

**FARKLI FİLTRELEME YÖNTEMLERİ İLE
LİDAR NOKTA BULUTLARINDAN SAYISAL
YÜKSEKLİK MODELİ ÜRETİMİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Nizar POLAT

DANIŞMAN

Yrd. Doç. Dr. Murat UYSAL

JEODEZİ VE FOTOGRAMETRİ

MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

HAZİRAN, 2014

Bu tez çalışması 13.FEN.BİL.37 numaralı proje ile AKÜ BAP tarafından desteklenmiştir.

AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**FARKLI FİLTRELEME YÖNTEMLERİ İLE LİDAR NOKTA
BULUTLARINDAN SAYISAL YÜKSEKLİK MODELİ ÜRETİMİ**

Nizar POLAT

DANIŞMAN

Yrd. Doç. Dr. Murat UYSAL

JEODEZİ VE FOTOGRAMETRİ MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

Haziran, 2014

TEZ ONAY SAYFASI

Nizar POLAT tarafından hazırlanan “Farklı Filtreleme Yöntemleri ile LiDAR Nokta Bulutlarından Sayısal Yükseklik Modeli Üretimi ” adlı tez çalışması lisansüstü eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca/...../..... tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği/oy çokluğu ile Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Jeodezi ve Fotogrametri Mühendisliği **Anabilim Dalı’nda Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Yrd. Doç. Dr. Murat UYSAL

Başkan : Yrd. Doç. Dr. Murat UYSAL
Afyon Kocatepe Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi

Üye : Yrd. Doç. Dr. Mustafa YILMAZ
Afyon Kocatepe Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi

Üye : Yrd. Doç. Dr. Abdullah VARLIK
Necmettin ERBAKAN Üniversitesi
Mühendislik-Mimarlık Fakülte

Afyon Kocatepe Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun
...../...../..... tarih ve
..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

.....
Prof. Dr. Yılmaz YALÇIN
Enstitü Müdürü

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

FARKLI FİLTRELEME YÖNTEMLERİ İLE LİDAR NOKTA BULUTLARINDAN SAYISAL YÜKSEKLİK MODELİ ÜRETİMİ

Nizar POLAT

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Jeodezi ve Fotogrametri Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Murat UYSAL

Sayısal yükseklik modeli (SYM) ve sayısal arazi modeli (SAM) birçok mühendislik uygulaması ve analiz için temel teşkil eden çok önemli topografik ürünlerdir. Bu modellerin üretimi için veri toplama şekilleri gelişen teknolojiye paralel olarak değişmektedir. Son yıllarda hava lazer tarama sistemleri veri toplanması konusunda önem kazanmıştır. Hava lazer tarama sistemleri sonucu elde edilen üç boyutlu nokta bulutu SYM ve SAM üretimi için kullanılabilir. Ancak lazer taraması esnasında sadece yer noktaları değil doğal ve yapay tüm objelerde veri setine dâhil olmaktadır. Bu yüzden ham nokta bulutunun SYM ve SAM üretiminden önce filtrelenmesi gerekmektedir. SYM ve SAM üretimindeki en büyük problem veri filtrelemesidir.

Airborne Light Detection and Ranging (hava LiDAR) verilerinden SYM ve SAM üretiminde henüz tam otomasyon sistemi oluşmuş değildir. Birçok parametreye ve ön bilgiye bağımlı olan filtreleme işlemi için farklı algoritmalar ve yazılımlar geliştirilmiştir. Bu algoritmalar farklı topografik alanlar için farklı doğruluklarda çalışmaktadırlar. Çünkü algoritmaların temelini oluşturan topografik özellikler her arazi için geçerli değildir.

Filtrelenmiş verilerden farklı enterpolasyon yöntemleri ile SAM üretilebilir. Fakat

filtreleme sonuçları enterpolasyon sonuçlarını doğrudan etkilemektedir. Çünkü her enterpolasyon yöntemi kullandığı veri setinden yola çıkarak modeli oluşturur. Bu nedenle filtrelemeden kaynaklanan hatalar oluşturulan SAM' da mevcuttur.

Hava LiDAR verilerinde SYM ve SAM üretimi için ücretsiz yapılan filtreleme sonuçları birçok projede altlık olarak kullanılabilir. Fakat hava LiDAR teknolojisinin sistem duyarlılığı ve filtrelemeden kaynaklanan aykırı değerler hala sonuçlara etki etmektedir. Sonuçların iyileştirilmesi için yeni filtreleme algoritmaları geliştirilebilir ve farklı veri tipleri de filtrelemeye dâhil edilebilir.

2014, xiii + 68 sayfa

Anahtar Kelimeler: LiDAR, Filtreleme, SYM, SAM

ABSTRACT

M.Sc Thesis

DIGITAL ELEVATION MODEL (DEM) GENERATION WITH LIDAR POINT CLOUD FILTERED BY DIFFERENT ALGORITHMS

Nizar POLAT

Afyon Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Geodesy and Photogrammetry Engineering

Supervisor: Assistant Prof Murat UYSAL

Digital Elevation Model (DEM) and Digital Terrain Model (DTM) are important topographic products and essential demands for many applications. Traditional methods for creating DEM and DTM are very costly and time consuming because of land surveying. In time, photogrammetry has become the first methods to generate DTM. Recently, airborne Light Detection and Ranging (LiDAR) system has become a powerful way to produce a DEM or DTM due to advantage of collecting three-dimensional information over a large area very effectively by means of precision and time. Airborne LiDAR collects information about not only from land surface but also from every object between plane and terrain that can reflect the laser beam. So filtering out nonground points from raw point clouds is the major step of DEM and DTM generation.

DEM and DTM generation from LiDAR point cloud is not fully automation. There are lots of different filtering algorithm due to several factors affect the filtering prosedures. These algorithms are working in different accuracy for different topographical areas. Because of topographical features is established based algorithms are not applicable to every land.

DTM can be produced by different interpolation methods of the filtered data. However, filtering results directly affect the interpolation results. Because each interpolation method, create the model starting from the data set that is filtered. That's why filtering

errors is also available in created DTM.

DEM and DTM generated from filtered airborne LiDAR data are sensitive enough to be used as a base model for many projects. Nevertheless airborne LiDAR system's own inherent sensitivity and filtering caused outliers still affect results. New filtering algorithms can be developed and and different data types may also be included to filter for improving the results.

2014, xiii+ 68 pages

Key Words: LiDAR, Filtering, DEM, DTM.

TEŞEKKÜR

Bu araştırmanın konusu, deneysel çalışmaların yönlendirilmesi, sonuçların değerlendirilmesi ve yazımı aşamasında yapmış olduğu büyük katkılarında dolay› tez danışman›m Say›n Yrd. Doç. Dr. Murat UYSAL' a, araştırma ve yazım süresince yardımlar›n› esirgemeyen ve her konuda öneri ve eleştirileriyle tez çalışmama yardım eden Say›n M. Ali UğUR 'un şahs›nda tüm Araştırma Görevlilerine teşekkür ederim.

Ayrıca çalışmada kullanılan veri setlerinin temin edildiği İstanbul Büyükşehir Belediyesi Harita Müdürlüğüne çok teşekkür ederim.

Bu araştırma boyunca maddi ve manevi desteklerinden dolay› başta değerli eşim Say›n Fatime Nur POLAT Han›m Efendi olmak üzere tüm aileme sonsuz teşekkür ederim.

Nizar POLAT

AFYONKARAHİSAR, 2014

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	Sayfa
ÖZET	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	vi
KISALTMALAR DİZİNİ	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
ÇİZELGE LAR.....	xii
Sayfa.....	xii
1. GİRİŞ	1
2. HAVA LiDAR SİSTEMİ.....	7
2.1 Temel Prensipler	9
2.1.1 LiDAR Konumu	11
2.1.2 LiDAR Post-Proses.....	11
2.2 LiDAR Dönüşleri (Returns) ve LiDAR Yoğunluğu (Intensity)	12
2.3 Las Formatı ve Veri Karakteristiği.....	15
3. LiDAR VERİLERİNİ FİLTRELEME.....	18
3.1 LiDAR Filtreleme İşlemleri İçin Bilinmesi Gereken Yer Noktalarına Ait Bazı Özellikler.....	18
3.2 Filtreleme Algoritmaları	19
3.2.1 Morfolojik (Morphological) Filtre.....	20
3.2.2 Kademeli Sıklaştırma (Prograsivve Densification) Temelli Filtre.....	23
3.2.3 Yüzey Temelli (Surfaced Based) Filtre	25
3.2.4 Bölümlenme-Segmentasyon Temelli (Segmentation Based) Filtresi.....	26
3.3 Filtreleme İşleminin Zorlukları.....	28
4. UYGULAMA.....	32
4.1 Filtreleme İşlemleri	35
4.1.1 Üçgen Ağ Model Filtrelemesi	35
4.1.2 Morfolojik Filtreleme.....	35
4.1.3 Polinomal Filtreleme.....	36
4.1.4 Eğim Temelli Filtreleme	37
4.2 F21 Bölgesinin Filtreleme Sonuçları ve Sayısal Yükseklik Modellerinin Karşılaştırılması.....	37
4.2.1 Üçgen Ağ Model Filtrelemesi	37
4.2.2 Morfolojik Filtreleme.....	39

4.2.3	Polinomal Filtreleme.....	40
4.2.4	Eğim Temelli Filtre.....	41
4.3	G21 Bölgesinin Filtreleme Sonuçları ve Sayısal Yükseklik Modellerinin Karşılaştırılması.....	44
4.3.1	Üçgen Ağ Model Filtrelemesi	44
4.3.2	Morfolojik Filtreleme.....	45
4.3.3	Polinomal Filtreleme.....	46
4.3.4	Eğim Temelli Filtre.....	48
4.4	FİLTRELENMİŞ LİDAR NOKTA BULUTUNDAN SAYISAL ARAZİ MODELİ ÜRETİMİ	50
4.4.1	Morfolojik Filtrelenmiş Nokta Bulutlarından SAM Üretimi	51
4.4.2	Polinomal Filtrelenmiş Nokta Bulutlarından SAM Üretimi	55
5.	SONUÇ VE ÖNERİLER	60
6.	KAYNAKLAR.....	63
	ÖZGEÇMİŞ.....	68

KISALTMALAR DİZİNİ

Kısaltmalar

ALDPAT	Airborne LiDAR Data Processing and Analysis Tools
ALS	Airborne LiDAR Systems
ASPRS	American Society for Photogrammetry and Remote Sensing
CBS	Coğrafi Bilgi Sistemi
DEM	Digital Elevation Model
DGPS	Differential Global Positioning System
DSM	Digital Surface Model
DTM	Digital Terrain Model
FEMA	Federal Emergency Management Agency
GPS	Global Positioning System
INS	Inertial Navigation System
IMU	Inertial Measurement Units
LiDAR	Light Detection and Ranging
MLS	Mobil LiDAR Systems
SYM	Sayısal Yükseklik Modeli
SAM	Sayısal Arazi Modeli
TLS	Terrestrial LiDAR System
USGS	U.S. Geological Survey
WGS 84	World Geodetic System 1984
3B	Üç Boyut

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1 LiDAR sisteminin genel yapısı (Guan <i>et al.</i> 2011).....	2
Şekil 1.2 Yersel ve Mobil LiDAR Sistemleri.	3
Şekil 2.1 LiDAR sistem bileşenleri: Laser, GPS ve IMU (NOAA 2012).	8
Şekil 2.2 Uçuş doğrultusunda kalıp taranan objeler (İnt.Kyn.2).....	10
Şekil 2.3 Hava LiDAR sisteminde lazerin iz düşümü (İnt.Kyn.3).....	10
Şekil 2.4 Laser ışını dönüşleri (İnt.Kyn.4).....	12
Şekil 2.5 LiDAR yoğunluk görüntüsü ve yükseklik tabanlı renklendirilmiş LiDAR görüntüsü (İnt.Kyn.6).	14
Şekil 2.6 Text formatında açılmış X, Y, Z, Yoğunluk ve dönüş numarası olan LiDAR veri örneği.	15
Şekil 2.7 Eşit dağılmamış LiDAR nokta bulutu (Liu 2008).	16
Şekil 3.1 Operatör işlemleri ve sonuçları (Chen 2012).	20
Şekil 3.2 Bir Pi noktasının yüzey noktası olarak tanımlanması (Sithole 2001).....	22
Şekil 3.3 Ağırlık fonksiyonu ve eşik değeri ile filtreleme (Chen 2012).....	25
Şekil 3.4 Filtreleme zorluğu olan örnek veriler (Sithole and Vosselman 2004).....	29
Şekil 4.1 F21 bölgesine ait LiDAR nokta bulutunun 3B görünümü.	32
Şekil 4.2 F21 bölgesine ait ortofoto.....	33
Şekil 4.3 F21 bölgesine ait sayısal yükseklik modelinin 3B görünümü.....	33
Şekil 4.4 G21 bölgesine ait LiDAR nokta bulutunun 3B görünümü.....	34
Şekil 4.5 G21 bölgesine ait ortofoto.....	34
Şekil 4.6 G21 bölgesine ait sayısal yükseklik modelinin 3B görüntüsü.....	34

Şekil 4.7 F21 bölgesine ait Üçgen Ağ Model algoritması ile filtrelenmiş nokta bulutu ve bu nokta bulutundan üretilen SYM.	38
Şekil 4.8 F21 bölgesine ait Morfolojik algoritma ile filtrelenmiş nokta bulutu ve bu nokta bulutundan üretilen SYM.	39
Şekil 4.9 F21 bölgesine ait Polinomal algoritma ile filtrelenmiş nokta bulutu ve bu nokta bulutundan üretilen SYM.	40
Şekil 4.10 F21 bölgesine ait Eğim Temelli algoritma ile filtrelenmiş nokta bulutu ve bu nokta bulutundan üretilen SYM.	41
Şekil 4.11 G21 bölgesine ait Üçgen Ağ Model algoritması ile filtrelenmiş nokta bulutu ve bu nokta bulutundan üretilen SYM.	44
Şekil 4.12 G21 bölgesine ait Morfolojik algoritma ile filtrelenmiş nokta bulutu ve bu nokta bulutundan üretilen SYM.	45
Şekil 4.13 G21 bölgesine ait Polinomal algoritma ile filtrelenmiş nokta bulutu ve bu nokta bulutundan üretilen SYM.	46
Şekil 4.14 G21 bölgesine ait Eğim Temelli algoritma ile filtrelenmiş nokta bulutu ve bu nokta bulutundan üretilen SYM.	48
Şekil 4.15 Morfolojik Filtre Ters Uzaklık Ağırlıklı Enterpolasyonu için (A) Referans veriden üretilmiş SAM, (B) Filtrelenmiş veriden üretilmiş SAM.	51
Şekil 4.16 Morfolojik Filtre Ters Uzaklık Ağırlıklı Enterpolasyonu için eşyüksekti eğrili (A-B) fark yüzeyi (metre).	52
Şekil 4.17 Morfolojik Filtre Doğal Komşuluk Enterpolasyonu için (A) Referans veriden üretilmiş SAM, (B) Filtrelenmiş veriden üretilmiş SAM.	52
Şekil 4.18 Morfolojik Filtre Doğal Komşuluk Enterpolasyonu için eşyüksekti eğrili (A-B) fark yüzeyi (metre).	53
Şekil 4.19 Morfolojik Filtre Kriging Enterpolasyonu için (A) Referans veriden üretilmiş SAM, (B) Filtrelenmiş veriden üretilmiş SAM.	53

Şekil 4.20 Morfolojik Filtre Kriging Enterpolasyonu için eşyükselti eğrili (A-B) fark yüzeyi (metre).....	54
Şekil 4.21 Polinomal Filtre Ters Uzaklık Ağırlıklı Enterpolasyonu için (A) Referans veriden üretilmiş SAM, (B) Filtrelenmiş veriden üretilmiş SAM.	55
Şekil 4.22 Polinomal Filtre Ters Uzaklık Ağırlıklı Enterpolasyonu için eşyükselti eğrili (A-B) fark yüzeyi (metre).....	56
Şekil 4.23 Polinomal Filtre Doğal Komşuluk Enterpolasyonu için(A) Referans veriden üretilmiş SAM, (B) Filtrelenmiş veriden üretilmiş SAM.....	56
Şekil 4.24 Polinomal Filtre Doğal Komşuluk Enterpolasyonu için eşyükselti eğrili (A-B) fark yüzeyi (metre).....	57
Şekil 4.25 Polinomal Filtre Kriging Enterpolasyonu için (A) Referans veriden üretilmiş SAM, (B) Filtrelenmiş veriden üretilmiş SAM.	57
Şekil 4.26 Polinomal Filtre Kriging Enterpolasyonu için eşyükselti eğrili (A-B) fark yüzeyi (metre).....	58

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 4.1 F21 bölgesinde SYM _{Üçgen} için temel istatistiksel değerler (m).	38
Çizelge 4.2 F21 bölgesinde SYM _{Üçgen} için korelasyon matrisi.....	38
Çizelge 4.3 F21 bölgesinde SYM _{Morfolojik} için temel istatistiksel değerler (m).	39
Çizelge 4.4 F21 bölgesinde SYM _{Morfolojik} için kovaryans matrisi.....	39
Çizelge 4.5 F21 bölgesinde SYM _{Polinomal} için temel istatistiksel değerler (m).	40
Çizelge 4.6 F21 bölgesinde SYM _{Polinomal} için korelasyon matrisi.....	40
Çizelge 4.7 F21 bölgesinde SYM _{Eğim} için temel istatistiksel değerler (m).....	41
Çizelge 4.8 F21 bölgesinde SYM _{Eğim} için korelasyon matrisi.	42
Çizelge 4.9 F21 bölgesi için üretilen tüm SYM 'lere ait istatistiksel değerler (m).....	42
Çizelge 4.10 F21 bölgesi için üretilen tüm SYM 'lere ait korelasyon matrisi.....	43
Çizelge 4.11 G21 bölgesinde SYM _{Üçgen} için temel istatistiksel değerler (m).....	44
Çizelge 4.12 G21 bölgesinde SYM _{Üçgen} için korelasyon matrisi	45
Çizelge 4.13 G21 bölgesinde SYM _{Morfolojik} için temel istatistiksel değerler (m).	46
Çizelge 4.14 G21 bölgesinde SYM _{Morfolojik} için korelasyon matrisi.....	46
Çizelge 4.15 G21 bölgesinde SYM _{Polinomal} için temel istatistiksel değerler (m).	47
Çizelge 4.16 G21 bölgesinde SYM _{Polinomal} için korelasyon matrisi	47
Çizelge 4.17 G21 bölgesinde SYM _{Eğim} için temel istatistiksel değerler (m).....	48
Çizelge 4.18 G21 bölgesinde SYM _{Eğim} için korelasyon matrisi.....	48
Çizelge 4.19 G21 bölgesi için üretilen tüm SYM' lere ait istatistiksel değerler (m).	49

Çizelge 4.20 G21 bölgesi için üretilen tüm SYM 'lere ait korelasyon matrisi.	49
Çizelge 4.21 Morfolojik Filtreleme verilerine ait farklı enterpolasyonların fark yüzeylerine ait temel istatistik değerleri.	55
Çizelge 4.22 Polinomal Filtre Ters Uzaklık Ağırlıklı Enterpolasyonu fark yüzeyine ait temel istatistik değerleri (m).	59

1. GİRİŞ

Sayısal Yükseklik Modeli (SYM) birçok mühendislik projesi için altlık olarak kullanılan topografik bir üründür. Altlık olarak kullanıldığı için SYM doğruluğu genel proje çıktılarının doğruluğunu da etkilemektedir. SYM üretiminde farklı veri toplama yöntemleri ile elde edilmiş veriler kullanılabilir. Son yıllarda yaygın olarak Light Detection and Ranging (LiDAR) sistemleri ile toplanmış verilerden SYM üretilmektedir. LiDAR sistemleriyle elde edilmiş verilerin sınıflandırılarak yeryüzü-obje ayrımının yapılması en temel adımdır. Bu tez kapsamında literatürde geçen filtreleme algoritmalarının araştırılması ve dört farklı filtreleme algoritması kullanarak filtreleme doğruluklarının incelenmesi amaçlanmaktadır. Ayrıca farklı algoritmalarla filtrelenmiş bu verilerden üretilen SYM sonuçlarının referans verilerle karşılaştırılması ve en uygun sonucu veren filtreleme algoritmasının sonuçlarının farklı enterpolasyonlar kullanılarak Sayısal Arazi Modeli (SAM) üretiminde kullanılması ve enterpolasyon yöntemlerinin doğruluklarının irdelenmesi de amaçlanmıştır.

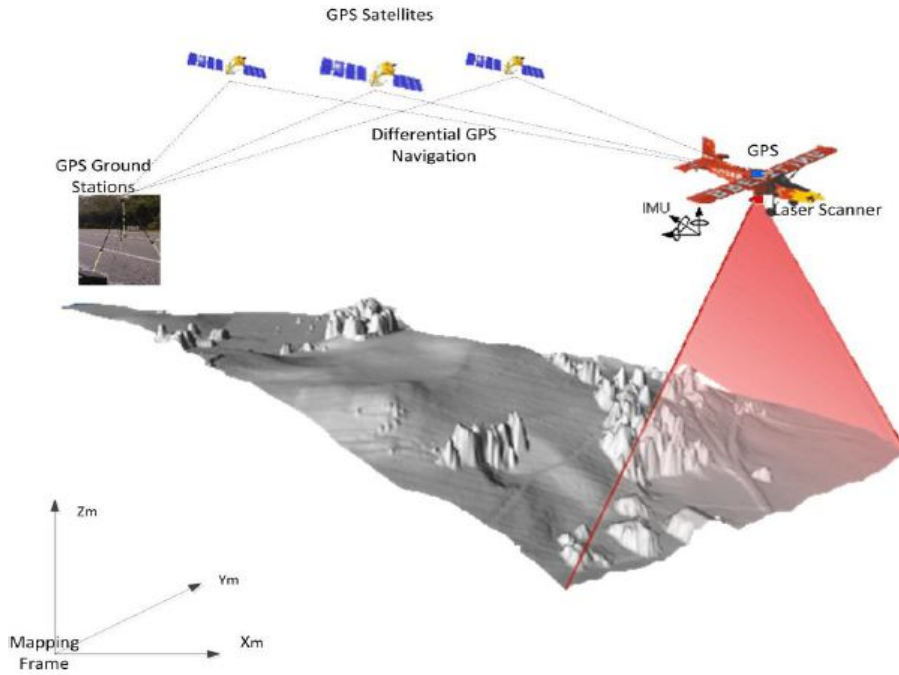
SYM üretimi önceleri klasik yersel ölçmelere dayanmaktaydı. Daha sonra analitik fotogrametri ile beraber bir kaç manuel işlem ve enterpolasyonlar sonucu üretilmeye başlandı. Son yıllarda ise yüksek çözünürlüklü uzaktan algılama verileri, Interferometrik Syntetic Aparture Radar (InSAR) ve LiDAR verileri SYM üretimi için kullanılmaya başlanmıştır (Briese 2010).

Otomatik SYM üretim algoritmaları zaman içinde gelişerek manuel enterpolasyonların yerini almış ve post-proses işlemlerini oluşturmuştur. Briese (2010) 'e göre verinin elde edilmesinden sonra gelen post-proses adımı iki kısımdan oluşmaktadır: sınıflandırma ve enterpolasyon. Sınıflandırma kısmında çıplak yeryüzüne (bare earth) ait (yükseklik, yoğunluk, çoklu-dönüşler vs) bilgilerin çıkarımı yapılarak verilerin yer yüzeyine ait olup olmadığı (terrain- nonterrain) belirlenir. Bu işlem 'filtreleme' olarak da adlandırılmaktadır. İkinci kısımda ise filtrelenerek elde edilen yüzey noktaları kullanılarak bazı enterpolasyon yöntemleri ile SYM üretilir.

LiDAR günümüzde farklı amaçlar için çok sık kullanılan bir teknolojidir (Şekil 1). Laser Ranging, Laser Altrimetry, Laser Scanning ve Laser Detection and Ranging olarak da bilinmektedir (Jiang *et al.* 2005). LiDAR teknolojisi 1960'ların sonlarında

geliştirildi (Mantis 2010). İlk ticari LiDAR haritalama sistemi 1993'te geliştirilerek topografik harita üretiminde kullanıldı (Liadsky 2007). Laser Scanning kullanılarak SYM üretimi metodu üzerine tartışmalar ilk kez 1994 yılında Almanyada Ölçme ve Haritalama Birimi (Surveying and Mapping Agency-SMA) tarafından başlatıldı (Petzold et al. 1999). Bu konuda tartışmalar sürerken 1996 yılından sonra birçok şirket tarafından çeşitli amaçlarda kullanılmak üzere üretilerek haritalar için LiDAR sistemleri oluşturulmaya başlandı (Jiang *et al.* 2005). Son yıllarda LiDAR teknolojisinin hızla gelişmesini sağlayan birçok yatırım ve araştırma da yapılmıştır.

LiDAR sistemleri kuruldukları platformlar baz alınarak üç grupta toplanır: Hava LiDAR sistemleri – Airborne LiDAR Systems (ALS), Yersel LiDAR Sistemleri – Terrestrial LiDAR System (TLS) ve Mobil Sistemler – Mobil LiDAR Systems (MLS) (Şekil 1.1, Şekil 1.2).



Şekil 1.1 LiDAR sisteminin genel yapısı (Guan *et al.* 2011).



Şekil 1.2 Yersel ve Mobil LiDAR Sistemleri.

Bir hava LiDAR sistemi, Şekil 1.1’ de de görüldüğü üzere, bir lazer tarayıcı, küresel konumlama sistemi (GPS) ve atalet ölçüm sisteminden (IMU) oluşmaktadır. Lazer tarayıcı uçağın altına monte edilir. Tarayıcı lazer ışının yollar ve ışının gidiş-dönüş süresini kaydederek yer objeleri ve sensör arasındaki mesafeyi hesaplar (Meng et al. 2010). Ölçülen bu mesafe de baz alınarak GPS ile platformun o anki konumu kaydedilirken IMU ile uçağın durumu kaydedilerek ölçülen objenin konumu hesaplanır (Liu 2008).

Hava LiDAR teknolojisi veri yoğunluğu, doğruluk, hız ve maliyet avantajları sebebiyle birçok alanda kullanılmaktadır. Topografik haritalama, bitki-orman haritalama, yol, enerji nakil hatları, demir yolları güzergâhları, kıyı çizgisi tespiti, 3B şehir modelleme, afet değerlendirme ve daha birçok uygulamada LiDAR teknolojisi kolaylıkla ve hızlıca kullanılabilir (Liu 2008). Hava LiDAR sisteminin klasik fotogrametriye kıyasla SYM üretiminde birçok avantajı var. Bunlardan en önemlisi LiDAR sensörleri aktif sistemlerdir. Bu sebeple gün ışığından ve gölgeden etkilenmez ve gece ya da gündüz kolaylıkla kullanılabilirler. Fotogrametri ise şehir, orman, kıyı, buz ve çöl gibi bazı alanlarda obje analizi için yetersiz kalabilirken LiDAR sistemleri ile ölçme ve haritalama işleri rahatlıkla yapılabilir (Baltsavias 1999). Yükseklik değerleri LiDAR

verisine dâhil olduğu için bu veriler ile SYM ve SAM üretimine daha uygundur. Ormanlık alanlarda YM üretimi için de daha önce de bahsedildiği gibi LiDAR ışınlarının kısmen ağaçları geçerek zemine ulaşabilmesinden dolayı çok daha uygundur fakat ağaçlardan dolayı zemine ulaşan nokta sayısı azdır. Bu tarz seyrek veri aralığı dışında, yüksek çözünürlüklü LiDAR verileri ile 3B görsel gerçeklik elde edilerek ve Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) için daha hassas SYM üretilir (Liu 2008).

LiDAR nokta bulutundan SYM üretiminin ilk adımı, noktaların yüzey ve obje noktaları olarak filtrelenmesidir. Filtreleme işlemi özellik çıkarımı için çok önemlidir ve sınıflandırma işlemi için temel bir gereksinimdir (Briese 2010). Tespit edilen yer noktaları geliştirilmiş birçok algoritma ile enterpolasyon girdisi olarak kullanılabilir. Yanlış tanımlanmış noktalar enterpolasyondan kullanılırsa, sapmalara sebep olur ki bu durumda birçok hatanın oluşması da büyük olasılıklıdır (Guo et al. 2010). Filtreleme zor ve zaman alan bir işlemdir çünkü LiDAR veri setleri genellikle çok sayıda nokta içermektedir. Bu sebeple LiDAR nokta bulutundan SYM üretimi için etkili ve verimli bir filtreleme algoritması seçmek gerekmektedir.

Güncel filtreleme algoritmaları farklı sebeplere bağlı olarak birçok zorlukla karşılaşmaktadır. Örneğin; aykırı değerler (nokta kümesinin çok üstünde veya altında kalan sayıca az noktalar), karmaşık objeler, dik yamaçlar, bağlı objeler, arazi süreksizliği (köprüler, viyadükler), bitkiler vb. filtrelemede problem oluşturmaktadır (Sithole and Vosselman 2004, Meng et al. 2010). Bu problemlerden bazıları diğerlerinden daha önemlidir. Çünkü çözülemediği zaman sonuçların doğruluğunu etkileyebilmektedir. Örneğin düşük aykırı değerler bazı algoritmalarda referans yüzeyin hesabına katılarak tüm hesaplamaların en baştan hatalı olmasına sebep olmaktadır. Farklı büyüklükteki binaların filtrelenmesinde arama penceresi (search-window) seçimi sonucu tamamen etkileyebilir. Çünkü küçük bir pencere seçilir ise büyük bir bina üzerindeki noktayı yer noktası sayabilir fakat büyük bir pencere seçilirse bu durumda arazideki bazı küçük yükseklikler, üzerinden geçilerek arazi şeklinde sınıflanabilir. Yüksekliği yere çok yakın olan objelerin filtrelenmesi ise çok zordur çünkü yükseklik değerleri araziye çok yakındır. Son yıllarda SYM üretimi için gerekli olan filtrelemede kullanılacak algoritmalarının her türlü topografik özellikte kullanılabilir olması için yoğun çalışmalar devam etmektedir. Fakat yukarıda bahsedildiği gibi bazı topografik

özellikler filtreleme için problem olmakta ve hızlı, güçlü, güvenilir ve otomatik filtreleme algoritmalarının geliştirilmesine engel olmaktadır (Meng et al. 2010).

Filtrelenmiş verilerde çalışma alanının tamamını temsil eden yeterli sayıda nokta olmayabilir. Bu verilerden SAM üretmek için eksik olan ara değerlerin mutlaka doldurulması gerekmektedir. Kullanılan enterpolasyon yöntemleri var olan verilerden yola çıkarak eksik alanları tamamlamakta ve model için gerekli olan sürekli yüzeyi oluşturmaktadır. Doğal olarak kullanılan enterpolasyon yöntemleri SAM doğruluğu üzerinde doğrudan etki sahibidir.

Tez içerisinde kullanılacak bazı temel tanımlamaların karışıklıkları önlemek için önceden belirlenmesi gerekmektedir. Bu tanımlar:

- Peyzaj (Landscape): Arazide bulunan doğal ve yapay objelerin tamamının oluşturduğu topografyadır.
 - Çıplak yeryüzü: Doğal ve yapay objeler çıkarıldıktan sonra geriye kalan arazi yüzeyidir.
 - Objeler: Topografyada bulunan ağaç ve bitkiler ile insan yapımı olan her şeydir.
 - Nokta bulutu: 3B kartezyen koordinat sisteminde toplanan konum verileridir.
 - Aykırı değer: Kuş, uçak gibi arazi ile hiç bağlantısı olmayan veya arazinin çok altında bir konum şeklinde kaydedilen nokta veya noktalar.
 - YM: Yüzey Modeli, topografyanın üzerindeki tüm objeler dâhil olacak şekilde ve yükseklik bilgisi de içeren sayısal bir gösterim modelidir.
 - SYM: Sayısal Yükseklik Modeli, bitki ve insan yapımı objeler çıkarıldıktan sonra geriye kalan çıplak yeryüzünün yükseklik değerlerini içeren sayısal görüntüdür (Maune 2007). USGS tanımına göre X ve Y yönlerinde düzenli dağılmış Z değerleri içeren çıplak yeryüzünün sayısal kartografik gösterimidir.
- SAM: Sayısal Arazi Modeli, 2B planimetrik harita konumlarının arazi yüksekliğini verdiği $z=f(x,y)$ sürekli bir fonksiyondur (Pfeifer and Mandlburger 2008).

Temel olarak bir SYM, 3B arazi yüzeyinin sayısal bir sunumudur. Bazı durumlarda SAM ile SYM karıştırılmaktadır. Aralarındaki temel fark SAM' ın

arazideki kırılma ve su toplama çizgileri gibi diğer bazı topografik özellikleri de içermesidir (Pfeifer 2008).

SYM, haritacılıktan inşaat mühendisliğine, hidrolojiden doğal kaynakların ve afetlerin yönetimine kadar birçok alanda temel altlık olarak kullanılan çok önemli bir topografik üründür. Klasik ölçmelerde, inovatif olarak orman yoğunluğu ve derinliği ölçmelerinde, sel baskın haritalarında, ış ve heyelan alanlarında, rota haritalarında ve askeri savunma alanlarında yaygın olarak kullanılmaktadır (Pike 1988, Toutin 2008, Korupa et al. 2010). SYM ürünleri birçok bilim ve mühendislik alanlarında geniş bir uygulama sahası bulmuştur ve günümüzde Coğrafi Bilgi Sistemlerinde (CBS) çok yoğun bir şekilde sisteme katılan bir norm - standart olarak görölmektedir (Li et al. 2005).

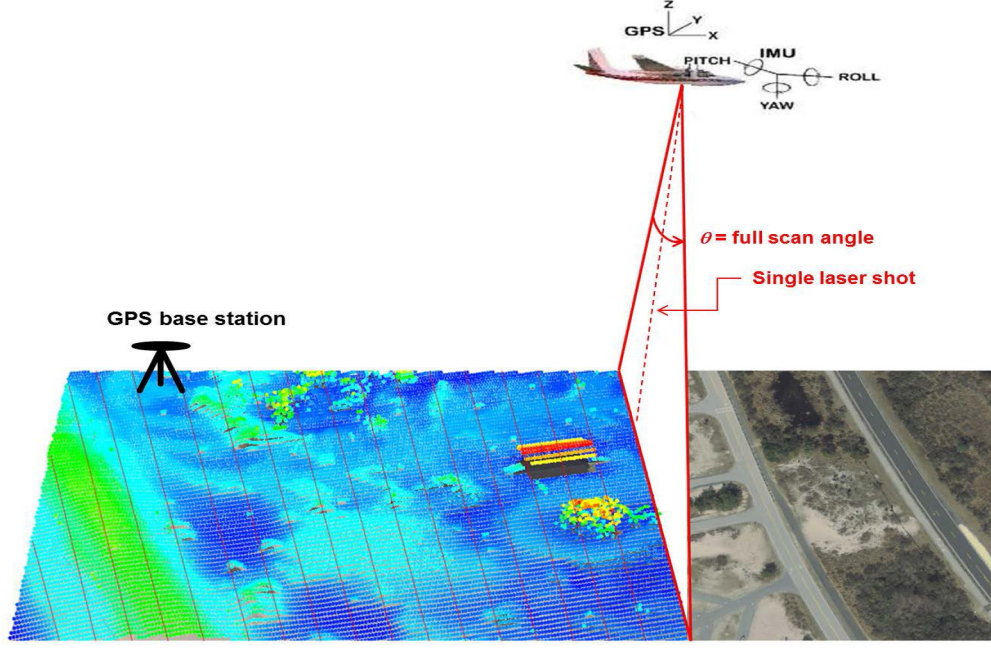
2. HAVA LiDAR SİSTEMİ

Yüksekliğe ilişkin bilgiler birçok uygulama için hayati önem taşımaktadır. Yükseklik bilgisini içeren modeller jeolojiden hidrolojiye, haritacılıktan şehirciliğe, risk yönetiminden askeri uygulamalara kadar birçok alanda kullanılmaktadır. Bu modellerin oluşturulması için gerekli olan verilerin toplanmasında çok sık kullanılmaya başlanan yöntemlerinden biri de LiDAR sistemidir. Bu sistem SYM üretiminde kullanılan verilerin toplanması için yüksek hassasiyet ve hız sağlar. Radar benzeri bir mantıkla çalışmaktadır fakat radar sistemlerinden farklı olarak radyo dalgaları yerine lazer ışınları kullanılmaktadır.

Özellik çıkarımı ve enterpolasyon SYM üretimi için hayati öneme sahiptir. İşlenmemiş LiDAR veri setindeki yer ve obje noktalarını ayıran filtrelerin oluşturulması, son yıllarda birçok araştırmacının üzerinde durduğu bir konudur. Birçok farklı filtreleme algoritması geliştirilmiş ve çok başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Fakat bu algoritmalar karmaşık bir arazi yüzeyi için kullanıldığında hala problemlerle karşılaşmaktadır. Bu bölümde LiDAR verinin özellikleri, geliştirilmiş filtreler ve filtrelerin karakteristik özelliklerinden bahsedilecektir.

LiDAR aktif uzaktan algılama teknolojisi olup topografyanın, bitki yüksekliklerinin ve geniş alanlara yayılmış binaların doğru bir şekilde ölçümünde kullanılmaktadır. Haritalama ve fotogrametri anlamda yükseklik bilgisi elde etmede çok önemli bir alternatif durumuna gelmiştir.

İlk optik lazer 1960'da Hughes Aircraft, Inc. Şirketi tarafından üretilmiştir. Temelde lazer ışınının objeye çarpıp dönmesi sırasındaki hareket süresinin kullanılması vardır. Bu bilgi ile obje ile lazer kaynağı arasındaki mesafe hesaplanır. Üç boyutlu obje koordinatı ise objeye gidiş-dönüş arasındaki zaman farkı, lazer ışınının kaynaktan çıktığı sıradaki açı ve yer yüzeyindeki bir sensörün mutlak konumu ile hesaplanır. LiDAR sistemleri aktif sistemler olmalarından dolayı gün ışığına bağımlı olmadan, ihtiyaç halinde gece de kullanılabilirler (NOAA 2012).



Şekil 2.1 LiDAR sistem bileşenleri: Laser, GPS ve IMU (NOAA 2012).

Hava LiDAR sisteminde kinematik GPS ve IMU olması, bu sistemin çabuk gelişmesini sağladı. Günümüzde LiDAR ile elde edilen ölçümlerin yatay ve dikey doğruluğu fotogrametrik yöntemleri yakalamış durumdadır. LiDAR tekniğinin klasik yöntemlerden daha üstün olduğunu gösteren birçok sebep vardır. Bu sebeplerden bir kısmı:

- Yoğun LiDAR nokta bulutu sayesinde yüksek çözünürlükte SYM üretilebilmekte,
- LiDAR noktaları ile yüzey özellikleri yükseklik dikkate alınarak çıkarılabilmekte (Baltsavias 1999, Silván-Cárdenas ve Wang 2006) ve bina, ağaç ve hatta enerji nakil hatları bile haritalanabilmekte (Baltsavias 1999, Habib et al. 2005),
- Küçük yükseklik değişiminin olduğu hafif eğimli alanlar daha hassas haritalanabilmekte (Baltsavias 1999, Lin ve Mills 2010),
- Lazer ışınının bitkilerden kısmen geçerek çoklu dönüşler elde edilmesiyle bitki topluluğuna ait yükseklik ve hacim işlemleri yapılabilmekte (Meng et al 2009, Raber 2002),
- Ağaçlık bölgelerde farklı mevsimlerde elde edilmiş çoklu dönüşler kullanılarak bitki sınıflandırılması yapılabilmekte (Hodgson 2005),

- Çoklu dönüşler sayesinde klasik yöntemlerle çok zor olan sık ağaçlık bölgelere ait SYM veya YM üretimi yapılabilmektedir (Baltasvias 1999).

Yüksek yoğunluklu nokta bulutu sayesinde, LiDAR verisi sadece SYM üretimi için değil aynı zamanda birçok farklı uygulama için de çok değerli bir veri kaynağıdır. LiDAR verileri hidrolojik modelleme, kıyı izleme, orman sınıflandırma (Popescu ve Zhao 2008, Zhao et al. 2009), 3B şehir modelleme (Kraus ve Otepka 2005, Alharthy ve Bethel 2002), arazi kullanımı sınıflandırmaları ve obje tespitinde (Ma ve Meyer 2005, Sohn ve Dowman 2007) kullanılabilmekte ve bu alanlar için önemi ve kullanım sıklığı gittikçe artmaktadır.

2.1 Temel Prensipler

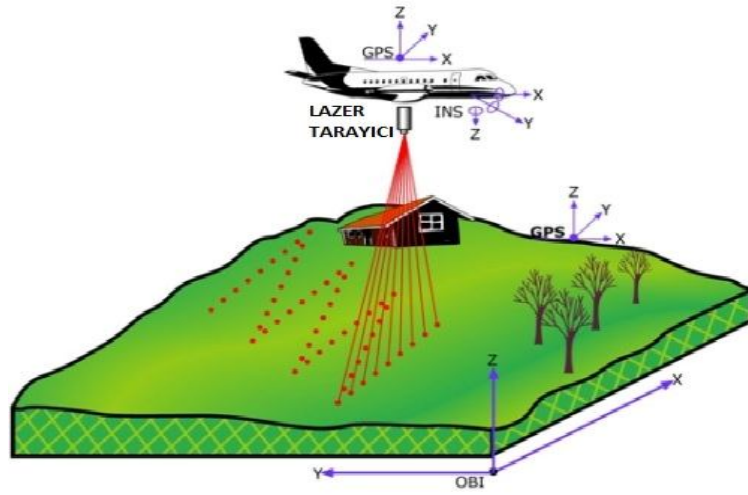
LiDAR'ın temel mantığı lazer ışının konumu bilinen sensörden objeye gidiş-dönüş süresinin belirlenmesine dayanmaktadır. Bir LiDAR ışınının uçuş süresi, t :

$$t=2R/C \quad (2.1)$$

Burada R LiDAR sensörü ile obje arasındaki mesafedir. R değeri şu şekilde hesaplanır:

$$R=(1/2)tC \quad (2.2)$$

Belirlenen bu süre ve lazerin açısı kullanılarak objenin üç boyutlu konumu hesaplanır. Mesafe ölçme işlemleri sonucunda nokta bulutu olarak adlandırılan ve uçuş hattı boyunca zamana göre dağılmış yükseklik bilgisi içeren nokta verileri elde edilir. Şekil 2.2 de de görüldüğü gibi uçuş doğrultusundaki yapay ve doğal objeler taranarak ilerlenir.



Şekil 2.2 Uçuş doğrultusunda kalıp taranan objeler (İnt.Kyn.2).

Lazerin yerdeki ayak izi yaklaşık olarak bir çemberdir ve bunun yarıçapı lazerin tarama açısına, uçuş yüksekliğine, uçağın hızına ve topografyaya bağlıdır (Şekil 2.3). Örneğin 1000 m yüksekten çıkan 0.1 mRad'lık lazer ışının yerdeki karşılığı yaklaşık olarak 10 cm'ye karşılık gelmektedir.



Şekil 2.3 Hava LiDAR sisteminde lazerin iz düşümü (İnt.Kyn.3).

Tarama yönünde nokta aralığı ışın tekrar frekansına bağlıdır. Tüm tarama alanındaki nokta sıklığını etkileyen diğer bir parametre ise uçağın hızıdır. Tipik nokta yoğunluğu

uçak yüksekliği 1000 m iken 20 m² için 1 nokta ile 1 m²'ye 20 nokta arasında değişmektedir. Bu tarz daha yoğun veri temini için tarama bölgesinde üst üste uçuşlar yapılır. Kaydedilen ışın sayısı gönderilen ışıandan daima daha azdır çünkü her ışın yutulma, engelle karşılaşma ya da farklı yansıma açılarından dolayı tekrar sensöre ulaşamaz.

Nadir dışı tarama açısı veri toplama amacına göre değişir. Bitki yoğunluğunun fazla olduğu alanlarda nadir dışı tarama açısının büyük olmasıyla yüzeye ait daha düzgün bir veri seti elde edileceği düşünülmektedir. Yer yüzeyini doğru bir şekilde elde etmek çok önemlidir çünkü bu veriler ile ulaşım ağları gibi mühendislik işlerinin projelendirilmesi sırasında kullanılan SYM üretilebilmektedir.

2.1.1 LiDAR Konumu

Veri toplama esnasında LiDAR lazerinin konumunun bilinmesi çok önemlidir. Bu işlem Diferansiyel Konum Belirleme Sistemi (Differential Global Positioning System - DGPS) teknolojisi ile sağlanır. DGPS iki farklı GPS alıcısının aynı anda konum kaydına dayanır. Veri toplama sırasında Yersel olan GPS alıcısı X, Y ve Z konum bilgilerini doğru olan yer istasyonunda uçaktaki GPS ise LiDAR anteninin konum bilgilerini kaydeder. Daha sonra işlemler sırasında konumu bilinen yer istasyonu noktasına göre LiDAR anten noktasının konumu < 5-10 cm arasında bir doğruluk ile hesaplanır ve sonuç olarak enlem boylam ve WGS 84 koordinat sistemine göre elipsoidal yükseklik elde edilir.

Bu işlemler için LiDAR anten yöneltme bilgilerinin (roll, pitch, heading) tüm veri toplama süresince elde olması lazım. Bu bilgiler her ışın gönderilip alındığında IMU ve üç akselerometre kullanılarak yöneltme için elde edilir. Tüm bu işlemler sonucunda uçağın enlem boylam elipsoidal yüksekliği ile yöneltme değerleri elde edilmiş olur ve zaman olarak GPS zamanı kullanılır.

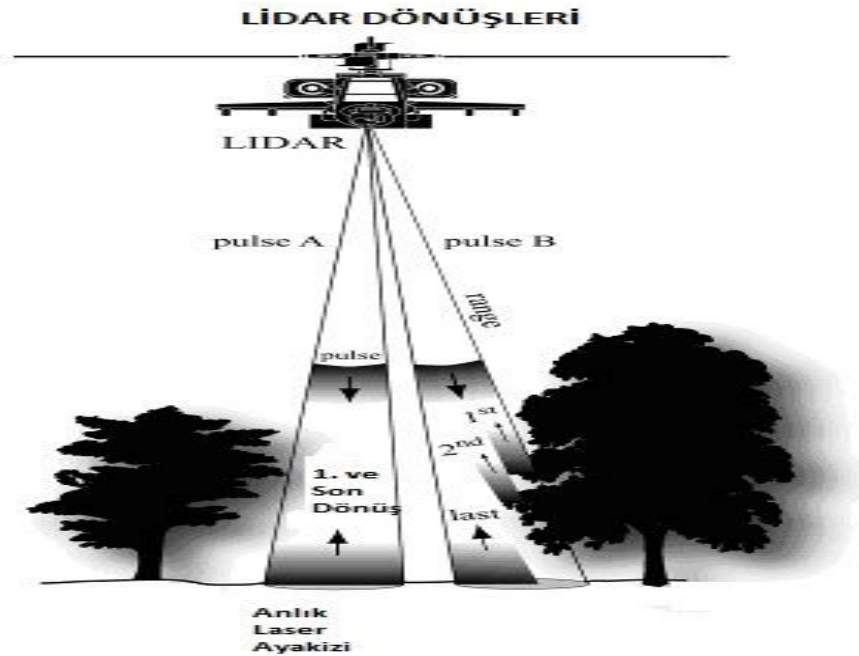
2.1.2 LiDAR Post-Proses

Peki, GPS, IMU ve gidiş-dönüş lazer ışını kaydedildikten sonra yeryüzüne ait X, Y ve Z değerlerine dönüştürülür. Bu işlem uçak uçuşu bittikten sonra post-proses ile

tamamlanır. Post-proses sonucunda LiDAR antenine ait X, Y ve Z değerleri, antene ait roll, pitch ve diğer yöneltme değerleri, LiDAR mesafe değerleri ile enlem, boylam ve yükseklik değerleri (her dönen lazer ışımına ait) elde edilir. Çıktı verileri WGS 84 koordinatları binary formatındadır ve ASCII formatına çevrilebilir.

2.2 LiDAR Dönüşleri (Returns) ve LiDAR Yoğunluğu (Intensity)

Daha önce de bahsedildiği gibi lazer ışını belli bir enerji ve belli bir açı ile direkt yeryüzüne doğru hareket ederek, sensörünün yüksekliğine ve gidiş açısına göre ışın düştüğü yeri neredeyse bir çember şeklinde aydınlatır ve bu aydınlatılmış alana lazer ayak izi denir. Tek bir lazer pulsu tek veya çoklu şekilde dönebilir (Şekil 2.4).



Şekil 2.4 Lazer ışını dönüşleri (İnt.Kyn.4).

Şekilde 2.4' de de görüldüğü gibi A pulsunda ki tüm enerji olduğu gibi yere ulaşır ve tek bir dönüş olarak tekrar sensöre ulaşır (İnt.Kyn.4). Fakat o bölgede anlık lazer ayak izinin içinde kalan taş, küçük bitki, ağaç veya dal gibi diğer maddeler var ise tek bir dönüş değil çoklu dönüşler olur. Bu dönüşler ile sensör arasındaki mesafe aynı olmamakla beraber çok benzerdir. B pulsunda ise lazer ışını bir ağaçtan ve yerden yansır. Önce ağacın örneğin 3 m yüksekliğindeki dalına çarpan lazerin bir kısmı sensöre ulaşır ve ilk dönüş (first return) olarak kaydedilir. Daha sonra 2 m de bulunan dala

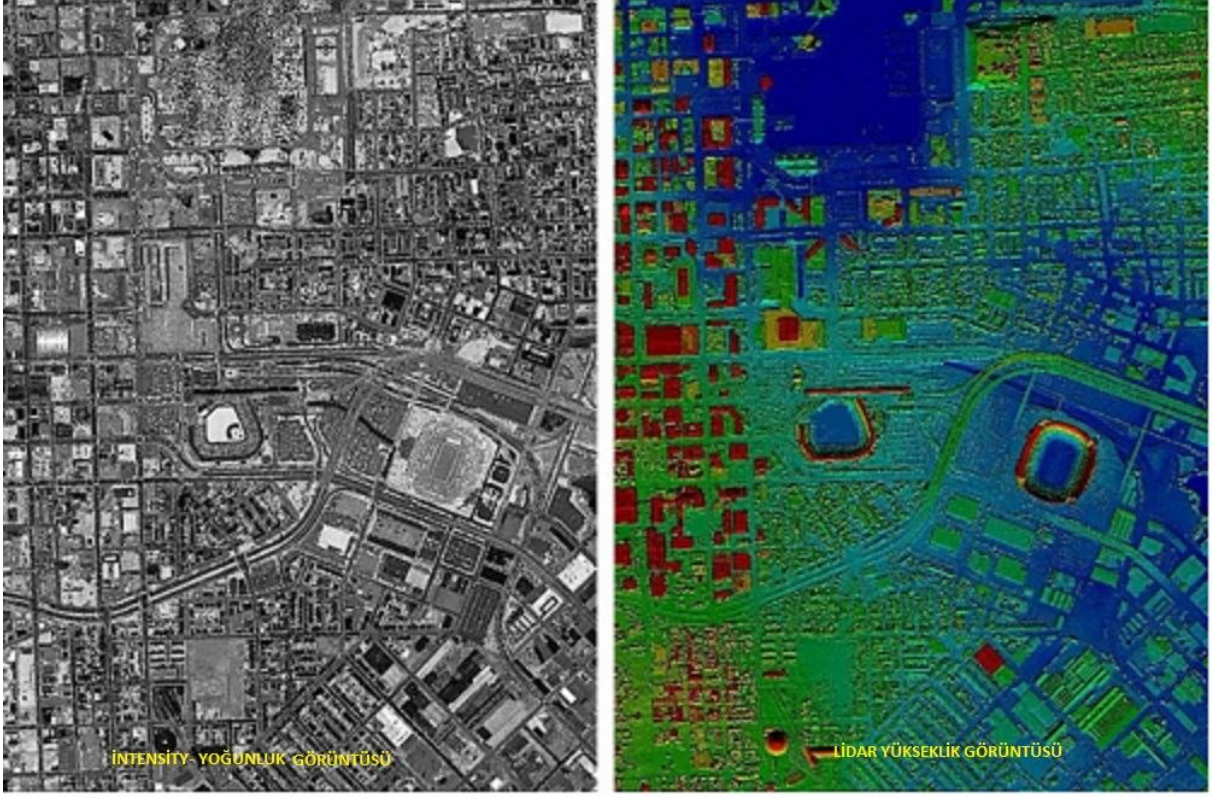
çarpıp döner ve ikinci dönüş (second return) olarak kaydedilir. Bu örnekte lazer ışınının neredeyse yarısı geriye kalır ve yere ulaşır. En son geri dönen bu kısma ise son dönüş (last return) adı verilir (İnt.Kyn.4). Bu durumda eğer çalışma alanındaki ağaçlarla ilgileniliyorsa birinci ve ikinci dönüşler işlenmez. Yeryüzü ile ilgili bilgi isteniyorsa son dönüşler hesaba katılarak diğer dönüşler filtrelenmelidir. Bu yüzden araziden elde edilen orijinal verilerin post-prosesi sonucunda farklı veri dosyaları elde edilir: ilk dönüş, olası ara dönüşler, son dönüş ve yoğunluk.

Her bir dönüş dosyasına ait nokta veriler farklı yoğunluklarda araziye dağılmış olur. Bu yoğunluk lazer açlarına, saniyedeki lazer ışını sayısına, hava aracının hızına ve lazerin denk geldiği cisimlere göre farklılık gösterir. Hiç lazer değmeyen alanlara boş alan denir.

Yoğunluk ise her nokta için gönderilen lazer ışını geri dönüş gücüdür. Kısmen lazer ışınının çarptığı nesnesinin yansıtma özelliğine de dayanır. Yansıtıcılık, dalga boyunun bir fonksiyonu olmasına rağmen yakın kızıl ötesinde daha yaygın olarak kullanılır. Dönüş gücü yansıtıcı yüzeyin bileşenlerine göre değişir.

Hava fotoğraflarının olmadığı yerde yedek olarak, LiDAR verilerinin tanımlanması sınıflandırılması ve bilgi çıkarımında kullanılır. Yoğunluk görecelidir ve ölçülebilir değildir bu yüzden aynı obje için bu değer uçuştan uçuşa ve yükseklikten yüksekliğe değişmektedir (İnt.Kyn.5).

Yoğunluk görüntüleri siyah beyaz pankromatik uydu görüntüleri gibi çok detaylıdır. Şekil 2.5 de olduğu gibi LiDAR yükseklik tabanlı renklendirilmiş görüntü ve yoğunluk görüntüsü beraber izlenince fark daha iyi anlaşılmaktadır.



Şekil 2.5 LiDAR yoğunluk görüntüsü ve yükseklik tabanlı renklendirilmiş LiDAR görüntüsü (İnt.Kyn.6).

Yoğunluk görüntüleri yakın kızıl ötesi görüntülerine çok benzemekle beraber aynı şekilde yorumlanmaz. Örneğin yakın kızıl ötesi bandında çok yoğun bir ormanlık alanın parlak renkli olması beklenirken bu alan LiDAR yoğunluk görüntüsünde siyah olabilir. Yoğunluk değerini etkileyen birçok faktör vardır. Örneğin lazer ışını bant aralığı, uçuş yüksekliği, hedefin mesafesi, lazerin açısı ve atmosferik dağılım vb.

LiDAR veri sağlayıcıları topladığı verileri müşterilere istenen formatta verir. Örneğin Şekil 2.6 da görüldüğü gibi, ASCII formatında, günün zamanı, X koordinatı, Y koordinatı, Z koordinatı ve yoğunluk (intensity) gibi değerleri içeren veri setleri şeklinde oluşturulabilir. Yine veri üreticileri tarafından farklı klasörler şeklinde de teslim edilebilir. Örneğin: 1. dönüş, son dönüş ya da yeryüzü (bare earth) gibi. Bu şekilde ASCII formatının kullanım ve analizi çok daha kolaydır.

X_Easting	Y_Northing	Z_Elevation	Intensity	ReturnNum
512548.36	5403119.37	314.29	10	1
512548.39	5403120.61	313.73	20	2
512548.36	5403122.39	308.73	48	1
512548.40	5403123.05	310.07	26	1
512548.40	5403123.92	308.46	0	2
512548.34	5403125.09	303.43	290	1
512548.35	5403125.41	303.47	319	1

Şekil 2.6 Text formatında açılmış X, Y, Z, Yoğunluk ve dönüş numarası olan LiDAR veri örneği.

2.3 Las Formatı ve Veri Karakteristiği

Lazer için üretilen LAS formatı bu alanda tektir ve Amerika Fotogrametri ve Uzaktan Algılama Topluluğu (American Society for Photogrammetry and Remote Sensing - ASPRS) LiDAR komitesi tarafından binary formatında geliştirilmiştir. LAS formatı, kullanıcılar, üretici, yazılım ve donanım arasında ortak kullanım imkânı veren bir format durumundadır (ASPRS 2005). İlk LAS versiyonu LAS 1.0 2003 yılında ortaya konarak bir standart belirlenmiş, güncel versiyon olan LAS 1.4, 14 Kasım 2011 de ASPRS tarafından kabul edilmiştir (İnt.Kyn.1). ASPRS tarafından LAS formatının özellikleri sürekli güncellenmektedir (ASPRS 2010, ASPRS 2013). Önceleri ASCII formatında saklanan veriler, LAS formatı ile beraber daha etkili ve verimli bir depolama formatına erişmiştir.

LiDAR nokta bulutu verisini filtrelemek için geliştirilmiş algoritmalara geçmeden önce veri yoğunluğu, doğruluk ve veri dağılımı gibi LiDAR verisin karakteristik özelliklerini bilmek gerekmektedir.

Veri yoğunluğu:

LiDAR verisinin yoğunluğu uçuş yüksekliğine, atmosferik yansımaya, lazer ışınının frekansına ve açısına bağlı olarak değişir (Axelsson 1999). Uygulamaya göre yoğunluk ihtiyacı değişir. Örneğin enerji nakil hatları ve 3B şehir modeli için yüksek yoğunluk gerekirken SYM üretimi için görece daha az yoğun veri yeterli olabilmektedir. Günümüzdeki LiDAR sistemleri çok yoğun veri üretebilme kabiliyetindedirler (m^2 de 1 nokta). Bu şekilde arazi çok detaylı bir şekilde temsil edilebilir.

Veri doğruluğu:

Uçuş yüksekliği 1000 m'den daha az ise düşey doğruluk 15-20 cm ve yatay doğruluk

30-100 cm arasında değer alabilmektedir (Baltsavias 1999). Düşey doğruluk sistem içindeki hatalar, uçuş yüksekliği, lazer ışını açısı, yüzeyin eğimi ve pürüzlülüğüne göre değişir. Yüksek irtifa düşük düşey doğruluk demektir. Yatay doğruluk da benzer şekilde

Veri dağılımı:

LiDAR verisi çok düzenli değildir. Yani arazi üzerine eşit ve homojen dağılmaz. Bu yüzden birden çok uçuş-şerit birleştirilerek daha düzenli, tüm alana dağılmış ve boş kısımları minimum olan bir veri seti elde edilmeye çalışılır. Fakat hava LiDAR taramasının doğal bir sonucu olarak eşit olmayan veri dağılımını şekil 2.7 de görüldüğü gibi üst üste çakışan alanlarda daha yoğun olabilmektedir.



şekil 2.7 Eşit dağılmamış LiDAR nokta bulutu (Liu 2008).

Sonuçta üst üste binmiş alanlarda noktalar arası mesafe daha az ve nokta yoğunluğu yüksek olmaktadır. Veri toplama şartları da planimetrik olarak verilerin eşit olmayan bir dağılıma sahip olmasına sebep olur. Örneğin görece ova gibi daha düz alanlarda yüksek uçuş hızı veya düşük lazer frekansı ile iyi sonuç elde edilebilirken dağlık alanlarda veya sık şehir alanlarında iyi sonuç elde etmek için düşük uçuş hızı ve yüksek lazer frekansı kullanmak gerekmektedir.

Bozukluklar:

LiDAR sistemlerindeki temel mesele lazerin kullanım sınırlarıyla ilgilidir ve bu sınırdan

kaynaklanan hataların giderilmesi için en iyi yol bu hataların modellenerek sisteme eklenmesidir (Baltsavias 1999). Bunun dışında veri setinde boş kalan alanlar ve aykırı veriler (nokta kümesinin çok üstünde veya altında kalan sayıca az noktalar) vardır. Yüksek aykırı veriler uçak ya da kuş gibi arazi yüzeyinin çok üzerinde olan değerlerdir ve görece aşırı yükseklik farkı sebebiyle hemen belli olan bozukluklardır. Lazer ışınları yer yüzeyinden çoklu yansıma yaparak alçak aykırı verileri oluşturur ve bu veriler çevrelerini saran verilerden daha düşük yüksekliğe sahiptir. Bir anlamda yer yüzeyinin altından yansımış gibi veri setine dâhil olan bozukluktur. Boş alanlar ise ya tarama alanında kalmadıkları için ya da sensörün kısıtlı kabiliyetinden kaynaklanmaktadır.

Birçok hava LiDAR sistemi 3B verinin yanında hava fotoğrafları, intensity ve çoklu dönüşleri de veri setine dâhil etmektedir (Axelsson 1999). Yansıtım değeri yüzey geometrisi ve yüzey materyaline bağlı olduğu için bitki, su ve yer yüzeyinin intensity (yoğunluk) değerleri farklılık arz eder. Bu yüzden intensity değerleri nokta sınıflandırmasında çok işe yarar (Hu 2003). Bitki alanlarında lazer ışınının bir kısmı bitkileri aşarak yere ulaşabilir (kış mevsiminde yaprak döken ağaçlarda %60 yansırken iğne yapraklı ağaçlarda %25 yansır) (Pfeifer 2011). Böylece sensör bitki alanına ait çoklu dönüşleri kaydeder. Bu sayede yer ve ağaç noktaları sınıflandırılarak ağaç yoğunluğu tahmini yapılabilir (Pfeifer 2011). Bunun yanı sıra lazer ışını ayak izinin yer yüzeyindeki yarıçapı 1 m'den büyük olabilir ve şehir alanlarında bina kenarlarını da içeren çoklu dönüşler sensör tarafından kaydedilir. Böylece bina ve benzeri objelerin sınıflandırılması kolaylaşır. Bazı LiDAR sistemleri tarama ile eş zamanlı olarak çalışma alanının optik görüntülerini de kaydederek filtreleme ve sınıflandırma için ek referans veriler elde etmiş olur (Pfeifer 2011).

3. LiDAR VERİLERİNİ FİLTRELEME

İşlenmemiş LiDAR veri setindeki yer ve obje noktalarını ayıran filtrelerin oluşturulması, son yıllarda birçok araştırmacının üzerinde durduğu bir konudur. Bu amaçla birçok farklı filtreleme algoritması geliştirilmiştir. Farklı kabul ve yeryüzü-obje ilişkisi özelliklerini temel alarak ortaya konulmuş olan bu filtreler genelde iyi çalışmakla beraber hala karmaşık arazi yüzeyleri için kabul edilebilir sonuçlar elde edilememiştir.

3.1 LiDAR Filtreleme İşlemleri İçin Bilinmesi Gereken Yer Noktalarına Ait Bazı Özellikler

LiDAR ölçüleri genelde üç bileşenden oluşur: yer noktası, obje noktası ve aykırı değerler.

$$\hat{O}_{\text{sensör}} = H_{\text{yer}} + H_{\text{obje}} + \hat{O}_{\text{aykırıdağer}} \quad (3.1)$$

$\hat{O}_{\text{sensör}}$, LiDAR sensörünün kaydettiği değer, H_{yer} yerin yükseklik değeri ve H_{obje} yüzeye ait olmayan objelerin yükseklik değerlerinin ifade etmektedir. $\hat{O}_{\text{aykırıdağer}}$ ise istenmeyen ölçülerdir ki bunlar sensörün kendisinden kaynaklanabileceği gibi uçak ya da kuşlardan da kaynaklanabilir (Meng et al. 2010).

Bir LiDAR veri seti içindeki yer noktaları genellikle bölgesel en düşük yüksekliğe sahip olup çıplak yeryüzü denilen arazi yüzeyine aittir. Objeler ise arazide bulunan ama yüzeye ait olmayan ya da yüzeyden sayılmayan diyebileceğimiz ağaçlar, binalar, kuşlar ve köprüler gibi doğal ve yapay objelere aittirler. Nois ya da aykırı değerlerin de içinde olduğu bu nokta bulutundan yüzey noktalarını çıkarabilmek için yüzey noktalarının karakteristiğini anlayabilmek gerekir (Meng et al. 2010). Yer noktalarının karakteristik özellikleri dört sınıfta toplanabilir:

En düşük yükseklik: Yer yüzeyi genellikle lokal alanlar içindeki en düşük yüksekliğe sahip noktalardır. Birçok filtreleme metodu bu önemli özellikten yola çıkarak filtreleme için gerekli olan çıkış noktasını bu noktalardan başlatmışlardır (Meng et al. 2010).

Yüzey eğimi: Yüzey eğimi çıplak yeryüzündeki komşu iki nokta arasında daha düşük iken bir yer noktası ve bir obje noktası arasında daha yüksektir (Zhang ve Whitman

2005). Bu yüzden birçok filtreleme algoritması obje noktalarını ayırırken belli bir eğim eşik değeri kullanırlar ve bu eşik değeri aşan eğimdeki noktaları obje noktası şeklinde sınıflandırarak elerler (Elmqvist 2001). Örneğin nispeten daha düz alanlarda eğim eşik değeri 30° gibi nispeten daha düşüktür. Ama söz konusu filtrelenecek veri set dağlık bir alana ait ise o zaman yer ve obje ayrımı yapabilmek için daha yüksek bir eşik değerine ihtiyaç duyulur (Meng et al. 2010).

Yüzey noktaları yükseklik farkı: Birçok arazide bazı keskin arazi değişimleri olduğu düşünüldüğünde, arazideki yükseklik farkları da çok önemli bir karakteristik özelliktir. Bu açıdan bakıldığında yüzeye ait komşu iki nokta arasındaki yükseklik farkı bir yüzey noktası ve obje noktası arasındaki, yükseklik farkından daha düşüktür (Zhang ve Whitman 2005, Okagawa 2001). Bu şekilde belirlenen bir yükseklik farkı eşik değeri ile örneğin bina ya da ağaçlar kolaylıkla filtrelenebilmektedir (Meng et al. 2010).

Yüzey homojenliği: Çıplak yeryüzü görece daha yumuşak ve süreklidir. Bu durumu bozan en temel objeler ağaçlar ve binalardır (Zhang ve Whitman 2005). Yani ağaç ve binalar morfolojik olarak daha belirgin bir durumdadır ve morfolojik filtreleme ile elimine edilirler (Meng et al. 2010).

Bu özellikleri dikkate alan birçok filtreleme algoritması mevcuttur ve çok iyi sonuçlar vermektedirler. Fakat falez, sarp kayalık ve uçurumlar gibi her arazide bu özellikler olmayabilir ve böyle yerlerde filtreleme sonuçları istenen doğruluğu yakalayamamaktadır.

3.2 Filtreleme Algoritmaları

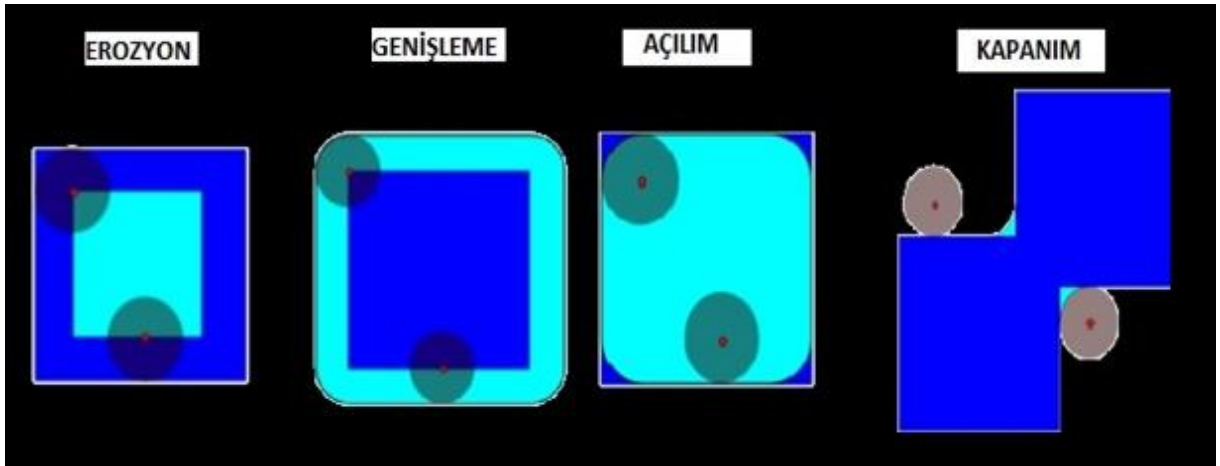
LiDAR verisi üç boyutlu uzaya dağılmış bir nokta bulutudur. Bu noktaların bir kısmı yer yüzeyini temsil ederken bir kısmı ağaçlar ve bitkiler ile binalar gibi diğer insan yapımı objeleri temsil eder. İşte bu veri setinde yer yüzeyine ait noktaların diğer (yeryüzü olmayan ağaç bina vb.) tüm noktalardan ayrılması işlemine filtreleme denir. Birçok farklı LiDAR işleme ve yorumlama algoritması mevcuttur fakat filtreleme işlemi çoğu zaman ilk yapılan işlemdir (Guan et al. 2011).

Filtreleme işlemi karmaşık bir yapıya sahiptir. Özellikle çalışma bölgesinde coğrafi ve morfolojik çeşitlilik fazla ise bu filtreleme işlemi daha da zorlaşmaktadır. Bu problemi

çözmek için birçok algoritma ve yaklaşım geliştirilmiştir ve hala bu konuda çalışmalar devam etmektedir. Şu an kullanımda olan algoritmalar probleme yaklaşım tarzlarına göre dört sınıfta toplanabilir: morfolojik filtre, kademeli yoğunluk filtresi, yüzey temelli filtre ve segmentli (bölümlendirilmiş) filtre (Briese 2010).

3.2.1 Morfolojik (Morphological) Filtre

Bu grup içindeki algoritmalar sayısal görüntü işleme tekniklerinden erozyon ve genişleme ya da bunların kombinasyonları olan açılım ve kapanım gibi morfolojik yapıdaki operatörleri kullanarak işlem yaparlar (Şekil 3.1). Örneğin genişleme operatörü orijinal veriyi uzatırken erozyon büzerek daha küçük hale getirir. Açılım operatörü sırası ile erozyon ve genişleme operatörlerinin kombinasyonu, kapanım ise yine sırasıyla genişleme ve erozyon operatörlerinin kombinasyonu ile oluşur (Gonzalez et al. 2004). Arama penceresi, Window veya kernel denen belirlenmiş yapı elemanlarını belirleyerek açılım operatörü ile SYM'e yaklaşım noktalar elde edilebilir (Briese 2010). Bu anlamda ilk kez 1993'te Linderberger zaman serileri temelli bir metot geliştirmiştir (Briese 2010, Petzold et al. 1999).



Şekil 3.1 Operatör işlemleri ve sonuçları (Chen 2012).

Linderberg'in metodunu temel alan TOPscan tarafından 1999 da geliştirilen tekniğe göre ilk önce geniş bir arama penceresi ile tüm gridler içindeki en düşük yükseklik değerine sahip noktalar alınarak kabaca bir yüzey oluşturulur. Daha sonra bu yüzey referans alınarak veriler filtrelenir. Belirlenen bir eşik (treshold) değerinin üzerinde kalan veriler obje (obje noktası) kabul edilir. Eşik değerinin altında kalarak yer noktası

olarak sınıflandırılan ve yükseklikleri bilinen bu noktalar ile daha doğru bir SYM üretilir. Bu SYM de tekrar referans veri gibi düşünülerek gittikçe küçülen arama penceresi ve yeni eşik değerleri ile veriler bir kez daha filtrelenir ve geriye kalan noktalardan tekrar yeni bir yüzey oluşturulur. Bu işlem, arama penceresi her defasında biraz daha küçültülerek birkaç kez gerçekleştirilir ve en ideal yüzeye ulaşılmaya çalışılır (Petzold et al. 1999). Pencere boyutu ve belirlenen eşik değeri sonucu doğrudan etkilemektedir. Eğer pencere çok büyük ise veya eşik değeri çok küçük ise bazı küçük yükseklikler yumuşatılarak (smoothing) filtrelenmez veya filtrelenerek tamamen kaldırılır. Eğer son eşik değeri çok yüksek olursa birçok ağaç, dal ve otlar gibi objelere ait noktalar yere aitmiş gibi yüzeye dâhil edilir. En uygun eşik değerlerini belirlemek için arazinin durumunu da bilmek gerekir.

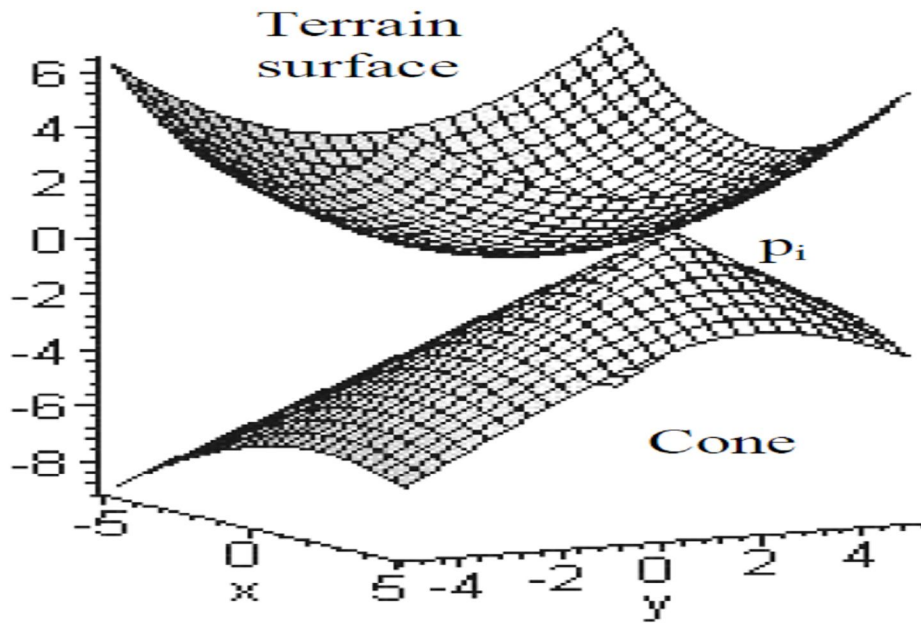
Arama penceresinin sınırlarını aşmak için Kilian 1996 da farklı pencere boyutlarını kullanarak açılım operatörünü denemiştir. Her seferinde lazer noktalarına bant genişliği ve arama penceresine göre bir ağırlık belirlemiştir (Kilian et al. 1996). Büyük bir pencere için büyük ağırlık tayin edilmiş ve tüm operatör işlemleri sonucunda yüksek ağırlık değerine sahip veriler yere ait (terrain) kabul edilirken düşük ağırlıklı noktalar yer dışı - obje (off-terrain) nokta kabul edildi. Yer ve obje nokta filtrelenmesi tamamlandıktan sonra SYM üretimine geçilmektedir.

İki kısımdan oluşan bir diğer morfolojik algoritma ise Masaharu and Ohtsubo tarafından 2002 yılında geliştirilmiştir. İlk kısım Kilian algoritmasına benzer şekilde arama pencerelerindeki en düşük nokta tespitiyle başlar. Ancak bu arama pencereleri görece çok daha küçük olmasından dolayı pencerelerin çoğu yer dışı yani objelerin üzerine denk gelir ve o alandaki en küçük değerli noktayı tespit eder. Bu durumun doğal sonucu olarak neredeyse tespit edilen düşük yükseklikli tüm noktalar aslında obje olan objelere ait noktalardır ve yüzeye ait olamazlar. Bu yüzden ikinci adımda bu noktalar elenir. Eleme işlemi için arama penceresinden daha büyük bir tampon (buffer) tespit edilir ve bunun içinde kalan noktaların ortalama değeri alınır. Sonra belirlenen bir eşik değere göre her bir noktanın hesaplanan ortalama değer ile arasındaki yükseklik farkı kıyaslanır. Eğer nokta yüksekliği ve ortalama değer arasındaki fark eşik değerinin üstünde ise bu durumda o nokta obje kabul edilerek veri setinden çıkarılır. Bu işlemler iki-üç kere tekrar edilerek SYM üretimine uygun istikrarlı bir yüzeye ulaşılır (Masaharu ve

Ohtsubo 2002).

Vosselman tarafından 2000 yılında geliştirilen erozyon operatörü temelli başka bir morfolojik filtrede ise bir noktanın yüzey veya obje olduğunu tanımlamak için diğer tüm noktalarla arındaki yükseklik farklarına bakılmaktadır. Şekil 3.2 de görüldüğü üzere eğer bu yükseklik farklarından biri belirlenen bir eşik değerin üzerinde ise o nokta obje kabul edilir (Vosselman 2000). Eşik değeri olarak tayin edilen iki nokta arasındaki maksimum yükseklik farkı Δh_{\max} (d) ise noktalar arasındaki mesafenin bir fonksiyonu olarak belirlenir. Kullanılan metottan dolayı bu filtre topografyadaki objeleri sürekli yüzeyde tutma eğilimindedir ve bunun sonucu olarak obje olan obje noktalarını yüzeye dâhil ederek yanlış sınıflandırmaya sebebiyet verir. Bu filtre Vosselman filtresi olarak bilindiği gibi eğim tabanlı (slope based) filtre olarak da bilinmektedir (Liu 2008). Temeldeki varsayıma göre bir arazide eğim belli bir eşik değerin üzerine çıkamaz (Sithole 2001). Bu yüzden bu filtre düz araziler için yeterli olurken diğer yüzeylerde yanlış sınıflandırma yapmaktadır.

Sithole (2001), bu filtreyi geliştirmek için eşik değeri belirleme işlemlerinde bir m katsayısı getirerek farklı arazi yüzeyleri için uygulamıştır. Sonuç olarak yüzey noktalarının obje olarak tanımlanıp yüzeyden atılması olarak ifade edilen 'Type I' hatasını düşürmüştür.



Şekil 3.2 Bir Pi noktasının yüzey noktası olarak tanımlanması (Sithole 2001).

Wack and Wimmer (2002) hiyerarşik olarak ağırlandırılmış bir metot kullanmıştır. Önce düşük çözünürlüklü bir SYM oluşturup belirlenen eşik değere göre yükseklik farklarını kullanarak bina ve bitkileri ayıklanmış daha sonra her noktayı, standart sapmasına göre yeniden ağırlıklandırıp bu ağırlığa göre yeniden düşük çözünürlükte bir SYM üretilmiştir. Bu işlemler birkaç kez tekrarlandıktan sonra elde kalan ve yüzey olarak sınıflandırılmış noktalar enterpolasyon ile SYM üretimine katılırlar.

Zhang (2003), aşamalı (git gide) büyüyen pencere ile yükseklik farklarına göre filtre yapan bir algoritma geliştirmiştir. Bu şekilde araçlar, bitki ve binalar filtrelenirken yüzey noktaları korunmaktadır. Bu algoritma yüzey üstü noktaların ayıklanmasında çok etkilidir fakat arazideki eğim sabit kabul eden bir ön varsayım ile çalışır. Algoritmanın diğer bir dezavantajı ise yüzeyden daha düşük noktaları yani alçak aykırı değerleri ayıramamasıdır ki var olan hatanın büyük kısmı bundan kaynaklanmaktadır. 2007 de Chen ve Peng bu algoritmanın sabit eğim kısıtlaması problemini çözmüşlerdir.

Silvan-Cardenas ve Wang, 2006 yılında çok ölçekli Hermite (MHT) transformasyonunu temel alan çok çözünürlüklü bir yaklaşım geliştirmişlerdir. Buna göre önce LiDAR nokta bulutundaki aykırı değerlerin elemine edilip daha sonra veri seti enterpolasyon ile çok ölçekli raster grid haline getirilir. Daha sonra erozyon operatörü kullanılarak MHT metodu ile belirlenmiş çok ölçekli eşik değerine göre obje olan değerler temizlenir. Bu algoritma kenar tespiti ve yüksek konum doğruluğunu korumada etkilidir.

Sonuçta, matematiksel morfoloji temelli tüm yaklaşımlarda yapı elemanı denen arama penceresinin boyutu sonuçlar üzerinde çok büyük bir etkiye sahiptir (Guan et al. 2011).

3.2.2 Kademeli Sıklaştırma (Prograsivve Densification) Temelli Filtre

Bu gruptaki filtreleme algoritmaları başlangıçta sınıflandırılmış küçük bir nokta seti ile başlar ve nitelikli noktalar eklenerek devam eder. SYM üretimi ise filtreleme esnasında oluşur ve diğer birçok morfolojik algoritmada ihtiyaç duyulduğu gibi ekstra bir enterpolasyona gerek kalmaz (Briese 2010).

Axelson 2000 yılında üçgen ağ (TIN) modeline dayalı bir algoritma önermiştir. İlk adımda büyük hücreli kare ağ model oluşturulur. Bu büyük hücre ek noktalar tanımlanarak alt sıklaştırma hücreleri ile doldurulur. Üçgen ağ başlangıçta diğer

noktalardan daha alttadır yani üçgen ağ model her kare ağ içinde kalan minimum yüksekliğe sahip noktalar kullanılarak tamamen belirlenen parametrelere göre oluşturulur (Axelson 2000). Bu algoritma süreksiz yüzeylerde görece iyi sonuç verebilmektedir ve özellikle çok yoğun şehir alanlarında uygulanabilir (Sithole and Vosselman 2003).

Krzystek 2003 yılında kabaca oluşturulan konveks bir üçgen ağ modelinin, sonlu elemanlar metodu ile grid doğruluğunun kademeli olarak arttırılmasını ve bu şekilde SYM üretimini önermiştir. Farklı orman yapılarında başarılı sonuçlar elde edilmiştir.

Sohn and Dowman (2002), bir üçgen ağ model içinde daha çok sayıda nokta tanımlayabilmek için Axelsson 'un metodunu bir adım daha öteye taşımışlardır. Algoritma 'azalan – downward' ve 'artan – upward' olmak üzere iki adımdan oluşmaktadır. Axelsson'un önerdiği ilk kaba üçgen ağ model oluştuktan sonra 'azalan' adımı uygulanarak, her hücrenin içinde kalan en küçük noktaları kullanarak en küçük seviyeli üçgen ağ model oluşturulur. Bu işlem nokta bulutunda eklenecek en küçük yüksekliğe sahip nokta kalmayncaya kadar devam eder. Daha sonra uygulanan 'artan' adımı ise belirlenen bir eşik değerine göre oluşturulan tampon bölge içindeki yüksek değerli noktalar eklenerek model sıklaştırılmış olur.

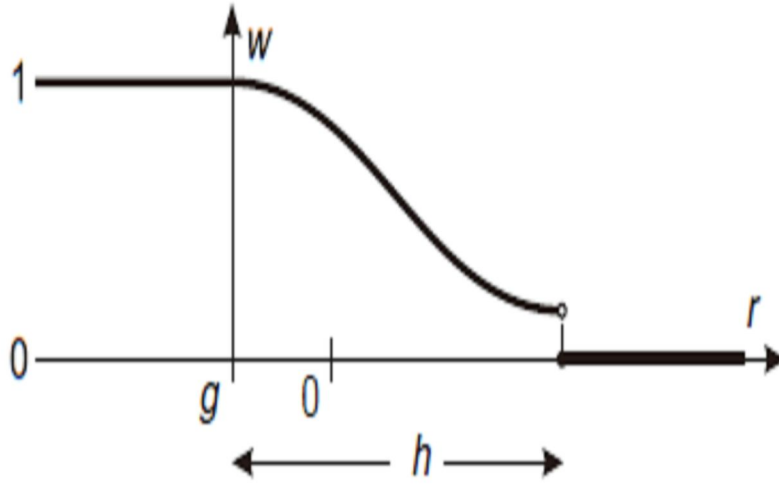
Benzer bir kademeli sıklaştırma metodu 2007 yılında Kobler tarafından önerilmiştir. İlk olarak belli bir eğim eşik değeri kullanılarak obje noktaların çoğu elimine edilir. Geriye kalan noktalardan bir başlangıç SYM üretilir. Daha sonra SYM üzerinde seçilen çekirdek noktalara göre üçgen ağ modeli oluşturulur. Üçgen ağ model ile geriye kalan noktalar arasındaki fark hesaplanır ve belirlenen bir yükseklik farkı eşik değeriyle karşılaştırılır. Eğer yükseklik farkı bu eşik değerinden küçük ise bu nokta yer noktası olarak kabul edilir (Kobler et al. 2007).

Üçgen ağ modele dayalı kademeli sıklaştırma algoritmaları düz ve sürekli bir yüzey varsayımına dayanarak işlem yapar bu yüzden topografik yüksekliklerde ve yüzey süreksizliğinde görece zayıf algoritmalar (Sithole and Vosselman 2003). Dahası üçgen ağ model nokta veri seti ve bunlara ait topolojik ilişkileri saklamaktadır ki bu tarz verilerin sürekliliği zor ve kullanımı zaman alıcıdır. Bu yüzden üçgen ağ model kullanımı hem sayısal ortamda depolama anlamında yer kaplamakta hem de işlem

yoğunluğu olarak daha fazla zamana gereksinim duymaktadır (Jiang et al. 2005).

3.2.3 Yüzey Temelli (Surfaced Based) Filtre

Kademeli sıklaştırma filtrelerinde olduğu gibi yüzey temelli filtreler de SYM ifade etmek için bir yüzey kullanır. Kademeli sıklaştırma filtrelerinde bir grup çekirdek nokta ile başlayıp kademeli olarak noktalar eklenir ve istenen yüzey oluşturulurdu. Yüzey temelli yaklaşımda ise yaklaşık bir yüzeyin altında ve üstünde kalan noktalar iteratif olarak ağırlıklandırılır istenen istikrarlı yüzeye ulaşılır ki her iki yaklaşımın da sonucu çok farklı olmaktadır (Briese 2010).



Şekil 3.3 Ağırlık fonksiyonu ve eşik değeri ile filtreleme (Chen 2012).

Bu tarz algoritma ilk olarak Kraus ve Pfeifer (1998) tarafından önerilmiştir. Kraus ve Pfeifer'in algoritmaları yüzey için enterpolasyon ve filtreleri birleştiren güçlü bir metottur. İlk olarak gerçek SYM ve SAM arasından geçen ve tüm noktaların eşit ağırlık ile katıldığı bir yüzey hesaplanır. Daha sonra oluşturulan bu yeni ortalama yüzey ile tüm noktalar arasında kalan mesafe baz alınarak tüm noktalar yeniden ağırlıklandırılır. Şekil 3.3 da görüldüğü gibi yer noktası olan g değerinin solunda kalan yani negatif residual değerine sahip noktalara daha büyük ağırlık verilir. Çünkü o noktaların yer noktası olma olasılığı daha yüksektir. Daha küçük residual değerine sahip noktalara ise daha küçük ağırlık değeri verilir. Yine aynı yaklaşım ile büyük residual değerine sahip noktalar elemine edilir çünkü çok yüksek olasılıkla yüzeye ait olmayan noktalardır. Gerekli ağırlıklandırma ve eliminasyon tamamlandıktan sonra bu enterpolasyon ile yeni yüzey

oluşturulur. Bu işlem iteratif olarak devam eder. Oluşturulan son iki yüzey arası fark istenen bir eşik değerine ulaşınca işlemler durdurulur ve en son oluşturulan yüzey SYM olarak alınır. Bu algoritma ağaçlık alanlar gibi yüzey ve obje noktaların karıştığı alanlarda iyi sonuç vermektedir (Guan et al. 2011). Algoritma yukarıda belirtilen alanlarda bulunan dik topografyayı rahatça belirleyebilmesine rağmen, geniş bina alanları ya da sık orman bölgeleri gibi obje yoğun nokta kümesi karşısında yeterli olmamakta ve Type II denilen ve obje noktaların yüzey olarak sınıflandırılması şeklinde tanımlanan hata türüne sebep olmaktadır (Briese 2010).

Zaman içinde bu algoritmayı daha iyi hale getirmek için çalışmalar yapılmıştır. Kraus and Rieger 1999'da ilk ve son dönen bilgilerini eklemiştir. Pfeifer (2001) yılında yüzey ve obje karışıklığını aşabilmek için Kraus and Pfeifer'in 1998 yılında önerdiği algoritmaya hiyerarşik piramit tabakaları uygulamıştır. Değiştirilen yeni algoritmada ilk olarak kaba bir üst tabaka yüzeyi oluşturulur ve bu yüzey iteratif olarak üstten alt tabakaya doğru indikçe çözünürlüğü artan yeni yüzeyler oluşturmak için kullanılır. En alt tabakaya ulaşıldığında en iyi çözünürlük de elde edilmiş olur. Bu şekilde ilerleyen algoritma ile geniş binalar ve hatta orman alanlarındaki obje objelerde filtrelenebilmektedir. Daha yüksek kaliteli SYM elde edebilmek için Kraus ve Pfeifer 2001 yılında arazideki doruk noktalarını yağmur akış analiz simülasyonu da kullanmışlardır. Daha sonra bu doruk noktaları elimine ederek daha yumuşak bir yer yüzeyi elde etmişlerdir.

Elmqvist (2002) sayısal görüntü işleme ile bir aktif yüzey modeli (ASM) tahmin etti. Bu model LiDAR veri setinin altında kalmaktaydı. Daha sonra bu yüzey kontrollü olarak yüzey kısıtlamaları ve enerji fonksiyonu (yüzey ile LiDAR noktası arasındaki bağ) dikkate alınarak iteratif olarak değişime uğrar. Enerji fonksiyonu minimize edilerek ASM ve SYM eşleşir. ASM'nin şekli yeryüzünün şeklini ciddi oranda etkilemektedir.

3.2.4 Bölümlenme-Segmentasyon Temelli (Segmentation Based) Filtresi

Diğer filtrelerden farklı olarak bölümlenme temelli filtre tek bir nokta üzerinde işlem yapmaktansa benzer özelliklere sahip komşu noktalara bir grup olarak işlem yapar. Örneğin bir segment içindeki noktalar komşu segmentten daha yüksek değerlere sahip ise o segmentin tamamı obje nokta olarak sınıflandırılır (Guan et al. 2011). Bu

algoritmalar temel olarak iki adımdan oluşur: noktaları segmentler de toplamak ve segmentleri sınıflandırmak. Her iki adım için ayrı ayrı algoritmalar seçilebilmektedir. Örneğin segmentasyon için büyüyen bölge – region growing tekniği ile bazı çekirdek noktalardan segmentler oluşturulabilirken benzer özelliklere sahip noktaları kümelenme tespiti – detecting cluster tekniği ile de belirlenebilir. Yükseklik, gradyent ve eğrilik gibi geometrik özellikler segmentasyon ve segmentasyon sınıflandırması adımlarının her ikisinde de incelenebilir (Briese 2010).

Sithole and Vosselman (2005) tarafından sunulan algoritmalar segmentasyon temelli yaklaşımların başında gelmektedir. Veriyi farklı yöneltmeler ile sürekli profiller şeklinde bölerek, bu profillerde kalan noktalardan bazı kesin kriterlere göre doğrusal segmentler oluşturmuşlardır. Daha sonra profillerden elde edilen doğrusal segmentleri kıyaslayarak tüm veri setine ait doğrusal segment elde edilmiştir.

Roggero 2002’de büyüyen bölge - region growing ve temel eleman analizi – major element analysis temelli segmentasyon filtresi önermiştir. Akel 2003’te ham LiDAR verilerini enterpolasyon ile raster grid elde etmiş ve sonra üçgen ağ model oluşturmuştur. Daha sonra bu üçgen ağ model içinde komşu üçgenlerin normal vektörlerinin eşik değerlerini temel alan büyüyen bölge - region growing tekniği kullanmıştır. Daha sonra segmentlere ait yükseklik farkları kullanılarak yollar elde edilmiştir. En sonunda yollarda elde edilen çekirdek değerler kullanılarak iteratif olarak SYM elde edilir (Akel and Zilberstein 2003, Akel and Zilberstein 2004, Akel and Kremeike 2005).

Tovari and Pfeifer 2005 yılında büyüyen bölge – region growing tekniğini baz alan yeni bir yaklaşım önermişlerdir. Bu yaklaşımda ratsgele çekirdek noktalar ve bunların komşuluğunda olan birkaç başka nokta da seçilir. Daha sonra üç parametre hesaplanır: noktaların oluşturduğu yüzeyin normal vektörü, yüzey ve noktalar arası mesafe ve çekirdek nokta ile komşu noktalar arası mesafe. Bu üç parametreye göre bölge sürekli büyüyerek yeni noktalar eklenir. Bu işlemler eklenecek yeni nokta kalmayınca kadar devam edilir. Segmentasyon bu şekilde tamamlandıktan sonra iteratif olarak ağırlıklandırılmış enterpolasyon ile SYM üretilir.

Forlani and Nardinocchi 2007’de tüm ham veriyi raster formata çevirip hücre değerleri

olarak da en düşük yükseklik değerlerini almıştır. Sonra raster yüzey büyüyen bölge – region growing tekniği ile segmentler ayrılmış, raster veri, segmentlerin topolojik ve geometrik özellikler dikkate alınarak aykırı değer, bitki, bina ve yer olarak sınıflandırılmıştır. Daha sonra yer olarak sınıflandırılan bu hücre değerleri kullanılarak yaklaşık yer yüzeyi üretilir ve orijinal nokta bulutu değerleri ile bu yüzey arasında kalan mesafeler hesaplanır. Belirlenen eşik değerinin altında kalan farklar gerçek yer noktası olarak sınıflandırılıp SYM üretimine katılır.

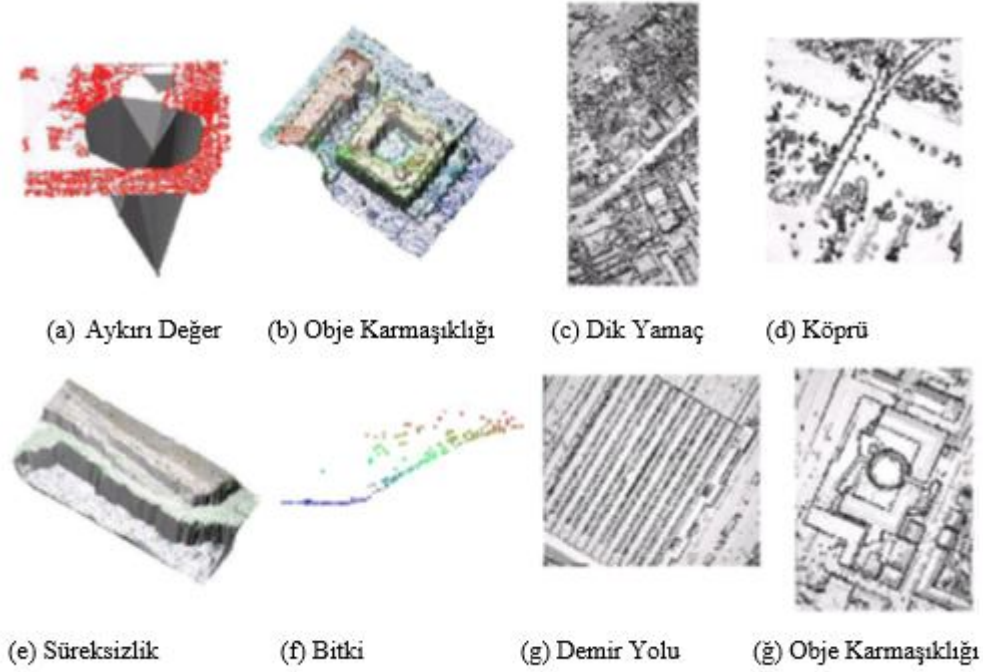
Birçok segmentasyon temelli filtre, görüntü işleme algoritmalarının daha rahat uygulandığı raster formatlı verilerle çalışır. Bu metotlar topografik bilgileri tanımlamak için genelde ‘yeryüzü süreklidir’ gibi geometrik hipotezleri kullanmazlar. Geometri, optik ve matematiksel istatistik kullanarak tek bir nokta yerine LiDAR nokta bulutundan çok sayıda nokta girdisini bir kerede tanımlarlar (Chen 2012). Bu yüzden aykırı değer gibi durumlardan çok ciddi oranda etkilenmezler. Tek bir noktanın yanlış sınıflandırılması problemini komşularıyla oluşturduğu segmentasyon sayesinde aşarlar (Chen 2012).

Yukarıda bahsedilen metotlar ile beraber daha birçok metot geliştirilmiştir (Breise 2010, Sithole and Vosselman 2004, Pfeifer and Mandlburger 2008, Meng et al. 2010, Liu 2008). Tüm bu algoritmaları yönsel tarama (directional scanning), eşyükselti eğrisi (counter based), üçgen model (TIN based) ve enterpolasyon (interpolation based) temelli filtreler gibi daha alt sınıflara ayırmak da mümkündür (Meng et al. 2009)

3.3 Filtreleme İşleminin Zorlukları

Hava LiDAR verilerinin filtrelenmesi genelde yükseklik, gradyent, nokta bulutundaki bölgesel benzerlikler veya arazideki kırıklar - breaklines baz alınarak yapılır (Chen 2012). Örneğin bölgesel olarak çok büyük yükseklik değerine sahip bir noktanın yer noktası olma olasılığı çok düşüktür ve bu durumun tam tersi de geçerlidir. Yani komşuları ile arasındaki yükseklik farkı büyük olan nokta yüzey noktası değildir. Ancak yüzey ve obje noktaların karmaşıklığı ve çeşitliliği filtreleme için büyük zorluk oluşturmaktadır. Dik eğimler, keskin yamaçlar, çok geniş veya düzensiz binalar, çim, bitkiler ve tarayıcının ayarları gibi durumlar filtreleme için ciddi zorluklar doğurabilmektedir.

Sithole and Vosselman (2004)'a göre filtreleme zorlukları genel olarak Şekil 3.4 de görüldüğü gibi aykırı değerler, obje karmaşıklığı, birleşik objeler, bitki, süreksizlik vb. olarak kategorilere ayrılabilir.



Şekil 3.4 Filtreleme zorluğu olan örnek veriler (Sithole and Vosselman 2004).

Aykırı Değer

Birçok algoritma başlangıçta en düşük değerleri yer noktası kabul eder (Sithole ve Vosselman 2004). Bu durumda birçok algoritma düşük aykırı değerlerden kolaylıkla etkilenmekte ve Şekil 3.4 (a)' da görüldüğü gibi yanlış yer sınıflandırmasına sebep olmaktadır.

Obje Karmaşıklığı

Obje karmaşıklığı çok geniş objeler, çok küçük objeler ve çok alçak objeler gibi birçok şekilde olabilmektedir. Eğer Şekil 3.4 (b) ve (ğ) de olduğu gibi bir biriyle bağlantılı ve geniş bina var ve bu binalar filtrede kullanılan arama penceresinden büyük ise otomatik olarak filtrelenmeleri mümkün değildir. Yine Şekil 3.4 (g) de ki gibi yere çok yakın olan araç veya alçak bitki gibi objelerin yer yüzeyinden ayrımları çok zordur. Bir biriyle bağlantısı merdivenle sağlanmış objelerde kolayca yer yüzeyi gibi algılanabilmektedir.

Birleşik Objeler

Eğimli alanlardaki binalar köprüler ve bir tarafı yer yüzeyinde olan rampalar arazi ile kısmen uyum içindedir. Bu yüzden Şekil 3.4 (d) de görüldüğü gibi bu tarz objelerin filtrelenerek yerden ayrımları çok zordur.

Bitkiler

Bitkiler genelde yükseklik farkından dolayı yerden kolayca ayırt edilebilir. Fakat Şekil 3.4 (f) de olduğu gibi bitkiler eğer eğimli bir alanda ise, boyu çok kısa ise veya binalara çok yakın ise elimine edilmeleri çok zorlaşır.

Süreksizlik

LiDAR nokta bulutundaki obje objeler araziye kıyasla çoğu zaman bir süreksizlik arz ederler ki bu durum filtreleme için çok önemlidir. Fakat Şekil 3.4 (c) ve (e) de ki dik yamaçlar gibi bazı durumlarda çıplak yeryüzü de süreksiz bir hal alır ve bu durum filtrelemeyi zorlaştırır.

Sonuç olarak LiDAR verilerinin yüzey ve obje olarak filtrelenmesi konusunda arazideki kırıklar-breakline, yoğunluk ve dalga boyu (Doneus and Briese 2006) gibi birçok ölçüt olmasında rağmen geliştirilen algoritmaların çoğunluğu LiDAR nokta bulutundaki konum bilgisine dayanmaktadır. Tüm bu filtreleme algoritmaları farklı konsept ve farklı yer noktası ve obje nokta anlayışına bağlıdır (Chen 2012). Bazı algoritmalar direkt olarak düzensiz dağılmış LiDAR nokta bulutuna uygulanabilirken bazı algoritmalar raster formata ihtiyaç duymaktadır. Bazı algoritmalar nokta bazlı çalışırken bazıları nokta grupları ile çalışmaktadır. Geliştirilen algoritmalar yükseklik farkı, gradyent ya da minimum mesafe gibi birbirinden farklı parametrelerle çalışmaktadır. Algoritmaların temelindeki hipotezler eğim, morfolojik yüzey ve segmentasyon gibi farklı yaklaşımlara bağlıdır. Bunların yanı sıra bazı algoritmalar tüm işlemleri tek adımda bitirirken bazıları iteratif olarak çalışır (Sithole ve Vosselman 2004).

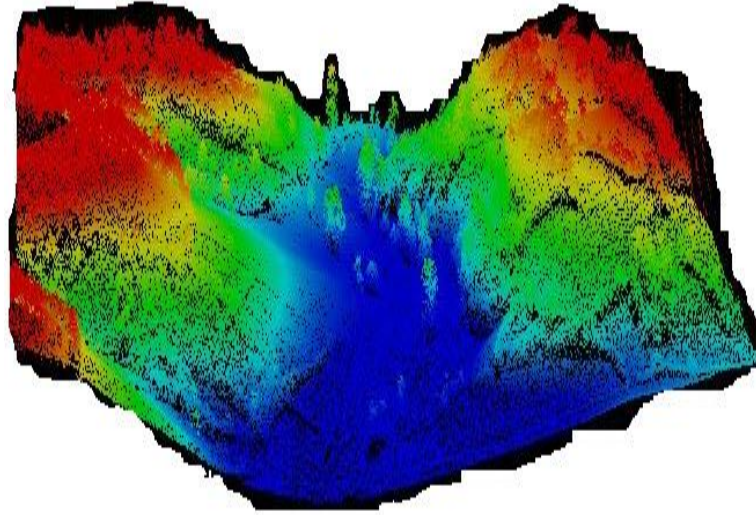
Sithole ve Vosselman (2004), Uluslararası Fotogrametri ve Uzaktan Algılama Topluluğuna (ISPRS) ait şehir ve orman alanlarını içeren veri setleri üzerinde uygulanan sekiz farklı algoritmanın sonuçlarını karşılaştırarak, bu filtrelerin karşılaştığı

temel problemleri belirlemişlerdir. Bu problemler karmaşık evre, farklı boyuttaki binalar, eğimli ve tepelik alanlar ve arazi sureksizliği şeklinde özetlenebilir. Bu algoritmaların hepsi de karmaşık olmayan veri setlerinde benzer ve gorece iyi sonuçlar vermektedir. Ancak buyk binalar veya dik eğimler gibi zor evre ve obje durumlarında bu filtrelerin gucu azalmakta ve sonuçlarının guvenilirliği azalmaktadır. Bu yüzden, algoritmalar iyi çalışmasına rağmen bazı durumlarda hala manuel olarak ön işlemler yapmak gerekmektedir.

4. UYGULAMA

Uygulama için İstanbul iline ait olan iki bölge seçilmiştir. Bu bölgelerin farklı topografik özelliklerde olmasına dikkat edilmiştir çünkü filtreleme algoritmaları farklı arazi özelliklerinde farklı duyarlılıkta çalışmakta ve bu durum sonuçları etkilemektedir. Veri setinde her iki bölgeye ait LAS formatında hava LiDAR nokta bulutu, ortofoto ve referans olarak kullanılmak üzere SYM bulunmaktadır. Referans olarak kullanılacak sayısal yükseklik modelleri TERRASOLID yazılımı ile 10 cm düşey doğruluk ve 50 cm yatay çözünürlükte otomatik olarak üretilmiş modellerdir. Tüm bu veriler İstanbul iline ait olup İstanbul Büyükşehir Belediyesi Harita Müdürlüğünden temin edilmiştir.

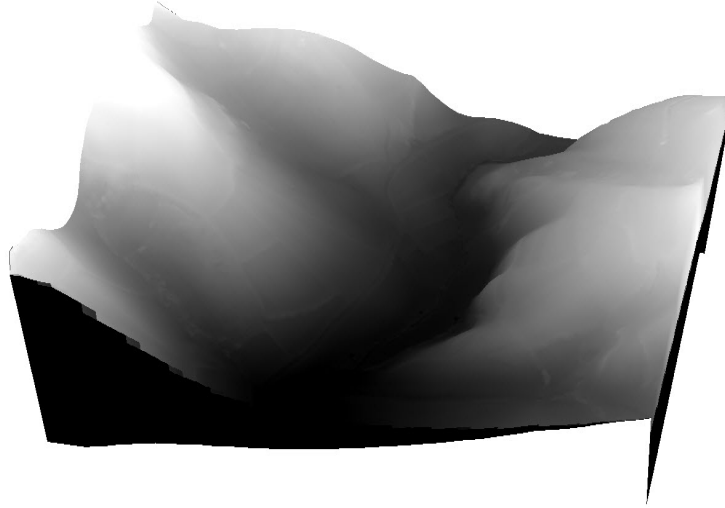
Birinci bölge kırsal bir alana aittir ve tez içerisinde F21 olarak adlandırılmaktadır. Filtrelemeye konu olan arazi özellikleri içinde eğim, ağaç, enerji nakil hattına ait teller ve yol sayılabilir. F21 için hava LiDAR görüntüsü, ortofoto ve SYM' nin 3B görüntüleri aşağıdadır (Şekil 4-1, 4-2, 4-3).



Şekil 4.1 F21 bölgesine ait LiDAR nokta bulutunun 3B görünümü.

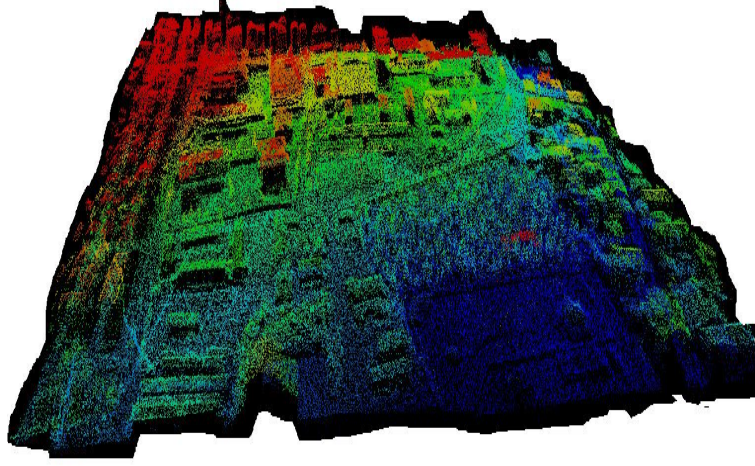


Şekil 4.2 F21 bölgesine ait ortofoto.



Şekil 4.3 F21 bölgesine ait sayısal yükseklik modelinin 3B görünümü.

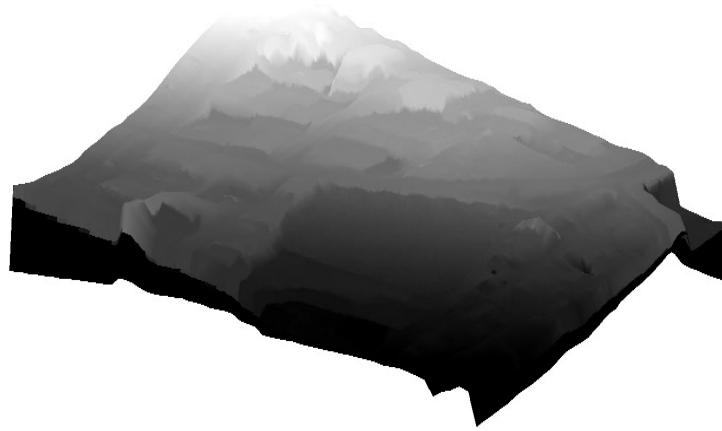
İkinci bölge ise şehre ait bir alandır ve tez içerisinde G21 olarak adlandırılmaktadır. Bu bölgede filtrelenecek ana objeler doğal olarak binalardır. Bunun dışında ağaç, mezarlık alanı ve şehre ait diğer objelerde bulunmaktadır. G21 için hava LiDAR görüntüsü, ortofoto ve SYM' nin 3B görüntüleri aşağıdadır.



Şekil 4.4 G21 bölgesine ait LiDAR nokta bulutunun 3B görünümü.



Şekil 4.5 G21 bölgesine ait ortofoto.



Şekil 4.6 G21 bölgesine ait sayısal yükseklik modelinin 3B görüntüsü.

4.1 Filtreleme İşlemleri

F21 ve G21 bölgelerine ait ham veriler için tüm filtreleme işlemleri Airborne LiDAR Data Processing and Analysis Tools (ALDPAT) programı kullanılarak yapılmıştır. Bu yazılım Florida Üniversitesi bünyesinde bulunan Uluslararası Kasırga Araştırma Merkezi (International Hurricane Research Center) içerisindeki Çevre Çalışmaları Bölümü (Department of Environmental Studies) tarafından geliştirilmiştir (Zhang and Cui 2007). Bu yazılımın filtreleme algoritmalarının kullanım prosedürleri kısaca şu şekildedir.

4.1.1 Üçgen Ağ Model Filtrelemesi

Axelson (2002) tarafından önerilen bu filtre, noktalar arası mesafeyi kullanıp üçgen ağ model oluşturarak yer-obje noktası seçimi yapar. Filtrenin çalışma adımlarına genel olarak bakılacak olursa:

- Tüm veri setini kapsayan kare grid oluşturulur. Her bir grid hücresindeki minimum yüksekliğe sahip noktalar yer noktaları için çekirdek nokta olarak kabul edilir. Bu çekirdek noktalar kullanılarak Delunay tekniği ile tüm veri setini kapsayan üçgen ağ model oluşturulur.
- Oluşan üçgen ağ temel alınarak diğer noktalar sınıflandırılır. Her bir üçgen yüzeyi ile diğer noktalar arasındaki mesafe ve açı dikkate alınarak önceden belirlenmiş eşik değeri ile kıyaslama yapılır. Eşik değerin altında kalan noktalar yüzey noktası kabul edilir.

4.1.2 Morfolojik Filtreleme

Matematiksel operatörler kullanarak görüntülerden özellik çıkarımı temeline dayanan bu filtre Zheng et al. (2002) tarafından LiDAR verilerine de uygulanmıştır. Kademeli artan arama penceresi ve belirlenen eşik değeri ile yer noktaları korunurken obje noktaları elemine edilir. Bu filtrenin çalışma adımlarına kısaca bakılacak olursa:

- Tüm veri setine grid uygulanır. Her hücrede veri olduğu düşünülür. Bu hücreler ortalama nokta yoğunluğundan küçük tutulur ki maksimum sayıda nokta

korunabilsin. Eğer bir hücrede nokta yoksa en yakın komşusundan bir değer atanır. Bu hücrelerdeki noktalar ile ilk yüzey oluşturulur.

- Erozyon ve genişleme operatörleri bu ilk yüzeye uygulanarak ikinci yüzey oluşturulur. Bir hücrenin son yüzey ve bir önceki yüzeydeki değeri arasındaki fark alınarak belirlenmiş eşik değeri ile kıyaslanarak yer-obje filtrelemesi yapılır. Eşik değeri, yaklaşık LiDAR ölçüm noktası hatası (0.2 - 0.3 m) ve arama penceresinin boyutu dikkate alınarak belirlenir.
- Belirlenen ikinci yüzey filtreye girdi veri olarak katılır ve aynı yaklaşımla üçüncü yüzey oluşturulur. Bu işlemler, arama penceresinin boyutunun önceden belirlenen maksimum boyuttaki objeden daha büyük duruma gelinceye kadar devam eder.

4.1.3 Polinomal Filtreleme

Polinomal filtreleme, LiDAR noktalarını filtrelerken iteratif bir yaklaşım sergiler. Oluşturulan ilk yüzey de eşik değerler dikkate alınarak en uygun yüzey oluşturulmaya çalışılır. Filtrenin çalışma adımlarına genel olarak bakılacak olursa:

- İlk olarak tüm veri setini kapsayan kare gridler oluşur. Hücre boyutları küçük (örneğin 2m) seçilir. Arama penceresinin boyutu ise veri setindeki en büyük obje boyutundan daha büyük (örneğin 40 m) seçilir. Bu pencere ile tüm veri seti taranarak her seferinde pencere içinde kalan minimum nokta alınır. Bu noktalar ile ilk yer yüzeyi oluşturulur.
- Arama penceresinin boyutu küçültülerek veri seti yeniden taranır ve aday noktalar seçilir. Oluşturulmuş ilk yüzey ile bu aday noktalar arasındaki yükseklik farkı, belirlenen eşik değerden küçük ise yer noktası olarak sınıflandırılır. Yer noktası olarak belirlenen aday noktalar ilk yüzeye eklenerek yeniden bir yüzey noktası oluşturulur.
- Arama penceresi tekrar küçültülerek veri seti tekrar taranıp önceki işlemler yinelenir. Bu işlemler arama penceresinin boyutu grid hücresi boyutundan daha küçük (örneğin 1 m) oluncaya kadar devam eder.

4.1.4 Eğim Temelli Filtreleme

Aynı bölgeye ait çıplak arazi ile arazi modeli arasındaki eğim doğal olarak birbirinden farklıdır. Çünkü o bölgede eğimi etkileyen en temel faktör olan yükseklik bina ve ağaç gibi doğal ve yapay objelerden dolayı ciddi anlamda değişmektedir. İşte bu durumdan faydalanmak isteyen Vosselman (2002), bu eğim farkını LiDAR verilerine uygulayarak yer-obje noktası ayırımını yapmıştır. Filtrenin çalışma adımlarına genel olarak bakılacak olursa:

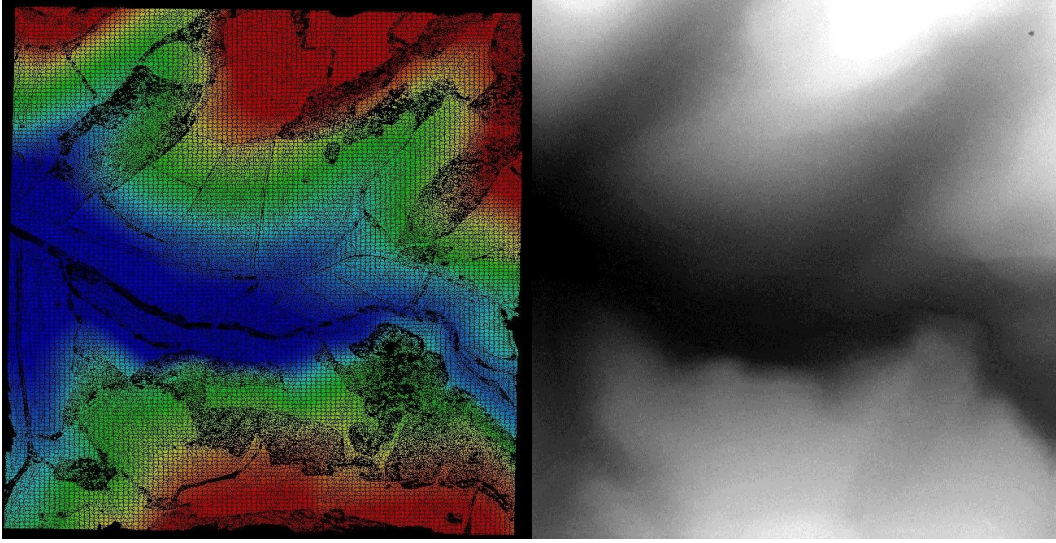
- Tüm veri setini içine alan kare grid ağ oluşturulur. Her bir grid hücresinin boyutu her hücrede en az bir nokta olacak şekilde, veri setinin yoğunluğu dikkate alınarak belirlenir. Bir hücrede birden fazla nokta olması durumunda en düşük yüksekliğe sahip olan nokta seçilir.
- Yer noktası olarak seçilen her bir noktanın çevresinde verilen yarıçap içinde kalan diğer noktalar yine belirlenen maksimum eğime göre yer-obje noktası seçimi yapılır.

4.2 F21 Bölgesinin Filtreleme Sonuçları ve Sayısal Yükseklik Modellerinin Karşılaştırılması

F21 bölgesine ait ham LiDAR verisi ALDPAT yazılımı kullanılarak bir önceki kısımda açıklaması yapılan algoritmalara göre filtrelenmiştir. Daha sonra ayrı ayrı filtrelenen bu verilerden Envi 5.0 programında en yakın komşuluk enterpolasyon ile SYM üretilmiştir. Modeller varsayılan ayarlara göre ve 25 cm mekânsal çözünürlükte üretilmiştir. Filtreleme işlemine ait parametreler ve üretilen SYM' ler ile referans SYM arasındaki istatistiksel analiz raporları oluşturulmuştur.

4.2.1 Üçgen Ağ Model Filtrelemesi

Ham LiDAR nokta bulutu filtrelenerek yer noktaları belirlenmiş ve bu noktalardan SYM üretimi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.7 F21 bölgesine ait Üçgen Ağ Model algoritması ile filtrelenmiş nokta bulutu ve bu nokta bulutundan üretilen SYM.

Üretilen SYM ile referans olarak kullanılan SYM arasındaki ilişkiler temel istatistiksel sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

Çizelge 4.1 F21 bölgesinde SYMÜçgen için temel istatistiksel değerler (m).

	Min	Maks	Ortalama	Standart Sapma
SYM _{Referans}	0.0000	99.1800	57.7610	17.2688
SYM _{Üçgen}	-1.0000	98.1900	59.5571	14.4613

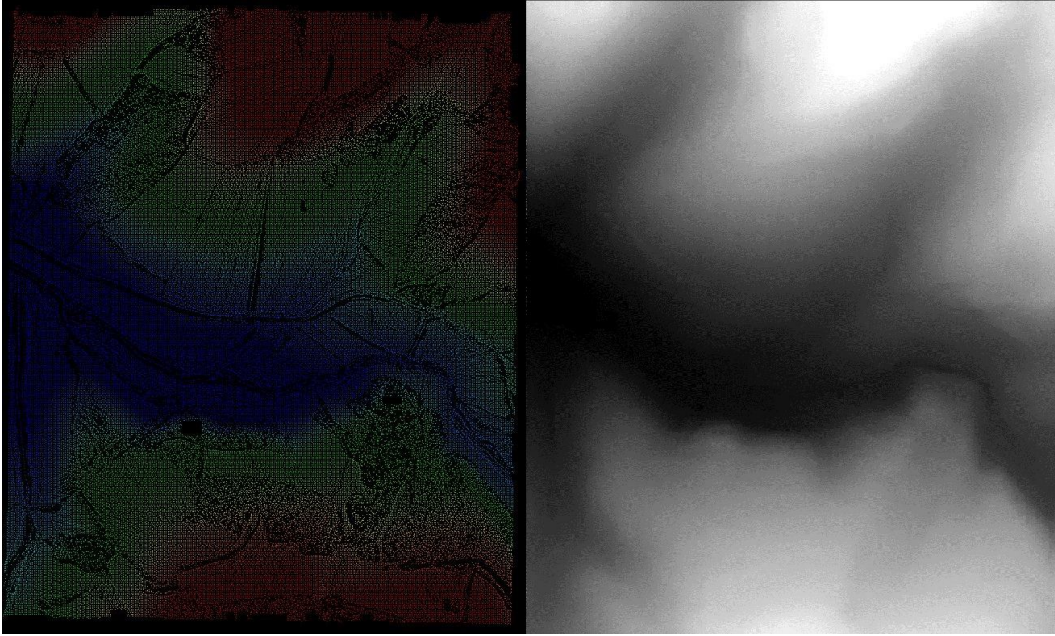
Çizelge 4.2 F21 bölgesinde SYMÜçgen için korelasyon matrisi.

	SYM _{Referans}	SYM _{Üçgen}
SYM _{Referans}	1.0000	0.75963
SYM _{Üçgen}	0.75963	1.0000

F21 bölgesi için üçgen ağ model algoritması ile filtrelenmiş nokta bulutundan üretilen SYM ve referans SYM arasındaki istatistiksel analiz Çizelge 4.1’ de verilmiştir. Çizelgeden de anlaşılacağı üzere F21 bölgesine ait referans SYM ile üçgen ağ model ile filtreleme sonucu üretilen SYM arasındaki korelasyon katsayısı 0.75963 olarak bulunmuştur (Çizelge 4.2). Başka bir ifadeyle bu modellerin benzerlikleri yaklaşık % 76 dır. SYM lere ait istatistiksel analizler Matlab 2012 ve ArcGIS 10 programlarında ayrı ayrı kontrollü olarak yapılmıştır.

4.2.2 Morfolojik Filtreleme

Ham LiDAR nokta bulutu filtrelenerek yer noktaları belirlenmiş ve bu noktalardan SYM üretimi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.8 F21 bölgesine ait Morfolojik algoritma ile filtrelenmiş nokta bulutu ve bu nokta bulutundan üretilen SYM.

Üretilen SYM ile referans olarak kullanılan SYM arasındaki ilişkiler temel istatistiksel değerlerle karşılaştırılmıştır.

Çizelge 4.3 F21 bölgesinde SYMMorfolojik için temel istatistiksel değerler (m).

	Min	Maks	Ortalama	Standart Sapma
$SYM_{Referans}$	0.0000	99.1800	57.7610	17.2688
$SYM_{Morfolojik}$	-1.0000	98.6400	58.8464	15.2938

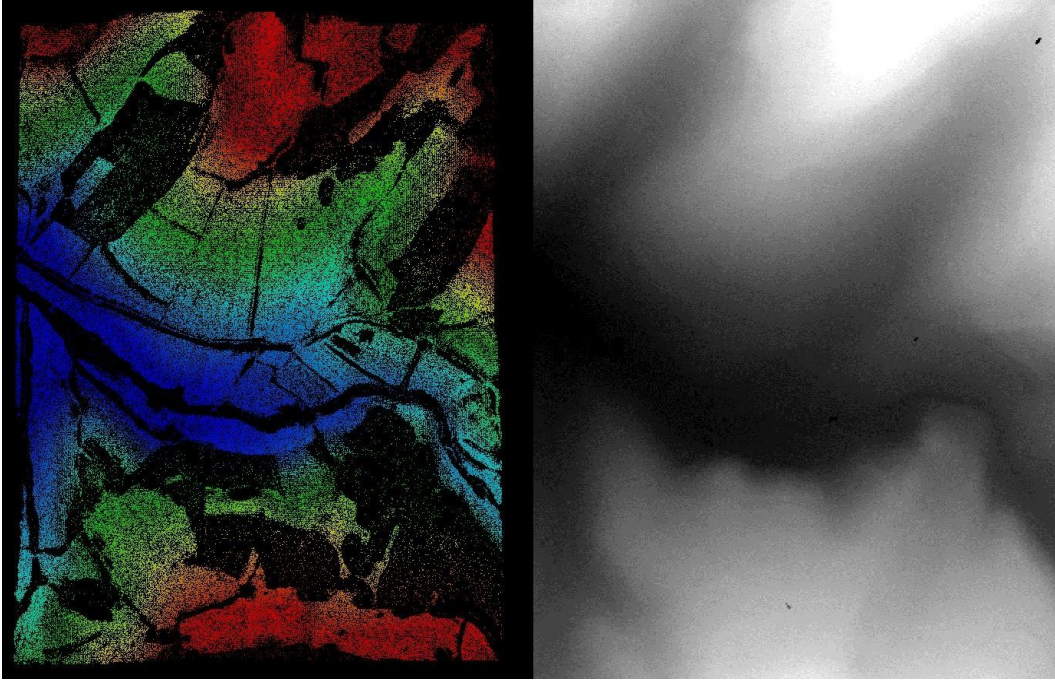
Çizelge 4.4 F21 bölgesinde SYMMorfolojik için kovaryans matrisi

	$SYM_{Referans}$	$SYM_{Morfolojik}$
$SYM_{Referans}$	1.0000	0.81734
$SYM_{Morfolojik}$	0.81734	1.0000

F21 bölgesi için morfolojik filtrelenmiş veri ile üretilen SYM ve referans SYM arasındaki istatistiksel analiz Çizelge 4.3’ te verilmiştir. Çizelgeden de anlaşılacağı

üzere F21 bölgesine ait referans SYM ile morfolojik filtreleme sonucu üretilen SYM arasındaki korelasyon katsayısı 0.81734 olarak bulunmuştur (Çizelge 4.4). Yani bu modellerin benzerlikleri yaklaşık % 82 dir. SYM lere ait istatistiksel analizler Matlab 2012 ve ArcGIS 10 programlarında ayrı ayrı kontrollü olarak yapılmıştır.

4.2.3 Polinomal Filtreleme



Şekil 4.9 F21 bölgesine ait Polinomal algoritma ile filtrelenmiş nokta bulutu ve bu nokta bulutundan üretilen SYM.

Üretilen SYM ile referans olarak kullanılan SYM arasındaki ilişkiler temel istatistiksel sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

Çizelge 4.5 F21 bölgesinde SYMPolinomal için temel istatistiksel değerler (m).

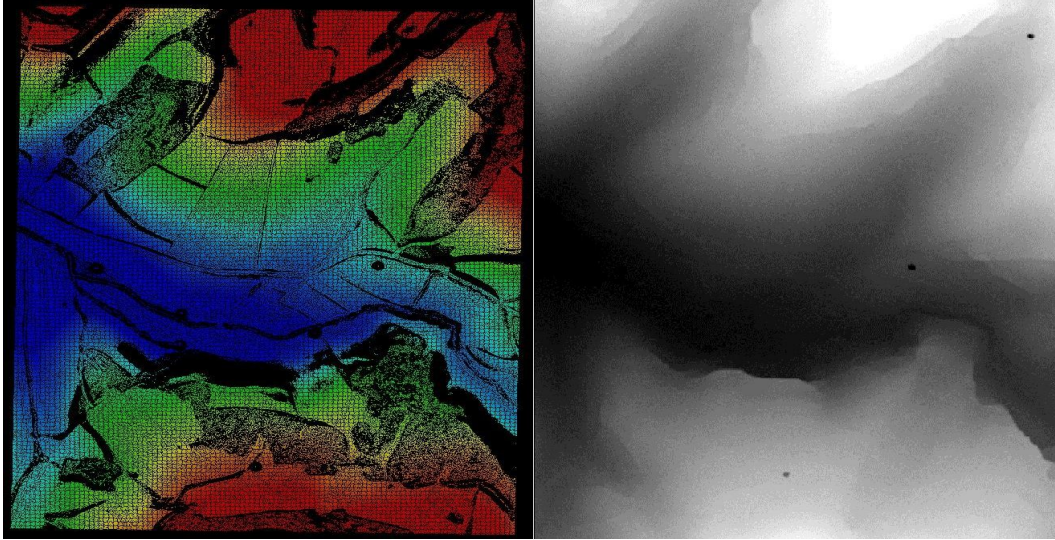
	Min	Maks	Ortalama	Standart Sapma
$SYM_{Referans}$	0.0000	99.1800	57.7610	17.2688
$SYM_{Polinomal}$	-8.4800	98.6900	56.6898	18.2185

Çizelge 4.6 F21 bölgesinde SYMPolinomal için korelasyon matrisi.

	$SYM_{Referans}$	$SYM_{Polinomal}$
$SYM_{Referans}$	1.0000	0.75617
$SYM_{Polinomal}$	0.75617	1.0000

F21 bölgesi için polinomal filtrelenmiş veri ile üretilen SYM ve referans SYM arasındaki istatistiksel analiz Çizelge 4.5 'te verilmiştir. Şekilden de anlaşılacağı üzere F21 bölgesine ait referans SYM ile polinomal filtreleme sonucu üretilen SYM arasındaki korelasyon katsayısı 0.75617 olarak bulunmuştur (Çizelge 5.6). Yüzde ifadesiyle bu modellerin benzerlikleri yaklaşık % 76 dır. SYM 'lere ait istatistiksel analizler Matlab 2012 ve ArcGIS 10 programlarında ayrı ayrı kontrollü olarak yapılmıştır.

4.2.4 Eğim Temelli Filtre



Şekil 4.10 F21 bölgesine ait Eğim Temelli algoritma ile filtrelenmiş nokta bulutu ve bu nokta bulutundan üretilen SYM.

Üretilen SYM ile referans olarak kullanılan SYM arasındaki ilişkiler temel istatistiksel değerlerle karşılaştırılmıştır.

Çizelge 4.7 F21 bölgesinde SYMEğim için temel istatistiksel değerler (m).

	Min	Maks	Ortalama	Standart Sapma
$SYM_{Referans}$	0.0000	99.1800	57.7610	17.2688
$SYM_{Eğim}$	-8.4800	99.0600	59.5012	14.3513

Çizelge 4.8 F21 bölgesinde SYMEğim için korelasyon matrisi.

	$SYM_{Referans}$	$SYM_{Eğim}$
$SYM_{Referans}$	1.0000	0.75172
$SYM_{Eğim}$	0.75172	1.0000

F21 bölgesi için eğim temelli filtrelenmiş veri ile üretilen SYM ve referans SYM arasındaki istatistiksel analiz Çizelge 4.7 'de verilmiştir. Çizelge dan da anlaşılacağı üzere F21 bölgesine ait referans SYM ile eğim temelli filtreleme sonucu üretilen SYM arasındaki korelasyon katsayısı 0.75172 olarak bulunmuştur (Çizelge 4.8). Yüzde ifadesiyle bu modellerin benzerlikleri yaklaşık % 75 tir. SYM' lere ait istatistiksel analizler Matlab 2012 ve ArcGIS 10 programlarında ayrı ayrı kontrollü olarak yapılmıştır.

Tüm algoritmaların temel istatistik değerleri Çizelge 4.9 'da verilmektedir. Tüm SYM 'ler %75 gibi yüksek bir uyumda olmakla beraber analiz sonuçlarına göre F21 bölgesinin filtrelemeleri sonucu üretilen SYM' ler içinde referans SYM ile en fazla uyuma sahip modeli üreten algoritma morfolojik filtrelemedir (Çizelge 4.10). Daha doğru bir pencere seçimi ve daha uygun eşik değerleri ile bu sonuçlar iyileştirilebilir. Bu noktada arazinin tanınması ve karakteristik noktalar ile yaklaşık yüksekliklerin bilinmesi çok önemlidir. Çünkü bu bilgiler filtreleme parametrelerinin tespitinde büyük rol oynamaktadır.

Çizelge 4.9 F21 bölgesi için üretilen tüm SYM 'lere ait istatistiksel değerler (m).

	Min	Maks	Ortalama	Standart Sapma
$SYM_{Referans}$	0.0000	99.1800	57.7610	17.2688
$SYM_{Üçgen}$	-1.0000	98.1900	59.5571	14.4613
$SYM_{Morfolojik}$	-1.0000	98.6400	58.8464	15.2938
$SYM_{Polinomal}$	-8.4800	98.6900	56.6898	18.2185
$SYM_{Eğim}$	-1.0000	99.0600	59.5012	14.3513

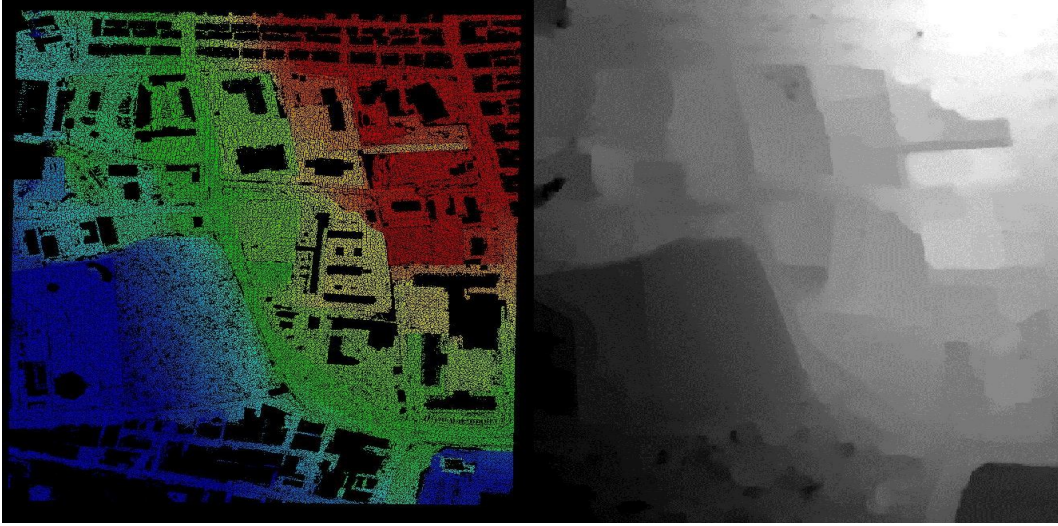
Çizelge 4.10 F21 bölgesi için üretilen tüm SYM 'lere ait korelasyon matrisi.

	SYM_{Referans}	SYM_{Üçgen}	SYM_{Morfolojik}	SYM_{Polinomal}	SYM_{Eğim}
SYM_{Referans}	1.00000	0.75963	0.81734	0.75617	0.75172
SYM_{Üçgen}	0.75963	1.00000	0.89654	0.65452	0.98781
SYM_{Morfolojik}	0.81734	0.89654	1.00000	0.74189	0.88565
SYM_{Polinomal}	0.75617	0.65452	0.74189	1.00000	0.64417
SYM_{Eğim}	0.75172	0.98781	0.88565	0.64417	1.00000

4.3 G21 Bölgesinin Filtreleme Sonuçları ve Sayısal Yükseklik Modellerinin Karşılaştırılması

G21 bölgesine ait ham LiDAR verisi ALDPAT yazılımı kullanılarak bir önceki kısımda açıklaması yapılan algoritmalara göre filtrelenmiştir. Daha sonra ayrı ayrı filtrelenen bu veriler Envi 5.0 programında işlenerek SYM üretilmiştir. Filtreleme işlemine ait parametreler ve üretilen SYM' ler ile referans SYM arasındaki istatistiksel analiz raporları oluşturulmuştur.

4.3.1 Üçgen Ağ Model Filtrelemesi



Şekil 4.11 G21 bölgesine ait Üçgen Ağ Model algoritması ile filtrelenmiş nokta bulutu ve bu nokta bulutundan üretilen SYM.

Üretilen SYM ile referans olarak kullanılan SYM arasındaki ilişkiler temel istatistiksel değerlerle karşılaştırılmıştır.

Çizelge 4.11 G21 bölgesinde SYM_{Üçgen} için temel istatistiksel değerler (m).

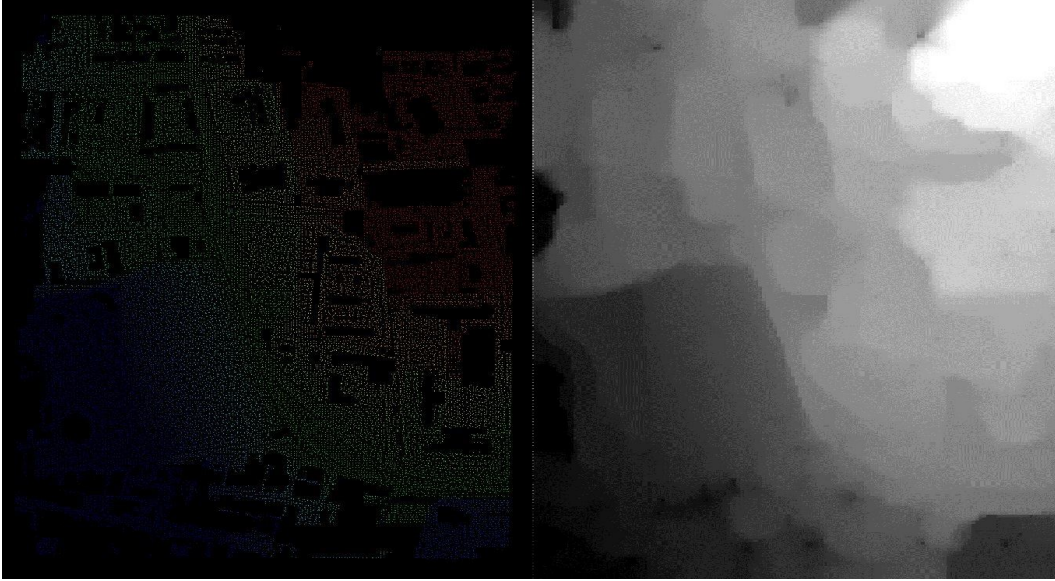
	Min	Maks	Ortalama	Standart Sapma
SYM _{Referans}	0.0000	52.8000	27.2465	10.9620
SYM _{Üçgen}	1.0000	52.4500	27.5915	10.3120

Çizelge 4.12 G21 bölgesinde $SYM_{\text{Üçgen}}$ için korelasyon matrisi

	SYM_{Referans}	$SYM_{\text{Üçgen}}$
SYM_{Referans}	1.0000	0.90638
$SYM_{\text{Üçgen}}$	0.90638	1.0000

G21 bölgesi için üçgen ağ model algoritması ile filtrelenmiş nokta bulutundan üretilen SYM ve referans SYM arasındaki istatistiksel analiz Çizelge 4.11’ de verilmiştir. Çizelge dan da anlaşılacağı üzere F21 bölgesine ait referans SYM ile üçgen ağ model ile filtreleme sonucu üretilen SYM arasındaki korelasyon katsayısı 0.90638 olarak bulunmuştur (Çizelge 4.12). Yüzde ifadesiyle bu modellerin benzerlikleri yaklaşık % 91 dir. SYM lere ait istatistiksel analizler Matlab 2012 ve ArcGIS 10 programlarında ayrı ayrı kontrollü olarak yapılmıştır.

4.3.2 Morfolojik Filtreleme



Şekil 4.12 G21 bölgesine ait Morfolojik algoritma ile filtrelenmiş nokta bulutu ve bu nokta bulutundan üretilen SYM.

Üretilen SYM ile referans olarak kullanılan SYM arasındaki ilişkiler temel istatistiksel değerlerle karşılaştırılmıştır.

Çizelge 4.13 G21 bölgesinde $SYM_{Morfolojik}$ için temel istatistiksel değerler (m).

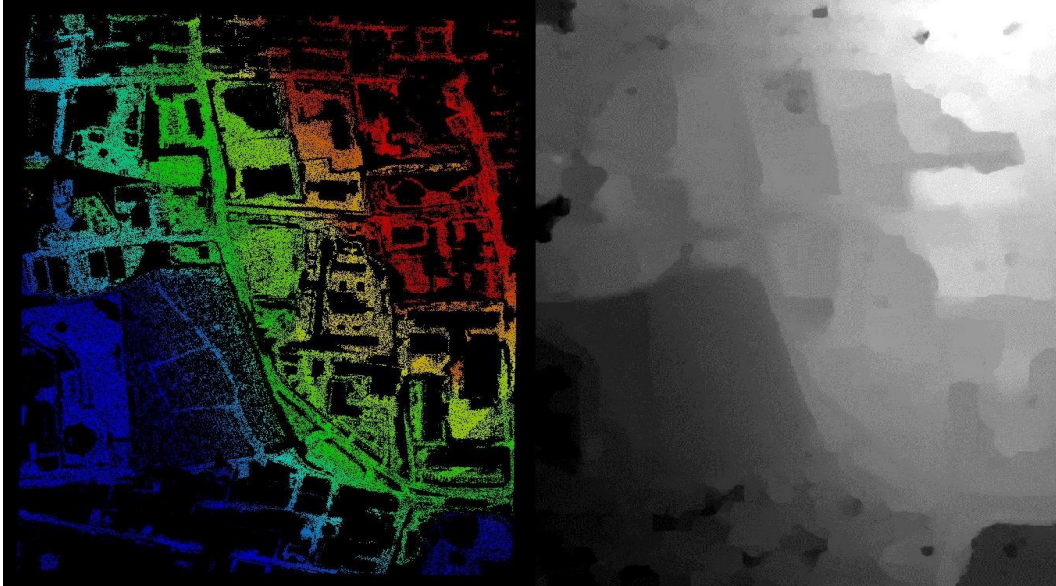
	Min	Maks	Ortalama	Standart Sapma
$SYM_{Referans}$	0.0000	52.8000	27.2465	10.9620
$SYM_{Üçgen}$	-1.0000	50.61	26.5946	10.0470

Çizelge 4.14 G21 bölgesinde $SYM_{Morfolojik}$ için korelasyon matrisi.

	$SYM_{Referans}$	$SYM_{Morfolojik}$
$SYM_{Referans}$	1.0000	0.91272
$SYM_{Morfolojik}$	0.91272	1.0000

F21 bölgesi için morfolojik filtrelenmiş veri ile üretilen SYM ve referans SYM arasındaki istatistiksel analiz Çizelge 4.13’ te verilmiştir. Çizelge dan da anlaşılacağı üzere F21 bölgesine ait referans SYM ile morfolojik filtreleme sonucu üretilen SYM arasındaki korelasyon katsayısı 0.91272 olarak bulunmuştur (Çizelge 4.14). Yüzde ifadesiyle bu modellerin benzerlikleri yaklaşık % 91 dir. SYM lere ait istatistiksel analizler Matlab 2012 ve ArcGIS 10 programlarında ayrı ayrı kontrollü olarak yapılmıştır.

4.3.3 Polinomal Filtreleme



Şekil 4.13 G21 bölgesine ait Polinomal algoritma ile filtrelenmiş nokta bulutu ve bu nokta bulutundan üretilen SYM.

Üretilen SYM ile referans olarak kullanılan SYM arasındaki ilişkiler temel istatistiksel değerlerle karşılaştırılmıştır.

Çizelge 4.15 G21 bölgesinde SYM_{Polinomal} için temel istatistiksel değerler (m).

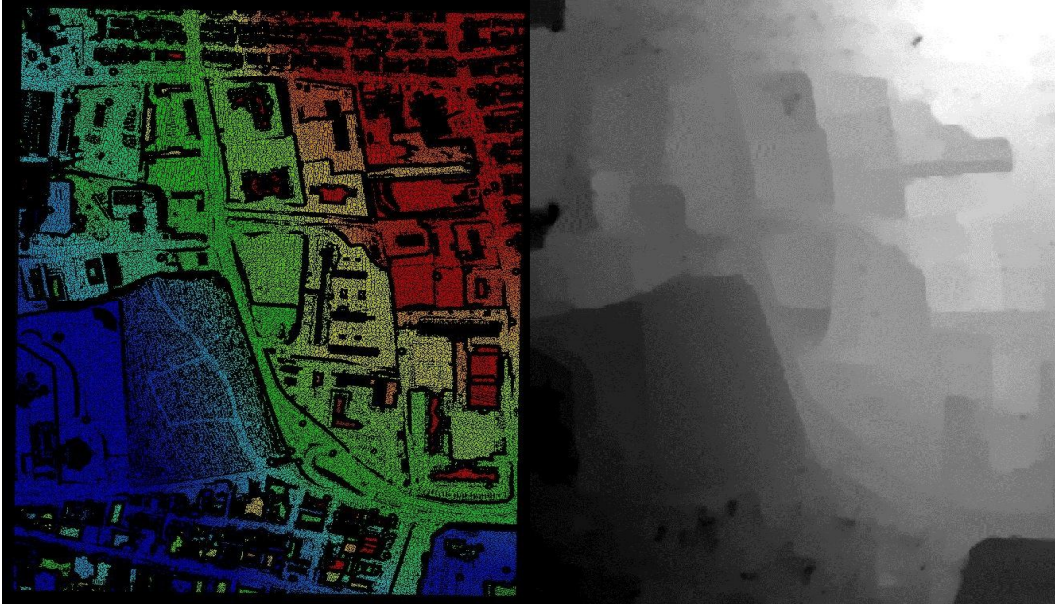
	Min	Maks	Ortalama	Standart Sapma
SYM _{Referans}	0.0000	52.8000	27.2465	10.9620
SYM _{Polinomal}	-1.0000	52.800	27.3327	10.3643

Çizelge 4.16 G21 bölgesinde SYM_{Polinomal} için korelasyon matrisi

	SYM _{Referans}	SYM _{Polinomal}
SYM _{Referans}	1.0000	0.91996
SYM _{Polinomal}	0.91996	1.0000

F21 bölgesi için polinomal filtrelenmiş veri ile üretilen SYM ve referans SYM arasındaki istatistiksel analiz Çizelge 4.15’ de verilmiştir. Çizelge dan da anlaşılacağı üzere F21 bölgesine ait referans SYM ile polinomal filtreleme sonucu üretilen SYM arasındaki korelasyon katsayısı 0.91996 olarak bulunmuştur (Çizelge 4.16). Yüzde ifadesiyle bu modellerin benzerlikleri yaklaşık % 92 dir. SYM lere ait istatistiksel analizler Matlab 2012 ve ArcGIS 10 programlarında ayrı ayrı kontrollü olarak yapılmıştır.

4.3.4 Eğim Temelli Filtre



Şekil 4.14 G21 bölgesine ait Eğim Temelli algoritma ile filtrelenmiş nokta bulutu ve bu nokta bulutundan üretilen SYM.

Üretilen SYM ile referans olarak kullanılan SYM arasındaki ilişkiler temel istatistiksel değerlerle karşılaştırılmıştır.

Çizelge 4.17 G21 bölgesinde $SYM_{Eğim}$ için temel istatistiksel değerler (m).

	Min	Maks	Ortalama	Standart Sapma
$SYM_{Referans}$	0.0000	52.8000	27.2465	10.9620
$SYM_{Eğim}$	-1.0000	52.4300	27.4612	10.2156

Çizelge 4.18 G21 bölgesinde $SYM_{Eğim}$ için korelasyon matrisi.

	$SYM_{Referans}$	$SYM_{Eğim}$
$SYM_{Referans}$	1.0000	0.89785
$SYM_{Eğim}$	0.89785	1.0000

G21 bölgesi için eğim temelli filtrelenmiş veri ile üretilen SYM ve referans SYM arasındaki istatistiksel analiz Çizelge 4.17 'de verilmiştir. Çizelge dan da anlaşılacağı üzere G21 bölgesine ait referans SYM ile eğim temelli filtreleme sonucu üretilen SYM arasındaki korelasyon katsayısı 0.89785 olarak bulunmuştur (Çizelge 4.18). Yüzde ifadesiyle bu modellerin benzerlikleri yaklaşık % 90 dır. SYM lere ait istatistiksel

analizler Matlab 2012 ve ArcGIS 10 programlarında ayrı ayrı kontrollü olarak yapılmıştır.

Tüm algoritmaların temel istatistik değerleri Çizelge 4.19 'da verilmektedir. Tüm SYM 'ler %90 gibi yüksek bir uyuşumda olmakla beraber analiz sonuçlarına göre G21 bölgesinin filtrelemeleri sonucu üretilen SYM 'ler içinde referans SYM ile en fazla uyuşuma sahip modeli üreten algoritma polinomal filtrelemedir (Çizelge 420). Daha doğru bir pencere seçimi ve daha uygun eşik değerleri ile bu sonuçlar iyileştirilebilir. Bu noktada arazinin tanınması ve karakteristik noktalar ile yaklaşık yüksekliklerin bilinmesi çok önemlidir. Çünkü bu bilgiler filtreleme parametrelerinin tespitinde büyük rol oynamaktadır.

Çizelge 4.19 G21 bölgesi için üretilen tüm SYM' lere ait istatistiksel değerler (m).

	Min	Maks	Ortalama	Standart Sapma
SYM_{Referans}	0.0000	52.8000	27.2465	10.9620
SYM_{Üçgen}	-1.0000	52.4500	27.5915	10.3120
SYM_{Morfolojik}	-1.0000	50.6100	26.5946	10.0470
SYM_{Polinomal}	-1.0000	52.8000	27.3327	10.3643
SYM_{Eğim}	-1.0000	52.4300	27.4612	10.2156

Çizelge 4.20 G21 bölgesi için üretilen tüm SYM 'lere ait korelasyon matrisi.

	SYM_{Referans}	SYM_{Üçgen}	SYM_{Morfolojik}	SYM_{Polinomal}	SYM_{Eğim}
SYM_{Referans}	1.00000	0.90638	0.91272	0.91996	0.89785
SYM_{Üçgen}	0.90638	1.00000	0.95491	0.97417	0.98429
SYM_{Morfolojik}	0.91272	0.97417	1.00000	0.97004	0.95028
SYM_{Polinomal}	0.91996	0.97417	0.95028	1.00000	0.96605
SYM_{Eğim}	0.89785	0.98429	0.95028	0.96605	1.00000

4.4 FİLTRELENMİŞ LiDAR NOKTA BULUTUNDAN SAYISAL ARAZİ MODELİ ÜRETİMİ

Ham LiDAR nokta bulutu filtrelenip sadece yer yüzey noktaları elde edildikten sonra bu noktalar kullanılarak SYM den farklı özellikleri barındıran ve yine yükseklik bilgisi içeren SAM üretimi gerçekleştirilmiştir. Bu üretim için sadece yükseklik modeli için en uygun filtrelemeyi yaptığımıza karar verdiğimiz F21 bölgesi için morfolojik ve G21 bölgesi için polinomal filtreleme sonuçları kullanılmıştır. Toplam iki veri setine ayrı ayrı üç farklı enterpolasyon yöntemi uygulanmış ve yine aynı bölgeye ait referans verilerin aynı enterpolasyon ile üretilmiş modelleri ile kıyaslanarak fark yüzeyleri oluşturulmuştur. Enterpolasyon için Ters Uzaklık Ağırlıklı (Inverse Distance to a Power), Kriging ve Doğal Komşuluk (Natural Neighbor) yöntemleri kullanılmıştır.

Ters Uzaklık Ağırlıklı enterpolasyonu, ağırlık fonksiyonunu uzaktaki noktaların sonuca etkisini azaltacak şekilde kurar. Enterpole edilecek nokta bir dayanak noktasından uzaklaştıkça bu grid noktasının o enterpolasyon noktasına etkisi azalır ve yaklaşan bir başka dayanak noktasının etkisi artar.

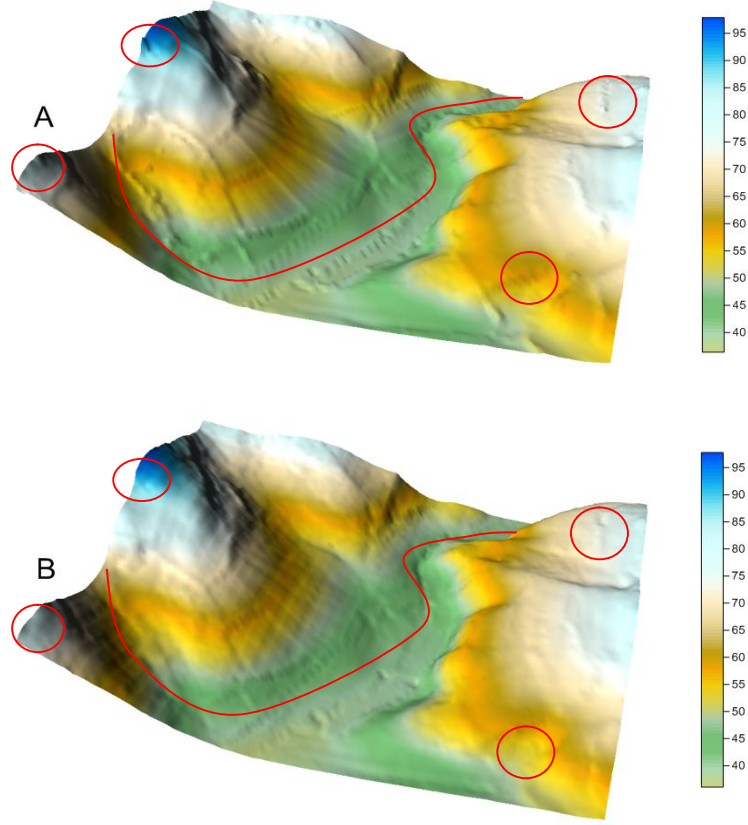
Doğal Komşuluk enterpolasyonu, veri setini mozaik (Thiessen) poligonlarına ayırır. Bu poligon Delunay üçgenlerinin eşi olarak da tanımlanmaktadır. Bir poligon içine eklenecek yeni bir nokta için komşu poligonlar, yakınlıklarına göre ağırlıklandırılır. Eklenen her yeni noktadan sonra mozaikler yeniden oluşturularak komşuluklar değiştirilir.

Kriging enterpolasyonu, bir önceki enterpolasyonlardan biraz farklılık göstermektedir. Diğer iki yöntem yapılan ölçülere çok bağlıdır. Örneğin belli bir kümelenme veya belli mesafe içinde komşu bulunmaması durumunda hiç verimli değillerdir. Fakat Kriging eldeki veri setinin genel trendini çıkararak enterpolasyon yapar.

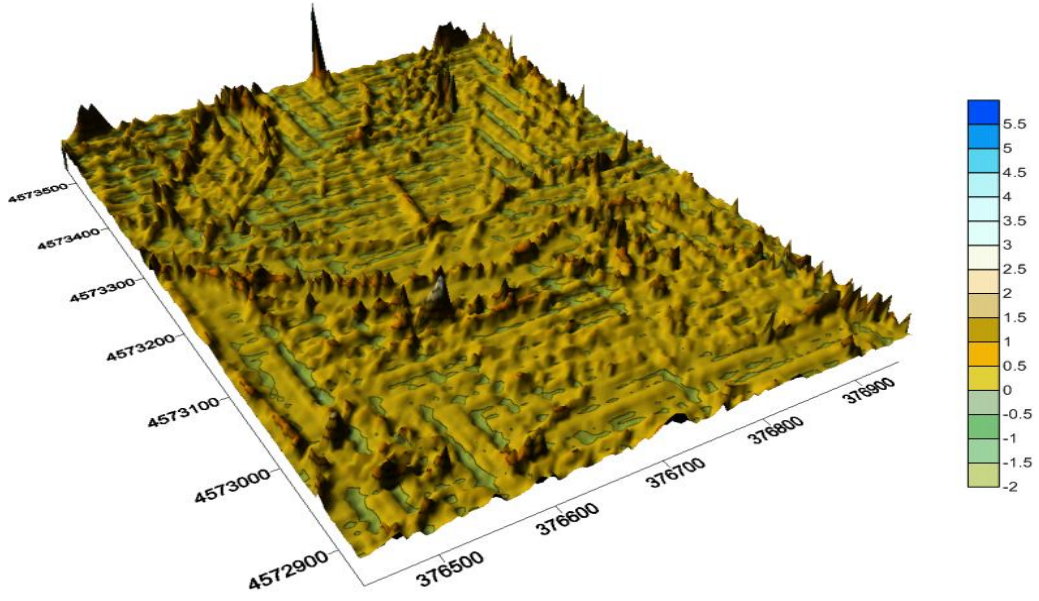
4.4.1 Morfolojik Filtrelenmiş Nokta Bulutlarından SAM Üretimi

4.4.1.1 Ters Uzaklık Ağırlıklı Enterpolasyon Sonuçları

Topografik farklar olarak görsel şekilde tespit edilebilmektedir (Şekil 5.1 A-B).



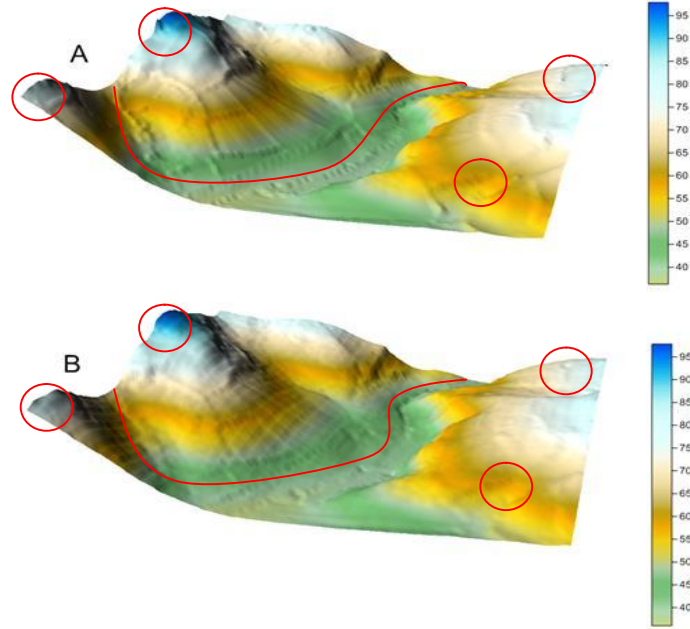
Şekil 4.15 Morfolojik Filtre Ters Uzaklık Ağırlıklı Enterpolasyonu için (A) Referans veriden üretilmiş SAM, (B) Filtrelenmiş veriden üretilmiş SAM.



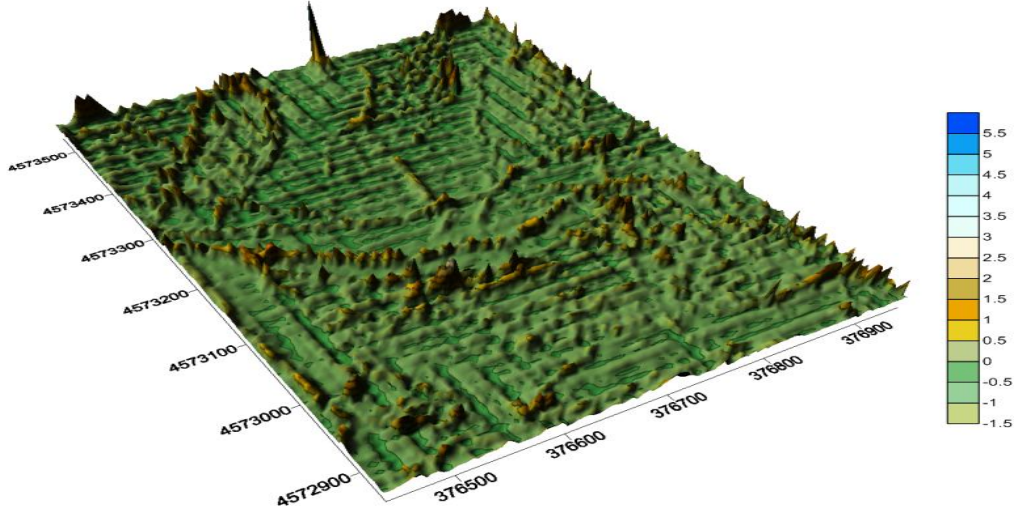
Şekil 4.16 Morfolojik Filtre Ters Uzaklık Ağırlıklı Enterpolasyonu için eşyüksekti eğrili (A-B) fark yüzeyi (metre).

4.4.1.2 Doğal Komşuluk Enterpolasyon Sonuçları

Topografik farklar metre olarak görsel şekilde tespit edilmektedir (Şekil 5.2 A-B).



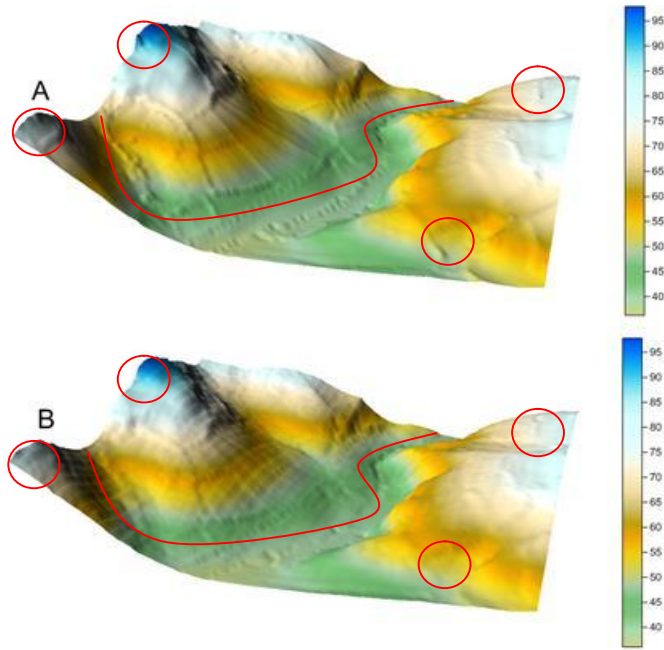
Şekil 4.17 Morfolojik Filtre Doğal Komşuluk Enterpolasyonu için (A) Referans veriden üretilmiş SAM, (B) Filtrelenmiş veriden üretilmiş SAM.



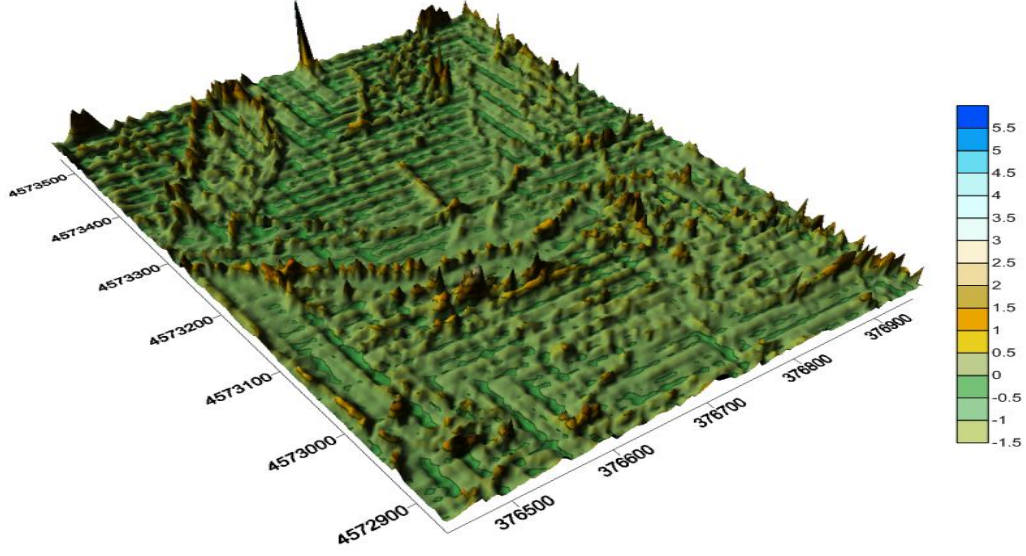
Şekil 4.18 Morfolojik Filtre Doğal Komşuluk Enterpolasyonu için eşyüksekti eğrili (A-B) fark yüzeyi (metre).

4.4.1.3 Kriging Enterpolasyon Sonuçları

Topografik farklar metre olarak görsel şekilde tespit edilmektedir (Şekil 5.3 A-B).



Şekil 4.19 Morfolojik Filtre Kriging Enterpolasyonu için (A) Referans veriden üretilmiş SAM, (B) Filtrelenmiş veriden üretilmiş SAM.



Şekil 4.20 Morfolojik Filtre Kriging Enterpolasyonu için eşyüksekti eğrili (A-B) fark yüzeyi (metre).

4.4.1.4 Morfolojik Filtrelenmiş Nokta Bulutlarından Üretilen Modellerin Değerlendirilmesi

Oluşturulan arazi modelleri yer gerçekliğini büyük oranda vermiş ve her üç enterpolasyon yöntemi de referans veriyle çok uyumlu modeller oluşturmuştur. Fark yüzeyi de arazinin karakteristiğini taşımaktadır (Şekil 4.16, 4.18, 4.20). Negatif farklar filtrelenmiş veri setinin referanstan daha yüksekte kaldığını pozitif farklar ise filtrelenmiş veri setinin referanstan daha alçakta kaldığını göstermektedir.

Üretilen SAM' lerinde filtrelemeden kaynaklanan farklılıklar gözlemlenmiştir. Bu farklılıklar şekil 4.15, şekil 4.17 ve şekil 4.19 üzerindeki işaretli alanlarda daha net görülebilmektedir. SAM' inde ki aykırı değerlerin arazideki ani yükseklik değişimlerinin ve vadi boyunca devam eden ağaçlarda daha fazla ortaya çıktığı görülmektedir. Bu bölgelere bakarak yükseklik ile sık ve sıralı ağaç topluluklarının filtrelemeyi doğrudan etkilediği görülmektedir.

Daha uyumlu modeller için tüm alan birden fazla yöntemle veya farklı parametrelerle filtrelenerek daha iyi bir veri seti elde edilebilir. Her üç enterpolasyon yöntemi ile üretilen modellerin referans modeller ile olan temel istatistik değerleri Çizelge 4.21' de görülmektedir. Buna göre her üç modelin standart sapması da bir birine çok yakın olmakla beraber ters uzaklık ağırlıklı enterpolasyon yöntemi nispeten daha iyi sonuç

vermektedir.

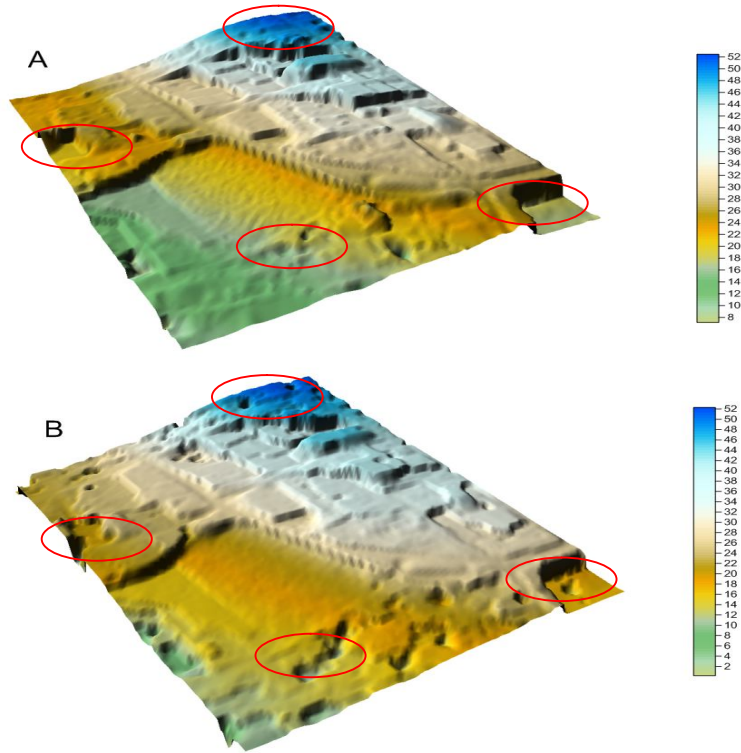
Çizelge 4.21 Morfolojik Filtreleme verilerine ait farklı enterpolasyonların fark yüzeylerine ait temel istatistik değerleri.

Enterpolasyon	Min	Maks	Ortalama	Standart Sapma
Ters Uzaklık				
Ağırlıklı	-5.1359	1.8060	-0.1369	0.2458
Doğal				
Komşuluk	-5.1072	1.0192	-0.1388	0.2643
Kriging	-5.1066	1.1125	-0.1393	0.2689

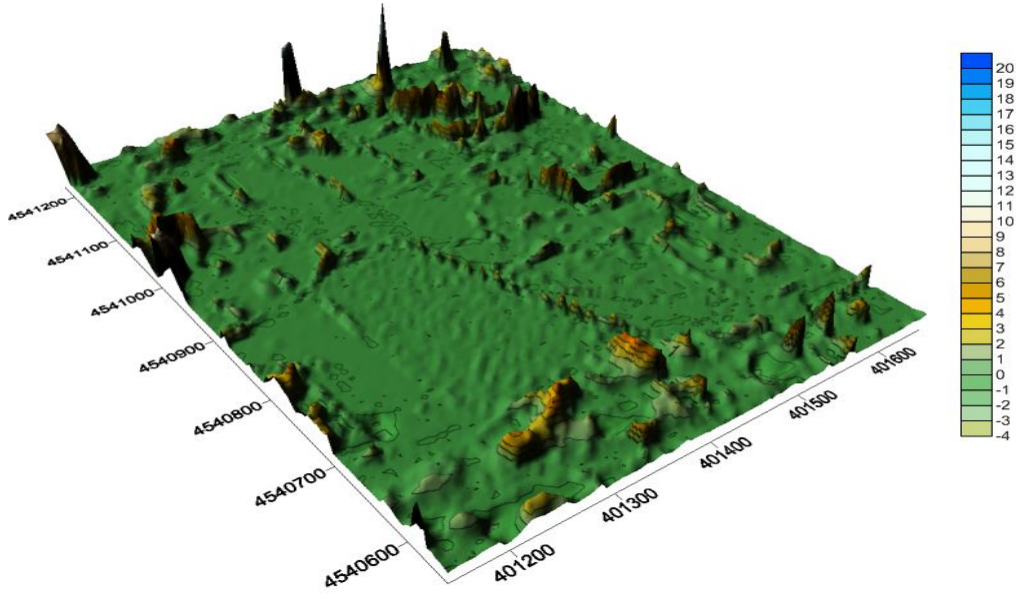
4.4.2 Polinomal Filtrelenmiş Nokta Bulutlarından SAM Üretimi

4.4.2.1 Ters Uzaklık Ağırlıklı Enterpolasyon Sonuçları

Topografik farklar metre olarak görsel şekilde tespit edilmektedir (Şekil 4.21, A-B).



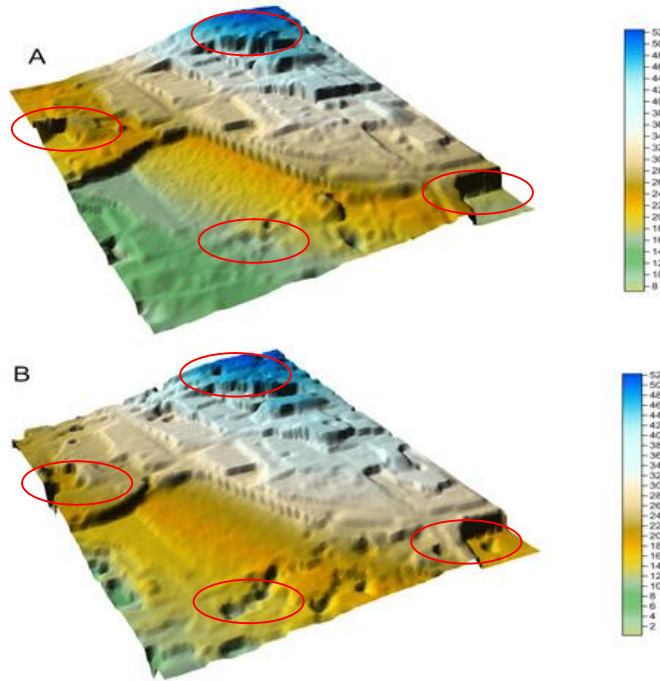
Şekil 4.21 Polinomal Filtre Ters Uzaklık Ağırlıklı Enterpolasyonu için (A) Referans veriden üretilmiş SAM, (B) Filtrelenmiş veriden üretilmiş SAM.



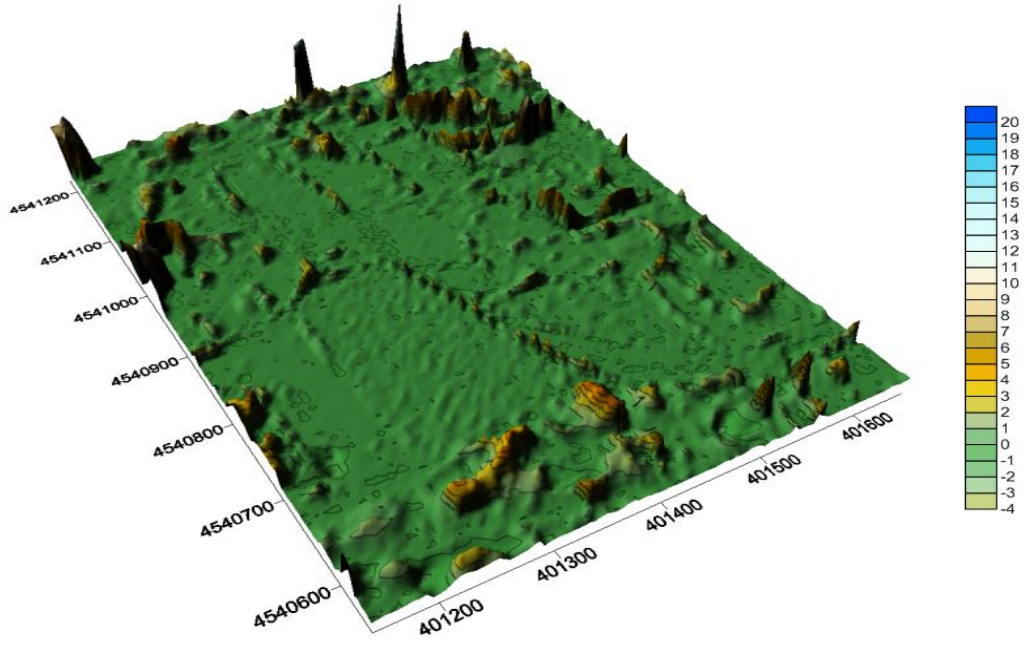
Şekil 4.22 Polinomal Filtre Ters Uzaklık Ağırlıklı Enterpolasyonu için eşyüksekti eğrili (A-B) fark yüzeyi (metre).

4.4.2.2 Doğal Komşuluk Enterpolasyon Sonuçları

Topografik farklar metre olarak görsel şekilde tespit edilmektedir (Şekil 4.23, A-B).



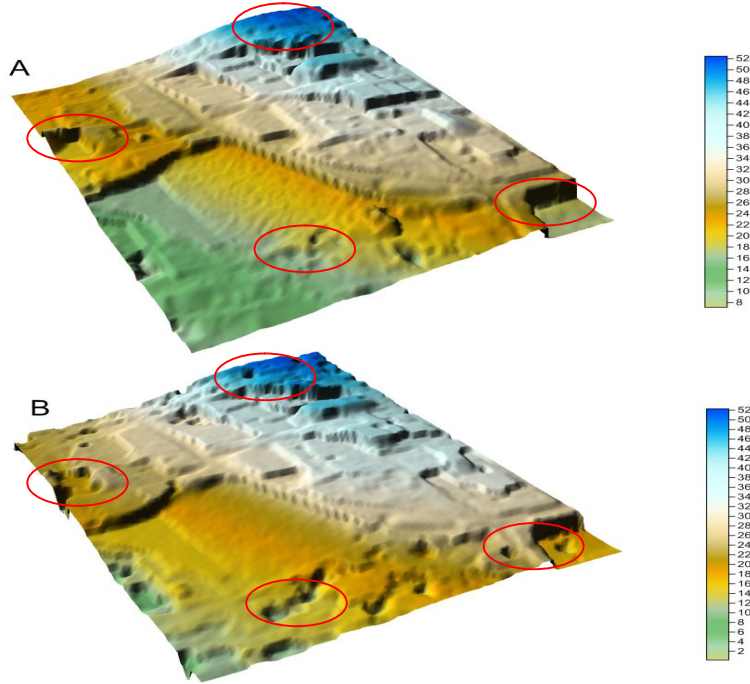
Şekil 4.23 Polinomal Filtre Doğal Komşuluk Enterpolasyonu için(A) Referans veriden üretilmiş SAM, (B) Filtrelenmiş veriden üretilmiş SAM.



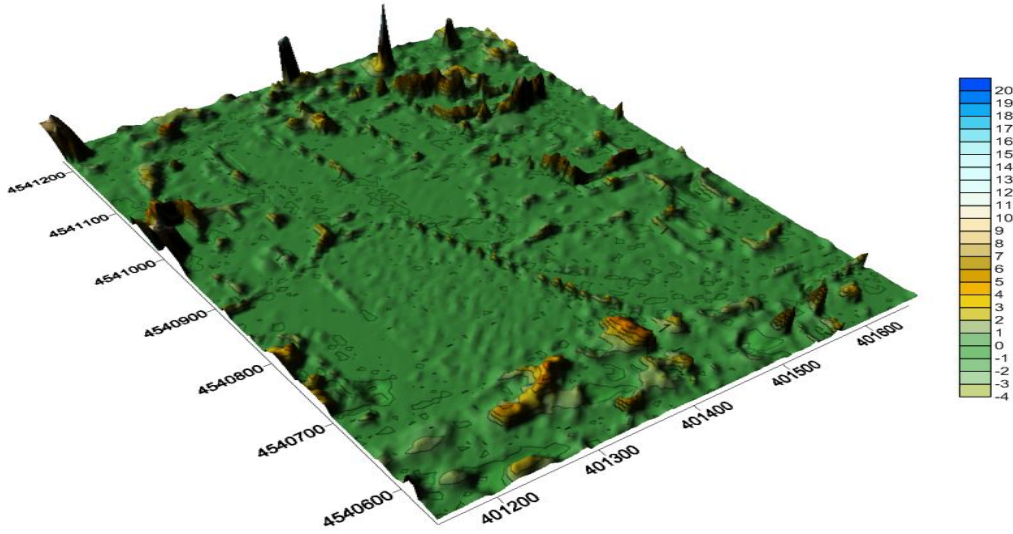
Şekil 4.24 Polinomal Filtre Doğal Komşuluk Enterpolasyonu için eşyüksekti eğrili (A-B) fark yüzeyi (metre).

4.4.2.3 Kriging Enterpolasyon Sonuçları

Topografik farklar metre olarak görsel şekilde tespit edilmektedir (Şekil 4.25, A-B).



Şekil 4.25 Polinomal Filtre Kriging Enterpolasyonu için (A) Referans veriden üretilmiş SAM, (B) Filtrelenmiş veriden üretilmiş SAM.



Şekil 4.26 Polinomal Filtre Kriging Enterpolasyonu için eşyüksekti eğrili (A-B) fark yüzeyi (metre).

4.4.2.4 Polinomal Filtrelenmiş Nokta Bulutlarından Üretilen Modellerin Değerlendirilmesi

Oluşturulan arazi modelleri yer gerçekliğini büyük oranda vermekle beraber her üç enterpolasyon yöntemi de referans veriyle çok uyumlu modeller oluşturmuştur. Fark yüzeyi de arazinin karakteristiğini taşımaktadır (Şekil 4.22, 4.24, 4.26). Negatif farklar filtrelenmiş veri setinin referanstan daha yüksekte kaldığını pozitif farklar ise filtrelenmiş veri setinin referanstan daha alçakta kaldığını göstermektedir.

Üretilen SAM' lerinde filtrelemeden kaynaklanan farklılıklar gözlemlenmiştir. Bu farklılıklar şekil 4.15, şekil 4.17 ve şekil 4.19 üzerindeki işaretli alanlarda daha net görülebilmektedir. SAM' inde ki aykırı değerlerin arazideki ani yükseklik değişimlerinin ve vadi boyunca devam eden ağaçlarda daha fazla ortaya çıktığı görülmektedir. Bu bölgelere bakarak farklı yüksekliğe sahip binaların, cami gibi yüksek ve karmaşık yapıların ve ağaçlık alanların filtrelemeyi doğrudan etkilediği görülmektedir.

Daha uyumlu modeller için tüm alan birden fazla yöntemle veya farklı parametrelerle filtrelenerek daha iyi bir veri seti elde edilebilir. Her üç enterpolasyon yöntemi ile üretilen modellerin referans modeller ile olan temel istatistik değerleri Çizelge 4.22' de görülmektedir. Buna göre her üç modelin standart sapması da bir birine çok yakın olmakla beraber ters uzaklık ağırlıklı enterpolasyon yöntemi nispeten daha iyi sonuç

vermektedir.

Çizelge 4.22 Polinomal Filtre Ters Uzaklık Ağırlıklı Enterpolasyonu fark yüzeyine ait temel istatistik değerleri (m).

	Min	Maks	Ortalama	Standart Sapma
Ters Uzaklık				
Ağırlıklı	-19.6814	3.1287	-0.4223	1.0699
Doğal				
Konşuluk	-19.7839	3.3483	-0.4222	1.0761
Kriging	-19.8023	3.4043	-0.4222	1.0772

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tezde hava LiDAR nokta bulutlarının son dönüşleri ile SYM ve SAM üretimi ve bu modellerin referans verilerle karşılaştırılması ele alınmıştır. Bu amaçla Las formatında işlenmemiş LiDAR verilerinin en uygun algoritmalarla filtrelenmesi gerekmektedir.

Filtreleme ve enterpolasyon SYM ve SAM üretiminde en temel iki adımı oluşturmaktadır. İlk adım olan filtrelemede en zor ve karmaşık kısım SYM ve SAM üretiminde kullanılan yer noktalarını elde edebilmek için veri setindeki obje noktalarının filtrelenmesidir. Özellikle büyük ve geniş binalar, yoğun bitki örtüsü arazi süreksizliği ve aykırı değerler gibi karmaşık durumlar filtreleme işlemini zorlaştırmakta ve sonuçları büyük oranda etkileyebilmektedir. Aykırı değerleri elimine etmek için grid hücrelerine minimum sayıda nokta almaya çalışılmış fakat yine de bu aykırı değerler tamamen temizlenememiştir. Filtreleme algoritmasındaki arama penceresinin boyutları da filtrelemeye çok etki etmektedir ve grid boyutlarıyla doğrudan ilişkili durumdadır. Bu pencere bazı durumlarda çok büyük binaları fark edememekte ve büyük eğimde verimli çalışmamaktadır. Yine benzer şekilde LiDAR verisinin hata aralığı ile doğrudan ilişkili olarak belirlenmesi gereken eşik değeri de sonuçları doğrudan etkilemektedir. Eşik değerinin gereğinden yüksek olması durumunda kısa otlar, kısmen ağaçlar ve bazen otomobiller de filtrelenmeden kalabilmektedir. Eşik değerinin gereğinden düşük olursa eğimli araziler ve engebeli yüzeylerde yere ait noktalar da obje olarak sınıflandırılıp filtrelenmektedir. Her iki durumda da filtrelenmiş veri seti istenen yoğunluk ve doğrulukta olmamakta ve modellerin üretimini doğrudan etkilemektedir.

İncelenen filtreleme algoritmalarının tamamı genel itibariyle yer yüzeyini birçok çalışmaya yetecek doğrulukta üretebilmektedir. Her algoritma belli topografik yüzeylerde daha iyi sonuç vermektedir. Fakat yeryüzü, genel durumu itibariyle homojen değildir. Algoritmalar çalışma alanının bir kısmında çok iyi sonuçlar verebilirken bir başka kısmında ise hiç filtreleme yapmamış olabilmektedir. Bu bağlamda daha güçlü algoritmaların geliştirilmesi üzerinde çalışılması gereken önemli bir konudur.

İki farklı çalışma alanı için dört farklı algoritma ile filtrelenen nokta bulutları, SYM üretiminde kullanılmıştır. Üretilen SYM' ler ile referans SYM, raster bazlı karşılaştırılmış ve farklı topografik özellikleri olan bu alanlar için en uygun sonucu

veren filtreleme algoritmaları belirlenmiştir. Eğimli, yükseklik farkı çok belirgin olan ve ağaç toplulukları da içeren F21 bölgesi için morfolojik filtreleme %82 gibi bir korelasyon ile en uygun filtreleme metodu olmuştur. Yüksek sık binaların, yollar ve ağaçlık alanların bulunduğu yerleşim alanından bir bölge olan G21 bölgesi için ise polinomal filtreleme %92 gibi korelasyon ile en uygun filtreleme metodu seçilmiştir.

Bu sonuçlar tamamen deneyseldir ve genel geçer değildir. Daha uygun arama pencereleri, eşik değerleri ve iterasyon ile başka bir filtreden daha iyi sonuç elde etmek ya da elde edilen bu sonuçları iyileştirmek mümkündür. Algoritmalar ne kadar güçlü olursa olsun tamamen aykırı değerlerden arındırılmış ve sadece çıplak yer yüzeyine ait bir veri seti elde etmek mümkün değildir. Bu anlamda LiDAR verilerinden elde edilen SYM'leri kullanırken tamamen yer noktalarının kullanılmadığı unutulmamalı ve olası hatalara dikkat edilmelidir.

Çalışma bölgesi olarak seçilen F21 ve G21 bölgeleri için en yüksek korelasyona sahip filtreleme sonuçları SAM üretiminde kullanılmıştır. Her iki bölge için üç farklı enterpolasyon yöntemi seçilerek filtrelenmiş nokta bulutuna uygulanmıştır. Üretilen modeller ile referans veri arasındaki fark yüzeyleri oluşturulmuştur. SAM sonuç ürünleri arasında görsel ve istatistiksel sonuçları karşılaştırmak mümkündür. Fark yüzeyinin karakteristiği arazi yapısına paralel olarak değişmektedir.

En uygun enterpolasyon seçiminde karar vermek kolay değildir çünkü filtreleme doğruluğunun sonuçları ciddi oranda etkilediği görülmektedir. SAM, yapısı gereği arazideki karakteristik özellikleri gösterdiği için filtrelemeden kalan aykırı değerler arazi karakteristiği modele eklenmektedir. Her enterpolasyon yöntemi farklı yaklaşımla çalıştığı için bu aykırı değerlerin modele etkisi de farklı olmaktadır. Bu durumda en uygun enterpolasyona karar vermek yanıltıcı olabilir. Ancak çalışma alanı içinde lokal alanlar irdelenirse, daha iyi bir karar verilebilir.

Sonuç olarak şu söylenebilir ki, yer yüzeyinin yükseklik modellenmesinde ister SYM ister SAM olsun LiDAR verisinin sistem doğruluğu dışında, çalışma bölgesine ait eğim, obje tipi, en büyük obje boyutu ve arazi süreksizliği gibi karakteristik bilgiler filtreleme doğruluğunu etkilemektedir. Yine bu bilgileri temel alarak seçilecek pencere boyutu ve eşik değer gibi parametreler de doğruluğa doğrudan etki etmektedir. Ayrıca arazide

bulunan farklı yüksekliğe sahip binalar, cami gibi çok yüksek ve karmaşık binalar, çok sık ağaç topluluklar, sıralı ağaç toplulukları gibi birçok topografik özelliğin filtreleme ve model doğruluğunu etkilediği görülmüştür. Enterpolasyon yöntemleri ise veri setine göre farklı sonuçlar verebilmektedirler. Tüm bunlardan yola çıkarak, LiDAR nokta bulutlarının SYM ve SAM üretimi için tamamen otomasyona sahip bir sistemden henüz uzak olduğu ve hala kullanıcı kararlarına bağlı olduğu görülmektedir. Bu durumu aşmak için güçlü filtreleme algoritmaları üretmenin yanı sıra farklı veri tipleri ile entegrasyonun ne gibi katkıları olabileceği araştırılması gereken bir konu olarak karşımızda durmaktadır.

6. KAYNAKLAR

- Akel, N. A., and Kremeike, K. (2005). Dense DTM generalization aided by roads extracted from LiDAR data. ISPRS WG III/3, III/4, V/3 Workshop "Laser Scanning 2005", Enschede, the Netherlands, 54-59.
- Akel, N. A., and Zilberstein, O. (2003). Automatic DTM extraction from dense raw LiDAR data. Proceeding of FIG Working Week, Paris, France, 1-10.
- Akel, N. A., and Zilberstein, O. (2004). A robust method used with orthogonal polynomials and road network for automatic terrain surface extraction from LiDAR data in urban areas. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. **35**, ISPRS, 274-279.
- ASPRS, 2005. LAS Specification Version 1.1. Bethesda, Maryland: *American Society for Photogrammetry and Remote Sensing*. 11 pp.
- ASPRS, 2010. American Society for Photogrammetry and Remote Sensing Standards Committee LASer (LAS) File Format Exchange Activities (URL: http://www.asprs.org/society/committees/standards/LiDAR_exchange_format.html, accessed June 1, 2010).
- ASPRS, 2010. American Society for Photogrammetry and Remote Sensing Standards Committee LASer (LAS) File Format Exchange Activities (URL: <http://www.asprs.org/Press-Releases/LAS-1-4-Specification-Approved-by-ASPRS-Board.html>, erişim 1 Mayıs, 2014).
- Axelsson, P. (1999). Processing of laser scanner data-algorithms and applications. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, (**54**), 138–147.
- Axelsson, P. (2000). DTM generation from laser scanner data using adaptive TIN models. *Int. Arch. Photogram. Remote Sens.*, pt. B3, vol. **33**, pp. 85–92.
- Baltsavias, E. P. (1999). A comparison between photogrammetry and laser scanning. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, (**54**), 83–94.
- Briese, C. (2010). Extraction of digital terrain models. In G. Vosselman, and H. Maas (Eds.), *Airborne and Terrestrial Laser Scanning*. Dunbeath: Whittles Publishing. pp.147-150
- Chen H. (2012). Digital terrain models generation from airborne LiDAR point clouds using a multi-scale terrain filterin method. Yüksek lisans tezi, The University of Waterloo.
- Chen, Q., and Peng, G. (2007). Filtering airborne laser scanning data with morphological methods. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing Journal of the American Society For Photogrammetry And Remote Sensing*, **73**(2): 175-185.
- Doneus, M., and Briese, C. (2006). Digital terrain modeling for archaeological interpretation within forested areas using full-waveform laser scanning. The 7th International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Cultural Heritage VAST,Zypern, 569-579.
- Elmqvist, M. (2002). Ground surface estimation from airborne laser scanner data using active shape models. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science*, XXXIV, Part 3A: 114-118.

- Forlani, G., and Nardinocchi, C. (2007). Adaptive filtering of aerial laser scanning data. ISPRS Workshop on Laser Scanning 2007 and SilviLaser 2007, Finland, 130-135.
- González, R. C., Woods, R., and Eddins, S. L. (2004). Digital image processing using matlab. Pearson Prentice Hall. 255-262.
- Guo, Q., Li, W., Yu, H., and 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.
- Guan, H. (2011). Position relations between IMU, GPS and laser scanner. Unpublished manuscript, University of Waterloo, Waterloo, ON.
- Guan, H., Li, J. and Chapman, M.A. (2011). Urban thematic mapping by integrating LiDAR point cloud with colour imagery, *GEOMATICA*, **65**(4): 375-385.
- Habib, A.; Ghanma, M.; Morgan, M.; Al-Ruzouq, R. Photogrammetric and LiDAR Data Registration Using Linear Features. *Photogramm. Eng. Remote Sens.* 2005, **71**, 699-707.
- Hu, Y. (2003). Automated extraction of digital terrain models, roads and buildings using airborne LiDAR data. Doktora tezi, The University of Calgary.
- Hodgson, M.E.; Jensen, J.; Raber, G.; Tullis, J.; Davis, B.A.; Thompson, G.; Schuckman, K. An evaluation of LiDAR-derived elevation and terrain slope in leaf-off condition. *Photogramm. Eng. Remote Sens.* 2005, **71**, 817-823.
- Jiang, J., Ming Y., Zhang, Z., Zhang, J. (2005). Point-based 3D Surface Representation from LiDAR Point Clouds. The 4th ISPRS Workshop on Dynamic and Multi-dimensional GIS. September 6-8, 2005, Wales, UK, 1-4
- Kilian, J., Haala, N., and English, M. (1996). Capture and evaluation of airborne laser scanning data. IAPRS XXXI 3, Vienna, 383-388.
- Kobler, A., Pfeifer, N., Ogrinc, P., Todorovski, L., Ostir, K., and Dzeroski, S. (2007). Repetitive interpolation: A robust algorithm for DTM generation from aerial laser scanner data in forested terrain. *Remote Sensing of Environment*, **108**(1), 9-23.
- Korupa, O., Montgomery, D. R., and Hewitt, K. (March 2010). Glacier and landslide feedbacks to topographic relief in the himalayan syntaxes. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, **107**(12), 5317-5322.
- Kraus, K., and Pfeifer, N. (1998). Determination of terrain models in wooded areas with airborne laser scanner data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, **53**(4), 193-203.
- Kraus, K., and Pfeifer, N. (2001). Advanced DTM generation from LiDAR data. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, (XXXIV(3/W4): 23-30).
- Kraus, K., and Rieger, W. (1999). Processing of laser scanning data for wooded areas. Wichmann Verlag, Heidelberg, 221-231.
- Krzystek, P. (2003). Filtering of laser scanning data in forest areas using finite elements. ISPRS Workshop '3-D reconstruction from airborne laserscanner and InSAR data', TU Dresden, Germany, 8-10.

- Li, Z., Zhu, Q., and Gold, C. (2005). *Digital terrain modeling: Principles and methodology*. Boca Raton, FL: CRC Press.
- Liadsky, J. (2007). Recent advancements in commercial LiDAR mapping and imaging systems. Informally published manuscript, Optech Incorporate, Available from NPS LiDAR Workshop. Retrieved from <http://www.nps.edu/academics/Centers/RemoteSensing/Presentations/LiDAR/Presentations/RecentAdvancements.pdf>
- Lin, Y.; Mills, J.P. Factors influencing pulse width of small footprint, full waveform airborne laser scanning data. *Photogramm. Eng. Remote Sens.* 2010, **76**, 49-59.
- Liu, X., Zhang, Z., Peterson, J., and Chandra, S. (2007). LiDAR-derived high quality ground control information and DEM for image orthorectification. *GeoInformatica*, **11**(1), 37-53.
- Liu, X. (2008). Airborne LiDAR for DTM generation: Some critical issues. *Progress in Physical Geography*, **32**(1), 31-49.
- Mantis. (2010). History of LiDAR. Retrieved from <http://xipar.info/historyLiDAR.html>
- Masaharu, H., and Ohtsubo, K. (2002). A filtering method of airborne laser scanner data for complex terrain. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing Commission III, (Working Group III/3), pp. 175-185.
- Maune D. F. (Ed) (2007). *Digital Elevation Model Technologies and Applications: The DEM user Manual*. ASPRS, 2. Edition, Maryland, USA.
- Meng, X., Wang, L., Silván-Cárdenas, J. L., and Currit, N. (2009). A multi-directional ground filtering algorithm for airborne LiDAR. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, **64**(1), 117-124.
- Meng, X.; Wang, L.; Currit, N. Morphology-based building detection from airborne LiDAR data. *Photogramm. Eng. Remote Sens.* 2009, **75**, 427-442.
- Meng, X., Currit, N., and Zhao, K. (2010). Ground filtering algorithms for airborne LiDAR data: A review of critical issues. *Remote Sensing*, (2), 833-860
- NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) Coastal Services Center. 2012. "LiDAR 101: An Introduction to LiDAR Technology, Data, and Applications." Revised. Charleston, SC: NOAA Coastal Services Center.
- Petzold, B., Reiss, P., and Stossel, W. (1999). Laser scanning-surveying and mapping agencies are using a new technique for the derivation of digital terrain models. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, **54**, 95-104.
- Pfeifer, N. (2001). Derivation of digital terrain models in the scope environment. Proceedings of OEEPE Workshop on Airborne Laser Scanning and Interferometric SAR for Detailed Detailed Digital Elevation Models, Stockholm, Sweden. (Official Publication No. 40.).
- Pfeifer, N., and Mandlbürger, G. (2008). LiDAR data filtering and DTM generation. In S. Jie, and Charles K. Toth (Eds.), *Topographic laser ranging and scanning: Principles and processing*, CRC Press, NW, pp. 308-331
- Pfeifer, N. (2011). LiDAR: Theory, point cloud, DTM. Informally published manuscript, Fayetteville State University, North Carolina.

- Pike, R. J. (1988). The geometric signature: Quantifying landslide-terrain types from digital elevation models. *Earth and Environmental Science Mathematical Geology*, **20**(5), 491-511.
- Petzold, B., Reiss, P., and Stossel, W. (1999). Laser scanning-surveying and mapping agencies are using a new technique for the derivation of digital terrain models. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, **54**, 95–104.
- Popescu, S.; Zhao, K. A voxel-based LiDAR method for estimating crown base height for deciduous and pine Trees. *Remote Sens. Environ* 2008, **112**, 767-781.
- Raber, G.T.; Jensen, J.R.; Schill, S.R.; Schuckman, K. Creation of Digital Terrain Models using an adaptive LiDAR vegetation point removal process. *Photogramm. Eng. Remote Sens.* 2002, **68**, 1307-1316.
- Roggero, M. (2002). Object segmentation with region growing and principal component analysis. in Proc. ISPRS Commission III, Symposium 2002, Graz, Austria, September 2002, pp. A-289-294.
- Silván-Cárdenas, J. L., and 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. IAPRS, XXXIV, 3/W4, Annapolis, MD, 203-210.
- Sithole, G., and Vosselman G., (2003). Comparison of filtering algorithms, Proceedings of the ISPRS Working Group III/3 Workshop: 3-D Reconstruction from Airborne Laserscanner and InSAR data, October, Dresden, Germany, URL:http://www.isprs.org/commission3/wg3/workshop_laserscanning/
- Sithole, G., and 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**(1-2), 85-101.
- Sithole, G., and Vosselman, G. (2005). Filtering of airborne laser scanner data based on segmented point clouds. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, **36**(Part 3/W19), 66-71.
- Sohn, G. and Dowman I. (2002). Terrain surface reconstruction by the use of tetrahedron model with the MDL criterion. Proceedings of the Photogrammetric Computer Vision, ISPRS Commission III, Symposium 2002. 336–244.
- Toutin, T. (2008). ASTER DEMs for geomatic and geoscientific applications: A review. *International Journal of Remote Sensing Archive*, **29**(7), 1855-1875
- Tóvári, D., and Pfeifer, N. (2005). Segmentation based robust interpolation – a new approach to laser data filtering. ISPRS WG III/3, III/4, V/3 Workshop "Laser Scanning 2005", Enschede, the Netherlands, 79-84.
- Vosselman, G. (2000). Slope based filtering of laser altimetry data. IAPRS XXXIII, B3/2, Amsterdam, 203-210.
- Wack, R., and Wimmer, A. (2002). Digital terrain models from airborne laser scanner data - a grid based approach. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXIV(3B): 293-296.
- Zhang, K. (2003). A progressive morphological filter for removing non-ground measurements

from airborne LIDAR data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **41**(4), 872-882.

Zhang, K. and Cui, Z. (2007). Airborne LiDAR Data Processing and Analysis Tools (ALDPAT 1.0), International Hurricane Research Center, Department of Environmental Studies, Florida International University.

1. <http://www.asprs.org/Committee-General/LASer-LAS-File-Format-Exchange-Activities.html>, 12.02.2014
2. http://forsys.cfr.washington.edu/fusion/fusion_overview.html, 11.02.2014
3. <http://www.forestry.gov.uk/forestry/INFD-6RVC9J>, 11.02.2014
4. <https://courseware.e-education.psu.edu/courses/bootcamp/lo04/cg.html>, 04.03.2014
5. <http://resources.arcgis.com/en/help/main/10.1/index.html#/015w00000051000000,27.01.2014>
6. <https://www.e-education.psu.edu/LiDAR/book/export/html/1873>, 07.04.2014
7. <http://sites.bu.edu/LiDAR/files/2013/09/echidna11.jpg>, 09.04.2014

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Nizar POLAT
Doğum Yeri ve Tarihi : Şanlıurfa 20.08.1986
Yabancı Dili : İngilizce
İletişim (Telefon/e-posta) :555 743 97 06 –npolat@aku.edu.tr

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise : Şanlıurfa Anadolu Lisesi-2005
Lisans : İstanbul Teknik Üniversitesi- 2012
Yüksek Lisans : Kocatepe Üniversitesi-2014

Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl :AKÜ Mühendislik Fakültesi – 2 Yıl

Yayınları (SCI ve diğer) :

1. Uysal M., Toprak A.S., Polat N., Photo Realistic 3D Modeling with UAV: Gedik Ahmet Pasha Mosque in Afyonkarahisar, CIPA 2013 Symposium, 3-6 Eylül 2013, 659-662, 2013
2. Yakar M., Uysal M., Toprak A.S., Polat N., 3D modeling of historical Doger Caravansaries by Digital Photogrammetry, CIPA 2013 Symposium, 3-6 Eylül 2013, 695-698, 2013
3. Uysal M., Toprak A.S., Polat N., 2013,Afyon Gedik Ahmet Paşa (İmaret) Camisinin Fotogrametrik Yöntemle Üç Boyutlu Modellenmesi, TUFUAB 2013, Trabzon
4. Yakar M., Uysal M., Toprak A.S., Polat N., 2013, Afyon Döğer Kervansarayının Fotogrametrik Rölöve Alımı ve Üç Boyutlu Modellenmesi,TUFUAB 2013, Trabzon.