

Hava Lidar Verilerinde Kullanılan Filtreleme Algoritmalarının İncelenmesi

Barış Süleymanoğlu^{1*}, Metin Soycan¹

¹Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 34220, İstanbul.

Özet

Lidar sistemleri çok geniş uygulama alanına sahip gelişmekte olan bir teknolojidir. Lidar sistemi farklı platformlarda kullanılarak (uçak, helikopter) kısa zaman içerisinde, doğruluğu yüksek nokta bulutu verisi elde edilmektedir. Bu sistem ile elde edilen nokta bulutu verisi Sayısal Yükseklik Modellerinin oluşturulmasında ana veri kaynağı haline gelmiştir. SYM'ler yer yüzeyinin topoğrafik yapısının matematiksel olarak gösterilmesinde kullanılan ve taşkın risk yönetimi, altyapı planlaması, çevresel koruma gibi birçok CBS çalışmalarına altlık oluşturan temel veri kaynağı halini almıştır. Ancak SYM'nin oluşturulabilmesi için zemin noktalarına ihtiyaç duyulmaktadır. Lidar nokta bulutu verisinde zemin verisi ile birlikte doğal ve yapay bütün objelerden yansıyan veriler yer almaktadır. SYM'nin oluşturulabilmesi için nokta bulutu verisinin filtrelenerek sadece zemin verisinin ayrılmasına ihtiyaç duyulmaktadır.

Filtreleme işleminin yapılabilmesi için geliştirilmiş birçok farklı algoritma bulunmaktadır. Bu çalışmada hava Lidar filtreleme algoritmaları geliştirilirken dikkat edilen özellikler, filtrelemede kullanılan yazılımlar ve filtreleme algoritmaları ile ilgili kısa bilgiler verilmiştir. Bu algoritmalar maksimum yerel eğim(MLS), uyarlanabilen TIN(ATIN), genişleyen pencereler ile yükseklik eşik değeri(ETEW) ve progresif morfolojik (PM) filtreleme algoritmaları ile 2 farklı arazi yüzeyinde uygulama gerçekleştirilmiştir.

Anahtar Sözcükler

Lidar, Filtreleme Algoritmaları, Sayısal Yükseklik Modelleri, Sayısal Yüzey Modelleri

Abstract

Lidar systems are an emerging technology with a wide range of applications. Using Lidar system on different platforms(aircraft, helicopter) a high accuracy point cloud is obtained in a short time. The point cloud data obtained with this system has become the main data source in the creation of DEM. DEM have become the main source of data for GIS studies such as flood risk management, infrastructure planning and environmental protection. Ground points are needed to create DEM. However, the laser point cloud data contains data that are reflected from all natural and artificial objects along with ground data. In order to create DEM, the ground data can be obtained by filtering the raw lidar data. This process is called filtering.

There are many different algorithms developed for the filtering process. In this study, brief information about airborne Lidar filtering algorithm, software used for filtering process, technical consideration for ground filter development and difficult ground features for LIDAR ground filtering is given. From these algorithms, study have been done with maximum local slope(MLS), Adaptive TIN(ATIN), Elevation threshold with expand window(ETEW) and Progressive morphology (PM) algorithm in two different terrain.

Keywords

Lidar, Filtering Algorithms, Digital Elevation Models, Digital Surface Models

1. Giriş

Sayısal Yükseklik Modelleri arazi ile ilgili coğrafi bilgi sistemleri uygulamalarının ana veri kaynağı haline gelmektedir. Sayısal yükseklik modelleri bina çıkarımı, 3B şehir modelleme, hidrolojik modelleme, taşkın analizleri, havza analizleri, kıyı yönetimi ve orman uygulamalarında kullanılmaktadır (Liu (2008)). SYM'lerin üretilmesi için yoğun, doğruluğu yüksek 3B nokta verilerine ihtiyaç vardır. Geleneksel yöntemler (Total Station, GPS ve Fotogrametri) kullanılarak bu tip verilerin elde edilmesi çok maliyetli, zaman alıcı veya bazı durumlarda (sık ormanlık alanlarda) imkansız olmaktadır. Bu zorlukları aşmak için yeni teknolojiler geliştirilmektedir. Lidar teknolojisi de bu amaç için geliştirilen ve son yıllarda kullanım alanı giderek artan önemli bir teknolojidir. Bu sistem farklı platformlara entegre edilerek (uçak, helikopter ve insansız hava araçları) büyük alanların hızlı ve düşük maliyetli bir şekilde taranarak bu alanlara ait yoğun ve doğruluğu yüksek 3B nokta verisinin elde edilmesini sağlamaktadır(Liu (2008)). Lidar sistemleri tarama yapılan alanlardaki zemin yüzeyi ve bu yüzeye eklenmiş doğal ve yapay bütün nesnelerin (bina, ağaç, çıplak arazi yüzeyi, araba..) verilerini sisteme kaydeder. SYM'lerin oluşturulabilmesi için ise sadece zemin verisine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu verinin elde edilebilmesi için zemin verileri ile zemine ait olmayan verilerin ayrılması gerekmektedir. Bu işleme ise filtreleme denilmektedir (Soycan (2011), Süleymanoğlu (2016)).

Lidar verilerinin filtrelenebilmesi için çok farklı filtreleme algoritmaları geliştirilmiştir. Bu algoritmalar zemin verisini belirleyebilmek için eğim, yükseklik farkı gibi farklı parametreleri kullanmaktadır. Briese (2010) filtreleme algoritmalarını 4 farklı kategoriye ayırmıştır. Bunlar morfolojik filtreleme algoritmaları, kademeli sıklaştırma algoritmaları, yüzey-temelli filtreleme algoritmaları ve bölümlenme temelli filtreleme algoritmalarıdır. Bu filtreleme algoritmalarının uygulanabileceği birçok ücretsiz yazılım geliştirilmiştir. Ayrıca lisanslı paket programlarına eklenen araç çubukları kullanılarak Lidar

* Sorumlu Yazar E-posta: bariss@yildiz.edu.tr (Barış Süleymanoğlu)

verilerinin filtrelenebilirliği de dahil birçok işlem yapılabilmektedir. Ücretsiz yazılımlardan en önemlileri ALDPAT, BCAL Lidar tools, FugroViewer, Fusion/LDV, MCC LİDAR ve GRASS GIS'tir. Lidar verilerinin işlenmesine yönelik kullanılan paket programlarına ise Terrasolid, SCOP++, ArcGIS, LASTool ve Global Mapper örnek verilebilir (Fernandez (2007), Zhang K. ve Cui Z. (2007)).

2. Filtreleme Algoritmalarının İncelenmesi

Yukarıda da belirtildiği gibi filtreleme algoritmaları zemin verisinin elde edilmesi için kullanılmaktadır. Zemin verilerinin elde edilebilmesi için zemin noktalarının fiziksel karakteristiklerinin anlaşılması gerekmektedir. Meng ve ark. (2010) zemin noktalarının karakteristik özelliklerini 4'e ayırmıştır. Bunlar:

En Düşük Yükseklik: Zemin noktaları belirli bir alandaki en düşük yüksekliğe sahip noktalardır.

Zemin Yüzeyinin Dikliği: İki komşu zemin noktası arasındaki eğim farkı zemin ve zemine ait olmayan noktalar arasındaki eğim farkı değerinden daha düşüktür.

Zemin Noktaları Arasındaki Yükseklik Farkı: Komşu zemin noktaları arasındaki yükseklik farkı ve yükseklik değişimi genel olarak düşüktür.

Zemin Yüzeyinin Homojenliği: Zemin yüzeyi genel olarak sürekli ve pürüzsüzdür.

Bütün bu özellikler zemin noktalarının filtrelenebilirliği için geliştirilen algoritmaların temelini oluşturmaktadır. Birçok filtreleme algoritması temel olarak bu dört özellikten birini kullanarak zemin verisini ayıklamaktadır. Ancak hiçbir filtreleme algoritması yüzde yüz hatasız çalışmamakla birlikte algoritmanın çalışma prensibine göre farklı arazi yüzeylerinde hatalı sonuçlar elde edilmektedir. Filtreleme algoritmalarının filtrelemede zorlandığı farklı zemin yüzeyleri bulunmaktadır. Bunlar Sithole ve Vosselman (2004) tarafından 5'e ayrılmıştır. Bunlar aykırı değerler, karmaşık objeler, yüzeye ekli nesneler, bitki örtüsü ve devamsız yüzeylerdir. Neredeyse bütün filtreleme algoritmaları bu zemin yüzeylerinin yer aldığı alanların filtrelenmesinde hatalı sonuçlar üretmektedir.

2.1. Filtreleme Algoritmaları

Briese (2010) yukarıda da ifade edildiği gibi filtreleme algoritmalarını 4'e ayırmıştır. Bunlar morfolojik filtreleme algoritmaları, kademeli sınıflandırma filtreleme algoritmaları, yüzey temelli filtreleme algoritmaları ve parçalara ayırma ve kümeleme tabanlı filtreleme algoritmalarıdır.

Morfolojik filtreleme algoritmaları Haralick ve Shapiro (1992) tarafından geliştirilmiş matematiksel morfoloji temeline dayanmaktadır. Matematiksel morfoloji sayısal görüntü işlemede kullanılan morfolojik operatörleri temel olarak çalışır. Bu operatörler aşınma(eroze), genişleme(dilate), açılış(open) ve kapanış(close) operatörleridir. Bu operatörler kullanılarak görüntü üzerinde yalınlaştırma, basitleştirme ve görüntünün bazı bölgelerinin silinmesi gibi farklı işlemler yapılabilmektedir (Bayram (2016)). Bu temele dayanan ilk filtreleme algoritmalarından biri Lidenberger (1993) tarafından geliştirilmiştir. Lidenberger tarafından geliştirilen filtreleme algoritması lazer profil ölçerlerden elde edilen verilere uygulanmıştır. Bu algoritma büyüklüğü kullanıcı tarafından belirlenen arama pencereleri kullanmaktadır. Arama penceresi bir profil hattı boyunca tarama işlemini gerçekleştirerek pencere içerisinde yer alan en düşük yüksekliğe sahip noktaların seçilmesinde kullanılır. Kilian vd. (1996) sabit pencere büyüklüğüne bağlı olarak yaşanan kısıtlamaları ortadan kaldırmak için sabit pencere büyüklüğü yerine farklı büyüklüklere sahip birden çok arama penceresi boyutu kullanılmıştır. Daha sonra Zhang (2003) morfolojik filtreleme algoritmalarının farklı büyüklükteki objeleri filtrelemedeki zayıf yönlerini gidermek için pencere büyüklüğüne bağlı olarak değişen yükseklik eşik değeri parametresini tanımlamıştır. Böylece karmaşık arazi yapılarının daha iyi filtrelenebilirliği sağlanmıştır. Buna progresif morfolojik filtreleme algoritması denilmiştir. Vosselman (2000) geliştirdiği filtreleme algoritmasında zemin ve zemine ait olmayan noktaların belirlenmesinde iki nokta arasındaki yükseklik farkı değerini kullanmıştır. Bu filtreleme algoritmasının yükseklik değişiminin fazla olduğu alanlarda hatalı sonuçlar verdiği görülmüştür.

Diğer bir filtreleme algoritması çeşidi ise kademeli sınıflandırma algoritmalarıdır. Bu filtreleme algoritmaları morfolojik filtreleme algoritmalarından farklı bir strateji izlemektedir. Bu algoritmalar filtreleme işlemine seçilmiş az sayıdaki zemin noktası ile başlayarak işlem sonuna kadar iteratif bir şekilde zemin nokta verisine yeni noktalar ekleyerek filtreleme işlemini sonuçlandırır (Briese (2010)). Axelsson (2000) uyarlanabilir TIN filtreleme algoritmasını geliştirmiştir. Bu algorithmada ilk olarak az sayıda zemin noktası seçilerek kaba bir TIN yüzeyi oluşturulur. Daha sonra veri setindeki bütün noktalar belirlenen eşik değerlere uygunsa zemin noktalarına eklenerek yüzey yeniden oluşturulur. Sohn ve Downman (2002) tarafından geliştirilen filtreleme algoritması Axelsson (2000) ile benzer yaklaşımı kullanır. Bu filtreleme algoritması filtreleme yapacağı alanın köşe noktalarındaki en düşük yüksekliğe sahip noktaları seçerek TIN yüzeyini oluşturur.

Üçüncü önemli filtreleme algoritması ise yüzey temelli filtreleme algoritmasıdır. Bu filtreleme algoritmaları iteratif bir şekilde çalışarak yüzeyin tamamını filtreler. Veri setindeki bütün noktalara eşit ağırlıklar atanarak yaklaşık sayısal yükseklik modeli oluşturulur. Noktaların bu yüzeye katkısı adım adım belirlenerek sayısal yükseklik modeline eklenir yada yüzeyden elenir (Liu (2008)). Bu filtreleme algoritması ilk Kraus ve Pfeifer (1998) tarafından geliştirilmiştir. Nokta bulutu verisine eşit ağırlıklar atanarak ortalama SYM yüzeyinin oluşturulması sağlanır. Bu yüzey gerçek zemin yüzeyi ile sayısal yüzey modeli arasında yer alan bir yüzeydir. Yüzey oluşturulduktan sonra nokta bulutu verisindeki her bir noktanın yüzeye dikey mesafesi hesaplanır. Eksi değer alan noktaların zemin noktaları, artı değer alan noktaların zemine ait olmayan noktalar

olması beklenir. Kraus ve Pfeifer (2001) ve Pfeifer et al.(2001) robust enterpolasyon yöntemindeki kısıtlamalardan dolayı algoritmayı hiyerarşik yapıya dönüştürmüşlerdir.

Son olarak yaygın kullanılan diğer filtreleme algoritması çeşidi ise parçalara ayırma ve kümeleme tabanlı filtreleme algoritmalarıdır. Bu filtreleme algoritmaları noktaların teker teker filtrelenerek sınıflandırılması yerine nokta gruplarının toplu bir şekilde filtrelenerek sınıflandırılması yaklaşımına dayanmaktadır (Briese (2010)). Sithole ve Vosselman (2005) tarama hattı sınıflandırma tekniğini kullanarak nokta bulutu verilerinin filtrelenerek sınıflandırılmasını sağlamıştır. Veri kümesinde yer alan noktalar arasındaki benzerliklerin tespit edilmesi bu filtreleme algoritmasının ilk adımıdır. Benzerlikleri tespit edilen noktalar aynı kümeye dahil edilir. Kümelerin sınıflandırılması ise topolojik ilişkilere bağlı olarak yapılmıştır. Tovari ve Pfeifer (2005) tarafından geliştirilen yaklaşımda kümeleme işlemi iteratif bir şekilde yapılmıştır. Bu yaklaşımda işlem tek bir noktadan başlar ve diğer noktalar belirli koşulları sağladıkları sürece kümelere eklenirler.

3. Filtreleme Algoritmalarının Kıyaslanmasına Yönelik Bir Uygulama : HGK Bergama Örneği

Bu çalışmada kullanılan veriler Harita Genel Komutanlığı tarafından İzmir Bergama ilçesinde Optech Pegasus HA-500 Lidar sistemi ile 1200 m yükseklikten elde edilmiştir (Kayi, (2015)). Bu çalışma kapsamında dört farklı filtreleme algoritmasının farklı arazi yüzeylerini filtrelemedeki performansları test edilmiştir. Bu amaçla birisi kırsal alanda diğeri ise yerleşim alanında olmak üzere iki farklı alan seçilmiştir. Bu alanlara ait sayısal yüzey ve sayısal yükseklik modelleri şekil 1 ve şekil 2’de görülmektedir.

Bu alanlar ALDPAT yazılımı içerisinde yer alan ATIN, ETEW, MLS ve PM filtreleme algoritmaları tarafından filtrelenmiştir. Sonuçlarının karşılaştırılabilmesi için referans yüzeyi Terrasolid yazılımı ile oluşturulmuştur. Filtreleme işlemleri sonucunda oluşturulan zemin yüzeyleri ile referans zemin yüzeyi arasında fark yüzeyleri oluşturularak bu yüzeylere ait istatistiki değerler hesaplanmıştır.

Şekil 1’de kırsal alanın ATIN, PM, MLS ve ETEW filtreleme algoritmaları tarafından filtrelenmesi sonucunda elde edilen sonuç yüzey ile referans zemin yüzeyi arasında oluşturulan fark yüzeyleri görülmektedir. Bu yüzeylere ait istatistiki değerler tablo 1’de gösterilmiştir. İstatistiki sonuçlar ve fark yüzeyleri incelendiği zaman bütün filtreleme algoritmalarının eğim farkının fazla olduğu ani yükseklik ve eğim değişimlerinin yaşandığı bölgelerde hatalı sonuçlar ürettiği görülmüştür. ETEW filtreleme algoritması ise diğer 3 filtreleme algoritmasına göre bu alanlarda daha fazla hata üretmiş ve yüzeyde çok sayıda pürüzlü alanların oluşmasına neden olmuştur.

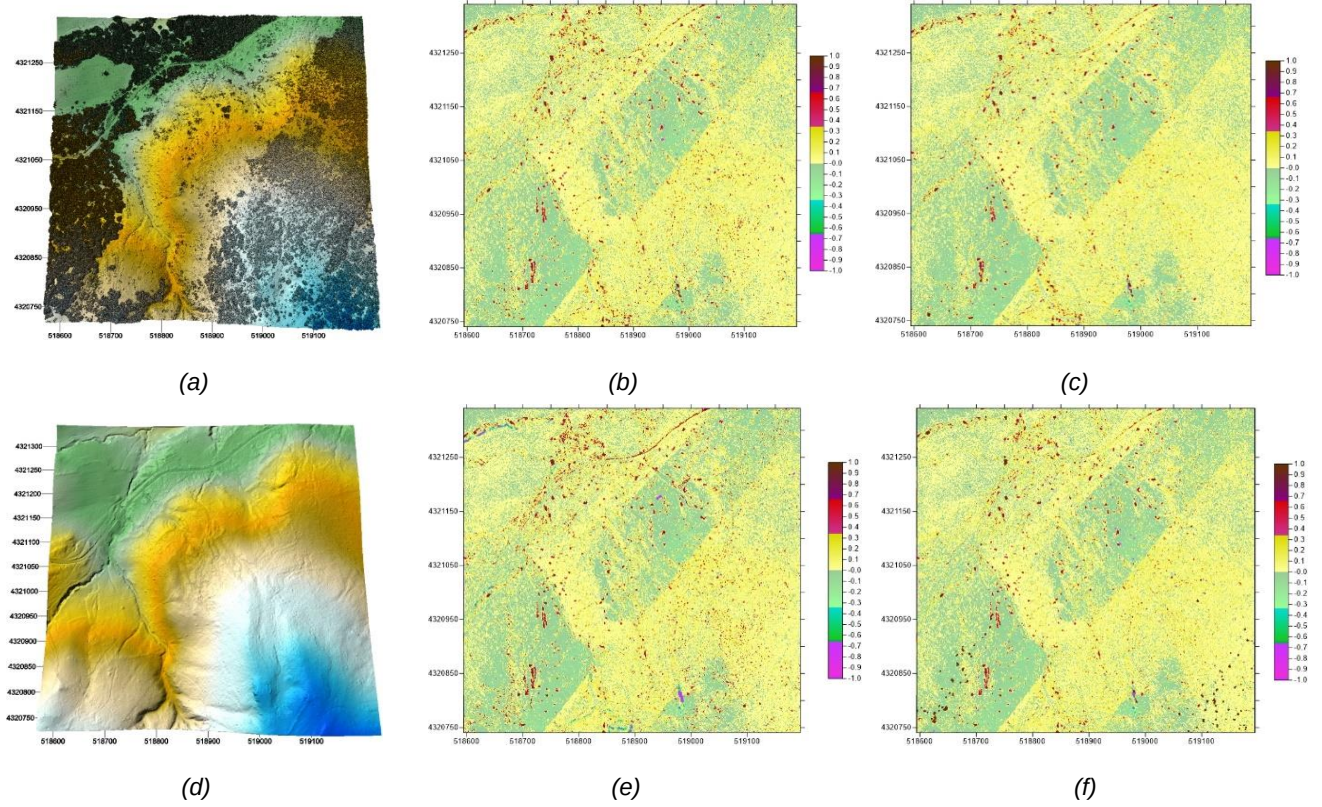
Tablo 1. Kırsal alan filtreleme algoritmaları sonuçları

	Kırsal Alan Filtreleme Sonuçları			
	ATIN-Ref	PM-Ref	MLS-Ref	ETEW-Ref
RMS (m)	0.35	0.33	0.34	0.41
Stn (m)	0.34	0.32	0.34	0.41
Min (m)	-19.74	-17.39	-17.39	-20.27
Max (m)	27.06	27.06	27.06	27.06

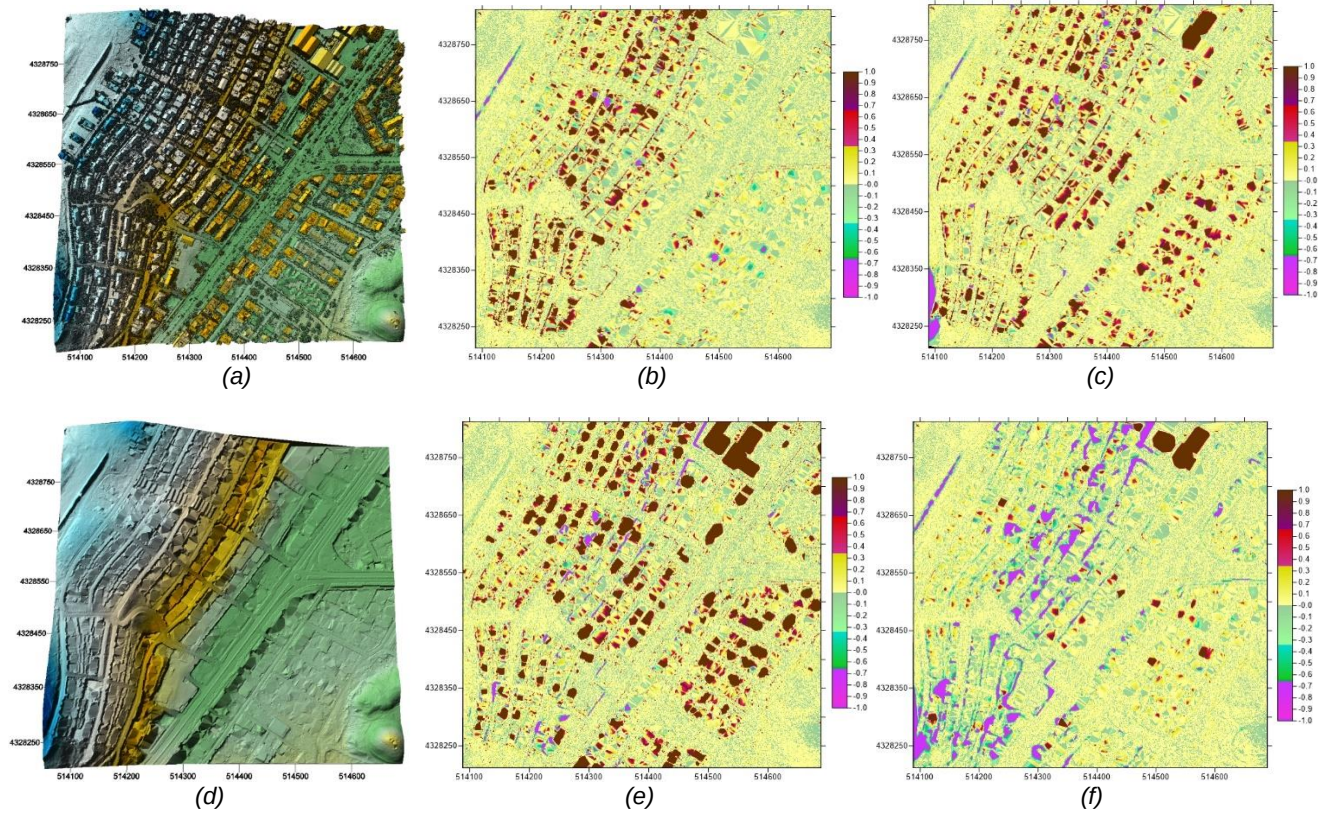
Şekil 2’de yerleşim alanının ATIN, PM, MLS ve ETEW filtreleme algoritmaları tarafından filtrelenmesi ile elde edilen sonuç yüzey ile referans zemin yüzeyi arasındaki fark yüzeyleri görülmektedir. Bu yüzeylere ait istatistiki değerlerde tablo 2’de verilmiştir. İstatistiki sonuçlar ve fark yüzeyleri incelendiği zaman yerleşim alanların yoğun olduğu bölgelerde bütün filtreleme algoritmalarının hatalı sonuçlar ürettiği görülmüştür. Ancak kompleks yapıların filtrelenmesinde ATIN filtreleme algoritması başarılı olurken diğer filtreleme algoritmaları farklı oranlarda hatalı sonuçlar üretmiştir.

Tablo 2. Yerleşim alan filtreleme algoritmaları sonuçları

	Yerleşim Alanı Filtreleme Sonuçları			
	ATIN-Ref	PM-Ref	MLS-Ref	ETEW-Ref
RMS (m)	0.51	0.44	1.22	0.54
Stn (m)	0.50	0.43	1.18	0.53
Min (m)	-5.75	-5.68	-6.16	-6.40
Max (m)	14.67	7.15	20.95	8.77



Şekil 1. Kırsal alana ait sayısal yüzey modeli(a), referans sayısal yükselik modeli(d), kırsal alanın filtrelenmesi sonucunda oluşan yüzeyler ile referans zemin yüzeyleri arasındaki fark yüzeyleri: ATIN(b), PM(c), MLS(e) ve ETEW(f)



Şekil 2. Yerleşim alanına ait sayısal yüzey modeli(a), referans sayısal yükselik modeli(d), yerleşim alanının filtrelenmesi sonucunda oluşan yüzeyler ile referans zemin yüzeyleri arasındaki fark yüzeyleri: ATIN(b), PM(c), MLS(e) ve ETEW(f)

4. Sonuçlar

Bu çalışma kapsamında Lidar filtreleme algoritmaları ve bu algoritmalar geliştirilirken dikkat edilen hususlar hakkında genel bilgiler verilmiştir. Daha sonra bu filtreleme algoritmalarından ATIN, PM, ETEW ve MLS filtreleme algoritmaları iki farklı arazi yüzeyinde denenmiştir. Filtreleme sonucunda oluşan yüzeyler ile referans zemin yüzeyleri arasında fark yüzeyleri oluşturulmuş ve bu yüzeylere ait istatistiki değerler hesaplanmıştır. Kırsal alanın filtrelenmesi sonucunda elde edilen sonuçlar ATIN için 35 cm, PM için 33 cm, MLS için 34 cm ve ETEW için ise 41 cm olarak bulunmuştur. Yerleşim alanının filtrelenmesi sonucunda elde edilen sonuçlar ATIN için 51 cm, PM için 44 cm, MLS için 1.22 m ve ETEW için ise 0.54 cm olarak bulunmuştur.

Kırsal alanda yapılan filtreleme sonucunda RMS ve Stn değerlerinin birbirine yakın sonuçlar verdiği görülmüştür. Ayrıca fark yüzeyleri 3B görsel bir şekilde incelenmiş ve genel olarak 4 filtreleme algoritmasının eğim ve yükseklik değişiminin az olduğu alanları filtrelemede başarılı olduğu görülmüştür. Buna rağmen ani eğim ve yükseklik değişimlerinin yaşandığı yoğun bitki örtüsü ile kaplı alanlarda hata miktarının ciddi oranda yükseldiği tespit edilmiştir.

Yerleşim alanında yapılan çalışmalarda MLS filtreleme algoritmasının çok büyük ve karmaşık binaların birçoğunu filtreleyemediği görülmüştür. ETEW ve PM filtreleme algoritmalarının ise yerleşim alanı içerisindeki büyük ve karmaşık binaların bir kısmını filtreleyemediği görülmüştür. ATIN filtreleme algoritmasının ise bu yapıları filtreleyebildiği görülmüştür. Ancak her dört filtreleme algoritması da yoğun yerleşim alanlarının olduğu bölgelerde hatalı sonuçlar üretmiştir. Bu anlamda hiçbir filtreleme algoritması için mutlak başarısından söz etmemiz mümkün değildir. Ancak çalışma alanı lokal olarak incelendiği zaman ATIN filtreleme algoritmasının diğer algoritmalara göre daha başarılı olduğu söylenebilir.

Her iki alanın filtrelenmesi ile elde edilen sonuçlar incelendiği zaman ATIN filtreleme algoritmasının diğer algoritmalara göre daha başarılı olduğu söylenebilir. Ancak yerleşim alanında ATIN algoritması da dahil bütün filtreleme algoritmaları yüksek oranda hatalı sonuçlar üretmiştir. Bu nedenle filtreleme algoritmalarının performansının artırılabilmesi için farklı algoritmaların birlikte kullanıldığı bütünleşik algoritmaların geliştirilmesi gerekliliği görülmüştür.

Teşekkür

Bu çalışma için Lidar verilerini bizimle paylaşan Harita Genel Komutanlığı yetkililerine teşekkürü bir borç bilirim.

Kaynaklar

- Axelsson, P.(2000)."DEM Generation from laser scanner data using adaptive TIN models". International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 33(Part B4), 110–117.
- Bayram B. (2016) YTÜ Sayısal Görüntü İşleme Ders Notları.
- Briese, C. (2010), Extraction of digital terrain models. Airborne and Terrestrial Laser Scanning’ın içinde Dunbeath: Whittles Publishing. pp.147-150
- Fernandez, J., & Singhanian,(2007). "An overview of lidar point cloud processing software". GEM Center Report 1–27.
- Haralick, R.M. and Shapiro,L.G., (1992), Computer and Robot Vision, Addison-Wesley, Longman Publishing Co. Inc, Boston, MA,USA
- Kayi, A., Erdoğan, M., Eker, O., (2015). "OPTTECH HA-500 ve RIEGL LMS- Q1560 ile gerçekleştirilen LİDAR test sonuçları", (2), 42–46.
- Kilian, J.,Haala,N & Englich, M. (1996). "Capture and evaluation of airborne laser scanner data". International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 31, 383–388.
- Kraus, K., & 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., & Pfeifer, N. (2001). "Advanced dtm generation from Lidar data". International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, XXXIV, 22–24.
- Lindenberger, J., 1993. Laser-profilmessungen zur topographischen gelaedeaufnahme, deutsche geodaetische kommission, Series C, No. 400, Munich.
- Meng, X., Currit, N., & Zhao, K. (2010). "Ground filtering algorithms for airborne LiDAR data: A review of critical issues". Remote Sensing, 2(3), 833–860
- Pfeifer, N, Stadler, P, Briese, C. (2001). "Derivation of digital terrain models In the scop++ environment". OEEPE Workshop on Airborne Laserscanning and Interferometric SAR for Digital Elevation Models, , 13. Retrieved from
- Sithole, G., &Vosselman, G. (2005)."Filtering of airborne laser scanner data based on segmented point clouds". GeoInformation Science,(February),66–71.
- Sithole, G., & 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.
- Sohn,G., &Dowman,I.(2002). "Terrain surface reconstruction by the use of tetrahedron model with the MDL criterion". International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 34(3A), 336–344.
- Soycan, M., Tunalio, N., & Öcalan, T.(2011)."Three dimensional modeling of a forested area using an airborne light detection and ranging method",581–595.
- Süleymanoğlu B. (2016), Lidar tekniği ile elde edilen nokta bulutların sınıflandırılması ve filtreleme algoritmalarının incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye
- Tóvári, D., & Pfeifer, N. (2005). "Segmentation based robust interpolation—a new approach to laser data filtering". Proceedings of the ISPRS Workshop Laser Scanning 2005, ISPRS Archives, XXXVI, 79–84.
- Vosselman, G.(2000). "Slope based filtering of laser altimetry data". International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 33, 33(Part B3/2), 678–684.
- Xiaoye Liu. (2008). "Airborne LiDAR for DEM generation: some critical issues". Progress in Physical Geography, 32(1), 31–49.
- Zhang, K., Chen, , Whitman, D., Shyu, M., Yan, J., Zhang, C., & Member, S. (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.