

SAYISAL YÜKSEKLİK MODELLERİNİN
OLUŞTURULMASINDA KULLANILAN
ENTERPOLASYON YÖNTEMLERİNİN
KARŞILAŞTIRILMASI
SEVİM BİLGE KEÇECİ
YÜKSEK LİSANS TEZİ
HARİTA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

T.C.
ONDOKUZ MAYIS ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SAYISAL YÜKSEKLİK MODELLERİNİN OLUŞTURULMASINDA
KULLANILAN ENTERPOLASYON
YÖNTEMLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

SEVİM BİLGE KEÇECİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
HARİTA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

AKADEMİK DANIŞMAN
PROF. DR. SEBAHATTİN BEKTAŞ

SAMSUN-2011

T.C.
ONDOKUZ MAYIS ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Bu çalışma jürimiz tarafından **11/08/2011** tarihinde yapılan sınav ile **Harita Mühendisliği Anabilim Dalı'nda YÜKSEK LİSANS** tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan: Prof. Dr. Sebahattin BEKTAŞ

Üye: Doç. Dr. Sermin ELEVLİ

Üye: Yrd. Doç. Dr. Halil AKINCI

ONAY :

Yukarıdaki imzaların adı geçen öğretim üyelerine ait olduğunu onaylarım.

.../.../2011

Prof. Dr. Hasan GÜMÜŞ
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

**SAYISAL YÜKSEKLİK MODELLERİNİN OLUŞTURULMASINDA
KULLANILAN ENTERPOLASYON
YÖNTEMLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI**

ÖZ

Günümüzde sayısal yükseklik modelleri ve sayısal arazi modelleri Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS), çeşitli mühendislik çalışmaları ve doğal kaynakların yönetimi gibi pek çok alanda kullanılmaktadır. Sayısal yükseklik modelleri, arazi analizleri ve 3 boyutlu uygulamalar için genel bir veri kaynağıdır. Arazinin eğimi, bakışı, eğriliği, havza alanı gibi özellikleri sayısal yükseklik modelinden kolaylıkla belirlenebilmektedir. Bu nedenle, sayısal yükseklik modellerinin doğru üretilmelerinin yanında günümüz koşullarında hızlı ve ekonomik üretilmesi de bir amaç haline gelmektedir. Bu kapsamda, farklı enterpolasyon yöntemleri kullanılarak farklı doğruluklarda sayısal yükseklik modeli üretilebilmektedir.

Bu çalışmada sayısal arazi modeli ve sayısal yükseklik modeli kavramları açıklanmış, sayısal yükseklik modeli oluşturmak için kullanılan enterpolasyon yöntemleri matematik modelleriyle anlatılmıştır. Uygulamada yersel ölçülerle bulunmuş, x,y,z koordinatları bilinen nokta kümesinden farklı enterpolasyon teknikleriyle çalışma alanının yükseklik modeli oluşturulmuştur. Elde edilen sonuçların karesel ortalama hataları karşılaştırılmış ve buna göre en iyi sonuç veren yöntem belirlenmeye çalışılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Sayısal Arazi Modeli, Sayısal Yükseklik Modeli, Enterpolasyon, Sayısal Arazi Temsili

**COMPARISON OF INTERPOLATION METHODS
FOR
CREATING DIGITAL ELEVATION MODELS**

ABSTRACT

Today, digital elevation models and digital terrain models are used in many areas, such as Geographical Information Systems (GIS), several engineering work and management of natural resources. Digital elevation models are a general source of data for terrain analysis and 3-D applications. The slope of the land, aspect, curvature, catchment area characteristics can be determined easily by the help of digital elevation models. Therefore, besides the accurate production of digital elevation models, its fast and economical production becomes a goal. Different accuracy digital elevation model can be produced by using different interpolation methods.

In this study, the concepts of digital terrain model and digital elevation model are explained, interpolation methods used to generate digital elevation models are described in mathematical models. In practice, 3-D model was created from the point set whose x,y,z coordinates were known with different interpolation techniques. The results obtained were compared and tried to determine the best method that works.

Key Words: Digital Terrain Model, Digital Elevation Model, Interpolation, Representation of Terrain Surfaces

TEŞEKKÜR

Tez çalıőmam boyunca bilgi ve tecrübesiyle yanımda olan ve değerli vaktini ayıran Danışman Hocam Prof. Dr. Sebahattin BEKTAŞ'a, benden yardımını ve desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen Sayın Hocam Yrd. Doç. Dr. Halil AKINCI'ya, yardımlarıyla tezime destek olan Sayın Hocam Yrd. Doç. Dr. Derya ÖZTÜRK'e ve tezi bitirmemde en büyük destekçim olan Burç ERDEDE'ye teőekkürü bir borç bilirim.

Ayrıca tez çalıőmam süresince bana her türlü maddi ve manevi destekte bulunan canım aileme, tez arkadaşım Harita Mühendisi Sevsin ERDOĞAN'a, sevdiklerime ve çalışma arkadaşlarıma çok teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZ	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iv
KISALTMALAR LİSTESİ.....	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ	vii
ÇİZELGELER LİSTESİ	ix
1. GİRİŞ	1
1.1. Problemin Tanımı	4
1.2. Çalışmanın Amacı	5
1.3. Literatür Araştırması	6
2. SAYISAL ARAZİ YÜZEYLERİNİN TEMSİLİ	10
2.1. Sayısal Arazi Modelleri	10
2.1.1. Model Olgusu ve Matematik Modeller	11
2.1.2. Arazi Modeli ve Sayısal Arazi Modeli	13
2.1.3. Sayısal Yükseklik Modelleri ve Sayısal Arazi Modelleri	14
2.2. Sayısal Arazi Modelleme İşlemi	16
2.2.1. Sayısal Arazi Modellemesinin Gelişimi	18
2.3. Sayısal Arazi Modellemesi ve Diğer Disiplinler Arasındaki İlişkiler	20
2.4. Sayısal Yükseklik Modelinin Doğruluğu	22
2.4.1. Basit İstatistiksel Yaklaşım	23
2.4.2. Koppe Yaklaşımı	24
3. VERİ TOPLAMA YÖNTEMLERİ	27
3.1. Sayısallaştırma ile Coğrafi Veri Toplama	27
3.2. Tarama ile Veri Toplama	30
3.3. Video Kayıt ile Veri Toplama	31
3.4. Uzaktan Algılama ile Veri Toplama	31
3.5. Fotogrametrik Yöntemlerle Veri Toplama	31
3.6. Arazi Ölçmeleri ile Veri Toplama	32
3.7. Alfasayısal Bilgi Girişi ile Veri Toplama	32
3.8. Sayısal Coğrafi Bilgi Kütüğü İthali ile Veri Toplama	32

3.9. Veri Toplama Yöntemlerinin Değerlendirilmesi	33
4. ARAZİ YÜZEY MODELLERİ İÇİN ENTERPOLASYON TEKNİKLERİ	35
4.1. Ağırlıklı Aritmetik Ortalama İle Enterpolasyon	37
4.2. Polinomlarla Enterpolasyon	38
4.3. Basit Lineer Enterpolasyon	41
4.4. Bilineer Enterpolasyon	41
4.5. Bikübik Spline Enterpolasyon	42
4.6. Çok Yüzeyle Enterpolasyon	44
4.7. En İyi Yerel Yüzeyle Uydurma	49
4.8. Kayan Yüzeyle Enterpolasyon	53
4.9. Doğal Komşuluk Enterpolasyon Tekniğı	55
4.9.1. Voronoi Diyagramı ve Delaunay Üçgenlemesi	56
4.10. Ters Mesafe Ağırlıklı Enterpolasyon Yöntemi	57
4.10.1. Shepard Metodu	57
4.11. En Küçük Eğrilikli Yüzeyle Enterpolasyonu	58
4.12. Kriging Yöntemi	60
4.12.1. Ordinary Kriging Yöntemi	70
4.12.2. Simple Kriging Yöntemi	71
5. UYGULAMA	72
5.1. Çalışma Alanı ve Materyal	72
5.2. Metodoloji	73
5.3. Uygulama	75
5.3.1. Ters Mesafe Ağırlıklı Enterpolasyon Yöntemi (IDW)	75
5.3.2. Kriging Enterpolasyon Yöntemi	76
5.3.3. En Küçük Eğrilikli Yüzeyle Enterpolasyonu	78
5.3.4. Doğal Komşuluk Enterpolasyon Yöntemi	79
5.3.5. Lokal Polinomal Enterpolasyon Yöntemi	81
6. BULGULAR VE İRDELEME	83
7. SONUÇ VE ÖNERİLER	85
8. KAYNAKLAR	86
9. ÖZGEÇMİŞ	92

KISALTMALAR LİSTESİ

SAM: Sayısal Arazi Modeli

SYM: Sayısal Yükseklik Modeli

EYE: Eş Yükseklik Eğrisi

SYEM: Sayısal Yer Modeli

SAYM: Sayısal Arazi Yükseklik Modeli

CBS: Coğrafi Bilgi Sistemi

GPS: Global Position System

IDW: Inverse Distance Weighted

TIN: Triangular Irregular Network

EKK: En Küçük Kareler

EKT: En Küçük Toplam

BLUE: Best Linear Unbiased Estimator

BLUP: Best Linear Unbiased Predictor

USGS: United States Geological Survey

DMA: Defense Mapping Agency

ŞEKİLLER LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 1.1. Küçük bir adanın eş yükseklik haritası	2
Şekil 1.2. Samsun'a ait gölgelendirilmiş bir topoğrafik harita örneği	2
Şekil 1.3. İstanbul'un 70cm çözünürlüklü Quickbird uydu görüntüsü	3
Şekil 1.4. Aydınlanma ile perspektif görüntü	4
Şekil 2.1. Sayısal arazi yüzeylelerinin temsili için bir sınıflandırma şeması	10
Şekil 2.2. SAM oluşum süreci	17
Şekil 2.3. Sayısal arazi modelleme işlemi	19
Şekil 2.4. Sayısal arazi modellemesi ve diğer disiplinler	22
Şekil 2.5. Yumuşak ve dik eğimin gösterimi	25
Şekil 4.1. Kare grid şeklinde süreksiz yüzey	37
Şekil 4.2. Yüksek derece fonksiyonların salınım yapması	40
Şekil 4.3. Veri noktalarının kare grid olması durumu	42
Şekil 4.4. Farklı parçalardan oluşan yüzey	43
Şekil 4.5. Farklı σ değerleri için değerler kümesi	47
Şekil 4.6. Farklı uydurmayla aynı tip yüzeyde referans noktalarındaki farklar	50
Şekil 4.7. Farklı yüzeylerde referans noktalarındaki farklar	51
Şekil 4.8. Enterpolasyon için farklı tip hareketli yüzeyler	54
Şekil 4.9. Enterpole edilecek noktalar için Thiessen Poligonu oluşturma	55
Şekil 4.10. Voronoi Diyagramı	56
Şekil 4.11. Delaunay Üçgenlemesi	56
Şekil 4.12. An-izotropinin belirlenmesinde kullanılan elips	62
Şekil 4.13. Variogram modeli ve parametreleri	63
Şekil 4.14. Uygulamalarda kullanılan variogram modelleri	64
Şekil 4.15. Z değerlerinin variogramla uzaysal varyasyonunun tanımı	68
Şekil 4.16. Z değerlerinin kümelere bölünerek ortalamalarının bulunması	68
Şekil 4.17. Bir fonksiyon ile uzaysal varyansın özetlenmesi	69
Şekil 4.18. Variogram modeli ve bileşenleri	69
Şekil 5.1. Uygulama yapılacak veri setinin arazi üzerindeki dağılımı	72
Şekil 5.2. Uygulamada kullanılan iş akış diyagramı	74
Şekil 5.3. Ters mesafe ağırlıklı enterpolasyon yönteminde kullanılan parametreler ...	75
Şekil 5.4. Ters Mesafe Ağırlıklı Enterpolasyon ile oluşturulan 3 boyutlu model	75

Şekil 5.5. Ters Mesafe Ağırlıklı Enterpolasyon ile oluşturulan eş yükseklik eğrisi haritası	76
Şekil 5.6. Kriging enterpolasyon yönteminde kullanılan parametreler	76
Şekil 5.7. Kriging Enterpolasyon Yöntemi ile oluşturulan 3 boyutlu model	77
Şekil 5.8. Kriging Enterpolasyon Yöntemi ile oluşturulan eş yükseklik eğrisi haritası	77
Şekil 5.9. En küçük eğrilikli yüzey enterpolasyon yönteminde kullanılan parametreler	78
Şekil 5.10. En Küçük Eğrilikli Yüzey Enterpolasyonu ile oluşturulan 3 boyutlu model	78
Şekil 5.11. En Küçük Eğrilikli Yüzey Enterpolasyonu ile oluşturulan eş yükseklik eğrisi haritası	79
Şekil 5.12. Doğal komşuluk enterpolasyonunda kullanılan parametreler	79
Şekil 5.13. Doğal Komşuluk Enterpolasyon Yöntemi ile oluşturulan 3 boyutlu model	80
Şekil 5.14. Doğal Komşuluk Enterpolasyon Yöntemi ile oluşturulan eş yükseklik eğrisi haritası	80
Şekil 5.15. Lokal polinomal enterpolasyon yönteminde kullanılan parametreler	81
Şekil 5.16. Lokal Polinomal Enterpolasyon Yöntemi ile oluşturulan 3 boyutlu model	81
Şekil 5.17. Lokal Polinomal Enterpolasyon Yöntemi ile oluşturulan eş yükseklik eğrisi haritası	82
Şekil 6.1. Yöntemlerden bulunan karesel ortalama hata değerlerinin grafiksel kıyaslaması	83

ÇİZELGELER LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 1.1. Değişik uygulamalarda kullanılan enterpolasyon yöntemleri arasında, en iyi sonuç veren yöntemlerin gösterilmesi	8
Çizelge 2.1. Yüksek kaliteli ürünler için a ve b değerleri	25
Çizelge 2.2. 10^0 ve 30^0 eğimleri için M_h ve M_p değerleri	26
Çizelge 4.1. Enterpolasyon tekniklerinin farklı kriterlere göre sınıflandırılması	35
Çizelge 4.2. Uzay boyutuna göre uzunluk fonksiyonları	49
Çizelge 6.1. Bilinen z değerleri ile enterpolasyonla bulunan z değerleri arasındaki farkla hesaplanan m_0 değerleri	83

1. GİRİŞ

İnsanlar, dünya üzerinde yaşarlar ve araziyle nasıl baş edeceklerini öğrenerek yaşamlarını sürdürürler. Örneğin; inşaat mühendisleri yapıların tasarımını ve inşasını arazi üzerinde yaparlar. Jeologlar, dünyanın katmanlarının yapısının oluşum esaslarını incelerler. Jeomorfoloqlar, arazinin oluşum süreci ve biçimi ile ilgilenirler. Harita mühendisleri ise yer yüzeyinin ölçümü ve harita, ortofoto veya perspektif görüntü gibi farklı yollarla sunumuyla uğraşırlar. Uğraştıkları alanlarda farklılıklar olmasına rağmen bu farklı disiplinler, arazi yüzeyinin belirli bir doğrulukla, uygun bir şekilde temsil edilmesini isterler.

İnsanlar, eski çağlardan beri arazi üzerindeki detayları göstermeye çalışmışlardır. Örneğin resim, en eski temsil yöntemidir. Resim, arazi hakkında bazı genel bilgiler sunmasına rağmen, metrik kalitesinin (doğruluğunun) aşırı derecede düşük olması nedeniyle mühendislik amaçları için kullanılamaz. Diğer bir eski, fakat etkili arazi gösterim yöntemi ise haritalardır. Haritalar medeniyet tarihi boyunca kullanılmıştır ve toplumun gelişiminde dil kadar etkili rol oynamışlardır. Eski zamanlarda, gerçek üç boyutlu (3B) arazi yüzeylerini göstermek için yarı sembolik ve yarı resimsel tasarımlar kullanılmıştır. Bu gösterimlerin de metrik kalitesi ve hassasiyeti çok düşüktür. Modern haritalar, iyi tasarlanmış bir sembol sistemine ve iyi kurgulanmış bir matematiksel temele dayanmakta olup, üç önemli özelliğe sahiptir:

1. Matematiksel kurullarla garantilenmiş ölçülebilirlik,
2. Genelleştirme ile sağlanan ana hatlar,
3. Sembolleştirme ile sağlanan sezgisellik.

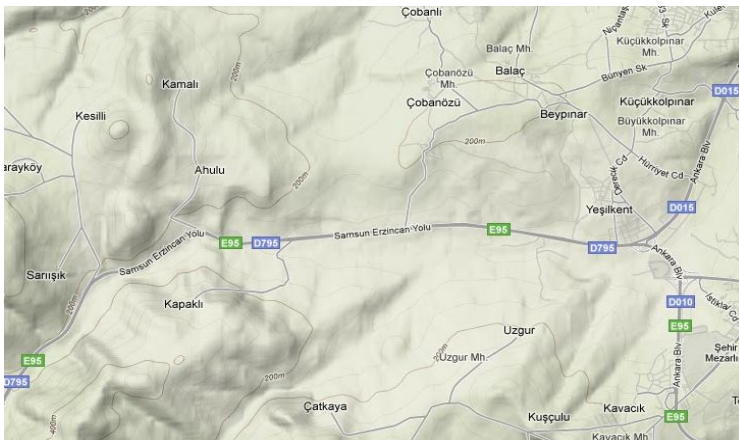
Eş yükseklik haritaları, arazi temsili için en çok tercih edilen yöntemdir. Bu tür haritaların kullanımı, 18'inci yüzyıla kadar dayanmaktadır. Pek çok kişi tarafından eş yükseklik haritalarının, haritacılık tarihi açısından en önemli icat olduğuna inanılır. Topoğrafik bir haritada, arazi üzerinde var olan bütün detaylar, iki boyutlu bir yatay datuma ortogonal olarak izdüşürülür, ölçeğe bağlı olarak küçültülerek çizgilerle veya sembollerle gösterilirler. Arazi yüksekliği ve morfolojik bilgi, eş yükseklik eğrileri ile

temsil edilir. Şekil 1.1.'de bir eş yükseklik haritası örneği gösterilmiştir (Li, Zhu, Gold, 2005).



Şekil 1.1. Küçük bir adanın eş yükseklik haritası (Li, Zhu, Gold, 2005)

Aslında bir harita, arazi üzerindeki detayların bilimsel olarak genelleştirilmiş ve soyutlanmış halidir. Genel olarak topografik haritalar üç boyutlu gerçekliği göstermek için iki boyutlu gösterimi kullanırlar. İki boyutlu gösterim ve üç boyutlu gerçeklik arasında her zaman büyük bir uçurum vardır. Bu uçurum nedeniyle kartografyacılar yıllarca kendilerini arazinin topografyasının üç boyutlu temsiline adanmışlardır. Topoğrafik haritalarda, geleneksel olarak, perspektif görüntüleme, tarama, gölgelendirme ve hipermetrik renklendirme (renk katmanları) teknikleri kullanılmıştır. Bununla birlikte, bilgisayarlar tarafından kolayca üretilebilmesi nedeniyle gölgelendirme, hala yaygın olarak kullanılmaktadır (Li, Zhu, Gold, 2005). Şekil 1.2.'de gölgelendirilmiş bir topoğrafik harita örneği gösterilmiştir



Şekil 1.2. Samsun'a ait gölgelendirilmiş bir topoğrafik harita örneği

Çeşitli doğru çizimleriyle karşılaştırıldığında resimlerin bazı avantajları vardır. Örneğin; resimler daha detaylıdır ve daha kolay anlaşılırlar. Bu nedenle, fotoğrafçılık bulunduğu beri, üzerinde yaşadığımız renkli dünyayı kaydetmek için yaygın bir şekilde kullanılmaya başlanmıştır. Fotoğraflar, sonrasında hava fotoğrafları, arazi temsili için 1849'dan beri kullanılmaktadır. Ancak hava fotoğraflarında, üç boyutlu yüzeyin bir boyutu olan yükseklik, temel olarak eksiktir. Bu sebeple tek bir hava fotoğrafı yer noktalarının gerçek yükseklikleri hakkında bilgi vermek için yeterli değildir. Düzeltilmiş hava fotoğrafları bazı durumlarda bir plan olarak kullanılabilir. Ancak üç boyutlu yüzeyler bir çift hava fotoğrafı ve belirli bir yüzdede çakışma ile (örneğin %60) yeniden oluşturulabilir. Bu teknik fotogrametri olarak adlandırılmaktadır.

Uydu görüntüleri, hava fotoğraflarını tamamlamak için 1970'den beri kullanılmaktadır. Birçok uydu sistemi, üç boyutlu modellerin oluşturulmasında kullanılmak için arazinin bindirmeli görüntülerini çekebilir. SPOT, IKONOS ve Quickbird bu uydu sistemlerine örnek olarak gösterilebilir. Şekil 1.3.'de İstanbul'a ait bir Quickbird görüntüsü yer almaktadır. Ancak uydu görüntülerinin çözünürlükleri hala hava fotoğrafları ile uyumlu değildir.



Şekil 1.3. İstanbul'un 70 cm çözünürlüklü Quickbird uydu görüntüsü

Arazi, perspektif görünümle de temsil edilebilir. Arazinin bu yöntemle temsil edilme işlemi, araziye bir düzleme izdüşürmeyi ve izdüşüm noktasından gözükmeyen tüm doğruları kaldırmayı içerir. “Blok Diyagramı” ve “Perspektif Eş Yükseklik Diyagramı” bu yöntemle elde edilen ürünlerdir (Li, Zhu, Gold, 2005).



Şekil 1.4. Aydınlanma ile perspektif görüntü (Düzgün, 2011)

1.1. Problemin Tanımı

Sayısal Yükseklik Modeli (SYM), topografik bir yüzeyin sayısal gösterimi için kullanılmaktadır. Sayısal Arazi Modeli (SAM) ise daha geniş kapsamlı olup, yüzeyi en iyi şekilde temsil etmeyi sağlayan, yapay ve doğal önemli topografik detaylara, kritik arazi hatlarına ve düzensiz dağılmış kritik yüzey noktalarına ait yükseklik değerlerini kapsayan bir modeldir. SYM, CBS'nin vazgeçilmez bir elemanıdır. SYM, arazi yüzeyinin görselleştirilmesi, arazide herhangi bir noktanın yüksekliğinin bulunması, arazi yüzeyinin eğim ve bakışının bulunması gibi birçok uygulamada kullanılmaktadır. Kısaca SYM'lerin amacı, bilgisayarlarda yeryüzünün bir parçasını sayısal olarak temsil etmektir.

Enterpolasyon ise, komşu noktaların bilinen yüksekliklerinden yararlanarak, bir noktanın yükseklik değerini belirlemek için kullanılır. SYM oluşturulurken kullanılan pek çok enterpolasyon yöntemi vardır. Bunlardan bazıları;

- Ağırlıklı Aritmetik Ortalama ile Enterpolasyon
- Polinomlarla Enterpolasyon
- Basit Lineer Enterpolasyon
- Bilineer Enterpolasyon
- Bikübik Spline Enterpolasyon
- Çok Yüzeyle Enterpolasyon
- En Küçük Karelerle Yerel Yüzey Uydurma
- Kayan Yüzeylerle Enterpolasyon
- Doğal Komşuluk Enterpolasyonu
- Ters Mesafe Ağırlıklı Enterpolasyon
- En Küçük Eğrilikli Yüzey Enterpolasyonu
- Kriging Enterpolasyon Yöntemidir.

Her enterpolasyon yöntemi farklı sonuçlar vermektedir. Bu bağlamda arazi tipine uygun enterpolasyon yöntemlerinin seçilmesi gerekmektedir. Düz arazilerde doğru sonuç veren bir enterpolasyon yöntemi, engebeli arazilerde doğru sonuç vermeyebilir. Arazinin yapısına en yakın sonucu veren enterpolasyon yönteminin kullanılması daha gerçekçi ve güvenilir sonuçlar verecektir. Hangi yöntemin daha doğru sonuç verdiği, yöntemin arazi şartlarıyla doğrudan ilişkili olup olmadığı belirlenmelidir.

1.2. Çalışmanın Amacı

SYM, araziye oluşturan noktalar ile arazinin sürekli yüzeyinin basitçe gösterilmesidir. SAM'da doğruluğu en çok etkileyen faktör, araziye kontrol noktaları yardımıyla göstermektir. SAM, kontrol noktaları üzerine kurulacağına göre, araziye tam olarak gösteremeyen noktaların olumsuz etkileri, hiçbir enterpolasyon yöntemiyle giderilemez.

Bir arazi parçasının tam olarak tanımlanabilmesi için sonsuz sayıda noktaya ihtiyaç vardır. Ancak bu, pratikte mümkün olmadığı için arazi, belirli sayıda nokta ile oluşturulan yüzeyle temsil edilmeye çalışılır. Bu noktaların oluşturduğu kümeye dayanak ya da örnekleme uzayı denir. İhtiyaç duyulan noktaların tamamı için veri toplama çoğu zaman mümkün olmadığından, kestirim işlemi yapılması gerekmektedir. Kestirim işlemi için kullanılan enterpolasyon yöntemleri, her zaman yeterince doğru sonuç vermemektedir. Bu durumda, arazinin tipine uygun enterpolasyon yönteminin seçilmesi daha uygun olacaktır. Bu çalışmada, bir veri seti üzerinde, seçilen beş yöntem kullanılarak yapılan uygulama sonucu, elde edilen yükseklik değerlerinin farklarından yararlanarak standart sapma (karesel ortalama hata) değerleri karşılaştırılmıştır. Çalışmanın amacı, en iyi sonuç veren enterpolasyon yöntemini belirlemektir.

Bu çalışma beş ana bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde genel hatlarıyla, sayısal model oluşturmanın gerekliliği ve bu çalışmaya neden gerek duyulduğu anlatılmıştır. İkinci bölümde; SAM, SYM gibi genel kavramlar açıklanmış, bu modellerin nasıl kurulacağından, diğer disiplinlerle ilişkilerinden bahsedilmiştir. Üçüncü bölümde; SAM oluştururken verilerin nasıl elde edilebileceğinden bahsedilmiştir. Dördüncü bölümde; model oluşturulurken kullanılan enterpolasyon yöntemlerinden bahsedilmiş, bunlar matematik modelleriyle beraber açıklanmıştır. Son bölümde ise koordinatları verilen nokta kümesiyle modeller oluşturulmuş, hangi modelin ne kadar doğru sonuç verdiği karşılaştırılmıştır.

1.3. Literatür Araştırması

Yapılan literatür çalışmaları sonucunda, ülkemizde, sayısal arazi modelleri ve kullanılan enterpolasyon yöntemleri ile ilgili çok sayıda çalışma bulunmaktadır (Üstüntaş, 1994, Bayrak, 1996, Yanalak, 1997, Yiğit, 2003, Alkanalka, 2005, Köroğlu, 2006, Erdoğan, 2007, Ayar, 2009 vb.). Yapılan çalışmaların hepsinde, SAM'ın gerekliliği konusu üzerinde durulmuş, farklı disiplinler tarafından yaygın olarak kullanıldığı açıklanmıştır.

Üstüntaş (1994), yüksek lisans tezinde, sayısal arazi modellerinden, arazi tasvirlerinden, enterpolasyon yöntemlerinden bahsetmiştir. Uygulamada ise alımı

yapılan araziyi sayısal olarak göstermek için kullanılan programın, araziyi doğru olarak gösterip göstermediğini incelemiş ve yazılımların doğru sonuç verdiğini belirlemiştir.

Bayrak (1996), çalışmasında, SYM oluşturmada kullanılan enterpolasyon yöntemlerinden, Multikvadrik ve Parça Parça Bilineer Enterpolasyon yöntemlerini karşılaştırmıştır. İki yöntemle üretilen yüksekliklerin, paftadan okunan değerlerden farklarını alarak testlere tabi tutmuş ve birbirleriyle karşılaştırarak, SYM oluşturma çalışmalarında birbirlerine karşı sağladıkları avantajları ve dezavantajları irdelemiştir.

Yanalak (1997), SYM'lerde kullanılan enterpolasyon yöntemlerini açıklamıştır. Uygulamada, hacim hesapları için kullanılmakta olan enterpolasyon yöntemlerini, grid büyüklüğü, kesit aralığı ve kritik daire yarıçapı için değerlendirip önerilerde bulunmuştur.

Yiğit (2003), GPS/Nivelman yöntemiyle jeoit yükseklikleri belirlenmiş olan değişik üç test bölgesinde, ara noktaların yüksekliklerinin belirlenmesi için ağırlıklı ortalama, polinom yüzeyler, multikvadrik, en küçük karelerle kollokasyon ve Kriging yöntemlerini karşılaştırmıştır.

Alkanalka (2005), fotogrametrik yöntemlerle elde edilen SYM verilerinin, uydu görüntüsünde bulut gelmesi, parlaklık, yıpranma gibi nedenlerle eksik olduğu bölgelerinin kestirim yöntemleri kullanılarak gerçeğe en yakın değerlerinin üretilmesini ve bu işlem için en uygun kestirim yönteminin araştırmasını yapmıştır. Ayrıca en uygun kestirim yöntemi bulunduğundan sonra yüzey eğrisi geçirme aralığının seçimi, veri olmayan kısımda bırakılan bilinen nokta sayısının önemi ve SYM verisi olmayan alan büyüklüğü hususlarının elde edilen yeni değerlerin doğruluğuna etkisi de incelenmiştir.

Köroğlu (2006), meslek açısından birçok uygulama alanı bulunan yüzey modelleme ve bunun için geliştirilmiş yöntemleri incelemiştir. Bu yöntemleri içinde bulunduran yazılım yardımıyla, yöntemlerin hacim hesabına etkisini araştırmıştır.

Erdoğan (2007), SYM üretiminde yoğun olarak kullanılan kaynak veri türleri ve üretim yöntemlerine göre, üretim kriterleri ve standartlarının belirlenmesi, zaman,

maliyet, doğruluk ve kullanılabilirlik yönünden bu yöntemlerin test edilmesi ve optimizasyonu alanında çalışmıştır. Uygulamada, görüntü eşleştirme ile SYM'ler üretmiş, elde edilen SYM'lerin doğruluğunu test etmiştir. Aynı zamanda bu verilerden bir kısmı için fotogrametrik değerlendirme ile sayısal eş yükseklik eğrisi üretimi yapılmış, sayısal eş yükseklik eğrilerinden SYM üretilmiştir. SYM'lerde optimum veri toplama aralığı ve SYM doğruluğu test edilmiştir.

Ayar (2009), çalışmasında, İller Bankası Genel Müdürlüğü ile yapılan protokol çerçevesinde İTÜ tarafından gerçekleştirilen Zonguldak GPS Ağı Projesi kapsamındaki GPS ölçmelerini değerlendirerek enterpolasyon yöntemleriyle yüksekliklerini belirlemiştir.

Yapılan yüksek lisans ve doktora tezleri dışında da bu konuyla alakalı pek çok makale ve bildiri bulunmaktadır. Bu çalışmalarda ise genellikle yöntemler birbiriyle kıyaslanmış, uygulama sonuçları karşılaştırılmıştır. Bu kapsamda, en iyi sonuç veren yöntem belirlenmeye çalışılmıştır.

Yapılan bazı çalışmalarda elde edilen en iyi sonuçlar Çizelge 1.1.'de görülmektedir.

Çizelge 1.1. Değişik uygulamalarda kullanılan enterpolasyon yöntemleri arasında, en iyi sonuç veren yöntemlerin gösterilmesi

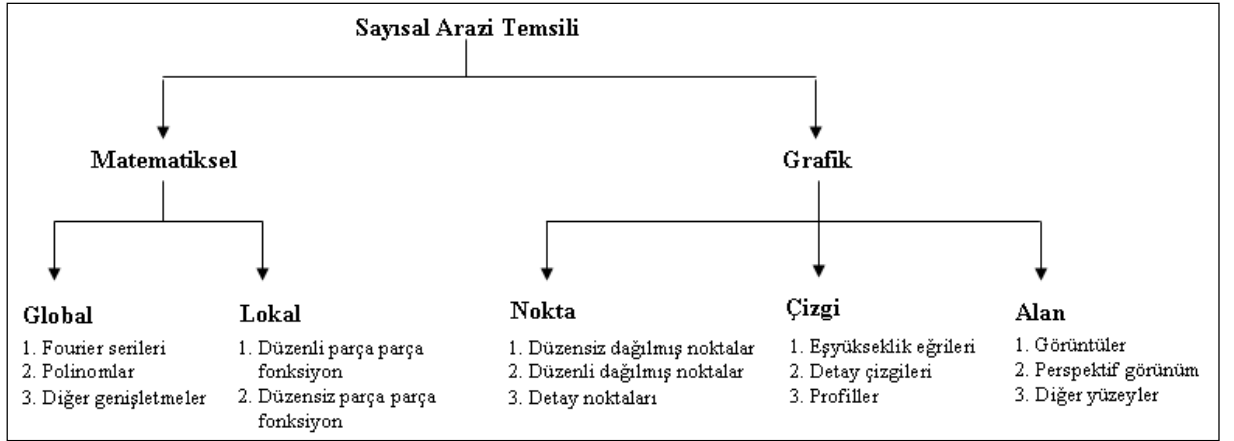
Yöntem	Yiğit (Yükseklik Dönüşümü)	Üstüntaş (EYE Geçirme)	Yanalak (Hacim Hesabı)	Alkanalka (SYM Oluşturma)
Doğal Komşuluk Enterpolasyonu			X	
Kriging Enterpolasyonu	X			X
Bilineer Enterpolasyon		X		
Çok Yüzeyle Enterpolasyon	X	X	X	
Kayan Yüzeylerle Enterpolasyon		X		

Bu çalışmada ise literatürden farklı olarak yersel ölçülerle x,y,z koordinatları belirlenmiş olan bir alan için farklı enterpolasyon yöntemleri kullanılarak, enterpolasyon sonucu bulunan noktaların doğrulukları karesel ortalama hata yönünden karşılaştırılmış ve en iyi sonuç veren enterpolasyon yönteminin Kriging yöntemi olduğu kanıtlanmıştır.

2. SAYISAL ARAZI YÜZEYLERİNİN TEMSİLİ

20. yüzyılın ortalarından itibaren, bilgisayar teknolojisi, modern matematik ve bilgisayar grafiklerindeki gelişmelerle birlikte, çeşitli sayısal arazi temsil teknikleri geliştirilmiştir. Bilgisayar kullanımı, bilgi çağında önemli bir dönüm noktası olmuş ve bilgisayarlar, sayısal arazi yüzeyinin temsili için önemli bir araç haline gelmiştir.

Sayısal arazi yüzeyleri matematiksel ya da grafiksel olarak temsil edilebilirler. Fourier serileri ve polinomlar genel matematik gösterimlerdir. Düzenli grid, düzensiz grid, eş yükseklik eğrileri ve bölgesel diyagramlar ise genel grafik gösterimlerdir. Şekil 2.1.'de, sayısal arazi temsili için kullanılan matematiksel ve grafik yöntemler gösterilmektedir (Li, Zhu ,Gold, 2005).



Şekil 2.1 Sayısal arazi yüzeylerinin temsili için bir sınıflandırma şeması (Li, Zhu ,Gold, 2005)

2.1. Sayısal Arazi Modelleri

Sayısal Arazi Modeli (SAM) ve Sayısal Yükseklik Modeli (SYM), arazi yüzeylerinin temsili için dikkate alınan en önemli kavramlardan biridir. Çalışmanın bu bölümünde, genel olarak “model” kavramından başlanarak, SAM ve SYM kavramları detaylı olarak ele alınacaktır.

2.1.1. Model Olgusu ve Matematik Modeller

‘Model, bir şeyi temsil etmek için kullanılan bir nesne ya da kavramdır. Gerçekliğin küçültülmüş ve anlayabileceğimiz biçime dönüştürülmüş halidir (Meyer, 1985). Bir model, kestirim ve kontrol gibi birkaç spesifik amaca sahip olabilir. Bu durumda, modelin söz konusu amaçları karşılamak için önemli detaylara sahip olması gerekmektedir. Model, orijinal durumu ya da önerilen veya tahmin edilen durumları temsil etmek için kullanılır. Bu nedenle, model kelimesi genellikle “temsil etmek” kelimesi ile aynı anlama gelir ve birçok durumda mevcut sistemi tanımlamakta kullanılır. Genelde 3 tip modelden bahsedilir:

1. Kavramsal
2. Fiziksel
3. Matematiksel

Kavramsal model, bir insanın bilgi ve deneyimlerine bağlı olarak, bir durum ya da bir nesne hakkında zihninde oluşturduğu modeldir. Bu özel model tipi, genellikle modellemenin birincil aşamasını oluşturur ve bu modeli daha sonra fiziksel veya matematiksel model takip eder. Ancak, durum ya da nesneyi başka bir yöntemle temsil etmek çok zorsa model kavramsal düzeyde kalacaktır.

Fiziksel model genellikle analog bir modeldir. Kauçuk, plastik ya da kilden yapılmış bir arazi modeli, bu modele örnek olarak gösterilebilir. Fotogrametride yaygın olarak kullanılan, optik veya mekanik projeksiyon ilkesine dayanan, arazinin stereo modeli bu kategoride yer almaktadır (Li, Zhu, Gold, 2005).

Matematiksel model, bir durumu, nesneyi ya da olguyu matematiksel terimlerle gösterir. Başka bir deyişle matematiksel model; bileşenleri, sabitler, değişkenler, fonksiyonlar, denklemler, eşitsizlikler gibi matematiksel kavramlar olan bir modeldir. Matematiksel modeller ikiye ayrılabilirler (Saaty, Alexander, 1981):

- Nicel modeller; bir sayı sistemine dayalı modellerdir.

- Nitel modeller; küme teorisine dayanan ve bir sayı sistemine indirgenemeyen modellerdir.

Ayrıca, bir problem ya deterministik ya da değişikliklere bağlı olarak olasılıklı olabilir. Bu nedenle, matematik model şu şekilde de sınıflandırılabilir:

1. Fonksiyonel modeller; deterministik problemleri çözmek için tasarlanmış
2. Stokastik modeller; olasılıklı problemleri çözmek için tasarlanmış

Matematik modellerle ilgili olarak, matematik modeli kullanmanın ne tür faydalar sağlayacağı ya da matematik model kullanmanın nedenleri akla gelen önemli sorulardandır. Saaty ve Alexander (1981) bu soruların cevaplarını aşağıdaki maddelerle açıklamıştır:

1. Modeller mantıksal formasyona dayanan ve kısaltılmış notasyonla ifade edilmiş bir dili kullanır. Böylece, birisi bir problemin ana elemanlarını daha iyi görebilirken aynı zamanda iletişimi sağlar. Belirsizliği azaltır ve sonuçlar üzerindeki kabul şansını artırır.
2. Problemin önemli parçaları üzerine yoğunlaşmaya olanak sağlar.
3. Birilerine problemlerin çözümü, diğer alanlara genelleme ve sonuçları uygulama konusunda yardımcı olur.
4. Tüm olasılıkları hesaba katmak, alternatifleri değerlendirmek ve imkansız olanları elimine etmek için olanak sağlar.
5. Gerçek dünyayı anlamak ve doğa kanunlarını keşfetmek için gerekli araçlardır.

Burada önemli olan diğer bir konu matematik modellerin nasıl değerlendirileceğidir. Meyer (1985) matematik modellerin değerlendirilmesi için 6 adet kriter önermiştir. Bunlar:

- Doğruluk: Modelin çıktısı doğrudur veya doğruya oldukça yakındır.
- Gerçekçilik: Model, doğru varsayımlara dayanır.
- Duyarlık: Modelin tahmini belirli sayılardır, fonksiyonlardır ya da geometrik şekillerdir.
- Sağlamlık: Modelin, girdi verisindeki hatalardan etkilenmemesidir.
- Genellik: Modelin çeşitli durumlara uygulanabilirliğini ifade eder.
- Verimlilik: Sonuçlar faydalıdır veya diğer iyi modellere yol gösterir ve ilham kaynağı olur.

Li(1990), bu listeye bir kriter daha eklemiştir. Basitlik: Modelde mümkün olabildiğince az sayıda parametre kullanılır. Gerçek karmaşık olsa bile bu gerçekliği temsil etmek için kullanılacak olan modelin her zaman karmaşık olması gerekmez (Li, Zhu, Gold, 2005).

2.1.2. Arazi Modeli ve Sayısal Arazi Modeli

Arazi modelleri, askeri personelden plancılara, mimarlardan inşaat mühendislerine ve dünya ile ilgilenen diğer bilim dallarına gerekli olmuştur. Aslında arazi modelleri kauçuktan, plastikten, kilden, topraktan ve bunun gibi malzemelerden yapılan fiziksel modellerdir. Örneğin ikinci dünya savaşında birçok model Amerikan donanması tarafından yapılmıştır ve kauçuk ile çoğaltılmıştır (Baffisfore, 1957; Li, Zhu, Gold, 2005).

Yakın zamanda 1982'deki Folkland savaşında bölgedeki İngiliz kuvvetleri yapılan toprak ve kil modelleri askeri operasyonları planlamak için yoğun bir şekilde kullanmıştır.

Matematiksel, nümerik ve sayısal tekniklerin arazi modellemesine girişi inşaat mühendisliği alanında çalışan fotogrametricilerin faaliyetleri sayesinde olmuştur. 1950'li yıllarda fotogrametri, karayollarının tasarımında bilgi toplamak amacıyla yaygın bir şekilde kullanılmaya başlanmıştır. Roberts (1957) bilgisayarın fotogrametri ile yol mühendisliği tasarımı ve planlamasında veri elde etmek amacıyla kullanılmasını yeni bir araç olarak önermiştir. SAM çalışmaları ilk kez Massachussets Institute of

Technology (MIT)'deki Prof. Miller ve Laflamme tarafından başlatılmıştır. Miller ve Laflamme ilk olarak stereo modellerden tasarlanan üç boyutlu noktaları seçmişler ve yol boyunca araziyi ölçmüşlerdir. Yol tasarımında yardımcı olmak amacıyla bilgisayarlarında sayısal bilgiler oluşturmuşlardır. Ayrıca sayısal arazi modeli olgusunu da bilim dünyasına tanıtmışlardır. Miller ve Laflamme tarafından verilen basit tanım şu şekildedir:

SAM, sürekli yer yüzeyinin çok sayıda seçilmiş noktalarının bilinen x,y,z koordinatlarından yararlanarak sayısal olarak temsilidir.

Geleneksel analog gösterime kıyasla SAM bazı spesifik özellikler içerir. Bunlar;

1. Gösterim şekillerinde çeşitlilik: Sayısal ortamda, çeşitli gösterim şekilleri ile basitçe oluşturulabilir. Örneğin; topoğrafik haritalar, boy ve en kesitler ve üç boyutlu animasyonlar.
2. Zamanla veri kaybının olmaması: Zaman geçtikçe kağıt haritalar deforme olabilir ancak SAM dijital ortamı kullandığı için hassasiyetini korur.
3. Gerçek zamanlı işlem ve otomasyonun daha yüksek uygulanabilirliği: Sayısal ortamda veri entegrasyonu ve güncellemesi analog biçime kıyasla daha esnektir.
4. Daha kolay çok ölçekli temsil: SAM farklı ölçekteki temsillere göre farklı çözünürlüklerde ayarlanabilir (Li, Zhu, Gold, 2005).

2.1.3. Sayısal Yükseklik Modelleri ve Sayısal Arazi Modelleri

SAM basit olarak sayısal arazi temsili olarak tanımlanmıştır. Miller ve Laflamme (1958) orijinal terimi oluştursa da farklı alternatifler kullanıma alınmıştır. Bunlar; sayısal yükseklik modeli (SYM), sayısal yer modeli (SYEM) ve sayısal arazi yükseklik modeli (SAYM) olarak adlandırılmaktadır. SYM yaygın olarak Amerika'da kullanılırken, SYEM Birleşik Krallık ve SAYM, USGS VE DMA tarafından kullanılmıştır. (Petrie, Kennie, 1987)

Pratikte bu terimler (SAM, SYM, SYEM ve SAYM) çoğu zaman aynı anlamli olarak kullanılır. Ancak bazen farklı sonuçları kasteder. Bu terimler arasında ufak

farklılıklar olabilir. Li(1990) bu farklılıklarla ilgili aşağıdaki şekilde kıyaslamalı bir analiz yapmıştır:

Yer: “dünyanın katı yüzeyi”; “katı bir taban ya da temel”; “dünyanın yüzeyi”; “denizin tabanı” vb.

Yükseklik: “verilen bir referans yüzeyinden düşey uzaklık”; “yer seviyesi üzerinde yükselti veya tanınmış bir seviyede özellikle deniz seviyesinden olan yükseklik” vb.

Yükselti: “verilen bir referans yüzeyinden, özellikle denizden olan yükseklik”

Arazi: “bir ülkenin doğal özelliklerini gösteren engebeler”; “bir bölgedeki toprak, bölge” vb.

Bu tanımlardan SYEM, SYM ve SAM arasındaki bazı farklılıklar kendini göstermeye başlar. Bu yüzden, SYEM çoğu zaman “katı bir yüzeyin sayısal modeli” anlamını taşır. Yer terimi kullanımına karşıt olarak yükseklik ve yükselti terimleri, objelerin “bir datumdan tepeye ölçümünü” vurgular. Bu terimler arazi yüzeyinden olan yüksekliği ifade etmek zorunda değildir. Arazinin anlamı daha karmaşık ve kapsamlıdır. Yükseklik olgusunu içerebilir. Ancak aynı zamanda diğer coğrafik elemanları ve doğal özelliği de kapsar. Bu sebeple SAM, SYM teriminden daha kapsamlıdır ve modelde kullanılan nehirler, tepe hatları gibi spesifik arazi özelliklerini de içerir (Li, Zhu, Gold, 2005).

Aslında arazi ve SAM terimi, farklı alanlardaki uzmanlar tarafından farklı anlamlar içerir. Ölçmeciler, arazi temsiline bakış açısından SAM ile çalışır ve özellikle arazide, arazi ve nesnelerin topografyasıyla ilgilenir. Akıllarındaki ideal SAM, topografik haritaların yeni bir jenerasyonu olabilir ve bu harita sayısal formattadır. Diğer yer bilimlerindeki uzmanlar, topografik olmayan bilgiyi topografik bilgilerle birleştirerek kendi özel gereksinimlerine göre SAM’ı oluştururlar. Genel olarak SAM aşağıdaki dört grup topografik ve topografik olmayan bilgiyi içerebilir:

1. Yer şekilleri; örneğin yükselti, eğim arazinin yapısını göstermede kullanılan daha karmaşık jeomorfolojik özelliklerdir.
2. Arazi özelliği; örneğin hidrografik özellikler (nehirler, göller, sahil hatları), ulaşım ağları (yollar, demir yolları, patikalar), yerleşim birimleri, sınırlar vb.

3. Doğal kaynaklar ve çevre; örneğin toprak, tarımsal arazi, jeoloji, iklim vb.
4. Sosyoekonomik veri; örneğin bir alandaki nüfus dağılımı, endüstri ve tarım, kapital gelir vb.

SAM, arazi üzerindeki farklı tiplerdeki (türlerdeki) bilgilerin konumsal dağılımını temsil eden örnekleme noktalarının bir seti olarak genelleştirilebilir. Bu genelleştirmenin formal dildeki açıklaması aşağıdaki gibi olabilir:

$$K_p = f(up, vp), \quad K = 1,2,3, \dots, m, \quad P = 1,2,3, \dots, n \quad (2.1)$$

Burada K_p , arazi üzerindeki herhangi bir P konumundaki bilgiyi temsil etmektedir. (up, vp) , P noktasının iki boyutlu koordinat çiftidir. $m(m \geq 1)$ arazi bilgi tipinin toplam sayısıdır. n ise, toplam örnekleme nokta sayısıdır. Örneğin toprak tipinin i . tip arazi bilgisi olarak kategorilendirildiğini varsayalım. O zaman bu bileşenin SAM'ı aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$I_p = f(up, vp) \quad P = 1,2,3, \dots, n \quad (2.2)$$

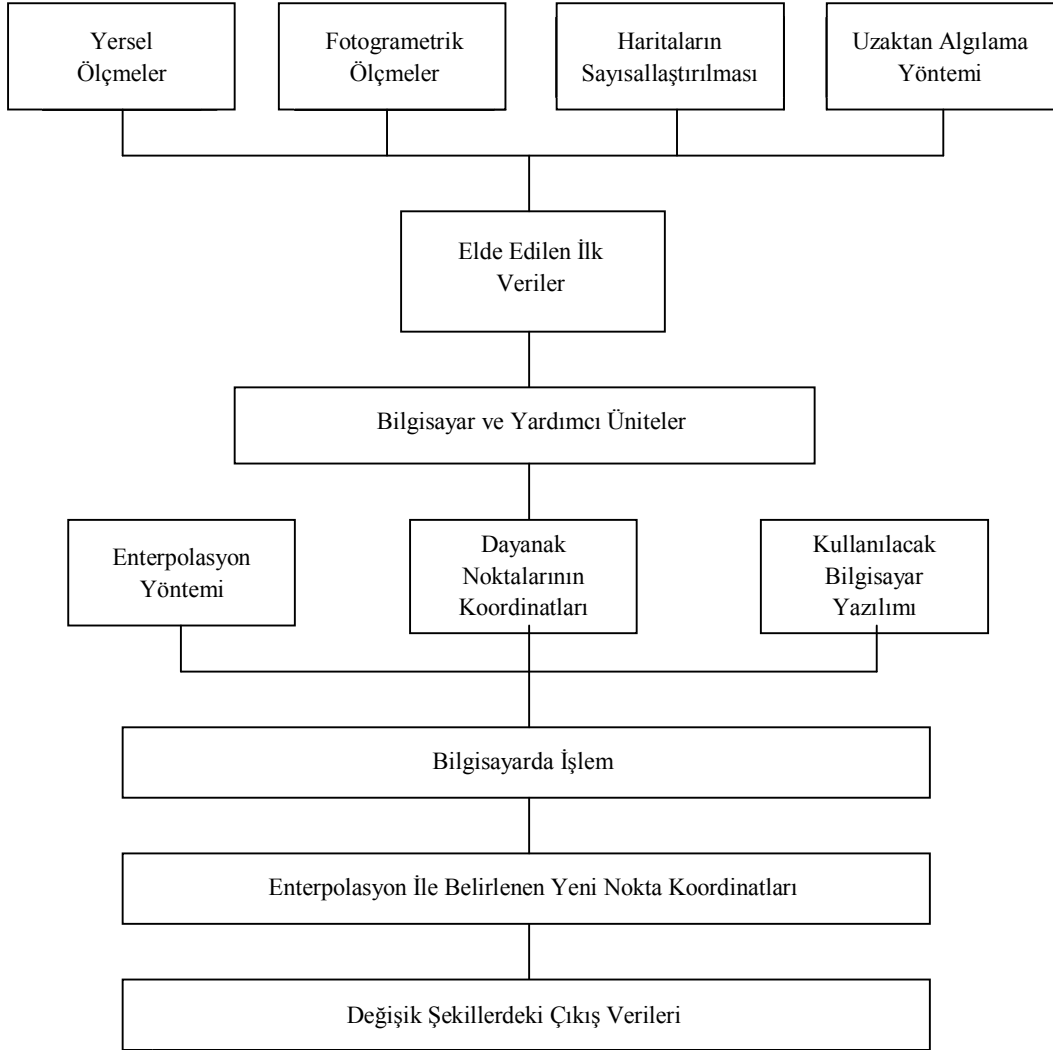
SAM bir veya daha fazla tip arazi bilgisinin uzaysal dağılımının sayısal gösterimidir ve iki boyutlu yer bilgisine ek olarak arazi bilgisi, matematiksel gösterim ile ifade edilir. Sıklıkla üç boyutlu uzayın arazi bilgisinin iki buçuk boyutlu temsili olarak anılır.

Eşitlik 2.1'de $m=1$ ve arazi yüksekliği var olduğunda sonuç SYM'nin matematiksel bir ifadesidir. Açık bir şekilde SYM, SAM'ın alt kümesidir ve SAM'ın en temel bileşenidir (Li, Zhu, Gold, 2005).

2.2. Sayısal Arazi Modelleme İşlemi

SAM yüzeyinin oluşturulması işlemi sayısal arazi modelleme olarak adlandırılır. Ayrıca bu, matematiksel modelleme işlemidir. Böyle bir işlemde arazideki noktalar örneklendirilir. Böylece belirli bir gözlem hassasiyeti, yoğunluk ve dağılım elde edilir. Daha sonra, arazi yüzeyi örnek nokta kümeleriyle gösterilir. Örneklem noktalarından

farklı olarak, sayısal yüzey üzerindeki lokasyonların özellikleri elde edilmek istenirse, örneklem veri noktalarında SAM yüzeyi oluşturularak enterpolasyon uygulanır. Diğer özellikler yükseklik değeri, eğim ve yüzey olabilir. Şekil 2.2, sayısal arazi modellemesinin tüm işlemlerini açıklamaktadır (Li, Zhu, Gold, 2005).



Şekil 2.2. SAM oluşum süreci (Köse,2006)

SAM oluşumu için, arazi yüzeyi üzerinde uygun biçimde dağılmış, konum ve yükseklikleri bilinen noktalara ihtiyaç vardır. Bu noktalara “dayanak noktaları”, “kontrol noktaları” veya “referans noktaları” denir. Bu dayanak noktaları yardımıyla, oluşturulan model üzerinde istenilen sıklıkta yeni noktalar üretilerek, bu noktalara ait konum ve yükseklikler belirlenir ve böylece yüzey sayısal olarak ifade edilir. SAM’ın iki amacı vardır:

1. Dayanak noktalarından yararlanarak, konumları bilinen noktaların yüksekliklerini hesaplamak,
2. Dayanak noktalarından yararlanarak, sadece yükseklikleri bilinen noktaların konumlarını hesaplamak.

SAM oluşturulurken, şu koşullar olabildiğince sağlanmalıdır:

- Olabildiğince az sayıda dayanak noktası ile araziye temsil edebilmelidir,
- Arazi bilgileri verimli bir şekilde işlenmelidir,
- SAM, arazinin topografyasını yeterli bir yaklaşımla temsil etmelidir,
- Kullanılan yazılımın çalışma süresi olabildiği kadar kısa olmalıdır,
- Gerekli olduğunda çok sayıdaki dayanak noktası veri olarak kullanılabilir (Yanalak, 1991).

2.2.1. Sayısal Arazi Modellemesinin Gelişimi

1950'lerin sonlarında Miller ve Laflamme, SAM'ı inşaat mühendisliğiyle tanıştırmıştır. Ayrıca, erozyon ve heyelan gibi dünyanın yüzeyindeki değişimleri gözlemlemek için SAM'ı kullanmışlardır. Dahası, hava fotoğraflarının stereo çiftlerini tarayarak otomatik veri elde edilmesini önermişlerdir.

1960'lardan beri SAM, fotogrametri ve uzaktan algılama için önemli bir uluslararası araştırma alanı olmuştur. Çünkü fotogrametriciler genelde SAM üreticileridir. 1960'larda ve 1970'lerin başında ana araştırma konusu, yüzey modelleme ve SYM üzerinden eş yükseklik eğrisi oluşturma ile ilgiliydi. Bu aşamada farklı tiplerde hareketli ortamlar gibi birçok enterpolasyon metodu önerildi. 1970'lerden itibaren odaklanılan nokta, kalite kontrol ve örnekleme stratejilerine kaymıştır.

- Ulusal veri tabanlarında sayısal topografik haritalar için yükseklik verisinin depolanması
- Yol tasarımı ve diğer sivil ve askeri mühendislik projelerinde yarma ve dolgu problemlerinin hesabı
- Peyzaj tasarım, planlama (peyzaj mimarlık) ve askeri amaçlar (silah yöneltme sistemleri, pilot talimi) için arazi şeklinin üç boyutlu gösterimi
- Arazi görüş analizi
- Baraj yerlerinin, yol rotalarının vs. hesaplanması
- Arazinin farklı karakterlerinin kıyaslaması ve statik analizi
- Gölge kabartma haritalarını hazırlamak için kullanılabilen eğim haritaları, görüş haritaları ve eğim profillerinin hesabı, jeomorfolojik çalışmaları destekleme ya da akarsu ve erozyon tahmini
- Toprak, arazi kullanımı veya bitki topluluğu gibi tematik (bir bilgiye ait) veriyle kabartma verisinin birleştirilmesi ya da tematik bilginin gösterimi için bir fon olarak kullanılması
- Görünüm yöntemleri ve görünümlerin görüntü simülasyon modelleri için veri elde edilmesi
- Üç boyutlu yükseklik modeli ile çalışarak imar adaları, yollar ve diğer modellerin daha gerçekçi olarak planlanması
- Kanalizasyon, yağmur suyu drenajı, içme suyu, elektrik, PTT gibi alt yapı projelerinin hızlı, ekonomik ve daha kolay bir biçimde yapılması ve maliyet analizi
- Çevre düzenlemesi projelerinin gerçekleştirilmesi
- Haberleşme ağı planlaması.

2.2.2. Sayısal Arazi Modellemesi ve Diğer Disiplinler Arasındaki İlişkiler

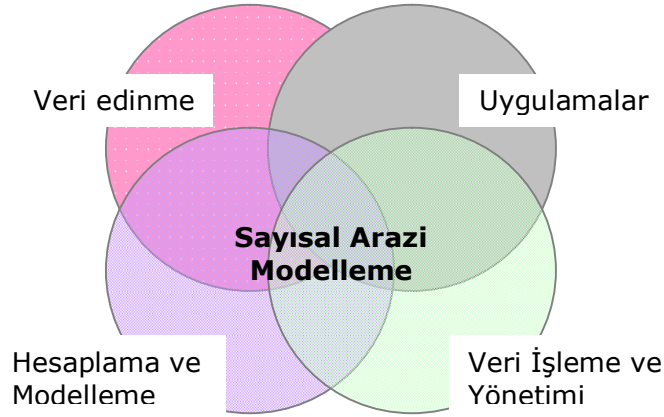
Sayısal arazi modellemesinin ilk gelişim sürecinde, fotogrametriciler ve inşaat mühendisleri vardır. Uygulamalı matematik ve analitik geometri bilimiyle uğraşan bilim adamları, modelleme algoritmalarının gelişmesinde görev alırken, bilgisayar teknolojisiyle uğraşan bilim adamları ise veri yönetimi ve sistem geliştirilmesi aşamalarına dahil olmuşlardır. Bugünlerde çeşitli disiplin alanlardaki uzmanlar SAM

uygulamalarında görev almaktadırlar. Bu sebeple sayısal arazi modellemesi dört ana bileşen içerir. Bunlar;

- Veri elde edilmesi,
- Modellemesi,
- Veri yönetimi ve
- Uygulama geliştirilmesidir.

Ancak bunlar doğrusal bir bağlantıda değildir. Örneğin fotogrametri, arazi modellemesinde veri elde etmek için kullanılan bir araçtır. Ancak SAM, hava fotoğraflarının ve uydu görüntülerinin ortorektifikasyonu için fotogrametriye uygulanır. Bu sebeple aralarındaki ilişkiler Şekil 2.4. de gösterildiği gibidir.

1. Veri elde edilmesinde, fotogrametride, global konumlama sistemi GPS ile ölçmede, uzaktan algılamada ve kartografyada ana disiplinlerdir.
2. Hesaplama ve modellemede, fotogrametride, ölçmede, kartografyada, coğrafyada, analitik geometride, bilgisayar grafiklerinde ve görüntü işlemede ana disiplinlerdir.
3. Veri yönetimi ve işlemede, veri tabanı tekniğinde veri kodlaması ve sıkıştırma tekniklerinde, veri yapılandırılmasında ve bilgisayar grafiklerinde ana disiplinlerdir.
4. Uygulamalarda tüm yerbilimler dahildir. Ölçmeyi içeren; fotogrametri, uzaktan algılama, coğrafya, jeomorfoloji, inşaat mühendisliği, maden mühendisliği, jeoloji mühendisliği, şehir ve bölge planlaması, çevre yönetimi, kaynak yönetimi, tesis yönetimi gibi alanlarda kullanılır.



Şekil 2.4. Sayısal arazi modellemesi ve diğer disiplinler (Li, Zhu, Gold, 2005)

Aslında, SAM askeri mühendislikte de yaygın bir uygulama alanı bulmuştur. Örneğin; uçak simülatorlerinde, savaş simülatorlerinde, tank rota planlamasında, füze ve uçak navigasyonunda yaygın olarak kullanılmıştır.

Bilimdeki, teknolojideki ve mühendislikteki bu uygulamalardan başka SAM, bilgisayar oyunlarında da yaygın bir kullanım alanı bulmuştur. Diyebiliriz ki SAM günlük yaşantımızdaki yerini almıştır (Li, Zhu, Gold, 2005).

2.4. Sayısal Yükseklik Modelinin Doğruluğu

Mutlak doğru bir harita olmadığı gibi, mutlak doğru bir SYM de bulunmamaktadır. Bütün SYM'ler bir takım ilişkili faktörlere bağlı olarak büyük veya küçük hatalar içerir. Tüm haritacılık işlemleri gibi, arazi modelinin doğruluğu da seçilen veya istenilen uygulamaya uygun olmalıdır (Shearer,1994; Erdoğan,2007).

Bir SYM'nin doğruluğu; SYM'nin yüzeyindeki ve bunlara karşılık gelen arazideki noktaların, belirli bir doğruluk seviyesine kadar yapılan ölçüleriyle elde edilir. Örneğin, sayısallaştırılmış eş yükseklik eğrilerinden elde edilen bir SYM, arazide yapılan ölçülerle veya fotogrametrik ölçülerle kontrol edilebilir. Böyle bir karşılaştırmadan elde edilecek veri, test noktalarındaki yükseklik farklarını verecektir (Erdoğan, 2007).

2.4.1. Basit İstatistiksel Yaklaşım

Yükseklik farkları v ve n nokta sayısı olmak üzere, ortalama ya da tam olarak cebirsel ortalama eşitlik 2.3'te gösterildiği gibi hesaplanır:

$$\text{Hataların Ortalaması: } \bar{X} = \sum_{i=1}^n v_i/n \quad (2.3)$$

$$v_i = Z_i - Z_e \quad (2.4)$$

Z_i : Bilinen yükseklik değeri

Z_e : Enterpolasyonla hesaplanan yükseklik değeri

İdeal durumda; hataların normal dağılımında olması durumunda ortalama $\bar{X} = 0$ olacaktır. Ancak pratikte bu durumla karşılaşma olasılığı son derece küçüktür. Zira en azından kaçınılmayan rastgele ölçü hataları nedeniyle ortalama sıfırdan farklı çıkar. Sıfırdan farklı çıkan ortalama değer rastgele ölçü hatalarından mı yoksa bir sistematik etkiden mi kaynaklandığı ancak yapılacak istatistik testlerle belirlenir (Bektaş, 2005).

Ortalama hata;

$$OH = \sum_{i=1}^n |v_i|/n \quad (2.5)$$

halini alır. Bu durumda, işaret dikkate alınmadığından, sonuç daima sıfırdan büyük olacaktır.

Karesel ortalama hata, diğer bir deyişle standart sapma, sık sık kullanılan istatistiksel ifadelerden biridir. Matematiksel ifadesi aşağıdaki gibidir:

$$m_0 = \pm \sqrt{\sum(v - \bar{X})^2 / (n - 1)} \quad (2.6)$$

Hangi ölçüm metotları kullanılırsa kullanılsın, ölçülmüş veri daima hata içerecektir. Verideki hatalar şunlardan kaynaklanır:

- Kaynak materyallerdeki hatalar,
- Veri elde etme için yanlış ekipman kullanılması,
- Veri elde etme sürecinde ortaya çıkan insan hataları,
- Koordinat değişiminde ve diğer veri sürecinde ortaya çıkan hatalar.

Fotogrametriyle edinilen SAM kaynak verisi için, kaynak materyallerdeki hatalar, havadan çekilen fotoğraftakileri ve kontrol noktalarındakileri içerir. Ekipman eksikliği, sınırlı doğruluğa neden olur. İnsan hataları, kaydetme yanlışlarını ve işaretler kullanarak ölçüm yapmadaki hataları içerir. Koordinat değişim hataları ise, otomasyona geçmiş metot kullanılırsa, görüntü eşleştirme hatalarını içerir.

SAM verisinin kalitesi genellikle pozisyon ve yüksekliğin doğruluğu ile ölçülür. Ancak güncellik de önemli bir konudur. SAM orijinal araziye benzer şekilde doğru olarak oluşturulsa da eğer güncel değilse elde edilen sonuç yararlı olmayabilir. Yüksek kalite bir SAM inşa etmek için, ortaya çıkabilecek hataların çapını azaltmak, küçültmek veya ortadan kaldırmak amacıyla, sayısal arazi modelleme süreçlerinin her birine dikkat edilmelidir. Bunlar;

- Veri elde etme süresince tanımlanan hataları küçültmek,
- Hataların etkilerini azaltmak ve hataları ortadan kaldırmak için prosedürleri uygulamak,
- Yüzey modelleme sürecindeki ortaya çıkan hataları küçültmektir (Li, Zhu, Gold, 2005).

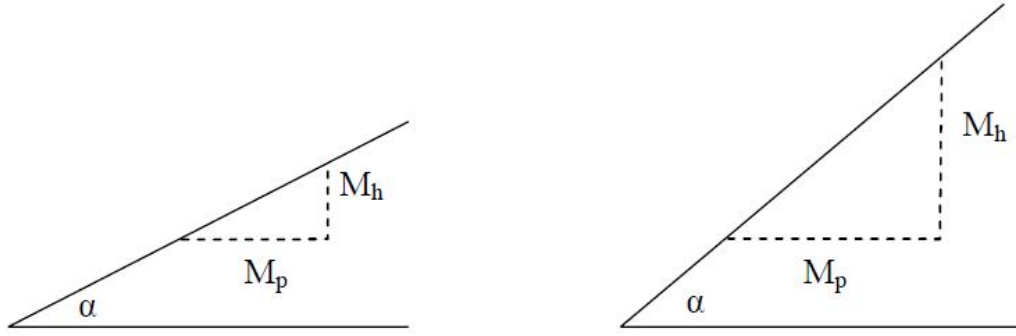
2.4.2. Koppe Yaklaşımı

Haritada yüksekliğin temsili için belirlenmiş doğruluklar çoğunlukla, Koppe tarafından gerçekleştirilen çalışmalara dayanmaktadır. Koppe, yükseklik hatalarının eğimle doğrudan ilişkili olarak arttığını göstermiştir ve aşağıdaki ifadeleri ortaya çıkarmıştır:

$$\begin{aligned} \text{Karesel Ortalama Hata yükseklikte} \quad M_h &= \pm(a + b \cdot \text{tana}) \\ \text{Karesel Ortalama Hata planimetrik} \quad M_p &= \pm(b + a \cdot \text{cota}) \end{aligned} \quad (2.7)$$

α : eğim açısı

a ve b: haritanın ölçeğine ve doğruluk gereklerine bağlı olarak belirlenmiş sabitlerdir.



Şekil 2.5. Yumuşak ve dik eğimin gösterimi (Shearer, 1994)

Yumuşak eğimlerde yükseklik hatası M_h , dik eğimlerde oluşan hatalara oranla küçüktür. Buna rağmen, planimetrik hata M_p , yumuşak eğimlerde daha büyüktür (Alkanalka, 2005).

Yüksek kaliteli ürün elde etmek için gereken a ve b değerleri çizelge 2.1.'de görülmektedir:

Çizelge 2.1. Yüksek Kaliteli Ürünler İçin a ve b Değerleri (Yılmaz, 2002)

Ölçek	Eş Yükseklik Eğrisi Aralığı (m)	$M_h(m)$	$M_p(m)$
1:1000	1	$\pm(0.1 + 0.3tana)$	$\pm(0.3 + 0.1cota)$
1:5000	5	$\pm(0.4 + 3tana)$	$\pm(3 + 0.4cota)$
1:10000	10	$\pm(1 + 5tana)$	$\pm(5 + cota)$
1:25000	10	$\pm(1 + 7tana)$	$\pm(7 + cota)$
1:50000	20	$\pm(1.5 + 7tana)$	$\pm(10 + 1.5cota)$

10^0 ve 30^0 eğimleri için M_h ve M_p değerleri çizelge 2.2’de görülmektedir.

Çizelge 2.2. 10^0 ve 30^0 eğimleri için M_h ve M_p değerleri (Yılmaz, 2002)

Ölçek	Eş Yükseklik Eğrisi Aralığı (m)	M_h (m)		M_p (m)	
		$a=10^0$	$a=30^0$	$a=10^0$	$a=30^0$
1:1000	1	0.15	0.27	0.86	0.47
1:5000	5	0.92	2.13	5.26	3.69
1:10000	10	1.88	3.89	10.67	6.73
1:25000	10	2.23	5.04	12.67	8.73
1:50000	20	3.26	7.27	18.51	12.59

Arazinin tipine veya SYM boyutuna bağlı olarak SYM doğruluğu hakkında herhangi bir kabul edilen kıstas bulunmamaktadır. Klasik eş yükseklik haritalarında, eş yükseklik eğrisi aralıkları ile eş yükseklik doğruluğu arasında tanımlanmış ilişkiler bulunmaktadır. Sadece grid boyutunun özellikleri ile ilgili olarak belirgin olmayan kurallar bulunmaktadır. Örneğin 5 metre aralıklı bir gridin çok doğru olduğu düşünülürse, düzgün arazi yapısında karesel ortalama hatasının 10-25 cm ve kayalık alanların hariç edildiği engebeli arazi yapısında ise bunun yaklaşık iki katı daha fazla olacağı belirtilmektedir. Düşey doğruluk, doğrusal grid boyutunun düzgün arazilerde 1/20’si, engebeli arazilerde 1/10’u kadarına karşılık gelmelidir. SYM’lerin yanlış değerlendirilmesini engellemek amacıyla, bu şekildeki bağlantıların araştırılması ve belirlenmesi tavsiye edilmektedir.

SYM amaçlı veri elde etmedeki en büyük sorun istenen doğruluğu elde etmek için gözlenen noktaların hangi yoğunlukta belirleneceğidir. SYM’lerdeki objektif kalite kıstasları tam olarak kullanılmamaktadır. Kaç tane veya hangi kırıklı çizgilerin başlangıç olarak alınacağı gibi işlemler, tamamen operatörün kişisel yargısına bırakılmıştır. Normalden çok fazla kırıklı çizgi alındığında, bunların çoğunun SYM’yi etkilemeyeceğine inanılmaktadır (Yılmaz, 2002).

3. VERİ TOPLAMA YÖNTEMLERİ

SYM için gerekli olan zamanın büyük bir bölümü genellikle veri toplama aşamasında harcanır. SYM'nin doğruluğu büyük ölçüde, verilerin toplanması işlemine bağlıdır (Bayrak, 1996). Veriler farklı yöntemlerle elde edilirler. Bu yöntemler, kabul edebildiği kaynak materyal cinsine, kaynak materyalin bilgisayara okutulmasındaki teknolojiye ve sonuçta ürettikleri veri yapısına göre çeşitlenirler. Bu yöntemleri birbirinden ayıran en belirleyici unsur, bilgisayarca okunabilir ortama dönüştürülürken kullanılan tekniktir. Bu teknik de veri kaynağının cinsine göre değişir. Buna göre coğrafi veri toplama yöntemleri aşağıdaki şekilde sınıflandırılabilir (Güngör, 1999; Köroğlu, 2006):

- Sayısallaştırma ile coğrafi veri toplama
 - El ile sayısallaştırma
 - Otomatik çizgi izleyerek sayısallaştırma
- Tarama ile coğrafi veri toplama
- Video kayıt ile coğrafi veri toplama
- Uzaktan algılama ile coğrafi veri toplama
- Fotogrametri ile coğrafi veri toplama
- Arazi ölçmeleri ile coğrafi veri toplama
- Alfasayısal bilgi girişi ile coğrafi veri toplama
- Sayısal coğrafi bilgi kütüğü ithali ile coğrafi veri toplama

3.1. Sayısallaştırma ile Coğrafi Veri Toplama

Sayısallaştırma tekniği ile veri toplamada, konum verileri iki boyutta x,y koordinat çiftleri halinde, başka bir ifade ile vektörel formda toplanırlar. Sayısallaştırmada, el ile sayısallaştırma veya otomatik çizgi izleyici sayısallaştırıcılar kullanılır.

El ile Sayısallaştırma: Bu sayısallaştırma ile vektör yapıdaki grafik veriler toplanır. El ile sayısallaştırmada kaynak materyal olarak herhangi bir altlık üzerinde yer alan her

türlü çizim, örneğin çizgisel veya tematik haritalar kullanılabilir. Kaynak materyalin, ölçülebilir özelliği yitirecek kadar şekil bozukluğuna uğramamış olmasına dikkat edilir. El ile sayısallaştırmada amaca göre değişik sayısallaştırma türleri geliştirilmiştir. Bunlar;

- Nokta Sayısallaştırma: İşaretleyicinin her tuşuna basıldığında bir nokta sayısallaştırılır.
- Zaman Artımlı Sayısallaştırma: Tuşa basılı olarak çizgi izlenirken belli zaman aralıklarında kendiliğinden sayısallaştırılır. Özellikle eş yükseklik eğrisi, yol veya akarsu sayısallaştırılırken çizginin dönüş aldığı yerlerde operatörün çizgiyi izlemesi, ister istemez yavaşladığından buralarda daha sık nokta sayısallaştırılmaktadır.
- Mesafe Artımlı Sayısallaştırma: Son sayısallaştırılan noktadan belli bir mesafe uzaklaşıldığında yeni bir nokta kendiliğinden sayısallaştırılır. Artırım miktarı çok verildiğinde girinti çıkıntılar iyi temsil edilememekte, az verildiğinde ise düz yerlerde gereksiz noktalar alınmaktadır.
- Mesafe Artımlı ve Doğrultudan Sapma Kontrollü Sayısallaştırma: Son sayısallaştırılan noktadan belli bir mesafe uzaklaşıldığında veya sayısallaştırılmış son iki nokta, oluşturduğu doğrultudan belli bir mesafeden fazla ayrıldığında yeni bir nokta kendiliğinden sayısallaştırılır. Bu yöntemle sayısallaştırmada, sayısallaştırılan her noktada bir dikdörtgen başlatıldığı düşünülür. Bu dikdörtgenin uzun ekseni bir önceki sayısallaştırma noktası ile son noktayı birleştiren doğrultudur ve eni ile boyu programla belirlidir. İmlecın bu dikdörtgeni kısa veya uzun kenarından, terk ettiği noktada yeni bir nokta kendiliğinden sayısallaştırılır ve yeni bir dikdörtgen oluşturulur.

Sayısallaştırmadan sonra bir kontrol çizimi alınır ve ışıklı masada kontrol edilerek eksik veya tekrarlı sayısallaştırmalar tespit edilir. Bunlar etkileşimli grafik çalışma istasyonlarında düzeltilir. Daha sonra etkileşimli geometrik düzeltmeler getirilir ve son olarak da grafik ve vektörel kütük seyrekleştirme (weeding) ve esnetme (rubber

sheeting) amacıyla geometrik geliştirme programından geçirilir (Güngör, 1999; Köroğlu, 2006)

Otomatik Çizgi İzleyerek Sayısallaştırma: Bu yöntemle negatif filmlerin sayısallaştırılması yapılır. Bu yüzden basılı haritaların belli bir katsayı ile küçültülerek negatif film kopyalarının alınması gerekir.

Bu sayısallaştırma sisteminin en önemli özelliği raster tarama ve etkileşimli sayısallaştırmanın üstün yanlarının birleştirilmesidir. Raster taramanın hız ve duyarlılığı ile operatörün düşünce ve kontrol becerilerinin birleştirildiği bu yöntemde operatörün gösterdiği çizgiler otomatik olarak bir raster tarama şeridi ile izlenerek sayısallaştırılmaktadır. Yapılan işlemin sonucu doğrudan vektörel olarak elde edilmektedir.

Bu yöntem için sayısallaştırma donanımı; bir optik sistem, bir operatör konsolu ve bilgisayardan oluşmaktadır.

Tipik bir sayısallaştırma esnasında operatör kalibrasyon işlemlerinden sonra, konsol üzerindeki izleme topu ile ekrandaki imleci komuta ederek ilk sayısallaştırılacak çizgiyi gösterir. Tarayıcı çizgiyi bulur ve yine operatörün gösterdiği yönde enine taramalarla izler. Sayısallaştırılmakta olan çizgi parçası mavi lazer ile ekranda parlaklaştırılır. Otomatik izleme çizgi ucuna geldiğinde, çizgideki belli bir sınırdan daha fazla bir kopukluğa, bir kavşak noktasına veya başlanılan noktaya geldiğinde son bulur. Bu esnada operatör “bitir” ya da “devam et” komutu verir. Kavşaklarda ya da birbirine çok yakın çizgilerde operatör müdahale eder ve hangi yöne devam edileceğini belirtir. Böylece sayısallaştırma operatör kontrolünde bütün çizgiler tamamlanıncaya kadar devam eder.

Bu yöntemde sayısallaştırma, operatör kontrolünde yapıldığından eksik veya tekrarlı sayısallaştırma genellikle olmaz, sayısallaştırılan çizginin orijinali ile uyumu çok iyidir. Ancak yine de bir kontrol çizimi alınması gerekiyorsa etkileşimli grafik çalışma istasyonunda gerekli düzeltmeler yapılabilir (Güngör, 1999; Köroğlu, 2006).

3.2. Tarama ile Veri Toplama

Tarama tekniği ile veri toplamada konum verileri raster yapıda toplanır. Bu yöntemde kaynak materyal çizgiler halinde taranarak her çizgi üzerinde belli aralıklardaki noktalarda veri olup olmadığı, kaynak materyalin o noktasındaki gri tonu veya renk kodu belirlenerek kaydedilir. Kaynak materyalin tüm yüzeyinin taranması ile sayısal ortamda kopyası çıkarılmış olur. Tekrar görüntüendiğinde sadece insan gözü için anlamlı olan bu veriler, tarama sonrası işlemlerle, bilgisayarca işlenebilir konum verileri haline dönüştürülür. Tarama piksel piksel yapılır.

Raster tarayıcılar silindir veya masa tipli olabilmektedir. Raster taramadan sonra elde edilen ham raster kütük adeta bir sayısal fotokopi gibidir. Kaynak materyalde bulunan çizgi kalınlıklarının değişimi, renk tonunun değişimi, kopukluklar ve lekeler gibi birçok hata hemen hemen aynen sayısal kopyaya aktarılmış olur. Bu hatalar raster düzenleme ile giderilebilir ya da yer tasarrufu açısından önce vektöre dönüştürülerek vektör olarak düzenlenir. Raster düzenlemede pikseller üzerinde işlem yapılır. Temel işlemler şunlardır:

- Leke Temizleme
- Delik Doldurma
- Yumuşatma
- Poligon Silme
- Boyama
- Döndürme
- Ters Çevirme
- Taşıma, Kopyalama
- Doldurma, Silme
- Ölçek Değiştirme
- Esnetme (Güngör, 1999; Köroğlu,2006).

3.3. Video Kayıt ile Veri Toplama

Video sayısallaştırıcılar “framegrabber” adlı özel bir analog-sayısal dönüştürücüye bağlı bir kameradan oluşmaktadır. Framegrabber, video cihazından gelen NTSC veya PAL gibi bir formattaki analog sinyali alır. Bu sinyal üzerindeki renk bileşenlerini ve senkronizasyon bilgisini önce bir sinyal üzerine kodlar. Daha sonra bu sinyaldeki senkronizasyon bilgisini çıkarır ve renkleri kırmızı, yeşil, mavi (RGB) bileşenlerine ayırır. Son olarak her renk kanalındaki 8 bitlik video sayısallaştırma mekanizması bu üç analog renk sinyalini sayısala çevirerek manyetik ortama kaydeder veya bir grafik bilgisayar ekranında aynı anda görüntüler. Sayısallaştırma tek resim için veya resim dizisi için yapılabilir (Güngör,1999; Köroğlu,2006).

3.4. Uzaktan Algılama ile Veri Toplama

Tarama ile uzaktan algılama pek çok bakımdan birbirine benzer düşüncelere dayanır. Taramada, genelde yapay bir ışık kaynağı kaynak materyal üzerine yansıtılırken, uzaktan algılamada algılayıcı pasiftir ve yeryüzünden yayılan enerjiyi algılar.

Uzaktan algılama verilerinin kaynağı yeryüzünden yayılan enerjidir. Güneş enerjisinin bir bölümü yer yüzeyi tarafından yansıtılır, bir bölümü ise emilir. Yerden yayılan bu enerji uydu, uçak gibi platformlara yerleştirilmiş algılayıcılarla saptanarak pikseller halinde sayısal değerlere dönüştürülür.

3.5. Fotogrametrik Yöntemlerle Veri Toplama

Fotogrametrik yöntemle veri toplamada kaynak materyal olarak stereo hava fotoğrafları veya stereo SPOT görüntüleri kullanılmaktadır. Bu görüntüler analitik stereo değerlendirme aletleri ile değerlendirilerek, detaylara ilişkin x,y,z koordinatları kaydedilir. Bu yöntemle toplanan veriler, normal harita sayısallaştırma ile toplanan verilerden farklı olarak üç boyutludur ve daha duyarlıdır. Ayrıca bu yöntemle daha güncel bilgiler toplanır.

3.6. Arazi Ölçmeleri ile Veri Toplama

Detaylara ilişkin öznitelik verilerinin basılı haritalardan toplanması yetersizdir. Çünkü bu haritalarda çok sayıdaki öznitelik verisini gösterebilmek için sembolleştirme olanakları sınırlıdır. Diğer taraftan, öznitelik bilgilerinin hava fotoğraflarından toplanması da yorumlama zorlukları nedeniyle sınırlıdır. Bu nedenlerden dolayı öznitelik verilerinin çoğunun arazide toplanması gerekir.

Araziden toplanan bütün yükseklik bilgileri, klasik olarak depolanıp daha sonradan SAM'a aktarılabilir. Bunun yanında, bu verilerin toplanması anında doğrudan SAM'a aktarılması da mümkündür. Bunun için Total Station ya da GPS kullanılabilir (Güngör, 1999; Köroğlu, 2006).

3.7. Alfasayısal Bilgi Girişi ile Veri Toplama

Bir bilgisayara bağlı alfasayısal terminal ve bir editleme yazılımı grafik olmayan bilgi girişi için yeterlidir. Yerinde bilgi kaydı için bugünkü el bilgisayarları veya diz üstü bilgisayarlar büyük avantajlar sağlamaktadır. ASCII veya EBCDIC karakterler olarak girilen alfasayısal bilgiler daha sonra grafik verilerle ilişkilendirilmek üzere CBS'nin kurulacağı bilgisayara transfer edilir. Veri giriş hacmini arttırmak için öznitelik değerleri kodlanabilir (Güngör, 1999; Köroğlu, 2006).

3.8. Sayısal Coğrafi Bilgi Kütüğü İthalatı ile Veri Toplama

Sayısal harita üretimi uygulamaları giderek yaygınlaştıkça, her geçen gün üretilen sayısal coğrafi veri dosyaları da artmaktadır. Coğrafi bilgi toplamanın en ucuz yolu daha önce üretilmiş olan coğrafi bilgi dosyalarını disket ve benzeri off-line ortamlardan veya bilgisayar ağları üzerinden on-line olarak transfer programları yardımıyla CBS ortamına aktarmaktır (Güngör, 1999; Köroğlu, 2006).

3.9. Veri Toplama Yöntemlerinin Değerlendirilmesi

El ile sayısallaştırma, nokta ve çizgiler biçiminde özetlenebilecek çizimlerin sayısallaştırılması için uygun bir yöntemdir. Duyarlılığı büyük ölçüde operatörün kartografik çizim becerisine bağlıdır. Daha çok yoğun olmayan detay sayısallaştırılmasına uygundur.

Otomatik çizgi izleyerek sayısallaştırma, daha çok çizgi sayısallaştırmaya yöneliktir. Özellikle eş yükseklik eğrilerinin sayısallaştırılması için ideal bir çözümdür. Tematik haritaların bu yöntemle sayısallaştırılması daha zordur. Duyarlılığı ve hızı çok iyidir. Ancak sayısallaştırma öncesi filme kopyalama zorunluluğu işletim maliyetini artırmaktadır.

Raster tarama ile veri toplama, gerek sürekli tonda gerekse çizgisel kaynak materyalin sayısallaştırılması için hızlı ve duyarlı bir yöntemdir. Kaynak materyalin kalitesi çok önemlidir; kartografik kalitesi düşük bir kaynak materyal hem duyarlılığı olumsuz yönde etkiler hem de düzenleme için çok zaman gerektirir. Raster tarama yönteminin en önemli dezavantajı ilk yatırımın çok yüksek olmasıdır.

Video sayısallaştırma ile veri toplamanın, tek resim olarak hava fotoğraflarının kullanılması ile yepyeni boyutlar kazandırması nedeniyle gelecekte yaygın olarak kullanılacağı tahmin edilmektedir.

Fotogrametrik yöntemle toplanan detay verileri vektörel formdadır. Bu yöntemin vektörel verilerden en önemli farkı üç boyutlu olmalarıdır. Fotogrametrik yöntemle toplanan verilerin önemli bir özelliği de duyarlılığıdır. SAM için fotogrametrik yöntemle veri toplamanın bir diğer avantajı ise daha güncel bilgileri toplayabilme olanağıdır.

Coğrafi veri toplamanın en ucuz yolu, daha önce üretilmiş olan coğrafi veri dosyalarını ithal etmektir. Ancak coğrafi veri dosyalarının özellikleri için ne yazık ki etkin bir standardizasyona ulaşılamamıştır. Birbirinden çok farklı özelliklerdeki coğrafi verileri aynı SAM ortamında kullanabilmek için her şeyden önce standartların

tanımlanması gerekir. Üretilen sayısal coğrafi bilgi dosyaları birçok bakımdan birbirlerinden farklılaşmaktadırlar. Bu farklılıklar;

- Coğrafi veri yapısı
- Ölçek
- Transfer formatı konularında yoğunlaşmaktadır (Güngör, 1999; Köroğlu, 2006).

4. ARAZİ YÜZEY MODELLERİ İÇİN ENTERPOLASYON TEKNİKLERİ

Enterpolasyon, matematikte bir yaklaşım ve istatistikte bir kestirim problemidir. Sayısal arazi modellemede enterpolasyon, komşu noktaların bilinen yüksekliklerinden yararlanarak, bir noktanın yükseklik değerini belirlemek için kullanılır. Enterpolasyon tekniklerinin arkasında iki tane üstü kapalı varsayım vardır:

- Arazi yüzeyi sürekli ve pürüzsüzdür.
- Komşu veri noktaları arasında yüksek bir korelasyon vardır.

Enterpolasyon sayısal arazi modellemedeki temel tekniklerden biridir çünkü, kalite kontrolü, yüzey rekonstrüksiyonu, doğruluk değerlendirmesi, arazi analizleri ve uygulamaları gibi, modelleme sürecinin çeşitli aşamalarında yer almaktadır.

Enterpolasyon teknikleri farklı kriterlere göre sınıflandırılabilir ve farklı amaçlar için kullanılabilir. Çizelge 4.1., basit bir sınıflandırmayı göstermektedir.

Çizelge 4.1. Enterpolasyon tekniklerinin farklı kriterlere göre sınıflandırılması (Li, Zhu, Gold, 2005)

Kriter	Enterpolasyon Teknikleri
Enterpolasyon için alanın büyüklüğü	Nokta, alan tabanlı
Yüzeyin doğruluğu	Gerçek uydurma, en iyi uydurma
Yüzeyin düzgünlüğü	Doğrusal ya da doğrusal olmayan
Yüzeyin devamlılığı	Adım, sürekli
Fonksiyonların doğruluğu	Kesinlik, yaklaşık
Problemin kesinliği	Fonksiyonel, stokastik
Etki alanının önemi	Konumsal, spektral
Olgunun karmaşıklığı	Analitik, sayısal iterasyon

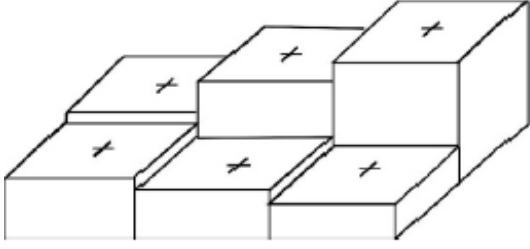
Enterpolasyon için alanın büyüklüğüne göre iki yaklaşım tanımlanır. Bunlar; alan tabanlı ve nokta tabanlı yaklaşımdır. Alan tabanlı yaklaşımda yüzey, bu yüzeydeki tüm referans noktaları kullanılarak kurulur ve bu alandaki herhangi bir noktanın yüksekliği bu oluşturulmuş yüzey kullanılarak belirlenebilir. Alan tabanlı enterpolasyon ya genel (global) ya da lokal olabilir. Global enterpolasyon diğer tüm noktaların

yükseklik değerlerinin bulunabileceği, ölçülmüş noktalardan tek karmaşık 3 boyutlu yüzeyin oluşturulmasını içerir.

Bu, kesin bir yaklaşımdır. Bu tür tekniğin faydası arazi yüzeyinin karmaşıklığına ve arazinin gerçek büyüklüğüne bağlıdır. Daha uygun bir çözüm büyük bir alanı benzer şekil ve özelliklere göre parçalara ayırmaktır. Bu yerel veya patchwise enterpolasyon olarak adlandırılır. Bir yüzey, her bir parça için tüm referans noktaları ve tüm noktaların yükseklikleri kullanılarak, bu parça yüzeyinden bulunan parça ile birlikte yapılandırılır. Parçanın ölçüsü alanın karmaşıklığı ile belirlenir ve parçalar arasındaki pürüzsüz bağlantıyı sağlamak için komşu parçalar arasındaki örtüşmenin kesin bir derecesi olabilir. Diğer taraftan, bir yüzey her bir noktanın enterpolasyonu için kurulabilir, bunlardan biri de noktasal enterpolasyondur. Bu yöntem ağır hesaplama gerektirir.

Patchwise, küresel ya da noktasal olsa da, enterpolasyon için yüzey bütün referans noktalarından geçebilir veya geçmeyebilir. Eğer tüm noktalardan geçiyorsa, tam yeniden oluşturmadır ve tam yüzey uydurma olarak adlandırılır. Ancak, yüzey referans noktalarındaki hatalardan dolayı bütün referans noktalarından geçmeyebilir. Bu durumda referans noktalarının her birinden sapma olabilir. Bu tür sapmalar minimum ile sınırlandırılırsa, o yüzey en iyi seçimdir. Bu tip enterpolasyona en iyi yüzey uydurma denir.

Bir yüzey şekil 4.1.'de gösterilen basamaklar biçiminde olabilir. Bu süreksiz bir yüzeydir. Birçok uygulamada, en azından görsellikte, süreklilik bir gereksinimdir, böylece sürekli bir yüzey oluşturulabilir. Bu sürekli yüzey düzgün olabilir ya da olmayabilir. Örneğin bitişik doğrusal yüzeyleri kapsayan bir yüzey ilk türevde devamlı değildir ve bu yüzden pürüzsüz de değildir. Hem üçgen yüzeyler hem de bilinear yüzeyler doğrusal yüzeylerdir. Genellikle, düzgün bir yüzey bazı üst düzey polinomlar kullanılarak oluşturulur (Li, Zhu, Gold, 2005).



Şekil 4.1. Kare grid şeklinde süreksiz yüzey

Eğer orijinal fonksiyon çok karmaşıksa ya da yaklaşık fonksiyon yeterli iyilikte fakat çok basitse, enterpolasyon için yaklaşık fonksiyonu kullanmak mümkündür. Örneğin, x küçük bir açıyken $\sin(x)$ değeri x 'in kendisine yaklaşıktır. Başka bir deyişle, $y=\sin(x)$ olduğu koşulda $y=x$, fonksiyonun çok iyi bir tahminidir. Aslında, olgunun doğasının çok karmaşık olması mümkündür ve problemin analitik fonksiyonu kurulamaz. Bu yüzden sayısal yaklaştırma iterasyonu yapılır.

Bir problem belirleyici ya da olasılıklı olabilir. Önce bir deterministik fonksiyon kullanılabilir. Daha sonra bir stokastik model kullanılmalıdır. Bazen arazi üzerindeki küçük varyasyonlar o kadar karmaşıktır ki, varyasyon bir stokastik süreç gibi davranır. Enterpolasyon boşlukta ya da spektral etki alanında meydana gelebilir. Arazi modellemesi için birçok enterpolasyon tekniği konumsal enterpolasyon içindir. Ancak, veriyi sıklık alanına dönüştürmek ve orada enterpolasyonu gerçekleştirmek mümkündür (Li, Zhu, Gold, 2005).

4.1. Ağırlıklı Aritmetik Ortalama İle Enterpolasyon

Ağırlıklı aritmetik ortalama ile enterpolasyon, noktasal enterpolasyon metodları arasında en sık kullanılan yöntemdir (Zhan-Ji, 1998). Bu yöntemde enterpolasyon noktasının yüksekliği, çevresinde bulunan dayanak noktalarının yüksekliklerinden ağırlıklı olarak hesaplanır. Her bir dayanak noktasının yüksekliğine verilecek olan ağırlık değeri o noktanın enterpolasyon noktasına olan uzaklığının bir fonksiyonudur (Yanalak,2002).

Bir enterpolasyon noktasının yüksekliği;

$$z_0 = \sum_{i=1}^m p_i * z_i / \sum_{i=1}^m p_i \quad (4.1)$$

eşitliği ile bulunur. Açık yazılırsa,

$$z_0 = (p_1 * z_1 + p_2 * z_2 + \dots + p_m * z_m) / (p_1 + p_2 + \dots + p_m) \quad (4.2)$$

olur. Matris gösterimiyle,

$$z_0 = p^T z / p^T I \quad (4.3)$$

yazılabilir. Burada p^T , ağırlık vektörünü, I , bir vektörü ve z , dayanak noktalarının yükseklik vektörünü verir. Ağırlık fonksiyonu olarak,

$$p_i = [(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2]^{-k} = (s_i^2)^{-k}, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad 2k = 1, 2, 3 \quad (4.4)$$

eşitliği kullanılabileceği gibi,

$$p_i = e^{(-s_i^2/k^2)}, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad k = 3, 4, 5 \quad (4.5)$$

şeklindeki Gauss fonksiyonu da kullanılabilir (Güler, 1978). Bu eşitliklerde geçen (x_i, y_i) herhangi bir dayanak noktasının, (x_0, y_0) ise, yüksekliği belirlenecek enterpolasyon noktasının konum koordinatlarını göstermektedir.

Ağırlıklı ortalama yönteminde, enterpolasyon noktaları için, çalışma alanındaki toplam n tane dayanak noktasının tümünün kullanılması yerine, enterpolasyon noktası civarındaki m tane dayanak noktasının kullanılması önerilmektedir (İnal, Yiğit, 2004).

4.2. Polinomlarla Enterpolasyon

Polinomlarla enterpolasyon tekniği yüzey modellemede en yaygın kullanılan tekniklerden biridir. Bu tekniğin amacı çalışılan bölgenin tek bir fonksiyonla ifade

edilmesidir. Bu amaçla dayanak noktalarının x_i, y_i koordinatları ve Z_i yüksekliğinden yararlanarak fonksiyon katsayıları belirlenir. Yüzey genellikle iki değişkenli yüksek dereceden polinomlarla tanımlanır.

x, y, z koordinatları ile bilinen dayanak noktalarının oluşturduğu arazi yüzeyinin, n . dereceden bir polinomla matematiksel ifadesi,

$$z(x, y) = \sum_{k=0}^n \sum_{j=0}^k a_{ij} x^i y^j \quad (4.6)$$

şeklinindedir. Burada,

a_{ij} : Polinomun bilinmeyen katsayılarını

n : Yüzeyin derecesini

i, j : (x, y) koordinatlarının üssü olan pozitif tamsayıları göstermektedir (Erkanlı, 1986; Yanalak, 1997)

Görüldüğü gibi 2. derece polinomun belirlenmesi için 6 katsayının bilinmesi gerekmektedir. (x, y, z) koordinatları bilinen 6 dayanak noktası ile bu problem çözülebilir. Diğer bir deyişle 6 dayanak noktalı bir arazi 2. derece bir yüzeyle tam olarak ifade edilebilir. Oluşturulacak yüzey, dayanak noktalarından geçecektir. 6'dan fazla dayanak noktası olması durumunda, çözüm için yeterli olandan fazla denklem oluşacağı için katsayılar dengelemeyle bulunur. Bu durumda yüzey dayanak noktalarından geçmez.

m , dayanak noktası sayısını göstermek üzere, 2. derece polinomun düzeltme denklemleri;

$L=1, 2, \dots, m$ için

$$\Delta z_L = a_{00} + a_{01}y_L + a_{10}x_L + a_{20}x_L^2 + a_{11}x_L y_L + a_{02}y_L^2 - z_L \quad (4.7)$$

olur.

$$\sum_{L=1}^m \Delta z_L^2 = \min. \quad (4.8)$$

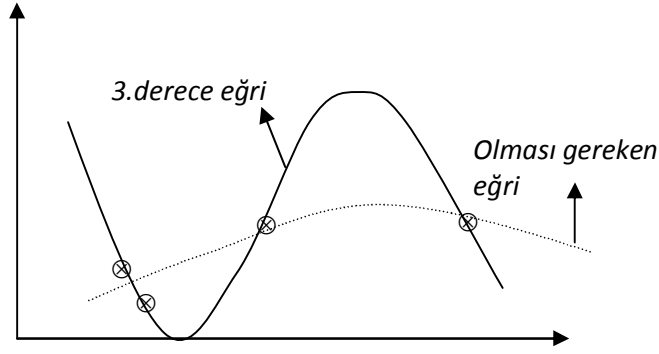
koşulundan yararlanarak dengelenmiş yüzeyin katsayıları belirlenir. n . derece bir polinom kullanılması durumunda polinomdaki katsayıların (bilinmeyenlerin) sayısı artar. Yapılacak işlem sırasında bir değişiklik olmaz. Oluşturulacak düzeltme denklemleri genel olarak,

$$\Delta z_L = z(x_L, y_L) - z_L \quad L = 1, 2, \dots, m \quad (4.9)$$

şeklinindedir. (4.6) koşulundan yola çıkılarak kurulan normal denklem takımının çözümü bilinmeyenleri verir. Yüksekliği istenen bir noktanın (x_0, y_0) koordinatları polinomda yerine konulduğunda o noktanın z_0 yüksekliği bulunabilir. Bu noktalar genellikle düzenli şekilde oluşturulmuş kare grid köşeleridir. Grid kenarları boyunca yapılacak lineer enterpolasyonla tam sayı yükselteli noktaların konumları da belirlenebilir (Yanalak, 1997).

Ortogonal olmayan polinomlarla enterpolasyonda yüzeyin derecesi 1 ise en az 4, yüzeyin derecesi 2 ise en az 9, yüzeyin derecesi 3 ise en az 16 dayanak noktası gereklidir (İnal, 1996).

Polinomlarla enterpolasyonda polinomun derecesinin artması, elde edilecek doğruluğun artacağı anlamına gelmez. Derecenin artmasıyla yüzeyde gereksiz salınımlar oluşur. Yüzeyde oluşan ani inip çıkmalar gerçeğe uygun olmayan yükseklik değişimlerine neden olur. Örneğin şekil 4.2.'de verilen 4 örnekleme noktası için bu noktalardan geçen 3. Dereceden bir polinom her zaman belirlenebilir. Ancak belirlenen 3. Derece ilişki, beklenen ilişkiden çok daha farklı olabilir.



Şekil 4.2. Yüksek derece fonksiyonların salınım yapması

4.3. Basit Lineer Enterpolasyon

Bir düzlem, aynı doğru üzerinde olmayan üç nokta ile belirlenebilir ve üçgensel yüzey bu yüzeye tipik bir örnektir. Bir düzlemin matematiksel fonksiyonu şöyledir:

$$z = a_0 + a_1x + a_2y \quad (4.10)$$

a_0 , a_1 ve a_2 üç tane katsayı ve (x,y,z) yüzey noktasının takım koordinatlarıdır. Bu üç katsayıyı hesaplamak için koordinatları bilinen üç referans noktası ile (örneğin, $P_1(x_1,y_1,z_1)$, $P_2(x_2,y_2,z_2)$ ve $P_3(x_3,y_3,z_3)$) aşağıdaki gibi üç denklem kurmak gerekir:

$$\begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

Katsayılar a_0 , a_1 ve a_2 hesaplanır, ondan sonra herhangi bir i noktasının (x_i,y_i) koordinatlarıyla birlikte z yüksekliği (4.10)'daki eşitlikte yerine konularak bulunabilir (Li, Zhu, Gold, 2005).

4.4. Bilineer Enterpolasyon

Bilineer enterpolasyon aynı doğru üzerinde olmayan herhangi dört nokta için yapılabilir. Matematik fonksiyonu aşağıdaki gibidir:

$$z = a_0 + a_1x + a_2y + a_3xy \quad (4.12)$$

$\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2$ ve α_3 katsayı takımıdır. Bunlar, P_1, P_2, P_3 ve P_4 gibi dört referans noktasının koordinatlarından yararlanarak oluşturulacak dört denklemlerle belirlenir. Matematiksel fonksiyonu aşağıdaki gibidir:

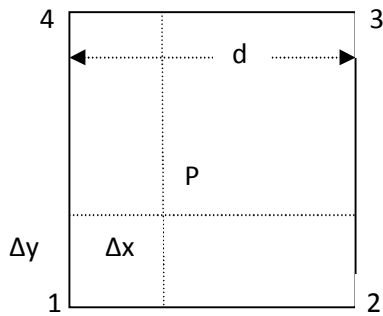
$$\begin{bmatrix} \alpha_0 \\ \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 & x_1y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 & x_2y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 & x_3y_3 \\ 1 & x_4 & y_4 & x_4y_4 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \\ z_4 \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

Önce katsayılar $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2$ ve α_3 hesaplanır, sonra bir i noktasının (x_i, y_i) koordinatlarıyla birlikte z yüksekliği (4.12)'deki eşitlikte yerine konularak bulunabilir.

Eğer veri (referans) noktaları kare grid şeklinde dağılıyorsa, formül aşağıdaki gibi olur:

$$z_p = z_1 \left(1 - \frac{\Delta x}{d}\right) \left(1 - \frac{\Delta y}{d}\right) + z_2 \left(1 - \frac{\Delta y}{d}\right) \left(\frac{\Delta x}{d}\right) + z_3 \left(\frac{\Delta x}{d}\right) \left(\frac{\Delta y}{d}\right) + z_4 \left(1 - \frac{\Delta x}{d}\right) \left(\frac{\Delta y}{d}\right) \quad (4.14)$$

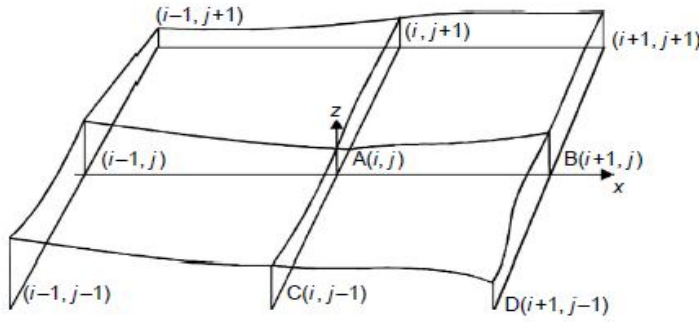
Formülde 1,2,3 ve 4 noktaları kare gridin dört düğüm noktası ve d , grid aralığının uzunluğudur (Li, Zhu, Gold, 2005).



Şekil 4.3. Veri noktalarının kare grid olması durumu

4.5. Bikübik Spline Enterpolasyon

Bilineer enterpolasyon, SAM enterpolasyonunda yaygın bir şekilde kullanılır çünkü basit, sezgisel ve güvenilirdir. Ancak sonuç yüzeyi düzgün (pürüzsüz) değildir. Yüzeyi pürüzsüz hale getirmek için, bir polinom yüzeyi bitişik doğrusal yüzeylerin takımına uydurulabilir. Alternatif olarak, bikübik spline fonksiyonu gibi eğri yüzeylere tam uydurma yapmak olasıdır. Bilineer fonksiyonların eksikliklerini gidermek için bikübik spline fonksiyonu 4 düğüm noktasından oluşan parça üzerinde pürüzsüz bir SAM yüzeyi oluşturmak için kullanılabilir.



Şekil 4.4. Farklı parçalardan oluşan yüzey (Li, Zhu, Gold, 2005)

Bikübik spline fonksiyonun matematiksel fonksiyonu aşağıdaki gibidir:

$$z = f(x, y) = \sum_{j=0}^3 \sum_{i=0}^3 a_{i,j} x^i y^j = a_{00} + a_{10}x + a_{20}x^2 + a_{30}x^3 + a_{01}y + a_{11}xy + a_{21}x^2y + a_{31}x^3y + a_{02}y^2 + a_{12}xy^2 + a_{22}x^2y^2 + a_{32}x^3y^2 + a_{03}y^3 + a_{13}xy^3 + a_{23}x^2y^3 + a_{33}x^3y^3$$

(4.15)

$\alpha_{00}, \alpha_{01}, \dots, \alpha_{33}$ gibi 16 katsayı belirlenir.

16 katsayıyı çözmek için 16 denkleme ihtiyaç vardır. Bilinen dört grid düğüm noktasının koordinatları ile dört denklem kurulabilir. Bu nedenle başka 12 denkleme ihtiyaç vardır ve parçalar arasındaki bağlantılar için koşullar gelecektir. Bunlar;

- Her düğüm noktasındaki eğim x, y yönünde sürekli olmalıdır.
- Bitişik parçaların bağlantı yerlerinin dönme momenti süreklidir.

R ve S sırasıyla x ve y yönündeki eğim ve T dönme momenti olmak üzere,

$$R = \frac{\partial z}{\partial x}, \quad S = \frac{\partial z}{\partial y}, \quad T = \frac{\partial^2 z}{\partial x \partial y} \quad (4.16)$$

Referans noktaları kare grid düğüm noktalarında bulunurken, yükseklik farklılıkları da bu değerleri hesaplamak için aşağıdaki gibi kullanılabilir:

$$R_{i,j} = \frac{\partial z}{\partial x} = \frac{z_{i+1,j} - z_{i-1,j}}{2}$$

$$S_{i,j} = \frac{\partial z}{\partial y} = \frac{z_{i,j+1} - z_{i,j-1}}{2} \quad (4.17)$$

$$T_{i,j} = \frac{\partial^2 z}{\partial x \partial y} = \frac{(z_{i-1,j-1} + z_{i+1,j+1}) - (z_{i+1,j-1} - z_{i-1,j+1})}{4}$$

Her bir düğüm noktası için 3 eşitlik olduğuna göre, 4 düğümlü bir parça için böyle 12 tür denklem olacaktır.

Bu katsayılar çözüldükten sonra bir P noktasının (x_p, y_p) koordinatları ile yükseklik (4.15) denklemine göre hesaplanabilir.

Parçalar arasındaki bağlantı gereksinimleri elastik mekaniğinden kabul edilmiştir ve sonuçlar beklenen enterpolasyon sonuçları olmayabilir. Çünkü arazi parçaları dar anlamda elastik kabuklar değildir (Li, Zhu, Gold, 2005).

4.6. Çok Yüzeyle Enterpolasyon

Çok yüzeyle enterpolasyon Hardy yöntemi ya da multiküadrik enterpolasyon olarak da bilinmektedir. Bu yöntemdeki ana fikre göre, düzenli veya düzensiz her sürekli eğri yüzey, istenen doğrulukla birlikte basit yüzeylerin (örneğin tek değer matematiksel yüzeyler) bir serisinin toplamıyla tahmin edilebilir.

Bu Fourier serilerinin bir örneğemesi olabilir. Gerçek süreç her referans noktası için temel bir fonksiyon kullanarak (ana fonksiyonu) eğri bir yüzey oluşturur ve referans noktasının arasındaki herhangi bir noktanın yüksekliği bu eğri yüzeylerden ağırlıklı ortalama ile alınacaktır. Bu şekilde en son bulunacak yüzey sürekli olacak ve bütün referans noktalarından geçecektir. Matematiksel ifadesi;

$$z = f(x, y) = \sum_{i=1}^n k_i Q(x, y, x_i, y_i)$$

$$= k_1 Q(x, y, x_1, y_1) + k_2 Q(x, y, x_2, y_2) + \dots + k_n Q(x, y, x_n, y_n)$$

(4.18)

Bu enterpolasyon yönteminin amacı dayanak noktalarının tümünü aynı anda kullanarak araziye tek bir fonksiyonla ifade etmektir. Yöntemin uygulanmasında öncelikle, m sayıdaki dayanak noktası kullanılarak bir trend yüzeyi geçirilir. Bu yüzey için polinom, harmonik seri veya trigonometrik fonksiyonlar kullanılabilir. Şimdiye kadar yapılan uygulamalar 1. veya 2. dereceden bir polinomun yeterli olduğunu göstermiştir. (Leberl, 1973; Yanalak, 1997)

Hesaplamayı kolaylaştırmak için, ana fonksiyonlar bir eksen etrafında dönen genellikle aynı tip basit fonksiyonlardır.

Bunun gibi basit fonksiyonların örnekleri;

1. Konik Fonksiyon

$$Q_1(x, y, x_i, y_i) = C + [(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2]^{1/2} \quad (4.19)$$

$$Q_1(x, y, x_i, y_i) = C + d \quad (4.20)$$

$d = [(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2]^{1/2}$: Enterpolasyon ve referans noktaları arasındaki yatay uzaklıktır.

2. Hiperbolik Fonksiyon

$$Q_2(x, y, x_i, y_i) = [d^2 + \sigma]^{1/2} \quad (4.21)$$

σ sıfır olmayan bir değerdir. (4.20) eşitliği dikey bir eksen etrafında bir hiperbol eğrisinin dönmesiyle oluşan bir eğri yüzeyi temsil eder. $\sigma=0$ olursa bu eğri yüzey konik bir yüzey olur.

3. Kübik Fonksiyon

$$Q_3(x, y, x_i, y_i) = C + [d]^{3/2} \quad (4.22)$$

4. Geometrik Fonksiyon

$$Q_4 = 1 - \frac{d_i^2}{a^2} \quad (4.23)$$

5. Üstel Fonksiyon

$$Q_5 = C_0 \times e^{-a^2 d_i^2} \quad (4.24)$$

C_0 ve a iki parametredir.

Aşağıda iyi bilinen ve yaygın olarak kullanılan ana fonksiyonlar vardır:

- Arthur Fonksiyonu

$$Q_{(d)} = e^{-25d^2/a^2} \quad (4.25)$$

d iki nokta arasındaki uzaklık ve a birçok veri noktası içindeki en uzun uzaklıktır.

- Lu Fonksiyonu

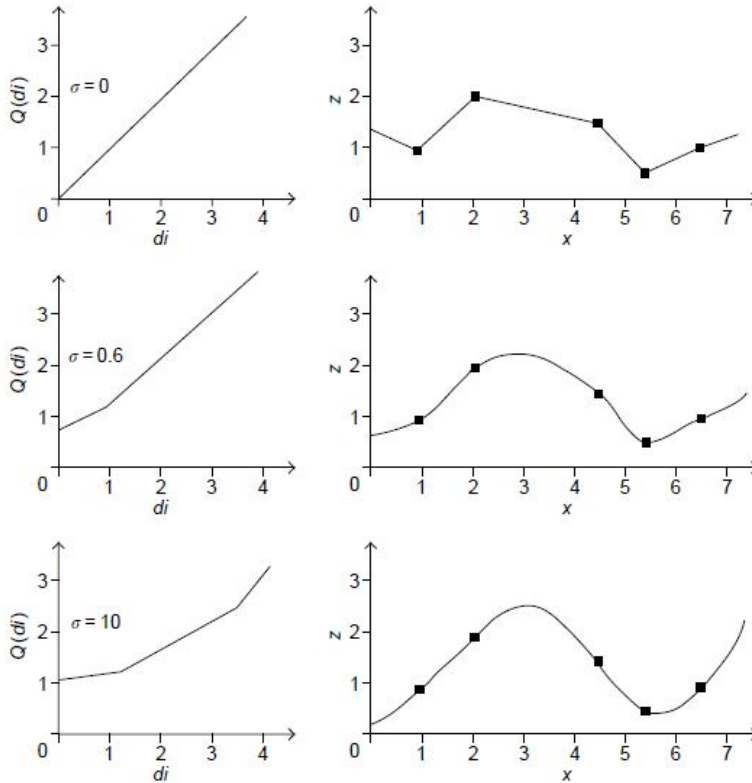
$$Q(d) = 1 + d^3 \quad (4.26)$$

- Wild Fonksiyonu

$$Q_2(x, y, x_i, y_i) = \left(1 + \frac{d}{(d_{ki})^2_{min}}\right)^{1/2} \quad (4.27)$$

$(d_{ki})^2_{min}$ veri noktası i ve en yakın veri noktası k arasındaki uzaklığı temsil eder. $n=m$ iken, Q matrisi asimetrik matristir çünkü her bir veri noktası kendi referans $(d_{ki})_{min}$ 'a sahiptir.

Wild fonksiyonu (4.21) eşitliğinin değiştirilmiş halidir. Çünkü (4.21) eşitliği kullanılarak bulunan yüzey σ daha büyük olduğu için daha pürüzsüz olacaktır. Şekil 4.5. σ için (örneğin 0, 0.6 ve 10) değerler kümesinin kullanılmış olduğu gidişatı gösterir.



Şekil 4.5. Farklı σ değerleri için değerler kümesi (Li, Zhu, Gold, 2005)

Wild fonksiyonunun avantajlarından biri, noktalar kümesi yeteri kadar yoğun olduğu sürece arazi özellik noktaları ve doğruları enterpolasyon süreci boyunca çok küçük (*dki*) ile bile kullanılabilir (Li, Zhu, Gold, 2005).

Bu yöntemin diğer avantajları aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Dayanak noktaları homojen dağılmamış olsalar bile yüzey modellemesinin sonuçları çok az etkilenmektedir.
- Dayanak noktalarının hesaplanan noktaya olan mesafesinin artması durumunda yüzey modellemesine olan katkısı da o oranda azalmaktadır.
- Dayanak noktaları için hiçbir çakıştırma artığı kalmamaktadır.

Sonuç olarak bir dik eğim, eğimli yüzeyin en yüksek noktasında üretilebilir. Bu şekilde, arazi üzerindeki beklenmedik değişikliklere uyum sağlanabilir. Çok yüzeyli enterpolasyonun bir avantajı da değişik türdeki ana yüzeyleri farklı özellikleri ve arazi yüzeylerini uygun şekilde tasarlıyor olmasıdır. Bu, örnek referans noktasının yoğunluğu düşük olduğunda kullanışlıdır, fakat bu noktaların doğruluğu nispeten yüksektir. Diğer yandan, süreç karmaşıktır ve etkisizdir ve bu yüzden bu metod genellikle kullanılmaz (Li, Zhu, Gold, 2005).

SYM oluşturulurken yapılan aslında iki boyutlu bir yüzey enterpolasyonudur. Bu enterpolasyon işlemi daha yüksek boyutlar için de geliştirilebilir. Bu işlemde yapılması gereken sadece uzunluk elemanlarını ilgili boyutta hesaplamak olacaktır (Bektaş, 1998).

Örneğin, SYM iki boyutlu bir enterpolasyondur. Noktanın x,y yatay konumu girilerek, noktanın yükseklik boyutu hesaplanabilmektedir. Dolayısıyla iki boyutlu enterpolasyonda noktalar arasındaki uzaklık, iki boyuttaki uzaklıktır.

$$s = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2} \quad (4.28)$$

Benzer olarak 3 boyutlu enterpolasyon da yapılabilir. Örneğin noktanın x,y,z üç boyutlu koordinatlarından, noktanın sıcaklık değeri enterpole edilmek istenirse, uzunluk elemanı bu sefer 3 boyutta uzunluk hesabı şeklinde olacaktır.

$$s = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2} \quad (4.29)$$

Genel olarak çok boyutlu enterpolasyonda, enterpolasyon yapılacak uzayın boyutuna göre i ve j noktaları arasındaki s_{ij} uzunluk hesabı aşağıdaki gibi yapılır:

Çizelge 4.2. Uzay boyutuna göre uzunluk fonksiyonları (Bektaş, 1998)

Boyut	Enterpolasyon Fonksiyonu	Uzunluk (s_{ij})
1	$h = f(x)$	$x_j - x_i$
2	$h = f(x, y)$	$[(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2]^{1/2}$
3	$h = f(x, y, z)$	$[(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2 + (z_j - z_i)^2]^{1/2}$
...
U	$h = f(x, y, z, \dots, u)$	$[(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2 + (z_j - z_i)^2 + \dots + (u_j - u_i)^2]^{1/2}$

4.7. En İyi Yerel Yüzey Uydurma

“En iyi” tanımına bağlı olarak en iyi uydurma için birçok seçenek vardır. Bu tür problemler için, en iyi parametre kestirimi için çok kullanılan iki ilke vardır. Bunlardan biri hataların mutlak değerleri toplamının minimum olması (EKTİ), diğeri ise oldukça popüler olan en küçük kareler ilkesi (EKKI)dir. Matematiksel ifadeler şu şekildedir:

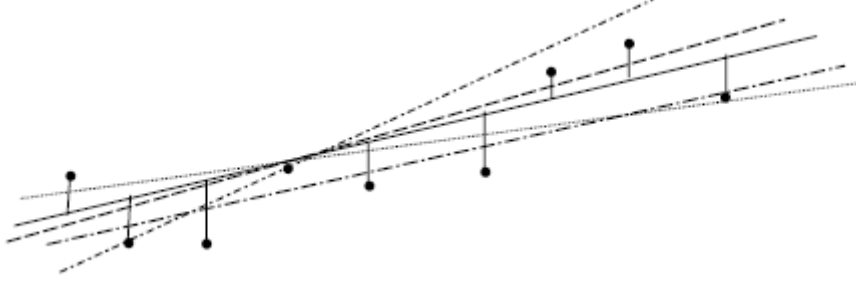
$$\sum_{i=1}^n |v_i| = \min \quad (\text{En Küçük Toplam İlkesi}) \quad (L_1 \text{ Norm}) \quad (4.30)$$

$$\sum_{i=1}^n v_i^2 = \min \quad (\text{En Küçük Kareler İlkesi}) \quad (L_2 \text{ Norm})$$

v_i uydurma yüzeyinden i . referans noktasının sapmasıdır ve n referans noktalarının toplam sayısıdır (Bektaş, Şişman, 2009).

Referans noktalarının bir takımı ve bir uydurma fonksiyonu için sayısız uydurma vardır. 4.6. şekli doğrusal bir yüzeyi uydurma fonksiyonu olarak kullanarak böyle bir

durumu göstermektedir. Şekle göre, uydurulmuş yüzeyden her referans noktasında bir sapma olabilir ve sapma hata teorisinde artık (iki sayı arasındaki değer) olarak adlandırılır.



Şekil 4.6. Farklı uydurma ile aynı tip yüzeyde referans noktalarındaki farklar (Li, Zhu, Gold, 2005)

En küçük kareler (EKK) ilkesinde çözüm her zaman tek anlamlıdır ve kolayca bulunabilmektedir. EKK'in dezavantajı kaba hatalı ölçülerden aşırı olarak olumsuz etkilenmesidir. Ölçüler arasında yalnızca bir tek kaba hatalı ölçü olsa bile tüm dengeleme sonuçları bundan olumsuz etkilenecektir. Dolayısıyla EKK'ya konu olan ölçüler mutlaka normal dağılımda olmalı, kaba hatalı ve uyuşumsuz ölçülerden arındırılmalıdır (Bektaş, 2005).

En küçük toplam (EKT) ilkesinde ise çözüm her zaman tek anlamlı değildir. Yani bir problemde düzeltmelerin mutlak değerleri toplamının minimum olduğu birden çok sayıda çözüm elde edilebilir. EKT ilkesi çözümünde, ölçülerden en küçük toplam değerini veren sadece bilinmeyen sayısı kadar ölçüden yararlanarak cebrik çözümle sonuç elde edilir (Bektaş, 2005).

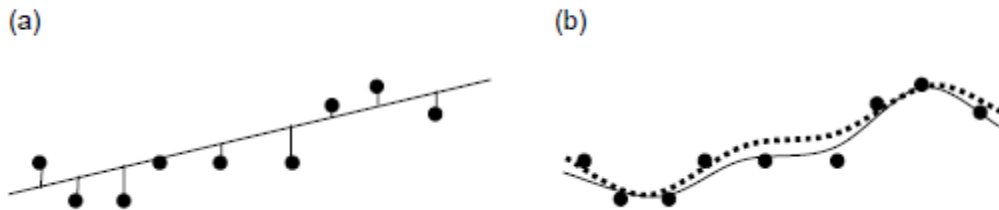
Bir problemin EKT ilkesine göre çözümü genellikle direkt olarak gerçekleştirilemez. Çözüm, problem doğrusal programlamaya dönüştürülerek deneme-yanılma şeklinde iteratif olarak gerçekleştirilir. EKT çözümünde yalnızca bilinmeyen sayısı kadar ölçüden yararlanılması ve diğer ölçülerin dışlanması yöntemin olumsuz tarafıdır. Bir problemin EKT ilkesiyle çözümünün avantajı kaba hatalı ölçülerden hiç etkilenmemesi ya da çok az etkilenmesidir (Bektaş, 2005).

Veriye uydurulan yüzey doğrusal ya da pürüzsüz eğik yüzey olabilir. Eğik yüzeylerin farklı şekilleri olabilir. Aynı takım veri için, eğer uydurulan yüzey farklıysa iki sayı arasındaki fark her referansta farklı olabilir. Şekil 4.7’de aynı takım veriye uydurulmuş bir doğrusal ve iki eğrisel olmak üzere üç yüzey vardır (Li, Zhu, Gold, 2005):

$$\begin{aligned}
 \text{Doğrusal} &= \sum_{i=1}^n \Delta z_{i,j}^2 \\
 \text{Eğri1} &= \sum_{i=1}^n \Delta z_{i,c-1}^2 \\
 \text{Eğri2} &= \sum_{i=1}^n \Delta z_{i,c-2}^2
 \end{aligned} \tag{4.31}$$

Doğru yüzeyin durumunda i . noktada Δz_i , L sayılar arasındaki farktır (örneğin noktadan doğruya olan dikey mesafe). $\text{Doğrusal} = \sum_{i=1}^n \Delta z_{i,L}^2$ farkların karelerinin toplamıdır ve $\Delta z_{i,c-1}$ eğri yüzeyin birinci tipi için i . noktasındaki farktır (örneğin, noktadan eğri yüzeye olan dikey mesafe). En küçük kareler koşulu, kare hatalarının en az toplamını oluşturan yüzeyin en iyisi olduğunu söylemektedir. Bu örnekte Doğrusal, Eğri1 ve Eğri2 arasında, eğer Eğri2 en küçük ise, Eğri2 en iyi olarak kabul edilir.

Bu tartışma hangi tür yüzeylerin düşünülmesi gerektiği konusundadır. Eğri yüzey uydurma için yaygın olarak kullanılan fonksiyonlar, 2. ve 3. dereceden çok terimli ve bikübitik fonksiyonlardır. Hangi fonksiyon olursa olsun en küçük kareler çözümünün prensipleri ve prosedürleri benzerdir (Li, Zhu, Gold, 2005).



Şekil 4.7. Farklı yüzeylerde referans noktalarındaki farklar (Li, Zhu, Gold, 2005)

Örneğin, 2. dereceden bir fonksiyonla en küçük karelerle yerel yüzey uydurma yönteminin matematik fonksiyonu aşağıdaki gibidir:

$$z = f(x, y) = a_0 + a_1x + a_2y + a_3xy + a_4x^2 + a_5y^2 \quad (4.32)$$

$a_0, a_1, a_2 \dots a_5$ altı katsayıdır. Referans noktalarından yararlanarak belirlenmeye ihtiyaçları vardır. Eğer $n (>6)$ referans noktaları varsa n eşitlikleri şu şekildedir:

$$\underbrace{\begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ \vdots \\ z_n \end{bmatrix}}_z = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 & x_1y_1 & x_1^2 & y_1^2 \\ 1 & x_2 & y_2 & x_2y_2 & x_2^2 & y_2^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_n & y_n & x_ny_n & x_n^2 & y_n^2 \end{bmatrix} \underbrace{\begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \vdots \\ a_5 \end{bmatrix}}_x \quad (4.33)$$

Hata fonksiyonları şu şekilde yazılabilir:

$$\underbrace{\begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \vdots \\ v_n \end{bmatrix}}_v = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 & x_1y_1 & x_1^2 & y_1^2 \\ 1 & x_2 & y_2 & x_2y_2 & x_2^2 & y_2^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_n & y_n & x_ny_n & x_n^2 & y_n^2 \end{bmatrix} \underbrace{\begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \vdots \\ a_n \end{bmatrix}}_x - \underbrace{\begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ \vdots \\ z_n \end{bmatrix}}_z \quad (4.34)$$

Ve şöyle basitleştirilebilir:

$$V = A x - z \quad (4.35)$$

En küçük kareler çözümüne göre:

$$v = (A^T A)^{-1} A^T z \quad (4.36)$$

Katsayılar hesaplandıktan sonra, (x, y) pozisyonunda herhangi bir P noktası için z_p yüksekliği 4.30'daki eşitliğin içine yerleştirilerek bulunabilir.

4.8. Kayan Yüzeylerle Enterpolasyon

Enterpolasyon işleminin nokta nokta yapıldığı bu yöntemde, her bir enterpolasyon noktası için bir yüzey hesabı gerekir. İstenilen enterpolasyon noktasının yüksekliği, çevresinde bulunan dayanak noktalarından hesaplanan bir yüzeyden elde edilir.

Konum ve şekli noktadan noktaya değişen bu yüzeyler kayan yüzeyler olarak adlandırılır. Yöntemin ilk geliştirildiği yıllarda yüzey olarak bir yatay düzlem kullanılmış ve bu düzlemin yüksekliği olarak en yakın dayanak noktasının yüksekliği alınmıştır. Bu yaklaşım arazinin süreksiz olmasına ve farklı yükseklikteki birçok yatay düzlemden oluşmasına neden olmuştur. Daha sonra bu kaba yaklaşımı biraz da olsa azaltmak için yatay düzlemin yüksekliği olarak, enterpolasyon noktasını çevreleyen dayanak noktalarının yüksekliklerinin ortalaması alınmıştır (Leberl, 1973; Yanalak, 1997).

Verilen bir veri seti için, farklı tipte yüzeyler oluşturulabilir. Enterpolasyon noktasına yakın olan referans noktasının yüksekliği, enterpolasyon noktasından belirlenmiş ise gerçek bir enterpolasyon olmamasına rağmen buna en yakın komşu enterpolasyonu denir. Bu durumda deterministik bir fonksiyon kullanılarak yatay bir düzlem oluşturulur. 4.8(a) bu tipteki yüzeyleri gösterir. Matematik fonksiyonu;

$$z = z_i, \text{ eğer } d_i = \min (d_1, d_2, \dots, d_i, \dots, d_n) \quad (4.37)$$

Hareketli ortalamanın grafik çizimi 4.8(b) de görülmektedir.

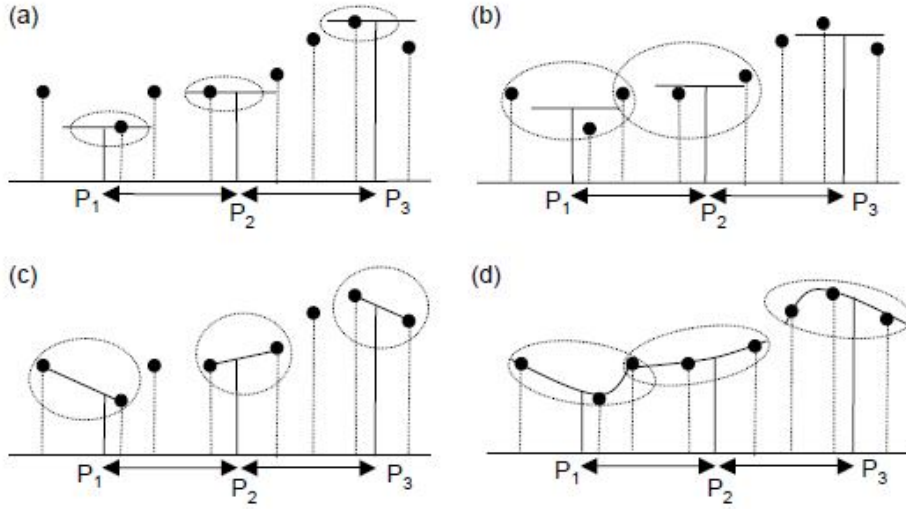
Aslında bu hem yatay bir düzlem hem de stokastik bir modeldir. Bunun için uygun koşul;

$$\sum_{i=1}^k \Delta z_i = 0 \quad (4.38)$$

Aslında herhangi bir fonksiyon, hareketli bir yüzey için model olarak kullanılabilir. Eğer polinomal fonksiyonun ilk üç terimi kullanılırsa, düzlem yüzey oluşturulur (Şekil 4.8c)

Ama ikinci dereceden polinomal yüzey gibi eğri yüzey (Şekil 4.8d) genel kullanımdır.

$$z = a_0 + a_1x + a_2y + a_3x^2 + a_4xy + a_5y^2 \quad (4.39)$$



Şekil 4.8. Enterpolasyon için farklı tip hareketli yüzeyler: (a) en yakın; (b) ortalama olarak; (c) doğrusal yüzey; (d) eğri yüzey

Bir yüzey modeli seçildikten sonra herhangi bir enterpolasyon noktası için (p), bu yüzey en küçük kareler koşulları ile komşu referans noktaları kümesinden oluşturulur.

Yeni nokta koordinatları aşağıdaki gibi bulunur:

$$x_{i,yeni} = x_i - x_p$$

$$y_{i,yeni} = y_i - y_p \quad (4.40)$$

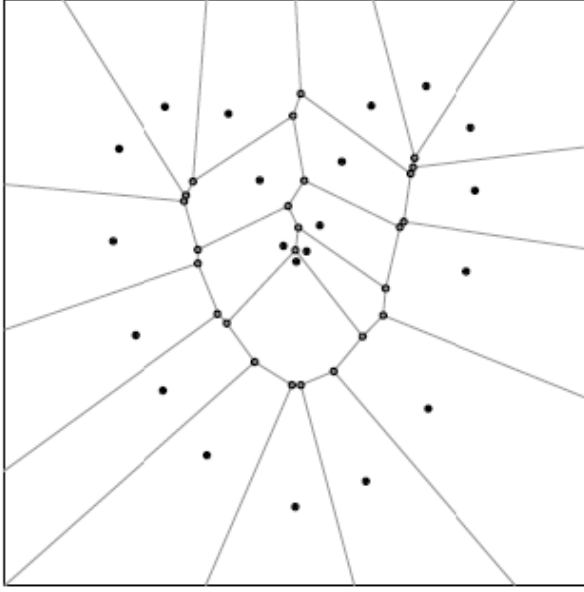
Yapılan öteleme işleminden sonra, denklem 4.37'dan, enterpolasyon noktasının yüksekliğinin şöyle olduğu belirtilebilir(Li, Zhu, Gold, 2005);

$$z = a_0 \quad (4.41)$$

4.9. Doğal Komşuluk Enterpolasyonu

Ağırlıklı ortalamaya göre çalışan bu enterpolasyon tekniği “Ters Mesafe Ağırlıklı (IDW)” enterpolasyon tekniğine çok benzer. Enterpole edilecek noktaları araştırırken örneklem noktalarında mesafeye bağlı ağırlıkları kullanır (<http://www.emsi.com/gmshelp/interpolation/interpolation.html>,24.04.2011). Düzensiz yoğunluktaki örneklem verisini ayırıp sınıflayabilen, enterpolasyon mantığının genel amaçlarına uygun sayısal enterpolasyon araçları ile TIN (düzensiz üçgenler ağı) fonksiyonlarını bir algoritmayla beraber kullanan ve özel tanımlı parametrelere ihtiyaç duymayan son derece kolay bir tekniktir.

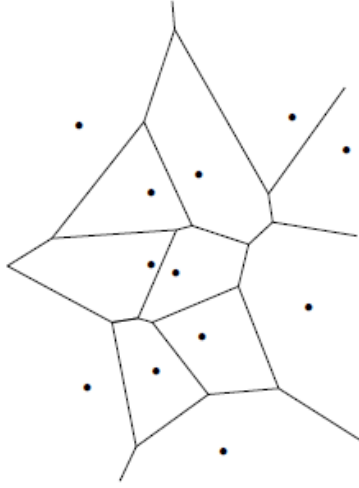
Bu teknikte ilk olarak Delaunay Üçgenlemesi ile her örneklem noktasının üçgen köşe noktası olduğu bir üçgenleme yapılır. Ardından her bir nokta için minimum sayıda üçgen kenarı olacak şekilde dışbükey alanlar tanımlanır. Her komşu noktanın ağırlığı, “Thiessen/Voronoi Tekniği” ile belirlenen bu alanlarda tayin edilir. Yani doğal komşuluk enterpolasyon tekniği “Thiessen Poligon Ağı”na dayalı olarak çalışan bir yöntemdir. Thiessen poligon ağı örneklem noktalarından elde edilen delaunay üçgenlemesi üzerine kurulabilir. Thiessen poligon ağında her bir örneklem noktası için tek bir “thiessen poligonu” vardır (Arslanoğlu, Özçelik, 2005).



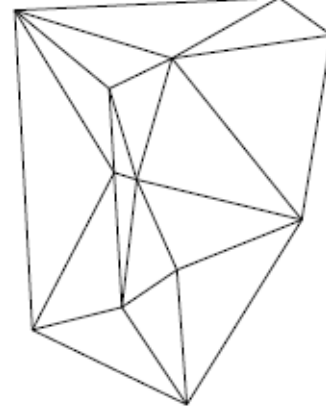
Şekil 4.9. Enterpole edilecek noktalar için Thiessen Poligonu oluşturma

4.9.1. Voronoi Diyagramı ve Delaunay Üçgenlemesi

Voronoi diyagramı literatürde Dirichlet, Thiessen veya Wigner-Seitz diyagramı olarak da anılmaktadır (Watson, Philip,1984; Sukumar, Moran, Semenov, Belikov, 2001; Ayar, 2009). Düzlemde yer alan sonlu nokta kümesine ait herhangi bir noktaya, kümedeki diğer noktalardan daha yakın konumda bulunan düzlem noktalarının geometrik yerine o noktanın Voronoi çokgeni (poligonu) denilmektedir. Kümedeki tüm noktaların Voronoi çokgenlerinin birleşimi, o kümenin Voronoi diyagramını oluşturur. Bu diyagram en yakın nokta problemleri için kullanılan kesin bir yapıdır. Bir noktanın Voronoi çokgeni herhangi bir noktayı, kendisine en yakın konumdaki komşu noktalardan ayırmaktadır. Çokgenin kenarları, nokta ile komşu noktaları birleştiren doğru parçalarının kenar orta dikmelerinden oluşmakta, her nokta kendisine ait komşu noktalar ile birleştirildiğinde Delaunay üçgenlemesi elde edilmektedir.



Şekil 4.10. Voronoi Diyagramı



Şekil 4.11. Delaunay Üçgenlemesi

Delaunay üçgenlemesine ait bazı önemli özellikler şunlardır:

- Tek anlamlıdır. Başlangıç noktasından bağımsızdır.
- Oluşan üçgenler en olası eşkenar üçgenlerdir. Çok dar açılı üçgenlerin oluşumu, dolayısıyla, birbirlerine uzak olan ve direkt ilişkisi bulunmayan noktalar arasında doğrusal bir ilişki kurulması engellenmektedir.
- Üçgenlerin çevrel çemberi içerisinde bir başka nokta yer almamaktadır.
- Veri kümesinin dışbükey çerçevesi üçgenlemede yer almaktadır. Bir nokta kümesinin dışbükey çerçevesi o kümeyi içine alan en küçük çokgendir.
- Dayanak noktaları kümesinde birbirine en yakın konumda bulunan nokta çiftinin oluşturduğu doğru parçası üçgenlemede yer almaktadır.
- Her bir noktayı kendisine en yakın nokta ile birleştiren doğru parçası bir üçgen kenarını oluşturmaktadır (Yanalak, 1997, Ayar, 2009).

4.10. Ters Mesafe Ağırlıklı Enterpolasyon

Ters Mesafe Ağırlıklı Enterpolasyon (IDW), örneklem nokta verilerinden enterpolasyonla grid üretmede çoğunlukla tercih edilen ortak bir yöntemdir. IDW enterpolasyon tekniği, enterpole edilecek yüzeyde yakındaki noktaların uzaktaki noktalarda daha fazla ağırlığa sahip olması esasına dayandırılır. Bu teknik enterpole edilecek noktadan uzaklaştıkça ağırlığı da azaltan ve örneklem noktalarının ağırlıklı

ortalamasına göre bir yüzey enterpolasyonu yapar. Birkaç IDW yöntemi olmasına karşın en iyi bilineni “Shepard Metodu”dur.

(<http://www.emsi.com/gmshelp/interpolation/interpolation.html>,24.04.2011 Arslanoğlu, Özçelik,2005).

4.10.1 Shepard Metodu

Ters mesafe ağırlıklı enterpolasyon yöntemi en basit şekliyle “Shepard Metodu” olarak adlandırılır. Denklemi aşağıdaki gibidir:

$$F(x, y) = \sum_{i=1}^n w_i f_i \quad (4.42)$$

n yüzeydeki dağınık nokta sayısı, f_i dağılım noktalarında öngörülen fonksiyon değerleri (örneğin veri kümesi değerleri) ve w_i her örneklem noktasına atanmış ağırlık fonksiyonlarıdır. Ağırlık fonksiyonunun klasik formu:

$$w_i = \frac{h_i^{-p}}{\sum_{j=1}^n h_j^{-p}} \quad (4.43)$$

p ağırlık parametresi (power parameter) olarak adlandırılan ve 2 olarak alınan keyfi bir pozitif reel sayıdır. h_i örneklem noktasından enterpolasyon noktasına olan mesafedir ve aşağıdaki eşitlikle bulunur:

$$h_i = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} \quad (4.44)$$

(x,y) enterpolasyon noktasının koordinatları ve (x_i,y_i) her bir dağılım noktasının koordinatlarıdır.

Ağırlık fonksiyonu standartlaştırılmıştır. Shepard yöntemi basitliği nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır.

(<http://www.emsi.com/gmshelp/interpolation/interpolation.html>, 2011)

4.11. En Küçük Eğrilikli Yüzey Enterpolasyonu

Bu yöntem, grid köşe noktalarındaki C_{ij} eğrilik değerlerinin kareleri toplamı minimum olacak şekilde grid köşe noktalarının yüksekliklerini enterpole etmek amacıyla geliştirilmiştir. İlk olarak grid köşelerindeki gravite değerleri enterpole edilerek eş gravite eğrilerinin oluşturulması amacıyla kullanılmıştır (Briggs 1974, Yanalak, 2002).

$$C = \sum_{i=1}^i \sum_{j=1}^j (C_{ij})^2 \rightarrow \text{minimum} \quad (4.45)$$

Bir yüzeydeki eğriliklerin kareleri toplamı (toplam karesel eğrilik)

$$C(z) = \iint \left(\frac{\partial^2 z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 z}{\partial y^2} \right) dx dy \quad (4.46)$$

ile ifade edilir. C değerini minimum yapan z fonksiyonun

$$\frac{\partial^4 z}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 z}{\partial y^2 \partial x^2} + \frac{\partial^4 z}{\partial y^4} = 0 \quad (4.47)$$

diferansiyel denklemini sağlaması gerekmektedir. Bu denklemin çözümü sınır koşulları kullanılarak yapılabilmektedir. Kullanılacak sınır koşulları yüzeyin sınır normali (n) boyunca,

$$\frac{\partial^2 z}{\partial n^2} = 0 \quad (4.48)$$

$$\frac{\partial}{\partial n} \left(\frac{\partial^2 z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 z}{\partial y^2} \right) = 0 \quad (4.49)$$

olması ve yüzeyin sınır köşelerinde

$$\frac{\partial^2 z}{\partial x \partial y} = 0 \quad (4.50)$$

olması koşuludur (Ayhan, Alp, Üstün, 1993; Yanalak, 2002).

Çözüm matris hesabıyla doğrudan yapılabileceği gibi matris hesabında nümerik bağımlılık söz konusu olabileceği düşüncesiyle iterasyonla da yapılabilmektedir. İteratif çözüm 4 adımda özetlenebilir:

1. Adım: Çok yüzeyli enterpolasyona benzer bir şekilde trend yüzeyi geçirilir. Trend yüzeyinden arta kalan değerler, her bir noktadaki Δz_i artık yükseklik değerini gösterir.

2. Adım: Rastgele dağılmış konumdaki dayanak noktalarına ait noktadaki Δz_i artık yükseklik değerlerinden yararlanarak, grid köşe noktalarındaki $\Delta z_{i,j}$ yaklaşık artık yükseklik değerleri, ağırlıklı ortalama ile hesaplanır.

3. Adım: Bir önceki adımda bulunan yaklaşık artık yükseklik değerleri ile iterasyona girilir. Bir iterasyon aşamasında, her bir grid köşe noktasındaki artık yükseklik değeri için komşu grid köşe noktalarındaki artık yükseklik değerlerinden yararlanılarak bir eşitlik yazılır. Yazılacak eşitlik normal bir grid köşesi için;

$$\Delta z_{i+2,j} + \Delta z_{i,j+2} + \Delta z_{i-2,j} + \Delta z_{i,j-2} + 2 (\Delta z_{i+1,j+1} + \Delta z_{i-1,j+1} + \Delta z_{i+1,j-1} + \Delta z_{i-1,j-1}) - 8 (\Delta z_{i+1,j} + \Delta z_{i-1,j} + \Delta z_{i,j+1} + \Delta z_{i,j-1}) + 20 \Delta z_{i,j} = 0 \quad (4.51)$$

şeklinde olacaktır. Yüzey sınırında ve köşelerinde bulunan grid köşe noktaları için yazılacak eşitlik normal bir nokta için yazılandan daha farklı olacaktır. Tüm noktalar için eşitliklerde geçen son terim olan $\Delta z_{i,j}$ değerleri hesaplandıktan sonra, bir sonraki iterasyon aşamasına geçilir. Ardışık iki iterasyondan elde edilecek $\Delta z_{i,j}$ değerleri arasındaki en büyük fark, seçilen ε değerinin (1 cm, 1 mm vb.) altında kalana kadar iterasyon işlemine devam edilir.

4. Adım: Son iterasyondan elde edilen artık yükseklik değerine trend yüzeyindeki değeri eklenerek grid köşe noktasının kesin yükseklik değeri bulunur (Yanalak, 2002).

Bu yöntem, az bir eğime sahip veri değerlerinden oluşan bölgeler için daha uygundur. Sonuç yüzey, lineer olarak elastik bir tabakaya benzemektedir. En küçük eğrilik enterpolasyonu verilere mümkün olduğunca yakın, en düz yüzeyi oluşturur. Bu yöntemde veriler tam olarak temsil edilememektedir (Alkanalka, 2005).

4.12. Kriging Yöntemi

Kriging enterpolasyon yöntemi geoistatistikte kullanılan ve birçok alanda popülaritesini kanıtlamış bir yöntemdir. Bu yöntem ile ilgili maden, jeoloji, çevre, meteoroloji, inşaat ve ekonomik risk değerlendirme gibi birçok alanda araştırma makaleleri mevcuttur. Literatürde çok fazla çalışma olmamakla birlikte, uzaktan algılama, fotogrametrik ve kartografik çalışmalarda uygulama alanı bulmuştur (İnal, Yiğit, 2003).

Kriging, bu tekniği ilk geliştiren D.G. Krige isimli Güney Afrikalı bir maden mühendisinden adını almaktadır.

Kriging konumsal tahmin için geoistatistiksel yöntemidir. Bu yöntem, matematiksel jeodezide kollokasyon olarak bilinen en iyi lineer yansız kestirimci (BLUP: Best Linear Unbiased Predictor) ya da en iyi lineer yansız hesaplayıcı (BLUE :Best Linear Unbiased Estimator) olarak tanımlanır (Boogaart, Schaeben, 2002).

Kriging enterpolasyon yönteminde en temel sorun W_i ağırlıklarının belirlenmesidir. Kriging yönteminde ağırlıklar variogram modellerinin doğrudan fonksiyonudur. Kriging ağırlıkları enterpolasyon değerini doğrudan etkilemektedir. Bu durumda enterpolasyon değerinin iyi olması için ağırlıkların yansız olması gerekmektedir. Kriging yöntemine BLUE (Best Linear Unbiased Estimator) adı verilir. Bu ismin altında yatan tahmin hatasının minimum olması şartına göre ağırlıkların belirlenmesidir. Bu durum, Kriging yöntemini diğer yöntemlerden ayıran en büyük özelliklerinden biridir (İnal, Yiğit, 2003; Isaaks, Srivastava,1989).

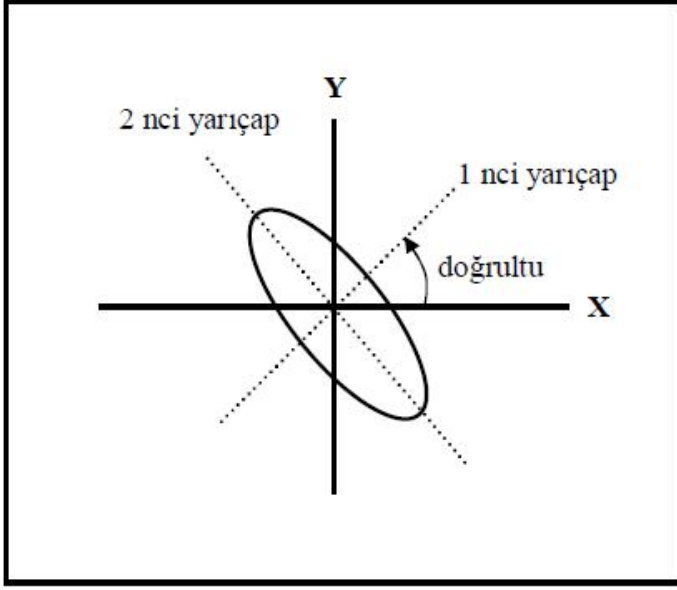
Kriging yönteminin kullanımı birkaç aşamayı içerir:

- Verinin tanımlayıcı istatistiksel analizi,
- Variogram modelleme,
- Yüzeyi oluşturma,
- İsteğe bağlı olarak varyans yüzeyinin analizi.

Bu fonksiyon, verideki alansal olarak korelasyon gösteren uzaklık veya yönlenmeyle ilişkin hata biliniyorsa çok uygundur (Türkeş, Erkonak, 1999).

Kriging yöntemini diğer yöntemlerden ayıran en büyük özelliği variogram modelidir. Variogram modelindeki temel düşünce, birbirine yakın olan iki noktadaki yüzey değerinin, birbirine uzak iki noktadaki yüzey değerlerine göre daha çok benzerliği ve aynı yönlü olmasıdır. Kısaca, variogram modelini dayanak noktaları arasındaki uzaklığın ve yüzey değerlerinin yönlerinin bir fonksiyonu olarak tanımlamak mümkündür (Açıkgöz, 2002; Alkanka, 2005).

Kriging yöntemi ile yüzey geçirmede ölçü noktalarının hepsine aynı ağırlık verilmemektedir. Grid köşelerine yakın olan ölçülere daha fazla ağırlık tanımlanırken, grid köşelerinden uzakta olan ölçülere daha az ağırlık tanımlanır. Ayrıca, ölçü noktalarındaki yüzey değerleri belirli bir yönde benzerlik gösteriyorsa diğer bir deyişle ölçülerde an-izotropi varsa, bu yöndeki noktalara daha fazla ağırlık tanımlanır. Ölçü noktalarına verilecek olan bu göreceli ağırlık, oran ve doğrultu olmak üzere iki parametresi bilinen bir elips ile tanımlanır.



Şekil 4.12. An-izotropinin belirlenmesinde kullanılan elips (Açıkgöz,2002)

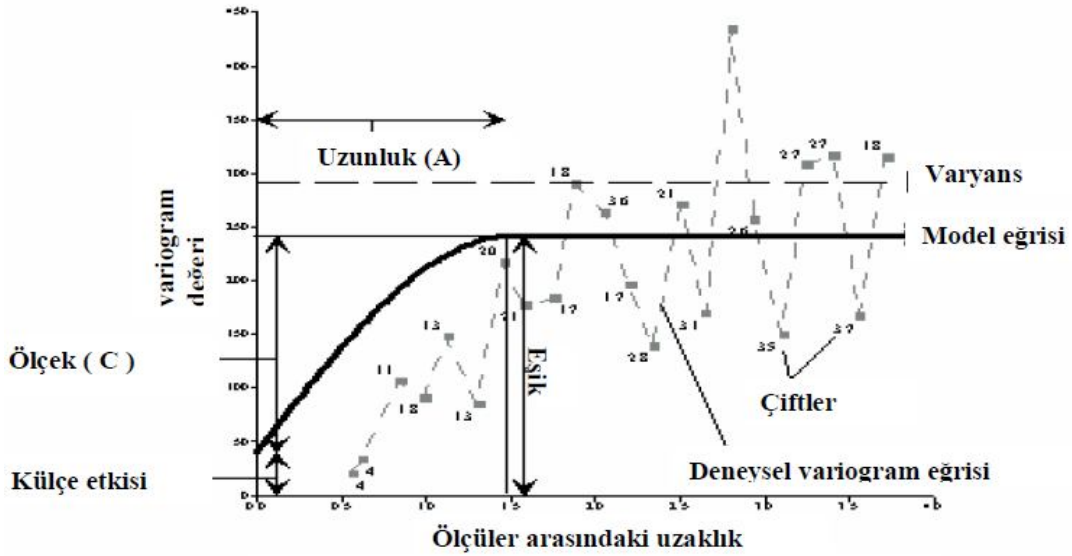
Oran, elipsin küçük ekseninin büyük eksenine bölünmesi ile elde edilir. Doğrultu ise asıl eksen ile elipsin küçük eksen arasındaki saat istikameti tersinde olan açıdır. Bu işlem ise tamamen ölçülerin yapısına bağlı olmakla birlikte, ampirik olarak yapılır (Açıkgöz,2002).

Kriging yöntemi ile yüzey tanımlamada etkin sonuçlar elde etmek için öncelikle, ölçülerin yapısını iyi bilmek gerekmektedir. Böylece, kullanılan ölçüleri temsil eden bir variogram modeli tanımlanmalı ve bu model ile her bir grid köşesindeki yüzey değeri hesaplanmalıdır.

Kriging yönteminde en uygun ağırlıkları bulmak için, ölçme noktaları arasındaki konumsal bağımlılığın bilinmesi gerekir. Bu konumsal bağımlılık ya bir kovaryans fonksiyonu ya da bir variogram fonksiyonu kullanmak suretiyle tanımlanabilir. Bölgesel değişkenler teorisi otokorelasyon kullanmaz, fakat bunun yerine bir yüzey üzerindeki noktalar arasındaki ilişkinin derecesini belirtmek için semivaryans olarak adlandırılan bir özellik kullanılır. Semivaryans sabit bir mesafe bölümlerine ayrılmış bütün olası noktalar arasındaki farkların varyanslarının yarısıdır (Isaaks, Srivastava, 1989). Semivaryans örneklemeler arasındaki konumsal bağımlılık derecesinin bir ölçütüdür.

Noktalar arasındaki semivaryansın büyüklüğü, noktalar arasındaki mesafeye bağlıdır (İnal, Özer, 2003).

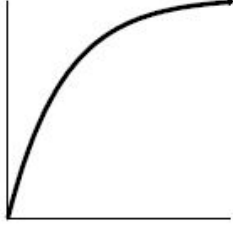
Variogram, uzayda farklı noktalardaki değişkenler arasındaki var olan bağımlılığı karakterize eden bir fonksiyondur. Kriging yöntemiyle bir noktadaki ondülasyonu hesaplamak için öncelikle Kriging ağırlıklarının belirlenmesi gerekmektedir. Kriging ağırlıkları ise variogram modelinin doğrudan bir fonksiyonudur. Herhangi bir çalışma bölgesinde enterpolasyon olarak Kriging kullanılacaksa bu durumda seçilen variogram modeline ait parametreler bilinmeli ya da çalışma bölgesinde bulunan verilerden yararlanarak deneysel variogram modeli oluşturulmalıdır. Elde edilen bu deneysel variogram modelinden yararlanarak teorik modele ait bilinmeyen parametreler belirlenmelidir. Kriging yöntemiyle belirlenen ağırlıklar, seçilen variogram fonksiyonuyla doğrudan ilişkilidir (İnal, Özer, 2003).



Şekil 4.13. Variogram modeli ve parametreleri

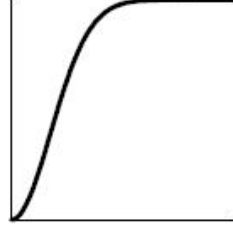
Deneysel variogramlarda variogram değerleri belirli uzaklıklarda hesaplanırlar. Bunların dışındaki uzaklıklarda variogram değerleri bilinmez. Bölgesel değişkenin özelliklerinin belirlenmesinde ve özellikle örneklenmemiş noktalardaki değerlerinin kestiriminde variogram değerini bütün uzunluklarda bilmek gerekir (Isaaks, Srivastava 1989). Bu ise deneysel variogram değerlerine bir fonksiyon uyarlamayı gerektirir.

Teorik variogram modelleri pozitif tanımlı fonksiyonlardır. Geoistatistikte kullanılan variogram modellerinden en yaygın kullanılanları aşağıda gösterilmiştir:



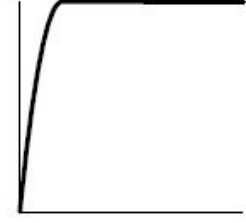
Üssel Model
Cressie (1991)

$$\gamma(h) = C [1 - e^{-h}]$$



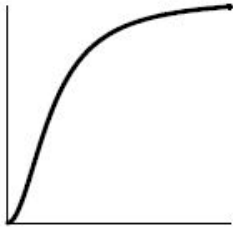
Gauss Modeli
Pannatier (1996)

$$\gamma(h) = C [1 - e^{-h^2}]$$



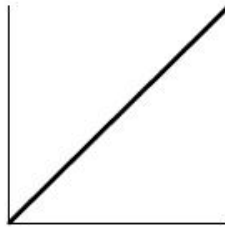
Quadritik Model
Alfaro (1980)

$$\gamma(h) = \begin{cases} C[2h - h^2] & h < 1 \\ C & h \geq 1 \end{cases}$$



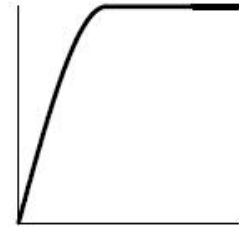
Rasyonel Quadritik model
Cressie (1991)

$$\gamma(h) = C \left[\frac{h^2}{1 + h^2} \right]$$



Lineer Model
Kitanidis (1997)

$$\gamma(h) = C(h)$$



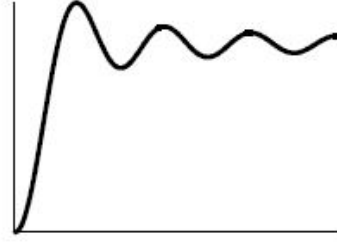
Küresel Model
Pannatier (1996)

$$\gamma(h) = \begin{cases} C[1.5h - 0.5h^3] & h < 1 \\ C & h \geq 1 \end{cases}$$



Logaritmik Model
Kitanidis (1997)

$$\gamma(h) = C[\log_e(h)] \quad h > 0$$



Dalga Modeli, Cressie (1991)

$$\gamma(h) = C \left[1 - \frac{\sinh}{h} \right]$$

Şekil 4.14. Uygulamalarda kullanılan variogram modelleri (Açıkgöz, 2002)

Bu modeller içerisindeki;

c_0 : Literatürde nugget effect olarak adlandırılır. Teorik eğrinin $h=0$ noktasında düşey eksenini kestiği noktadır. Kestirim değerini etkilemez, sadece Kriging varyansında değişime sebep olur.

c : Variogramın yapısal bileşenleri için düşey ölçek değeridir.

a : Range olarak adlandırılır ve variogramın yatay uzaklığıdır. Bu uzunluktan sonra veriler artık birbirleri ile korelasyonsuzdur. Variogram ya da kovaryans değerleri bu uzunluktan sonra sabit kalır. Range'daki değişim enterpolasyon değerinin de değişimine sebep olur.

h : Örneklem noktaları arası ya da enterpolasyon noktası ile örneklem noktaları arası yatay uzunluktur.

$c+c_0$: Sill olarak adlandırılır. Variogram fonksiyonunun toplam düşey ölçek değeridir. Yaklaşık örneklem varyansına eşittir.

Variogramlar genel olarak silli ve silsiz olarak ikiye ayrılmaktadır. Örneğin lineer model silsiz bir modeldir ve c değeri eğim değeridir, küresel model ise silli bir modeldir (İnal, Özer, 2003).

Kriging yönteminin temeli bölgesel değişkenler teorisine dayanır. Bu teoride yükseklikler tarafından temsil edilen olaylarda konumsal varyasyon yüzey boyunca istatistiksel olarak homojendir. Yüzey, üç bileşenin toplamı olarak ifade edilir; bunlar, sabit bir ortalama ya da trendden oluşan yapısal bir bileşen, rastgele fakat konumsal olarak korelasyonlu bileşen ve konumsal olarak korelasyonsuz kalıntı hata terimidir (Martensson, 2002; İnal, 2003).

Kriging yöntemi ağırlıklı ortalama yöntemine benzer bir şekilde yakındaki noktalardan daha fazla etkilenmeyi sağlayan bir ağırlık modeli kullanır.

Kriging yönteminin genel denklemi,

$$Z_p = \sum_{i=1}^n W_i Z_i \quad (4.52)$$

şeklindedir. Burada;

Z_p , P noktasının aranan yükseklik değeri

W_i , Z_p 'nin hesabında kullanılan her bir Z_i 'ye karşılık ağırlık değeri

Z_i , Z_p 'nin hesabında kullanılan noktaların yükseklik değerleri

n , Z_p 'nin hesabında kullanılan nokta sayısı

Ağırlıkların belirlenmesi için aşağıdaki denklem sisteminin çözülmesi gerekir.

$$P_1\gamma(S_{11}) + P_2\gamma(S_{12}) + \dots + P_n\gamma(S_{1n}) = \gamma(S_{1P})$$

$$P_1\gamma(S_{21}) + P_2\gamma(S_{22}) + \dots + P_n\gamma(S_{2n}) = \gamma(S_{2P}) \quad (4.53)$$

$$P_1\gamma(S_{n1}) + P_2\gamma(S_{n2}) + \dots + P_n\gamma(S_{nn}) = \gamma(S_{nP})$$

Burada;

S_{ij} = i ve j noktaları arasındaki mesafe,

P_i = i noktasındaki ağırlık değeridir.

Enterpolasyonun yansız olması için toplam ağırlıkların 1'e eşit olması gerekir.

$$\sum_{i=1}^n P_i = 1 \quad (4.54)$$

Burada n tane bilinmeyen için $(n+1)$ tane denkleme ihtiyaç vardır. Lagrange çarpanı ile denklem sayısı bilinmeyen sayısına eşitlenir. Lagrange çarpanı; bilinmeyen sayısını denklem sayısına eşitlemek için hem gözlemleri hem de koşulları içeren lineer bir denklem sistemine bilinmeyen olarak katılan denklemdir. Aynı zamanda kararsız çarpan olarak da isimlendirilir (İnal, 2003; Yaprak, 2007).

Son satıra $P_1 + P_2 + \dots + P_n = 1$ ilave edilir ve denklem 4.55'de gösterildiği hale gelir.

$$P_1\gamma(S_{11}) + P_2\gamma(S_{12}) + \dots + P_n\gamma(S_{1n}) = \gamma(S_{1P})$$

$$P_1\gamma(S_{21}) + P_2\gamma(S_{22}) + \dots + P_n\gamma(S_{2n}) = \gamma(S_{2P})$$

(4.55)

$$P_1\gamma(S_{n1}) + P_2\gamma(S_{n2}) + \dots + P_n\gamma(S_{nn}) = \gamma(S_{nP})$$

$$P_1 + P_2 + \dots + P_n = 1 \quad \text{şeklini alır.}$$

$$\begin{bmatrix} \gamma(s_{11}) & \gamma(s_{12}) & \gamma(s_{13}) & 1 \\ \gamma(s_{21}) & \gamma(s_{22}) & \gamma(s_{23}) & 1 \\ \gamma(s_{31}) & \gamma(s_{32}) & \gamma(s_{33}) & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \gamma(s_{1P}) \\ \gamma(s_{2P}) \\ \gamma(s_{3P}) \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4.56)$$

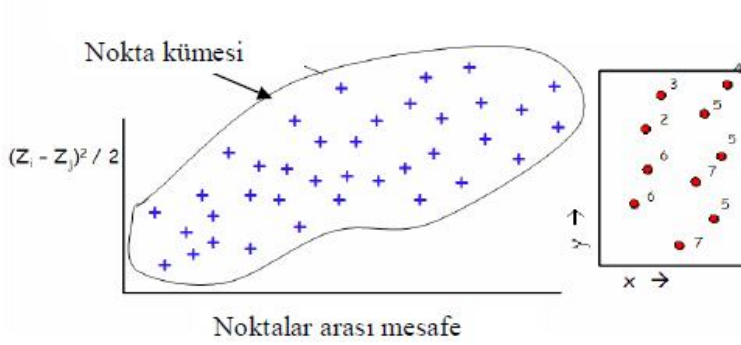
Matris çözümü ile ağırlıklar hesaplanır. Ağırlıklar hesaplandıktan sonra Kriging genel denkleminde çalışma bölgesindeki herhangi bir nokta için enterpolasyon değeri

$$N_P = P_1 N_1 + P_2 N_2 + P_3 N_3 + \dots + P_n N_n \quad (4.57)$$

formülü ile hesaplanır (İnal, Yiğit, 2003).

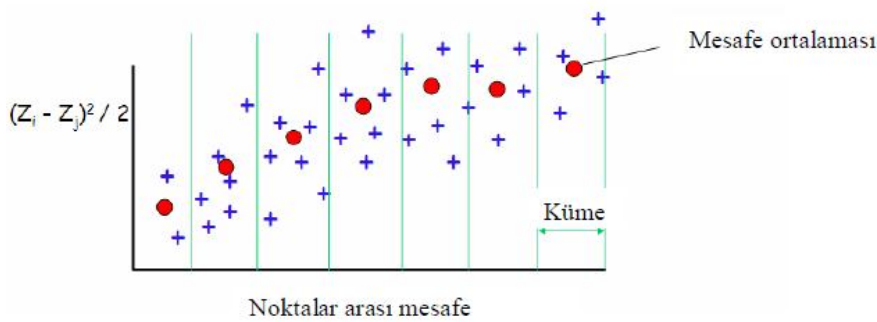
Kısaca Kriging işlem adımlarını özetlemek gerekirse;

1. İşlem Adımı: Verilerin uzaysal değişimlerine göre tanımlaması yapılır.



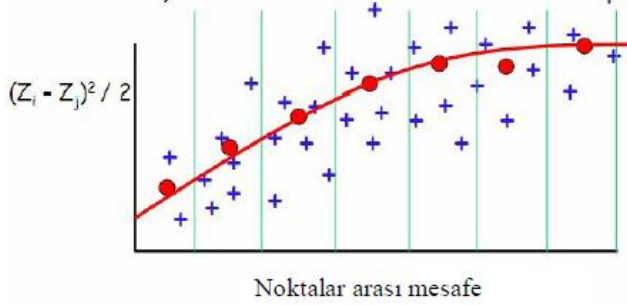
Şekil 4.15. Z değerlerinin variogramla uzaysal varyasyonunun tanımı

Diyagramı küme serilerine ayırır. Her kümenin ortalamasını alır.



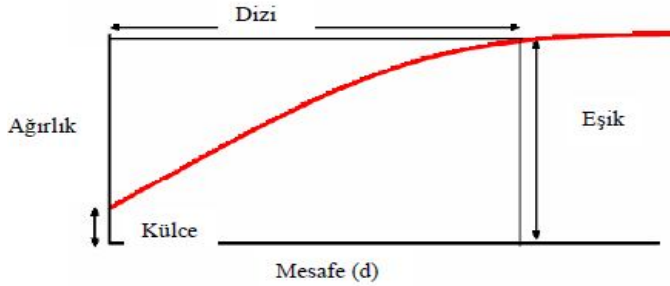
Şekil 4.16. Z değerlerinin kümelerle bölünerek ortalamalarının bulunması

2. İşlem Adımı: Uzaysal değişimleri bir fonksiyonla özetler. Dairesel, küresel, üssel gibi birden fazla seçenek mümkündür.



Şekil 4.17. Bir fonksiyon ile uzaysal varyansın özetlenmesi

Bu işlem adımı, nugget(külçe), range(dizi), sill(eşik) kavramları bulunur. Bunları şekil üzerinde gösterirsek;



Şekil 4.18. Variogram modeli ve bileşenleri

3. İşlem Adımı: Türetilen ağırlıkların tanımlanması, ağırlıkları oluşturmak için uyarlanmış eğri değişikliklerinin kullanılması safhasıdır. Genelde yakın değerler daha fazla ağırlığa sahiptirler fakat yön de önemli olabilir (Alkanalka, 2005).

Bugün Kriging yöntemleri yaygın olarak aşağıda sıralanan adlarla çeşitli alanlarda kullanılmaktadır. Kullanılan bu yöntemler;

- Ordinary (Punctual) Kriging
- Simple Kriging

- Cokkriging
- Universal Kriging
- Block Kriging
- İndicator Kriging
- Disjunctive Kriging

olarak sıralanabilir (İnal, 2003).

4.12.1. Ordinary Kriging Yöntemi

Ordinary Kriging yönteminin ilk adımı enterpole edilecek noktalar kümesinden variogram oluşturmaktır. Variogram deneysel ve teorik (model) variogram olmak üzere iki bölümden oluşur. Deneysel variogram her noktanın varyansının hesaplanması ile bulunur. İkinci aşamada deneysel variogramdaki trendi modelleyen basit matematiksel fonksiyon olan teorik variogram seçilir. Teorik variogramlar 4.56 eşitliği ile hesaplanan deneysel variogramlardan belirlenir.

$$\gamma(s) = \frac{1}{2n(s)} \sum_{s_{ij}}^{n(s)} (Z(x_i, y_i) - Z(x_j, y_j))^2 \quad (4.58)$$

$$S_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (4.59)$$

şeklindedir. Eşitliklerde;

S_{ij} = i ve j noktaları arasındaki yatay uzaklık

$n(s)$ = S uzunluğundaki nokta çiftleri sayısı

Z_i = i noktasının yüksekliği

$\gamma(s)$ = s uzunluğundaki yarıvaryans değeridir (Yaprak, 2007).

Ordinary Kriging yönteminde bilinmeyen değerlerin belirlenmesi değişkenlerin durağan ve ortalamanın sabit olduğu varsayımına göre çözüme gidilir (İnal, Yiğit, 2003).

4.12.2. Simple Kriging Yöntemi

Simple Kriging enterpolasyonu Ordinary Kriging'e benzer, ancak ağırlıkların toplamının 1'e eşit olması yerine ağırlık, veri setlerinin ortalaması ile bulunur. Simple Kriging yönteminde ortalama değeri bilinmektedir. Simple Kriging yönteminde noktaların enterpolasyonu genelleştirilmiş lineer regresyon altında 2. derece durağanlık varsayımı ve bilinen ortalamaya dayanır

(<http://ewr.cce.vt.edu/environmental/teach/smprimer/kriging.html#Kriging>,2011; Alkanalka, 2005).

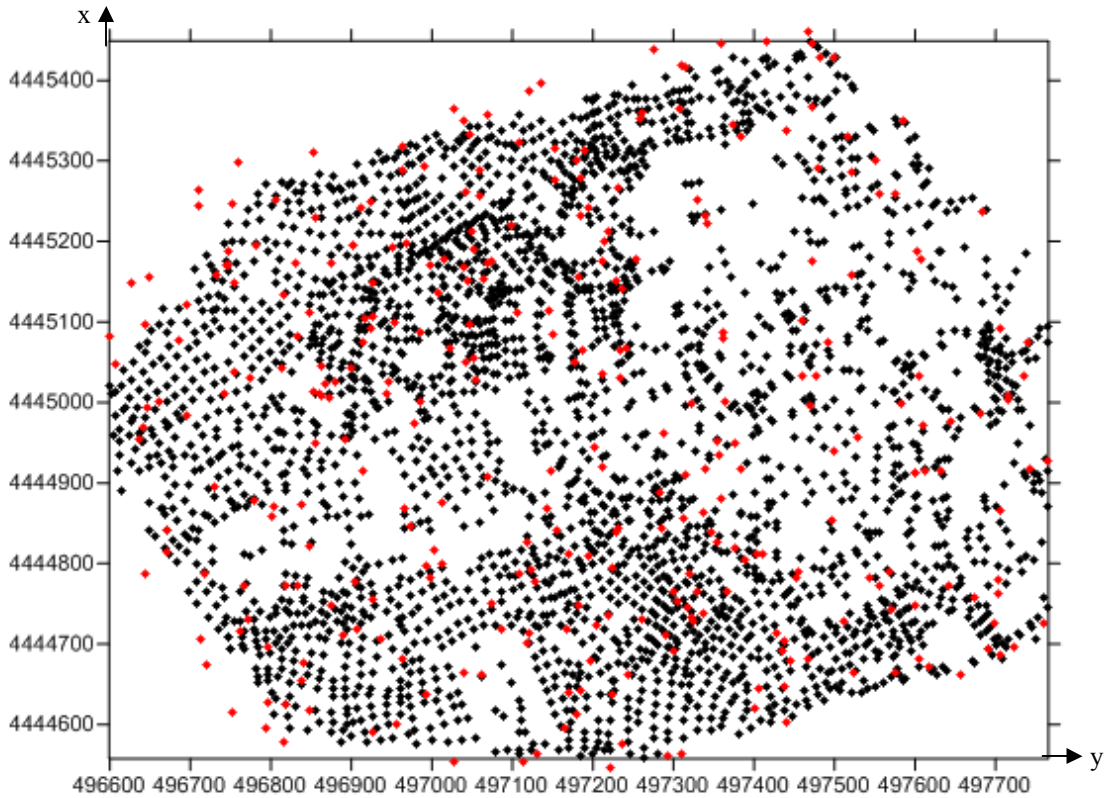
Simple Kriging Ordinary Kriging'den daha az hassastır. Fakat daha estetik yüzeyler oluşturur. Simple Krigingde ortalama değeri bilmek zorunlu iken, Ordinary Krigingde bu zorunluluk yoktur

(http://www.ems.com/gmshelp/Interpolation/Kriging/Simple_Kriging.htm,2011).

5. UYGULAMA

5.1. Çalışma Alanı ve Materyal

Uygulama, Zonguldak ilinin bir bölümüne ait, yersel ölçülerle bulunmuş olan noktalar kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bölge yaklaşık 1 km x 1 km büyüklüğündedir. Çalışma alanı yaklaşık olarak 783.550 dönüm ve yer yer engebelidir. 3180 adet noktadan oluşan veri setiyle Golden Surfer 9 programı kullanılarak uygulama yapılmıştır. Veri setindeki noktalara bakıldığında, en büyük yükseklik değeri 652.58 m iken en düşük yükseklik değeri 531.14 m'dir. Enterpolasyon sonucu dayanak noktalarında oluşan artık değerlerin standart sapması (karesel ortalama hatası) hesaplanarak çalışma bölgesinde en iyi sonuç veren yöntem araştırılmıştır.



Şekil 5.1. Uygulama yapılacak veri setinin arazi üzerindeki dağılımı

• Test Noktaları * Örneklem Noktaları

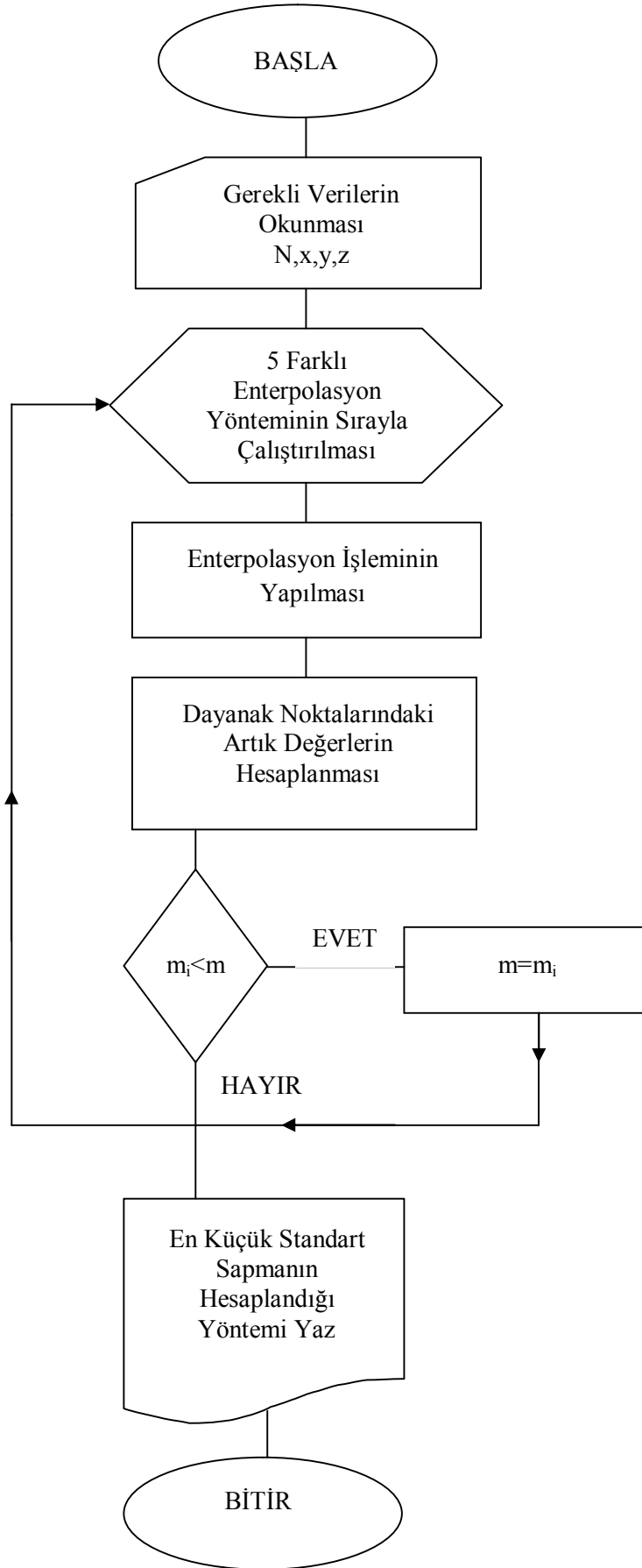
5.2. Metodoloji

Bu çalışmada, 3180 noktanın %10'luk kısmı olan 318 nokta test noktası olarak ayrılmıştır. Geriye kalan 2862 nokta ile farklı enterpolasyon yöntemleri kullanılarak 3 boyutlu sayısal yükseklik modeli oluşturulmuştur. Uygulamada kullanılan enterpolasyon yöntemleri;

- Ters Mesafe Ağırlıklı Enterpolasyon Yöntemi (IDW)
- Kriging Enterpolasyon Yöntemi
- En Küçük Eğrilikli Yüzey Enterpolasyonu
- Doğal Komşuluk Enterpolasyon Yöntemi
- Lokal Polinomal Enterpolasyon Yöntemidir.

Ters Mesafe Ağırlıklı Enterpolasyon Yöntemi, enterpolasyon işleminde, yakındaki noktaların uzaktakilere göre daha fazla etki etmesi gerektiği esasına göre çalışmaktadır. Kriging enterpolasyon yöntemi, diğer yöntemlerden farklı olarak variogram modeli ile çalışmaktadır. En Küçük Eğrilikli Yüzey Enterpolasyonu, multikuadrik enterpolasyon yöntemi gibi bir trend yüzeyi oluşturur. Çözüm için belirli sınır değerleri ile çalışır ve yüzeyi sınırlar. Bu nedenle daha iyi sonuç vereceği tahmin edilmektedir. Doğal Komşuluk Enterpolasyon Yöntemi, diğer yöntemlerden farklı olarak üçgenleme yaparak sonuca ulaşır. Bu yöntem Delaunay üçgenlemesini kullanmaktadır. Lokal Polinomal Enterpolasyon Yöntemi ise küçük bölgelerin ayrı ayrı enterpole edilmesi ile bulunur. Bu kapsamda, daha iyi sonuç vereceği düşünüldüğünden bu beş yöntem üzerinde uygulama yapılmıştır.

Öncelikle örneklem noktaları ile enterpolasyon yöntemine göre Golden Surfer 9 yazılımı kullanılarak arazinin 3 boyutlu sayısal yükseklik modeli oluşturulmuştur. Oluşturulan model üzerine, homojen olarak dağılmış 318 test noktası çakıştırılmıştır. Test noktalarının z yükseklik değerleriyle oluşturulan yüzey üzerindeki z yükseklik değerleri arasındaki farklar bulunarak, m_0 karesel ortalama hata (standart sapma) değerleri hesaplanmıştır. Yapılan uygulamanın iş akış diyagramı şekil 5.2'de gösterilmiştir:

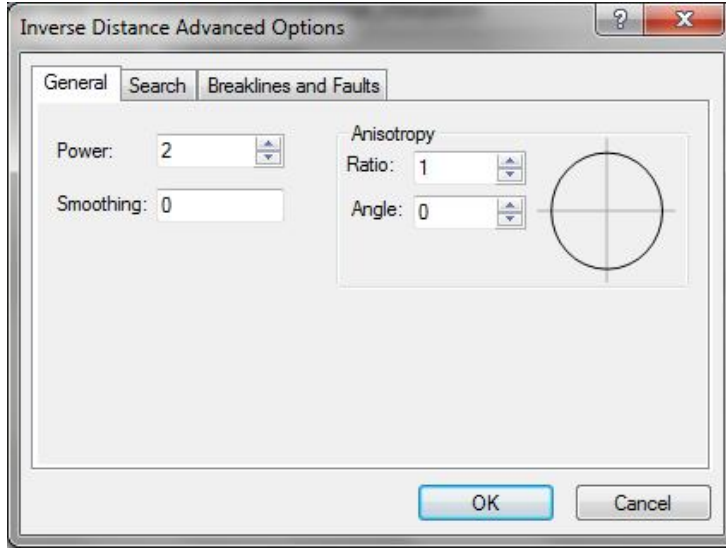


Şekil 5.2. Uygulamada kullanılan iş akış diyagramı

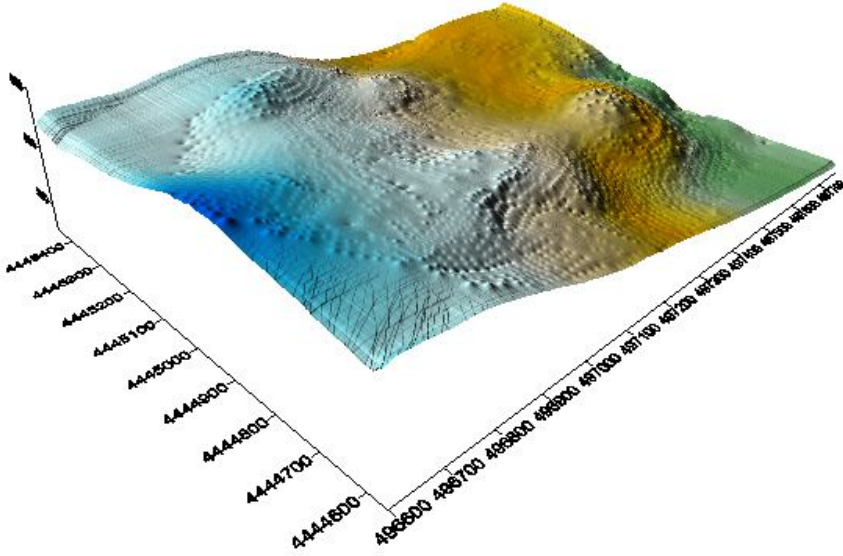
5.3.Uygulama

5.3.1. Ters Mesafe Ağırlıklı Enterpolasyon Yöntemi (IDW)

Ters mesafe ağırlıklı enterpolasyon yönteminde kullanılan parametreler şekil 5.3'te, bu yönteme göre oluşturulan üç boyutlu model ise şekil 5.4'te gösterilmiştir.

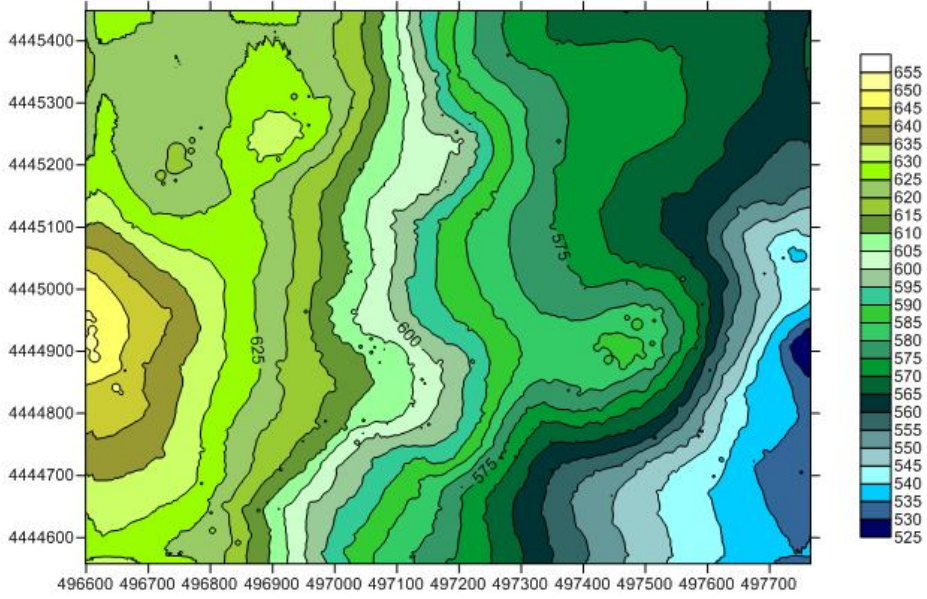


Şekil 5.3. Ters mesafe ağırlıklı enterpolasyon yönteminde kullanılan parametreler



Şekil 5.4. Ters Mesafe Ağırlıklı Enterpolasyon ile oluşturulan 3 boyutlu model

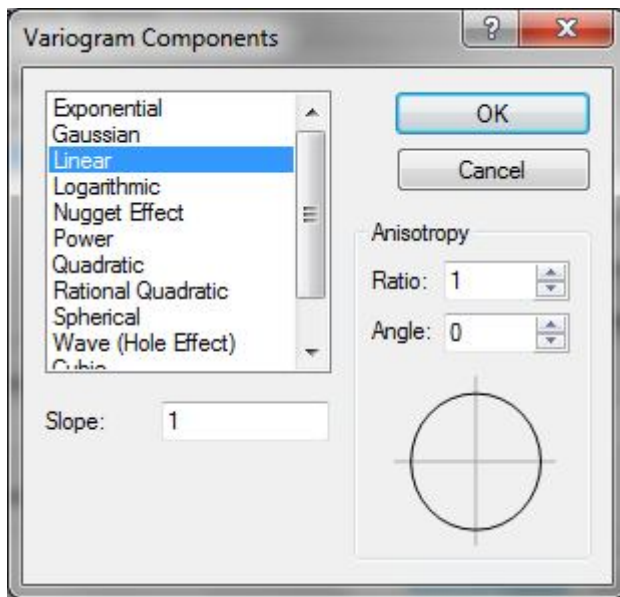
Ters mesafe ağırlıklı enterpolasyon yöntemine göre oluşturulan eş yükseklik haritası şekil 5.5’de gösterilmiştir.



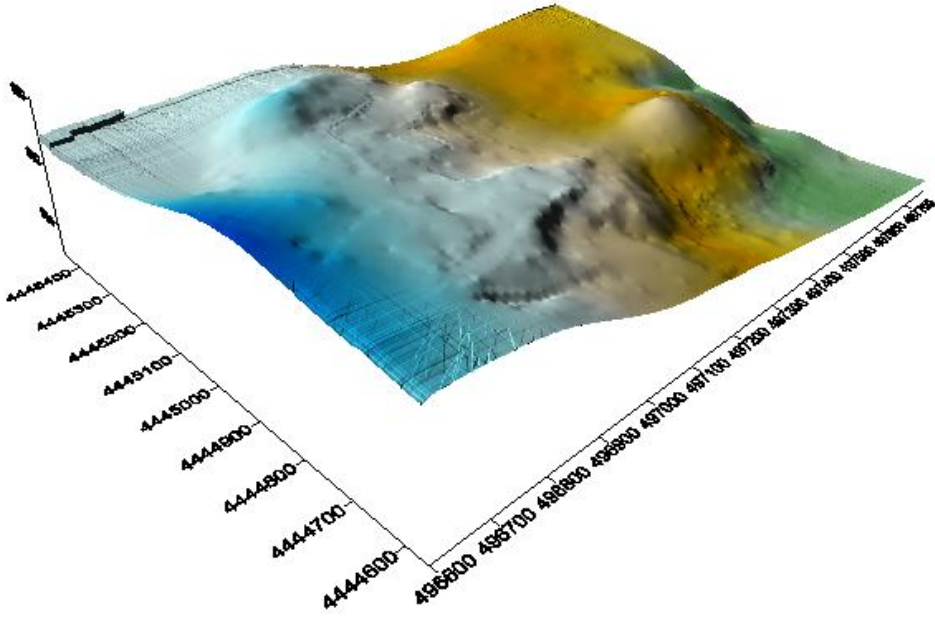
Şekil 5.5. Ters Mesafe Ağırlıklı Enterpolasyon ile oluşturulan eş yükseklik eğrisi haritası

5.3.2. Kriging Enterpolasyon Yöntemi

Kriging enterpolasyon yönteminde kullanılan parametreler şekil 5.6’da, bu yönteme göre oluşturulan üç boyutlu model ise şekil 5.7’de gösterilmiştir.

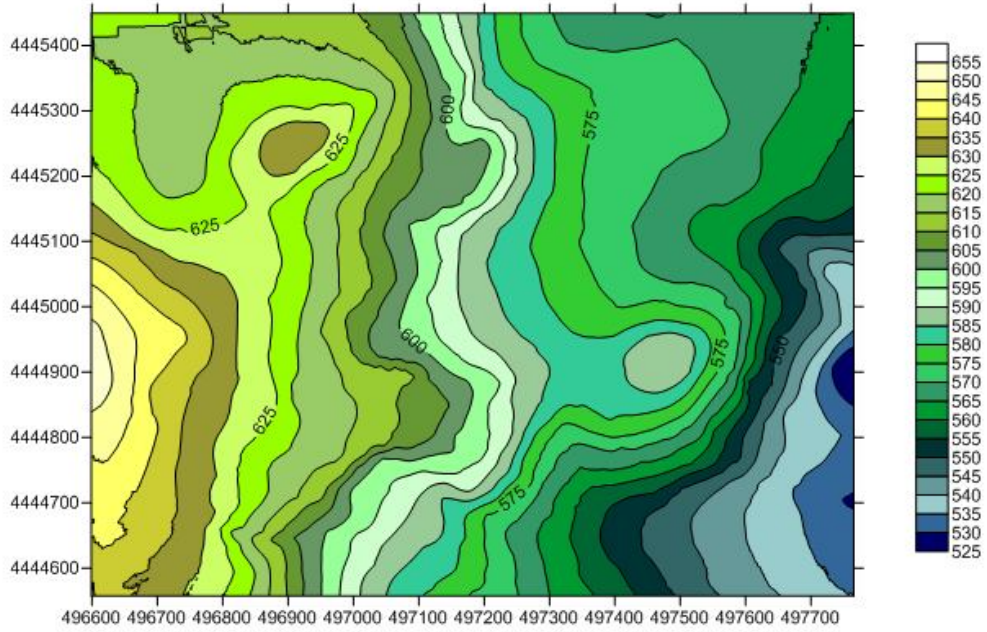


Şekil 5.6. Kriging enterpolasyon yönteminde kullanılan parametreler



Şekil 5.7. Kriging Enterpolasyon Yöntemi ile oluşturulan 3 boyutlu model

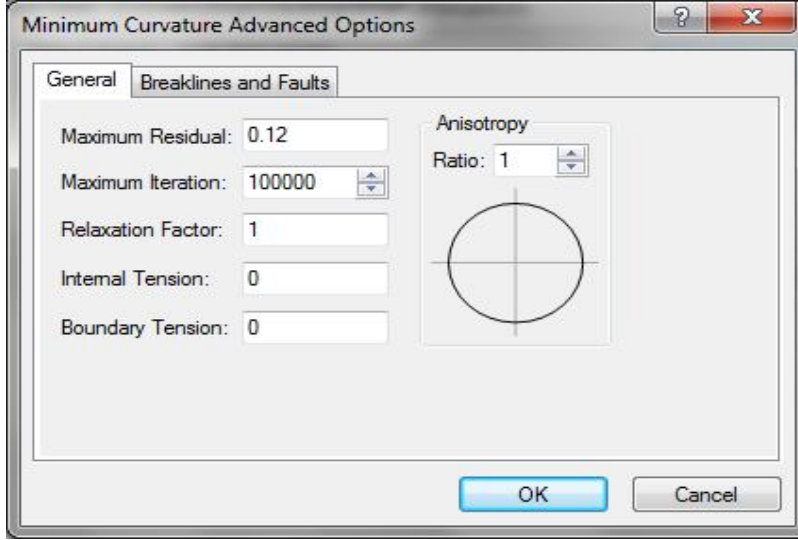
Kriging enterpolasyon yöntemine göre oluşturulan eş yükseklik haritası şekil 5.8'de gösterilmiştir.



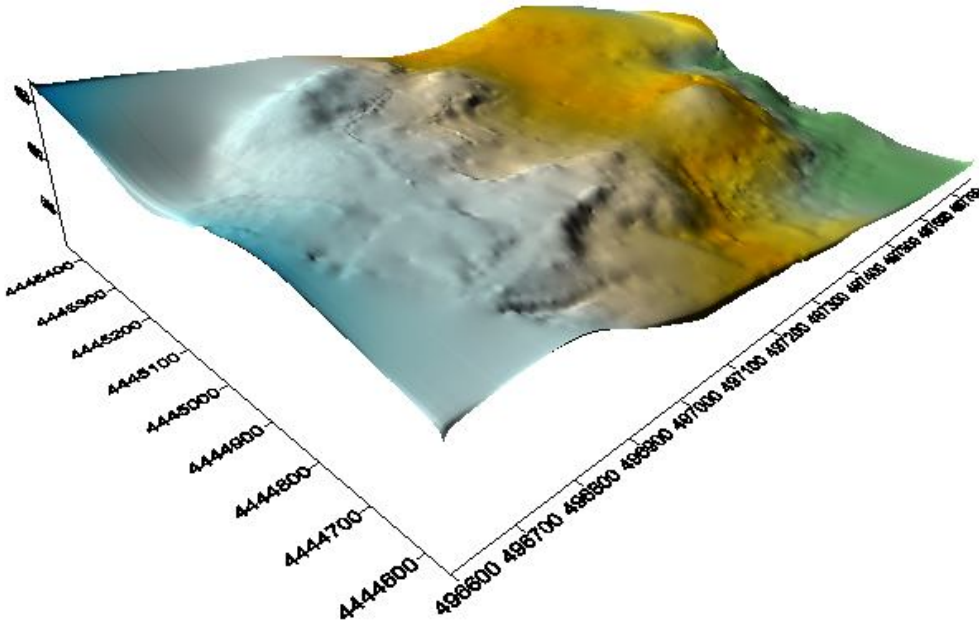
Şekil 5.8. Kriging Enterpolasyon Yöntemi ile oluşturulan eş yükseklik eğrisi haritası

5.3.3. En Küçük Eğrilikli Yüzey Enterpolasyonu

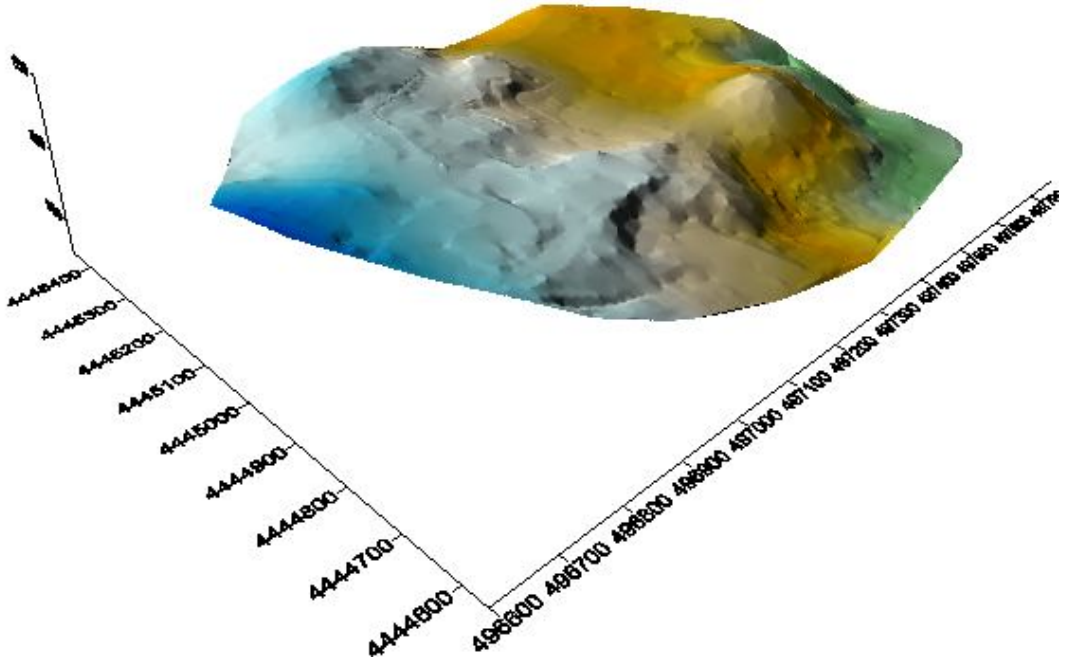
En küçük eğrilikli yüzey enterpolasyonunda kullanılan parametreler şekil 5.9'da, bu yönteme göre oluşturulan üç boyutlu model ise şekil 5.10'da gösterilmiştir.



Şekil 5.9. En küçük eğrilikli yüzey enterpolasyon yönteminde kullanılan parametreler

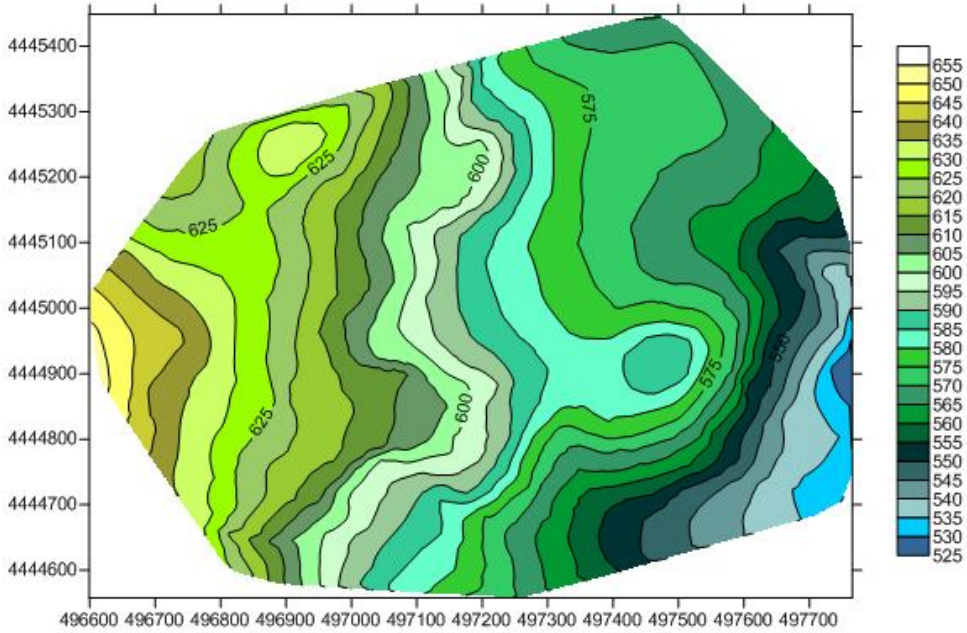


Şekil 5.10. En Küçük Eğrilikli Yüzey Enterpolasyonu ile oluşturulan 3 boyutlu model



Şekil 5.13. Doğal Komşuluk Enterpolasyon Yöntemi ile oluşturulan 3 boyutlu model

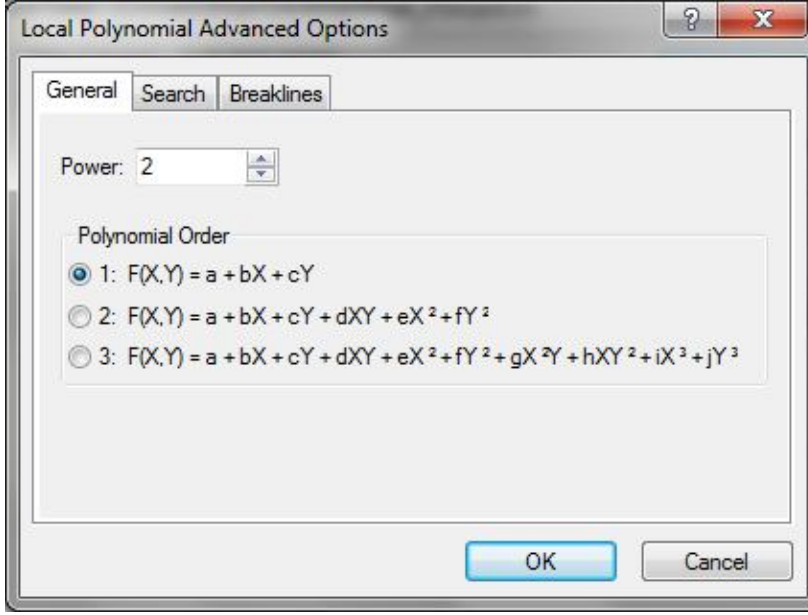
Doğal komşuluk enterpolasyon yöntemine göre oluşturulan eş yükseklik haritası şekil 5.14'te gösterilmiştir.



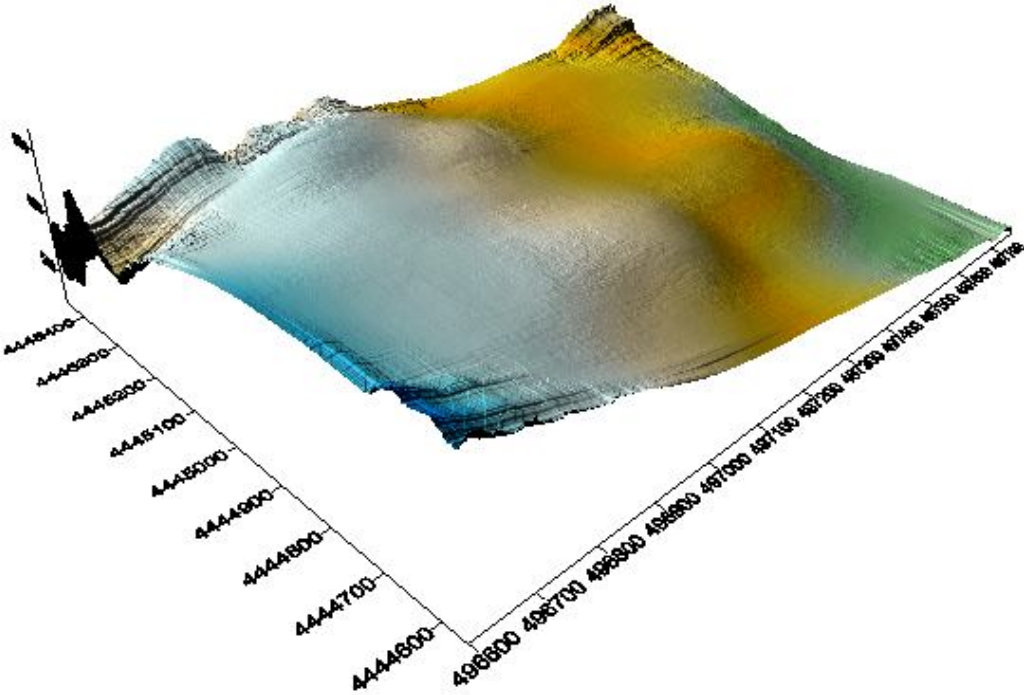
Şekil 5.14. Doğal Komşuluk Enterpolasyon Yöntemi ile oluşturulan eş yükseklik eğrisi haritası

5.3.5. Lokal Polinomal Enterpolasyon Yöntemi

Lokal polinomal enterpolasyon yönteminde kullanılan parametreler şekil 5.15'te, bu yönteme göre oluşturulan üç boyutlu model ise şekil 5.16'da gösterilmiştir.

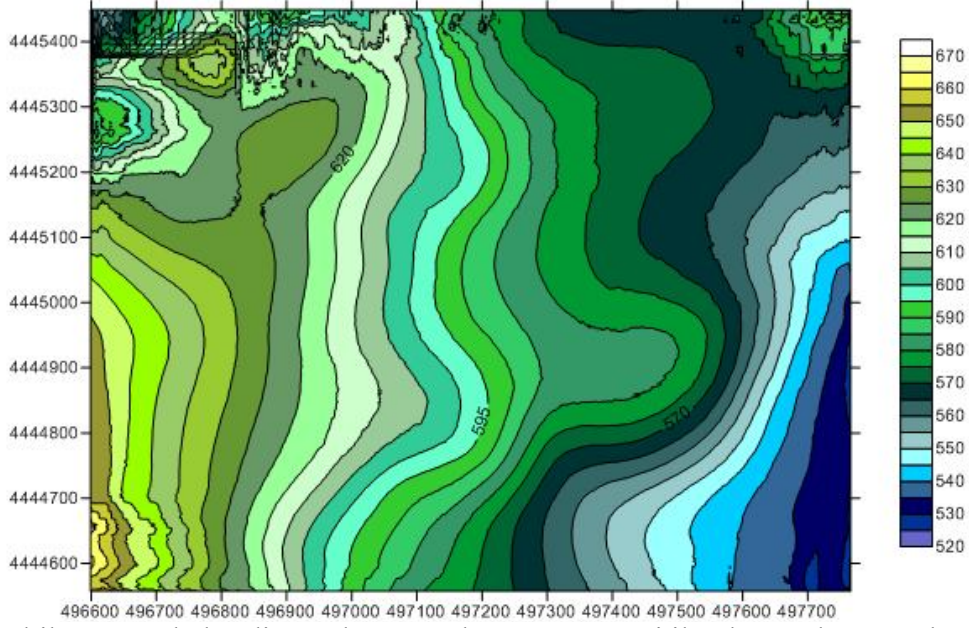


Şekil 5.15. Lokal polinomal enterpolasyon yönteminde kullanılan parametreler



Şekil 5.16. Lokal Polinomal Enterpolasyon Yöntemi ile oluşturulan 3 boyutlu model

Lokal polinomal enterpolasyon yöntemine göre oluşturulan eş yükseklik haritası şekil 5.17'de gösterilmiştir.



Şekil 5.17. Lokal Polinomal Enterpolasyon Yöntemi ile oluşturulan eş yükseklik eğrisi haritası

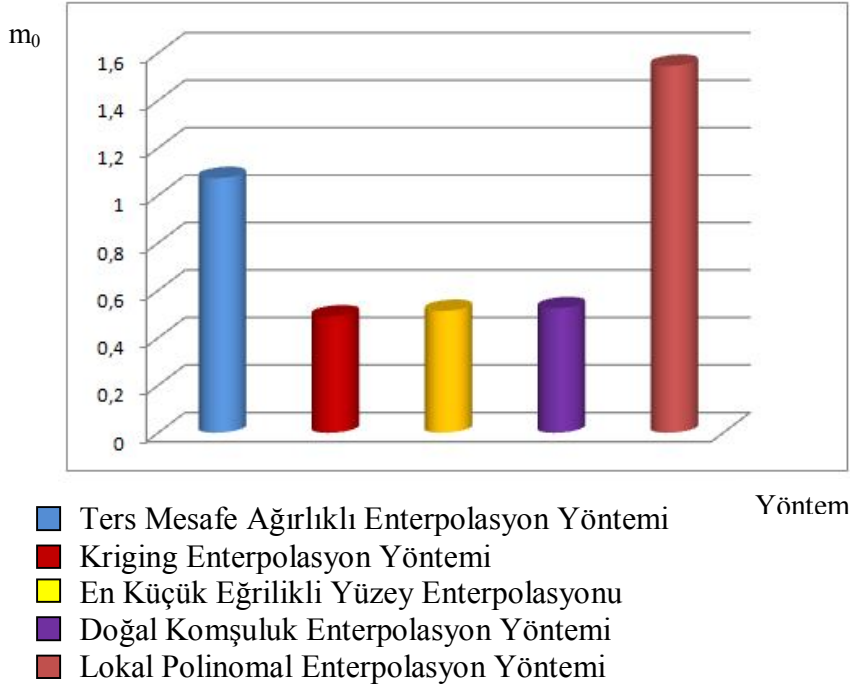
6. BULGULAR VE İRDELEME

Uygulama aşamasında bulunan sayısal yükseklik modelleri üzerindeki test noktalarının z yükseklikleri arasındaki farklar alınarak m_0 değerleri hesaplanmıştır.

Çizelge 6.1. Bilinen z değerleri ile enterpolasyonla bulunan z değerleri arasındaki farkla hesaplanan m_0 değerleri

Enterpolasyon Yöntemi	Hesaplanan m_0 Değeri (m)
1. Ters Mesafe Ağırlıklı Enterpolasyon Yöntemi	1,0725
2. Kriging Enterpolasyon Yöntemi	0,4896
3. En Küçük Eğrilikli Yüzey Enterpolasyonu	0,5129
4. Doğal Komşuluk Enterpolasyon Yöntemi	0,5240
5. Lokal Polinomal Enterpolasyon Yöntemi	1,5452

Karesel ortalama hata değerlerinin grafiksel kıyaslaması şekil 6.1’de gösterilmiştir.



Şekil 6.1. Yöntemlerden bulunan karesel ortalama hata değerlerinin grafiksel kıyaslaması

m_0 değerleri bulunurken öncelikle test noktalarının bilinen yükseklik değerlerinden, enterpolasyon sonucu bulunan yükseklik değerlerinin farkı alınarak v değeri bulunmuştur. $m_0 = \sqrt{\frac{[vv]}{n-1}}$ formülünde gerekli değerler yerine konularak m_0 değerlerine ulaşılmıştır. Her enterpolasyon yöntemi için ayrı ayrı hesaplama yapılmıştır.

Yöntemler arasında gerçekliğe en uygun yani arazi yüzeyini gerçeğe en yakın olarak temsil eden enterpolasyon yönteminin Kriging yöntemi olduğu belirlenmiştir. Kriging yöntemi daha sağlam matematik modellerden oluşturulmaktadır. En küçük eğrilikli yüzey enterpolasyonu, yüzeyi bütünüyle ele alır. Bu nedenle duyarlı ve gerçekçi sonuçlar vermektedir. Kriging yönteminden sonra en iyi sonuç veren yöntemdir.

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Kullanılan enterpolasyon yöntemleri ile 3 boyutlu sayısal yükseklik modelleri ve eş yükseklik haritaları oluşturulmuştur. 3180 nokta ile yapılan uygulama sonucunda bulunan m_0 değerleri karşılaştırıldığında, en iyi sonucu Kriging enterpolasyon yönteminin verdiği görülmektedir. Kriging enterpolasyon yöntemini sırasıyla en küçük eğrilikli yüzey enterpolasyonu ve doğal komşuluk enterpolasyon yöntemi izlemektedir. Yöntemler içindeki en kötü sonucu lokal polinomal enterpolasyon yöntemi vermiştir.

En küçük eğrilikli yüzey enterpolasyonunda, yüzey bütünüyle ele alındığı için doğruya yakın sonuçlar vermektedir. En küçük eğrilik yöntemi az kırılmaya sahip bölgeler için daha uygundur. Bütün yüzey için enterpolasyon yapıldığından hesap yükü fazla olmaktadır. Ancak günümüzdeki bilgisayar teknolojileri sayesinde artık bu durum zorluk olmaktan çıkmıştır.

Elde edilen sonuçlara göre en iyi kestirim yöntemi Kriging yöntemi olarak belirlenmiştir. Kriging yöntemini diğer yöntemlerden ayıran en büyük özellik variogram modelidir. Kriging yöntemi istatistiksel ve matematiksel olarak çok iyi temellere sahiptir.

Ters mesafe ağırlıklı enterpolasyon yönteminde, ağırlık fonksiyonunun uzaklıkla ters orantılı alınması, dolayısıyla uzaktaki noktaların enterpolasyona etkilerinin azaltılması, klasik ağırlıklı ortalamadan daha iyi sonuç vermesini sağlamaktadır.

Daha önce yapılmış çalışmalarda, kullanılan yöntemler arasında Kriging yönteminin en iyi sonuç verdiği saptanmıştır. Bu çalışma ile, Kriging yönteminin en iyi kestirim yöntemi olduğu deneysel olarak bir kez daha kanıtlanmıştır.

SYM verisinin eksik ve hatalı olduğu durumlarda, uygun enterpolasyon yöntemi kullanılarak doğruluğu yüksek yeni veriler elde edilebilir. Bu durum hem ekonomiktir hem de zaman tasarrufu sağlar. Geoistatistikte önemli bir yere sahip olan Kriging yöntemi yüksek doğruluk elde etmemiz nedeniyle mesleğimizde de kullanılabilir.

8. KAYNAKLAR

- Açıkgöz, M., 2002, İzmit Deprem Anı Yer Değiştirmelerinin Modellenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Alkanalka, E., 2005, Kestirim Metodlarının Sayısal Yükseklik Modeli Üzerindeki Uygulamaları, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 88 s.
- Arslanoğlu, M., Özçelik, M., 2005, Sayısal Arazi Yükseklik Verilerinin İyileştirilmesi, TMMOB Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası 10. Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı, 28 Mart-1Nisan 2005, Ankara.
- Ayar A., 2009, Non Sibson Enterpolasyon Yöntemiyle Yerel Geoit Belirlenmesi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 69 s.
- Ayhan, M.E., Alp, O., Üstün, M., 1993, Rastgele Dağılmış Verilerden Bilgisayar Desteğinde Yüzey Modelleme, T.U.J.J.B., 103-118.
- Baffisfore, A., 1957, A do-it-yourself terrain model, Photogrammetric Engineering, 23, 712-720.
- Bayrak, T., 1996, Sayısal Yükseklik Modellerinde İnterpolasyon Yöntemlerinin Karşılaştırılması, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Trabzon, 62 s.
- Bektaş, S., 1998, *Mühendisler İçin Sayısal Çözümleme Basic Program Örnekleriyle*, Ondokuz Mayıs Üniversitesi Yayınları, Samsun, 225 s.
- Bektaş, S.,2005, *Endirekt ve Koşullu Ölçülerle Dengeleme Hesabı*, Ondokuz Mayıs Üniversitesi Yayınları, Samsun, 207 s.

Bektaş, S., Şişman, Y., 2010, The Comparison of L1 and L2 Norm Minimization Methods, International Journal of the Physical Sciences, Vol. 5 (11), pp. 1721-1727, ISSN 1992-1950©2010 Academic Journal.

Boogaart, K. G. van den, Schaeben, H., 2002, Kriging of Regionalized Directions, Axes and Orientations I. Directions and Axes, Mathematical Geology, Vol. 34, No. 5, 479-503.

Enterpolasyon Yöntemleri,

<http://www.emsi.com/gmshelp/interpolation/interpolation.html>,24.04.2011

Erdoğan, M., 2007, Veri Türü, Kalitesi ve Üretim Yöntemine Göre Sayısal Yükseklik Modeli (SYM) Standartlarının Belirlenmesi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, İstanbul, 136 s.

Erkanlı Y., 1986, Koordinatlandırılmış Modelde veya Alanda, Enterpolasyon, Ekstrapolasyon Yöntemlerinin Uygulanması ve Neticeleri, Harita ve Kadastro Mühendisleri Dergisi,56-57,

http://www.hkmo.org.tr/yayinlar/dergi_goster.php?kodu=99&dergi=1

(05.03.2010).

Güler A., 1978, Sayısal Arazi Modellerinde Enterpolasyon Yöntemleri, Harita Dergisi, Sayı85,53-71,Ocak,Ankara,

http://www.hkmo.org.tr/yayinlar/dergi_goster.php?kodu=106&dergi=1

(08.03.2010).

Güngör, V., 1999, Coğrafi Bilgi Sistemlerinde Ağ Analizi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.

Isaaks, E., Srivastava, R.M., 1989, An Introduction to Applied Geostatistics, Oxford University Press, Oxford, 561 s.

İnal, C., 1996, Yerel Jeoit Geçirilerek GPS Sonuçlarından Yüksekliklerin Belirlenmesi, S.Ü. Müh. Mim. Fak. Dergisi, 11. Cilt, 2. Sayı, S. 15-21.

İnal, C., Turgut, B., Yiğit, C., 2002, Lokal Alanlarda Jeoit Ondülasyonlarının Belirlenmesinde Kullanılan Enterpolasyon Yöntemlerinin Karşılaştırılması, Selçuk Üniversitesi Jeodezi ve Fotogrametri Mühendisliği Öğretiminde 30. Yıl Sempozyumu, 16-18 Ekim 2002, Konya.

İnal, C. Yiğit, C., 2003, Jeodezik Uygulamalarda Kriging Enterpolasyon Yönteminin Kullanılabilirliği, TUJK 2003 Yılı Bilimsel Toplantısı Coğrafi Bilgi Sistemleri ve Jeodezik Ağlar Çalıştayı, 24-25-26 Eylül 2003, Konya.

İnal C., Yiğit C., 2004, Elipsoidal Yüksekliklerin Ortometrik Yüksekliğe Dönüşümünde Enterpolasyon Yöntemlerinin Kullanılabilirliği, S.Ü. Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, c.19,s.1.

Köroğlu, S., 2006, Farklı Enterpolasyon Yöntemlerinin Hacim Hesabına Etkisinin Araştırılması, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 86 s.

Köse, M.H., 2006, Uydu Radar Görüntülerinden Üç Boyutlu Sayısal Arazi Modelin Üretilmesi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Konya, 92 s.

Kriging Enterpolasyon Metodu,

<http://ewr.cee.vt.edu/environmental/teach/smprimer/kriging.html#Kriging>,

30.04.2011

Leberl, F., 1973, Interpolation in a Square Grid DTM, ITC Journal Vol.5, 756-807,

Li, Z., 1990, Sampling Strategy and Accuracy Assessment for Digital Terrain Modelling, Ph. D. Thesis, The University of Glasgow.

Li, Z., Zhu, Q., Gold, C., 2005, *Digital Terrain Modeling, Principles and Methodology*, CRC Press, Florida, 318 s.

Martensson S.G., 2002, Height Determination By GPS-Accuracy with Respect to Different Geoid Models in Sweden, FIG XXII International Congress, Washington DC USA.

Meyer, W., 1985, *Concepts of Mathematical Modeling*, McGraw-Hill Book Company, New York.

Miller, C., Laflamme, R., 1958, The digital terrain model- theory and applications, *Photogrammetric Engineering*, 24, 433-442.

Petrie, G., Kennie, T.J., 1987, Terrain Modeling in Surveying and Civil Engineering, *Comp.-Aided Des.*, 19, 4, 171-187, The University of Glasgow.

Roberts, R., 1957, Using new methods in highway location, *Photogrammetric Engineering*, 23, 563-569.

Saaty, T., Alexander, J., 1981, *Thinking with Models*, Pergamon Press, Oxford.

Shearer, J.W., 1994, The Accuracy of Digital Terrain Models, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Sayı 60, 315-336.

Simple Kriging Enterpolasyonu

http://www.ems.com/gms/help/Interpolation/Kriging/Simple_Kriging.htm,

02.05.2011

Sukumar, N., Moran, B., Semenov, A., Belikov, V.V., 2001, Natural Neighbour Galerkin Methods, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, sayı 50, 1-27.

- Türkeş M., Erkonak H., 1999, Türkiye Sıcaklık Verileri CBS İle Analizi, Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü, Ankara.
- Watson, D.F., Philip, G.M., 1984, Triangle Based Interpolation, Mathematical Geology, Sayı 16, 779-795.
- Yanalak, M., 1991, Sayısal Arazi Modelleri ve Kullanılan Enterpolasyon Yöntemleri, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Yanalak M., 1997, Sayısal Arazi Modellerinden Hacim Hesaplarında En Uygun Enterpolasyon Yönteminin Araştırılması, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 110 s.
- Yanalak M., 2002, Yön ve Ters Uzaklık Ağırlıklı Ortalama ile Enterpolasyon, Harita Dergisi, Sayı 127, 55, Ocak, Ankara.
- Yanalak M., 2002, Sayısal Arazi Modellerinde Yükseklik Enterpolasyonu Harita Dergisi, Sayı 128, 44-58, Ankara.
- Yaprak S., 2007, Kriging Yönteminin Geoit Yüzeyi Modellemesinde Kullanılabilirliğinin Araştırılması ve Var Olan Yöntemlerle Karşılaştırılması, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 142 s.
- Yılmaz, A., 2002, Farklı Kaynaklardan Üretilen Sayısal Yükseklik Modellerinin Karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Zhan-Ji.Y., 1998, Precise Determination Of Local Geoid And Its Geophysical Interpretation, Doktora Tezi, Hong Kong Polytechnich University, Hong Kong, 144 s.

ÖZGEÇMİŞ

Adı-Soyadı: Sevim Bilge KEÇECİ

Doğum Yeri: Elazığ

Doğum Tarihi: 21.05.1987

Bildiği Yabancı Diller: İngilizce

Eğitim Durumu: Ondokuz Mayıs Üniversitesi Jeodezi ve Fotogrametri Mühendisliği Bölümü (2009), Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Harita Mühendisliği Anabilim Dalı (Devam Ediyor)

Çalıştığı Kurumlar: Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Harita Mühendisliği Anabilim Dalı (2010- Devam Ediyor)

İletişim Adresi: Ondokuz Mayıs Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Harita Mühendisliği Bölümü

Telefon: 0362 312 1919-1078

Web Adresi: sevimbilge.kececi@omu.edu.tr