

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

HARİTA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**İHA TABANLI 3 BOYUTLU NOKTA BULUTLARINDA ZEMİN ÜSTÜ NOKTA
FİLTRELEME ALGORİTMALARININ VE SAM ÜRETME YÖNTEMLERİNİN
KARŞILAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Harita Müh. Çiğdem ŞERİFOĞLU

**MAYIS 2016
TRABZON**



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde

Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : / /

Tezin Savunma Tarihi : / /

Tez Danışmanı :

Trabzon

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**Harita Mühendisliği Anabilim Dalında
Çiğdem ŞERİFOĞLU Tarafından Hazırlanan**

**İHA TABANLI 3 BOYUTLU NOKTA BULUTLARINDA ZEMİN ÜSTÜ NOKTA
FİLTRELEME ALGORİTMALARININ VE SAM ÜRETME YÖNTEMLERİNİN
KARŞILAŞTIRILMASI**


başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 03 / 05 / 2016 gün ve 1651 sayılı
kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda
YÜKSEK LİSANS TEZİ
olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan : Doç. Dr. Oğuz GÜNGÖR

Üye : Doç. Dr. Levent TAŞÇI

Üye : Yrd. Doç. Dr. Esra TUNÇ GÖRMÜŞ


Prof. Dr. Sadettin KORKMAZ

Enstitü Müdürü

ÖNSÖZ

“İHA Tabanlı 3 Boyutlu Nokta Bulutlarında Zemin Üstü Nokta Filtreleme Algoritmalarının ve SAM Üretme Yöntemlerinin Karşılaştırılması” başlıklı çalışma Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Harita Mühendisliği Anabilim Dalında yüksek lisans tezi olarak hazırlanmıştır.

Tez süreci boyunca bilgi birikimini, tecrübesini ve sabrını benden esirgemeyen, fikirleri ile vizyonumu her geçen gün geliştirmeyi hedefleyen çok değerli tez danışmanım Doç. Dr. Oğuz GÜNGÖR’ e en içten teşekkürlerimi sunarım.

Tez döneminde zaman zaman desteğini gördüğüm mesai arkadaşım Arş. Gör. Selma ZENGİN KAZANCI’ ya teşekkürlerimi sunarım.

Tez dönemi boyunca tecrübesini ve sabrını benden esirgemeyen, her zaman yanımda olan sevgili nişanlım Arş. Gör. Volkan YILMAZ ‘a teşekkürü borç bilirim.

Son olarak bugünlere gelmemde büyük pay sahibi olan ve maddi manevi desteklerini her zaman hissettiğim aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Çiğdem ŞERİFOĞLU

Trabzon 2016

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “İHA TABANLI 3 BOYUTLU NOKTA BULUTLARINDA ZEMİN ÜSTÜ NOKTA FİLTRELEME ALGORİTMALARININ VE SAM ÜRETME YÖNTEMLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Doç. Dr. Oğuz GÜNGÖR’ ün sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarında yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 02.05.2016

Çiğdem ŞERİFOĞLU

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No.</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	I V
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VII
SUMMARY	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ	IX
TABLolar DİZİNİ.....	XII
SEMBOLLER DİZİNİ	XIII
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Sayısal Yükseklik Modelleri.....	2
1.3. Nokta Bulutu Filtrelemesi.....	3
1.4. Enterpolasyon	5
1.5. Problemin Tanımı	9
1.6. Çalışmanın Amacı.....	9
1.7. Metodoloji.....	10
2. FİLTRELEME YÖNTEMLERİ.....	11
2.1. Progressive Morphological (PM) Filtreleme Yöntemi	11
2.2. Maksimum Lokal Eğim (MLS) Filtreleme Yöntemi	16
2.3. Elevation Threshold with Expand Window (ETEW) Filtreleme Yöntemi..	17
2.4. Adaptive TIN (ATIN) Filtreleme Yöntemi	18
3. ENTERPOLASYON YÖNTEMLERİ	21
3.1. Polinomlarla Enterpolasyon.....	21
3.1.1. Ortogonal Polinomlarla Enterpolasyon.....	21
3.1.1.1. Linear Yüzey ile Enterpolasyon.....	22
3.1.1.2. Kuadratik Yüzey ile Enterpolasyon	23
3.1.1.3. Kübik Yüzey ile Enterpolasyon	24
3.1.2. Ortogonal Olmayan Polinomlarla Enterpolasyon.....	25
3.1.2.1. Bi-linear Yüzey ile Enterpolasyon.....	26

3.1.2.2.	Bi-kuadratik Yüzey ile Enterpolasyon	27
3.1.2.3.	Bi-kübik Yüzey ile Enterpolasyon	28
3.2.	Ters Mesafe Ağırlıklı Yöntem (IDW/Inverse Distance Wighted)	29
3.2.1.	Shepard Yöntemi	29
3.3.	Radyal Tabanlı Fonksiyonlar (RTF) ile Enterpolasyon.....	30
3.4.	Kriging Enterpolasyon Yöntemi	34
3.4.1.	Ordinary Kriging.....	39
4.	YAPILAN ÇALIŞMALAR	42
4.1.	Çalışma Alanı.....	42
4.2.	Ortofoto ve Nokta Bulutlarının Üretilmesi	42
4.3.	Nokta Bulutlarının Filtrelenmesi	43
4.3.1.	PM Filtreleme Yönteminin Uygulaması	43
4.3.2.	MLS Filtreleme Yönteminin Uygulaması.....	44
4.3.3.	ETEW Filtreleme Yönteminin Uygulaması.....	45
4.3.4.	ATIN Filtreleme Yönteminin Uygulaması.....	46
4.4.	Polinomlarla Enterpolasyon Uygulamaları	47
4.4.1.	Ortogonal Polinomlarla Enterpolasyon.....	47
4.4.2.	Ortogonal Olmayan Polinomlarla Enterpolasyon	48
4.4.3.	Shepard Enterpolasyon Yöntemi Uygulaması	48
4.4.4.	Radyal Tabanlı Fonksiyonlar ile Enterpolasyon Uygulaması	48
4.4.5.	Ordinary Kriging Enterpolasyon Uygulaması	49
5.	BULGULAR.....	52
5.1.	Filtreleme Yöntemlerinin Doğruluk Analizi	52
5.2.	Filtreleme Sonuçları.....	55
5.2.1.	Niteliksel Değerlendirme Sonuçları.....	55
5.2.2.	Niceliksel Değerlendirme Sonuçları	61
5.3.	Filtreleme Sonuçlarının Enterpolasyonu ile SAM Üretimi	65
5.4.	Enterpolasyon Yöntemlerinin Doğruluk Analizi	66
5.5.	Enterpolasyon Yöntemlerinin Sonuçları.....	67
6.	SONUÇ VE ÖNERİLER.....	81
7.	KAYNAKLAR	83

ÖZGEÇMİŞ

Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

İHA TABANLI 3 BOYUTLU NOKTA BULUTLARINDA ZEMİN ÜSTÜ NOKTA
FİLTRELEME ALGORİTMALARININ VE SAM ÜRETME YÖNTEMLERİNİN
KARŞILAŞTIRILMASI

Çiğdem ŞERİFOĞLU

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Harita Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Doç. Dr. Oğuz GÜNGÖR
2016, 90 Sayfa

Bu çalışmada, İnsansız Hava Aracından (İHA) elde edilen 4 farklı yoğunluktaki (ham, düşük yoğunluklu, orta yoğunluklu ve yüksek yoğunluklu veri) nokta bulutu verileri 1 Boyutlu Progressive Morphological (PM1B), 2 Boyutlu Progressive Morphological (PM2B), Maksimum Lokal Eğim (MLS), Elevation Threshold with Expand Window (ETEW) ve Adaptive TIN (ATIN) filtreleme yöntemleri ile filtrelenmiştir. Çalışmada bu yöntemlerin performansları Tip I, Tip II, Toplam hata, Kappa İndeksi ve Ki-kare hata metriklerine göre değerlendirilmiştir. En yüksek doğruluk ile filtrelenen verinin MATLAB ortamında 16 farklı yöntem ile enterpolasyonu ile çalışma bölgesine ait Sayısal Arazi Modeli (SAM) üretilmiştir. SAM' in üretilmesi amacıyla ortogonal (lineer, kuadratik, kübik) ve ortogonol olmayan (bi-lineer, bi-kuadratik, bi-kübik) polinomlarla enterpolasyon, Shepard yöntemi, Radyal Tabanlı Fonksiyonlar (multikuadratik-dairesel dik koni, multikuadratik-dairesel paraboloid, multikuadratik-iki yapraklı dairesel hiperboloid, ters multikuadratik, gauss, kübik splayn, doğal kübik splayn, multilog) ile enterpolasyon ve Ordinary Kriging (OK) enterpolasyon yöntemleri kullanılmıştır. Üretilen SAM' in düşey hassasiyeti arazide yapılan yersel ölçümlerle kontrol edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre İHA tabanlı nokta bulutu ile SAM üretiminin LİDAR (Light Detection and Ranging)' a alternatif olup olamayacağı irdelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: İnsansız Hava Aracı, Nokta Bulutu, Filtreleme, Enterpolasyon, Sayısal Arazi Modeli

Master Thesis

SUMMARY

COMPARISON OF THE GROUND FILTERING AND DTM GENERATION
ALGORITHMS ON UAV-BASED 3D POINT CLOUDS

Çiğdem ŞERİFOĞLU

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Geomatics Engineering Graduate Programme
Supervisor: Assoc. Prof. Oğuz GÜNGÖR
2016, 90 Pages

In this study, 1D Progressive Morphological (PM1D), 2D Progressive Morphological (PM2D), Maximum Local Slope (MLS), Elevation Threshold with Expand Window (ETEW) and Adaptive TIN (ATIN) ground filtering algorithms were used to filter the UAV-based point clouds with four different densities (raw, low-density, medium-density and high-density data). Performances of these algorithms were investigated in terms of the Type I, Type II, Total Error, Kappa Index and Chi-squared values. The DTM (Digital Terrain Model) of the study area was then generated by interpolating the most accurate filtering result in MATLAB environment by using 16 interpolation algorithms namely orthogonal (linear, quadratic, cubic) polynomial interpolation algorithms, non-orthogonal (bi-linear, bi-quadratic, bi-cubic) polynomial interpolation algorithms, Shepard, Radial-basis functions (multiquadratic-circular right cone, multiquadratic-circular paraboloid, multiquadratic-circular hyperboloid of two sheets, inverse multiquadratic, gauss, cubic spline, natural cubic spline, multilog) and ordinary kriging (OK) algorithms. Vertical accuracy of the produced DTM was examined with terrestrial measurements. It was also investigated that whether or not UAV-based point clouds can be used to generate DTMs as an alternative for LiDAR (Light Detection and Ranging) point clouds.

Key Words: Unmanned Aerial Vehicle, Point Cloud, Ground Filtering, Interpolation, Digital Terrain Model

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No.</u>
Şekil 1.	Sayısal yüzey modeli ve sayısal arazi modeli (URL-1)..... 2
Şekil 2.	Kare grid modeli (solda) ve dikdörtgen grid modeli (sağda)..... 3
Şekil 3.	Filtrelenmemiş noktalar, genişletilmiş yüzey ve aşınmış yüzey (Zhang vd., 2003). Filtrelenmemiş noktalar profil boyunca $1 \times 1 \text{ m}^2$ lik hücelere dağıtılmıştır. Eğer bir hücreye birden fazla nokta düşerse yüksekliği en az olan nokta seçilir. İçine nokta düşmeyen hücelere en yakın komşu enterpolasyon yöntemine göre yükseklik değeri atanır (Zhang vd., 2003).. 12
Şekil 4.	Zemin, bina, ağaç, ilk filtrelenen yüzey ve ikinci filtrelenen yüzeyin temsili gösterimi (Zhang vd., 2003). l_1 pencere boyutu kullanılarak uygulanan açınım operasyonu sonucunda ilk filtrelenen yüzey (kesikli çizgi) elde edilmiştir. İlk filtrelenen yüzeye pencere boyutu l_2 olan açınım operasyonu uygulanması ile ikinci filtrelenen yüzey (düz çizgi) elde edilmiştir (Zhang vd., 2003). 12
Şekil 5.	PM filtreleme yönteminin akış diyagramı (Zhang vd., 2003). 14
Şekil 6.	Orijinal nokta bulutu verisi (Solda), nokta bulutu verisi ile grid ağı çakıştırılması (Ortada), her bir grid hücresine yükseklik değerlerinin atanması (Sağda)..... 16
Şekil 7.	Başlangıç zemin noktalarından TIN oluşturulması (URL-1)..... 18
Şekil 8.	Her bir üçgene aday noktaların eklenmesi (mavi noktalar eklenen aday noktaları temsil etmektedir) (URL-2). 19
Şekil 9.	Adaptive TIN filtreleme ile zemin noktası seçimi. Aday nokta ile üçgen yüzey arasındaki mesafe (d) önceden belirlenen eşik değeri ile karşılaştırılarak aday nokta sınıflandırılır. Eğer bu mesafe eşik değerinden küçük ise aday nokta zemin noktası olarak sınıflandırılır. Mesafe eşik değerden büyükse fakat yansıma noktasının mesafesi eşik değerden küçük ise aday nokta yine zemin noktası olarak sınıflandırılır (Zhang ve Cui, 2007). 19
Şekil 10.	Üstten alta doğru sırasıyla lineer, quadratik, kübik ve orijinal yüzeyler (Yiğit, 2003)..... 22
Şekil 11.	Üstten alta doğru sırasıyla bi-lineer, bi-quadratik, bi-kübik ve orijinal yüzeyler (Yiğit, 2003). 26
Şekil 12.	Variogram modeli ve bileşenleri (Açıkgöz, 2002; Alkanalka, 2005)..... 36
Şekil 13.	Yaygın olarak kullanılan 4 variogram modeli (Burrough ve McDonnell, 1998; Kazancı, 2014). 37
Şekil 14.	Çalışma bölgesi 42
Şekil 15.	Deneysel variogram modeli grafiği 50

Şekil 16.	Çalışma bölgesinin ortofoto görüntüsü	56
Şekil 17.	Ham verinin PM1B (a), PM2B (b), MLS (c), ETEW (d) ve ATIN (e) yöntemleriyle filtrelenmesi sonucu elde edilen nokta bulutlarının ortofoto üzerine bindirilmesi	57
Şekil 18.	Düşük yoğunluklu verinin PM1B (a), PM2B (b), MLS (c), ETEW (d) ve ATIN (e) yöntemleriyle filtrelenmesi sonucu elde edilen nokta bulutlarının ortofoto üzerine bindirilmesi	58
Şekil 19.	Orta yoğunluklu verinin PM1B (a), PM2B (b), MLS (c), ETEW (d) ve ATIN (e) yöntemleriyle filtrelenmesi sonucu elde edilen nokta bulutlarının ortofoto üzerine bindirilmesi	59
Şekil 20.	Yüksek yoğunluklu verinin PM1B (a), PM2B (b), MLS (c), ETEW (d) ve ATIN (e) yöntemleriyle filtrelenmesi sonucu elde edilen nokta bulutlarının ortofoto üzerine bindirilmesi	60
Şekil 21.	Hesaplanan Tip I, Tip II ve Toplam Hata değerleri	62
Şekil 22.	Hesaplanan Kappa Değerleri	63
Şekil 23.	Hesaplanan Ki-kare değerleri	64
Şekil 24.	Polinomlarla enterpolasyon yöntemleri için hesaplanan KOH değerleri (m cinsinden).....	68
Şekil 25.	IDW Shephard yöntemi için hesaplanan KOH değerleri (m cinsinden).....	69
Şekil 26.	Radyal tabanlı fonksiyonlar için hesaplanan KOH değerleri (m cinsinden)	70
Şekil 27.	Ordinary Kriging için hesaplanan KOH değerleri (m cinsinden).....	70
Şekil 28.	Ortofotonun lineer enterpolasyon yöntemi ile elde edilen SAM' ın üzerine bindirilmesi	73
Şekil 29.	Ortofotonun kuadratik enterpolasyon yöntemi ile elde edilen SAM' ın üzerine bindirilmesi	73
Şekil 30.	Ortofotonun kübik enterpolasyon yöntemi ile elde edilen SAM' ın üzerine bindirilmesi	74
Şekil 31.	Ortofotonun bi-lineer enterpolasyon yöntemi ile elde edilen SAM' ın üzerine bindirilmesi	74
Şekil 32.	Ortofotonun bi-kuadratik enterpolasyon yöntemi ile elde edilen SAM' ın üzerine bindirilmesi	75
Şekil 33.	Ortofotonun bi-kübik enterpolasyon yöntemi ile elde edilen SAM' ın üzerine bindirilmesi	75
Şekil 34.	Ortofotonun IDW-Shephard enterpolasyon yöntemi ile elde edilen SAM' ın üzerine bindirilmesi	76
Şekil 35.	Ortofotonun RTF-Gauss enterpolasyon yöntemi ile elde edilen SAM' ın üzerine bindirilmesi	76

Şekil 36.	Ortofotonun RTF-Kübik Splayn enterpolasyon yöntemi ile elde edilen SAM' in üzerine bindirilmesi	77
Şekil 37.	Ortofotonun RTF-Ters Kuadratik enterpolasyon yöntemi ile elde edilen SAM' in üzerine bindirilmesi	77
Şekil 38.	Ortofotonun RTF-Multilog enterpolasyon yöntemi ile elde edilen SAM' in üzerine bindirilmesi	78
Şekil 39.	Ortofotonun RTF-Doğal Kübik Splayn enterpolasyon yöntemi ile elde edilen SAM' in üzerine bindirilmesi	78
Şekil 40.	Ortofotonun RTF- Multikuadratik-Dairesel dik koni enterpolasyon yöntemi ile elde edilen SAM' in üzerine bindirilmesi	79
Şekil 41.	Ortofotonun RTF-Multikuadratik-Dairesel paraboloid enterpolasyon yöntemi ile elde edilen SAM' in üzerine bindirilmesi	79
Şekil 42.	Ortofotonun RTF-Multikuadratik-İki yapraklı dairese hiperboloid enterpolasyon yöntemi ile elde edilen SAM' in üzerine bindirilmesi	80
Şekil 43.	Ortofotonun Kriging yöntemi-Ordinary kriging enterpolasyon yöntemi ile elde edilen SAM' in üzerine bindirilmesi	80

TABLULAR DİZİNİ

	<u>Sayfa No.</u>
Tablo 1.	Radyal tabanlı fonksiyon türleri 32
Tablo 2.	δ parametesinin hesaplanması için sunulan öneriler 34
Tablo 3.	Çeşitli variogram modellerinin formülleri (İnal ve Yiğit, 2004). 37
Tablo 4.	PM1B ve PM2B filtreleme yöntemlerinde kullanılan parametreler 44
Tablo 5.	MLS filtreleme yönteminde kullanılan parametreler 45
Tablo 6.	ETEW filtreleme yönteminde kullanılan parametreler 46
Tablo 7.	ATIN filtreleme yönteminde kullanılan parametreler 47
Tablo 8.	Uygulanan enterpolasyon yöntemlerinin çalışma süreleri 51
Tablo 9.	Örnek Kappa hesap tablosu 54
Tablo 10.	Hesaplanan Tip I hata, Tip II hata, Toplam hata, Kappa indeks ve Ki-kare değerleri 65
Tablo 11.	Test bölgeleri için hesaplanan KOH, FSS, OH, OMH, MinH ve MaksH değerleri (m cinsinden) 71

SEMBOLLER DİZİNİ

aATIN	: advance Adaptive TIN
ALDPAT	: Airborne LIDAR Data Processing and Analysis Tools
ALS	: Airborne Lazer Scanning
ATIN	: Adaptive TIN
BCAL	: Boise Center Aerospace Laboratory
BLUE	: Best Linear Unbiased Estimator
BLUP	: Best Linear Unbiased Predictor
DEM	: Digital Elevation Model
EKK	: En Küçük Kareler
ETEW	: Elevation Threshold with Expand Window
EYM	: En Yakın Mesafe
FSS	: Farkların Standart Sapması
GPS	: Global Positioning System
HATAC	: Commission Error
HATAO	: Omission Error
IDW	: Inverse Distance Weighted/Ters Mesafe Ağırlıklı Yöntem
ISD	: Inverse Square Distance/Ters Kare Mesafesi
İGNA-99	: İstanbul GPS Nirengi Ağı-1999
İHA	: İnsansız Hava Aracı
KOH	: Karesel Ortalama Hata
KTÜ	: Karadeniz Teknik Üniversitesi
LiDAR	: Light Detection and Ranging
MATLAB	: Matrix Laboratory
MaxH	: Maksimum Yükseklik Hatası
MCC	: Multiscale Curvature Classification
MGF	: Multi-directional Ground Filter
MinH	: Minimum Yükseklik Hatası
MLS	: Maksimum Lokal Eğim/Maximum Lokal Slope
MRBF	: Multiquadratic Radial Basis Function

NN	: Natural Neighbor
OH	: Ortalama Hata
OK	: Ordinary Kriging
OMH	: Ortalama Mutlak Hata
PM	: Progressive Morphological
PM1B	: 1 Boyutlu Progressive Morphological
PM2B	: 2 Boyutlu Progressive Morphological
RBF	: Radial Basis Function
RST	: Regularized Spline with Tension
RTF	: Radyal Tabanlı Fonksiyonlar
RTK	: Real Time Kinematik
SAM	: Sayısal Arazi Modeli
SYM	: Sayısal Yükseklik Modeli
TIN	: Düzensiz Üçgen Ağı/Triangulated Irregular Network
UK	: Universal Kriging
ZN	: Toplam Zemin Noktaları Sayısı
ZÜN	: Toplam Zemin Üstü Noktaları Sayısı

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Yeryüzündeki nesnelere 3 boyutlu koordinatlarla (x,y,z) temsil eden noktalar bütününe nokta bulutu denir. Uzaktan algılama uygulamalarında kullanılan nokta bulutları LiDAR teknolojileri ile veya stereo hava fotoğrafları ile üretilmektedir. LiDAR radara benzer aktif bir algılayıcıdır (Yılmaz ve Yakar, 2006) ve algılanacak olan hedefe gönderilen sinyallerin gidiş ve dönüşü arasında geçen süreyi hesaplayarak hedefin 3 boyutlu koordinat bilgisini üretir. Son yıllarda LiDAR teknolojileri 3 boyutlu hassas konum sağlama yeteneklerinden dolayı birçok uzaktan algılama uygulamasında yüzey üretimi amaçlı olarak kullanılmaktadır. Sayısal yükseklik modeli üretimi, 3 boyutlu obje modellemesi ve deformasyon analizleri bu uygulamalardan sadece birkaçıdır.

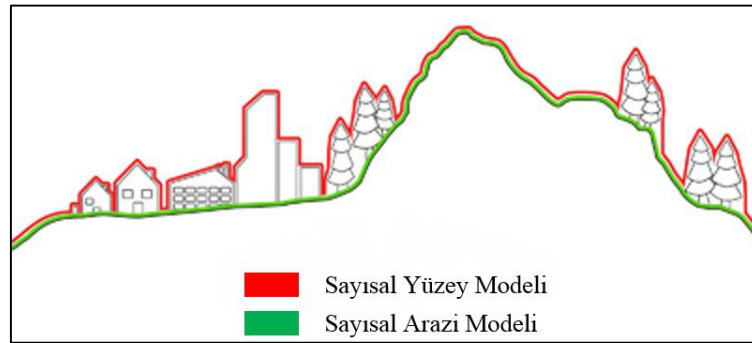
LiDAR teknolojileri 20 yıldan fazla bir süredir kullanılmakta olup, LiDAR sensörler ile yüksek yoğunlukta nokta bulutu elde etmek mümkündür. LiDAR algılayıcıların bir diğer avantajı da çok sayıda dönüş (return) sinyalini kayıt edebilmeleridir. LiDAR sensörlerinden gönderilen sinyaller fazla yoğun olmayan bitki örtüsü tabakasını aşarak zemine kadar ulaşabilmektedir. Bu nedenden dolayı zemin modellemesinde LiDAR nokta bulutları oldukça faydalı olmaktadır. LiDAR teknolojileri ile güneş ışığına bağlı olmaksızın yılın her günü 24 saat veri toplanabilmektedir (Şehsuvaroğlu vd., 2014). Bu avantajlarına rağmen LiDAR teknolojilerinin bazı dezavantajları da bulunmaktadır. LiDAR sensörler kötü hava koşullarından etkilenmekte olup algılama mesafeleri arttıkça her bir sinyaldeki şiddet azalmaktadır. Dolayısıyla, üretilen nokta bulutu istenilen hassasiyette olamayabilmektedir. Ayrıca, LiDAR verilerinin temini ve işlenmesi günümüzde hala pahalı bir işlemdir. Bu nedenden dolayı özellikle ülkemizde kullanımı yaygınlaşmamıştır.

LiDAR teknolojilerine alternatif olarak stereo hava fotoğrafları kullanılarak da nokta bulutu üretimi gerçekleştirilebilmektedir. Hava fotoğrafları insanlı veya insansız hava araçlarından çekilmektedir. Yüksek bindirme oranlarına sahip hava fotoğraflarının çekilmesi yüksek doğrulukta nokta bulutu üretimi için oldukça önemlidir. Hava fotoğrafları kullanılarak mekânsal çözünürlüğe bağlı olarak LiDAR algılayıcılara eş değer yoğunluklarda nokta bulutları elde etmek mümkündür. Ayrıca, hava fotoğrafları

kullanılarak nokta bulutu üretimi LiDAR teknolojilerine göre daha ucuzdur. Özellikle büyük alanlara ait nokta bulutlarının üretiminde hava fotoğrafları kullanmak maliyeti oldukça düşürmektedir. Ancak, havadan çekilen fotoğraflarla bitki örtüsü altındaki zeminin görüntülenmesi mümkün olmadığından dolayı bu gibi alanlarda zeminin modellenmesi LiDAR nokta bulutlarına göre daha zordur.

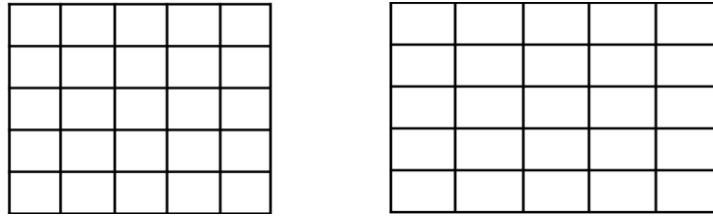
1.2. Sayısal Yükseklik Modelleri

Yükseklik modelleri birçok disiplin tarafından aktif bir şekilde kullanılmaktadır. Günümüzde, teknolojiye paralel olarak yüksek çözünürlüklü sayısal yükseklik modelleri elde edilebilmektedir. Sayısal yükseklik modeli belirli bir bölgedeki topografya bilgisini temsil eden genel bir terimdir (Şehsuvaroğlu vd., 2014). Yükseklik modelleri raster olabildiği gibi vektör formatında da olabilmektedir. Raster yükseklik modellerindeki her bir piksel bir yükseklik değeri taşır. Literatürde sıklıkla kullanılan yükseklik modelleri sayısal yüzey modeli (SYM) ve sayısal arazi modelidir (SAM). Bu yükseklik modelleri genellikle eş anlamlı olarak kullanılırlar (Li vd. 2004), ancak her biri ayrı anlam taşımaktadır. Sayısal yüzey modeli yeryüzü zemini ile üzerinde var olan bütün nesnelere (bina, ağaç, köprü vb.) yükseklik bilgilerini içermektedir. Sayısal arazi modeli ise çıplak arazi yüzeyini temsil etmektedir ve ya direk zemine ait noktaların klasik yersel metodlar ile ölçülmesiyle ya da fotogrametrik olarak üretilen 3 boyutlu nokta bulutunda zemin üstü nesnelere ait yükseklik değerlerinin filtrelenmesi ile elde edilir (URL-1). Sayısal yüzey modeli ile sayısal arazi modeli arasındaki fark Şekil 1’de gösterilmiştir.



Şekil 1. Sayısal yüzey modeli ve sayısal arazi modeli (URL-1).

SYM üretiminde kullanılan modellerden en yaygınları düzenli grid modelleri, düzensiz üçgen ağları (TIN) ve yükseklik eğrili modellerdir (Ramirez, 2006; Liu, 2008). Tez kapsamında düzenli grid ağları modeli kullanılmıştır. Grid modeli, içerisinde noktalar arasındaki topolojik ilişkileri bulunduran matris yapısını kullanır (El-Sheimy vd., 2005; Liu, 2008). Bu modelde arazi kare ya da dikdörtgen gridlere bölünür (Şekil 2). Her bir grid hücresinin sabit bir değeri vardır (Ramirez, 2006; Liu, 2008). Bu sabit yükseklik değeri genellikle komşu noktaların enterpolasyonları ile elde edilir. Bu üç model içinde depolama ve işleme açısından en etkili ve basit olan yöntem grid yöntemidir (El-Sheimy vd., 2005; Ramirez, 2006; Ziadat, 2007; Liu, 2008). Ancak bu yöntem arazi yüzeyini süreksiz bir şekilde temsil ettiği için hatalara açıktır (Liu, 2008). Grid boyutu büyüdükçe zemin yüzeyi daha kaba bir şekilde temsil edilir (Ramirez, 2006; Liu, 2008). Yüksek yoğunluklu nokta bulutu verileri grid yönteminin bu kısıtlamasını ortadan kaldırmaktadır. Büyük boyutlu nokta bulutu verisi depolama ve işleme açısından daha etkili bir modele ihtiyaç duymaktadır. Bu yüzden grid yöntemi nokta bulutundan SYM üretimi için bir çok çalışmada kullanılmıştır (Lohr, 1998; Wack ve Wimmer, 2002; Lloyd ve Atkinson, 2006; Liu vd., 2007; Liu, 2008).



Şekil 2. Kare grid modeli (solda) ve dikdörtgen grid modeli (sağda)

1.3. Nokta Bulutu Filtrelemesi

SAM üretiminin ilk aşaması nokta bulutu verisindeki zemin ve zemin üstü objelere ait olan noktaların birbirlerinden ayrılmasıdır. Zemin üstü nesnelere ait olan noktaların nokta bulutundan çıkartılması ve elde edilen noktaların enterpolasyonu ile SAM üretilmektedir. Literatürde nokta bulutlarının filtrelenmesi ile ilgili birçok çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmaların oldukça büyük bir çoğunluğu LiDAR verisi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bunun nedeni LiDAR verisinin çok sayıda dönüş sinyaline ait bilgi

içermesidir. Literatürde nokta bulutu filtrelemesi ile ilgili olarak gerçekleştirilen çalışmalardan bazıları şu şekildedir;

Montealegre vd., (2015a) yaptıkları çalışmada LiDAR algılayıcı ile elde edilen nokta bulutu verisini kullanarak yedi farklı filtreleme yönteminin performansını karşılaştırmışlardır. Çalışma kapsamında; LAStools, FUSION v.3.30, Multiscale Curvature Classification (MCC-LiDAR v.2.1), BCAL LiDAR Tools v.1.5.1, Airborne LiDAR Data Processing ve Analysis Tools (ALDPAT v.1.0) gibi açık kaynak kodlu filtreleme yazılımları kullanılmıştır. Sonuçlar incelendiğinde MCC-LiDAR yazılımının en başarılı filtreleme performansını sergilerken en kötü performansı ise ALDPAT yazılımı içinde çalışan MLS yönteminin verdiği görülmüştür.

Polat ve Uysal (2015) yaptıkları çalışmada ALDPAT yazılımında yer alan beş farklı yöntemle filtreledikleri LiDAR verisinden SAM üretmiş ve bunların referans SAM ile korelasyonunu incelemişlerdir. Çalışmada referans olarak kullanılan SAM TerraScan ticari yazılımında çalışan aATIN (advance Adaptive TIN) yöntemi kullanılarak oluşturulmuştur. Sonuçlara göre kırsal bölge için ATIN ve Morphological yöntemleriyle üretilen SAM referans SAM ile en yüksek korelasyonu verirken, en kötü korelasyonu ise MLS yöntemi ile üretilen SAM vermiştir. Kentsel bölgelerde ise ATIN ve Polinomial yöntem ile üretilen SAM referans SAM ile en yüksek korelasyonu vermiştir. Ayrıca, ETEW ve MLS yöntemleri ile üretilen SAM' ların kentsel bölgelerde referans SAM ile en düşük korelasyonu veren yöntemler oldukları tespit edilmiştir.

Alexander vd. (2010) tam dalga formatındaki ALS nokta bulutu verisini sınıflandırmak için çalışma bölgesindeki nesnelere yansıyan dalgaların genliklerine, geri saçınım kesitlerine ve geri saçınım katsayılarına ait bilgileri kullanmışlardır. İlk çalışma bölgesi için toplanan bu veriler kullanılarak üretilen karar ağacı sınıflandırıcısı ikinci çalışma bölgesinde kullanılmıştır. İkinci çalışma bölgesi geri saçınım katsayıları kullanılarak sınıflandırıldığında en başarılı sınıflandırma doğruluğu elde edilmiştir (0,89 Kappa). Ayrıca bu çalışmada geri saçınım katsayılarının yol ve çimi başarılı bir şekilde ayırabildiği belirtilmiştir.

Chauve vd. (2009) çalışmalarında tam dalga boyu formundaki nokta bulutu verisinin işlenmesi amacıyla bir yöntem geliştirmişlerdir. Geliştirilen yöntem nokta bulutunu parametrik fonksiyonlar kullanarak ayrıştırmaktadır. Ayrıca, bu yöntemde Gauss ve genelleştirilmiş Gauss modelleri ile modellenen dalgalar ile birlikte geliştirilmiş bir tepe noktası belirleme algoritması kullanılmaktadır. Geliştirilen yöntemin performansının

irdelenmesi amacıyla üretilen SAM ve bitki örtüsü yükseklik modelleri yersel ölçümler ile karşılaştırılmıştır.

Meng vd., (2009) MGF (Multi-directional Ground Filter) filtreleme yöntemini geliştirmiş ve bu yöntemin performansını Active Contours (Elmqvist, 2001; Elmqvist vd., 2001), Regularization Method (Sohn ve Dowman, 2002), Progressive TIN Densification (Axelsson, 1999), Kraus ve Pfeifer (2001) tarafından geliştirilen yöntem, Spline Interpolation yöntemi (Brovelli vd., 2002), Modified slope-based filter yöntemi (Roggero, 2001) ve Sithole (2001) tarafından geliştirilen yöntem ile karşılaştırmıştır. Doğruluk analizi 15 test bölgesi için yapılmıştır. Hesaplanan Kappa değerlerine göre MGF yöntemi (% 79,9 Kappa) Progressive TIN Densification (% 84,2 Kappa) yönteminden sonra en başarılı performansı vermiştir. En düşük performansı ise % 46,9 Kappa değeri ile Spline Interpolation yönteminin verdiği görülmüştür.

Mallet vd. (2008) çalışmalarında kentsel alanlara ait tam dalga boyu formatındaki LiDAR nokta bulutu verisini sınıflandırmak amacıyla bir örüntü tanıma yöntemi geliştirmişlerdir. Geliştirilen yöntem nokta bulutunun destek vektör makineleri kontrollü sınıflandırıcısı ile sınıflandırılmasına dayanmaktadır. Elde edilen sonuçlar geliştirilen metodolojinin nokta bulutu sınıflandırmasında oldukça başarılı olduğunu göstermektedir.

Zhang ve Whitman (2005) çalışmalarında LiDAR ile üretilen nokta bulutunu kullanarak literatürde sıklıkla kullanılan üç filtreleme yöntemini (ETEW, MLS ve PM) karşılaştırmışlardır. Çalışma kapsamında farklı eğimlere sahip üç farklı veri seti kullanılmıştır. Bu üç veri setinin ilki az eğimli kentsel alanı, ikincisi az eğimli kıyı bölgesini, üçüncüsü ise çok eğimli orman alanını temsil etmektedir. Rastgele atılan 648 nokta için hata analizi yapıldığında en yüksek filtreleme performansını PM filtreleme yönteminin verdiği görülmüştür. En düşük performansı ise ETEW yöntemi vermiştir.

1.4. Enterpolasyon

Literatürdeki birçok çalışmada nokta bulutu enterpolasyonu ile yükseklik modeli üretilmiştir. Örneğin; Montealegre vd., (2015b) yaptıkları çalışmada 1 m ve 2 m konumsal çözünürlüklü sayısal yükseklik modeli üretiminde kullandıkları 6 enterpolasyon yönteminin performansını karşılaştırmışlardır. Böylelikle SAM' ın konumsal çözünürlüğünün SAM' ın doğruluğuna etkisi irdelenirken, bölgenin eğiminin, arazi örtüsünün, zemin noktalarının yoğunluğunun ve lazer penetrasyonunun enterpolasyon

hatasına etkisi ayrıca incelenmiştir. Çalışmada enterpolasyon yöntemlerinin uygulanması amacıyla ArcGIS 10.1 ve FUSION 3.30 (McGaughey, 2009) yazılımları kullanılmıştır. Çalışmada veri olarak Airborne Laser Scanning (ALS) ile elde edilen nokta bulutu kullanılmıştır. Nokta bulutunun filtreleme işlemi MCC v.2.1 (Evans ve Hudak, 2007) yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. Çalışmada 7.585.872 adet nokta (bütün noktaların % 80'i) kestirim noktası olarak, 1.896.468 adet nokta (bütün noktaların % 20' si) ise test noktası olarak kullanılmıştır. Sonuç olarak 1.896.468 nokta için en iyi karesel ortalama hatayı 1 m' lik SAM' da 2,68 cm ile "TIN to Raster" yönteminin, 2 m' lik SAM' da ise 5,25 cm ile Kriging yönteminin verdiği görülmüştür. Enterpolasyon yöntemlerinin doğruluğu GPS ile ölçülmüş 55 nokta ile kontrol edilmiştir. 55 nokta için en iyi karesel ortalama hatayı 1 m' lik SAM' da 37,10 cm ile IDW yöntemi, 2 m' lik SAM' da 40,60 cm ile yine IDW yöntemi vermiştir. Bu çalışmada ayrıca, DEM' in konumsal çözünürlüğündeki artışın enterpolasyon yöntemlerinin karesel ortalama hatalarını düşürdüğü sonucuna varılmıştır.

Uysal vd., (2015) çalışmalarında İHA ile çekilen hava fotoğrafları ile üretilen DEM' in hassasiyetini analiz etmişlerdir. Yapılan çalışmada Afyon Kocatepe Üniversitesi kampüsünde 40.000 m² alanda gerçekleştirilen çalışmada PhotoScan yazılımı ile m² başına 450 nokta düşen nokta bulutu üretilmiştir. 5,203 cm çözünürlükte üretilen DEM' in kontrolü arazide RTK GPS yöntemiyle ölçülen 30 kontrol noktası ile sağlanmıştır. Bu noktalardaki düşey hassasiyetin 6,62 cm olduğu görülmüştür.

Guo vd., (2010) çalışmalarında topoğrafik çeşitliliğin ve veri yoğunluğunun farklı enterpolasyon yöntemleri ve konumsal çözünürlük bazında üretilen SYM' ye etkisini irdelemişlerdir. Buna göre IDW, NN (Natural Neighbor) ve TIN gibi basit enterpolasyon yöntemlerinin LiDAR verilerinden DEM üretiminde oldukça başarılı olduğu görülmüştür. Fakat hassasiyetin önemli olduğu durumlarda ise OK ve UK (Universal Kriging) gibi Kriging tabanlı yöntemlerin daha uygun olduğu sonucuna varılmıştır.

Erdoğan (2009), tarafından yapılan çalışmada veri yoğunluğunun ve farklı enterpolasyon yöntemlerinin sayısal yükseklik modeli doğruluğuna etkisi araştırılmıştır. Çalışmada en fazla hatayı IDW yönteminin, en az hatayı ise Thin Plate Spline yönteminin verdiği sonucuna varılmıştır. OK ve Radial Basis Function yöntemlerinin ise birbirlerine yakın hatalar ürettiği görülmüştür.

Alkanalka ve Bayram (2007) tarafından yapılan çalışmada fotogrametrik ölçülerle elde edilen SYM' lerin eksik veya hatalı kısımları enterpolasyon teknikleri ile tamamlanmıştır. SYM verisinin eksik olduğu bölgelerde kestirim yöntemleri kullanılarak

yeniden SYM üretilmiştir. Çalışma kapsamında 589.600 m²' lik düzlük alanlarda ve 2.375.200 m²' lik dağlık alanlarda kestirim yöntemleri uygulanmıştır. Kriging yöntemi düz alanlarda 1.474 adet noktada $\pm 0,78$ m, dağlık alanlarda ise 5.938 adet noktada $\pm 12,5$ m hassasiyetle en başarılı enterpolasyon yöntemi olmuştur. Kriging yöntemini Radial Basis Function yöntemi takip etmiştir.

Chaplot vd., (2006) topoğrafyanın etkisinin sayısal yükseklik modeli doğruluğuna etkisini irdelemişlerdir. Üretilen nokta bulutu IDW, OK, UK, Multiquadratic Radial Basis Function (MRBF), ve regularized spline with tension (RST) enterpolasyon yöntemleri ile enterpole edilmiştir. Çalışma, üç tanesi engebeli, üç tanesi engebeyesiz bölge olmak üzere toplamda altı test bölgesi için gerçekleştirilmiştir. Sonuçlara göre Kriging yönteminin engebenin az olduğu yerlerde en iyi sonucu verdiği görülmüştür. Engebeli bölgelerde ise IDW enterpolasyon yöntemi en başarılı sonucu vermiştir.

Enterpolasyon yöntemlerinin nokta bulutu enterpolasyonunun yanı sıra kullanıldığı farklı uygulama alanları da bulunmaktadır. Örneğin; Kayıkçı ve Karaaslan (2015) tarafından yapılan çalışmada farklı enterpolasyon yöntemleri kullanarak yerel jeoid belirlenmesi amaçlanmıştır. Bunun için Trabzon ilinde Tapu ve Kadastro IX. Bölge Müdürlüğü tarafından gerçekleştirilen kadastro çalışmaları kapsamında oluşturulan C3 noktalarında ölçülen ortometrik ve elipsoidal yükseklik değerleri kullanılmıştır. Uygulamada noktalar dayanak ve test noktaları olarak ikiye ayrılmıştır. Çalışmada ağırlıklı ortalama, polinom yüzeyleri ve multiquadratik enterpolasyon yöntemleri kullanılmıştır. Dayanak noktalarından farklı enterpolasyon yöntemleri kullanılarak elde edilen test noktaları için hesaplanan ortometrik yüksekliklerin ölçülmüş ortometrik yüksekliklere ne kadar yaklaşabildiği irdelenerek enterpolasyon yöntemleri arasında kıyaslamalar yapılmıştır. Yapılan değerlendirmelere göre ağırlıklı ortalama yöntemiyle elde edilen sonuçların diğer sonuçlara göre daha kötü olduğu belirlenmiştir. En iyi sonucu ise üçüncü dereceden polinomla elde edilmiş yüzeyin verdiği görülmüştür.

Şentürk ve İnce (2015) tarafından yapılan çalışmada Kocaeli ilinde en uygun jeoid belirlenmeye çalışılmıştır. Bu amaçla Kocaeli iline dağılmış hem elipsoidal hem de ortometrik yükseklikleri mevcut 1.018 nirengi noktası kullanılmıştır. Çalışma alanını ve bu alanın karakteristik noktalarını temsil edebilecek 200 adet nokta seçilerek "Jeoid Dayanak Noktaları Ağı" oluşturulmuş ve seçilen bu noktalardan yararlanılarak, Kocaeli il sınırlarını kapsayacak uygun bir yerel jeoid modelinin tasarlanması amaçlanmıştır. Bu kapsamda ağırlıklı ortalama, polinomlarla, multikuadratik, üçgenlerle, doğrusal ve kriging

enterpolasyon yöntemi olmak üzere beş farklı enterpolasyon yöntemi uygulanmıştır. Kullanılan enterpolasyon yöntemlerinin $\pm 5,8 - 8,7$ cm arasında bir standart sapma ile yerel jeoidi modelleyebildiği ve Kriging ile Multiküadratik enterpolasyon yöntemlerinin en iyi sonucu verdiği belirtilmiştir.

Kazancı (2014) tarafından yapılan çalışmada Karadeniz Bölgesi'nde farklı konumsal özelliklere sahip 52 tane meteoroloji istasyonundan alınan günlük ortalama sıcaklık verilerine dayanarak 9 konumsal enterpolasyon yöntemi yardımıyla her bir istasyonun günlük ortalama sıcaklık değeri hesaplanmıştır. Bu kapsamda, her seferinde dayanak noktalarından biri enterpolasyon noktası seçilmiş, geriye kalan noktalar dayanak noktası alınarak, seçilen enterpolasyon noktasının günlük ortalama sıcaklık değeri tahmini yapılmıştır. Çalışmada kullanılan jeostatistiksel olmayan yöntemler Orijinal ve Modified Shaperd Yöntemi, Basit Doğrusal Regresyon Analizi, Çoklu Doğrusal Regresyon Analizi, Birleştirilmiş Basit Doğrusal Regresyon ve IDW Yöntemi, Birleştirilmiş Çoklu Doğrusal Regresyon ve IDW Yöntemi, Birleştirilmiş Lapse Rate ve IDW yöntemleridir. Bu çalışmada 9. yöntem olarak jeostatistiksel bir yöntem olan OK yöntemi uygulanmıştır. En iyi sonuç veren yöntemler sırasıyla Çoklu Doğrusal Regresyon ve IDW Yöntemi, Çoklu Doğrusal Regresyon Yöntemi, Basit Doğrusal Regresyon Analizi ve IDW Yöntemi, Basit Doğrusal Regresyon Yöntemi ve IDW yöntemidir. Kriging Yöntemi ise kendi içinde ayrı olarak değerlendirilmiştir.

Yaprak ve Arslan (2008) tarafından yapılan çalışmada İstanbul GPS Nirengi Ağı-1999 (İGNA-99) ağında konumları ve jeoid yükseklikleri belirlenmiş 200 dayanak ve 50 test noktasında OK yöntemi uygulanmıştır. Çalışmada ArcGIS 8.3 yazılımı kullanılmıştır. 200 dayanak noktası ile jeoid yüzey modeli oluşturulmuştur. Oluşturulan modelden jeoid yüksekliği bilinen 50 test noktası için yeni jeoid yükseklikleri hesaplanmış ve modelden hesaplanan yükseklikler ile bilinen yükseklikler arasındaki farklara ait karesel ortalama hata değerleri $\pm 3,05$ cm ile $\pm 3,09$ cm aralığında bulunmuştur.

Yaprak ve Arslan (2007) çalışmalarında Tokat Mücavir alanında GPS/Nivelman yöntemi ile jeoid belirlemek için deterministik ve Kriging enterpolasyon yöntemlerinin sonuçlarını karşılaştırarak, Kriging yönteminin jeoid yüzeyi modellemesinde kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Uygulamada ArcGIS 8.3 Geostatistical Analyst yazılımı kullanılmıştır. Geoit modeli oluşturmak için $N_{GPS/NIVELMAN}$ değerleri bilinen ve topoğrafyayı iyi temsil eden 27 dayanak noktası kullanılmıştır. Model 11 nokta ile deterministik ve geoistatistik enterpolasyonlarla test edilmiştir. Çalışma sonucunda Kriging

yöntemi ile jeoid belirleme sonuçlarının deterministik yöntemlerden daha hassas olduğu, multiküadratik yöntem sonuçlarının Kriging yöntem sonuçlarına çok yakın olduğu ve multiküadratik yöntemin en iyi sonucu veren deterministik yöntem olduğu saptanmıştır.

1.5. Problemin Tanımı

SAM birçok disiplinde altlık olarak kullanılmaktadır. Bu nedenle SAM üretimi literatürdeki birçok çalışmaya konu olmuştur. SAM çıplak zemini temsil ettiğinden dolayı SAM üretiminin ilk aşaması nokta bulutundaki zemine ait olan ve olmayan noktaların birbirlerinden ayrılmasıdır (nokta bulutu filtrelemesi). Literatürde nokta bulutu filtrelemesi amacıyla çeşitli algoritmalar geliştirilmiştir. Ancak şimdiye kadar bu algoritmalar sağladığı avantajlar nedeniyle genelde LiDAR' dan elde edilen nokta bulutu verilerine uygulanmıştır. Ancak LiDAR günümüzde hala pahalı bir teknoloji olduğundan dolayı tez kapsamında İHA' lardan elde edilen hava fotoğrafları yardımıyla üretilen nokta bulutu filtrelenerek SAM üretimi gerçekleştirilmiştir. Yapılan doğruluk analizleri ile İHA tabanlı nokta bulutlarının SAM üretiminde LiDAR' a alternatif olup olamayacağı araştırılmıştır.

1.6. Çalışmanın Amacı

Bu tez çalışmasının temel amaçları şu şekilde sıralanabilir;

- İHA' ya entegre edilen dijital kamera ile çekilen hava fotoğraflarını kullanarak çalışma bölgesine ait farklı yoğunluklarda nokta bulutları üretmek.
- Farklı yoğunluklarda üretilen nokta bulutlarını farklı filtreleme algoritmaları ile filtreleyerek hem filtreleme algoritmalarının performanslarını hem de nokta bulutu yoğunluğunun filtreleme algoritmalarının performanslarına etkilerini irdelemek.
- Farklı enterpolasyon yöntemleri kullanarak filtreleme sonucu elde edilen filtrelenmiş nokta bulutlarının enterpolasyonlarını gerçekleştirmek ve SAM üretimi yapmak.
- Elde edilen SAM' ların düşeydeki doğruluğunu yersel ölçümler ile kontrol etmek.
- İHA tabanlı nokta bulutlarının LiDAR nokta bulutlarına alternatif olup olamayacağını belirlemek.

1.7. Metodoloji

Bu çalışmada öncelikle, İHA'ya entegre edilen dijital kamera ile çekilen fotoğraflar ile üretilen dört farklı yoğunluktaki (ham veri, düşük yoğunluklu, orta yoğunluklu ve yüksek yoğunluklu) nokta bulutlarına beş farklı filtreleme algoritması uygulanarak zemin üstü noktaları filtrelenmiştir. Kullanılan filtreleme yöntemleri, PM1B, PM2B, MLS, ETEW ve ATIN yöntemleridir. Yöntemlerin uygulamasında ALDPAT yazılımı kullanılmıştır. Her yöntem ham veri, düşük yoğunluklu, orta yoğunluklu ve yüksek yoğunluklu veriler için ayrı ayrı uygulanmıştır. Doğruluk analizleri ile hangi filtreleme algoritmasının hangi yoğunluktaki verileri ne derece başarı ile filtreledikleri incelenmiştir. En yüksek doğruluk ile filtrelenen verinin MATLAB ortamında enterpolasyonu ile çalışma bölgesine ait SAM üretilmiştir. SAM'ın üretilmesi amacıyla ortogonal (lineer, kuadratik, kübik) ve ortogonal olmayan (bi-lineer, bi-kuadratik, bi-kübik) polinomlarla enterpolasyon, Shepard yöntemi, Radyal Tabanlı Fonksiyonlar (multikuadratik-dairesel dik koni, multikuadratik-dairesel paraboloid, multikuadratik-iki yapraklı dairesele hiperboloid, ters multikuadratik, gauss, kübik splayn, doğal kübik splayn, multilog) ile enterpolasyon ve OK enterpolasyon yöntemleri kullanılmıştır. Üretilen SAM'ın düşey hassasiyeti arazide yapılan yersel ölçümlerle irdelenmiştir.

2. FİLTRELEME YÖNTEMLERİ

2.1. Progressive Morphological (PM) Filtreleme Yöntemi

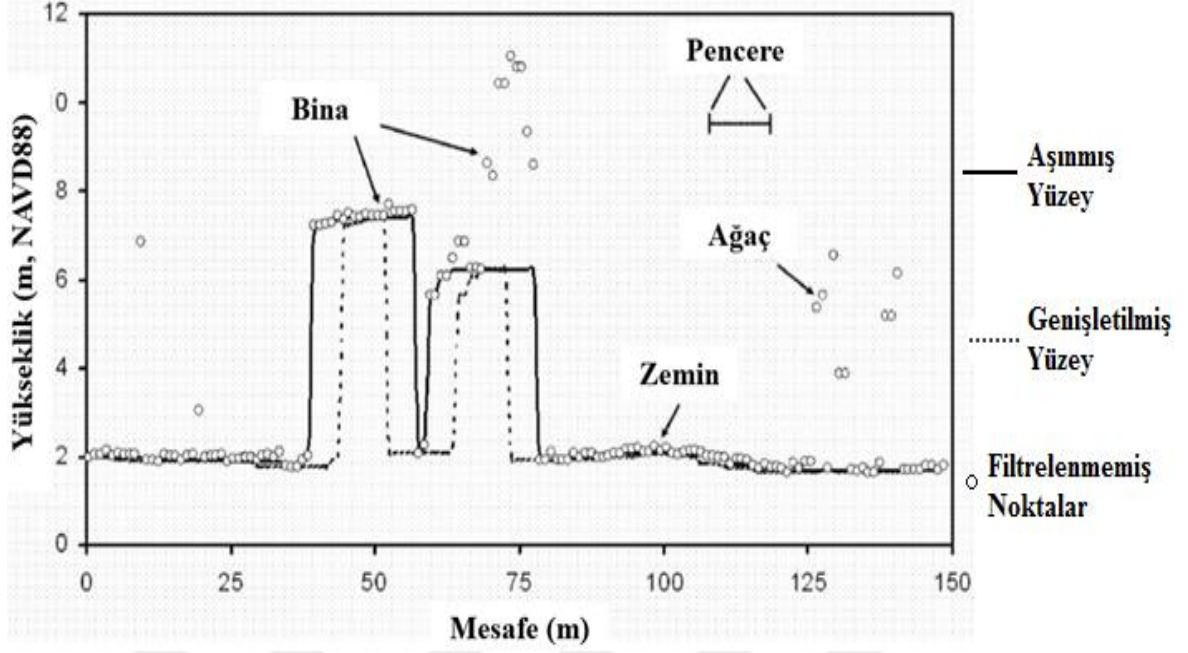
Zhang vd., (2003) tarafından LiDAR verilerindeki zemine ait olmayan noktaları yok edebilmek amacıyla geliştirilmiştir. PM filtreleme yöntemi aşamalı olarak artan pencere boyutu ve yükseklik farkı eşik değeri kullanarak zemine ait olmayan farklı boyutlardaki objeleri yok ederken zemine ait noktaları korumaktadır. PM filtreleme yönteminin temelinde matematiksel morfolojide kullanılan genişletme ve aşınma operasyonları vardır. Bu operasyonlar detayların boyutlarını genişletmek ve küçültmek için yaygın olarak kullanılmaktadır (Haralick vd., 1987). Nokta bulutundaki herhangi bir $p(x, y, z)$ için, z yükseklik değerinin x ve y konumlarındaki genişletme değeri;

$$d_p = \max_{(x_p, y_p) \in w} (z_p) \quad (2.1)$$

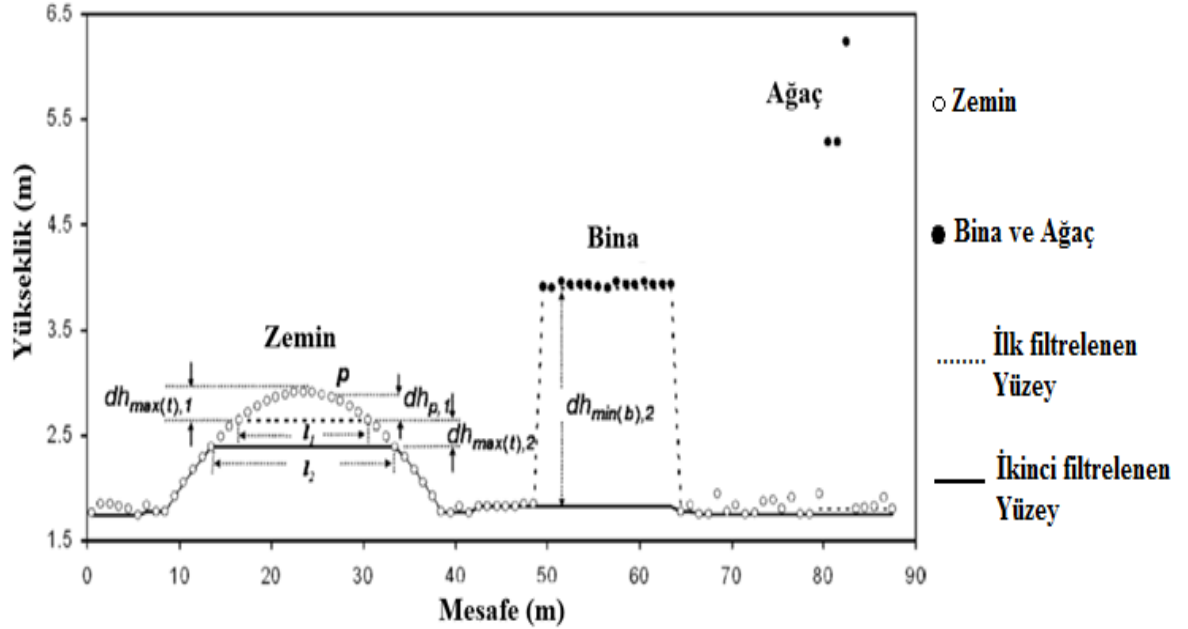
şeklinde olmaktadır. Burada x_p , y_p ve z_p koordinatları p noktasının w penceresi içindeki komşularını temsil etmektedir. Bu pencere bir boyutlu (PM1B) çizgi olabileceği gibi iki boyutlu (PM2B) dikdörtgen veya farklı bir şekil olabilir. Pencere içindeki bu p noktasının komşuluğundaki maksimum yükseklik değerine genişletme, minimum yükseklik değerine ise aşınma denir. Aşınma işlemi;

$$e_p = \min_{(x_p, y_p) \in w} (z_p) \quad (2.2)$$

şeklinde ifade edilir. Genişletme ve aşınma işlemlerinin kombinasyonları açınım ve kapanım operasyonlarını oluşturur (Zhang vd., 2003). Önce aşınma sonra genişletme uygulanırsa açınım operasyonu, önce genişletme sonra aşınma uygulanırsa kapanım operasyonu yapılmış olur. Bu operasyonlar nokta bulutunu filtrelemek amacıyla kullanılır. Şekil 3' de çizgi pencere kullanarak gerçekleştirilen bir açınım operasyonunun sonucu gösterilmektedir. Buna göre, aşınma operasyonu pencere boyutundan küçük boyuttaki ağaçları yok etmektedir. Pencere boyutundan büyük olan binalar ise genişletme operasyonu kullanılarak yeniden düzenlenmektedir (Zhang vd., 2003).



Şekil 3. Filtrenmemiş noktalar, genişletilmiş yüzey ve aşınmış yüzey (Zhang vd., 2003). Filtrenmemiş noktalar profil boyunca $1 \times 1 \text{ m}^2$ lik hücelere dağıtılmıştır. Eğer bir hücreye birden fazla nokta düşerse yüksekliği en az olan nokta seçilir. İçine nokta düşmeyen hücelere en yakın komşu enterpolasyon yöntemine göre yükseklik değeri atanır (Zhang vd., 2003).



Şekil 4. Zemin, bina, ağaç, ilk filtrelenen yüzey ve ikinci filtrelenen yüzeyin temsili gösterimi (Zhang vd., 2003). l_1 pencere boyutu kullanılarak uygulanan açınım operasyonu sonucunda ilk filtrelenen yüzey (kesikli çizgi) elde edilmiştir. İlk filtrelenen yüzeye pencere boyutu l_2 olan açınım operasyonu uygulanması ile ikinci filtrelenen yüzey (düz çizgi) elde edilmiştir (Zhang vd., 2003).

PM filtreleme yönteminin çalışma prensibi Şekil 4' de gösterilmiştir. Filtreleme sonucu ortaya çıkan ilk yüzey l_1 boyutunda bir pencere ile uygulanan açınım operasyonu sonucu elde edilir. Büyük boyutlardaki zemine ait olmayan objeler boyutları l_1 ' den büyük olduğu için korunur. l_1 ' den küçük boyuta sahip olan ağaçlar ise yok edilir. Zemin üzerindeki l_1 ' den küçük boyutta olan detaylar l_1 boyutlu pencere içindeki minimum yükseklikle yer değiştirir.

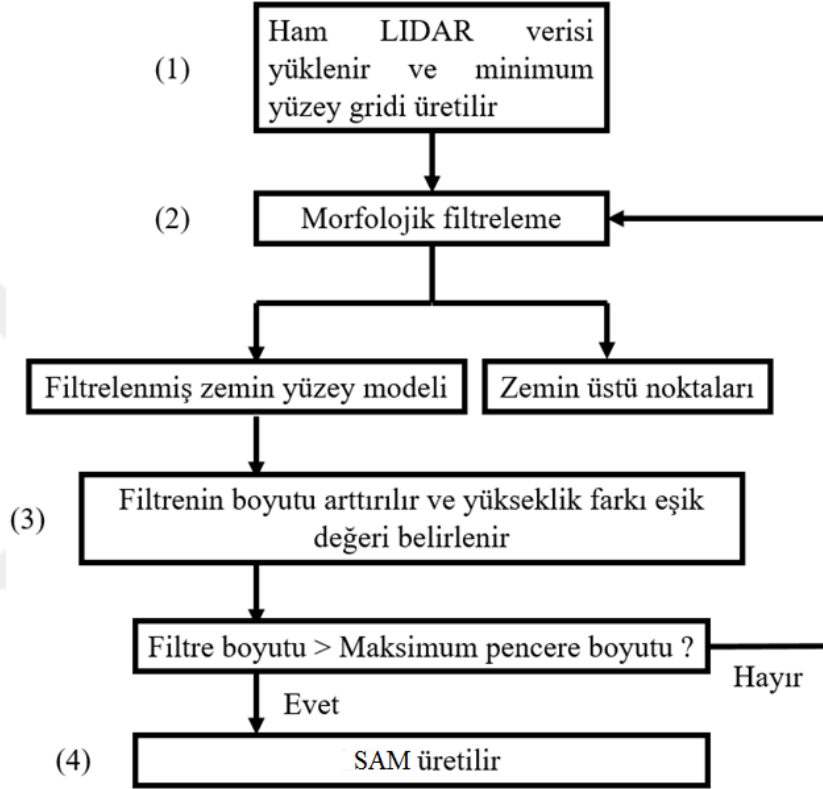
Bir sonraki iterasyonda, pencere boyutu l_2 ' ye çıkartılır ve filtrelenmiş yüzeye başka bir açınım operasyonu uygulanır. Binanın boyutu l_2 boyutlu pencerenin boyutundan küçük olduğu için binaya ait noktalar yok edilerek l_2 boyutlu pencere içindeki minimum yükseklikle yer değiştirir. Ancak, bu şekilde nokta bulutuna doğrudan uygulanan açınım operasyonu sonucu ortaya çıkan yüzey arazi ölçüleriyle elde edilen yüzeyden daha aşağıda olabilmektedir. Hatta düz arazilerde bile filtreleme sonucu elde edilen yüzey genelde orijinal yüzeyden daha alt seviyede olmaktadır. Bu problemi ortadan kaldırmak için bir yükseklik farkı eşik değeri kullanılabilir (Zhang vd., 2003).

Bina ile zemin arasındaki yükseklik farkı filtrelemeyi kolaylaştırmaktadır. Örneğin; $dh_{p,1}$ herhangi bir P noktasında (Şekil 4) ilk filtreleme için orijinal yüzey ile filtrelenmiş yüzey arasındaki yükseklik farkı ve $dh_{T,1}$ ise yükseklik farkı eşik değeri olsun. P noktası $dh_{p,1} \leq dh_{T,1}$ ise zemin noktası olarak, $dh_{p,1} > dh_{T,1}$ ise zemin üstü nokta olarak sınıflandırılır. $dh_{\max(t),1}$ orijinal yüzey ile filtrelenmiş yüzey arasındaki maksimum yükseklik farkını temsil etmektedir (Şekil 4). Eğer $dh_{\max(t),1}$, $dh_{T,1}$ ' den küçük ise orijinal nokta bulutu verileri korunur (Zhang vd., 2003).

İkinci iterasyonda, bir önceki iterasyonda elde edilen filtrelenmiş yüzey ile filtrelenecek yüzey arasındaki maksimum yükseklik farkı $dh_{\max(t),2}$ olsun. Eğer $dh_{\max(t),2}$, ikinci iterasyondaki yükseklik farkı eşik değeri olan $dh_{T,2}$ ' den küçük ise zemin noktaları korunur. Yaklaşık olarak bina yüksekliğine eşit olan $dh_{\min(b),2}$ ise, önceki filtrelenmiş yüzey ile mevcut filtrelenen yüzey arasındaki binadaki yükseklik farkı değeri olsun. $dh_{\min(b),2}$ ' nin $dh_{T,2}$ ' den büyük olması durumunda binaya ait noktalar yok edilecektir (Zhang vd., 2003).

Genelde, yükseklik farkı eşik değeri $dh_{T,k}$ her k 'ncü iterasyonda binaların en alçak noktasına göre ayarlanır. k 'ncü açınım operasyonundaki her bir P noktası, eğer $dh_{p,k} \leq dh_{T,k}$ ise zemin noktası olarak, değilse zemin üstü noktası olarak etiketlenir. Bu şekilde farklı boyutlardaki binalara ait ölçümler belirlenirken pencere boyutu en büyük binanın

boyutundan daha büyük olana kadar aşama aşama büyütülerek açınım operasyonları uygulanır. Ağaçlar ve bitişindeki zemin arasındaki yükseklik farkı ani yükseldiği için, bina filtreleme işlemi aynı zamanda ağaçlara ait noktaların yok edilmesinde de kullanılır (Zhang vd., 2003). PM filtreleme yöntemi kullanılarak SAM üretim aşamaları Şekil 5' te gösterilmiştir.



Şekil 5. PM filtreleme yönteminin akış diyagramı (Zhang vd., 2003).

1. Aşama: Düzensiz olarak dağılmış (x,y,z) nokta bulutu verileri yüklenir. İçerisine birden fazla nokta düşen her bir grid hücresindeki minimum yükseklik değerleri kullanılarak düzenli aralıklı minimum yüzey gridi oluşturulur. Eğer bir grid hiçbir yükseklik değerine sahip değilse ona en yakın noktanın yükseklik değeri atanır.

2. Aşama: PM filtreleme yönteminin en önemli bileşeni olan açınım operasyonu işlemi grid yüzeye uygulanır. İlk iterasyonda minimum yükseklik yüzeyi ile birlikte başlangıç pencere boyutu filtreleme için girdi verisi sağlar. Takip eden iterasyonlarda önceki iterasyonlardan elde edilen filtrelenmiş yüzeyler ve büyüyen pencere boyutları filtreleme için girdi verisi olarak alınır.

3. Aşama: Pencere boyutu büyütülür ve yükseklik farkı eşik değeri hesaplanır. Filtreleme penceresinin boyutu önceden belirlenen maksimum değeri geçene kadar 2. ve 3. aşamalar tekrar edilir. Bu değer genelde maksimum bina boyutundan biraz daha büyüktür.

4. Aşama: Son aşamada zemin üstü noktalar yok edildikten sonra veri setine göre SAM oluşturulur.

Pencere boyutu ve yükseklik farkı eşik değeri morfolojik filtrenin performansını etkilemektedir. Pencere boyutunu lineer olarak arttıran formül;

$$w_k = 2kb + 1 \quad (2.3)$$

şeklindedir. Burada $k = 1, 2, \dots, M$ (M kullanılan toplam pencere sayısı) ve b ise pencere boyutunu belirlemek için kullanılan bir katsayıyı ifade etmektedir. Maksimum pencere boyutu $2Mb + 1$ ' e eşittir. Pencerenin lineer olarak artması değişen topografik detayların daha başarılı şekilde korunmasını sağlamaktadır. Ancak bu durum da büyük boyutlu zemin üstü objelerine ait noktaların hesaplanması için fazla zamana ihtiyaç duyulmaktadır.

Alternatif olarak, pencere boyutu eksponansiyel olarak da arttırılabilir. Bu durumda formül aşağıdaki gibi olmaktadır;

$$w_k = 2b^k + 1 \quad (2.4)$$

Burada $k = 1, 2, \dots, M$ (M kullanılan toplam pencere sayısı) ve b ise kullanılan üstel fonksiyonun tabanını temsil etmektedir. Maksimum pencere boyutu $2b^M + 1$ ' e eşittir.

Yükseklik farkı eşik değeri topoğrafyanın eğimine göre belirlenebilir. Arazinin maksimum yükseklik farkı $dh_{\max(t),k}$, pencere boyutu w_k ve arazinin eğimi S arasında bir ilişki vardır. Eğim sabit varsayılırsa;

$$S = \frac{dh_{\max(t),k}}{\frac{w_k - w_{k-1}}{2}} \quad (2.5)$$

olmaktadır. Yükseklik farkı eşik değeri $dh_{T,k}$ ise;

$$dh_{T,k} = \begin{cases} dh_0, & w_k \leq 3 \\ s(w_k - w_{k-1})c + dh_0, & w_k > 3 \\ dh_{\max}, & dh_{T,k} > dh_{\max} \end{cases} \quad (2.6)$$

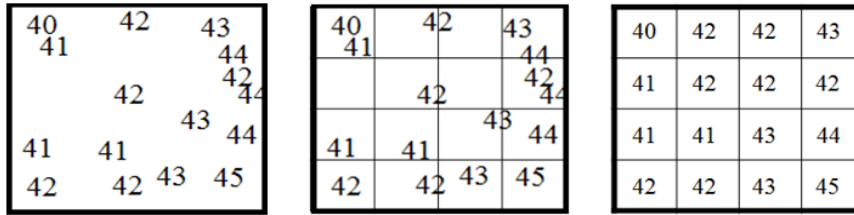
şeklinde ifade edilmektedir. Burada dh_0 başlangıç yükseklik farkı eşik değerini, s eğimi, c piksel boyutunu ve dh_{\max} ise maksimum yükseklik farkı eşik değerini göstermektedir.

Kentsel alanlarda zemin üstü noktalar genellikle arabalar, ağaçlar ve binalardır. Arabaların ve ağaçların boyutları binalardan çok daha küçük olduğu için bunların çoğu ilk birkaç iterasyonda yok edilir. Binaları belirleyebilmek için maksimum yükseklik farkı eşik değeri sabit bir yükseklik alınabilir. En iyi s değeri genelde iteratif olarak, filtrelenmiş ve filtrelenmemiş objeleri karşılaştırarak belirlenmektedir (Zhang vd.,2003).

2.2. Maksimum Lokal Eğim (MLS) Filtreleme Yöntemi

Arazi eğimi, zemin ve ağaçların ya da binaların tepelerinde farklı değerlere sahiptir. Eğimdeki bu farklılık zemin ve zemin üstü noktalarının birbirinden ayırmada kullanılır. Vosselman (2000), LiDAR noktaları ve bunların komşuları arasındaki lokal eğimi karşılaştırarak zemin noktalarını belirleyen MLS filtresini geliştirmiştir. Bu filtreleme algoritmasına göre;

- Düzensiz şekilde dağılmış LiDAR noktaları düzenli grid aralıklarına bölünmüş bir grid ağı ile çakıştırılır. Burada oluşturulan her bir grid LiDAR noktalarının yüksekliklerini temsil etmektedir. LiDAR verisine ait her bir nokta $p_j(x_j, y_j, z_j)$ gridlere x ve y koordinatları cinsinden atanır. Eğer bir gride birden fazla nokta düşerse yükseklik değeri en küçük olan nokta seçilir. İçine hiçbir nokta düşmeyen gridlere ise en yakın komşuluğundaki yükseklikler atanır (Bkz. Şekil 6).



Şekil 6. Orijinal nokta bulutu verisine ait yükseklikler (Solda), nokta bulutu verisi ile grid ağın çakıştırılması (Ortada), her bir grid hücreesine yükseklik değerlerinin atanması (Sağda)

- Her bir $p_0(x_0, y_0, z_0)$ noktası ile belirlenen bir yarıçap içindeki bütün noktalar arasındaki eğim ($s_{0,j}$) hesaplanır. $s_{0,max}$, p_0 noktası ile yarıçap içindeki diğer noktalar arasındaki maksimum eğim değeridir. Eğer bu değer daha önceden belirlenen eşik değerden (s) küçük ise p_0 zemin noktası olarak, büyük ise zemin üstü noktası olarak etiketlenir ve zemin üstü noktaları yok edilir.

$$s_{0,j} = \frac{z_0 - z_j}{\sqrt{(x_0 - x_j)^2 + (y_0 - y_j)^2}} \quad (2.7)$$

Burada, $s_{0,j}$, p_0 ve p_j arasındaki eğimi, (x_j, y_j) , p_j noktasının yatay koordinatlarını ve z_j ise p_j noktasının yüksekliğini göstermektedir. Eğer $s_{0,max} < s$ ise p_0 noktası zemin noktası olarak belirlenir (Vosselman, 2000).

2.3. Elevation Threshold with Expand Window (ETEW) Filtreleme Yöntemi

Bu yöntemde arazideki yükseklik farkları zemin ve zemin üstü LiDAR noktalarını birbirinden ayırmada kullanılır. ETEW yöntemi zemin ve zemin üstü noktaları birbirinden ayırmak için aşama aşama genişleyen bir arama penceresi kullanmaktadır (Zhang ve Whitman, 2005). Bu yöntemde göre;

- İlk olarak veri seti kare grid şeklindeki hücrelere bölünür ve gridlere düşen noktalardan minimum yükseklik değerine sahip olan noktalar haricindeki tüm noktalar atılır.
- Sonraki iterasyonda bu gridlerin boyutu artırılır ve her bir gride düşen minimum yükseklik değeri belirlenir. Sonrasında minimum yüksekliğe sahip olan noktadan itibaren belli bir eşik değerden daha yukarıda olan bütün noktalar atılır.
- Bu işlem bir önceki iterasyonda hiç bir nokta atılmayana kadar gridler ve eşik değerler artırılarak tekrar edilir.
- $Z_{i,j}$, i 'inci iterasyonda j 'inci griddeki $p_{i,j}$ noktasındaki yükseklik değeri, $Z_{i,min}$ bu griddeki minimum yükseklik ve $h_{i,T}$ yükseklik farkı eşik değeri olmak üzere; eğer $Z_{i,j} - Z_{i,min} > h_{i,T}$ ise i 'inci iterasyon için $p_{i,j}$ noktası yok edilir. Burada $h_{i,T}$ grid boyutuyla ilişkilidir ve aşağıdaki gibi ifade edilir;

$$h_{i,T} = sc_i \quad (2.8)$$

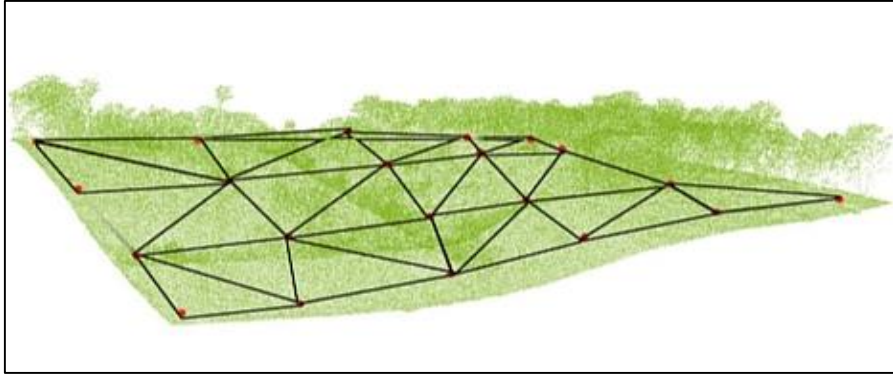
Burada s önceden belirlenen arazinin maksimum eğimini ve c_i i 'inci iterasyondaki grid boyutunu temsil etmektedir (Zhang ve Cui, 2007). Basit uygulamalarda i 'inci iterasyondaki grid boyutu c_i her iterasyonda iki kat artacak şekilde alınabilir (Zhang ve Cui, 2007);

$$c_i = 2c_{i-1} \quad i = 2, 3, \dots, M \quad (M \text{ toplam iterasyon sayısı}) \quad (2.9)$$

2.4. Adaptive TIN (ATIN) Filtreleme Yöntemi

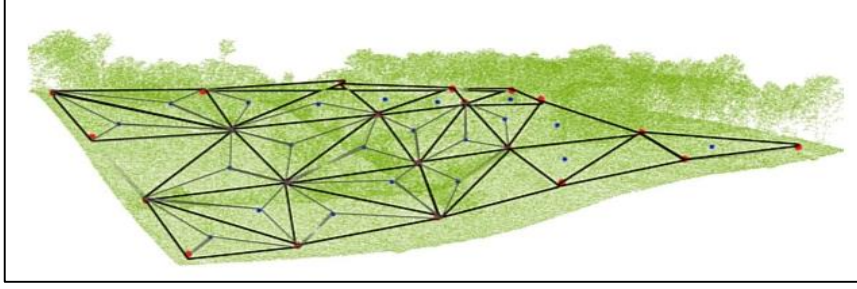
Axelsson (2000) tarafından geliştirilen Adaptive TIN filtreleme yöntemi zemin noktalarını seçerken her bir noktanın Triangulated Irregular Network (TIN) yüzeyine uzaklıklarını kullanır. Bu yöntemde işlem adımları aşağıdaki gibidir;

- Öncelikle tüm veri seti kare gridlere bölünür ve her bir grid için başlangıç zemin verisindeki en düşük yüksekliğe sahip noktalar (tohum) seçilir.
- Sonrasında tüm bu zemin noktaları kullanılarak referans yüzeyi olacak olan TIN oluşturulur (Şekil 7).



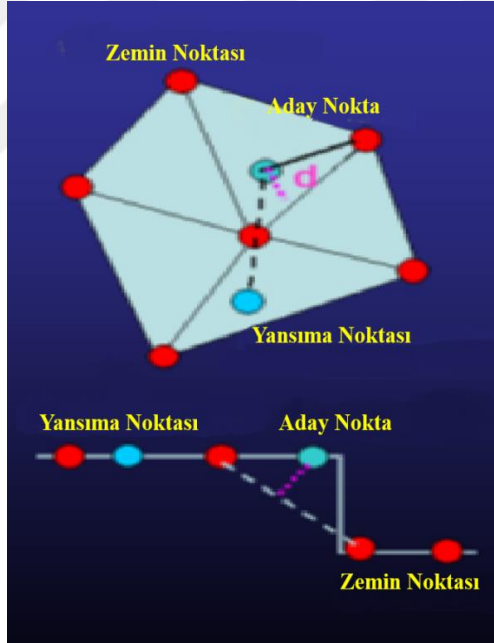
Şekil 7. Başlangıç zemin noktalarından TIN oluşturulması (URL-1).

- TIN deki her bir üçgene sınıflandırılmamış zemin üstü (aday) noktalardan biri eklenir (Şekil 8).



Şekil 8. Her bir üçgene aday noktaların eklenmesi (mavi noktalar eklenen aday noktaları temsil etmektedir) (URL-2).

- Noktaların sınıflandırılmasında her bir aday nokta ile üçgen yüzeyi arasındaki uzaklık ve aday noktanın üçgenin köşe noktaları ile yaptığı açı kullanılır. Eğer bu uzaklık ve açılar önceden belirlenmiş eşik değerden küçük ise aday nokta zemin noktalarına eklenir.



Şekil 9. Adaptive TIN filtreleme ile zemin noktası seçimi. Aday nokta ile üçgen yüzey arasındaki mesafe (d) önceden belirlenen eşik değer ile karşılaştırılarak aday nokta sınıflandırılır. Eğer bu mesafe eşik değerinden küçük ise aday nokta zemin noktası olarak sınıflandırılır. Mesafe eşik değerden büyükse fakat yansıma noktasının mesafesi eşik değerden küçük ise aday nokta yine zemin noktası olarak sınıflandırılır (Zhang ve Cui, 2007).

- Uçurum kenarları gibi dik yamaçlarda zemin noktalarının belirlenmesinde yansıma noktasına (mirror point) olan uzaklıklar kullanılır. Yansıma noktası aday noktanın en yakınındaki noktaya olan yansımasıdır (Şekil 9).
- Sonraki iterasyonda yeni zemin noktaları eklenerek oluşturulan TIN sıklaştırılır. İşlemler ekleyecek yeni bir nokta kalmayana kadar, yani tüm noktalar zemin ve zemin üstü noktası olarak sınıflandırılana kadar devam eder (Axelsson, 2000; Zhang ve Cui, 2007; Zhang vd., 2013).



3. ENTERPOLASYON YÖNTEMLERİ

3.1. Polinomlarla Enterpolasyon

Polinomlarla enterpolasyon yöntemi yüzey modellemede en yaygın kullanılan tekniklerden biridir. Bu yöntemde arazi tek bir fonksiyonla ifade edilmektedir. Kontrol noktalarından; yani x_i, y_i yataydaki konumları ve z_i yükseklikleri belli olan noktalardan yararlanılarak polinomun katsayıları belirlenir. Burada gerekli olan kontrol noktalarının sayısı polinom derecesine bağlı olarak değişmektedir. Polinomun bilinmeyenleri olan katsayılar belirlendikten sonra her x_i, y_i noktası için z_i yükseklikleri hesaplanabilir. (x_i, y_i, z_i) koordinatları ile bilinen kontrol noktalarının oluşturduğu arazi yüzeyi n . dereceden ortogonal ya da ortogonal olmayan polinomlar kullanılarak ifade edilebilir.

3.1.1. Ortogonal Polinomlarla Enterpolasyon

Ortogonal polinomlarla enterpolasyonda kullanılan matematiksel ifade;

$$z(x, y) = \sum_{k=0}^n \sum_{\substack{j=k-i \\ i=0}}^k a_{ij} x^i y^j \quad (3.1)$$

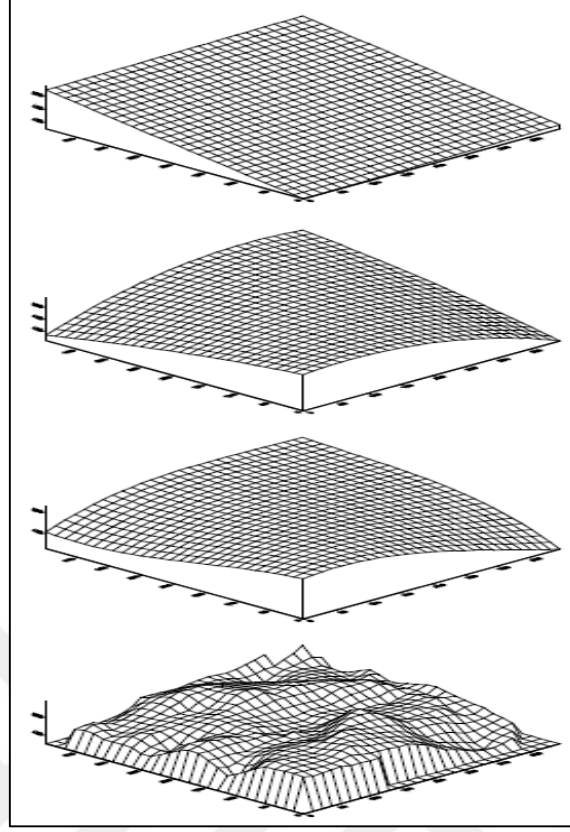
şeklindedir. Burada;

a_{ij} : Polinomun bilinmeyen katsayılarını,

n : Polinomun derecesini,

x ve y : Noktaların düzlem koordinatlarını

ifade etmektedir. Eşitlikteki k değeri polinomun derecesine göre değer almaktadır. $n = 1$ seçildiğinde yüzey lineer, $n = 2$ seçildiğinde yüzey kuadratik ve $n = 3$ seçildiğinde yüzey kübik olarak adlandırılır (İnal, 1996; İnal vd., 2002).



Şekil 10. Üstten alta doğru sırasıyla lineer, quadratik, kübik ve orijinal yüzeyler (Yiğit, 2003).

3.1.1.1. Lineer Yüzey ile Enterpolasyon

Bir düzlem aynı doğru üzerinde olmayan üç nokta ile belirlenebilir. Üçgensel yüzeyler bu tip yüzeylere örnektir (Li vd., 2004). Düzlemin matematiksel fonksiyonu aşağıdaki gibidir;

$$z = a_0 + a_1x + a_2y \quad (3.2)$$

Eşitlikte a_0 , a_1 ve a_2 katsayılarının hesabı için en az üç kontrol noktasına ihtiyaç vardır. Kontrol nokta sayısı n olmak üzere, $n > 3$ olması durumunda bilinmeyen katsayılar en küçük kareler (EKK) yöntemi ilkesine göre çözümlenir. Bu durumda matris çözümü,

$$z(x, y) = AX \quad (3.3)$$

şeklindedir. Bilinmeyenleri içeren matris,

$$X = (A^T A)^{-1} A^T L \quad (3.4)$$

şeklinde olur. Denklem (3.4)' de ifade edilen matrisler;

$$\begin{aligned} X &= \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} \\ A &= \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_n & y_n \end{bmatrix} \\ L &= \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ \vdots \\ z_n \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.5)$$

şeklinde gösterilebilir. Burada X 3×1 boyutlu polinom katsayılar vektörünü, A $n \times 3$ boyutlu bilinmeyenlere ait katsayılar matrisini (kontrol noktalarına ait konum bilgilerini ve 1 elemanı içerir) ve L ise $n \times 1$ boyutlu kontrol noktalarına ait yükseklik değerini içeren ölçü vektörünü ifade eder.

Denklem sistemi çözüldüğünde a_0 , a_1 ve a_2 katsayıları elde edilir. Sonrasında ise herhangi bir x_i, y_i Denklem (3.2)' deki eşitlikte yerine koyulur ve o konuma ait z_i yüksekliği elde edilir (Yiğit, 2003).

3.1.1.2. Kuadratik Yüzey ile Enterpolasyon

Denklem (3.1)' de genel ortogonal polinom yüzeyi için $n = 2$ seçilirse, $k = 0, 1, 2$ değerlerini alır ve

$$z = a_0 + a_1x + a_2y + a_3x^2 + a_4xy + a_5y^2 \quad (3.6)$$

eşitliğiyle 6 bilinmeyenli kuadratik yüzey elde edilir. Eşitlikte $a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5$ katsayılarının hesabı için en az 6 kontrol noktasına ihtiyaç vardır. Kontrol nokta sayısı n

olmak üzere, $n > 6$ olması durumunda bilinmeyen katsayılar en küçük kareler yöntemi ilkesine göre Denklem (3.3) ve (3.4) eşitlikleri ile çözümlenir. Bu durumda eşitliğin çözümü için kurulması gereken denklem sistemi aşağıdaki gibidir;

$$\begin{aligned}
 X &= \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \\ a_5 \end{bmatrix} \\
 A &= \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 & x_1^2 & x_1y_1 & y_1^2 \\ 1 & x_2 & y_2 & x_2^2 & x_2y_2 & y_2^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_n & y_n & x_n^2 & x_ny_n & y_n^2 \end{bmatrix} \\
 L &= \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ \vdots \\ z_n \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{3.7}$$

Burada X 6×1 boyutlu polinom katsayılar vektörünü, A $n \times 6$ boyutlu bilinmeyenlere ait katsayılar matrisini (kontrol noktalarına ait konum bilgilerini ve 1 elemanını içerir) ve L ise $n \times 1$ boyutlu kontrol noktalarına ait yükseklik değerini içeren ölçü vektörünü ifade eder.

Katsayılar $a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5$ hesaplanır, sonra herhangi bir i noktasının x_i, y_i koordinatları Denklem (3.6)'daki eşitlikte yerine konularak o konuma ait z_i yüksekliği elde edilir (Yiğit, 2003).

3.1.1.3. Kübik Yüzey ile Enterpolasyon

Denklem (3.1)'deki genel ortogonal polinom yüzeyinde $n = 3$ seçilirse, $k = 0, 1, 2, 3$ değerlerini alır ve

$$\begin{aligned}
 z &= a_0 + a_1x + a_2y + a_3x^2 + a_4xy + a_5y^2 + a_6x^3 + a_7x^2y + a_8xy^2 \\
 &\quad + a_9y^3
 \end{aligned} \tag{3.8}$$

eşitliğiyle 10 bilinmeyenli kübik yüzey elde edilir. Eşitlikte bilinmeyen katsayıların hesabı için en az 10 kontrol noktasına ihtiyaç vardır. Kontrol nokta sayısı n olmak üzere, $n > 10$ olması durumunda bilinmeyen katsayılar en küçük kareler yöntemi ilkesine göre (3.3) ve

(3.4) eşitlikleri ile çözümlenir. Bu durumda eşitliğin çözümü için kurulması gereken denklem sistemi aşağıdaki gibidir;

$$\begin{aligned}
 X^T &= [a_0 \quad a_1 \quad a_2 \quad a_3 \quad a_4 \quad a_5 \quad a_6 \quad a_7 \quad a_8 \quad a_9] \\
 A &= \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 & x_1^2 & x_1 y_1 & y_1^2 & x_1^3 & x_1^2 y_1 & x_1 y_1^2 & y_1^3 \\ 1 & x_2 & y_2 & x_2^2 & x_2 y_2 & y_2^2 & x_2^3 & x_2^2 y_2 & x_2 y_2^2 & y_2^3 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_n & y_n & x_n^2 & x_n y_n & y_n^2 & x_n^3 & x_n^2 y_n & x_n y_n^2 & y_n^3 \end{bmatrix} \\
 L^T &= [z_1 \quad z_2 \quad \cdots \quad z_n]
 \end{aligned} \tag{3.9}$$

Burada X 10×1 boyutlu polinom katsayılar vektörünü, A $n \times 10$ boyutlu bilinmeyenlere ait katsayılar matrisini (kontrol noktalarına ait konum bilgilerini ve 1 elemanını içerir) ve L ise $n \times 1$ boyutlu kontrol noktalarına ait yükseklik değerini içeren ölçü vektörünü ifade eder.

Katsayılar $a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7, a_8, a_9$ hesaplanır, sonra herhangi bir i noktasının x_i, y_i koordinatları Denklem (3.8)' deki eşitlikte yerine konularak o konuma ait z_i yüksekliği elde edilir (Yiğit, 2003).

3.1.2. Ortogonal Olmayan Polinomlarla Enterpolasyon

Ortogonal olmayan polinomlarla enterpolasyonda kullanılan matematiksel ifade;

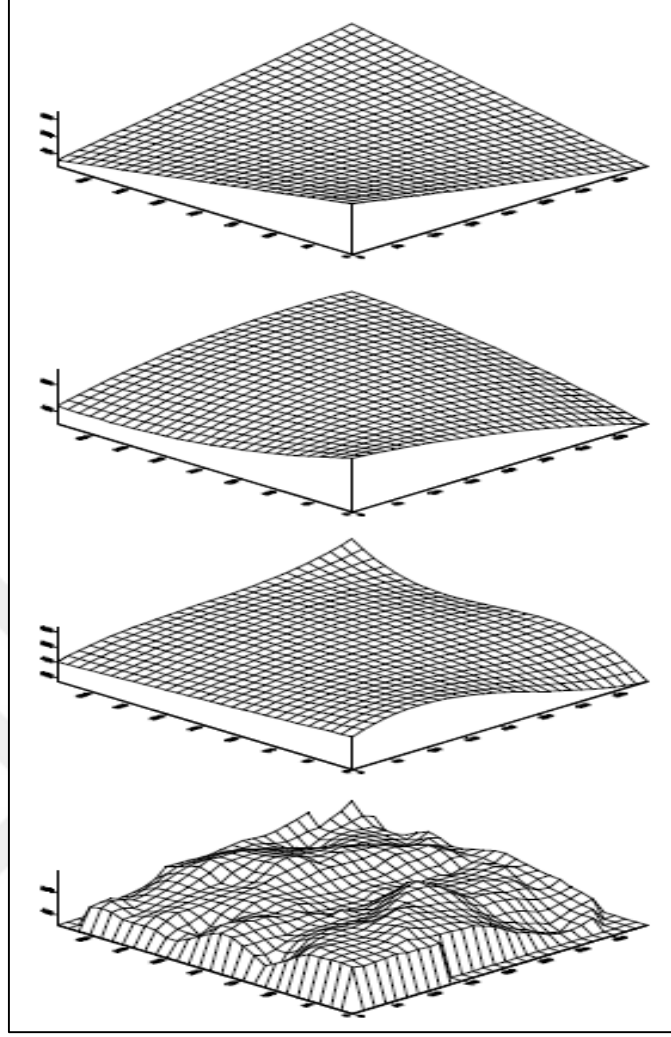
$$z(x, y) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n a_{ij} x^i y^j \tag{3.10}$$

şeklinde dir. Yüzey $n = 1$ seçildiğinde bi-lineer, $n = 2$ seçildiğinde bi-kuadratik ve $n = 3$ seçildiğinde bi-kübik olarak adlandırılır (İnal, 1996; İnal vd., 2002). Burada,

a_{ij} : Polinomun bilinmeyen katsayıları,

n : Polinomun derecesi,

x, y : Noktaların düzlem koordinatlarıdır (İnal vd., 2002).



Şekil 11. Üstten alta doğru sırasıyla bi-lineer, bi-küçük, bi-küçük ve orijinal yüzeyler (Yiğit, 2003).

3.1.2.1. Bi-lineer Yüzey ile Enterpolasyon

Bi-lineer enterpolasyon aynı doğru üzerinde olmayan herhangi dört nokta için yapılabilir (Li vd., 2004). Bi-lineer enterpolasyonun mantığı lineer enterpolasyon yöntemiyle benzerdir. Bi-lineer enterpolasyonun lineer enterpolasyondan farkı kullanılan fonksiyon ve minimum kontrol noktası sayısındaki farklılıktır.

$$z = a_0 + a_1x + a_2y + a_3xy \quad (3.11)$$

Eşitlikte a_0, a_1, a_2 ve a_3 katsayılarının hesabı için en az dört kontrol noktasına ihtiyaç vardır. Kontrol noktası sayısı n olmak üzere, $n > 4$ olması durumunda bilinmeyen

katsayılar en küçük kareler yöntemi ilkesine göre çözümlenir. Bu durumda matris çözümü Denklem (3.3) ve (3.4)' e göre yapılır. Denklem (3.11)' in çözümü için kurulması gereken denklem sistemi aşağıdaki gibidir;

$$\begin{aligned}
 X &= \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{bmatrix} \\
 A &= \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 & x_1y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 & x_2y_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_n & y_n & x_ny_n \end{bmatrix} \\
 L &= \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ \vdots \\ z_n \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{3.12}$$

Burada X 4×1 boyutlu polinom katsayılar vektörünü, A $n \times 4$ boyutlu bilinmeyenlere ait katsayılar matrisini (kontrol noktalarına ait konum bilgilerini ve 1 elemanını içerir) ve L ise $n \times 1$ boyutlu kontrol noktalarına ait yükseklik değerini içeren ölçü vektörünü ifade eder (Yiğit, 2003).

Katsayılar a_0 , a_1 , a_2 ve a_3 hesaplanır, sonra herhangi bir i noktasının x_i, y_i koordinatları Denklem (3.11)'deki eşitlikte yerine konularak o konuma ait z_i yüksekliği elde edilir.

3.1.2.2. Bi-kuadratik Yüzey ile Enterpolasyon

Denklem (3.10)' daki genel ortogonal olmayan polinom yüzeyinde $n = 2$ seçilirse,

$$z = a_0 + a_1x + a_2y + a_3x^2 + a_4xy + a_5y^2 + a_6x^2y + a_7xy^2 + a_8x^2y^2 \tag{3.13}$$

eşitliğiyle 9 bilinmeyenli bi-kuadratik yüzey elde edilir. Eşitlikte bilinmeyen katsayıların hesabı için en az 9 kontrol noktasına ihtiyaç vardır. Kontrol nokta sayısını n olmak üzere, $n > 9$ olması durumunda bilinmeyen katsayılar en küçük kareler yöntemi ilkesine göre Denklem (3.3) ve (3.4) eşitlikleri ile çözümlenir. Bu durumda eşitliğin çözümü için kurulması gereken denklem sistemi aşağıdaki gibidir;

$$\begin{aligned}
X^T &= [a_0 \ a_1 \ a_2 \ a_3 \ a_4 \ a_5 \ a_6 \ a_7 \ a_8] \\
A &= \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 & x_1^2 & x_1y_1 & y_1^2 & x_1^2y_1 & x_1y_1^2 & x_1^2y_1^2 \\ 1 & x_2 & y_2 & x_2^2 & x_2y_2 & y_2^2 & x_2^2y_2 & x_2y_2^2 & x_2^2y_2^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_n & y_n & x_n^2 & x_ny_n & y_n^2 & x_n^2y_n & x_ny_n^2 & x_n^2y_n^2 \end{bmatrix} \\
L^T &= [z_1 \ z_2 \ \cdots \ z_n]
\end{aligned} \tag{3.14}$$

Burada X 9×1 boyutlu polinom katsayılar vektörünü, A $n \times 9$ boyutlu bilinmeyenlere ait katsayılar matrisini (kontrol noktalarına ait konum bilgilerini ve 1 elemanını içerir) ve L ise $n \times 1$ boyutlu kontrol noktalarına ait yükseklik değerini içeren ölçü vektörünü ifade eder.

Katsayılar $a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7, a_8$ hesaplanır, sonra herhangi bir i noktasının x_i, y_i koordinatları Denklem (3.13)' deki eşitlikte yerine konularak o konuma ait z_i yüksekliği elde edilir (Yiğit, 2003).

3.1.2.3. Bi-kübik Yüzey ile Enterpolasyon

Denklem (3.10)' daki genel ortogonal olmayan polinom yüzeyinde $n = 3$ seçilirse,

$$\begin{aligned}
z &= a_0 + a_1x + a_2y + a_3x^2 + a_4xy + a_5y^2 + a_6x^2y + a_7xy^2 + \\
&\quad a_8x^2y^2 + a_9y^3 + a_{10}xy^3 + a_{11}x^2y^3 + a_{12}x^3 + a_{13}x^3y + a_{14}x^3y^2 + a_{15}x^3y^3
\end{aligned} \tag{3.15}$$

eşitliğiyle 16 bilinmeyenli bi-kübik yüzey elde edilir. Eşitlikte bilinmeyen katsayıların hesabı için en az 16 kontrol noktasına ihtiyaç vardır. Kontrol nokta sayısı n olmak üzere, $n > 16$ olması durumunda bilinmeyen katsayılar en küçük kareler yöntemi ilkesine göre Denklem (3.3) ve (3.4) eşitlikleri ile çözümlenir. Bu durumda eşitliğin çözümü için kurulması gereken denklem sistemi aşağıdaki gibidir;

$$\begin{aligned}
X^T &= [a_0 \ a_1 \ a_2 \ \cdots \ \cdots \ \cdots \ a_{15}] \\
A &= \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 & \cdots & \cdots & x_1^3y_1^2 & x_1^3y_1^3 \\ 1 & x_2 & y_2 & \cdots & \cdots & x_2^3y_2^2 & x_2^3y_2^3 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_n & y_n & \cdots & \cdots & x_n^3y_n^2 & x_n^3y_n^3 \end{bmatrix} \\
L^T &= [z_1 \ z_2 \ \cdots \ z_n]
\end{aligned} \tag{3.16}$$

Burada X 16×1 boyutlu polinom katsayılar vektörünü, A $n \times 16$ boyutlu bilinmeyenlere ait katsayılar matrisini (kontrol noktalarına ait konum bilgilerini ve 1 elemanını içerir) ve L ise $n \times 1$ boyutlu kontrol noktalarına ait yükseklik değerini içeren ölçü vektörünü ifade eder.

Katsayılar $a_0, a_1, a_2, a_3, \dots, a_{14}, a_{15}$ hesaplanır, sonra herhangi bir i noktasının x_i, y_i koordinatları Denklem (3.15)' deki eşitlikte yerine konularak o konuma ait z_i yüksekliği elde edilir (Yiğit, 2003).

3.2. Ters Mesafe Ağırlıklı Yöntem (IDW/Inverse Distance Weighted)

Ters mesafe ağırlıklı yöntemi komşu noktalardan tahminler üreten lokal bir ara değer kestirim yöntemidir. IDW enterpolasyon tekniği enterpole edilecek yüzeyde yakındaki noktaların uzaktaki noktalardan daha fazla ağırlığa sahip olması esasına dayandırılır. (Arslanoğlu ve Özçelik, 2005).

3.2.1. Shepard Yöntemi

Ters mesafe ağırlıklı enterpolasyon yöntemi en basit şekliyle “Shepard Metodu” olarak adlandırılır. Shepard metodu “Orijinal Shepard Yöntemi” ve “Geliştirilmiş Shepard Yöntemi” olarak ikiye ayrılmaktadır. Yapılan uygulamalar sonucunda Geliştirilmiş Shepard Yöntemi sonuçları çok fazla hata verdiği için dolaylı bu tez kapsamında sadece Orjinal Shepard Yöntemi kullanılmıştır. Yöntemin denklemi aşağıdaki gibidir;

$$z(x, y) = \sum_{i=1}^n w_i z_i \quad (3.17)$$

Burada n yüzeydeki kontrol noktası sayısını ve z_i kontrol noktalarındaki bilinen yükseklik değerlerini gösterir. w_i ağırlıkları göstermek üzere;

$$w_i = \frac{\frac{1}{d_{ij}^p}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_{ij}^p}} \quad (3.18)$$

şeklinde hesaplanır. Burada p kullanıcı tarafından 0 ile 5 arasında değişen sayılardan seçilen bir değer olup güç fonksiyonu (power function) olarak adlandırılır. Shepard yönteminin literatürdeki uygulamalarında p değeri genellikle 2 olarak alınmıştır. $p = 2$ olarak uygulanan Shepard Yöntemi, Ters Kare Mesafesi (Inverse Square Distance/ISD) olarak da adlandırılmaktadır. d_{ij} enterpolasyon noktasından kontrol noktasına olan mesafedir ve;

$$d_{ij} = \sqrt{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2} \quad (3.19)$$

şeklinde hesaplanır (Kazancı, 2014).

3.3. Radyal Tabanlı Fonksiyonlar (RTF) ile Enterpolasyon

Multiküadratik enterpolasyon yönteminin geliştirilmiş halidir. Bu yöntemde kontrol noktalarının tümü aynı anda kullanılarak arazi yüzeyi tek bir fonksiyonla ifade edilir. Yöntemin en genel eşitliği;

$$z_0 = \sum_{i=1}^m C_i [Q(x_0, y_0, x_i, y_i)] + z(x_0, y_0) \quad (3.20)$$

şeklinde dir. Burada C katsayılar vektörünü, Q RTF yüzeyini, ve m kontrol noktası sayısını ifade etmektedir. RTF yönteminde öncelikle m sayıdaki kontrol noktaları ile n . dereceden bir polinom kullanılarak trend yüzeyi geçirilir (Hardy, 1971). Şimdiye kadar yapılan uygulamalar 1. veya 2. dereceden bir polinomun yeterli olduğunu göstermiştir (Leberl, 1973). Trend yüzeyi olarak belirlenen n . dereceden polinomun bilinmeyen katsayıları en küçük kareler yöntemine göre çözümlenir. Sonrasında kontrol noktalarının x_i, y_i değerleri denklemde yerine koyularak ve bunlara ait yükseklikler olan z_{trend} değerleri belirlenmiş

olur. Kontrol noktalarındaki artık yükseklik değerleri Δz_i ' ler bu noktaların yüksekliği olan z_i ' ler ile z_{trend} yüksekliklerinin farkı alınarak hesaplanır.

$$\Delta z_i = z_i - z(x_i, y_i) = z_i - z_{trend} \quad i = 1, 2, 3 \dots m \quad (3.21)$$

Herhangi bir x_0, y_0 enterpolasyon noktasındaki Δz_0 artık yükseklik değeri ise;

$$\Delta z_0 = z_0 - z(x_0, y_0) = z_0 - z_{trend} \quad (3.22)$$

şeklinde ifade edilir. Eşitlikteki bilinmeyenlerden biri olan Δz_0 multiküadratik yöntemle göre hesaplandığında enterpolasyon noktalarına ait z_0 yükseklikleri de elde edilecektir (Yiğit, 2003).

Denklem (3.20)' ye göre Δz_0 aynı zamanda aşağıdaki gibi ifade edilir;

$$\Delta z_0 = \sum_{i=1}^m C_i [Q(x_0, y_0, x_i, y_i)] \quad (3.23)$$

Burada y ve x ' in fonksiyonları olan m sayıdaki aynı türden RTF (Q) yüzeylerinin toplamı Δz_0 ' ı oluşturur. Kontrol noktalarının Δz_i artık yükseklik değerlerinden hesaplanan C_i katsayıları ikinci dereceden terimlerin işaretini ve eğimini belirler (Hardy, 1971; Güler, 1983; Çakır, 2012). $Q(x_0, y_0, x_i, y_i)$ yüzeyi için ise çeşitli RTF' ler mevcuttur. d_{i0} kontrol noktası ile enterpolasyon noktası arasındaki yatay mesafe olmak üzere,

$$d_{i0} = \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2} \quad (3.24)$$

şeklinde hesaplanır. Literatürdeki radyal tabanlı fonksiyonlardan bazıları Tablo 1' de gösterilmiştir.

Tablo 1. Radyal tabanlı fonksiyon türleri

Radyal Tabanlı Fonksiyonlar	Formül
Gauss	$Q(d) = e^{-\delta^2 d^2}$
Kübik Splayn	$Q(d) = d^3$
Ters Multiküadratik	$Q(d) = 1/\sqrt{d^2 + \delta^2}$
Multilog	$Q(d) = \log(d^2 + \delta^2)$
Doğal Kübik Splayn	$Q(d) = (d^2 + \delta^2)^{3/2}$
Multiküadratik	$Q(d) = \sqrt{d^2 + \delta^2}$

Hardy' nin multiküadratik yüzeyleri kendi aralarında çeşitlilik göstermektedir.

Bunlar;

- İki yapraklı dairesel hiperboloid;

$$Q(x_0, y_0, x_i, y_i) = [(x_0 - x_i)^2 + (y_0 - y_i)^2 + \delta^2]^{1/2} \quad (3.25)$$

- Dairesel paraboloid;

$$Q(x_0, y_0, x_i, y_i) = [(x_0 - x_i)^2 + (y_0 - y_i)^2 + \delta^2] \quad (3.26)$$

- Dairesel dik koni;

$$Q(x_0, y_0, x_i, y_i) = [(x_0 - x_i)^2 + (y_0 - y_i)^2]^{1/2} \quad (3.27)$$

şeklindedir. Bu eşitlikler Denklem (3.23)' de yerine konulduğunda;

- İki yapraklı dairesel hiperboloid serilerinin toplamları;

$$\Delta z_0 = \sum_{i=1}^m C_i [(x_0 - x_i)^2 + (y_0 - y_i)^2 + \delta^2]^{1/2} \quad (3.28)$$

- Dairesel paraboloid serilerinin toplamları;

$$\Delta z_0 = \sum_{i=1}^m C_i [(x_0 - x_i)^2 + (y_0 - y_i)^2 + \delta^2] \quad (3.29)$$

- Dairesel dik konilerin toplamları;

$$\Delta z_0 = \sum_{i=1}^m C_i [(x_0 - x_i)^2 + (y_0 - y_i)^2]^{1/2} \quad (3.30)$$

şeklinde multikvadratik yüzeyler elde edilir (Güler, 1985; Yiğit, 2003).

Multikvadratik yüzey olarak Denklem (3.27)' nin seçilmesi durumunda C_i katsayılarını hesap etmek için kontrol noktası sayısına bağlı olarak m tane lineer denklem sistemi aşağıdaki şekilde oluşturulur;

$$\begin{aligned} C_1 a_{11} + C_1 a_{12} + \dots + C_m a_{1m} &= \Delta z_1 \\ C_2 a_{21} + C_2 a_{22} + \dots + C_m a_{2m} &= \Delta z_2 \\ \dots + \dots \quad \ddots \quad \dots &= \vdots \\ C_m a_{m1} + C_m a_{m2} + \dots + C_m a_{mm} &= \Delta z_m \end{aligned} \quad (3.31)$$

Bu denklem sistemindeki;

- a_{ij} katsayıları her bir kontrol noktası arasındaki mesafe;

$$a_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (3.32)$$

- A a_{ij} katsayılarından oluşan matris;

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1m} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{mm} \end{bmatrix} \quad (3.33)$$

- Δz kontrol noktalarındaki artık yükseklikleri içeren vektör;

$$\Delta z^T = [\Delta z_1 \quad \Delta z_2 \quad \dots \quad \Delta z_m] \quad (3.34)$$

- C bilinmeyenler vektörü;

$$C^T = [C_1 \quad C_2 \quad \dots \quad C_m] \quad (3.35)$$

olmak üzere;

$$AC = \Delta z \quad (3.36)$$

şeklinde ifade edilir. Burada bilinmeyen C_i katsayıları;

$$C = A^{-1} \Delta z \quad (3.37)$$

şeklinde elde edilir. (x_0, y_0) koordinatlarıyla bilinen herhangi bir enterpolasyon noktasının z_0 yükseklik değeri,

$$z_0 = z(x_0, y_0) + \sum_{i=1}^m C_i [(x_0 - x_i)^2 + (y_0 - y_i)^2]^{1/2} \quad (3.38)$$

eşitliği ile hesaplanır. Denklem (3.25) ve (3.26)'daki δ^2 sabit bir sayıdır ve geometrik parametre olarak adlandırılır. Denklem (3.25)'de $\delta^2 = 0$ alındığında Denklem (3.27) elde edilir. Tablo 2' de δ parametesinin hesaplanması için formüsel öneriler sunulmuştur (Franke, 1979; Hardy, 1990; Fasshaurer, 2002).

Tablo 2. δ parametesinin hesaplanması için sunulan öneriler

Önerenler	Formül
Hardy	$\delta = 0.815s$
Franke	$\delta = 1.25 D/\sqrt{m}$
Fasshaurer	$\delta = 2/\sqrt{m}$

Tablo 2' de s çalışma alanındaki tüm kontrol noktalarının en yakın komşuları ile aralarındaki mesafelerin ortalamasını, D tüm kontrol noktalarını içine alan en küçük çemberin çapını, m ise kontrol noktalarının sayısını ifade etmektedir (Çakır, 2012).

3.4. Kriging Enterpolasyon Yöntemi

Kriging kestirim yöntemi jeostatistikte kullanılan ve birçok alanda popülaritesini kanıtlamış bir yöntemdir. Adını, tekniği ilk geliştiren D. G. Krige isimli Güney Afrikalı bir maden mühendisinden almaktadır (İnal ve Özer, 2003). Kriging enterpolasyon yöntemi kontrol noktalarından alınan verileri kullanarak diğer noktalardaki verilerin optimum

değerlerini kestiren bir enterpolasyon yöntemidir (İnal vd., 2002). Kriging yöntemi, semivariogramı kullanarak bilinmeyen noktalardaki yansız değişimin tahmininin optimal bir şekilde yapıldığı bir yöntemdir (Trangmar vd., 1985; Başkan, 2004). Bundan dolayı Kriging yöntemine en iyi lineer yansız tahminci (BLUP, Best Linear Unbiased Predictor) ya da en iyi lineer yansız hesaplayıcı (BLUE, Best Linear Unbiased Estimator) adları da verilir (Kazancı, 2014).

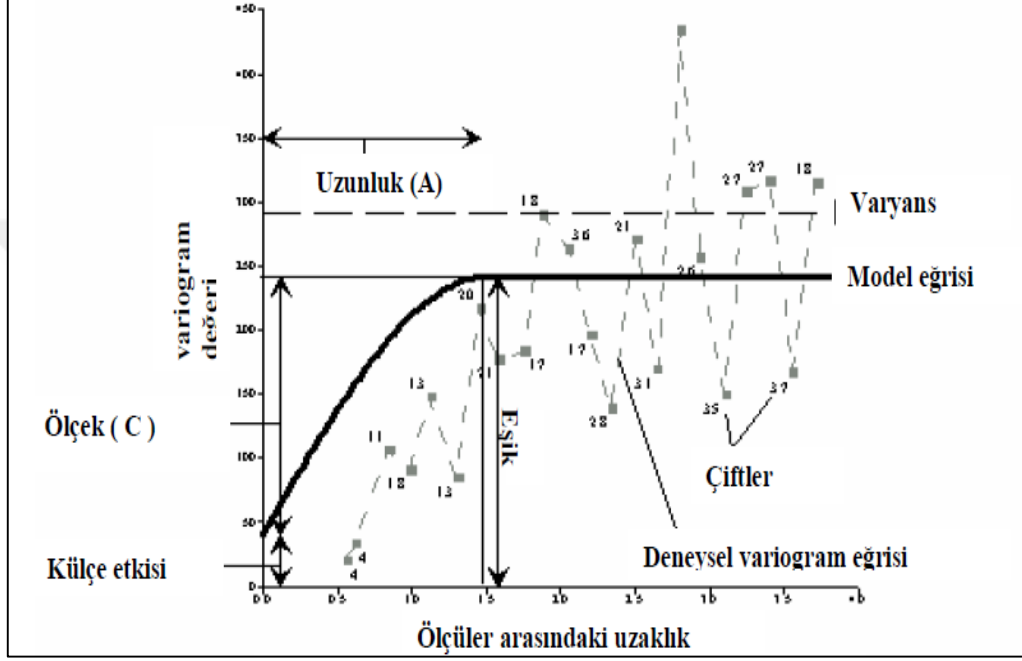
Kriging yöntemini diğer yöntemlerden ayıran en büyük özelliği variogram modelidir. Variogram uzayda farklı noktalardaki değişkenler arasındaki bağımlılığı ölçen ve karakterize eden bir fonksiyondur. Variogram analizi incelenen özelliğin konumsal bağımlılık derecesini, yani ölçme yapılan noktalar arasındaki konumsal bağımlılığı belirlemede, Kriging analizi ise ölçme yapılmayan nokta veya alanlardaki özelliklerin kestirilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Öztaş, 1995; Başkan, 2004; Yaprak ve Arslan, 2008). Dowd (1984)' e göre Kriging yönteminde en uygun ağırlıkları bulmak için ölçme noktaları arasındaki konumsal bağımlılığın bilinmesi gerekir. Bu konumsal bağımlılık ya bir kovaryans fonksiyonu ya da bir variogram fonksiyonu kullanmak suretiyle tanımlanabilir. Bras ve Rodriguez-Iturbe (1985)' e göre her iki yaklaşım da eşdeğerdir (Barton vd., 1999). Variogram fonksiyonu birbirinden d kadar uzakta olan iki konumsal değişken arasındaki farkın varyansı olarak ifade edilir. Yarıvariogram fonksiyonu (semivaryans) ise variogram fonksiyonunun yarısına eşittir (Isaaks ve Srivastava, 1989). Jeostatistiğin önemli bir kavramı olarak tanımlanan iki veri noktası arasındaki semivaryans (γ);

$$\gamma(x_i, y_i; x_0, y_0) = \gamma(d) = \frac{1}{2} \text{var}[Z(x_i, y_i) - Z(x_0, y_0)] \quad (3.39)$$

eşitliği ile elde edilir. Burada Z , x_i, y_i ve x_0, y_0 noktalarındaki yükseklik değerlerini, $\gamma(d)$ ise d mesafesine ilişkin semivaryans değerini ifade etmektedir (Webster ve Oliver, 2001). Semivaryans örneklemeler arasındaki konumsal bağımlılık derecesinin bir ölçütüdür. Noktalar arasındaki semivaryansın büyüklüğü noktalar arasındaki mesafeye bağlıdır (İnal ve Özer, 2003; Alkanalka, 2005).

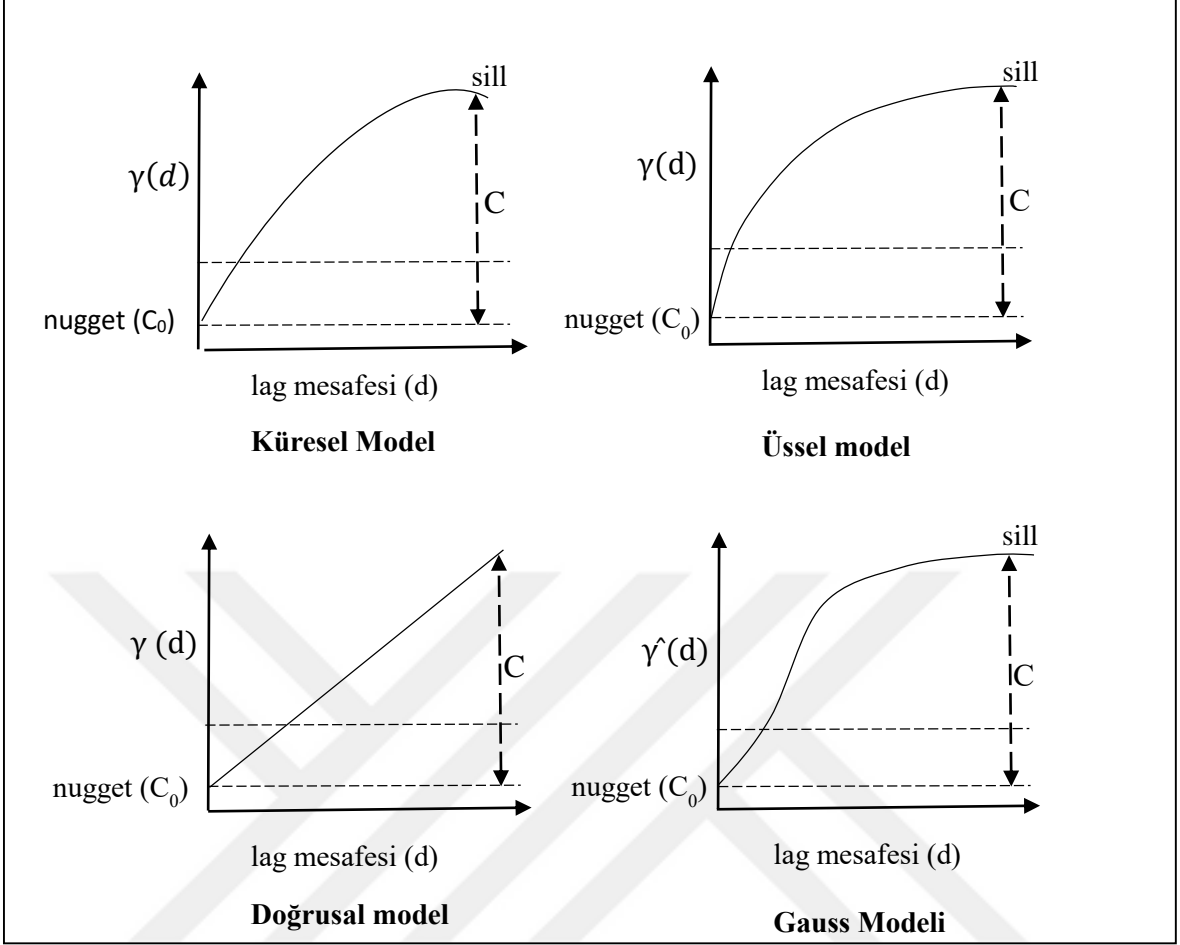
Semivaryansın doğru bir şekilde hesaplanabilmesi için modeli oluşturan, yatay konumu ve yükseklikleri bilinen kontrol nokta sayısının en az 30 olması gerekmektedir. Bu sayı bazı araştırmacılara göre 100 ve hatta 200 olmalıdır. Bu nedenle veri setine ilişkin olmalıdır (Mulla ve Schepers, 1997; Dikici, 2001; Yaprak ve Arslan, 2008).

Herhangi bir bölgede Kriging enterpolasyon yöntemi kullanılacaksa bu durumda variogram modeli bilinmeli ya da çalışma bölgesine ait verilerden yararlanılarak deneysel variogram modeli oluşturulmalıdır. Elde edilen variogram modelinden yararlanılarak çalışma bölgesine ait teorik model parametreleri çözümlenmelidir. Variogram modelinin genel yapısı ve bileşenleri Şekil 12' de verilmiştir (İnal ve Özer, 2003).



Şekil 12. Variogram modeli ve bileşenleri (Açıkgöz, 2002; Alkanalka, 2005).

Variogram modeli grafiğinde dikey eksen semivaryansları, yatay eksen ise d mesafelerini temsil etmektedir. Deneysel variogramlarda variogram değerleri belirli uzaklıklarda hesaplanırlar. Bunların dışındaki uzaklıklarda variogram değerleri bilinmez. Bölgesel değişkenin özelliklerinin belirlenmesinde ve özellikle örneklenmemiş noktalardaki değerlerinin kestiriminde variogram değerini bütün uzunluklarda bilmek gerekir (Isaaks ve Srivastava 1989). Bu ise deneysel variogram değerlerine bir fonksiyon uyarlamayı gerektirir. Teorik variogram modelleri pozitif tanımlı fonksiyonlardır. Jeostatistikte kullanılan variogram modellerinden en yaygın olanları Şekil 13' de, formülleri ise Tablo 3' de sıralanmıştır.



Şekil 13. Yaygın olarak kullanılan 4 variogram modeli (Burrough ve McDonnell, 1998; Kazancı, 2014).

Tablo 3. Çeşitli variogram modellerinin formülleri (İnal ve Yiğit, 2004).

Variogram Modeli	Parametreler	Durum
Küresel	$\gamma(d) = C_0 + C \left[\left(\frac{3d}{2a} \right) - \left(\frac{d^3}{2a^3} \right) \right]$	$(0 \leq d \leq a)$
	$\gamma(h) = C_0 + C$	$(d \geq a)$
Üssel	$\gamma(d) = C_0 + C \left(1 - \exp\left(\frac{-d}{a}\right) \right)$	
Doğrusal	$\gamma(d) = C_0 + C \cdot d$	
Gauss	$\gamma(d) = C_0 + C \left(1 - \exp\left(\frac{-d^2}{a^2}\right) \right)$	

Tablo 3' de gösterilen modellerdeki;

C_0 : Literatürde *nugget effect* (*külçe etkisi*) olarak adlandırılır. Teorik eğrinin $d = 0$ noktasında düşey eksenini kestiği noktadır. Kestirim değerini etkilemez, sadece Kriging varyansında değişime sebep olur.

C : Variogramın yapısal bileşenleri için düşey ölçek değeridir. Yapısal varyans olarak da tanımlanır.

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

d : Örneklem noktaları arasındaki ya da enterpolasyon noktası ile örneklem noktaları arasındaki yatay uzunluktur.

$C_0 + C$: *Sill* olarak adlandırılır. Variogram fonksiyonunun toplam düşey ölçek değeridir. Yaklaşık örneklem varyansına eşittir. Kestirim değerini etkilemez, sadece Kriging varyansında değişime sebep olur.

Kriging yöntemi, çevredeki ölçülen değerlerden her konum için bir ağırlık hesabının yapılmasında IDW yöntemine benzer bir şekilde yakındaki noktalardan daha fazla etkilenmeyi sağlayan bir ağırlık modeli kullanır. Bununla birlikte bu ağırlıklar, sadece ölçüm ve tahmin edilen noktalar arasındaki mesafeye dayanmaz aynı zamanda bütün ölçüm noktaları arasında ki konumsal dizilime de dayanır (Kazancı, 2014). Kriging yönteminin genel denklemi;

$$Z_p = \sum_{i=1}^n W_i Z_i \quad (3.40)$$

şeklindedir. Burada Z_p p noktasının aranan yükseklik değeri, W_i Z_p 'nin hesabında kullanılan her bir Z_i 'ye atanacak ağırlık değerleri, Z_i Z_p 'nin hesabında kullanılan kontrol noktaları yükseklikleri ve n ise kontrol noktası sayısıdır.

Denklem (3.40) incelendiğinde en temel sorunun W_i ağırlıklarının belirlenmesi olduğu görülmektedir. Kriging yönteminde ağırlıklar variogram modellerinin doğrudan fonksiyonudur. Kriging ağırlıkları enterpolasyon değerini doğrudan etkilemektedir. Bu durumda enterpolasyon değerinin iyi olması için ağırlıkların yansız olarak elde edilmesi gerekmektedir (Isaaks ve Srivastava, 1989). Kriging yönteminin yaygın olarak kullanılan çeşitleri şunlardır:

- Simple Kriging
- Ordinary (Punctual) Kriging
- Universal Kriging
- Block Kriging
- Indicator Kriging
- Disjunctive Kriging
- Cokriging (İnal ve Yiğit, 2004).

3.4.1. Ordinary Kriging

Ordinary Kriging ile ara değer kestirimi yapılırken ilk işlem enterpole edilecek noktalar kümesinden variogramı oluşturmaktır. Burada oluşturulan variogram deneysel ve teorik (model) variogram olmak üzere iki kısımdan oluşur. Deneysel variogram her noktanın semivaryansının hesaplanması ile bulunur. İkinci aşamada teorik variogram seçilir (Azat 2009; Kazancı, 2014). Variogram fonksiyonundan ağırlıkların belirlenmesinde;

$$Var[\widehat{Z}_p - Z_p] = \min \quad (3.41)$$

olması koşuluna göre;

$$\begin{aligned} W_1\gamma(d_{11}) + W_2\gamma(d_{12}) + \dots + W_n\gamma(d_{1n}) &= \gamma(d_{1p}) \\ W_1\gamma(d_{21}) + W_2\gamma(d_{22}) + \dots + W_n\gamma(d_{2n}) &= \gamma(d_{2p}) \\ \dots + \dots &= \vdots \\ W_1\gamma(d_{n1}) + W_2\gamma(d_{n2}) + \dots + W_n\gamma(d_{nn}) &= \gamma(d_{np}) \end{aligned} \quad (3.42)$$

lineer denklem sistemine göre çözümlenir. Bu denklem sistemi;

$$\gamma W = \gamma_0 \quad (3.43)$$

şeklinde yazılabilir. Burada γ kontrol noktaları arasında oluşan olası tüm çiftlerin variogram değerlerini içeren $n \times n$ boyutlu kare matrisi, W , n boyutlu ağırlık bilinmeyenleri vektörünü ve γ_0 ise enterpole edilecek nokta ile kontrol noktası arasındaki

n boyutlu variogram değerleri vektörünü ifade etmektedir. Enterpolasyonun yansız olması için;

$$\sum_{i=1}^n W_i = 1 \quad (3.44)$$

şartı aranır ve Denklem (3.42);

$$\begin{array}{cccccc} W_1\gamma(d_{11}) & + & W_2\gamma(d_{12}) & + \cdots + & W_n\gamma(d_{1n}) & = & \gamma(d_{1p}) \\ W_1\gamma(d_{21}) & + & W_2\gamma(d_{22}) & + \cdots + & W_n\gamma(d_{2n}) & = & \gamma(d_{2p}) \\ \cdots & + & \cdots & \ddots & \cdots & = & \vdots \\ W_1\gamma(d_{n1}) & + & W_2\gamma(d_{n2}) & + \cdots + & W_n\gamma(d_{nn}) & = & \gamma(d_{np}) \\ W_1 & + & W_2 & + \cdots + & W_n & = & 1 \end{array} \quad (3.45)$$

şeklini alır. Yukarıdaki denklem sistemine bakıldığında n tane bilinmeyen ve $n + 1$ tane denklem olduğu görülmektedir. Çözümün yansız olması için γ Lagrange çarpanı eklenir. Lagrange çarpanı bilinmeyen sayısını denklem sayısına eşitlemek için lineer bir denklem sistemine bilinmeyen olarak katılan bir miktardır. Aynı zamanda kararsız çarpan olarak da adlandırılır (ASCE, ACSM, ASPRS, 1994). Lagrange çarpanının bilinmeyen olarak eklenmesiyle bilinmeyen sayısı ile denklem sayısı birbirine eşit olur ve Denklem (3.45)'deki denklem sistemi;

$$\begin{array}{ccccccccc} W_1\gamma(d_{11}) & + & W_2\gamma(d_{12}) & + \cdots + & W_n\gamma(d_{1n}) & + & \lambda & = & \gamma(d_{1p}) \\ W_1\gamma(d_{21}) & + & W_2\gamma(d_{22}) & + \cdots + & W_n\gamma(d_{2n}) & + & \lambda & = & \gamma(d_{2p}) \\ \cdots & + & \cdots & \ddots & \cdots & \cdots & \cdots & = & \vdots \\ W_1\gamma(d_{n1}) & + & W_2\gamma(d_{n2}) & + \cdots + & W_n\gamma(d_{nn}) & + & \lambda & = & \gamma(d_{np}) \\ W_1 & + & W_2 & + \cdots + & W_n & + & \lambda & = & 1 \end{array} \quad (3.46)$$

şeklini alır. Matris gösterimi ile;

$$\gamma = \begin{bmatrix} \gamma(d_{11}) & \gamma(d_{12}) & \cdots & \gamma(d_{1n}) & 1 \\ \gamma(d_{21}) & \gamma(d_{22}) & \cdots & \gamma(d_{2n}) & 1 \\ \cdots & \cdots & \ddots & \cdots & \cdots \\ \gamma(d_{n1}) & \gamma(d_{n2}) & \cdots & \gamma(d_{nn}) & 1 \\ 1 & 1 & \cdots & 1 & 0 \end{bmatrix} W = \begin{bmatrix} W_1 \\ W_2 \\ \vdots \\ W_P \\ \lambda \end{bmatrix} \gamma_0 = \begin{bmatrix} \gamma(d_{1p}) \\ \gamma(d_{2p}) \\ \vdots \\ \gamma(d_{np}) \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.47)$$

olmak üzere W bilinmeyenler vektörü;

$$W = \gamma^{-1}\gamma_0 \quad (3.48)$$

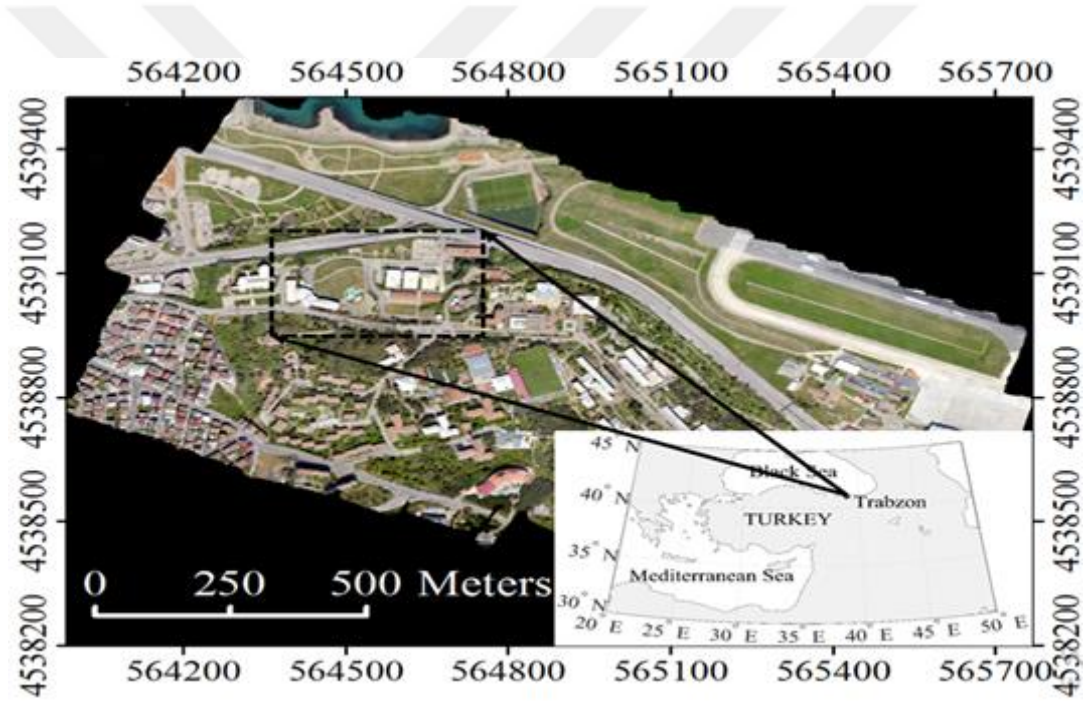
eşitliği ile hesaplanır. Artık ağırlıklar belirlendikten sonra Kriging genel denkleminde yerine konularak çalışma bölgesindeki herhangi bir nokta için enterpolasyon değeri elde edilir (İnal ve Yiğit, 2004; Kazancı, 2014).



4. YAPILAN ÇALIŞMALAR

4.1. Çalışma Alanı

Çalışma alanı olarak Karadeniz Teknik Üniversitesi (KTÜ) kampüsünde bir alan belirlenmiştir. Çalışma alanı bina ve ağaç gibi zemin üstü objelerini içermesi ile birlikte; eğimli, engebeli ve düz topografik yapıda örnek bölgeler içermektedir. Bölgenin boyutları 178 m x 410 m olup, yüksekliği 18 m ile 83 m arasında değişmektedir. Çalışma alanı Şekil 14' de gösterilmiştir.



Şekil 14. Çalışma bölgesi

4.2. Ortofoto ve Nokta Bulutlarının Üretilmesi

Gatewing X100 insansız hava aracına monte edilen RICOH GR DIGITAL IV dijital kamera ile çalışma bölgesinin hava fotoğrafları çekilmiştir. Hava fotoğrafları Nisan 2013' de gerçekleştirilen 40 dakikalık bir uçuş ile elde edilmiştir. Uçuş gerçekleştirilirken 9 hat boyunca 185 m yükseklikten 256 adet hava fotoğrafı çekilmiştir. Uçuş öncesinde çalışma bölgesinin her tarafına dağılan 12 adet yer kontrol noktası tesis edilmiştir. Çekilen hava

fotoğrafları Agisoft PhotoScan Professional yazılımında değerlendirilmiş ve bölgeye ait ham nokta bulutu elde edilmiştir. Üretilen ham nokta bulutu daha sonra kademe kademe sıklaştırılarak sırasıyla düşük, orta ve yüksek yoğunluklarda nokta bulutları elde edilmiştir. Ham, düşük, orta ve yüksek yoğunluklu nokta bulutlarının yoğunlukları sırasıyla 0,1 nokta/m², 4,2 nokta/m², 16,5 nokta/m² ve 61,1 nokta/m²' dir. Ayrıca yine aynı yazılım kullanılarak bölgeye ait 25 cm konumsal çözünürlüklü ortofoto görüntü üretilmiştir.

4.3. Nokta Bulutlarının Filtrenmesi

Çalışma kapsamında bütün nokta bulutları PM1B, PM2B, MLS, ETEW ve ATIN filtreleme yöntemleri kullanılarak filtrenmiştir. Filtreleme yöntemlerinin uygulanmasında ALDPAT v.1.0 yazılımı kullanılmıştır.

4.3.1. PM Filtreleme Yönteminin Uygulanması

PM yönteminin uygulanması aşamasında nokta bulutları hem 1 boyutlu çizgi (PM1B) hem de 2 boyutlu kare pencere (PM2B) yöntemine göre filtrenmiştir. PM yönteminin ana parametreleri aşağıdaki gibidir;

Piksel boyutu (Pb) nokta bulutunu karelere bölen her bir gridin boyutudur. Piksel boyutu veri setindeki ortalama nokta uzaklığından küçük olacak şekilde seçilebilir. Piksel boyutunun büyük alınması zemin üstü noktalarının neredeyse hiç filtrenmemesine, küçük alınması ise çok az filtrenmesine neden olmaktadır. Bu parametrenin küçük seçilmesi aynı zamanda işlem süresinin uzamasına neden olmaktadır. Eğim (e) yükseklik farkı eşik değeridir (Zhang ve Cui, 2007). Eğim arazideki ortalama eğim değeri olarak seçilebilir. Başlangıç eşik değeri (Bed) başlangıç yükseklik farkı eşik değeridir (Zhang ve Cui, 2007). Başlangıç eşik değeri aşağı yukarı nokta bulutu doğruluğuna eşit alınabilir. Başlangıç eşik değerinin normalden yüksek alınması zemin üstü noktalarının çok iyi filtrenmemesine, düşük alınması ise zemin üstü objelerinin civarındaki zemin noktalarının da filtrenmesine neden olmaktadır. Maksimum eşik değeri (Med) maksimum yükseklik farkı eşik değeridir ve maksimum yüksekliğe sahip objeye göre seçilebilir (Zhang ve Cui, 2007). Bu değer küçük oranlarla değiştirilmesi filtreleme sonucunda kayda değer bir değişikliğe neden olmamaktadır. Örneğin; maksimum eşik değeri 10 m veya 20 m almak arasında gözle

görülür bir fark olmamaktadır. Bu nedenle bu parametre filtrelemenin performansında belirleyici olan parametrelerden değildir. Pencere tabanı (b) pencere boyutu formülündeki üstel fonksiyonun tabanıdır (Bkz. Denklem (4.1)) ve başlangıç olarak 2 alınabilir. Yazılımda pencere boyutu için Denklem (2.3) ve (2.4)' den verilenden farklı bir formül kullanılmıştır. Burada kullanılan formül;

$$ps_k = (b^{k-1})^p \quad (4.1)$$

şeklinde. Burada p güç artışı parametresi, $k = 1, 2, \dots, l$ (l pencere serilerinin maksimum uzunluğudur) ve ps (Pencere Serileri) pencere serilerinin boyutudur (Zhang ve Cui, 2007). Güç artışı (p) pencere boyutu formülündeki üst sayıdır ve bu değer pencere serilerini etkilemektedir. Bu parametre başlangıçta 1 alınabilir. Bu parametrenin yüksek alınması durumunda pencere boyutu artışı bir öncekine göre çok büyüyeceğinden zemin üstü objeler filtrelenebilmektedir.

Çalışma kapsamında PM1B ve PM2B filtreleme yöntemlerinde kullanılan parametrelere verilen değerler sırasıyla Tablo 4' de gösterilmiştir. Bu tabloda verilen parametreler her bir veri seti için birçok defa denenerek bulunan optimum değerlerdir.

Tablo 4. PM1B ve PM2B filtreleme yöntemlerinde kullanılan parametreler

Filtreleme Algoritması	Veri	Pb	e	Bed	Med	b	p	ps
PM1B	Ham	0.4	0.25	0.10	10	2	1	[1,2,4,8,16,32,64,128]
	Düşük yoğunluklu	0.3	0.25	0.15	10	2	1	[1,2,4,8,16,32,64,128]
	Orta yoğunluklu	0.2	0.25	0.15	10	2	1	[1,2,4,8,16,32,64,128]
	Yüksek yoğunluklu	0.2	0.25	0.15	10	2	1	[1,2,4,8,16,32,64,128]
PM2B	Ham	0.4	0.21	0.10	10	2	1	[1,2,4,8,16,32,64,128]
	Düşük yoğunluklu	0.3	0.20	0.15	10	2	1	[1,2,4,8,16,32,64,128]
	Orta yoğunluklu	0.2	0.20	0.15	10	2	1	[1,2,4,8,16,32,64,128]
	Yüksek yoğunluklu	0.2	0.21	0.15	10	2	1	[1,2,4,8,16,32,64,128]

4.3.2. MLS Filtreleme Yönteminin Uygulaması

MLS yönteminin ana parametreleri şunlardır;

Piksel boyutu (Pb) minimum yükseklik gridini oluşturmak için girilen değerdir. Veri setindeki noktalar arasındaki ortalama uzaklık değeri olarak seçilebilir. Minimum mesafe

(d) eğim hesabı yapılabilen minimum mesafedir. Minimum mesafe nokta bulutu yoğunluğu arttıkça küçülmektedir. Eğim (e) eğim için girilen eşik değerdir. Eğer bir nokta ile komşuları arasındaki maksimum eğim, eğim eşik değerinden büyükse bu nokta zemin üstü noktası olarak, aksi takdirde zemin noktası olarak sınıflandırılır. Başlangıç için ortalama eğimden daha yüksek bir değer girilebilir. Eğim değerinin gereğinden yüksek alınması zemin üstü noktaların iyi filtrelenmemesine, düşük alınması ise zemin noktalarının yanlış filtrelenmesine neden olmaktadır. Arama yarıçapı (r) arama yarıçapı uzunluğudur. Bölgenin kapladığı alana göre belirlenebilir. Uzun yarıçapların zemin üstü noktalarını iyi filtrelediği fakat çoğu zemin noktalarını ortadan kaldırdığı görülmüştür.

MLS yöntemi için girilen optimum parametreler Tablo 5’ de verilmiştir. Yapılan denemeler sonucunda MLS yöntemi tarafından kullanılan arama yarıçapı ve maksimum eğim parametrelerinin MLS yönteminin performansında etkili oldukları görülmüştür.

Tablo 5. MLS filtreleme yönteminde kullanılan parametreler

Filtreleme Yöntemi	Veri	Pb	e	d	r
MLS	Ham	0.4	0.7	0.30	40
	Düşük yoğunluklu	0.4	0.7	0.20	40
	Orta yoğunluklu	0.5	0.7	0.10	40
	Yüksek yoğunluklu	0.5	0.7	0.08	40

4.3.3. ETEW Filtreleme Yönteminin Uygulaması

ETEW yönteminin ana parametreleri;

Piksel boyutu (Pb) nokta bulutunu gridlere bölmek üzere oluşturulacak ağda her bir pikselin boyutudur. Veri setindeki noktalar arasındaki ortalama uzaklık civarında bir değer seçilebilir. Eğim (e) eğim için girilecek olan eşik değeri ifade etmektedir. Eğim değeri için bölgenin ortalama eğimi seçilebilir. Eğimin yüksek seçilmesi durumunda çoğu noktada eğim değeri bu eşik değerden aşağıda kalacağından zemin üstü noktaları başarıyla filtrelenmemektedir. Eğim normalden düşük seçildiğinde ise zemin noktaları filtrelenmektedir. İterasyon sayısı (i) algoritmanın kaç defa tekrarlayacağını belirleyen parametredir. Döngü sayısını gereğinden yüksek girmek zemin noktalarının filtrelenmesine neden olabilmektedir.

ETEW yöntemi için yazılıma girilen optimum parametre değerleri Tablo 6' da verilmiştir. Filtrelemenin doğruluğu açısından en hassas parametrelerin eğim ve iterasyon sayısı olduğu görülmüştür.

Tablo 6. ETEW filtreleme yönteminde kullanılan parametreler

Filtreleme Yöntemi	Veri	Pb	e	i
	Ham	0.4	0.4	6
ETEWE	Düşük yoğunluklu	0.4	0.4	6
	Orta yoğunluklu	0.3	0.5	8
	Yüksek yoğunluklu	0.3	0.5	8

4.3.4. ATIN Filtreleme Yönteminin Uygulaması

ATIN yöntemi için ana parametreler aşağıdaki gibidir;

Piksel boyutu (Pb) nokta bulutunu gridlere bölerken kullanılan her bir pikselin boyutudur. Veri setindeki noktaların ortalama uzaklığı civarında bir değer seçilebilir. Z farkı (Zf) üçgen yüzeye düşen her bir nokta ile yüzey arasındaki uzaklığın eşik değeridir. Bu değer normalden yüksek seçilirse zemin üstü noktalar filtrelenmemektedir. Eğer Z farkı için olması gerekenden düşük bir değer seçilirse zemin noktaları zemin üstü noktasıymış gibi yok edilmektedir. Z farkı için birbirine komşu noktalar arasındaki ortalama yükseklik farkına göre yaklaşık bir değer girilebilir. Veri seri Başlangıç grid boyutu (Bgb) parametresi ile belirlenen boyutlarda gridlere bölünmektedir. Her bir gride denk gelen tohum noktalarını seçmek için kullanılır. Her bir griddeki minimum yükseklik değeri daha sonra TIN yüzeyi oluşturmada kullanılır. Axelsson (2000) başlangıç grid boyutu parametresinin zemindeki en büyük yapının boyutunda olabileceğini belirtmiştir (Zhang ve Cui, 2007). Açık eşik değeri (Aed) üçgen yüzeye gelen her bir nokta ile yüzey köşe noktaları arasındaki açının eşik değeridir. Büyük alanlarda Delaunay üçgenlemesi yapmak zaman alıcı olduğundan zaman ihtiyacını azaltabilmek için ATIN filtreleme yöntemi Txy parametresi ile veriyi eni X, boyu Y olan parçalara böler.

ATIN yöntemi için belirlenen optimum parametreler Tablo 7' de gösterilmiştir. Yöntemin doğruluğunu en fazla etkileyen parametreler piksel boyutu, Z farkı ve başlangıç grid boyutu parametreleridir.

Tablo 7. ATIN filtreleme yönteminde kullanılan parametreler

Filtreleme Yöntemi	Veri	Pb	Zf	Bgb	Aed	Txy
ATIN	Ham	0.5	0.18	20	5	20
	Düşük yoğunluklu	0.3	0.18	20	5	20
	Orta yoğunluklu	0.1	0.10	20	5	20
	Yüksek yoğunluklu	0.2	0.10	20	5	20

4.4. Polinomlarla Enterpolasyon Uygulamaları

4.4.1. Ortogonal Polinomlarla Enterpolasyon

Ortogonal polinomlarla enterpolasyon yönteminin genel denklemi (3.1)' de verildiği gibidir. (3.1) eşitliğinde $n = 1,2,3$ yazıldığında sırasıyla lineer, kuadratik ve kübik enterpolasyon denklemleri elde edilmiştir. Lineer yöntemde yüzeyi tanımlamak için Denklem (3.2)' de belirtilen lineer fonksiyon seçilmiştir. Bu eşitlikteki a_0 , a_1 ve a_2 katsayılarını bulabilmek için en az 3 denkleme, dolayısı ile en az 3 kontrol noktasına ihtiyaç vardır. Çalışmada her pencereye düşen kontrol noktası sayısı üçten fazla olduğu için katsayılar EKK yöntemine göre dengelemeli olarak bulunmuştur. Sonrasında ise herhangi bir x_i , y_i piksel konumu için katsayılar Denklem (3.2)' de yerine konularak o konuma ait z_i yüksekliği elde edilmiştir.

Kuadratik yüzey ile enterpolasyon yönteminde yüzey fonksiyonu olarak Denklem (3.6)' eşitliği kullanılmıştır. Eşitlikteki bilinmeyen katsayıları $(a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5)$ bulabilmek için en az 6 kontrol noktasına ihtiyaç vardır. Çalışmada her pencere için katsayılar EKK yöntemine göre dengelemeli olarak Denklem (3.3) ve (3.4) eşitlikleri ile bulunmuştur. Elde edilen altı katsayı Denklem (3.6) eşitliğinde yerine konularak pencereler içindeki herhangi bir x_i , y_i piksel konumu için z_i yükseklik değeri elde edilmiştir.

Kübik yüzey ile enterpolasyonda ise yüzey fonksiyonu olarak Denklem (3.8) eşitliği kullanılmıştır. Eşitlikteki bilinmeyen katsayıları $(a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7, a_8, a_9)$ bulabilmek için en az 10 kontrol noktasına ihtiyaç vardır. Bilinmeyen katsayılar EKK yöntemine göre dengelemeli olarak Denklem (3.3) ve (3.4) eşitlikleri ile bulunmuştur. Elde edilen 10 katsayı Denklem (3.8) eşitliğinde yerine konulmuş ve pencereler içindeki herhangi bir piksel konumu için z_i yükseklik değeri elde edilmiştir.

4.4.2. Ortogonal Olmayan Polinomlarla Enterpolasyon

Ortogonal olmayan polinomlarla enterpolasyon yönteminin genel denklemi (3.10)' da verilmiştir. Bu bölümde sırasıyla bi-lineer, bi-kuadratik ve bi-kübik yüzeylerle enterpolasyon yapılmıştır. Bi-lineer enterpolasyon yönteminde yüzey Denklem (3.11)' de verilen fonksiyon ile tanımlanmıştır. Eşitlikteki a_0 , a_1 , a_2 ve a_3 katsayıları dengelemeli olarak bulunmuştur. Bilinmeyen katsayıları elde edilen (3.11) denklemi bu sefer her hangi bir piksel konumu için çözümlenmiş ve o konuma ait yükseklik değeri elde edilmiştir.

Sırasıyla bi-kuadratik ve bi-kübik yüzeyler için de aynı işlemler yapılarak bi-kuadratik yüzeyde 9 katsayı bilinmeyi, bi-kübik yüzeyde ise 16 katsayı bilinmeyi dengelemeli olarak elde edilmiştir. Bi-kuadratik yöntemde elde edilen katsayılar Denklem (3.13) eşitliğinde, bi-kübik yöntemde elde edilen katsayılar ise Denklem (3.15) eşitliğinde yerine koyularak her bir pencere içindeki enterpolasyon noktaları için yükseklik değerleri elde edilmiştir.

4.4.3. Shepard Enterpolasyon Yöntemi Uygulaması

Shepard yönteminde önemli olan Denklem (3.17) formülündeki w_i ağırlıklarını ve Denklem (3.18) eşitliğindeki p güç parametresini doğru bir şekilde belirlemektir. Uygulamada güç parametresi, en iyi sonucu vermesinden dolayı $p = 2$ olarak alınmıştır. Shepard yöntemi ile her bir pencereye düşen kontrol noktalarının penceredeki enterpolasyon noktalarının konumlarına etki eden ağırlıkları hesaplanmış ve Denklem (3.17) eşitliği ile bu noktaların yükseklik değerleri elde edilmiştir.

4.4.4. Radyal Tabanlı Fonksiyonlar ile Enterpolasyon Uygulaması

Radyal tabanlı fonksiyonlar ile enterpolasyon uygulamasında trend yüzeyi olarak bi-lineer yüzey seçilmiştir. Q yüzeyleri için ise Multikuadratik, Ters Multikuadratik, Multilog, Gauss, Kübik Splayn, Doğal Kübik Splayn fonksiyonları ile modeller oluşturulmuştur. Multikuadratik yüzey için iki yapraklı dairesel hiperboloid, dairesel paraboloid ve dairesel dik koni olmak üzere üç farklı fonksiyon seçilmiştir. Uygulama, basitçe anlaşılır olması açısından lineer trend yüzeyi ve dairesel dik koni fonksiyonu

üzerinden açıklanacaktır. Öncelikle yüzeyin denklemine ait bilinmeyen katsayılar (a_0, a_1, a_2) EKK yöntemi ile dengeli olarak belirlenmiştir. Yüzey denkleminde her x_i, y_i kontrol noktası için z_{trend} yükseklikleri elde edilmiştir. Denklem (3.21)' e göre z_i kontrol noktası ile z_{trend} yükseklikleri farkı alınarak kontrol noktalarına ait artık yükseklik değerleri olan Δz_i ' ler hesaplanmıştır. Herhangi bir x_0, y_0 enterpolasyon noktasındaki Δz_0 artık yükseklik değerleri ise Denklem (3.22) ile elde edilmiştir. Ancak Denklem (3.22) eşitliğinde Δz_0 ve z_0 olmak üzere iki bilinmeyen vardır. Δz_0 multiküadratik yöntemle göre hesaplandığında enterpolasyon noktalarına ait z_0 yükseklikleri de elde edilecektir. Buna göre multiküadratik yüzey olarak Denklem (3.27)' deki dairesel dik koni formülü, Denklem (3.23) eşitliğindeki Q yüzey fonksiyonu yerine konulduğunda Denklem (3.30)' da verilen Δz_0 artık yüksekliklerinin elde edildiği eşitliğe ulaşılır. Bu eşitlikteki bilinmeyen C_i katsayıları için m kontrol noktası sayısı olmak üzere Denklem (3.33)'deki gibi $m \times m$ ' lik bir mesafe matrisi oluşturulur. Buradaki mesafeler kontrol noktaları arasındaki mesafelerdir. Δz_i kontrol noktaları artık yükseklikleri Denklem (3.34)' de gösterildiği üzere vektör şeklinde ifade edildikten sonra Denklem (3.37) eşitliği ile C_i katsayı değerlerini içeren vektör elde edilir. Sonrasında bi-lineer denklemde x_0, y_0 değerleri yerine konularak enterpolasyon noktalarına ait trend yüzeyi elde edilir. Denklem (3.38) eşitliğinde tek bilinmeyen olarak kalan mesafeler ise kontrol noktaları ile enterpolasyon noktaları arasındaki mesafeleri temsil etmektedir. Bu mesafeler de hesaplandıktan sonra enterpolasyon noktalarının z_0 yükseklik değerleri elde edilir. Tez kapsamında δ parametresi için Fasshauer tarafından önerilen formül kullanılmıştır.

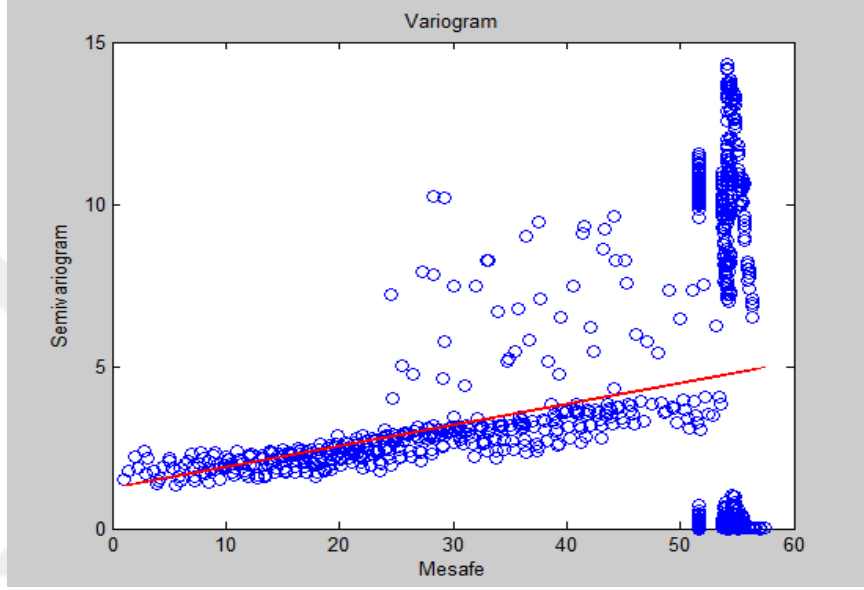
4.4.5. Ordinary Kriging Enterpolasyon Uygulaması

Ordinary Kriging yönteminde öncelikle kontrol noktaları arasındaki mesafeler (n dayanak noktası için $\frac{n(n-1)}{2}$ sayıda mesafe);

$$d_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (4.2)$$

eşitliğiyle bulunmuştur. Belirlenen d_{ij} mesafeleri kontrol noktası sayısı (n) kadar gruplara ayrılmış ve her bir grubun ortalaması alınmıştır. Her bir d_{ij} mesafesine ait semivaryans

değeri (γ_{ij}) Denklem (3.39) eşitliğine göre elde edilmiştir. İlgili d_{ij} mesafesine karşılık gelen semivaryans değerleri de aynı şekilde gruplara ayrılmış ve grupların ortalama değerleri alınmıştır. Bu şekilde kontrol noktası sayısı kadar $d_{(ort)}$ ve $\gamma_{(ort)}$ değerleri elde edilmiştir. Bulunan veriler $d_{(ort)}$ değerleri yatay eksen, $\gamma_{(ort)}$ değerleri düşey eksen olmak üzere çizdirilerek deneysel variogram modeli oluşturulmuştur (Bkz. Şekil 15).



Şekil 15. Deneysel variogram modeli grafiği

Deneysel variogram modeli her bir pencerede ayrı ayrı oluşturulmuştur. Uygulamada teorik variogram modeli olarak doğrusal model seçilmiştir. Doğrusal variogram modeli formülündeki bilinmeyenlerin hesabı için ilgili verilere ait semivaryansları bulmak üzere deneysel variogram modelinden elde edilen eğim ve doğrunun y eksenini kestiği nokta (C_0) kullanılmıştır. Bu şekilde enterpolasyon noktalarına ait semivaryans değerleri elde edilmiştir. Bu değerler kullanılarak ($n \times n$) boyutunda kare simetrik matris olan Denklem (3.47)'deki γ matrisi oluşturulmuştur. Denklem (3.47)'deki γ_0 matrisinin oluşturulması için Tablo 3' de verilen doğrusal model formülü ve kontrol noktalarına ait deneysel variogram modelinden elde edilen eğim ve C_0 değerleri kullanılmıştır. Fakat burada formüldeki d mesafeleri yerine her bir kontrol noktası ile enterpolasyon noktası arasındaki mesafeler kullanılmıştır. Son olarak tüm veriler Denklem (3.48) eşitliğinde yerine konularak Kriging ağırlıkları elde edilmiştir. Bu ağırlıklar her bir pencere için ayrı ayrı hesaplanmıştır.

Özet olarak;

n tane kontrol noktası için kontrol noktaları arasında oluşan olası tüm nokta çiftlerinin variogram değerleri Tablo 3’ deki doğrusal model eşitliği kullanılarak hesaplanmıştır ve köşegen elemanları 0 olan, $(n + 1)$ satır ve $(n + 1)$ sütun elemanları 1 olan $(n + 1)$ boyutlu γ kare-simetrik matrisi elde edilmiştir. Enterpole edilecek nokta ve dayanak noktaları arasındaki semivaryans değerleri de yine Tablo 1’ de verilen doğrusal model eşitliğinden hesaplanmıştır ve $(n + 1)$ ’inci satır elemanı 1 olan $(n + 1)$ boyutlu γ_0 sütun vektörü elde edilmiştir. Kriging ağırlıklarından oluşan $(n + 1)$ boyutlu W ağırlık matrisi Denklem (3.48) eşitliği ile hesaplanmıştır. Böylece Kriging modelinin en önemli kısmını oluşturan ağırlıkların belirlenmesinden sonra Denklem (3.40) kullanılarak her bir penceredeki enterpolasyon noktaları için tahmini yükseklik değerleri bulunmuştur.

Tablo 8. Uygulanan enterpolasyon yöntemlerinin çalışma süreleri

	Enterpolasyon Yöntemleri	Süre	Pencere Boyutu (piksel)
Polinomlarla Enterpolasyon	Lineer	12.3 sn	130x130
	Kuadratik	12.5 sn	130x130
	Kübik	12.2 sn	130x130
	Bi-lineer	12.2 sn	130x130
	Bi-kuadratik	17.2 sn	130x130
	Bi-kübik	12.4 sn	130x130
IDW	Shepard Yöntemi	23 dakika	130x130
Radyal Tabanlı Fonksiyonlar	Gauss	30 saat	130x130
	Kübik Splayn	21.18 saat	130x130
	Ters Multikuadratik	22.35 saat	130x130
	Multilog	31 saat	130x130
	Doğal Kübik Splayn	21.32 saat	130x130
	Multikuadratik-Dairesel Dik Koni	18.21 saat	130x130
	Multikuadratik-Dairesel Paraboloid	18.12 saat	130x130
	Multikuadratik-İki Yapraklı Dairesel Hiperboloid	18.31 saat	130x130
Kriging	Ordinary Kriging	1 hafta	23x54

Tablo 8’ de tüm enterpolasyon yöntemlerinin uygulamaları sırasında geçen süreler gösterilmiştir. Kriging yöntemi sistem kaynaklarını fazla miktarda kullandığından dolayı bu yöntemin uygulanması sırasında diğer yöntemlere göre daha küçük boyutlu pencere kullanılmıştır.

5. BULGULAR

5.1. Filtreleme Yöntemlerinin Doğruluk Analizi

Filtreleme yöntemlerinin doğruluk analizi niteliksel ve niceliksel olarak gerçekleştirilmiştir. Niteliksel değerlendirmede 4 farklı yoğunluktaki nokta bulutunun filtrelenmesi ile elde edilen sonuçların çalışma bölgesine ait ortofoto üzerine bindirilmesiyle görsel olarak irdelenmiştir. Niceliksel değerlendirmede ise orijinal nokta bulutu üzerinden seçilen kontrol noktaları kullanılmıştır. Bu kontrol noktaları filtrelenmiş nokta bulutu üzerine bindirilmiş ve her bir noktanın doğru filtrelenip filtrelenmediği bölge için üretilen yüksek konumsal çözünürlüklü ortofoto yardımıyla irdelenmiştir.

Filtreleme ile noktaların sınıflandırılması sonrasında iki temel hata ortaya çıkmaktadır. Bunlar omission (HATAO) ve commission (HATAC) hatalarıdır. HATAO zemin noktalarının zemin üstü noktalarıymış gibi, HATAC ise zemin üstü noktalarının zemin noktalarıymış gibi sınıflandırılmasıdır. Veri setindeki bütün noktaların sınıflandırma doğruluklarının noktaların tek tek değerlendirilmesi ile irdelenmesi pratik bir yöntem olmayacağından dolayı, Zhang vd., (2003) ve Zhang ve Whitman (2005) sınıflandırma doğruluğunun rastgele seçilen test noktaları üzerinden belirlenmesine imkan sağlayan bir yaklaşım kullanmışlardır. Bu çalışmada sınıflandırma doğruluklarının irdelenmesinde Zhang vd., (2003) ve Zhang ve Whitman (2005) tarafından kullanılan metodolojiden yararlanılmıştır. Bu metodolojiye göre, rastgele belirlenen noktalar ile bir yarıçap içerisinde olan tüm noktalar kontrol noktası olarak seçilir ve niceliksel değerlendirmede kullanılır. Her veri seti için kullanılacak olan noktaların sayısı değerlendirmenin istatistiksel anlamda mantıklı olması açısından önemlidir. Bu tez kapsamında her bir veri seti için kullanılan minimum nokta sayısı Congalton ve Green (1999) tarafından önerilen yaklaşıma göre belirlenmiştir. Bu yaklaşıma göre minimum referans noktası sayısı;

$$n = \frac{B\Pi_i(1 - \Pi_i)}{b_i^2} \quad (5.1)$$

eşitliği ile belirlenir. Burada n referans nokta sayısını, $B = \alpha/k$ olmak üzere α güven aralığını, k sınıf sayısını, b_i arzu edilen doğruluğu ve Π_i ise i 'inci sınıfın alanının bütün

alana oranını temsil etmektedir (Akar ve Güngör, 2015). Sınıfların alanlarının bilinmemesi durumunda bu eşitlik şu şekilde ifade edilebilir;

$$n = \frac{B}{4b^2} \quad (5.2)$$

Bu çalışmada güven aralığı %95 olarak seçilmiştir. Sınıf sayısı ise 2 olduğu için B ($B = 0,05/2$) 0,025 olmaktadır. Ki-kare tablosunda 1 serbestlik derecesinde 0,025 değerine karşılık gelen değerin 5,02389 olduğu görülmektedir. Bu durumda, $n = 502$ olarak hesaplanmaktadır ($n = 5,02/(4 \times 0,05^2)$). Buna göre en az 502 adet referans noktasının kullanılması gerekmektedir.

Buna göre çalışmada 4 farklı yoğunluktaki nokta bulutu üzerinde rastgele 100' er tane nokta belirlenmiştir. Belirlenen noktalara ham veri için 3 m, düşük yoğunluklu veri için 1 m, orta yoğunluklu veri için 0,5 m ve yüksek yoğunluklu veri için 0,15 m mesafedeki noktalar kontrol noktası olarak seçilmiştir. Buna göre, ham veride 688, düşük yoğunluklu veride 662, orta yoğunluklu veride 637 ve yüksek yoğunluklu veride 700 nokta kontrol noktası olarak seçilmiştir. Bu noktaların değerlendirmesi Sithole ve Vosselman (2004) tarafından sunulan üç doğruluk analizi metriği (Tip I, Tip II ve Toplam Hata) ile yapılmıştır (Vosselman ve Sithole, 2004). Bu metriklerin formülleri;

$$\begin{aligned} \text{Tip I Hata} &= \frac{a}{ZN} \\ \text{Tip II Hata} &= \frac{b}{Z\ddot{U}N} \\ \text{Toplam Hata} &= \frac{a + b}{ZN + Z\ddot{U}N} \end{aligned} \quad (5.3)$$

şeklindedir. Burada a yanlışlıkla zemin üstü noktasıymış gibi filtrelenen zemin noktaları sayısını, b yanlışlıkla zemin noktası olarak sınıflandırılan zemin üstü noktası sayısını, ZN toplam zemin noktası sayısını ve $Z\ddot{U}N$ ise toplam zemin üstü noktası sayısını ifade etmektedir (Montealegre vd., 2015a). HATAO ve HATAC' nin tespit edilebilmesi için ortofoto üzerine filtrelenmiş noktalar mavi renkte, kontrol noktaları ise kırmızı renkte gösterilmiştir. Ortofotoya göre zeminde görünen kırmızı renkteki bir kontrol noktası kapatıldığında altında mavi renkteki filtrelenen nokta çıkıyorsa o nokta doğru filtrelenmiş

nokta olarak, çıkmıyorsa yani altında nokta yoksa bu nokta HATAO (*a*) olarak değerlendirilmiştir. Aynı şekilde ortofoto üzerinde zemin üstü bir noktaya denk gelen kırmızı renkteki kontrol noktası kapatıldığında altında mavi renkli filtrelenen nokta çıkıyorsa bu nokta HATAC (*b*) olarak değerlendirilmiştir. Bu analiz tüm veri seti ve tüm filtreleme yöntemleri için gerçekleştirilmiştir.

Literatürdeki birçok çalışmada Cohen' in Kappa indeksi (Cohen, 1960) filtreleme sonuçlarının doğruluğunu analiz etmekte kullanılmaktadır (Silván-Cárdenas ve Wang, 2006; Meng vd., 2010; Chen vd., 2013; Pingel vd., 2013; Montealegre vd., 2015a). Tez kapsamında da filtreleme sonuçlarının Kappa indeksi değerleri hesaplanmış ve analiz edilmiştir. Kappa indeksi aralığı genelde 0 ile 1 arasında uzanmaktadır, ancak negatif değerler aldığı da görülebilmektedir. Landis ve Koch (1977)' a göre (Landis ve Koch, 1977) Kappa indeksinin 0,40 ve altı değer alması zayıf uyumu, 0,40 ile 0,75 arasında olması iyi uyumu, 0,75 ve üzeri bir değer alması ise mükemmel uyumu ifade etmektedir (Montealegre vd., 2015a). Kappa indeksi hesabı sayısal bir örnekle açıklanacak olursa;

Örneğin, filtrelemenin kontrolü için rastgele 1000 kontrol noktası seçilmiş olsun. Bunlardan 400' ünün zemin üstü noktası 600' ünün zemin noktası olduğu kabul edilsin. Ayrıca, 200 HATAO ve 100 HATAC varlığı tespit edilmiş olsun. Buna göre Kappa hesabı için oluşturulacak tablo ve işlem adımları aşağıdaki gibidir;

Tablo 9. Örnek Kappa hesap tablosu

Referans Veri	Filtrelenmiş Veri		
	ZN	ZÜN	
ZN	400	200	600
ZÜN	100	300	400
	500	500	

- Tablo 9' a göre hem filtrelenmiş hem de referans verinin zemin noktası olarak kabul ettiği 400 nokta, her ikisinin de zemin üstü noktası olarak kabul ettiği 300 nokta vardır. Buna göre gözlenen anlaşma orantısı (P_0) aşağıdaki gibi olmaktadır;

$$P_0 = \frac{400 + 300}{1000} = 0.70 \quad (5.4)$$

- Referans veride 600 nokta zemin noktası, 400 nokta zemin üstü noktası olarak belirlenmiştir. Yani referans verideki noktaların % 60' ı zemin noktasıdır. Filtrelenmiş veride ise noktaların % 50' si zemin noktasıdır. Buna göre hem referans hem de filtrelenmiş verinin bir noktayı rastgele olarak zemin noktası kabul etme olasılığı $0,60 * 0,50 = 0,30$, her ikisinin de rastgele olarak zemin üstü nokta kabul etme olasılığı ise $0,40 * 0,50 = 0,20$ olarak belirlenmiştir. Buna göre gözlenen rastgele anlaşma olasılığı (P_e) şöyle olmaktadır;

$$P_e = 0,20 + 0,30 = 0,50 \quad (5.5)$$

- Elde edilen veriler Cohen' in Kappa kat sayısı formülünde yerlerine konulursa katsayı değeri (K) aşağıdaki gibi hesaplanır;

$$K = \frac{P_0 - P_e}{1 - P_e} = 0,40 \quad (5.6)$$

Tez kapsamında her bir filtreleme sonucu ayrıca McNemar testi kullanılarak analiz edilmiştir. McNemar testi veri setleri arasındaki istatistiksel anlamlılığı test eder (Foody, 2004; Kavzoglu ve Colkesen, 2011; Yılmaz ve Gungor, 2016). Daha basit bir şekilde, bu test iki veri seti arasındaki ki-kare değerini hesaplar. Hesaplanan değer kritik değerden (kritik değer % 95 güven aralığında 3,84 olarak kabul edilmektedir) daha yüksekse iki veri seti arasındaki fark anlamlı kabul edilir (Kavzoglu ve Colkesen, 2012; Yılmaz ve Gungor, 2016). McNemar testi gerçekleştirilirken Tip I hata, Tip II hata, Toplam hata ve Kappa indeksi hesaplarında kullanılan kontrol noktalarından faydalanılmıştır.

5.2. Filtreleme Sonuçları

5.2.1. Niteliksel Değerlendirme Sonuçları

Çalışma bölgesi (Şekil 16) bina ve ağaç gibi zemin üstü objelerini içeren, yer yer düz, yer yer eğimli bir yapıya sahiptir. Şekil 17' de ham verinin filtrelenmesi ile elde edilen nokta bulutlarının, Şekil 18' de düşük yoğunluklu verinin, Şekil 19' da orta yoğunluklu verinin ve Şekil 20' de ise yüksek yoğunluklu verinin filtrelenmesi ile elde

edilen nokta bulutlarının ortofoto görüntüye bindirilmesi gösterilmiştir. Şekillerdeki zemine ait noktalar siyah renkte gösterilmiştir. Şekiller üzerindeki çemberler HATAC' leri, dikdörtgenler ise HATAO' ları göstermektedir.



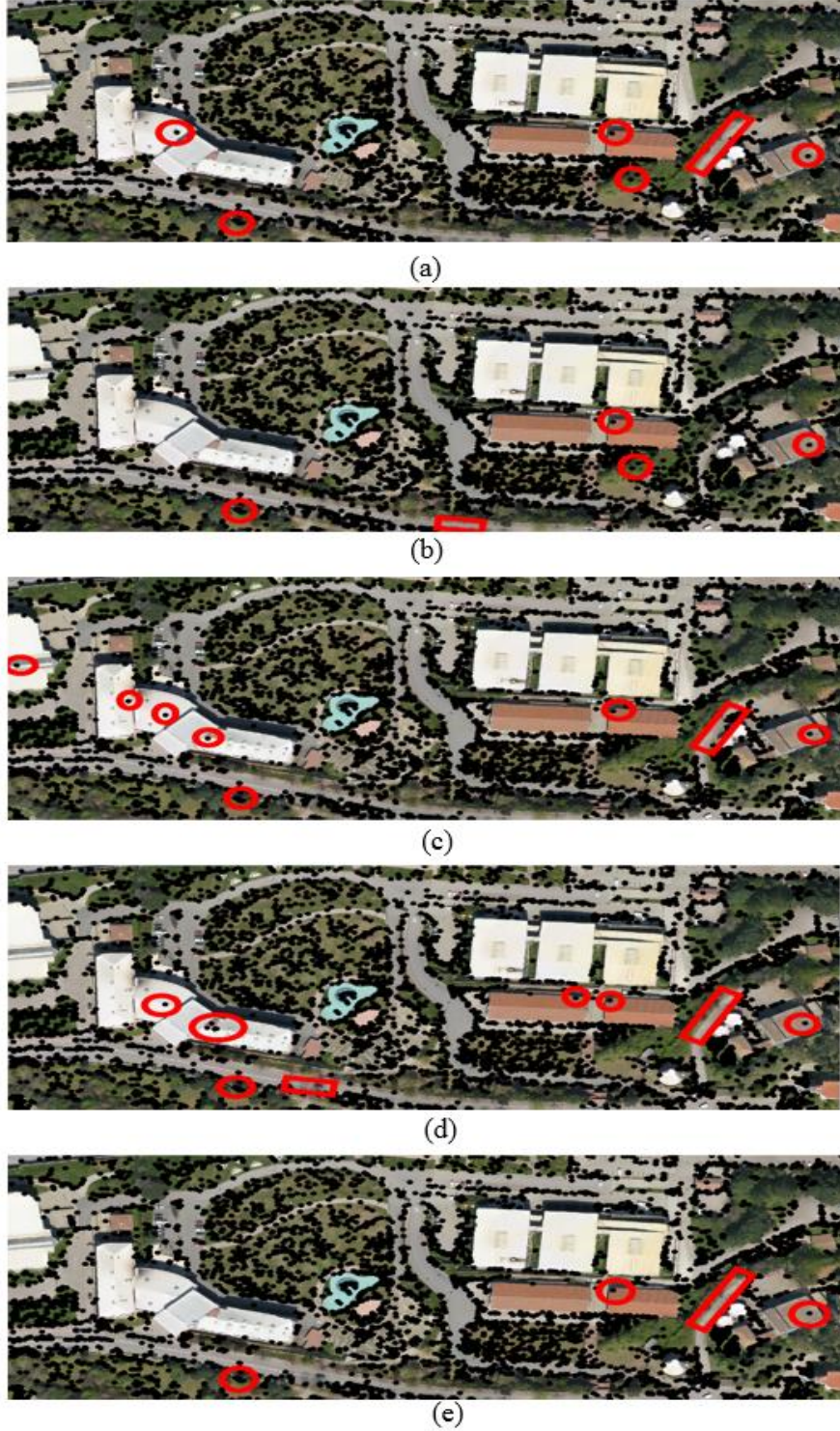
Şekil 16. Çalışma bölgesinin ortofoto görüntüsü

Ham verinin yoğunluğu çok düşük olduğundan dolayı zemin noktalarının daha iyi bir şekilde görünebilmesi için Şekil 17' de görülen zemin noktaları diğer şekillerdeki (Şekil 18, Şekil 19 ve Şekil 20) zemin noktalarına oranla daha büyük boyutta gösterilmiştir. Şekil 17' de görüldüğü üzere PM2B filtreleme yönteminin HATAO değeri PM1B yönteminden daha düşüktür. ATIN filtreleme yönteminin HATAC değerinin diğer yöntemlerden daha az olduğu görülmektedir. MLS ve ETEW filtreleme yöntemlerinin hatalarının hemen hemen aynı olduğu söylenebilir.

Şekil 18 incelendiğinde düşük yoğunluklu verinin ATIN filtreleme yöntemi kullanılarak filtrelenmesi ile elde edilen nokta bulutundaki HATAC değerinin PM1B ve PM2B yöntemlerine göre daha fazla, HATAO değerinin ise daha az olduğu görülmektedir. MLS yöntemi ile ETEW filtreleme yöntemlerinin hataları genelde aynı gibi gözükse de MLS filtreleme yönteminin ETEW' e göre daha az HATAO içerdiği görülmektedir.

Şekil 19' da görüldüğü üzere orta yoğunluktaki verinin filtreleme sonuçlarında en az hatayı ATIN yöntemi vermiştir. Fakat ATIN yöntemi ile elde edilen nokta bulutunun HATAC değerinin PM1B ve PM2B yöntemlerine göre daha fazla olduğu görülmektedir. MLS ve ETEW filtreleme yöntemleri ise birbirlerine yakın HATAC değerlerine neden

olmuştur. Ayrıca Şekil 19’ da MLS yöntemi ile üretilen nokta bulutunun ETEW yöntemi sonucuna göre daha fazla HATAO değeri içerdiği görülmektedir.



Şekil 17. Ham verinin PM1B (a), PM2B (b), MLS (c), ETEW (d) ve ATIN (e) yöntemleriyle filtrenmesi sonucu elde edilen nokta bulutlarının ortofoto üzerine bindirilmesi



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

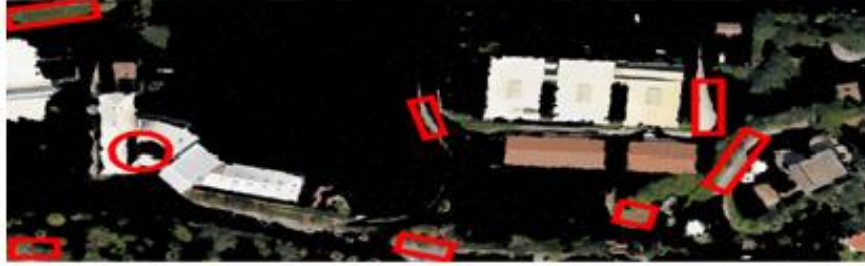
Şekil 18. Düşük yoğunluklu verinin PM1B (a), PM2B (b), MLS (c), ETEW (d) ve ATIN (e) yöntemleriyle filtrelenmesi sonucu elde edilen nokta bulutlarının ortofoto üzerine bindirilmesi



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

Şekil 19. Orta yoğunluklu verinin PM1B (a), PM2B (b), MLS (c), ETEW (d) ve ATIN (e) yöntemleriyle filtrelenmesi sonucu elde edilen nokta bulutlarının ortofoto üzerine bindirilmesi



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

Şekil 20. Yüksek yoğunluklu verinin PM1B (a), PM2B (b), MLS (c), ETEW (d) ve ATIN (e) yöntemleriyle filtrelenmesi sonucu elde edilen nokta bulutlarının ortofoto üzerine bindirilmesi

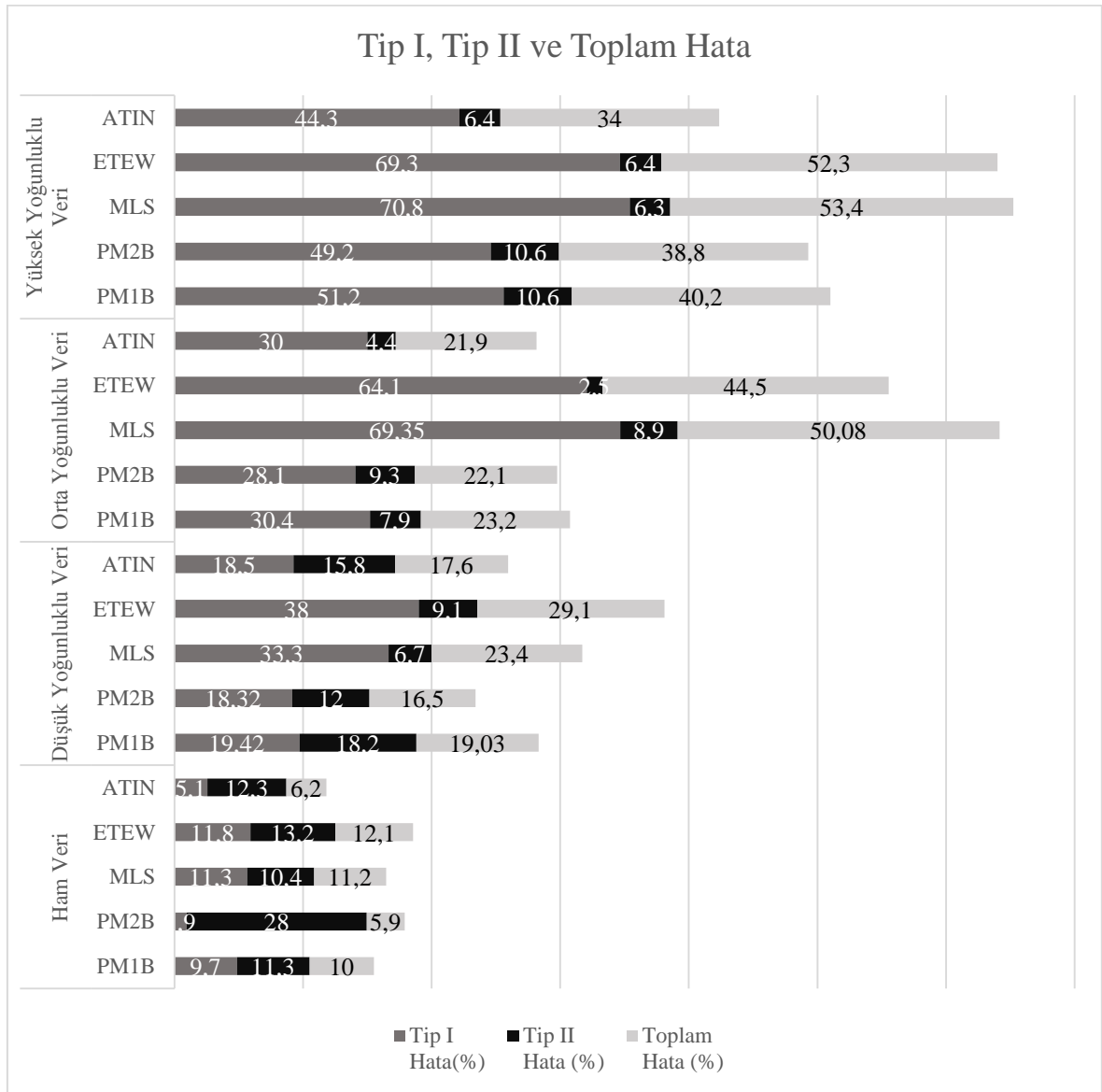
Şekil 20 incelendiğinde ATIN yönteminin diğer yöntemlere göre daha az miktarda HATAO ve HATAC değerlerine neden olduğu görülmektedir. PM1B ve PM2B filtreleme yöntemleri aynı bölgelerde benzer hatalara neden olmuşlardır. PM filtreleme yöntemi yüksek yoğunluktaki veriyi ATIN yönteminden sonra en iyi filtreleyen yöntemdir. MLS ve ETEW yöntemleri de hemen hemen aynı bölgelerde aynı HATAO ve HATAC değerlerine neden olmuştur. Bu yöntemler aynı zamanda yüksek yoğunluktaki veri için en fazla HATAO ve HATAC değerlerini veren yöntemlerdir.

Niteliksel değerlendirme sonucu kesin ifadelerle yorum yapmak hem zordur, hem de doğru değildir. Değerlendirme sonuçları kişiden kişiye farklılıklar gösterebilmektedir. Fakat genel olarak, çemberlerin ve dikdörtgenlerin sayısına veya içindeki zemin üstü noktası yoğunluğuna ve dikdörtgen sayısına bakıldığında, bu hataların ham veriden yüksek yoğunluktaki veriye doğru arttığı görülmektedir.

5.2.2 Niceliksel Değerlendirme Sonuçları

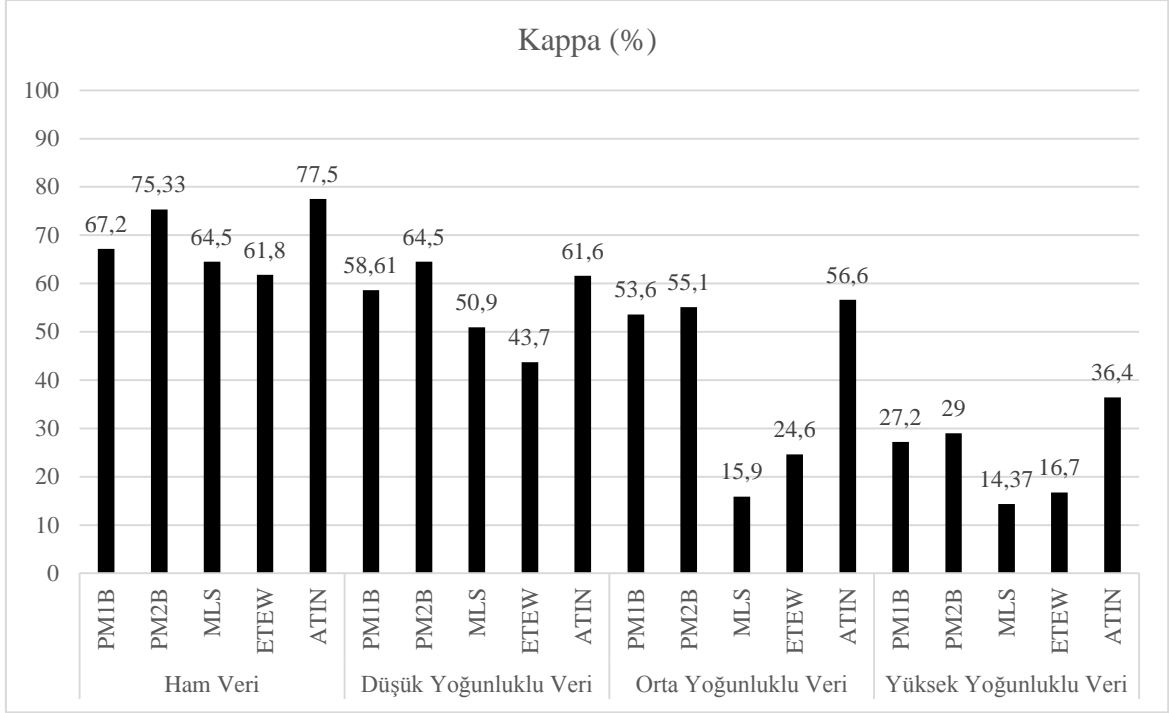
Tez kapsamında filtreleme için optimum parametreler seçilmiştir. Bu parametrelerin seçiminde Hu vd., (2014) tarafından kullanılan metodolojiden faydalanılmıştır. Bu metodolojiye göre toplam hatayı minimum yapan optimum parametreler seçilmektedir. Tip I, Tip II ve Toplam Hata metriklerinin sonuçları Şekil 21’ de gösterilirken, hesaplanan Kappa ve Ki-kare (McNemar sonuçları) değerleri ise sırasıyla Şekil 22 ve Şekil 23’ de gösterilmiştir. Şekil 21 incelendiğinde Tip I hatanın % 1,9 ile % 70,8, Tip II hatanın % 2,5 ile % 28 ve Toplam hatanın ise % 5,9 ile % 53,4 değerleri arasında değiştiği görülmektedir. En düşük Tip I hatasını (% 1,9) ham yoğunluktaki veride PM2B yönteminin, en düşük Tip II hatasını (% 2,5) orta yoğunluktaki veride ETEW yönteminin, en düşük Toplam hatayı (% 5,9) ise ham veride PM2B yöntemlerinin verdiği görülmüştür. En yüksek Tip I hatasını (% 70,8) yüksek yoğunluktaki veride MLS yönteminin, en yüksek Tip II hatasını (% 28) ham veride PM2B yönteminin, en yüksek Toplam hatayı (% 53,4) ise yüksek yoğunluktaki veride MLS yönteminin verdiği görülmektedir. Şekil 21 incelendiğinde en yüksek Kappa değerinin % 77,5 ile ham veride ATIN yöntemiyle, en düşük Kappa değerinin ise % 14,37 ile yüksek yoğunluktaki veride MLS yöntemiyle elde edildiği görülmektedir. Şekil 23’ de görüldüğü üzere en yüksek Ki-kare değerini (415,905) ham veride ATIN yöntemi verirken, en düşük Ki-kare değerini (36,204) ise orta yoğunluklu verinin MLS yöntemine ait sonuç nokta bulutu vermiştir.

Ham verinin sonuçları incelendiğinde en yüksek Kappa değerini (% 77,5) ve en yüksek Ki-kare değerini (415,905) veren yöntemin ATIN yöntemi olduğu görülmektedir. Tip I hatası dikkate alındığında PM2B yönteminin zemin noktalarını ATIN' e göre daha iyi muhafaza ettiği görülmektedir, fakat zemin üstü noktalarının sınıflandırılmasında ATIN yönteminin performansı Toplam hatayı düşürmüş ve Kappa değerini yükseltmiştir. Niteliksel değerlendirmede ATIN yöntemi sonucunun HATAC değerinin diğer yöntemlere göre daha düşük olduğu görülse de niceliksel değerlendirme sonuçlarına göre en düşük HATAC değerini (Tip II) MLS yöntemi sonucunun verdiği görülmektedir. Ham veride en düşük Kappa (% 61,8) ve Ki-kare değerini (280,504) ETEW yöntemi vermiştir.



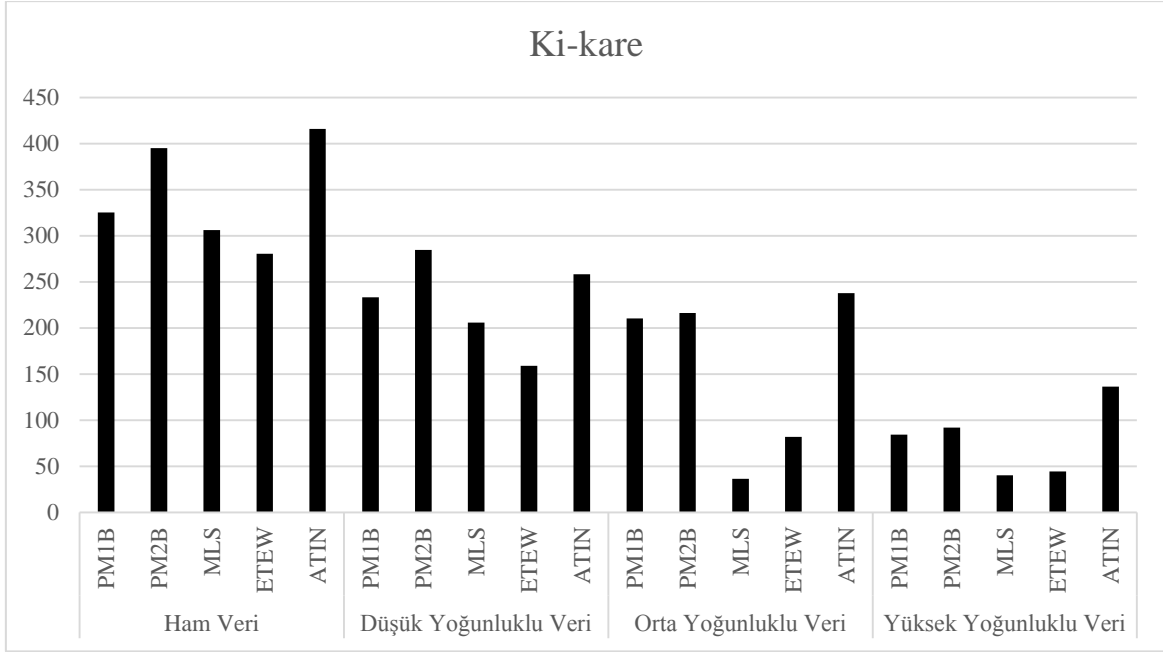
Şekil 21. Hesaplanan Tip I, Tip II ve Toplam Hata değerleri

Düşük yoğunluktaki verinin filtreleme sonuçları incelendiğinde en iyi Kappa (% 64,5) ve Ki-kare değerini (284,808) veren yöntem PM2B yöntemi olduğu görülmektedir. PM2B yöntemini ATIN yöntemi takip etmektedir. Ham yoğunluktaki veride olduğu gibi burada da MLS yöntemi ETEW yönteminden daha iyi Kappa ve Ki-kare değerlerini vermiştir. Düşük yoğunluklu veri için en düşük Kappa (% 43,7) ve Ki-kare (159,009) değerini ise ETEW yöntemi vermiştir.



Şekil 22. Hesaplanan Kappa Değerleri

Orta yoğunluktaki verinin filtreleme sonuçları incelendiğinde en iyi Kappa ve Ki-kare değerini ATIN yöntemi ile elde edilen filtrelenmiş nokta bulutunun verdiği görülmektedir. PM2B yöntemi sonucunun Tip I hatasına bakıldığında, bu yöntemin zemin noktalarını ATIN' e göre daha iyi sınıflandırdığı görülmektedir, fakat ATIN yöntemi bu veriyi filtrelerken daha az HATAC değerine neden olmuştur ve küçük bir farkla PM2B yönteminin önüne geçmiştir. Orta yoğunluktaki veride, ham veri ve düşük yoğunluktaki verinin aksine MLS yöntemi ETEW yönteminden daha kötü sonuç vermiştir. Bu yöntem aynı zamanda % 15,9 Kappa ve 36,204 Ki-kare değerleri ile bu veri için en kötü filtrelemeyi yapan yöntem olmuştur.



Şekil 23. Hesaplanan Ki-kare değerleri

Yüksek yoğunluktaki verinin filtrelenmesi ile elde edilen nokta bulutları incelendiğinde en iyi Kappa (% 36,4) ve Ki-kare değerini (136,517) ATIN yöntemi sonucunun verdiği görülmektedir. PM2B ve PM1B yöntemleri orta yoğunluktaki veride olduğu gibi birbirlerine yakın hata değerlerini vermişlerdir. MLS yöntemi yüksek yoğunluklu verinin filtreleme sonuçları içerisinde en kötü Kappa değerini (% 14,37) vermiştir. En düşük Ki-kare değeri MLS yöntemi ile üretilen nokta bulutu ile elde edilmiştir.

Filtreleme sonuçları genel olarak değerlendirildiğinde, her bir veri seti için hesaplanan Kappa ve Ki-kare değerleri birbirleri ile uyumlu sonuçlar verdiği görülmektedir. Ham veri haricinde, Toplam hata değerleri de bu iki hata metriği ile paralel sonuçlar vermiştir. MLS ve ETEW yöntemlerinin Tip I ve Tip II hataları incelendiğinde bütün veri setleri için Tip I hatasının Tip II' ye göre belirgin şekilde fazla olduğu görülmektedir. Buradan anlaşılacağı üzere, MLS ve ETEW yöntemleri zemin noktalarını başarılı bir şekilde muhafaza edememişlerdir. Ayrıca, nokta bulutu yoğunluğu arttıkça filtreleme yöntemlerinin performansının düştüğü görülmektedir. MLS yöntemi nokta bulutu yoğunluğunun artmasından negatif yönde en fazla etkilenen yöntemdir. MLS yöntemi ham veride ve düşük yoğunluklu veride ETEW yönteminden daha iyi sonuçlar verirken orta ve yüksek yoğunluktaki verilerde en kötü performansı sergilemiştir. Bu

sonuçlara göre MLS yönteminin seyrek yoğunluktaki nokta bulutları ile kullanılması daha uygundur. Genelde PM2B yöntemi PM1B yönteminden çok daha başarılı sonuçlar vermiştir, fakat ham veriden yoğun nokta bulutuna doğru gittikçe aradaki farkın azaldığı görülmektedir. PM2B yönteminin genelde ATIN yöntemiyle başa baş sonuçlar verdiği görülmektedir. Ancak, ATIN yöntemi genel olarak en iyi sonucu veren yöntemdir ve yoğunluğu yüksek nokta bulutları ile birlikte kullanımı başarılı sonuçlar alınmasına katkı sağlayabilir. Tez kapsamında hesaplanan bütün hata metrikleri inceleme kolaylığı olması açısından Tablo 10' da verilmiştir.

Tablo 10. Hesaplanan Tip I hata, Tip II hata, Toplam hata, Kappa indeks ve Ki-kare değerleri

Veri Seti	Filtreleme Algoritması	Tip I Hata (%)	Tip II Hata (%)	Toplam Hata (%)	Kappa İndeksi (%)	Ki-kare Değerleri
Ham veri	PM1B	9,70	11,30	10,00	67,2	325,258
	PM2B	1,90	28,00	5,90	75,33	395,006
	MLS	11,30	10,40	11,20	64,5	306,110
	ETEW	11,80	13,20	12,10	61,8	280,504
	ATIN	5,10	12,30	6,20	77,5	415,905
Düşük yoğunluklu veri	PM1B	19,42	18,20	19,03	58,61	233,400
	PM2B	18,32	12,00	16,50	64,5	284,808
	MLS	33,30	6,70	23,40	50,9	205,837
	ETEW	38,00	9,10	29,10	43,7	159,009
	ATIN	18,50	15,80	17,60	61,6	258,195
Orta yoğunluklu veri	PM1B	30,40	7,90	23,20	53,6	210,302
	PM2B	28,10	9,30	22,10	55,1	216,305
	MLS	69,35	8,90	50,08	15,88	36,204
	ETEW	64,10	2,50	44,50	24,6	81,964
	ATIN	30,00	4,40	21,90	56,6	237,864
Yüksek yoğunluklu veri	PM1B	51,20	10,60	40,20	27,2	84,355
	PM2B	49,20	10,60	38,80	29,0	92,074
	MLS	70,80	6,30	53,40	14,37	40,061
	ETEW	69,30	6,40	52,30	16,7	44,279
	ATIN	44,30	6,40	34,00	36,4	136,517

5.3. Filtreleme Sonuçlarının Enterpolasyonu ile SAM Üretimi

Literatürdeki birçok çalışmaya göre nokta bulutu yoğunluğu arttıkça üretilen SAM'ın doğruluğu da artmaktadır (Ali, 2004; Blaschke vd., 2004; Anderson vd., 2005; Anderson vd., 2006; Sailer vd., 2014). Bu nedenle tez kapsamında en iyi filtreleme sonucunu veren ATIN yöntemi ile filtrelenen yüksek yoğunluktaki nokta bulutu SAM üretiminde

kullanılmıştır. Üretilen SAM'ın konumsal çözünürlüğünün belirlenmesi için Hu (2003) tarafından önerilen yaklaşım kullanılmıştır. Bu yaklaşıma göre SAM'ın konumsal çözünürlüğü (Hu, 2003; Liu, 2008);

$$S = \sqrt{\frac{A}{n}} \quad (5.7)$$

şeklinde hesaplanır. Burada n nokta bulutundaki toplam nokta sayısını, A toplam alanı temsil etmektedir. Çalışmada kullanılan yüksek yoğunluktaki nokta bulutu 1.284.763 nokta içerdiği ve çalışma alanı 72.980 m² olduğu için SAM'ın optimum çözünürlüğü yaklaşık 25 cm olarak belirlenmiştir.

Tez kapsamında SAM üretimi için kullanılan bütün enterpolasyon yöntemleri MATLAB programlama dilinde kodlanmıştır. SAM üretimi yazılan bu kodlar ile gerçekleştirilmiştir. SAM'ın modellenmesi raster formatında gerçekleştirildiği için arazi koordinat sisteminden piksel koordinat sistemine afin dönüşümü ile geçiş yapılmıştır. Bunun için bölgede yer alan ve koordinatları RTK (Real Time Kinematik) GPS ölçüm tekniği ile belirlenen 4 yersel kontrol noktası kullanılmıştır. Çalışma bölgesi için üretilen 25 cm konumsal çözünürlüklü ortofotonun boyutuna eşit bir matris oluşturulmuştur. Enterpolasyon için nokta bulutundaki tüm noktalar kontrol noktası olarak kullanılmıştır. Kontrol noktalarına ait yükseklikler piksel koordinatları cinsinden matrisin ilgili hücrelerine atanmıştır. Sonrasında ilgili enterpolasyon yöntemi ile bu kontrol noktaları kullanılarak matrisin diğer boş kalan hücrelerine yükseklik enterpole edilmiştir. Fakat tüm matris elemanlarını aynı anda kullanarak enterpolasyon yapmak sistem kaynaklarını çok fazla tükettiğinden ve enterpolasyon mantığı açısından elverişli olmadığından dolayı enterpolasyon işlemi arazi matrisi üzerinde pencereler dolaştırılarak gerçekleştirilmiştir.

5.4. Enterpolasyon Yöntemlerinin Doğruluk Analizi

Çeşitli enterpolasyon yöntemleri ile üretilen SAM'ların doğruluğu çalışma bölgesinde tesis edilen test noktaları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. SAM'ın doğruluğunu detaylı bir şekilde irdelemek için düz alanlardan (Bölge 1), eğimli alanlardan (Bölge 2) ve zemin üstü objelerin yakınlarından (Bölge 3) test noktaları belirlenmiş ve

yükseklik değerleri ölçülmüştür. Bölge 1, Bölge 2 ve Bölge 3 için sırasıyla 87, 163 ve 129 adet test noktası tesis edilmiştir. Test noktalarının ölçümleri RTK GPS yöntemiyle yapılmıştır. Her bir bölge için noktaların ölçülen yükseklik değerleri ve SAM üzerindeki yükseklik değerleri arasında Karesel Ortalama Hata (KOH), Farkların Standart Sapması (FSS), Ortalama Mutlak Hata (OMH) ve Ortalama Hata (OH) metrikleri hesaplanmıştır. Ayrıca minimum (MinH) ve maksimum (MaksH) yükseklik hataları da hesaplanmıştır (Bkz. Tablo 11). MinH test noktalarının ölçülen yükseklik değerleri ile SAM üzerindeki yükseklik değerleri arasındaki farkların minimumunu, MaksH ise maksimumunu ifade etmektedir. KOH, FSS, OMH ve OH' nin formülleri şu şekildedir (Montealegre vd., 2015b);

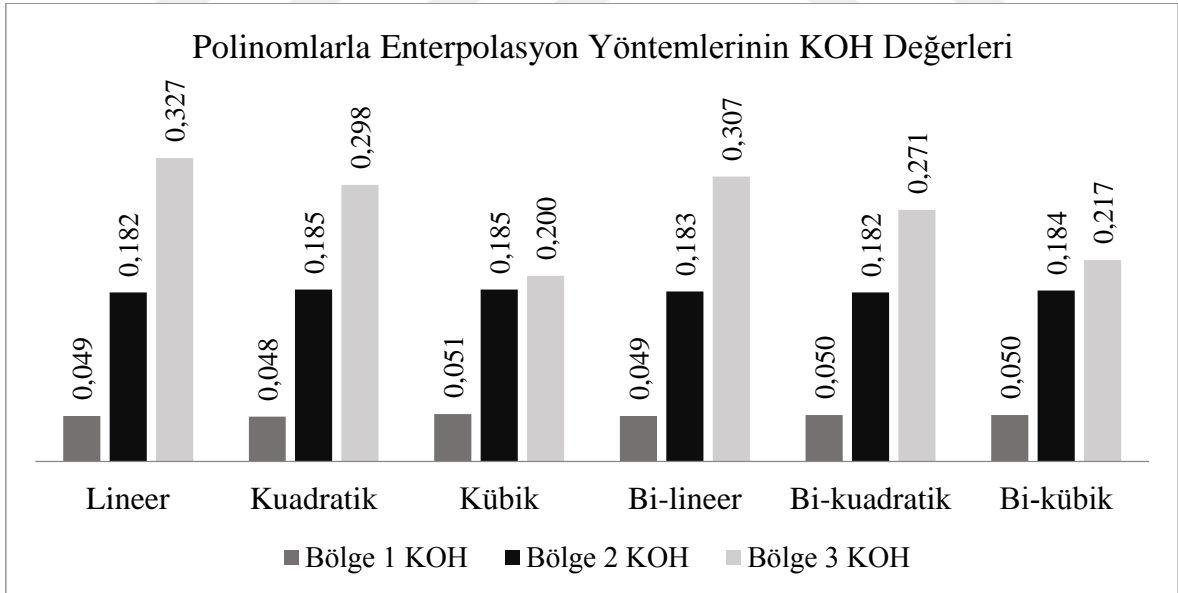
$$\begin{aligned}
 KOH &= \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\ddot{O}_z(x, y) - SAM_z(x, y))^2} \\
 FSS &= \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (F_i - \bar{F})^2}{n - 1}} \\
 OMH &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (|\ddot{O}_z(x, y) - SAM_z(x, y)|) \\
 OH &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\ddot{O}_z(x, y) - SAM_z(x, y))
 \end{aligned} \tag{5.8}$$

Burada, \ddot{O}_z bir test noktasının ölçülen yükseklik değerini, SAM_z aynı test noktasının SAM üzerindeki yükseklik değerini temsil etmektedir. n toplam test noktası sayısına, x ve y test noktalarının yataydaki koordinat değerlerine ve $F = \ddot{O}_z - SAM_z$ ' ye karşılık gelmektedir (Montealegre vd., 2015b). \bar{F} ise $\ddot{O}_z - SAM_z$ farklarının ortalamasına eşittir.

5.5. Enterpolasyon Yöntemlerinin Sonuçları

Kullanılan enterpolasyon yöntemlerinin sonuçları her üç bölge için de ayrı ayrı irdelenmiştir. Sonrasında yöntemlerin sonuçları birbirleriyle karşılaştırılarak yorumlanmıştır.

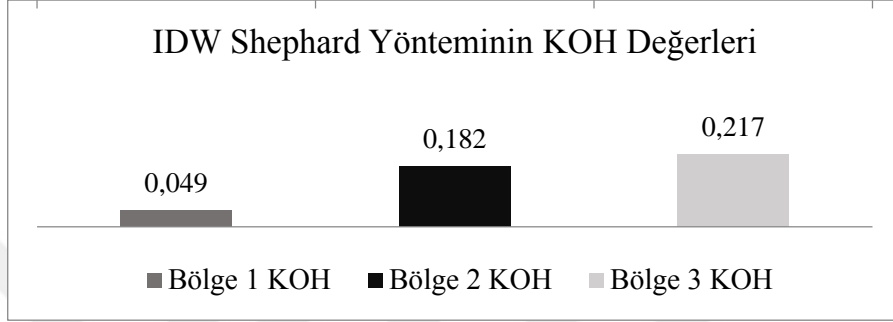
Tablo 11’ de görüldüğü üzere Bölge 1 için hesaplanan KOH, FSS, OH, OMH, MinH ve MaksH değerleri birbirlerine çok yakındır. Fakat genel olarak bu hatalar dikkate alınarak incelendiğinde bu bölge için en başarılı performansı sergileyen polinom yöntemin kuadratik, en kötü performansı sergileyen yöntemin ise kübik enterpolasyon yöntemi olduğu görülmektedir. Bölge 2’ de de benzer hatalar gözlemlenmek mümkündür. Bu bölgede KOH değeri 0,18 m olup farklı yöntemlere göre sonuç milimetre mertebesinde değişmektedir. Bölge 3 için en iyi KOH değerini 0,20 m ile kübik enterpolasyon yöntemi vermiştir. Kübik yöntemi 0,217 m ile bi-kübik enterpolasyon yöntemi takip etmektedir. 3. bölgede en kötü KOH değerini (0,307 m) ise kuadratik yöntem vermiştir. En iyi FSS değerine (0,185 m) sahip olan yöntemin kübik enterpolasyon yöntemi olduğu görülmektedir. Bu yöntemi 0,197 m FSS değeri ile bi-kübik yöntem takip etmektedir. FSS değeri en kötü olan yöntem 0,320 m ile lineer enterpolasyon yöntemidir. Üç bölge içinde en yüksek MaksH değerini 3. bölgede (1,947 m) bi-kuadratik yöntemin verdiği görülmüştür. Bölge 3 için hesaplanan OH, OMH ve MaksH değerlerinin ise birbirlerine oldukça yakın olduğu görülmektedir. Polinomlarla enterpolasyon yöntemlerine ilişkin KOH değerleri Şekil 24’ de verilmiştir.



Şekil 24. Polinomlarla enterpolasyon yöntemleri için hesaplanan KOH değerleri (m cinsinden)

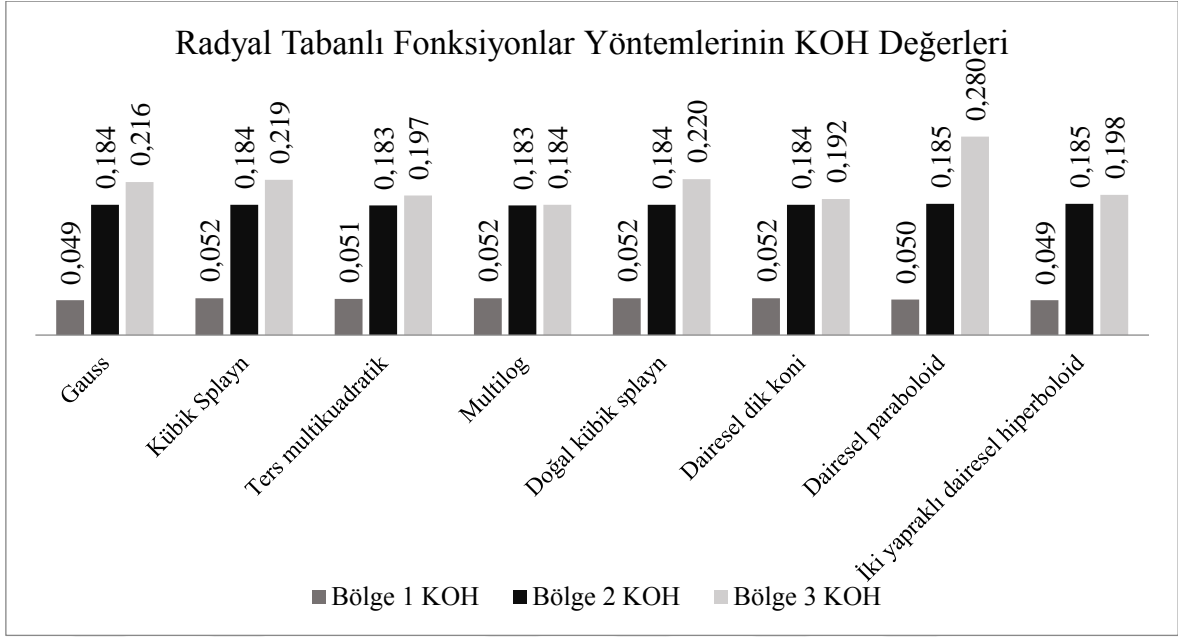
Shepard yöntemine ilişkin KOH değerleri Şekil 25’ de verilmiştir. Shepard yöntemi Bölge 1’ de 0,049 m ve Bölge 2’de 0,182 m KOH değerleri ile diğer yöntemlerle benzer

performans göstermiştir. Shepard yöntemi için Bölge 1 ve Bölge 2’ deki diğer hata metrikleri sonuçları polinomlarla enterpolasyon yöntemleriyle çoğunlukla benzerdir. Shepard yöntemi Bölge 3’ de bi-kübik yöntemle aynı KOH değerini (0,217 m) vermiştir. 3. Bölge için, Shepard yöntemi enterpolasyonu sonucu polinom yöntemleri ile karşılaştırıldığında MaksH değeri (0,478 m) en düşük olan yöntemin Shepard yöntemi olduğu görülmektedir.



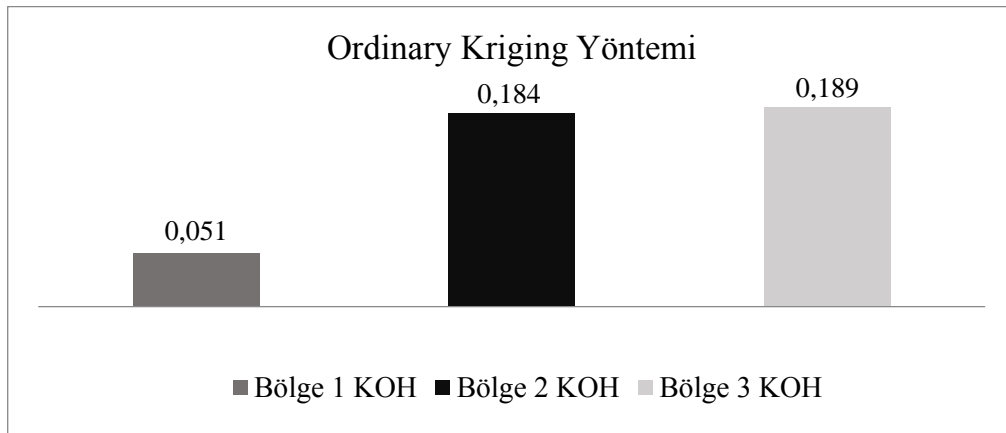
Şekil 25. IDW Shepard yöntemi için hesaplanan KOH değerleri (m cinsinden)

RTF yöntemine ilişkin KOH değerleri Şekil 25’ de verilmiştir. RTF enterpolasyon sonuçları incelendiğinde Bölge 1 ve Bölge 2’ de enterpolasyon yöntemlerinin genelde aynı KOH değerlerini verdikleri görülmüştür. Bölge 1’ deki KOH değerleri 0,050 m civarındayken, Bölge 2’ deki KOH değerleri 0,184 m civarında belirlenmiştir. Bölge 3’ de en iyi KOH değerini (0,184 m) multilog yöntemi vermiştir. Multilog yöntemini 0,192 m KOH değeri ile multiküadratik-dairesel dik koni enterpolasyon yöntemi takip etmektedir. 3. Bölgedeki en kötü KOH değerini ise 0,280 m ile multiküadratik-dairesel paraboloid yöntem vermiştir. 3. Bölge için en iyi FSS değerini (0,144 m) veren yöntem multiküadratik-dairesel dik koni yöntemi olmuştur. Bu yöntemi 0,164 m FSS değeri ile multiküadratik-iki yapraklı dairesel hiperboloid yöntemi takip etmektedir. Bölgede en kötü FSS değerini veren yöntem (0,273 m) multiküadratik-dairesel paraboloid yöntemi olmuştur. RTF enterpolasyon sonuçları içinde en iyi OH değerini (0,066 m) veren yöntem multiküadratik-dairesel paraboloid yöntemi iken yine aynı yöntem en kötü OMH değerini (0,169 m) vermiştir. OMH değeri en iyi olan yöntem ise 0,141 m ile multilog yöntemidir. Bu bölgede MinH değerleri hemen hemen aynı olup 0,001 m civarındadır. En yüksek MaksH değerini (0,739 m) multilog fonksiyonu ile yapılan enterpolasyon yöntemi vermiştir (Bkz. Tablo 11).



Şekil 26. Radyal tabanlı fonksiyonlar için hesaplanan KOH değerleri (m cinsinden)

Kriging yöntemi Bölge 1 ve Bölge 2' de diğer enterpolasyon yöntemleri ile yaklaşık olarak aynı KOH değerini vermiştir. Bölge 1 Kriging yöntemi ile enterpole edildiğinde hesaplanan FSS, OH, OMH, MinH ve MaxH değerleri sırasıyla 0,046 m, 0,025 m, 0,038 m, 0 m ve 0,163 m olarak belirlenmiştir (Bkz. Tablo 11). Kriging yöntemi için Bölge 2' ye ait FSS, OH, OMH, MinH ve MaxH değerleri sırasıyla 0,165 m, 0,083 m, 0,142 m, 0,004 m ve 0,734 m şeklindedir. Kriging yöntemi Bölge 3' de 0,189 m KOH ve 0,139 m FSS değeri ile en iyi sonuçları veren yöntemlerden biridir. Ordinary Kriging yöntemine ilişkin KOH değerleri Şekil 27' de verilmiştir.



Şekil 27. Ordinary Kriging için hesaplanan KOH değerleri (m cinsinden)

Tablo 11. Test bölgeleri için hesaplanan KOH, FSS, OH, OMH, MinH ve MaksH değerleri (m cinsinden)

		Bölge 1						Bölge 2						Bölge 3					
		KOH	FSS	OH	OMH	MinH	MaksH	KOH	SDR	OH	OMH	MinH	MaksH	KOH	SDR	OH	OMH	MinH	MaksH
Polinomlarla Enterpolasyon	Lineer	0,049	0,044	0,022	0,038	0,000	0,163	0,182	0,161	0,085	0,142	0,004	0,763	0,327	0,320	0,075	0,186	0,001	0,562
	Kuadratik	0,048	0,043	0,022	0,036	0,000	0,163	0,185	0,163	0,087	0,143	0,004	0,763	0,298	0,294	0,058	0,172	0,001	0,500
	Kübik	0,051	0,045	0,025	0,039	0,000	0,163	0,185	0,167	0,083	0,142	0,004	0,763	0,200	0,185	0,079	0,149	0,001	0,495
	Bi-lineer	0,049	0,044	0,022	0,038	0,000	0,163	0,183	0,161	0,087	0,142	0,004	0,763	0,307	0,300	0,069	0,178	0,001	0,553
	Bi-kuadratik	0,050	0,045	0,023	0,038	0,000	0,163	0,182	0,162	0,084	0,140	0,002	0,776	0,271	0,247	0,113	0,165	0,001	1,947
	Bi-kübik	0,050	0,044	0,023	0,037	0,000	0,163	0,184	0,166	0,049	0,139	0,002	0,184	0,217	0,197	0,093	0,156	0,001	0,495
IDW	Shephard Yöntemi	0,049	0,044	0,023	0,037	0,000	0,163	0,182	0,164	0,078	0,142	0,001	0,787	0,217	0,200	0,086	0,153	0,003	0,478
Radyal Tabanlı Fonksiyonlar	Gauss	0,049	0,044	0,023	0,037	0,000	0,163	0,184	0,166	0,081	0,140	0,002	0,776	0,216	0,196	0,093	0,154	0,001	0,495
	Kübik Splayn	0,052	0,046	0,025	0,039	0,000	0,163	0,184	0,165	0,083	0,142	0,004	0,730	0,219	0,187	0,115	0,165	0,001	0,617
	Ters multikuadratik	0,051	0,045	0,024	0,038	0,000	0,163	0,183	0,165	0,082	0,141	0,006	0,750	0,197	0,165	0,108	0,151	0,001	0,495
	Multilog	0,052	0,045	0,025	0,038	0,000	0,163	0,183	0,165	0,082	0,141	0,005	0,739	0,184	0,165	0,082	0,141	0,005	0,739
	Doğal kübik splayn	0,052	0,046	0,025	0,040	0,000	0,163	0,184	0,165	0,083	0,142	0,004	0,800	0,220	0,189	0,115	0,165	0,001	0,623
	Multikuadratik-Dairesel dik koni	0,052	0,046	0,025	0,038	0,000	0,163	0,184	0,165	0,082	0,141	0,004	0,736	0,192	0,144	0,126	0,153	0,001	0,495
	Multikuadratik-Dairesel paraboloid	0,050	0,043	0,026	0,039	0,001	0,163	0,185	0,169	0,079	0,142	0,003	0,763	0,280	0,273	0,066	0,169	0,001	0,511
Multikuadratik-İki yapraklı dairesele hiperboloid	0,049	0,044	0,025	0,038	0,001	0,163	0,185	0,167	0,082	0,146	0,002	0,763	0,198	0,164	0,111	0,151	0,000	0,538	
Kriging	Ordinary Kriging	0,051	0,046	0,025	0,038	0,000	0,163	0,184	0,165	0,083	0,142	0,004	0,734	0,189	0,139	0,129	0,152	0,001	0,512

Genel olarak tüm enterpolasyon yöntemleri Bölge 1 ve Bölge 2' de aynı hata değerlerini vermiştir. Bunun nedeni bu iki bölgenin sırasıyla düz ve eğimli arazileri temsil etmesidir. Bu nedenle bu bölgelerde enterpolasyon yöntemlerinin birbirlerine göre başarısını analiz etmek mümkün değildir. Bölge 3 zemin üstü objelere yakın alanları içerdiğinden dolayı bu bölgede belirlenen hata miktarları enterpolasyon yöntemlerine göre oldukça farklılık göstermektedir. Bölge 3' deki hata değerleri incelendiğinde çalışma alanına ait en doğru SAM' ı veren yöntemlerin 0,184 m ve 0,189 m KOH değerleri ile sırasıyla RTF yöntemlerinden Multilog ve Ordinary Kriging yöntemlerinin olduğu görülmektedir. Bu yöntemleri 0,200 m KOH değeri ile kübik enterpolasyon yöntemi takip etmektedir. Çalışmada doğruluğu en düşük SAM' ı veren yöntem 0,327 m KOH değeri ile polinomlarla enterpolasyon yöntemlerinden lineer yöntem olmuştur. Tüm yöntemler arasında en iyi FSS değerini (0,139 m) veren yöntem Ordinary Kriging yöntemi iken en kötü FSS değerini ise polinomlarla enterpolasyon yöntemlerinden lineer yöntem vermiştir. Çalışmada en yüksek hata değerini (0,617 m) veren SAM ise RTF yöntemlerinden olan kübik splayn ile enterpole edilen SAM olmuştur. En yüksek OMH' yi (0,186 m) lineer yöntem verirken en düşük OMH' yi (0,141 m) ise multilog yöntemi vermiştir (Bkz. Tablo 11). Üretilen bütün SAM' lar üzerlerine ortofoto bindirilerek aşağıdaki şekillerde gösterilmiştir.



Şekil 28. Ortofotonun lineer enterpolasyon yöntemi ile elde edilen SAM' ın üzerine bindirilmesi



Şekil 29. Ortofotonun kuadratik enterpolasyon yöntemi ile elde edilen SAM' ın üzerine bindirilmesi



Şekil 30. Ortofotonun kübik enterpolasyon yöntemi ile elde edilen SAM' in üzerine bindirilmesi



Şekil 31. Ortofotonun bi-lineer enterpolasyon yöntemi ile elde edilen SAM' in üzerine bindirilmesi



Şekil 32. Ortofotonun bi-kuadratik enterpolasyon yöntemi ile elde edilen SAM' ın üzerine bindirilmesi



Şekil 33. Ortofotonun bi-kübik enterpolasyon yöntemi ile elde edilen SAM' ın üzerine bindirilmesi



Şekil 34. Ortofotonun IDW-Shephard enterpolasyon yöntemi ile elde edilen SAM' ın üzerine bindirilmesi



Şekil 35. Ortofotonun RTF-Gauss enterpolasyon yöntemi ile elde edilen SAM' ın üzerine bindirilmesi



Şekil 36. Ortofotonun RTF-Küçük Splayn enterpolasyon yöntemi ile elde edilen SAM' ın üzerine bindirilmesi



Şekil 37. Ortofotonun RTF-Ters Multiküadratik enterpolasyon yöntemi ile elde edilen SAM' ın üzerine bindirilmesi



Şekil 38. Ortofotonun RTF-Multilog enterpolasyon yöntemi ile elde edilen SAM' in üzerine bindirilmesi



Şekil 39. Ortofotonun RTF-Doğal Kübik Splayn enterpolasyon yöntemi ile elde edilen SAM' in üzerine bindirilmesi



Şekil 40. Ortofotonun RTF- Multiküadratik-Dairesel dik koni enterpolasyon yöntemi ile elde edilen SAM' ın üzerine bindirilmesi



Şekil 41. Ortofotonun RTF-Multiküadratik-Dairesel paraboloid enterpolasyon yöntemi ile elde edilen SAM' ın üzerine bindirilmesi



Şekil 42. Ortofotonun RTF-Multikvadratik-İki yapraklı dairesel hiperboloid enterpolasyon yöntemi ile elde edilen SAM' in üzerine bindirilmesi



Şekil 43. Ortofotonun Kriging yöntemi-Ordinary kriging enterpolasyon yöntemi ile elde edilen SAM' in üzerine bindirilmesi

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez kapsamında İHA ile üretilen farklı yoğunluklardaki nokta bulutlarının filtrelenmesi ve enterpolasyonu ile SAM üretimi amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda öncelikle 4 farklı yoğunluktaki nokta bulutları 5 farklı filtreleme yöntemi ile filtrelenmiştir. Sonuçlar karşılaştırılarak en iyi sonucu veren yöntem ile filtrelenen yüksek yoğunluktaki veri SAM oluşturulmak üzere 16 farklı enterpolasyon yöntemi ile enterpole edilmiştir. Elde edilen SAM' ların doğruluklarına göre enterpolasyon yöntemlerinin başarıları karşılaştırılmıştır.

Elde edilen sonuçlara göre ATIN yöntemi mevcut nokta bulutunu en iyi filtreleyen yöntem olarak belirlenmiştir. Yoğun nokta bulutlarının filtrelenmesinde ATIN yöntemi oldukça faydalı olmaktadır. ATIN yöntemini PM2B yöntemi takip etmektedir. MLS yöntemi ise en düşük filtreleme performansını sergilemiştir. Bunun yanında nokta bulutu yoğunluğunun filtreleme algoritmalarının başarılarına oldukça büyük etkisi olduğu görülmüştür. Bölgede nokta bulutu yoğunluğu arttıkça filtreleme performansları düşmüştür. Nokta bulutu yoğunluğu arttıkça filtreleme yöntemlerinin performansının düşmesinin birkaç nedeni vardır. Nokta bulutu yoğunluğunun artırılması yani noktaların sıklaştırılması, zemin ile zemin üstü noktaları arasındaki nokta sayısının artmasına neden olduğu için yüksek yoğunluğa giderken zemin üstü objelere yakın bölgelerde hatalar artmaktadır. Filtreleme programları zemindeki diğer noktalara göre yüksek Z (yükseklik) değerine sahip noktaları filtrelemektedirler, fakat bu noktalar zemin üzerinde olduğu için de HATAO yapılmaktadır. Bu nedenle nokta yoğunluğu arttıkça Tip I hata değerlerinin de arttığı ve yine buna bağlı olarak Kappa ve Ki-kare değerlerinin düştüğü görülmektedir. Bölüm 4' de belirtildiği üzere filtreleme yöntemleri kullanıcı tarafından girilen parametrelere göre filtreleme yapmaktadır. Girilen eşik değerler filtreleme doğruluğu açısından büyük öneme sahiptir. Nokta bulutunun yoğunluğu arttıkça eşik değerlerinin hassas olarak girilmesi zorlaşmaktadır. Hassas olarak girilmeyen eşik değerler yüksek yoğunluktaki verilerde daha fazla hataya neden olmaktadır.

Çalışmada düz bir yapıya sahip Bölge 1 ile eğimli bir yapıya sahip olan Bölge 2 tüm enterpolasyon yöntemleri için hemen hemen aynı sonucu vermiştir. Elde edilen bu sonuçlara göre düz ve eğimli arazide Kriging gibi ağır ve uzun süren bir yöntem kullanmak yerine daha basit olan polinom yöntemleri kullanılabilir. Enterpolasyon yöntemlerinin

performansları arasındaki farklar özellikle zemin üstü objelere yakın noktalardan oluşan Bölge 3' de açıkça görülebilmektedir. Çalışmada SAM oluşturulduktan sonra enterpolasyon yöntemlerinden kaynaklanan ani çıkış ve iniş yapan yükseklikleri filtrelemek üzere model üzerinde bir pencere gezdirilmiştir. Bu pencere sayesinde polinomlar ile enterpolasyon yöntemlerinden elde edilen hatalar oldukça düşürülerek sonuçların neredeyse RTF ve Kriging yöntemlerinden elde edilen sonuçlara yaklaştığı görülmektedir. SAM üretildikten sonra yapılan bu filtreleme işlemi RTF enterpolasyon yöntemleri ile üretilen SAM' ın hata değerlerini de bir miktar düşürmüştür. Fakat bu yöntem zaten iyi sonuç veren Kriging yönteminin hata değerini diğerlerine oranla çok fazla düşürmemiştir. Çalışmada en iyi doğrulukta SAM Ordinary Kriging ve RTF yöntemlerinden olan multilog yöntemi ile üretilen model olmuştur. Bölgede genel olarak en iyi sonuç veren yöntemlerin kübik yöntemler olduğu görülmektedir. Özellikle kübik yöntemler ilk SAM üretiminde algoritmalarından dolayı aşırı uç yükseklikler oluşturmaktadır. Yapılan ikinci filtreleme sonucu kübik yöntemlerde hata değerleri yaklaşık ortalama 10 cm düşerek şimdiki hata değerlerini oluşturmuştur. Buradaki sonuçlardan da görüldüğü gibi engebeli arazilerde Kriging yöntemi başarısını ortaya koymaktadır. Bu tarz bölgelerde Kriging yönteminin sonra RTF yönteminin oldukça başarılı olduğu görülmektedir. Fakat ikinci bir filtrelemeden sonra elde edilen sonuçlar incelendiğinde polinom yöntemleri gibi oldukça basit ve kısa sürede sonuç veren yöntemlerin engebeli alanlarda dahi Kriging ve RTF yöntemlerine yakın başarıda sonuçlar verebildiği görülmektedir. Bu nedenle zaman ve bilgisayar kapasitesinin kısıtlı olduğu durumlarda polinom yöntemleri ikinci bir filtreleme ile birlikte Kriging ve RTF yöntemlerine alternatif olarak kullanılabilir.

Tez kapsamında yapılan uygulamalardan ve sonuçlardan anlaşıldığı üzere İHA tabanlı nokta bulutundan filtreleme ve enterpolasyon yöntemleriyle elde edilen SAM' ın hassasiyeti oldukça iyi seviyededir. Bu çalışmanın gerçekleştirildiği bölgeye benzer alanlarda LİDAR nokta bulutlarına alternatif olarak İHA tabanlı nokta bulutlarının kullanılması mümkündür.

7. KAYNAKLAR

- Açıkgöz, M., 2002. İzmit Deprem Anı Yer Değişirmelerinin Modellenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Y.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Akar, Ö. ve Güngör, O., 2015. Integrating multiple texture methods and NDVI to the Random Forest classification algorithm to detect tea and hazelnut plantation areas in northeast Turkey, International Journal of Remote Sensing, 36, 2, 442-464.
- Alexander, C., Tansey, K., Kaduk, J., Holland, D. ve Tate, N., J., 2010. Backscatter coefficient as an attribute for the classification of full-waveform airborne laser scanning data in urban areas, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 65, 5, 423-432.
- Ali, T., A., 2004. On the Selection of an Interpolation Method for Creating a Terrain Model (TM) from LIDAR Data, In: Proceedings of the American Congress on Surveying and Mapping (ACSM) Conference 2004, Nashville TN, U.S.A., 1-18.
- Alkanalka, E. ve Bayram, B., 2007. Kestirim Yöntemlerinin Sayısal Yükseklik Modeli Üzerindeki Uygulamaları, 11. Harita Bilimsel ve Teknik Genel Kurultayı, 2-6 Nisan, Ankara .
- Alkanalka, E., 2005. Kestirim Metodlarının Sayısal Yükseklik Modeli Üzerindeki Uygulamaları, Yüksek Lisans Tezi, Y.T.Ü., Fen bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Anderson, E., S., Thompson, J., A. ve Austin, R., E., 2005. LIDAR density and linear interpolator effects on elevation estimates, International Journal of Remote Sensing, 26, 18, 3889-3900.
- Anderson, E., S., Thompson, J., A., Crouse, D., A. ve Austin R., E., 2006. Horizontal resolution and data density effects on remotely sensed LIDAR-based DEM, Geoderma, 132, 3, 406-415.
- Arslanoğlu, M. ve Özçelik, M., 2005. Sayısal Arazi Yükseklik Verilerinin İyileştirilmesi, TMMOB Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası, 10. Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı, 28 Mart-1 Nisan, Ankara .
- ASCE (American Society of Civil Engineers), ACSM (American Congress on Surveying and Mapping), ASPRS (Amerikan Society for Photogrammetry and Remote Sensing), 1994, Glassory of the Mapping of Sciences, 581, USA.
- Axelsson, P., 1999. Processing of laser scanner data—Algorithms and applications, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 54, 2-3, 138-147.
- Axelsson, P., 2000. DEM generation from laser scanner data using adaptive TIN models, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 33, 110-117.

- Azat, S., Y., 2009. Bilgisayar Ortamında Kayaların Jeokimyasal Bileşimlerinin Jeostatistiği, Modellenmesi ve Haritalandırılması, Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Barton, J., M., H., Buchberger, S., G. ve Lange, M., J., 1999. Estimation of Error and Compliance in Surveys By Kriging, Journal of Surveying Engineering, 125, 2, 87-108.
- Başkan, O., 2004. Gölbaşı yöresi topraklarının mühendislik, fiziksel özellik ilişkilerinde jeostatistik uygulaması, Doktora Tezi, A.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Blaschke, T., Tiede, D. ve Heurich, M., 2004. 3D landscape metrics to modelling forest structure and diversity based on laser scanning data, International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 36, 8/W2, 129-132.
- Brovelli, M., A., Cannata, M. ve Longoni, U., M., 2002. Managing and processing LIDAR data within GRASS, In Proceedings of the GRASS Users Conference, September 29, İtalya.
- Burrough, P., A. ve McDonnell, R., A., 1998. Principles of Geographical Information Systems. Oxford University Press, Oxford.
- Chaplot, V., Darboux, F., Bourennane, H., Leguédou, S., Silvera, N. ve Phachomphon K., 2006. Accuracy of interpolation techniques for the derivation of digital elevation models in relation to landform types and data density, Geomorphology, 77, 1, 126-141.
- Chauve, A., Vega, C., Durrieu, S., Bretar, F., Allouis, T., Pierrot Deseilligny, M. ve Puech, W., 2009, Advanced full-waveform lidar data echo detection: Assessing quality of derived terrain and tree height models in an alpine coniferous forest, International Journal of Remote Sensing, 30, 19, 5211-5228.
- Chen, C., Li, Y., Li, W. ve Dai, H., 2013. A multiresolution hierarchical classification algorithm for filtering airborne LiDAR data, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 83, 1-9.
- Cohen J., 1960. A coefficient of agreement for nominal scales, Educational and Psychological Measurement, 20, 37-46.
- Congalton, R., G. ve Green, K., 1999. Assessing the Accuracy of Remotely Sensed Data: Principles and Practices, Boca Raton, FL: Lewis.
- Çakır, L., 2012. Ortometrik Yüksekliklerin Dolaylı Olarak Gps Gözlemlerinden Elde Edilmesinde Kullanılan Yöntemlerin İrdelenmesi, Doktora Tezi, KTÜ, Fen Bilimleri Entitüsü, Trabzon.

- Dikici, H., 2001. Toprak biliminde kullanılan bazı jeoistatistik yöntemleri, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Tarımsal Bilişim Teknolojileri 4. Sempozyumu, Eylül, Kahramanmaraş.
- Elmqvist, M., 2002. Ground surface estimation from airborne laser scanner data using active shape models, ISPRS Commission III Symposium, Photogrammetric and Computer Vision, Graz, Austria, 114–109.
- Elmqvist, M., Jungert, E., Lantz, F., Persson, A. ve Soderman, U., 2001. Terrain modelling and analysis using laser scanner data, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 34, 3-4, 219-226.
- El-Sheimy, N., Valeo, C. ve Habib, A., 2005. Digital terrain modeling: acquisition, manipulation, and application, MA: Artech House, Boston.
- Erdogan, S., 2009. A comparison of interpolation methods for producing digital elevation models at the field scale, *Earth Surface Processes and Landforms*, 34, 366-376.
- Evans, J., S. ve Hudak, A., T., 2007. A multiscale curvature algorithm for classifying discrete return LiDAR in forested environments, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 45, 1029–1038.
- Fasshauer, G., E., 2002. Newton Iteration with Multiquadrics for the Solution of Nonlinear PDEs, *Computers and Mathematics with Applications*, 43, 3–5, 423–438.
- Foody, G., M., 2004. Thematic map comparison, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 70, 5, 627-633.
- Franke, R., 1979. A Critical Comparison of Some Methods for Interpolation of Scattered Data, PhD thesis, Naval Postgraduate School Monterey, California.
- Guo, Q., Li, W., Yu, H. ve Alvarez., O., 2010. Effects of Topographic Variability and Lidar Sampling Density on Several DEM Interpolation Methods, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 76, 6, 701-712.
- Güler, A., 1983. Sayısal Arazi Modellerinde İki Enterpolasyon Yöntemi ile Denemeler, K.T.Ü. Araştırma ve İnceleme Yayınları Dizisi, Genel Yayın No: 22, Fakülte Yayın No: 19, Trabzon, 22s.
- Güler, A., 1985. Sayısal Arazi Modellerinde İki Interpolasyon Yöntemi ile Denemeler, Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası Dergisi, Ankara, 52-53, 98-118.
- Haralick, R., M., Sternberg, S., R., ve Zhuang, X., 1987. Image analysis using mathematical morphology, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 4, 532-550.
- Hardy, R., L., 1971. Multiquadric Equations of Topography and other Irregular Surfaces, *Journal of Geophysical Research*, 76, 1905 -1915.

- Hardy, R., L., 1990. Theory of Applications of the Multiquadratic-biharmonic Method: 20 Years of Discovery 1968-1988, Computers and Mathematics with Application, 19, 8-9, 163-208.
- Hu, H., Ding, Y., Zhu, Q., Wu, B., Lin, H., Du, Z. ve Zhang, Y., 2014. An adaptive surface filter for airborne laser scanning point clouds by means of regularization and bending energy, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 92, 98-111.
- Hu, Y., 2003. Automated extraction of digital terrain models, roads and buildings using airborne LiDAR data, PhD Thesis, Department of Geomatics Engineering, University of Calgary, Canada.
- Isaaks, E., H. ve Srivastava, R., M., 1989. An Introduction to Applied Geostatistics, Oxford University Press, Oxford, 561 s.
- İnal, C. ve Özer, C., 2003. Jeodezik Uygulamalarda Kriging Enterpolasyon Yönteminin Kullanılabilirliği, TUJK Bilimsel Toplantısı Coğrafi Bilgi Sistemleri ve Jeodezik Ağlar Çalıştayı Poster Bildirisi.
- İnal, C., 1996. Yerel Jeoid Geçirilerek GPS Sonuçlarından Yükseklik Belirlemesi, S.Ü. Müh. Mim. Fak. Dergisi, 11, 2.
- İnal, C., Turgut, B. ve Yiğit, C., Ö., 2002. Lokal Alanlarda Jeoid Ondilasyonlarının Belirlenmesinde Kullanılan Enterpolasyon Yöntemlerinin Karşılaştırılması, Selçuk Üniversitesi Jeodezi ve Fotogrametri Mühendisliği Öğretiminde 30. Yıl Sempozyumu, Ekim, Konya.
- İnal, C., ve Yiğit C., Ö., 2004. Jeodezik Uygulamalarda Kriging Enterpolasyon Yönteminin Kullanılabilirliği, Coğrafi Bilgi Sistemleri ve Jeodezik Ağlar Çalıştayı, Konya, 177 – 185.
- Kavzoglu, T., ve Colkesen, I., 2011. Entropic distance based K-Star algorithm for remote sensing image classification, Fresenius Environmental Bulletin, 20, 5, 1200-1207.
- Kavzoglu, T., ve Colkesen, I., 2012. The effects of training set size for performance of support vector machines and decision trees, In: Proceeding of the 10th international symposium on spatial accuracy assessment in natural resources and environmental sciences, July, Florianopolis-SC.
- Kraus, K. ve Pfeifer, N., 2001. Advanced DTM generation from LIDAR data, International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 34, 3-4, 23-30.
- Landis, J., R. ve Koch, G., G., 1977. The measurement of observer agreement for categorical data, Biometrics, 33, 159–174.
- Leberl, F., 1973. Interpolation in a Square Grid DTM, ITC Journal, 1973-1975.

- Li, Z., Zhu, C. ve Gold, C., 2004. Digital terrain modeling: principles and methodology, CRC press.
- Liu, X., 2008. Airborne LiDAR for DEM generation: some critical issues, Progress in Physical Geography, 32, 1, 31-49.
- Liu, X., Zhang, Z., Peterson, J. ve Chandra, S., 2007. LiDAR-derived high quality ground control information and DEM for image orthorectification, GeoInformatica, 11, 37–53.
- Lloyd, C., D. ve Atkinson, P., M., 2002. Deriving DSMs from LiDAR Data with Kriging, International Journal of Remote Sensing, 23, 2519-24.
- Lohr, U., 1998. Digital Elevation Models by Laser Scanning, Photogrammetric Record, 16, 105–109.
- Mallet, C., Soergel, U. ve Bretar, F., 2008. Analysis of full-waveform lidar data for classification of urban areas, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XXXVII, B3a, 85-91.
- McGaughey, R., J., 2009. FUSION/LDV: Software for LIDAR data analysis and visualization. US Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station: Seattle, WA, USA, 123, 2.
- Meng, X., Currit, N. ve Zhao, K., 2010. Ground filtering algorithms for airborne LiDAR data: A review of critical issues, Remote Sensing, 2, 3, 833-860.
- Meng, X., Wang, L., Silván-Cárdenas, J., L. ve Currit, N., 2009. A multi-directional ground filtering algorithm for airborne LIDAR, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 64, 1, 117-124.
- Montealegre, A., L., Lamelas, M., T. ve de la Riva, J., 2015a. A Comparison of Open-Source LiDAR Filtering Algorithms in a Mediterranean Forest Environment, IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 8, 8, 4072-4085.
- Montealegre, A., L., Lamelas, M., T. ve de la Riva, J., 2015b. Interpolation Routines Assessment in ALS-Derived Digital Elevation Models for Forestry Applications, Remote Sensing, 7, 7, 8631-8654.
- Mulla, D., J. ve Schepers, J., S., 1997. Key processes and properties for site-specific soil and crop management, Eds. Pierce, F., J. ve Sadler, E., J., The state of site specific management for agriculture, 1-18.
- Öztaş, T., 1995. Jeoistatistiğin toprak bilimindeki önemi ve uygulanaışı. Akalın Toprak ve Çevre Sempozyumu. Cilt. I, s. 271-280.

- Pingel, T., J., Clarke, K., C. ve McBride, W., A., 2013. An improved simple morphological filter for the terrain classification of airborne LiDAR data, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 77, 21–30.
- Polat, N. ve Uysal, M., 2015. Investigating performance of Airborne LiDAR data filtering algorithms for DTM generation, Measurement, 63, 61-68.
- Ramirez, J., R., 2006. A new approach to relief representation. Surveying and Land Information Science, 66, 19–25.
- Roggero, M., 2001. Airborne Laser Scanning: Clustering in Raw Data, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing 34, 3-4, 227–232.
- Sailer, R., Rutzinger, M., Rieg, L. ve Wichmann, V., 2014. Digital elevation models derived from airborne laser scanning point clouds: appropriate spatial resolutions for multi-temporal characterization and quantification of geomorphological processes, Earth Surface Processes and Landforms, 39, 2, 272-284.
- Silvan-Cardenas, J., L. ve Wang L., 2006. A multi-resolution approach for filtering LiDAR altimetry data, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 61, 1, 11–22.
- Sithole, G., 2001. Filtering of laser altimetry data using a slope adaptive filter, International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 34, 3-4, 203-210.
- Sithole, G., ve Vosselman, G., 2004. Experimental comparison of filter algorithms for bare-Earth extraction from airborne laser scanning point clouds, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 59, 1, 85-101.
- Sohn, G. ve Dowman, I., J., 2002. Terrain surface reconstruction by the use of tetrahedron model with the MDL Criterion, International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 34, 3/A, 336-344.
- Şehsuvaroğlu, M., S., Eker, O., Erdoğan, M. ve Yıldız, F., 2014. Sayısal Yüzey Modeli Üretiminde Fotogrametri mi, LiDAR mı?, Harita Dergisi, 151, 1-10.
- Şentürk, E. ve İnce, C., D., 2015. Kocaeli İlinde Yerel Jeoidin Enterpolasyon Yaklaşımıyla Belirlenmesi, TMMOB Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası, 15. Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı, Mart, Ankara.
- Tanır Kayıkçı, E. ve Karaaslan, Ö., 2015. Trabzon İli için Jeoid Ondülasyonları Belirleme Amacıyla Enterpolasyon Yöntemlerinin Uygulanması, 15. Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı, Mart, Ankara, 52-53.
- Trangmar, B., B., Yost, R., S. ve Uehara, G., 1985. Application of geostatistics to spatial studies of soil properties, Advances in Agronomy, 38, 1, 45-94.
- URL-1, <http://amazingplanetandgeology.blogspot.com.tr/2015/11/dem-dtm-dsm-nedir-ve-aralarndaki.html>, Erişim tarihi: 27.01.2016.

- URL-2, <http://lbi-archpro.org/als-filtering/lbi-project/results/lastools/filtering-algorithm-2>, Erişim tarihi: 11.18.2015.
- Uysal, M., Toprak, A., S. ve Polat, N., 2015. DEM generation with UAV Photogrammetry and accuracy analysis in Sahitler hill, Measurement, 73, 539-543.
- Vosselman, G., 2000. Slope based filtering of laser altimetry data, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 33, 2-3, 935– 942.
- Wack, R. ve Wimmer, A., 2002. Digital terrain models from airborne laser scanner data – a grid based approach, International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 34, 3/B, 293–96.
- Webster, R. ve Oliver, M., A. 2001. Geostatistics for environmental scientists (Statistics in Practice).
- Yaprak, S. ve Arslan, E., 2007. Tokat Modelinde GPS/NİVELMAN Yöntemi ile Geoit Belirlemede Deterministik ve Geoistatistik Yöntemlerin Karşılaştırılması, TMMOB Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası 11. Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı, Nisan, Ankara, 1-12.
- Yaprak, S. ve Arslan, E., 2008. Kriging Yöntemi ve Geoit Yüksekliklerinin Enterpolasyonu, Jeodezi, Jeoformasyon ve Arazi Yönetimi Dergisi, 98, 36-42.
- Yılmaz, H., M. ve Yakar, M., 2006. LIDAR (Light Detection And Ranging) Tarama Sistemi, Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi, 2, 23-33.
- Yiğit, C. Ö., 2003. Elipsoidal yüksekliklerin ortometrik yüksekliğe dönüşümünde kullanılan enterpolasyon yöntemlerinin karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Yılmaz, V. ve Gungor, O., 2016. Fusion of very high-resolution UAV images with criteria-based image fusion algorithm, Arabian Journal of Geosciences, 9, 1.
- Zengin Kazancı, S., 2014. Konumsal Enterpolasyon Yöntemlerinin Uygulaması: Karadeniz Bölgesi Günlük Ortalama Sıcaklık Verileri Örneği, Yüksek Lisans Tezi, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Zhang, J. ve Lin, X., 2013. Filtering airborne LiDAR data by embedding smoothness-constrained segmentation in progressive TIN densification, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 81, 44-59.
- Zhang, K. ve Cui, Z., 2007. Airborne LIDAR Data Processing and Analysis Tools, ALDPAT 1.0. Miami, FL, USA: National Center for Airborne Laser Mapping, 81.
- Zhang, K. ve Whitman, D., 2005. Comparison of three algorithms for filtering airborne LiDAR data, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 71, 3, 313-324.

Zhang, K., Chen, S., C., Whitman, D., Shyu, M., L., Yan, J. ve Zhang, C., 2003. A progressive morphological filter for removing nonground measurements from airborne LIDAR data, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 41,4, 872-882.

Ziadat, F., M., 2007. Effect of contour intervals and grid cell size on the accuracy of DEMs and slope derivatives, Transactions in GIS, 11, 67–81.



ÖZGEÇMİŞ

30.01.1990 yılında İstanbul'da doğdu. 2004 – 2008 yılları arasında Yabancı Dil Ağırlıklı Ankara Ayrancı Lisesi' nde lise eğitimi gördü. 2009 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Harita Mühendisliği bölümünü kazandı. 4 yıllık eğitimin ardından 2014 yılında lisans eğitimini tamamladı. Aynı yıl Karadeniz Teknik Üniversitesi' nde yüksek lisans eğitimine başladı. 2015 yılının Ocak ayında Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği Anabilim Dalı' na Araştırma Görevlisi olarak atandı. Yüksek Lisans eğitimi halen devam etmektedir. İngiltere'de dil eğitimi almıştır.