



**T.C.**  
**SELÇUK ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**SAYISAL ARAZİ MODELLERİNİN**  
**KARAYOLU PROJELERİNDEKİ HACİM**  
**HESAPLAMALARINA ETKİSİ**

**Mehmet DOĞRULUK**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Harita Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Mayıs-2013**  
**KONYA**  
**Her Hakkı Saklıdır**

## TEZ KABUL VE ONAYI

Mehmet DOĞRULUK tarafından hazırlanan “Sayısal Arazi Modellerinin Karayolu Projelerindeki Hacim Hesabına Etkisi” adlı tez çalışması 31/05/2013 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Harita Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

### Jüri Üyeleri

#### Başkan

Prof.Dr.Cevat İNAL

#### Danışman

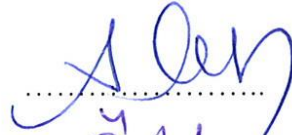
Doç. Dr. Ayhan CEYLAN

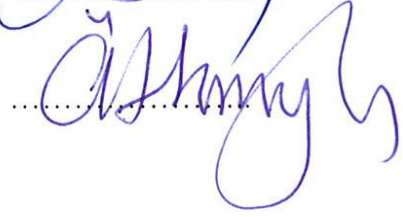
#### Üye

Doç.Dr.Ömer MUTLUOĞLU

### İmza







Yukarıdaki sonucu onaylarım.


Prof. Dr. Aşır GENÇ  
FBE Müdürü

## TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

## DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.



İmza

Mehmet DOĞRULUK

Tarih: 31.05.2013

## ÖZET

### YÜKSEK LİSANS TEZİ

## SAYISAL ARAZİ MODELLERİNİN KARAYOLU PROJELERİNDEKİ HACİM HESAPLAMALARINA ETKİSİ

**Mehmet DOĞRULUK**

**Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü  
Harita Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Danışman: Doç. Dr. Ayhan CEYLAN**

**2013, 115 Sayfa**

**Jüri**

**Doç. Dr. Ayhan CEYLAN**

**Prof.Dr. Cevat İNAL**

**Doç.Dr. Ömer MUTLUOĞLU**

Sayısal Arazi Modeli (SAM), yeryüzünün topoğrafik yüzeyi üzerinden belirli aralıklarla ve çeşitli yöntemlerle yüzey bilgisinin toplanılması ve yeryüzünün fiziksel yapısının bilgisayar ortamında temsil edilmesi işlemlerini içerir. SAM Karayolu projelerinde yapılan hesap ve analizlerde büyük avantajlar sağlamaktadır.

Karayolu projelerinde yapılacak toprak işleri, yapım maliyetlerini doğrudan etkiler. Dolayısıyla yapılacak toprak işi miktarının bilinmesi gerekir. Bu amaçla yapılan hacim hesapları SAM ile kolaylıkla yapılabilmekte, hesaplamalar olası güzergah seçenekleri için ayrı ayrı yapılarak sonuçlar klasik yöntemlere göre daha etkin bir biçimde analiz edilebilmektedir.

SAM ile yapılan hacim hesaplarında, kazılan ve doldurulan bölgeler birer yüzey olarak temsil edilir. Bu yüzeyler yüzey noktalarından oluşur. Nokta sayısının fazla olması arazi yüzeyinin daha iyi temsil edilmesi anlamına gelir. Bu ise hacim hesabının gerçeğe yakın sonuç vermesini sağlar. Bu amaçla yapılan nokta sıklaştırmaları, farklı hesaplama algoritmalarına sahip enterpolasyon fonksiyonları ile yapılabilir. Ancak farklı hesaplama algoritmaları ile üretilen yüzey noktalarının araziye temsil yeteneği de farklı olacaktır.

Bu çalışmada belirlenen bir karayolu koridoru için SAM oluşturulmuş ve bu sayede karayolu projelendirmesi yapılmıştır. Ayrıca 9 farklı enterpolasyon yöntemi kullanılarak sıklaştırılan yüzeyler ile proje kotlarını ifade eden yüzey arasındaki hacim hesabı SAM ile yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre farklı enterpolasyon algoritmalarının yüzeylerin araziye temsil etme yeteneğini etkilediği görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Sayısal arazi modeli, enterpolasyon yöntemleri, kriging, variogram, hacim hesabı, karayolu koridoru

## **ABSTRACT**

### **MS THESIS**

#### **THE EFFECT OF DIGITAL TERRAIN MODELS ON VOLUME COMPUTATION AT HIGHWAY PROJECT**

**Mehmet DOĞRULUK**

**THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF  
SELÇUK UNIVERSITY  
THE DEGREE OF MASTER OF  
GEOMATICS ENGINEERING**

**Advisor: Assoc. Prof.Dr. Ayhan CEYLAN**

**2013, 115 Pages**

**Jury**

**Assoc.Prof.Dr. Ayhan CEYLAN**

**Prof.Dr. Cevat İNAL**

**Assoc.Prof.Dr. Ömer MUTLUOĞLU**

Digital Terrain Model (DTM) contains processes to collect data on terrain surface using different data collection methods and digital representation of a portion of the earth surface. DTM provides great advantages of computation and analyses issues for highway corridor planning.

Amount of volume effects directly coast of construction of highway project. Therefore we need to know amount of volume. Volume computation for this purpose can be made easily with DTM. It can be obtained for each alternative route and results can be analyzed effectively with respect to traditional methods by using DTM.

Excavated and filled areas are represented as surfaces which consist of surface points. The number of reference points effects representation of the surface. For this purpose, point densifications can be made with different interpolation methods which have different calculation algorithm. The points generated by different computational algorithms will have different ability to represent the terrain surface.

In this study, a digital terrain model was generated to represent a part of terrain corridor. The highway project was also designed by DTM. Terrain surfaces were created by using nine different interpolation methods with the combination project surface. Furthermore, volume computation was maintained between terrain surfaces and project surface. The result indicates that the selected interpolation methods affected the ability of representation of the terrain surface.

**Keywords:** Digital terrain model, interpolation methods, kriging, variogram, volume computation, highway corridor.

## ÖNSÖZ

“Sayısal Arazi Modellerinin Karayolu Projelerindeki Hacim Hesaplamalarına Etkisi” konulu yüksek lisans çalışmamın her aşamasında akademik ve manevi desteğini esirgemeyen, tez yürütücülüğümü üstlenen saygı değer hocam Doç. Dr. Ayhan CEYLAN’ a teşekkürlerimi sunarım. Aynı zamanda üniversite eğitimim boyunca bilimsel katkıda bulunan bütün hocalarıma, yardımları için Doç. Dr. Metin SOYCAN’ a ve Yrd. Doç. Dr. Cemal Özer YİĞİT’ e teşekkür ederim.

Bu uzun sürecin her aşamasında beni destekleyen ve sabrını esirgemeyen eşim Merve’ye, anlayışından dolayı teşekkür ederim.

Mehmet DOĞRULUK  
KONYA-2013

## İÇİNDEKİLER

|   |            |
|---|------------|
| <b>ÖZET .....</b>   | <b>iv</b>  |
| <b>ABSTRACT.....</b>  | <b>v</b>   |
| <b>ÖNSÖZ .....</b>  | <b>vi</b>  |
| <b>İÇİNDEKİLER.....</b>   | <b>vii</b> |
| <b>SİMGELER VE KISALTMALAR.....</b>                                       | <b>ix</b>  |
| <b>1. GİRİŞ VE KAYNAK ARAŞTIRMASI .....</b>                               | <b>1</b>   |
| <b>2. SAYISAL ARAZİ MODELİ (SAM).....</b>                                 | <b>6</b>   |
| 2.1. Sayısal Arazi Modelinin Tanımı.....                                  | 7          |
| 2.2. Sayısal Arazi Modeline Konu Olan Arazi Yüzeyleri .....               | 10         |
| 2.3. Sayısal Arazi Modelinin Doğruluğunu Etkileyen Faktörler .....        | 13         |
| 2.4. Sayısal Arazi Modeli Verilerinin Toplanması .....                    | 16         |
| 2.4.1. Klasik yöntemler .....   | 18         |
| 2.4.2. Fotogrametrik yöntemler .....                                      | 20         |
| 2.4.3. Uydu bazlı yöntemler.....  | 21         |
| 2.4.4. Harita ve altlıkların sayısallaştırılması .....                    | 26         |
| 2.5. Sayısal Arazi Modeli Verilerinin İşlenmesi.....                      | 27         |
| 2.5.1. Yüzey oluşturma yöntemleri.....                                    | 28         |
| 2.6. Sayısal Arazi Modellerinde Kullanılan Enterpolasyon Yöntemleri ..... | 32         |
| 2.6.1. Ağırlıklı ortalama yöntemi.....                                    | 33         |
| 2.6.2. Kriging yöntemi .....  | 35         |
| 2.6.3. Multiküadratik enterpolasyon yöntemi .....                         | 43         |
| 2.6.4. En küçük (Minimum) eğrilik yöntemi .....                           | 45         |
| 2.6.5. En yakın komşu yöntemi .....                                       | 47         |
| 2.6.6. Doğal komşuluk yöntemi.....  | 47         |
| 2.6.7. Lineer enterpolasyon ile üçgenleme .....                           | 49         |
| 2.6.8. Uzunluk (Radyal) temelli fonksiyonlar yöntemi .....                | 51         |
| 2.6.9. Lokal polinomlar yöntemi .....                                     | 53         |
| 2.6.10. Modified Shepard's yöntemi .....                                  | 56         |
| 2.7. Sayısal Arazi Modellerinin Sunumu.....                               | 59         |
| <b>3. HACİM HESAPLARI.....</b>  | <b>61</b>  |
| 3.1. Eşyükseklik Eğrilerinden Hacim Hesabı .....                          | 61         |
| 3.1.1. Ortalama alan yöntemi.....   | 61         |
| 3.1.2. Uç alanlar yöntemi.....  | 62         |
| 3.1.3. Prizmatik yöntem.....  | 62         |
| 3.2. Paralel Kesitler ile Hacim Hesabı .....                              | 63         |
| 3.3. Düzenli Dağılmış Veriler ile Hacim Hesabı .....                      | 63         |
| 3.4. Rastgele Dağılmış Veriler ile Hacim Hesabı .....                     | 64         |

|   |            |
|---|------------|
| <b>4. UYGULAMA .....</b>  | <b>65</b>  |
| 4.1. Çalışmanın Amacı.....  | 65         |
| 4.2. Verilerin Toplanması .....                                   | 67         |
| 4.3. Çalışmada Kullanılan Yazılımlar.....                         | 68         |
| 4.3.1. Surfer 9 yazılımı .....                                    | 69         |
| 4.3.2. Netcad 5.1 yazılımı .....                                  | 69         |
| 4.4. Uygun Enterpolasyon Yöntemlerinin Seçimi .....               | 71         |
| 4.4.1. Enterpolasyon yöntemlerinin genel değerlendirmesi .....    | 71         |
| 4.4.2. Enterpolasyon yöntemlerinin ayrı ayrı değerlendirmesi..... | 77         |
| 4.4.3. Enterpolasyon sonuçlarının değerlendirilmesi.....          | 99         |
| 4.5. Hacim Hesapları .....  | 101        |
| <b>5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....</b>                              | <b>104</b> |
| <b>KAYNAKLAR .....</b>  | <b>107</b> |
| <b>EKLER .....</b>  | <b>114</b> |
| EK-1 Karayolu Projesinin Boykesiti .....                          | 114        |
| <b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>   | <b>115</b> |



## SİMGELER VE KISALTMALAR

### Simgeler

|               |   |                                    |
|---------------|---|------------------------------------|
| $\Sigma$      | : | Toplam                             |
| $\mu\text{m}$ | : | Mikrometre (mikron)                |
| x, y          | : | Dayanak noktalarının koordinatları |
| h             | : | Yükseklik değeri                   |
| $\sigma^2$    | : | Varyans                            |
| W             | : | Bilinmeyenler vektörü              |
| $c^2$         | : | Yumuşatma parametresi              |

### Kısaltmalar

|       |   |  |
|-------|---|--|
| AFZ   | : | Almus Fay Zonu                           |
| ASAR  | : | Advanced Synthetic Aperture Radar        |
| CCD   | : | Charge Coupled Device                    |
| CAD   | : | Computer Aided Desing                    |
| DEM   | : | Digital Elevation Model                  |
| DGM   | : | Digital Ground Model                     |
| DHM   | : | Digital Height Model                     |
| DTM   | : | Digital Terrain Model                    |
| DDTM  | : | Dinamic Digital Terrain Model            |
| GPS   | : | Global Positioning System                |
| KAFZ  | : | Kuzey Anadolu Fay Zonu                   |
| KOH   | : | Karesel Ortalama Hata                    |
| IDW   | : | Ters Mesafe Ağırlıklı                    |
| InSAR | : | Interfometric Synthetic Aperture Radar   |
| LIDAR | : | Light Detection And Ranging              |
| RADAR | : | Radio Detecting And Ranging              |
| RAR   | : | Real Aperture Radar                      |
| RTK   | : | Gerçek Zamanlı Kinematik Konum Belirleme |
| SAM   | : | Sayısal Arazi Modeli                     |
| SAYM  | : | Sayısal Arazi Yükseklik Modeli           |
| SAR   | : | Synthetic Aperture Radar                 |
| TCK   | : | Türkiye Cumhuriyeti Karayolları          |
| TIN   | : | Triangular Irregular Network             |
| USGS  | : | United States Geological Survey          |
| YKN   | : | Yer Kontrol Noktası                      |

## 1. GİRİŞ VE KAYNAK ARAŞTIRMASI

Üzerinde yaşadığımız yeryüzüne yönelik konum bilgisi, hemen hemen toplumun her kesiminin doğrudan ya da dolaylı olarak ihtiyaç duyduğu bir konudur. Konum bilgisi, farklı kullanım alanları içerisinde çeşitli amaçlar için kullanılmakla birlikte, toplumların yaşam standartlarının iyileştirilmesi ve toplumu oluşturan bireylere yönelik birçok farklı problemin çözümü neticesinde toplum refahının sağlanması amacı ile kullanılmaktadır.

İlkçağlardan günümüze kadarki süreçte kalıcı konum bilgisi ihtiyacı farklı amaçlar için üretilen haritalar ile sağlanmaya çalışılmış, teknolojik gelişmelere paralel olarak haritaların üretim çeşitliliği ve kullanım alanları hızla artış göstermiştir. Çağımızda insan nüfusundaki hızlı artış konum bilgisinin önemini daha da arttırmış, doğal kaynakların araştırılması, çevre kirliliği, yaşam alanlarının belirlenmesi ve planlanması gibi konularda konuma dayalı planlama yapılması zorunlu bir hal almıştır.

Mühendislik çalışmalarında klasik haritalar ile karşılanmaya çalışılan konum bilgisi ihtiyacı, çeşitli analizlerin yapılması, mühendislik yapılarının tasarımı ve görselleştirilmesi gibi konularda kullanıcı beklentilerine yeterince cevap verememektedir. Bu sebeple haritanın günümüzdeki tanımını farklı bir boyuta taşınmış, sınırlı içerikteki sembollerle ifade edilen klasik basılı haritaların yerine görselleştirilmiş ve interaktif haritaları içeren sayısal harita kavramı gündeme gelmiştir.

Sayısal haritaların kullanımının yaygınlaşması ile gerçek yeryüzünün fiziksel şekline ilişkin bilgiler daha etkin kullanılmaya başlamıştır. Klasik haritalarda statik bir bilgi olarak gözlemlenebilen arazi yükseklik bilgisi, sayısal haritalarla dinamik bir bilgi olarak kullanılabilmiş ve gerçek yeryüzü çok daha pratik ve üç boyutlu olarak görselleştirilebilmiştir.

Yeryüzünün üç boyutlu sayısal modelinin oluşturulması günümüzde grafik tasarım programları ile yapılmaktadır. Grafik tasarım programları ile mühendislik projesine yönelik hesaplama ve analiz işlemleri, planlanacak arazinin sayısal bir modelini oluşturularak yapılmaktadır. Aynı zamanda oluşturulan sayısal arazi modeli (SAM) kullanılarak, projelerin grafik unsurlarının tasarımı ve görselleştirilmesi yapılabilmektedir.

SAM, gerçek yeryüzünün topoğrafik yüzeyi üzerinden belirli aralıklarla ve çeşitli yöntemlerle yüzey bilgisinin toplanması ve yeryüzünün fiziksel yapısının bilgisayar ortamında temsil edilmesi işlemlerini içerir. Günümüzde çok çeşitli bir

kullanıcı kitlesi tarafından farklı amaçlarla sayısal arazi modeline ihtiyaç duyulmaktadır. Ancak bu çalışmada sayısal arazi modelinin mühendislik amaçlı kullanımını üzerinde durulmuştur.

SAM, sivil ve askeri amaçlı mühendislik projelerinde; uçuş koridoru simülasyonlarının hazırlanması, deniz dibi modelleme, çevre düzenleme çalışmaları, iletişim sistemlerinin planlanması, yerleşim alanlarının görselleştirilmesi, canlıların yaşam alanlarının belirlenmesi, olası doğal afetlere karşı tedbir alınması, gecekondulaşmanın önlenmesi ve ulaşım sistemlerinde (karayolu, demiryolu) geçki koridorunun belirlenmesi gibi çeşitli konuların çözümünde etkin olarak kullanılmaktadır. Aynı zamanda SAM kullanımı, mühendislik projelerinde çok önemli bir yeri olan proje parametrelerinin hesabı ve çeşitli analiz işlemlerinin çok daha pratik ve kısa zamanda yapılması sağlamıştır. Özellikle bu çalışmanın konusu olan karayolu projelerinde; güzergah alternatiflerinin değerlendirilmesi, proje geometrik unsurlarının tasarımı, hacim ve maliyet hesaplarının yapılması ile hazırlanan proje parametrelerinin yeryüzüne uygulanması gibi konularında SAM kullanımı vazgeçilmez duruma gelmiştir.

Karayolu projelerinin araziye uygulanması aşamasında yapılan toprak işlerinin maliyet hesaplarının yapılabilmesi için kazılacak ve doldurulacak hacimlerin hesaplanması gerekir. Hacim hesabında, oluşturulan matematiksel model kullanılarak kazılan ve doldurulan kısımlar birer yüzey olarak temsil edilir. Ancak fiziksel yeryüzü gibi düzgün olmayan yüzeylerin temsil edilmesi için bu yüzeylere bir matematiksel model uydurmak gerekmektedir. Bu modellerin oluşturulması için teorik olarak bu modeli oluşturan tüm noktaların var olması gerekir ki bu da pratikte mümkün değildir. Uygulamada bunun yerine yüzeyi temsil eden daha az yoğunlukta örnekleme noktaları kullanılır. Bu noktalar bütünü, genellikle basit fonksiyonlarla ifade edilebilen yüzeyleri oluşturur. Bu noktaların oluşturduğu yüzeyler çoğu zaman belirli bir geometrik şekle sahip değildir. Hacim hesabı yapabilmek için bu yüzeyler anlamlı geometrik şekillere ayrılır. Bunun için genellikle üçgen veya kare şekiller tercih edilir. Bu işlemin ardından farklı yüzeyler arasında kalan hacimler, çeşitli hacim hesap yöntemleri ile hesaplanabilir.

Karayolu projelerinde hacim hesapları genellikle paralel kesitler yöntemine göre yapılır. Paralel kesitler yöntemi ile hacim hesabında karayolu güzergahının enkesit ve boykesiti oluşturularak alt ve üst yüzeyler arasında kalan yarma ve dolgu hacimleri hesaplanır. Bu iki yüzey arasındaki hacim hesabının sonucu, özellikle arazi yapısını

temsil eden yüzeyin nokta sıklığına bağlıdır. Bu yüzey, nokta sıklığına bağlı olarak geometrik şekillerle ayrılır. Nokta sıklığının fazla olması ile geometrik şekillerin boyutları küçülür ve oluşturulan yüzey arazi karakteristiklerini daha duyarlı temsil eder. Bu durum araziden toplanan verilerin sıklaştırılması ile sağlanabilir. Ancak nokta kestirimi olarak isimlendirilen bu işlem, kestirim fonksiyonunun hesaplama algoritmasına bağlı olarak farklı sonuçlar doğurur. Hacim hesaplarını doğrudan etkileyen bu işlemin sonuçlarının araştırılması gerekir.

Yukarıda söz edilen hacim hesaplarını bilgisayar desteği olmadan yapmak zahmetli ve oldukça zaman alıcı bir süreçtir. Günümüzde karayolu projelerinin hacim hesapları SAM ile kolaylıkla yapılabilmektedir. SAM kullanımı ile hesaplamada hata yapma riski azalmış ve hesap sonuçlarının görselleştirilmesi de mümkün hale gelmiştir. Bu çalışmada belirli bir bölge için oluşturulan sayısal arazi modelinin karayolu projelerinde yapılan hacim hesaplarına etkisi araştırılmıştır. Karayolu koridorunun üç boyutlu olarak temsil edilmesi, projelendirilmesi ve yüzeyler arasında kalan hacimlerin hesaplanması SAM kullanılarak yapılmıştır.

SAM kullanılarak farklı mühendislik konularına yönelik yapılmış bazı çalışmalar aşağıda açıklanmıştır.

Yener (1993) yaptığı çalışmada sayısal arazi modelinin tarihsel gelişimi, kullanım alanları, amaçları, oluşum aşamaları ve modelleme yazılımları incelemektedir. İstanbul Büyükbent' in kuzeybatısındaki 75 hektarlık bir orman alanını uygulama alanı olarak seçmiştir. Çeşitli veri toplama yöntemleri kullanılarak elde edilen 336 dayanak noktası yardımıyla bir CAD programı kullanılarak sayısal arazi modeli oluşturulmuştur. Oluşturulan modelin ormancılık çalışmalarında kullanılabilirliği incelemiştir

Yanalak (1997) yapmış olduğu tez çalışmasında sayısal arazi modellemede kullanılan enterpolasyon yöntemleri, üçgenleme algoritmaları ve hacim hesaplama yöntemleri detaylı olarak açıklamaktadır. Sayısal arazi modeli oluşturmak üzere seçilen yedi farklı arazi grubu üzerinde, farklı enterpolasyon yöntemleri kullanarak oluşturduğu alt ve üst yüzeyler arasında hacim hesaplamaları yapmıştır. Uygulama sonuçlarına göre sayısal arazi modelini temsil eden dayanak noktaları arasındaki mesafe, enterpolasyon yöntemleri, kesit aralığı ve üçgenlemede kullanılan kritik daire yarıçapı konuları üzerinde değerlendirmeler yapmıştır.

Soycan ve Soycan (2002) yaptıkları uygulamada, sayısal arazi modeli oluşturmak amacıyla 1/5000 ölçeğindeki yükseklik eğrili bir harita üzerinde 125' er metre aralıklarla, karelajların X, Y, H değerleri okuyarak bunlar dayanak noktaları

olarak kullanılmıştır. Farklı enterpolasyon yöntemleri ile 1m×1m' lik grid verileri oluşturulmuş, bunların X, Y ve H değerleri elde edilmiştir. Oluşturulan grid verileri ile modelin yükseklik eğrili haritası yapılmış ve orijinal pafta ile karşılaştırılmıştır. Her bir yöntemle elde edilen grid verilere göre oluşturulan sayısal arazi modeli üzerinde yaklaşık 800 m aralıklı iki nokta belirlenerek, bu iki nokta arasında 50' şer metre arayla boykesit noktaları işaretlenmiş ve bu boykesit noktalarından sağa ve sola 10' ar metre alınarak 20 metre genişliğinde enkesitler oluşturulmuştur. Koordinatları belirlenen enkesit ve boykesit noktalarının Surfer 3.2 yazılımında yükseklikleri(siyah kotları) hesaplanmıştır.

Boykesit noktalarının, kilometraj ve yükseklik değerlerine bağlı olarak orijinal paftaya uygun sonuçlar veren beş yöntemle göre boykesitleri oluşturulmuştur. Boykesit üzerinde kırmızı çizgi, kazı ve dolgu hacimlerinin minimum tutulması hedeflenerek oluşturulmuştur.

Arazinin siyah kotlarının oluşturduğu doğal yüzey verisi ve kırmızı kotlarının oluşturduğu proje verileri, beş farklı enterpolasyon yöntemi ile elde edilen yüzeyler için ayrı ayrı iki yüzey halinde tanımlanarak gridlenmiştir. İkili yüzeyler arasında kalan bölgenin hacmi, en ve boy kesitlerin çizilmesine ve alanlarının hesaplanmasına gerek kalmadan hesaplanmıştır.

Çakır (2005) yaptığı uygulamada hacim hesabı için iki farklı yüzey kullanılmıştır. Birinci yüzey için KTÜ kampüs sınırları içerisinde eğimi düzgün değişen 110m\*110m büyüklüğünde bir arazi kesimi seçilmiştir, ikinci yüzey olarak fonksiyon ile tanımlı 110m\*110m büyüklüğünde teorik bir yüzey kullanılmıştır. İki yüzey için dört enterpolasyon yöntemi kullanılarak SYM oluşturulmuştur. SYM'den elde edilen hacim sonuçları birbirleri ile karşılaştırılarak enterpolasyon yöntemlerinin avantaj ve dezavantajları incelenmiştir.

Gürsoy (2006) yapmış olduğu tez çalışmasında Kuzey Anadolu Fay Zonu (KAFZ)'den ayrılan Almus Fay Zonu (AFZ)'nin jeolojik özelliklerini uzaktan algılama yöntemleri ile elde edilen veriler yardımıyla sayısal arazi modeli oluşturularak incelenmiş ve AFZ' nin aktivitesi araştırılmıştır.

Köroğlu (2006) yapmış olduğu çalışmada, Haliç bölgesinde yapılan ıslah çalışmasına altlık oluşturmak üzere, otomatik veri toplama sistemi adı verilen modern bir ölçme yöntemi kullanılarak toplanmış olan verileri değerlendirmiş, 4, 6, 8 ve 10 m de bir alınan veri kümeleri oluşturulmuş ve farklı enterpolasyon yöntemleri kullanılarak veri kümelerine ait yüzeyler elde edilmiştir. Elde edilen bu yüzeylerin belirli bir Z=0

referans yüzeyine göre hacim değerlerini hesaplamıştır. Farklı yoğunlukta veriye sahip dört ayrı veri kümesi üzerinde uygulanan değişik enterpolasyon yöntemine göre hesaplanan hacim değerleri ile orijinal veri kümesinden elde edilen hacim hesap sonuçları arasındaki farklar karşılaştırılmıştır.

Köse (2006) yapmış olduğu çalışmada, Stereo ASAR görüntülerinden elde edilen SYM' den faydalanılarak Sayısal arazi modeli üretilmesi ve üretilen modelin doğruluk kontrolünün yapılması amaçlanmıştır. Çalışma için, Envisat Uydusundan elde edilen ve İç Anadolu Bölgesi'nin büyük bir kısmını kapsayan Stereo ASAR görüntüleri ile bu alan içerisinde belirlenen ve GPS ile ölçülen yer kontrol noktaları kullanılmıştır.

An (2007) yaptığı çalışmada Türkiye Kömür İşletmeleri Kurumuna bağlı Çanakkale İl Çan İlçesi sınırlarında yer alan açık maden işletmesi için jeodezik ölçümler yapmış ve işletme sınırları içerisindeki kömür havzası için sayısal arazi modeli oluşturmuştur. Elde edilen model üzerinden kesitler olarak yapılması gereken dekapaj kazı miktarını, üçgen yüzeylerin belli bir referans yüzeyine göre hacim hesabı yöntemini kullanarak hesaplamıştır.

Demirci (2008) yaptığı çalışmada Batı Karadeniz Bölgesi Filyos Havzası'nda, nehir yatağında oluşan sediment birikim alanlarını, uydu görüntüleri ve sayısallaştırma ile elde edilen verilerle oluşturulan bir sayısal arazi modeli ile analiz etmiştir. .

Zhu ve ark. (2009) yaptığı çalışmada yağış miktarına göre su birikimi için dinamik bir simülasyon oluşturmuştur. Oluşturduğu sayısal arazi modeli ile yağış, sıcaklık, bitki dağılımı ve çeşitliliği, nem, mevsimsel etkiler ve bunların zamana bağlı değişimlerini bir araya getirerek dinamik sayısal arazi modeli (DDTM) elde etmiştir. Bu model üzerinde iki farklı zaman dilimine göre oluşan su birikimi miktarını bir simülasyon ile karşılaştırmış.

Avcı (2010) yaptığı tez çalışmasında iki yüzey arasında hacim hesabı için fotogrametrik yöntemler ile veri toplayarak sayısal arazi modeli oluşturmuştur. Bir kum ocağı için kazı öncesi ve sonrasına göre elde edilen veriler yardımıyla iki yüzey arasındaki hacim değerini farklı CAD programları ile hesaplayarak geliştirdiği yeni bir hacim hesabı programı ile elde ettiği hacim değerlerini kıyaslamıştır. Kıyaslamada gerçek hacimde değerleri olarak taşınan hafriyat miktarı referans alınmıştır.

## 2. SAYISAL ARAZİ MODELİ (SAM)

Arazi modellemeye konu olan yeryüzü, sürekli düzensiz yapıda ve matematiksel olarak bütünüyle tanımlanamayan üç boyutlu karmaşık bir yüzeydir. Bu düzensiz yapıdaki topoğrafik yüzeyi oluşturan sonsuz sayıdaki noktanın konum ve yüksekliklerinin bilinmesi ile yüzey tanımlanabilir. Ancak uygulamada bu yaklaşım mümkün olmadığı için yeryüzünde düzenli veya düzensiz dağılımda konumu ve yüksekliği bilinen noktalar seçilerek arazi yüzeyi temsil edilmeye çalışılır.

Sayısal Arazi modeli (SAM) yeryüzünün topoğrafik yüzeyi üzerinden belirli aralıklarla yüzey bilgisinin toplanılması ve arazi öz yapısının bilgisayar desteği ile temsil edilmesi işlemlerini içerir. Teknolojik gelişmeler neticesinde doğruluğu ve hızı artan ölçme yöntemleri sayesinde yüzey bilgisinin istenilen doğrulukta, yoğunlukta ve dağılımda elde edilmesi, sonuçların istenilen düzeye ulaşmasını sağlamıştır. Öte yandan bilgisayar kapasitelerindeki artış ve işlem sürelerinin azalması, SAM ürünlerinin günümüzde oldukça yaygın kullanımına olanak sağlamıştır.

Otomatik çizim sistemleri, kartografik sayısallaştırıcılar, elektronik uzaklıkölçer ve elektronik takometrelerin kullanıma girmesi, analitik ve yarı analitik değerlendirme aletleri, uydu görüntülerinin doğruluğunun artması, bilgisayarın, bellek ve hız ihtiyaçlarını çoğunlukla karşılar duruma gelmesi Jeodezi ve Fotogrametri Mühendisliği alanında “Sayısal Arazi Modeli” olgusunun önemini arttırmaktadır (Yanalak, 1997).

SAM oluşturma süreci başlıca üç aşama ile açıklanabilir. Bu aşamalar:

1. Verilerin toplanması
2. Verilerin İşlenmesi
3. Verilerin sunumu

şeklinde sıralanır.

Modellenecek arazi üzerinde rastgele ya da düzgün dağılımdaki dayanak noktalarının seçimi, toplama yoğunluğunun belirlenmesi ve bu noktaların koordinatlarının (x, y, z) ölçülerek sayısal ortamda depolanması işlemlerinin tümü verilerin toplanması aşamasında gerçekleştirilir. Verilerin toplanmasında kullanılacak yöntem ise temsil edilecek arazinin büyüklüğüne, kullanıcı kitlesinin ihtiyaçlarına ve veri toplamadaki hız, doğruluk ve ekonomik olma kriterlerine göre seçilir.

Yüzey oluşturmak üzere işleme girmeden önce ölçümü tamamlanan dayanak noktaları için kaba hatalar ve aletsel hatalar giderilmesi işlemleri yapılır. Tüm dayanak

noktaları belirli bir koordinat sistemine dönüştürülür. Uygun yüzey elde etme tekniği ve uygun enterpolasyon yöntemi kullanılarak dayanak noktaları üzerine bir yüzey yerleştirilmiş olur.

Yüzey oluşturma işleminin ardından araziye temsil eden model, modeli oluşturan noktaların koordinatları ve arazinin tamamına veya bir bölgesine yönelik olarak oluşturulan haritalar kullanıcılara sunulur. Bilgisayar seçilen bir enterpolasyon yöntemi ile yeni noktaların istenen koordinatlarını hesaplar ve bu yeni noktalardan yararlanarak yükseklik eğrilerinin çizimi, kesit ve perspektiflerin çıkarılması, alan, hacim vb. diğer hesapların sonuçlarının gösterimi verilerin sergilenmesi aşamasını oluşturmaktadır (Yener, 1993).

Sonuçlar veri bankalarında arşivleme kurallarına uygun şekilde sayısal formda saklanır. Bu sonuçlar gerektiğinde sayısal düzeltmelerden geçirilip, tekrar grafik ya da sayısal değerler olarak kullanılabilir (Alkanalka, 2005).

## **2.1. Sayısal Arazi Modelinin Tanımı**

SAM ile ilgili farklı mesleki disiplinlere yönelik birçok çalışma yapılmakla birlikte SAM kavramı ilk olarak 1958 yılında Miller ve Laflamme tarafından Massachusetts Teknoloji Enstitüsü fotogrametri laboratuvarında yapılan bir çalışma ile gündeme gelmiştir. Bu çalışmada bir karayolu projesi için fotogrametrik olarak oluşturulan stereo model üzerinden üç boyutlu arazi koordinatları elde edilerek bilgisayar yardımı ile profil çizilmiştir. Dönemin teknolojik yetersizlikleri nedeni ile dar kapsamlı olarak ele alınan bu çalışmada mühendislik projelerinde kesit ve hacim hesapları için SAM kullanılmıştır. Yaklaşık on yıl boyunca mühendislik amaçlı çalışmalarda kullanılan SAM, bilgisayar teknolojisindeki gelişmeler sonrasında arazi tasviri amacıyla kullanılmaya başlanmıştır. Arazi tasvirine yönelik yapılan çalışmalarda karşılaşılan presizyon, hız ve maliyet gibi başlıca sorunlara bilgisayar desteği ile çözüm bulunmuştur. Yapılan her işlemin en kısa zamanda neticesini değerlendirme ve alınan neticeye göre değişiklik yapma ve doğru değere ulaşma yönünde önemli aşamalar kat edilmiştir (Köroğlu, 2006).

SAM oluşturmaya yönelik yapılan çalışmalar 1950' li yılların sonundan bu yana bilgisayar destekli olarak yürütülmekte ve dönemin şartlarının aksine teknolojik olanaklar SAM oluşturma'nın tüm aşamalarında etkin bir şekilde kullanılmaktadır.



SAM birbirleriyle benzerlik gösteren farklı terimler ile ifade edilmektedir. Bu terimlerden bazıları aşağıda sıralanmıştır.

**Sayısal Yer Modeli (DGM) :** Yeryüzünün katı kitlesinin yüzeyini ifade eden bu modelde denizin dibi referans olarak alınır. Birleşik Krallık' da yaygın olarak kullanılmaktadır. Sayısal yüzey modeli, sürekli ve tek değerli olduğu kabul edilir. Başka bir deyişle, yüzey, herhangi bir anı yükseklik değişimi, zirve, çukur, dik yamaç, uçurum, ya da fay kırığı gibi yüzeyin sürekliliğini bozan yapıları içermez. Tek değerli yüzey,  $Z=f(x,y)$  fonksiyonu olarak tanımlanır. Orada, herhangi bir (x,y) ikilisine karşılık gelen tek bir Z değeri vardır (Özer, 1989).

**Sayısal Yükseklik Modeli (DHM) :** DEM terimi ile aynı anlamı taşıyan bu terimin kullanımı DEM kadar yaygın değildir. Almanya'da ortaya çıkmıştır (El Sheimy ve ark., 2005).

**Sayısal Yükseklik Modeli (SYM/DEM) :** Bu modelde model üzerindeki noktaların, belirlenen bir seviyeden yukarıya doğru ölçülen düşey yöndeki uzaklıklar ile yükseklik sayısal olarak ifade edilir. Genellikle referans yüzeyi olarak deniz seviyesi kabul edilir. Bu terim Amerika'da yaygın olarak kullanılır ve yükseklik bilgisi genellikle düzenli kareler ya da altıgenler ile temsil edilir (El Sheimy ve ark., 2005).

Sayısal Arazi Yükseklik Modeli (SAYM) ya da Sayısal Yükseklik Modeli (SYM); ABD Jeolojik Ölçmeler Dairesi (USGS) tarafından tanımlanan, x ve y yönünde düzenli aralıklarla bölünmüş alanlarda ortak bir düşey datuma dayandırılmış z (yükseklik) değerlerini ihtiva eden sayısal kartografik bir arazi temsil yöntemidir (Yastıklı, 2003). Kısaca SAYM eşit aralıklı yükseklik değerlerinin fiziksel yeryüzünü temsil ettiği sayısal bir gösterim şeklidir. Bazı ülkelerde SAYM ile eş anlamlı olarak kullanılan Sayısal Arazi Modeli (SAM) ise; SAYM'den daha geniş kapsamlı olup yüzeyi en iyi şekilde temsil etmeyi sağlayan, yapay ve doğal önemli topografik detaylara, kritik arazi hatlarına (dere, sırt, kıyı v.b) ve düzensiz dağılmış kritik yüzey noktalarına ait yükseklik değerlerini kapsayan bir modeldir (Arslanoğlu ve Özçelik, 2005).

**Sayısal Arazi Modeli (DTM/SAM) :** SYM' ye göre daha karmaşık bir yapıda olan bu modelde yükseklik bilgisinin yanı sıra su ayırımı ve su toplama çizgileri gibi topoğrafik bilgileri de içerir. Ayrıca arazi ile ilgili eğim, bakı ve görüş mesafesi gibi türetilmiş bilgiler de mevcuttur. Dar anlamda SAM/DTM arazinin bir sayısal rölyefini temsil eder. Genel anlamda ise planimetrik veriler ile birlikte arazinin rölyefinin her ikisini de içerir (El Sheimy ve ark., 2005).

DEM ve DTM terimleri sıklıkla eş anlamlı olarak kullanılır. DTM genellikle yüzeyin kendi yüksekliğini ifade eder. Bunun aksine, DEM maksimum yükseklikleri (binaların çatıları ve ağaçların en üst noktası vb.) içerir (El Sheimy ve ark., 2005).

Sayısal arazi modelleri, bilgisayarlarla yapılacak işlemlere esas olmak üzere yer yüzeyinin sayısal gösterimi olarak tanımlanabilir. SAM/DTM geniş anlamda, ayrıntıların konum ve arazi yükseklik bilgilerinin her ikisini, dar anlamda ise yalnızca yükseklik bilgilerini içerir. SAM kavramı, seçilmiş yüzey noktalarının  $x$ ,  $y$ ,  $z$  koordinatları ile birlikte uygun bir bilgisayar yazılımını da kapsar (Güler, 1985).

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

Literatüre geçmiş pek çok SAM tanımı bulunmakla birlikte yukarıda verilen tanımlardan da anlaşılacağı üzere SAM geniş anlamıyla temsil ettiği arazinin konum ve yükseklik modelini, dar anlamıyla ise sadece arazinin yükseklik modelini içerir. SAM terimi, daha çok yükseklik kavramı için kullanıldığından, Sayısal Yükseklik Modeli (SYM), Sayısal Arazi Yükseklik Modeli (SAYM) terimleri de bu terim ile eş anlamlı olarak kullanılmaktadır.

Arazi yüzeyinin sayısal olarak ifade edilebilmesi için söz konusu arazi üzerinde yeterli sıklıkta, düzenli veya düzensiz dağılımda, belirli bir koordinat sisteminde üç boyutlu koordinatları ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ) bilinen noktalara ihtiyaç duyulur. Bu noktalar dayanak, referans, örnekleme veya kontrol noktası olarak adlandırılır.

Bir SAM oluşturmak için sayısal bir kayıt ortamında depolanan dayanak noktalarının yanı sıra uygun bir enterpolasyon yöntemine sahip bir bilgisayar yazılımı gerekir. Bu yazılım, dayanak noktalarının koordinatlarından ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ) yararlanarak oluşturulan arazi modeli içerisinde konumu ( $x$ ,  $y$ ) bilinen noktaların yükseklik ( $z$ ) değerini enterpolasyon ile hesaplar. Aynı zamanda model içerisinde yükseklik ( $z$ ) değerleri bilinen noktaların konumu ( $x$ ,  $y$ ) da yine enterpolasyon ile hesaplanabilir. Birbirinin tersi olarak düşünülebilecek bu iki temel prensip kullanılarak gerçekteki arazi yüzeyi sayısal olarak ifade edilmiş olur.

Bir SAM' dan beklenecek özellikler şöyle sıralanabilir (Yanalak, 1991):

- Olabildiğinde az sayıda dayanak noktası ile araziye temsil edebilmelidir.
- Arazi bilgileri verimli bir şekilde işlenmelidir.
- Arazi topografyasını yeterli bir yaklaşımla temsil etmelidir.

- Yazılımın çalışma süresi olurunca kısa olmalıdır.
- Gerekli olduğunda çok sayıda dayanak noktasını veri olarak kullanabilmelidir.

Yukarıda sıralanan tüm koşulların sağlanması, dolayısıyla SAM'ın arazinin gerçekteki durumuyla örtüşmesi, topoğrafik yüzeyin yapısına, dayanak noktalarının sıklığına ve araziye ne ölçüde temsil ettiğine, seçilen enterpolasyon yöntemine ve hesaplayıcının hızına bağlıdır.

Sayısal arazi modellemenin ilk aşaması olan örnekleme noktalarının belirlenmesinde, topoğrafik yüzeyi yeterince temsil edemeyen noktalar seçilmesi SAM'ın topoğrafik yüzey ile uyumunu olumsuz yönde etkiler. Bu nedenle arazi üzerindeki karakteristik noktaların dayanak noktası olarak tercih edilmesi oluşturulacak SAM'ın topoğrafik yüzey ile uyumunu arttıran en önemli etken olacaktır. Ancak, oluşturulacak modelin topoğrafik yüzeyle uygunluğunu sağlamak için çok sayıda örnekleme noktasının seçimi de yöntemin özünüyle bağdaşmaz (Koçak, 1988).

## 2.2. Sayısal Arazi Modeline Konu Olan Arazi Yüzeyleri

SAM'ın niteliği bir yüzey olarak temsil ettiği arazinin yapısına bağlıdır. Verilerin toplanma yoğunluğu ise temsil edilecek arazinin yapısı ile ilgilidir. Düz bir araziden toplanacak olan nokta yoğunluğu ile kırık çizgi sayısının ve eğim değişimlerinin fazla olduğu bir araziden toplanan verilerin yoğunluğu aynı olmayacaktır. Bu nedenle SAM'ın beklentileri karşılaması için verilerin toplandığı arazi yüzeyleri için bir sınıflandırma yapılmasına ihtiyaç duyulmaktadır.

SAM oluşturmada amaca uygun bir arazi sınıflandırması yapmak, doğruluk, zaman ve ekonomi konularında SAM'dan beklenen sonuçların alınmasında önemli bir etkidir. Yener (1993) yaptığı çalışmada Kunduracıoğlu (1988) tarafında yapılan arazi sınıflandırmasının amaçlarını aşağıdaki gibi sıralamıştır:

- 1- Arazinin öz yapısına uygun model seçmek
- 2- Arazinin tipine göre uygun dağılımda noktalar seçmek, yani en uygun veri toplama yöntemini belirlemek
- 3- En uygun interpolasyon yöntemini seçmek
- 4- Otomasyon sağlamak

Bu sınıflandırmada kullanılan kriterler yine Yener'in (1993) çalışmasında Alkış (1986) tarafından aşağıdaki gibi belirtilmiştir:

- Arazinin eğimi (gradyent) , eğriliği

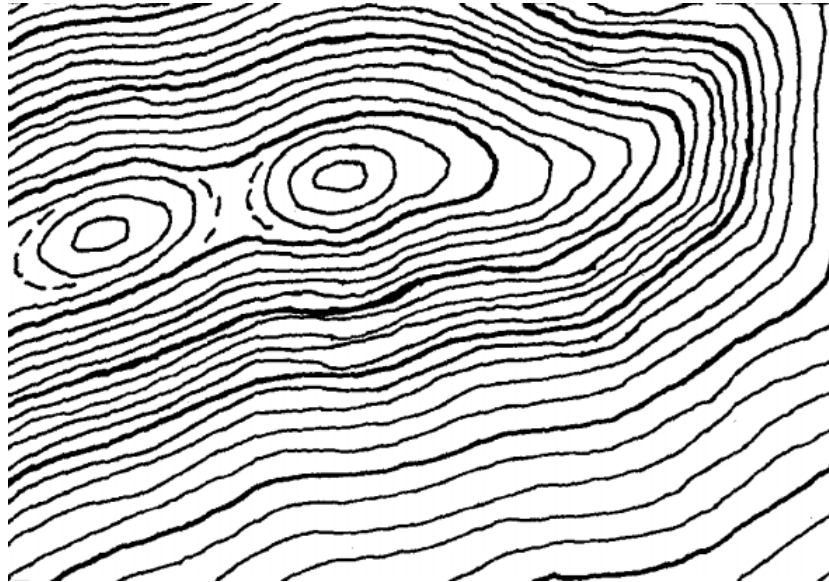
- Doğrultu kosinüsleri ve öz vektörlerle gösterim
- Kırık çizgilerin sayısı, yüzey alanı, düzlemlerin dağılımı
- Armonik vektör büyüklüğü ve genlik güç spektrumu

Kırıklı çizgiler arazi yüzeyindeki sürekliliğin değişimini gösteren çizgisel detaylardır. Arazi üzerindeki uçurum, hendek, vadi ve baraj gibi yapılar kırıklı çizgilere örnek olarak verilebilir. Değişik arazi sınıflandırmaları yanında araziyi gruplara ayırmak için aşağıda belirtilen kriterler kullanılabilir (Özer, 1989).

- Birbirine dik iki doğrultuda yüzeyin eğim durumu
- Araziye optimum bir şekilde yerleştirilmiş düzlemlerle kesim sapmalarının büyüklüğü
- Ekstrem değerlerin sayısı (özellikle lokal tepe ve çukurluk)
- Arazinin düşey kesitinde yeknesak bir oluşum (arazinin düzgünlüğü)

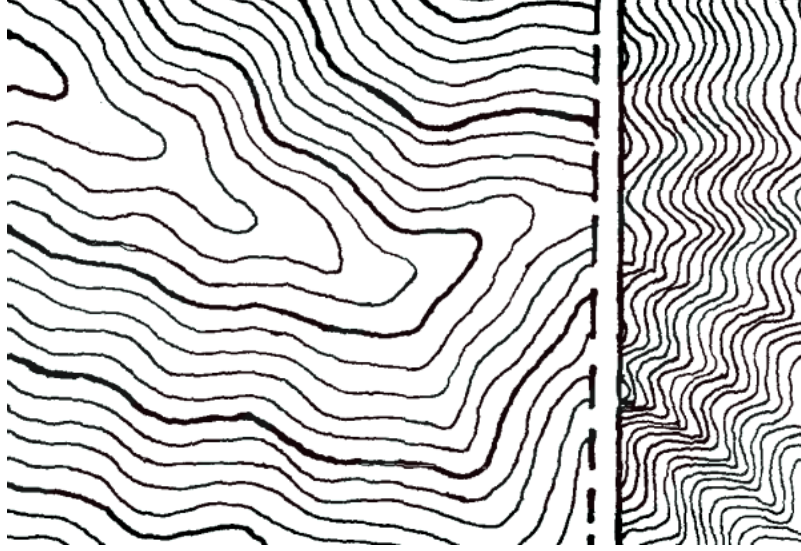
Yukarıda sözü edilen kriterler yardımı ile arazi 4 farklı gruba ayrılmaktadır.

- a) **Düzenli Düzlem Yüzeyler:** Bu arazi grubu eğimi yavaş değişen ve düz sayılabilecek yüzeyleri kapsar. 1 hektara düşen kırık çizgi sayısı 10 'dan daha azdır. Arazi eğimi yaklaşık %5 ve önerilen dayanak noktası sayısı 20-40 nokta/ha' dır.



Şekil 2.2. Düzenli düzlem yüzeyler (Yener, 1993)

- b) Düzenli Değişen Yüzeyler:** Bu gruba giren araziler çok fazla oval şekilli yüzeylerden oluşan dalgalı arazilerdir. 1 hektara düşen kırık çizgi sayısı 10 ile 20 arasındadır. Arazi eğimi % 5-20 arasında ve önerilen dayanak nokta sayısı 40-100 nokta/ha' dır.



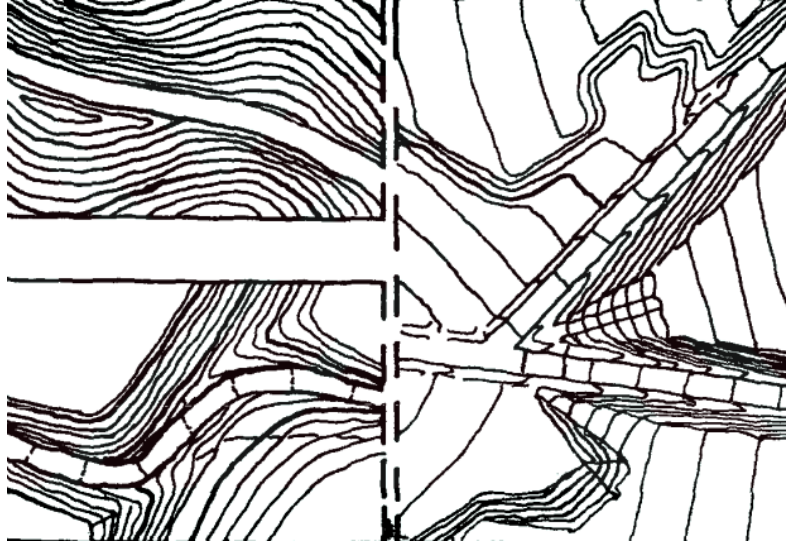
Şekil 2.3. Düzenli değişen yüzeyler (Yener, 1993)

- c) Düzensiz Yüzeyler:** Eğim değişimlerinin keskin olduğu, düzensiz yüzeyleri içeren arazi grubudur. 1 hektara düşen kırık çizgi sayısı 20' den fazla ve eğim %20' den büyüktür. Önerilen dayanak nokta sayısı ise 100-400 nokta/ ha' dır.



Şekil 2.4. Düzensiz yüzeyler (Yener, 1993)

**d) Yapay Yüzeyler:** Bölgesel alçalma ve yükselmelerin sıklıkla görüldüğü ve kırık çizgiler ile ifade edilen yüzeyleri kapsayan bu araziler üzerinde insan eli ile oluşturulmuş büyük hafriyat alanları bulunur.



Şekil 2.5. Yapay yüzeyler (Yener, 1993)

### 2.3. Sayısal Arazi Modelinin Doğruluğunu Etkileyen Faktörler

Yeryüzünü üç boyutlu olarak temsil eden SAM, oluşum süreci boyunca kaçınılmaz olarak birtakım hataların etkisi altında kalmaktadır. Bu hatalar planimetrik veriler (x, y) ve yükseklik verileri (z) üzerindeki hatalar olarak iki grupta toplanır. SAM' in doğruluğu ise söz konusu hata gruplarının oluşumuna sebep olan etkenlerin bilinmesine bağlıdır. SAM' in doğruluğunu etkileyen başlıca etkenler şunlardır (Yanalak, 1991).

- Dayanak noktalarının seçimi, dağılımı ve yoğunluğu
- Dayanak noktalarının ölçümü sırasında yapılan ölçme hataları
- Kullanılan enterpolasyon yönteminin doğruluğu
- Arazinin yapısı

Dayanak noktalarının seçimi, SAM oluşturma sürecinin başında yer alır. Bütün model dayanak noktaları üzerine kurulduğu için topoğrafik yüzeyi yeterince temsil edemeyen dayanak noktalarının seçimi modelden beklenen doğruluğu sıralanan diğer etkenlerden daha çok etkileyecektir. Topoğrafik yüzey üzerinde su toplama çizgileri, tepe ve çukur noktaları, eğimin değiştiği noktalar gibi karakteristik noktaların dayanak

noktası olarak seçilmemesi, SAM' in araziyi yeterince temsil edememesine neden olacaktır.

SAM' in doğruluğu topoğrafik verilerin doğruluğuna bağlı olarak artar. Farklı arazi sınıfları için üretilen SAM' dan beklenen doğruluk, seçilen veri toplama yöntemine ve bu yöntemin sağlayacağı doğruluğa bağlıdır. SAM' in kullanım amacının önceden belirlenmesi yeterli doğruluğu sağlayacak veri toplama yönteminin seçilmesinde büyük önem taşımaktadır.

Veri toplama aşamasında meydana gelen ölçüm hataları teorik analizler ya da istatistik testler kullanılarak ortaya koyulabilir. SAM' in kaynak verilerinin toplam doğruluğu ölçmenin farklı safhalarında olan hatalarla alakalıdır. Farklı hata kaynakları; düzenli hata, kaba hata ve düzensiz hatalar SAM için veri elde etmede kaçınılmazdır. Bunlarının bazılarının belirlenmesi ve veri gruplarından çıkartılması, bazılarının da bu safhalarda azaltılması gerekir (Üstüntaş, 1994).

Kaba hatalar temel kısımlarda görülen hatalar olup, interaktif editleme sırasında kolayca ortadan kaldırılabilir. Sistemik hatalar sabit bir konum içeren hatalar olup, veri toplama yöntemleri ve sistemlerinden kaynaklanmaktadır. Bu hata çeşitleri şunları içerir: Düşey yükseklik kayıklıkları, ağaçlara, binalara ve gölgelere bağlı arazi yüzeyinin yanlış yorumlanması, hayali kayıklar, zirveler ve hendekler. Rastgele hatalar, bilinmeyen veya tesadüfî olaylardan kaynaklanırlar. Bu hataların büyüklüğü editleme ile azaltılır. Fakat tamamen ortadan kaldırılamaz (Erdoğan, 2007).

SAM' in doğruluğunu etkileyen diğer bir önemli faktör ise model için seçilen enterpolasyon yöntemidir. Arazi yüzeyinden elde edile topoğrafik veriler kullanılarak arazi içerisindeki herhangi bir noktanın yüksekliğinin belirlenmesi enterpolasyon ile gerçekleştirilir. Yüksekliğin belirlenmesinde farklı enterpolasyon yöntemleri kullanılır. Bu yöntemlerin bir bölümünde ilk ölçülen yükseklik değerleri hatasız kabul edilir; bazılarında belirli bir dengeleme ya da düzensiz hataların filtrelemesi yapılır. Seçilen enterpolasyon yöntemi ne kadar uygun ise hesaplanan (Z) değeri ile gerçek arazi yüksekliği arasındaki fark o kadar küçük olur. Diğer bir deyişle, (Z) değeri ne kadar araziye yaklaşırsa, SAM' in güvenilirliği o kadar artar (Üstüntaş, 1994).

Herhangi bir veri toplam yöntemi ile oluşturulan SAM, arazinin gerçekteki konumu ile karşılaştırıldığında farkların ortaya çıktığı görülecektir. Ortaya çıkan konum ve yükseklik farkları yukarıda Yanalak (1991) tarafından sıralanan ve SAM' in doğruluğunu etkileyen etkenlerin tümünün birleşimi ile oluşur. Oluşturulan SAM ile gerçek arazi arasında test noktaları yardımı ile performans testleri yapılabilir. Arazinin

gerçekteki durumunu temsil eden test noktaları arazide doğrudan ölçülebileceği gibi diğer veri toplama yöntemleri kullanılarak da elde edilebilir. SAM' ın doğruluğunun belirlenmesindeki genel yaklaşım, test noktalarının elde edilmesinde kullanılan veri toplama yönteminin SAM üretiminde kullanılan veri toplama yönteminden daha doğru sonuç verecek şekilde seçilmesidir. Örneğin harita ve altlıkların sayısallaştırılması yöntemi ile elde edilen bir SAM' ın doğruluğu klasik ölçme yöntemleri veya fotogrametrik ölçme yöntemleri kullanılarak elde edilen test noktaları yardımıyla belirlenebilir. Bu işlem sayısal modelin doğruluk analizi olarak tanımlanır. Elde edilecek doğruluk değerleri SAM' ın bağıl doğruluğunu temsil edecektir.

Li ve ark. (2004) tarafından yapılan çalışmada farklı veri toplama yöntemleri kullanılarak elde edilen SAM doğrulukları bir tablo ile açıklanmaya çalışılmıştır.

**Çizelge 2.1.** Çeşitli DTM elde etme metotlarının karşılaştırması (Li ve ark., 2004)

| <b>Veri Toplama Yöntemi</b> | <b>Verilerin Doğruluğu</b> | <b>Hız</b> | <b>Maliyet</b>  | <b>Uygulama Sahası</b> |
|-----------------------------|----------------------------|------------|-----------------|------------------------|
| Klasik ölçmeler             | Yüksek (cm-m)              | Çok yavaş  | Çok yüksek      | Küçük alanlar          |
| GPS ölçümü                  | Nispeten yüksek (cm-m)     | Yavaş      | Nispeten yüksek | Küçük alanlar          |
| Fotogrametri                | Orta-yüksek (cm-m)         | Hızlı      | Nispeten düşük  | Orta-büyük alanlar     |
| Uzay fotogrametri           | Düşük-orta (m)             | Çok hızlı  | Düşük           | Büyük alanlar          |
| InSAR                       | Düşük (m)                  | Çok hızlı  | Düşük           | Büyük alanlar          |
| Radargrametri <sup>1</sup>  | Çok düşük (10m)            | Çok hızlı  | Düşük           | Büyük alanlar          |
| LIDAR                       | Yüksek (cm)                | Hızlı      | Yüksek          | Orta-büyük alanlar     |
| Harita Sayısallaştırma      | Nispeten düşük (m)         | Yavaş      | Yüksek          | Bütün alanlar          |
| Harita tarama               | Nispeten düşük (m)         | Hızlı      | Düşük           | Bütün alanlar          |

Li (1990, 1992) yaptığı çalışmalarda, SAM' ın doğruluğunun arazi yüzeyinin pürüzlülüğü, enterpolasyon fonksiyonu, enterpolasyon yöntemi ve toplanan verilerin nitelikleri (doğruluk, yoğunluk, dağılım) gibi çeşitli değişkenlerin oluşturduğu bir fonksiyon olarak ifade etmiştir. Matematiksel olarak;

$$A_{DTM} = f(C_{DTM}, M_{Modeling}, R_{Terrain}, A_{Data}, D_{Data}, DN_{Data}, O) \quad (2.1)$$

şeklinde ifade edilen bu fonksiyonda  $A_{DTM}$  SAM' ın doğruluğunu;  $C_{DTM}$  SAM' ın yüzey karakteristiklerini;  $M_{Modeling}$  SAM yüzeyinin modelleme fonksiyonunu;  $R_{Terrain}$  arazi yüzeyinin pürüzlülüğünü;  $A_{Data}$ ,  $D_{Data}$  ve  $DN_{Data}$  toplanan verilerin niteliklerini (doğruluk, yoğunluk, dağılım); ve  $O$  ise diğer etkenleri ifade eder (Li ve ark., 2004).

<sup>1</sup> Yapay açıklıklı radar görüntü çiftlerinin stereo olarak değerlendirilmesi işlemidir (Şanlı, 2006).



## 2.4. Sayısal Arazi Modeli Verilerinin Toplanması

Dünya yüzeyi su dışında doğal ve yapay özelliklerle kaplanmıştır. Bitki örtüsü, kar/buz ve çöl alanları başlıca doğal özelliklerdir. Kutup bölgeleri ve yüksek dağlık bölgelerde arazi yüzeyi sürekli kar ve buz ile kaplanmış durumdadır. Yerleşim bölgeleri ve trafik ağı ise dünya yüzeyindeki başlıca yapay özelliklerdir (Li ve ark., 2004).

Farklı çeşitlerdeki arazi yüzeylerinin ölçümünde farklı ölçme teknikleri kullanılabilir. Çünkü bazı ölçme teknikleri bazı alanlar için uygun olmayabilir. Örneğin yüksek dağlık bölgelerde arazi yüzeyini doğrudan ölçmek kolay değildir. Bu bölgelerde hava ya da uzay görüntülerinin kullanıldığı fotogrametrik ölçme tekniği daha uygundur (Li ve ark., 2004).

Yukarıdaki açıklamadan da anlaşılacağı üzere araziyi temsil etmek için seçilen dayanak noktalarının ölçümünde birden çok yöntem bir arada kullanılarak veriler toplanabilmektedir. Arazi yüzeyi üzerindeki doğal ve yapay özelliklere ait verilerin toplanması ile elde edilen SAM için veri toplama işlemi başlıca 4 ana başlık altında toplanabilir:

- Klasik (yersel) yöntemler
- Fotogrametrik yöntemler
- Uydu bazlı yöntemler
- Harita ve altlıkların sayısallaştırılması

Arazi yüzeyinden verilerin toplama işlemi Yener' in (1993) çalışmasında Toz (1989) tarafından aşağıdaki gibi açıklanmıştır;

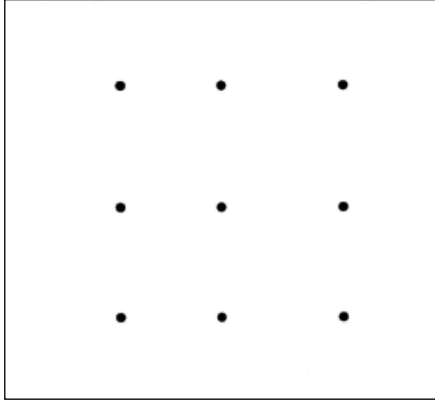
Verilerin toplanması işlemi, arazi yüzeyinin şeklini en iyi şekilde temsil edebilecek dayanak nokta kümesinin seçimini ve ölçümünü içerir. Genellikle bu noktalar,

- Araziye rastgele dağılmış noktalar,
- Yapı, kırık çizgi ve arazinin karakteristik noktaları,
- Araziye yerleştiği varsayılan bir kafes ağın kesim (düğüm) noktalarından oluşmaktadır.

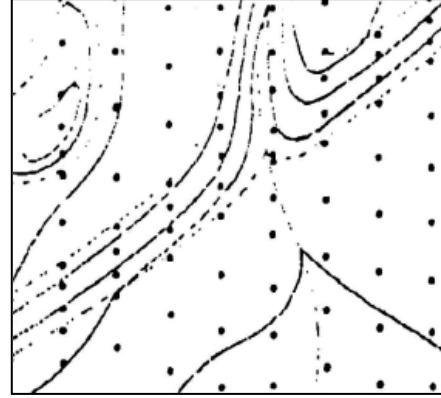
Bu verilerin geometrik konumları elde edilen kaynağa bağlı olarak 4 değişik şekilde olabilir (Yanalak, 1997):

- Düzenli grid köşelerinde (a tipi)
- Kesitler boyunca düzensiz olarak (b tipi)
- Eşyükselti eğrileri boyunca (c tipi)

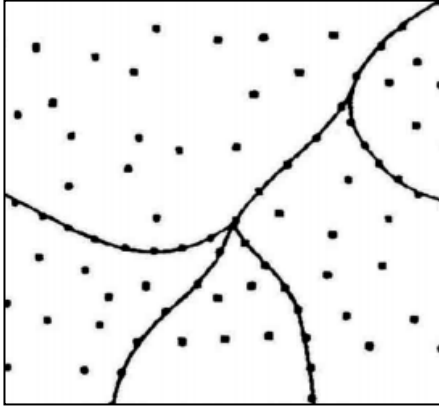
- Düzensiz (rastgele) dağılmış olarak (d tipi)



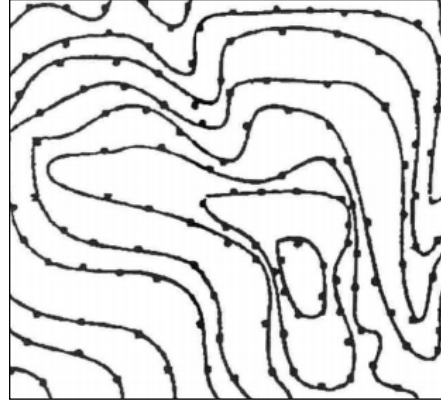
a tipi veri



b tipi veri



d tipi veri



c tipi veri

Şekil 2.6. Verilerin geometrik konumları

SAM oluşturma aşamaları içerisinde en fazla zaman alan kısım verilerin toplanması aşamasıdır. Öte yandan verilerin toplanması, araziye temsil edecek modelinin temelini oluşturduğundan amaca ve modelden beklenen doğruluğa uygun veri toplama yöntemi seçilmesi gerekmektedir. Örneğin oluşturulacak olan SAM askeri uygulamalar için üretilecek bir simülasyonda ya da büyük alanlar için üretilmesi gereken düşük doğrulukta uygulamalarda kullanılacak ise klasik ölçmeler ile veri toplanması, SAM' dan beklenen doğruluğu sağlamasına rağmen maliyet artışına ve zaman kaybına neden olacaktır. Bu durumda mevcut harita ve altlıkların sayısallaştırılması veya fotogrametrik ölçmeler veri toplama yöntemi olarak seçilebilir.

### 2.4.1. Klasik yöntemler

Bu yöntemde SAM oluşturmak için elde edilecek olan topoğrafik veriler doğrudan arazide yapılan ölçümler sonucunda elde edilir. Ölçülen örnekleme (dayanak) noktalarının koordinatları (x,y,z) genellikle düzensiz dağılımdadır. Klasik ölçmeler ile veri toplama doğruluk bakımından çok yüksek bir yöntem olmasına karşın, büyük alanlarda verilerin elde edilme süresi bakımından diğer veri toplama yöntemlerine göre oldukça zaman alıcı bir yöntemdir. Bunun sonucu olarak bu yöntem ya çok hassas çalışmalar ya da başka yöntemlerin uygulanamadığı durumlar veya arazi kontrolleri için uygulanır (Üstüntaş, 1994).

Örnekleme noktalarının dağılımı ve yoğunluğu nokta alımı sırasında belirlenir. Topoğrafyanın değiştiği yani süreksizliğin olduğu kısımlarda örnekleme yoğunluğu, süreklilik gösteren kısımlara göre daha fazla olmaktadır. Örnekleme noktalarının alımında kesikli yapıyı tanımlayan noktaların seçimine azami dikkat edilir (Bayrak, 1996).

Günümüzde yüzey bilgisinin klasik ölçmeler ile toplanması, elektronik takeometre ve GPS (Küresel Konumlama Sistemi) ile yapılmaktadır. Elektronik takometrelere göre birçok avantaj sağlayan GPS teknolojilerinin yaygınlaşması ile mühendislik amaçlı çalışmalarda GPS kullanımı hızla artmıştır. Özellikle gerçek zamanlı kinematik ölçü yöntemi (RTK) günümüzde en yoğun kullanılan yöntemdir (Kahveci ve Yıldız, 2009).

RTK GPS, halihazır harita yapımında, imar uygulamalarında, kanal ve boru hattı projelerinde, araç takibinde, yol projelerinde, aplikasyon işlerinde ve özellikle coğrafi bilgi sistemi ve kent bilgi sistemi uygulamalarında, hızlı ve doğru sonuçlar üretmesi nedeniyle sıklıkla kullanılmaktadır (Pırtı, 2009).

RTK ile konum belirleme (GZK GPS), gezen (rover) alıcılar tarafından uydulardan (GPS, GLONASS, Galileo vb.) kaydedilen faz gözlemlerine ve aynı anda referans bir istasyondan gerçek zamanı olarak gezen alıcıya gönderilen ham ölçü ya da düzeltme bilgilerine (konum, pseudorange<sup>2</sup>, atmosfer vb.) dayalı olarak gerçekleştirilen, hesapların ise genelde gezen alıcıda yapıldığı bir konum belirleme tekniğidir. Klasik RTK tekniğinde konumu yüksek doğrulukta bilinen (ya da önceden ölçülmüş) bir referans istasyonu ile bu istasyona en fazla 15-20 km uzaklıkta bulunan bir ya da daha

<sup>2</sup> Uydudan yayınlanan sinyalin uydudan çıkış anı ile alıcıya ulaştığı ana kadar arada geçen zamanın ışık hızı ile ölçeklendirilmesiyle elde edilen uydu-alıcı uzaklığı (Kahveci ve Yıldız, 2009).

fazla sayıda alıcının olması gerekmektedir. Referans istasyonu arazideki gezen alıcılara düzeltme bilgilerini herhangi bir iletişim vasıtasıyla (UHF-VHF telsizler, cep telefonu, uydu haberleşmesi vb. bir yöntemle) gönderir (Kahveci, 2009). Ayrıca RTK yönteminde, hem referans ve hem de gezici istasyonda çift frekanslı GPS alıcıları kullanılması gerekmektedir.

RTK GPS yöntemi ile arazideki bir noktaya ilişkin koordinatların  $\pm 2-5$  cm ile belirlenmesi olasıdır. Bununla beraber RTK GPS yöntemiyle koordinatların istenirse yerel bir koordinat sistemde ya da ülke sisteminde araziye  $\pm 2-5$  cm'lik bir duyarlılıkta aplikasyonu yapılabilir (Mekik ve Arslanoğlu, 2003).

Çok uzun zaman ve ön çalışma gerektiren aplikasyon işleri ve detay alımı çok kısa bir sürede ve en az yersel sistemlerden elde edilebilecek duyarlılıkla yapılabildiğinden, bu yöntem haritacılık alanında yeni bir dönem olarak kabul edilebilir. Sistemin tek olumsuzluğu duyarlı sonuç alınabilmesi için en az 5 uydudan ölçü toplaması gerekir. En az 5 uyduya bağlanma şartı ağaçlık alanlarda ve yüksek binaların bulunduğu kent merkezlerinde sağlanamayabilir (Mutluoğlu ve Ceylan, 2004).

Klasik ölçme yöntemler ile ölçülen dayanak noktalarının koordinatları ölçüm cihazının hafızasına kaydedilir ve veri aktarım yazılımları yardımıyla sayısal formda bilgisayara aktarılır, koordinat dönüşümleri yapılarak bilgisayar ortamında depolanır.

Grafik formdaki haritalarda topoğrafik detayların semboller ile temsil edilerek ifade edilmesi yüzeyin temsilinde kısıtlamalara neden olmaktadır. Öte yandan topoğrafik haritalar üzerindeki eğrilerin sayısallaştırılması ile veri elde etmede kırıklı çizgiler gibi ilave bilgiler eklenmediği durumlarda yüzeyin temsilinde yeterli doğruluk sağlanamamaktadır. Fotogrametrik ve uydu bazlı ölçmeler ile veri toplamada ise yüzeye ait görüntülerin operatör tarafından yorumlanması birtakım hatalara neden olmakla birlikte bu yöntemlerde yükseklik bilgisinin oluşturulmasında klasik ölçmelere ihtiyaç duyulmaktadır.

Günümüzde SAM oluşturmak için kullanılan veri toplama yöntemleri, teknolojik gelişmeler ile paralel olarak hız, doğruluk ve maliyet bakımından sürekli iyileşmektedir. Ancak, yukarıda söz edilen nedenlerden dolayı klasik ölçmeler ile veri toplanma işlemi önemini hala yitirmemiştir.

### 2.4.2. Fotogrametrik yöntemler

Fotogrametrik ölçmeler ile veri toplama, geniş alanlar için SAM üretiminde kullanılan ekonomik, yüksek doğruluklu, hızlı ve güncel bir yöntemdir. Stereo hava fotoğrafları ve stereo uydu görüntüleri ile oluşturulan üç boyutlu modeller fotogrametrik kıymetlendirme aletleri ile değerlendirilir. Klasik fotogrametrik sistemler olarak adlandırılan analog ve analitik kıymetlendirme aletlerinde veri kaynağı, analog formdaki resim çiftleridir. Digital fotogrametrik sistemlerde ise digital görüntüler veri kaynağıdır (Şahin, 2007).

Analog değerlendirme aletlerinde stereo kıymetlendirme ile toplanan veriler mekanik aktarım aletleri ile çizim masasına analog olarak gönderilerek çizim yapılır. Görüntülenen detayların geometrik konumlarının belirlenmesi, ilk olarak stereo komparator yardımıyla görüntü koordinatları ve paralaksların ölçümü sonucunda arazi koordinatlarının hesaplanması şeklinde gerçekleştirilmiştir. Analog yöntem sonucu elde edilen sonuç ürün, doğrudan ölçülen yüksekliklerin eş yükseklik eğrileri ile gösterildiği çizgisel haritadır (Yıldırım ve Şeker, 2006).

Bilgisayar teknolojisinin yaygınlaşması ile analitik fotogrametri gündeme gelmiştir. Analitik değerlendirmede, stereo kıymetlendirme aletlerinden toplanan verilerin sayısal forma dönüştürülebilmesi ve değerlendirme işlemlerinin bilgisayarda yapılması ile sonuçlar koordinat (x, y, z) bilgisi olarak saklanabilir duruma gelmiştir. Bu gelişmelerin yanı sıra, çok zaman alıcı olan ve çok iyi yetişmiş operatör gerektiren bir yöntem olan eş yükseklik eğrilerinin doğrudan ölçümü, kısa bir süre sonra nokta gridinin daha duyarlı ölçümü şekline dönüşmüştür. Analitik fotogrametrinin analog fotogrametriye karşı ortaya koyduğu hız, elastikiyet ve doğruluk dijital fotogrametriye geçişi hızlandırmıştır (Yıldırım ve Şeker, 2006).

Fotogrametrinin tarihsel gelişim sürecine (analog-analitik-sayısal) paralel olarak uygulanan yöntemlerde önemli gelişmeler elde edilmiştir (Kiracı ve ark., 2010). 1980'li yılların sonrasında bilgisayar teknolojisinde meydana gelen gelişmeler etkisini fotogrametri alanında da göstermiş ve 'Digital Fotogrametri' kavramının doğmasına ve gelişmesine neden olmuştur. Digital fotogrametri çok büyük boyutlardaki sayısal görüntüleri kullanma, bu görüntülerden otomatik yöntemlerle çeşitli verilerin üretimi ve vektör verileri işleme olanakları sağlamış ve beraberinde 'Digital Harita' kavramını getirmiştir. Bu süreç içerisinde basılı topoğrafik haritaların üzerindeki eş yükseklik eğrilerinin yerini vektör eş yükseklik eğrileri ve arazi kırıklık hatları ile daha kaliteli ve

yüksek çözünürlüklerde “Sayısal Yükseklik Modelleri (SYM)” almıştır. Digital fotogrametrik sistemler stereo modeller üzerinden digital topoğrafik harita üretiminin yanı sıra, otomatik olarak SYM verileri toplama ve ortofoto harita üretimine de olanak sağlamaktadır. Önceleri bazı zorluklarla gerçekleştirilen sayısal yükseklik modeli üretimi, digital fotogrametrik sistemler ve görüntü işleme sistemleri yardımıyla daha kolay bir hale gelmiştir (Erdoğan ve Toz, 2008).

Digital fotogrametri yöntemi ile SAM verisi toplamada veri kaynağı olarak yüksek çözünürlüklü uydu görüntüleri, CCD (Charge Coupled Device) kameralardaki gelişmeler neticesinde çözünürlükleri artan sayısal hava kameraları ile çekilen digital hava fotoğrafları ve analog kameralar ile çekilmiş film bazlı hava fotoğrafları kullanılmaktadır. Analog fotoğraflar yüksek çözünürlüklü tarayıcılar ile taranarak, piksel tabanlı digital görüntülere dönüştürür. Bu amaç için kullanılacak tarayıcılar her bir ana renk için 256 seviyelik bir radyometrik çözünürlüğe ve 1 $\mu$ m’ lik konum belirleme hassasiyetine ve 5 $\mu$ m’ ye kadar piksel boyutlarına izin vermektedirler ( Kayalar ve ark., 2003).

Fotogrametrik yöntemlerle toplanan veriler sayısal formdaki raster görüntüler haline getirildikten sonra sayısal görüntü işleme, fotogrametrik nirengi ölçümü ve dengeleme işlemleri yapılarak sayısal stereo model oluşturulur. Model için yapılan yöneltme işlemlerinin ardından ise SAM verilerinin toplanması işlemine geçilir. Raster görüntü çiftleri renkli grafik ekranda aynı anda görüntülenmektedir. Operatör ekranda özel bir gözlük ile grafik olarak üç boyutlu değerlendirme yapabilmektedir. Verilerin sayısal stereo model üzerinden toplanması işlemi otomatik, yarı otomatik veya el ile veri toplama şekilde yapılmaktadır.

Fotogrametrik veri toplamanın en önemli avantajı, SAM oluşturmak için gerekli minimum sayıda dayanak noktasının seçilebilmesine olanak vermesidir. Özellikle sayısal aletlerle yapılan uygulamalarda, yüzey değişiminin düzgün olduğu bölgeler için çok az sayıda dayanak noktası seçilmekte, ağırlık daha çok yüzey eğiminin değiştiği kritik noktalara verilmektedir (Öztürk, 2006).

### **2.4.3. Uydu bazlı yöntemler**

Teknolojik gelişmeler yeryüzüne ait nesnelere hakkında bilgi edinmemizi sağlayan uzaktan algılama tekniğinin gelişimini hızlandırmıştır. Böylece zamansal olarak daha

kısa sürede, büyük alanlara ait görüntülerin elde edilmesiyle ekonomik veriler üretilebilmektedir (Abdikan, 2007).

Yeryüzü farklı algılama ve görüntüleme sistemleri ile donatılmış uydu platformları ile izlenmektedir. Uydu platformlarına entegre edilmiş yüksek çözünürlüklü kameralar ve algılayıcılar yardımıyla büyük alanların yüksek çözünürlüklü görüntüleri elde edilebilmektedir.

Uydu bazlı görüntü verilerini algılayıcı türlerine bağlı olarak üç grupta toplamak mümkündür:

- Optik sistemlerden elde edilen görüntüler
- Tarayıcılardan elde edilen görüntüler
- Radarlardan elde edilen görüntüler

Bu gruplandırmaya göre uydu bazlı algılayıcı sistemleri kullanılarak SAM verisi toplama işlemi algılayıcı türüne göre; çözünürlükleri yüksek kameralar kullanılarak elde edilen uydu görüntüleri, lazer tarama (LIDAR) ve yapay açıklıklı radar (SAR) yöntemleri ile yapılabilir.

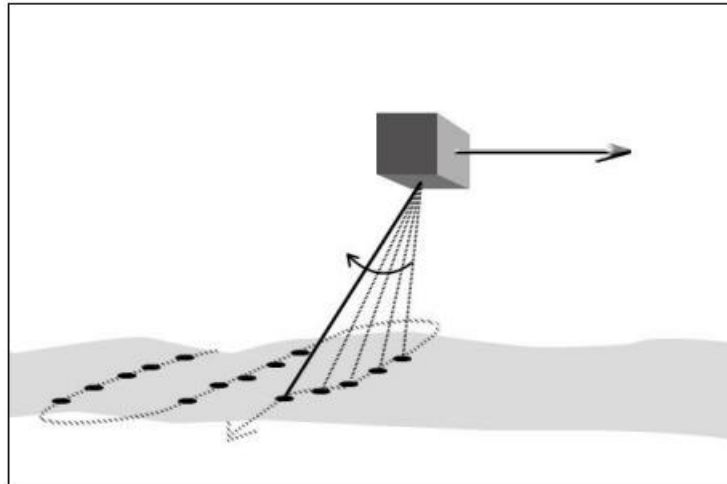
Günümüzde uydu görüntülerinin çözünürlüğünün artması (1m ve altında) uydu görüntülerine olan talebi arttırmıştır. Son yıllarda pek çok ülke ve ticari kuruluşlar tarafından geliştirilen uydu teknolojileriyle ; stereo görüntü çekilebilmekte, yersel çözünürlüğü 1m'nin altında ( 50cm-60cm) pankromatik (siyah-beyaz) ve 2m'nin altında renkli görüntüler elde edilebilmektedir. Yüksek çözünürlüklü uydu görüntüleri; çekildikleri anda güncel olmaları, sayısal olmaları, aynı bölgenin kısa zaman aralığında (3 günden az) yeniden görüntülenmesi ve yasal prosedürlerin olmaması gibi avantajlarından dolayı, günümüzde gerek özel sektörün gerekse kamu kuruluşlarının vazgeçilmez veri kaynağı haline gelmiştir. Yüksek çözünürlüklü uydu görüntüleri yaygın olarak ; haritacılıkta, yerel yönetimlerde, iletişimde, ormancılıkta, tarımda, doğal kaynakların araştırılmasında, afet yönetiminde, askeri çalışmalarda, çevrenin izlenmesi ve Coğrafi Bilgi Sistemleri gibi birçok alanda, birçok disiplin tarafından kullanılmaktadır (Mutluoğlu ve Ark., 2011).

Son yıllarda, uydu görüntülerinden SAM elde etme konusunda, birçok çalışma yapılmış ve yapılmaktadır. SAM oluşturmak için, izdüşüm geometrisi bilinen sensörler kullanan görüntülü uydu platformları kullanılır. Sayıları yüzleri bulan bu tür uydulara örnek olarak, sıkça kullanılan RadarSAT (IRS1-C Pan, Aster VNIR, Spot Pan), Ikonos ve QuickBird uyduları verilebilir. Bunlar içerisinde, çözünürlüğü neredeyse 1/5000

ölçekli hava fotoğraflarının çözünürlüğüne eşdeğer Ikonos ve QuickBird uyduları da SAM modeli oluşturmak için son yıllarda tercih edilmektedir. Uydu görüntüleri ile SAM modeli oluşturma yöntemlerinin, yersel ya da var olan haritaların sayısallaştırılması yoluyla elde edilen verilerle SAM modeli oluşturma yöntemlerine göre önemli avantajları vardır. Bu avantajların en önemlisi, SAM oluşturulması istenilen bölgelerin, güncel uydu görüntülerinin kolayca elde edilebiliyor olmasıdır. Bu sayede, modeli oluşturulacak bölgelerin güncel verileri kullanılmış olunacaktır (Yüksekkaya, 2006).

Yukarıda anlatılan avantajların yanı sıra, uydu görüntülerinden SAM modellerinin oluşturulabilmesi için yapılan uygulamalarda, özellikle SAM modelinin duyarlılığının artırılması istendiğinde, dezavantaj gibi görülebilecek bazı ek işler gerekmektedir. Modelin doğruluğunu ve duyarlılığını artırmak için, yer kontrol noktalarına gereksinim duyulmaktadır. Ancak bu noktaların belirlenmesi ve ölçülmesi için, GPS tekniklerinin kullanılması durumunda sorun kolayca çözülebilmektedir. Kontrol noktalarının dağılımı ve sayısı, SAM doğruluğunu ve duyarlılığını önemli ölçüde etkilemektedir (Yüksekkaya, 2006).

LİDAR (Light Detection And Ranging) lazer darbeleri kullanılarak bir nesne veya bir yüzeyin uzaklığını anlamaya yarayan teknolojidir. Radar teknolojisiyle benzerdir. Radarda kullanılan radyo dalgaları yerine ışık, yani lazer darbeleri kullanılır. Temel prensibi hedefe lazer demeti göndermek ve ışığın uçuş süresini ölçmektir. Uçuş süresinden hedefin uzaklığı hesaplanıp bu birçok nokta için tekrarlanırsa belirli bir alan taranarak 3 boyutlu haritalama yapılabilir (Çetinkaya, 2006).



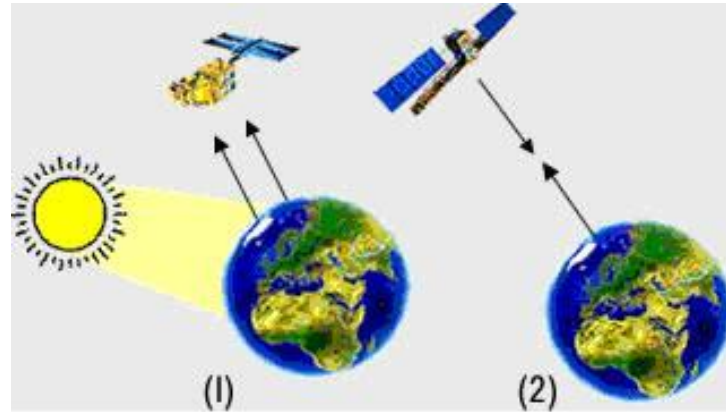
Şekil 2.7. Lidar (Çetinkaya, 2006)



Uzaklığı ölçülecek nesne ya da yüzeye gönderilen lazer darbesinin gönderiliş zamanı ile nesneye çarpıp gelen yansımanın tekrar kaynağa ulaşma zamanı arasındaki fark sayesinde uzaklık ölçülür. Lazer ışınının gönderildiği andaki konum ve dönüklük bilgileri ölçülerek objelerin koordinatları (x, y, z) elde edilir. LIDAR, bugün kullanılan en yeni teknolojilerden biridir. LIDAR teknolojisi ile iyi kontrol edilmiş şartlar altında 15 cm' lik düşey doğruluğa erişilebilmektedir. LIDAR büyük alanların haritalarının üretiminde daha ekonomik bir sistemdir (Erdoğan, 2007).

LIDAR sistemleri, yükseklik verisi toplamak için geleneksel fotogrametrik yöntemlerden farklı birçok avantaj sunar. Bunlara örnek olarak; yüksek düşey koordinat hassasiyeti, hızlı veri toplama/işleme, veri setleri oluşturabilme ve koşullara göre geniş aralıkta veri toplayabilme yeteneği söylenebilir.

Uzaktan algılama tekniği ile üretilen veriler pasif ya da aktif algılayıcılar vasıtasıyla elde edilir. Güneş enerjisi kullanan algılayıcılar pasif, kendi enerjisini üreterek yayan algılayıcılar ise aktif sistemler olarak tanımlanır. Aktif sistemde yer alan RADAR uygulamaları ise son yıllarda geliştirilerek pek çok alanda kullanılmıştır (Abdikan, 2007).



Şekil 2.8. Pasif (1) ve aktif (2) uzaktan algılama

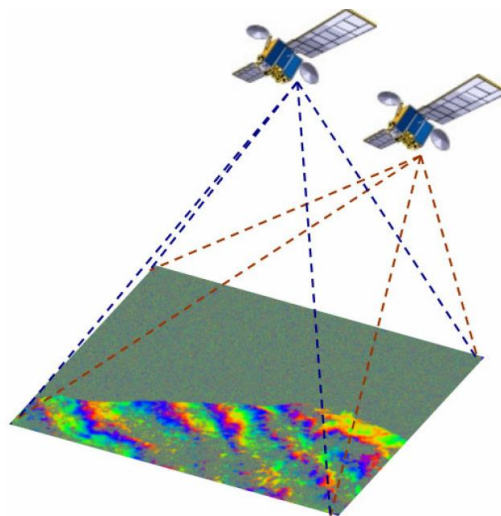
Radar sistemleri, kendi bünyelerinde ürettikleri radar sinyallerini yeryüzüne gönderme ve yeryüzünden geri yansıyan bu sinyalleri de algılama esasına göre çalışmaktadır. Yansıyan sinyaller geri alınarak, yeryüzüne ait radar görüntüleri elde edilir. Gerçek açıklıklı Radar (RAR) ve yapay açıklıklı radar (SAR) olarak iki yöntem mevcuttur.

Gerçek açıklıklı radar sisteminin neden olduğu çözünürlük problemi geliştirilen SAR (Synthetic Aperture Radar) sistemi ile çözülmüştür. Bu sistemde kısa bir anten,

uzun bir antenin görevini görecektir şekilde tasarlanarak yapay olarak uzatılmıştır (Abdikan, 2007).

Günümüzde SAM üretiminde, SAR görüntüleri de kullanılmaktadır. Ancak radar görüntülerinden doğrudan SAM üretimi mümkün olmamaktadır. Bu nedenle öncelikli olarak Sayısal Yükseklik Modeli (SYM)'nin üretilmesi gerekmektedir. Yapay Açıklıklı Radar (SAR) görüntülerinden, SYM oluşturmada iki yöntem kullanılmaktadır. Bunlar stereoskopi ve radar interferometrisi (InSAR) yöntemleridir.

Stereoskopi yöntemi, klasik bir yöntem olup hassasiyeti düşüktür. Yer kontrol noktaları (YKN) kullanılarak stereo geometrinin hassasiyeti artırılabilir. Radar interferometri (InSAR) yöntemi ise, radar görüntülerine özgü bir yöntem olup, yüksek hassasiyete sahiptir (Köse, 2006). Radar interferometresi aynı yerin iki görüntüsünün birbirinden farklı iki konumdan alınması esasına dayanır (maksimum 1km). Alınan görüntüler arasındaki faz farkı amaca göre yüzey yüksekliğini veya yüzey değişimini hesaplamaya yardımcı olur (Saygılı, 2008). SAR görüntüleri faz ve genlik (amplitude) değerlerinden oluşur. Genlik bilgisi yansıma özelliklerini içerir, faz değeri ise radar anteni ile hedef arasındaki uzaklık bilgisini içerir. SAR algılayıcıları gönderdiği elektromanyetik sinyalin hem geri yansıyan kısmının şiddetini (amplitude), hem de sinyaldeki gecikme zamanlarını (phase) kaydeder. İnterferogramdaki faz bilgisi kullanılarak çalışılan bölgeye ait sayısal yükseklik modeli (DEM), yükseklik değişimleri ve deformasyonlar tespit edilebilmektedir (Doğru ve Özener, 2011). InSAR yeryüzü topoğrafyasının ve deformasyonunun belirlenmesi için yeni bir jeodezik tekniktir ve yersel ölçümlere ihtiyaç duymaz (Şengül, 2010).



Şekil 2.9. InSAR

SAM üretiminde uydu bazlı algılayıcı sistemlerinden toplanan görüntülerin kullanılması, büyük alanlarda sağladığı hız ve maliyet avantajı bakımından tercih edilen bir yöntem haline gelmiştir. Öte yandan algılayıcı ve görüntüleme sistemleri kullanılarak elde edilen verilerdeki doğruluk, bu sistemlerde yaşanan teknolojik gelişmeler neticesinde artmaktadır.

#### **2.4.4. Harita ve altlıkların sayısallaştırılması**

SAM üretilecek bölgeye ait mevcut harita, ortofoto ve plan gibi altlıklar üzerindeki grafik bilgiler vektör ya da raster veri yapısına dönüştürülerek bilgisayar ortamında depolanır. Grafik altlıklardan bilgilerin toplanması elle ve otomatik olarak iki farklı şekilde yapılır.

- *El İle Sayısallaştırma:* El ile sayısallaştırma ya da manuel sayısallaştırma işleminde cam ya da plastik plakalar arasında bulunan yoğun bölümlenmiş bir manyetik grid içeren ve sayısallaştırma masası (sayısallaştırıcı=digitizer) diye adlandırılan donanımlara ihtiyaç duyulur. Çözünürlük grid karelerin büyüklüğü ile ters orantılıdır. Çözünürlük 0,0025mm mertebesindedir. Özel bir fare (4, 8, 16 veya daha çok tuşu olan) ile masa üzerine serilen harita üzerine tıklamalar yapılarak sayısallaştırma yapılır (Karagöz, 2008). Bu yöntemle bilgisayar ortamına aktarılan veriler vektör yapıda toplanmaktadır.

Tipik bir sayısallaştırma programı ile masa üzerinde sabitlenen haritada önce referans noktaları sayısallaştırılır. Program referans noktalarının belirli bir koordinat sistemindeki koordinatlarını alır ve bu noktaların sayısallaştırılan masa koordinatlarını da kullanarak dengeleme hesabı ile iki sistem arasındaki dönüşüm parametreleri belirlenir. 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. Sonuçta elde edilen sayısallaştırıcı masa koordinatlarıdır. Dönüşüm parametreleri sayesinde istenilen koordinat sistemine dönüşüm yapılır (Köroğlu, 2006).

El ile sayısallaştırmada nokta sayısallaştırma ve çizgi izleyerek sayısallaştırma olmak üzere iki farklı veri toplama türü kullanılmaktadır. Nokta sayısallaştırmada sayısallaştırılacak detaylar üzerine tek tek tıklanarak koordinatlar bilgisayar ortamına

aktarılır. Çizgi izleyerek sayısallaştırmada ise imleç eşit zaman aralıkları, mesafe ya da koordinat farkları ile sayısallaştırılacak bölgedeki çizgisel detayları izleyerek nokta koordinatlarını kaydeder. Genellikle harita ve altlıklar üzerindeki eş yükseklik eğrileri, dere, akarsu ve yol gibi detaylar bu yöntem ile sayısallaştırılır.

- *Otomatik Sayısallaştırma:* Bu yöntem harita ve altlıkların sayısallaştırılmasında yüksek çözünürlüklü tarayıcılar kullanılır. Tarayıcılar, analog verileri raster tabanlı dijital görüntüye çeviren cihazlardır. Tarayıcı tarafından algılanan dijital değerler, ışık kaynağından gönderilerek görüntüden yansıyan ışık yoğunluklarıyla ölçülür ve raster veri kodlama şeklinde bellekte saklanır. Tarayıcılar genel olarak iki değişik yapıda olup, bunlar; masa tipi tarayıcılar ve silindir tipi tarayıcılardır. Masa tipi tarayıcılarda, taranacak altlık sabit algılayıcı kamera hareketlidir. Silindir tipi tarayıcılarda ise altlık hareketli bir silindire monte edilmekte kamera sabittir (Ceylan ve ark., 2005).

Tarama sonucunda elde edilen harita ve altlıklar farklı formatlarda raster görüntüler olarak saklanır. Mevcut harita ve altlıklardaki hataları içinde barındıran raster görüntüde düzenlemeler (raster editleme) yapılarak hatalar giderilir. Bununla birlikte düzenleme işlemi raster - vektör dönüşümü yapıldıktan sonra da vektör veriler üzerinde yapılabilir.

Harita ve altlıkların sayısallaştırılması ile veri toplama klasik ölçmeler ve fotogrametrik ölçmeler ile veri toplama yöntemleri ile kıyaslandığında büyük alanlar için pratik ve ekonomik olmasına karşın doğruluk bakımından klasik ve fotogrametrik ölçü yöntemleri sayısallaştırma ile veri toplama yöntemine göre daha doğru sonuç vermektedir. Sayısallaştırmanın doğruluğu, sayısallaştırma masasının çözünürlüğüne, pafta altlığındaki deformasyon oranına ve kişinin becerisine bağlıdır (Ceylan ve ark., 2005).

## **2.5. Sayısal Arazi Modeli Verilerinin İşlenmesi**

Veri toplama sürecinin tamamlanmasının ardından düzenli veya dağınık yapıda elde edilen veriler iki aşamalı bir işlem sürecinden geçirilir. Verilerin işlenmesi sonucu dayanak noktaları ile temsil edilen arazi üzerinde yatay konumu bilinen noktaların yükseklik değerleri elde edilmiş olur.

Veri toplamada ortaya çıkan hataların ayıklanması, koordinat dönüşümü ve gerekli görülen durumlarda fazla verilerin ayıklanması veya verilerin sıklaştırılması işlemlerinin gerçekleştirildiği çalışmaların tümü “ön çalışma” olarak adlandırılan aşamada gerçekleştirilir.

Ön çalışma aşamasından geçirilmiş SAM verileri “esas çalışma” işlemi ile araziyi temsil edecek yüzey formuna getirilir. Ön işlemlerden geçirilmiş SAM verilerini kullanarak, kare ağı veya üçgenleme metotlarından biriyle çizgisel veya yüzeysel veriler elde edilir. Eğer gerekirse koordinat dönüşümü ve diğer dönüşümler uygulanarak SAM verileri istenilen koordinat sisteminde elde edilir (Üstüntaş, 1994).

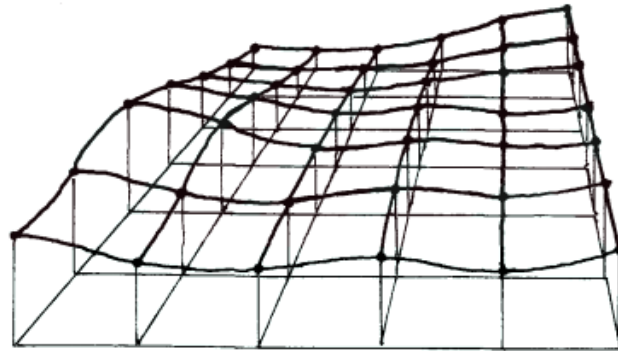
Oluşturulan kare ağın düğüm noktaları ve yeni seçilen noktaların yükseklikleri uygun enterpolasyon yöntemi ile hesaplanır (Köse, 2006).

### 2.5.1. Yüzey oluşturma yöntemleri

SAM oluşturulacak arazi yüzeyinin temsili veya arazi görselleştirilmesi işlemleri genellikle grid (raster) yöntemi, üçgenleme yöntemi ya da bu iki yöntemin birleşimi şeklinde yapılmaktadır. Grid ve üçgenleme yönteminin entegrasyonu için bkz. (Yang, 2005).

#### 2.5.1.1. Grid (Raster) yöntemi

Arazinin gridlerle temsili raster yöntemi olarak adlandırılır. Yüzey modellemede 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 önce de belirtildiği gibi araziye temsil eden kritik noktalara ait bilgiler de toplanabilir. Bu durumda rastgele konumdaki detayı grid konumdaki detaya dönüştürmek gerekmektedir (Öztürk, 2006).



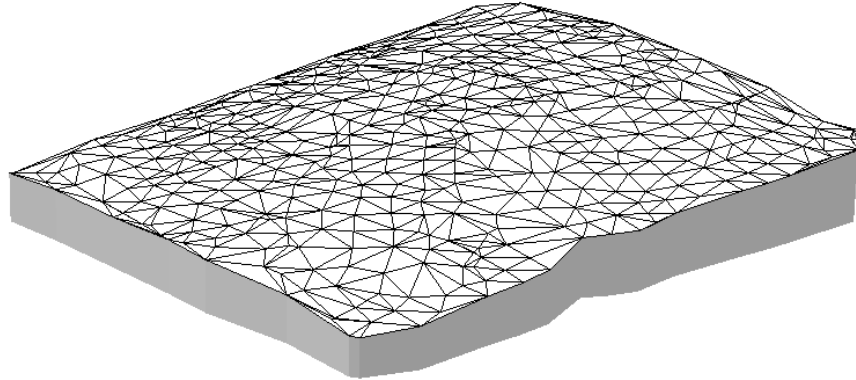
Şekil 2.10. Grid yöntemi ile oluşturulmuş ağ (Yener, 1993)

Dayanak noktalarından bir raster ağının köşe noktalarına geçişte herhangi bir bilgi kaybı olmamalıdır. Bu nedenle raster göz genişlikleri dayanak nokta aralıklarından daha küçük seçilir. Raster gözleri ne kadar küçük ise elde edilecek doğruluk o denli

yüksektir. Dar gözlü bir rasterdan hesaplanan yükseklik eğrilerinin arazi yüzeyini daha iyi temsil ettiği yapılan denemelerle kanıtlanmıştır. Ancak raster' in hesaplandığı dayanak noktalarının yeterli yoğunluğa sahip olması gerektiği kesinlikle unutulmamalıdır (Yener, 1993).

### 2.5.1.2. Üçgenleme yöntemi

Üçgenleme yöntemi günümüzde artan bir şekilde arazi ya da yüzey modellemede tercih edilen bir yöntem haline gelmiştir. Araziden düzensiz yapıda toplanan dayanak noktaları veya çizgi ve poligon yapısındaki veriler kullanılarak, birbirleri ile komşu ve birbirleri ile bindirmesiz biçimde düzensiz üçgenler ağı (TIN) oluşturulur. Oluşturulacak üçgen ağının düğüm noktalarının dayanak noktaları üzerinde olacağı göz önünde bulundurularak veri toplama aşamasında arazinin karakteristik noktalarının dayanak noktası olarak seçilmesi gerekmektedir.



Şekil 2.11. Düzensiz üçgenler ağı

Düzensiz Üçgenleme Ağı yönteminde, arazi yüzeyine rastlantısal ya da düzgün olarak dağılmış bulunan dayanak noktalarının birleştirilmesi ile arazi düzlem üçgenlerden oluşan (polihedron) çok yüzlü bir yüzeyle kaplanır. Bu şekilde elde edilen üçgen ağlarının bazıları, topoğrafik yapı çizgileri ve arazinin kırık çizgileri üzerinde bulunan dayanak noktalarına, üçgenlemede bir öncelik vermeksizin tüm noktaların aynı nitelikte olduğu varsayımına dayanır (Arslanberk, 2009).

TIN, dünya yüzeyi gibi sürekli bir yüzeyi modellemede kullanılan bir veri yapısıdır. En çok kullanılan TIN yapısı, uzayda dağılmış düzensiz noktaların tümünü içine alan, üst üste binmeyen üçgenlerden oluşan, bağlantılı bir veri kümesidir. Bu

kümedeki tüm noktalar genellikle komşu Thiessen poligonlarının merkezlerini birleştiren bir yöntem olan Delaunay üçgenlemesi ile birbirlerine bağlantılıdır. Ayrıca, noktaların x, y ve z koordinatları bilinen noktalar olduğu ve noktaları birleştiren üçgen yüzeylerin her birinin düzlem olduğu kabul edilmektedir (Saygılı, 2008).

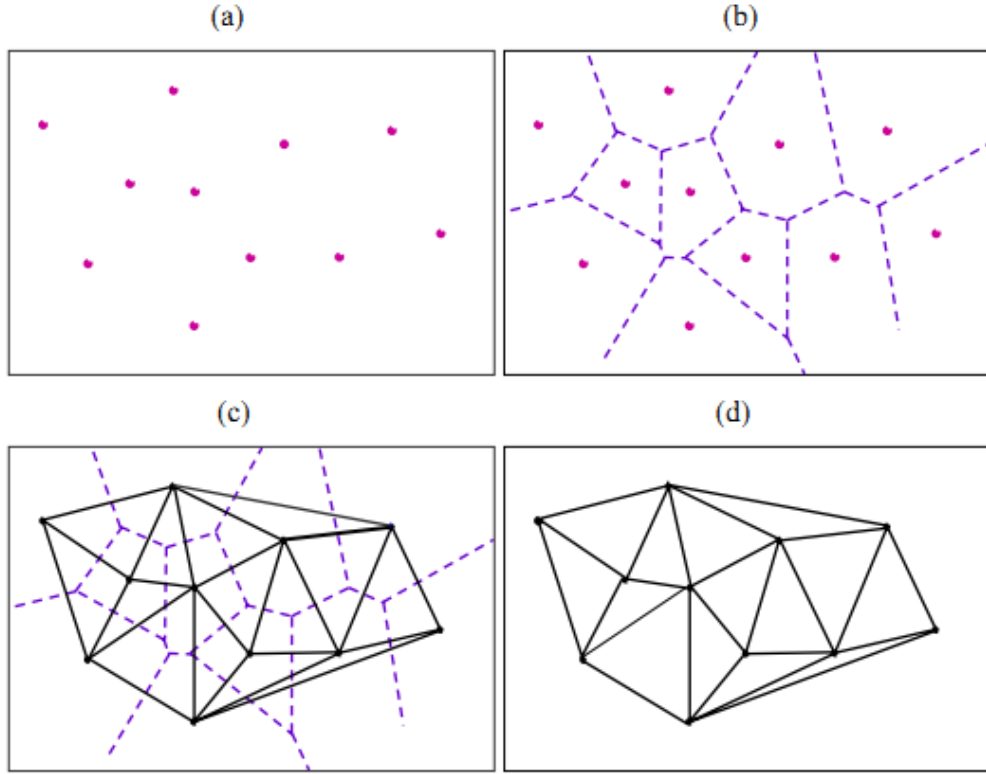
#### **2.5.1.2.1. Delaunay üçgenlemesi**

Bir şehirde, bir bölgede hizmet verecek personel için görev dağılımı yapıldığını kabul edelim. Bir örnek ile ifade etmek istersek, Ankara'da su sayaçlarını okuyan şirket, okuma memurlarının hangi adreslere gideceğinin planını yapıp personele bildirir. Su sayaçları okunacağı zaman her bir personel sadece kendisine ait bölge içerisindeki adreslere, binalara uğrar ve okuma işini yapar. Hiçbir personel kendi bölgesi dışında bir bölgeye geçmez. Bölgenin belirlenmesinde iş performansın en iyi olması hedeflenir. Ayrıca, görev karmaşası olmaması için her bir alt bölgede ya da hücrede sadece ve sadece bir personel istihdam edilmektedir (Kureş, 2006).

Yukarıda verilen örnek günlük yaşamı kolaylaştırmak, olası karmaşıklıkların önüne geçmek ve işgücü verimliliği arttırmak için yapılan birçok farklı düzenleme ile çeşitlendirilebilir. Çalışma alanının küçük bölgelere ayrılması, personelin kendi bölgesi dışına çıkmaması ve kendisine en yakın bölgeye yönlendirilmesi delaunay üçgenlemesi mantığı ile gerçekleştirilmiştir.

Örneklenen durum SAM verileri için yorumlandığında, araziden toplanan verilerin delaunay üçgenlemesi kullanılarak küçük bölgelere ayrılacağı, bunun sonucunda ise birbirine uzak olan noktalar arasında doğrusal bir ilişki kurulmasının engelleneceği açıkça görülmektedir.

Delaunay üçgenlemesi hesaplamalı geometride yaygın bir kullanıma sahiptir. Delaunay üçgenleme yapısına geçmeden Voronoi diyagramını incelemek gerekir. Bu diyagram literatürde, Dirichlet, Thiessen veya Wigner-Seitz diyagramı olarak da anılmaktadır. Düzlemde yer alan sonlu nokta kümesine ait herhangi bir noktaya kümedeki diğer noktalardan daha yakın konumda bulunan düzlem noktalarının geometrik yerine o noktanın Voronoi çokgeni, kümedeki tüm noktaların Voronoi çokgenlerinin birleşimine de o kümenin Voronoi diyagramı denir. Bu diyagram en yakın nokta problemleri için kullanılan kesin bir yöntemdir (Çakır, 2005).



**Şekil 2.12.** a) Rasgele dağılmış noktalar, b) Voronoi diyagramı, c) Voronoi diyagramı ve delaunay üçgenlemesi, d) Delaunay üçgenlemesi (Çakır, 2005)

Dayanak noktaları kümesinde birbirine en yakın konumda bulunan nokta çiftinin oluşturduğu doğru parçası üçgenlemede yer almaktadır. Benzer şekilde her bir noktayı kendisine en yakın nokta ile birleştiren doğru parçası bir üçgen kenarını oluşturmaktadır. Veri kümesinin dışbükey çerçevesi o kümeyi içene alan en küçük çokgendir. Voronoi çokgenlerinin köşe noktaları, üçgenlerin kenar orta noktalarının kesişimiyle bulunan noktalardır. Dolayısıyla bu noktalar üçgenlerin çevrel çemberlerinin merkezleridir. Bu merkezler ait oldukları üçgenin içinde olabileceği gibi dışında da olabilir. Delaunay üçgenlemesinin algoritması kurulurken birçok araştırmacının tarafından kullanılan en büyük özellik, üçgenlerin çevrel çemberinin içinde başka bir nokta yer almamasıdır. Üçgenlemeyi çekici kılan bir diğer nokta, oluşan üçgenlerin en olası eşkenar üçgenler olmasıdır. Dar açılı üçgenlerin oluşması ile birbirlerine göre uzak mesafede olan noktalar arasında üçgenleme yapılması engellenmiş olmaktadır. Bu özelliği ile delaunay üçgenlemesi, otomatik eşyükseklik eğrisi çiziminde tercih edilen bir üçgenleme yöntemi durumuna gelmiştir (Yanalak, 1997).



## 2.6. Sayısal Arazi Modellerinde Kullanılan Enterpolasyon Yöntemleri

Sayısal arazi modellemede enterpolasyon, modelde yüksekliği bilinmeyen noktaların yüksekliklerini hesaplanmayı sağlar. Enterpolasyon temelde aşağıdaki işlemler için kullanılır (Weibel, 1991):

- Tek nokta konum yüksekliğini (z) hesaplama
- Örnekleme noktalarından yararlanarak grid yüksekliğini (z) hesaplama
- Eşyükseklik eğrileri boyunca nokta konumu (x, y) hesaplama
- Gridleri sıklaştırma/seyrekleştirme (yeniden örnekleme)

Dayanak noktalarını gereğince temsil eden bir yüzeyin belirlenmesi, enterpolasyon büyüklüklerinin hesaplanabilmesi anlamına gelir. Konum koordinatları bilinen herhangi bir enterpolasyon noktasındaki kestirim değeri, yüzeyin o noktadaki yükseklik değerine eşit olur. Yüzeyin belirlenmesinde kullanılacak yaklaşımlara bağlı olarak değişik enterpolasyon yöntemleri türetilmiştir (Yanalak, 1997). Yüzey belirlemede kullanılan yaklaşımlar:

1. Nokta nokta enterpolasyon
2. Yerel olarak tanımlanmış parça parça fonksiyonlarla enterpolasyon
3. Tüm araziye kaplayan bir tek fonksiyonla enterpolasyon olarak 3 gruba ayrılır.

Noktasal enterpolasyon, enterpole edilecek nokta için yüksekliği istenen noktayı çevreleyen, ölçü dairesi ya da karenin iç tarafına düşen dayanak noktaları kullanılmaktadır. Bu noktalar; ağırlıklı ortalama, düşük dereceden polinom ya da seçilen diğer bir fonksiyonun parametrelerini hesaplamada kullanılır (Yener, 1993). Noktasal enterpolasyon yöntemleri;

- Ağırlıklı ortalama yöntemi ile enterpolasyon
- Kayan yüzeyler ile enterpolasyon
- Lineer enterpolasyon
- Bilineer enterpolasyon

olarak sıralanabilir.

Yerel olarak tanımlanmış parça parça fonksiyonlarla enterpolasyon yönteminde, bölge küçük parçalara bölünür ve her bir parça seçilen fonksiyonla gösterilir. Bu durumda parçaların sınırları boyunca çatlaklar ve süreksizlikler görülebilir. Bundan

kaçınmak için parçalardaki fonksiyonları sınırlar boyunca karşılaştırmak amacıyla birleştirme fonksiyonları kullanılır (Yiğit, 2003).

Parça parça enterpolasyon yöntemleri:

- En küçük parçalardaki polinomlarla enterpolasyon
- En küçük kareler yöntemi ile enterpolasyon
- Sonlu elemanlarla enterpolasyon
- Üçgen elemanlarında lineer enterpolasyon
- Beşinci dereceden (C sürekliliği) polinom üçgen elemanlarında iki değişkenli enterpolasyon
- Dörtgen elemanlarla bilineer enterpolasyon olarak sıralanabilir (Köse, 2006).

Tüm araziye kapsayan tek bir fonksiyonla enterpolasyon yaklaşımında tüm araziye temsil eden  $z=f(x)$  fonksiyonu aynı anda tüm dayanak noktaları kullanılarak belirlenir. Bu metoda;

- Multiküadratik
- Lineer en küçük kareler
- Çift Fourier serileri

örnek olarak gösterilebilir (Bayrak, 1996).

### 2.6.1. Ağırlıklı ortalama yöntemi

Ağırlıklı ortalama yöntemi, çok basit bir algoritmaya sahip olması ve programlama tekniği açısından uygun olması nedeniyle tercih edilen ve yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Basit bir yöntem olarak gözükmekle birlikte, birçok uygulamada etkin sonuç vermektedir. Basit olarak, kestirim noktasındaki yüzey değeri, dayanak noktalarındaki yüzey değerlerinin ağırlıklandırılmış ortalamasının alınmasıyla hesaplanır (Açıkgöz, 2002). Ağırlıklı ortalama yönteminde veriler enterpolasyon sırasında ağırlıklandırılır bu nedenle entepole edilerek hesaplanacak olan grid köşe noktasına uzak olan dayanak noktalarının etkisi, yakın noktaya nazaran daha azdır (Yang ve ark., 2004).

Ağırlıklı ortalama yönteminde, herhangi bir  $j$  noktasına ait  $\hat{Z}_j$  grid düğüm noktası yüzey değeri,  $n$  ( $i=1, \dots, n$ ) sayıdaki dayanak noktasına ait  $Z_i$  yüzey değerlerinden yararlanarak,

$$\hat{Z}_j = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{Z_i}{h_{ij}^\beta}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{h_{ij}^\beta}} \quad (2.2)$$

$$h_{ij} = \sqrt{d_{ij}^2 + \delta^2} \quad (2.3)$$

denklemleri ile belirlenir. Denklemden:

$h_{ij}$  : i komşu noktası ile j yüzey noktası arasında belirlenmiş enterpolasyon mesafesi

$\hat{Z}_j$  : grid düğüm noktasının enterpolasyon sonrası yüzey değeri

$d_{ij}$  : i komşu noktası ile j yüzey noktası arasındaki uzaklığı

$Z_i$  : komşu dayanak noktalarının yüzey değerini

$\beta$  : ağırlık katsayısı

$\delta$  : yumuşatma parametresi olarak tanımlanır (Golden software Surfer 9).

Bu yöntemle kestirimde, tüm dayanak noktalarının kullanılmasına gerek yoktur. Dayanak noktalarının ağırlıklarının ( $\beta$ ) uzaklığa bağlı olarak belirlendiği düşünülürse, uzaklık arttıkça ağırlık küçülecek ve bir noktadan sonra sıfıra eşit olacaktır. Bu da, ağırlığı sıfır olan dayanak noktasının kestirimde hiçbir etkisinin olmayacağını ifade eder (Alkanalka, 2005). Bu nedenle her bir enterpolasyon noktasının yüzey değeri, o noktanın çevresinde çizilecek kritik daire içinde kalan dayanak nokta yüzey değerlerinden 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 (Yanalak, 1997).

Kritik daire kullanmaktan farklı bir düşünce olarak enterpole edilecek noktanın doğal komşularını kullanmak düşünülebilir. Yanalak (2002) yaptığı çalışmada Sibson (1977), Lee ve Preparata (1984), Watson ve Philip (1984) yaptığı çalışmaları referans göstererek doğal komşuluğun hesapsal geometride önemli bir yer tuttuğunu ifade etmiştir. Bununla beraber Macedonio ve Paraschi'nin (1991) çalışmasına göre, bir enterpolasyon noktası dayanak noktaları ile birlikte Delunay kriterine göre üçgenlenirse enterpolasyon noktası ile birleşerek üçgen kenarı oluşturan bütün dayanak noktaları

enterpolasyon noktasının doğal komşuları olurlar. Dolayısıyla ağırlıklı ortalama ile enterpolasyon işlemi sadece bu dayanak noktaları kullanılarak yapılabilir. Doğal komşuların kullanılması ile kritik daire veya dikdörtgen boyutunun belirlenmesine gerek kalmayacaktır (Yanalak, 2002b).

### 2.6.2. Kriging yöntemi

Kriging, bu tekniği ilk geliştiren D.G. Krige isimli Güney Afrikalı bir maden mühendisinden adını almaktadır. Kriging konumsal tahmin için geoistatistiksel bir 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).

Bugün pek çok sayıda kriging yöntemleri yaygın olarak çeşitli alanlarda kullanılmaktadır. Bunlar orijinal adları ile Simple Kriging, Ordinary (Punctual) Kriging, Universal Kriging, Block Kriging, İndicator Kriging, Disjunctive Kriging, Cokriging olarak sunulabilir (Yiğit, 2003).

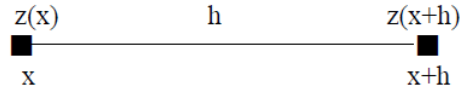
Kriging yönteminin temeli bölgesel değişkenler teorisine dayanır. Yükseklikler tarafından temsil edilen olaylarda konumsal değişim yüzey boyunca istatistiksel olarak homojendir. Yüzey; sabit bir ortalama ya da trend'den oluşan yapısal bir bileşen, rastgele fakat konumsal olarak korelasyonlu bileşen ve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

Tragmar ve ark. (1985) göre kriging analizini diğer enterpolasyon metotlarından ayıran en önemli özellik, tahmin edilen her bir nokta veya alan için ayrı bir varyans değerinin hesaplanabilmesidir ki bu, tahmin edilen değer için güven derecesinin bir ölçüsüdür. Eğer bir nokta veya alan için hesaplanan varyans değeri, gerçek varyanstan daha küçük ise arazi özelliğinin ölçülmeyen nokta veya alanı için tahmin edilen değerinin güvenilir olduğu kabul edilir. Kriging varyansı olarak isimlendirilen bu varyans, verilerin gerçek değerlerine bağlı değildir, veri sayısına ve veriler arasındaki uzaklığa bağlıdır (Üstüntaş, 2006).

İstatistiksel yöntemler incelenen değişkenler arasında bir bağlantı olmadığını varsayarlar. Örneğin yapılan bir zar atışı ile bir sonraki atışın sonuçları arasında hiçbir

ilişki yoktur. Her iki zar atışının sonucu da bir ile altı arasında herhangi bir değer olabilir. Sonuç ve değerler rastlantısaldir (Uyar, 2005). Jeostatistiksel yöntemlerde ise değişkenler birbirleri ile ilişkilidir. Buna göre, birbirine yakın aralıklarla alınan örneklerin birbirlerinden daha uzak aralıklarla alınan örneklerden daha fazla benzerlik göstermeleri beklenir. Örnekler arasındaki benzerlik, örnek noktaları arasındaki mesafe arttıkça azalma gösterecek belli bir noktadan sonra ise konumsal bağımlılık sona erecektir.

Konumsal değişkenin değerleri arasındaki farkın uzaklığa bağlı değişimleri jeostatistikte variogram fonksiyonu ile ortaya konur. Variogram fonksiyonu, birbirinden  $h$  uzaklığıyla ayrılmış iki rastlantı değişkeni arasındaki farkın varyansı şeklinde ifade edilir (Tercan ve Saraç 1998).



$x$  noktasındaki örnek değeri  $z(x)$ , bundan  $h$  kadar mesafedeki  $x+h$  noktasındaki örnek değeri ise  $z(x+h)$  ile gösterilsin, buna göre varyans;

$$2\gamma(h) = \text{Var}[Z(x) - Z(x+h)] \quad (2.4)$$

Varyansa ilişkin;  $\text{Var}(Z) = E(Z)^2 - \mu^2$  eşitliği kullanılarak variogram beklenen değer cinsinden,

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

şeklinde yazılabilir (Tercan ve Saraç 1998).

Variogram fonksiyonu, mesafe ve yönün bir fonksiyonudur. Çalışma alanının ilgili bölgesel değişkeni için ne özellikler gösterdiğini anlamaya yardımcı olur. Bu fonksiyon ile değişkenin homojenlik ve izotropluk dereceleri, düzenliliği ve bir örneğin etkili olduğu uzaklık belirlenir. Variogram deneysel ve teorik (model) variogram olmak üzere iki bölümden oluşur. Deneysel variogram her noktanın varyansının hesaplanması ile bulunur. İkinci aşamada deneysel variogramdaki trendi modelleyen basit matematiksel fonksiyon olan teorik variogram seçilir (Yaprak, 2007).

### 2.6.2.1. Deneysel variogram

Kriging yöntemi ağırlıklı ortalama yöntemine benzer bir şekilde yakındaki noktalardan daha fazla etkilenmeyi sağlayan bir ağırlık modeli kullanır. Kriging yönteminin genel denklemi aşağıda (2.6) verilmiştir.

$$Z_p = \sum_{i=1}^n W_i Z_i \quad (2.6)$$

$Z_p$  : P noktasının aranan ondülasyon (yükseklik) 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 (yükseklik) değerleri

$n$  :  $Z_p$  nin hesabında kullanılan nokta sayısı

Isaaks ve Srivastava (1989)' ya göre kriging enterpolasyon yönteminde kullanılan temel eşitlik incelendiğinde en temel sorun  $W_i$  ağırlıklarının belirlenmesidir. Ağırlıklar ise variogram fonksiyonu ile belirlenebilir. Herhangi bir çalışma bölgesinde enterpolasyon olarak Kriging kullanılacaksa bu durumda seçilen variogram modeline ait parametreler bilinmeli ya da çalışma bölgesinde bulunan verilerden yararlanarak deneysel variogram modeli oluşturulmalıdır. Elde edilen bu deneysel variogram modelinden yararlanarak teorik modele ait bilinmeyen parametreler belirlenmelidir (İnal ve Yiğit, 2004).

Journel ve Huijbregts (1978)'e göre yarıvariogramlar belli bir x mesafesi ile birbirlerinden ayrılan örnek çiftleri arasındaki varyansın mesafeyle olan ilişkisini gösterirler. Diğer bir ifade ile örnekleme çiftleri arasındaki mesafenin bir fonksiyonu olarak uzaysal bağımlılığı tanımlar ve matematiksel olarak aşağıdaki eşitlikle ifade edilirler (Başkan, 2004).

Her bir h uzaklığı için iki boyutta deneysel semivaryans;

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{h_{ij}}^{N(h)} (Z(x_i, y_i) - Z(x_j, y_j))^2 \quad (2.7)$$

eşitliği ile hesaplanır. Burada,

$$h_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (2.8)$$

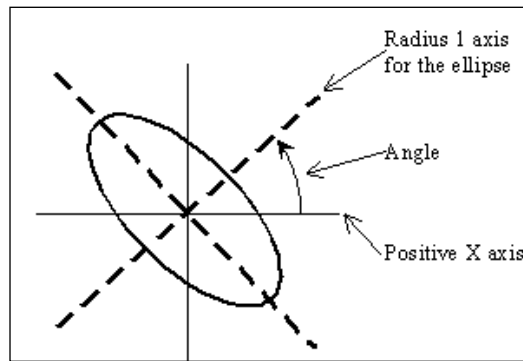
$h_{ij}$  : i ve j noktaları arasındaki yatay uzaklık değeridir.

$N(h)$  : h vektörü uzunluğundaki nokta çiftleri sayısı (ya da bölge içerisindeki h vektörü sayısı)

$\gamma(h)$  : h uzunluğundaki semivaryans değeridir (Yiğit, 2003).

Diğer taraftan örnekler arasındaki konumsal bağımlılık mesafe boyutundan başka yöne göre de oluşabilir. Birbirine h kadar uzaklıktaki örnekler yön dikkate alınmaksızın hesaplanırsa bu tip variogramlar yön bağımsız (omnidirectional, bölge içerisinde olan bütün h vektörlerini sağlayan nokta çiftleri hesaba katılır, variogramlar) olarak adlandırılır. Fakat herhangi bir yöndeki h uzunluklarına sahip vektör çiftleri dikkate alınarak hesaplanan variogramlar yönsel variogram olarak adlandırılır. Örneğin  $\theta = 0^\circ$ ,  $\theta = 90^\circ$  ya da  $\theta = 45^\circ$  yönlerinde variogramlar oluşturulabilir.  $\theta$  değeri, X ana yönünden olan açı ve  $\Delta\theta$  tolerans miktarını göstermek üzere ( $\theta - \Delta\theta < \theta < \theta + \Delta\theta$ ) tanımlanabilir (Yiğit, 2003).

Bir bölgesel değişken için alınan konumsal örneğin etki alanı bütün yönlerde aynı uzanımı göstermeyebilmektedir. Belirli bir yönde, belirli bir mesafe içerisinde süreklilik gözlenmesine karşılık, bir başka yönde süreksiz ve düzensiz değişiklikler görülebilir. Bölgeselleşmiş bir değişkenin örnekleri arasında belirli bir mesafe içerisinde devamlılığın yönsel farklılık göstermesi ilgili değişkenin anizotropik bir değişken olduğunu ifade eder (Konuk, 2011). İncelenen özellikler için belirlenen yarıvariogram değerlerinin yönler göre değişiklik göstermesi yönsel (anizotropik) bağımlılığın bir göstergesidir. Yönsel bağımlılığın olduğu durumlarda, varyasyonun maksimum ve minimum olduğu yönler dikkate alınarak hesaplanan bir katsayının yarıvariogramın eğim bileşimine ilave edilmesi gerekmektedir (Webster ve Oliver 1990).



Şekil 2.13. An-izotropinin belirlenmesinde kullanılan elips





$$\sum_{i=1}^n W_i = 1 \quad (2.12)$$

şartı ileri sürülür. Bu durumda (2.6) denklem sistemi

$$\begin{aligned} W_1\gamma(h_{11}) + W_2\gamma(h_{12}) + \dots + W_n\gamma(h_{1n}) &= \gamma(h_{1p}) \\ W_1\gamma(h_{21}) + W_2\gamma(h_{22}) + \dots + W_n\gamma(h_{2n}) &= \gamma(h_{2p}) \\ \vdots & \\ W_1\gamma(h_{n1}) + W_2\gamma(h_{n2}) + \dots + W_n\gamma(h_{nn}) &= \gamma(h_{np}) \\ W_1 &+ W_2 &+ \dots + W_n &= 1 \end{aligned} \quad (2.13)$$

şeklini alır.

(2.9) nolu denklem sistemine bakıldığında n tane bilinmeyen ve (n+1) tane denklem vardır. Çözümün yansız olması için ( $\lambda$ ) Lagrange çarpanı eklenir. Lagrange çarpanı ile denklem sayısı bilinmeyen sayısına eşitlenir ve bu denklem sistemi;

$$\begin{aligned} W_1\gamma(h_{11}) + W_2\gamma(h_{12}) + \dots + W_n\gamma(h_{1n}) + \lambda &= \gamma(h_{1p}) \\ W_1\gamma(h_{21}) + W_2\gamma(h_{22}) + \dots + W_n\gamma(h_{2n}) + \lambda &= \gamma(h_{2p}) \\ \vdots & \\ W_1\gamma(h_{n1}) + W_2\gamma(h_{n2}) + \dots + W_n\gamma(h_{nn}) + \lambda &= \gamma(h_{np}) \\ W_1 &+ W_2 &+ \dots + W_n &= 1 \end{aligned} \quad (2.14)$$

olur. Matris gösterimi ile,

$$\gamma W = \gamma_0 \quad (2.15)$$

yazılabilir. Burada;

$$\gamma = \begin{bmatrix} \gamma(h_{11}) & \gamma(h_{12}) & \dots & \gamma(h_{1n}) & 1 \\ \gamma(h_{21}) & \gamma(h_{22}) & \dots & \gamma(h_{2n}) & 1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \gamma(h_{n1}) & \gamma(h_{n2}) & \dots & \gamma(h_{nn}) & 1 \\ 1 & 1 & \dots & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

$$W = \begin{bmatrix} W_1 \\ W_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ W_p \\ \lambda \end{bmatrix} \quad \gamma_0 = \begin{bmatrix} \gamma(h_{1p}) \\ \gamma(h_{2p}) \\ \cdot \\ \cdot \\ \gamma(h_{np}) \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

olmak üzere  $W$  bilinmeyenler vektörü;

$$W = \gamma^{-1} \gamma_0 \quad (2.18)$$

formülü ile hesaplanır ve enterpolasyon noktasının Kriging varyansı,

$$\sigma_{OK}^2 = W^T \gamma_0 \quad (2.19)$$

Denklemine göre bulunur.

Ağırlıklar belirlendikten sonra Kriging genel denkleminde çalışma bölgesindeki herhangi bir nokta için enterpolasyon değeri (2.6) formülüne göre belli edilir. Ağırlıklar kovaryans fonksiyonlarından ya da variogram fonksiyonlarından yararlanılarak bulunabilir. Genellikle geoistatistikte ağırlıklar variogram parametrelerine göre yukarıdaki denklem sistemlerinde kullanılarak 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 (İnal ve Yiğit, 2003).

Deneysel semi-variogram değerlerini hesaplamaya başlamadan önce, örneklenen değişken değerlerinin dağılım modelinin belirlenmesi gerekmektedir. Konumsal değişkenlerin dağılımı, normal, lognormal veya üstel (eksponansiyel) olabilmektedir. Eğer, dağılım modeli araştırılmadan deneysel semi-variogram hesaplamaları yapılırsa, elde edilen değerlere model uyarlamak mümkün olmayabilir. Örneğin, lognormal dağılıma sahip bir değişken için deneysel semi-variogram hesaplamalarını, değişkenin logaritmik değerleri ile yapmazsak, elde edilen değerlere uyan model ya hatalı olacaktır, ya da uygun bir model bulmak mümkün olmayacaktır (Konuk, 2011).

### 2.6.2.2. Teorik variogram

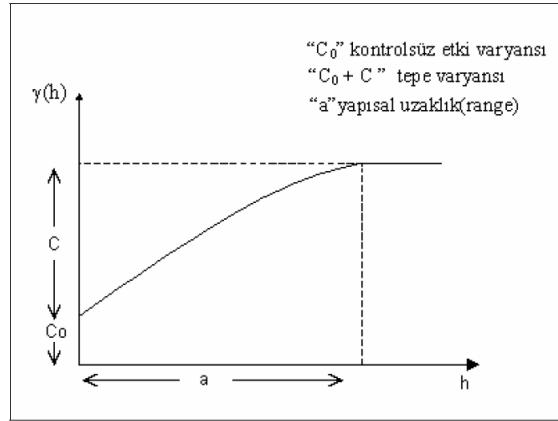
Deneysel variogramlarda variogram değerleri belirli uzaklıklarda hesaplanırlar. Bunların dışındaki uzaklıklarda variogram değerleri bilinmez. Isaaks ve Srivastava (1989)'ye göre bölgesel değişkenin özelliklerinin belirlenmesinde ve özellikle örneklenmemiş noktadaki değerlerinin kestiriminde variogram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

Geoistatistikte yaygın olarak kullanılan variogram modelleri aşağıda verilmiştir (Golden Software).

- Üssel model
- Küresel model
- Gauss model
- Lineer model
- Kuadratik model
- Dalga (Hole effect) model
- Kübik model
- Logaritmik model
- Power model

Teorik olarak  $h = 0$  olduğunda variogram değeri sifıra eşittir [ $\gamma(0) = 0$ ]. Bununla birlikte, uzaklığa bağlı değişimin verilerden belirlenebileceği sınır bir uzaklık değeri vardır. Bu sınır uzaklık, bütün mevcut örnekler içinde, birbirine en yakın iki örnek arasındaki uzaklıktır. Pratik olarak, bu uzaklıktan daha küçük uzaklıklarda, değerler arasındaki farkın değişimi, veri olmadığından belirlenemez ve bu durum variogramın orijininde bir süreksizliğe (0 dan farklı pozitif bir değer almasına) neden olur. Orijindeki süreksizliğin bir diğer nedeni de örnekleme ve analiz hatalarıdır. Süreksizliğin bu iki kaynağını birbirlerinden ayırt etmek mümkün değildir ve variogramda bu durum kontrolsüz etki varyansı (külçe etkisi, nugget variance) " $C_0$ " şeklinde ortaya çıkar. Bu etki ölçüm hatalarından, söz konusu özelliğin yapısından veya örnekleme noktaları arasındaki mesafenin incelenen toprak özelliğinin konumsal (spatial=yersel) bağımlılık derecesini belirlemek için uygun olmamasından kaynaklanan varyasyonu içine alır (Öztaş 1995). Konumsal değişken variogramı belirli bir mesafeden sonra artışını durdurur ve tepe varyansı (eşik, sill) " $C_0 + C$ " değeri çevresinde değerler almaya başlar.

Variogramın eşik değerine ulaştığı uzaklık etki alanı (yapısal uzaklık, range) “a” olarak adlandırılır ve fiziksel olarak bir örneğin etki alanı kavramına karşılık gelir (Şekil 2.14). Yapısal uzaklıktan daha büyük uzaklıklarda bir değer diğerinin üzerinde hiçbir etkisi yoktur, yani konumsal bağımlılık sona ermiştir (Tercan ve Saraç 1998).



Şekil 2.14. Yarıvariogram bileşenleri (Başkan, 2004)

Bardosy (2002)'ye göre teorik variogramlar, variogram formülü ile hesap edilen deneysel variogramlardan yararlanarak belirlenir ya da Kriging ile variogram fonksiyonu arasında çapraz doğrulama tekniği kullanılır. Deneysel variogram modelinden teorik variogram modelinin belirlenmesinde;

- Tecrübeye dayanarak kestirim
- Ağırlıklı en küçük kareler yöntemi
- Maximum olabilirlik
- Robust

gibi farklı yaklaşımlar vardır. Bu yaklaşımlardan ilki istatistiksel bir anlam taşımadığı için farklı kişiler aynı modeli farklı parametrelerle bulacaktır (Yiğit, 2003).

### 2.6.3. Multikuadratik enterpolasyon yöntemi

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 (Yanalak, 1997). Leberl (1973) 'e göre şimdiye kadar yapılan uygulamalar 1. veya 2. dereceden bir polinomun yeterli olduğunu göstermiştir.

Hardy (1971)' e göre trend yüzeyi olarak n. dereceden bir polinom kararlaştırılması durumunda,  $z(x_j, y_j)$  polinomunun katsayıları ve dayanak noktalarındaki  $\Delta z_j$  artık yükseklik değerleri (düzeltmeler) hesaplanır (polinom katsayılarının sayısı dayanak noktalarının sayısından az olmalıdır),

$$\Delta z_j = z_j - z(x_j, y_j) \quad j=1,2,\dots,m \quad (2.20)$$

$$\sum_{j=1}^m C_j [Q(x_i, y_i, x, y)] = \Delta z \quad (2.21)$$

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

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

$$\sum_{j=1}^m C_j [(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + k]^{1/2} = \Delta z \quad (2.22)$$

- Dairesel paraboloid serilerinin toplamı,

$$\sum_{j=1}^m C_j [(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + k] = \Delta z \quad (2.23)$$

- Dairesel dik konilerin toplamı,

$$\sum_{j=1}^m C_j [(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2]^{1/2} = \Delta z \quad (2.24)$$

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

$$[(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2 + k]^{-1/2} = a_{ij} \quad j=1,2,\dots,m \quad (2.25)$$

kısaltması ile (2.24) eşitliği,

$$\sum_{j=1}^m C_j a_{ij} = \Delta z_i \quad i=1,2,\dots,m \quad (2.26)$$



plakaya benzer. Yöntemin algoritması, modifiye biharmonik diferansiyel eşitliğin sayısal çözümüne dayanır (Dressler, 2009).

Minimum eğrilik, mümkün olduğunca birbirine yakın dayanak noktalarını iyileştirmeye çalışırken mümkün olabilecek en düzgün yüzeyi üretir (Soycan ve Soycan, 2002).

En küçük eğrilik yöntemi ile yüzey tanımlamak için öncelikle, grid veri oluşturulacak ölçülerden bir trend belirlenerek artık değerler hesaplanır. Bu aşamada trend için basit düzlemsel model denklemi (2.31) kullanılarak en küçük kareler regresyonu yapılır.

$$AX + BY + C = Z(X, Y) \quad (2.31)$$

Sonraki aşamalarda, ölçü noktalarında bilinen artık değerler ölçü olarak alınır ve her bir grid köşesinde en küçük eğrilik algoritması ile enterpole edilir. En küçük eğrilik algoritması ile enterpolasyon işlemi,

$$(1 - T_i)\nabla^2(\nabla^2 Z) - (T_i)\nabla^2 Z = 0 \quad (2.32)$$

biharmonik eşitliği kullanılmaktadır (Smith ve Wessel, 1990). Burada;

$T_i$  :  $T_i$  iç gerilme,

$\nabla^2$  : Laplace operatörü

olarak bilinirler. Bu yöntemle, oluşturulan grid verinin düzgünlüğünü sağlamak amacıyla, çalışma bölgesinde iteratif olarak (2.32) eşitliği kullanılır. Bu iterasyon tanımlanmış olan maksimum artık değerden küçük oluncaya ya da maksimum iterasyon değerine ulaşıncaya kadar devam eder. En küçük eğrilik algoritması ile yüzeyin oluşturulmasındaki son aşama ise, her bir grid köşesindeki trend değeri ile enterpole edilen artık değerinin toplanmasıdır (Alkanalka, 2005).

En küçük eğrilik algoritması ile oluşturulan yüzeyde meydana gelen eğilme ya da bükülmeleri kontrol etmek için; yüzeyin iç bölgelerinde iç gerilme katsayısı ( $T_i$ ), kenarlarda ise sınır gerilme katsayısı ( $T_b$ ) kullanılır. Gerilme katsayılarının değeri 0-1 arasında değişir ve bu değer büyüdükçe, yüzeyde oluşan eğilme ya da bükülmeler azalmaktadır (Açıkgöz, 2002). Yüzeydeki eğriliği kontrol etmek için Sınır normali ( $n$ ) boyunca,

$$(1-T_b) \frac{\partial^2 Z}{\partial n^2} + (T_b) \frac{\partial Z}{\partial n} = 0 \text{ ve } \frac{\partial(\nabla^2 Z)}{\partial n} = 0 \quad (2.33)$$

formülü ve Sınır köşelerinde ise,

$$\frac{\partial^2 Z}{\partial X \partial Y} = 0 \quad (2.34)$$

formülü kullanılır.

### 2.6.5. En yakın komşu yöntemi

Bu yöntemde en yakın veri noktasının değeri her bir grid noktasına atanmaktadır. Bu yöntem düzenli dağılımdaki veriler için kullanışlıdır. Aynı zamanda veri olmayan boşlukları doldurmak için de kullanılabilir (Golden Software).

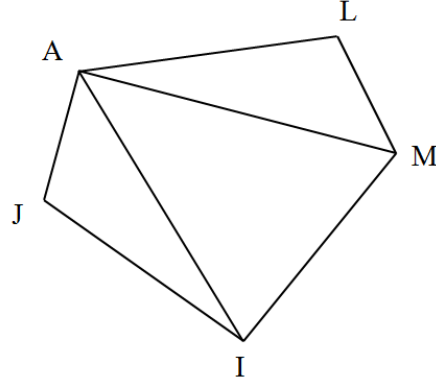
### 2.6.6. Doğal komşuluk yöntemi

Ağırlıklı ortalamaya göre çalışan bu enterpolasyon tekniği “Ters Mesafe Ağırlıklı (IDW) enterpolasyon tekniğine” çok benzer. Enterpole edilecek noktaları araştırırken örneklem noktalarında mesafeye bağlı ağırlıkları kullanır. Düzensiz yoğunluktaki örneklem verisini ayırıp sınıflayabilen, enterpolasyon mantığının genel amaçlarına uygun sayısal enterpolasyon araçları ile TIN fonksiyonlarını bir algoritmayla beraber kullanan ve özel tanımlı parametrelere ihtiyaç duymayan son derece kolay bir tekniktir. Bu teknikte ilk olarak Delaunay Üçgenlemesi ile her örneklem noktasının üçgen köşe noktası olduğu bir üçgenleme yapılır. Ardından her bir nokta için minimum sayıda üçgen kenarı olacak şekilde dışbükey alanlar tanımlanır. Her komşu noktanın ağırlığı, “Thiessen/Voronoi Tekniği” ile belirlenen bu alanlarda tayin edilir. Yani Doğal Komşuluk Enterpolasyon Tekniği “Thiessen Poligon Ağı”na dayalı olarak çalışan bir yöntemdir. Thiessen poligon ağı, örneklem noktalarından elde edilen delaunay üçgenlemesi üzerine kurulabilir (Arslanoğlu ve Özçelik, 2005).

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 2.14' de 5

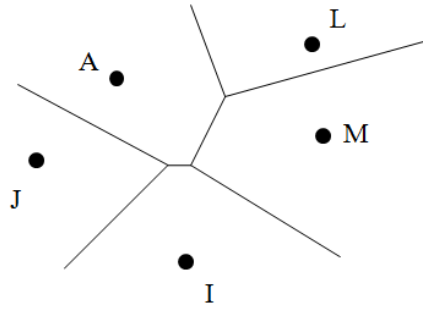


dayanak noktasının oluşturduğu Delaunay üçgenleri görülmektedir. Üçgenlerin kenar orta dikmeleri yardımıyla veri alanı 5 parçaya ayrılabilir. Noktaların etki alanlarını belirleyen bu yapı Voronoi diyagramıdır (Yanalak, 1997).



Şekil 2.15. Delunay üçgenleri

Şekil 2.15' 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), (A, L) 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 yararlanılır (Yanalak,1997).

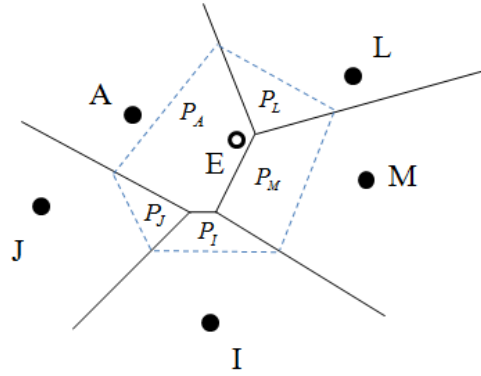


Şekil 2.16. Voronoi diyagramı

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 2.16' da bir enterpolasyon noktasına (E) ait doğal komşu koordinatları gösterilmiştir. Düz çizgiler daha önceden oluşturulmuş Voronoi diyagramını göstermektedir. Kesik çizgiler ise E noktasına ait Voronoi çokgenidir (Yanalak, 1997).



Şekil 2.17. 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  $z_E$  değeri, kendine komşu olan noktaların  $z_i$  değerlerinin ağırlıklı ortalamasıyla bulunur. Ağırlık olarak doğal komşu koordinatları kullanılır.

$$z_E = P_A z_A + P_L z_L + P_M z_M + P_I z_I + P_J z_J \quad (2.35)$$

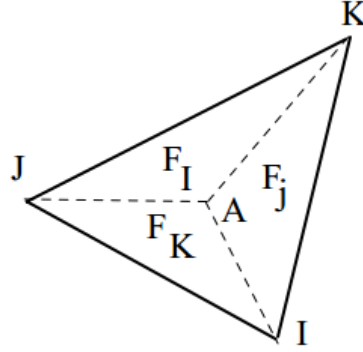
### 2.6.7. Lineer enterpolasyon ile üçgenleme

Üçgenler ağında yaygın olarak kullanılan enterpolasyon yöntemi, lineer enterpolasyondur. Her bir üçgen eğik düzlem olarak kabul edilir. Yüksekliği enterpole edilecek noktalar, içine düştüğü üçgenlerde lineer enterpolasyon uygulanarak tanımlanır. Bir eğik düzlemin,

$$z = a_{00} + a_{10}x + a_{01}y \quad (2.36)$$

şeklinde ifade edildiği düşünülürse, her bir üçgen için  $a_{00}, a_{10}$  ve  $a_{01}$  katsayıları üçgene ait 3 köşe noktası için yazılacak 3 denklemlerle belirlenir. Yüksekliği enterpole edilecek noktanın  $x_0, y_0$  koordinatları (2.36)'da 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 ağırlıklı ortalaması alınmaktadır. Herhangi bir köşe noktasına ait  $z$  değerinin ağırlığı ise enterpolasyon noktasının o köşeye göre lokal barisentrik koordinatıdır (Yanalak, 2002b).



Şekil 2.18. Üçgende lokal barisentrik koordinatlar

Şekil 2.18' 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,

$$P_I = F_I / F, \quad P_J = F_J / F, \quad P_K = F_K / F \quad (2.37)$$

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

$$\begin{aligned} P_I &= ((x_J - x_A)(y_K - y_A) - (x_K - x_A)(y_J - y_A)) / B \\ P_J &= ((x_K - x_A)(y_I - y_A) - (x_I - x_A)(y_K - y_A)) / B \\ P_K &= ((x_I - x_A)(y_J - y_A) - (x_J - x_A)(y_I - y_A)) / B \\ B &= (x_J - x_I)(y_K - y_I) - (x_K - x_I)(y_J - y_I) \end{aligned} \quad (2.38)$$

yazılabilir. Enterpolasyon noktasının  $z_0$  değeri,

$$z_0 = P_I z_I + P_J z_J + P_K z_K \quad (2.39)$$

şeklinde belirlenir (Yanalak, 1997).

Üçgenleme üzerine yapılan birçok çalışma (Lee ve Parata 1984, Lewis ve Robinson 1977, Garey ve ark. 1978, Watson ve Philip 1984, Auerbach ve Schaeben 1990, Mirante ve Wemgarten 1982, Fang ve Pieggl 1992, Tsai 1993 ve Macedonia ve Pareschi 1991) neticesinde elde edilen sonuçlara göre lineer enterpolasyon ile üçgenlemede hesap işlemlerinin bir yerde kesilmesi amacıyla üçgenlenecek veri alanının bir sınır ile tanımlanması gerekir. Aksi halde algoritmalar nereye kadar komşu nokta araştırmasına devam edeceğini, işlemi nerede keseceğini belirleyemeyip sonsuz döngü içerisine girebilirler. Üçgenlemenin doğruluğu bakımından veri alanının sınırlandırılması gereği de ortaya çıkabilir. Özellikle fazla girintili çıkıntılı arazilerin uçlarına doğru gereksiz ve yanıltıcı üçgenler oluşur. Enterpolasyonla yanlış bilgi elde etmemek için bu üçgenler dışarıda kalacak şekilde veri alanı sınırlandırılabilir. Veri alanını sınırlandırmak amacıyla şimdiye kadar kullanılmış olan geometrik şekiller, tüm dayanak noktalarını içine alan bir üçgen, en küçük ve en büyük x ve y koordinatlarının sınırlandırdığı bir dikdörtgen veya seçilmiş bir çokgen olmuştur (Yanalak, 1997).

### 2.6.8. Uzunluk (Radyal) temelli fonksiyonlar yöntemi

Uzunluk (Radyal) tabanlı fonksiyonların teorisi çok değişkenli fonksiyonların enterpolasyonuna dayanmaktadır. Burada amaç  $(x^s, y^s)_{s=1}^N$  ifadelerinin enterpolasyonunu yapmaktır. Bu durumda  $x_s \in R^d$  olmalıdır. Bu denklemde  $f$  lineer uzayda bir fonksiyon olduğundan yani doğrusal bir fonksiyon olduğundan Radyal Tabanlı Fonksiyonlar yaklaşımında  $f$  enterpolasyon fonksiyonu temel bazı fonksiyonların lineer bir kombinasyonudur (Topaloğlu, 2007).

Uzunluk (Radyal) tabanlı fonksiyonlar enterpolasyon fonksiyonu,

$$f(x, y) = p(x, y) + \sum_{i=1}^n w_i \cdot \phi(|(x, y) - (X_i, Y_i)|) \quad (2.40)$$

şeklinde kullanılır. Burada,

$p(x, y)$ : polinomu

$w_i$  : gerçek ağırlıklar

$|(x, y) - (X_i, Y_i)|$ : noktalar arasındaki öklid uzunluğunu

$\phi(r)$  : temel fonksiyonu

ifade eder.

Enterpolasyon işlemi  $p(x,y)$  polinomunu kullanarak polinomal regresyon ile başlar. Sonrasında bilinmeyen ağırlıkların belirlenmesi için (2.41) lineer denklem sistemi çözülür.

$$Z_j - p(x, y) = \sum_{i=1}^n w_i \cdot \phi(|(x, y) - (X_i, Y_i)|) \quad , j=1, \dots, n \quad (2.41)$$

Ağırlıklar belirlendiğinde ise yüzeyi tanımlayan  $z$  değerleri (2.40) formülü yardımı ile bütün noktalar için bulunur (Dressler, 2009).

Uzunluk temelli fonksiyonlar, veri grupları için çeşitli enterpolasyon fonksiyonları kullanarak (*Invers multiquadric*, *Multilog*, *Multiquadric*, *Natural cubic spline* ve *Thin plate spline*) en uygun yüzeyi belirlemeye çalışırlar. Veri grubunu iyi temsil etmesi ve yumuşak yüzeyler oluşturması bakımından *Multiquadric* yöntem genellikle iyi sonuç vermektedir (Golden Software).

Enterpolasyon için kullanılan fonksiyonlardan bazıları, eşitlikleri ile birlikte Çizelge 2.2'de belirtilmiştir.

**Çizelge 2.2.** Uzunluk temelli fonksiyonlar yönteminde kullanılan fonksiyonlar

| Enterpolasyon Fonksiyonu | Denklem                                 |
|--------------------------|---|
| Inverse multiquadric     | $\phi(r) = \frac{1}{\sqrt{r^2 + c^2}}$  |
| Multilog                 | $\phi(r) = \log(r^2 + c^2)$             |
| Multiquadric             | $\phi(r) = \sqrt{r^2 + c^2}$            |
| Natural cubic spline     | $\phi(r) = \log(r^2 + c^2)^{3/2}$       |
| Thin plate spline        | $\phi(r) = (r^2 + c^2) \log(r^2 + c^2)$ |

$r$  : Dayanak noktası ile grid noktası arasındaki bağıl uzaklık

$c^2$  : yumuşatma parametresidir ( $R^2$ ).

Carlson ve Foley (1991)' e göre *Multiquadric ve İnvers (reciprocal) multiquadric* yöntemin doğruluğu, kullanıcı tarafından veri yapısına ve yüzeyin konumuna bağlı olarak belirlenen yumuşatma parametresine ( $R^2$ ) bağlıdır. Öte yandan yumuşatma parametresinin çok küçük değerler seçilmesi katsayılar matrisinde kondisyon bozukluklarına neden olmaktadır. Carlson ve Foley, yaptıkları çalışmada  $R^2$  değerinin 0,5 değerinden daha büyük değerleri için kondisyon bozukluklarının azaldığını göstermiştir. Aynı zamanda  $R^2$  değeri, yaklaşık 0,5 değerinde temel fonksiyon üzerinde etkili olmaya başlamaktadır (Carlson ve Foley, 1991).

$R^2$  parametrenin hesaplanması için çeşitli yaklaşımlar geliştirilmiştir. Franke (1982), Multiquadric ve Thin Plate Spline yöntemleri için  $R = 1.25 \times D / \sqrt{N}$  formülünü önermiştir. Burada D, bütün dayanak noktalarını kapsayan en küçük dairenin çapı ve N ise dayanak noktası sayısını temsil eder. Hardy (1990),  $R = 0.815 \times d$  formülünü önermiştir ( $d = 1/N \sum_{i=1}^N d_i$ ). Burada  $d_i$ , veriler arasındaki ortalama mesafeyi ifade eder. Rippa (1999), Multiquadric, İnverse Multiquadric ve Gaussian yöntemleri için yumuşatma parametresinin seçiminde kullanılan bir algoritma önermiştir. Carlson ve Foley (1991), yumuşatma parametresi için verilerin z (yükseklik) değerine bağlı bir algoritma üretmiştir. Golbert ve ark. (1996 ve 1999), Multiquadric fonksiyonlarda yumuşatma parametresinin optimizasyonu için çapraz doğrulama tekniğini kullanmıştır. Kansa (1990), Multiquadric fonksiyondaki farklı yumuşatma değerlerini, temel fonksiyonlar ile kullanmaya izin veren bir algoritma önermiştir (Wang ve Liu, 2002). Bununla beraber optimum yumuşatma parametresi için genel olarak kabul görmüş bir yöntem bulunmamaktadır (Louire, 2001).

### 2.6.9. Lokal polinomlar yöntemi

Bu yöntemde enterpolasyon değerleri ağırlıklı en küçük kareler yöntemi ile hesaplanır. Her bir enterpolasyon noktasının yükseklik hesabında kullanılacak dayanak noktaları, belirlenen bir arama elipsi ile tanımlanır. Sadece bu tanımlanan arama elipsi içerisindeki verileri kullanarak, her bir yüzey verisini oluşturmak için dayanak noktaları ağırlıklandırılır ve iki değişkenli bir lokal polinom oluşturulur. Polinomun bilinmeyen katsayıları en küçük kareler ilkesine göre çözümlenir. Yükseklik değerleri bu lokal polinom yardımı ile hesaplanır. Aslında bu yöntem, en küçük kareler yöntemiyle lokal yüzey için bir eğri uydurmazdır. (Golden software).

Polinomun derecesi için üst sınır, ölçü sayısı ve buna karşın bilinmeyen sayısı ile belirlense de uygun polinom derecesi genellikle deneysel yollarla aranır. Birinci dereceden başlayarak dengeleme sonuçlarının sonsal istatistiksel büyüklükleri (model ve bilinmeyen parametrelerin hata değerleri) bu analiz için uygundur. Teorik olarak polinomun derecesi arttıkça model ile verilerin birbirine daha fazla yaklaşması başka bir deyişle modele ilişkin sonsal varyans değerinin küçülmesi beklenir (Üstün, 2001). Ancak kondisyon bozukluklarına bağlı olarak kestirilen parametrelerdeki duyarlık kayıpları model derecesi arttıkça model hatasının da büyümesine neden olabilmektedir. Bu nedenle model hatasının büyümeye başladığı polinom derecesinin bir eksiği uygun polinom derecesi olarak görülebilir. Bu durumlar göz önüne alınarak yüksek dereceli polinom seçimi sonucu oluşabilecek duyarlık kayıplarına karşı doğru seçim yapmaya özen gösterilmelidir (Ceylan ve Ark, 2011). Polinomlarla enterpolasyonda polinomun derecesinin artması elde edilecek doğruluğun artacağı anlamına gelmez. Derecenin artmasıyla yüzeyde gereksiz salınımlar oluşur. Yüzeyde oluşan ani iniş çıkışlar gerçeğe uygun olmayan yükseklik değişimlerine neden olur (İnal ve ark, 2002).

Yerel polinomlar 1., 2. ve 3. dereceden polinomlar olarak ifade edilirler. Eğer fonksiyon 1. dereceden ifade edilirse,

$$F(X,Y) = a + bX + cY \quad (2.42)$$

ikinci dereceden ifade edilirse,

$$F(X,Y) = a + bX + cY + dXY + eX^2 + fY^2 \quad (2.43)$$

Üçüncü dereceden ifade edilirse,

$$F(X,Y) = a + bX + cY + dXY + eX^2 + fY^2 + gX^2Y + hXY^2 + iX^3 + jY^3 \quad (2.44)$$

şeklinde yazılır.

Ağırlıklı en küçük kareler fonksiyonu, enterpolasyon noktasına yakın olan dayanak noktalarına daha fazla ve uzak olan noktalara daha az olacak biçimde ağırlıkları belirler. Ağırlık fonksiyonu arama elipsi, ağırlık katsayısı ve veri geometrisine bağlıdır. Gerçek ağırlıklar için öncelikle  $T_{XX}, T_{XY}, T_{YX}$  ve  $T_{YY}$  parametreleri

$$T_{XX} = \frac{\cos(\phi)}{R_1}, T_{XY} = \frac{\sin(\phi)}{R_1}, T_{YX} = \frac{-\sin(\phi)}{R_2}, T_{YY} = \frac{\cos(\phi)}{R_2} \quad (2.45)$$

formülüyle hesaplanır. Burada,

$\phi$  : asıl eksen ile elipsin küçük eksenindeki saat istikameti tersinde olan açı

$R_1$  : arama elipsinin 1. eksenini

$R_2$  : arama elipsinin 2. eksenini

olarak tanımlanır.  $T_{XX}, T_{XY}, T_{YX}$  ve  $T_{YY}$  parametreleri arama elipsi parametrelerinin fonksiyonu olan  $A_{XX}, A_{XY}$  ve  $A_{YY}$  'nin hesabında kullanılır. Bunlar,

$$\begin{aligned} A_{XX} &= T_{XX}^2 + T_{YX}^2 \\ A_{XY} &= 2(T_{XX}T_{XY} + T_{YX}T_{YY}) \\ A_{YY} &= T_{XY}^2 + T_{YY}^2 \end{aligned} \quad (2.46)$$

formülleri yardımı ile hesaplanır. Bu değerler ( $A_{XX}, A_{XY}$  ve  $A_{YY}$ ) bütün dayanak noktaları için aynıdır. Bundan sonra dayanak noktası ( $X_i, Y_i$ ) ile grid ( $X_0, Y_0$ ) noktası koordinat farkları  $dX$  ve  $dY$ ,

$$\begin{aligned} dX &= X_i - X_0 \\ dY &= Y_i - Y_0 \end{aligned} \quad (2.47)$$

hesaplanır. Bu değerler yardımı ile ağırlık hesabında kullanılacak olan  $R_i$ ,

$$R_i = \sqrt{A_{XX}dX^2 + A_{XY}dXdY + A_{YY}dY^2} \quad (2.48)$$

formülü ile hesaplanır. Sonuç olarak  $i$  dayanak noktasındaki  $w_i$  ağırlığı,

$$w_i = (1 - R_i)^p \quad i = 1, \dots, N \quad (2.49)$$

formülüyle hesaplanır. Burada  $p$  değeri, 0-20 arasında bir değer alabilen ağırlık kuvvetidir. Lokal en küçük kareler parametreleri, minimize edilmiş çakışma artıklarının kareleri toplamıyla,

$$\text{Minimize} \sum_{i=1}^N w_i [F(x_i, y_i) - z_i]^2 \quad (2.50)$$

formülü kullanılarak hesaplanır (Golden Software).



### 2.6.10. Modified Shepard's yöntemi

Modified Shepard's yöntemi enterpolasyonda, mesafenin tersine göre ağırlıklandırılmış en küçük kareler yöntemini kullanılır. Yöntem, grid düğüm noktaları için dayanak noktalarını kullanarak lokal olarak en küçük kareler yöntemine uygun bir kuadratik yüzey oluşturur. Oluşturulan kuadratik yüzeyde grid düğüm noktalarına en yakın dayanak noktaları ağırlıklandırılarak grid düğüm noktalarının yükseklikleri elde edilir.

Bu yöntem Franke ve Nielson (1980) tarafından geliştirilmiştir. Yönteme göre grid noktalarının yükseklikleri,

$$f(x, y) = \sum_{i=1}^n w_i f_i \quad (2.51)$$

eşitliği ile hesaplanır. Burada,

$f(x, y)$ : enterpolasyon fonksiyonu

$f_i$ : düğüm noktaları  $(x_i, y_i)$  boyunca uzanan nodal fonksiyon

$w_i$ : dayanak noktalarına bağlı ağırlıklar

olarak tanımlanır. Enterpolasyonda her bir düğüm noktası için bir nodal fonksiyon oluşturulur. Hesaplama belirli bir bölgede yapıldığında (lokalleştiğinde)  $f_i$  ve  $w_i$  değerleri, düğüm noktasının  $(x_i, y_i)$  merkezine yerleştirilen ve eksenleri  $R_q$  ve  $R_w$  olan kritik dairenin içinde kalan dayanak noktaları kullanılarak yapılır (Origin Software). Nodal fonksiyonlar lineer, kuadratik ya da kübik formda olabilmektedir.

Bu yöntemdeki ilk adım etki yarıçapları olan  $R_q$ ,  $R_w$  değerlerinin belirlenmesidir.  $R_q$ , nodal fonksiyonu oluşturan dayanak noktalarını kapsayan yarıçapını ifade ederken  $R_w$ , enterpolasyon fonksiyonu içindeki nodal fonksiyonları oluşturan noktaları kapsayan yarıçapı ifade eder. Bu değerler,

$$R_q = \frac{D}{2} \sqrt{\frac{N_q}{N}}, \quad R_w = \frac{D}{2} \sqrt{\frac{N_w}{N}} \quad (2.52)$$

formülleri ile hesaplanır. Burada,

$N$  : Dayanak noktası sayısı

$D$  : Nokta çiftleri arasındaki maksimum uzaklık

$N_q$  :  $R_q$  etki yarıçapı içinde kalan ve nodal fonksiyonu oluşturan ortalama dayanak noktası sayısı (kuadratik komşu nokta sayısı)

$N_w$  :  $R_w$  etki yarıçapı içinde kalan ve düğüm (grid) noktasına en yakın olan ortalama dayanak noktası sayısı (ağırlıklandırılacak komşu nokta sayısı)

olarak tanımlanır. Verilerin tamamı kullanılarak belirlenen bir enterpolasyon fonksiyonuna nazaran, lokal olarak tanımlanmış bir enterpolasyon fonksiyonu  $N_q$  ve  $N_w$  değerleri için daha küçük sayıda noktaya ihtiyaç duyar. Franke ve Nielson (1980)'a göre normal dağılıma uyan veri grubu için bu değerler  $N_q = 18$  ve  $N_w = 9$  olarak kullanılabilir. Buna göre seyrek veri dağılımı olan bölgelerde ya da nokta sayısının küçük olduğu uygulamalarda ( $N < 25$ ),  $N_q / N_w \cong 2$  oranı kullanılabilir (Basso ve ark, 1999).

$R_q$ ,  $R_w$  yarıçapları belirlendikten sonra nodal fonksiyonlar en küçük kareler yöntemine göre hesaplanır. Bu fonksiyonlar sadece  $R_q$  yarıçapı içerisinde kalan dayanak noktaları kullanılarak hesaplanır. Bu basit modifikasyon yönteme lokal bir özellik kazandırır. Uzunluk fonksiyonu  $\rho_i$ ,

$$\frac{1}{\rho_i(x, y)} = \frac{(R_q - d_i)_+}{R_q d_i} \quad \begin{cases} d_i < R_q \Rightarrow R_q - d_i \\ d_i \geq R_q \Rightarrow 0 \end{cases} \quad (2.53)$$

Burada,

$$d_i(x, y) = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} \quad (2.54)$$

formülü ile hesaplanır.

Bir sonraki adımda her bir düğüm noktası  $[(x_k, y_k) \ (k=1, \dots, N)]$  için en küçük kareler problemini çözülür.

$$\min_{\substack{a_{kj}, j=2, \dots, 6 \\ k \neq i}} \frac{1}{\sum_{i=1}^N \rho_i(x, y)} = \left[ \frac{f_k + a_{k2}(x_i - x_k) + a_{k3}(y_i - y_k) + a_{k4}(x_i - x_k)^2 + a_{k5}(x_i - x_k)(y_i - y_k) + a_{k6}(y_i - y_k)^2 - f_i}{\sum_{i=1}^N \rho_i(x, y)} \right] \quad (2.55)$$

Minimize problemi çözüldükten sonra nodal fonksiyonlar  $Q_k(x, y)$ ,

$$Q_k(x, y) = a_{k2}(x - x_k) + a_{k3}(y - y_k) + a_{k4}(x - x_k)^2 + a_{k5}(x - x_k)(y - y_k) + a_{k6}(y - y_k)^2 + f_k, k = 1, \dots, N \quad (2.56)$$

formülü ile hesaplanır. Bunlar Modified Shepard formülünde kullanıldığında,

$$D[f](x, y) = \frac{\sum_{k=1}^N \frac{Q_k(x, y)}{g_k(x, y)}}{\sum_{k=1}^N \frac{1}{g_k^2(x, y)}} \quad (2.57)$$

formülü elde edilir.

Her bir grid noktası,  $R_w$  yarıçaplı daire içinde kalan ve dayanak noktalarından hesaplanan nodal fonksiyona dayalı olarak yukarıdaki (2.57) formül kullanılarak hesaplanır. Bu ise,

$$\frac{1}{g_k(x, y)} = \frac{(R_w - d_k)_+}{R_w d_k} \quad \begin{cases} d_k < R_w \Rightarrow R_w - d_k \\ d_k \geq R_w \Rightarrow 0 \end{cases} \quad (2.58)$$

formülü ile tanımlanır. Burada  $d_k(x, y)$  değeri,

$$d_k(x, y) = \sqrt{(x - x_k)^2 + (y - y_k)^2} \quad (2.59)$$

formülü ile hesaplanır (Basso ve ark, 1999).

Franke ve Nielson (1980) yaptıkları çalışmada ideal  $N_q$  ve  $N_w$  (18 ve 9) değerlerini elde etmek için etki yarıçaplarını ( $R_w$  ve  $R_q$ ) eşit kullanmışlardır. Bunun aksine Renka (1988) yaptığı çalışmada  $R_w$  ve  $R_q$  değerlerini farklı kullanılabilmesine olanak tanıyan bir algoritma ile  $N_q$  ve  $N_w$  değerleri için sırasıyla 13 ve 19 sayılarını elde etmiş ve dağınık yapıdaki dayanak noktaları için iyi sonuçlar almıştır (Renka, 1988). Buna göre enterpolasyon değeri, kritik daire içinde kalan ve enterpolasyon noktasına en yakın olan komşu noktalar kullanılarak hesaplanır. Yöntemler arasındaki temel farklılık enterpolasyonda kullanılacak nokta sayılarının kabulüne dayanır. Surfer yazılımı enterpolasyona Renka (1988) tarafından önerilen bu nokta sayıları ile başlar. Ancak kullanıcı tarafından bu değerlerin özelleştirilmesine olanak tanınmıştır.

## 2.7. Sayısal Arazi Modellerinin Sunumu

SAM, yeryüzünün şeklinin belirlenmesi amacı ile yapılan çalışmalarda doğrudan, sivil ve askeri amaçlı mühendislik çalışmalarında ise ilgili yüzeyi temsil etmek amacı ile dolaylı bir yan ürün olarak kullanılmaktadır. Bunun yanında yerbilimleri, tıp, mimarlık ve sanayi sektörü gibi çeşitli alanlarda da tercih edilmektedir.

Araziye yönelik planlanan çeşitli projelerin temel altlığı niteliği taşımasının yanı sıra obje yüzeylerini temsil etme konusunda; cisimlerin sayısal ortamda üç boyutlu ifade edilmesi amacıyla kullanılmaktadır. Öte yandan yeryüzü şekillerinin ifade edilmesi ile yerleşim yerlerinin görselleştirilmesi, canlıların yaşam alanlarının belirlenmesi, olası doğal afetlere karşı tedbir alınması, şehirleşme çalışmaları ve gecekondulaşmanın önlenmesi gibi konuların çözümünde de etkin olarak kullanılmaktadır.

SAM' ın yaygın olarak kullanıldığı uygulama alanları aşağıdaki gibi sıralanabilir:

**a) Ölçme ve Harita Yapımı:** Jeoloji, jeofizik ve sivil mühendislik uygulamalarının temelini oluşturan arazi modeli, arazi ölçümleri veya fotogrametrik yöntemler ile üretilmiş olabilir. Mühendislik projelerinde standart olarak kullanılan kare grid ve üçgen şeklindeki arazi modellerine ilave olarak arazi modelleri:

- Elektronik konum belirleyicilerden elde edilen konum bilgisi ve akustik iskandil ile deniz dibi modellemede
- Uzaktan algılama görüntülerinin düzeltilmesinde (Landsat ya da Sesat uydu serileri oluşturmada)
- Gerçek 3 boyutlu yüzeyler ile uydu görüntülerini eşleştirilmesinde kullanılabilir (Petrie, G. ve Kennie, T. J. M., 1986).

### **b) Sivil Mühendislik Uygulamaları**

- Ulaşım sistemlerinde (karayolu, demiryolu) geçki koridorunu belirlenmesinde
- Arazi düzenleme çalışmalarında
- Baraj, gölet, havaalanı, köprülü kavşak ve tünel gibi mühendislik yapılarının tasarımında
- Mühendislik projelerine yönelik yarma ve dolgu hacimlerinin hesaplanmasında
- Doğal afet ve su taşkınlarının hasar analizi çalışmalarında
- Kanal ve nehir sulama sistemlerinin tasarımında

- Çevre düzenleme çalışmalarının planlanmasında
- İletişim sistemlerinin planlanmasında

sayısal arazi modeli kullanılmaktadır.

### c) Askeri Amaçlı Uygulamalar

- Yer bazlı radar istasyonlarının tesisinin planlanmasında
- Nükleer, kimyasal ve biyolojik tehditlere karşı sığınak bölgelerinin belirlenmesinde
- Ağır silah sistemleri için hedef alma ve isabet analizinde
- Hava kuvvetleri için uçuş koridoru simülasyonlarının hazırlanmasında
- Yer bazlı füze sistemleri için navigasyon simülasyonu hazırlamada
- Uzay araştırmalarında Ay ve gezegen yüzeylerinin modellenmesinde
- Savaş anı ve tatbikat durumlarında uygulanacak taarruz savunma gibi askeri taktiklerin geliştirilmesinde sayısal arazi modeli kullanılmaktadır.

Veri işlenmesi ile elde edilen SAM' dan aşağıdaki sayısal ya da grafik çıktılar alınabilir (Alkanalka, 2005).

- Otomatik olarak eş yükseklik eğrilerinin çizimi,
- Boyuna ve enine profiller,
- Ortofoto üretimine hizmet edecek sayısal profiller,
- Tek tek nokta yükseklikleri,
- Eğim haritaları,
- Genelleştirilmiş eş yükseklik eğrileri,
- Hacim hesap sonuçları,
- Perspektif görünümler.

Kullanım amacı farklılık göstermesine karşın SAM sağladığı bütüncül yaklaşım ile kullanıldığı tüm alanlarda planlama ve olası sonuçların belirlenmesi aşamalarının altlığı haline gelmiştir. Yüzeyi ve topoğrafya ile ilgili bütün analizlerin görüntülenmesi ve modellenmesine SAM olanak sağlar. İki boyutlu analizle mümkün olmayan değerlendirmelerin yapılması ve arazi yapılarının ortaya çıkarılması, yükseklik bilgisi sayesinde yeni bilgilerin oluşturulmasıyla sağlanabilir (Gürsoy, 2006).

### 3. HACİM HESAPLARI

Hacim, sayısal arazi modellerinden elde edilmesi beklenen sonuç ürünlerden biridir. Hacim problemleri eldeki 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).

SAM üretmek için farklı yöntemler ile toplanan dayanak noktalarının arazi üzerinde dağınık yapıda, düzenli grid köşelerinde, kesitler boyunca ve eşyükseklik eğrileri boyunca dağılmış durumdadır. SAM kullanılarak yapılacak olan hacim hesapları ise modeli oluşturan dayanak noktalarının dağılımına göre sınıflandırılabilir.

#### 3.1. Eşyükseklik Eğrilerinden Hacim Hesabı

Eşyüksekti 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 alan yöntemi
- Prizmatik yöntem

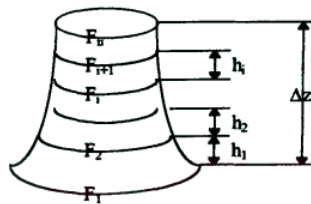
##### 3.1.1. Ortalama alan yöntemi

Bu yöntemde  $F_1$  ve  $F_n$  uç noktaları arasında kalan hacim ( $v$ ) kesit alanlarının ortalaması ile iki uç alan arasındaki yükseklik farkının çarpılması ile bulunur.

Eşyükseklik eğrilerinin belirlediği alanlar  $F_1, F_2, \dots, F_{n-1}$  ve uç alanlar arasındaki yükseklik farkı  $\Delta z$  ise hacim

$$v = \frac{F_1 + F_2 + \dots + F_{n-1} + F_n}{n} \cdot \Delta z \quad (3.1)$$

olur (Özgen ve Öztan, 1988).



Şekil 3.1. Eşyükseklik eğrilerinden hacim hesabı

### 3.1.2. Uç alanlar yöntemi

Eş yükseklik eğrileri arasındaki yükseklik farklarının genellikle eşit olduğu düşünüldüğünde ( $h_1=h_2=\dots=h_{i-1}=h$ ) iki eşyükseklik eğrisi arasında kalan hacim

$$v_i = \frac{F_i + F_{i+1}}{2} \cdot h_i \quad i = 1, 2, \dots, n-1 \quad (3.2)$$

formülü ile ifade edilebilir

$F_1$  ve  $F_n$  uç alanları arasında kalan toplam hacim ( $v$ ) ise (3.2) formülü yardımıyla

$$v = \frac{1}{2} h (F_1 + 2F_2 + 2F_3 + \dots + 2F_{n-1} + F_n) \quad (3.3)$$

formülü ile elde edilir (Özgen ve Öztan, 1988).

### 3.1.3. Prizmatik yöntem

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

$$v_i = \frac{h_i}{6} (F_i + 4F_{im} + F_{i+1}) \quad (3.4)$$

olur. Burada  $h_i$ ,  $F_i$  ve  $F_{i+1}$  alanları arasındaki yükseklik farkıdır. Şekil 4.1'deki çift sayı indisli alanlar orta alan kabul edilirse (3.4) eşitliğinden yararlanarak toplam hacim

$$v = \frac{h_1 + h_2}{6} (F_1 + 4F_2 + F_3) + \frac{h_3 + h_4}{6} (F_3 + 4F_4 + F_5) + \dots + \frac{h_{n-2} + h_{n-1}}{6} (F_{n-2} + 4F_{n-1} + F_n) \quad (3.5)$$

Eğriler arasındaki yükseklik farkının eşit ( $h_1=h_2=\dots=h_{i-1}=h$ ) kabul edildiği varsayımına göre (3.5) eşitliğinden ise

$$v = \frac{h}{3} (F_1 + 4F_2 + 2F_3 + 4F_4 + 2F_5 + 4F_6 + \dots + F_{n-2} + 4F_{n-1} + F_n) \quad (3.6)$$

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

### 3.2. Paralel Kesitler ile Hacim Hesabı

Arazi yüzeyi eşit aralıklı düşey düzlemlerle kesilerek, paralel kesitler (örn. enkesit) elde edilir. Eşyükseklik eğrilerinin, arazinin yatay düzlemlerle kesilmesi sonucu elde edildiği düşünülürse, hacim hesapları ortalama alan yönteminde kullanılan formüllere benzer şekilde

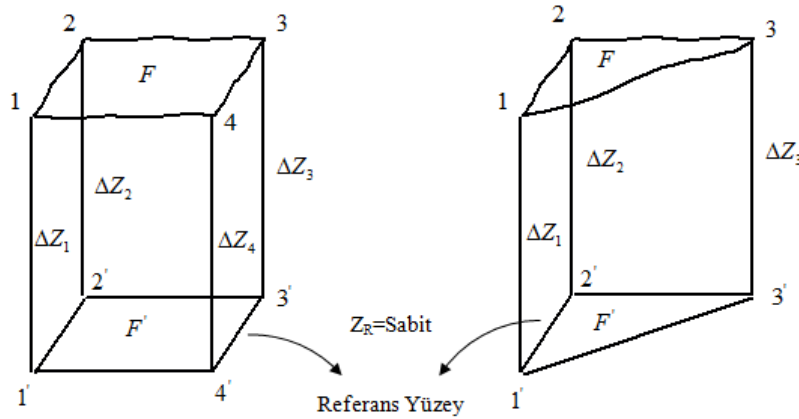
$$v = \frac{F_1 + F_2 + \dots + F_{n-1} + F_n}{n} l(n-1) \quad (3.7)$$

$$v = \frac{l}{2} (F_1 + 2F_2 + 2F_3 + \dots + 2F_{n-1} + F_n) \quad (3.8)$$

$$v = \frac{l}{3} (F_1 + 4F_2 + 2F_3 + 4F_4 + 2F_5 + 4F_6 + 2F_7 + \dots + F_{n-2} + 4F_{n-1} + F_n) \quad (3.9)$$

hesaplanır. Burada  $l$  paralel kesitler arasındaki yatay uzaklıktır. (Yanalak, 1997).

### 3.3. Düzenli Dağılmış Veriler ile Hacim Hesabı



Şekil 3.2. Dikdörtgen ve üçgen prizma

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 3.2' de görülen üçgen prizmanın hacmi açıkça yazılırsa;  $Z_1, Z_2, Z_3$  noktaların kotları,  $Z_R$  referans düzlemin kotu ve  $F'$  izdüşüm üçgeninin alanı olmak üzere,



$$\Delta Z_i = Z_i - Z_R \quad i = 1, 2, \dots, n-1 \quad (3.10)$$

$$v = F' (\Delta Z_1 + \Delta Z_2 + \Delta Z_3) / 3 \quad (3.11)$$

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

$$\begin{aligned} \Delta X_2 &= x_2 - x_1 \\ \Delta Y_2 &= y_2 - y_1 \\ \Delta X_3 &= x_3 - x_2 \\ \Delta Y_3 &= y_3 - y_2 \end{aligned} \quad F' = \frac{1}{2} (\Delta X_2 \cdot \Delta Y_3 - \Delta Y_2 \cdot \Delta X_3) \quad (3.12)$$

yazılabilir. Dikdörtgen bir prizmanın hacmi üçgen prizmaya benzer şekilde

$$v = F' (\Delta Z_1 + \Delta Z_2 + \Delta Z_3 + \Delta Z_4) / 4 \quad (3.13)$$

formülü ile hesaplanır (Yanalak, 1997).

### 3.4. Rastgele Dağılmış Veriler ile 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 3.3'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 3.2' de anlatılan şekle dönüşür. Kesitler yardımıyla hacim hesaplanır (Yanalak, 1997).

## 4. UYGULAMA

### 4.1. Çalışmanın Amacı

Ulaşım ağı planlamadaki geleneksel yaklaşım, mühendislerin eşyükseklik eğrili haritalar üzerinde bir ya da daha fazla ulaşım alternatifini belirleme kabiliyetlerine dayanmaktadır. Mühendisler her bir alternatif güzergah için toplam maliyeti, bakım-onarım ve işletim maliyetlerini hesaplar. Bu ise hem zahmetli ve hem de zaman alıcı bir süreçtir ( Liu, 1993).

Geçmişte el ile gerçekleştirilen karayolu projeleri ve özellikle de bu projelerin geometrik unsurları ile ilgili projelendirmeler günümüzde bilgisayar destekli grafik tasarım yazılımlarıyla gerçekleştirilebilmekte ve bu sayede projelerin daha hızlı ve daha kısa zamanda ve çok alternatifli olarak hazırlanabilmesi mümkün olabilmektedir (Koparan, 2006). Bu işlem, karayolu planlanacak arazinin bilgisayar ortamında sayısal bir modeli oluşturularak yapılır. Oluşturulan sayısal arazi modeli (SAM) kullanılarak, projelerin grafik unsurlarının tasarımının yanı sıra çeşitli analizler ve görselleştirme işlemleri de yapılabilmektedir.

Karayolu projelerinin tasarımı, arazi yüzeyinde mümkün olan en az değişikliği öngörerek projeyi araziye uygulamaya dayanır. Bu sayede proje maliyetleri azalır ve arazinin doğal yapısı üzerinde asgari düzeyde değişiklik olur. Ancak çoğu zaman bu mümkün olmaz. İhtiyaçlara cevap verecek nitelikte tasarlanan projelerinin araziye uygulanabilmesi için projeyi kapsayan mevcut arazi yapısında birtakım değişiklikler yapılması gerekir. Genellikle toprak işleri olarak isimlendirilen bu değişiklikler tünel, köprü, viyadük ve yol yapımı gibi karayolu ulaşımına yönelik inşaat çalışmalarında sıklıkla karşılaşılan bir durumdur. Toprak işleri, karayolu ulaşım ağlarının planlanmasında önemli etkenlerden biri olan yapım maliyetlerini doğrudan etkiler. Dolayısıyla proje kapsamında yapılacak toprak işi miktarının projelendirme aşamasında belirlenmesi gerekir. Yapılacak/yaptırılacak toprak işlerinin miktarının belirlenmesi için kazılacak ve doldurulacak hacimlerin hesaplanması gerekir.

Toprak işi hacim hesapları, sayısal arazi modelleri ile kolaylıkla yapılabilmekte, hesaplamalar olası güzergah seçenekleri için ayrı ayrı yapılarak sonuçlar klasik yöntemlere göre daha etkin bir biçimde analiz edilebilmektedir. Bu ise doğru güzergah seçimine katkıda bulunmakta ve proje maliyetinin planlanan düzeyi aşmasını engellemektedir.

Sayısal arazi modeli ile yapılan hacim hesaplarında, kazılan ve doldurulan bölgeler birer yüzey olarak temsil edilir. Bu yüzeyler çeşitli yöntemler ile toplanan dayanak noktalarından oluşur. Dolayısıyla yüzey noktalarının sıklığı yapılan hacim hesabını sonucunu etkiler. Nokta sıklığının fazla olması, yüzeylerin arazinin gerçek durumu daha iyi temsil etmesi anlamına gelir. Bu ise hacim hesabının gerçeğe yakın sonuç vermesini sağlar. Bu amaçla yapılan nokta sıklaştırmaları, farklı hesaplama algoritmalarına sahip enterpolasyon fonksiyonları ile yapılabilir. Farklı hesaplama algoritmaları ile sıklaştırılan yüzeylerin araziye temsil yeteneği de farklı olacaktır. Sıklaştırma sonucunda oluşan yüzey noktalarının araziye ne ölçüde temsil ettiği ise arazide ölçülen dayanak noktaları yardımıyla test edilebilir. Araziyi iyi temsil eden yüzey noktaları ile elde edilen hacim sonuçları gerçeğe yakın sonuçlar olacaktır.

Bu çalışmada yukarıda değinilen konulardan yola çıkılarak sayısal arazi modeli ile karayolu geçkisi için yapılacak hacim hesaplarının bir entegrasyonu yapılmıştır. Belirlenen bir karayolu geçki koridoru için sayısal arazi modeli oluşturulmuş ve oluşturulan geçkinin hacim hesabı, farklı enterpolasyon yöntemleri ile üretilen yüzeylerle yapılarak sonuçların karşılaştırılması yapılmıştır. Bu sayede SAM'ın karayolu projelerindeki hacim hesaplarını ne ölçüde etkilediğinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Yapılan çalışmanın detayları aşağıda açıklanmıştır.

Belirlenen karayolu geçki koridorunun mevcut durumuna ait araziden toplanan veriler, Surfer yazılımında girdi veri olarak kullanılmış, farklı enterpolasyon yöntemleri kullanılarak 5, 15 ve 30 m aralıklarla grildenmiş ve dağınık yapıdaki dayanak noktaları düzenli dağılımdaki veri grubuna dönüştürülmüştür. Farklı enterpolasyon yöntemleri ile üretilen her bir veri grubu için Netcad yazılımı kullanılarak sayısal arazi modelleri oluşturulmuş, bu modeller kullanılarak karayolu koridorunun mevcut durumunu temsil eden yüzeyler (alt yüzeyler) elde edilmiştir. Ayrıca, alt yüzeyleri oluşturulan yüzey noktalarının dayanak noktaları ile uyumu, çakışma artıkları kullanılarak istatistiksel olarak değerlendirilmiştir.

Öte yandan yine Netcad yazılımı kullanılarak belirlenen geçki koridoru için 12 m platform genişliğine sahip ve karayolu tasarım kriterlerine uygun nitelikte iki şeritli bir karayolu projesi tasarlanmıştır. Tasarlanan proje için arazi yüzeyine uygun bir kırmızı çizgiye göre boykesit çizimi yapılarak proje kotları (kırmızı kotlar) hesaplanmıştır. Hesaplanan proje kotlarının oluşturduğu platformu ifade eden bir yüzey dosyası (üst yüzey) yine sayısal arazi modeli yardımı ile elde edilmiştir.

Son olarak sayısal arazi modeli kullanılarak farklı enterpolasyon yöntemleri ile elde edilen alt yüzeylerin her biri ile platformu ifade eden üst yüzey için ayrı ayrı olmak üzere paralel kesitler yöntemine göre hacim hesapları yapılmıştır. Burada, enterpolasyon sonucuna göre en küçük karesel ortalama hata (KOH) değerini veren yüzey noktaları ile yapılan hacim hesabı referans (doğru) kabul edilmiştir. Diğer enterpolasyon yöntemleri ile elde edilen hacim değerleri ile referans hacim değeri karşılaştırılarak sayısal arazi modelin karayolu projelerindeki hacim hesaplarına etkisi araştırılmıştır.

#### 4.2. Verilerin Toplanması

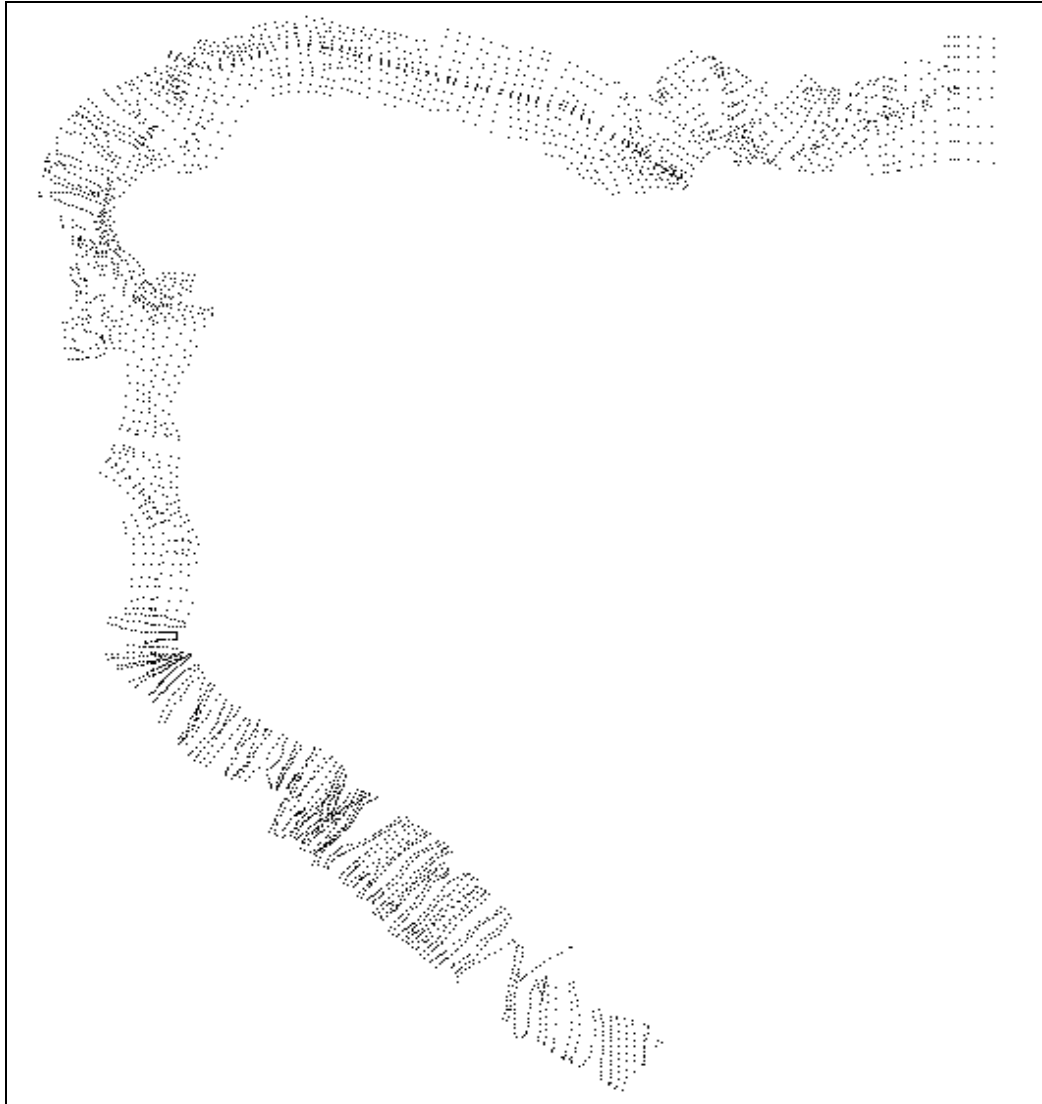
Bu çalışmada Selçuk Üniversitesi Alaeddin Keykubad Yerleşkesi civarındaki bir bölgede yaklaşık 5,3 km uzunluğunda ve ortalama 200 m genişliğindeki bir arazi koridoru uygulama bölgesi olarak seçilmiştir. Söz konusu karayolu koridoru, Yeni İstanbul Caddesine (D330 karayoluna) Selçuk Üniversite Yerleşkesi girişi ile Mevlana Üniversitesi arasından bağlanmakta ve yerleşkenin arkasından dolaşarak tekrar Yeni İstanbul Caddesine bağlanacak şekilde tamamlanmaktadır. Uygulama bölgesinde kısmen mevcutta kullanılan bir yol bulunmaktadır ve oluşturulan karayolu projesi mümkün olduğunca bu yolu kapsayacak şekilde planlanmıştır.



Şekil. 4.1. Çalışma alanının perspektif görünümü

Dalgalı bir arazi yapısına sahip çalışma bölgesi için altlık olarak kullanılmak üzere 4338 adet dayanak noktası kullanılmıştır. Dağınık yapıdaki dayanak noktalarının konum bileşenleri (x,y,z) gerçek zamanlı kinematik ölçü yöntemi (RTK) ile toplanmıştır.

Karayolu koridorunun geçtiği kesimlerde yer yer sert iniş ve çıkışlar bulunmakla birlikte arazinin yaklaşık boyuna eğimi % 5,5 civarındadır. Karayolu koridorunu kapsayan alan yaklaşık 115 ha ve nokta yoğunluğu yaklaşık 38 nokta/ ha'dır.



Şekil. 4.2. Çalışma alanında dağınık yapıda ölçülen dayanak noktaları

### 4.3. Çalışmada Kullanılan Yazılımlar

Bu çalışmada karayolu koridorunun projelendirilmesi, hacim hesapları ve hacim hesaplarında kullanılan üst (karayolu platformu) ve alt (arazinin mevcut durumu)

yüzeyle Netcad 5.1 yazılımında oluşturulmuştur. Arazi yüzeyini temsil eden yüzey noktaları ise farklı enterpolasyon yöntemleri kullanılarak Surfer 9 yazılımında oluşturulmuştur. Enterpolasyon sonucu elde edilen ve uygulama bölgesi olarak seçilen karayolu koridorunun mevcut durumunu gösteren perspektif görüntüler de yine Surfer 9 yazılımında çizilmiştir. Ayrıca histogram çizimi ve bazı istatistik değerlendirmeler Grapher 9 yazılımı kullanılarak yapılmıştır. Veri dağılım testleri ve çizimleri için ise Minitab 16 yazılımı kullanılmıştır.

#### 4.3.1. Surfer 9 yazılımı

Golden Software firmasının çıkardığı "Surfer" yazılımı, gelişigüzel dağılmış verilerden düzenli grid veri üretmekte, eşyükseklik eğrili haritalarının çizdirilmesinde, çeşitli 3-boyutlu görüntüler elde edilmesinde ve arazi kesitinin çıkarılmasında kullanılmaktadır.

Yazılımın sunduğu on iki farklı enterpolasyon yöntemi kullanılarak düzenli veya dağınık yapıdaki nokta gruplarından istenilen aralıkta grid veri üretilebilir. Konumu bilinen noktaların grid yükseklikleri (z), dayanak noktalarının x, y koordinatlarından ve yükseklik değerlerinden yararlanarak bütün dayanak noktaları kullanılarak elde edilebileceği gibi, eksenleri kullanıcı tarafından tanımlanabilen bir arama elipsi kullanılarak, enterpolasyon noktasına en yakın n sayıdaki dayanak noktası yardımıyla da elde edilebilir (*search*). Enterpolasyon yöntemlerine göre çeşitlilik gösteren ileri düzey ayarlamalar (arama elipsi, ağırlık katsayısı vb.) yapılarak sonuçların amaca uygun olarak düzenlenmesine olanak tanınmaktadır. Arazi modellemede kullanılan grid verileri, dayanak noktalarından yararlanarak enterpolasyon ile elde edilebileceği gibi doğrudan matematiksel fonksiyonlar kullanılarak da oluşturulabilir.

Surfer, gridleme işlemi sonrasında oluşacak veriler için; nokta sayısı, yoğunluk, standart sapma, ortalama vb. değerler hakkında istatistiksel bilgileri içeren bir rapor dosyası üretmektedir.

#### 4.3.2. Netcad 5.1 yazılımı

Netcad özellikle haritacılık ve planlama alanlarında tercih edilen; halihazır harita üretimi, imar planı çizimi, parselasyon haritaları yapımı ve imar uygulamalarının her türlü çizimi ile raporlarının hazırlanması, arazi toplulaştırma ve kamulaştırma haritalarının üretimi, yağmurlama projeleri, ulaşım projesi tasarımı ve coğrafi bilgi

sistemleri çalışmalarını yapabilen bir CAD yazılımıdır. Netcad yukarıda sıralanan işlemlerin yapılabileceği birçok alt modülden oluşmaktadır. Sayısal arazi modeli Netsurf modülü ile, karayolu tasarımı ise Netpro modülü kullanılarak yapılmaktadır.

Netcad/netsurf modülü Netcad grafik programları yelpazesi içerisinde yer alan, her türlü harita üretimi konusunda çözümler üreten, halihazır harita yapımına yönelik; münhane işlemleri, şev taramaları, sayısal arazi modeli oluşturma gibi özel işlemleri kapsayan yazılımdır. Bunun yanında sayısal arazi modeli üzerinde yapılabilecek, enkesit oluşturma, arazi modelinden kübaj hesabı, karelaaj noktalarının hesaplatılması gibi bir takım hesaplamalarda da netsurf modülünden faydalanılabilmektedir. Yazılım, yüzey oluşturmada lineer enterpolasyon ile düzensiz üçgenler ağı metodunu kullanır.

Ulaşım projelerinin tasarımının yapıldığı Netcad/Netpro yol projelendirme modülü ise; arazi çalışmaları, otoyollar, devlet ve il yolları, kent geçişleri, demiryolları, hava alanları, limanlar, barajlar, kaplama ve yol yenilemesi, açık madencilik, tüneller ve alt geçitler, hafriyat ve yerleşim alanları planlaması ve benzeri tüm hacim işleri ve hizmetlerinde kullanılabilmektedir. Netpro aşağıdaki özellikleri içerir;

- Klasik kesit bilgileri girişi,
- Total station desteği,
- Arazi modelinden otomatik enkesit ve boykesit oluşumu,
- Yatay ve düşey çalışmalar,
- Klotoid desteği,
- Sıyırma ve dış kazısı hesabı,
- Rakortman ve dever hesabı,
- Şev, hendek, palye tanımları,
- Kot taşıma, 3 boyutlu kavşak tasarımları,
- Plan, boykesit ve enkesit çizimleri, her türlü rapor ve çıktı,
- Brükner dengelemesi,
- TCK ve uluslararası standartlara uyum,
- Net3D programı ile projenin 3 boyutlu sanal modeli üzerinde gerçek zamanlı gezi ve inceleme.

Netpro modülü, hacim hesaplarını paralel kesitler ile hacim hesabı yöntemine göre yapmaktadır. Ayrıca hacim hesap sonuçları, tablo şeklinde ve kümülatif değerler olarak sunulmaktadır.

#### 4.4. Uygun Enterpolasyon Yöntemlerinin Seçimi

Bu çalışmada kullanılacak uygun enterpolasyon yöntemlerinin belirlenmesinde, dayanak noktaları ile enterpolasyon noktaları arasındaki düşey yönlü farklar değerlendirme ölçütü olarak düşünülmüştür. Düşey farklar (çakışma artıkları), sayısal arazi modeli ile mevcut arazi yüzeyinin uyumunu istatistiksel olarak değerlendirmek amacıyla kullanılmıştır. Böylelikle, yüzey oluşturma aşamasından önce arazi ile uyumsuz sonuçlar verdiği tespit edilen enterpolasyon yöntemlerinin bir ön değerlendirmesinin yapılması planlanmıştır. Ön değerlendirmenin ardından her bir enterpolasyon yöntemi ayrı ayrı ele alınarak, çakışma artığı ve karesel ortalama hata değerlerinin küçültülmesi amaçlanmıştır.

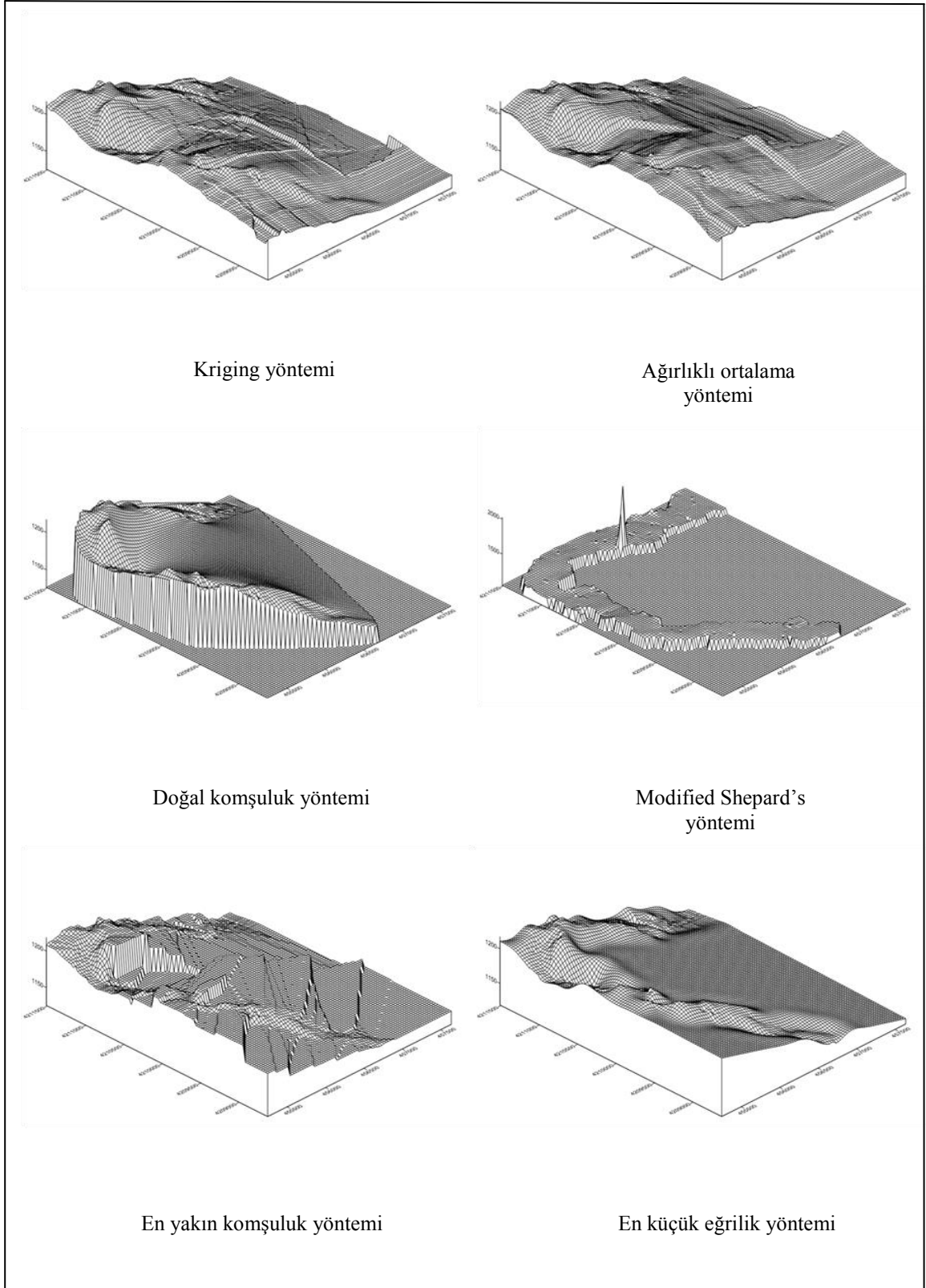
##### 4.4.1. Enterpolasyon yöntemlerinin genel değerlendirmesi

İlk aşamada, karayolu koridorunu kapsayan arazinin mevcut durumunu ifade eden 4338 adet dayanak noktası, Netcad 5.1 yazılımında *Proje/Yardımcı işlemler/Yaz* menü yolu izlenerek excel dosya formatına (\*.xls) dönüştürülmüştür. Bu veriler kullanılarak Surfer 9 yazılımında *Grid/Data* menü yolu izlenerek 5, 15 ve 30 m aralıklı olarak arazi yüzey verileri üretilmiştir. Kullanılan enterpolasyon yöntemleri;

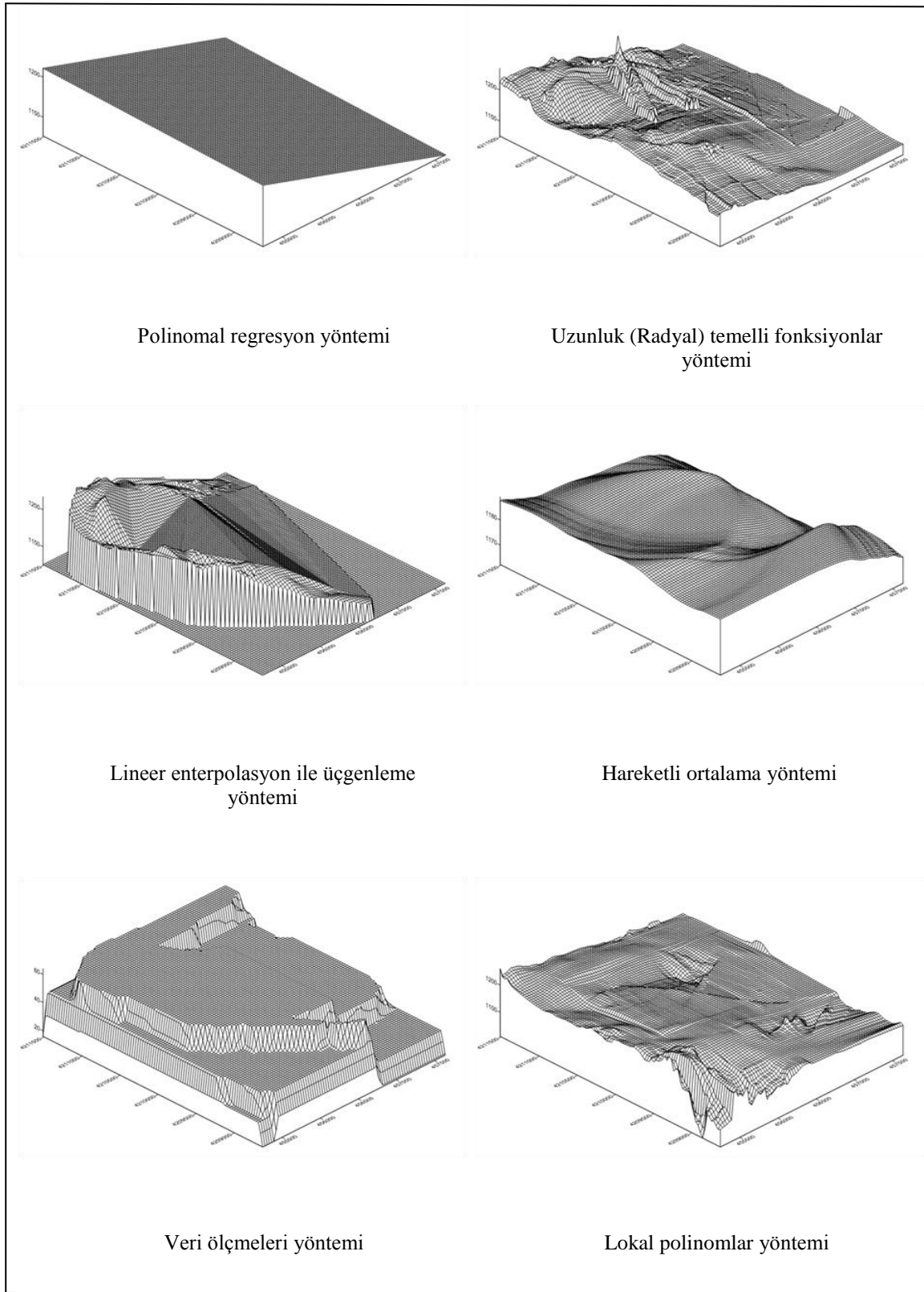
- Ağırlıklı ortalama yöntemi
- Kriging yöntemi
- En küçük eğrilik yöntemi
- En yakın komşuluk yöntemi
- Doğal komşuluk yöntemi
- Lineer enterpolasyon ile üçgenleme yöntemi
- Polinomal regresyon yöntemi
- Uzunluk (radyal) temelli fonksiyonlar yöntemi
- Lokal polinomlar yöntemi
- Hareketli ortalama yöntemi
- Modified Shepard's yöntemi
- Veri ölçümleri yöntemi (data metrics) olarak sıralanmaktadır.

Elde edilen \*.grd formatlı yüzey verileri yardımı ile Surfer 9 yazılımında *Map/New/3D Wireframe* menü yolu izlenerek, her bir enterpolasyon sonucununun 30 m aralıklı tel kafes perspektif görüntüsü çizdirilmiştir (Şekil 4.3 ve Şekil 4.4).





Şekil. 4.3. Tel kafes perspektif görüntüleri (1)



Şekil. 4.4. Tel kafes perspektif görüntüler (2)

Şekil 4.3 ve 4.4’de görülen perspektif görüntülerde dayanak noktası bulunmayan bölgelerde de yükseklik verisi üretilmiştir. Modified Shepard’s yönteminde bunun sonucu olarak ani yükseklik değişimi gözlenmektedir (Şekil 4.3).

Surfer 9 yazılımı, dayanak noktalarının yükseklikleri ( $z_d$ ) ile yüzey verisindeki her bir dayanak noktasına karşılık gelen enterpolasyon noktalarının yüksekliklerini ( $z_e$ ) bilineer enterpolasyon ile hesaplamaktadır. Bu yükseklikler kullanılarak çakışma artığı değerleri ( $z_c$ ) aşağıdaki formül ile hesaplanır.

$$z_c = z_d - z_e \quad (4.1)$$

Bu işlem, yazılımda *Grid/Residuals* menü yolu izlenerek yapılmaktadır. Hesaplanan çakışma artıklarından çeşitli istatistiki bilgiler (varyans, ortalama, ortanca, karesel ortalama hata vb.) elde edilebilir.

Bu çalışmada çakışma artıkları Karesel Ortalama Hata (KOH) ile değerlendirilmiştir. KOH çakışma artıklarından,

$$KOH = \pm \sqrt{\frac{\sum (z_c - z_{ort})^2}{n-1}} \quad (4.2)$$

formülü ile hesaplanmıştır. Burada,

$z_c$  : çakışma artığı

$z_{ort}$ : çakışma artığı değerlerinin ortalaması

$n$  : çakışma artığı sayısını ifade eder.

Çalışmanın bu aşamasında her bir enterpolasyon yöntemi için 5, 10 ve 30 m örnekleme (grid) aralığı ile oluşturulan yüzey verilerinin en büyük ve en küçük çakışma artıkları ile KOH değerleri bir çizelge haline getirilmiştir. Bu çizelgede çakışma artığı değerleri ve buna bağlı KOH değerleri ile bu değerlerin örnekleme aralığına bağlı değişimleri birlikte gösterilmiştir (Çizelge 4.1).

Çizelge 4.1. Çakışma artıklarının enterpolasyon yöntemlerine göre karşılaştırması

| Enterpolasyon Yöntemleri                   | Grid Aralığı (m) | En Büyük Çakışma Artığı (m) | En Küçük Çakışma Artığı (m) | Ortalama (m) | Karesel Ort. Hata (m) |
|--|------------------|-----------------------------|-----------------------------|--------------|-----------------------|
| Ağırlıklı ortalama yöntemi                 | 5                | 4,081                       | -2,961                      | 0,0016       | ± 0,335               |
|  | 15               | 5,403                       | -4,584                      | 0,0025       | ± 0,658               |
|  | 30               | 5,809                       | -5,238                      | 0,0256       | ± 0,829               |
| Kriging yöntemi                            | 5                | 3,090                       | -2,570                      | -0,0001      | ± 0,241               |
|  | 15               | 4,593                       | -3,766                      | -0,0026      | ± 0,451               |
|  | 30               | 5,370                       | -3,924                      | 0,0104       | ± 0,611               |
| En küçük eğrilik yöntemi                   | 5                | 3,523                       | -2,466                      | 0,0084       | ± 0,262               |
|  | 15               | 4,566                       | -3,360                      | 0,0021       | ± 0,483               |
|  | 30               | 5,677                       | -4,556                      | 0,0012       | ± 0,668               |
| En yakın komşuluk yöntemi                  | 5                | 4,060                       | -2,253                      | 0,0017       | ± 0,186               |
|  | 15               | 4,982                       | -4,302                      | 0,0070       | ± 0,487               |
|  | 30               | 7,376                       | -4,530                      | 0,0139       | ± 0,720               |
| Doğal komşuluk yöntemi                     | 5                | 2,804                       | -2,350                      | 0,0010       | ± 0,266               |
|  | 15               | 4,448                       | -3,876                      | 0,0000       | ± 0,488               |
|  | 30               | 5,648                       | -4,039                      | 0,0128       | ± 0,661               |
| Lineer enterpolasyon ile üçgenleme yöntemi | 5                | 2,548                       | -2,622                      | 0,0014       | ± 0,249               |
|  | 15               | 4,095                       | -4,233                      | -0,0010      | ± 0,485               |
|  | 30               | 5,918                       | -4,163                      | 0,0140       | ± 0,662               |
| Modified Shepard's yöntemi                 | 5                | 2,325                       | -2,259                      | -0,0045      | ± 0,191               |
|  | 15               | 8,979                       | -18,274                     | -0,0558      | ± 1,065               |
|  | 30               | 12,051                      | -27,978                     | -0,0334      | ± 1,735               |
| Uzunluk temelli fonksiyonlar yöntemi       | 5                | 2,480                       | -2,014                      | -0,0069      | ± 0,172               |
|  | 15               | 9,348                       | -11,521                     | -0,0477      | ± 0,743               |
|  | 30               | 13,645                      | -12,228                     | -0,0167      | ± 1,162               |
| Lokal polinomlar yöntemi                   | 5                | 12,476                      | -17,103                     | 0,0722       | ± 1,593               |
|  | 15               | 12,396                      | -16,815                     | 0,0724       | ± 1,602               |
|  | 30               | 12,118                      | -17,039                     | 0,0763       | ± 1,618               |
| Polinomal regresyon yöntemi                | 5                | 27,939                      | -33,900                     | 0,0000       | ± 11,716              |
|  | 15               | 27,940                      | -33,890                     | 0,0030       | ± 11,716              |
|  | 30               | 27,940                      | -33,897                     | 0,0030       | ± 11,716              |
| Hareketli ortalama yöntemi                 | 5                | 34,780                      | -44,105                     | -2,789       | ± 19,640              |
|  | 15               | 34,777                      | -44,085                     | -2,788       | ± 19,640              |
|  | 30               | 34,784                      | -44,039                     | -2,782       | ± 19,641              |
| Veri ölçümleri yöntemi (Data Metrics)      | 5                | 1177,673                    | 1061,793                    | 1119,296     | ± 22,205              |
|  | 15               | 1177,723                    | 1062,070                    | 1119,317     | ± 22,159              |
|  | 30               | 1177,973                    | 1062,659                    | 1119,429     | ± 22,175              |

Çizelge 4.1' de verilen değerlere bakıldığında örnekleme aralığı 5 m seçilen enterpolasyon yöntemlerinde KOH değerlerinin daha iyi sonuçlar verdiği görülmektedir. Buna bağlı olarak örnekleme aralığı azaldıkça KOH değerlerinin azaldığı söylenebilir. Ancak örnekleme aralığının azalması ile araziye uygulanabilirlik ve hesap yükü bakımından bir takım zorluklar yaşanabilir.

Çizelge 4.1'de görülen ilk 8 enterpolasyon yöntemi, özellikle 5 m örnekleme aralığında birbirine yakın sonuçlar vermiştir. Yine de en küçük ve en büyük çakışma

artığı değerlerinin kısmen yüksek olduğu görülmektedir. Araziden ölçülen verilerin doğru kabul edilmesi koşuluyla çakışma artığı değerlerinin yüksek çıkması, arazi verisindeki bölgesel veri boşlukları veya arazi karakteristiğindeki kısa mesafeli değişimler ile açıklanabilir. Aynı zamanda yüzey verisi oluşturmada bir sınır belirtilmediği için dayanak noktası bulunmayan kısımlarda üretilen yüzey verilerinin yükseklik değerleri, bütün KOH sonuçlarını az da olsa olumsuz yönde etkilemektedir.

Lokal polinomlar yöntemi, en küçük kareler yöntemini kullanarak enterpolasyon yapmaktadır. Her bir yüzey verisini oluşturmak için dayanak noktaları ağırlıklandırılarak iki değişkenli bir lokal polinom oluşturulur. Polinomun bilinmeyen katsayıları en küçük kareler ilkesine göre çözümlenir. Polinomun derecesi Surfer 9 yazılımında 1, 2 veya 3 olarak seçilebilir. Bu çalışmada ağırlıklandırma işlemi için herhangi bir sınırlama kullanılmadan 1. derece polinom ile enterpolasyon yapılmıştır. Çizelge 4.1'e bakıldığında KOH değerlerinin 5, 15 ve 30 m örnekleme aralıklarında sırasıyla  $\pm 1,593$ ,  $\pm 1,602$  ve  $\pm 1,618$  m olduğu görülmektedir. Bir sonraki aşamada polinom derecesindeki değişiklikler ve ağırlıklandırma işlemleri ile daha iyi sonuçlar alınabilir.

Polinomal regresyon yöntemi, temelde konumu bilinen noktalarının yüksekliklerini enterpole etmekten çok, büyük ölçekli veri gruplarının söz konusu olduğu uygulamalarda veri grubunun trend yüzeyini belirlemek amacıyla kullanılmaktadır. Trend yüzey için düzlem, lineer, kuadratik ve kübik yüzeyler kullanılabilir. Bu çalışmada trend yüzey olarak lineer yüzey seçilmiştir. Çizelge 4.1'e bakıldığında KOH değerlerinin bütün örnekleme aralıklarında  $\pm 11,716$  m olduğu görülmektedir. Bu değer, diğer yöntemlere göre oldukça büyük olduğundan polinomal regresyon yöntemi ile elde edilen yüzey, bir sonraki aşamada ve hacim hesabında kullanılmayacaktır.

Hareketli ortalama yöntemi ile dayanak noktalarının yükseklik değerlerinin ortalamasını kullanarak yüzey verisi hesaplanmaktadır. Ortalama değer hesabında arama elipsi (kritik daire) kullanılarak daha iyi sonuçlar elde edilebilir. Yine de bu yöntemin çok büyük veri gruplarından yüzey elde etmede kullanılması tavsiye edilmektedir. Çizelge 4.1'e göre KOH değerleri  $\pm 19,640$  ve  $\pm 19,641$  m olarak hesaplanmıştır. Bu değerler, diğer yöntemlere göre oldukça büyük olduğundan, hareketli ortalama yöntemi ile elde edilen yüzey bir sonraki aşamada ve hacim hesabında kullanılmayacaktır.

Veri ölçmeleri yöntemi  $\pm 22,205$ ,  $\pm 22,159$  ve  $\pm 22,175$  KOH değerleri ile duyarlı bir sonuç vermemiştir. Aslında bu yöntem veriler hakkında bilgi edinmek için tercih edilmektedir. Bu yöntem ile elde edilen yüzey, bir sonraki aşamada ve hacim hesabında kullanılmayacaktır.

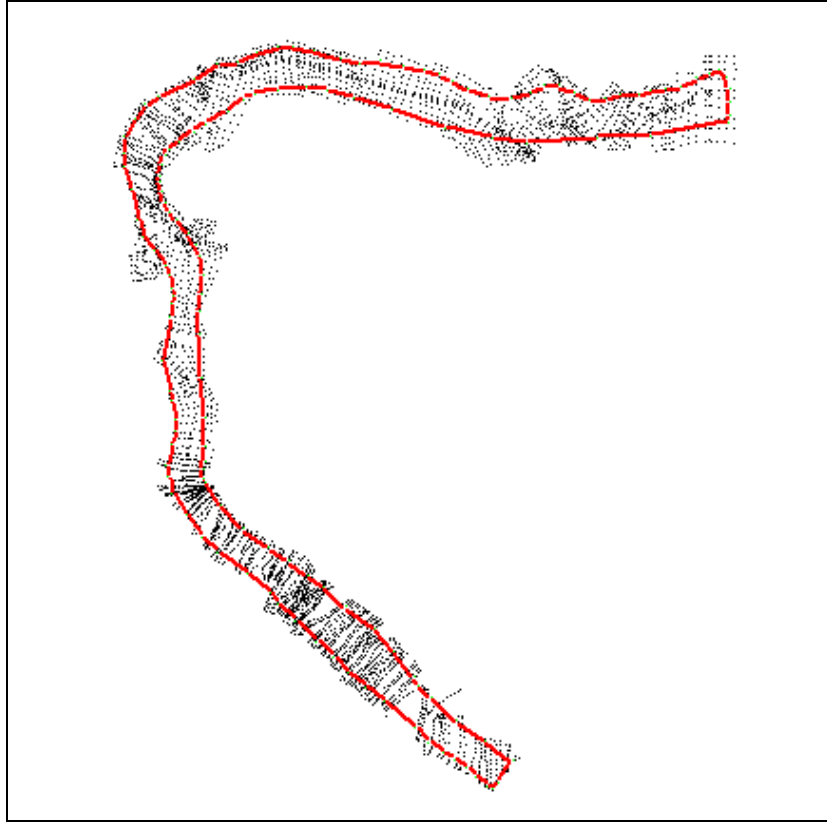
Çalışmanın devamında ve hacim hesaplarında aşağıda sıralanan enterpolasyon yöntemleri kullanılacaktır;

- Ağırlıklı ortalama,
- Kriging,
- En küçük eğrilik,
- En yakın komşuluk,
- Doğal komşuluk,
- Lineer enterpolasyon ile üçgenleme,
- Modified Shepard's yöntemi,
- Uzunluk (radyal) temelli fonksiyonlar,
- Lokal polinomlar.

#### 4.4.2. Enterpolasyon yöntemlerinin ayrı ayrı değerlendirmesi

Bu aşamada bütün enterpolasyon yöntemleri için en iyi sonuçların alındığı aralık olan 5m' lik örnekleme aralığı kullanılmıştır. Aynı zamanda söz konusu 9 enterpolasyon yöntemi ile üretilen yüzey verileri tek tek değerlendirilerek, çakışma artığı değerlerinin küçültülmesi amaçlanmaktadır. Yöntemlerin tümünde KOH değerini küçültmek amacıyla dayanak noktalarını kapsayan bir sınır poligonu kullanılmıştır (Şekil 4.5). Böylece dayanak noktası bulunmayan bölgelerde oluşacak yüzey noktalarının KOH üzerindeki olumsuz etkisi önlenecektir. Özellikle sınır noktalara yakın olan dayanak noktalarındaki çakışma artıkları bu etkiye daha fazla maruz kalır.

Sınır poligonu, sınırı oluşturan noktaların yatay koordinatlarını (x,y) içeren kapalı bir çoklu doğru olarak oluşturulmuştur. Çoklu doğrunun her kırık noktasının koordinatları bir excel dosyasına yazılmıştır. Bu dosya, x ve y değerlerinin yazıldığı iki sütundan ve n (kırık nokta sayısı kadar) satırdan oluşur. Başlangıç koordinatı ile bitiş koordinatı aynı olan bu dosyanın ilk satırına, nokta sayısı ve çoklu doğrunun dışının temizleneceğini ifade eden '0' rakamı yazılmıştır. Surfer yazılımında bu işlem *Worksheet* menüsünden yapılmaktadır. Oluşturulan dosya *File/Save as* menü yolu izlenerek \*.bln (*blank*) formatında kaydedilir.



**Şekil. 4.5.** Dayanak noktaları ve sınır belirten çoklu doğru

Bu aşamada kullanılan enterpolasyon yöntemleri ve çizilen perspektif görüntüler Şekil 4.5' de görülen çoklu doğru ile sınırlandırılmıştır. Çoklu doğrunun alanı 83,322 hektar ve genişliği ortalama 157 m dir. Çoklu doğru içerisinde kalan dayanak noktası sayısı ise 3071'dir.

#### **4.4.2.1. Ağırlıklı ortalama yöntemi ile enterpolasyon**

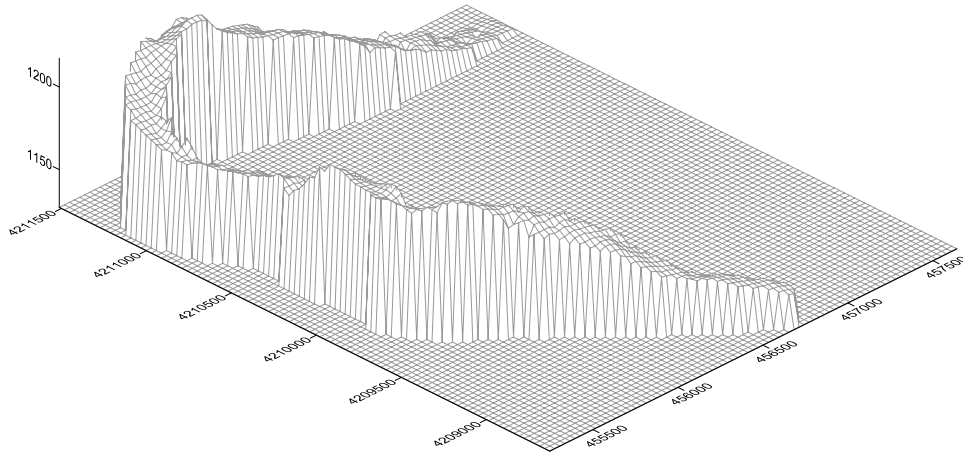
Dayanak noktaları bu yöntemde mesafenin tersine göre ağırlıklandırılmıştır. Ağırlık kuvveti ile yakındaki dayanak noktalarına daha fazla ağırlık vermek mümkündür. Bu çalışmada ağırlık kuvveti olarak 3, 4, 5 ve 6 değerlerine göre sonuçlar üretilmiştir. Enterpolasyonda kullanılacak dayanak noktalarının seçiminde ise bir arama elipsi (kritik daire) kullanılmıştır. Bu elipsin parametreleri kullanıcı tarafından belirlenebilir. Elips dışında kalan noktalar enterpolasyon işleminde kullanılmaz. Arama elipsinin parametreleri, her iki eksen için 80 m seçilmiştir. Çalışmanın bu kısmında elde edilen sonuçlar, arama elips kullanılmasına ve ağırlık kuvveti değişimine bağlı KOH değerleri ile Çizelge 4.2'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.2. Ağırlıklı ortalama yöntemiyle elde edilen sonuçlar

| Ağırlık kuvveti (p)         | Arama Elipsi Yok |         |         |         | Arama Elipsi Var (R=80 m) |         |         |         |
|-----------------------------|------------------|---------|---------|---------|---------------------------|---------|---------|---------|
|                             | 3                | 4       | 5       | 6       | 3                         | 4       | 5       | 6       |
| En küçük çakışma artığı (m) | -2,549           | -2,520  | -2,471  | -2,423  | -2,549                    | -2,520  | -2,471  | -2,425  |
| En büyük çakışma artığı (m) | 3,967            | 3,806   | 3,662   | 3,535   | 3,968                     | 3,806   | 3,662   | 3,535   |
| Ortalama (m)                | 0,0037           | 0,0015  | 0,0006  | 0,0002  | 0,0037                    | 0,0015  | 0,0006  | 0,0002  |
| KOH (m)                     | ± 0,225          | ± 0,202 | ± 0,194 | ± 0,190 | ± 0,225                   | ± 0,202 | ± 0,194 | ± 0,190 |

Çizelge 4.2'deki sonuçlara göre KOH değerinin ağırlık kuvvetine bağlı olarak azaldığı görülmektedir. Ancak  $p=4$  değerinden sonra KOH değerindeki değişim azalarak devam etmiştir. Arama elipsi kullanılarak elde edilen sonuçlar ile diğer sonuçlar kıyaslandığında, hemen hemen aynı sonuçların elde edildiği açıkça görülmektedir. Bu yöntemde en iyi sonuçlar  $\pm 0,190$  m KOH değeri ile ağırlık kuvveti 6 seçilerek yapılan enterpolasyon ile elde edilmiştir.

Bu yöntem verileri ile çizilen perspektif görüntü aşağıda gösterilmiştir (Şekil 4.6).



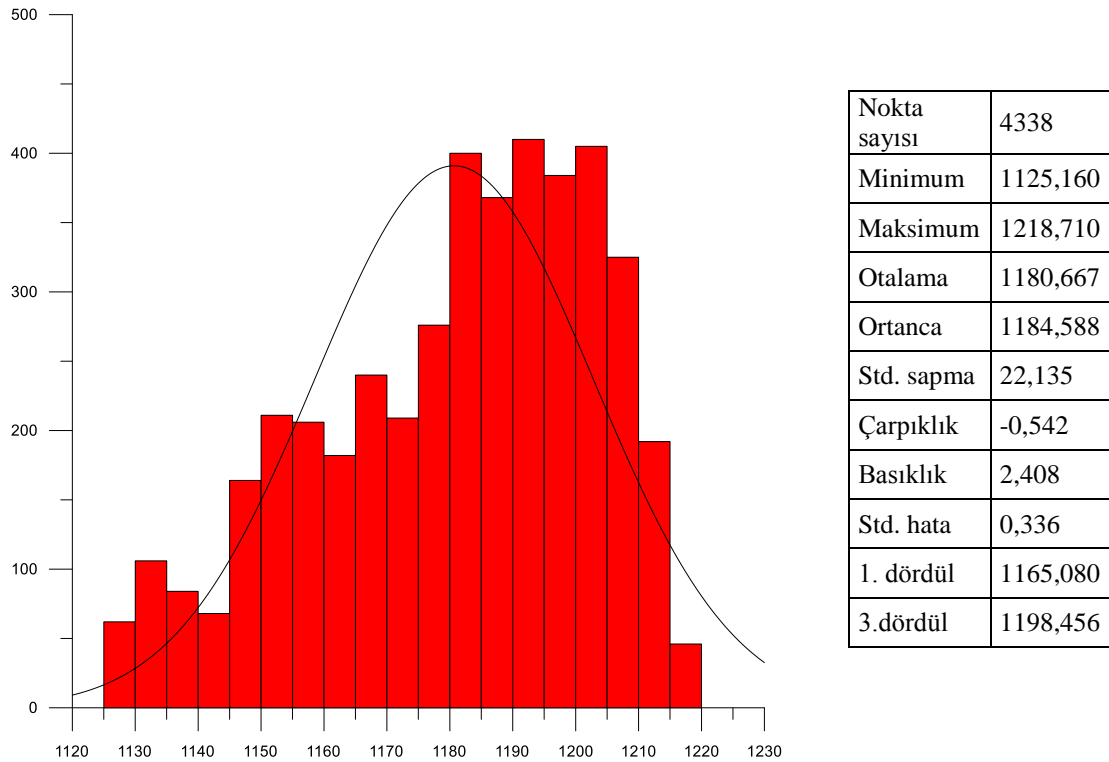
Şekil 4.6. Ağırlıklı ortalama yöntemi ile elde edilen perspektif görüntü



#### 4.4.2.2. Kriging yöntemi ile enterpolasyon

Kriging yöntemi ile enterpolasyonda öncelikle çalışma bölgesini ifade eden verilerden deneysel variogram oluşturulmuştur. Daha sonra deneysel variogram yardımıyla teorik variogram parametreleri hesaplanarak enterpolasyonda kullanılacak noktaların yüksekliklerine buna göre ağırlık verilmiştir.

Normal dağılımlı veriler yüzey oluşturulurken daha iyi sonuçları verdiği için verilerin dağılım testinin yapılması gerekir (Yaprak, 2007). Buna göre dayanak noktalarının yükseklik dağılımının normal dağılıma uyduğu varsayımı ile yükseklik değerlerinin histogram grafiği çizilmiştir (Şekil 4.7). Bu histogramda yükseklik değerleri 5 m aralık ile belirlenmiş ve normal dağılım eğrisi ile verilere ait istatistik bilgileri gösterilmiştir.



Şekil. 4.7. Çalışma bölgesindeki dayanak noktalarının histogram grafiği ve istatistikler

Histogram grafiğine ve istatistik bilgilerine bakıldığında histogramın sola çarpık olduğu görülmektedir (-0,542).

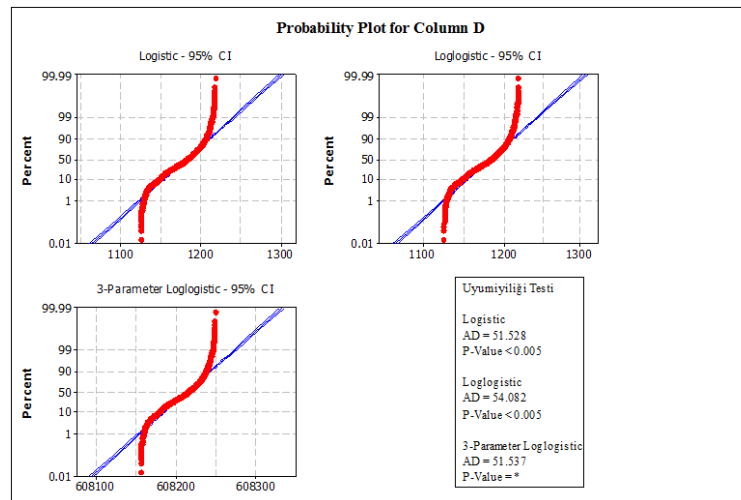
Dayanak noktalarının yükseklik değerlerinin normal dağılıma uygunluğu, literatürde sıklıkla kullanılan tek örneklem Kalmogorov-Smirnov sınamasına kullanılarak yapılmıştır. Buna göre  $H_0$  ve alternatif hipotezleri;

$H_0$ = Örnekler normal dağılımlı bir ana kütlede alınmıştır.

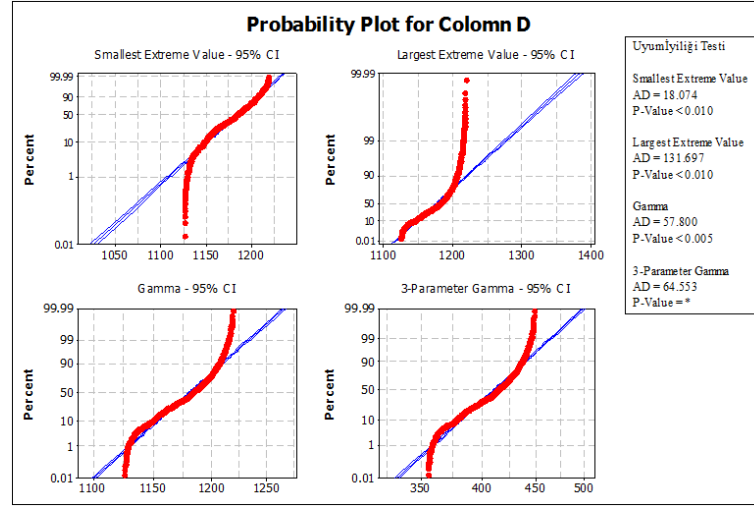
$H_A$ = Örnekler normal dağılımlı olmayan bir ana kütlede alınmıştır

şeklinde yazılır. Kalmogorov-Smirnov (K-S) sınavında, verilerden hesaplanan K-S test istatistik değeri (D), K-S kritik değeri tablosunda bu değere karşılık olan ( $D_\alpha$ ) değere göre yorumlanır. D değeri, örnek kapsamındaki herhangi bir x için ampirik dağılım fonksiyonu S(x) ile teorik dağılım fonksiyonu F(x) arasındaki dikey mesafeyi vermekte, bu da teorik dağılıma uygunluk ölçüsü olarak kullanılmaktadır (Genceli, 2007). Hesaplanan bu mesafelerden en büyüğü ( $D_{mak}$ ),  $D_\alpha$  tablo değeri ile kıyaslanır ve  $D_{mak} < D_\alpha$  koşulu sağlanırsa  $H_0$  hipotezi geçerli olur. Aksi halde  $H_1$  hipotezi geçerli sayılır. Bu çalışmadaki veriler için Surfer yazılında hesaplanan  $D_{mak} = 0.075$  test değeri,  $D_\alpha$  için verilen bütün güven aralıklarında tablo değerlerinden daha büyük olduğundan ( $D_{mak} = 0.075 > D_{0.05} = 0,021$ )  $H_1$  hipotezi geçerlidir. Yani veriler normal dağılıma uygun olduğu söylenemez. Bu durumda verilerin hangi dağılıma uyduğunun belirlenmesi ve variogramın dönüşüm yapılmış verilere göre oluşturulması gerekir.

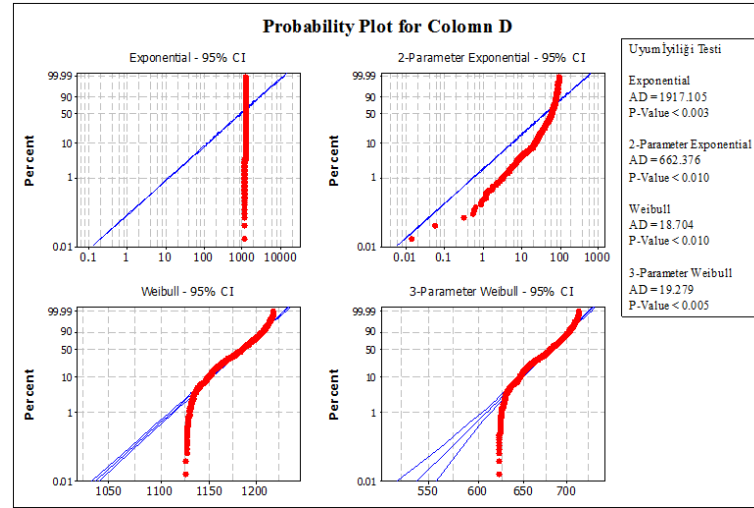
Dayanak noktalarının yüksekliklerinin belirli bir olasılık dağılımı gösterip göstermediğini belirlemek amacıyla Minitab 16 yazılımında bulunan dağılımlar ve dönüşüm modelleri kullanılarak Anderson-Darling yöntemine göre uyum iyiliği sınavı yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre veri kümesinin denenen dağılımlara yeterince uygun olmadığı belirlenmiştir. Bu sınavda P değerinin Anderson-Darling istatistiğinden büyük olması, uygun dağılıma karar verilmesinde kullanılmaktadır. Aksi durumda verilerin söz konusu dağılıma yeterince uymadığına karar verilir.



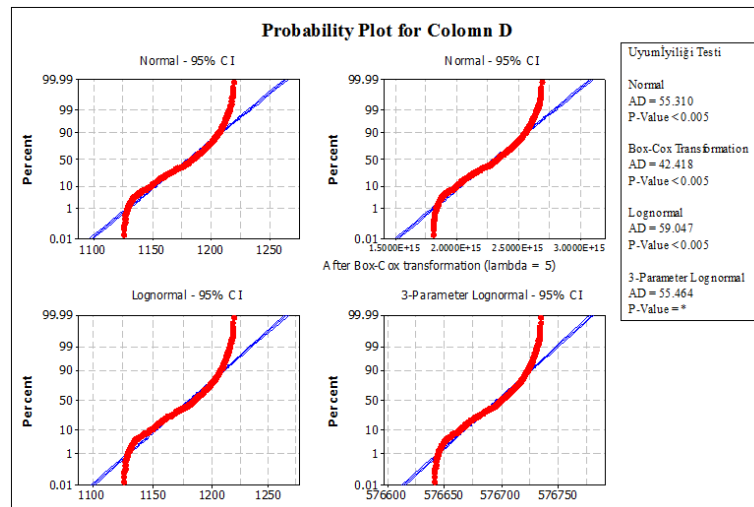
Şekil. 4.8. Logaritmik dağılıma göre uyum iyiliği sınavı sonuçları



Şekil. 4.9. Gama dağılımına göre uyum iyiliği sınaması sonuçları



Şekil. 4.10. Üssel ve Weibull dağılımlarına göre uyum iyiliği sınaması sonuçları



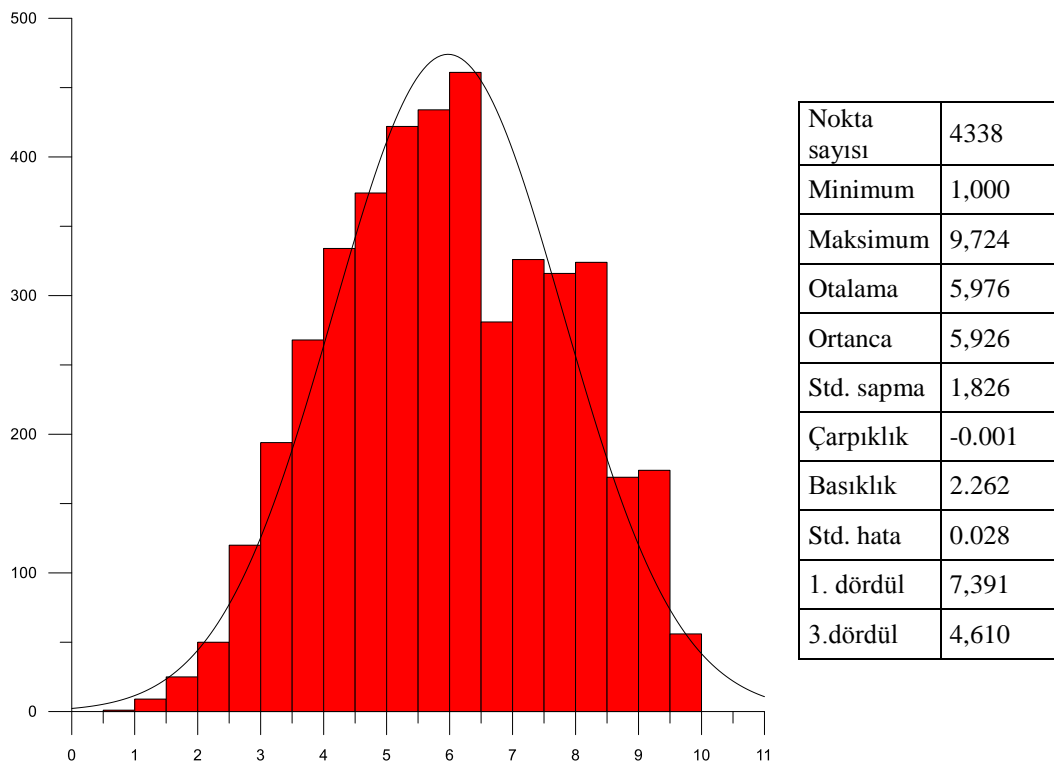
Şekil. 4.11. Normal ve Lognormal dağılımlara göre uyum iyiliği sınaması sonuçları

Bu durumda veriler (dayanak noktalarının yükseklikleri) için uygun bir dağılım belirlenemediğinden verilerdeki sola çarpıklık dönüşüm ile giderilerek verilerin normal dağılımlı olduğu kabulüne göre variogram elde edilecektir.

Bilindiği gibi yukarıda (Şekil 4.7) çizilen histograma göre verilerdeki sola çarpıklık (-0,542) görülmektedir. Bu durumda veri grubu için bir simetrik durum oluşturularak veriler sağa çarpık duruma getirilebilir ve sağa çarpık veriler için uygulanan karekök dönüşümü uygulanabilir.

Normal dağılım gerektiren bir istatistik yöntem uygulanmadan önce uygun yöntemlerle puan dağılımının normalliği incelenip pozitif yönlü bir çarpıklık gözlenince karekök, aşırı pozitif bir çarpıklık varsa logaritmik dönüşüm (transformasyon) yerinde olur. Puanlarda 1 den düşük değer varsa puanlara 1 değeri eklendikten sonra dönüşüm uygun görülmektedir. Negatif yönlü bir dağılım için her bir puan, en yüksek puana 1 eklenerek bulunan bir sabitten çıkarılarak pozitif çarpık bir yapıya dönüştürüldükten sonra dönüşüm yapılabilir (Büyüköztürk, 2010).

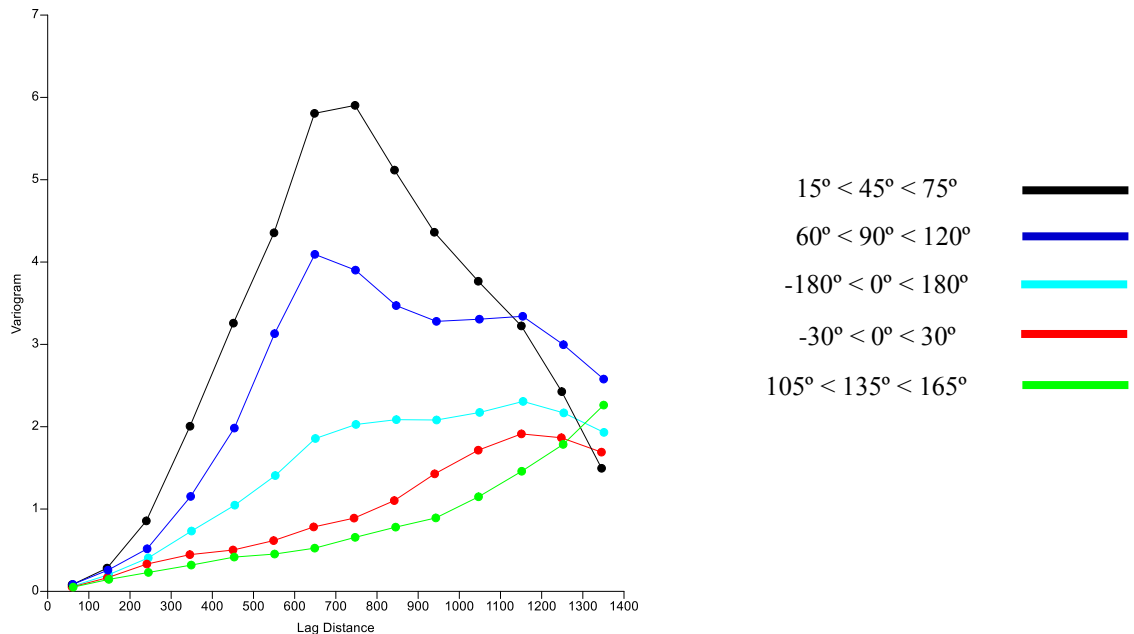
Dayanak noktalarının yükseklik değerleri için karekök dönüşümü uygulanmış ve dönüşüm sonucu elde edilen histogram grafiği ve istatistiki bilgiler aşağıda gösterilmiştir (Şekil 4.12).



**Şekil. 4.12.** Dönüşüm yapılmış dayanak noktalarının histogram grafiği ve istatistikler

Bundan sonraki aşamada dönüşüm sonucu oluşan yüksekliklere göre variogram oluşturulacak ve enterpolasyon yapılacaktır. Enterpolasyon sonucunda dayanak noktalarına karşılık gelen enterpolasyon noktaları, ters dönüşüm ile eski haline getirilecek ve enterpolasyon yükseklikleri dayanak noktaların yüksekliklerinden çıkarılarak gerçek çakışma artığı değerleri hesaplanacaktır. Çakışma artığı istatistikleri de gerçek yükseklik değerlerine göre hesaplanacaktır. Ayrıca yüzeyi oluşturan 5 m aralıklı yüzey verileri normale dönüştürüldükten sonra hacim hesabında kullanılacaktır.

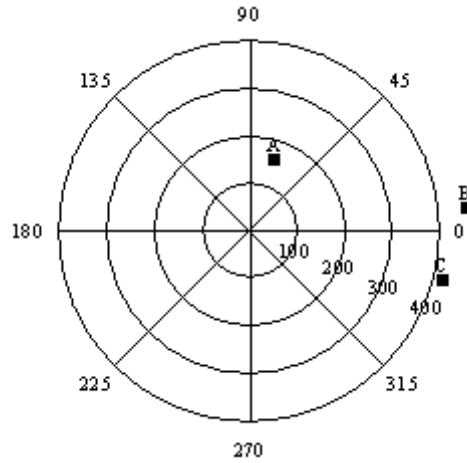
Çalışma alanı için deneysel variogram hesaplamasında yön bağımlılığı dikkate alınmıştır. Tolerans açısı olarak  $30^\circ$  seçilerek  $45^\circ$  aralıkla değişen farklı yönlere göre 1400 m etki mesafesi için deneysel variogram grafikleri oluşturulmuştur (Şekil 4.13). Oluşturulan variogramlarda trend olarak lineer yüzey seçilmiştir.



Şekil. 4.13. Farklı yönlere göre oluşturulan deneysel variogramlar

Şekil 4.13' de görülen deneysel variogramlara göre yeşil renk (en altta bulunan eğri) ile gösterilen ( $105^\circ < 135^\circ < 165^\circ$ ) deneysel variogramın eğimi daha küçüktür. Başka bir deyişle aynı etki mesafesinde yükseklik farklarından hesaplanan ortalama varyans daha düşüktür. Bu ise  $105^\circ$ - $165^\circ$  yönleri arasında daha büyük bir devamlılığın olduğu anlamına gelir. Şekil 4.13'de görülen ve açık mavi renk ile çizilen deneysel variogram yön bağımsız (omnidirectional) variogramı temsil etmektedir. Ayrıca Şekil 4.13'de görülen variogramların tümünün korelasyonlu devam ettiği en son aralık ise 600-700 m aralığıdır.

Variogramların yönsel bağımlılığı bu çalışmada ölçü yapısıyla doğrudan ilgilidir. Karayolu koridoru için ölçülen noktalar iki temel yöne doğru uzanmaktadır (Kuzey Batı - Güney Doğu ve Kuzey - Güney). Bu nedenle bu yönler ( $105^{\circ}$ - $165^{\circ}$  ve  $-30^{\circ}$ - $30^{\circ}$ ) arasında hesaplanan nokta çiftlerinin sayısı fazla olmakta ve yön bağımlılığını etkilemektedir.  $15^{\circ}$ - $75^{\circ}$  ve  $60^{\circ}$ - $120^{\circ}$  yönleri arasında ise koridor genişliğinin dar olması nedeniyle nokta çifti sayısı azalmakta ve bu yönler arasında hesaplanan nokta çiftlerinin deneysel variogram üzerindeki ağırlığı azalmaktadır. Bu nedenle yön bağımsız variogram,  $105^{\circ}$ - $165^{\circ}$  ve  $-30^{\circ}$ - $30^{\circ}$  yönlerinde çizilen yönlü variogramlara daha yakın değerler almaktadır. Benzer şekilde, hesaplanan parametreler ile çizilecek olan teorik variogram da  $105^{\circ}$ - $165^{\circ}$  ve  $-30^{\circ}$ - $30^{\circ}$  yönleri arasında çizilen deneysel variogramlara daha yakın olmaktadır.



Şekil. 4.14. Deneysel variogram çiziminde kullanılan kutupsal daireler

Şekil 4.14'de variogram oluşturmada kullanılan kutupsal daireler gösterilmiştir. Burada her bir nokta çifti bir nokta olarak temsil edilmektedir. Bu noktanın merkeze olan Öklid uzaklığı ve saat istikametinin tersi yönündeki açısı yardımıyla nokta çiftleri kutupsal olarak gruplandırılır. Örneğin şekilde görülen A noktasının merkeze olan uzaklığı 100-200m arasındadır. Saat istikametinin tersi yönündeki açısı ise  $45^{\circ}$ - $90^{\circ}$  arasındadır. C noktası ise 400m yarıçapındaki en son dairenin dışında kalmaktadır ve deneysel variogram hesabına dahil edilmez. Kutupsal dairelerin merkez noktası, veriler arasındaki diyagonal uzunluğun ortasına konumlandırılır. Seçilen deneysel variogram oluşturma uzunluğuna göre en sondaki kutupsal dairenin yarıçapı belirlenir.

Bu çalışmada teorik variogram parametreleri, yön bağımsız deneysel variogram parametrelerine göre hesaplanmıştır. Nokta çiftlerinden hesaplanan deneysel variogram parametreleri 14 aralık olacak şekilde seyreltilerek aşağıda gösterilmiştir (Çizelge 4.3).

**Çizelge 4.3.** Deneysel variogram parametreleri

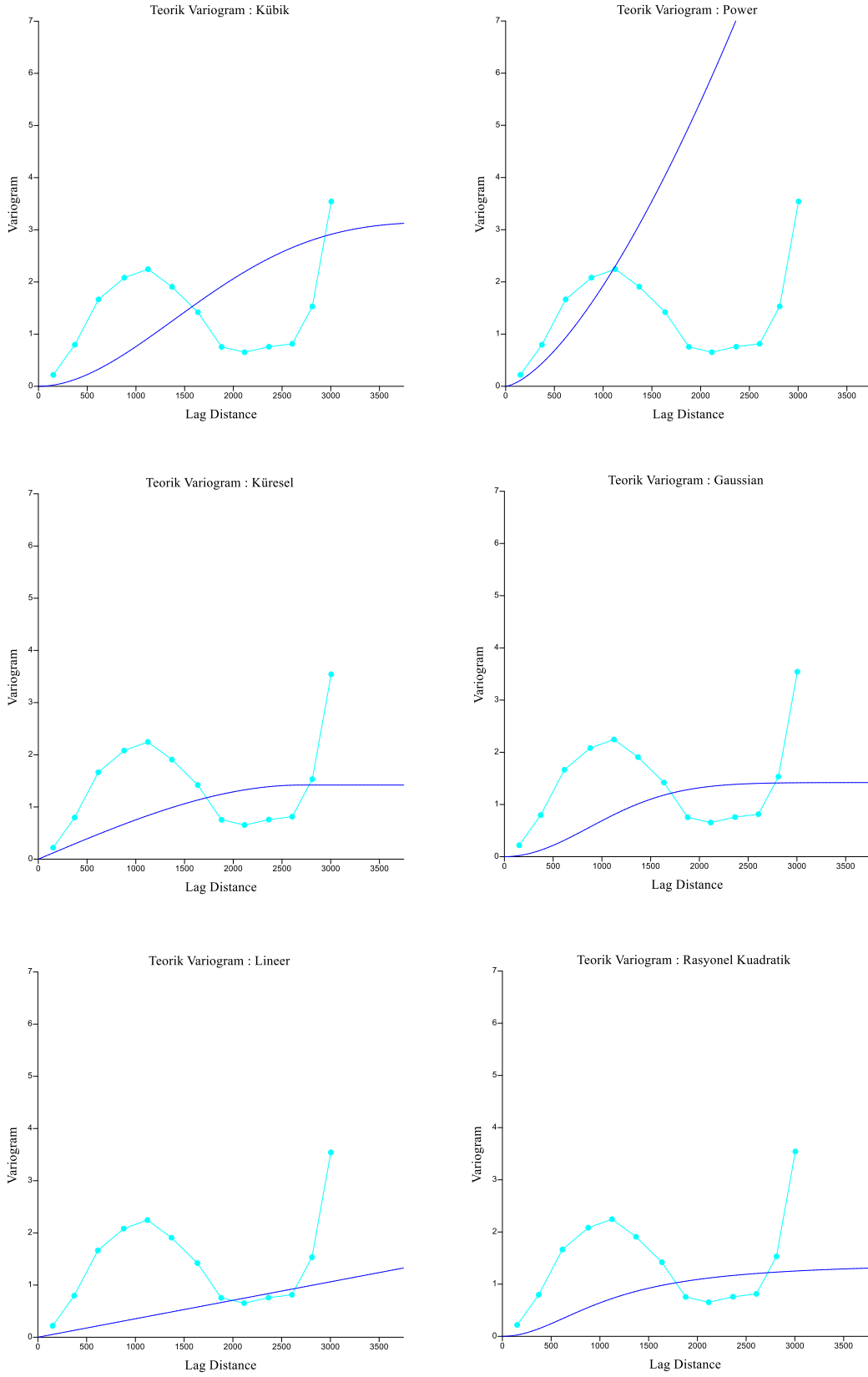
| Mesafe Aralıkları (m) | Ortalama Mesafe (m) | Variogram Değeri (m <sup>2</sup> ) | Nokta Çifti Sayısı |
|-----------------------|---------------------|------------------------------------|--------------------|
| 0-100                 | 62.03               | 0.06                               | 227823             |
| 100-200               | 148.07              | 0.20                               | 417698             |
| 200-300               | 244.29              | 0.41                               | 408968             |
| 300-400               | 349.36              | 0.73                               | 431958             |
| 400-500               | 454.46              | 1.05                               | 356681             |
| 500-600               | 552.88              | 1.41                               | 345707             |
| 600-700               | 650.32              | 1.86                               | 325957             |
| 700-800               | 748.78              | 2.03                               | 308941             |
| 800-900               | 847.00              | 2.08                               | 307942             |
| 900-1000              | 944.74              | 2.08                               | 304054             |
| 1000-1100             | 1049.38             | 2.17                               | 326400             |
| 1100-1200             | 1154.81             | 2.31                               | 274175             |
| 1200-1300             | 1253.68             | 2.17                               | 284562             |
| 1300-1400             | 1351.26             | 1.93                               | 303044             |

Teorik variogram parametreleri en küçük kareler yöntemine göre belirlenmiştir. Tepe varyans değeri (C) ve etki mesafesi (a) bilinmeyen kabul edilip iterasyon sonucunda (mak. 100) 150° yönündeki noktalara 1,1 oranında ağırlık verilmiştir. Hesaplama nugget effect (C<sub>0</sub>) 0 kabul edilerek etki mesafesi (a) ve tepe varyansı (C) için iterasyon başlangıç değeri olarak, korelasyonun bittiği en küçük aralık olan 600-700 aralığındaki 1,857 m<sup>2</sup> ve 650,319 m değerleri kullanılmıştır. Teorik variogram modeli olarak Kübik, Power, Küresel, Gaussian, Lineer ve Rasyonel Kuadratik modeller seçilmiştir. Hesaplanan teorik variogram parametreleri aşağıda gösterilmiştir (Çizelge 4.4).

**Çizelge 4.4.** Teorik variogram parametreleri

| Teorik Variogram Parametreleri                   |         |        |         |          |         |                    |
|--|---------|--------|---------|----------|---------|--------------------|
|  | Kübik   | Power  | Küresel | Gaussian | Lineer  | Rasyonel Kuadratik |
| (C) Tepe Varyans (m <sup>2</sup> )               | 3,15    | 0,97   | 1,42    | 1,42     | 2,85    | 1,42               |
| (a) Etki Mesafesi (m)                            | 4730.00 | 650.32 | 2770.00 | 1260.00  | 1000.00 | 1130.00            |
| (C <sub>0</sub> ) Külçe Etkisi (m <sup>2</sup> ) | 0.00    | 0.00   | 0.00    | 0.00     | 0.00    | 0.00               |

Elde edilen teorik variogram ile deneysel variogramların birlikte görüntülediği variogramlar aşağıda gösterilmiştir (Şekil 4.15).



Şekil. 4.15. Oluşturulan teorik variogramlar

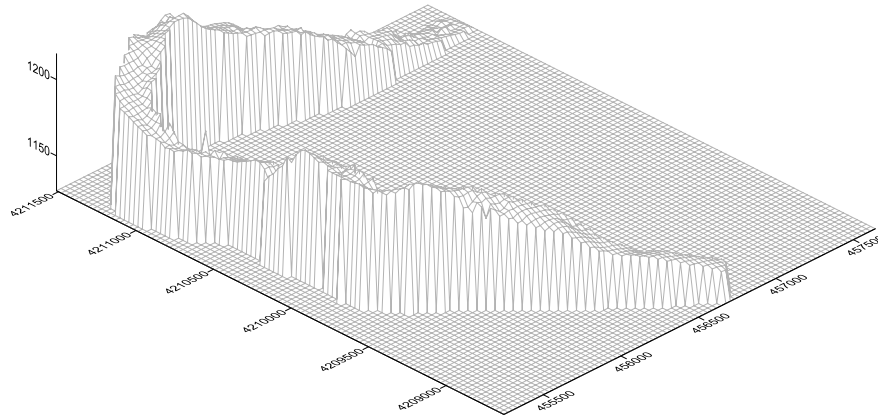


Bu çalışmada elde edilen teorik variogramlar ile enterpolasyonda Universal Kriging yöntemi seçilmiştir. Bu yöntemde enterpolasyon yükseklikleri trend yüzeyden kalan artıklar kullanılarak hesaplanır. İşlem sonucunda trend artıklara tekrar eklenerek yüzey noktalarının enterpolasyon yükseklikleri hesaplanır. Bu çalışmada enterpolasyon işlemi ile elde edilen sonuçlardan üretilen çakışma artıkları, gerçek değerlerine dönüştürülerek bir çizelge haline getirilmiştir (Çizelge 4.5).

**Çizelge 4.5.** Kriging yöntemi ile elde edilen sonuçlar

|                             | Teorik Variogram Modelleri |         |         |          |         |                    |
|-----------------------------|----------------------------|---------|---------|----------|---------|--------------------|
|                             | Kübik                      | Power   | Küresel | Gaussian | Lineer  | Rasyonel Kuadratik |
| En küçük çakışma artığı (m) | -1,331                     | -1,730  | -2,130  | -4,966   | -2,130  | -4,966             |
| En büyük çakışma artığı (m) | 2,542                      | 2,590   | 3,039   | 5,454    | 3,039   | 5,455              |
| Ortalama (m)                | -0,0056                    | -0,0021 | -0,0019 | -0,0156  | -0,0019 | -0,0100            |
| KOH (m)                     | ± 0,148                    | ± 0,196 | ± 0,239 | ± 0,680  | ± 0,239 | ± 0,611            |

Çizelge 4.5’de verilen bilgilere göre çakışma artıkları ve KOH değeri bakımından en iyi sonuç, kübik variogram ile yapılan enterpolasyon ile elde edilmiştir ( $\pm 0,148$  m). Küresel ve lineer variogramla elde edilen sonuçlar ise birbiriyle benzerlik göstermektedir. Gaussian ve rasyonel kuadratik yöntemleri ile beklenen duyarlılıkta sonuçlar alınamamıştır. Kübik variogramla yapılan enterpolasyon sonucu elde edilen verilerle çizilen perspektif görüntü aşağıda gösterilmiştir (Şekil 4.16).



**Şekil. 4.16.** Kriging yöntemi ile elde edilen perspektif görüntü

#### 4.4.2.3. En küçük eğrilik yöntemi ile enterpolasyon

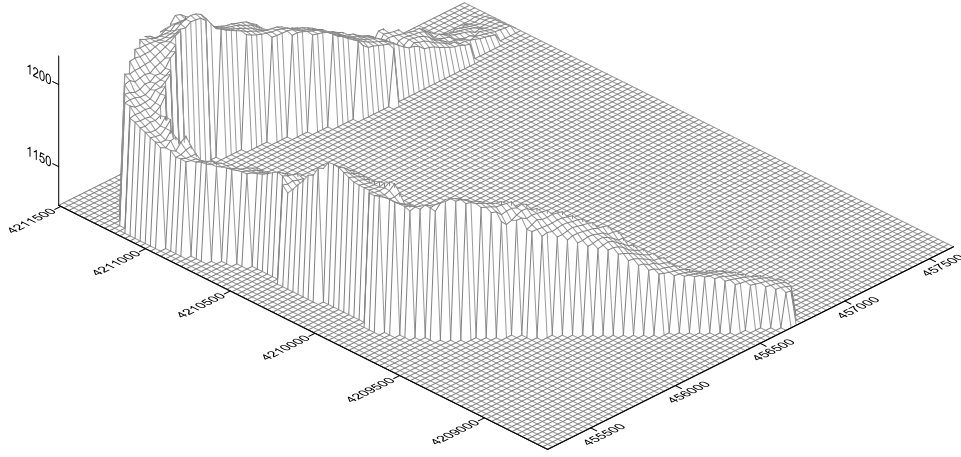
En küçük eğrilik yöntemi ile oluşturulan yüzeyde meydana gelen eğilme ya da bükülmeler yüzeyin iç bölgelerinde iç gerilme katsayısı, kenarlarda ise sınır gerilme katsayısı ile kontrol edilir. İç ve sınır gerilme katsayılarının değeri 0-1 arasında değişir ve bu değer büyüdükçe, yüzeyde oluşan eğilme ya da bükülmeler azalmaktadır. Bu çalışmada en küçük ve en büyük çakışma artıklarını azaltmak amacıyla iç ve sınır gerilme katsayılarının sınır değerlerine göre enterpolasyon yapılarak sonuçlar Çizelge 4.6'da gösterilmiştir.

**Çizelge 4.6.** En küçük eğrilik yöntemiyle elde edilen sonuçlar

|                             | Gerilme Katsayısı |          |         |          |         |          |         |          |
|-----------------------------|-------------------|----------|---------|----------|---------|----------|---------|----------|
|                             | İç =0             | Sınır =0 | İç =1   | Sınır =0 | İç =1   | Sınır =1 | İç =0   | Sınır =1 |
| En küçük çakışma artığı (m) | -2,773            |          | -2,786  |          | -2,466  |          | -2,466  |          |
| En büyük çakışma artığı (m) | 3,680             |          | 3,680   |          | 3,523   |          | 3,513   |          |
| Ortalama (m)                | 0,0064            |          | 0,0066  |          | 0,0058  |          | 0,0058  |          |
| KOH (m)                     | ± 0,274           |          | ± 0,275 |          | ± 0,251 |          | ± 0,250 |          |

Çizelge 4.6'ya göre bütün sonuçların birbirine yakın olduğu görülmektedir. Ön değerlendirme aşamasında elde edilen verilere nazaran çakışma artıkları az da olsa küçülmüştür. Bu aşamada iç gerilme 0 ve sınır gerilme 1 değerlerine göre yapılan enterpolasyon sonucu, hem çakışma artıkları bakımından hem de KOH değeri bakımından en iyi sonucu veren enterpolasyondur. Kenarlara yakın bölgelerde oluşan salınımlar, kullanılan sınır poligonu ile bir miktar azaltılmıştır. Buna rağmen çizelgede görülen KOH değerlerine bakıldığında iç=0, sınır =1 yöntemi ile elde edilen sonucun ( $\pm 0,250$  m) en iyi sonuç olması, özellikle sınır bölgelerde yüzeyin daha fazla salınım yaptığını işaret etmektedir.

En küçük eğrilik yöntemi verileri ile çizilen perspektif görüntü aşağıda gösterilmiştir (Şekil 4.17).



Şekil. 4.17. En küçük eğrilik yöntemi ile elde edilen perspektif görüntü

#### 4.4.2.4. En yakın komşuluk yöntemi ile enterpolasyon

En yakın komşuluk yöntemi dayanak noktalarının, oluşturulacak enterpolasyon noktasına olan uzaklıklarının hesaplanması ve en küçük uzaklığa sahip  $n$  sayıda gözlemin seçilmesi esasına dayanmaktadır. Her bir yüzey noktası, kendisine en yakın dayanak noktasının yükseklik değerini alır. Bu nedenle yöntem veri grubu içerisindeki boşlukları doldurmak için tercih edilebilir. Bu amaçla enterpolasyonda dayanak noktalarının seçimi için bir kritik daire kullanılabilir.

Kritik daire seçimi dayanak noktalarının dağılımı ve yoğunluğuna bağlıdır. Dayanak noktalarının birbirine uzaklığından daha az seçilen kritik daire yarıçapı, yüzey üzerinde çok sayıda boşluk oluşmasına sebep olacaktır. Bu durum özellikle yüzeyin bir bütün olarak değerlendirildiği hacim hesabı gibi uygulamalarda yanıltıcı sonuçlar alınmasına sebep olabilir.

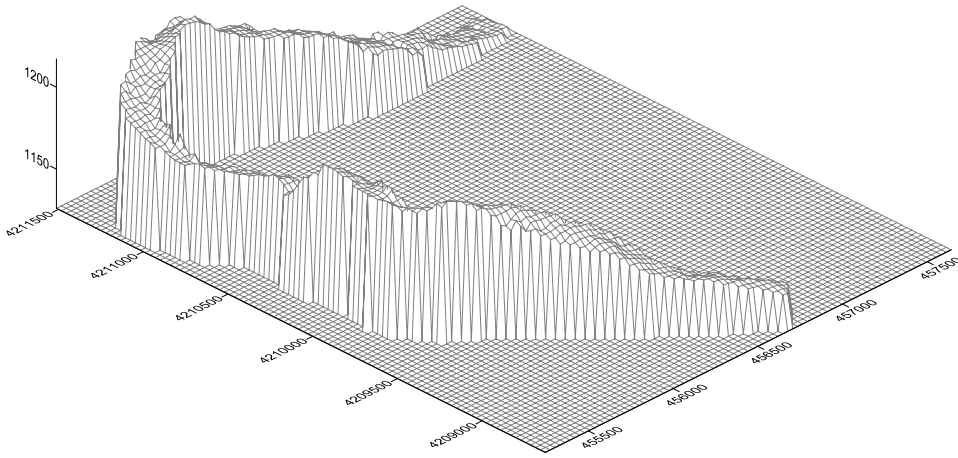
En yakın komşuluk yöntemi kullanılarak yapılan enterpolasyonlarda farklı kritik daire yarıçapları kullanılarak yapılmıştır. Sonuçlar Çizelge 4.7’de gösterilmiştir.

**Çizelge 4.7.** En yakın komşuluk yöntemiyle elde edilen sonuçlar

|                             | Kritik Daire Yarıçapı (m) |         |         |         |         |         |         |         |
|-----------------------------|---------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|                             | R=2                       | R=5     | R=6     | R=7     | R=10    | R=40    | R=160   | R=3750  |
| En küçük çakışma artığı (m) | -0,512                    | -2,280  | -2,253  | -2,253  | -2,253  | -2,253  | -2,253  | -2,253  |
| En büyük çakışma artığı (m) | 2,662                     | 3,924   | 4,060   | 4,060   | 4,060   | 4,060   | 4,060   | 4,060   |
| Ortalama (m)                | 0,2334                    | 0,0009  | 0,0008  | 0,0008  | 0,0008  | 0,0008  | 0,0008  | 0,0008  |
| KOH (m)                     | ± 0,713                   | ± 0,205 | ± 0,194 | ± 0,194 | ± 0,194 | ± 0,194 | ± 0,194 | ± 0,194 |
| Hes. çakışma artığı sayısı  | 17                        | 2674    | 2999    | 3003    | 3003    | 3003    | 3003    | 3003    |
| Hes. yüzey noktası sayısı   | 1436                      | 8233    | 11078   | 13990   | 21801   | 33248   | 33312   | 33312   |
| Boş yüzey noktası sayısı    | 31876                     | 25079   | 22234   | 19322   | 11511   | 64      | 0       | 0       |

Çizelge 4.7’de görülen sonuçlara göre, kritik daire yarıçapı 6, 7, 10, 160 ve 3750 seçilen enterpolasyon yöntemlerinin KOH değerleri  $\pm 0,194$  m olarak hesaplanmıştır. Bu yöntemler KOH değerleri bakımından iyi sonuç veren yöntemlerdir. Ancak kritik daire yarıçapı 6, 7 ve 10 seçilen enterpolasyon sonuçlarının boş yüzey noktası sayısının oldukça fazla olduğu görülmektedir. Öte yandan kritik daire yarıçapı 2 ve 5 seçilen enterpolasyon sonuçlarında KOH değerleri sırasıyla  $\pm 0,713$  ve  $\pm 0,205$  m olarak hesaplanmıştır. Bu yöntemlerde KOH değerlerinin hesaplanmasında kullanılan çakışma artıklarının sayısının, veri boşlukları nedeniyle azaldığı görülmektedir. Çizelge 4.7’ye göre söz konusu enterpolasyon yöntemleri boş yüzey noktası sayısı en fazla olan sonuçları vermiştir. Bu durum, elde edilen yüzeylerin dayanak noktalarını yeterince temsil edememesine sebep olacaktır. Dolayısıyla yüzey verileri üretildiğinde KOH değeri ile birlikte boş kalan yüzey noktası sayısına da bakılması gerekmektedir. Bu çalışmada elde edilen en iyi sonuçlar kritik daire yarıçapı 40, 160 ve 3750 seçilen enterpolasyon yöntemleri ile elde edilmiştir.

En yakın komşuluk yöntemi verileri ile çizilen perspektif görüntü aşağıda gösterilmiştir (Şekil 4.18).



Şekil. 4.18. En yakın komşuluk yöntemi ile elde edilen perspektif görüntü

#### 4.4.2.5. Doğal komşuluk yöntemi ile enterpolasyon

Doğal komşuluk yöntemi enterpole edilecek yüzey noktaları araştırırken dayanak noktalarını ile enterpolasyon noktası arasındaki mesafeye bağlı ağırlıkları kullanır. Enterpolasyon noktaları dayanak noktaları ile birlikte delunay yöntemine göre üçgenlendiğinde enterpolasyon noktası ile birleşerek üçgen kenarı oluşturan bütün dayanak noktaları enterpolasyon noktasının doğal komşuları olurlar. Komşu noktaların ağırlıklandırılması yön bağımsız yapılabileceği gibi belirli bir yöne göre de yapılabilir. Seçilen yöndeki dayanak noktalarına daha fazla ağırlık verilecektir. Özellikle boyu enine göre daha büyük olarak uzanan bölgelerde (karayolu, nehir vb.) yön bağımlı nokta ağırlıklandırma daha iyi sonuçlar alınmasını sağlayabilir.

Doğal komşuluk yöntemi ile yapılan enterpolasyonlarda üçgenlemede kullanılacak noktaların ağırlıklandırılması yön bağımlı ve yön bağımsız olarak ele alınmıştır. Yön bağımlı enterpolasyonlarda açı;  $30^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $120^\circ$  ve  $150^\circ$  yönlerinde, elips oranı ise 2 seçilmiştir. Yön bağımsız enterpolasyonlarda açı  $0^\circ$  ve elips oranları; 0.5, 1 ve 2 olarak belirlenmiştir.

Elips oranı ise, elipsin küçük ekseninin büyük eksenine bölünmesi ile elde edilir. Farklı elips oranları ve yönlere göre elde edilen sonuçlar Çizelge 4.8'de gösterilmiştir.

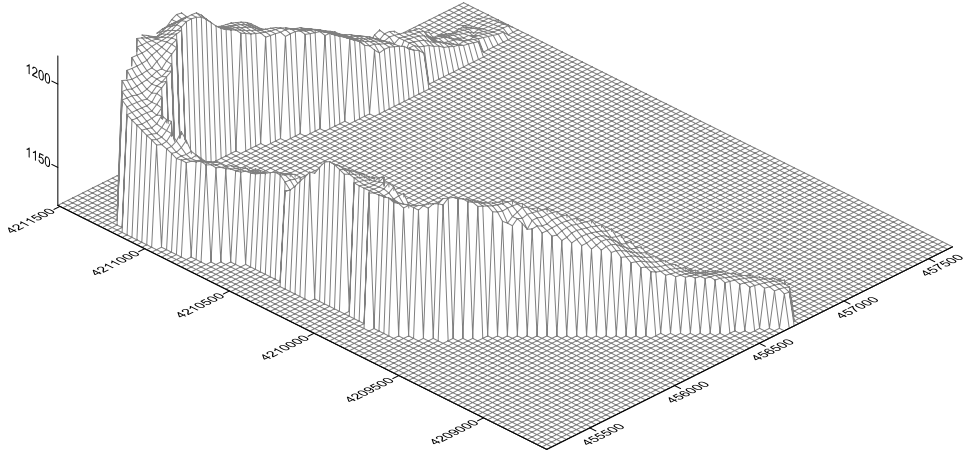
**Çizelge 4.8.** Doğal komşuluk yöntemiyle elde edilen sonuçlar

| Durum                       | Yön bağımsız |             |             | Yön bağımlı |             |             |             |
|-----------------------------|--------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
|                             | 0            | 0           | 0           | 30          | 60          | 120         | 150         |
| Açı ( $\alpha^\circ$ )      | 0            | 0           | 0           | 30          | 60          | 120         | 150         |
| Elips Oranı (a/b)           | 0.5          | 1           | 2           | 2           | 2           | 2           | 2           |
| En küçük çakışma artığı (m) | -2,089       | -2,350      | -1,925      | -2,406      | -2,632      | -2,545      | -2,284      |
| En büyük çakışma artığı (m) | 3,352        | 2,804       | 3,173       | 3,101       | 3,021       | 3,160       | 3,151       |
| Ortalama (m)                | 0,0031       | 0,0014      | 0,0001      | 0,0043      | 0,0057      | 0,0022      | -0,0032     |
| KOH (m)                     | $\pm 0,279$  | $\pm 0,258$ | $\pm 0,273$ | $\pm 0,276$ | $\pm 0,280$ | $\pm 0,271$ | $\pm 0,270$ |

Çizelge 4.8’de verilen sonuçlara göre KOH değeri bakımından, yön bağımsız ( $0^\circ$ ) ve elips oranı 1 seçilerek oluşturulan yüzeyin, KOH değeri bakımından en iyi sonucu verdiği görülmektedir ( $KOH = \pm 0,258$  m). En iyi en küçük çakışma artığı sonucunu, yön bağımsız ve elips oranı 2 seçilen enterpolasyon verirken, en iyi en büyük çakışma artığı sonucuna da yön bağımlı ( $60^\circ$ ) enterpolasyon yöntemi ile elde edilmiştir. Bu verilere göre Çizelge 4.8’de görülen çeşitli yönler ve ağırlık oranlarıyla yapılan enterpolasyon sonuçlarında, KOH değerlerine göre ölçüler arasında yön bağımlılığı tespit edilememiştir. Bunun temel nedeni çalışma bölgesi verilerinin birden çok yöne göre anizotropik olmasıdır. Bu nedenle yön bağımlı enterpolasyon sonuçlarında KOH değerinde azalma gözlenememiştir. Buna rağmen yön bağımlı sonuçlar içerisinde 150° yönünde en küçük KOH değeri elde edilmesi, bu yön daha fazla devamlılık olduğunu işaret etmektedir.

Yapılan yön bağımlı enterpolasyonlarda, açı  $90^\circ$  ve oran 2 alındığında durum, açı  $0^\circ$  ve oran 0,5 (yön bağımsız) durumuna dönüştüğünden açı  $90^\circ$  ve oran 2 durumu yön bağımlı enterpolasyon olarak değerlendirilmemiştir. Açı  $180^\circ$  ve oran 2 durumu da aynı şekilde açı  $0^\circ$  ve oran 2 (yön bağımsız) durumuna dönüşmektedir.

Doğal komşuluk yöntemi ile elde edilen yüzey verileri ile çizilen perspektif görüntü aşağıda gösterilmiştir (Şekil 4.19).



Şekil. 4.19. Doğal komşuluk yöntemi ile elde edilen perspektif görüntü

#### 4.4.2.6. Lineer enterpolasyon ile üçgenleme yöntemi

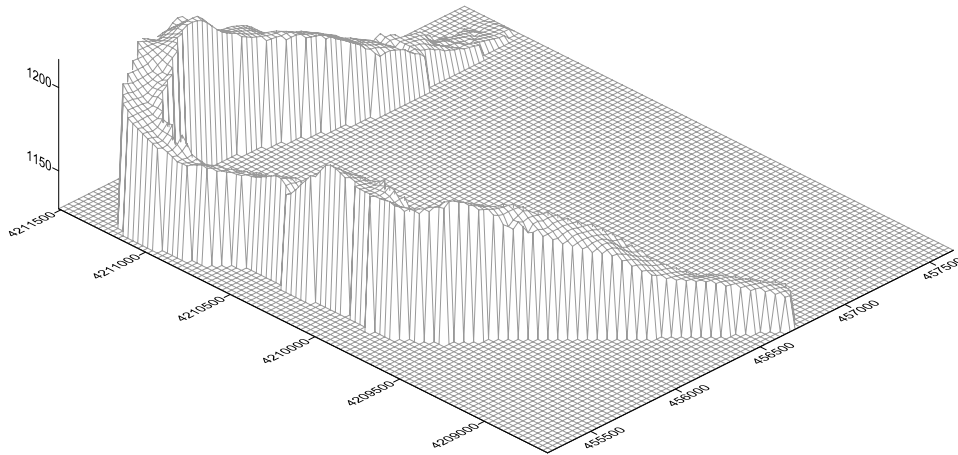
Lineer enterpolasyonda üçgenlenecek veri alanının doğruluğunu arttırmak için bir sınır ile belirlenmesi gerekmektedir. Özellikle fazla girintili çıkıntılı arazilerin sınıra yakın bölgelerinde gereksiz ve yanıltıcı üçgenler oluşabilir. Bu çalışmada enterpolasyonla yanlış bilgi elde etmemek için bu üçgenler dışarıda kalacak şekilde veri alanı sınırlandırılmıştır. Elde edilen enterpolasyon sonucu Çizelge 4.9’da gösterilmiştir.

Çizelge 4.9. Lineer enterpolasyon yöntemiyle elde edilen sonuçlar

|                             |             |
|-----------------------------|-------------|
| En küçük çakışma artığı (m) | -2,622      |
| En büyük çakışma artığı (m) | 2,548       |
| Ortalama (m)                | 0,0012      |
| KOH (m)                     | $\pm 0,244$ |

Çizelge 4.9’da görülen sonuçlara göre KOH değeri  $\pm 0,244$  m olarak hesaplanmıştır. Elde edilen bu sonuç, bir önceki aşamadaki elde edilen KOH değerinden

( $\pm 0,249$  m ) biraz daha küçüktür. Lineer enterpolasyon yöntemi ile elde edilen yüzey verileri ile çizilen perspektif görüntü aşağıda gösterilmiştir (Şekil 4.20).



Şekil. 4.20. Lineer enterpolasyon yöntemi ile elde edilen perspektif görüntü

#### 4.4.2.7. Modified Shepard's yöntemi ile enterpolasyon

Modified Shepard's yönteminde komşu dayanak noktaları ağırlıklandırılarak oluşturulan kuadratik yüzeylerden grid düğüm noktalarının yükseklikleri elde edilir.

Çalışmanın bu kısmında 2. Bölümde anlatılan yaklaşımlar dikkate alınarak farklı komşu nokta sayılarına göre enterpolasyon yapılmış ve sonuçlar Çizelge 4.10'da gösterilmiştir.

Çizelge 4.10. Modified Shepard's yöntemiyle elde edilen sonuçlar

|                             | Kuadratik komşular | Ağırlıklandırılan komşular | Kuadratik komşular | Ağırlıklandırılan komşular |
|-----------------------------|--------------------|----------------------------|--------------------|----------------------------|
|                             | 13                 | 19                         | 18                 | 9                          |
| En küçük çakışma artığı (m) | -2,259             |                            |                    | -1,957                     |
| En büyük çakışma artığı (m) | 2,325              |                            |                    | 2,313                      |
| Ortalama (m)                | -0,0079            |                            |                    | -0,0043                    |
| KOH (m)                     | $\pm 0,203$        |                            |                    | $\pm 0,160$                |



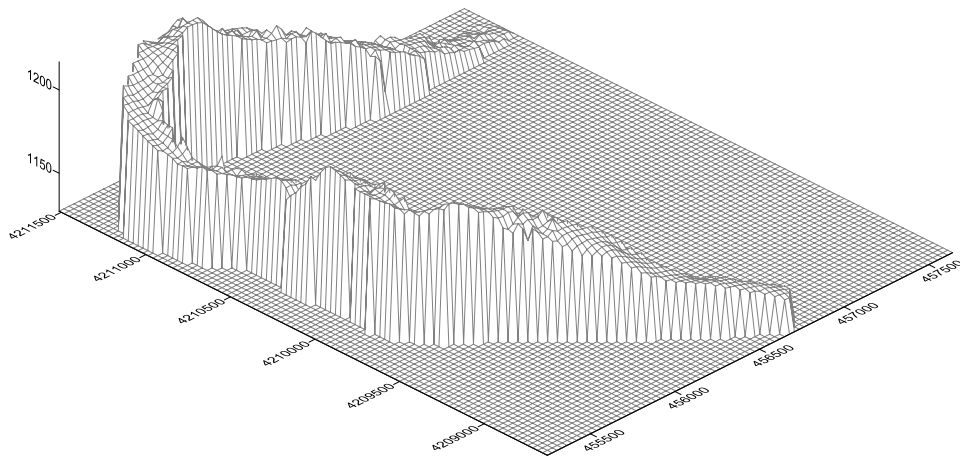


enterpolasyonlar sadece  $c^2 = 130$  ve  $c^2 = 0,5$  değerlerine göre yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar bir çizelge haline getirilerek aşağıda gösterilmiştir. (Çizelge 4.11).

**Çizelge 4.11.** Uzunluk (Radyal) temelli fonksiyonlar yöntemiyle elde edilen sonuçlar

| Enterpolasyon Fonksiyonu | $c^2$ | En Küçük Çakışma Artığı (m) | En Büyük Çakışma Artığı (m) | Ortalama (m) | Karesel Ort. Hata (m) |
|--------------------------|-------|-----------------------------|-----------------------------|--------------|-----------------------|
| İnvers Multiquadric      | 0,5   | -4,426                      | 5,130                       | 0,0287       | $\pm 0,773$           |
|                          | 130   | -1,694                      | 2,428                       | -0,0084      | $\pm 0,178$           |
| Multilog                 | 0,5   | -2,595                      | 3,562                       | 0,0072       | $\pm 0,334$           |
|                          | 130   | -1,856                      | 2,450                       | -0,0091      | $\pm 0,182$           |
| Multiquadric             | 0,5   | -1,851                      | 3,321                       | 0,0014       | $\pm 0,218$           |
|                          | 130   | -2,014                      | 2,480                       | -0,0107      | $\pm 0,187$           |
| Natural cubic spline     | 0,5   | -1,402                      | 2,616                       | -0,0051      | $\pm 0,152$           |
|                          | 130   | -2,306                      | 2,566                       | -0,0080      | $\pm 0,204$           |
| Thin plate spline        | 0,5   | -1,330                      | 2,681                       | -0,0012      | $\pm 0,172$           |
|                          | 130   | -2,164                      | 2,516                       | -0,0088      | $\pm 0,190$           |

Çizelge 4.11'de verilen değerlere bakıldığında,  $c^2 = 130$  değerinde bütün yöntemlerin birbirine yakın sonuçlar verdiği görülmektedir.  $c^2 = 0,5$  değerine göre yöntemler içinde en iyi sonucu veren Natural cubic spline yöntemiyle elde edilen KOH değeri  $\pm 0,152$  m olarak görülmektedir. Bu yöntemle elde edilen verilerle çizilen perspektif görüntü aşağıda gösterilmiştir (Şekil 4.22).



**Şekil. 4.22.** Uzunluk (Radyal) temelli fonksiyonlar yöntemiyle elde edilen perspektif görüntü

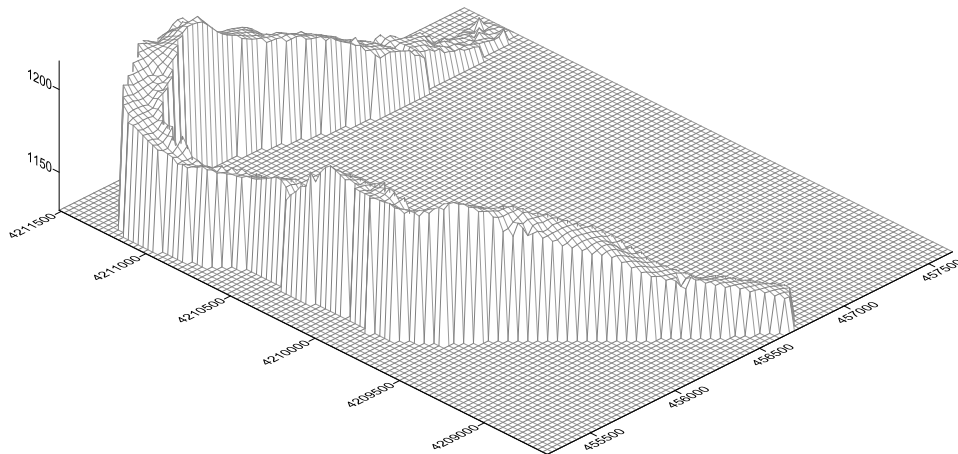
#### 4.4.2.9. Lokal polinomlar yöntemi ile enterpolasyon

Bu yöntemde her bir enterpolasyon noktasının yükseklik hesabında kullanılacak dayanak noktaları, belirlenen bir arama elipsi ile tanımlanmıştır. Tanımlanan arama elipsi içerisindeki verileri kullanarak, her bir yüzey verisini oluşturmak için dayanak noktaları ağırlıklandırılmış ( $p=5, 10, 15$  ve  $20$ ) ve iki değişkenli bir lokal polinom oluşturulmuştur. Elipsin eksenleri olarak ortalama koridor genişliği olan  $160$  m kullanılmış ve 1., 2. ve 3. derece polinomlara göre enterpolasyon yapılmıştır. Polinom derecesi ve ağırlık katsayısı değişimine bağlı sonuçlar Çizelge 4.12’de gösterilmiştir.

**Çizelge 4.12.** Lokal polinomlar yöntemiyle elde edilen sonuçlar

| 1. Derece Polinom           |             |             |             |             |
|-----------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Ağırlık kuvveti (p)         | 5           | 10          | 15          | 20          |
| En küçük çakışma artığı (m) | -4,639      | -3,510      | -3,157      | -2,794      |
| En büyük çakışma artığı (m) | 5,227       | 4,576       | 3,780       | 3,520       |
| Ortalama (m)                | 0,0154      | 0,0041      | 0,0016      | 0,0010      |
| KOH (m)                     | $\pm 0,625$ | $\pm 0,440$ | $\pm 0,345$ | $\pm 0,290$ |
| 2. Derece Polinom           |             |             |             |             |
| Ağırlık kuvveti (p)         | 5           | 10          | 15          | 20          |
| En küçük çakışma artığı (m) | -3,694      | -3,423      | -3,145      | -2,767      |
| En büyük çakışma artığı (m) | 5,132       | 4,160       | 3,984       | 3,806       |
| Ortalama (m)                | -0,0011     | 0,0003      | 0,0005      | 0,0002      |
| KOH (m)                     | $\pm 0,497$ | $\pm 0,366$ | $\pm 0,287$ | $\pm 0,237$ |
| 3. Derece Polinom           |             |             |             |             |
| Ağırlık kuvveti (p)         | 5           | 10          | 15          | 20          |
| En küçük çakışma artığı (m) | -3,551      | -3,199      | -2,783      | -2,243      |
| En büyük çakışma artığı (m) | 5,150       | 3,945       | 3,514       | 2,762       |
| Ortalama (m)                | 0,0026      | 0,0002      | -0,0002     | 0,0002      |
| KOH (m)                     | $\pm 0,480$ | $\pm 0,348$ | $\pm 0,268$ | $\pm 0,221$ |

Çizelge 4.12'de görülen değerlere göre polinomun derecesinin ve ağırlık kuvvetinin artışına bağlı olarak KOH ve çakışma artığı değerlerinin azaldığı görülmektedir. En iyi sonuçlar ( $\pm 0,221m$ ) 3. derece polinom ve ağırlık kuvveti 20 alınan enterpolasyon sonucunda elde edilmiştir. Bu yöntemle elde edilen verilerle çizilen perspektif görüntü aşağıda gösterilmiştir (Şekil 4.23).



Şekil. 4.23. Lokal polinomlar yöntemiyle elde edilen perspektif görüntü

#### 4.4.3. Enterpolasyon sonuçlarının değerlendirilmesi

Bu çalışmada dağınık yapıdaki dayanak noktalarını sıklaştırılarak düzenli yapıdaki veri grubuna geçiş iki aşamalı olarak gerçekleştirilmiştir. Enterpolasyon yöntemlerinin genel değerlendirmesi (1. aşama) sonucunda 12 farklı enterpolasyon yöntemi içerisinde, 5 m örnekleme (grid) aralığında KOH değerlerine göre birbirine yakın sonuçlar veren 9 enterpolasyon yöntemi ayrı ayrı değerlendirilerek çakışma artığı ve KOH değerleri küçültülmeye çalışılmıştır.

Enterpolasyon yöntemlerinin ayrı ayrı değerlendirilmesi (2. aşama) sonucunda 9 farklı enterpolasyon yöntemine göre elde edilen veri grupları içinden, en iyi sonuçları veren yöntemler hacim hesabı aşamasında kullanılacaktır. Hacim hesabında kullanılacak veri grupları; elde edildiği yöntemle, çakışma artığı ve KOH değerine göre bir çizelge şeklinde düzenlenmiş ve sonuçlar aşağıda gösterilmiştir (Çizelge 4.13). Ayrıca enterpolasyon yöntemlerinin genel değerlendirmesi (1. aşama) sonucunda 5 m

grid aralığında elde edilen sonuçlar da bir karşılaştırma yapabilmek amacı ile aynı çizelgede gösterilmiştir.

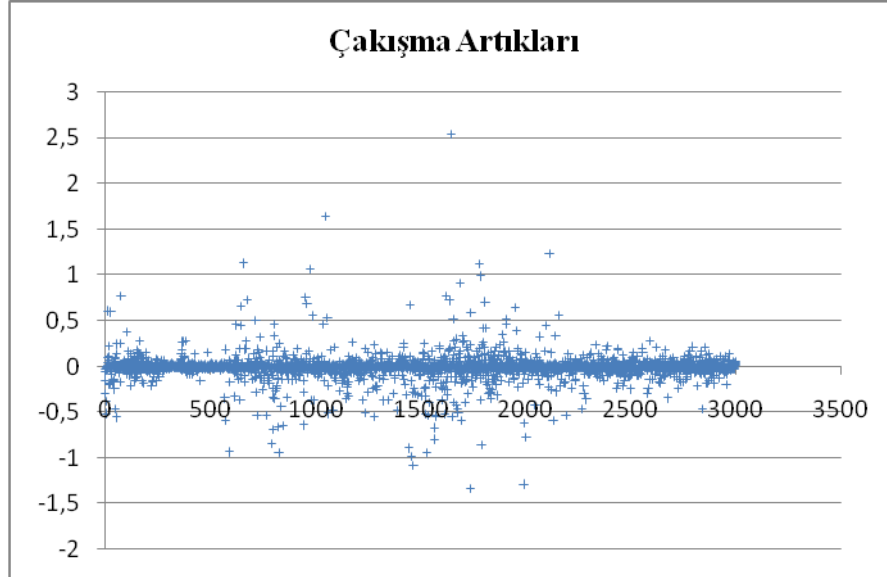
**Çizelge 4.13.** Enterpolasyon sonuçlarının değerlendirilmesi

| Enterpolasyon Yöntemleri                      | 1. Aşama Sonuçları          |                             |                       | 2. Aşama Sonuçları          |                             |                       |
|---|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------|
|   | En Büyük Çakışma Artığı (m) | En Küçük Çakışma Artığı (m) | Karesel Ort. Hata (m) | En Büyük Çakışma Artığı (m) | En Küçük Çakışma Artığı (m) | Karesel Ort. Hata (m) |
| Ağırlıklı ortalama yöntemi                    | 4,081                       | -2,961                      | 0,335                 | 3,535                       | -2,423                      | ± 0,190               |
| Kriging yöntemi                               | 3,090                       | -2,570                      | 0,241                 | 2,542                       | -1,331                      | ± 0,148               |
| En küçük eğrilik yöntemi                      | 3,523                       | -2,466                      | 0,262                 | 3,513                       | -2,466                      | ± 0,250               |
| En yakın komşuluk yöntemi                     | 4,060                       | -2,253                      | 0,186                 | 4,060                       | -2,253                      | ± 0,194               |
| Doğal komşuluk yöntemi                        | 2,804                       | -2,350                      | 0,266                 | 2,804                       | -2,350                      | ± 0,258               |
| Lineer enterpolasyon ile üçgenleme yöntemi    | 2,548                       | -2,622                      | 0,249                 | 2,548                       | -2,622                      | ± 0,244               |
| Modified Shepard's yöntemi                    | 2,325                       | -2,259                      | 0,191                 | 2,313                       | -1,957                      | ± 0,160               |
| Uzunluk (Radyal) temelli fonksiyonlar yöntemi | 2,480                       | -2,014                      | 0,172                 | 2,616                       | -1,402                      | ± 0,152               |
| Lokal polinomlar yöntemi                      | 12,476                      | -17,103                     | 1,593                 | 2,762                       | -2,243                      | ± 0,221               |

Çizelge 4.13'de verilen sonuçların genel bir değerlendirmesi yapılacak olursa; enterpolasyon yöntemlerinin ayrı ayrı değerlendirmesi ile bir önceki aşamaya göre KOH değerlerinin ve çakışma artıklarının azaldığı görülmektedir. Ancak en yakın komşuluk yönteminde çakışma artıkları değişmemesine rağmen KOH değeri bir miktar artmıştır ( $\pm 0,186$ 'dan  $\pm 0,194$ 'e çıkmıştır). Bu yöntemde yüzey noktalarının yükseklikleri kendisine en yakın dayanak noktasının yükseklik değerini almaktadır. Kullanılan sınır nedeni ile dayanak noktalarının sayısı azalmış buna bağlı olarak çakışma artığı değeri 0 olan nokta sayısı da azalmıştır (2593'den 1680'e düşmüştür). Buna bağlı olarak KOH değerindeki artış, çakışma artığı hesaplanan nokta sayısının azalması ile açıklanabilir.

Çizelge 4.13'e göre KOH değeri bakımından en iyi sonuçlar Kriging Yöntemi ile elde edilmiştir ( $\pm 0,148$  m ). Uzunluk (Radyal) Temelli Fonksiyonlar ve Modified

Shepard's Yöntemleri de Kriging Yöntemine oldukça yakın sonuçlar vermiştir. Kriging yöntem ile elde edilen sonuçlara göre 3003 dayanak noktasını için çakışma artıkları saçılım grafiği oluşturulmuş ve aşağıda gösterilmiştir (Şekil 4.24).



**Şekil. 4.24.** Kriging Yöntemi ile elde edilen çakışma artıklarının saçılım grafiği

Şekil 4.24'de görülen çakışma artıklarının % 71'lik kısmı (2144 nokta)  $\pm 0,050$  m aralığındadır. Çakışma artıklarının % 98'i (2940 nokta) ise  $\pm 0,500$  m aralığında bulunmaktadır.

#### 4.5. Hacim Hesapları

Uygulamanın bu kısmında, farklı enterpolasyon yöntemlerine göre elde edilen veri grupları içinden KOH değerleri en küçük olan 9 veri grubu kullanılarak hacim hesaplaması yapılmıştır. Farklı enterpolasyon yöntemleri sonucunda 5 m aralıklı olarak elde edilen düzenli yapıdaki 9 farklı veri grubu, hacim hesabında arazinin mevcut durumunu temsil etmek üzere üçgenleme yöntemi ile yüzey haline getirilmiştir. Bu işlem için elde edilen \*.grd formatındaki veriler Surfer yazılımında önce \*.dat formatına dönüştürülmüştür. Sonrasında veri gruplarından yükseklik (z) değeri bulunmayan veriler temizlenerek \*.dat formatındaki veriler \*.xls formatına dönüştürülmüştür.

Enterpolasyon sonuçlarına göre en iyi sonucu veren yöntem (Kriging Yöntemi) ile üretilen ve \*.xls formatına dönüştürülen veri grubu referans kabul edilerek, Netcad yazılımında sayısal arazi modeli oluşturulmuştur. Sayısal arazi modeli yardımı ile belirlenen geçki koridoru için 12 m platform genişliğine sahip ve karayolu tasarım

kriterlerine uygun nitelikte iki şeritli bir karayolu projesi tasarlanmıştır. Tasarlana projede hacim hesabı için hassas sonuçlar elde edebilmek amacı ile enkesit aralığı 5m seçilmiştir ve her enkesit üzerinde 5m’de bir yükseklik değeri oluşturulmuştur.

Tasarlanan proje için arazi yüzeyine uygun bir kırmızı çizgiye göre boykesit çizimi yapılarak (Ek 1) proje kotları (kırmızı kotlar) hesaplanmıştır. Hesaplanan proje kotlarının oluşturduğu platformu ifade eden bir yüzey dosyası (üst yüzey) elde edilmiştir.

Enterpolasyon yöntemlerinin ayrı ayrı değerlendirmesi sonucu en iyi KOH değerlerini veren verilerden oluşan alt yüzeylerin her biri ile platformu ifade eden üst yüzeyin enkesitleri oluşturulmuş ve her bir alt yüzey için ayrı ayrı olmak üzere paralel kesitler yöntemine göre hacim hesapları yapılmıştır. Burada, enterpolasyon sonucuna göre en küçük KOH değerini veren (Kriging) yöntem yüzeyler arası yapılan hacim hesabında referans (doğru) kabul edilmiştir. Diğer yüzey verilerinden elde edilen hacim değerleri ile referans hacim değeri karşılaştırmak amacı ile elde edilen hacim sonuçları bir çizelge haline getirilmiştir (Çizelge 4.14).

**Çizelge 4.14.** Hacim hesabı sonuçları

| <b>Enterpolasyon Yöntemleri</b>               | <b>Yarma Hacmi (m<sup>3</sup>)</b> | <b>Dolgu Hacmi (m<sup>3</sup>)</b> | <b>Toprak İşi Miktarı (m<sup>3</sup>)</b> | <b>Toprak İşi Miktarı Farkı (m<sup>3</sup>)</b> | <b>Hata %</b> |
|---|------------------------------------|------------------------------------|---|---|---------------|
| Ağırlıklı ortalama yöntemi                    | 117784,38                          | 101712,89                          | 219497,27                                 | -12159,55                                       | 5,5%          |
| Kriging yöntemi                               | 123320,01                          | 108336,81                          | 231656,82                                 | 0,00  | 0,0%          |
| En küçük eğrilik yöntemi                      | 118698,49                          | 103139,61                          | 221838,10                                 | -9818,72  | 4,4%          |
| En yakın komşuluk yöntemi                     | 119114,01                          | 102484,00                          | 221598,01                                 | -10058,81                                       | 4,5%          |
| Doğal komşuluk yöntemi                        | 117402,67                          | 99702,53                           | 217105,20                                 | -14551,62                                       | 6,7%          |
| Lineer enterpolasyon ile üçgenleme yöntemi    | 117327,94                          | 100203,06                          | 217531,00                                 | -14125,82                                       | 6,5%          |
| Modified Shepard’s yöntemi                    | 122119,79                          | 109404,25                          | 231524,04                                 | -132,78   | 0,1%          |
| Uzunluk (Radyal) temelli fonksiyonlar yöntemi | 124582,18                          | 109045,02                          | 233627,20                                 | 1970,38   | 0,8%          |
| Lokal polinomlar yöntemi                      | 119613,61                          | 106485,93                          | 226099,54                                 | -5557,28  | 2,4%          |

Çizelge 4.14’de görülen sonuçlara göre hesaplanan yarma ve dolgu hacimleri uygulanan enterpolasyon yöntemine göre değişkenlik göstermektedir. Bununla beraber enterpolasyon sonucunda KOH değeri en küçük hesaplanan Kriging, Uzunluk Temelli Fonksiyonlar ve Modified Shepard’s yöntemleri ile elde edilen hacim sonuçlarının birbirine yakın olduğu görülmektedir. Kriging Yöntemi ile elde edilen hacim hesabının referans(doğru) olduğu kabulüne göre, Uzunluk Temelli Fonksiyonlar ve Modified Shepard’s yöntemleri ile yapılan toprak işi miktarının % 1’in altındaki hata oranıyla hesaplandığı görülmektedir.



## 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmanın birinci bölümünde giriş ve literatür özeti verilmiş, ikinci bölümde ise sayısal arazi modellerinin tanımı, yapısı, SAM'ın doğruluğun etkileyen faktörler, SAM verilerini toplama yöntemleri, SAM kapsamında kullanılan enterpolasyon yöntemleri ve SAM'ın kullanıldığı çalışma alanları açıklanmıştır. Üçüncü bölümde ise farklı hacim hesaplama yöntemleri ele alınmıştır.

Uygulama kısmında teorik esaslar çerçevesinde verilen bilgiler kullanılarak karayolu koridoru şeklinde uzanan bir test bölgesi için SAM oluşturulmuştur. Karayolu koridorunun projelendirilmesi ve proje kapsamında yapılan hacim hesapları SAM kullanılarak yapılmıştır. Ayrıca SAM'ın hacim hesapları üzerindeki etkisi, 12 farklı enterpolasyon yöntemi kullanılarak araştırılmıştır.

Uygulamanın ilk aşamasında karayolu koridorunu mevcut durumunu ifade eden dayanak noktaları kullanılarak bu koridoru temsil edecek yüzeyler oluşturulmuş ve bu yüzeylerin dayanak noktaları ile uyumu, çakışma artıklarının KOH değerlerine göre test edilmiştir. 12 farklı enterpolasyon yöntemi ve farklı yüzey örnekleme aralıkları ile yapılan uygulama sonucuna göre;

- Yüzey örnekleme aralığı için en küçük çakışma artığı ve KOH değerlerinin elde edildiği değer olan 5m seçilmiştir. Sonuçlara bakıldığında, yüzey örnekleme aralığının azalmasına paralel olarak çakışma artığı ve KOH değerlerinin azaldığı söylenebilir. Ancak örnekleme aralığının azalması ile araziye uygulanabilirlik ve hesap yükü bakımından bir takım zorluklar yaşanabilir.
- Polinomal regresyon, hareketli ortalama ve veri ölçmeleri yöntemleri ile elde edilen KOH değerleri, bu yöntemlerin karayolu koridorunu yeterince temsil edemediklerini göstermiş ve söz konusu yöntemler hacim hesabından önce elenmiştir. Bu yöntemler nokta enterpolasyonundan çok veriler hakkında bilgi edinmek ve bölgesel veri boşluklarını doldurmak amacıyla kullanılabilir.

Uygulamanın ikinci aşamasında geriye kalan 9 enterpolasyon yöntemi kullanılarak çakışma artıkları ve KOH değerlerinin azaltılması amaçlanmıştır. Bu amaçla öncelikle karayolu koridoru kapalı bir çoklu doğru ile sınırlanarak, yüzey verilerinin dayanak noktası bulunmayan bölgelerde oluşması engellenmiştir. Bu işlemin ardından her bir enterpolasyon yöntemi ayrı ayrı değerlendirilmiştir. Yapılan uygulama sonuçlarına göre;

- Ağırlıklı ortalama yönteminde KOH değerlerinin ağırlık kuvvetinin artışına bağlı olarak azaldığı görülmüştür. Bu yöntemde ağırlıklar mesafenin tersine göre belirlenmekte ve uzaktaki noktaların ağırlığı da buna bağlı olarak azalmaktadır. Bu nedenle kritik daire kullanımı sonucu etkilememiştir.
- Kriging yönteminde verilerin dağılım modelinin bilinmesi önemlidir. Bu amaçla veriler test edilmiş ve normal dağılımlı olmadıkları anlaşılmıştır. Bunun ardından verilere karekök dönüşümü uygulanmış ve yön bağımlılık dikkate alınarak farklı yönlere göre deneysel variogramlar oluşturulmuştur. Teorik variogram parametrelerinin belirlenmesinde tepe varyans (C) ve etki mesafesi (a) değerleri bilinmeyen kabul edilmiş ve yönsel bağımlılığının kuvvetli olduğu yöndeki verilere daha fazla ağırlık verilerek enterpolasyon yapılmıştır. Çalışma alanının koridor şeklinde uzanması ve yön bağımlılığının birden fazla yönde bulunması, uygulanan ağırlık oranının artırılmasını engellemiştir. Geniş arazilerde daha iyi sonuçlar alınabilir.
- En küçük eğrilik yönteminde yüzeyin doğruluğu sınır ve iç gerilme katsayıları ile arttırılmaya çalışılmıştır. Bu değerler büyüdükçe, yüzeyde oluşan eğilme ya da bükülmeler azalmaktadır. Yapılan enterpolasyon sonuçları, sınır bölgelerde daha fazla salınım olduğunu işaret etmektedir. Çalışma bölgesinin sınırlarının gerekenden bir miktar geniş tutulması, sınıra yakın bölgelerde oluşan salınımların çalışma alanının dışında bırakılmasında faydalı olabilir.
- En yakın komşuluk yönteminde her bir yüzey noktası kendisine en yakın dayanak noktasının yükseklik değerini alır. Bu nedenle yöntemin doğruluğu dayanak noktalarının dağılımına ve yoğunluğuna bağlıdır. Veri yoğunluğunun az olduğu uygulamalarda kritik daire kullanılarak yöntemin doğruluğu arttırılabilir. Ancak bu durumda da veri boşluklarının kontrol edilmesi gerekmektedir. Bu çalışmada nokta yoğunluğunun 40m ve üzerindeki kritik daire yarıçapları için yeterli olduğu görülmüştür.
- Doğal komşuluk yöntemi ile yapılan enterpolasyonlarda üçgenlemede kullanılacak noktaların ağırlıklarındırılması yön bağımlı ve yön bağımsız olarak ele alınmıştır. Ancak veriler birden çok yönlerde anizotropik olduğundan sadece 150° yönünde uygulanan ağırlık oranı (2), sonucu olumsuz yönde etkilemiş ve yön bağımlı enterpolasyon sonuçlarında KOH değerinde azalma gözlenememiştir.

- Lineer enterpolasyon ile üçgenlemede özellikle fazla girintili çıkıntılı arazilerin sınıra yakın bölgelerinde gereksiz ve yanıltıcı üçgenler oluşabilir. Bu çalışmada enterpolasyonla yanlış bilgi elde etmemek için bu üçgenler dışarıda kalacak şekilde veri alanı sınırlandırılarak enterpolasyon yapılmıştır.
- Modified Shepard's yönteminde farklı komşu nokta sayılarına göre enterpolasyon yapılmış, kuadratik nokta sayısı 18 ve ağırlıklandırılan nokta sayısı 9 seçilen enterpolasyon sonucunda daha küçük KOH değeri elde edilmiştir.
- Uzunluk temelli fonksiyonlar yönteminde farklı enterpolasyon fonksiyonları ile yumuşatma parametreleri ( $c^2$ ) kullanılmış,  $c^2 = 0,5$  değerine göre en iyi sonuç Natural cubic spline yöntemi ile elde edilmiştir. Yöntemin doğruluğu yumuşatma parametresinin seçimine bağlı olarak değişmektedir.
- Lokal polinomlar yönteminde 1., 2. ve 3. derece polinomlara göre farklı ağırlık kuvvetleri kullanılarak enterpolasyon yapılmıştır. Polinom derecesi ve ağırlık kuvveti artışına bağlı olarak KOH değerlerinin azaldığı görülmüştür.

Enterpolasyon sonuçlarının genel değerlendirmesi yapıldığında Kriging yönteminin en iyi KOH değeri ( $\pm 0,148$  m ) ile en doğru sonucu verdiği belirlenmiştir. Bu yöntemde çakışma artıklarının % 71'lik kısmı (2144 nokta)  $\pm 0,050$  m aralığındadır. Çakışma artıklarının % 98'i (2940 nokta) ise  $\pm 0,500$  m aralığında bulunmaktadır.

Çalışmanın son kısmında Kriging yöntemi ile elde edilen arazi yüzey verileri doğru kabul edilmiş ve karayolu platformunu ifade eden yüzey (üst yüzey) ile her bir yöntemle elde edilen en iyi KOH değerine sahip arazi yüzey verileri (alt yüzeyler) arasında paralel kesitler yöntemine göre hacim hesapları yapılmıştır. Bu hesaplarda yarma ve dolgu hacmi toplamları toprak işi hacmi olarak ifade edilmiştir. Buna göre, Uzunluk Temelli Fonksiyonlar ve Modified Shepard's yöntemleri ile üretilen yüzey verileri kullanılarak yapılan toprak işi hacim hesaplarının % 1'in altındaki hata oranıyla hesaplandığı görülmektedir. Bu bağlamda, araziyi iyi temsil eden yüzeylerle yapılan hacim hesaplarının, gerçek hacim değerine oldukça yakın sonuçlar verdiği söylenebilir. Diğer yöntemler ile elde edilen hacim sonuçları ortalama %95 oranında Kriging yöntemine uyumlu sonuçlar vermiştir.

Bu çalışmada birbirinden farklı hacim değerleri elde edilmesi, SAM'ın karayolu projelerindeki hacim hesap sonuçlarını etkilediğini göstermektedir.

**KAYNAKLAR**

- Abdikan, S., 2007, SAR Görüntülerinden Üretilen İnterferometrik ve Stereo Sayısal Yükseklik Modellerinin Kalitesinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 3-8
- Açıkgöz, M., 2002, İzmit Deprem Anı Yer Değiştirmelerinin Modellenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul
- Alkanalka, E., 2005, Kestirim Metodlarının Sayısal Yükseklik Modeli Üzerindeki Uygulamaları, Yüksek Lisans Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 14-15
- Alkış, A., 1997, Sayısal Arazi Modeli Ders Notları, YTÜ, İstanbul
- An, B., 2007, Açık Maden İşletmelerinde Jeodezik Uygulamalar, Yüksek Lisans Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 29-36
- Arslanberk, L., 2009, Farklı Kaynaklardan Elde Edilen Sayısal Yükseklik Modellerinin Ortofoto Doğruluğuna Etkilerinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Afyon, 78-79
- Arslanoğlu, M., ve Özçelik, M., 2005, Sayısal Arazi Yükseklik Verilerinin İyileştirilmesi, *10. Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı*, Ankara, 306-313
- Avcı, Ü., 2010, İki Yüzey Arasında Hacim Hesabı Yapan Program ve Algoritma Geliştirme, Yüksek Lisans Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya, 2-18
- Bayrak, T., 1996, Sayısal Yükseklik Modellerinde İnterpolasyon Yöntemlerinin Karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, *Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Trabzon, 3-10
- Basso, K., De Avila Zingano P. R., Dal Sasso Freitas, C. M., 1999, Interpolation of Scattered Data: Investigating Alternatives for the Modified Shepard Method, *Computer Graphics and Image Processing, Proceedings XII Brazilian Symposium*, Brazil, 39-47
- Başkan, O., 2004, Gölbaşı Yöresi Topraklarının Mühendislik-Fiziksel Özellik İlişkilerinde Jeostatistik Uygulaması, Doktora Tezi, *Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 41-46
- Briggs, I. C., 1974, Machine Contouring Using Minimum Curvature, *Geophysics*, 39, 1, 39-48.
- Büyüköztürk, Ş., 2010, Sosyal Bilimler İçin Veri Analizi El Kitabı, *Pagem Yayıncılık*, Ankara
- Carlson, R. E. and Foley, T. A., 1991, The Parameter  $R^2$  in Multiquadric İnterpolation, *Computers & Mathematics with Applications*, vol. 21, no 9, 29-42

- Ceylan, A., Mutluoğlu, Ö., Günaslan, R., 2005, 1/1000 Ölçekli Kadastro Paftalarının Kartografik Yöntemlerle Sayısal Hale Dönüştürülmesi Ve Doğruluk Analizi, *10.Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı*, Ankara, 233-240
- Ceylan, A., Üstün, A., Doğanalp, S., Gürses, H. B., 2011, Karayolu ve Demiryolu Projelerinde Ortometrik Yükseklik Hesabı: En küçük Kareler ile Kollokasyon, *13.Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı*, Ankara, 1-8
- Çakır, L., 2005, Sayısal Yükseklik Modellerinde Hacim Hesapları ve Kullanılan Enterpolasyon Yöntemlerinin Karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, *Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Trabzon, 8-9
- Çetinkaya, H., 2006, Lidar İçin Optik Sistem Tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 11-12
- Demirci, F., 2008, Filyos Havzasındaki Sediment Birikim Alanlarının Uydu Görüntü Verileri ve Sayısal Arazi Modeli İle Analizi, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 45-62
- Doğru, A., Özener, H., 2011, GPS ve INSAR ile Yer Değiştirmelerin Belirlenmesi, *13.Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı*, Ankara, 277-282
- Dressler, M., 2009, Art of Surface Interpolation, Kunštát, [online], <http://m.dressler.sweb.cz/AOSIM.pdf>, [16 Kasım 2012]
- El Sheimy, N., Valeo, C. and Habib, A., 2005, Digital Terrain Modeling: Acquisition, Manipulation And Applications, *Artech House*, Boston, 2-18
- Erdoğan, M., 2007, Veri Türü, Kalitesi ve Üretim Yöntemine Göre Sayısal Yükseklik Modeli (SYM) Standartlarının Belirlenmesi, Doktora Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 25-36
- Erdoğan, M. ve Toz, G., 2008, Hava Fotoğraflarından Sayısal Yükseklik Modeli Üretimi ve SYM Doğruluğu Modellemesi, *Harita Dergisi*, 140, 16
- Franke, R., and Nielson, G., 1980, Smooth Interpolation of Large Sets of Scattered Data, [online], <http://archive.org/stream/smoothinterpolat00fran#page/n1/mode/2up>, [25 Ocak 2013]
- Genceli, M., 2007, Tek Değişkenli Dağılımlar İçin Kolmogorov-Smirnov, Lilliefors ve Shaphiro-Wilk Normallik Testleri, *Yıldız Teknik Üniversitesi Sigma Dergisi*, Cilt 25, Sayı 4, 306-328
- Golden Software, Surfer 9 Programı Yardım Menüsü
- Güler, A., 1985, Sayısal Arazi Modellerinde İkili Enterpolasyon Yöntemi İle Denemeler, *Harita ve Kadastro Mühendisleri Dergisi*, 52-53, 98-118
- Gürsoy, Ö., 2006, Almus Fay Zonu (AFZ)'nin Jeolojik Özelliklerinin Uzaktan Algılama Yöntemleri ve Sayısal Arazi Modeli ile İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 39-40

- Hardy, R. L., 1971, Multiquadric Equations of Topology and Other Irregular Surfaces, *Journal of Geophysical Research*, Vol 76, No 8, 1905-1915
- Isaaks, E. H., Srivastava, R. M. 1989, An Introduction to Applied Geostatistics, Oxford University Press, New York, 561
- İnal, C., Turgut, B., Yiğit, C. Ö., 2002, Lokal Alanlarda Jeoit Ondülasyonlarının Belirlenmesinde Kullanılan Enterpolasyon Yöntemlerinin Karşılaştırılması, [online], [http://www.harita.selcuk.edu.tr/arsiv/semppdf/97\\_106.pdf](http://www.harita.selcuk.edu.tr/arsiv/semppdf/97_106.pdf), [15 Şubat 2013]
- İnal, C., Yiğit C. Ö., 2004, Jeodezik Uygulamalarda Kriging Enterpolasyon Yönteminin Kullanılabilirliği, Coğrafi Bilgi Sistemleri ve Jeodezik Ağlar Çalıştayı, Konya, 177-185
- Journel, A.G. and Huijbregts, C.H.J, 1978, Mining Geostatistics, Academic Press, London
- Kahveci, M., 2009, Kinematik GNSS ve RTK CORS Ağları, *Zerpa Turizm Yayıncılık*, Ankara, 21-24
- Kahveci, M., Yıldız, F., 2009, GPS/GNSS Uydularla Konum Belirleme Sistemleri, *Nobel Yayın Dağıtım*, Ankara, 126-137
- Karagöz, Ö., 2008, Modern Kartografik Yönelimlerde Raster-Vektör Dönüşüm Algoritmaları Ve Örnek Uygulaması, Yüksek Lisans Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya, 61-62
- Kayalar, F., Uysal, M., Varlık, A. ve Can, Z. C., 2003, Dijital Ortofoto Üretimi, *Harita Dergisi*, 130, 48-55
- Keçeci, S. B., 2011, Sayısal Yükseklik Modellerinin Oluşturulmasında Kullanılan Enterpolasyon Yöntemlerinin Karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, *Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Samsun, 61-71
- Kiracı, A. C., İşcan, L., Eker, O., Yılmaz, A., Özerbil, T., Maraş, H., Fırat, O. ve Akabalı, A., 2010, Sayısal Hava Kamerası ve Fotogrametriye Kazandırdıkları, *Harita Dergisi*, 143, 26
- Koçak, E., 1988, Sayısal Arazi Modeli Yüksek Lisans Ders Notları, ZKÜ, Zonguldak
- Konuk, A., 2011, Coğrafi Bilgi Sistemleri İçin Temel İstatistik, Anadolu Üniversitesi Yayını no: 2326, Eskişehir, 144-164
- Koparan C. Y., 2006, Karayolu Projelendirilmesinde Kullanılan Grafik Tasarım Programlarının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Zonguldak, 16-40
- Köroğlu, S., 2006, Farklı Enterpolasyon Yöntemlerinin Hacim Hesabına Etkisinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 4-16

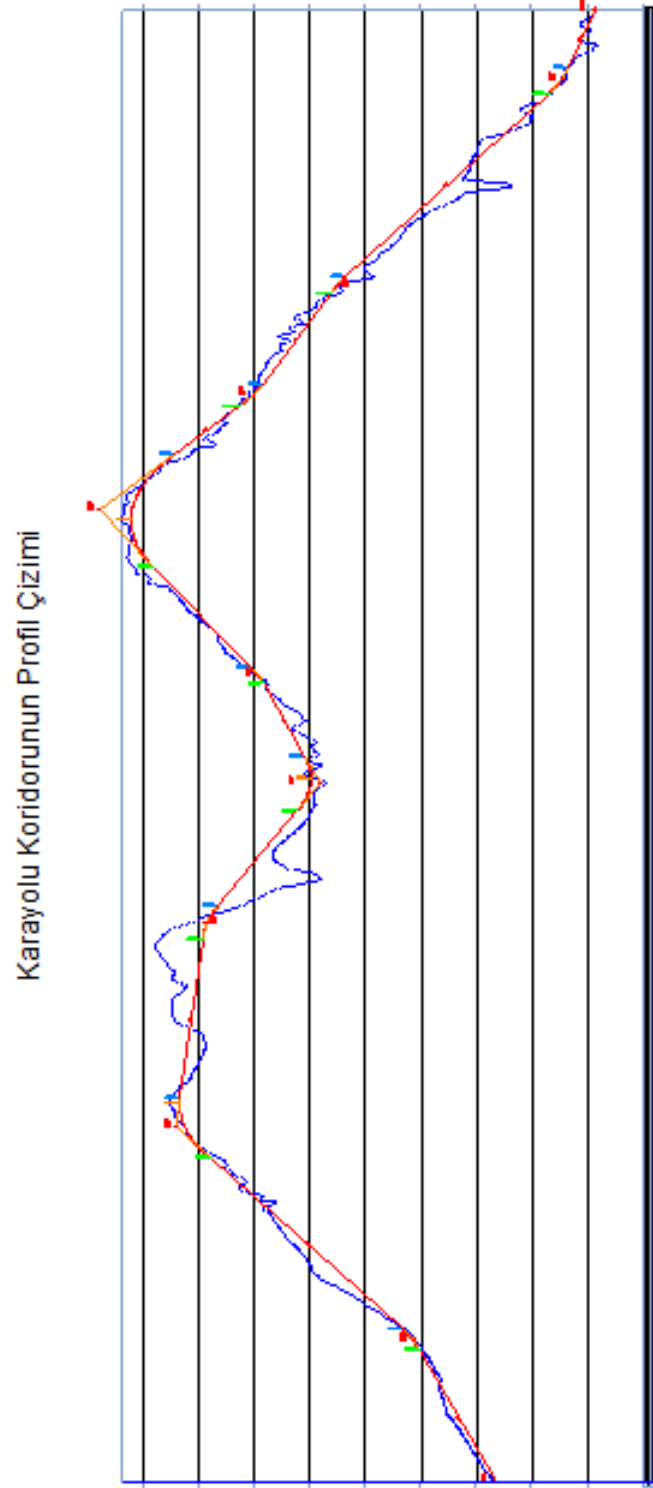
- Köse, M. H., 2006, Uydu Radar Görüntülerinden Üç Boyutlu Sayısal Arazi Modeli Üretilmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya, 25-54
- Kureş, L., 2006, İki Boyutlu Üçgenleştirme Algoritmaları, Yüksek Lisans Tezi, *Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 32
- Laberl, F., 1973, Interpolation In a Square Grid DTM, *ITC Journal*, 1973-75
- Li, Z., Zhu, Q. and Gold, C., 2004, Digital Terrain Modelling Principles and Methodology, CRC Press., 31-62, 159-190
- Liu, K., Sessions J., 2003, Preliminary Planning of Road Systems Using Digital Terrain Models, *Journal of Forest Engineering*, volume 4, number 2, 27-32
- Louie, J. N., 2001, Surfer Gridding (Golden Software), [online], <http://crack.seismo.unr.edu/ftp/pub/louie/class/333/contour/surfer.pdf>, [25 Şubat 2013]
- Martensson S.G., 2002, Height Determination By GPS-Accuracy with Respect to Different Geoid Models in Sweden, *FIG XXII International Congress*, Washington DC.USA, 19-26
- Mekik, Ç., Arslanoğlu, M., 2003, Gerçek Zamanlı Kinematik GPS Konumlarının Doğruluk Analizi ve Bir Örnek Uygulama, *9. Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı*, Ankara, 549-558
- Mutluoğlu, Ö., Ceylan, A., 2004, CBS İçin Konumsal Verilerin Elde Edilmesinde GZK GPS Yönteminin Klasik Jeodezik Yönteme Göre Doğruluk Ve Maliyet Analizlerinin Karşılaştırılması, *Selçuk Üniversitesi Yüksekokulu Teknik-Online Dergi*, Cilt 3, Sayı:1, 41-51
- Mutluoğlu, Ö., Yakar, M., Yılmaz, H. M., 2011, Mono GeoEye - 1 Uydu Görüntüsünün Geometrik Doğruluğunun Araştırılması, *13. Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı*, Ankara, 249-250
- Origin Software, Gridding Methods for Randomly Spaced Data, [online] [http://www.originlab.com/www/helponline/Origin/en/UserGuide/Gridding\\_Methods\\_for\\_Randomly\\_Spaced\\_Data.html](http://www.originlab.com/www/helponline/Origin/en/UserGuide/Gridding_Methods_for_Randomly_Spaced_Data.html) , [03 Mart 2013]
- Özer, H., 1989, Sayısal Arazi Modeli Oluşturma Yöntemleri, *Harita Dergisi*, 102, 15
- Özgen, M. G., Öztan, O., 1988, Kartometri, *İ.T.Ü Matbaası*, İstanbul
- Öztaş, T., 1995, Jeostatistiğin toprak bilimindeki önemi ve uygulanışı, *İlhan Akalan Toprak ve Çevre Sempozyumu*, Ankara, Cilt I, 271-280
- Öztürk, E., 2006, Farklı Kaynaklardan Değişik Yöntem ve Ölçeklerde Üretilen Sayısal Yükseklik Modellerinin Doğruluk Araştırması, Yüksek Lisans Tezi, *Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Zonguldak, 42-46

- Petrie, G. and Kennie, T. J. M., 1986, Terrain modelling in surveying and civil engineering, [online], Glasgow, Glasgow University, [http://web2.ges.gla.ac.uk/~gpetrie/Petrie\\_Kennie\\_Terrain\\_Modelling\\_C-A-Design\\_1987.pdf](http://web2.ges.gla.ac.uk/~gpetrie/Petrie_Kennie_Terrain_Modelling_C-A-Design_1987.pdf) [17 Ocak 2011]
- Pırtı, A., 2009, Mühendislik Ölçmelerinde Gerçek Zamanlı Kinematic GPS (GZK GPS) Ders Notları, YTÜ, İstanbul, 15
- Polat, O., 2002, Golden Software Surfer v8.01 Kullanım Kılavuzu Üzerine Notlar, [online], <http://www.dicle.edu.tr/a/oakkoyun/dersler/mds412files/SK.pdf> [14 Ekim 2012]
- Renka, R. J., 1988, Multivariate Interpolation of Large Sets of Scattered Data, *Association for Computing Machinery (ACM) Transactions on Mathematical Software*, 14, 2, 139-148
- Saygılı, A., 2008, SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) Verilerinden Elde Edilen Sayısal Yükseklik Modellerinin Doğruluğunun İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 26-27
- Soycan, A. ve Soycan, M., 2002, Yol Projelerinde Sayısal Arazi Modellerinin Kullanılması, *Selçuk Üniversitesi Jeodezi ve Fotogrametri Mühendisliği Öğretiminde 30.yıl Sempozyumu*, Konya, 495-504
- Smith, W. H. F. and Wessel, P., 1990, Griding with Continuous Curvature Splines in Tension, *Geophysics*, 55, 3, 293-305
- Şahin, İ., 2007, Farklı Kaynaklardan Elde Edilen Sayısal Yükseklik Modellerinin Ortofoto Doğruluğuna Etkisinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya, 20-21
- Şanlı, F. B., 2006, Stereoskopik Radarsat F1-F5 Görüntülerinden Üretilen Sayısal Arazi Modellerinin Değerlendirilmesi, *HKM Jeodezi, Jeoinformasyon ve Arazi Yönetimi Dergisi*, 94, 40-48
- Şengül, Y. S., 2010, InSAR Ölçülerinin Doğruluk Araştırması, *Harita Dergisi*, 143, 19
- Tercan, A. E., Saraç, C., 1998, Maden Yataklarının Değerlendirilmesinde Jeostatistiksel Yöntemler, Maden Mühendisleri Odası Yayınları, Ankara, 21-26
- Topaloğlu, V., 2007, Yapay Sinir Ağları İle Dalga Yüksekliği Tahmini, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 17
- Trangmar, B. B., Yost, R.J., Wehara, G., 1985, Application of geostatistics to spatial studies of soil properties, *Advances in Agronomy*, Vol 38, 65-91
- Uyar, H., 2005, Jeovar3: Jeostatistiksel Variogram Analizleri ve Kriging Teknikleri Bilgisayar Yazılımı, Yüksek Lisans Tezi, *Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 4-11
- Üstün, A., 2001, GPS Nivelmanı Yardımıyla Ortometrik Yüksekliklerin Elde Edilmesine Yönelik Jeoit Belirleme Yöntemleri, *YTÜ Dergisi*, (1), 62-82



- Üstüntaş, T., 1994, Sayısal Arazi Modellerinde Hassasiyet Analizi ve Enterpolasyon Yöntemleri, Yüksek Lisans Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya, 7-17
- Üstüntaş, T., 2006, Sayısal Arazi Modellerinde Bazı Enterpolasyon Yöntemlerinin Karşılaştırılması, *Selçuk Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu Teknik Online Dergisi*, Cilt 5, Sayı 2, 41-48
- Wang, J. G., and Liu, G. R., 2002, A Point Interpolation Meshless Method Based on Radial Basis Functions, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 54, 1623-1648
- Webster, R. and Burgess, T.M., 1980, Optimal Interpolation and Isarithmic Mapping of Soil Properties III, Changing Drift and Universal Kriging, *Journal of Soil Science*, 31; 505-524
- Weibel, R. and Heller, M., 1991, Digital Terrain Modeling. In: Maguire, D.J., Goodchild, M.F. and Rhind, D.W. (eds.). *Geographical Information Systems: Principles and Applications*, London: Longman, 269-297
- Yanalak, M., 1991, Sayısal Arazi Modelleri ve Kullanılan Enterpolasyon Yöntemleri, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 14-19
- Yanalak, M., 1997, Sayısal Arazi Modellerinden Hacim Hesaplarında En Uygun Enterpolasyon Yönteminin Araştırılması, Doktora Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 3-54
- Yanalak, M., 2002a, Yön ve Ters Uzaklık Ağırlıklı Ortalama ile Enterpolasyon, *Harita Dergisi*, 127, 55
- Yanalak, M., 2002b, Sayısal Arazi Modellerinde Yükseklik Enterpolasyonu, *Harita Dergisi*, 128, 44-58
- Yang, B., 2005, An Integrated TIN and Grid Method for Constructing Multi-resolution Digital Terrain Models, *International Journal of Geographical Information Science*, 19:10, 1019-1038
- Yang, C. S., Kao, S. P., Lee, F. B., Hung, P. S., 2004, Twelve Different Interpolation Methods: A Case Study of Surfer 8.0, *Proceedings of The XXth ISPRS Congress*, İstanbul, 778-785
- Yaprak, S., 2007, Kriging Yönteminin Geoit Yüzeyi Modellemesinde Kullanılabilirliğinin Araştırılması ve Varolan Yöntemlerle Karşılaştırılması, Doktora Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 31-35
- Yastıklı, N., Jacobsen, K., 2003, Automatic Digital Elevation Model Generation, Problems and Restrictions in Urban Areas, *YTÜ dergisi*, sayı:2003-2, 38-46
- Yener, H., 1993, Sayısal Arazi Modelleri, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 7-23

- Yıldırım, A. ve Şeker, D. Z., 2006, Fotogrametrik Harita Üretiminde Kullanılan Görüntülerin Maliyet Analizi, *İTÜ derdisi/d*, 5, 1, 83-90
- Yiğit, C. Ö., 2003, Elipsoidal Yüksekliklerin Ortametrik Yüksekliğe Dönüşümünde Kullanılan Enterpolasyon Yöntemlerinin Karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya, 22-23
- Yüksekkaya, A., 2006, Dijital Görüntüler Kullanılarak Sayısal Arazi Modellerinin (DTM) Oluşturulması, Yüksek Lisans Tezi, *Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Samsun, 5-6
- Zhu, Q., Sun, M., Chen, X., Zhang, Z., Mao, X., Wen, Y., 2009, Rainfall Runoff Simulation Based on Dynamic Digital Terrain Model, *Bioinformatics and Biomedical Engineering 3rd International Conference*, Beijing, China, 1-4

**EKLER****EK-1 Karayolu Projesinin Boykesiti**

## ÖZGEÇMİŞ

### KİŞİSEL BİLGİLER

**Adı Soyadı** : Mehmet DOĞRULUK  
**Uyruğu** : TC  
**Doğum Yeri ve Tarihi** : Kahramanmaraş 05.07.1982  
**Telefon** : 0312 2372702  
**Faks** :  
**e-mail** : mehmetdogruluk@hotmail.com

### EĞİTİM

| Derece        | Adı, İlçe, İl                         | Bitirme Yılı |
|---------------|---------------------------------------|--------------|
| Lise          | : Fatih Lisesi, Merkez, Kahramanmaraş | 2000         |
| Üniversite    | : Selçuk Üniversitesi, Merkez, Konya  | 2006         |
| Yüksek Lisans | :                                     |              |
| Doktora       | :                                     |              |

### İŞ DENEYİMLERİ

| Yıl       | Kurum                         | Görevi            |
|-----------|-------------------------------|-------------------|
| 2006-2008 | Fermak İnş. Taah. A.Ş         | Harita Mühendisi  |
| 2008-2011 | Süleyman Demirel Üniversitesi | Öğretim Görevlisi |
| 2011-2013 | Hacettepe Üniversitesi        | Öğretim Görevlisi |

### UZMANLIK ALANI

CAD, Modelleme, Karayolu İnşaatı

### YABANCI DİLLER

İngilizce