

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**FARKLI ENTERPOLASYON YÖNTEMLERİNİN
HACİM HESABINA ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Müh. Sinan KÖROĞLU**

Anabilim Dalı : JEODEZİ VE FOTOGRAMETRİ MÜHENDİSLİĞİ

Programı : JEODEZİ VE FOTOGRAMETRİ MÜHENDİSLİĞİ

TEMMUZ 2006

**FARKLI ENTERPOLASYON YÖNTEMLERİNİN
HACİM HESABINA ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Müh. Sinan KÖROĞLU
(501961607)**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 3 Temmuz 2006
Tezin Savunulduğu Tarih : 21 Temmuz 2006**

**Tez Danışmanı : Doç.Dr. Yunus KALKAN
Diğer Jüri Üyeleri Doç.Dr. Halil ERKAYA (Y.T.Ü.)
Doç.Dr. Mustafa YANALAK (İ.TÜ.)**

TEMMUZ 2006

ÖNSÖZ

Tez çalışmam süresince bilgileri ve önerileriyle bana yol gösteren değerli hocam Sayın Doç. Dr. Yunus KALKAN' a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca çalışmalarımın gerçekleşmesinde desteklerini esirgemeyen sevgili aileme teşekkürü bir borç bilirim.

Temmuz 2006

Sinan KÖROĞLU

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR	v
TABLO LİSTESİ	vi
ŞEKİL LİSTESİ	vii
SEMBOL LİSTESİ	viii
ÖZET	ix
SUMMARY	x
1. GİRİŞ	1
2. SAYISAL ARAZİ MODELİ KAVRAMI TANIMI VE GENEL ESASLARI	4
2.1. Sayısal Arazi Modelleme Teknikleri	6
2.1.1. Grid Yöntemi	7
2.1.1.1. Uygun Grid Aralığının Seçilmesi	8
2.1.1.2. Yüzey Kestirim Fonksiyonunun Seçimi	8
2.1.2. Üçgenleme Yöntemi	10
2.1.3. Grid ve Üçgen Bazlı Yaklaşımların Karşılaştırılması	13
3. COĞRAFİ VERİ TOPLAMA YÖNTEMLERİ	15
3.1. Sayısallaştırma ile Coğrafi Veri Toplama	15
3.2. Tarama ile Coğrafi Veri Toplama	18
3.3. Video Kayıt ile Coğrafi Veri Toplama	21
3.4. Uzaktan Algılama ile Coğrafi Veri Toplama	21
3.5. Fotogrametrik Yöntemlerle Coğrafi Veri Toplama	22
3.6. Coğrafi Verilerin Doğrudan Araziden Toplanması	23
3.7. Alfasayısal Bilgi Girişi ile Coğrafi Veri Toplama	24
3.8. Sayısal Coğrafi Bilgi Kütüğü İthali ile Coğrafi Veri Toplama	24
3.9. Coğrafi Veri Toplama Yöntemlerinin Değerlendirilmesi	25
4. SAYISAL ARAZİ MODELİNDE KULLANILAN ENTERPOLASYON YÖNTEMLERİ	27
4.1. Ağırlıklı Aritmetik Ortalamayla Enterpolasyon	27
4.2. Polinomlarla Enterpolasyon	28
4.3. Multikvadrik Enterpolasyon	30
4.4. Kayan Yüzey Yardımıyla Enterpolasyon	32
4.5. Kriging Yöntemi	35
4.5.1. Ordinary ve Universal Kriging Yöntemi	37

4.6. Yüzey Toplamlarıyla Enterpolasyon (Lineer Prediksiyon)	41
4.7. Sürekli Parça Parça Polinomlarla Enterpolasyon	45
4.8. Dikdörtgen Gridde Enterpolasyon	47
4.9. Üçgenler Ağında Enterpolasyon	50
4.9.1. Lineer Enterpolasyon	51
4.9.2. Beşinci dereceden polinomlarla enterpolasyon	52
4.9.3. Doğal komşu koordinatlarıyla enterpolasyon	52
4.9.4. Eğrisel (Curvilinear) enterpolasyon	54
4.9.5. Normal Vektörlerle En Küçük Kareler Yöntemine Göre Enterpolasyon	55
4.9.6. Minimum Alan İlkesi Kullanılarak En Küçük Kareler Yöntemine Göre Enterpolasyon	56
4.9.7. Delaunay Komşularıyla Ağırlıklı Ortalama İle Enterpolasyon	57
5. SAYISAL ARAZİ MODELLERİNDEN HACİM HESAPLARI	58
5.1. Eş Yükseklik Eğrilerinden Hacim Hesabı	58
5.1.1. Ortalama Alanlar Yöntemi	58
5.1.2. Uç Alanlar Yöntemi	59
5.1.3. Prizmatik Yöntem	60
5.1.3.1. Simpson Yöntemi	60
5.1.3.2. Simpson 3/8 Yöntemi	60
5.2. Paralel Kesitlerle Hacim Hesabı	61
5.3. Düzenli Dağılmış Dayanak Noktaları ile Hacim Hesabı	61
5.4. Rastgele Dağılmış Verilerle Hacim Hesabı	63
5.4.1. Ortak Bir Referans Düzlemine Göre, Üçgen Prizmalarla Hacim Hesabı	63
5.4.2. Üçgenlerin İzdüşümleri İle Hacim Hesabı	64
6. UYGULAMA	65
7. SONUÇ VE ÖNERİLER	70
KAYNAKLAR	72
ÖZGEÇMİŞ	75

KISALTMALAR

BLUE	: Best Linear Unbiased Estimator
BLUP	: Best Linear Unbiased Predictor
CBS	: Coğrafi Bilgi Sistemi
CCD	: Charged Coupled Device
DIP	: Digital Image Processing
GPS	: Global Positioning System
RGB	: Red Green Blue
RLE	: Run Length Encoding
SAM	: Sayısal Arazi Modeli
SYM	: Sayısal Yükseklik Modeli

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 6.1.	Proje 0'ın Farklı Enterpolasyon Yöntemleri ile Elde Edilen Hacim Değerleri ve Enterpolasyon Süreleri	68
Tablo 6.2.	Proje 1'in Farklı Enterpolasyon Yöntemleri ile Elde Edilen Hacim Değerleri ve Enterpolasyon Süreleri	68
Tablo 6.3.	Proje 2'in Farklı Enterpolasyon Yöntemleri ile Elde Edilen Hacim Değerleri ve Enterpolasyon Süreleri	68
Tablo 6.4.	Proje 3'in Farklı Enterpolasyon Yöntemleri ile Elde Edilen Hacim Değerleri ve Enterpolasyon Süreleri	69
Tablo 6.5.	Proje 4'in Farklı Enterpolasyon Yöntemleri ile Elde Edilen Hacim Değerleri ve Enterpolasyon Süreleri	69
Tablo 7.1.	Proje 0 Veri Kümesine Göre Diğer Veri Kümelerinin Hacim Değerlerinin Yüzdelik Farkları.....	70
Tablo 7.2.	Veri Kümelerinin Enterpolasyon İşlem Süreleri	71

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1 : Topoğrafya gösterim çeşitleri.....	7
Şekil 2.2 : Araziyi örten bir üçgen ağı.....	11
Şekil 3.1 : Fotogrametrik sayısal veri toplama konfigürasyonu.....	22
Şekil 4.1 : Trend Yüzeyi, Enterpole Edilmiş Yüzey ve Gerçek Yüzey.....	42
Şekil 4.2 : Enterpolasyon Noktasının (A) Lokal Barisentrik Koordinatları.....	49
Şekil 4.3 : Üçgende Lokal Barisentrik Koordinatlar.....	51
Şekil 4.4 : Delaunay Üçgenlemesi.....	53
Şekil 4.5 : Veronoi Diyagramı.....	53
Şekil 4.6 : Doğal Komşu Koordinatları.....	54
Şekil 5.1 : Eş Yükselti Eğrilerinden Hacim Hesabı.....	59
Şekil 5.2 : Düzenli Üçgenler Ağı.....	61
Şekil 5.3 : Düzenli Dikdörtgenler Ağı.....	62
Şekil 5.4 : Üçgen Prizmanın Hacmi.....	62
Şekil 5.5 : Dörtgen Prizmanın Hacmi.....	63
Şekil 6.1 : Haliç Bölgesi.....	65
Şekil 6.2 : Haliç ve yakın çevresinin 3-boyutlu görünümü.....	65
Şekil 6.3 : Uygulama Verilerinin 1/1000 Ölçekli Sayısal Harita Üzerindeki Gösterimi.	66

SEMBOL LİSTESİ

n	: Polinomun derecesi
m	: Dayanak noktası sayısı
x_0, y_0, z_0	: Enterpolasyon noktalarının koordinatları
Δz	: Trend yüzeyine göre artık yükseklik değerleri
$z(x, y)$: Trend yüzeyi
a_j	: Polinom katsayıları
R	: Kritik daire yarıçapı
γ	: Kare matris
W	: Ağırlık bilinmeyenleri vektörü
P	: Ağırlık
S	: Yatay uzaklık
k	: Sabit katsayı
Q	: Multikvadrik yüzey
C	: Multikvadrik yüzey katsayıları
F	: Alan
z_x, z_y, \dots, z_{xy}	: Kısmi türevler
σ	: Standart sapma
f	: Serbestlik derecesi

ÖZET

Bu çalışmamızda öncelikle, mesleğimiz açısından birçok uygulama alanı bulan yüzey modelleme ve bunun için geliştirilmiş yöntemler ve bu yöntemleri içinde bulunduran yazılım yardımıyla yöntemlerin hacim hesabına etkisi incelenmiştir. İkinci bölümde Sayısal Arazi Modeli Kavramı Tanımı ve genel esaslarından bahsedilmiş. Üçüncü bölümde Sayısal Arazi Modeline altlık olan coğrafi veri toplama yöntemlerinden bahsedilmiştir. Dördüncü bölümde Sayısal Arazi Modelinde kullanılan enterpolasyon yöntemleri tanıtılmıştır. Beşinci bölümde hacim hesaplama yöntemleri tanıtılmıştır. Altıncı bölümde Haliç bölgesine ait veriler üzerinde bir uygulama yapılmıştır. Otomatik Veri Toplama Sistemi adı verilen modern bir ölçme yöntemi kullanılarak toplanmış olan veriler değerlendirilmiş ve farklı enterpolasyon yöntemleri kullanılarak yüzey modellemesi yapılmıştır. Elde edilen bu yüzeylerin belirli bir $Z=0$ referans yüzeyine göre hacim değerleri hesaplanmıştır. Aynı bölgeye ait farklı sayıda veri gurubu ve değişik enterpolasyon yöntemlerine göre yüzey modellemesi yapılmış ve farklı modellerin sağladığı çözüm süreleri belirlenmiştir. Yedinci bölümde, elde edilen sonuçların bir karşılaştırması yapılarak en uygun enterpolasyon yöntemi ve hesap metodu önerilmeye çalışılmıştır.

SUMMARY

RESEARCHING THE EFFECT OF DIFFERENT INTERPOLATION METHODS ON VOLUME COMPUTATION

In this study antecedently, the surface modelling which includes a various application area for our occupation and the methods to improve and by the help of software includes these methods, the effects of methods on volume account is researched. In the second section Digital Terrain Modelling concept, its definition and general principals are mentioned. In the third section the methods of geographical data collection as a support to Digital Terrain Modelling are mentioned. In the fourth section the interpolation methods that are used in the Digital Terrain Models are introduced. In the fifth section methods of volume computation are introduced. In the sixth section application is done on the datas that belong to Golden Horn. The datas which are collected by a modern measuring methods called Automatic Data Collection are evaluated and by using different interpolation methods, its surface modelling is done. And the volume values of the taken surfaces are calculated according to the definite $Z=0$ reference surface and its surface modelling belongs to the same area is done according to the different data group and interpolation methods. Moreover; the resolution period supplied by the different models are determined. In the seventh section the comparison of the taken results is done and the most suitable interpolation method and computation method are tried to be suggested.

1. GİRİŞ

İçinde bulunduğumuz yüzyılda uluslararası dengelerin yeniden biçimlendirildiği, geçmişten gelen hızlı kentleşme ve kural tanımaz sanayileşmenin doğal kaynaklarda meydana getirdiği kirlenme ve tahribatın giderilmesi yoluna gidildiği, çevreye daha fazla önem ve alakanın gösterildiği bir döneme girilmiştir.

Bu gelişmelerin yansıması sonucu, son yıllarda üretim yapılarında ekonomik ve politik düzende ortaya çıkan önemli değişiklikler, mekansal yapıyı önemli boyutlarda etkilemekte, kentleşme süreçleri ve mekandaki çekim noktaları farklılaşırken geçmişte kontrolsüz kentleşme ve sanayileşme ile kirlenilen kentin doğal mekanları, kirlilik nedeniyle birer atık deposuna dönüşerek geçmişin cazibe merkezi doğal alanlar olmaktan çıkmışlar veya çıkmaktadırlar. Bu alanların tekrar eski haline dönüşmesi için çözüm arayışları sürdürülmektedir. Dolayısı ile bu mekanların eski konumlarına kavuşturulabilmesi için günümüz teknolojisinden yararlanma ihtiyacı, daha da önemli hale gelmiştir.

Geçmiş yıllarda bilgisayar destekli çizim programlarının mesleğimizde, öncelikle kadastro paftalarının çizim ve sayısallaştırılmasında kullanıldıklarını görüyoruz. Daha sonra belediye, imar ve enerji teknik altyapı hizmetlerinde kullanılması ile uygulamalar yaygınlaşmıştır. Bu şekilde harita bilgilerinin sayısallaştırılmasına yönelinmiştir. Sayısal haritaların oluşturulması, elle yapılacak haritalara oranla zaman kazanımı, çizim, çoğaltma ve kullanım kolaylığı ve kullanım yaygınlığı gibi avantajlar sağlamıştır.

Öte yandan konum belirleme sistemlerinde önemli gelişmeler kaydedilmiştir. Özellikle, Global konum belirleme tekniği olan GPS, çok değişik alanlarda uygulama bulmuştur. Bunlardan birisi de, sayısal arazi modelleri için gerekli konum bilgilerinin türetilmesidir.

Günümüzde bilgisayar teknolojisindeki hızlı gelişim bilgisayar kullanımının her alanda yaygınlaşması, daha çok bilginin yoğun bir şekilde işlenmesini ve paylaşımını da beraberinde getirmiştir. Bu gelişmeler bizleri geçmişteki imkanlarla yapılması güç hatta olanaksız gibi görünen işlerin yapılmasına yöneltmektedir. Ölçme aletleri ve

yazılım teknolojisindeki hızlı değişim ve bu değişimin haritacılığın gelişimine önemli katkısı, otomasyon alanında kendini göstermiş, sürat ve doğruluk açısından kayda değer faydalar sağlamış, dar bir alana sıkışmış olan haritacılık mesleğine yeni ufuklar açmıştır. En son teknoloji ile donanmış ölçüm aletleri ve bunlara en uygun yazılımın kullanıcıya bir arada sunulması, geçmişte el ile yapılan uygulamaları bilgisayar ortamında daha hızlı ve daha kolay yapılır hale getirmiştir. Yapılan her işlemin en kısa zamanda neticesini değerlendirme, alınan neticeye göre yöntem ve donanım değişikliği yapma imkanı, dolayısı ile en kısa sürede ve istenen doğruluğa ve maliyet açısından en uygun yöntemin uygulanmasına imkan sağlamıştır.

Bu çalışmamızda öncelikle, mesleğimiz açısından birçok uygulama alanı bulan yüzey modelleme ve bunun için geliştirilmiş yöntemler ve bu yöntemleri içinde bulunduran yazılımlar yardımıyla yöntemlerin hacim hesabına etkisi incelenmiştir. Çalışmanın genel hatlarının ortaya konulduğu Giriş Bölümünden sonra, İkinci bölümde Sayısal Arazi Modeli Kavramı Tanımı ve genel esaslarından bahsedilmiş. Üçüncü bölümde Sayısal Arazi Modeline altlık olan coğrafi veri toplama yöntemlerinden söz edilmiştir. Dördüncü bölümde Sayısal Arazi Modelinde kullanılan enterpolasyon yöntemleri tanıtılmıştır. Beşinci bölümde hacim hesaplama yöntemleri açıklanmıştır. Altıncı bölümde, deniz dibi topografyasının modellemesine yönelik olmak üzere Haliç’de yapılan örnek bir uygulamadan bahsedilmiştir. Bu uygulamada, Deniz dibi topoğrafyasını belirlemek amacıyla çok sık ve düzgün aralıklarda (2 m. x 5 m) ölçülmüş konum ve derinlik bilgileri kullanılarak farklı veri kümeleri oluşturulmuştur. Farklı ölçüm sıklığı ve mesafe aralığına sahip veri kümeleri değerlendirilmiş ve

- Mesafenin Ters Metoduна Göre Enterpolasyon
- Krigging Metoduна Göre Enterpolasyon
- Minimum Eğrilik Metoduна Göre Enterpolasyon
- Shepard's Metoduна Göre Enterpolasyon
- En Yakın Komşu Metoduна Göre Enterpolasyon
- Polinomal Regresyon Metoduна Göre Enterpolasyon
- Radyal Temel Fonksiyonlar Metoduна Göre Enterpolasyon
- Lineer Enterpolasyonla Triangulasyon Metoduна Göre Enterpolasyon

yöntemleri kullanılarak bu veri kümeleri ile yüzey modellemesi yapılmıştır. Elde edilen bu yüzeylerin belirli bir referans yüzeyine ($Z=0$) göre hacim değerleri hesaplanmıştır. Farklı veri kümelerine uygulanan enterpolasyon yöntemlerine göre bulunan hacim değerleri karşılaştırılarak çok yoğun veriye sahip orijinal veri kümesinin diğer veri kümeleri ile yüzdelik farkları hesaplanmış ve farklı enterpolasyon yöntemlerinin işlem süreleri belirlenmiştir. Yedinci bölümde elde edilen sonuçların bir karşılaştırması yapılarak orijinal kümeyle farklı ölçüm sıklığı ve mesafe aralığına sahip diğer veri kümelerine farklı enterpolasyon yöntemlerinin uygulanmasıyla ortaya çıkan hacim değerlerinin yüzdelik farkları karşılaştırılmıştır. Ayrıca, farklı veri kümelerine göre farklı enterpolasyon yöntemlerinin sağladığı doğruluk ve işlem süreleri belirlenmiş ve buna göre yöntemlerin bir sıralaması yapılmıştır.

2. SAYISAL ARAZİ MODELİ KAVRAMI TANIMI VE GENEL ESASLARI

Teknolojideki hızlı değişim bu değişimden doğrudan etkilenen meslek dalı olan Jeodezi ve Fotogrametri Mühendisliğinde de gelişime önemli ölçüde katkıda bulunmuştur. Bu katkı otomasyon alanında kendini göstermiş sürat ve presizyon açısından kayda değer faydalar sağlamıştır. Bilgisayar donanımlarının ve yazılımlarının inanılmaz bir hızla gelişmesi, elle yapılan uygulamaları bilgisayar ortamında daha hızlı ve kolay yapılır hale getirmiştir. Yapılan her işlemin en kısa zamanda neticesini değerlendirme ve alınan neticeye göre değişiklik yapma ve doğru değere ulaşma yönünde önemli aşamalar katedilmiştir. Dolayısı ile proje öncesi tasarım, proje aşaması ve sonrasını da kapsamı Jeodezi ve Fotogrametri Mühendisliği alanında Sayısal Arazi Modelinin önemini ortaya çıkartmıştır.

Sayısal Arazi Modelinin (SAM) ilk olarak 1950 yılların sonunda Massachusetts Teknoloji Enstitüsü (M.I.T) fotogrametri laboratuvarında yapılan çalışmalar ışığında Prof. Miller ve asistanı Laflamme tarafından ortaya atılmıştır (Miller ve Laflamme, 1958).

Sayısal Arazi Modeli (SAM), yeryüzünün, bilgisayarla yapılacak işlemlerde temelini oluşturan sayısal gösterimidir. Bu tanım dar anlamda sadece yükseklik verilerini, geniş anlamda ise hem yükseklik hem de planimetrik verileri içermektedir.(Alkış, 1997)

SAM oluşumu için, arazi yüzeyi üzerinde uygun biçimde dağılmış, konum ve yükseklikleri (X,Y,H) 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'da dayanak noktalarının seçilmesi, bu noktaların X, Y, H koordinatlarının ölçümü ve uygun bir enterpolasyon yöntemi ile bu dayanak noktaları yardımıyla diğer istenen noktaların koordinatlarının belirlenmesi SAM'ın iki önemli problemini oluşturur. (Yanalak, 1991)

SAM oluşturulurken, şu koşullar olabildiğince sağlanmalıdır:

1. Mümkün olduğunca az sayıda dayanak noktasıyla SAM oluşturulmalıdır,
2. Arazi bilgileri verimli bir şekilde istenmelidir,
3. SAM, arazinin topografyasını yeterli incelikte bir yaklaşımla temsil etmelidir,

Enterpolasyonla yükseklikleri elde edilen noktalar için, hesaplama süresi çok fazla olmamalıdır. (Acar, 1994)

Bu koşulların gerçekleşme olasılığı, arazi tipine, dayanak noktalarının dağılımına, enterpolasyon yöntemine ve hesaplayıcının hızına bağlıdır. (Yanalak, 1991)

SAM'in oluşturulabilmesi için, seçilen yüzey noktalarının X, Y, H koordinatları ile beraber uygun bilgisayar programlarına gereksinim vardır. Programlar yardımıyla, uygun bir enterpolasyon yöntemi seçilerek dayanak noktalarına bağlı olarak yeni noktaların koordinatları elde edilir. Böylece elde edilen bütün veriler, başka bilgi sistemleri için veri olarak kullanılabilir.

SAM için ilk veriler farklı yöntemlerle elde edilir. Bunlar;

1. Yersel ölçülerle doğrudan
2. Topoğrafik harita ve planlardan dolaylı
3. Fotogrametrik ölçülerle dolaylı

olarak yapılır.

Bir SAM oluştururken yüksek doğruluk elde etmek için her aşamada dikkatli olunmalıdır: Verilerin elde edilmesinde iyi bir ölçme yöntemi kullanılmalı, dayanak noktaları yeterli sayıda ve yoğunlukta belirlenmeli, kullanılacak enterpolasyon yöntemi iyi seçilmeli ve arazi yapısı dikkate alınmalıdır (Yanalak, 1991).

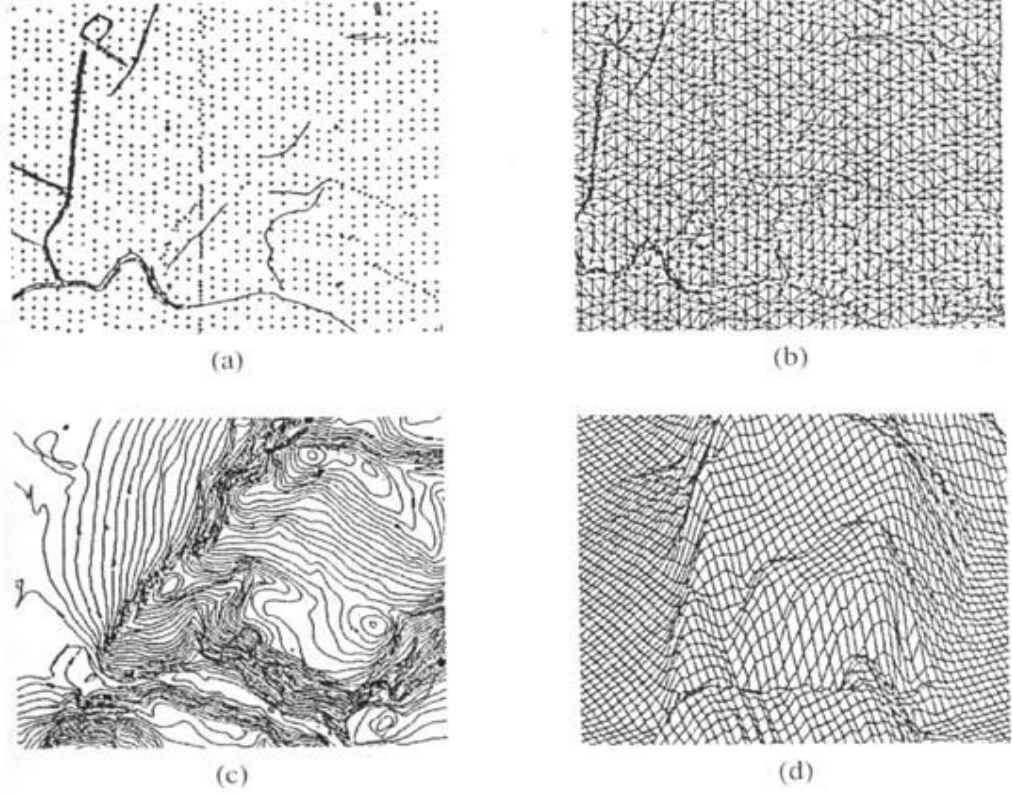
2.1 Sayısal Arazi Modelleme Teknikleri

Sayısal Yükseklik Modeli (SYM) terimi, yeryüzünün her hangi bir formda (örneğin düzenli gridler, üçgen ağlar ve düzensiz spot noktaları ve kırıklı çizgiler) dijital kartografik temsili olarak kullanılabilir. Yüksekliği önemli topografik detaylar ve değişim noktaları (kırıklı çizgiler) arazi üzerine düzensiz olarak bulunmakta ve arazinin şeklini daha iyi belirtmektedirler. Kırıklı çizgiler yüzeydeki sürekliliğin veya düzgünlüğün değişimini temsil eden çizgisel detaylardır. Kullanımı yaygın olan iki kırıklı çizgi yapısı vardır (Heipke, 1996):

- Yumuşak kırıklı çizgiler: Çizgisel bir detay boyunca bilinen Z değerleri korunmakta ve TIN yüzey modelindeki poligonların kenarlarını oluşturmaktadırlar. Yüzeyin devamlılığında kırıklıklara yol açmamaktadırlar.
- Sert kırıklı çizgiler: Yüzeyin sürekliliğindeki kesilmeleri ifade etmektedir. Keskin yüzey değişimleri ile tanımlanan vadi, dere, sırt, baraj ve diğer yapılardan oluşmaktadırlar.

Topoğrafya, klasik topoğrafik haritalar dışında değişik analitik ve sayısal yöntemlerle de temsil edilebilir (Şekil 2.1). Bu temsil; gridler, üçgen kafesler, profiller ve eş yükseklik eğrileri şeklinde yapılabilir (Kraus ve Waldhausl, 1993).

Topoğrafik haritalar grafik formda olduklarından görüntü olarak araziye oldukça iyi bir şekilde temsil ederler. Ancak günümüz mühendislik uygulamalarında, görüntüden başka ihtiyaçlar da söz konusudur. Kazı, dolgu (toprak hacmi) hesabı, karayolu güzergahı tespiti, iletişim ağlarında ulaşılan / ulaşılamayan alanların tespiti, arazinin eğim karakteristiği gibi yanıtlanması istenen problemler için grafik olarak üretilen haritalar anında yanıt veremezler. Bu nedenle, arazinin grafik gösterim dışında sayısal olarak temsil edilebilmesi ihtiyacından yola çıkarak değişik matematik modeller geliştirilmiştir. Dayanak noktaları kullanılarak, uygun yöntemi içeren bir yazılım yardımıyla arazinin sayısal gösterimi olarak tanımlanan, SYM kavramı iki farklı yöntemle elde edilebilmektedir. SYM verilerinin, profiller boyunca ya da belirli grid ağı noktalarında ölçümü ve çiziminin yapılması olanaklıdır (Yılmaz, 2002).



Şekil 2.1 Topoğrafya gösterim çeşitleri

(a. Profiller, b. Üçgen kafes, c. Eş yükseklik eğrisi, d. Düzenli grid)

2.1.1 Grid Yöntemi

Raster yöntemi olarak da adlandırılır. Yüzey modellemeye ya da yüzey yerleştirmede belki de en basit yaklaşım, yüzeyi oluşturan noktaların grid köşelerinde seçilmesi ve bu noktalara ait bilgilerin ölçülmesi ya da toplanmasıdır. Ancak daha önde de belirtildiği gibi araziye temsil eden kritik noktalara ait bilgiler de toplanabilir. Bu durumda rasgele konumdaki datayı grid konumdaki dataya dönüştürmek gerekmektedir.

Grid bazlı yaklaşım, günümüzde SYM üretiminde hala en yaygın yöntem olarak kullanılmaktadır. Bu yöntemde arazi yüzeyi üzerine kare veya dikdörtgen gridler yerleştirilir ve grid düğüm noktalarının yükseklikleri hesaplanır. Yükseklik değerlerinin kestirimi için çok sayıda yöntem vardır. Yöntemlerden hiçbirisinin tüm yüzeylere uyduğu ve en iyi yöntem olduğu söylenemeyeceği gibi veriye en çok uyan yöntemin tespiti hala araştırılan bir husustur. Bir uygulama için çok iyi sonuç veren bir yöntem, başka bir uygulamada arzu edilmeyen sonuçlar türetebilmektedir.

Çalışılan yüzeyin özelliklerine, beklenen doğruluğa ve elde mevcut donanım ve yazılımlara göre farklı yöntemler kullanılmaktadır. SYM uygulamalarında sonuç ürünlerden biri olarak karşımıza çıkan eş yükseklik eğrisi, grid köşe noktalarından kestirilen yükseklik değerlerinden yararlanılarak elde edilmektedir.

2.1.1.1 Uygun Grid Aralığının Seçilmesi

SYM uygulamalarında önemli konulardan biri de, kestirimde grid aralıklarının uygun seçilmesidir. SYM gridleme yöntemi ile elde edildikten sonra, elde edilecek ürünler grid dataya dayanmaktadır. Bu nedenle grid datanın arazi ya da yüzeyin özelliklerini gerçeğe en yakın bir biçimde temsil etmesi beklenir. Yapılan çalışmalarda, kestirim yapılacak grid nokta sayısının, yaklaşık olarak dayanak noktası sayısına eşit olması gibi bir sonuç çıkmıştır. Ancak şeritler ya da kolonlar şeklinde toplanan veri kümelerinin gridlenmesinde, bu yaklaşım her zaman olumlu sonuç vermemektedir. Bu nedenle kabul edilen diğer bir kriter; grid aralığının, gridlenecek bölgede birbirine en yakın iki dayanak noktası arasındaki mesafenin en fazla yarısı olması şeklindedir (Gruen 1998, Özer 1986). Bazı uygulamalarda arazi yüzeyini temsil edebilmek için kare yerine dikdörtgen grid ağları kullanıldığı bilinmektedir. Yine yüzey temsilde farklı alanlarda farklı grid aralıklarının kullanılması denenmiş fakat organizasyon ve hesap yükü açısından çok fazla desteklenmemiştir (Öztürk, 2004).

2.1.1.2 Yüzey Kestirim Fonksiyonunun Seçimi

Yüzey modellendirmede kestirim fonksiyonunun seçimi oldukça önemlidir. Yüzey fonksiyonlarının çoğunun temsil edecekleri arazinin geometrisi ile doğrudan ilişkisi yoktur. Kullanılacak fonksiyonun, arazinin geometrisini, bazı uygulamalarda fiziki özelliğini en iyi yansıtan fonksiyon olmasına dikkat edilmelidir. Literatürde çok sayıda kestirim fonksiyonu vardır. Fonksiyon sayısındaki bu çokluk, aslında her türlü araziye uyan optimum bir fonksiyonun bulunamaması olarak yorumlanabilir. Bu nedenle fonksiyon seçimi, hala, daha çok kullanıcıya kalmış bir konu olmaya devam etmektedir. Kestirim fonksiyonunun seçiminde şu hususlara dikkat etmek gerekmektedir:

- Gridleme ile oluşacak yüzey sürekli olmalı, kesiklikler bulunmamalı,
- Hesaplama kolaylığı ve sürat sağlamalı,
- Matematiksel olarak çalışılan konu ile ilişkili olmalıdır.

Temelde üç farklı kestirim tekniği vardır. Nokta nokta (yerel) kestirim, tüm araziyi kapsayan bir tek (global) fonksiyonla kestirim ve yerel olarak tanımlanmış parça parça fonksiyonlarla kestirim.

Nokta nokta kestirimde, yüksekliği bulunacak noktayı çevreleyen kritik daire (veya kare) nin iç tarafına düşecek biçimde ölçülmüş dayanak noktaları seçilir. Bu yaklaşımda, yerel kestirim fonksiyonlarının oluşturduğu yüzey süreklidir. Dayanak noktasının etkisinin mesafeyle azalması yada artması ağırlık kavramı ile açıklanır. Grid noktasına yakın olan ölçüler, kestirimde uzak noktadakilere göre daha etkilidir. Nokta nokta kestirimde, her noktaya ait yüksekliğin hesaplanmasında ayrı ölçü yada dayanak kümesi kullanıldığından, sonuçta grid kümeye ait yükseklikler düzenli ve sürekli bir yüzey oluşturacaktır (Öztürk, 2004).

Günümüzde kullanılan SYM yazılımlarının birçoğunda nokta nokta kestirim yöntemi tercih edilmektedir. Nokta nokta kestirimin kullanımı esnek olduğundan, parça parça yada global fonksiyonlara göre daha doğru sonuçlar vermesi beklenmelidir.

Global Kestirim yaklaşımında tüm dayanak noktalarının kullanıldığı bir yüzey oluşturulur, bir tek $Z = f(x,y)$ fonksiyonunu belirlemek için bütün dayanak noktaları aynı anda kullanılır. Oluşan yüzey bütün dayanak noktalarından geçer. Tüm bölgeye, rastgele konumdaki ölçü noktalarından yararlanılarak yüksek dereceden bir polinom ile üç boyutlu bir yüzey uydurulur. Bu yüzey tanımlandıktan sonra, diğer bir ifadeyle yüzeyi temsil eden polinomun katsayıları belirlendikten sonra grid köşelerine ait yükseklikler enterpole edilir. Küçük ölçü kümelerinin kullanıldığı çalışmalarda global teknik oldukça iyi sonuçlar vermektedir (Torlegard, 1988).

Parça parça kestirim yaklaşımı, nokta nokta kestirim ile global kestirim arası bir yöntemdir. Parça parça kestirimde bütün sayısal arazi modeli daha küçük ve eşit parçalara bölünür. Her bir parça, seçilen bir fonksiyonla gösterilir. Böylece, aynı anda çok sayıda bilinmeyen hesaplanması problemi çözülmüş olur. Ancak parçaların sınırları boyunca çatlaklar ve kesiklikler, süreksizlikler oluşabilir. Bu nedenle parça parça kestirim yöntemi uygulanırken sürekliliği sağlayan önlemlerin alınması gerekir. Global kestirime olan en büyük üstünlüğü her bir parça için bilinmeyenlerin ayrı hesaplanması, daha az sayıda bilinmeyen olmasıdır. En büyük dezavantajı ise global kestirimden daha çok düzenleme gerektirmesidir. Bindirmeli yaklaşımın tercih edilmesi durumunda, alt bölgeler arasındaki bindirme oranının

seçiminde, dayanak noktalarının sıklığı ve grid aralığı dikkate alınmalıdır (Torlegard, 1988).

Dayanak noktaları grid köşelerinde yer alabileceği gibi, rasgele konumda da bulunabilir. Bu durum iki şekilde gerçekleşmektedir:

- Fotogrametrik model üzerinden doğrudan ölçmelerle,
- Arazi üzerinde rastlantısal olarak dağılmış dayanak noktalarının ölçülmesi ile.

Kullanılacak bir enterpolasyon yöntemi ile grid köşe noktalarındaki yükseklik değerleri belirlenir. Her bir grid, köşe noktalarındaki yükseklik değerleri ve gerekirse eğim değerlerine dayanan bir fonksiyon ile ifade edilir.

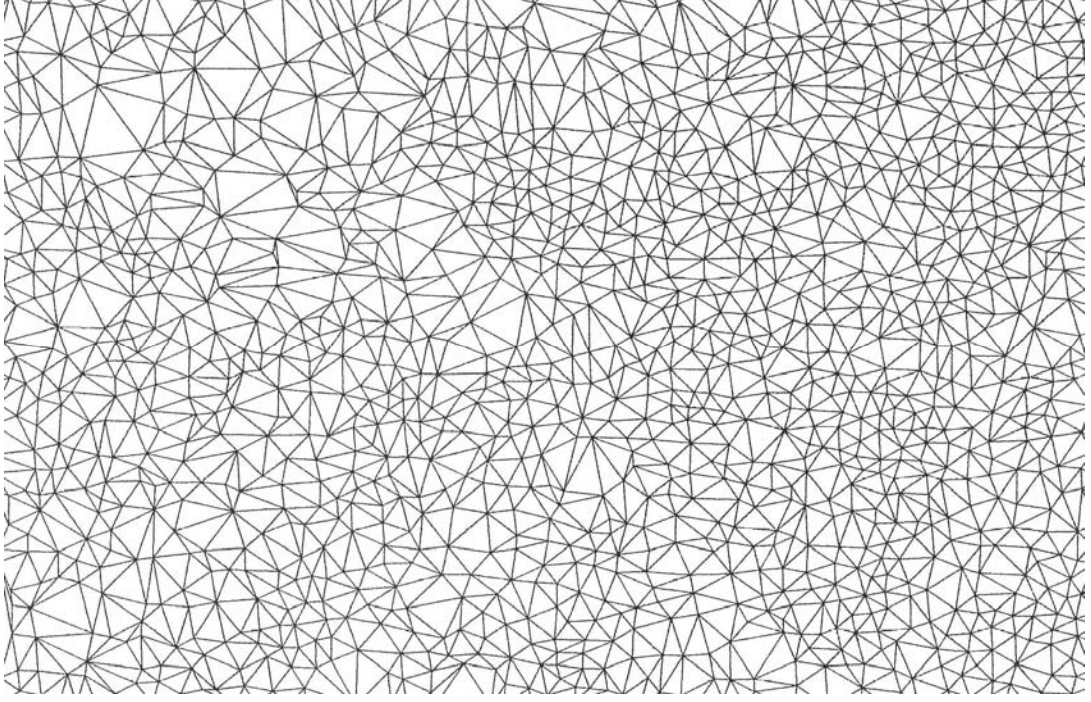
2.1.2 Üçgenleme Yöntemi

Üçgenleme yöntemi, günümüzde artan bir şekilde arazi yada yüzey modellemede kullanılmakta olup Düzensiz Üçgen Ağı (TIN - Triangular Irregular Network) biçiminde de kullanılmaktadır. Düzensiz olarak bulunan x,y koordinatlı ve z değerli noktalardan oluşan birbirlerine komşu ve bindirmesiz üçgen setlerinden oluşmaktadır. TIN veri yapısı, küme noktası ve kırıklı çizgi olarak yorumlanan, düzensiz olarak dağılmış nokta, çizgi ve poligon verilerinden oluşmaktadır. TIN modeli üçgenler ve komşu kenarları arasındaki topolojik ilişkileri saklar. Bu veri yapısı, arazi ve diğer yüzey çeşitlerinin görüntülenmesi ve analizi için kullanışlı yüzey modelleri oluşturulmasına olanak sağlamaktadır (Heipke, 1996).

Bir TIN yüzeyi aşağıdaki kaynakların bir veya daha fazlasından oluşturulabilir:

- Nokta, çizgi ve poligon verileri,
- Eş yükseklik haritaları,
- Stereo kıymetlendirme verileri,
- ASCII formdaki rasgele dağılmış noktalar,
- Kırıklı çizgi verileri,
- SYM kafes yapısı

Arazi yüzeyine rastlantısal ya da düzgün olarak dağılmış bulunan dayanak noktalarının birleştirilmesi ile arazi düzlem üçgenlerden (TIN) oluşan çok yüzlü (polihedron) bir yüzeyle kaplanır (Şekil 2.2).



Şekil 2.2 Araziyi örten bir üçgen ağı.

Bu şekilde elde edilen triangülasyon ağlarının bazıları topoğrafik yapı çizgileri ve arazinin kırık çizgileri üzerinde bulunan dayanak noktalarına, üçgenlemede bir öncelik vermeksizin tüm noktaların aynı nitelikte olduğu varsayımına dayanır. Bu ağlarda sözgelimi yapı çizgilerini üçgen kenarları kesebilir. Daha sonraki çalışmalarda ise, arazinin yapısını gösteren iskelet çizgilerin ve kırık çizgilerin üçgenlerin mutlaka bir kenarını oluşturması sağlanmıştır.

Bu amaçla noktaların tanınmasını sağlayan bir kodlama sistemi kurulur. Bu kodlama, noktalar arasındaki ilişkiyi ve noktanın bulunduğu yerin özelliğini belirtir. Birçok olanak gözönünde bulundurularak dayanak noktalarından oluşturulan triangülasyon ağının kısa kenarlı üçgenlerden meydana gelmesi amaçlanır. Böyle bir ağ, minimal ağırlıklı triangülasyon ağı olarak adlandırılır.

Üçgenlerin enterpolasyonu uygulamada lineerdir, noktalara filtreleme uygulanmamaktadır. Bir TIN yüzeyi nokta, çizgi, poligon verisi, eş yükseklik haritaları, fotogrametrik veriler, ASCII dosyalarındaki rasgele dağılmış noktalar, kırıklı çizgi verileri, SYM ağları gibi verilerden biri veya daha fazlası kullanılarak oluşturulabilir. Üçgenlerdeki küresellik dikkate alınmamaktadır. Bu yöntemde yüzey üçgenlerle temsil edilmekte, dayanak noktaları üçgenlerin köşe noktalarını oluşturduğundan yüzey dayanak noktalarından geçmektedir. Üçgenler içine giren

kestirim noktalarına ait yükseklikler, üçgenlerin köşe noktalarındaki yükseklikler yardımıyla değişik fonksiyonlar kullanılarak hesaplanmaktadır. Bu teknikte en önemli nokta, etkin bir üçgenleme algoritmasına ihtiyaç duyulmasıdır. Bu amaçla geliştirilmiş çok sayıda üçgenleme algoritması kullanılmaktadır. Üçgenleme yöntemi ne olursa olsun temelde göz önünde bulundurulması gereken hususlar vardır. Bunlar; oluşturulan üçgenlerin mümkün olduğunca kenarlarının eşit olması ve düzgün bir görünümde olmaları şeklinde özetlenebilir (Öztürk, 2004). Uygulamada farklı üçgenleme yöntemleri olup, en çok uygulananlar arasında Delaunay Üçgenleme Yöntemi ve Açısal Süpürme Yöntemi gelmektedir.

Delaunay yönteminde, mümkün olduğunca eş kenarlı üçgenlerin oluşturulmasına çalışılır. Bu yöntem üçgen bazlı yaklaşımı uygulayan SYM yazılımlarının çoğunda uygulanmaktadır. Bu yöntemde, arazi yüzeyi üçgen yüzeylerinin toplamı şeklinde ifade edilir. Rasgele veya düzgün şekilde dağılmış olan dayanak noktaları üçgenlerin köşe noktalarını oluşturur. Birbirleri üzerine binmeyen bu üçgenlerin her biri lineer veya lineer olmayan bir fonksiyonla ifade edilir.

Oluşturulacak üçgen ağı aşağıdaki koşulları sağlamalıdır (Gruen, 1998):

- Her dayanak noktası en azından bir üçgende bulunmalıdır.
- Arazi yüzeyini örten üçgenlerin birbiri ile ara kesiti sıfır olmalıdır.

Ağı oluşturan kenarların uzunluklarının toplamı minimum olmalıdır.

$$\sum_{i=1}^n |S_i| = \min . \quad (2.1)$$

Bu fonksiyon türünün belirlenmesi için; aşağıdaki enterpolasyon yöntemlerinden birisi seçilir:

- Minimum alan ilkesini kullanarak en küçük kareler yöntemine göre enterpolasyon,
- Lineer enterpolasyon,
- Beşinci dereceden polinomlarla enterpolasyon,
- Eğrisel enterpolasyon,
- Normal vektörlerle en küçük kareler yöntemine göre enterpolasyon.

Açısal Süpürme Yöntemi Delaunay üçgenleme yöntemine alternatif olarak geliştirilmiş bir yöntem olup Mirante ve Weingarten tarafından 1982 yılında geliştirilmiştir.

2.1.3 Grid ve Üçgen Bazlı Yaklaşımların Karşılaştırılması

Grid yöntemi ile ilgili sonuçlar şunlardır (Gruen, 1998):

- Enterpolasyon tekniği nedeniyle çok basit organize edilmesi ve grid yüksekliklerinin kolay bir şekilde depolanması olanağı, bu yöntemin en önemli avantajıdır.
- Yüzey modellemede SYM ve SZM verilerinin çok iyi bilinen üstünlükleri vardır. Örneğin eğim, baki, uzunluk ve alan hesaplama; hacim ve yarma-dolma hesabı; eş yükseklik eğrisi oluşturma; yüzey Z değerlerinin enterpolasyonu; çoklu yüzeyler üzerinde profiller oluşturma; görünürlük analizleri; üç boyutlu görüntüleme ve simülasyon (Heipke, 1996).
- Diğer taraftan bir gridin tamamı depolanmak zorundadır. Kural olarak gridin yoğunluğu her zaman dayanak noktalarının yoğunluğundan fazladır.
- Düzgün aralıklı bir gridde kırık-çizgilere ait bilgiler bulunmamaktadır. Bunlar ancak grid çizgileri ile kesim noktalarının özel olarak depolanması ile dikkate alınabilir. Bu çalışma oldukça zor olup ilave bellek gereksinimi göstermektedir.

En küçük kareler yönteminin kullanılması durumunda, hesaplama zamanı çözülmesi gereken denklem sisteminin büyüklüğüne ve dolayısı ile hesap biriminin büyüklüğüne bağlıdır.

Üçgenleme yöntemi ile ilgili sonuçlar şunlardır:

- Dayanak noktalarının rasgele dağılmış olması üçgenlemede bir zorluk yaratmaz, aksine dayanak noktalarının ölçümünü kolaylaştırır.
- Veri noktalarının üçgen köşelerini oluşturması, yüzeyin gerçeğine daha uygun olduğunun bir göstergesidir. Gridlemede ise, elde edilen yüzey grid noktalarından geçmekte, yüzeyin gerçekten teorik olarak farklı olduğu da bilinmektedir.
- Arazinin yapısı ve yüzeyler doğrudan dikkate alınır, sınırların yeni bir poligonla tanımlanması gerekmez.
- Bellek gereksinimi grid yöntemine göre çok daha azdır.

- Üçgenleme ve enterpolasyon için gerekli zaman dayanak noktalarının sayısı ile doğru orantılıdır.
- Organizasyon, grid yöntemine göre daha karmaşıktır. Fakat gelişen bilgisayar teknolojisi ile birlikte bu dezavantaj ortadan kalkmıştır.
- Özellikle büyük veri kümeleriyle çalışıldığında, hesap süresi açısından çok daha avantajlı olduğu görülmektedir (Özer, 1986).

TIN modeli, SYM ve SZM'den daha az sayıda veriye ihtiyaç göstermektedir. Yakınlık ve komşuluk analizlerinin yapılabildiği topolojik olarak kodlanmış ve arazideki süreksizlikleri temsil eden kritik noktaların toplanması yeterlidir (Heipke, 1996).

3. COĞRAFI VERİ TOPLAMA YÖNTEMLERİ

Mekan bilgisi olarak da isimlendirebileceğimiz bu veriler, uygulamada 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).

(1) Sayısallaştırma ile coğrafi veri toplama

(a) Manuel (El-ile) sayısallaştırma

(b) Otomatik çizgi izleyerek

(2) Tarama ile coğrafi veri toplama

(3) Video kayıt ile coğrafi veri toplama

(4) Uzaktan algılama ile coğrafi veri toplama

(5) Fotogrametrik kıymetlendirme ile coğrafi veri toplama

(6) Coğrafi verilerin doğrudan arazide toplanması (Arazi ölçmeleri ile)

(7) Alfasayısal bilgi girişi ile coğrafi veri toplama

(8) Sayısal coğrafi bilgi kütüğü ithali ile coğrafi veri toplama

Bu yöntemlerin teknikleri ile birlikte, avantaj ve dezavantajları aşağıda incelenmiştir.

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, manuel veya otomatik çizgi izleyici sayısallaştırıcılar kullanılır.

Manuel sayısallaştırma: Manuel sayısallaştırma ile vektör yapındaki grafik veriler toplanır. Manuel 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.

Bir manuel sayısallaştırıcı iki ana birimden oluşur. Sayısallaştırma masası ve sayısallaştırma cihazı (imleç (cursor), kalem, mouse sayısallaştırıcılar v.b).

Bugün kullanılan en duyarlı manuel sayısallaştırıcılarda masa yüzeyinin hemen altına hassas ve sık bir tel ağı yerleştirilmiştir. İmleç tuşuna basıldığında yayılan elektronik sinyal bu tel ağı tarafından algılanır ve masa koordinat sisteminde x,y koordinat çifti olarak elektronik konum bilgisine dönüştürülür.

Tipik bir sayısallaştırma programı ile masa üzerinde sabitlenen haritada önce referans noktaları sayısallaştırılır. Program referans noktalarının belli bir koordinat sistemindeki koordinatlarını alır ve bu noktaların sayısallaştırılan masa koordinatlarını da kullanarak dengeleme hesabı ile iki sistem arasındaki dönüşüm parametrelerini belirler. Dengelemenin fonksiyonel modeli olarak benzerlik veya afin dönüşüm bağıntıları kullanılır. Bu dönüşümler için referans noktaları olarak sadece pafta köşelerinin alınması yeterlidir. Dönüşüm parametreleri belirlendikten sonra sayısallaştırmaya geçilir. Sayısallaştırıcı cihaz ile sayısallaştırılacak detay (örneğin yükseklik eğrileri) üzerinde sayısallaştırma cihazının imleci veya ucu hareket ettirilir. Sayısallaştırma programı sayısallaştırılacak altlık üzerindeki çizimi bir çizgiler ve tek noktalar kümesi olarak görür. Alanların çevresi bir kapalı poligon gibi sayısallaştırılır. Sonuçta elde edilen sayısallaştırıcı masa koordinatlarıdır. Dönüşüm parametreleri sayesinde ise istenen koordinat sistemine dönüşüm yapılır.

Manuel sayısallaştırmada amaca göre değişik sayısallaştırma türleri geliştirilmiştir.

Bunlar ;

-Nokta Sayısallaştırma: Her tuşa basılda bir nokta sayısallaştırılır.

-Zaman Artımlı Sayısallaştırma: Tuşa basılı olarak çizgi izlenirken belli zaman aralıklarında kendiliğinden sayısallaştırılır. Özellikle eş yükselti eğrisi karakterindeki çizgilerin sayısallaştırılmasında, çizginin dönüş aldığı yerlerde operatörün 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 edilmemekte, az verildiğinde ise düz yerlerde gereksiz fazlalıkta nokta 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 eksenini bir önceki sayısallaştırma noktası ile son noktayı birleştiren doğrultudadır ve eni ile boyu programla belirlidir. İmlecin 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 tesbit 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) maksadıyla geometrik geliştirme programından geçirilir.

Manuel sayısallaştırma ile elde edilen grafik kütük çoğunlukla sphagetti yapıdadır. Daha sonradan bu kütükler yapılandırma programları ile düğüm-kenar veya daha ileri topolojik yapılara çevrilebilir. Bugün güçlü çalışma istasyonlarında doğrudan etkileşimli topolojik sayısallaştırma yapan yazılımlar da kullanılmaktadır.

Otomatik çizgi izleyerek 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. Başka bir deyişle bilgisayarca okunabilir ortama dönüşüm tekniği rasterdir, ancak sonuç doğrudan vektörel olarak elde edilmektedir.

Bu yöntem için bir 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 imleçe 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 gelindiğinde son bulur. Bu esnada operatör "bitir" veya "devam et" komutu verir. Kavşaklarda yada birbirine çok yakın çizgilerde operatör müdahale eder ve hangi yöne devam edileceğini belirtir. Böylece sayısallaştırma operatör kontrolünde bütün çizgiler tamamlanıncaya kadar devam eder.

Sayısallaştırma esnasında sayısallaştırma doğrultusu kontrol edilmek suretiyle seyrekleştirme anında yapılabilmektedir. 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 editleme istasyonunda gerekli düzeltmeler yapılabilir (Güngör, 1999).

3.2 Tarama ile Coğrafi 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 görüntülediğinde sadece insan gözü için anlamlı olan bu veriler, tarama sonrası işlemlerle bilgisayarca işlenebilir konum verileri haline dönüştürülür. Tarama tekniği olarak Doğrusal Fotodiod veya CCD (Charged Coupled Device) ile tarama kullanılır. Tarama piksel piksel (grid karesi) yapılır. Raster tarayıcılarda piksel boyutu 12.5, 25, 50, 100 ve 200 mikron gibi belli değerlere ayarlanabileceği gibi 12.5 ile 250 mikron arasında istenen herhangi bir değere de bağlanabilir. Örneğin 50 mikron çözünürlük için 1 mm² lik alan 20x20= 400 piksele ayrılır.

Raster tarayıcıların en önemli parçası CCD dir. CCD özel bir kamera içine yerleştirilmiş ve ışığa karşı duyarlı çok küçük hücrecikleri (8-30 bin tane) içeren bir hücre dizisidir. Taraması yapılacak kaynak materyalin (çok iyi temizlenmesi gerekir) küçük bir bölümü (piksel boyutu kadar) bir ışık kaynağı ile aydınlatılır. Kaynak materyalden kameraya yansıyan ışın CCD üzerine düşer ve buradaki herbir hücrecik üzerine düşen ışın, şiddetine göre önce analog voltaja ve sonra bu analog voltaj da

ikili bit dizisine dönüştürülür. Böylece her biri bir pikseli temsil eden her hücrecik tarafından karşılığı olan harita noktasından yansıyan ışının şiddeti bitlerle kodlanmış olur. Her piksel için 8 bit kaydedildiğinde $2^8=256$ değişik ışın şiddeti algılanmış olur ve bunlar grinin tonları olarak yorumlanırlar. Gri tonları yerine renkli bir sayısal görüntü elde edebilmek için, aynı kaynak materyal kırmızı, yeşil ve mavi filtrelerle üç kere taranır ve üç raster kütüğü birleştirilerek görüntülenir. Bu tür raster kütüklere RGB (Red Green Blue) kütükleri denilmektedir. Bunun yanısıra CCD kamera önüne koyulan kırmızı, yeşil, mavi filtrelerle sadece belli renklerin veya renk kombinasyonlarının algılanması mümkün olduğu gibi, hiç filtre kullanılmadan orijinal renk yansımaları ile de tarama yapılabilir.

Buraya kadar açıklanan şekildeki taramaya sürekli tonda (continious tone) raster tarama denilmektedir. Bu şekildeki tarama sonucunda yüksek hacimli veri ortaya çıkacağından elde edilen kütüğü raster olarak editleyebilmek ve işleyebilmek için güçlü çalışma istasyonlarına ihtiyaç duyulur. Bu nedenle sürekli tonda sayısallaştırma daha çok tematik haritalar veya fotoğraflar için kullanılır.

Özellikle eşyükselti eğrileri gibi çizgisel kaynak materyalin sürekli tonda taranması uygun değildir. Sürekli tonda taramanın alternatifi RLE (Run Length Encoding) yöntemidir. Bu yöntemde bir çizgi boyunca her pikselde yansıma değerinin belli bir eşik değeri aşıp aşmadığı kontrol edilir. Böylece kaynak materyalin o noktasının siyah mı yoksa beyaz mı olduğu saptanır. RLE kütükleri az yer kaplamakta ve vektöre çevirme algoritmaları için uygun bir format sunmaktadır.

Raster tarayıcılar silindir veya masa tipli olabilmektedir. Silindir tipli tarayıcılarda kaynak materyal bir silindir üzerine sarılır. Silindirin her dönüşünde CCD kamera bir çizgiyi taramış olur. CCD kamera silindir eksenini doğrultusunda hareket ettikçe tüm yüzey belli aralıklardaki çizgiler ile taranmış olur. Masa tipli tarayıcılarda ise CCD kameranın bulunduğu kafa y eksenini boyunca bir kol üzerine yerleştirilmiştir. Kol x eksenini boyunca hareket ederken bir çizgi taranır ve CCD kamera kaydırılarak bütün yüzey taranmış olur.

Raster taramadan sonra elde edilen ham raster kütük adeta bir sayısal fotokopi gibidir. Kaynak materyalde bulunan çizgi kalınlıklarının değişimi, renk tonunun değişimi, kopukluklar, çapaklar ve lekeler gibi birçok hata hemen hemen aynen

sayısal kopyaya aktarılmış olur. Bu hatalar raster editleme ile giderilebilir ya da yer tasarrufu açısından önce vektöre dönüştürülerek, vektör olarak editlenir.

Raster editleme: Raster editlemede pikseller üzerinde işlem yapılır. Temel işlemler şunlardır:

- Leke temizleme: Kaynak materyalin kirlenmesi veya eskimesi nedeniyle oluşan siyah piksellerin silinmesi
- Delik doldurma: Siyah bir alan içindeki beyaz deliklerin siyahla doldurulması
- Yumuşatma: Keskin kenarların yumuşatılması
- Poligon silme: Verilen bir kapalı poligon içeriğini silme
- Boyama: Elle serbest fırçalama veya püskürtme
- Döndürme: Tüm kütüğün veya verilen bir kapalı poligon içeriğinin döndürülmesi
- Ters Çevirme: Tüm kütükte veya verilen bir kapalı poligon içinde siyahların beyaz, beyazların siyaha çevrilmesi
- Taşıma, Kopyalama: Verilen bir kapalı poligon içeriğinin başka bir konuma taşınması veya kopyalanması
- Doldurma, Silme: Verilen bir kapalı poligon içeriğinin siyahla doldurulması veya silinerek beyaza çevrilmesi
- Ölçek Değiştirme
- Esnetme: Raster görüntünün belli bir referans şekle uydurulması için esnetilmesi.

Vektör editleme, yapılandırma ve etiketleme: Rasterdan vektöre dönüştürülen grafik veriler orijinal ile çok iyi bir uyum göstermesine rağmen yanlış mantıksal birleştirmeler (ardışık iki münhani çizgisinin birleşmesi), çapak (spur), kopukluk (gap) gibi nedenlerle, ayrıca vektöre dönüşüm esnasında veya karakter/sembol tanımlaması yapılırken çözümlenmeden kalmış veriler (uncenterlined) nedeniyle son bir vektörel editleme gereklidir. Bu vektörel editlemeler otomatik veya etkileşimli olabilmektedir. Teknik olarak geometrik editlemeye dayalıdır.

Daha sonra anlamsız olan bu grafik veriler etiketlenerek anlamlı hale getirilir. Örneğin münhani çizgilerine yükseklik değerlerinin atanması (Güngör, 1999).

3.3 Video Kayıt ile Coğrafi Veri Toplama

Video sayısallaştırıcılar "framegrabber" adlı özel bir analog-sayısal dönüştürücüye bağlı bir kameradan oluşmaktadır. Framegrabber, video cihazından gelen (video kasette kayıtlı veya televizyondan 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 ekranından aynı anda görüntüler. İşlemcisi hızlı bir çalışma istasyonunun ekranında hareketli sayısal film görüntüsü bile elde etmek mümkündür. Sayısallaştırma tek resim veya resim dizisi (hareketli film) için yapılabilir (Güngör, 1999).

3.4 Uzaktan Algılama ile Coğrafi Veri Toplama

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

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

CBS için coğrafi veriye dönüştürülmek üzere algılama tekniği ile toplanan veriler algılayıcılarına göre aşağıdaki gruplar altında incelenebilir (Güngör, 1999).

- LANDSAT MSS (Multi Spectral Scanner, 64 ayrı gri tonu kodlu)
- LANDSAT TM (Thematic Mapper, 256 ayrı gri tonu kodlu)
- SPOT HRV (High Resolution Visible, 256 ayrı gri tonu kodlu)
- Airborne MSS (Uçuş yüksekliğine göre piksel boyutu ve tarama şeridi genişliği değişir).

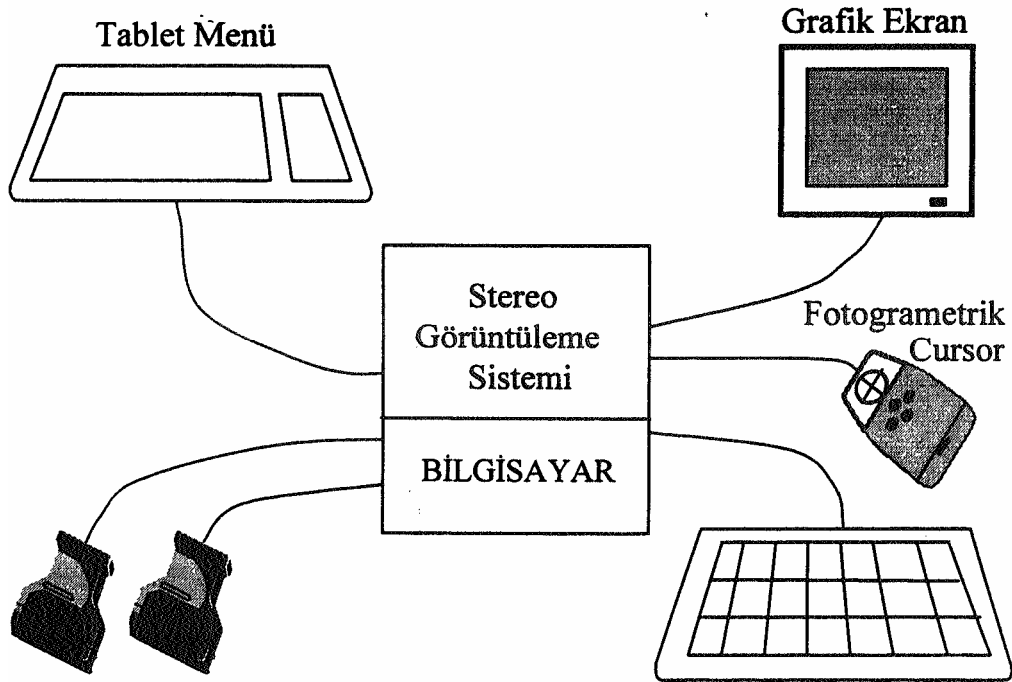
Bunlardan ilk üçü LANDSAT ve SPOT uydu platformlarına yerleştirilmiş algılayıcılardır.

Çeşitli elektromanyetik bantlarda toplanan bu veriler çeşitli tekniklerle işlendiğinde

- Planimetrik (x,y) konumu,
- Topoğrafik/batimetrik (z) yüksekliğine ait bilgiler türetilmektedir.

3.5 Fotogrametrik Yöntemlerle Coğrafi Veri Toplama

CBS için fotogrametrik yöntemle veri toplamada kaynak materyal olarak stereo hava fotoğrafları veya stereo SPOT görüntüleri kullanılmaktadır. Bu görüntüler analitik stereo kıymetlendirme aletleri ile değerlendirilerek detaylara ilişkin X,Y,Z koordinatları kaydedilir. Tipik bir fotogrametrik sayısal veri toplama konfigürasyonu, (analitik stereo kıymetlendirme cihazı) aşağıdaki şekilde görülmektedir (Şekil 3.1).



Şekil 3.1 Fotogrametrik sayısal veri toplama konfigürasyonu

Bu yöntemle toplanan veriler normal harita sayısallaştırma ile toplanan verilerden farklı olarak üç boyutludur ve daha duyarlıdır. Ayrıca bu yöntemle daha güncel bilgiler toplanır.

Yakın gelecekte iki fotogrametrik sayısal veri toplama yöntemi oldukça yaygınlaşacaktır. Bunlardan birisi "Foto tarama" yöntemidir. Bu yöntemde tek hava

fotoğrafi çok küçük piksel boyutlarında (7.5,12.5 mikron) raster taranmakta, elde edilen gri kodların bölgeye ait sayısal arazi modeli ile rektifikasyonu sağlanmakta ve sonra sayısal görüntü işleme yöntemi ile işlenmektedir. İkinci yöntem "soft-copy(sayısal) fotogrametri" yöntemidir. Stereoskopik resim çiftinden optik olarak üç boyutlu model oluşturma yerine bu yöntemde resimler önce CCD kamera ile raster taranmakta ve bu raster görüntü çifti polarizasyon ile bir renkli grafik ekranda aynı anda görüntülenmektedir. Bu görüntüye özel bir gözlük ile bakılarak grafik ekranda üç boyutlu arazi modeli görülmekte ve ölçü markası yerine cursor kullanılarak değerlendirme yapılmaktadır(Güngör, 1999).

3.6 Coğrafi Verilerin Doğrudan Araziden Toplanması

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'ne aktarılabilir. Bunun yanında, bu verilerin toplanması anında doğrudan

SAM 'ne aktarılması da mümkündür. Araziden konum verisini toplayıp doğrudan SAM 'ne aktaran bugün için iki ayrı olanak vardır.

- Total Station
- GPS

Total station: Hedef olarak yansıtıcı prizmalar kullanan total station aletleri aslında elektronik takeometre veya teodolitler ile elektronik uzaklık ölçerlerin bir elektronik kayıt cihazı ile birleştirilmesinden oluşurlar. Total station aletlerinde yansıtıcı prizmaya yapılan yatayaçı, düşeyyaçı ve eğik kenar ölçüleri elektronik olarak bir kayıt cihazına kaydedilir. 500-1000 noktanın kaydının yapılabilirdiği bu cihazlar daha sonra bir bilgisayara bağlanır ve ölçü dosyası bir transfer programı ile bilgisayara aktarılır. Genellikle ASCII kodlu ve belli bir formattaki bu dosyalar önce bir format dönüşümünden geçirilir ve bir koordinat geometrisi (COGO) yazılımı ile prizma noktalarının üç boyutta koordinatları hesaplanabilir. Daha sonra bu COGO kütükleri de dönüşüm programları yardımıyla SAM' e aktarılır.

GPS'den coğrafi bilgi sistemine veri aktarımı: GPS (Global Positioning System, Global Konumlama Sistemi) Jeodezik bir ölçü aracı olduğu kadar, daha da yaygın olarak bir navigasyon aracıdır. Geo Research Inc. isimli bir firmanın gerçekleştirdiği entegrasyonla GPS verilerinin anında bir CBS'ne aktarılması mümkün olabilmektedir. Bu sistemde bir GPS alıcısı doğrudan bir dizüstü bilgisayarına bağlanarak bir araca monte edilmiştir. Bu bilgisayara ARC/INFO CBS yazılımı ve entegrasyonu sağlayan GeoLink yazılımı yüklenmiştir. Araç ilerlerken belli aralıklarla (örneğin saniyede bir) alınan GPS konum ölçüleri doğrudan ARC/INFO kütüklerine aktarılmakta ve dizüstü bilgisayar ekranında daha önceden var olan grafik kütükle birlikte görüntülenebilmektedir. Böylece adeta tüm yeryüzeyi bir sayısallaştırma masası bu araç da bir imleç yerine geçmektedir. Alınan sonuçlar duyarlılık açısından oldukça olumludur. Üstelik ARC/INFO nun düğüm-kenar yapısı ve ölçü anında öznitelik bilgi de girilebilmesi birçok olanak yaratmaktadır. Yol haritalarının revizyonu, navigasyon vb. birçok uygulamada kullanılması beklenen bu sistem gelecekte yepyeni ufuklar açabilecek potansiyeldedir (Güngör, 1999).

3.7 Alfasayısal Bilgi Girişi ile Coğrafi 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 dizüstü 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. Bir veri giriş operatörünün ortalama hızı saatte 12000 tuştur. Hatalı veri girişlerini önlemek için kontrol mekanizmaları geliştirilmeli veya formatı belli dosyalardan programlar yardımıyla hata ayıklaması yapılmalıdır (Güngör, 1999).

3.8 Sayısal Coğrafi Bilgi Kütüğü İthal ile Coğrafi Veri Toplama

Sayısal Harita Üretimi uygulamaları giderek yaygınlaştıkça her geçen gün üretilen sayısal coğrafi veri dosyaları da artmaktadır. Coğrafi bilgi toplamının en ucuz yolu daha önce üretilmiş olan coğrafi bilgi dosyalarını teyp, disket ve benzeri off-line

ortamlardan veya bilgisayar ağıları üzerinden on-line olarak transfer programları yardımıyla CBS ortamına aktarmaktır (Güngör, 1999).

3.9 Coğrafi Veri Toplama Yöntemlerinin Değerlendirilmesi

Manuel sayısallaştırma ile elde edilen grafik kütük çoğunlukla sphagetti yapıdadır. Daha sonradan bu kütükler yapılandırma programları ile kenar-düğüm veya daha ileri topolojik yapılara çevrilebilir. Manuel sayısallaştırma, nokta ve çizgiler biçiminde özetlenebilecek çizimlerin sayısallaştırılması için uygun bir yöntemdir. Sonuçta iki boyutlu bir vektörel kütük üretilir. Duyarlılığı büyük ölçüde operatörün kartoğrafik çizim becerisine bağlıdır. Daha çok yoğun olmayan detay sayısallaştırılmasına uygundur.

Otomatik çizgi izleyerek sayısallaştırma daha çok çizgi sayısallaştırmaya yöneliktir. Özellikle münhane kalıplarının sayısallaştırılması için ideal bir çözümdür. Tematik haritaların bu yöntemle sayısallaştırılması daha güçtür. Duyarlılığı ve hızı çok iyidir. Ancak sayısallaştırma öncesi filme kopyalama zorunluluğu işletim maliyetini arttırmaktadır.

Raster tarama ile coğrafi veri toplama, gerek sürekli tonda (fotoğraf vb.) gerekse çizgisel kaynak materyalin sayısallaştırılması için hızlı ve duyarlı bir yöntemdir. Kaynak materyalin kalitesi çok önemlidir; kartoğrafik kalitesi düşük bir kaynak materyal hem duyarlılığı olumsuz yönde etkiler hem de editleme için çok zaman gerektirir. Ayrıca renkli kağıt haritalarda renk ayırımı ile sayısallaştırmada hala daha birçok sorun vardır. Raster tarama yönteminin en önemli dezavantajı ilk yatırımın çok yüksek olmasıdır.

Video sayısallaştırma ile coğrafi veri toplama bugün için çok yaygın olmamakla beraber büyük bir gelecek vaat etmektedir. Tek resim olarak hava fotoğraflarının kullanılması ile yepyeni boyutlar kazanması ve bu teknolojinin soft-copy fotogrametri olarak gelecekte yerini alması beklenmektedir.

Günümüzde CBS yazılımları giderek artan oranda uzaktan algılama kaynaklı coğrafi verileri ithal edebilmektedir. Çünkü özellikle tematik amaçlı çalışmalarda alan detayların toplanması için küçük ölçeklerde etkin ve ekonomik bir yöntem durumundadır. LANDSAT-TM, LANDSAT-MSS, SPOT-HRV ve uçakta MSS verileri genelde raster yapıdadır. Bu veriler sayısal görüntü işleme (DIP:Digital

Image Processing) teknikleri ile işlenerek, bunlardan raster veya vektör formda birçok coğrafi veri türetilmektedir.

Fotografik yöntemle toplanan detay verileri vektörel formda ve sphagetti yapıdadır. Sphagetti yapıda görülen kopukluk, taşma, boşluk ve üstüste binme (undershoot, overshoot, gap, sliver) gibi geometrik sorunlar etkileşimli editleme ile giderilse dahi SAM' a aktarıldıktan sonra yapılandırılmaları ve düğüm kenar yapıya çevrilmeleri gerekir. Fotogrametrik yöntemle toplanan bu vektörel verilerin harita sayısallaştırma ile toplanan vektörel verilerden en önemli farkı üç boyutlu (x,y,z üçlülerinden oluşan vektörler) olmalarıdır. Fotogrametrik yöntemle toplanan verilerin bir diğer önemli özelliği de duyarlılığıdır. Bugünkü fotogrametrik kıymetlendirme cihazlarından resim ölçeğine ve aletin duyarlılığına bağlı olmak kaydıyla detaylar örneğin 1m. gibi bir duyarlıkta sayısallaştırılabilmektedir. 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 ulaşamamıştır. 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 (veri sıklığı)
- Transfer formatı konularında yoğunlaşmaktadır(Güngör, 1999).

4. SAYISAL ARAZİ MODELİNDE KULLANILAN ENTERPOLASYON YÖNTEMLERİ

Enterpolasyon, dayanak noktalarındaki ölçme değerlerinden, ölçülmeyen noktalardaki ölçü büyüklüklerinin kestirimidir. Sayısal Arazi Modeli (SAM), koordinatları bilinen noktaların yüksekliklerini belirlemeyi ve yükseklikleri bilinen noktaların koordinatlarının bulunmasını, bu noktalara eğri uydurarak eş yükseklik eğrilerinin oluşturulmasını, eş yükseklik eğrilerinden faydalanarak kesitlerin çıkarılmasını ve hacim hesaplarını içermektedir (Yanalak, 1991). İki boyutlu dayanak uzayında tanımlanan bir boyutlu raslantısal fonksiyonun enterpolasyonu, gerçekte bir yüzey uydurma problemidir.

Bu problemin çözümü için şu 3 yaklaşım söz konusudur:

1. Tüm araziye kaplayan bir tek fonksiyonla enterpole etmek
2. Yerel olarak tanımlanmış parça parça fonksiyonlarla enterpole etmek
3. Nokta nokta enterpole etmek

Kullanılan enterpolasyon yöntemleri bu üç yaklaşıma göre sınıflandırılır. Enterpolasyon sistemleri hakkında genel bir çerçeve çizilebilmesi amacıyla önemli enterpolasyon yöntemleri sırayla birer başlık altında ele alınacaktır.

4.1 Ağırlıklı Aritmetik Ortalamayla Enterpolasyon

Bu yöntemde enterpolasyon noktasının yüksekliği, çevresinde bulunan dayanak noktalarının yüksekliklerinden ağırlıklı olarak hesaplanır. Her bir dayanak yüksekliğine verilecek olan ağırlık değeri o noktanın enterpolasyon noktasına olan uzaklığın bir fonksiyonudur. Bir enterpolasyon noktasının yüksekliği,

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

eşitliği ile bulunur. Açıkça yazmak gerekirse,

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

olur. Matris gösterimiyle,

$$z_o = \underline{p}^T \underline{z} / \underline{p}^T \underline{1} \quad (4.3)$$

yazılabilir. Burada,

$$\underline{p}^T = (p_1 + p_2 + \dots + p_m) \quad (4.4)$$

ağırlık vektörünü, $\underline{1}$ birim vektörü. \underline{z} ise dayanak noktalarının yükseklik vektörünü gösterir. Ağırlık fonksiyonu olarak (x_i, y_i) herhangi bir dayanak noktasının, (x_0, y_0) yüksekliği belirlenecek enterpolasyon noktasının konum koordinatları olduğuna göre;

$$p_i = [(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2]^{-k} = (s_i^2)^{-k}, \quad i=1,2,\dots,m \quad 2k=1,2,3 \quad (4.5)$$

eşitliği kullanılabileceği gibi.

$$p_i = e^{(-s_i^2/k^2)}, \quad i=1,2,\dots,m \quad k=3,4,5 \quad (4.6)$$

şeklindeki Gauss fonksiyonu da kullanılabilir (Güler, 1978).

Dayanak noktası sayısı arttıkça, her bir enterpolasyon noktası için yapılacak işlem sayısı artacaktır. Bu kadar yüklü işlemden kaçınmak için, her bir enterpolasyon noktasının yüksekliği, o noktanın çevresinde çizilen kritik daire içinde kalan dayanak nokta yüksekliklerinden hesaplanır. Daire yerine bir kare veya dikdörtgen kullanmak da mümkündür. Daire dışında kalan dayanak noktaları hesaba katılmaz. Bu nedenle önem kazanan kritik daire büyüklüğü, yöntemin uygulanacağı araziye göre farklı büyüklüklerde seçilebilir.

4.2 Polinomlarla Enterpolasyon

Bu yöntemin ana fikri arazi yüzeyini tek bir fonksiyonla ifade etmektir. x, y, z koordinatları ile bilinen dayanak noktalarının oluşturduğu arazi yüzeyinin, n' inci dereceden bir polinomla matematiksel ifadesi,

$$z(x, y) = \sum_{k=0}^n \sum_{i=0}^k a_{ij} x^i y^j \quad (4.7)$$

şeklindedir. Burada,

a_{ij} : Polinomun bilinmeyen katsayılarını

n : Yüzeyin derecesini

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

Yüzeyin derecesi seçime bağlı olmasına rağmen, SAM uygulamalarında genellikle 2.ve 3. derece polinomlar kullanılır. Yüzeyin derecesi arttıkça gereksinim duyulan dayanak nokta sayısı da artmaktadır. Bu da dayanak noktalarının yeterli sayıda olmaması durumunda büyük hatalara neden olur. İlk bakışta, polinom derecesinin artmasıyla SAM' dan elde edilecek doğruluğun artacağı sanısına rağmen bu doğru değildir. Derecenin artmasıyla yüzeyde gereksiz salınımlar oluşur. Yüzeyde oluşan ani iniş çıkışlar arazi yüzeyinde gerçeğe uygun olmayan yükseklik değişimlerine neden olur. (4.7) formülünde $n=2$ alındığında k sırasıyla 0,1 ve 2 değerlerini alır. k değerine karşılık i, j çiftinin alabileceği değerler,

$$k=0 \Rightarrow (i=0, j=0)$$

$$k=1 \Rightarrow (i=2, j=1) \quad (i=1, j=0)$$

$$k=2 \Rightarrow (i=2, j=0) \quad (i=1, j=1) \quad (i=0, j=2)$$

2.derece polinomun açık matematiksel ifadesi,

$$z(x, y) = a_{00} + a_{01}y + a_{10}x + a_{20}x^2 + a_{11}xy + a_{02}y^2 \quad (4.8)$$

olur.

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

$$\Delta z = a_{00} + a_{01}y_L + a_{10}x_L + a_{20}x_L^2 + a_{11}x_L y_L + a_{02}y_L^2 - z_L \quad (4.9)$$

olur.

$$\sum_{L=1}^m \Delta z_L^2 = \min \quad (4.10)$$

koşulundan yararlanarak dengelenmiş yüzeyin katsayıları belirlenir. Düzeltme denklemlerinin sayısı çoğu kez elle düzenlenemeyecek kadar fazla olabilir. Lineer denklem takımlarının çözümü ve bilgisayar belleğinden yer kazancı için uygun yöntemler kullanılmalıdır (Öztaş, 1981, 1983, 1986). n.derece bir polinom kullanılması durumunda polinomdaki katsayıları (bilinmeyenlerin) sayısı artar. Yapılacak işlem sırasında bir değişiklik olmaz. Oluşturulacak düzeltme denklemleri genel olarak.

$$\Delta z_L = z(x_L, y_L) - z_L \quad L=1,2,\dots,m \quad (4.11)$$

şeklinde (4.10) koşulundan yola çıkılarak kurulan normal denklem takımının çözümü, bilinmeyenleri (katsayıları) 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.

4.3 Multikvadrik Enterpolasyon

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).

Trend yüzeyi olarak n. dereceden bir polinom kararlaştırılması durumunda, $z(x_j, y_j)$ polinomunun katsayıları ve dayanak noktalarındaki Δz_j artık yükseklik değerleri (düzeltmeler) hesaplanır (polinom katsayılarının sayısı dayanak noktalarının sayısından az olmalıdır),

$$\Delta z_j = z_j - z(x_j, y_j) \quad j=1,2,\dots,m \quad (4.12)$$

$$\sum_{j=1}^m C_j [(x_j, y_j, x, y)] = \Delta z \quad (4.13)$$

genel ifadesi ile verilen multikuadrik yüzey, m sayıda aynı türden Q yüzeyinin toplamından oluşur. C_j katsayıları her bir Q yüzeyinin eğimini ve işaretini belirler ve Δz_j artık yükseklik değerleri yardımıyla hesaplanır. Literatürde, her bir Q yüzeyinin simetri eksenini bir dayanak noktasından geçecek şekilde aşağıdaki multikuadrik yüzeyler önerilmiştir (Hardy 1971, Yanalak 1997):

- İki yapraklı dairesel hiperboloid serilerinin toplamı (k , sabit bir katsayıdır)

$$\sum_{j=1}^m C_j [(x_j - x)^2 + (y_j - y)^2 + k]^{1/2} = \Delta z \quad (4.14)$$

- Dairesel paraboloid serilerinin toplamı,

$$\sum_{j=1}^m C_j [(x_j - x)^2 + (y_j - y)^2 + k] = \Delta z \quad (4.15)$$

- Dairesel dik konilerin toplamı,

$$\sum_{j=1}^m C_j [(x_j - x)^2 + (y_j - y)^2]^{1/2} = \Delta z \quad (4.16)$$

C_j katsayılarının belirlenmesinde, dayanak noktalarının bilinen $(x_j, y_j, \Delta z_j)$ değerlerinden yararlanılır. Multikuadrik yüzey olarak dairesel dik konilerin seçildiği kabulü ve herhangi iki dayanak noktası için,

$$[(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2]^{1/2} = a_{ij} \quad j=1,2,\dots,m \quad (4.17)$$

kısaltması ile (4.16) eşitliği,

$$\sum_{j=1}^m C_j a_{ij} = \Delta z_i \quad i=1,2,\dots,m \quad (4.18)$$

şeklini alır. (4.18) bağıntısından,

$$C_1 a_{11} + C_2 a_{12} + C_3 a_{13} + \dots + C_m a_{1m} = \Delta z_1$$

$$\begin{aligned}
C_1 a_{21} + C_2 a_{22} + C_3 a_{23} + \dots + C_m a_{2m} &= \Delta z_2 \\
C_1 a_{31} + C_2 a_{32} + C_3 a_{33} + \dots + C_m a_{3m} &= \Delta z_3 \\
&\vdots \\
C_1 a_{m1} + C_2 a_{m2} + C_3 a_{m3} + \dots + C_m a_{mm} &= \Delta z_m
\end{aligned} \tag{4.19}$$

denklem sistemi elde edilir. Matris gösterimi ile,

$$\underline{A} \cdot \underline{c} = \underline{\Delta z} \tag{4.20}$$

yazılabilir.

Burada $\underline{A}(m \times m)$ lik katsayılar matrisini, $\underline{c}(m \times 1)$ lik bilinmeyenler matrisini ve $\underline{\Delta z}(m \times 1)$ lik artık yükseklik matrisini göstermektedir. Bilinmeyen C_j katsayıları,

$$\underline{c} = \underline{A}^{-1} \underline{\Delta z} \tag{4.21}$$

şeklinde belirlenir. \underline{A} matrisinin simetrik ve köşegen elemanlarının 0 olduğu göz önüne alınırsa işlemler daha kolaylaşacaktır. C_j katsayılarının belirlenmesi ile multikvadrik yüzey oluşmuş demektir. (x_0, y_0) koordinatları bilinen herhangi bir enterpolasyon noktasının yüksekliği.

$$z_0 = z(x_0, y_0) + \Delta z_0 = z(x_0, y_0) + \sum_{j=1}^m C_j [(x_j - x_0)^2 + (y_j - y_0)^2]^{1/2} \tag{4.22}$$

eşitliği ile hesaplanır. Dayanak nokta sayısı arttıkça yöntemin hesap yükü artar. Bu yük özellikle C_j katsayıları belirlenirken alınacak invers işleminden kaynaklanmaktadır. Yöntem hakkında temel kaynak olarak Hardy (1971, 1972, 1975 ve 1990), Yanalak (1997) verilebilir.

4.4 Kayan Yüzey Yardımıyla 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. Günümüzde ise, (4.7) bağıntısı ile genel olarak ifade edilen polinomlar kullanılmakta ve 1., 2., veya 3. dereceden polinomlar yeterli bulunmaktadır (Schut 1976, Leberl 1973, Wolf 1981, Yanalak 1997).

Herhangi bir enterpolasyon noktasının yüksekliğinin hesaplanabilmesi için, öncelikle, bu noktanın yakın çevresinde bulunan dayanak noktaları yardımıyla, söz konusu noktaya ait yüzeyin belirlenmesi (a_{ij} katsayılarının hesabı) gereklidir. Enterpolasyon noktasının yakın çevresi iki şekilde tanımlanabilir:

- Tüm yüzey yakın çevre olarak kabul edilir. Bu durumda dayanak noktalarının tümü ile hesap yapılır.
- Seçilen bir kritik daire yarıçapı ile, enterpolasyon noktası merkez olmak üzere çizilen kritik dairenin içi yakın çevre olarak tanımlanır ve yalnızca bu daire içindeki dayanak noktaları dikkate alınır. Daire yerine kritik kare veya dikdörtgen ile de işlem yapılabilir. Ancak dayanak noktaları sayısı bilinmeyenlerin (a_{ij} katsayılarının) sayısından fazla olmalıdır. Bu durumda a_{ij} katsayıları dengeleme hesabıyla bulunur.

Dayanak nokta yüksekliklerine, enterpolasyon noktasından uzaklığa bağlı olarak ağırlıklar verilir ve

$$\underline{Az}^T . p . \underline{Az} = \min \quad (4.23)$$

koşulundan hareketle,

$$\underline{a} = (\underline{A}^T \underline{P} \underline{A})^{-1} \underline{A}^T \underline{P} \underline{l} \quad (4.24)$$

çözümüne ulaşılır. (4.24) eşitliğinde,

\underline{A} : dayanak noktası koordinatlarını içeren katsayılar matrisi,

$$\underline{A} = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ 1 & x_m & y_m \end{bmatrix} \quad (4.25)$$

\underline{a} : yüzeyin katsayılarını içeren bilinmeyenler vektörü,

$$\underline{a} = \begin{bmatrix} a_{00} \\ a_{10} \\ a_{01} \end{bmatrix} \quad (4.26)$$

\underline{l} : dayanak noktası yüksekliklerini içeren mutlak terimler vektörü.

$$\underline{l} = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ z_m \end{bmatrix} \quad (4.27)$$

\underline{P} : ($m \times m$) boyutlu köşegen matrisidir.

Günümüze kadar çok çeşitli ağırlık fonksiyonları önerilmiştir (Schut 1976, Yanalak 1997).

AĞIRLIK MODELLERİ:

1. $P = (1 - r^2) / r^2$

2. $P = 1 / r^k$ $k=1,2,3$ veya 4

3. $P = 1 - 0,9 r^2$

4. $P = (1 - r^2)^3 (1 - r^2)^3 / r^k$ $k=1$ veya 2

5. $p = e^{(-kr^2)}$ $k=14$ veya 20

$P = 1 - 2 r^2$ $(r < 0.5)$

6.

$P = 2 (1 - r)^2$ $(r \geq 0.5)$

7. $p = e^{-s^2/k^2}$ (Gauss Fonksiyonu) $k=3,4$ veya 5

Bu formüllerde

- r : Enterpolasyon noktasıyla dayanak noktası arasındaki uzaklığın, enterpolasyon noktası ile dayanak noktası arasında olabilecek maksimum uzaklığa (örneğin kritik daire yarıçapı) oranı,
- s : dayanak noktası ile enterpolasyon noktası arasındaki uzaklık,
- k : uygulamalardan elde edilmiş katsayılarıdır.

Yukarıda açıklanan dengeleme hesabına başlamadan önce, koordinat sisteminin başlangıcı enterpolasyon noktasına taşınırsa, enterpolasyon noktasının yüksekliği dengeleme sonunda bulunacak olan a_{00} katsayısına eşit olur.

4.5 Kriging Yöntemi

Kriging, bu tekniği ilk geliştiren D.G. Krige isimli Güney Afrikalı bir maden mühendisinden adını almaktadır. Kriging konumsal tahmin için geoistatistiksel yöntemdir. Bu yöntem, matematiksel jeodezide kollokasyon olarak bilinen en iyi lineer yansız tahminci (BLUP [best linear unbiased predictor]) ya da en iyi lineer yansız hesaplayıcı (BLUE [best linear unbiased estimator]) olarak tanımlanır (Boogaart ve Schaeben, 2002). Kriging ve kollokasyon yöntemlerinin karşılaştırılması Dermanis (1984) tarafından yapılmıştır (Martensson, 2002). Kriging yöntemi birçok alanda kullanılabilirliğini ve popülaritesini kanıtlamış geoistatistiksel bir enterpolasyon yöntemidir (Golden Software 2002).

Kriging yönteminin temeli bölgesel değişkenler teorisine dayanır. Yükseklikler tarafından temsil edilen olaylarda konumsal değişim yüzey boyunca istatistiksel olarak homojendir. Yüzey; sabit bir ortalama yada trend'den oluşan yapısal bir bileşen, rastgele fakat konumsal olarak korelasyonlu bileşen ve konumsal olarak korelasyonsuz kalıntı hata terimi olmak üzere üç ana bileşenin toplamı olarak ifade edilir (Martensson, 2002).

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

$$Z_p = \sum_{i=1}^n W_i Z_i \quad (4.28)$$

şeklindedir.

Burada;

Z_p : P noktasının aranan ondülasyon değeri

W_i : Z_p nin hesabında kullanılan her bir Z_i ye karşılık ağırlık değerleri

Z_i : Z_p nin hesabında kullanılan noktaların ondülasyon değerleri

n : Z_p nin hesabında kullanılan nokta sayısı

Bu formüllerde Z değerleri konumları ile belli ondülasyon değerlerini göstermekte.

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

- Simple Kriging
- Ordinary (Punctual) Kriging
- Universal Kriging
- Block Kriging
- Indicator Kriging
- Disjunctive Kriging
- Cokriging

olarak sunulabilir.

Kriging enterpolasyon yönteminde (4.28) nolu formül incelendiğinde 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 (Isaaks ve Srivastava, 1989).

4.5.1 Ordinary ve Universal Kriging Yöntemi

Ordinary Kriging yönteminde bölgesel değişkenlerin durağan ve ortalamasının sabit olduğu varsayımına göre çözüme gidilir. Kriging yönteminde ağırlıkların belirlenmesine ilişkin detaylı matematiksel ve istatistiksel yaklaşımlarla, kovaryans fonksiyonundan denklem çıkarımları (Isaaks ve Srivastava, 1989)'da ayrıntılıca açıklanmıştır.

Variogram fonksiyonundan ağırlıkların belirlenmesin de aşağıdaki yol izlenir.

Ağırlıklar,

$$\text{Var}[\hat{Z}_p - Z_p] = \min \quad (4.29)$$

olması koşuluna göre türetilen

$$\begin{aligned} W_1\gamma(h_{11}) + W_2\gamma(h_{12}) + \dots + W_n\gamma(h_{1n}) &= \gamma(h_{1p}) \\ W_1\gamma(h_{21}) + W_2\gamma(h_{22}) + \dots + W_n\gamma(h_{2n}) &= \gamma(h_{2p}) \\ &\vdots \\ W_1\gamma(h_{n1}) + W_2\gamma(h_{n2}) + \dots + W_n\gamma(h_{nn}) &= \gamma(h_{np}) \end{aligned} \quad (4.30)$$

lineer denklem sistemine göre çözümlenir. Matris gösterimi ile

$$\gamma W = \gamma_0 \quad (4.31)$$

yazılabilir. Burada;

γ : dayanak noktaları arasında oluşan olası tüm çiftlerin variogram değerlerine ilişkin n-boyutlu kare matris

W : n-boyutlu ağırlık bilinmeyenleri vektörü

γ_0 : enterpole edilecek nokta ile dayanak noktaları arasındaki variogram değerleri vektörü (n-boyutlu)

Ayrıca enterpolasyonun yansız olması için;

$$\sum_{i=1}^n W_i = 1 \quad (4.32)$$

şartı ileri sürülür ve bu durumda (4.30) nolu denklem sistemi

$$\begin{aligned}
 W_1\gamma(h_{11})+ W_2\gamma(h_{12})+ \dots W_n\gamma(h_{1n}) &= \gamma(h_{1p}) \\
 W_1\gamma(h_{21})+ W_2\gamma(h_{22})+ \dots W_n\gamma(h_{2n}) &= \gamma(h_{2p}) \\
 \cdot & \cdot \cdot \cdot \cdot \\
 \cdot & \cdot \cdot \cdot \cdot \\
 W_1\gamma(h_{n1})+ W_2\gamma(h_{n2})+ \dots W_n\gamma(h_{nn}) &= \gamma(h_{np}) \\
 W_1 &+ W_2 + \dots W_n = 1
 \end{aligned} \tag{4.33}$$

şeklini alır.

(4.33) nolu denklem sistemine bakıldığında n tane bilinmeyen ve (n+1) tane denklem vardır. Çözümün yansız olması için (X) Lagrange çarpanı eklenir.

Lagrange çarpanı ile denklem sayısı bilinmeyen sayısına eşitlenir (ASCE, ACSM, ASPRS 1994) ve (4.33) nolu denklem sistemi;

$$\begin{aligned}
 W_1\gamma(h_{11})+ W_2\gamma(h_{12})+ \dots W_n\gamma(h_{1n})+\lambda &= \gamma(h_{1p}) \\
 W_1\gamma(h_{21})+ W_2\gamma(h_{22})+ \dots W_n\gamma(h_{2n})+\lambda &= \gamma(h_{2p}) \\
 \cdot & \cdot \cdot \cdot \cdot \\
 \cdot & \cdot \cdot \cdot \cdot \\
 W_1\gamma(h_{n1})+ W_2\gamma(h_{n2})+ \dots W_n\gamma(h_{nn}) +\lambda &= \gamma(h_{np}) \\
 W_1 &+ W_2 + \dots W_n = 1
 \end{aligned} \tag{4.34}$$

olur. Matris gösterimi ile,

$$\gamma W = \gamma_0 \tag{4.35}$$

yazılabilir. Burada;

$$\lambda = \begin{bmatrix} \gamma(h_{11}) & \gamma(h_{12}) & \cdot & \cdot & \gamma(h_{1n}) & 1 \\ \gamma(h_{21}) & \gamma(h_{22}) & \cdot & \cdot & \gamma(h_{2n}) & 1 \\ \vdots & \vdots & & & \vdots & \vdots \\ \gamma(h_{n1}) & \gamma(h_{n2}) & \cdot & \cdot & \gamma(h_{nn}) & 1 \\ 1 & 1 & \cdot & \cdot & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$W = \begin{bmatrix} W_1 \\ W_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ W_p \\ \lambda \end{bmatrix} \quad \gamma_0 = \begin{bmatrix} \gamma(h_{1p}) \\ \gamma(h_{2p}) \\ \cdot \\ \cdot \\ \gamma(h_{np}) \\ 1 \end{bmatrix}$$

olmak üzere W bilinmeyenler vektörü,

$$W = \gamma^{-1} \gamma_0 \quad (4.36)$$

formülü ile hesaplanır ve enterpolasyon noktasının Kriging varyansı,

$$\sigma_{OK}^2 = W^T \gamma_0 \quad (4.37)$$

denklemine göre bulunur.

Ağırlıklar belirlendikten sonra Kriging genel denkleminde çalışma bölgesindeki herhangi bir nokta için enterpolasyon değeri (4.28) formülüne göre belli edilir. Ağırlıklar kovaryans fonksiyonlarından yada variogram fonksiyonlarından yararlanılarak bulunabilir. Genellikle geoistatistikte ağırlıklar variogram parametrelerine yukarıdaki denklem sistemlerine göre bulunur. Çalışma bölgesindeki herhangi bir P noktasında enterpolasyon değerine ulaşmak için kullanılan dayanak nokta sayısı hesap edilecek ağırlıkların sayısını etkilemektedir. Her bir dayanak noktası için bir ağırlık hesap edilmektedir. Farklı konumlarda olan ve aynı noktaları dayanak noktası olarak kullanan noktalarda ağırlık farklı olacaktır. Bu durumda Kriging algoritmasında her bir yeni nokta için ağırlık hesabının tekrarlı olarak hesap edilmesi manasına gelmektedir.

Pratikte çoğu zaman, bölgesel değişkenlerin durağanlık özelliği taşımadığı ve bir trend gösterdiği durumlarla karşılaşılabilir. Verilerin bir trend göstermesi ve bu trendinde hesaba katılarak Kriging sisteminin çözülmesi *Universal Kriging* olarak adlandırılır. Trend olarak genellikle 1. ya da 2. dereceden polinomlar veya

fourier serisi düşünülür. Universal Kriging sisteminde ortalama değer, bilinen fonksiyonların lineer bir kombinasyonları olarak kabul edilir. İki farklı durumda uygulanabilir.

Birinci olarak, bölgeye uyan bir global trend yüzeyi geçirilir ve trend yüzeye göre belirlenen ondülasyon değerleri ölçü değerlerinden çıkarılır elde kalan kalıntı hataları ile hesap yapılır. Gerçek yüzeyi elde etmek için trend değeri işlemler sonunda geri eklenir (Isaaks ve Srivastava, 1989).

Birinci durumda yapılması gereken trend parametreleri çözümlenir, elde edilen trend yüzeyinden ölçüler çıkarılır ve kalıntı hataları elde edilir, kalıntılardan deneysel variogram modeli oluşturulur ve seçilen variogram fonksiyonuna ait bilinmeyen parametreler çözümlenir, daha sonra Ordinary Kriging yöntemi uygulanır ve son olarak elde edilen değerlere trend değeri geri eklenir.

İkinci olarak da, trend bilinmeyen parametreleri Ordinary Kriging denklemlerine sınırlandırıcı diğer denklemler olarak eklenir ve ağırlıklarla birlikte eşzamanlı olarak çözüme gidilir. Daha detaylı bilgi için bakınız (Bardosy, 2002).

İkinci durumda ise Ordinary Kriging denklemlerine sınırlandırıcı olarak belirlenen bir drift modeli eklenir. Drift trend yüzeyiyle özdeştir. Drift olarak genellikle 1. yada 2. dereceden polinomlar düşünülür. 1. dereceden polinomal drift,

$$D_p = a_1 y_i + a_2 x_i \quad (4.38)$$

2. dereceden polinomal drift,

$$D_p = a_1 y_i + a_2 x_i + a_3 y_i x_i + a_4 y_i^2 + a_5 x_i^2 \quad (4.39)$$

şeklinde ifade edilir. Birinci dereceden drift seçilmiş olduğunda matrisler

$$\lambda = \begin{bmatrix} \gamma(h_{11}) & \gamma(h_{12}) & \dots & \gamma(h_{1n}) & 1 & y_1 & x_1 \\ \gamma(h_{21}) & \gamma(h_{22}) & \dots & \gamma(h_{2n}) & 1 & y_2 & x_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \gamma(h_{n1}) & \gamma(h_{n2}) & \dots & \gamma(h_{nn}) & 1 & y_n & x_n \\ 1 & 1 & \dots & 1 & 0 & 0 & 0 \\ y_1 & y_2 & \dots & y_n & 0 & 0 & 0 \\ x_1 & x_2 & \dots & x_n & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$W_1 = \begin{bmatrix} W_1 \\ W_2 \\ \vdots \\ W_p \\ \lambda \\ a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} \quad \gamma_0 = \begin{bmatrix} \gamma(h_{p1}) \\ \gamma(h_{p2}) \\ \vdots \\ \gamma(h_{pn}) \\ 1 \\ y_p \\ x_p \end{bmatrix}$$

şeklini alır. W bilinmeyenler matrisi;

$$W = \gamma^{-1} \gamma_0 \quad (4.40)$$

tahmin varyansı;

$$\sigma^2_{UK} = W^T \gamma_0 \quad (4.41)$$

şeklinde bulunur. Herhangi bir p noktasının enterpolasyon değeri (4.28) nolu formüle göre belirlenir.

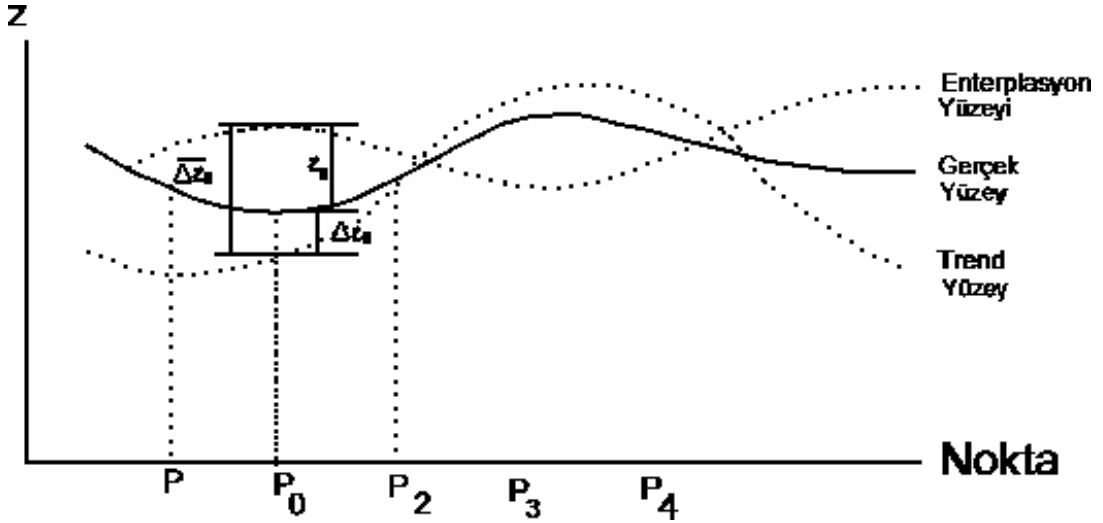
Universal Kriging sisteminde drift'in ilavesi Ordinary Kriging yöntemine göre daha fazla veriyi gerektirir. Bu da Universal Kriging sisteminin bir dezavantajı olarak görülebilir.

4.6 Yüzey Toplamlarıyla Enterpolasyon (Lineer Prediksiyon)

Bu yöntem lineer en küçük kareler enterpolasyonu veya lineer prediksiyon olarak da adlandırılabilir. Öncelikle, enterpolasyon bölgesindeki dayanak noktaları dikkate alınarak bir trend yüzeyi belirlenir (bak, Bölüm 4.3). Daha sonra, Δz artık yükseklik değerlerinden yararlanılarak enterpolasyon noktalarının yükseklikleri hesaplanır.

Şekil 4.1'den görüleceği gibi trend yüzeyi, gerçek yüzey ve enterpole edilmiş yüzey birbirlerinden farklıdır. Gerçek yüzey, tüm dayanak ve enterpolasyon noktalarında yüzeyin kendisi ile çakışmak zorundadır. Kısacası gerçek yüzey var yüzeyin kendisidir. Sonlu sayıda dayanak noktasından geçen bir yüzey belirlemek mümkündür (bak, Bölüm 4.2). Ancak, bu yüzeyin enterpolasyon noktalarından da geçeceği söylenemez. O halde, dayanak noktası sayısı sonsuz olmadıkça gerçek yüzeyi matematiksel olarak belirlemek mümkün değildir.

Trend yüzeyi, var olan sonlu m sayıdaki dayanak noktaları kullanılarak, dengeleme ile belirlenen yüzeydir (bak, Bölüm 4.3). Enterpolasyon yüzeyi, trend yüzeyine göre belirlenen dayanak noktalarındaki Δz artış yükseklik değerleri ve herhangi bir enterpolasyon yöntemi yardımıyla hesaplanan yüksekliklerin geometrik yeridir.



Şekil 4.1 Trend Yüzeyi, Enterpole Edilmiş Yüzey ve Gerçek Yüzey

Yüzey toplamlarıyla enterpolasyon yönteminde, bir $z(x,y)$ trend yüzeyi geçirilip dayanak noktalarındaki artış yükseklik değerleri belirlendikten sonra, herhangi bir enterpolasyon noktasına ait $\overline{\Delta z_0}$ artış yükseklik değerinin, dayanak noktalarına ait Δz artış yükseklik değerlerinin lineer bir fonksiyonu olduğu varsayılır (Krauss ve Mikhail 1972, Demirel 1977, Leberl 1973, Yanalak 1997).

Bu varsayımdan hareketle,

$$\overline{\Delta z_0} = a_1 \cdot \Delta z_1 + a_2 \cdot \Delta z_2 + \dots + a_m \cdot \Delta z_m \quad \text{veya} \quad \overline{\Delta z_0} = \underline{a}^T \cdot \underline{\Delta z} \quad (4.42)$$

yazılabilir.

Şekil (4.1)' e göre, $\overline{\Delta z_0}$ nin, gerçek değeri olan Δz_0 ' dan sapması için (4.42) eşitliği dikkate alınarak,

$$V_0 = \Delta z_0 - \overline{\Delta z_0} = \Delta z_0 - \underline{a}^T \cdot \underline{\Delta z} = \begin{bmatrix} 1 & -\underline{a}^T \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta z_0 \\ \underline{\Delta z} \end{bmatrix} \quad (4.43)$$

yazılabilir. (4.43) eşitliğine hata artma yasası uygulanırsa.

$$\sigma_{V_0}^2 = \begin{bmatrix} 1 & -\underline{a}^T \end{bmatrix} \cdot \underline{C} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ -\underline{a} \end{bmatrix} \quad (4.44)$$

elde edilir. (4.44) de,

$\sigma_{V_0}^2$: Δz_0 yerine $\overline{\Delta z_0}$ in tahmininden doğan varyans,

\underline{C} : $[\Delta z_0 \ \underline{\Delta z}^T]^T$ vektörünün kovaryans matrisidir.

\underline{C} kovaryans matrisi daha açık olarak.

$$\underline{C} = \begin{bmatrix} \sigma_{\Delta z_0}^2 & \underline{q}^T \\ \underline{q} & \underline{Q}^T \end{bmatrix} \quad (4.45)$$

şeklinde ifade edilebilir (Krauss ve Mikhail 1972, Yanalak 1997).(4.45)'de

$\sigma_{\Delta z_0}^2$: dayanak noktalarına ait Δz değerlerindeki korelasyonlu hataların doğurduğu varyans,

\underline{q} : Δz_0 ile $\underline{\Delta z}$ vektörünün elemanları arasındaki korelasyonu gösteren ($m \times 1$) elemanlı kovaryans vektörü,

\underline{Q} : $\underline{\Delta z}$ vektörünün kendi elemanları arasındaki otokorelasyonu ifade eden ($m \times m$) elemanlı kovaryans matrisidir. (4.45) eşitliği (4.44)'de yerine konulursa,

$$\sigma_{V_0}^2 = \sigma_{\Delta z_0}^2 - 2 \underline{a}^T \underline{q} + \underline{a}^T \underline{Q}^T \underline{a} \quad (4.46)$$

olur.

Yüzey toplamlarıyla enterpolasyon yönteminin amacı, $\sigma_{\hat{v}_0}^2$ varyansını minimum yapan \underline{a} katsayılar vektörünün (bak, (4.42)) belirlenmesidir. Bunun için (4.46)'nin \underline{a} 'ya göre türevi sifıra eşitlenmelidir. (\underline{Q} matrisinin simetrik olduğu varsayılmıştır)

$$\underline{Q} \cdot \underline{a} - \underline{q} = 0 \quad (4.47)$$

Aranan çözüm, (4.47)'den,

$$\underline{a} = \underline{Q}^{-1} \underline{q} \quad (4.48)$$

şeklinde elde edilir. (4.48), (4.42)'de yerine konarak.

$$\overline{\Delta z_0} = \underline{q}^T \underline{Q}^{-1} \underline{\Delta z} \quad (4.49)$$

enterpolasyon noktasına ait artık yükseklik değeri ve trend yüzeyi dikkate alınarak.

$$z_0 = z(x_0, y_0) + \overline{\Delta z_0} \quad (4.50)$$

$$z_0 = z(x_0, y_0) + \underline{\Delta z}_0 + \underline{q}^T \underline{Q}^{-1} \underline{\Delta z} \quad (4.51)$$

enterpolasyon noktasının yüksekliği hesaplanabilir. (4.49) bağıntısının kullanılabilmesi için \underline{q} ve \underline{Q} nun belirlenmesi gerekir.

Bunun için, $\underline{\Delta z}$ artık yükseklik değerlerinin stokastik büyüklükler olduğu, *ergodik*¹ özellik taşıdığı ve $\underline{\Delta z}$ değerlerine ait kovaryansların, noktalar arasındaki uzaklığına bağlı olduğu varsayılır (Krauss ve Mikhail 1972, Yanalak 1997) ve

$$\underline{Q} = \begin{bmatrix} 1 & w(s_{12}) & w(s_{13}) & \dots & w(s_{1m}) \\ w(s_{21}) & w(s_{22}) & w(s_{23}) & \dots & w(s_{2m}) \\ \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ w(s_{m1}) & w(s_{m2}) & w(s_{m3}) & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (4.52)$$

¹ Ergodiklik özelliği, bir alan içinde, bir noktadaki tekrarlı büyüklükler yerine diğer noktalardaki büyüklüklerin kullanılmasına izin verir.

$$\underline{q}^T = [w(s_1) \ w(s_2) \ w(s_3) \ \dots \ w(s_m)] \quad (4.53)$$

yazılabilir.

(4.52)'deki s_{ij} değerleri i. ve j. dayanak noktaları arasındaki uzaklıklar, (4.53)'deki s_i değerleri ise enterpolasyon noktası ile dayanak noktaları arasındaki uzaklıklardır. Q matrisinin $w(s_{ij})$ ve \underline{q} vektörünün $w(s_i)$ elemanları, dayanak noktalarına ait Δz artık yükseklik değerlerinden deneysel olarak, ya da bilinen kovaryans fonksiyonları kullanılarak türetilir (Krauss ve Mikhail 1972, Yanalak 1997). Deneysel türetmede dayanak nokta sayısının sonsuza gitmesi ($m \rightarrow \infty$) öngörüldüğünden, bu araştırmada ikinci yol seçilmiş ve kovaryans fonksiyonu olarak Hirvonen Fonksiyonu,

$$w(s) = (1 + s^2 / k^2)^{-1} \quad k=3,4,5 \quad (4.54)$$

ve Gauss Fonksiyonu.

$$w(s) = e^{-s^2 / k^2} \quad k=3,4,5 \quad (4.55)$$

kullanılmıştır. Her iki fonksiyon, (4.47) denkleminin elde edilmesindeki varsayımı (Q matrisinin simetrik olması şartını) sağlamaktadır. Belirli bir veri kümesi için yapılan uygulamada Q matrisi bir kez oluşturulurken, her bir enterpolasyon noktası için ayrı bir q vektörünün hesabı gerekmektedir. Yöntemin başarısı, dayanak noktalarına ait d değerlerindeki fonksiyonel (bir fonksiyonla ifade edilebilen, sistematik eğimli) bileşenin olabildiğince yok edilmesine bağlıdır. Bu nedenle, verilerin yapısına uygun bir trend yüzeyinin seçimi son derece önemlidir (Yanalak 1997).

4.7 Sürekli Parça Parça Polinomlarla Enterpolasyon

Bu yöntem, dayanak noktalarının arazi yüzeyi üstünde düzensiz dağılmış olduğu durumlarda uygulanır. Yöntemin uygulanmasında üç aşama vardır (Schut, 1976):

1. Arazi yüzeyinin düzenli gridlere bölünmesi,
2. Grid köşe noktalarında gerekli büyüklüklerin hesabı,
3. Birleşme yerlerinde sürekliliğin sağlanması koşulu ile, her bir grid yüzeyinin, ayrı ayrı matematiksel fonksiyonlarla ifadesi

Birinci aşamada arazi yüzeyi, düzenli kare veya dikdörtgen gridlere bölünerek grid köşe noktalarının (x_g, y_g) konum koordinatları belirlenir. Kare veya dikdörtgen kenar uzunlukları, arazinin yapısına göre uygun şekilde seçilir. İkinci aşama, grid köşe noktalarında gerekli büyüklüklerin hesabını kapsar. Bu büyüklükler grid köşelerine ait z_g yükseklikleri ile bu noktalardaki z_x, z_y, z_{xy} eğim (türev) değerleridir. Sürekliliğin sağlanabilmesi için bu eğim değerlerine gerek vardır. Bir grid köşesinin koordinatları (x_g, y_g, z_g) , bu grid köşesindeki eğim değerleri (z_x, z_y, z_{xy}) ve dayanak noktalarının bilinen koordinatları (x_i, y_i, z_i) olduğuna göre, herhangi bir dayanak noktası için, içine düştüğü gridin bir köşesi dikkate alınarak aşağıdaki düzeltme denklemi yazılabilir (Güler, 1978):

$$z_i + v_i = z_g + z_g (x_i - x_g) + z_y (y_i - y_g) + z_{xy} (x_i - x_g) (y_i - y_g) \quad (4.56)$$

Diğer grid köşelerine göre de benzer düzeltme denklemleri yazılırsa, bir dayanak noktasına ait 4 düzeltme denklemi elde edilir. Toplam m sayıda dayanak noktası için yazılan 4 Boogartm adet düzeltme denkleminin $\underline{v}^T \underline{v} = \min$ ilkesiyle çözümü, grid köşe noktalarına ait z_g, z_x, z_y, z_{xy} bilinmeyenlerini verir. (4.56) düzeltme denklemlerindeki z_i yüksekliklerine, grid köşe noktasına olan uzaklığın bir fonksiyonu ile ifade edilen ağırlıklar verilebilir (bak, (4.5) ve (4.6) bağıntıları). Bu durumda çözüm bilindiği gibi, $\underline{v}^T \underline{p} \underline{v} = \min$ ilkesine göre yapılır.

Yöntemin üçüncü aşamasında, her bir grid yüzeyi ayrı ayrı matematiksel fonksiyonlarla ifade edilir. Literatürde,

$$z = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n a_{ij} x^i y^j \quad (4.57)$$

eşitliği ile verilen polinomların kullanılması ön görülmekte ve polinom derecesi $n=3$ alınmaktadır (Schut, 1976, Yanalak 1997). $n=3$ için (4.57)'den,

$$\begin{aligned} z = & a_{00} + a_{01} y + a_{02} y^2 + a_{03} y^3 + a_{10} x + a_{11} xy \\ & + a_{12} xy^2 + a_{13} xy^3 + a_{20} x^2 + a_{21} x^2 y + a_{22} x^2 y^2 \\ & + a_{23} x^2 y^3 + a_{30} x^3 + a_{31} x^3 y + a_{32} x^3 y^2 + a_{33} x^3 y^3 \end{aligned} \quad (4.58)$$

16 terimli bikübik polinom elde edilir. Polinomun bilinmeyen katsayılarını belirlemek için, 2. aşamada hesaplanan z_g, z_x, z_y, z_{xy} değerleri kullanılır. (4.58)' in x

ve y' ye göre türevleri, polinom yüzeyinin x ve y eksenleri doğrultusundaki eğimlerini verir,

$$\begin{aligned}
z_x &= a_{10} + a_{11}y + a_{12}y^2 + a_{13}y^3 + 2a_{20}x + 2a_{21}xy + 2a_{22}xy^2 + \\
&2a_{23}xy^3 + 3a_{30}x^2 + 3a_{31}x^2y + 3a_{32}x^2y^2 + 3a_{33}x^2y^3 \\
z_y &= a_{01} + 2a_{02}y + 3a_{03}y^2 + a_{11}x + 2a_{12}xy + 3a_{13}xy^2 + a_{21}x^2 + \\
&2a_{22}x^2y + 3a_{23}x^2y^2 + a_{31}x^3 + 2a_{32}x^3y + 3a_{33}x^3y^2
\end{aligned} \tag{4.59}$$

(4.59)' in y' ye (veya x' e) göre türevi alınarak, karışık türev elde edilir;

$$\begin{aligned}
z_{xy} = z_{yx} &= a_{11} + 2a_{12}y + 3a_{13}y^2 + 2a_{21}x + 4a_{22}xy \\
&6a_{23}xy^2 + 3a_{31}x^2 + 6a_{32}x^2y + 9a_{33}x^2y^2
\end{aligned} \tag{4.60}$$

Bir gridin 4 köşe noktası için bilinen $(x_g, y_g, z_g, z_x, z_y, z_{xy})$ değerleri (4.58), (4.59) ve (4.60)'da yerine konursa 16 denklem elde edilir ve bu denklemlerin çözümüyle a_{ij} katsayıları hesaplanır. a_{ij} katsayılarının hesabı her bir grid için tekrarlanmak zorundadır. Hesabı kolaylaştırmak için, (x, y) koordinat sisteminin başlangıç noktası, gridlerin sol alt köşelerine taşınır ve bulunan yeni koordinatlar normlaştırılır. Böylece, $\underline{a} = \underline{A}^{-1} \underline{z}$ çözümünde tüm gridler için tek bir \underline{A} katsayılar matrisi geçerli olur.

(4.58) eşitliğinde $a_{22} = a_{23} = a_{32} = a_{33} = 0$ alınırsa 12 terimli bikübik polinom elde edilir (Schut 1976, Leberl 1973, Jancaitis ve Junkins 1973, Yanalak 1997). Bu polinomun hesabında (4.56) eşitliğindeki z_{xy} çarpanlı terim ile (4.60) denklemleri dikkate alınmaz. (x_0, y_0) konum koordinatı bilinen bir enterpolasyon noktasının z_0 yüksekliği bu noktayı içine alan gride ait polinom denkleminde hesaplanır.

4.8 Dikdörtgen Gridde Enterpolasyon

Bu yöntemde, grid köşe noktalarının yükseklikleri bilinmektedir. Bu veriler, doğrudan doğruya ölçülmüş değerler olabileceği gibi bir başka enterpolasyon yöntemi kullanılarak türetilmiş değerler de olabilir. Her bir grid, 16 terimli bikübik polinom veya bu polinomun bazı terimlerini içeren farklı polinomlar ile

ifade edilir. Bölüm 4.7 'da 16 ve 12 terimli bikübik polinomlardan söz edilmiştir. Kullanılacak polinom,

$$z = a_{00} + a_{01}y + a_{02}y^2 + a_{10}x + a_{11}xy + a_{12}xy^2 + a_{20}x^2 + a_{21}x^2y \quad (4.61)$$

eşitliği ile ifade edilirse 8 terimli bikuadratik polinom,

$$z = a_{00} + a_{10}x + a_{01}y + a_{11}xy \quad (4.62)$$

bağıntısının seçilmesi durumunda 4 terimli bilineer polinom elde edilir. 16 veya 12 terimli bikübik polinom kullanılması durumunda, grid köşe noktalarındaki eğim değerlerine gerek vardır. Bu değerler, şimdiye kadar yapılan uygulamalarda çeşitli şekillerde belirlenmiştir. Jancaitis ve Junkins (1973), grid köşe noktalarının yüksekliklerini belirlerken, kayan yüzeylerle enterpolasyon yöntemini kullanmış ve bu işlem sırasında kayan yüzeylerin eğimlerinden yararlanarak grid köşelerindeki eğim değerlerini hesaplamıştır. Leberl(1973), bilinen grid köşe yüksekliklerini kullanarak iki farklı şekilde çözüm getirmiştir. İlk çözümde, gride ait 4 köşe noktası ile gridi çevreleyen 12 köşe noktasından oluşan 16 grid noktası yerel bir polinomla ifade edilerek eğim değerleri hesaplanmaktadır. 2.çözümde ise grid köşesi ve eğim belirlenmek istenen doğrultuda grid köşesine en yakın 2 nokta kullanılarak istenilen eğim değeri belirlenmektedir. Burada bulunacak eğim değeri, ardışık 3 noktadan geçen daire yayının orta noktasındaki eğim değeridir. Belirlenen eğim (türev) değerleri yardımıyla, Bölüm 4.7 'da anlatıldığı gibi a_{ij} katsayıları hesaplanır.

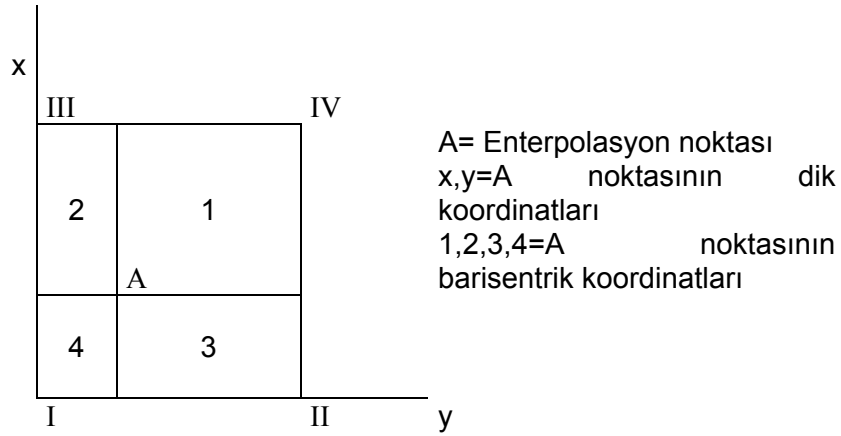
12 terimli bikübik polinomda (bak, Bölüm 4.7) a_{31} ve a_{13} katsayıları kullanılmadığında 10 terimli klasik kübik polinom elde edilir. Nakamura (1969), Linkwitz (1970) ve Benner ve Schult (1972) tarafından uygulanan bu polinom, sürekli bir yüzeyin oluşumuna imkan vermemektedir. Ortak sınırlarda farklı kesitlerin elde edilmesi, yöntemin olumsuz yanı olmuştur (Schut, 1976, Yanalak 1997).

(4.61) polinomunun uygulanması halinde, a_{ij} katsayılarının belirlenmesi için 8 denkleme gerek vardır. Bu denklemlerden 4'ü grid köşe noktalarının bilinen x_g, y_g, z_g koordinatları kullanılarak (4.61) eşitliğinden elde edilir. Diğer 4 denklem için grid kenar orta noktaları kullanılır. Kenarın iki ucundaki grid nokta yüksekliklerinin ortalaması alınarak, orta noktaların yükseklikleri bulunur. Orta

noktaların koordinatları (4.61)'de yerine konulduğunda aranan diğer 4 denklem elde edilir. 8 denklemin çözümüyle a_{ij} katsayıları belirlenir.

(4.62) polinomunun kullanılması durumunda çözüm için grid köşelerindeki yükseklik değerleri yeterli olmaktadır. 4 grid köşesi için (4.62) eşitliğinin 4 kez yazılması ile elde edilecek denklem sistemi çözülürse a_{ij} katsayıları bulunur. 4 terimli bilinear yüzey kullanımı, aslında ağırlıklı aritmetik ortalamadan farklı bir yaklaşım değildir. Konu formüle edildiğinde bu durum daha açık görülecektir. Köşe noktaları I, II, III, IV şeklinde numaralandırılmış dikdörtgen bir gridin köşe koordinatları Şekil 4.2, I noktası merkez olacak şekilde normlaştırılırsa;

$$x_I = x_{II} = y_I = y_{III} = 0, \quad x_{III} = x_{IV} = y_{II} = y_{IV} = 1 \text{ olduğu görülür.}$$



Şekil 4.2 Enterpolasyon Noktasının (A) Lokal Barisentrik Koordinatları

4 grid köşesi için (4.62) eşitliği yazılır ve matris gösterimiyle ifade edilirse.

$$\begin{bmatrix} z_I \\ z_{II} \\ z_{III} \\ z_{IV} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_{00} \\ a_{10} \\ a_{01} \\ a_{11} \end{bmatrix} \quad (4.63)$$

elde edilir. (4.63) denklem sisteminin çözümü a_{ij} katsayılarını verir,

$$a_{00} = z_I$$

$$a_{10} = z_{III} - z_I$$

$$a_{01} = z_{II} - z_I$$

$$a_{11} = z_{IV} + z_I - z_{II} - z_{III}$$

Bulunan katsayılar (4.62) eşitliğinde yerine konursa,

$$z = z_I + (z_{III} - z_I)x + (z_{II} - z_I)y + (z_{IV} + z_I - z_{II} - z_{III})xy \quad (4.64)$$

bulunur. Sağ taraf $z_I, z_{II}, z_{III}, z_{IV}$ parentezine alınırsa,

$$z = (1-x)(1-y)z_I + y(1-x)z_{II} + x(1-y)z_{III} + xy z_{IV} \quad (4.65)$$

şekline dönüşür. (4.65)'deki çarpanlar grid köşe yüksekliklerine verilen ağırlıklar olarak düşünüldüğünde,

$$p_I = (1-x)(1-y), p_{II} = y(1-x), p_{III} = x(1-y), p_{IV} = xy$$

yazılabilir. Bu ağırlıklar aynı zamanda enterpolasyon noktasının yerel bansentrik koordinatlarına (Şekil 4.2' deki 1, 2, 3 ve 4 nolu dikdörtgenlerin alanlarına) karşılık gelmekte Watson (1992) ve bilinear enterpolasyon, yerel barisentrik koordinatlarla ağırlıklı ortalamaya özdeş olmaktadır.

Her bir gridi 4 veya 2 lineer üçgen parçasının toplamı şeklinde ifade etmek, kullanılabilecek bir başka çözüm yoludur. Her bir grid için 4 köşe noktasının ortalaması alınarak grid orta noktasının yüksekliği bulunur. Orta nokta köşelere birleştirilerek 4 üçgen oluşturulur. Enterpolasyon noktasının yüksekliği, içine düştüğü üçgende lineer enterpolasyonla bulunur. Diğer bir çözüm yolu gridin köşegenlerinden biri yardımıyla gridin 2 üçgene ayrılmasıdır. Enterpolasyon noktasının yüksekliği, içine düştüğü üçgende lineer enterpolasyonla bulunur. Aynı işlem 2. köşegen için yapılarak enterpolasyon noktası için 2. yükseklik bulunur. Bulunan iki yükseklik değerinin ortalaması alınarak enterpolasyon noktasının kesin yüksekliği elde edilir (Yanalak, 1997).

4.9 Üçgenler Ağında Enterpolasyon

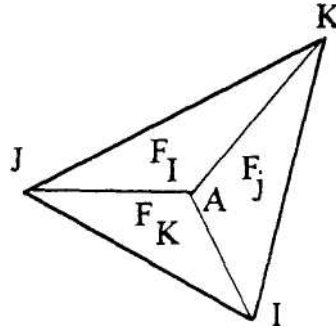
Arazi yüzeyini üçgen elemanların toplamı şeklinde ifade etmek için arazi yüzeyi üçgenlenir. Dayanak noktalan üçgenlerin köşelerini oluşturur. Bütün dayanak noktaları kullanılarak boşluk kalmayacak şekilde veri alanı üçgenlerle kaplanır. Verilerin düzenli grid ağı köşelerinde yer alması durumunda bu işlem çok daha kolay olur. Burada üçgenlemenin nasıl yapıldığına değinilmeyecektir. Üçgenleme yapısıyla birlikte kullanılan enterpolasyon yöntemleri sırasıyla ele alınacaktır.

4.9.1 Linear Enterpolasyon

Üçgenler ağında yaygın olarak kullanılan enterpolasyon yöntemi, lineer enterpolasyondur. Her bir üçgen eğik düzlem olarak kabul edilir. Arazi yüzeyinin düzlem üçgen parçalarının toplamından oluştuğu düşünülür. Yüksekliği enterpole edilecek noktanın içine düştüğü üçgende lineer enterpolasyon uygulanır. Bir eğik düzlemin,

$$z = a_{00} + a_{10}x + a_{01}y \quad (4.66)$$

şeklinde ifade edildiği düşünülürse, her bir üçgen için a_{00}, a_{10} ve a_{01} katsayılarının hesabı gereklidir. Üçgene ait 3 köşe noktası için yazılacak 3 denklemlerle katsayılar belirlenir. Yüksekliği enterpole edilecek noktanın x_0, y_0 koordinatları (4.66)'de yerine konulduğunda z_0 değeri elde edilir. Üçgen elemanlarda yapılan lineer enterpolasyon, aslında ağırlıklı ortalamadan farklı bir işlem değildir. Üçgenin 3 köşe noktasına ait z değerlerinin ortalaması alınmaktadır. Herhangi bir köşe noktasına ait z değerinin ağırlığı ise enterpolasyon noktasının o köşeye göre lokal barisentrik koordinatıdır. Barisentrik koordinatlar Şekil 4.3' de gösterilmiştir.



Şekil 4.3 Üçgende Lokal Barisentrik Koordinatlar

Şekil 4.3' de I, J, K noktaları üçgenin 3 köşe noktasını göstermektedir. A enterpolasyon noktasının 3 köşeye göre 3 ayrı lokal barisentrik koordinatı vardır. Bu 3 koordinatın toplamı 1'dir. A noktasının köşe noktalarına birleştirilmesiyle elde edilen 3 alt üçgenin alanlarının IJK üçgeninin alanına bölünmesiyle lokal barisentrik koordinatlar elde edilir. Alt üçgenlerin alanları F_I, F_J, F_K ile, toplam alan F ile gösterilirse, A noktasının lokal barisentrik koordinatları;

$$P_I = F_I / F, \quad P_J = F_J / F, \quad P_K = F_K / F \quad (4.67)$$

olur. Lokal barisentrik koordinatlar noktaların kartezyen dik koordinatları ile ifade edilirse,

$$\begin{aligned}
 P_I &= ((x_J - y_A)(y_K - y_A) - (x_K - x_A)(y_J - y_A)) / B \\
 P_J &= ((x_K - x_A)(y_I - y_A) - (x_I - x_A)(y_K - y_A)) / B \\
 P_K &= ((x_I - y_A)(y_J - y_A) - (x_J - x_A)(y_I - y_A)) / B \\
 B &= (x_J - x_I)(y_K - y_I) - (x_K - x_I)(y_J - y_I)
 \end{aligned} \tag{4.68}$$

yazılabilir. Enterpolasyon noktasının z_0 değeri,

$$z_0 = P_I z_I + P_J z_J + P_K z_K \tag{4.69}$$

şeklinde belirlenir.

4.9.2 Beşinci Dereceden Polinomlarla Enterpolasyon

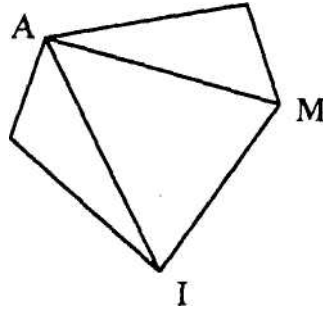
Preusser (1984) tarafından önerilen bu yöntemde her üçgen için 5. dereceden iki değişkenli bir polinom belirlenir. Polinom katsayılarının hesaplanması için üçgen köşelerindeki z_x, z_y, z_{xx}, z_{yy} ve z_{xy} kısmi türevlerinin bilinmesi gereklidir. Bilinmediği durumlarda yüzey için bir yaklaşım yüzeyi kullanılıp hesaplanmalıdır. Kullanılacak yaklaşım yüzeyi daha düşük dereceden bir polinom yüzeyi olabileceği gibi lineer üçgenlerden oluşan yüzey de olabilir. Düzlem üçgenlerin kullanılması durumunda dayanak noktalarında birleşen üçgen normallerinin h_x, h_y ve h_z bileşenlerinden yararlanılarak dayanak noktalarındaki kısmi türevler elde edilebilir. Dayanak noktasında kesişen her üçgen için bulunacak h_x, h_y ve h_z den elde edilecek z_x ve z_y değerlerinin ortalamaları alınarak her bir dayanak noktası için tek bir z_x elde edilir. Aynı işlemler 1. türevler için tekrarlandığında z_{xx}, z_{yy} ve z_{xy} değerlerine ulaşılır. Her bir üçgen için 3 köşe noktasındaki z değerleri de düşünüldüğünde 18 değer bilinmektedir. Belirlenecek 5. dereceden polinom köşe noktalarındaki bu değerleri yakalar. Problem Preusser (1984) tarafından çözülmüş ve katsayılar belirlenmiştir.

4.9.3 Doğal Komşu Koordinatlarıyla Enterpolasyon

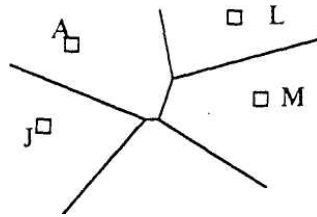
Düzlemdeki bir nokta kümesi, "oluşacak üçgenlerin çevrel çemberleri içerisinde başka bir nokta bulunmasın" koşuluna göre üçgenlenirse elde edilecek üçgenleme

Delaunay üçgenlemesidir. Oluşan her üçgen bir Delaunay üçgenidir. Bir üçgen kenarını oluşturan iki nokta birbirinin doğal komşusudur. Bir noktanın doğal komşuları kullanılarak, o noktanın doğal komşu koordinatları hesaplanabilir.

Şekil 4.4' de 5 dayanak noktasının oluşturduğu Delaunay üçgenleri görülmektedir. Üçgenlerin kenar orta dikmeleri yardımıyla veri alanı 5 parçaya ayrılabilir. Noktaların etki alanlarını belirleyen bu yapı için bakınız (Yanalak, 1997). Şekil 4.5' de bu noktalara ait Voronoi diyagramı görülmektedir. Birbirine komşu olan parçalara ait noktalar birbirlerinin doğal komşularıdır ((M, L), (M, I), (M, A), (A, I), (A, J), ve (J,I)). Komşu olmayan parçalara ait noktalar ise doğal komşu değildir ((J, L), (J, M), (I, L)). Bir noktaya ait doğal komşu koordinatları belirlenirken Voronoi diyagramından yararlanır.



Şekil 4.4 Delaunay Üçgenlemesi

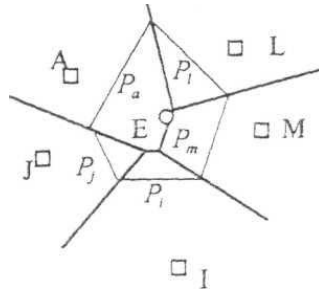


Şekil 4.5 Veronoi Diyagramı

Bir enterpolasyon noktasının doğal komşu koordinatları belirlenmek istendiğinde ilk olarak dayanak noktaları üçgenlenir ve Voronoi diyagramı çizilir, ikinci aşamada enterpolasyon noktasına doğal komşu olan dayanak noktaları belirlenir. Enterpolasyon noktası ile komşu dayanak noktalarını birleştiren doğru parçalarının kenar orta dikmeleri yardımıyla enterpolasyon noktasının

Voronoi çokgeni bulunur. Belirlenen bu çokgen ile daha önceden belirlenen Voronoi çokgenlerinin kesişim alanları enterpolasyon noktasının doğal komşu koordinatlarını verir.

Şekil 4.6' da bir enterpolasyon noktasına (E) ait doğal komşu koordinatları gösterilmiştir. Düz çizgiler daha önceden oluşturulmuş Voronoi diyagramını göstermektedir (bak.Şekil 4.5). Kesik çizgiler ise E noktasına ait Voronoi çokgenidir.



Şekil 4.6 Doğal Komşu Koordinatları

P_a, P_l, P_m, P_i ve P_j alanları E noktasının doğal komşu koordinatlarını gösterir. Bu değerler barisentrik koordinatlarda olduğu gibi toplam alana bölünerek normlaştırılmıştır. Değerleri 0 ile 1 arasında değişen koordinatların toplamı 1 olur. Enterpolasyon noktasına ait z_0 değeri, kendine komşu olan noktaların z_i değerlerinin ağırlıklı ortalamasıyla bulunur. Ağırlık olarak doğal komşu koordinatları kullanılır,

$$z_0 = P_a z_A + P_l z_L + P_m z_M + P_i z_I + P_j z_J \quad (4.70)$$

4.9.4 Eğrisel (Curvelineer) Enterpolasyon

Bu yöntemde de dayanak noktaları Delaunay kriterine göre üçgenlenir. Enterpolasyon noktasının z_0 değeri, içine düştüğü üçgende eğrisel enterpolasyonla belirlenir. Enterpolasyonun yapılabilmesi için bazı değerlerin önceden bilinmesi gereklidir. Bu değerler, enterpolasyon noktasının barisentrik koordinatları (P_i), enterpolasyon noktasının lineer enterpolasyonla bulunacak r değeri, köşe noktalarındaki gradyent düzlemlerinin enterpolasyon noktasındaki değerleri (s_i), köşe noktalarındaki pürüzsüzlük indeksi (r_i) ve dengeleyici fonksiyondur ($H(P_i, r_i)$).

Bu elemanların belirlenmesine ait işlemler aşağıda özetlenmiştir:

P_i ve z_L : Lineer enterpolasyon bölümünde anlatıldığı gibi bulunur.
 s_i : Üçgenin her bir köşesi için o köşede oluşan Delaunay üçgenleri normallerinin vektörel toplamlarıyla gradyent vektörü elde edilir. Gradyent vektörüne dik ve o noktaya teğet olan düzlem gradyent düzlemidir. Bu düzlemin enterpolasyon noktasında aldığı değer s_i değeridir.

r_i : i noktasında oluşan Delaunay üçgenlerinin alanlarının toplamı F , aynı üçgenlerin i noktasındaki gradyent düzlemine dik üzdüşümlerinin alanları toplamı F' ile gösterilirse, $r_i = 1 - F'/F$ şeklinde ifade edilir.

H : P_i ve r_i ye bağlı bir fonksiyondur (Watson ve Philip 1984a).

Bir enterpolasyon noktasının yüksekliği,

$$z_0 = z_l + \sum_{i=1}^3 H(P_i, r_i).(s_i, z_L) \quad (4.71)$$

ifadesiyle bulunur.

4.9.5 Normal Vektörlerle En Küçük Kareler Yöntemine Göre Enterpolasyon

Enterpolasyon noktasının doğal komşuları belirlenir ve enterpolasyon noktasına ait Delaunay üçgenleri oluşturulur. Enterpolasyon noktasındaki üçgen normallerinin oluşturacağı demeti mümkün olduğunca dar kılacak şekilde enterpolasyon noktasının z değeri belirlenir. Kullanılan bu koşul enterpolasyon noktasında minimum eğriliği sağlamak şeklinde de ifade edilebilir. Kalmar ve diğ. (1995) olayı aşağıdaki gibi formüle etmişlerdir:

Enterpolasyon noktasının koordinatları x_0, y_0, z_0 ile, oluşan üçgenlerden herhangi birisi için diğer iki köşenin koordinatları x_1, y_1, z_1 , ve x_2, y_2, z_2 ile gösterilsin. Üçgen normal vektörünün x, y ve z yönündeki bileşenleri olan n_x, n_y ve n_z için,

$$n_x = a z_0 + b, n_y = c z_0 + d, n_z = e \quad (4.72)$$

yazılabilir. Bu eşitlikler deki a, b, c, d ve e değerleri için,

$$a = y_2 - y_1$$

$$b = z_2(y_1 - y_0) - z_1(y_2 - y_0)$$

$$c = x_1 - x_2 \quad (4.73)$$

$$d = z_1(x_2 - x_0) - z_2(x_1 - x_0)$$

$$e = (x_1 - x_0)(y_2 - y_0) - (x_2 - x_0)(y_1 - y_0)$$

geçerlidir. Enterpolasyon noktasındaki normlaştırılmış normal vektörlerin ortalamasıyla, N_x , N_y ve N_z bulunur;

$$N_x = A \cdot z_0 + B, N_y = C \cdot z_0 + D, N_z = 1 \quad (4.74)$$

eşitlikteki katsayılar, n üçgen sayısını göstermek üzere

$$\begin{aligned} A &= \sum_{i=1}^n a_i / e_i / n, B = \sum_{i=1}^n b_i / e_i / n \\ C &= \sum_{i=1}^n c_i / e_i / n, D = \sum_{i=1}^n d_i / e_i / n \end{aligned} \quad (4.75)$$

şeklinde ifade edilir.

Normlaştırılmış normal vektörlerin ortalama vektörden farkları alınarak.

$(n_x^i - N_x)$, $(n_y^i - N_y)$ ve (0) değerleri elde edilir. Bu değerler z_0 'ın lineer bir fonksiyonudur. Fark vektörlerinin uzunluklarının kareleri toplamını minimize etmek için z_0 'a göre türev alınırsa sonuçta,

$$z_0 = \frac{\sum_{i=1}^n [(A - a_i / e_i)(b_i / e_i - B) + (C - c_i / e_i)(d_i / e_i - D)]}{\sum_{i=1}^n [(b_i / e_i - B)^2 + (d_i / e_i - D)^2]} \quad (4.76)$$

elde edilir.

4.9.6 Minimum Alan İlkesi Kullanılarak En Küçük Kareler Yöntemine Göre Enterpolasyon

Bu yöntem bir enterpolasyon noktasında oluşacak Delaunay üçgenlerinin alanları toplamını minimum yapacak şekilde r_0 değerinin belirlenmesi düşüncesine dayanır. Bir üçgen için elde edilecek normal vektörlerin yarı uzunluğunun üçgenin alanına eşit olduğu düşünülürse toplam alan normal vektörlerle kolaylıkla ifade edilebilir, i üçgenine ait normal vektör bileşenleri, n_x^i, n_y^i, n_z^i ile gösterilirse toplam alan için,

$$F = 0.5 \cdot \sum_{i=1}^n \sqrt{(n_x^i)^2 + (n_y^i)^2 + (n_z^i)^2} \quad (4.77)$$

yazılabilir. z_o' a göre türev alınıp minimum alanı verecek olan z_o değeri bulunur (Kalmar ve diğ. 1995).

4.9.7 Delaunay Komşularıyla Ağırlıklı Ortalama İle Enterpolasyon

Bu enterpolasyon yönteminde, yüksekliği enterpole edilecek enterpolasyon noktası ile dayanak noktaları beraberce üçgenlenir. Enterpolasyon noktasına Delaunay komşusu olan dayanak noktaları, diğer bir deyişle enterpolasyon noktası ile birleşerek bir üçgen kenarı oluşturan dayanak noktaları belirlenir. Her bir dayanak noktasının yüksekliğine, enterpolasyon noktasına olan yatay uzaklığın bir fonksiyonu olarak ağırlık verilir. Ağırlıklı aritmetik ortalama ile enterpolasyon noktasının yüksekliği belirlenir.

Her bir enterpolasyon noktasının dayanak noktaları ile ayrı ayrı üçgenlenmesi oldukça zaman alıcı bir işlemdir. Bu sakıncadan kurtulmak için ilk olarak dayanak noktaları üçgenlenir. Üçgenlemeye katılacak olan enterpolasyon noktası araya sokma yöntemi ile üçgenlemeye dahil edilir. *Araya sokma işlemi* iki şekilde yapılabilir.

Birinci yol: Araya sokulan noktayı hangi üçgenlerin çevrel çemberlerinin içerdiği belirlenir. Bu üçgenlerin kenarları bir listeye yazılır. Yazılan listede iki kez geçen kenarlar tamamen silinir Geriye kalan kenarlar araya sokulan nokta ile birleştirildiğinde Delaunay üçgenleri oluşmuş demektir.

İkinci yol: Araya sokulan noktanın içine düştüğü Delaunay Üçgeni belirlenir. Nokta üçgenin köşelerine birleştirilerek 3 yeni üçgen oluşturulur. Yeni oluşan üçgen kenarları Delaunay kriterlerine göre değiştirilerek son üçgenleme elde edilir.

5. SAYISAL ARAZİ MODELLERİNDEN HACİM HESAPLARI

Hacim, sayısal arazi modellerinden elde edilmesi beklenen sonuç ürünlerden biridir. Hacim problemleri elde edilen veriye göre değişik şekiller alır. Verilerin elde edildiği kaynağa, dolayısıyla da veri düzenine göre farklı algoritmalar düşünülebilir. Veriler elde edilmiş kaynağına bağlı olarak farklı yapılarda bulunurlar (Yanalak 1997). Dayanak noktalarının bulunabileceği konumlar şöyledir:

- Dayanak noktaları rastgele dağılmış konumda olabilirler.
- Dayanak noktaları dikdörtgen veya üçgenlerden oluşan düzenli grid ağı köşelerinde yer alabilir.
- Dayanak noktaları paralel kesitler boyunca yer alabilir.
- Dayanak noktaları eş yükselti eğrilerini temsil edebilir.

Yapılan bu sınıflandırma dikkate alınarak, hacim hesapları ayrı başlıklar altında incelenecektir.

5.1 Eş Yükseklik Eğrilerinden Hacim Hesabı

Eş yükselti eğrilerinin, yeryüzünün eşit aralıklı yatay düzlemlerle kesilmesi ile elde edildiği düşünülürse, problem kolaylıkla çözülebilir. Çeşitli yöntemler kullanılmasına rağmen, en çok uygulananları şunlardır:

- Ortalama alanlar yöntemi
- Uç alanlar yöntemi
- Prizmatik yöntem

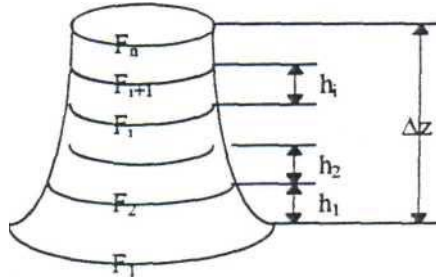
5.1.1 Ortalama Alanlar Yöntemi

Bu yöntemde, F_1 ve F_n uç alanları (Şekil 5.1) arasında kalan hacim (v), kesit alanlarının ortalaması ile iki uç alan arasındaki yükseklik farkı çarpılarak bulunur.

Eş yükseklik eğrilerinin belirlediği alanlar $F_1, F_2, \dots, F_{n-1}, F_n$ ve uç alanlar arasındaki yükseklik farkı Δz ise, hacim

$$v = \frac{F_1 + F_2 + \dots + F_{n-1} + F_n}{n} \cdot \Delta z \quad (5.1)$$

olur (Özgen ve Öztan, 1988).



Şekil 5.1 Eş Yükselti Eğrilerinden Hacim Hesabı

5.1.2 Uç Alanlar Yöntemi

Şekil 5.1'deki F_i ile F_{i+1} alanları arasında kalan hacim

$$v_i = \frac{F_i + F_{i+1}}{2} \cdot h_i \quad i = 1, 2, \dots, n-1 \quad (5.2)$$

formülü ile ifade edilebilir (Özgen ve Öztan, 1988).

Ardışık eşyükselti eğrileri arasındaki yükseklik farklarının genel olarak birbirine eşit olduğu ($h_1=h_2= \dots =h_{n-1}=h$) varsayımı ile, F_1 ve F_n uç alanları arasındaki toplam v hacmi için (5.2)'den

$$v = \frac{1}{2} h (F_1 + 2F_2 + 2F_3 + \dots + 2F_{n-1} + F_n) \quad (5.3)$$

elde edilir (Yanalak 1997).

5.1.3 Prizmatik Yöntem

Prizmatik yöntemlerden Simpson ve Simpson 3/8 Kuralı incelenecektir.

5.1.3.1 Simpson Yöntemi

Ardışık iki alan arasındaki şekil kesik prizma kabul edilirse, hacim Simpson formülü ile hesaplanabilir. F_{im} , F_i ile F_{i+1} alanları arasındaki orta kesitin alanını gösterdiğine göre F_i ile F_{i+1} alanları arasında kalan hacim

$$v_i = \frac{h_i}{6} (F_i + 4F_{im} + F_{i+1}) \quad (5.4)$$

olur. Buradaki h_i , F_i ve F_{i+1} alanları arasındaki yükseklik farkıdır. Şekil 5.1 'deki çift sayı indisli alanlar orta alan (F_{im}) olarak kabul edilirse, (5.4) eşitliğinden yararlanarak, toplam hacim şu şekilde ifade edilebilir:

$$v = \frac{h_1+h_2}{6}(F_1+4F_2+F_3) + \frac{h_3+h_4}{6}(F_3+4F_4+F_5)+\dots + \frac{h_{n-2}+h_{n-1}}{6}(F_{n-2}+4F_{n-1}+F_n) \quad (5.5)$$

Eğriler arasındaki yükseklik farklarının birbirine eşit olduğu ($h_1=h_2=\dots=h_{n-1}=h$) varsayımına göre (5.5)'den

$$v = \frac{h}{3} (F_1 + 4F_2 + 2F_3 + 4F_4 + 2F_5 + 4F_6 + \dots + 2F_{n-2} + 4F_{n-1} + F_n) \quad (5.6)$$

elde edilir. F_{im} orta alanı için, ardışık iki kesit alanının ortalaması kullanılırsa, çözüm uç alanlar yöntemine dönüşür (Özgen ve Öztan, 1988).

5.1.3.2 Simpson 3/8 Yöntemi

(Simpson'un ikinci kuralı veya üç-sekiz kuralı) .

$$\int_{x_0}^{x_3} f(x) dx \cong \frac{3}{8} h [f_0 + 3f_1 + 3f_2 + f_3] - \frac{3h^5}{80} f^4(\xi) \quad ; \quad x_0 < \xi < x_3 \quad (5.7)$$

Bu formülü $[a,b]$ aralığında $n=3m$ yani $3m+1$ nokta için genelleştirirsek

$$\int_a^b f(x) dx \cong \frac{3h}{8} [f_0 + f_{3m} + 2(f_3 + f_6 + \dots + f_{3m-3}) + 3(f_1 + f_2 + f_4 + f_5 + \dots + f_{3m-2} + f_{3m-1})] \quad (5.8)$$

denklemini elde edilir .

5 noktalı bir aralık ve 4. mertebeden bir interpolasyon polinomu kullanarak

$$\int_{x_0}^{x_4} f(x) dx \cong \frac{2}{45} h [7f_0 + 32f_1 + 12f_2 + 32f_3 + 7f_4] - \frac{8h^7}{945} f^{(6)}(\xi) ; x_0 < \xi < x_4 \quad (5.9)$$

elde edilebilir.

5.2 Paralel Kesitlerle Hacim Hesabı

Arazi yüzeyi eşit aralıklı düşey düzlemlerle kesilerek, paralel kesitler elde edilir. Eş yükselti eğrilerinin, arazinin yatay düzlemlerle kesilmesi sonucu elde edildiği düşünülürse, hacim hesapları Bölüm 5.1'de verilen formüllere benzetilerek yapılabilir.

Ardışık kesitler arasındaki yatay uzaklık l ile, kesit alanları sırasıyla, $F_1, F_2, \dots, F_{n-1}, F_n$ ile gösterilirse (5.1), (5.3) ve (5.5) formüllerine benzer aşağıdaki bağıntılar geçerli olur,

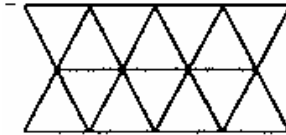
$$v = \frac{F_1 + F_2 + \dots + F_{n-1} + F_n}{n} l(n-1) \quad (5.10)$$

$$v = 0.5l(F_1 + 2F_2 + 2F_3 + \dots + 2F_{n-1} + F_n) \quad (5.11)$$

$$v = \frac{l}{3}(F_1 + 4F_2 + 2F_3 + 4F_4 + 2F_5 + 4F_6 + 2F_7 + \dots + 2F_{n-2} + 4F_{n-1} + F_n) \quad (5.12)$$

5.3 Düzenli Dağılmış Dayanak Noktaları ile Hacim Hesabı

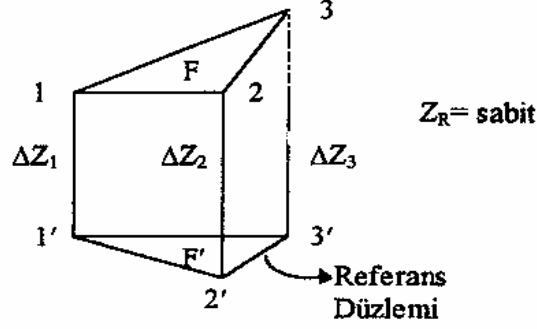
Düzenli dağılmış dayanak noktaları yardımıyla arazi yüzeyi üçgen veya dörtgen parçalara ayrılır. İstenilen bir referans düzlemi ve parçalara ayrılmış yüzey arasında kalan hacim üçgen veya dörtgen prizmalar yardımıyla belirlenir.



Şekil 5.2 Düzenli Üçgenler Ağı



Şekil 5.3 Düzenli Dikdörtgenler Ağı



Şekil 5.4 Üçgen Prizmanın Hacmi

Şekil 5.4' de görülen üçgen prizmanın hacmi açıkça yazılmak istenirse Z_1, Z_2, Z_3 noktaların kotları Z_R referans düzleminin kotu ve F' izdüşüm üçgeninin alanı olmak üzere,

$$\Delta Z_i = Z_i - Z_R \quad , i = 1, 2, \dots, n-1 \quad (5.13)$$

$$v = F' (\Delta Z_1 + \Delta Z_2 + \Delta Z_3) / 3 \quad (5.14)$$

elde edilir. x_i, y_i de nokta koordinatları olmak üzere,

$$\Delta X_2 = x_2 - x_1$$

$$\Delta Y_2 = y_2 - y_1 \quad \text{ve} \quad F' = \frac{1}{2} (\Delta X_2 \Delta Y_3 - \Delta Y_2 \Delta X_3) \quad (5.15)$$

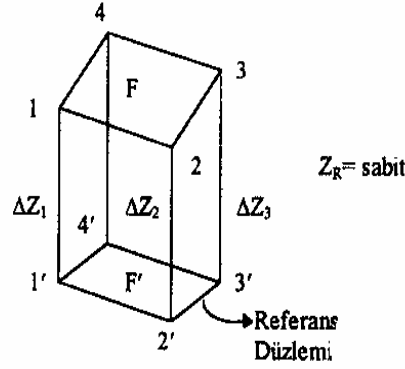
$$\Delta X_3 = x_3 - x_1$$

$$\Delta Y_3 = y_3 - y_1$$

yazılabilir. Dörtgen bir prizmanın hacmi üçgen prizmaya benzer şekilde

$$v = F' (\Delta Z_1 + \Delta Z_2 + \Delta Z_3 + \Delta Z_4) / 4 \quad (5.16)$$

olur (Yanalak 1997).



Şekil 5.5 Dörtgen Prizmanın Hacmi

5.4 Rastgele Dağılmış Verilerle Hacim Hesabı

Dayanak noktalarının rastgele dağılmış olduğu durumlarda, seçilecek bir enterpolasyon yöntemi yardımıyla düzenli dikdörtgen veya üçgen grid köşelerindeki yükseklik değerlerini enterpole etmek mümkündür. Bu durumda problem, Bölüm 5.3'de açıklanan duruma dönüşür. Üçgen veya dikdörtgen prizmalar yardımıyla hacim hesaplanır. Seçilen enterpolasyon yöntemi kullanılarak, paralel kesitler boyunca yer alan noktaların yüksekliklerini enterpole etmek de mümkündür. Bu haliyle problem, Bölüm 5.2' de anlatılan şekle dönüşür. Kesitler yardımıyla hacim hesaplanır.

Rastgele dağılmış veriden, düzenli veriye geçerken oluşacak bilgi kaybını önlemek için, dayanak noktalarını doğrudan kullanan yapılan oluşturmak gerekecektir. Üçgenleme yöntemi bu amaçla kullanılabilir uygun yapıdır. 1. yüzeyde m_1 ve 2. yüzeyde m_2 eş sayıda dayanak noktası olduğu kabul edilirse, bu iki yüzey arasında hacim hesabı aşağıda açıklanan iki farklı yöntemle yapılabilir (Yanalak 1997).

5.4.1 Ortak Bir Referans Düzlemine Göre, Üçgen Prizmalarla Hacim Hesabı

1.ve 2. yüzeydeki dayanak noktaları Delaunay kriterine göre ayrı ayrı üçgenlenir. Her iki yüzeydeki en düşük kottan daha düşük olmak kaydıyla Z_R referans kotu seçilir. Üçgen prizmalar yardımıyla 1. yüzey ile referans düzlemi arasındaki v_1 hacmi belirlenir. Aynı işlemler 2. yüzey içinde yapılır ve referans düzlemi ile 2. yüzey arasındaki v_2 hacmi hesaplanır. 1. ve 2. yüzey arasındaki aranan hacim, $v_1 - v_2$ farkıyla

bulunur. Yüzeylerin birbirlerini kesmeleri veya sınırlarının farklı olması halinde sonuçlar yanıltıcı olur. Bu durumda 5.4.2 çözümü kullanılmalıdır (Yanalak 1997).

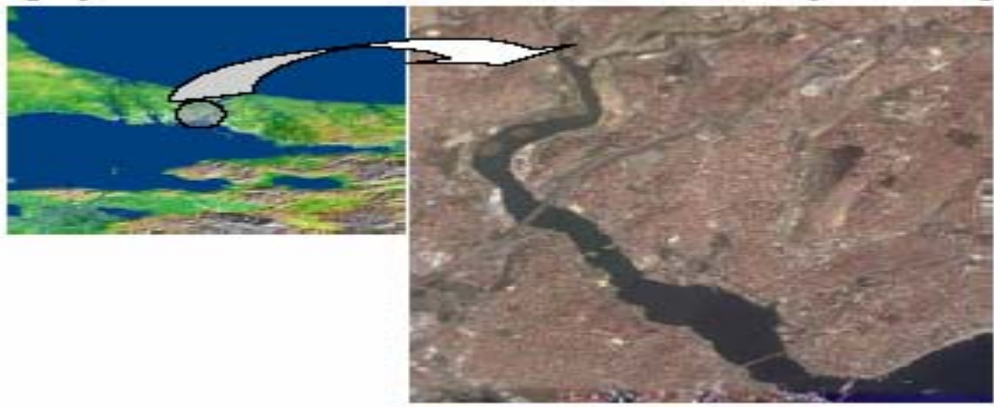
5.4.2 Üçgenlerin İzdüşümleri İle Hacim Hesabı

Her iki yüzeydeki dayanak noktaları ayrı ayrı üçgenlenir. 1. yüzeydeki noktaların 2. yüzeydeki izdüşümlerine ait yükseklikleri, 2. yüzeyde içine düştüğü üçgende yapılacak lineer enterpolasyonla bulunur. 1. yüzeye ait üçgenler kullanılarak oluşturulan üçgen prizmalar yardımıyla aranan v hacmi hesaplanır. Benzer şekilde 2. yüzeydeki noktaların 1. yüzeydeki karşılıkları enterpole edilerek, 2. yüzeye ait üçgenler yardımıyla da v hacmi hesaplanabilir. Her iki yüzeydeki üçgenlerin sayıları ve konumları birbirinden farklı olduğundan hesaplanacak v değerleri farklı olacaktır. Üçgen sayısı çok olan yüzey esas alınarak yapılacak çözüm daha iyi sonuç verecektir. Sayılar yakın olduğunda ortalama değer kullanılabilir.

Yüzeylerden birini üçgenleyip, diğer yüzeyi multikuadrik, polinom veya en küçük kareler yüzeylerinden biri ile ifade etmek de çözüm olarak düşünülebilir (Yanalak 1997).

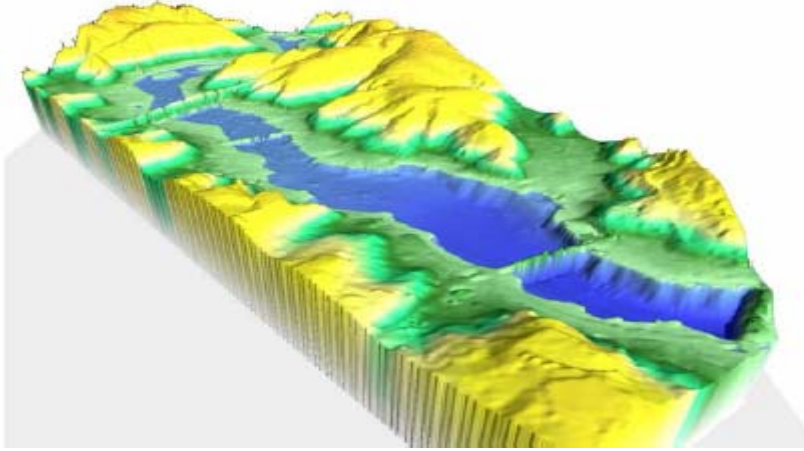
6. UYGULAMA

Bu çalışmada eski İstanbul'un merkezi olan tarihi yarımada ile Beyoğlu yakasını birbirinden ayıran önemli bir su yapısı olan Haliç bölgesine ait ölçme çalışmalarından elde edilen verilerden yararlanılmıştır (Şekil 6.1).



Şekil 6.1 Haliç Bölgesi

Bu ölçme çalışmalarına ilişkin ayrıntılı bilgiler Kalkan ve Alkan (2003)'de verilmektedir. Uygulama bölgesi ve yakın çevresine ait 3-boyutlu bir görünüm Şekil 6.2' de verilmiştir.

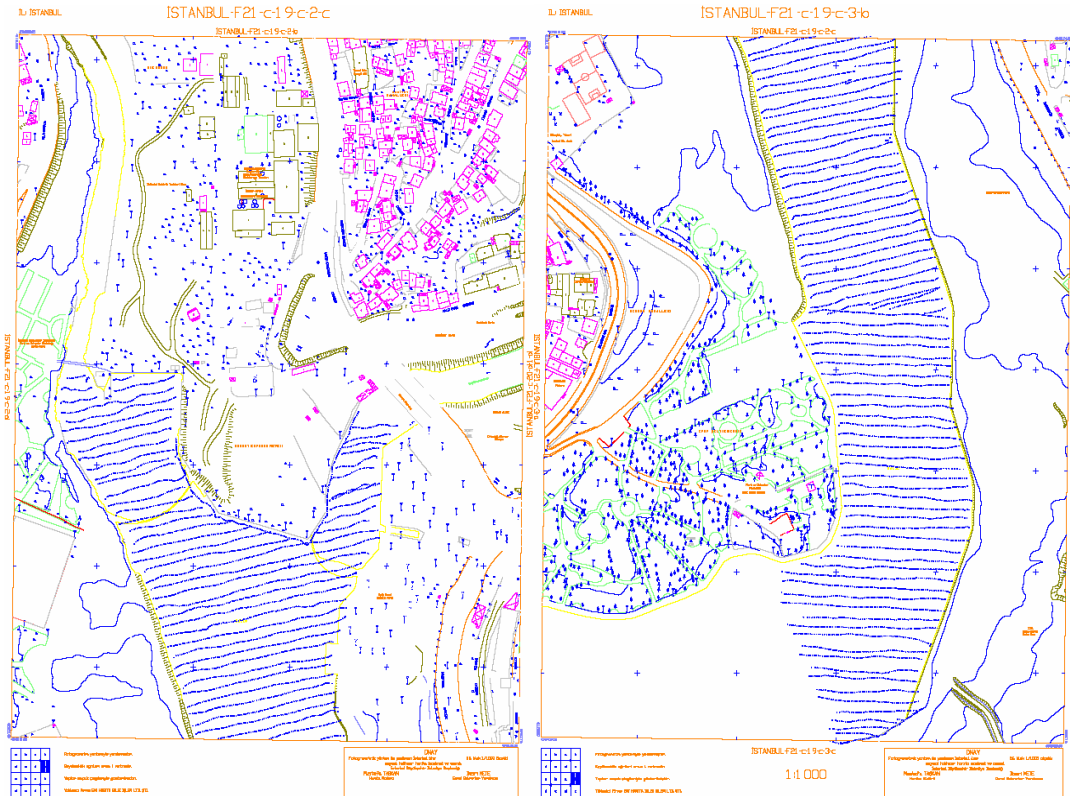


Şekil 6.2 Haliç ve yakın çevresinin 3-boyutlu görünümü

Bu uygulamada, Haliç Islah Çalışmasına altlık oluşturmak üzere, batimetrik ölçmelerle çok yoğun ve düzgün aralıklarda toplanmış veri kümesinden yararlanılmıştır. Orijinal veri kümesi olarak isimlendirdiğimiz bu küme, değişik yoğunlukta seyreltilmek suretiyle aşağıdaki yeni veri kümeleri oluşturulmuştur. Bu kümeler, yaklaşık 2 metrede bir alınan ve 8612 adet ölçme noktasına sahip orijinal veri kümesinden (**Proje 0**) elde edilen,

- ✓ **Proje 1** yaklaşık 4 metrede bir alınan ve 4553 adet ölçme noktasına sahip
- ✓ **Proje 2** yaklaşık 6 metrede bir alınan ve 3194 adet ölçme noktasına sahip
- ✓ **Proje 3** yaklaşık 8 metrede bir alınan ve 2517 adet ölçme noktasına sahip
- ✓ **Proje 4** yaklaşık 10 metrede bir alınan ve 2109 adet ölçme noktasına sahip

veri kümeleri şeklindedir. Uygulamada kullanılan veri kümesinin 1/1000 Ölçekli Sayısal Harita üzerindeki konumlarını gösterir birer ekran görüntüsü Şekil 6.3’ de görülmektedir.



Şekil 6.3 Uygulama Verilerinin 1/1000 Ölçekli Sayısal Harita Üzerindeki Gösterimi

Oluşturulan bu veri kümelerinden sayısal arazi modeli oluşturmak üzere X, Y, H değerleri bilgisayar ortamında yazılımın değerlendireceği data yapısına (*.dat uzantılı dosya) dönüştürülmüştür. Uygulama işlemine başlamadan önce uygulama alanının sınırlarını belirlenmiş ve programın blank özelliğiyle *.bln uzantılı dosyaları oluşturulmuştur. Daha sonra Surfer programındaki standart ayarlarında değişiklik yapılmadan

- Mesafenin Ters Metodu Göre Enterpolasyon
- Krigging Metodu Göre Enterpolasyon
- Minimum Eğrilik Metodu Göre Enterpolasyon
- Shepard's Metodu Göre Enterpolasyon
- En Yakın Komşu Metodu Göre Enterpolasyon
- Polinomal Regresyon Metodu Göre Enterpolasyon
- Radyal Temel Fonksiyonlar Metodu Göre Enterpolasyon
- Lineer Enterpolasyonla Triangulasyon Metodu Göre Enterpolasyon

yöntemleri kullanılarak belirlediğimiz sınırlar içerisindeki yüzey modellemesi yapılmış, elde edilen bu yüzeylerin *.grd uzantılı dosyaları oluşturulmuştur. Yüzey modellemesi yapılarak elde edilen bu yüzeylerin belirli bir Z=0 referans yüzeyine göre hacim değerleri

- Trapez (Uç alanlar Yöntemi)Kuralı
- Simpson's Kuralı
- Simpson's 3/8 Kuralı'na

göre hesaplanmıştır. Aynı bölgeye ait veri kümelerine uygulanan farklı enterpolasyon yöntemlerine göre hesaplanan hacim sonuçları ve Enterpolasyon işlem sürelerine ait değerler, Tablo 6.1,...,6.5 'de verilmiştir. Ayrıca, program tarafından önerilen(tercih edilen) hacim hesabı yöntemi de tabloda vurgulu olarak gösterilmiştir.

Tablo 6.1: Proje 0'ın Farklı Enterpolasyon Yöntemleri ile Elde Edilen Hacim Değerleri ve Enterpolasyon Süreleri

PROJE 0		2 Metrede bir alınan 8612 veri						
Yöntem ve Metodlar	Mesafenin Karesinin Tersi	Kriging	Minimum Eğrilik	Shepard's Yöntemi	En Yakın Komşuluk	Polinomal Regresyon	Radyal Temel Fonksiyon	Lineer Enterp. Triangulasyon
Trapez Kuralı:	552100,03	553675,08	552247,01	554626,44	553418,98	541472,20	553612,42	553200,34
Simpson's Kuralı:	553473,85	554856,79	553298,59	565000,04	554687,73	544188,37	554456,89	554281,52
Simpson's 3/8 Kuralı:	552647,12	554157,92	552988,37	558133,70	553989,79	542552,26	553968,15	553740,46
Tercih Edilen Hacim Değeri	552100,03	553675,08	552247,01	554626,44	553418,98	541472,20	553612,42	553200,34
İşlem Süresi (Saniye)	3,85	6,23	0,80	0,83	0,30	0,07	46,80	0,19

Tablo 6.2: Proje 1'in Farklı Enterpolasyon Yöntemleri ile Elde Edilen Hacim Değerleri ve Enterpolasyon Süreleri

PROJE 1		4 Metrede bir alınan 4553 veri						
Yöntem ve Metodlar	Mesafenin Tersi	Kriging	Minimum Eğrilik	Shepard's Yöntemi	En Yakın Komşuluk	Polinomal Regresyon	Radyal Temel Fonksiyon	Lineer Enterp. Triangulasyon
Trapez Kuralı:	550642,45	553891,03	552017,39	553746,98	554340,01	531143,20	554120,70	553777,22
Simpson's Kuralı:	552136,25	555032,00	552721,49	555444,95	554865,51	533790,67	554754,79	554855,95
Simpson's 3/8 Kuralı:	551311,88	554402,36	552635,76	554159,06	554949,38	532205,97	554441,50	554363,93
Tercih Edilen Hacim Değeri	550642,45	553891,03	552017,39	553746,98	554340,01	531143,20	554120,70	553777,22
İşlem Süresi (Saniye)	2,26	4,57	0,6	0,48	0,25	0,02	41,03	0,13

Tablo 6.3: Proje 2'nin Farklı Enterpolasyon Yöntemleri ile Elde Edilen Hacim Değerleri ve Enterpolasyon Süreleri

PROJE 2		6 Metrede bir alınan 3194 veri						
Yöntem ve Metodlar	Mesafenin Tersi	Kriging	Minimum Eğrilik	Shepard's Yöntemi	En Yakın Komşuluk	Polinomal Regresyon	Radyal Temel Fonksiyon	Lineer Enterp. Triangulasyon
Trapez Kuralı:	548422,45	553385,23	550942,65	554093,08	553069,40	514235,60	553789,27	552920,96
Simpson's Kuralı:	550032,39	554490,19	551900,35	555189,93	554258,71	516772,22	554326,34	554072,49
Simpson's 3/8 Kuralı:	549012,98	553887,80	551682,63	554682,38	553416,97	515269,89	554144,79	553476,31
Tercih Edilen Hacim Değeri	548422,45	553385,23	550942,65	554093,08	553069,40	514235,60	553789,27	552920,96
İşlem Süresi (Saniye)	1,73	4,01	0,60	0,37	0,24	0,01	39,10	0,11

Tablo 6.4: Proje 3'ün Farklı Enterpolasyon Yöntemleri ile Elde Edilen Hacim Değerleri ve Enterpolasyon Süreleri

PROJE 3 8 Metrede bir alınan 2517 veri

Yöntem ve Metodlar	Mesafenin Tersisi	Kriging	Minimum Eğrilik	Shepard's Yöntemi	En Yakın Komşuluk	Polinomal Regresyon	Radyal Temel Fonksiyon	Lineer Enterp. Triangulasyon
Trapez Kuralı:	546617,70	553456,05	551620,97	554343,55	551943,33	507239,10	553754,10	552514,02
Simpson's Kuralı:	547859,14	554571,21	552222,96	555250,76	553008,89	509732,82	554444,97	553570,05
Simpson's 3/8 Kuralı:	547225,59	553923,66	552127,21	554911,31	552634,90	508260,41	554092,84	553094,37
Tercih Edilen Hacim Değeri	546617,70	553456,05	551620,97	554343,55	551943,33	507239,10	553754,10	552514,02
İşlem Süresi (Saniye)	1,41	3,69	0,61	0,31	0,22	0,00	35,20	0,09

Tablo 6.5: Proje 4'ün Farklı Enterpolasyon Yöntemleri ile Elde Edilen Hacim Değerleri ve Enterpolasyon Süreleri

PROJE 4 8 Metrede bir alınan 2109 veri

Yöntem ve Metodlar	Mesafenin Tersisi	Kriging	Minimum Eğrilik	Shepard's Yöntemi	En Yakın Komşuluk	Polinomal Regresyon	Radyal Temel Fonksiyon	Lineer Enterp. Triangulasyon
Trapez Kuralı:	544634,75	552724,31	550784,96	553114,15	551826,80	499668,97	553326,33	552059,31
Simpson's Kuralı:	545983,01	553730,61	551964,82	554065,05	553121,56	502120,27	554499,66	553056,00
Simpson's 3/8 Kuralı:	545369,44	553334,44	551552,37	553791,22	552531,00	500676,96	553944,68	552745,97
Tercih Edilen Hacim Değeri	544634,75	552724,31	550784,96	553114,15	551826,80	499668,97	553326,33	552059,31
İşlem Süresi (Saniye)	1,24	3,63	0,78	0,28	0,21	0,01	41,00	0,07

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Yüzey Modelleme için geliştirilmiş enterpolasyon yöntemleri ve kullanılan yazılım yardımıyla yöntemlerin hacim hesabına etkisinin incelendiği bu çalışmada, farklı enterpolasyon yöntemlerinin hacim hesabına etkisi araştırılmış ve işlem süreleri belirlenmiştir. Bu amaçla, farklı yoğunlukta veriye sahip dört ayrı küme üzerinde uygulanan sekiz değişik enterpolasyon yöntemine göre hesaplanan hacim değerleri ve işlem süreleri Bölüm 6' da verilmiştir. Buna göre, yöntemlerin orijinal verilerden oluşan **Proje 0** veri kümesinden elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmasından elde edilen yüzdeler aşağıdaki şekilde belirlenmiştir.

	PROJE-1 (4553 veri)	PROJE-2 (3194 veri)	PROJE-3 (2517veri)	PROJE-4 (2109 veri)	Aritmetik Ortalama
Radyal Temel Fonksiyon Metodu	%0,09	%0,03	%0,03	%0,05	%0,05
Lineer Enterpolasyonla Triangulasyon Metodu	%0,10	%0,05	%0,07	%0,08	%0,08
Kriging Metodu	%0,04	%0,05	%0,04	%0,17	%0,08
Shepard's Metodu	%0,16	%0,10	%0,05	%0,27	%0,15
En Yakın Komşuluk Metodu	%0,17	%0,06	%0,27	%0,29	%0,20
Minimum Eğrilik Metodu	%0,04	%0,24	%0,11	%0,26	%0,16
Mesafenin Ters Metodu	%0,26	%0,67	%0,99	%1,35	%0,82
Polinomal Regresyon Metodu	%1,91	%5,03	%6,32	%7,72	%5,25

Tablo 7.1: Proje 0 Veri Kümesine Göre Diğer Veri Kümelerinin Hacim Değerlerinin Yüzdeler Farkları.

Sonuçlara bakıldığında, bu çalışma için en uygun enterpolasyon yönteminin Radyal Temel Fonksiyon Yöntemi olduğu söylenebilir. Yöntemlerin sağladığı yüzdeler farkların genel olarak nokta sayısına bağlı olarak lineer değiştiği görülmektedir.

Benzer olarak yöntemlerle ilgili işlem süreleri aşağıdaki şekilde belirlenmiştir.

	PROJE-0 (8612 veri)	PROJE-1 (4553 veri)	PROJE-2 (3194veri)	PROJE-3 (2517 veri)	PROJE-4 (2109 veri)
Polinomal Regresyon Metodu	0,07	0,02	0,01	0,01	0,01
Lineer Enterp. Triang. Metodu	0,19	0,13	0,11	0,09	0,07
En Yakın Komş. Metodu	0,30	0,25	0,24	0,22	0,21
Shepard's Metodu	0,83	0,48	0,37	0,31	0,28
Minimum Eğrilik Metod	0,80	0,60	0,60	0,61	0,78
Mesafenin Tersi Metodu	3,85	2,26	1,73	1,41	1,24
Kriging Metodu	6,23	4,57	4,01	3,69	3,63
Radyal Temel FonksiyonMetod.	46,80	41,03	39,10	35,20	41,00

Tablo 7.1: Veri Kümelerinin Enterpolasyon İşlem Süreleri

Burada da, **Polinomal Regresyon Metodu'** nun işlem süresi diğer yöntemlere göre anlamlı sayılabilecek derecede küçük çıkmıştır. İşlem süreleri ile yüzdelik hatalar arasında da normal olarak doğrusal olmayan bir ilişki söz konusudur. Yüzdelik fark olarak en küçük değere sahip olan **Radyal Temel Fonksiyon Metodu** işlem süresi olarak en uzun işlem süresine sahiptir.

Bu çalışmanın bir sonucu olarak, Bu özellikte topoğrafik yapıya sahip bölgelerde yapılacak yüzey modelleme çalışmalarında uygulanabilecek en uygun enterpolasyon yönteminin **Radyal Temel Fonksiyon Metodu** olduğunu söyleyebiliriz. Diğer yöntemlere göre dezavantaj gibi görünen daha uzun işlem süresi, gelişen bilgisayar teknolojisi karşısında göz ardı edilebilecek bir özellik olarak düşünülebilir.

KAYNAKLAR

- Acar, U.**, 1994. Sayısal Arazi Modelleri ve Kullanılan Enterpolasyon Yöntemleri, *Yüksek Lisans Tezi*, YTÜ, İstanbul.
- Alkış, A.**, 1997. Sayısal Arazi Modeli Ders Notları, YTÜ, İstanbul.
- ASCE** (American Society of Civil Engineers), **ACSM** (American Congress on Surveying and Mapping), **ASPRS** (American Society for Photogrammetry and Remote Sensing) (1994) Glossary of the Mapping of Sciences, 581s, USA.
- Bardosy A.**, 2002. Introduction to Geostatistics, Institute of Hydraulic Engineering University of Stuttgart, technical note, 134s, Germany
- Benner, E., Schult, R.**, 1972. Report On a Digital Terrain Model, Presented Paper for Comission IV at The XII' th Congress of ISP.
- Boogaart KG van den, Schaebe H.**, 2002. Kriging of Regionalized Directions, Axes, and Orientations I. Directions and Axes, *Mathematical Geology, Vol. 34, No. 5, 479-503.*
- Demirel, H.**, 1977. E.K.KY'a Göre Prediksiyon ve Kollakasyon, İ.D.M.M. Akademisi Yayınları, İstanbul.
- Golden Software.**, 2002. Surfer 8, User's Guide: Contouring and 3D surface mapping for scientist and engineers, Colorado, USA.
- Gruen, A.**, 1998, DTM Generation and Visualization, Symposium on digital Photogrammetry, İ.T.Ü., İstanbul.
- Güler, A.**, 1978. Sayısal Arazi Modellerinde Enterpolasyon Yöntemleri, *Harita Dergisi, Ocak, Sayı 85, 53-71.*
- Güngör, V.**, 1999. Coğrafi Bilgi Sistemlerinde Ağ Analizi, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Hardy, R.L.**, 1971. Multiquadric Equations of Topology and Other Irregular Surfaces, *Journal of Geophysical Research, Vol 76, No 8, 1905-1915.*
- Hardy, R.L.**, 1972. Analytical Topographic Surfaces By Spatial Intersection, *P.E.R.S.*, 38,5.
- Hardy, R.L.**, 1975. Research Results in The Aplication of Multiquadric Equations to Surveying and Mapping Problems, *Surveying And Mapping*, December, 321-332.

- Hardy, R. L.**, 1990. Theory and Applications of The Multiquadrik-Biharmonic Method: 20 Years of Discovery 1968-1988, *Computers Math. Aplic.*, Vol 19, No 8/9, 163-208.
- Heipke, C.**, 1996. Overview of Image Matching Techniques, Official Publication, OEEPE.
- Isaaks E.H., Srivastava R.M.**, 1989. An Introduction to Applied Geostatistics, Oxford University Press, Oxford, 561s.
- Jancaitis, J.R., Junkins, J.L.**, 1973. Modeling Irregular Surfaces, P.E.R.S, 39,4.
- Kalkan, Y., Alkan, R.M.**, 2003. Hassas Batimetrik Ölçmeler ve Haliç Uygulaması, 9. Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı Kitabı, 31 Mart -04 Nisan, 461-474, Ankara.
- Kalmar, J., Papp, G., Szabo, T.**, 1995. DTM Based Surface And Volume Approximation Geophysical Applications, *Computer and Geosciences*, Vol 21, No 2, p 245-257.
- Kraus, K., Mikhail, E. M.**, 1972. Linear Least-Squares Interpolation, Twelfth Congress of The International Society of Photogrametry, Presented Paper, Comission III, Ottawa, Canada.
- Kraus, K., Waldhausl, P.**, 1993. *Photogrammetry, Volume 2*, Ferd. Dümmmlers Verlag, Bonn.
- Leberl, F.**, 1973. Interpolation In a Square Grid DTM, ITC Journal, 1973-75.
- Linkwitz, K.**, 1970 Digitale Gelandemodelle, Bildmessung und Luftbildwesen.
- Martensson S.G.**, 2002. Height Determination By GPS-Accuracy with Respect to Different Geoid Models in Sweden, FIG XXII International Congress, Washington DC.USA.
- Miller, C.L., Laflamme, R.A.**, 1958. The Digital Terrain Model – *Theory and Application, Photogrametric Engineering, Vol 14, No:3, June*
- Nakamura, H.**, 1969. On Digital Terrain Models, *International Archives of Photogrametry, Vol XVII, Part 10, Presanted Paper, 5-26*
- Preusser, V.A.**, 1984. Bivariate Interpolation Uber Dreieckselementen Durch Polynome 5. Ordnung Mit C1-Kontinuitat, ZFV , 6, 229-3001.
- Özer, H.**, 1986. Sayısal Arazi Modeli Yöntemleri Yazılımlar ve Uygulamalar, *Yüksek Lisans Tezi, Y.T.Ü.Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.*
- Özgen, M.G., Öztan, O.**, 1988. Kartometri, İ.T.Ü Matbaası, İstanbul.

- Öztan, O.**, 1981. Bir Otoyol Geçişine Ait Triangulasyon Açında Prezisyon Araştırması ve Bazı Öneriler, İ.T.Ü. İnşaat Fak. Jeodezi ve Fotogrametri Müh. *Doçentlik Tezi*.
- Öztan, O.**, 1983. Jeodezik Normal Denklemlerde Band Genişliği Üzerine Bir Eleştiri, İ.T.Ü Dergisi, Cilt 41, Sayı 1-2.
- Öztan, O.**, 1986. Linear Denklem Sistemlerinin Çözümünde Modern Bellek Depolama Yöntemleri, İ.T.Ü. Jeodezi Anabilim Dalı Semineri.
- Öztürk, E.**, 2004. Digital Hava Kameraları, Yüksek Lisans Seminer, Z.K.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Zonguldak.
- Schut, G. H.**, 1976. Review of Interpolation Methods for Digital Terrain Models, *The Canadian Surveyor, Vol 30, No 5, December*.
- Torlegard, K.**, 1988. Some Photogrammetric Experiments with Digital Image Processing, ISPRS88.
- Watson, D.F.**, 1992. Contouring: A Guide to The Analysis and Display of Spatial Data, Pergamon pres.
- Watson, D.F., Philip, G.M.**, 1984a. Triangle Based Enterpolation, *Mathematical Geology, Vol 16, No 8, 779-795*
- Wolf, V.H.**, 1981. Multiquadratische Methode und Kollakation, AVN/3, 89-95
- Yanalak, M.**, 1991. Sayısal Arazi Modelleri ve Kullanılan Enterpolasyon Yöntemleri, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Yanalak, M.**, 1997. Sayısal Arazi Modellerinden Hacim Hesaplarında En Uygun Enterpolasyon Yönteminin Araştırılması, *Doktora Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Yılmaz, A.**, 2002. Farklı Kaynaklardan Üretilen Sayısal Yükseklik Modellerinin Karşılaştırılması, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

ÖZGEÇMİŞ

Sinan KÖROĞLU, 24.04.1973 tarihinde Karadeniz Ereğli’de doğdu. İlk orta ve lise öğrenimini Karadeniz Ereğli’de tamamladı. 1992 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesinde Jeodezi ve Fotogrametri Mühendisliği lisans eğitimine başladı. 1996 yılında mezun olduğu sene aynı bölümün yüksek lisans programına girdi. Aynı yıl Karadeniz Ereğli Belediyesinde çalışmaya başladı. 1997 yılında askerlik görevini yerine getirdi. 1998 yılında Bayındırlık ve İskan Bakanlığında Harita Mühendisi ünvanıyla görevine başladı. Halen bu görevini sürdürmektedir.