

Üçgenleme ve Enterpolasyon Temelli Lidar Filtreleme Algoritmalarının Performans Analizi

Abdullah Varlık¹, Fırat Uray¹

¹ Necmettin Erbakan Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, Konya
e-posta: furay@konya.edu.tr

Geliş Tarihi: 01.02.2017 ; Kabul Tarihi: 24.07.2017

Özet

Anahtar kelimeler

Lidar;
Nokta Bulutu
Filtreleme;
Filtreleme
Algoritmaları;
Uzaktan Algılama

Sayısal Arazi Modeli (SAM), ölçme ve planlama uygulamalarının temel bileşeni olduğu düşünüldüğünde daha hızlı şekilde ve daha büyük alanlar için bu modelin üretilebilmesi amacı ile son teknoloji yöntemleri tercih edilmektedir. Light Detection and Ranging (LiDAR) sistemleri son yirmi yılda bu görevi başarılı şekilde yerine getirmektedir. LiDAR teknolojisi ile elde edilen üç boyutlu nokta bulutundan arazi yüzeyini temsil eden modelin üretilebilmesi için insan yapımı objelerin ve bitki örtüsünün belirlenip çıkartılması gerekmektedir. Yükseklik farkının değişken ve fazla olduğu bölgelerde ise bu filtreleme işlemi başlı başına bir problem olarak kabul edilmektedir. Bu işlem sürecini otomatikleştirmek amacı ile araştırmacılar tarafından farklı yöntemlere dayanan LiDAR filtreleme teknikleri geliştirilmiştir. Filtreleme algoritmalarının performansını iyileştirmek için son yıllarda daha karmaşık işlem adımları iç içe kullanılarak yeni algoritmalar geliştirilmiş ve bu tekniklerden bazıları ticari yazılımlara eklenerek kullanıma sunulmuştur. Bu çalışma kapsamında geliştirilen Kriging enterpolasyon temelli filtre (KRIGF) tekniği ile ticari olarak dağıtılan bir LiDAR filtreleme yazılımında kullanılan üçgenleme temelli Adaptive Triangulated Network (ATIN) algoritmasının performansları karşılaştırılmıştır. International Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS) tarafından araştırmacılara ücretsiz sunulan farklı arazi tiplerine ait LiDAR verileri KRIGF ve ATIN algoritmaları ile filtrelenerek SAM oluşturulmuş ve referans arazi modeline karşı test edilmiştir.

Performance Analysis of Triangulation and Interpolation Based Lidar Filtering Algorithms

Abstract

Keywords

LiDAR;
Point Cloud Filtering;
Filtering Algorithms;
Remote Sensing

Digital Terrain Modeling (DTM) is considered to be the main component of survey and planning applications. Technological advances are closely followed to produce this model faster for larger areas. Light Detection and Ranging (LiDAR) systems have successfully accomplished this task in the last two decades. It is necessary to identify and remove the man-made objects and the plant cover from the 3D point cloud obtained by LiDAR technology in order to produce the terrain model representing the surface of the land. In the areas where the elevation differences are variable and too excessive, this filtering process is regarded as a problem in itself. In order to automate this process, LiDAR filtering techniques based on different methods have been developed by the researchers. More sophisticated processing steps have been implemented to improve the performance of filtering algorithms, and new algorithms have been developed and some of these techniques have been added to commercial softwares. The performance of the Kriging interpolation based filter (KRIGF) technique developed in this study and the triangular based Adaptive Triangulated Network (ATIN) algorithm which is used in a commercial LiDAR filtering software are compared. LiDAR dataset that contains various terrain types which are offered by International Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS) were filtered with KRIGF and ATIN algorithms and DTMs were generated from that filtered dataset.

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

1. Giriş

Fotogrametrik sistemlerle birlikte klasik ölçüm ve haritalama sistemleri ile kıyaslandığında LiDAR teknolojisi, geniş alanlarda yüksek çözünürlüklü harita yapımı için hızlı ve hassas bir alternatif olmayı sağlayan ve Sayısal Yükseklik Modeli (SYM) ve Sayısal Arazi Modeli (SAM) üretimi için öncelikli tercih edilen kabul görmüş bir tekniktir. Günümüzde pek çok Avrupa ülkesi ile Amerika Birleşik Devletleri ulusal SYM ve SAM ürünlerinin üretimi için LiDAR sistemini kullanmaktadır (Meng vd., 2010).

Yükseklik ve arazi modeli üretimi yanında yoğun nokta bulutu verisi içerdiği yükseklik bilgisi sayesinde nokta bulutlarının analizi ile temel yüzey elemanlarının (binalar, bitki örtüsü, elektrik ve boru hatları vb.) haritalanmasında kullanılmaktadır. Küçük yükseklik değişimlerini saptayabilmesinin yanında LiDAR nokta bulutları bitki örtüsünün üst yüzeyini dâhi belirleyebilmektedir. Bitki örtüsünün yükseklik yapısını ise çoklu sinyal dönüş özelliği sayesinde yapabilmektedir. Genel olarak LiDAR teknolojisi bu özellikleri sayesinde SYM üretimi için klasik fotogrametrik metotların yerini almaya başlamıştır.

Araştırmacılar, yeryüzüne ait noktaların ayırt edilip sınıflandırılabilmesi için birçok LiDAR filtreleme algoritması geliştirmişlerdir. Kısım düz ve obje yoğunluğu az olan çalışma bölgelerinde bu algoritmalar başarılı sonuçlar elde etmiştir. Fakat eğimli ve çeşitli boyutlardaki bina, bitki örtüsü vb. objeleri içeren bölgelerde filtreleme doğruluğu düşmektedir. Doğal karmaşıklığa sahip LiDAR verilerinin en doğru şekilde filtrelenmesi en önemli ihtiyaçlardandır, bu sebeple bahsedilen karmaşık arazi yüzeylerini en hassas şekilde sınıflandırabilen algoritmalar öncelikli tercih edilmekte ve nispeten pahalı ücretlerle kullanıcılara ulaşmaktadır (Meng vd., 2010).

İnternet üzerinde araştırmacılara sunulan LiDAR veri setleri ile araştırmacılar açık kaynak kodlu filtreleme algoritmaları geliştirebilmektedir. Bu

çalışmada da enterpolasyon tekniğine dayalı bir LiDAR filtreleme algoritması geliştirilmiş olup elde edilen sonuçlar üçgen temelli Adaptive Triangulated Irregular Network (ATIN) (Axelsson, 2000) algoritmasına karşı test edilmiştir.

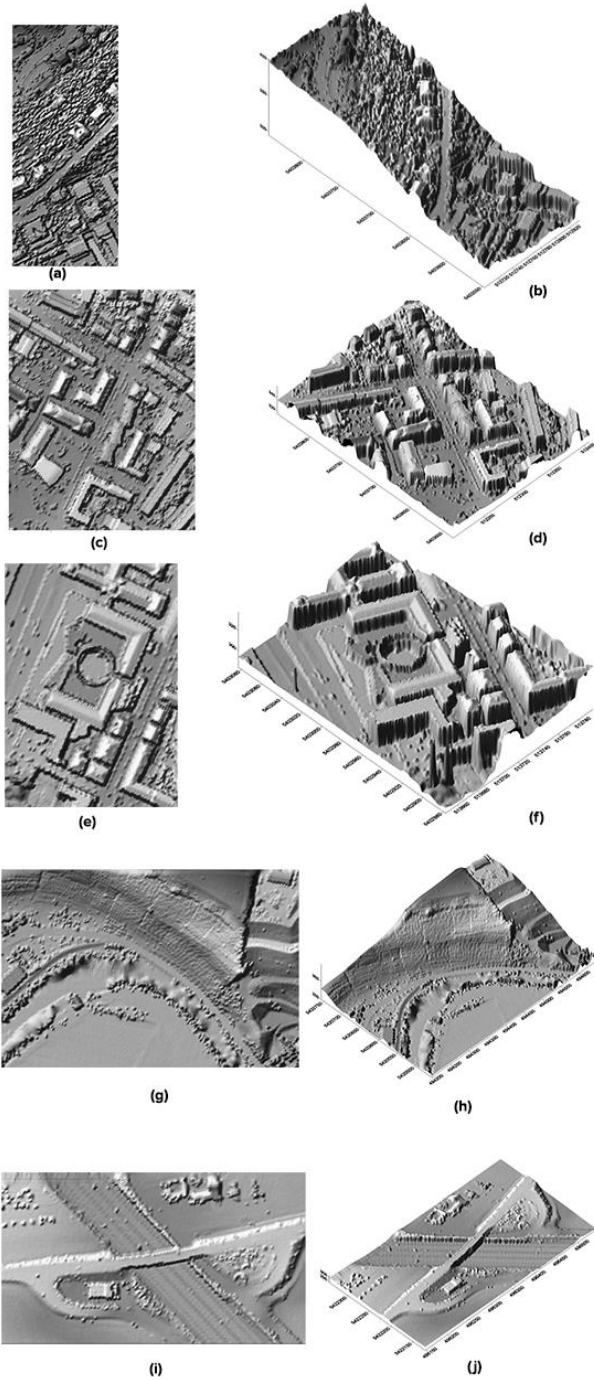
2. Çalışma Bölgesi

Farklı tipte arazi özelliklerine sahip 5 bölgeye ait LiDAR nokta bulutu veri seti kullanılarak bu bölgelere ait SAM elde edilmiştir. Arazi tipi birbirinden farklı bölgelerin seçim nedeni ise farklı algoritmaların bu çalışma alanlarında değişken performans göstermesidir (Meng vd., 2010).

Veri Adı	Boyut	Arazi Tipi	Kot Aralığı (m)
V11	134 x 303 m	Fazla eğimli, tepe üzerinde yapılar ve bitki örtüsü bulunmaktadır.	295 - 404
V12	205 x 270 m	Kısmen düz, bina ve yollar içermektedir.	325 - 357
V23	150 x 206 m	Düz, iç içe büyük boyutlu yapılar içermektedir.	284 - 327
V52	450 x 300 m	Nehir ve düzlükler ile kademeli yamaç içermektedir.	249 - 347
V71	400 x 220 m	Düz arazide köprülü yol içermektedir.	293 - 310

Tablo 1. LiDAR Veri Setlerinin Özellikleri

İlk veri seti olan V11, 38010 adet üç boyutlu koordinat verisi içermektedir. Verinin özelliği tepenin yamacında yerleşim bölgesi bulunması ve bitki örtüsü ile karışık bir şekilde yayılmasıdır. İkinci veri seti V12 ise 52119 adet nokta içermekte ve düz bir arazide farklı boyutlarda yapılar bulundurmaktadır. Diğer bir veri seti olan V23, 25095 adet nokta verisi ve iç içe geçmiş yapılar içermektedir. Dördüncü bölge V52 nehir yatağında bir bölgeye ait olup 22474 adet koordinat verisi bulundurmaktadır. Son veri seti V71 ise 15645 noktadan oluşmakta ve köprülü bir kavşak bölgesine aittir.



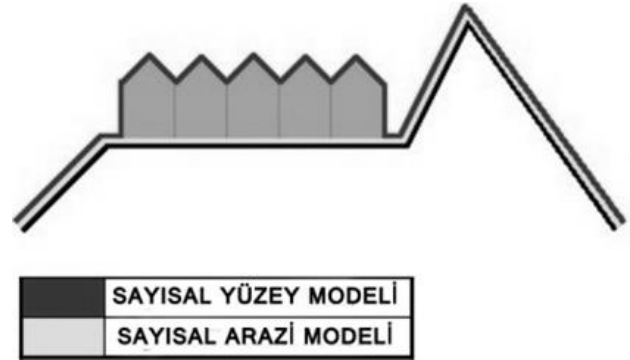
Şekil 1. Veri setlerinin 1m çözünürlüklü Sayısal Yükseklik Modeli

3. Metot

3.1. SYM ve SAM

Topoğrafik yüzeyin dijital olarak gösterilmesi için kullanılan Sayısal Yükseklik Modeli (SYM) yeryüzünü bitki örtüsü ve insan yapımı yapılarda dâhil şekliyle üç boyutlu koordinat sisteminde X, Y ve Z yükseklik değerleriyle ifade eden model olarak tanımlanabilir. Bu modeller genellikle raster formatında veya TIN (Triangulated Irregular Network) yani üçgenlenmiş düzensiz ağ modelleri ile gösterilir. Sayısal görüntü şeklinde ifade edilen SYM'ler de görüntüde ki her piksel bir yükseklik değeri barındırır (Maune, 2010).

Sayısal Arazi Modeli (SAM), genellikle sayısal yükseklik modeliyle aynı anlamda kullanılan fakat insan yapımı tüm objeler ve bitki örtüsü hariç arazi yüzeyini temsil eden, yükseklik değerleri bulunan noktalardan oluşan, arazinin gerçek şeklinin daha iyi biçimde sunulmuş biçimidir (Maune, 2010).



Şekil 2. Sayısal Yükseklik ve Arazi Modeli (Uray, 2016)

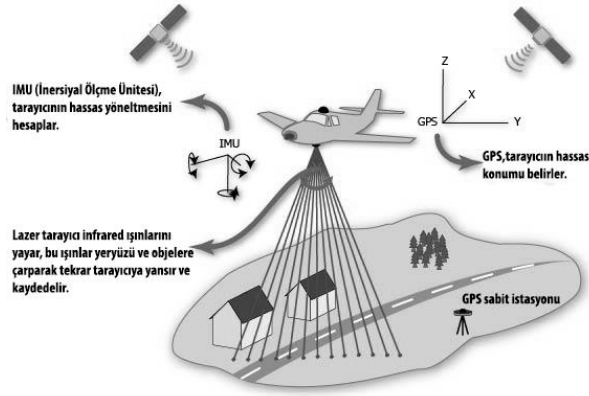
3.2. LiDAR Sistemleri

LiDAR sistemleri kullanıldıkları amaca ve projeye göre üç ana grup altında toplanmaktadır. Bunlar;

- Hava LiDAR (Airbone Lidar),
- Yersel LiDAR(Terrestrial Lidar),
- Mobil LiDAR(Mobile Lidar)'dır.

Hava Lidar sistemleri, lazer tarayıcı, GPS; Küresel konum belirleme sistemi (Global Positioning System) ve IMU; Dâhili ölçüm ünitesi (Internal Measurement Unit) bütünlük sisteminden oluşmaktadır. Bu sistemler lazer ışınlarını elektromanyetik dalgalar halinde göndererek yeryüzü üzerinden veri toplamaktadır. GPS/IMU

entegrasyonu sayesinde yeryüzüne ilişkin 3B (üç boyutlu) veri elde edilebilmektedir (Yılmaz vd., 2015).



Şekil 3. Hava Lidar Sistemi

LiDAR sağladığı yüksek çözünürlük ve doğruluk açısından topoğrafik harita yapımı için tercih edilmektedir. Hava fotoğrafları ile birlikte kullanıldığında yol, bina ve bitki örtüsü haritalaması için kullanılabilir. Sunduğu üç boyut özelliği ile LiDAR'ı özel yapan, karmaşık topoğrafyalar, dağlık araziler de dâhil yer yüzeyi modellerinin haritalanması için uygun olmasıdır. Yüksek çözünürlüklü eş yükselti haritaları gibi diğer topoğrafik ürünlerde LiDAR verilerinden üretilebilir.

3.3. LiDAR Filtreleme Teknikleri

LiDAR verilerinin filtrelenmesi için birçok teknik araştırma konusu olmuştur (Jenkins, 2006). Morfolojik yaklaşımda 3B nokta bulutu verisi üzerinde şekle ve biçime dayalı yani morfolojik birçok işlem serisi uygulanır. Üçgenlenmiş düzensiz ağ (TIN) üretim tekniğinde LiDAR noktaları en düşük noktalara dayalı üçgenlenmiş yüzeyden kısıtlı açı ve mesafe altında Delaunay üçgenlemesi metodu kullanılır. Enterpolasyon tabanlı yaklaşımda iteratif enterpolasyon hesabıyla zemin yaklaşık olarak hesaplanır. Bu enterpolasyon algoritması hiyerarşik yaklaşımla genişletilerek filtreleme sonuçlarını ve hesaplama hızını iyileştirmiştir. Eğim tabanlı filtreleme tekniğinde ise ayırt edici derecede farklı olan zemin noktası ve diğer noktalar arasındaki

geçişlerin varsayımı hesaplanarak bir filtreleme yaklaşımı izlenir (Meng vd., 2010).

LiDAR verilerinde zemin noktaları çıplak yeryüzünden genelde ait olduğu bölge içinde en düşük yüzeyden ölçülerek elde edilir. Zemine ait olmayan noktalar ise çıplak yeryüzünün üzerinde ki ağaçlar, binalar, köprüler gibi objelerden ölçülerek elde edilir. Arazi noktalarının uygun olarak belirlenmesi amacıyla zemin noktalarını objelere ait noktalardan ayırt edecek fiziksel karakteristiklerini anlamak önemlidir.

Bunlardan ilki en düşük yüksekliğe sahip noktalardır. Birçok filtreleme algoritmasının temeli bu noktalara dayalıdır. Yeryüzünün dikliği bir başka karakteristik özelliktir. Zemin noktalarının kendi aralarında ki eğim obje noktaları ile arasındaki eğime kıyasla daha düşüktür. Bu sebepten çoğu filtreleme algoritması belli bir eşik değerinde ki eğim bilgisini kullanarak çalışır. Bir başka fiziksel özellik ise yer yüzeyinde ki yükseklik farklarıdır. Zemin noktaları kendi aralarında obje noktalarına kıyasla daha düşük yükseklik farkına sahiptir ve filtreleme algoritmaları için ayırt edicidir. Yeryüzün sürekliliği ise bir başka ayırt edici özellik olabilir. Arazi yüzeyi sürekli ve düzgün bir yapıya sahiptir. Ağaçlar ve binalar gibi obje noktaları ise arazi yüzeyinin sürekliliğini bozan ve filtrelenmesi gereken elemanlardır. Morfolojik temelli filtreleme algoritmaları bu karakteristik özelliklerden yararlanarak çalışır.

3.4. SAM Üretimi ve Doğruluk Değerlendirmesi

Koordinat bilgisi içeren noktalar yığınının üretilen sürekli yüzeyler SAM olarak adlandırılır. Bu model oluşturulurken verideki boşluklar bütün noktalar yığını enterpole edilerek doldurulur ve belirli bir koordinat değerindeki yükseklikler bu yolla hesaplanır. Bu sayede sürekliliği olan arazi yüzeyi elde edilmiş olur. Enterpolasyon yöntemleri noktaların yüksekliklerini belirleme tekniklerine göre matematiksel farklılıklar gösterebilir. LiDAR verileri filtrelene ve enterpolasyon işleminden sonra düşey doğruluğu iyi dağılmış kontrol noktaları ile karesel ortalama hata (KOH) hesaplanarak

değerlendirilebilir (Hodgson ve Bresnahan, 2004).

$$KOH_z = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Z_i - \bar{Z}_i)^2}{n}} \quad (1)$$

Bu çalışmada oluşturulan sayısal arazi modelinin doğruluğu referans arazi modeli ile 3 boyutlu karşılaştırılması yapılarak modeller arasındaki yükseklik farkları kullanılarak hata miktarları elde edilmiştir. Üretilen modelden elde edilen yükseklik değerleri formül 1 de Z_i , referans arazi modelindeki noktaların yükseklik değerleri ise $\bar{Z}_i$ olarak gösterilirken çalışma bölgesinde ki modellerin karşılaştırılmasında kullanılan toplam nokta sayısı ise n ile ifade edilmiştir. Bu modellerin karşılaştırılması beşinci bölümde incelenmiştir.

4. Uygulama

4.1. Kriging Enterpolasyon Yöntemi

Kriging enterpolasyon tekniği topoğrafik çalışmalarda kullanılabilirliğini kanıtlamış ve çok tercih edilen yöntemlerden birisidir. Bu yöntem, matematiksel jeodezide kolokasyon olarak bilinen en iyi lineer yansız tahminci (BLUP [Best Linear Unbiased Predictor]) yada en iyi lineer yansız hesaplayıcı (BLUP [Best Linear Unbiased Estimator]) olarak tanımlanır (Boogaart and Schaeben, 2002). Kriging analizini diğer enterpolasyon metotlarından ayıran en önemli özellik, tahmin edilen her bir nokta veya alan için ayrı bir varyans değerinin hesaplanabilmesidir ki bu, tahmin edilen değer güven derecesinin bir ölçüsüdür (Başkan, 2004). Kriginde kullanılan temel eşitlik 2 numaralı formülde verilmiştir.

$$\bar{Z}(s_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z(s_i) \quad (2)$$

Formül de $\bar{Z}(s_0)$ aranılan değer, N modeli oluşturan nokta sayısı, λ_i aranılan her $\bar{Z}$ değerine karşılık ağırlık değeri, $Z(s_i)$ ise $\bar{Z}(s_0)$ hesabında kullanılan bilinen noktalardır.

4.1.1. Kriging Enterpolasyon Temelli Filtre (KRIGF)

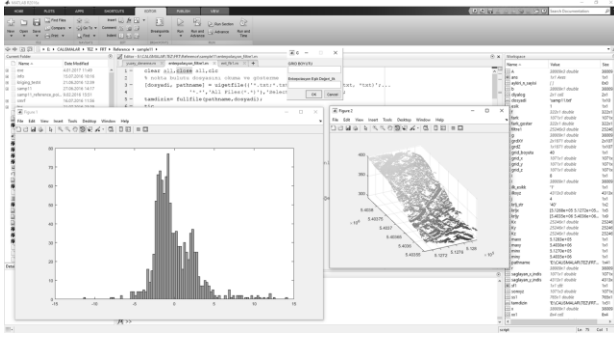
Enterpolasyon tabanlı filtreleme tekniğinin temeli,

nokta bulutu gridlere bölünerek bu gridlerdeki en düşük kotlu noktalar kullanılarak Kriging enterpolasyon tekniği ile yüzey oluşturulması ve tüm noktaların bu yüzeye olan yükseklik farkına göre sınıflandırmasına dayanır. Bu gridlerin boyutu çalışma bölgesindeki en geniş yapıdan daha büyük olmalıdır. Veriyi gridlere bölerken kayan gridler oluşturulur. Kayan gridlerin özelliği seçilen grid boyutunun belli bir oranda bindirmeli olarak veriye uygulanması anlamına gelmektedir (Uray, 2016).

Gridler içerisindeki minimum yüksekliğe sahip noktalardan polinom yüzey geçirilerek ilk referans yüzeyi hesaplanır. Referans yüzeyinin hesaplanmasının nedeni nokta bulutundaki aykırı noktaların çıkartılması ve filtreleme işlemine etkisini ortadan kaldırmaktır. Yüzeyi oluşturulduktan sonraki adımda ise enterpolasyon işleminde kullanılacak dayanak noktaların bu yüzeye göre yükseklik farkları bulunarak belirlenen eşik değerin altında kalan noktalar dayanak noktası olarak seçilir. Polinom yüzeyinden seçilecek bu noktaların eşik değerinin belirlenmesinde yükseklik farklarının dağılımdan faydalanılmıştır. Burada ki amaç yeryüzüne ait noktaların dağılımının yoğun olduğu aralığı belirlemektir. Histogramdan elde edilen bilgi sayesinde eşik değeri 1m olarak belirlenmiştir. Daha sonraki aşamada bu dayanak noktalarından Kriging enterpolasyon tekniği ile yüzey geçirilir ve kot farkı eşik değerin altında kalan noktalar zemin noktası olarak sınıflandırılır. Zemin noktası olarak atanan noktalar daha küçük boyutlu gridlere bölünerek noktalar sıklaştırılır ve ikinci kez enterpolasyon ile yüzey geçirilir. Grid boyutları bir öncekinin boyunun yarısı kadar küçültülür. Tekrar sınıflandırılmamış noktalar işleme sokulur ve şartı sağlayan noktalar zemin noktası olarak etiketlenir. Bu çalışmada grid sıklaştırma işlemi grid boyutu 2m olana dek tekrarlanmıştır.

Kriging enterpolasyon temelli filtreleme algoritması Matlab programlama dilinde yazılmış ve program arayüzü oluşturulmamıştır. Intel i5 işlemcili 8 GB ram hafızasına sahip AMD Radeon HD5450 grafik işlemcisine sahip bir masaüstü bilgisayarda

program çalıştırılmıştır.



Şekil 4. Algoritmanın Matlab yazılımında çalıştırılması
LiDAR sistemlerinden elde edilen veriler genellikle ASPRS (American Society for Photogrammetry and Remote Sensing) kurumunun oluşturduğu ve güncellediği “.las” dosya formatında olmaktadır. Bu veri istenilen kelime işleme programı formatına çevrilebilmektedir. Çalışma kapsamında geliştirdiğimiz programda girdi verisi olarak ham nokta bulutunun koordinatları “.txt” dosya formatında kullanılmıştır. Filtrelenen veriler aynı format şeklinde çıktı alınmıştır.

Surfer 12 yazılımı yardımıyla arazi modelleri oluşturulmuştur. Arazi modelleri oluşturulurken Kriging enterpolasyon tekniği seçilmiştir. Bu enterpolasyon yönteminin seçilmesinin sebebi yer bilimlerinde doğruluğunu diğer yöntemlere karşı kanıtlamış olmasıdır (Yiğit, 2003). Arazi modelleri arasındaki yükseklik farkları yine aynı yazılım sayesinde bulunmuş ve karesel ortalama hataları hesaplanmıştır.

4.2. Üçgenleme Temelli ATIN Filtreleme Algoritması

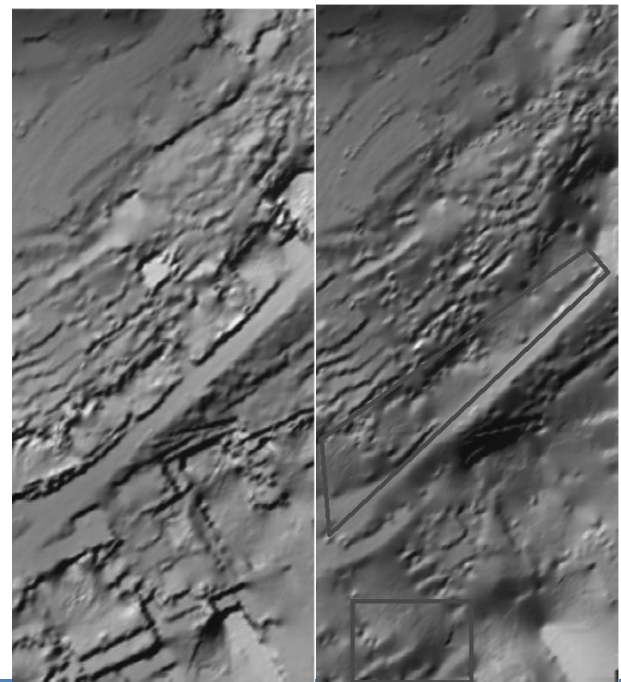
Üçgen ağ modeline dayalı bu algoritma TerraScan firması tarafından iyileştirilerek LiDAR verisi işleme yazılımına entegre edilmiştir. Yapılan çalışmalarda on beş farklı test bölgesinde en iyi filtreleme performansını bu algoritma göstermiştir (Sithole ve Vosselman, 2004). Tekniğin temeli, nokta bulutunun gridlere bölünerek her bir griddeki en düşük yüksekliğe sahip noktaların belirlenerek

zemin noktası olarak kabul edilmesi ve daha sonra bu noktalardan delaunay üçgenlemesi yapılmasına dayanır. Veri setindeki tüm noktalar, içinde bulundukları yani ait oldukları üçgen yüzeyi ile arasındaki mesafe ve test noktasına en yakın üçgen köşe elemanı ile üçgen yüzeyi arasındaki kalan açı bulunur. Bu değerler belirtilen parametrelerin altında kalıyorsa test noktası zemin noktası olarak, tersi durumda ise obje noktası olarak sınıflandırılır ve sıradaki test noktasına geçerek her bir nokta için bu sınav yapılır. Böylece zemine ait yeni noktalar üçgenlemeye eklenerek bir sonraki iterasyon için üçgenler sıklaştırılmış olur. Her iterasyondan önce parametre değerleri yeniden hesaplanır ve sınıflandırılmamış nokta kalmayana dek iterasyona devam edilir (Uray, 2016).

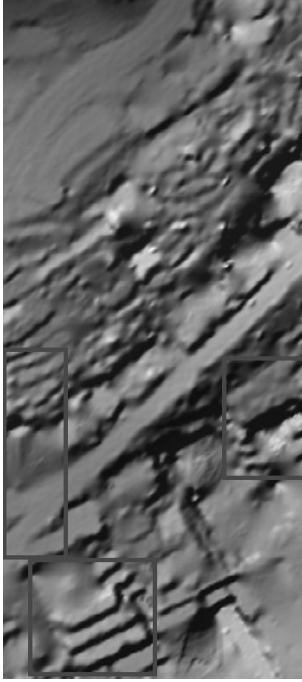
5. Sonuçlar

5.1. Veri Seti V11

KRIGF filtreleme algoritması, V11 verisinde ortalama bir performans göstermiştir. Ani yükseklik değişimi olan bölgelerde araziye tam olarak belirleyememiştir. Bunun yanında eğimli yerlerde bulunan zemin noktalarını başarılı şekilde sınıflandırmıştır. Verinin güneyinde bulunan kademeli yapıları ise tam olarak belirleyememiş ve o bölgede araziye oldukça yumuşatmıştır. Üretilen modelin karesel ortalama hatası ± 1.55 m olmuştur.



Şekil 5.V11 veri setinden üretilen referans SAM ve KRIGF algoritması ile üretilen SAM



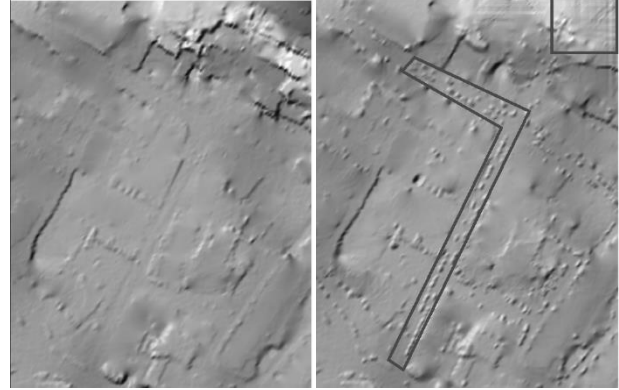
Şekil 6.V11 veri setinden ATIN algoritması ile üretilen SAM

ATIN tekniği, SAMP11 örneğinde kısmen iyi bir performans göstermiştir. Şekil 6'da görüldüğü üzere eğimin fazla olduğu bölgelerde bitki örtüsüne ait noktaları oldukça iyi şekilde tespit ederken yamaçlarla bütünleşik binaların bir kısmını filtrelemede zorlanmıştır. Ayrıca yol kenarındaki dik şevlerin sadece bir bölümünü tespit edememiştir. Üretilen modelin karesel ortalama hatası ± 1.10 m olmuştur.

5.2. Veri Seti V12

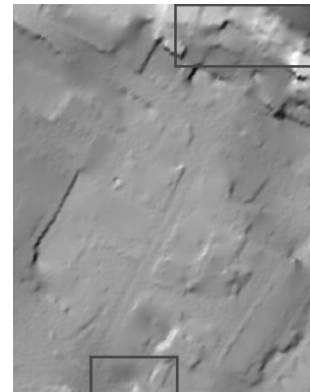
V12 verisinde Şekil 7'de görüldüğü üzere işaretlenen kısımlardaki yol üzerinde bulunan araçlar KRIGF algoritması tarafından belirlenememiş ve sınıflandırılmamıştır. Bölgenin kuzey doğusundaki yüksekliğin arttığı kısımda ise

ani yükseklik değişikliklerini tespit edemediği için arazi yüzeyini yumuşatmıştır. Bu çalışmada test edilen algoritmalarla kıyaslandığında V12 verisi için en kötü sonucu vermiştir. Üretilen modelin karesel ortalama hatası ± 0.95 m olmuştur.



Şekil 7.V12 veri setinden üretilen referans SAM ve KRIGF algoritması ile üretilen SAM

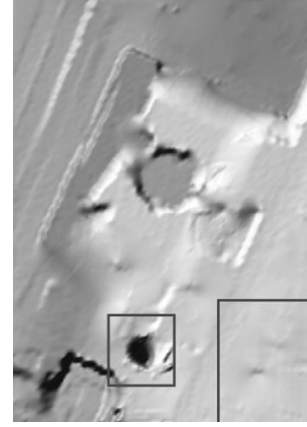
ATIN tekniği, V12 örneğinde oldukça iyi bir performans göstermiştir. Şekil 8'de görüldüğü üzere eğimin fazla olduğu bölgelerde ki binaları filtrelerken ani kot değişiminin olduğu bu bölgedeki araziye tam olarak ortaya çıkaramamıştır. Bahsedilen bölge dışında ki kısımlarda arazi yüzeyini oldukça başarı şekilde belirlemiştir. Üretilen modelin karesel ortalama hatası ± 0.52 m olmuştur.



Şekil 8.V12 veri setinden ATIN algoritması ile üretilen SAM

5.3. Veri Seti V23

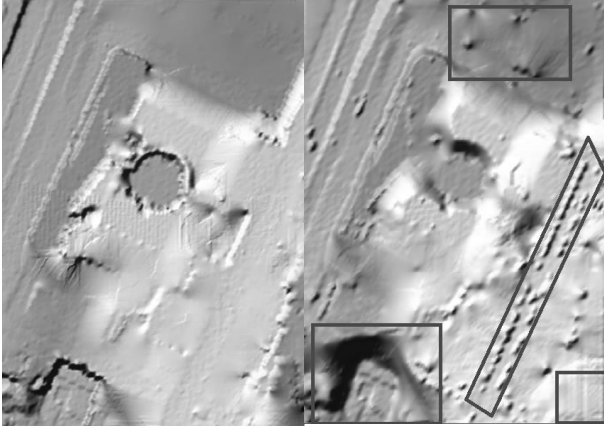
KRIGF algoritması V23 verisinde yol üzerinde bulunan araçları tespit edememiş ve filtreleyememiştir. Bölgenin güney batı kısmında bulunan yükseklik değişimini referansa kıyasla tam olarak belirleyememiştir. Ayrıca güney doğu kısmında ki binaları filtrelerken aynı zamanda binaların altındaki zemini tam olarak tespit edememiş ve araziye yumuşatmıştır. Üretilen modelin karesel ortalama hatası ± 1.53 m olmuştur.



Şekil 10.V23 veri setinden ATIN algoritması ile üretilen SAM

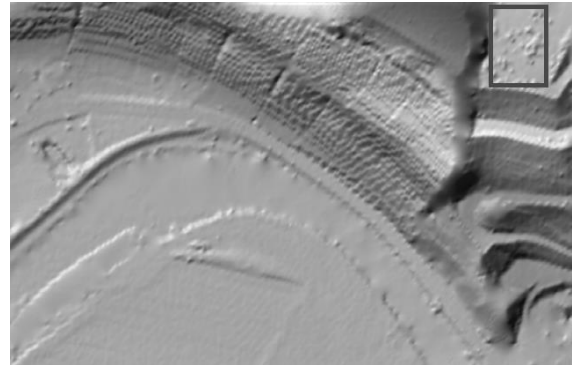
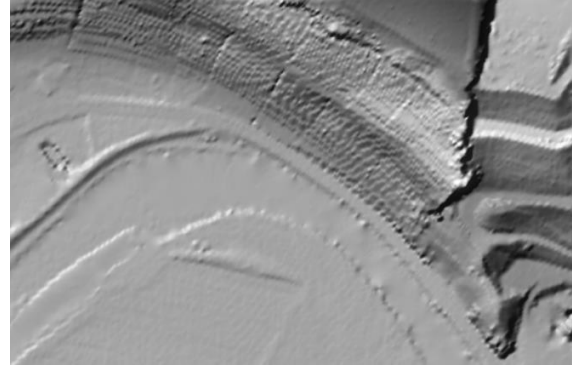
5.4. Veri Seti V52

V52 verisinde KRIGF tekniği nehir yatağı kenarında ki bitki örtüsünü başarılı şekilde filtrelerken kuzey doğu kısmında ki yamaçta bulunan binayı da tam olarak kaldırmıştır. Enterpolasyon temelli filtrelerin yükseklik değişimi olan bölgelerde ki yetersiz kalışı göz önünde bulundurulduğunda KRIGF algoritması bu veride oldukça iyi bir performans göstermiştir. Üretilen modelin karesel ortalama hatası ± 1.29 m olmuştur.



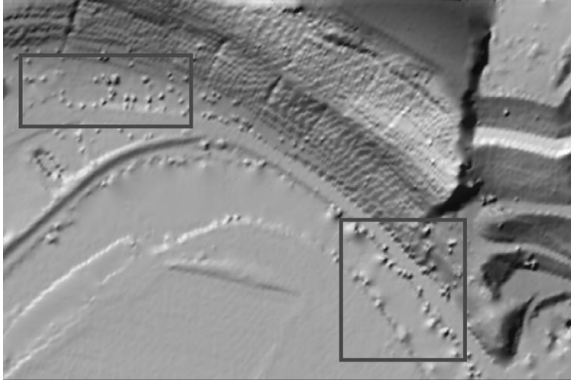
Şekil 9.V23 veri setinden üretilen referans SAM ve KRIGF algoritması ile üretilen SAM

Şekil 9'da görüldüğü üzere veri setinin sağ alt köşesinde ki bölgede arazi kotundaki değişimi ATIN filtresi yakalayamamıştır. Ayrıca verideki bazı bölgelerdeki aykırı noktaların ayıklanamamasından dolayı arazi modelinin sürekliliği bozulmuştur. Üretilen modelin karesel ortalama hatası ± 1.42 m olmuştur.



Şekil 11.V52 veri setinden üretilen referans SAM ve KRIGF algoritması ile üretilen SAM

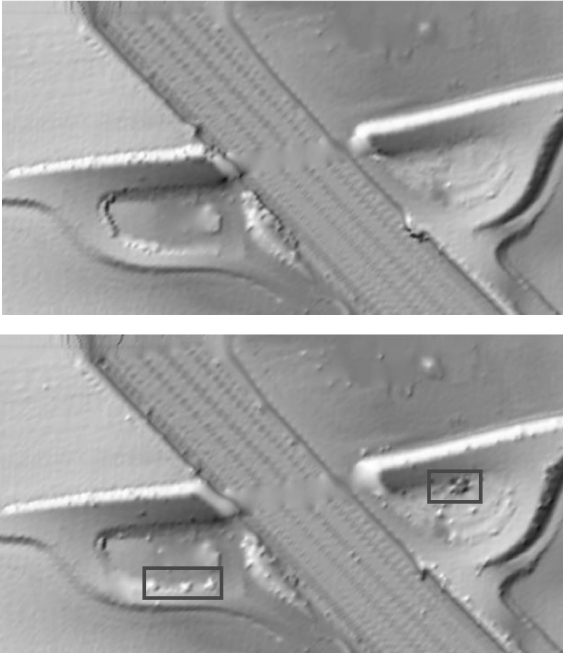
Şekil 12’de görüldüğü üzere ATIN kademeli yüksekliği artan yamaçlarda veri kaybına sebep olmamıştır. Tepenin üzerindeki binayı filtrelerken başarılı olmuştur. Ayrıca nehir yatağının kıyısındaki ağaçları ve yamacın başlangıcındaki bitki örtüsünü tam olarak kaldıramamıştır. Üretilen modelin karesel ortalama hatası ± 0.73 m olmuştur.



Şekil 12.V52 veri setinden ATIN algoritması ile üretilen SAM

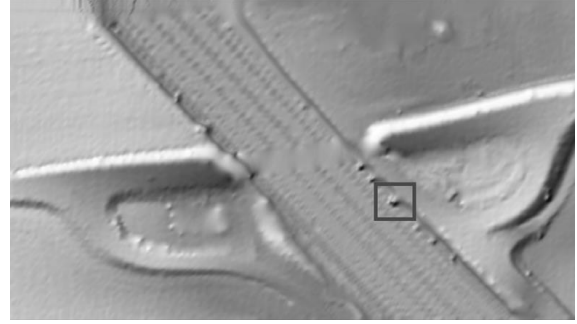
5.5. Veri Seti V71

KRIGF algoritması V71 veri setinde ATIN algoritmasına yakın bir sonuç vermiştir. Şekil 13’de işaretlenen kısımlardaki bitki örtüsü hariç veri seti referansa göre oldukça iyi sınıflandırılmıştır. Üretilen modelin karesel ortalama hatası ± 0.19 m olmuştur.



Şekil 13.V71 veri setinden üretilen referans SAM ve KRIGF algoritması ile üretilen SAM

ATIN algoritması, V71 örneğinde oldukça iyi bir sonuç ortaya koymuştur. Şekil 14’de görüldüğü üzere yol kenarında şevde bulunan bitki örtüsünün büyük bir kısmını filtrelemiş ve fakat ana yol kenarında ufak boyutta ki arazi uzantısını sınıflandıramamıştır. Üretilen modelin karesel ortalama hatası ± 0.20 m olmuştur.



Şekil 14.V71 veri setinden ATIN algoritması ile üretilen SAM

5.6. Yorumlar

Özellikle karmaşık yapılar ve arazi şekilleri içeren bölgelerde LiDAR verisinden zemin noktalarının doğru ve verimli şekilde tespit edilmesi hala büyük bir zorluk olarak karşımızda durmaktadır. Parametrelerin seçimi ve iterasyon hesaplamaları bu işlemler için kilit rol üstlenmektedir. KRIGF algoritmasında seçilen grid boyutu ve yükseklik eşik değeri sonuçlara doğrudan etki etmektedir. Başlangıçta referans alınacak yüzey, araziye ne kadar doğru temsil ederse filtreleme sonucu hata miktarı o kadar düşecektir. Başlangıç yüzeyinin araziye en yakın olması için ise gridlerde ki minimum kotlu noktaların araziye ait olması gerekmektedir. Başlangıçtaki grid boyutunun seçimi bu nedenle bölgede ki en büyük yapıdan daha büyük seçilmiştir. Yükseklik eşik değeri için ise histogramdan faydalanılmıştır. Noktaların kot farklarının dağılımına göre parametre seçimi filtreleme işleminin doğruluğunu arttıracaktır.

Çalışma kapsamında ATIN ve KRIGF filtreleme algoritmaları ISPRS referans verilerine karşı test edilmiş ve doğruluk karşılaştırması yapılmıştır.

Ticari yazılımla beraber kullanıcılara sunulan ATIN algoritması tepelik ve kısmen yamaç bölgelerde obje noktalarını tespit etmede KRIGF algoritmasına kıyasla daha başarılı olmuştur. Bununla beraber KRIGF yamaçlarda ki yapıları kaldırmış fakat ani yükseklik değişimi olan bölgelerde bu kot değişimlerini yakalayamamış ve araziye kısmen yumuşatmıştır. Yerleşim yeri olan bölgelerde her iki algoritma da yakın sonuçlar vermiştir.

LiDAR filtreleme algoritmaları ile ilgili yapılan çalışmalar incelendiğinde en iyi sonucu veren arazi modellerinde bile hatalar bulunmaktadır. Parametrelerin değiştirilmesi ve belli bir sınır koyulması yorucu bir iş olacağından bunun yerine filtreleme performansını arttırmak için türetilen yeni fonksiyonlar ve bölgesel yakınlık ile ilgili işlem adımları üzerinde çalışılırsa sonuçlara daha faydalı etki edecektir (Uray, 2016).

6. Kaynaklar

- Axelsson, P., 2000. DEM Generation from Laser Scanner Data Using adaptive TIN Models. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens.* **23**, 110–117. doi:10.1016/j.isprsjprs.2005.10.005
- Başkan, O., 2004. Gölbaşı Yöresi Topraklarının Mühendislik-Fiziksel Özellik İlişkilerinde Jeostatistik Uygulaması. Yüksek Lisans Tezi. Ankara Üniversitesi, Ankara, 154.
- Boogaart, K.G., Schaeben, H., 2002. Kriging of Regionalized Directions , Axes , and Orientations I. Directions and Axes. *Math. Geol.* **34**, 479–503.
- Hodgson, M.E., Bresnahan, P., 2004. Accuracy of Airborne Lidar-Derived Elevation. *Photogramm. Eng. Remote Sens.* **70**, 331–339. doi:10.14358/PERS.70.3.331
- Maune, D.F., 2010. Digital Elevation Model (DEM) Whitepaper NRCS High Resolution Elevation Data.
- Meng, X., Currit, N., Zhao, K., 2010. Ground filtering algorithms for airborne LiDAR data: A review of critical issues. *Remote Sens.* **2**, 833–860. doi:10.3390/rs2030833
- Sithole, G., Vosselman, G., 2004. Experimental comparison of filter algorithms for bare-Earth extraction from airborne laser scanning point clouds. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* **59**, 85–101. doi:10.1016/j.isprsjprs.2004.05.004
- Uray, F., 2016. Hava Lidar Nokta Bulutu Verileri Filtreleme Algoritmalarının Geliştirilmesi Ve Performanslarının Karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Necmettin Erbakan Üniversitesi, Konya, 81.
- Yiğit, C., Ö., 2003. Elipsoidal yüksekliklerin ortometrik yüksekliğe dönüşümünde kullanılan enterpolasyon yöntemlerinin karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Konya, 131.
- Yilmaz, M., Kocatepe, A., Sistemi, H.L., 2015. Hava LiDAR Nokta Bulutundan Sayısal Yükseklik Modeli Üretiminde Veri Seyrekleştirme Algoritmalarının Karşılaştırılması, in: TMMOB Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası, 15.Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı.