kodunun yazılması, parametrelerin seçimi ve kodun uygulanabilirliğinin test edilmesi konularının ardından geliştirilen yöntem 2 boyutlu veri kümelerine uygulanmıştır. 2 boyutlu uygulama çalışması Jura veri kümesi üzerinde yapılmıştır ve bu amaçla veri kümesinden 3 değişken (Çinko, Nikel ve Kadmiyum) seçilmiştir. Çalışmada değişkenler özünlü ilişki gösteren faktörlere dönüştürülmüş ve faktörler ardışık normal benzetim ile benzetilmiştir. Orijinal veri uzayına geri dönüştürülen benzetim sonuçları ile orijinal verilerin özet istatistikleri, birikimli sıklık dağılımları, variogramları ve korelasyonları karşılaştırılmıştır.

Beşinci bölümde yöntem, 3 boyutlu bir veri kümesine uygulanmıştır. Bu amaçla polimetallik bir sahaya ait 3 değişken (Demir, Krom ve Nikel) dikkate alınmıştır. Çalışmada uygulanan adımlar 2 boyutlu uygulama ile aynı olmakla beraber özünlü ilişki faktörler ile elde edilen benzetimlerin ve orijinal verilerin özet istatistikleri, birikimli sıklık dağılımları, variogramları ve korelasyonları karşılaştırılmıştır.

Altıncı bölüm ise elde edilen sonuçları içermektedir.

## 2. JEOİSTATİSTİKSEL YÖNTEMLER

Jeoistatistik, konuma bağılı veri kümelerine odaklanan bir istatistik dalıdır. Bu bölümde, jeoistatistik tanımının yapıldığı günden günümüze kadar olan süreçte jeoistatistiksel yöntemlerin gelişimi ve yöntemlere ait teorik bilgilerin detaylı açıklamaları verilmiştir.

Bu kapsamda bölgesel değişkenler teorisine, rastlantı fonksiyonlarına, variogram fonksiyonuna, kovaryans fonksiyonuna, jeoistatistiksel kestirime ve jeoistatistiksel benzetime yer verilmiştir.

### 2.1. Bölgesel Değişkenler Teorisi ve Rastlantı Fonksiyonları

Gerçek uzayda bulunan en az bir, iki veya üç boyutta değer alabilen rassal değişkenler “bölgesel değişkenler” olarak adlandırılırlar. Bölgesel değişkenler teorisi, Georges Matheron [14] tarafından yayımlanan bir çalışma ile ortaya atılmıştır. Daha sonra Journel ve Huijbreghts [15] ve Cressie [16] ve diğer araştırmacıların da çalışmaları ile günümüzdeki haline ulaşmıştır.

Bir cevher yatağındaki tenör değerleri veya damar kalınlığı gibi değişkenler, bölgesel değişkenlere örnek olarak verilebilir. Fakat bölgesel değişkenler madencilik ile sınırlı değildir; yerbilimlerine ait verilerin büyük çoğunluğu bölgesel değişken olarak değerlendirilmektedir.

Bir cevher yatağını göz önüne aldığımızda, tek bir noktadan alınan bir veri tekrarlanabilir değildir. İstatistiksel açıdan tek bir değer ile o lokasyona ait özet istatistik bilgilerinin sağlanması mümkün değildir. Bu sebeple, bir değişkene ait özet istatistik bilgilerini elde edebilmek için farklı bir varsayıma ihtiyaç vardır.

Bu varsayım “Durağanlık”tır. Durağanlık, verilerin ilgili alanda aynı değişkenlik derecesine sahip olduğunu varsaymaktadır. Durağanlık varsayımları üçe ayrılmaktadır.

Değişkenlerin  $x_1, x_2, \dots, x_n$  gibi lokasyonlarda gözlemlendiğini düşünelim. Gözlemlenen değişkenlerin konuma bağılı davranışı, olasılık dağılım fonksiyonu ile karakterize edilir.

$$P(Z(x_1) < z_1, Z(x_2) < z_2, \dots, \text{ve } Z(x_n) < z_n) \quad (2.1)$$

Birinci dereceden durağanlık durumunda, konum değişirse olasılık dağılım fonksiyonu değişmez.

$$(Z(x_1) < z_1, Z(x_2) < z_2, \dots \text{ ve } Z(x_n) < z_n) = P(Z(x_1 + h) < z_1 + h, Z(x_2 + h) < z_2 + h, \dots \text{ ve } Z(x_n + h) < z_n + h) \quad (2.2)$$

Birinci dereceden durağanlık, kısıtlama yaratan bir varsayımdır.  $x$  ve  $x + h$  noktalarında bulunan rassal  $Z(x)$  ve  $Z(x + h)$  değişkenlerini düşünelim. Bu iki değişken arasındaki kovaryans, değişkenler arasındaki  $h$  uzaklığına bağlıdır. Bu yapı ikinci dereceden durağanlık olarak tanımlanmaktadır. İkinci dereceden durağanlık için iki koşul aranmaktadır. Bunlardan ilki, bir çalışma alanı içerisindeki tüm  $x$  lokasyonlarında ortalamanın sabit olmasıdır.

$$E[Z(x)] = \mu \quad \text{ve} \quad E[Z(x + h)] = \mu \quad (2.3)$$

Eşitlik (2.3)'te  $E$  beklenen değer işlemcisini,  $\mu$  ise ortalamayı göstermektedir. Diğer koşul ise kovaryans fonksiyonunun gözlemlenen lokasyonlardaki koordinatlara değil, aralarındaki  $h$  uzaklığına bağlı olmasıdır.

İkinci dereceden durağanlık varsayımı altında,

$$E[Z(x) - Z(x + h)] = 0 \quad (2.4)$$

$$\text{var}[Z(x) - Z(x + h)] = E[\{Z(x) - Z(x + h)\}^2] = 2\gamma(h) \quad (2.5)$$

ilişkileri tanımlanabilir [17]. Eşitlik (2.5)'te  $2\gamma(h)$  ile belirtilen variogram fonksiyonu, uzaklığa bağlı jeostatistiksel prosesleri karakterize etmek için sıklıkla kullanılmaktadır.

## 2.2. Deneysel Variogram

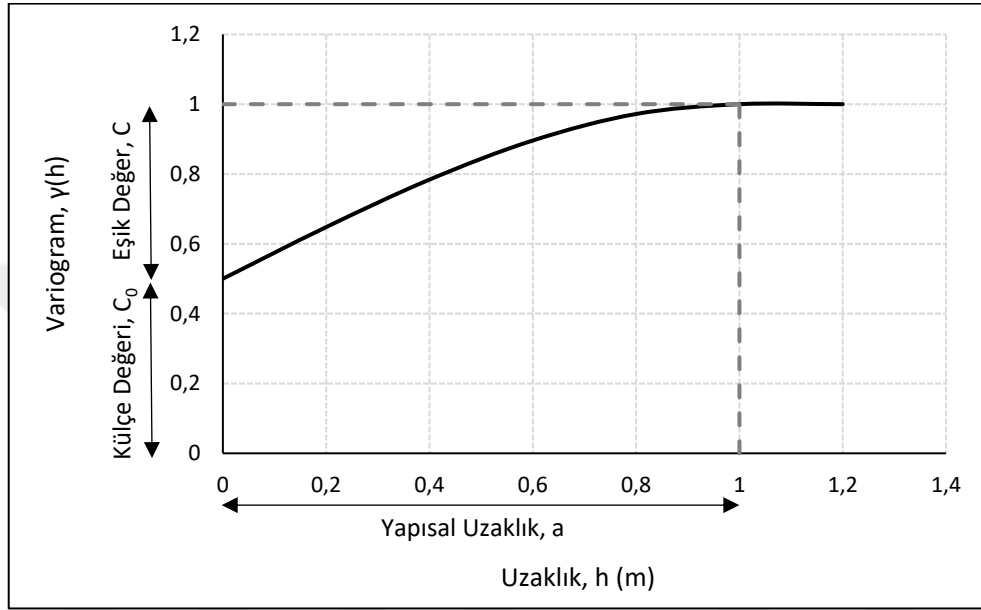
Teorik gösteriminin yanı sıra, variogram fonksiyonu deneysel olarak hesaplanabilir (Eşitlik (2.6)).

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [z(x_i + h) - z(x_i)] \quad (2.6)$$

Burada  $N(h)$ ,  $h$  uzaklığındaki örnek çifti sayısını;  $x_i$ , örnek alınan noktayı;  $z(x_i)$  ise örnekleme noktasındaki değeri göstermektedir.

### 2.3. Model Variogram

Deneysel variogram adım sayısı ve adım aralığı ile belirlenen uzaklıklarda hesaplanmaktadır. Diğer tüm uzaklıklarda variogram değerlerini bilmek için bir variogram modeline ihtiyaç vardır. Variogram modeli tipik olarak üç parametre ile tanımlanır; bunlar külçe etkisi ( $C_0$ ), eşik değer ( $C$ ) ve yapısal uzaklıktır ( $a$ ) (Şekil 2.1).



Şekil 2.1. Tipik bir variogram modeli

Külçe etkisi, uzaklığa bağlı değişimin elde edilebildiği birbirine en yakın iki değer arasındaki uzaklık ile ilişkilidir. Bu uzaklıktan daha küçük uzaklıkların belirlenmesi söz konusu olmadığından, orijinde bir süreksizlik oluşur. Variogram modelinde düşey eksende görülen bu kayma külçe etkisi olarak adlandırılır ve  $C_0$  ile gösterilir. Külçe etkisi oluşmasının diğer sebebi ise örnekleme hatasıdır.

Eşik (sill) değer, variogram modelinde yapısal uzaklığa ulaşıldığı anda yatay ekseninde görülen değerdir ve aynı zamanda örneklerin varyansına eşittir.

Yapısal uzaklık ise, örneklerin birbirleri ile ilişki gösterdiği en büyük uzaklıktır. Teorik olarak değişkenler arasındaki uzaklığın yapısal uzaklıktan düşük olduğu uzaklıkta verilerin ilişkili oldukları fakat bu uzaklıktan yüksek uzaklıklarda verilerin birbirleri ile ilişkili olmadıkları varsayılır.

Variogram modelleri, eşik değerli (silli) ve eşik değersiz (silsiz) modeller olarak ikiye ayrılırlar.

### 2.3.1. Eşik Değerli (Silli) Modeller

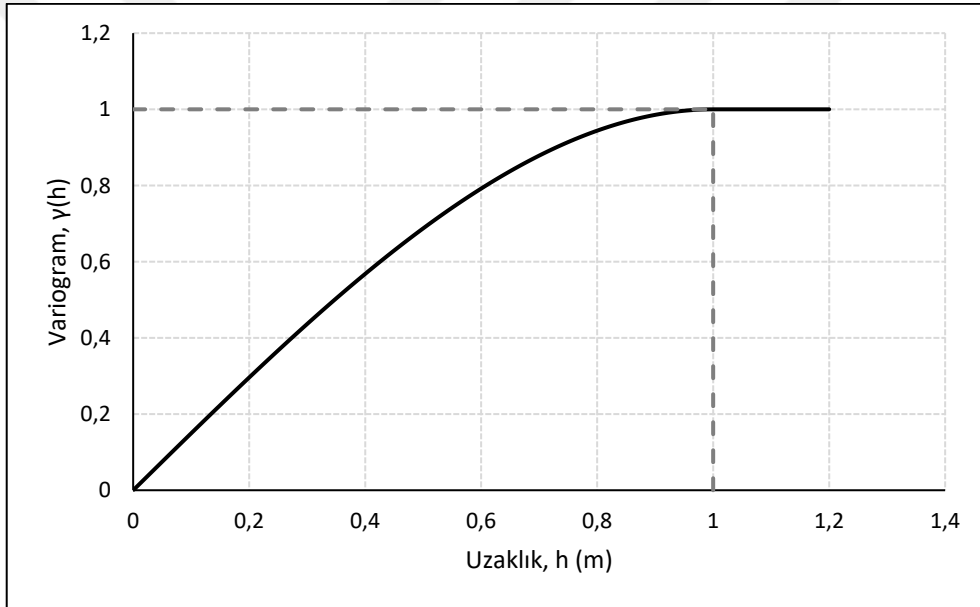
#### Küresel Model

En yaygın kullanılan variogram modelidir.

$$\begin{aligned}\gamma(h) &= C * [(1,5 * h/a) - (0,5 * (h/a^3))], \quad h \leq a \\ \gamma(h) &= C, \quad h > a \\ \gamma(h) &= 0, \quad h = 0\end{aligned}\tag{2.7}$$

Eşitlik (2.7)'de,  $\gamma(h)$ :  $h$  mesafesindeki variogram değerini,  $C$ : eşik değerini,  $a$  ise yapısal uzaklığı belirtmektedir.

Eşik değeri ve yapısal uzaklığın 1 birim olduğu küresel model örneği Şekil 2.2'de görülmektedir.



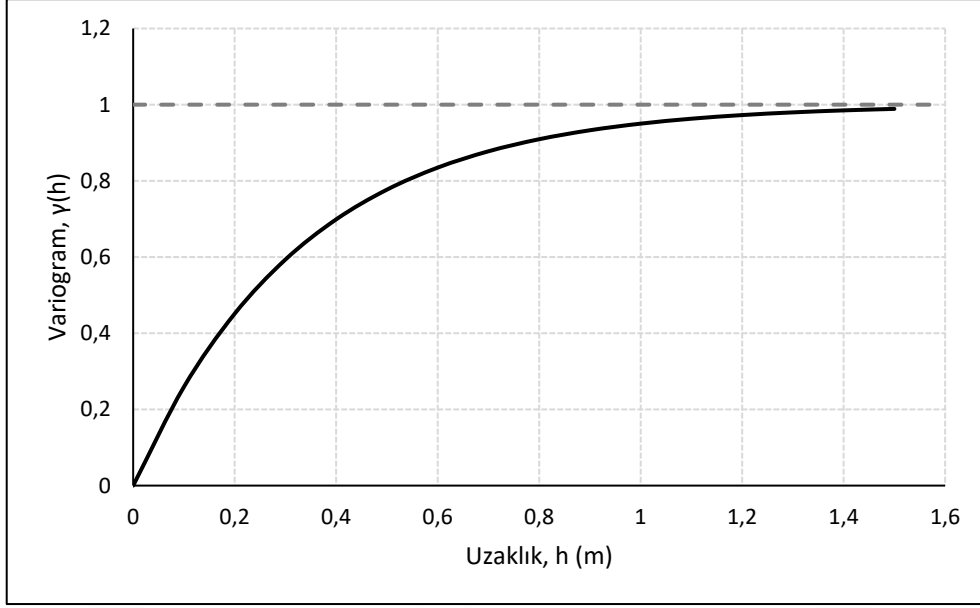
Şekil 2.2. Küresel variogram modeli

#### Üssel Model

Eşitlik (2.8)'deki gibi tanımlanır.

$$\begin{aligned}\gamma(h) &= 0, \quad h = 0 \\ \gamma(h) &= C * (1 - e^{-(h/l)^3}) \\ \gamma(h) &= C, \quad h > l\end{aligned}\tag{2.8}$$

Eşik değeri ve yapısal uzaklığın 1 birim olduğu üssel variogram modeli Şekil 2.3'te görülmektedir.



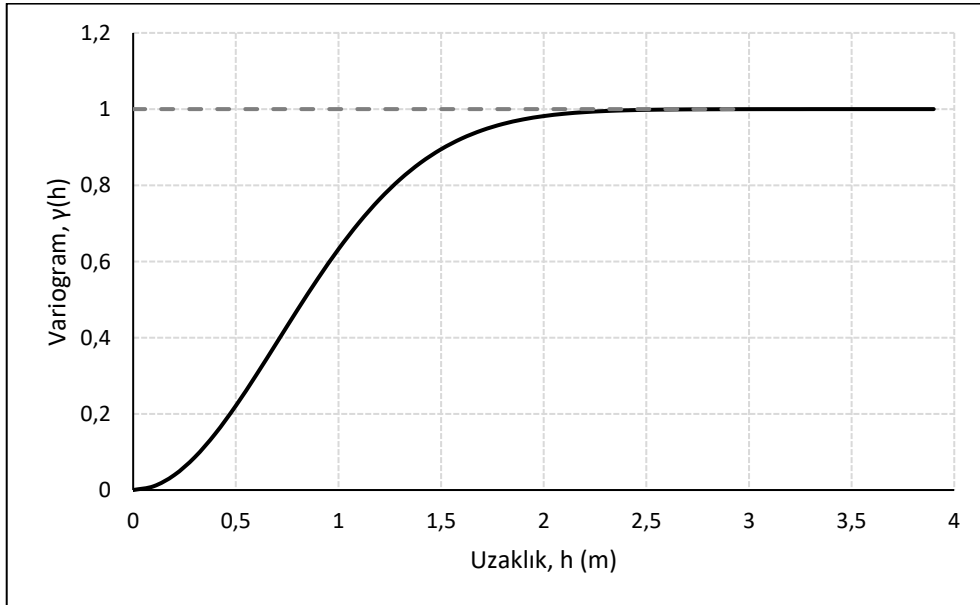
Şekil 2.3. Üssel variogram modeli

### Gauss Modeli

Eşitlik (2.9)'daki gibi tanımlanır.

$$\begin{aligned} \gamma(h) &= 0, & h &= 0 \\ \gamma(h) &= C * \left(1 - e^{-(h/l)^2}\right), & h &\leq l \\ \gamma(h) &= C, & h &> l \end{aligned} \quad (2.9)$$

Eşik değeri ve yapısal uzaklığın 1 birim olduğu Gauss variogram modeli Şekil 2.4'te görülmektedir.



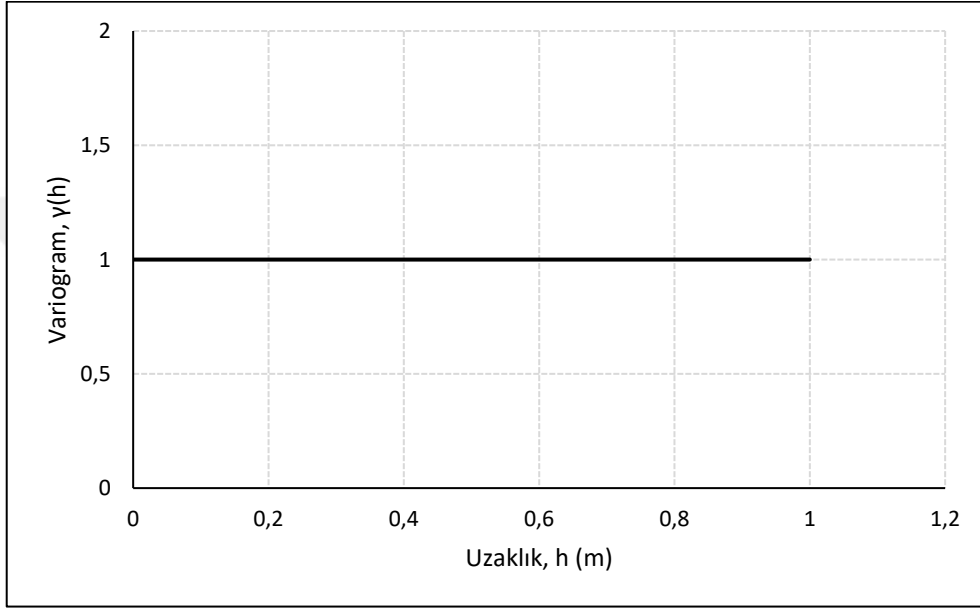
Şekil 2.4. Gauss variogram modeli

### Külçe Etkisi Modeli

Kısa mesafedeki değişimin büyük olması durumunda görülmektedir. Tanımlı külçe etkisi fonksiyonu Eşitlik (2.10)'da verilmiştir.

$$\gamma(h) = C_0 \quad (2.10)$$

Burada  $\gamma(h)$ :  $h$  mesafesindeki variogramı;  $C_0$  ise külçe değerini göstermektedir. Eşik değeri 1 olan külçe etkisi modeli Şekil 2.5'te verilmiştir.



Şekil 2.5. Külçe etkisi variogram modeli

### 2.3.2. Eşik Değersiz (Silsiz) Modeller

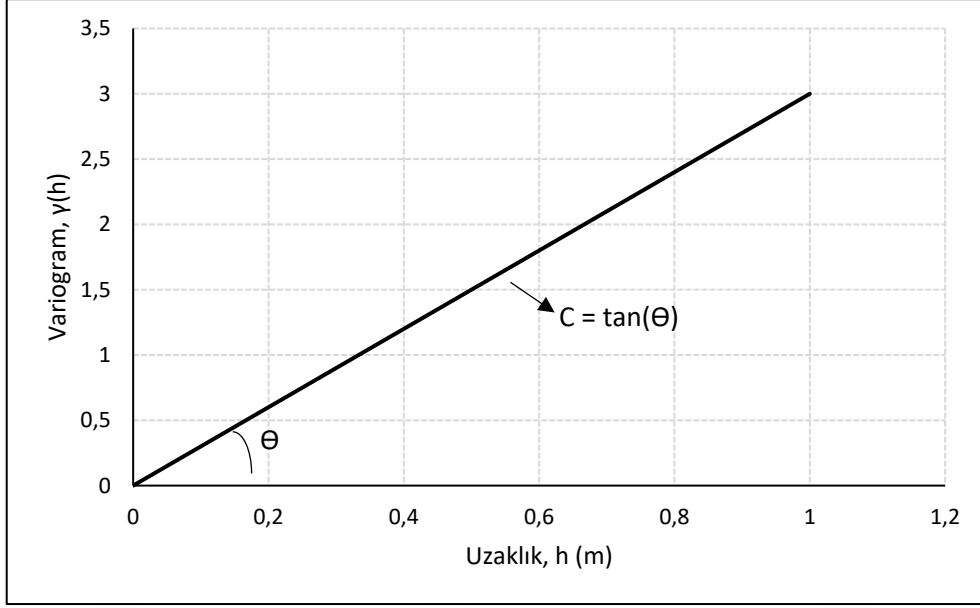
#### Doğrusal Model

Eşik değersiz modeller içerisinde en yaygın kullanılan modeldir. Eşitlik (2.11)'de doğrusal model fonksiyonu verilmiştir.

$$\gamma(h) = C * h \quad (2.11)$$

Burada  $\gamma(h)$ :  $h$  uzaklığındaki variogramı,  $C$  doğrunun eğimini ve  $h$  ise uzaklığı göstermektedir.

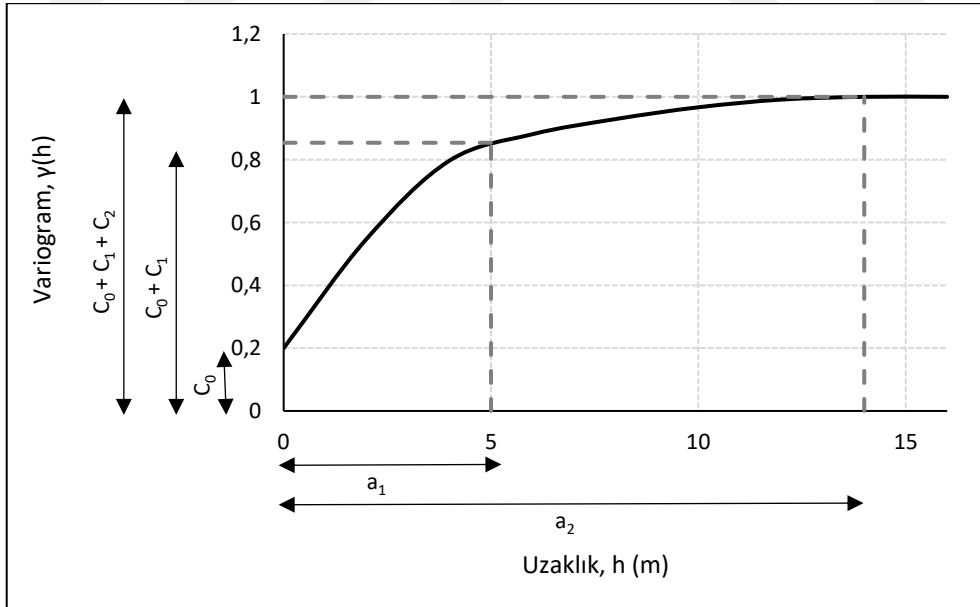
Doğrusal variogram modelinin grafiksel gösterimi Şekil 2.6'da görülmektedir.



Şekil 2.6. Doğrusal variogram modeli

### Yuvalı Yapı Modeli

Bazı durumlarda, uzaklığa bağlı değişim birden fazla variogram fonksiyonu ile ifade edilebilir. Bu variogram fonksiyonları benzer iki variogram modelinden veya farklı iki variogram modelinin birleşiminden oluşabilir. Şekil 2.7’de külçe etkisi modeli ve iki farklı küresel model içeren yuvalı yapıda bir variogram modeli verilmiştir.



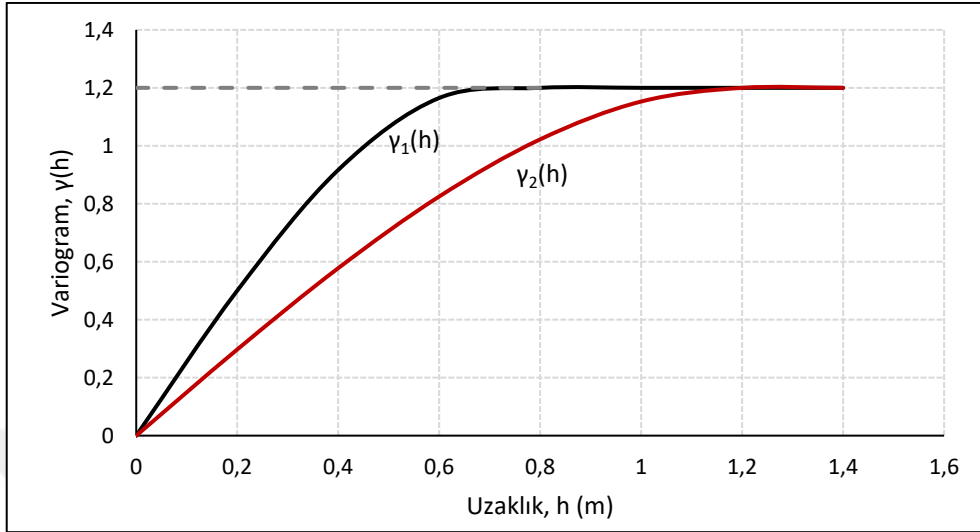
Şekil 2.7. Yuvalı yapı modeli

### 2.4. Anizotropi

Variogramlar çeşitli yönlerde hesaplanabilmektedir. Belirli yönlerde uyarlanan variogram modellerinde yapısal uzaklıklarda veya eşik değerlerinde farklılıklar görülebilir. Buna anizotropi denir.

### 2.4.1. Geometrik Anizotropi

Farklı yönlerde hesaplanan deneysel variogramlar farklı yapısal uzaklıklarda eşik değere ulaşıyorsa geometrik anizotropi durumu söz konusudur (Şekil 2.8).

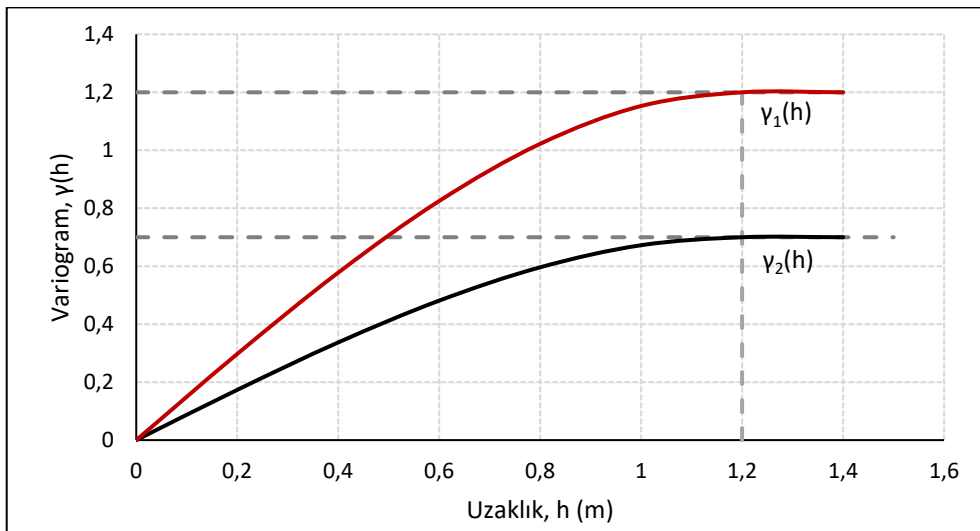


Şekil 2.8. Geometrik anizotropi

Yapısal uzaklığın daha düşük olduğu yönde, yapı gösteren uzaklığın daha düşük olduğu söylenebilir.

### 2.4.2. Zonal Anizotropi

Farklı yönlerde hesaplanan deneysel variogramların eşik değerleri farklı olabilir. Bu durum bölge içerisinde yüksek tenörlü değişkenler ve düşük tenörlü değişkenlerin zonal olarak ayrılmasından kaynaklanabilir. Eşik değerlerindeki bu farklılık zonal anizotropi olarak adlandırılır (Şekil 2.9).



Şekil 2.9. Zonal anizotropi

## 2.5. Kovaryans Fonksiyonu

İki rastlantı değişkeninin birlikte değişkenliğinin ölçüsü kovaryanstır.  $X$  ve  $Y$  olmak üzere iki değişkenin ortalamaları  $\mu_X$  ve  $\mu_Y$  olsun.  $X$  ve  $Y$ 'nin kovaryansı,

$$Cov[X, Y] = E[(X - \mu_X) * (Y - \mu_Y)] \quad (2.12)$$

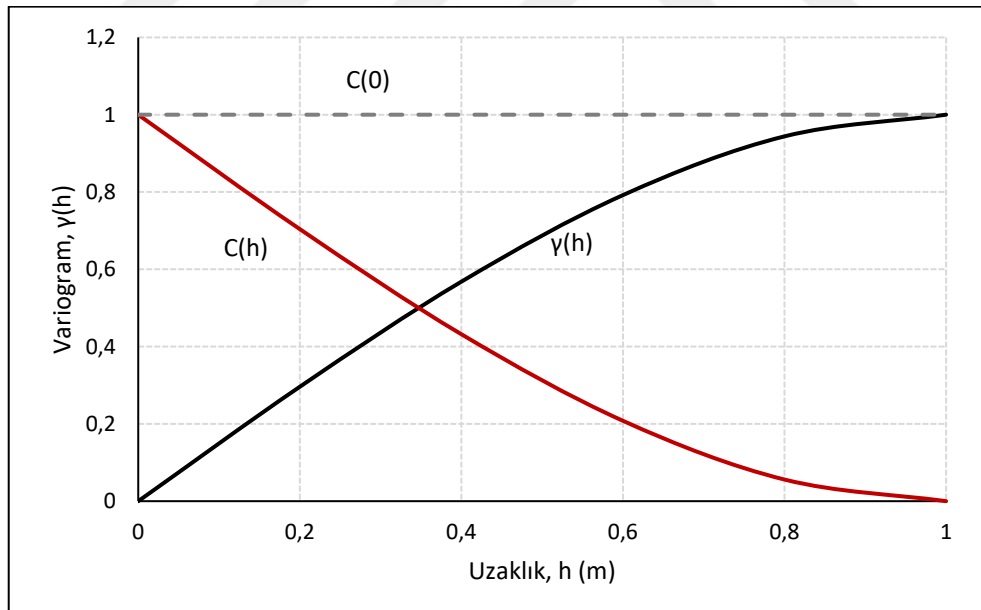
olarak ifade edilir. Eşitlik (2.12)'de  $E$  beklenen değer işlemcisini göstermektedir.

Birbirleri ile pozitif ilişkiye sahip değişkenlerin kovaryansı pozitifken, negatif ilişkiye sahip değişkenlerin kovaryansı negatiftir.

Kovaryans fonksiyonu ve variogram fonksiyonu arasında Eşitlik (2.13)'te gösterilen ilişki bulunmaktadır.

$$\gamma(h) = C(0) - C(h) \quad (2.13)$$

Eşitlik (2.13)'te  $\gamma(h)$ : variogram fonksiyonunu,  $C(h)$ :  $h$  uzaklığındaki kovaryansı ve  $C(0)$  ise varyansı ifade etmektedir. Bu ilişki grafiksel olarak Şekil 2.10'da gösterilmektedir.



Şekil 2.10. Variogram ve kovaryans arasındaki ilişki

## 2.6. Kestirim

Bölgesel değişkenin örneklenmemiş bir noktadaki değerinin hesaplanması kestirim olarak adlandırılır [18]. Kestirimde kullanılan klasik yöntemler; poligon, basit ortalama ve uzaklığın tersi ile ağırlıklandırma gibi yöntemlerdir. Fakat en yaygın

olarak kullanılan yöntem krigleme (*kriging*) yöntemidir. Krigleme yönteminde  $x_0$  noktasındaki  $Z^*(x_0)$  kestirim değeri Eşitlik (2.14) ile hesaplanır.

$$Z^*(x_0) = \sum \lambda_i z(x_i) \quad (2.14)$$

Bu eşitlikte  $z(x_i)$ ;  $x_0$  noktasını kestirmek için kullanılan örnekleri,  $\lambda_i$  ise bu örneklere atanacak olan ağırlıkları ifade etmektedir. Kestirimde kullanılacak örneklerin değerleri bilinmektedir fakat atanacak olan ağırlıkları hesaplamak gerekir. Yansızlık koşulunun sağlanması ve en küçük hata varyansının elde edilmesi koşulları ile ağırlıklar belirlenir. Ağırlıkların bu koşullar altında belirlenmesi işlemine ortalamasız krigleme (*ordinary kriging*) adı verilir [19]. Bu koşulları sağlayarak elde edilecek olan kestirim değerleri Eşitlik (2.15)'teki matris sisteminin çözülmesi ile elde edilir.

$$\begin{bmatrix} \gamma(x_1 - x_1) & \gamma(x_1 - x_2) & \cdots & \gamma(x_1 - x_n) & 1 \\ \gamma(x_2 - x_1) & \gamma(x_2 - x_2) & \cdots & \gamma(x_2 - x_n) & 1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \gamma(x_n - x_1) & \gamma(x_n - x_2) & \cdots & \gamma(x_n - x_n) & 1 \\ 1 & 1 & \cdots & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \vdots \\ \lambda_n \\ \mu \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \gamma(x_1 - x_0) \\ \gamma(x_2 - x_0) \\ \vdots \\ \gamma(x_n - x_0) \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

Eşitlik (2.15) ile verilen matris sisteminde  $\gamma(x_p - x_n)$ ;  $x_p$  ve  $x_n$  uzaklığındaki variogram değerini,  $\mu$ ; lagrange çarpanını,  $\lambda_n$ ;  $x_n$  noktasındaki ağırlık değerini ve  $\gamma(x_n, x_0)$ ;  $x_0$  ve  $x_n$  noktaları arasındaki variogram değerini göstermektedir.

Bir diğer krigleme yöntemi ise ortalamaya bağlı olan ortalamalı kriglemedir (*simple kriging*). Bu yöntemde ağırlıklar Eşitlik (2.16)'da belirtilen matris sisteminin çözülmesi ile elde edilir.

$$\begin{bmatrix} \gamma(x_1 - x_1) & \gamma(x_1 - x_2) & \cdots & \gamma(x_1 - x_n) \\ \gamma(x_2 - x_1) & \gamma(x_2 - x_2) & \cdots & \gamma(x_2 - x_n) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \gamma(x_n - x_1) & \gamma(x_n - x_2) & \cdots & \gamma(x_n - x_n) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \vdots \\ \lambda_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \gamma(x_1 - x_0) \\ \gamma(x_2 - x_0) \\ \vdots \\ \gamma(x_n - x_0) \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

## 2.7. Benzetim

Benzetimin amacı, temel olarak konuma bağlı değişkenliği yeniden üretecek veri kümeleri elde etmektir. Belirli bir değişkenin yapısına uygun ve gerçek değerlerle aynı değişkenliği gösteren veriler jeostatistiksel benzetim ile üretilebilir. Benzetimle elde edilen değerler;

- Gerçek veriler gibi aynı histogram ve variograma,

- Örneklelenmiş noktalarda gerçek verilerle aynı değerlere sahip olabilirler [18].  
Yalnızca birinci ölçütü sağlayan benzetimlere koşulsuz benzetim, her iki ölçütü de sağlayan benzetimlere ise koşullu benzetim denir.

Literatürde birçok jeostatistiksel benzetim yöntemi bulunmaktadır. Bunlar arasında ardışık benzetim (sequential simulation) oldukça yaygın bir şekilde kullanılan yöntemlerden biridir. Ardışık benzetim yönteminin, ardışık normal benzetim ([7]; [20]), ardışık indikatör benzetim ([21]; [20]; [22]) ve doğrudan ardışık benzetim ([23]) gibi alt yöntemleri vardır.

Bu tezin içeriği ağırlıklı olarak jeostatistiksel benzetim konusundadır ve yöntem olarak ardışık normal benzetim kullanılmaktadır. Ardışık normal benzetim ile ilgili detaylı bilgiler Bölüm 3'te verilmiştir.

### 3. ÖZKRIGLENEBİLİRLİK VE ÖZÜNLÜ İLİŞKİLİ FAKTÖRLER

Bu bölümde “Özkriglenebilirlik (*Autokrigeability*)” ve “Özünü İlişkili Faktörlerle Çokdeğişkenli Jeostatistiksel Benzetim” yöntemi teorik olarak ele alınmış ve özünü ilişki modeline yol açacak özkriglenebilir bir faktörleme yaklaşımı geliştirilmiştir. Bu faktörleme yöntemine dayanan benzetim yöntemine özünü ilişkili faktörlerle (ÖİF) çokdeğişkenli benzetim yöntemi adı verilmiştir.

#### 3.1. Giriş

Özkriglenebilirlik, eşkrigleme ile kriglemenin eşdeğer olduğu durumlar için kullanılan bir terimdir. Özkriglenebilirlik koşulu altında eşbenzetim, tek değişkenli benzetim ile aynı sonuçları üretir. Bunun için eşbenzetimle tek değişkenli benzetimin eşdeğer olduğu faktörleri elde etmek gerekir. Bu tür faktörler, Matheron [11] ve Wackernagel [12] tarafından özkriglenebilir (*autokrigeable*) faktörler olarak tanımlanmıştır. Subramanyam ve Pandalai [13], eşkrigleme ve krigleme yöntemlerinin eşdeğer olduğu koşulları kapsamlı bir şekilde incelemişlerdir.

Özkriglenebilir faktörlerden çokdeğişkenli benzetimler üretmek oldukça kolay ve hızlıdır. Bunun için özkriglenebilir faktörleri birbirinden bağımsız bir şekilde benzetmek ve benzetilmiş değerleri orijinal veri uzayına geri dönüştürmek yeterlidir.

Wackernagel [12], özkriglenebilirliğe yol açan iki durum belirlemiştir: (1) çapraz variogramların bütün uzaklıklarda sıfır olması (diklik), (2) çapraz variogramlarla düz variogramların orantılı olması (özünü ilişki). Özkriglenebilir faktörlerin üretiminde şimdiye kadar literatürde ilk yaklaşım (dik faktör yaklaşımı) dikkate alınmıştır. Temel bileşenler analizi (PCA), Minimum / Maksimum öz ilişkili faktör analizi (MAF), eşzamanlı köşegenleştirme (*simultaneous diagonalization*), Gauss iterasyonu ile eşağırlıklı köşegenleştirme ve uzaklığa bağlı çapraz ilişkilerin enküçüklenmesi yöntemleri bunlar arasında sayılabilir. Bu yöntemlere ilişkin kısa bir özet, Bölüm 3.2.3'te “Dik faktör üretiminde kullanılan yaklaşımlar” adlı bölümde verilmiştir.

Tanım olarak her bir değişkenin geri kalan diğer değişkenlere göre özkriglenebilir olduğu çokdeğişkenli veriler, özünü ilişki modelini (*intrinsic correlation model*) oluşturur [12].

## 3.2. Yöntem

### 3.2.1. Çok Değişkenli Durağan Rastlantı Fonksiyonu

$Z(x)$ , çok değişkenli ( $p$ -boyutlu) ikinci dereceden durağan (*second order stationary*) bir rastlantı fonksiyonu

$$Z(x) = [Z_1(x), Z_2(x), \dots, Z_p(x)] \quad (3.1)$$

olsun. Durağanlığın bir sonucu olarak ortalama değer vektörü

$$m = E[Z(x)] = [m_1, m_2, \dots, m_p] \quad (3.2)$$

Kovaryans fonksiyonu matrisi

$$C_Z(h) = E[(Z(x) - m)^T (Z(x+h) - m)] = \begin{bmatrix} C_{11}(h) & C_{12}(h) & \dots & C_{1p}(h) \\ C_{21}(h) & C_{22}(h) & \dots & C_{2p}(h) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C_{p1}(h) & C_{p2}(h) & \dots & C_{pp}(h) \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

variogram matrisi ise

$$\Gamma_Z(h) = 0,5 E [(Z(x) - Z(x+h))^T (Z(x+h) - m)] = \begin{bmatrix} \gamma_{11}(h) & \gamma_{12}(h) & \dots & \gamma_{1p}(h) \\ \gamma_{21}(h) & \gamma_{22}(h) & \dots & \gamma_{2p}(h) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \gamma_{p1}(h) & \gamma_{p2}(h) & \dots & \gamma_{pp}(h) \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

şeklinde yazılabilir. Bu ifadelerden  $E$ ; beklenen değer işlemcisini,  $T$ ; bir matrisin evriğini (transposition),  $c_{ij}$  ve  $\gamma_{ij}$  sırasıyla  $i$  ve  $j$ 'inci değişkenler arasındaki kovaryans ve variogramları göstermektedir.  $C_Z(h)$  ve  $\Gamma_Z(h)$  matrisleri yalnızca  $h$  uzaklık vektörüne bağlıdır.  $h = 0$  olduğunda kovaryans fonksiyonu matrisi  $C_Z(h)$ , varyans – kovaryans matrisi  $V$ 'ye eşittir ( $C_Z(0) = V$ ) [20].

### 3.2.2. Özkriglenebilirlik ve Özünlülük İlişki Modeli

Bir değişkenin eşkriglenmesi tek değişkenli kriglemesine eşitse bu değişkenin özkriglenebilir olduğu söylenir. Bu durumda kestirilecek değişken dışında diğer tüm değişkenlere atanacak ağırlıklar sıfıra eşittir [12]; [24]. Birincil (*primary*) ve ikincil (*secondary*) değişkenlerin aynı lokasyonlarda ölçüldüğünü (*isotopic sampling*) varsayalım. Eğer birincil değişkenle diğer tüm ikincil değişkenler arasındaki çapraz variogramların  $[\gamma_{1j}(h)]$  birincil değişkenin düz variogramına  $\gamma_{11}(h)$  oranı:

$$\frac{\gamma_{1j}(h)}{\gamma_{11}(h)} = s_{1j}, \quad j = 1, 2, \dots, p \quad (3.5)$$

bütün uzaklıklar için sabitse birincil değişkenin özünüli ilişkili olduğu söylenir. Özünüli ilişki gösteren bir değişken, özkriglenebilir olduğundan bu değişkenin eşkriglemesi, onun kriglemesine eşdeğerdir. Özünüli ilişki modeli altında  $x_0$  noktasındaki örneklenmemiş bir  $Z(x_0)$  değerinin,  $x_i, i = 1, 2, \dots, n$  noktalarındaki  $p$  adet değişkenin  $[Z_j(x_i), j = 1, 2, \dots, p]$  ölçülmüş değerlerinden ortalamalı eşkrigleme (*simple cokriging*) sistemi ile kestirimini göz önüne alalım. Bu durumda ortalamalı eşkrigleme sistemi Eşitlik (3.6)'da gösterildiği gibi yazılabilir [20].

$$\begin{bmatrix} K_{11} & s_{12}K_{11} & \cdots & s_{1p}K_{11} \\ s_{21}K_{11} & K_{22} & \cdots & s_{2p}K_{11} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ s_{p1}K_{11} & s_{p2}K_{11} & \cdots & K_{pp} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_1^{SCK} \\ \lambda_2^{SCK} \\ \vdots \\ \lambda_p^{SCK} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{11} \\ s_{21}k_{11} \\ \vdots \\ s_{p1}k_{11} \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

Eşitlik (3.6)'da:

$$K_{jj} = \begin{bmatrix} \gamma_{jj}(x_1 - x_1) & \cdots & \gamma_{jj}(x_1 - x_n) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \gamma_{jj}(x_1 - x_n) & \cdots & \gamma_{jj}(x_n - x_n) \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

örnekler arasındaki variogram matrisini,  $\gamma_{jj}(x_1 - x_i)$ ;  $x_1$  ve  $x_i$  noktaları arasındaki  $j$  'inci değişkenin variogram değerini,  $s_{1j}$ ; birincil değişken ile  $j$ 'inci değişken arasındaki özkriglenebilirlik faktörünü,  $\lambda_j^{SCK}$ ;  $j$ 'inci değişkene atanacak ortalamalı eşkrigleme ağırlık vektörünü

$$\lambda_j^{SCK} = \begin{bmatrix} \lambda_{j1}^{SCK} \\ \lambda_{j2}^{SCK} \\ \vdots \\ \lambda_{jn}^{SCK} \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

ve  $k_{11}$  ise

$$k_{11} = \begin{bmatrix} \gamma_{11}(x_1 - x_0) \\ \gamma_{11}(x_2 - x_0) \\ \vdots \\ \gamma_{11}(x_n - x_0) \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

sütun vektörünü göstermektedir. Wackernagel [12], Eşitlik (3.6)'daki sistemin çözümünün

$$\lambda_1^{SCK}(x) = K_{11}^{-1}k_{11} \equiv [\lambda_{i1}^{SK}] \quad (3.10)$$

$$\lambda_j^{SCK}(x) = [\lambda_{ij}^{SCK}(x)] = 0, \quad j = 1, 2, \dots, p$$

olduğunu göstermiştir. Bu çözümde  $\lambda_{1i}^{SK}$  ortalamalı krigleme sisteminin çözümünden elde edilen ağırlık vektörünü ifade etmektedir. Eşitlik (3.10)'un çözümü, birinci değişken dışındaki tüm diğer değişkenlere atanacak ağırlıkların sıfıra eşit olduğunu dolayısıyla ortalamalı eşkrigleme sisteminin ortalamalı krigleme sistemi ile aynı sonucu vereceğini göstermektedir. Ortalamasız eşkrigleme (*ordinary cokriging*) içinde özkriglenebilirliğe ilişkin benzer bir kanıt Bogaert [24] tarafından verilmiştir.

### 3.2.3. Dik Faktör Üretiminde Kullanılan Yaklaşımlar

PCA, sıfır uzaklığında oluşturulan varyans-kovaryans matrisinin özdeğer (*eigenvalue*) analizine dayanır. Suro-Perez [25], PCA'yı indikatör değişkenlerin jeostatistiksel benzetiminde kullanmıştır. Diğer bir yöntem olan MAF ise gerçekte kısa ve uzun mesafelerde oluşturulan variogram matrislerine uygulanan iki aşamalı temel bileşenler analizidir. MAF yöntemi, Boucher ve Dimitrikopoulos [26], Rondon ve Tran [27] ve Rondon [28] tarafından çokdeğişkenli jeostatistiksel benzetim amacıyla kullanılmıştır. Bu yöntemler dikliği her uzaklıkta garanti etmezler. Örneğin PCA sıfır uzaklığında, MAF ise variogram matrislerinin oluşturulduğu iki uzaklıkta dik faktörler üretir. Uygulamada kullanılan diğer bir yöntem, eşbölgesel değişkenlerin doğrusal modeli (LMC) dir. Bununla birlikte LMC, kuramsal olarak bir faktörleme yöntemi olmayıp eşbölgesel değişkenlerin farklı uzaklıklardaki yapılarını incelemeyi esas alır. PCA ve MAF'ın LMC içinde kullanıldığı çokdeğişkenli jeostatistiksel benzetim yöntemi, Emery ve Ortiz [29] tarafından geliştirilmiştir.

Genel durumda bütün uzaklıklarda tamamen ilişkisiz faktörler üretmek mümkün değildir [30]. Bu nedenle uzaklığa bağlı dikliği yaklaşık bir şekilde sağlayacak yöntemlere gereksinim duyulmuştur. Örneğin Xie vd. [31] ve Tercan [32], eşzamanlı köşegenleştirme (*simultaneous diagonalization*) yöntemi ile yaklaşık dik faktörler üretmişler ve bu faktörleri kestirim amacıyla kullanmışlardır. Mueller ve Ferreira [33], Tichavsky ve Yeredor [34] tarafından geliştirilen Gauss iterasyonu ile eş ağırlıklı

köşegenleştirme (U-WEDGE) yöntemini bir demir yatağının jeostatistiksel benzetimine uyarlamışlardır. Tercan vd. [1] variogram matrislerini yaklaşık bir şekilde dikleştirmek amacıyla uzaklığa bağlı çapraz ilişkinin enküçüklenmesine dayanan yeni bir yöntem (MSC) geliştirmiştir.

### 3.2.4. Özünü İlişkili Faktörlerin Üretimi

$F(x)$ ,  $p$ -boyutlu durağan (stationary) özkriglenebilir faktörlerden oluşan bir faktör  $F(x) = [F_1(x), F_2(x), \dots, F_p(x)]$  olsun. Ayrıca bu faktörleri doğrusal bir şekilde  $Z(x)$ 'e dönüştüren dik, kare bir  $A$  matrisinin var olduğunu kabul edelim. Bu durumda,

$$Z(x) = F(x)A \quad (3.11)$$

eşitliği yazılabilir. Dolayısıyla problem, arzu edilen özkriglenebilir faktörleri üretecek bir  $W = A^{-1}$  dik matrisi belirlemektir. Bu matris bilindiğinde orijinal veriden özkriglenebilir faktörleri hesaplamak olanaklıdır.

$$F(x) = Z(x)W \quad (3.12)$$

bu durumda her bir faktör  $F_j$ ,  $j = 1, 2, \dots, p$  özkriglenebilirlikten dolayı ayrı ayrı benzetilip, benzetilmiş faktörler orijinal veri uzayına geri dönüştürülebilir. Geri dönüşümden sonra benzetim tamamlanır.

### 3.2.5. Dönüşüm Matrisinin Belirlenmesi

Faktörlerin varyans – kovaryans ( $V_F$ ) ve variogram matrisi ( $\Gamma_F(h)$ )

$$V_F = W^T \Gamma_Z(h) W \quad (3.13)$$

$$\Gamma_F(h) = W^T \Gamma_Z(h) W \quad (3.14)$$

$W$  dönüşüm matrisi ve değişkenlerin variogram matrisi  $\Gamma_Z(h)$  cinsinden ifade edilebilir. Bu durumda  $i$  ve  $j$ 'inci faktörler arasındaki variogram fonksiyonu

$$\gamma_{ij}^T(h) = w_i^T \Gamma_Z(h) w_j \quad (3.15)$$

eşittir. Eşitlik (3.15)'te  $w_j$ ,  $W$  dönüşüm matrisinin  $j$ 'inci sütun vektörüne karşılık gelmektedir.

Eşitlik (3.12)'de sadece  $Z(x)$  bilinmekte, dönüşüm matrisi  $W$  ile elde edilecek faktörlerin  $F(x)$  belirlenmesi gerekmektedir. Bu problem literatürde kör kaynak ayırıştırması (*blind source separation*) olarak bilinen probleme karşılık gelir (Hyvarinen vs.) [35]. Burada denklem sayısı  $p$ , ancak bilinmeyen sayısı  $p \times (p + 1)$ 'dir. Kör kaynak ayırım problemlerinde aranan faktörlerin özellikleri göz önünde bulundurularak bir kriter belirlenir ve belirlenen bu kritere göre amaç fonksiyonu enküçüklenir. Faktörler, özönlü ilişkiye sahip olduğu için kriter olarak

$$\frac{\gamma_{ij}^F(h)}{\gamma_{ii}^F(h)} = \frac{w_i^T \Gamma_Z(h) w_j}{w_i^T \Gamma_Z(h) w_i} = s_{ij}, \quad i \neq j, \quad i \text{ ve } j = 1, 2, \dots, p \quad (3.16)$$

kullanılabilir. Eşitlik (3.16)'da  $\gamma_{ij}^F(h)$ ;  $i$  ve  $j$ 'inci faktörler arasındaki çapraz variogramları göstermektedir. Bu durumda amaç fonksiyonu  $\varphi$ ,

$$\varphi = \sum_{i=1}^p \sum_{j \neq i}^p \sum_{k=1}^l \left( \frac{w_i^T \Gamma_Z(h_k) w_j}{w_i^T \Gamma_Z(h_k) w_i} - m_{ij} \right)^2 \quad (3.17)$$

şeklinde yazılabilir. Eşitlik (3.17)'de  $l$ ; adım (lag) sayısı,  $m_{ij}$  ise  $i$  ve  $j$ 'inci faktörler arasındaki özkrişlenebilirlik değerlerinin ortalamasıdır.

$$m_{ij} = \frac{1}{l} \sum_{k=1}^l \frac{w_i^T \Gamma_Z(h_k) w_j}{w_i^T \Gamma_Z(h_k) w_i} \quad (3.18)$$

Eşitlik (3.17)'de verilen hedef fonksiyon, faktörlerin düz ve çapraz deneysel variogramlarını esas alan bir fonksiyondur. Bu fonksiyon, özönlü ilişki modelini farklı bir formda ifade ederek geliştirilebilir. Özönlü ilişki modeli altında variogram matrisi  $\Gamma(h)$ , varyans-kovaryans matrisi  $V$  ile variogram fonksiyonunun  $\gamma(h)$  çarpımına eşittir:

$$\Gamma(h) = V\gamma(h) \quad (3.19)$$

Eşitlik (3.13), Eşitlik (3.14) ve Eşitlik (3.19) dikkate alınarak hedef fonksiyon

$$\varphi = \sum_{i=1}^p \sum_{j \neq i}^p \sum_{k=1}^l \left( \frac{w_i^T \Gamma_z(h_k) w_j}{w_i^T \Gamma_z(h_k) w_i} - 1 \right)^2 \quad (3.20)$$

şeklinde yeniden yazılabilir. Geliştirilen bu hedef fonksiyonlar (Eşitlik (3.17) ve Eşitlik (3.20)),  $p^2$  parametrelili ( $p$ : değişken sayısı) sürekli fonksiyonlardır. Bu tür fonksiyonlar global bir optimum yanında çok sayıda lokal optimum içerebilir. Literatürde bu fonksiyonların enküçüklenmesi amacıyla önerilmiş çok sayıda yöntem vardır. Bunlar arasında benzetilmiş tavlama (BT), Newton algoritması, parçacık sürü optimizasyonu (PSO) ve dereceli azalma (gradient descent) gibi yöntemler, daha önceki araştırmalarda kullanılan yöntemlerdir. Newton algoritması ve dereceli azalma yöntemleri lokal bir optimuma takılıp global optimuma ulaşamayabilen yöntemler oldukları için hedef fonksiyonların optimizasyonunda PSO yöntemi dikkate alınmıştır.

### 3.2.6. Parçacık Sürü Optimizasyonu

Parçacık Sürü Optimizasyonu (*Particle Swarm Optimization*) (PSO), Kennedy ve Eberhart [36] tarafında geliştirilmiş popülasyon temelli sezgisel bir optimizasyon tekniğidir. Kuş veya balık sürülerinin sosyal davranışlarından esinlenerek geliştirilmiştir. Bu yöntemde, sistem rastgele çözümlerden oluşan bir popülasyonla başlatılır ve en iyi çözüm için jenerasyonları güncelleyerek arama yapar. PSO'da parçacık (*particles*) denilen potansiyel çözümler, mevcut en iyi çözümleri takip ederek problem uzayında gezinirler. PSO uygulaması kolay bir yöntemdir ve çok az parametreye gereksinim duyar.

PSO, bir grup rastgele üretilmiş çözümle (parçacıkla) başlatılır ve jenerasyonlar güncellenerek en uygun değerler araştırılır. Her iterasyonda, her bir parçacık iki "en iyi" değere göre güncellenir. Bunlardan birincisi bir parçacığın o ana kadar bulunduğu en iyi uygunluk değeridir. Ayrıca bu değer daha sonra kullanılmak üzere hafızada tutulur ve " $W_{best}$ " yani parçacığın en iyi değeri olarak isimlendirilir. Diğer en iyi değer ise popülasyondaki herhangi bir parçacık tarafından o ana kadar elde edilmiş en iyi uygunluk değerine sahip çözümdür. Bu değer popülasyon için global en iyi değerdir ve " $G_{best}$ " olarak isimlendirilir.

$p$  boyutlu uzayda,  $m$  adet parçacık olduğunu varsayalım. Böylece,  $l$ 'inci parçacık için  $W_{best}$  ve  $G_{best}$  aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$W_l = [w_{l1}, w_{l2}, \dots, w_{lp}] \quad (3.21)$$

$$W_{best\ l} = [w_{l1}^{best}, w_{l2}^{best}, \dots, w_{lp}^{best}] \quad (3.22)$$

$$G_{best\ l} = [g_{l1}^{best}, g_{l2}^{best}, \dots, g_{lp}^{best}] \quad (3.23)$$

$l$ 'inci parçacığın her bir konumundaki değişim miktarı

$$V_l = [v_{l1}, v_{l2}, \dots, v_{lp}] \quad (3.24)$$

olarak ifade edilir. En iyi iki değer,  $W_{best}$  ve  $G_{best}$  bulunduktan sonra parçacıkların hızı ve konumu sırasıyla Eşitlik (3.25) ve Eşitlik (3.26)'ya göre güncellenir.

$$V_l^{k+1} = \varphi * (V_l^k + c_1 rand_l^k (W_{best\ l}^k - W_l^k) + c_2 rand_2^k (G_{best\ l}^k - W_l^k)) \quad (3.25)$$

$$W_l^{k+1} = W_l^k + V_l^{k+1} \quad (3.26)$$

Burada  $rand$  (0,1) arasında üretilen rastgele bir değeri,  $l$  parçacık numarasını,  $k$  ise iterasyon sayısını gösterir.  $c_1$  sosyal öğrenme faktörü ve  $c_2$  bilişsel öğrenme faktörleridir.  $\varphi$  ise sürünün her elemanına ait hız güncellemelerinin arama alanından çok uzaklaşmamaları için kullanılan sınırlama (*constriction*) faktörüdür ve sosyal ve bilişsel öğrenme faktörlerinin bir fonksiyonudur. Sınırlama faktörünün belirlenmesini sağlayan formül, Eşitlik (3.27) ve Eşitlik (3.28)'de verilmiştir.

$$c = c_1 + c_2 \quad (3.27)$$

$$\varphi = \frac{2}{|2 - c - \sqrt{c^2 - 4c}|} \quad (3.28)$$

Bunlar parçacıkları bir sonraki  $W_{best}$  ve  $G_{best}$  konumlarına doğru yönlendiren sabitlerdir. Optimizasyon algoritması en yüksek iterasyon sayısına ulaşılması ile sonlanır.

### 3.2.7. Ardışık Normal Benzetim

Her bir özünlül ilişkili faktörün benzetimi ardışık normal benzetim ile gerçekleştirilir. Ardışık normal benzetim kolay ve basit bir yöntem olup standart algoritması aşağıda verilmiştir.

1. Benzetilecek faktör  $[F(x)]$ , standart normal dağılıma  $[Y(x) \approx N(0,1)]$  dönüştürülür.
2. Benzetilecek düğüm noktaları  $x_\beta$ ,  $\beta = 1, 2, \dots, N$  rastgele bir şekilde sıralanır.
3.  $x_\beta$  lokasyonunda standart normal birikimli dağılım fonksiyonunun ortalaması ve varyansı ortalamalı krigleme yöntemi ile kestirilir:

$$Y^*(x_\beta) = m + \sum_{\alpha=1}^n \lambda_\alpha (Y(x_\alpha) - m) \quad (3.29)$$

$$\sigma_{SK}^2(x_\beta) = C(0) - \sum_{\alpha=1}^n \lambda_\alpha C(x_\alpha - x_\beta) \quad (3.30)$$

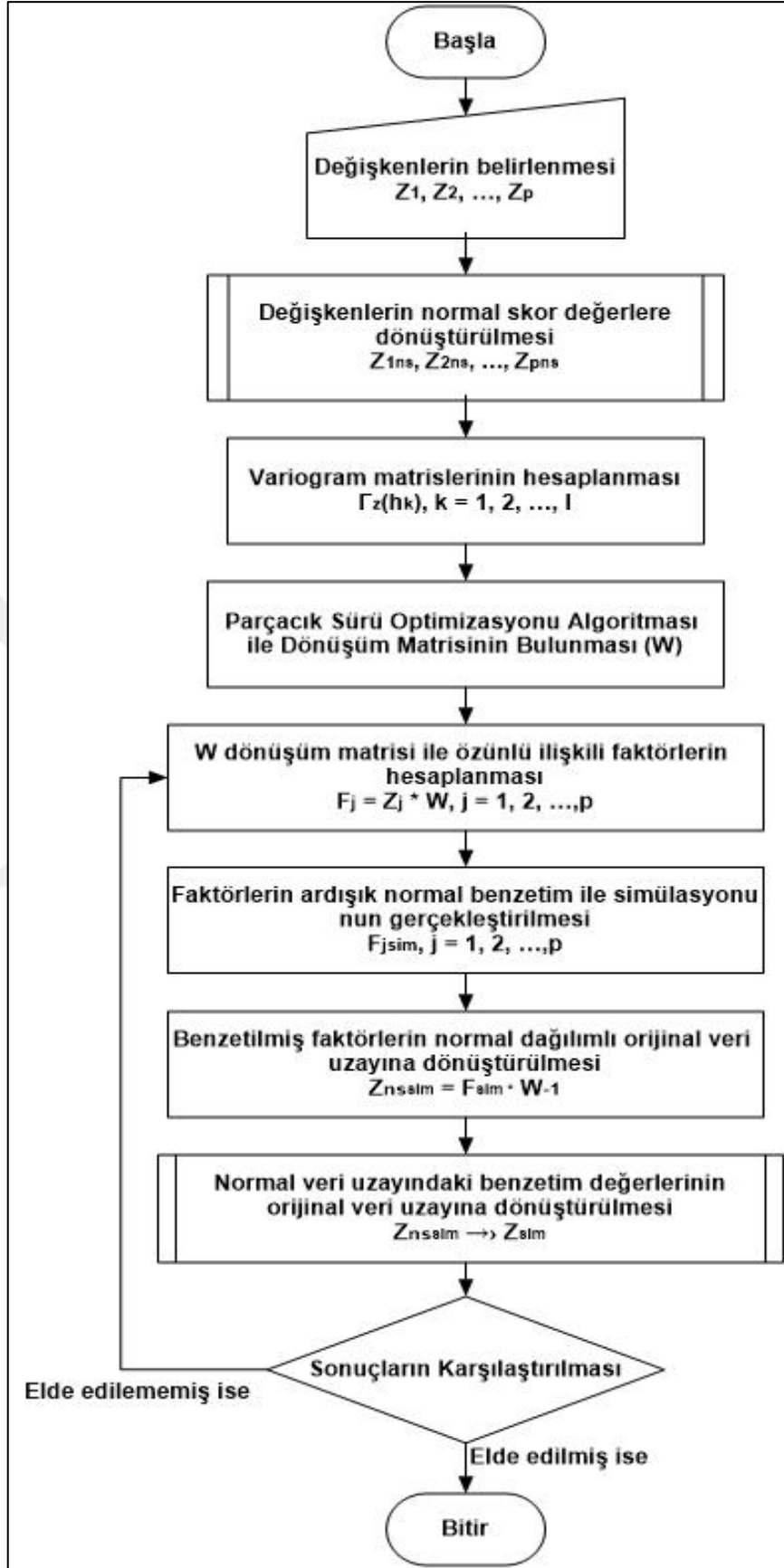
4. Kestirilen birikimli dağılım fonksiyonundan bir  $Y^S(x_\beta)$  değeri çekilip benzetim değeri olarak alınır.
5. Tüm düğüm noktalarının benzetimi yapılan kadar 3 ve 4 adımları tekrarlanır.
6. Son aşamada  $Y^S(x_\beta)$  benzetim değeri faktör uzayına  $F^S(x_\beta)$  geri dönüştürülür.

### 3.2.8. Özünlül İlişkili Faktörlerle Çokdeğişkenli Benzetim

Özünlül ilişkili faktörleme (Öİ) yöntemi geliştirildikten sonra bu faktörlere dayanan çokdeğişkenli jeostatistiksel benzetim dört aşamada gerçekleştirilir:

1. Değişkenlerin belirlenmesi ve farklı uzaklıklarda variogram matrislerinin  $\Gamma_Z(h_k)$ ,  $k = 1, 2, \dots, L$  hesaplanması,
2.  $W$  dönüşüm matrisinin ve özünlül ilişki gösteren faktörlerin  $F_j$ ,  $j = 1, 2, \dots, p$  bulunması,
3. Her bir faktörün ardışık normal benzetim tekniği kullanılarak benzetimi  $F_j^S$ ,  $j = 1, 2, \dots, p$ ,
4. Benzetilmiş faktörlerin orijinal veri uzayına dönüşümü,  $Z^S = F^S W^{-1}$ .

Özünlül ilişkili faktörlerin üretilmesine yönelik akım şeması Şekil 3.1'de verilmiştir.



Şekil 3.1. Özünü ilişkili faktörle çokdeğişkenli jeostatistiksel benzetim yöntemine ilişkin akım şeması

## 4. ÖZÜNLÜ İLİŞKİLİ FAKTÖR ÜRETİMİ ALGORİTMASININ KODLANMASI VE TESTİ

$W$  dönüşüm matrisinin bulunması için, hedef fonksiyonun parçacık sürü optimizasyonu algoritması ile enküçüklenmesi gerekmektedir. Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) algoritması MATLAB ile kodlanmıştır.

Yazılan kodun test edilmesi amacı ile çözümü bilinen bazı test fonksiyonları mevcut kod ile çalıştırılmıştır. Bu test fonksiyonları; literatürde global optimizasyonda kullanılan test fonksiyonları olarak bilinen, çözüm kümeleri belli fonksiyonlardır. Parçacık sürü optimizasyonu algoritmasına uygun yazılan kod ile test fonksiyonlarının enküçüklenmesi sonucunda elde edilen sonuçlar Çizelge 4.1'de görüldüğü gibidir.

Çizelge 4.1. Test fonksiyonlarının optimizasyon sonuçları

Fonksiyon Adı	$f_{min}$	$f_{min}^*$	$[x_1, x_2]$	$[x_1, x_2]^*$	Minimizasyon Başarısı (%)
Beale	0,00	0,00	[3,00, 0,50]	[3,00, 0,50]	100,00
Bird	-106,76	-106,65	[-1,58, -3,13]	[-1,59, -3,16]	99,89
Booth	0,00	0,00	[1,00, 3,00]	[1,00, 3,00]	100,00
Carrromtable	-24,16	-24,03	[9,65, 9,65]	[-9,57, 9,64]	99,46
Hölder Table	-19,21	-19,21	[-8,06, -9,66]	[-8,06, 9,66]	100,00
Three-hump Camel	0	4,89E-05	[0,00, 0,00]	[0,00, 0,01]	100,00

\* optimizasyon ile elde edilen değerler

Çizelge 4.1'de görüldüğü üzere enküçükleme başarısı göz önüne alındığında yazılan optimizasyon kodunun enküçüklemeleri başarılı bir şekilde yaparak doğru bir şekilde çalıştığı görülmektedir.

Test fonksiyonları ile optimizasyon kodunun test edilmesinin ardından tekrarlanabilirlik çalışması yapılmıştır. Bu çalışma için optimizasyon kodu her seferinde aynı başlangıç rassal sayısı (*seed*) ile çalıştırılarak rassal sayı atamaları kontrol altına alınmıştır. Ardından farklı başlangıç rassal sayıları atanarak global optimizasyon sonucunun değişkenliği ölçülmüştür. Başlangıç rassal sayısı değişiminin optimizasyon sonucu üzerinde etkisi olmadığı ve aynı global sonuca ulaşıldığı görülmüştür. Bu da optimizasyonda kullanılacak olan kodun tekrarlanabilirliğini göstermektedir.

#### 4.1. Parçacık Sürü Optimizasyonu Parametre Seçimi

Parçacık sürü optimizasyonu temel alınarak yazılan kodun çalışabilmesi için bazı başlangıç parametrelerinin atanması ve kullanılan veri kümesi için uygun veri yapısının hazırlanması gerekmektedir. Hedef fonksiyona beslenecek olan değişkenler, SGeMS ile ortalaması sıfır, varyansı bir olan normal skor değerlere dönüştürülmüş, normal skor değerlere ait deneysel variogramlar yine SGeMS ile hesaplatılarak koda beslenmiştir.

Parçacık sürü eniyileştiricisi pek çok parametreden etkilenmektedir. Bu parametreler; sosyal ve bilişsel öğrenme faktörleri, sürünün boyutu, komşulukların boyutu, senkronize ve asenkronize güncellemeler ve bunların dışında atalet ve daralma faktörleri gibi parametrelerdir [37].

Optimizasyon ana parametreleri klasik parçacık sürü optimizasyonuna uygun olacak şekilde belirlenmiştir. Sürü sayısı güvenilir sonuçlar verecek kadar büyük, fakat optimizasyonun etkili bir şekilde ve hızlı yapılabilmesine olanak tanıyacak kadar da küçük olmalıdır. Başlangıç için 20 parçadan oluşan bir sürü oluşturulmuştur. Carlisle ve Dozier'in [37] parçacık sürü optimizasyonu parametreleri üzerine yaptığı çalışmada da belirtildiği üzere, 20 – 30 parçalık sürüler en etkili çalışma performansını göstermektedir.

Oluşturulan sürünün her bir elemanı, tek bir sayı olabilir. Değişken sayısının birden çok olduğu durumlarda ise değişken sayısı boyutlarında rastgele dik (ortogonal) kare matrisler şeklinde atanır. Her bir parçacık, aranan dönüşüm matrisi için bir çözüm adayıdır. Başlangıç hızları sıfır olarak kabul edilmiştir. Her iterasyonda hız güncellemeleri yapılmıştır. Hız güncellemelerinde kullanılan sosyal ve bilişsel parametrelerin ( $c_1$  ve  $c_2$ ) toplamının 4,1'den küçük olmaması önerilmektedir [37]. Daha global bir arama alanı oluşturabilmek amacıyla bilişsel parametre sosyal parametreden daha yüksek olacak şekilde seçilerek bilişsel parametre 2,3 ve sosyal parametre 1,8 olarak kabul edilmiştir. Sürünün her elemanına ait hız güncellemelerinin arama alanından çok uzaklaşmalarını için kullanılan sınırlama (*constriction*) faktörü ise sosyal ve bilişsel parametrelerin bir fonksiyonu olarak koda uyarlanmıştır. Durdurma koşulu, en yüksek iterasyon sayısına ulaşılması olarak belirlenmiştir.

Özünü ilişkili faktörlere algoritmasına uyarlanan parçacık sürü optimizasyonu kodu ile yapılan işlemler Intel® Core™ 2 işlemciye, 2,5 GHz işlemci hızına ve 2 GB belleğe sahip donanım ile gerçekleştirilmiştir. Mevcut donanım ile 2 boyutlu veri setinde özünü ilişkili faktörlerin elde edilmesi yaklaşık 4 dakika, özünü ilişkili faktörlerin ardışık normal benzetim ile 50 defa benzetilmesi yaklaşık 7 dakika, benzetilmiş faktörlerin geri dönüştürülmesi işlemi ise yaklaşık olarak 5 dakika sürmektedir. Süreç toplamda 15 – 20 dakika arasında tamamlanmaktadır.

#### **4.2. İki Boyutlu Jura Veri Kümesi Üzerindeki Test**

Bu bölümde, özünü ilişkili faktörlerle çokdeğişkenli jeostatistiksel benzetim yöntemi iki boyutlu çok değişkenli Jura veri kümesinden seçilen üç değişkene (Zn, Ni ve Cd) uygulanmıştır. Çalışma, Matlab ile yazılan kod kullanılarak;

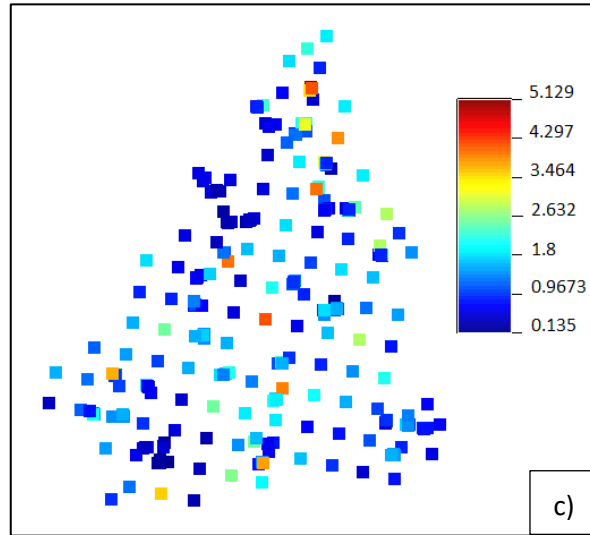
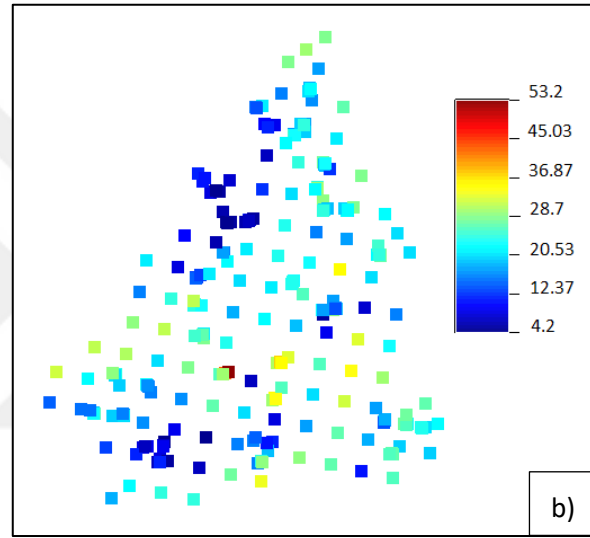
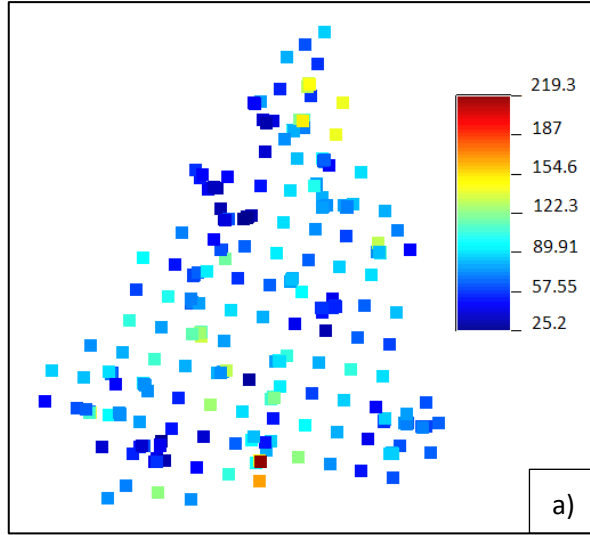
- hedef fonksiyonun enküçüklenmesi,
- fonksiyonu enküçükleyen global en iyi değer kullanılarak normal skor verilerden özünü ilişkili faktörlerin üretilmesi,
- özünü ilişkili faktörlerin jeostatistiksel benzetiminin yapılması,
- benzetilmiş faktörlerin orijinal veri uzayındaki normal skor benzetim değerlerine dönüştürülmesi,
- normal skor benzetim değerlerinin orijinal veri uzayına geri döndürülmesi ve
- orijinal veriler ve ÖİF yöntemi ile üretilen benzetimlerin istatistiksel ve jeostatistiksel olarak karşılaştırılması

işlemlerini kapsamaktadır.

##### **4.2.1. Jura Veri Kümesinin Tanıtımı**

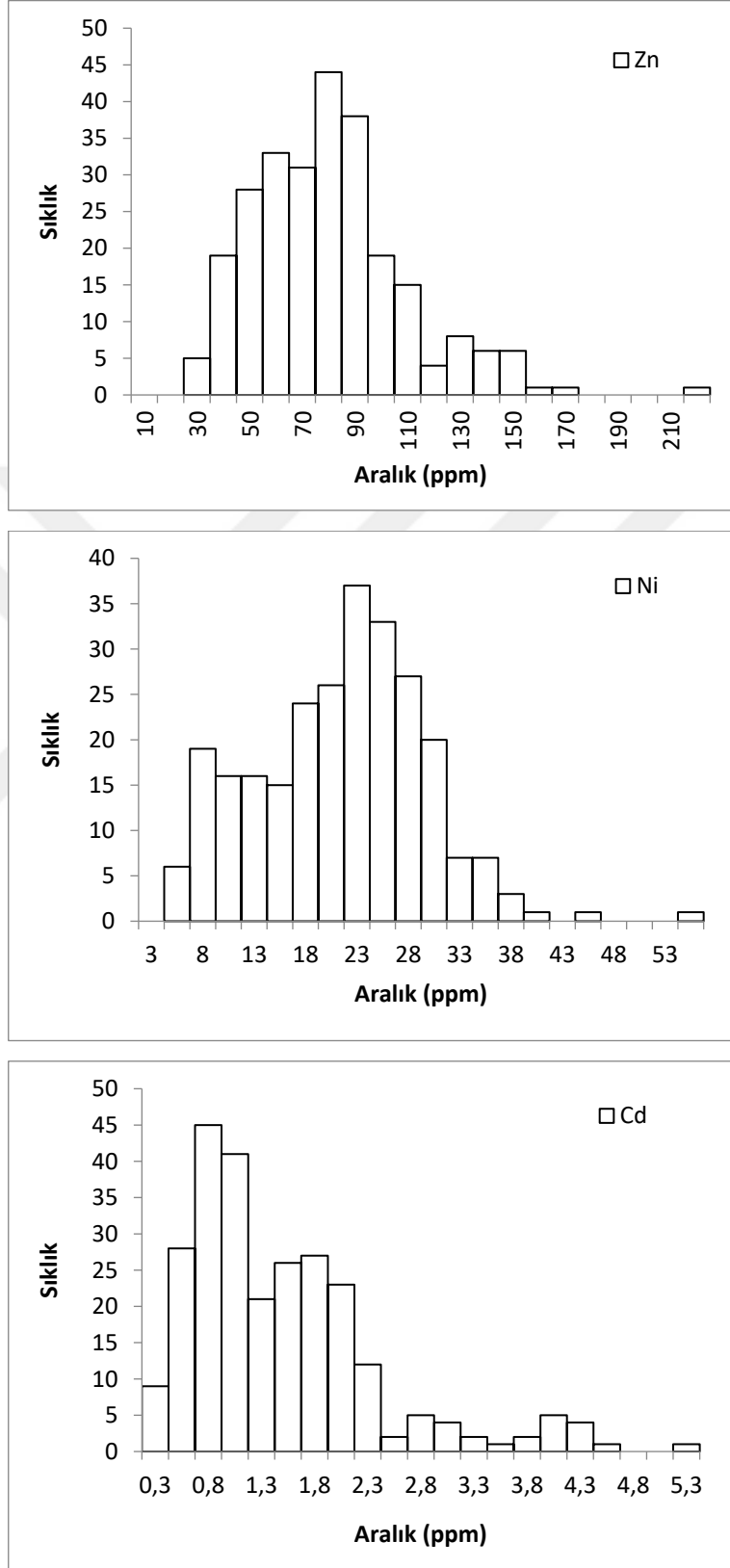
İsviçre-Fransa sınırında bulunan Jura bölgesine ait veri kümesi, *Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne*'a (EPFL) ait bir çalışmaya dayanan toprak örneklerinden oluşmaktadır. Jura veri kümesi, yaklaşık 22 kilometrekareye yayılmış 259 lokasyona ait koordinat bilgisini ve her bir lokasyonda ölçülmüş yedi ağır metale (Cd, Co, Cr, Cu, Ni, Pb ve Zn) ait konsantrasyon değerlerini içermektedir.

Jura veri kümesinde seçilen Zn, Ni ve Cd değişkenlerine ilişkin lokasyon haritaları, ppm bazında tenör değerleri ile birlikte Şekil 4.1'de verilmiştir.



Şekil 4.1. Tenör dağılımları ile birlikte lokasyon haritaları a) Zn, b) Ni, c) Cd

Zn, Ni ve Cd değişkenlerine ait histogramlar Şekil 4.2'de ve 6zet istatistikler 6izelge 4.2'de verilmiştir.



Şekil 4.2. Değişkenlere ait sıklık dağılımları

Çizelge 4.2. Değişkenlere ait özet istatistikler

	Çinko (Zn)	Nikel (Ni)	Kadmiyum (Cd)
Ortalama (ppm)	75.078	19.730	1.309
Medyan (ppm)	73.560	20.560	1.070
Standart Sapma (ppm)	29.019	8.233	0.915
Varyans (ppm)	842.119	67.780	0.838
Aralık (ppm)	194.12	49.000	4.994
En Düşük Değer (ppm)	25.200	4.200	0.135
En Yüksek Değer (ppm)	219.320	53.200	5.129
Veri Sayısı	259	259	259

#### 4.2.2. PSO Uygulamaları ve Dönüşüm Matrisinin Bulunması

Özünüli ilişkili faktörlerin elde edilmesi için gereken dönüşüm matrisi, hedef fonksiyonun parçacık sürü optimizasyonu ile enküçüklenmesi ile elde edilmektedir. Değişkenlerin normal dağılıma sahip değerleri, düz ve çapraz deneysel variogramları, benzetimi yapılacak olan noktaların koordinatları gibi birtakım girdiler hedef fonksiyonun enküçüklenmesi için yazılan koda beslenmektedir. Ayrıca parçacık sürü optimizasyonu algoritmasına özel parametrelerin belirlenmesinin ardından kod koşturulmaya hazır hale gelir.

Koda beslenecek olan normal dağılıma sahip orijinal veriler ve bu verilerin düz ve çapraz deneysel variogramları SGeMS'de hesaplatılarak Matlab'a beslenmiştir. Normal dağılıma sahip değerlerin kullanılmasından dolayı değişkenlerin beslendiği sıranın bir önemi bulunmamaktadır.

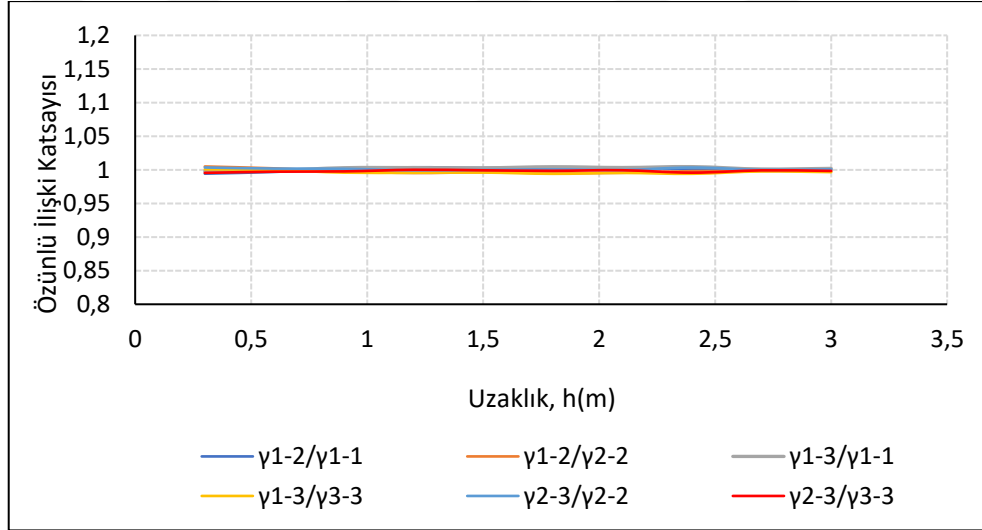
Parçacık sürü optimizasyonuna ait parametrelerin (sosyal ve bilişsel parametreler, atalet katsayısı, sürü sayısı vb.) seçiminde ise literatürde en sık kullanılan ve en iyi performansı gösteren referans değerler kullanılmıştır.

Parçacık sürü eniyileycisinin verdiği sonuç dönüşüm matrisi ( $W$ ) olarak kabul edilmiştir. Bu dönüşüm matrisi, değişken sayısı ile aynı boyuta sahip, kendisi transpozu ile çarpıldığında birim matrisi veren kare ve dik bir matristir. Jura veri kümesinden elde edilen dönüşüm matrisi de kare ve dik bir matristir ve bu dönüşüm matrisi  $W$ , Eşitlik (4.1)'de verilmiştir.

$$W = \begin{bmatrix} -0,420 & -0,403 & -0,381 \\ 0,092 & 0,056 & 0,067 \\ -0,519 & -0,511 & -0,524 \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

#### 4.2.3. Özünlü İlişkili Faktörlerin Üretimi

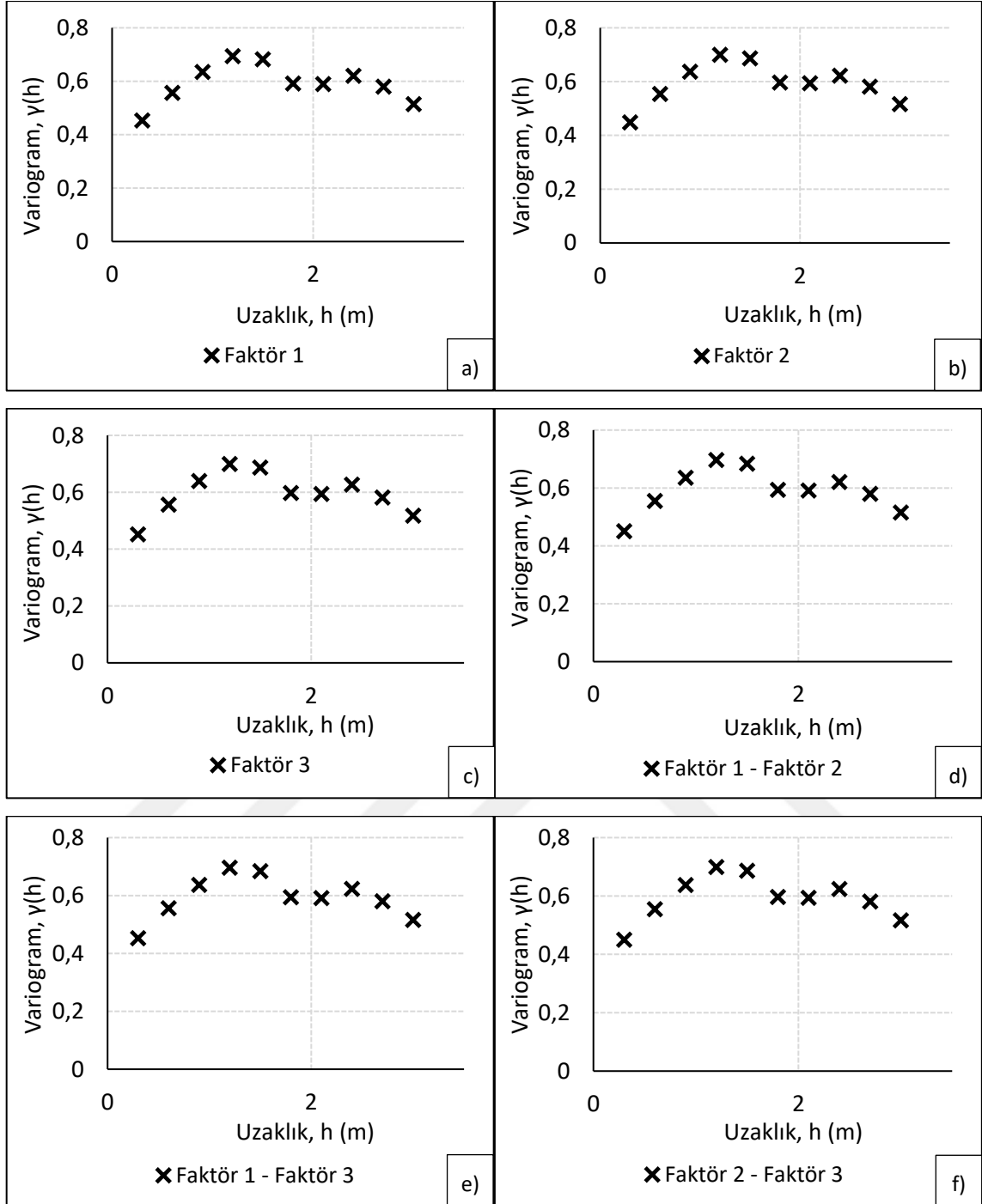
Dönüşüm matrisinin bulunmasının ardından, normal dağılıma sahip orijinal veriler dönüşüm matrisi ile çarpılarak özünlü ilişkili faktörlere dönüştürülmüştür. Bir değişkenin çapraz variogramlarının düz variogramlarına oranının sabit olması, o değişkenin özünlü ilişkiye sahip olduğunu göstermektedir. Bu oranlar, özünlü ilişki katsayısı olarak belirtilmiştir. Elde edilen faktörlerin deneysel variogramları hesaplatılarak düz ve çapraz deneysel variogramlar arasındaki oranlar kontrol edilmiştir. Jura veri kümesinden elde edilen faktörlerin özünlü ilişki katsayıları Şekil 4.3'te gösterilmiştir.



Şekil 4.3. Faktörlerin variogramlarına ait özünlü ilişki katsayıları

Şekil 4.3'te, üç faktörden elde edilen tüm çapraz variogramların düz variogramlara oranları verilmiştir. Faktörlerden elde edilen özünlü ilişki katsayılarının tamamı, tüm faktörler için her uzaklıkta sabit ve yaklaşık olarak bire eşit şekilde çakışmaktadır. Bu durum, faktörlerin özünlü ilişkiye sahip olduğunun bir göstergesidir. Bu eşitlik durumu faktörlerin çapraz ve düz variogramlarının birbirlerine eşit olduğunu göstermektedir.

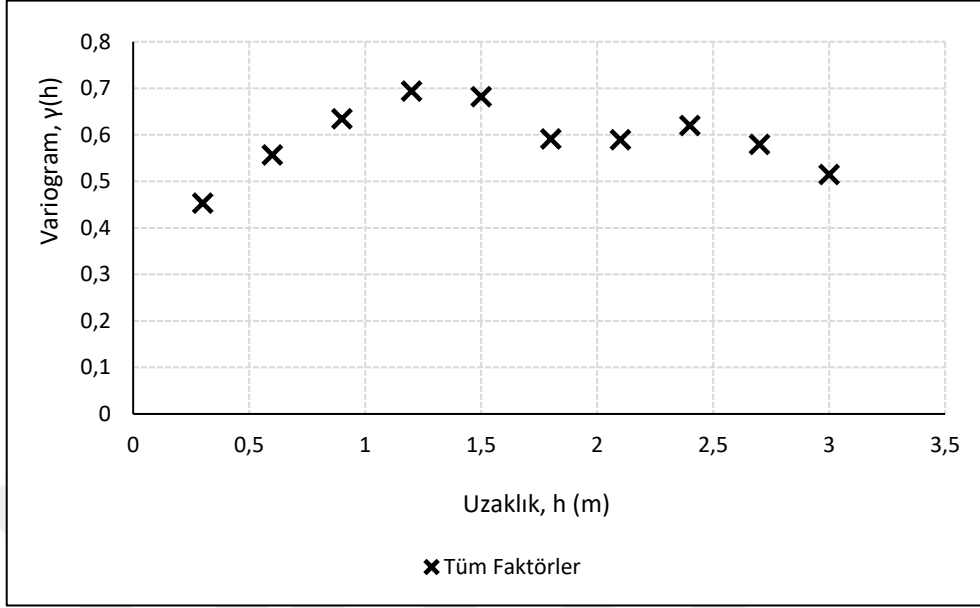
Şekil 4.4'te elde edilen özünlü ilişkili faktörlerin düz ve çapraz deneysel variogramları verilmiştir.



Şekil 4.4. Faktörlerin düz ve çapraz deneysel variogramları a) Faktör 1, b) Faktör 2, c) Faktör 3, d) Faktör 1-2, e) Faktör 1-3, f) Faktör 2-3

Faktörlere ait deneysel variogramlara bakıldığında, tüm faktörlerin düz ve çapraz deneysel variogramlarının birbirine denk olduğu görülmektedir. Bu denklik faktörlerin özünü ilişki göstermesinden kaynaklanmaktadır. Özünü ilişki gösteren faktörlerin düz variogramları ve çapraz variogramları eş olacağı için tüm düz ve çapraz variogramlar tek bir deneysel variogram ile ifade edilebilir. Jura veri kümesi

faktörlerini temsil edecek olan model variogram, Şekil 4.5'te verilen deneysel variogramların modellenmesi ile elde edilmiştir..



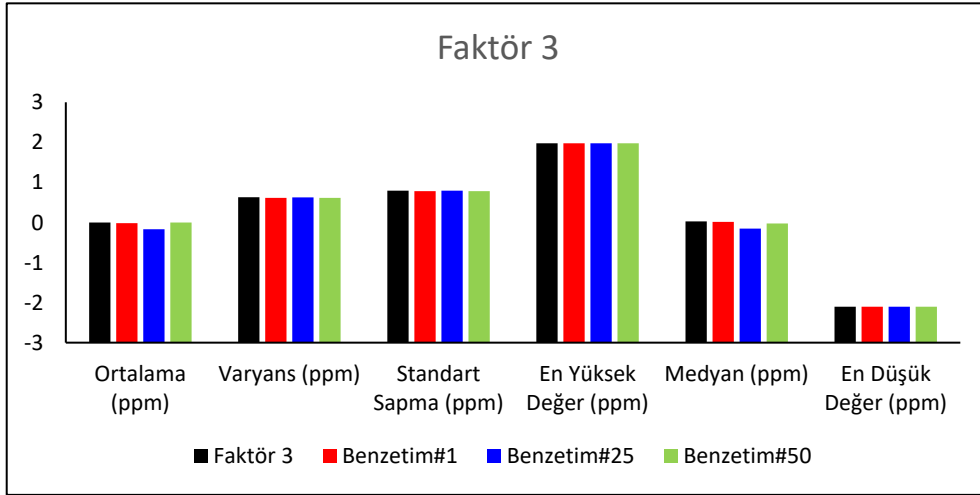
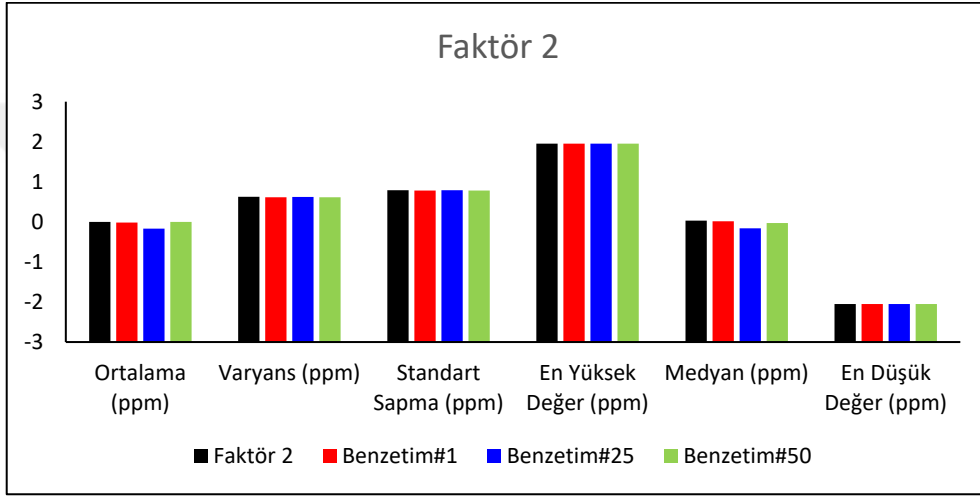
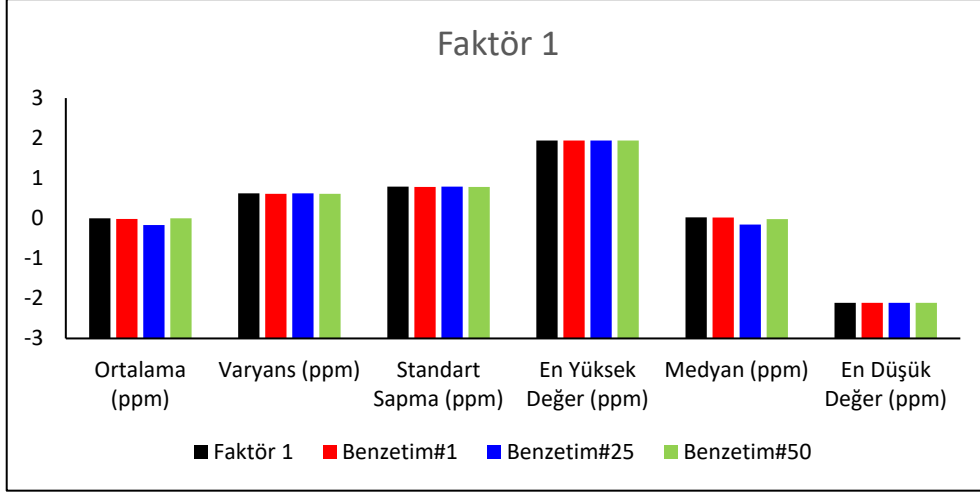
Şekil 4.5. Faktörlerin düz ve çapraz deneysel variogramı

Tüm faktörler için Şekil 4.5'te verilen deneysel variogram grafiğinden elde edilen variogram modeli kullanılarak tüm çapraz ve düz ilişkiler karakterize edilebilmektedir. Bu durum özünü ilişkili faktörlerin en önemli özelliğidir ve variogramların ayrı ayrı modellenmesi ihtiyacını ortadan kaldırmaktadır.

#### 4.2.4. Faktörlerin Benzetimi

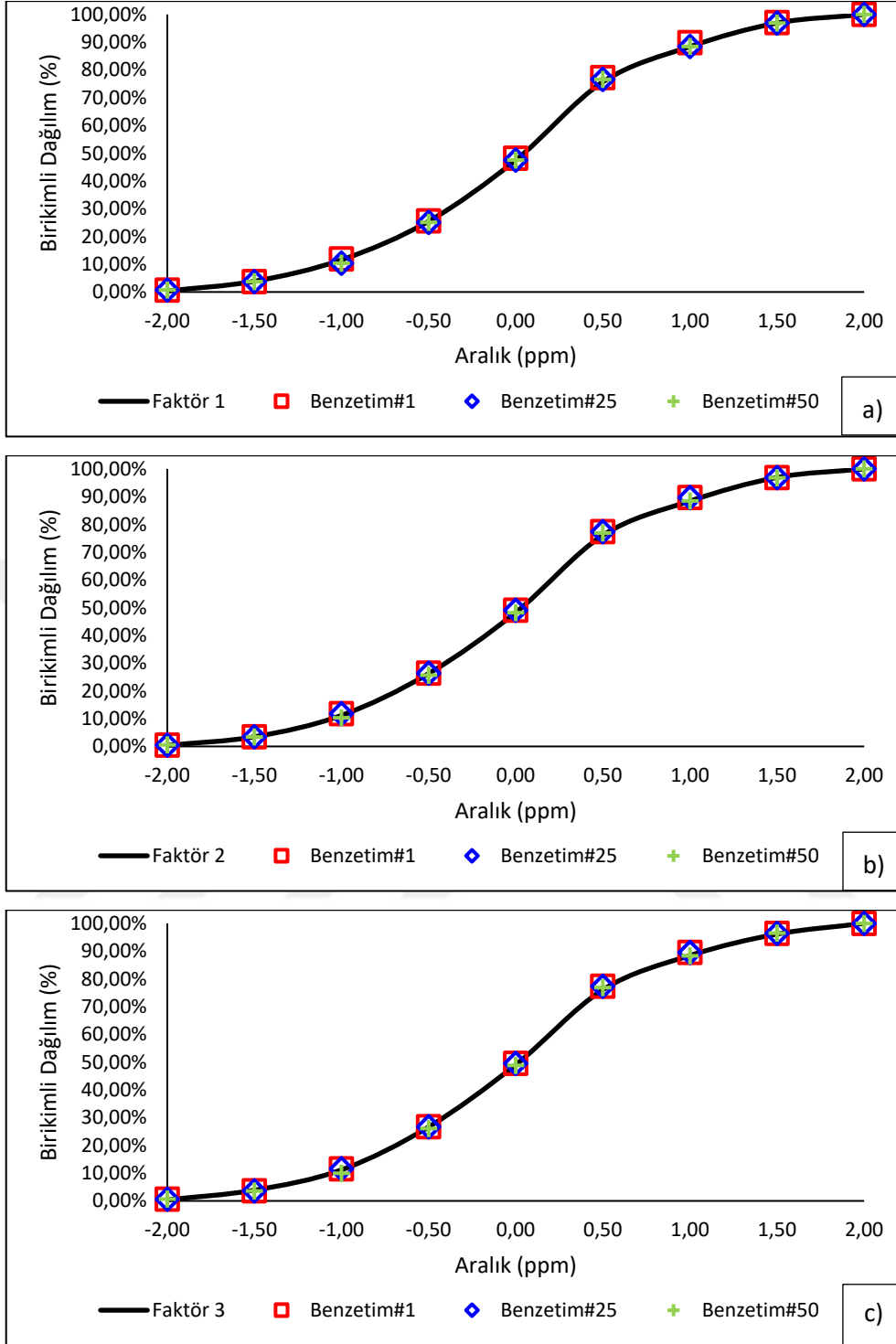
Orijinal verilerin faktörlere dönüştürülmesinin ardından, benzetim çalışmasının yapılabilmesi için faktörler SGeMS'e beslenmiştir ve faktörleri temsil eden tek bir variogram modeli hesaplanmıştır. Ölçümlerin Jura sahasına yayılışına uygun şekilde 4448 noktadan oluşan 0,06 m x 0,06 m boyutlarında bir grid sistemi oluşturulmuştur. Her bir faktör, bu grid sisteminde bağımsız olarak ardışık normal benzetim ile benzetilmiştir. Benzetim sayısı, kullanılan donanım göz önünde bulundurularak 50 olarak belirlenmiştir. 50 adet benzetim içerisinde rassal bir şekilde 1, 25 ve 50 numaralı benzetimler seçilmiştir ve bu benzetimlerden elde edilen değerler, faktörler ile benzetilmiş faktörlerin karşılaştırılmasında kullanılmıştır.

Faktörler ve benzetilmiş faktörlerin özet istatistiklerinin karşılaştırmaları Şekil 4.6'da ve birikimli dağılım fonksiyonlarının karşılaştırmaları ise Şekil 4.7'de verilmiştir.



Şekil 4.6. Faktörlerin ve benzetim değerlerinin özet istatistiklerinin karşılaştırılması

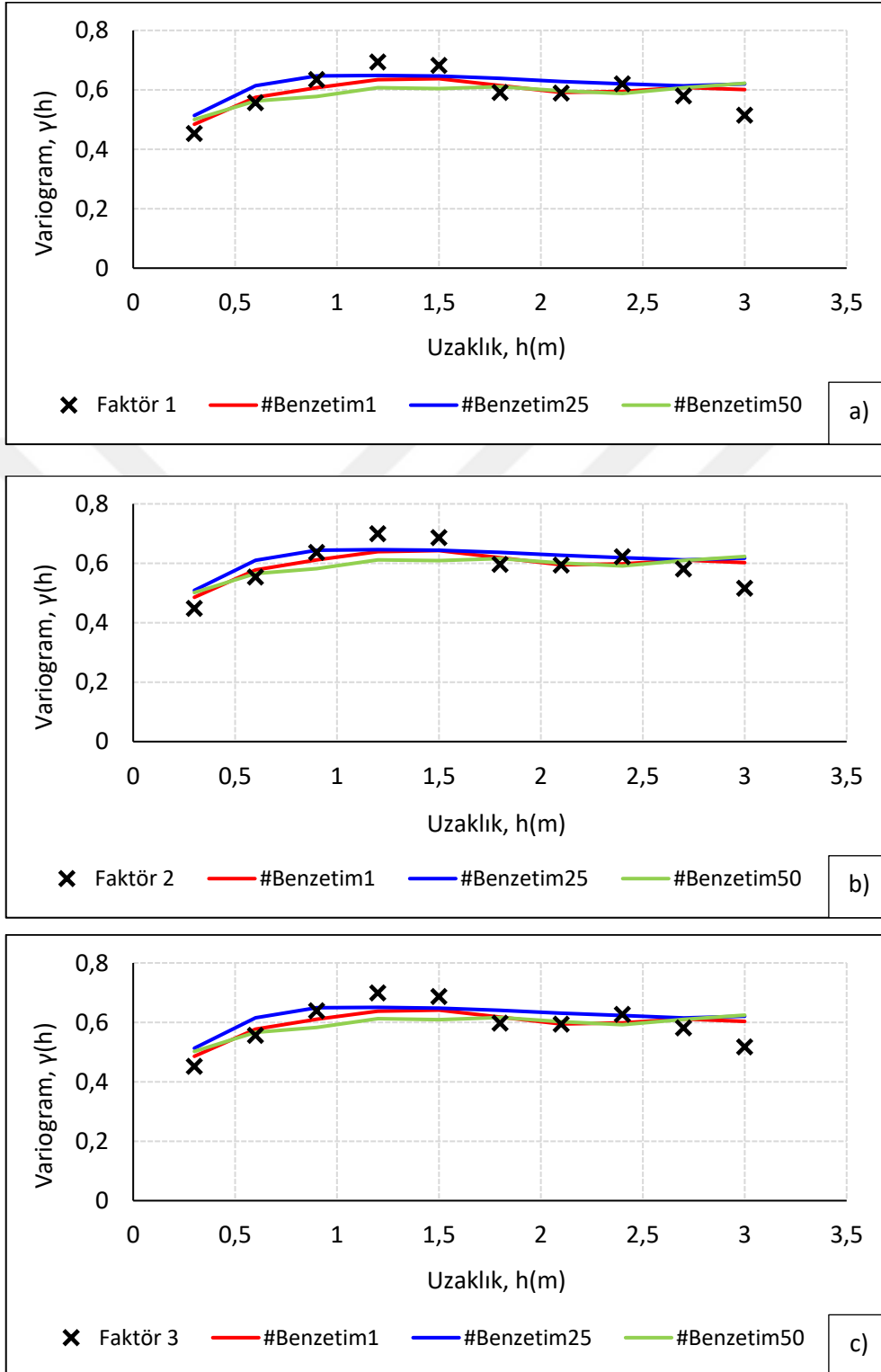
Şekil 4.6'da verilmiş olan grafiklerde bakıldığında, varyans, standart sapma, en yüksek ve en düşük değer gibi özet istatistiklerin tam olarak, ortalama ve medyan gibi özet istatistiklerin ise yaklaşık olarak üretildiği görülmektedir. Bu durum, faktörlerin doğru bir şekilde benzetildiğini gösteren kontrollerden biridir.



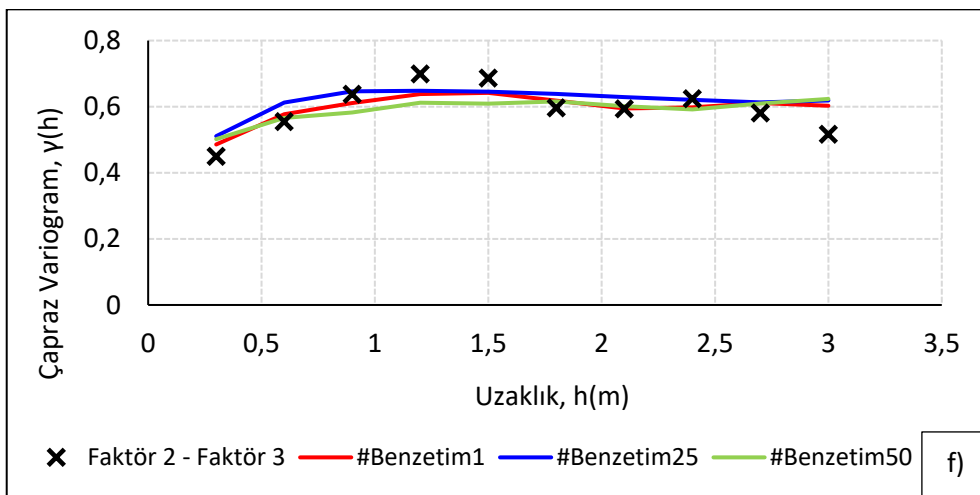
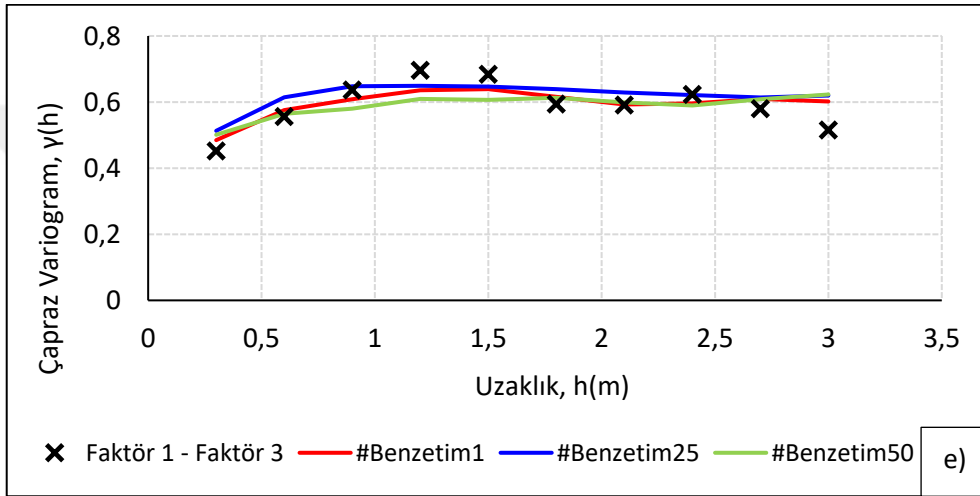
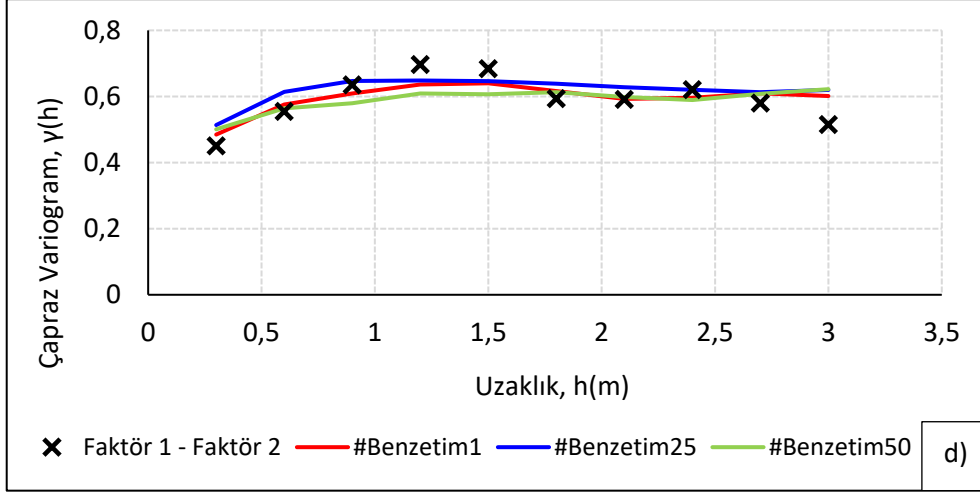
Şekil 4.7. Faktörler ve benzetimlerinin birikimli dağılım fonksiyonları a) Faktör 1 b) Faktör 2 c) Faktör 3

Şekil 4.7’de verilen birikimli dağılım fonksiyonları karşılaştırmalarına bakıldığında, benzetim değerlerinin birikimli dağılım fonksiyonları ile faktörlerin birikimli dağılım fonksiyonlarının neredeyse çakıştığı görülmektedir. Bu da faktörlerin doğru bir şekilde benzetildiğini gösteren bir diğer kontroldür.

Faktörlerin ve benzetimlerinin düz ve çapraz deneysel variogramları ise Şekil 4.8 ve Şekil 4.9'da verilmiştir.



Şekil 4.8. Faktörler ve benzetimlerinin düz deneysel variogramları a) Faktör 1, b) Faktör 2, c) Faktör 3

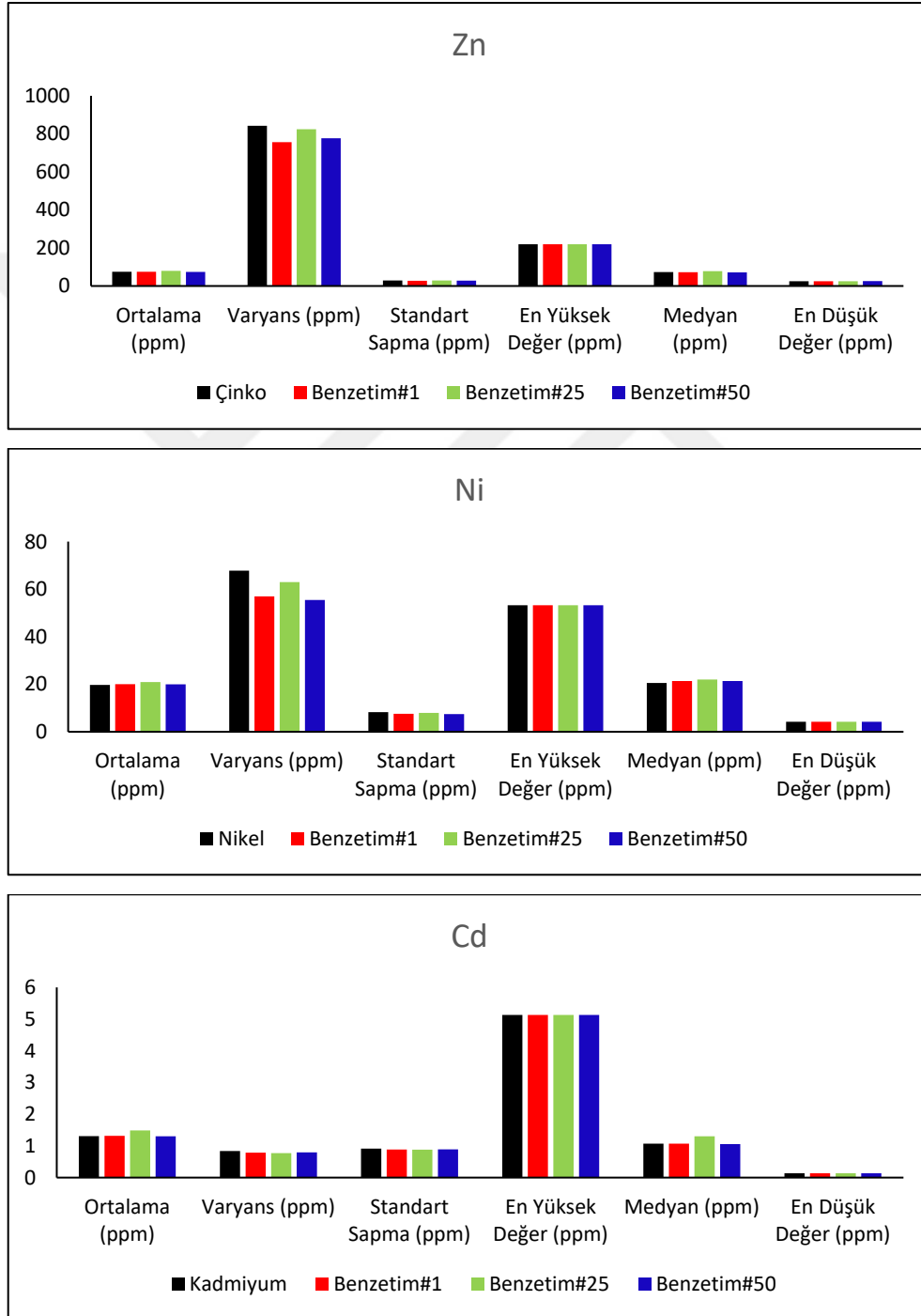


Şekil 4.9. Faktörler ve benzetimlerinin çapraz deneysel variogramları d) Faktör 1-2, e) Faktör 1-3, f) Faktör 2-3

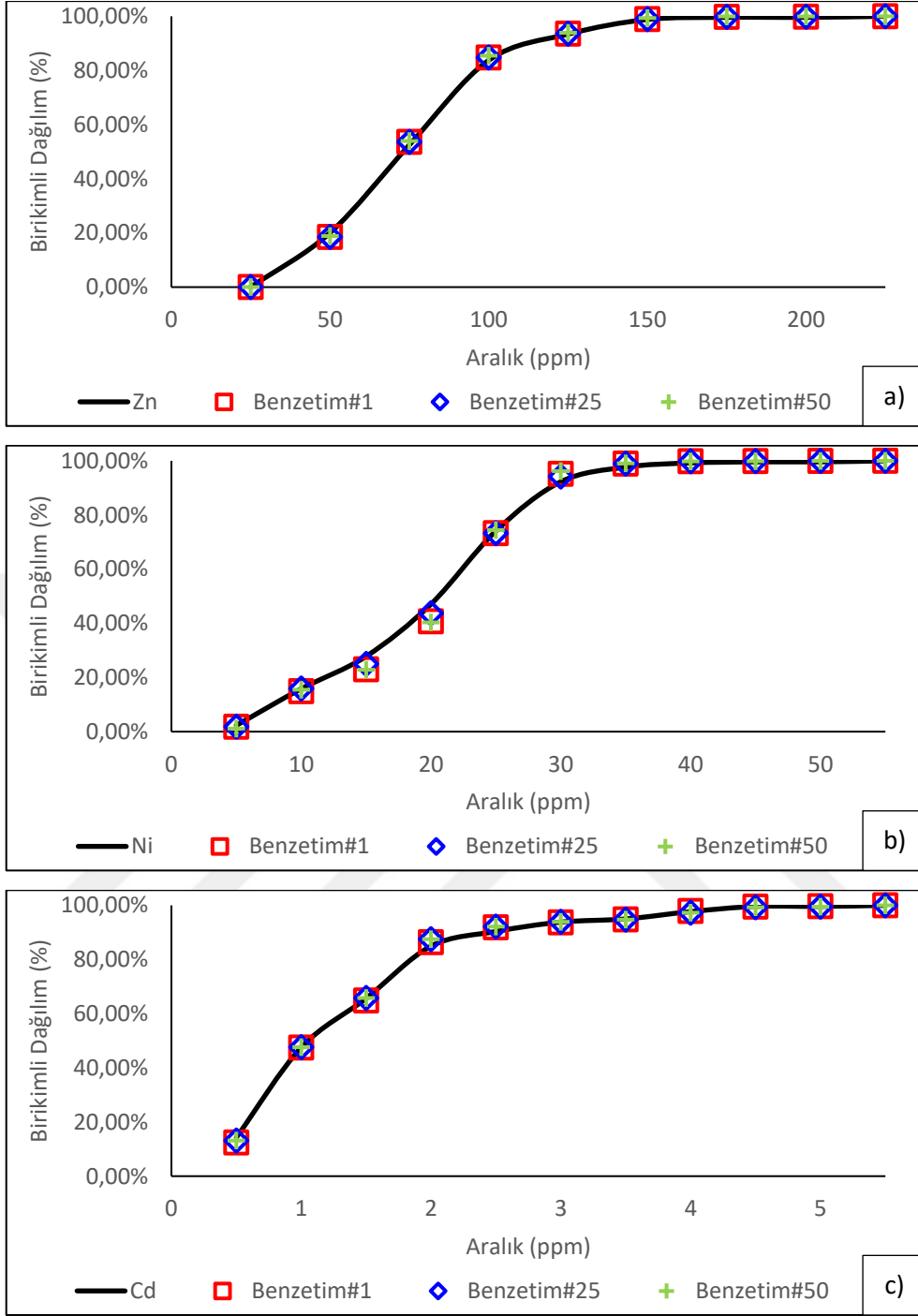
Şekil 4.8 ve Şekil 4.9'da verilmiş olan karşılaştırmalar göz önüne alındığında ise benzetimlerle elde edilen deneysel variogramların yaklaşık bir şekilde faktörlerin deneysel variogramlarına benzediği görülmektedir. Yapılan bu karşılaştırmalar benzetilmiş faktörlerin kullanılabilir olduğunu göstermektedir.

#### 4.2.5. Benzetilmiş Faktörlerin Geri Dönüştürülmesi

Benzetilmiş faktörler, dönüşüm matrisi kullanılarak önce orijinal normal dağılımlı veri uzayına ardından orijinal veri uzayına dönüştürülmüştür. Orijinal veri uzayına dönüştürülen benzetimler ile orijinal Jura verilerinin karşılaştırmalı özet istatistikleri Şekil 4.10'da, birikimli dağılım fonksiyonlarının karşılaştırmaları ise Şekil 4.11'de görülmektedir.



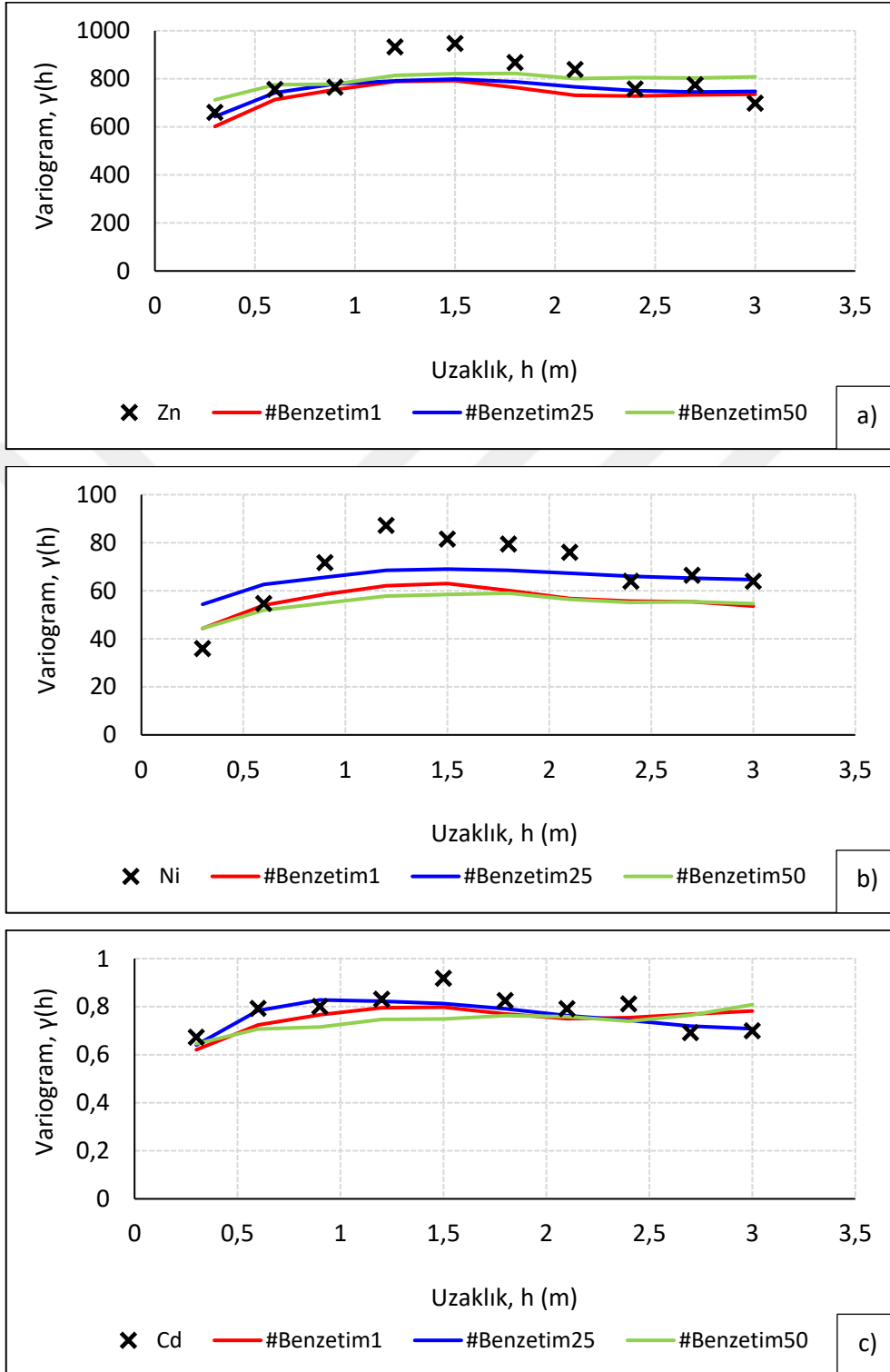
Şekil 4.10. Orijinal verilerin ve benzetim değerlerinin özet istatistiklerinin karşılaştırılması



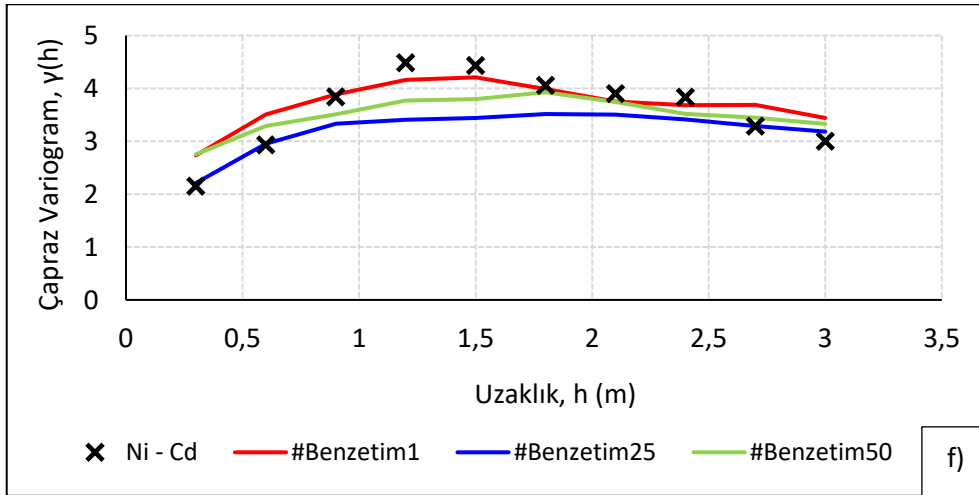
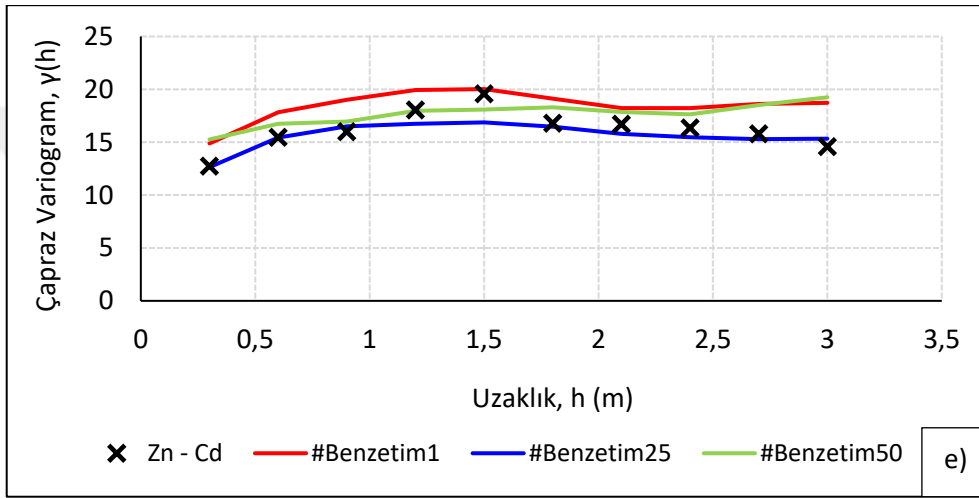
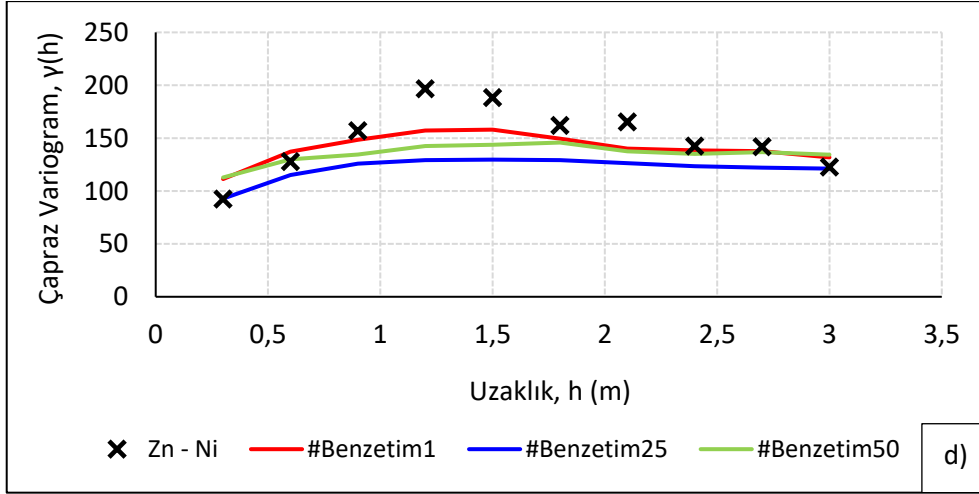
Şekil 4.11. Orijinal veriler ile benzetim sonuçlarının karşılaştırması a) Zn, b) Ni ve c) Cd

Şekil 4.10'da verilen özet istatistiklerin karşılaştırmalarına bakıldığında, öznlü ilişkili faktörlerle elde edilen benzetimlerin orijinal verilerin ortalama, standart sapma, en büyük ve en küçük değer gibi temel özet istatistiklerini yaklaşık bir şekilde ürettiği görülmektedir. Aynı şekilde Şekil 4.11'de benzetimlerin birikimli dağılım fonksiyonlarının orijinal verilerin birikimli dağılım fonksiyonları ile çakıştığı görülmektedir.

Orijinal veriler ile benzetimlerin çapraz ve düz variogramlarının karşılaştırılması ise Şekil 4.12 ve Şekil 4.13'te verilmiştir.



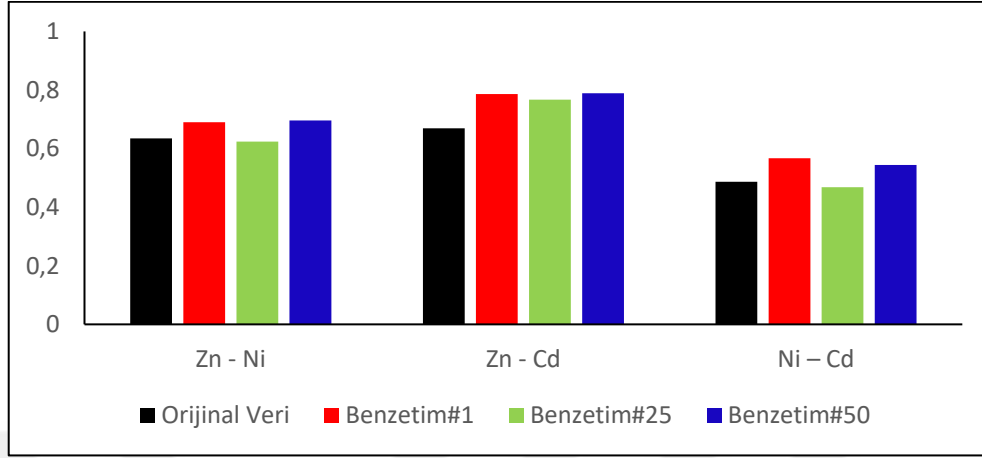
Şekil 4.12. Orijinal veriler ile benzetimlerin düz variogramlarının karşılaştırması a) Zn, b) Ni, c) Cd



Şekil 4.13. Orijinal veriler ile benzetimlerin çapraz variogramlarının karşılaştırması d) Zn-Ni, e) Zn-Cd, f) Ni-Cd

Şekil 4.12 ve Şekil 4.13'te görülen çapraz ve düz deneysel variogramların karşılaştırmalarına bakıldığında, benzetimlerin deneysel variogramlarının orijinal verilerin deneysel variogramlarına benzer bir model sergilediği ve orijinal verinin varyansına yaklaştığı görülmektedir.

Orijinal veriler ile benzetimler arasındaki doğrusal korelasyon katsayıları ise Şekil 4.14'te verilmiştir. Jura veri kümesinden elde edilen doğrusal korelasyon katsayıları orijinal değerlere yakınlık göstermektedir.



Şekil 4.14. Jura verilerinden elde edilen doğrusal korelasyon katsayıları

Özet istatistiklerin, birikimli dağılım fonksiyonlarının, deneysel variogramların ve korelasyon katsayılarının karşılaştırmaları göz önüne alındığında, özünü ilişkili faktörlere yaklaşımı ile 2 boyutlu uygulamada değişkenlerin birikimli dağılım fonksiyonlarının, özet istatistiklerinin ve doğrusal korelasyon katsayılarının yaklaşık bir şekilde yeniden üretildiği görülmektedir. Üretilen benzetimlerin düz ve çapraz deneysel variogramlarının, orijinal verilerin çapraz ve düz deneysel variogramları ile benzer bir yapı sergilediği ve orijinal verilerin varyansına oldukça yaklaşık sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir.

2 boyutlu durum çalışması, özünü ilişkili faktör üretimi ile değişkenler arasındaki çapraz ilişkinin ortadan kaldırılması ve çapraz ilişkiyi modelleme gereksinimine ihtiyaç duyulmaması sonucu

nda benzetim çalışmalarının daha kısa ve daha basit şekilde yapılabileceğini göstermektedir.

## 5. YÖNTEMİN BİR NİKEL SAHASINDA UYGULANMASI

Bu bölümde, özünlü ilişkili faktörleme yöntemi kullanılarak üç boyutlu saha verilerinin çokdeğişkenli jeostatistiksel benzetimi gerçekleştirilmiştir. Çalışmada kullanılan üç boyutlu çok değişkenli lateritik bir nikel sahasına ait veriler arasından üç değişken (Fe, Ni ve Cd) seçilmiştir.

Çalışma, Matlab ile yazılan kod kullanılarak;

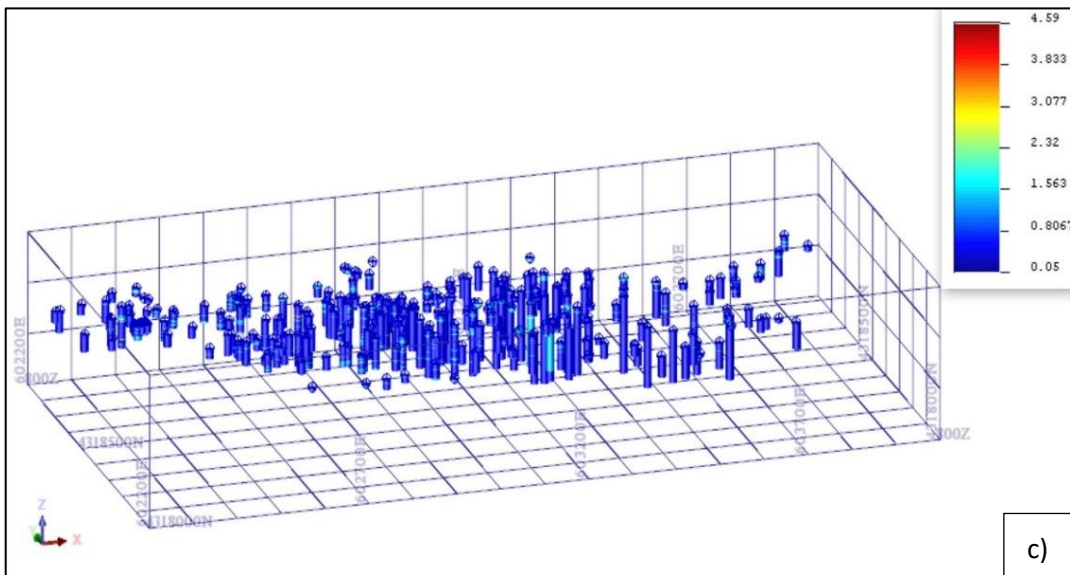
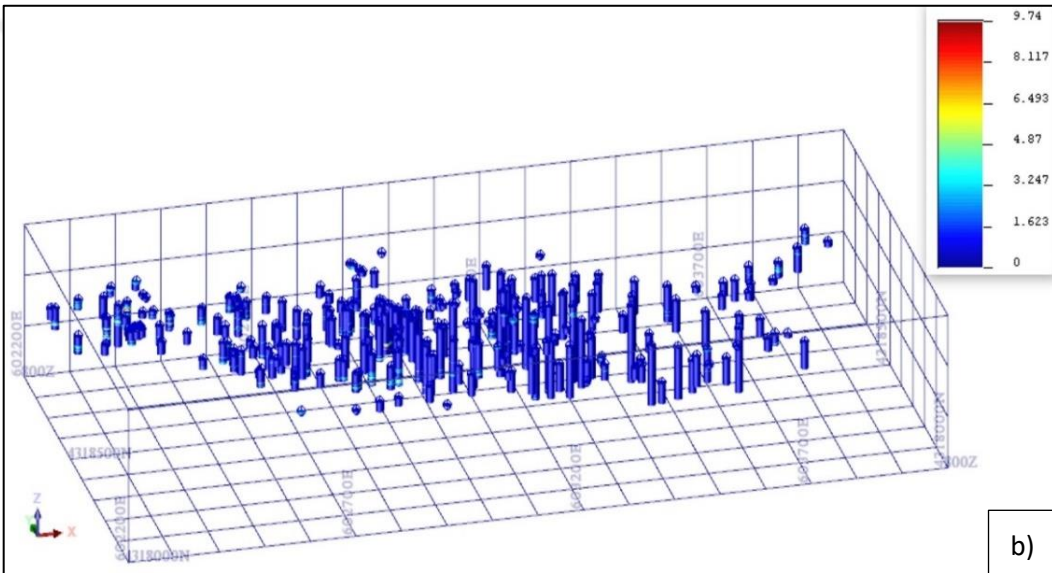
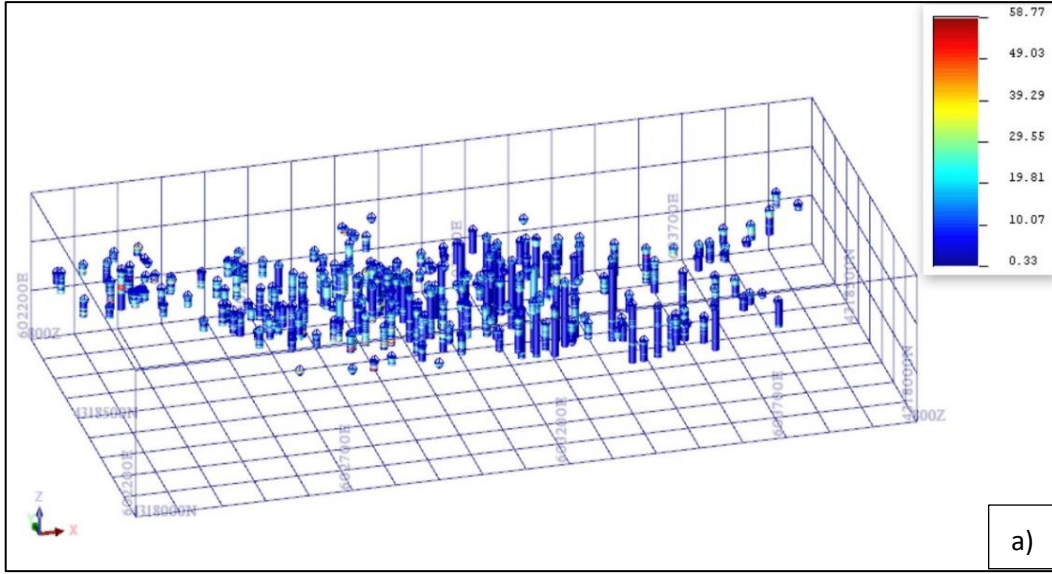
- hedef fonksiyonun enküçüklenmesi,
- fonksiyonu enküçükleyen global en iyi değer kullanılarak normal skor verilerden özünlü ilişkili faktörlerin üretilmesi,
- özünlü ilişkili faktörlerin variogramının modellenmesi ve jeostatistiksel benzetiminin yapılması,
- benzetilmiş faktörlerin orijinal veri uzayındaki normal skor benzetim değerlerine dönüştürülmesi,
- normal skor benzetim değerlerinin orijinal veri uzayına geri döndürülmesi ve
- orijinal veriler ve özünlü ilişkili faktörleme yöntemi ile üretilen benzetimlerin istatistiksel ve jeostatistiksel olarak karşılaştırılması

işlemlerini kapsamaktadır.

Üç boyutlu veri kümesi üzerinde yapılan uygulama çalışması, derinlik boyutunun da eklenmesi ve variogram hesaplamalarında düşey variogramların da hesaba katılması haricinde iki boyutlu veri kümesi ile yapılan uygulama çalışması ile aynı işlem basamaklarına sahiptir. Çalışmanın gerçekleştirilmesi sırasında, Bölüm 3.2.8'de akım şeması ile belirtilen işlem sırası adım adım uygulanmıştır.

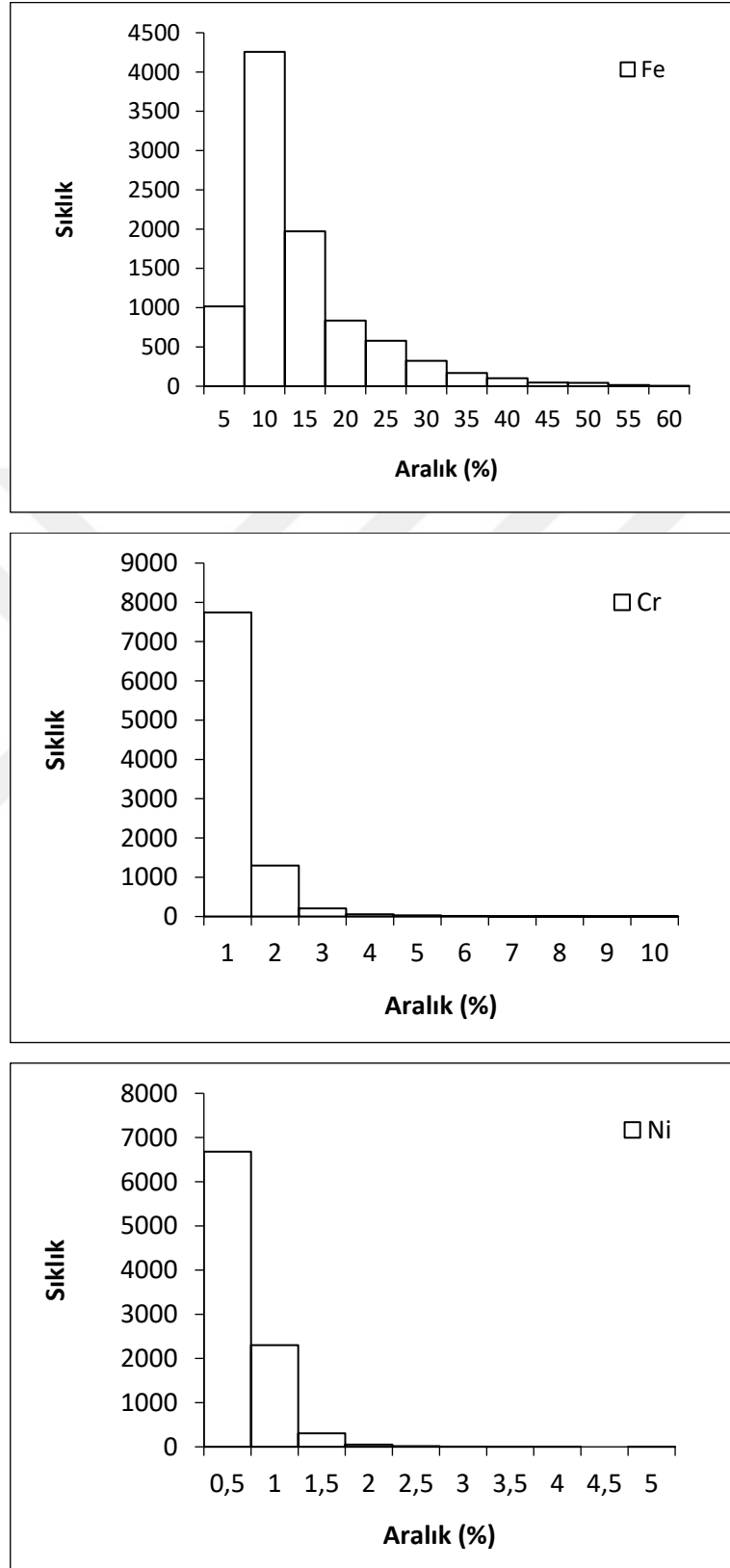
### 5.1. Veri Kümesinin Özellikleri

3 boyutlu çalışmada kullanılan veri kümesi, Türkiye sınırları içerisinde bulunan lateritik bir nikel sahasına aittir. Bu veri kümesi, yaklaşık 1,3 km<sup>2</sup>'ye yayılmış, 275 adet sondajdan elde edilen 9362 nokta verisini ve her noktada ölçülmüş Fe, Cr ve Ni tenörlerini içermektedir. Seçili değişkenlere ilişkin lokasyon haritaları, yüzde cinsinden tenör değerleri ile birlikte Şekil 5.1'de verilmiştir.



Şekil 5.1. Tenör dağılımları ile birlikte sondaj haritaları a) Fe, b) Cr, c) Ni

Değişkenlere ait histogramlar ve özet istatistikler sırasıyla Şekil 5.2 ve Çizelge 5.1'de verilmiştir.



Şekil 5.2. Değişkenlerin sıklık dağılımları

Çizelge 5.1. Nikel sahası verilerinin özet istatistikleri

	Demir (Fe)	Krom (Cr)	Nikel (Ni)
Ortalama (%)	11,692	0,676	0,440
Medyan (%)	9,030	0,510	0,370
Standart Sapma (%)	8,043	0,637	0,281
Varyans (%)	64,687	0,406	0,079
Aralık (%)	58,440	9,740	4,540
En Düşük Değer (%)	0,330	0,000	0,050
En Yüksek Değer (%)	58,770	9,740	4,590
Veri Sayısı	9362	9362	9362

## 5.2. PSO Uygulamaları ve Dönüşüm Matrisinin Bulunması

Faktörlerin üretilmesini sağlayacak dönüşüm matrisi, yazılan optimizasyon kodunu kullanarak hedef fonksiyonun enküçüklenmesi ile elde edilmiştir. Değişkenlerin normal dağılıma sahip değerleri, düz ve çapraz deneysel variogramları, benzetimi yapılacak olan noktaların koordinatları gibi birtakım girdiler hedef fonksiyonun enküçüklenmesi için yazılan koda beslenmektedir. Derinlik boyutunun da eklenmesi dışında, optimizasyon kodu temel olarak 2 boyutlu uygulama ile aynı adımlar kullanılarak koşturulmuştur.

Koda beslenecek olan normal dağılıma sahip orijinal veriler ve bu verilerin düz ve çapraz deneysel variogramları SGeMS'de hesaplatılarak Matlab'a beslenmiştir. Normal dağılıma sahip değerlerin kullanılmasından dolayı değişkenlerin beslendiği sıranın bir önemi bulunmamaktadır.

Parçacık sürü optimizasyonuna ait parametrelerin (sosyal ve bilişsel parametreler, atalet katsayısı, sürü sayısı vb.) seçiminde ise literatürde en sık kullanılan ve en iyi performansı gösteren referans değerler dikkate alınmıştır.

Parçacık sürü eniyileycisinin verdiği sonuç dönüşüm matrisi olarak kabul edilmiştir. Bu dönüşüm matrisi, değişken sayısı ile aynı boyuta sahip, kendisi transpozu ile çarpıldığında birim matrisi veren kare ve dik bir matristir.

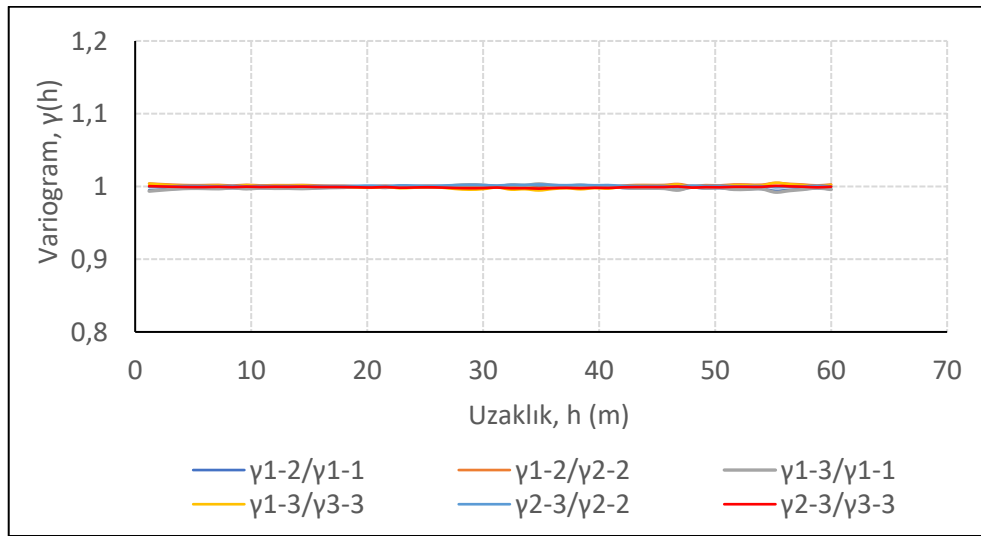
Lateritik nikel sahası verilerini özünü ilişkili faktörlere dönüştüren dönüşüm matrisi Eşitlik (5.1)'de verilmiştir.

$$W = \begin{bmatrix} -0,661 & -0,589 & -0,554 \\ -0,453 & -0,527 & -0,568 \\ -0,582 & -0,587 & -0,587 \end{bmatrix} \quad (5.1)$$

Özünü ilişkili faktörleme algoritmasına uyarlanan parçacık sürü optimizasyonu kodu ile yapılan işlemler Intel® Core™ 2 işlemciye, 2,5 GHz işlemci hızına ve 2 GB belleğe sahip donanım ile gerçekleştirilmiştir. Mevcut donanım ile 3 boyutlu veri setinde özünü ilişkili faktörlerin elde edilmesi yaklaşık 7 dakika, özünü ilişkili faktörlerin ardışık normal benzetim ile 50 defa benzetilmesi yaklaşık 10 dakika, benzetilmiş faktörlerin geri dönüştürülmesi işlemi ise yaklaşık olarak 8 dakika sürmektedir. Süreç toplamda 25 – 30 dakika arasında tamamlanmaktadır.

### 5.3. Özünü İlişkili Faktörlerin Üretimi

Dönüşüm matrisinin bulunmasının ardından, normal dağılıma sahip orijinal veriler dönüşüm matrisi ile çarpılarak özünü ilişki gösteren faktörlere dönüştürülmüştür. Bu faktörlerin çapraz variogramlarının düz variogramlarına oranının (özünü ilişki katsayısı) sabit olması, faktörlerin özünü ilişki gösterdiğini göstermektedir. Elde edilen faktörlerin deneysel variogramları hesaplatılarak düz ve çapraz deneysel variogramlar arasındaki oranlar kontrol edilmiştir. 3 boyutlu veri kümesinden elde edilen faktörlerin özünü ilişki katsayıları Şekil 5.3'te gösterilmiştir.

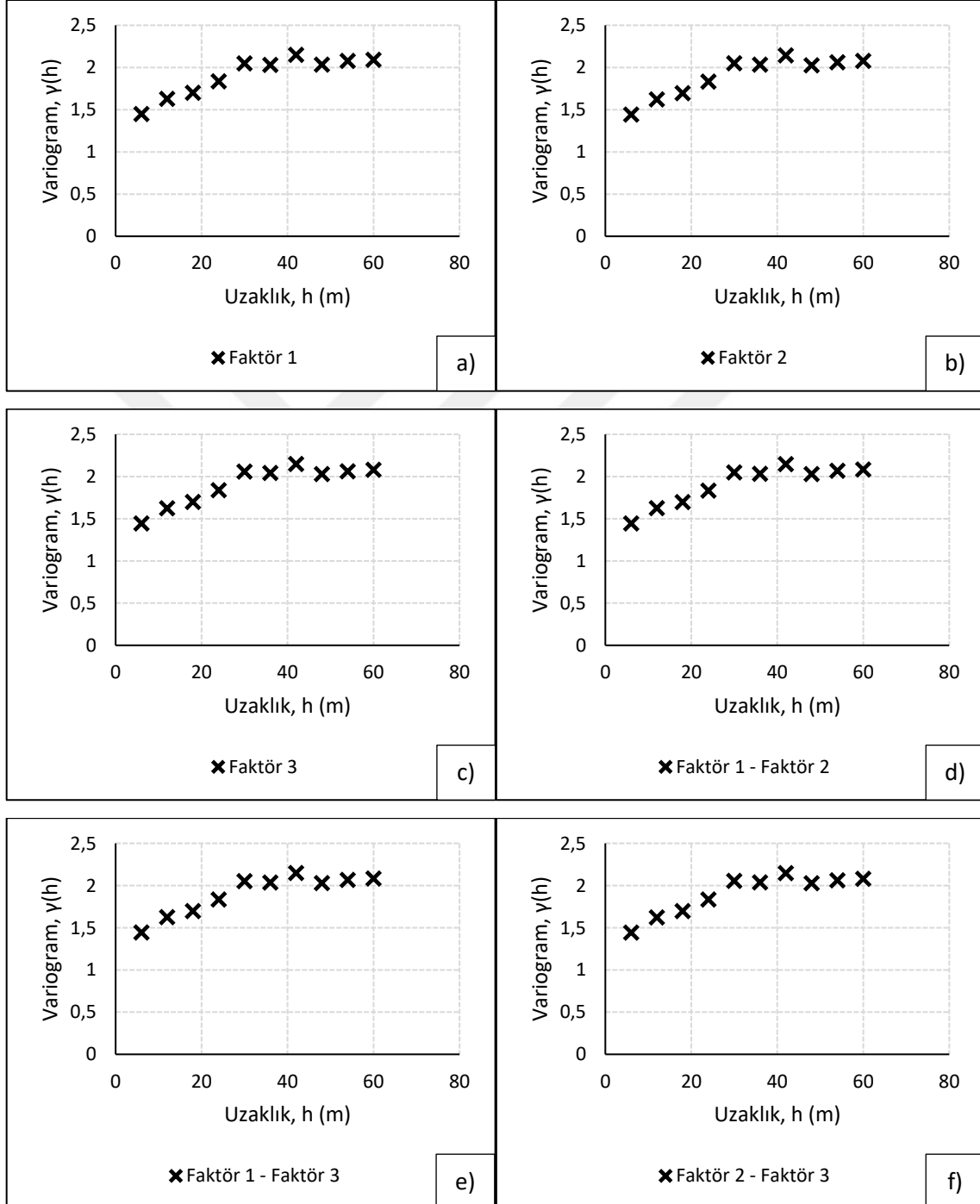


Şekil 5.3. Her bir uzaklıkta özünü ilişki katsayıları

Şekil 5.3'te çapraz variogramların düz variogramlara oranları 3 faktör için de verilmiştir. Bu oranlar, tüm faktörler için her uzaklıkta sabit ve tam olarak bire eşit şekilde çıkmaktadır. Bu durum, benzer düz ve çapraz deneysel variogramlara sahip faktörlerin üretilmiş olmasının doğal bir sonucudur. 2 boyutlu uygulama ile

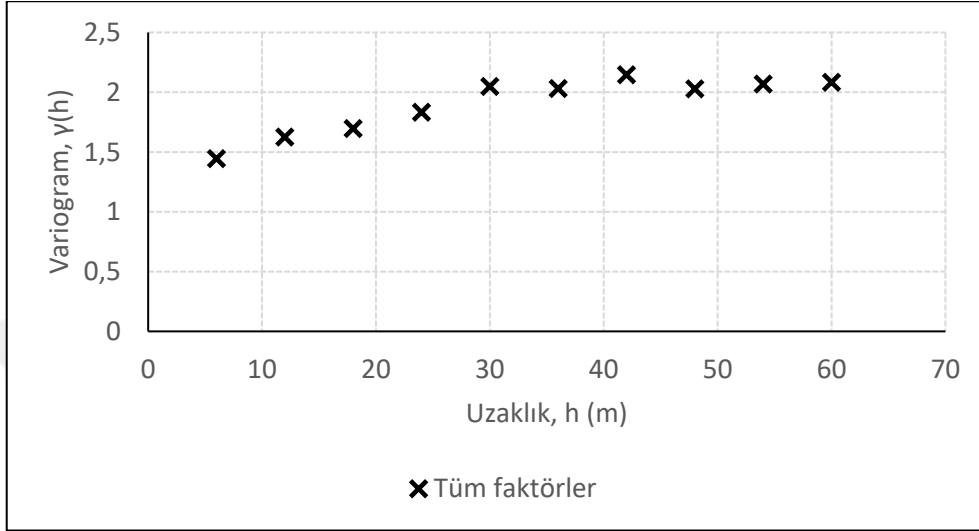
paralel olarak 3 boyutlu uygulamada da orijinal veri, tamamen benzer özellikler gösteren faktörlere dönüştürülmüştür.

Şekil 5.4'te elde edilen özünü ilişkili faktörlerin çapraz ve düz deneysel variogramları verilmiştir.



Şekil 5.4. Faktörlerin düz ve çapraz deneysel variogramları a) Faktör 1, b) Faktör 2 ve c) Faktör 3, d) Faktör 1-2, e) Faktör 1-3, f) Faktör 2-3

Faktörlere ait deneysel variogramlara bakıldığında, tüm faktörlerin düz ve çapraz deneysel variogramlarının birbirine denk olduğu görülmektedir. Bu denklik faktörlerin özünü ilişki göstermesinden kaynaklanmaktadır. Özünü ilişki gösteren faktörlerin düz variogramları ve çapraz variogramları eş olacağı için tüm düz ve çapraz variogramlar tek bir deneysel variogram ile ifade edilebilir (Şekil 5.5).



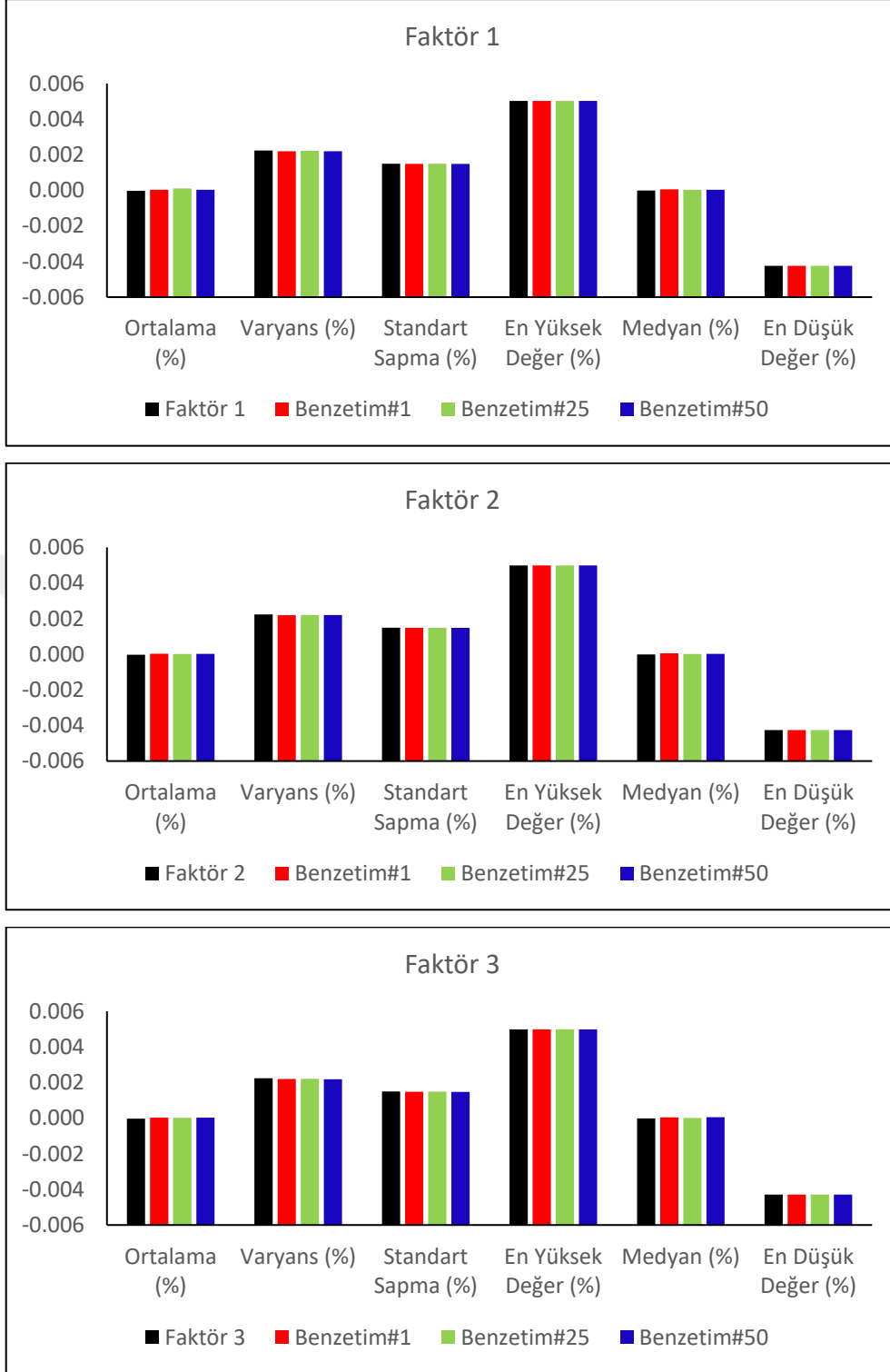
Şekil 5.5. Faktörlerin düz ve çapraz deneysel variogramı

Tüm faktörler için Şekil 5.5'te verilen deneysel variogram grafiğinden elde edilen variogram modeli kullanılarak tüm kestirim ve benzetim işlemleri gerçekleştirilebilir. Bu durum özünü ilişkili faktörlerin en önemli özelliğidir ve variogramların ayrı ayrı modellenmesi ihtiyacını ortadan kaldırmaktadır.

#### 5.4. Faktörlerin Benzetimi

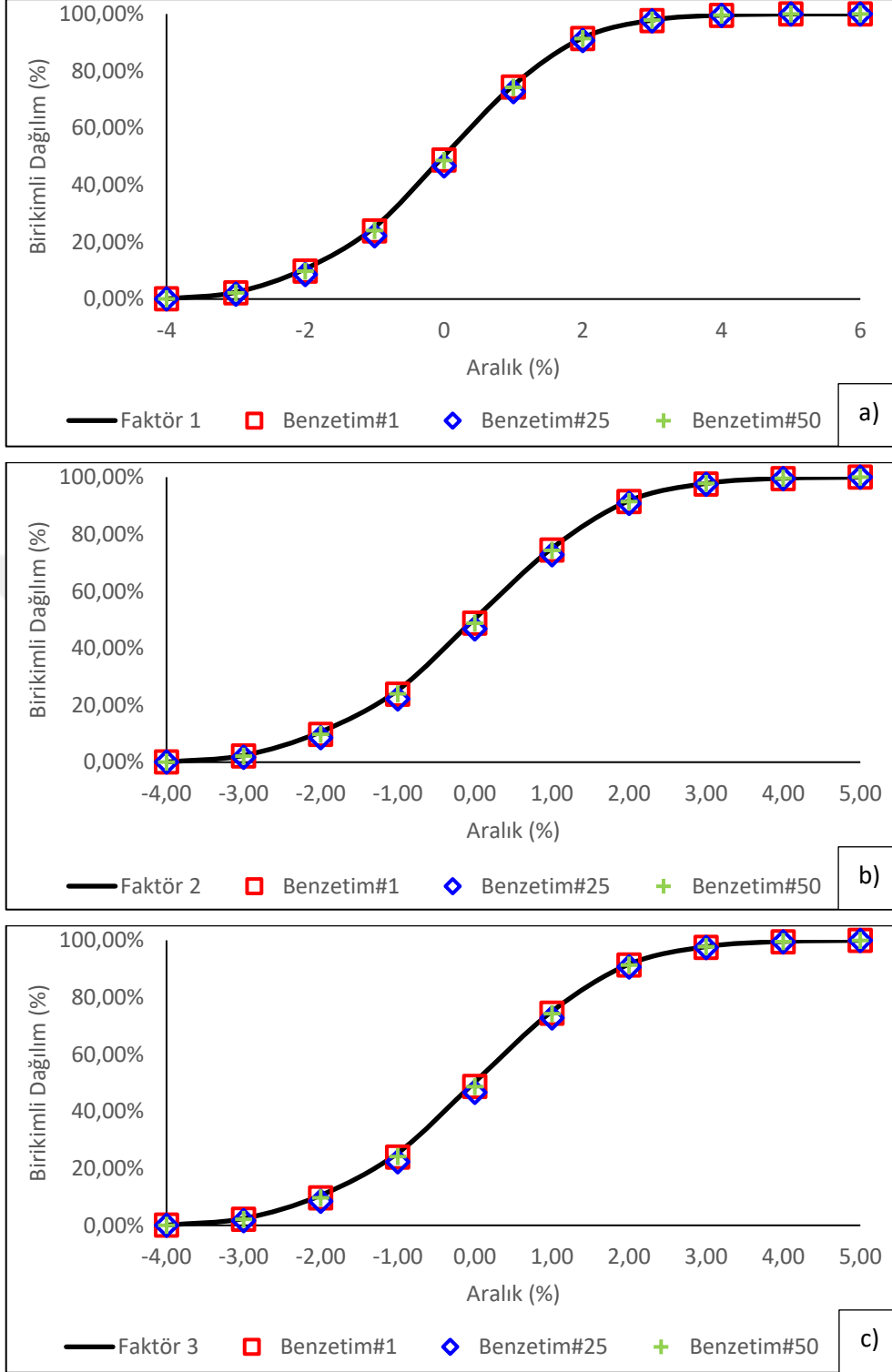
Benzetim çalışmasının yapılabilmesi için faktörler SGeMS'e beslenmiş ve faktörlerin variogram modelleri belirlenmiştir. Ölçümlerin sahaya yayılışına uygun şekilde 17.818 noktadan ibaret bir grid sistemi oluşturulmuştur. Birim grid boyutları 20 m x 20 m x 5 m'dir. Her bir faktör bağımsız olarak ardışık normal benzetim ile benzetilmiştir. Benzetim sayısı, kullanılan donanım göz önünde bulundurularak 50 olarak belirlenmiştir. 50 adet benzetim içerisinde rassal bir şekilde 1, 25 ve 50 numaralı benzetimler seçilmiştir ve bu benzetimlerden elde edilen değerler, faktörler ile benzetilmiş faktörlerin karşılaştırılmasında kullanılmıştır.

Faktörlerin ve benzetilmiş faktörlerin özet istatistiklerinin karşılaştırmaları sırasıyla Şekil 5.6'da, birikimli dağılım fonksiyonlarının karşılaştırmaları ise Şekil 5.7'de verilmiştir.



Şekil 5.6. Faktörlerin ve benzetimlerin özet istatistiklerinin karşılaştırılması

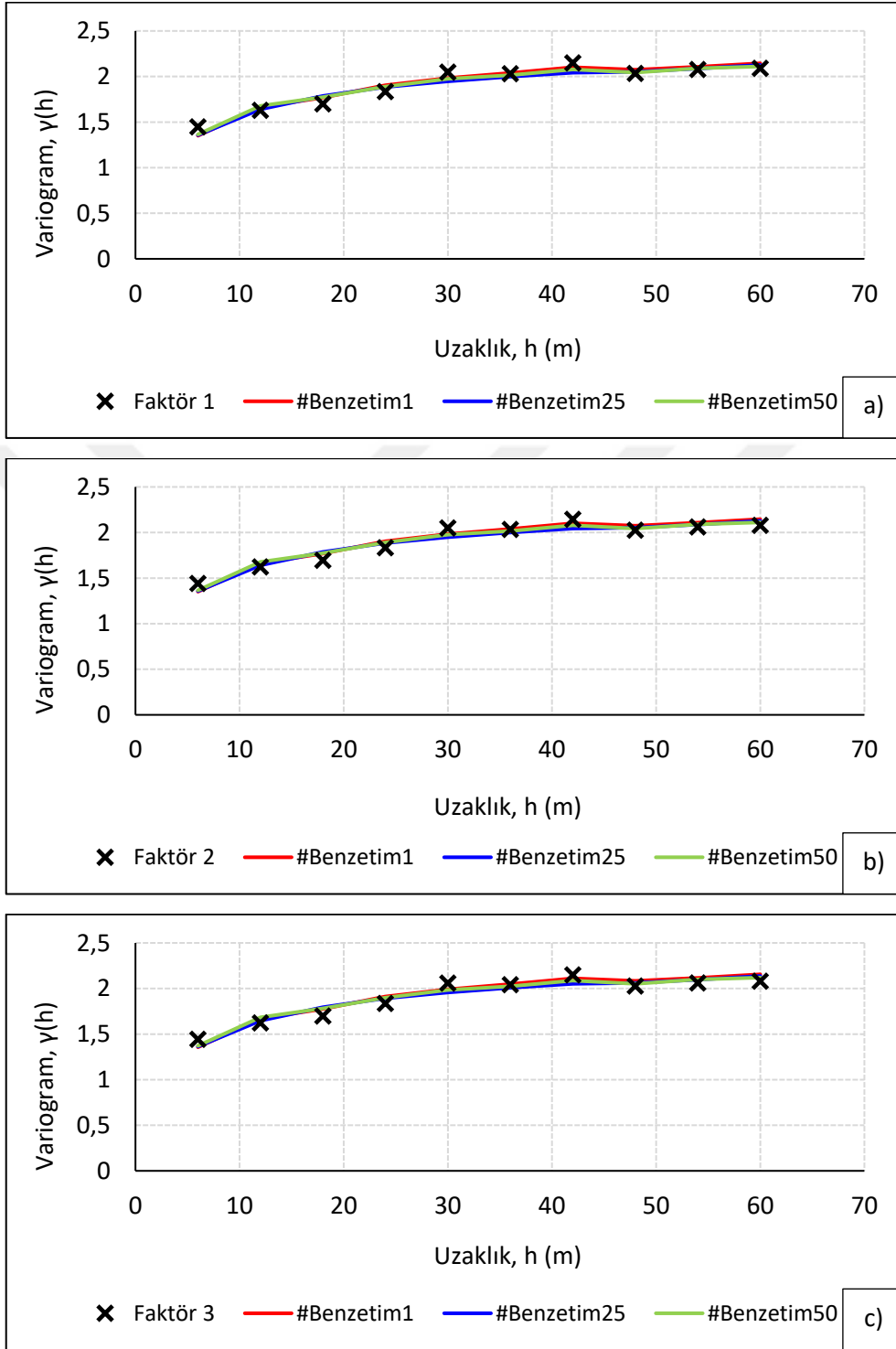
Şekil 5.6'da verilmiş olan grafiklere bakıldığında, varyans, standart sapma, en yüksek ve en düşük değer gibi özet istatistiklerin tam olarak, ortalama ve medyan gibi özet istatistiklerin ise yaklaşık olarak üretildiği görülmektedir. Bu durum, faktörlerin benzetiminin kullanılabilirliğe sahip olduğunu göstermektedir.



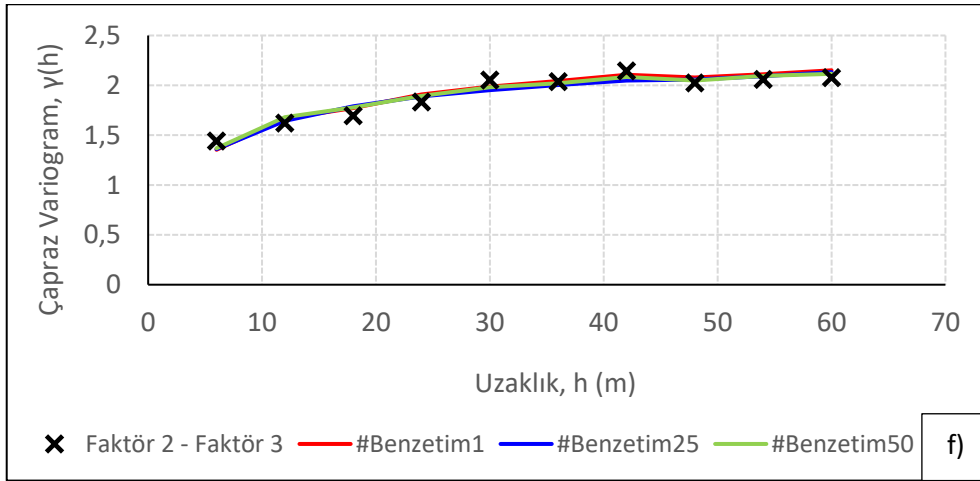
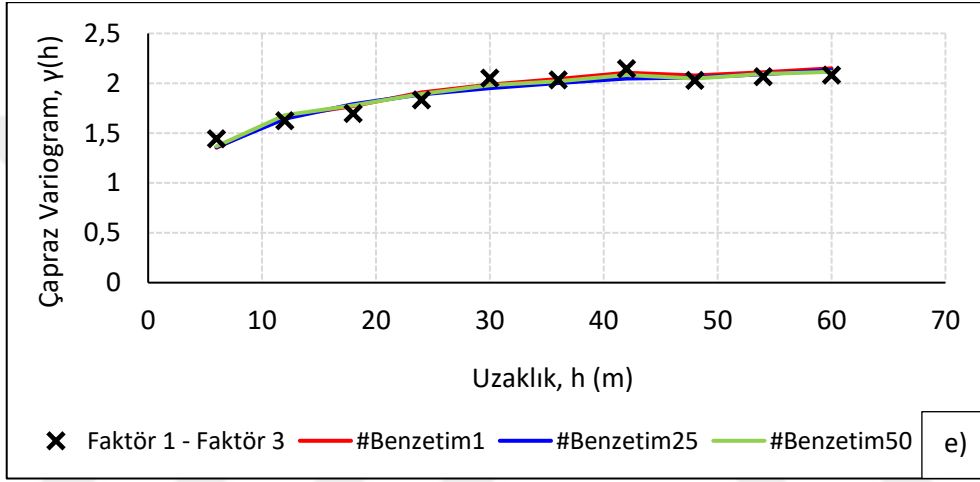
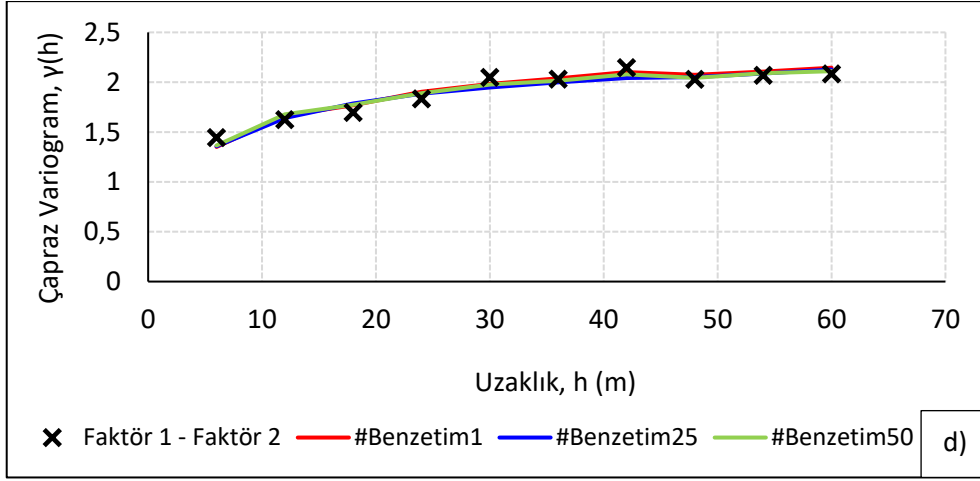
Şekil 5.7. Faktörler ve benzetimlerinin birikimli dağılım fonksiyonları a) Faktör 1 b) Faktör 2, c) Faktör 3

Şekil 5.7’de verilen birikimli dağılım fonksiyonları karşılaştırmalarına bakıldığında, benzetim değerlerinin birikimli dağılım fonksiyonları ile faktörlerin birikimli dağılım fonksiyonlarının neredeyse çakıştığı görülmektedir. Bu da faktörlerin doğru bir şekilde benzetildiğini gösteren bir diğer kontroldür mekanizmasıdır.

Faktörler ve benzetimlerinin düz ve çapraz deneysel variogramları ise Şekil 5.8 ve Şekil 5.9'da karşılaştırılmıştır.



Şekil 5.8. Faktörler ve benzetimlerin düz deneysel variogramları a) Faktör 1, b) Faktör 2, c) Faktör 3

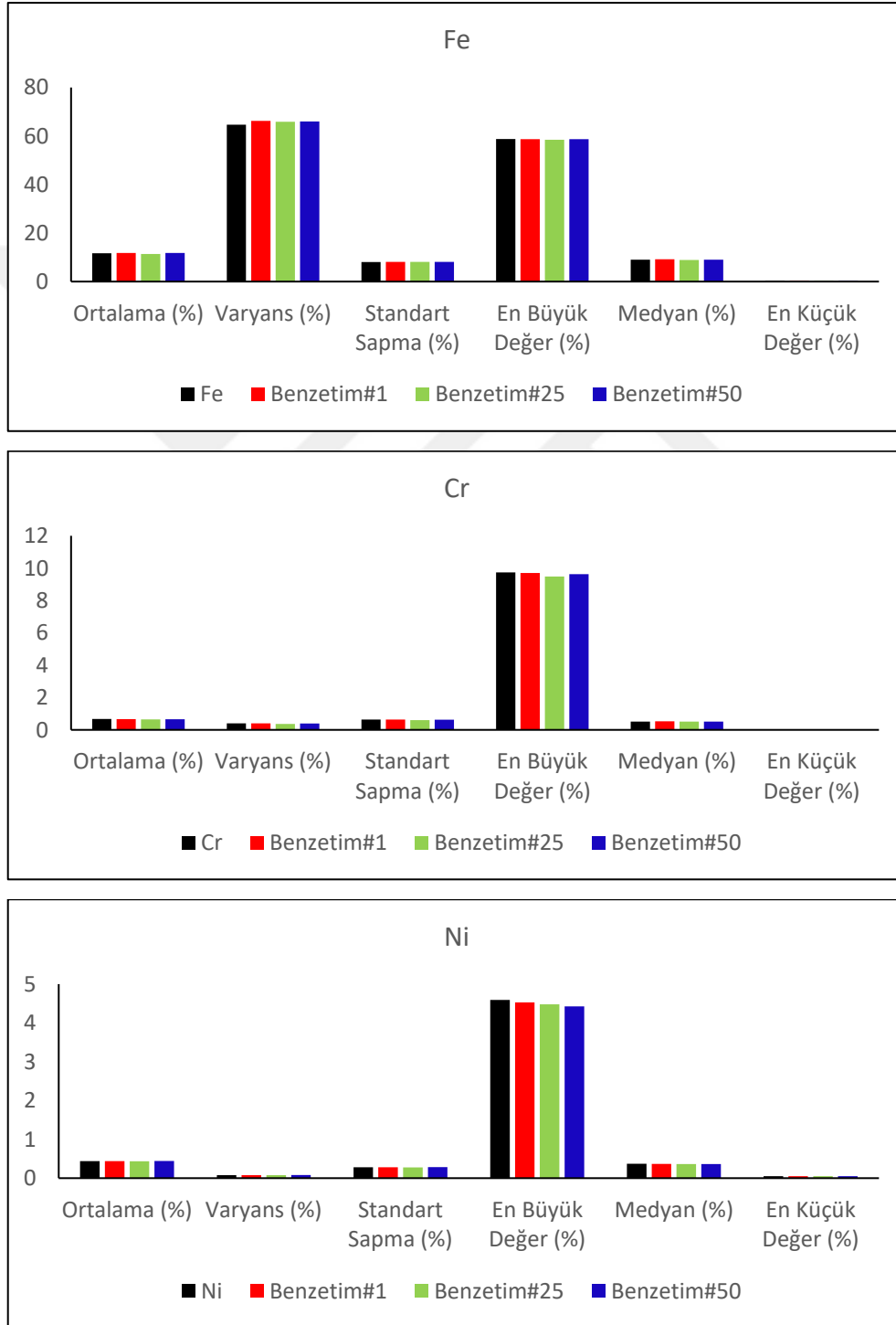


Şekil 5.9. Faktörler ve benzetimlerin çapraz deneysel variogramları d) Faktör 1-2, e) Faktör 1-3, f) Faktör 2-3

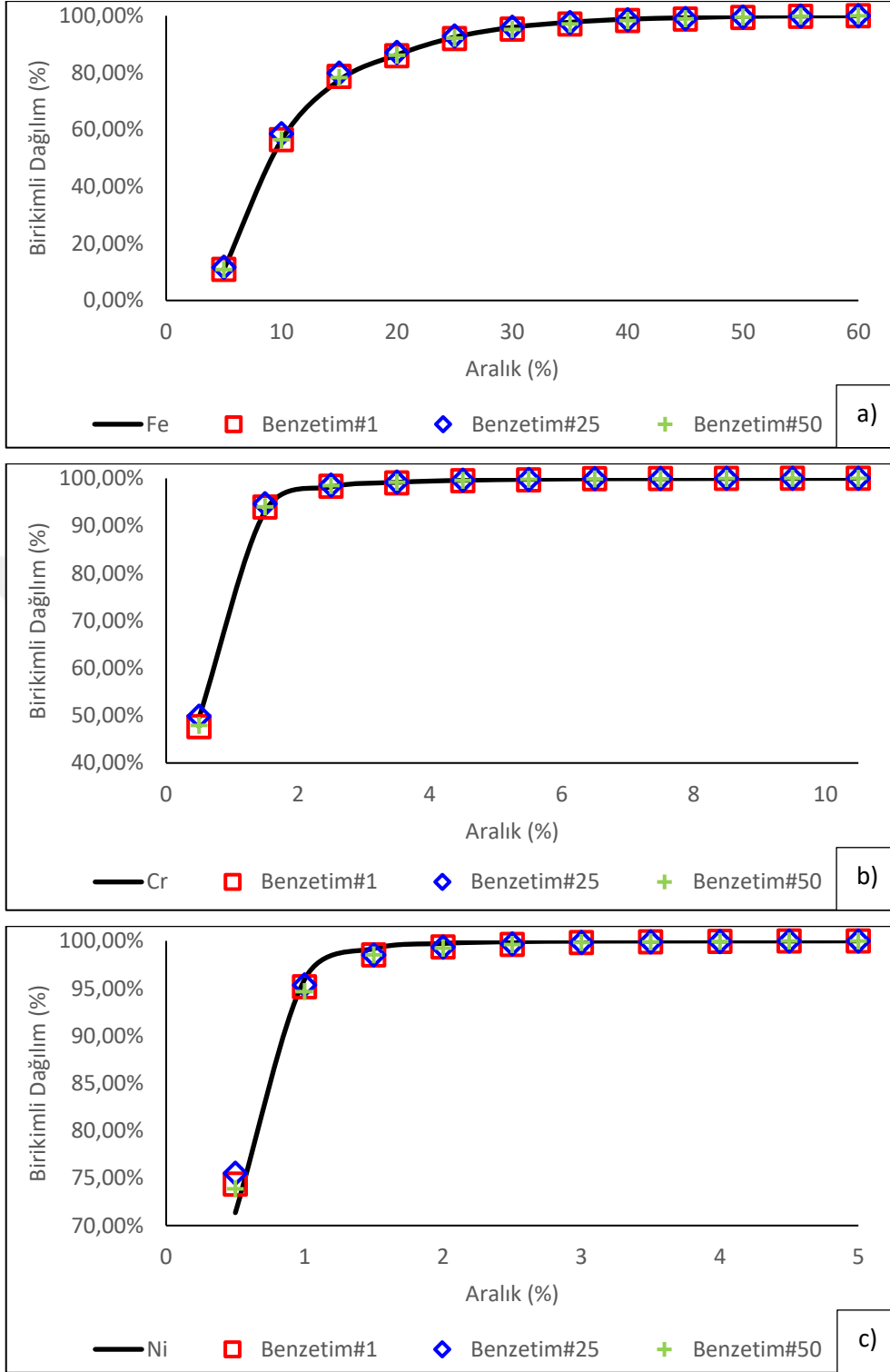
Şekil 5.8 ve Şekil 5.9 Şekil 4.9'da verilmiş olan karşılaştırmalar göz önüne alındığında ise benzetimlerle elde edilen deneysel variogramların yaklaşık bir şekilde faktörlerin deneysel variogramlarına benzediği görülmektedir. Yapılan bu karşılaştırmalar benzetilmiş faktörlerin kullanılabilir olduğunu göstermektedir.

## 5.5. Benzetilmiş Faktörlerin Geri Dönüştürülmesi

Benzetilmiş faktörler dönüşüm matrisi kullanılarak normal dağılıma sahip orijinal veri uzayına ardından orijinal veri uzayına dönüştürülmüştür. Orijinal veri uzayına dönüştürülen benzetimlerin ve orijinal verilerin karşılaştırmalı özet istatistikleri Şekil 5.10'da, birikimli dağılım fonksiyonlarının karşılaştırmaları ise Şekil 5.11'de görülmektedir.



Şekil 5.10. Orijinal verilerin ve benzetim değerlerinin özet istatistiklerinin karşılaştırılması

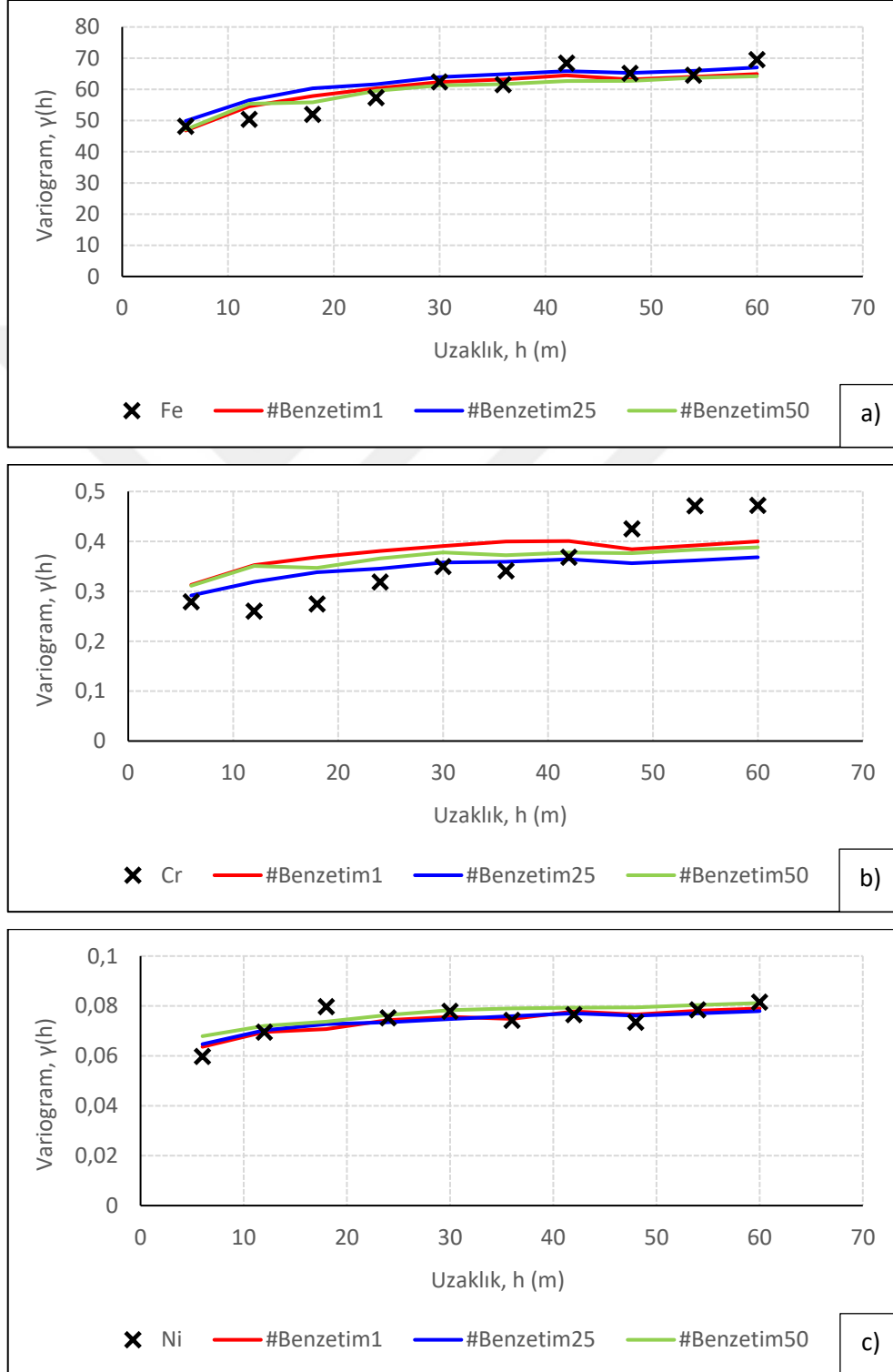


Şekil 5.11. Orijinal veriler ile benzetimlerin birikimli dağılım fonksiyonları a) Fe, b) Cr, c) Ni

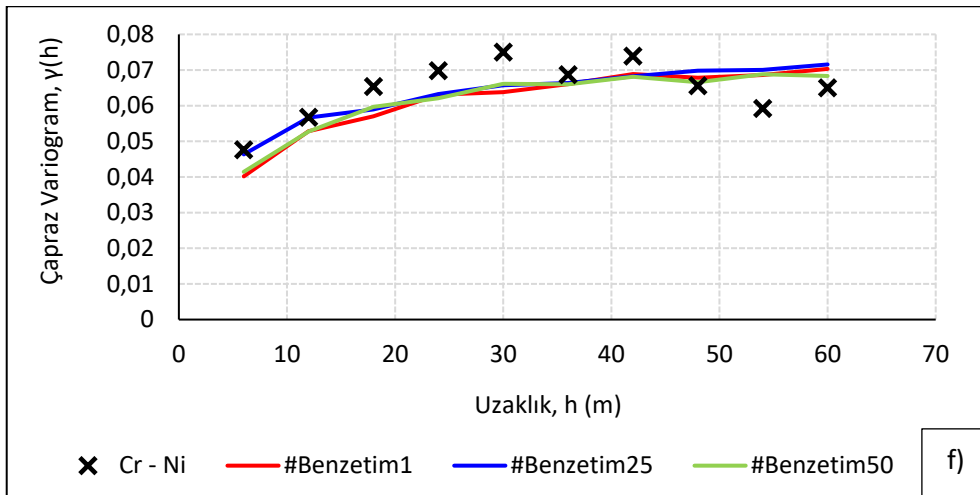
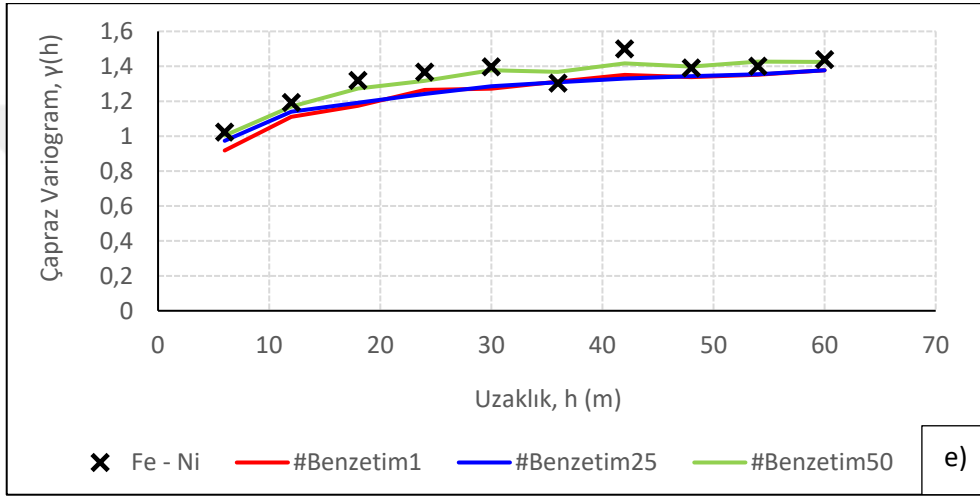
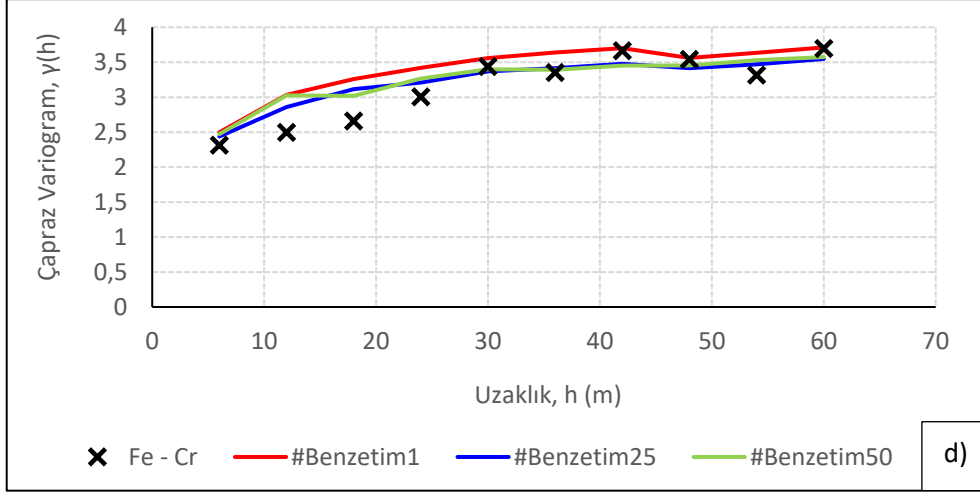
Şekil 5.10'da verilen özet istatistiklerin karşılaştırmalarına bakıldığında, öznlü ilişkili faktörlerle elde edilen benzetimlerin orijinal verilerin ortalama, standart sapma, en büyük ve en küçük değer gibi temel özet istatistiklerini yaklaşık bir şekilde ürettiği görülmektedir. Aynı şekilde Şekil 5.11'de benzetimlerin birikimli dağılım

fonksiyonlarının orijinal verilerin birikimli dağılım fonksiyonları ile karşılaştığı görülmektedir.

Orijinal veri uzayına dönüştürülen benzetimlerin ve orijinal verilerin deneysel variogramları ise Şekil 5.12 ve Şekil 5.13'te karşılaştırılmıştır.



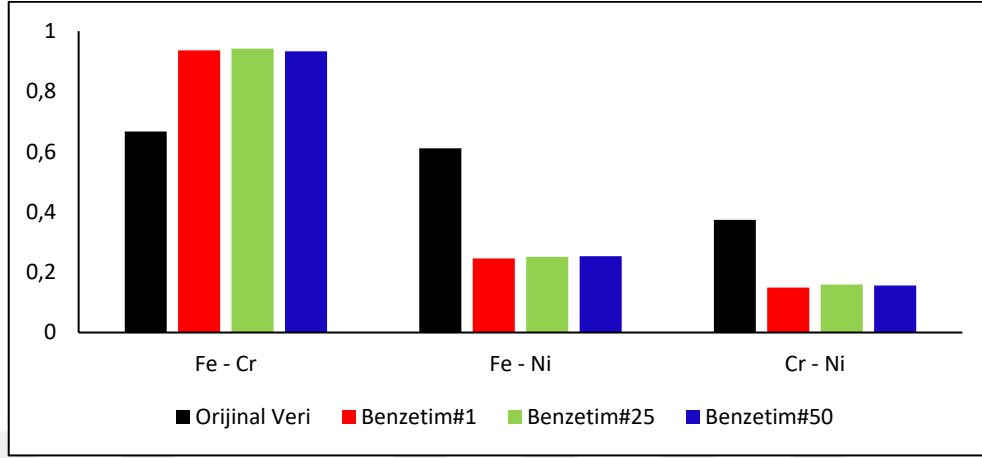
Şekil 5.12. Orijinal veriler ile benzetimlerin düz deneysel variogramları a) Fe, b) Cr, c) Ni



Şekil 5.13. Orijinal veriler ile benzetimlerin çapraz deneysel variogramları d) Fe-Cr, e) Fe-Ni, f) Cr-Ni

Şekil 5.12 ve Şekil 5.13'te görülen çapraz ve düz deneysel variogramların karşılaştırmalarına bakıldığında, benzetimlerin deneysel variogramlarının orijinal verilerin deneysel variogramlarına benzer bir model sergilediği ve orijinal verinin varyansına yaklaştığı görülmektedir.

Orijinal veriler ile benzetim sonuçlarının doğrusal korelasyon katsayıları ise Şekil 5.14'te verilmiştir. Lateritik nikel sahası verilerinden elde edilen doğrusal korelasyon katsayıları, orijinal değerlerin korelasyon katsayılarına yaklaşmamıştır.



Şekil 5.14. Lateritik nikel verilerinden elde edilen doğrusal korelasyon katsayıları

Özet istatistiklerin, birikimli dağılım fonksiyonlarının ve deneysel variogramların karşılaştırmaları göz önüne alındığında, özünü ilişkili faktör üretimi ile 3 boyutlu uygulamada da değişkenlerin yaklaşık bir şekilde yeniden üretildiği görülmektedir. Üretilen benzetimlerin düz ve çapraz deneysel variogramları, orijinal verilerin çapraz ve düz deneysel variogramları ile benzer bir yapı sergilemektedir ve benzetimlerin varyansları orijinal verilerin varyanslarına oldukça yaklaşmaktadır. 3 boyutlu uygulamada elde edilen korelasyon katsayıları ise, 2 boyutlu uygulamaya kıyasla orijinal verilerin korelasyonlarını tam olarak üretememiştir. Bunun nedeni bilinmemektedir.

3 boyutlu uygulamada korelasyonların üretilmemesi durumu haricinde özünü ilişkili faktör üretimi ile çokdeğişkenli jeostatistiksel benzetimler başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Değişkenler arasındaki çapraz ilişkinin ortadan kaldırılması ve çapraz ilişkiyi modelleme gereksinimine ihtiyaç duyulmaması, benzetim çalışmalarının daha basit bir şekilde yapılabildiğini göstermektedir.

## 6. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Tez çalışmasında, özünlü ilişkili faktörlerin üretilmesi ve ÖİF yöntemi ile elde edilen faktörlerin kullanılması ile çapraz ilişkilerin ortadan kaldırılarak jeostatistiksel benzetimlerin yapılması araştırılmıştır. Bu amaçla, 2 boyutlu ve 3 boyutlu nokta verileri üzerinde özünlü ilişkili faktör üretimini gerçekleştiren bir bilgisayar kodu yazılmıştır. Uygulamalarda, ÖİF yöntemi ile üretilen faktörlerin kullanılması ile jeostatistiksel benzetimler gerçekleştirilmiş, 2 ve 3 boyutta üretilen benzetimler ile orijinal verilerin istatistiksel ve jeostatistiksel karşılaştırmaları yapılmıştır.

2 boyutlu uygulamada, yazılan kod ile özünlü ilişkili faktörler elde edilmiştir. Faktörler ardışık normal benzetimle benzetilmiş ve benzetilen faktörler orijinal veri uzayına geri dönüştürülmüştür. Dönüştürülen benzetimler orijinal veriler ile karşılaştırılmıştır. Orijinal verilerin ve benzetimlerin birikimli dağılım grafiklerine bakıldığında, ÖİF yöntemi ile elde edilen benzetimlerin orijinal verileri yeniden ürettiği görülmektedir. Benzetimlerin ve orijinal verilerin düz ve çapraz deneysel variogramları, özet istatistikleri ve korelasyonlarının karşılaştırmaları da ÖİF yöntemi ile elde edilen benzetimlerin orijinal veriyi yaklaşık bir şekilde üretebildiğini göstermektedir.

Nikel sahasındaki uygulamada da öncelikli olarak özünlü ilişkili faktörler üretilmiştir. Faktörler ardışık normal benzetim ile benzetilmiştir ve benzetilmiş faktörler çalışma algoritmasına uygun şekilde orijinal veri uzayına geri dönüştürülmüştür. Elde edilen benzetimlerin özet istatistikleri ve birikimli dağılım fonksiyonları, orijinal veriler ile örtüşmektedir. Benzetimlerin düz ve çapraz deneysel variogramları da yapı olarak orijinal verilerin deneysel variogramlarına benzemektedir ve orijinal verilerin varyanslarına yakın değerler göstermektedir. Fakat benzetimlerle elde edilen korelasyon katsayıları, orijinal verilerin korelasyon katsayıları ile benzerlik göstermemektedir ve benzetimlerle yeniden üretilmemiştir. Korelasyon katsayılarında görülen anomali haricinde ÖİF yöntemi ile yapılan benzetimler orijinal verilerle paralellik göstermektedir ve bu da yöntemin düzgün ve doğru sonuçlar üretecek şekilde çalıştığını göstermektedir.

Sonuç olarak ÖİF yönteminin kullanılması ile çokdeğişkenli jeostatistiksel benzetimler, tek bir variogram modellemesi ile gerçekleştirilebilmektedir. Çokdeğişkenli veri kümelerinin gerektirdiği işlem yoğunluğuna bakıldığında,

yöntemin pratikliği ÖİF yönteminin jeostatistiksel benzetimlerin gerçekleştirilmesi konusunda oldukça iyi bir alternatif olduğunu göstermektedir.

Tez kapsamında yapılan çalışmalara ek olarak;

- dönüşüm matrisi  $W$ 'nin farklı bir optimizasyon yöntemi kullanılarak elde edilmesi ve farklı dönüşüm mekanizmalarının olup olmadığının araştırılması,
- benzetimlerin gerçekleştirilmesi sırasında nokta benzetimi yerine, blok modelden yola çıkılarak blokların benzetilmesine dayalı bir çalışma yapılması,
- özünüli ilişkiyi ölçecek bir kriterin geliştirilmesi,
- yöntemin farklı veri kümeleri üzerinde denenerek korelasyon katsayılarının üretilmemesinin nedenlerinin araştırılması ve
- pratikte özünüli ilişki gösteren çoklu değişkenlerin ne tür özelliklere sahip olabileceğinin araştırılması,

önerilmektedir.

## KAYNAKÇA

- [1] Tunçay, T., Bayramin, İ., Tercan, A.E., Ünver, İ., Spatial variability of some soil properties: a case study of the Lower Seyhan river basin in Turkey, *Zemdirbyste-Agriculture*, vol. 100, no. 2, 213-219, **2013**.
- [2] Journel, A.G., Kyriakidis, P.C., *Evaluation of Mineral Reserves: A Simulation Approach*, Oxford University Press, **2004**.
- [3] Chilès, J.P., Delfiner, P., *Geostatistics: Modeling Spatial Uncertainty*, Wiley, New York, **1999**.
- [4] Deutsch C., Journel, A., *GSLIB: Geostatistical Software Library and User's Guide*, Oxford Univ. Press, New York, **1998**.
- [5] Srivastava, R.M., Froidevaux, R., Probability field simulation: a retrospective, *Geostatistics Banff 2004*: Springer, 55-64, **2005**.
- [6] Soares, A., Direct sequential simulation and cosimulation, *Mathematical Geology*, vol. 33, no. 8, 911-926, **2001**.
- [7] Gómez-Hernández, J.J., Journel, A.G., Joint sequential simulation of multigaussian fields, *Geostatistics Troia '92*, Springer, 85-94, **1993**.
- [8] Verly, G., Sequential Gaussian cosimulation: a simulation method integrating several types of information, in *Geostatistics Troia'92*, Springer, 543-554, **1993**.
- [9] Cassiraga, E., Gómez-Hernández, J.J., Probability field algorithm for multivariate conditional simulation, *geoENV III—Geostatistics for Environmental Applications*: Springer, 275-285, **2001**.
- [10] Sohrabian. B., *Bağımsız Bileşenler Analizi ile Çok Değişkenli Jeostatistiksel Kestirim*, Doktora Tezi, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, **2013**.
- [11] Matheron. G., Recherche de simplification dans un problème de cokrigeage, *Publication N-628, Centre de Géostatistique, Ecole des Mines de Paris, Fontainebleau*, **1979**.
- [12] Wackernagel, H., *Multivariate Geostatistics: An Introduction With Applications*, Springer, **2003**.
- [13] Subramanyam, A., Pandalai, H., On the equivalence of the cokriging and kriging systems, *Mathematical Geology*, vol. 36, no. 4, 507-523, **2004**.

- [14] Matheron, G., Principles of geostatistics, *Economic Geology*, vol. 58, no. 8, 1246-1266, **1963**.
- [15] Journel, A.G., Huijbregts, C.J., *Mining Geostatistics*, Academic Press, **1978**.
- [16] Cressie, N., *Statistics for Spatial Data*, John Wiley & Sons, New York, **1991**.
- [17] Oliver, M.A., Webster, R., *Basic Steps In Geostatistics: The Variogram and Kriging*, Springer, New York, **2015**.
- [18] Tercan, A.E., Saraç, C., *Maden Yataklarının Değerlendirilmesinde Jeostatistiksel Yöntemler*, TMMOB Maden Mühendisleri Odası Yayını, Ankara, **1998**.
- [19] Soltani, S., Hezarkhani, A., Tercan, A.E., Karimi, B., Use of genetic algorithm in optimally locating additional drill holes, *Journal of Mining Science*, vol. 47, no. 1, 62-72, **2011**.
- [20] Goovaerts, P., *Geostatistics For Natural Resources Evaluation*, Oxford Univ. Press, New York, **1997**.
- [21] Journel, A.G., Nonparametric estimation of spatial distributions, *Journal of the International Association for Mathematical Geology*, vol. 15, no. 3, 445-468, **1983**.
- [22] Chilès, J., Delfiner, P., *Geostatistics: Modeling Spatial Uncertainty*, John Wiley & Sons, New York, **1999**.
- [23] Almeida, A.S., Journel, A.G., Joint simulation of multiple variables with a Markov-type coregionalization model, *Mathematical Geology*, vol. 26, no. 5, 565-588, **1994**.
- [24] Bogaert, P., Comparison of kriging techniques in a space-time context, *Mathematical Geology*, vol. 28, no. 1, 73-86, **1996**.
- [25] Suro-Pérez, V., Indicator principal component kriging: the multivariate case, *Geostatistics Tróia '92*, Springer, 441-454, **1993**.
- [26] Boucher, A., Dimitrakopoulos, R., Block simulation of multiple correlated variables, *Mathematical Geosciences*, vol. 41, no. 2, 215-237, **2008**.
- [27] Rondon, O., Tran, T., Multivariate simulation using min/max autocorrelation factors: practical aspect and case studies in the mining industry, *Geostats*, vol. 1, 269-278, **2008**.

- [28] Rondon, O., Teaching aid: minimum/maximum autocorrelation factors for joint simulation of attributes, *Mathematical Geosciences*, vol. 44, no. 4, 469-504, **2011**.
- [29] Emery, X., Ortiz, J.M., Enhanced coregionalization analysis for simulating vector Gaussian random fields, *Computers & Geosciences*, vol. 42, 126-135, **2012**.
- [30] Goovaerts, P., Spatial orthogonality of the principal components computed from coregionalized variables, *Mathematical Geology*, vol. 25, no. 3, 281-302, **1993**.
- [31] Xie, T., Myers, D.E., Fitting matrix-valued variogram models by simultaneous diagonalization (Part I: Theory), *Mathematical Geology*, vol. 27, no. 7, 867-875, **1995**.
- [32] Tercan, A.E., Importance of orthogonalization algorithm in modeling conditional distributions by orthogonal transformed indicator methods, *Mathematical Geology*, vol. 31, no. 2, 155-173, **1999**.
- [33] Mueller, U.A., Ferreira, J., The U-WEDGE transformation method for multivariate geostatistical simulation, *Mathematical Geosciences*, vol. 44, no. 4, 427-448, **2012**.
- [34] Tichavsky, P., Yeredor, A., Fast approximate joint dagonalization incorporating weight matrices, *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 57, no. 3, 878-891, **2009**.
- [35] Hyvärinen, A., Oja, E., Independent component analysis: algorithms and applications, *Neural Networks*, vol. 13, no. 4-5, 411-430, **2000**.
- [36] Eberhart, R., Kennedy, J., Particle Swarm Optimization, *Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks*, vol.4, 1942-1948, **1995**.
- [37] Carlisle, A., Dozier, G., An off-the-shelf PSO, *Proceedings of the workshop on particle swarm optimization*, vol. 1, 1-6, **2001**.

## ÖZGEÇMİŞ

### Kimlik Bilgileri

Adı Soyadı: Ecem KARAHAN  
Doğum Yeri: ANKARA  
Medeni Hali: Bekar  
E-posta: [ecem.karahan09@hacettepe.edu.tr](mailto:ecem.karahan09@hacettepe.edu.tr)  
Adres: Tepealtı Mah. Sevgi Sokak 86/4  
Yenimahalle/ANKARA

### Eğitim

Lise: Yahya Kemal Beyatlı Lisesi  
Lisans: Hacettepe Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü  
Yüksek Lisans: Hacettepe Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü,  
Maden İşletme Anabilim Dalı  
Doktora: -

### Yabancı Dil Düzeyi

2017 Bahar ÖSYM Yabancı Dil Sınavı, 77,50/100.

### İş Deneyimi

-

### Deneyim Alanları

Jeostatistik, Maden Planlama, Kodlama

### Tezden Üretilmiş Projeler ve Bütçesi

-

### Tezden Üretilmiş Yayınlar

-

### Tezden Üretilmiş Tebliğ ve/veya Poster Sunumu ile Katıldığı Toplantılar

-



HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
YÜKSEK LİSANS/DOKTORA TEZ ÇALIŞMASI ORJİNALLİK RAPORU

HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLER ENSTİTÜSÜ  
MADEN MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI BAŞKANLIĞI'NA

Tarih: 22/06/2018

Tez Başlığı / Konusu: ÖZÜNLÜ İLİŞKİLİ FAKTÖRLERLE ÇOKDEĞİŞKENLİ JEOİSTATİSTİKSEL BENZETİM  
(MULTIVARIATE GEOSTATISTICAL SIMULATION USING INTRINSICALLY CORRELATED FACTORS)

Yukarıda başlığı/konusu gösterilen tez çalışmamın a) Kapak sayfası, b) Giriş, c) Ana bölümler d) Sonuç kısımlarından oluşan toplam 68 sayfalık kısmına ilişkin, 22/06/2018 tarihinde ~~sağım~~/tez danışmanım tarafından Turnitin adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan orijinallik raporuna göre, tezimin benzerlik oranı % 7'dir.

Uygulanan filtrelemeler:

- 1- Kaynakça hariç
- 2- Alıntılar hariç/dâhil
- 3- 5 kelimedenden daha az örtüşme içeren metin kısımları hariç

Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Çalışması Orjinallik Raporu Alınması ve Kullanılması Uygulama Esasları'nı inceledim ve bu Uygulama Esasları'nda belirtilen azami benzerlik oranlarına göre tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edileceği muhtemel durumda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Gereğini saygılarımla arz ederim.

Tarih ve İmza

Adı Soyadı: ECEM KARAHAN  
Öğrenci No: N14123026  
Anabilim Dalı: MADEN MÜHENDİSLİĞİ  
Programı: MADEN İŞLETME  
Statüsü:  Y.Lisans

**DANIŞMAN ONAYI**

UYGUNDUR.

Prof. Dr. A. Erhan TERCAN

(Unvan, Ad Soyad, İmza)