

FARKLI VERİ YOĞUNLUĞUNA SAHİP LİDAR NOKTA BULUTLARINDAN ELDE EDİLEN SONUÇ ÜRÜNLERİN KARŞILAŞTIRILMASI

M. S. Şehsuvaroğlu^a, O. Eker^a, M. Erdoğan^a, A. Kayı^a, F. Yıldız^b

^a Harita Genel Komutanlığı, 06590 Cebeci Ankara - (sabri.sehsuvaroglu, oktay.eker, mustafa.erdogan, abduallah.kayi)@hgk.msb.gov.tr

^b Selçuk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 42151, Konya - fyildiz@selcuk.edu.tr

ANAHTAR KELİMELER: LiDAR, Nokta Yoğunluğu, Sayısal Yüzey Modeli, Sayısal Arazi Modeli, Eş Yükseklik Eğrisi

ÖZET:

LiDAR projelerinden beklenen başarıyı (proje çıktı ürünlerinin tamlığı ve doğruluğu) etkileyen çok sayıda parametre vardır. Bu parametreler içerisinde en öne çıkan LiDAR nokta bulutunun yoğunluğudur. LiDAR nokta yoğunluğu, nokta bulutundan ve bu nokta bulutundan elde edilecek sayısal yükseklik modellerinden çıkarılabilecek nesnelere ve bu nesnelere ait ayrıntı seviyesini belirler. Ancak öte yandan da proje toplam maliyetini belirleyici en önemli etkidir. LiDAR projelerinin maliyetleri halen oldukça yüksektir ve projenin toplam maliyeti ile LiDAR nokta yoğunluğu arasında bir getiri-götürü dengesi söz konusudur. Gereğinden daha fazla yoğunluğa sahip veri toplamak, projenin tümü açısından maliyet-etkin bir yöntem olmamaktadır.

Bu çalışmada aynı zaman dilimi içerisinde, aynı bölgeye ait, aynı lazer cihazı ile farklı veri toplama parametreleri kullanılarak elde edilen farklı yoğunluktaki iki nokta bulutundan elde edilen proje çıktı ürünleri karşılaştırılmıştır. Literatürde benzer türde çalışmalarda, özellikle farklı nokta yoğunluklarının sayısal arazi modeli üretimi ve ormanlara ait çeşitli parametrelerin hesaplanmasına etkileri incelenmiştir. Ancak bu çalışmalarda uçuş sonrası elde edilen tek bir nokta bulutundan, seyreltilerek sanal olarak oluşturulan daha düşük yoğunluktaki nokta bulutlarından elde edilen ürünler karşılaştırılmıştır. Bu çalışmada ise literatürdeki çalışmalardan farklı olarak; hem farklı irtifadan (1.200 m ve 2.600 m) gerçekleştirilen LiDAR uçuşları sonucunda elde edilen iki farklı yoğunluktaki nokta bulutu kullanılmış hem de eş yükseklik eğrisi, bina, tel gibi çeşitli sonuç ürünler kıyaslanmıştır. Ham nokta bulutları gerekli işlemlerden geçirilerek önce sınıflandırılmış nokta bulutları, daha sonra da sonuç ürünler (sayısal yüzey modeli, sayısal arazi modeli, eş yükseklik eğrisi, bina, elektrik teli ve ağaç) elde edilmiş ve sonuç ürünler birbirleriyle karşılaştırılarak elde edilen sonuçlar sunulmuştur. Verilerin işlenmesi ve sonuç ürünlerin üretilmesi için Terrasolid yazılımı kullanılmıştır. Yazılım ile yapılan işlemlerin tamamında her iki farklı veri grubu için aynı parametreler kullanılmıştır.

KEY WORDS: Lidar, Point Density, Digital Terrain Models, Digital Elevation Model

ABSTRACT:

There are many parameters which affect the expected success (the completeness and the accuracy of the project deliverables) of the LiDAR projects. And maybe the most prominent of these parameters is LiDAR point cloud density. LiDAR point density determines the objects which could be extracted from point clouds and digital elevation models produced from the point clouds and also the level of details of these objects. However the point density is also the most important factor of the total LiDAR project cost. The costs of LiDAR projects are still very high and there is a trade-off between total project cost and LiDAR point density. To collect more points than the need of project's aim is not a cost-effective method when you consider acquiring, processing, storing and distributing of the data.

In this study, the deliverable products of two different LiDAR datasets which acquired at the same time period, in the same area, with the same laser but with different flight parameters so with different point densities, compared. The effects of different point densities to the production of digital terrain models and estimation of various forest parameters have been investigated in the literature. But most of these studies compared the deliverables produced from lower point densities which obtained from the original point cloud by degrading the number of points virtually. Unlike the literature; two point clouds with different densities acquired from two different altitudes (1200 m and 2600 m) have been used and some various products such as contours, buildings, wires have been compared. First of all classified point clouds obtained by processing raw point clouds. After that the deliverables (digital surface model, digital terrain model, contour, building, wire and tree) were produced and then conclusions were presented after comparing these products. The Terrasolid software was used for the processing of the data and producing the deliverables. All processes were executed with same parameters for both of the datasets.

1. GİRİŞ

Yaklaşık 20 yıl önce ticari olarak kullanılmaya başlanan ve 2000'li yılların başından itibaren ABD ve Avrupa'da çok farklı uygulama alanlarında yoğun olarak kullanılan Havadan LiDAR (Işığın Algılama ve Mesafe Ölçme - Light Detection and Ranging) Sistemleri (HLS), son yıllarda ülkemizde pek çok

kurum, kuruluş ve kişinin ilgisini çekmeye başlamıştır. Kısa zaman içerisinde, oldukça yoğun ve yüksek doğrulukla 3B nokta bulutu üretme, ağaç üst bitki örtüsünün altındaki nesnelere ve zemini tespit edebilme yeteneklerine sahip HLS ile topoğrafyanın ve nesnelere 3B sayısal gösterimleri hassas ve doğru olarak elde edilebilmektedir. LiDAR'ın en büyük avantajı, nokta koordinatlarının yanı sıra sinyalin geri yansıdığı

yüzeyin fiziksel özelliklerine (dönen sinyalin genişliği ve şiddeti) ait bilgiler içermesi ve bazı nesnelere birden fazla sayıda geri dönüş elde edilebilmesidir.

LiDAR projelerinden beklenen başarıyı (proje çıktı ürünlerinin tamlığı ve doğruluğu) etkileyen çok sayıda parametre vardır. Bu parametreler içerisinde en öne çıkanı, başka bir ifade ile en belirleyici olanı veri toplama sonucunda elde edilen nokta yoğunluğudur (veri çözünürlüğüdür). Ancak nokta yoğunluğu aynı zamanda proje toplam maliyetinin en belirleyici elemanıdır (Raber vd., 2007). LiDAR veri yoğunluğu, nominal nokta yoğunluğu (NNY) veya nominal nokta aralığı (NNA) terimleri ile ifade edilmektedir. Bazı literatürde nokta kelimesi yerine sinyal de kullanılmaktadır. Bu terimlerde NNY, 1 m² içerisine düşen nokta sayısını; NNA ise noktalar arasındaki ortalama mesafeyi gösterir. NNY genellikle NNA < 1 m; NNA ise NNA ≥ 1 m olduğu durumlarda kullanılmaktadır. Her iki birim de; tek bir uçuş hattı içerisinde, tek bir cihaz ile gerçekleştirilen ölçümler sonucunda algılanan sinyalin ilk veya son dönüşleri esas alınarak hesaplanmaktadır. Her iki birim arasındaki dönüşüm $NNY = 1 / NNA^2$ eşitliğinden yararlı yapılabilir (ASPRS, 2014; USGS, 2014). Nokta yoğunluğu; uçuş hızı, tarama hızı, sinyal tekrarlama frekansı, kolon genişliği (uçuş yüksekliği ve tarama açısı) ve uçuş hattı boyunca arazi eğimine bağlı olarak değişmektedir (Wehr, 2009). LiDAR nokta yoğunluğu, nokta bulutundan ve sayısal yükseklik modellerinden çıkarılabilecek nesnelere ve bu nesnelere ait ayrıntı seviyesini belirler (Triglav-Çekada vd. 2010, Balsa-Barreiro vd. 2012, Chu vd. 2014). Nokta bulutunun ve nokta bulutundan üretilen sayısal yükseklik modellerinin kalitesi (doğruluğu ve çözünürlüğü); bitki örtüsü, bina, tel gibi nesnelere çıkarılması ve bu nesnelere ait birtakım ölçümlerin doğru ve tam olarak yapılabilmesi, büyük oranda nokta yoğunluğuna bağlıdır.

LiDAR'dan üretilmiş Sayısal Arazi Modellerinin (SAM) doğruluğunu etkileyen parametreler; LiDAR nokta bulutunun yoğunluğu, bölgenin topoğrafik yapısı ve arazi örtüsü, kullanılan enterpolasyon yöntemi ve filtreleme (zemin noktalarını ayırma) işleminin kalitesidir. Bu parametrelerin en başında LiDAR nokta bulutunun yoğunluğu ve bölgenin karakteristiği sayılabilir. Aguilar vd., (2010) LiDAR'dan elde edilmiş SAM'ların barındırdığı toplam hatanın, düz alanlarda LiDAR nokta yoğunluğuna çok bağımlı olmadığını; bununla birlikte LiDAR çözünürlüğünün etkisinin arazi topoğrafyasının karmaşıklığının artması ile birlikte anlamlı hale geldiğini belirtmektedir. Benzer şekilde Sani S. (2008), nokta yoğunluğundaki azalmanın SAM doğruluğuna etkisinin, düz arazilere göre engebeli araziler için daha fazla olduğunu ve dolayısıyla karmaşık topoğrafyaya sahip alanlarda nokta yoğunluğunun daha fazla olması gerektiğini belirtmiştir. Bu nedenle farklı topoğrafik karmaşıklığa sahip bölgelerde belirli bir doğruluk değerini yakalayabilmek için farklı yoğunluktaki nokta bulutlarına ihtiyaç olduğu sonucuna varmıştır.

Mantıksal olarak daha fazla ölçüm ile daha çok bilgi yani daha fazla sayıda LiDAR noktası ile daha detaylı ve daha doğru yükseklik modelleri elde edilebileceği ve nesnelere çıkarılabileceği açıktır. Ancak LiDAR projelerinin maliyetleri halen oldukça yüksektir ve projenin toplam maliyeti ile LiDAR nokta yoğunluğu arasında bir getiri-götürü dengesi söz konusudur. LiDAR nokta yoğunluğunu artırarak veri kalitesinin iyileştirilmesi, beraberinde veri toplama, depolama ve işleme maliyetlerini de önemli miktarlarda artırır (García-Quijano vd., 2008). Nokta yoğunluğu LiDAR proje toplam maliyetinin önemli kısmını belirleyen parametredir (Raber vd., 2007; Aguilar vd., 2010). Uçuş süresi, uçuş yüksekliği ve elde edilen yoğun verinin yönetimi (depolama, işleminden geçirme, paylaşma) proje maliyetini etkileyen başlıca hususlardır. Daha

yoğun veri elde edebilmek için yüksek sinyal tekrarlama hızına sahip özellikli bir cihaza sahip olma ve daha fazla sayıda uçuş hattı (kolonla) uçarak veri toplamak gerekmektedir yani daha fazla kaynağa ihtiyaç duyulmaktadır (Raber vd., 2007; Balsa-Barreiro vd., 2012; Jakubowski vd., 2013). Özellikle çok yoğun verileri işlemek, gerek yazılımsal gerek donanımsal olarak büyük kaynakları gerektirmektedir. Çok büyük hacimli yoğun nokta bulutunu gerekli işlemlerden geçirme, yüksek oranda hesaplama iş yükü ve de çok fazla işlem zamanı gerektirir (Raber vd., 2007; Guo vd., 2010). Bu nedenle maliyet etkin bir proje gerçekleştirilebilir adına, projeden beklenen amacı karşılayacak şekilde, yeterli yoğunluğa sahip LiDAR nokta bulutu toplanması gerekmektedir. Bunun için; uçuş yüksekliği ve hızı, sinyal tekrarlama frekansı, tarama açısı, tarama hızı ve uçuş hatlarının bindirme oranı parametrelerini en uygun şekilde belirlemek gerekir (Şehsuvaroğlu vd., 2014).

LiDAR uygulamasında; daha yüksekten veya daha hızlı uçularak veya kolon bindirmesi azaltılarak nokta yoğunluğu ve LiDAR veri toplama maliyeti düşürülebilmektedir. Uçuş hızını arttırmak veya kolon bindirmesini azaltmak, yerdeki iz büyüklüğü, bitki örtüsü içerisinde geçebilme yeteneği gibi diğer parametreleri etkilemeden nokta yoğunluğunu düşürmektedir. Ancak daha yüksekten uçulduğunda; geri yansıma enerjisi, maksimum sinyal tekrarlama frekansı ve bitki örtüsünden geçebilme yeteneği azalırken, yerdeki iz büyüklüğü ve kolon genişliği artar (Magnusson vd., 2010).

Ülke çapında gerçekleştirilen modelleme çalışmalarında 0.5 - 1 nokta/m² yeterli iken, biokütle ve ağaç modelleme gibi çalışmalarda ise daha yoğun veri gerekmektedir. 7 - 8 nokta/m²'den daha yoğun veriler SAM'ın doğruluğuna önemli katkı yapmamaktadır. 8 - 10 nokta/m² gibi yüksek yoğunluklu veriler sadece yoğun bitki örtüsüne sahip alanlar için tavsiye edilir. (Balsa-Barreiro vd., 2012). Ahokas vd. (2008), Finlandiya Ulusal Kadastro Kurumu için yaptıkları test çalışması sonucunda; ulusal boyutta, karesel ortalama hata (KOH) ≤ 30 cm doğruluklu ve 2 m çözünürlüklü SAM üretimi için 0.5 nokta/m² yoğunluğun yeterli olacağını bulmuşlardır. Nitekim 2008-2013 yılları arasında gerçekleştirilen İsveç ve Finlandiya ulusal yükseklik modeli üretim çalışmalarında LiDAR nokta yoğunluğu minimum 0.5 nokta/m² olarak gerçekleştirilmiştir (Petersen ve Rost, 2011). Öte yandan ülkenin yarısının deniz seviyesinin altında olduğu Hollanda örneğinde ise 2007-2013 yılları arasında gerçekleştirilen ve temel amacı su yönetimi olan Hollanda ulusal temel yükseklik modeli (AHN2) üretiminde nokta yoğunluğu ortalama 10 nokta/m² olarak gerçekleştirilmiştir (Sande vd., 2010).

Nokta yoğunluğuna ilişkin olarak ABD'de tek bir ulusal standart olmamakla birlikte; Birleşik Devletler Jeolojik Ölçmeler Kurumu (USGS) ve Amerika Fotogrametri ve Uzaktan Algılama Birliği (ASPRS)'nin yayımladıkları standartlar bulunmaktadır. USGS ve ASPRS son yayımladıkları güncel standartlarda ortak terminoloji ve yöntemler kullanmışlardır. Buna göre çeşitli sınıflar belirlemişler ve her sınıf için KOH ve nokta yoğunlukları tanımlamışlardır. ASPRS 10 adet düzey doğruluk sınıfı belirlerken, USGS 4 adet kalite seviyesi belirlemiştir. Tablo 1'de sunulan ASPRS ve USGS'in belirledikleri KOH ve nokta yoğunluk değerleri birbirleri ile uyumludur. USGS, Amerikan ulusal yükseklik verisi için en az 2'nci kalite seviyesinin (KS-2) karşılanmasını ve bu veriden de minimum 1 m aralıklı SAM üretilmesini talep etmektedir. Her iki standartta; ihtiyaç duyulması halinde, özel çalışmalar ve farklı karakteristikteki bölgeler için daha fazla yoğunlukta veri toplanmasını teşvik etmektedirler (ASPRS, 2014; USGS, 2014).

Bu çalışmada; maliyet etkin bir LiDAR projesi gerçekleştirilebilir adına, LiDAR verisi toplayacak veya talep edebilecek en uygun nokta yoğunluğunu (dolayısıyla LiDAR

uçuş parametrelerini) belirlemeleri için ışık tutmak amaçlanmıştır. Makalede öncelikle farklı LiDAR nokta yoğunluklarının kullanımı ve sonuç ürünlere etkilerini inceleyen bazı literatür çalışmaları özetlenmiş, çalışmada kullanılan test verisi tanıtılmış, daha sonra iki farklı verisetinin karşılaştırılması yapılmış ve son olarak sonuçlar sunulmuştur.

Düşey Doğruluk Sınıfı (ASPRS)	Mutlak Doğruluk			min NNY (nokta/m ²)	max NNA (m)
	KOH _z BÖz (cm)	BÖzDD %95 GA (cm)	BÖDD 95'nci yüzde (cm)		
1-cm	≤ 1.0	≤ 2.0	≤ 3	≥ 20	≤ 0.22
2.5-cm	2.5	4.9	7.5	16	0.25
5-cm	5.0	9.8	15	8	0.35
10-cm	10.0	19.6	30	2	0.71
15-cm	15.0	29.4	45	1	1.0
20-cm	20.0	39.2	60	0.5	1.4
KS (USGS)					
KS-0	5.0	9.8	14.7	8	0.35
KS-1	10.0	19.6	29.4	8	0.35
KS-2	10.0	19.6	29.4	2	0.71
KS-3	20.0	39.2	58.8	0.5	1.41

Tablo 1: Sayısal yükseklik verisi için düşey doğruluk ve tavsiye edilen minimum nokta yoğunluk değerleri (KS: Kalite Seviyesi, BÖz: Bitki Örtüsüz alan, BÖzDD: BÖz için Düşey Doğruluk, BÖDD: Bitki Örtülü alan için Düşey Doğruluk, GA: Güven Aralığı, NNY: Nominal Nokta Yoğunluğu, NNA: Nominal Nokta Aralığı).

2. İNCELEME

Watershed Sciences (2010), ABD Pasifik Kuzeybatı bölgesinde gerçekleştirilen LiDAR uygulamalarının çoğu için geçerli olabilecek birtakım LiDAR nokta yoğunluğu tavsiyelerinde bulunmuştur. Pasifik Kuzeybatı bölgesi; topoğrafik çeşitlilik ve arazi örtüsü anlamında, ABD'nin diğer bölgelerinden farklılaşmakta ve karmaşık ve zor karakteristiği nedeniyle yüksek yoğunlukta veriye ihtiyaç göstermektedir. Bu nedenle Watershed Sciences (2010), bu bölgede yapılacak uygulamalar için minimum yoğunluğun 4-8 nokta/m² olması gerektiği sonucuna varmıştır. Aynı çalışmada, Oregon/ABD'de iki yıllık süre boyunca yapılan çeşitli LiDAR projeleri incelenerek, noktaların ne kadarının zeminden döndüğü hesaplanmış ve bir sinyalin zemin olarak sınıflandırılma olasılığı %14 olarak bulunmuştur. Yani minimum yaklaşık 8 nokta/m² yoğunluklu veri için, zeminden yansıyan nokta yoğunluğu 1.1 nokta/m² (1 m çözünürlüklü SAM üretimine uygun) olmaktadır.

Guo vd. (2010); 1.32 nokta/m² yoğunluklu veriseti için, veriyi %90 ile %10 arasında değişen oranlarda seyrekleştirerek (nokta sayısını azaltarak), farklı topoğrafik özellikli araziler için, farklı enterpolasyon yöntemleri (komşuluk, ters ağırlıklı mesafe (IDW), TIN, spline ve Kriging) kullanarak, farklı çözünürlüklerde (0.5, 1, 5 ve 10 m) SAM'lar üretmiş ve bu SAM'ların doğruluk araştırmasını yapmışlardır. Çalışma sonucunda; SAM'ın KOH'sının topoğrafyanın değişkenliği ile doğrusal korelasyonlu, LiDAR nokta yoğunluğu ile de doğrusal olmayan korelasyonlu olduğunu gözlemlemişlerdir. Ayrıca arazi topoğrafyasının değişimi ve nokta yoğunluğunun SAM

doğruluğuna etkisinin, farklı enterpolasyon teknikleri ve farklı SAM çözünürlükleri için de değiştiğini tespit etmişlerdir. Benzer şekilde Chu vd. (2014), LiDAR nokta yoğunluğu ve kullanılan enterpolasyon yönteminin farklı tipte araziler için SAM doğruluğunu etkilediğini ortaya koymuştur. Guo vd. (2010)'nun elde ettikleri sonuçlar şöyle özetlenebilir: Yüksek çözünürlüklü SAM'larda (0.5 ve 1 m); topoğrafyanın değişkenliği ile birlikte nokta yoğunluğunun sonuç SAM doğruluğuna etkisi vardır. Bununla birlikte düşük çözünürlüklü SAM'larda (5 ve 10 m) ise topoğrafya değişkenliği sonuç SAM doğruluğunu etkileyen ana parametredir. Yani yüksek çözünürlüklü SAM'lar için, topoğrafya değişkenliği ile nokta yoğunluğu SAM doğruluğunu benzer şekilde etkilerken, düşük çözünürlüklü SAM'lar için yoğunluğa kıyasla topoğrafya değişkenliği doğruluğu çok daha fazla etkilemektedir. Yüksek çözünürlüklü SAM'lar için Kriging yöntemi en doğru sonuçları verirken, düşük çözünürlüklü SAM'lar için diğer enterpolasyon yöntemleri spline (en kötü sonucu vermiştir) hariç benzer sonuçlar vermiştir. Yüksek çözünürlüklü SAM'lar için nokta yoğunluğunu arttırmak, KOH'yı azaltmaktadır. Ancak KOH ile nokta yoğunluğu arasındaki doğrusal korelasyon yüksek çözünürlükler (0.5 ve 1 m) için anlamlı iken, düşük çözünürlükler (5 ve 10 m) için anlamlı olmamaktadır. Yüksek çözünürlüklü SAM'larda (0.5 ve 1 m); yoğunluk arttıkça KOH üssel olarak azalmaktadır. Ayrıca, özellikle düşük yoğunluklu veriler için, IDW ve spline yöntemleri; Kriging, TIN ve komşuluk yöntemlerine göre nokta yoğunluğu değişimlerine biraz daha duyarlı olmaktadır. Bununla birlikte nokta yoğunluğu orijinal nokta yoğunluğunun %70'i (literatürde benzer çalışmalar orijinal veriyi %50 seviyesine kadar azaltmaların SAM kalitesini bozmadığını göstermektedir) ve üstünde olduğunda, yoğunluğun doğruluğa etkisi, enterpolasyon yöntemlerinin tümü için, nispeten çok az olmaktadır. Düşük çözünürlüklü SAM'lar (5 ve 10 m) için ise nokta yoğunluğundaki değişimin SAM'ın doğruluğuna çok etki etmediği (oldukça küçük olduğu) ve enterpolasyon yöntemleri arasında spline yönteminin diğer yöntemlere göre, nokta yoğunluğuna en duyarlı yöntem olduğu tespit edilmiştir. Benzer şekilde Sanii S. (2008) IDW yöntemi kullanarak, üç farklı tipte (düz, orta engebeli, engebeli) arazi için 8 farklı seviyede seyrekleştirdiği LiDAR verisinden yararlı 10 farklı çözünürlükte SAM'lar üretmiş ve bunları karşılaştırmıştır. Guo vd. (2010) ile benzer sonuçlara ulaşan Sanii S. (2008)'nin bulgularına göre, veri yoğunluğunun %50 seyrekleştirilmesi SAM'ın KOH'sını çok az seviyede (2 - 4 cm) olumsuz etkilemektedir. Raber vd., (2007) SAM'ların doğruluklarını ve bunlar ile yapılan hidrolik analizlerin sonuçlarını (sel risk haritası) karşılaştırmışlar ve daha fazla sayıda LiDAR noktasına sahip olmanın, sel haritalama uygulamalarında her zaman için yararlı olamayacağı sonucuna ulaşmışlardır. Böylece Raber vd. (2007)'de seyrekleştirilmiş LiDAR verisinden üretilmiş SAM'ların doğruluk değerlerinde önemli değişiklikler tespit edememişlerdir.

Chu vd. (2014), dağlık ve ormanlık bir alan için, jeomorfolojik detayların tespitinde nokta yoğunluğunun ve enterpolasyon yönteminin etkisini incelemiştir. Çalışmada üç farklı enterpolasyon yöntemi (IDW, TIN ve Kriging) ve beş farklı seviyede (1/2, 1/4, 1/8, 1/16 ve 1/32) azaltılmış nokta bulutu kullanılmıştır. Sonuçta Kriging ve TIN yöntemlerini kullanarak, 1/8 seviyesinde azalttıkları verisetiyle ürettikleri 1 m çözünürlüklü SAM'ı kullanarak %80'in üzerinde başarı ile toprak kayması şevlerini tespit etmişlerdir. m² de toplam 37 nokta (3.5 zemin noktası), 1/8 oranında azaltılarak m² de 5 noktaya (0.5 zemin noktası) indirilmiştir. Jeomorfolojik detayların tespitinde başarılı sonuçlar elde edebilmek için;

minimum koşulun m^2 de 1-3 nokta, dağlık ve ormanlık alanlar için ise m^2 de 5 nokta olması gerektiği belirtilmiştir.

Duldulao (2009) çalışmasında nokta yoğunluğunun SAM doğruluğuna etkisini araştırmıştır. Değişik topoğrafik özelliklere sahip bir alanda toplanmış LiDAR verisini (6 nokta/ m^2) referans olarak kabul etmiş ve bu veriyi çeşitli oranlarda seyrekleştirerek farklı çözünürlüklerde nokta bulutları ve bu nokta bulutlarından da 1 m çözünürlüklü SAM'lar üreterek referans modelle karşılaştırmıştır. Sonuç olarak çalıştığı test alanı için doğru bir SAM elde etmek için en az 0.6 nokta/ m^2 (yaklaşık 1 nokta/ m^2) yoğunluğun yeterli olduğunu bulmuştur. Aguilar vd., (2010) orijinal nokta yoğunluğunun 1/3'ü yoğunlukta da SAM üretiminde çok benzer doğruluk değerleri elde etmiştir. Anderson vd., (2006) benzer bir çalışma yapmış ve yüksek çözünürlüklü SAM üretiminin, düşük çözünürlüklü SAM üretimine göre daha fazla oranda nokta yoğunluğuna duyarlı olduğunu bulmuşlardır. Liu X. (2008) yaptıkları çalışmada; orta derecede karmaşıklığa sahip bir arazi için, orijinal veri ile elde edilen 5 m çözünürlüklü SAM ile orijinal verinin (noktalar arası ortalama mesafe 2.4 m) yarısı oranında noktaya sahip veri ile elde edilen 5 m çözünürlüklü SAM arasında önemli bir farkın olmadığını bulmuşlardır.

García-Quijano vd. (2008) yaptıkları çalışmada, aynı cihazla iki farklı (700 ve 1200 m) yükseklikten bir gün ara ile çekilmiş LiDAR verisinden SAM üretmişler ve bu modelleri yer kontrol noktaları ile karşılaştırarak düşey doğruluklarını değerlendirmişlerdir. Çalışma, az eğimli ve de çok karmaşık arazi şekillerinin olmadığı bir bölgede gerçekleştirilmiştir. NNA'ları 0.4 ve 1.4 m olan bu iki verisetinden elde edilen SAM'ların rölatif düşey doğrulukları benzer, mutlak doğruluklarının KOH'ları arasındaki fark da yaklaşık 7.5 cm olarak bulunmuş ve yazarlar daha yüksek yoğunluklu verinin, üretilen SAM'ların düşey doğruluğunu önemli miktarda geliştirmedeği sonucuna varmışlardır.

Pirotti ve Tarolli, (2010); farklı veri yoğunluklarına sahip LiDAR verilerinden yararlı üretilmiş 1 m çözünürlüklü SAM'lardan elde edilmiş arazi eğrilik (curvature) haritalarından dere yatağı çıkarımı çalışması yapmışlardır. Çalışmalarında, farklı yoğunluklardaki LiDAR verilerinin bu amaca uygunluğunu araştırmışlardır. Bunun için orijinal yoğunluğu 7 zemin noktası/ m^2 olan verisetini, yedi farklı seviyede (4, 8, 16, 32, 64, 128 ve 256 katı oranında) seyrekleştirilerek düşük yoğunluklu verisetleri elde etmişlerdir. Bu verisetlerinden 1 m aralıklı SAM'lar, SAM'lardan arazi eğrilik haritaları ve bu haritalardan da dere yataklarını çıkarmışlardır. Çalışma neticesinde iki sonuca ulaşılmıştır: (i) Arazi ölçümleri ile SAM'lar karşılaştırılarak ortalama mutlak hata ve KOH'lar hesaplanmış ve nokta yoğunluğunun seyrekleştirilmesinin SAM'ın düşey doğruluğuna etkisinin 16 kat seyrekleştirmeden sonra başladığı görülmüştür. Başka bir ifade ile 0.44 nokta/ m^2 ile 7 nokta/ m^2 den üretilen SAM'ların düşey doğrulukları birbirine çok yakın çıkmıştır. (ii) 1 m çözünürlüklü SAM'lardan yararlı üretilmiş arazi eğrilik haritalarından dere yatağı çıkarımı için, $5 m^2$ de 1 nokta (32 kat seyrekleştirilmiş, 022 nokta/ m^2) yoğunluklu verinin yeterli olduğunu ifade etmişlerdir.

Triglav-Čekada vd. (2010), Slovenya'da büyük ölçekli topoğrafik veri üretimi için gerekli olan minimum LiDAR nokta yoğunluğuna ilişkin önerilerde bulunmuşlardır. Buna göre, ülkenin bitki örtüsü yapısı da dikkate alındığında; 1:10.000 ölçekli harita verisi üretmek için en uygun yoğunluğun 3-5 nokta/ m^2 , 1:5.000 ölçekli harita verisi üretmek için 12-20 nokta/ m^2 , 1:1.000 ölçekli harita verisi için ise HLS yerine yersel LiDAR'ın uygun olduğu sonucuna ulaşmışlardır. HLS'nin 1:10.000 ve daha küçük ölçekli topoğrafik haritalama çalışmaları için ekonomik olacağını vurgulamışlardır.

Düşük çözünürlüklü LiDAR verisi kullanılarak, ormana ait çok sayıda yapısal değişken doğru olarak tahmin edilebilmektedir. Daha düşük maliyetlerle, düşük yoğunlukta toplanmış LiDAR verisi kullanılarak, çoğu orman envanter/biyofiziksel değişkenleri uygun şekilde tahmin etmek mümkündür. Bu da orman envanteri çıkarma çalışmaları kapsamında HLS'yi maliyet etkin bir yöntem olarak öne çıkarmaktadır. Bu bağlamda yapılan çalışmalara örnek olarak aşağıdaki çalışmalar verilebilir: Çoğu çalışma; LiDAR nokta yoğunluğunun 0.06 ile 0.5 nokta/ m^2 arasındaki seviyelere kadar azaltılarak kullanılmasının, hesaplanan kanopi ölçümlerinin hassasiyetine etkisinin az olduğunu bulmuştur (Treitz vd., 2012; Jakobowski vd., 2013). Kanopi yüksekliği ve yoğunluğu ile ilgili 23 adet ölçüm (metrik) konusunda Lim vd. (2008) iki farklı yükseklikten elde edilmiş LiDAR verisini (yoğunlukları oranı 1/3) karşılaştırmışlar ve 23 ölçümden sadece 5 tanesinde farklı yoğunlukta verilerin önemli ölçüde değiştiğini tespit etmişlerdir. Treitz vd. (2012) bazı orman değişkenlerinin hesaplanmasında 3.2 nokta/ m^2 yoğunluklu veri yerine, seyrekleştirerek elde ettikleri 0.5 nokta/ m^2 yoğunluklu veri kullanımının yeterli olduğunu ortaya koymuşlardır. Lim vd. (2010), orman envanter bilgilerini tahmin etmede, uygun nokta yoğunluğu nedir sorusuna cevap aramışlardır. Kanada'da başlatılan ve 3 yıl süren bir proje sonunda, projede 3 nokta/ m^2 yoğunluklu veri 1.5 ve 0.5 nokta/ m^2 yoğunluğa seyrekleştirilerek üç farklı verisetinden bazı orman parametreleri hesaplanmış ve bunlar karşılaştırılmıştır. Sonuçta tahmin edilen orman envanteri değişkenleri için yapılan tahminlerde nokta azaltımının etkisinin olmadığı tespit edilmiş ve minimum nokta yoğunluğu olarak 0.5 nokta/ m^2 'nin yeterli olduğu sonucuna varılmıştır. Yazarlar daha yoğun veri kullanılarak daha iyi tahminler yapılması düşüncesinin değişmesi gerektiğini vurgulamışlardır. Jakobowski vd., (2013); karışık iğne yapraklı bir ormanda, nokta yoğunluğunu m^2 'de 9 noktadan 0.01 noktaya kadar çeşitli çözünürlüklerde seyrekleştirmiş ve LiDAR ölçümleri ile temel meşcere ölçümleri (ağaç yüksekliği, göğüs yüksekliğinde çapı ve toplam bazal alanı) arasındaki korelasyonların nokta yoğunluğu 1 nokta/ m^2 'nin altına düşene kadar nispeten etkilenmediğini bulmuşlardır. Jakobowski vd., (2013) öte yandan, örtü ile ilgili orman ölçümleri ve tek ağaç analizlerinde yüksek yoğunluklu veriye ihtiyaç duyulduğunu vurgulamışlardır. Watt vd. (2013) daha düşük yoğunluklu veri toplayarak, orman envanter çalışmaları için LiDAR'ın daha maliyet etkin bir yöntem yapılabileceğini ifade etmektedir. Yeni Zelanda'da ormancılık çalışmaları için 1-2 nokta/ m^2 yoğunluklu veri toplandığını belirten Watt vd. (2013) eğer elde hassas bir SAM varsa, bu yoğunluk değerlerinden çok daha az yoğunlukta verilerle benzer sonuçların elde edilebileceğini belirtmişlerdir.

3. TEST VERİSİ

Bu çalışmada kullanılan LiDAR verisi, Bakanlıklararası Harita İşlerini Koordinasyon ve Planlama Kurulunun (BHİPKK) Bilimsel Araştırma ve Koordinasyon Komisyonu (BARKOK) tarafından planlanan ve Harita Genel Komutanlığınca organize edilen test uçuşunda toplanmıştır. Uçuş, Bergama/İzmir'de 20-21 Ekim 2014 tarihlerinde sabit kanatlı B200 uçağına monte edilmiş, Optech firmasının Pegasus HA-500 LiDAR sistemi ile iki farklı yükseklikten gerçekleştirilmiştir. Uçuşlara ait teknik bilgiler Tablo 2'de sunulmuştur (Kayı vd, 2015).

LiDAR verileri Optech Lidar Mapping Suite (LMS) yazılımı ile ön işlemlerden geçirilmiştir. Araziye tesis edilen 51 adet noktasının 26 adedi kontrol noktası, 25 adedi ise denetleme

noktası olarak kullanılmıştır. Denetleme noktalarına göre KOH ± 0.07 m olarak hesaplanmıştır (Kayı vd, 2015).

Uçuş Yüksekliği	Tarama Açısı +/-	Uçuş Hızı (knots)	Yoğunluk (nokta/m ²)	Kolon Sayısı	Bindirme
2600m	20°	150	≥ 2	18	%50
1200m	35°	150	≥ 8	32	% 25

Tablo 2. Test uçuşuna ait teknik bilgiler

Tablo 2’den de anlaşılacağı üzere, m²’de 2 nokta ile 8 nokta veri toplama arasında yaklaşık 2 katı uçuş maliyeti bulunmaktadır. 150 km²’lik alan için 2600 m yükseklikten yapılan uçuş yaklaşık 3 saat sürerken, 1200 m yükseklikten yapılan uçuş 6 saat sürmüştür.

Bergama test alanı içerisinde farklı topoğrafik karakteristik özelliklere ve arazi örtüsüne sahip ve farklı tipte detayları içeren toplam 0.88 km² büyüklüğe sahip 7 adet küçük çalışma alanı seçilmiştir (Şekil 1). Bu alanların büyüklükleri ve içerdikleri detaylar ile topoğrafik özelliklerine ait bilgiler Tablo 3’de verilmiştir.



Şekil 1. Seçilen çalışma alanları. 1. sıra: Alan-1,2,3 (soldan sağa); 2.sıra: Alan-4,5,6 (soldan sağa); 3.sıra: Alan-7

Veri toplama esnasında uygulanan farklı kolon bindirme oranları nedeniyle, uçuş hatları içerisinde farklı nokta dağılımları elde edilmiştir. Kolon bindirme oranlarının etkisini karşılaştırmaya yansıtılmak için, her iki veriseti için de bindirmesiz tek uçuş hattı verileri kullanılmıştır.

4. UYGULAMA

Ham nokta bulutu gerekli işlemlerden geçirilerek; aykırı noktalar tespit edilmiş, filtreleme ve sınıflandırma işlemleri (hem otomatik hem manuel) yapılarak noktalar zemin, alçak bitki örtüsü, orta bitki örtüsü, yüksek bitki örtüsü, bina ve tel (elektrik hattı) olarak sınıflandırılmıştır. Sınıflandırılmış nokta bulutlarından yararlı 1 m aralıklı Sayısal Yüzey Modeli (SYM) ve SAM; 1 m aralıklı eş yükseklik eğrisi, bina ve tel vektör verileri üretilmiştir. Tüm vektör veriler yazılımın hazır araçları ile otomatik olarak elde edilmiştir. Ayrıca yazılımın tek ağaç tespit aracı kullanılarak, çalışma alanlarında mevcut ağaçlar (2 m’den yüksek) saydırılmıştır. Çalışma kapsamında kırıklık hattı detayları kullanılmamıştır. Tüm bu işlemler Terrasolid yazılımı ile ve her iki yoğunluktaki veriler için aynı parametreler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çalışma alanları küçük olduğu için verilerin gerek otomatik gerekse manuel işlem süreleri, Alan-7 hariç birbirlerine yakın sürmüştür. En çok işlem süresi gerektiren Alan-7 için; yoğun verinin işlenmesi 34 saat, düşük yoğunluklu verinin işlenmesi ise 20 saat sürmüştür.

Alan-1	Alan-2	Alan-3	Alan-4	Alan-5	Alan-6	Alan-7
Bitki Örtüsü (Sık ve seyrek)	Bitki Örtüsü (Sık ve seyrek)	Bitki Örtüsü (Çok sık)	Bitki Örtüsü (Seyrek)	Tarım Alanı, Tel	Boş Alan	Kentsel Alan
0.10km ²	0.06 km ²	0.05 km ²	0.09 km ²	0.32 km ²	0.10 km ²	0.16 km ²
Çok Eğimli	Orta Eğimli	Az Eğimli	Çok Eğimli ve Engebeli	Düz	Orta Eğimli	Çok Eğimli ve Düz

Tablo 3. Çalışma alanlarının özellikleri

1200 m’den toplanan verilerden üretilen 1 m aralıklı SYM ve SAM’lar doğru kabul edilerek, 2600 m’den toplanan verilerden üretilen 1 m aralıklı SYM ve SAM’lar arasındaki farklar alınmış ve farkların istatistiki değerlendirilmesi yapılarak Tablo 4 ve 5’de sunulmuştur.

	Min. Fark	Maks. Fark	Ort. Fark	KOH
Alan-1	-14.54	14.21	-0.19	2.141
Alan-2	-7.59	8.0	-0.183	1.568
Alan-3	-18.35	17.32	-0.094	2.041
Alan-4	-7.0	7.53	-0.078	0.982
Alan-5	-27.28	30.51	0.078	1.245
Alan-6	-3.23	8.57	0.054	0.242
Alan-7	-24.86	27.01	0.019	2.74

Tablo 4. SYM karşılaştırılması sonucu

	Min. Fark	Maks. Fark	Ort. Fark	KOH
Alan-1	-1.47	0.74	-0.075	0.132
Alan-2	-3.57	1.01	-0.091	0.149
Alan-3	-1.48	1.17	0.013	0.104
Alan-4	-1.66	3.12	0.01	0.118
Alan-5	-2.09	2.61	0.031	0.109

Alan-6	-0.97	1.22	0.034	0.046
Alan-7	-4.72	7.47	0.059	0.430

Tablo 5. SAM karşılaştırılması sonucu

Nokta bulutlarından çıkarılan vektör verilerin karşılaştırılması yapılırken, bölgeye ait 30 cm çözünürlüklü renkli hava fotoğraflarından oluşturulan stereo modellerden de faydalanılmıştır. Her iki verisetinden oluşturulan vektör veriler stereo ortamda hava fotoğraflarının üzerine açılarak görsel kontrol ve değerlendirmeler yapılmıştır.

Yazılım ile nokta bulutundan tespit edilen ağaç sayıları karşılaştırılmıştır. Fotogrametrik yöntemle stereo ortamda çalışma alanlarındaki tek ağaçlar sayılmış ve ağaç sayısının yüksek yoğunluklu veriden bulunan ağaç sayısı ile arasında yaklaşık %5-10'luk fark tespit edilmiştir. Bu farkın yazılımın parametreleri ayarlanarak daha da düşürülebileceği değerlendirilmektedir. Diğer yandan düşük yoğunluklu veriden tespit edilen tek ağaç sayısının, yüksek yoğunluklu veriye göre %53 ile %66 arasında değişen oranlarda daha az sayıda olduğu tespit edilmiştir. Örneğin, yazılım Alan-2 için yüksek yoğunluklu veriden 2.366 adet ağaç tespit etmişken, düşük yoğunluklu veriden 1.397 adet ağaç (%59 daha az) tespit edebilmiştir. Bu rakamlar Alan-4 için 1182'ye 782 (%66 daha az) olarak gerçekleşmiştir.

Eş yükseklik eğrileri kıyaslandığında, her iki verisetinden üretilen eş yükseklik eğrilerinin tamlık ve geometrik açılarından birbirlerine çok benzer oldukları tespit edilmiştir. İki veri arasındaki küçük farklar; dere ve yol geçişlerinde, şev kenarlarında, geniş yataklı sulu dere kıyısındaki ağaç altlarında görülmüştür (Şekil 2).

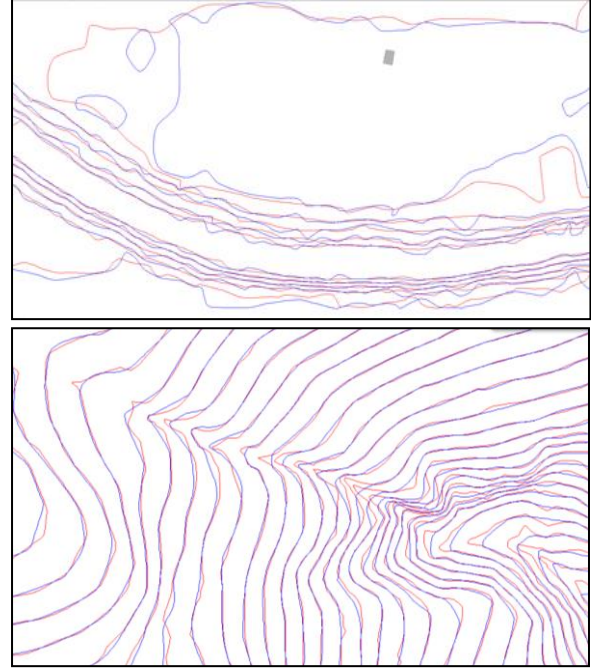
Alan-5 için; eş yükseklik eğrilerinin kartografik gösterimi (nefaset) açısından, yüksek yoğunluklu veri daha iyi sonuç vermiştir (Şekil 2a). Düşük yoğunluklu veriden çizilen eş yükseklik eğrilerinin, fazladan manuel düzeltmeye ihtiyaç duyduğu görülmüştür. Özellikle geniş dere kenarındaki ağaçların altından geçen eş yükseklik eğrileri gereksiz girinti ve çıkıntılı çizilmiştir. Diğer alanlar için; yüksek yoğunluklu veriden elde edilen eş yükseklik eğrilerinin dere ve yol geçişleri muntazam şekilde gerçekleşmiştir. Burada düşük yoğunluklu verinin aynı kalitede geçiş sağlayabilmesi için, dere ve yolların sayısallaştırılıp kırıklık hattı olarak eş yükseklik eğrisi üretimine dâhil edilmesi gerektiği görülmüştür. Dere ve yol geçişleri ile şev kenarları dışında kalan bölgeler için ise yüksek yoğunluklu veri biraz daha ayrıntılı olarak eş yükseklik eğrilerini göstermekle beraber, kartografik gösterim açısından bu bölgelerde düşük yoğunluklu verinin daha kabul edilebilir olacağı düşünülmektedir. Kartografik gösterimi iyileştirmek için yazılımın parametreleri ile oynayarak farklı sonuçlar elde edilebileceği değerlendirilmektedir.

Nokta bulutundan elde edilen enerji nakil hattı telleri incelendiğinde; 34.5 kW'lık gerilim hattı telleri düşük yoğunluklu veriden çıkartılamazken, yüksek yoğunluklu veriden çıkartılmıştır (Şekil 3a). 154 kW'lık gerilim hattı tellerinin tamamı her iki verisetinden de çıkartılmıştır (Şekil 3a). Ancak düşük yoğunluklu veriden elde edilen tel verisi içerisinde bazı yerler de kısa kopukluklar tespit edilmiştir (Şekil 3b). Her iki veriden elde edilen tel çizgileri arasında düşeyde 20-25 cm, yatayda ise 30-50 cm fark tespit edilmiştir.

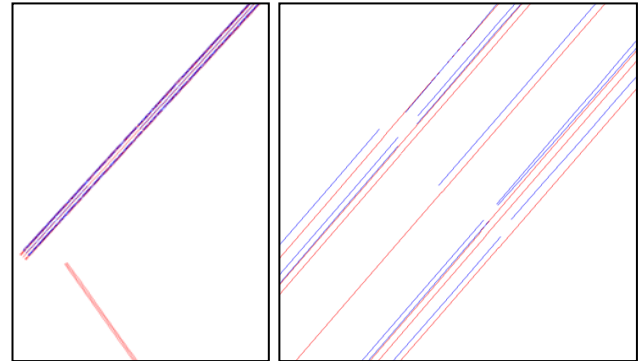
Yüksek yoğunluklu veriden kentsel alan içerisinde bulunan tüm binalar tespit edilirken, düşük yoğunluklu veriden binaların tamamı çıkartılamamıştır. Ağaç altlarında kalan tek katlı binalar ve bina müştemilatları (odunluk, sundurma, çardak vb.) düşük yoğunluklu veriden elde edilen bina vektör verisinde yer almamıştır.

Bina çatı kenarları yüksek yoğunluklu veriden daha doğru ve detaylı çizilmiştir. Özellikle karmaşık şekle sahip binalar

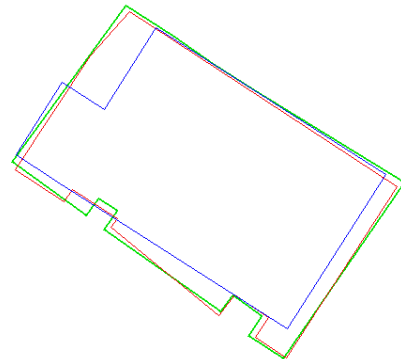
başta olmak üzere, bazı binaların çatı kenarları düşük yoğunluklu veriden doğru çizilememiş ve bazı ayrıntılar gösterilememiştir (Şekil 4). Çatı çizgileri karşılaştırıldığında, yatayda 0.2 - 2.0 m arasında değişen kayıklıklar tespit edilirken, düşeyde farklılık bulunmamıştır.



Şekil 2. İki ayrı veri setinden elde edilen eş yükseklik eğrilerinin karşılaştırılması (Kırmızı renk yüksek, mavi renk düşük yoğunluklu veriden üretilen)



Şekil 3. İki ayrı veri setinden elde edilen tel hatlarının karşılaştırılması (Kırmızı renk yüksek, mavi renk düşük yoğunluklu veriden üretilen)



Şekil 4. İki ayrı veri setinden elde edilen binanın karşılaştırılması (Kırmızı renk yüksek, mavi renk düşük yoğunluklu veriden üretilen, yeşil renk fotogrametrik olarak çizilen)

SAM'lar incelendiğinde; KOH'nın bitki örtüsü olan alanlarda, bölgenin eğimine de bağlı olarak, 10-15 cm; kentsel alanda 43 cm, eğimsiz tarım alanında 11 cm, detay olmayan boş alanda ise 4.6 cm değiştiği görülmektedir. Buradan hareketle kentsel alanlar dışında arazi örtüsüne sahip bölgelere ait SAM üretiminde, minimum 8 nokta yerine 2 nokta/m² yoğunluklu LiDAR verisinin kullanılabilmesi değerlendirilmektedir.

SYM'ler incelendiğinde; KOH'nın bitki örtüsü olan alanlarda, 1-2 m; kentsel alanda 2.7 m, eğimsiz tarım alanında 1.2 m, detay olmayan boş alanda ise 0.2 m değiştiği görülmektedir. Elde edilen bu sonuçlara göre, SYM'nin kullanım amacına göre hangi yoğunluklu verinin kullanılmasına karar verilmesi gerektiği değerlendirilmektedir.

Manuel editleme işlemine en çok Alan-7'de ihtiyaç duyulmuştur. Bu alan için, yüksek yoğunluklu veri için harcanan zamanın yaklaşık %50 daha fazlası harcanmıştır. Düşük yoğunluklu verinin manuel editlenmesi işleminde yüksek çözünürlüklü ortofoto, bina vektör verisi gibi yardımcı kaynaklara daha çok ihtiyaç duyulmuştur.

SONUÇLAR

Sonuç verinin doğruluğu ve hassasiyeti ile doğrudan ilişkili olan LiDAR nokta yoğunluğu, diğer yandan veriyi toplama, işlemlerden geçirme iş yükü ve süresi, depolama ve paylaşma zorluğu yani projenin toplam maliyeti ile de ilişkilidir. Daha yoğun veri toplamak demek projenin toplam maliyetinin artması demektir. Öte yandan yüksek yoğunluklu bir verisetinden örneğin düşük çözünürlüklü SAM üretmek, orijinal verinin zenginliğinin ve doğruluğunun değerini düşürecektir. Yönetilmesi zor ve maliyetli olan büyük miktarlarda LiDAR verisi toplamak yerine, kullanıcı ihtiyaçlarına cevap verecek, gereksinimlerini karşılayacak optimum yoğunlukta veri toplanması tercih edilmelidir. İkinci bölümde de belirtildiği gibi, bazı proje ve uygulamalar için yüksek yoğunluklu veri kullanımı her zaman için etkin veya istenilen durum olmamaktadır.

Hangi uygulama için hangi nokta yoğunluğunun kullanılabilmesine ilişkin literatürde yer alan bazı çalışmalardan edinilen bilgiler birinci ve ikinci bölümlerde sunulmuştur. Bu bilgiler ve aşağıda sunulan sonuçlar; proje alanının büyüklüğü, topoğrafik yapısı ve arazi örtüsü dikkate alınarak uygun nokta yoğunluğu seçimine ışık tutacaktır.

Daha düşük yoğunluklu (seyrekleştirilmiş) nokta bulutları ile doğruluğu bozmadan veya çok az bozarak, çok daha kolay ve kısa işlem sürelerinde SAM'lar elde edilerek üretim etkinliği artırılabilir (Anderson vd., 2006; Liu X., 2008; Guo vd., 2010). Bu çalışma sonucunda da elde edilen benzer sonuçlar dikkate alındığında, kentsel alanlar dışında, SAM üretiminde düşük yoğunluklu veri kullanılabilmesi değerlendirilmektedir. SYM'ler için bu çalışmada bulunan 1-2.7 m arası farklılıkların ayrıca değerlendirilmesi ve detaylı olarak incelenmesi gerekmektedir.

Her iki verisetinden elde edilen eş yükseklik eğrileri benzer sonuçlar verdiğinden, 1 m aralıklı eş yükseklik eğrisi üretimi için 2 - 8 nokta/m² aralığında yoğunluklu veri kullanılabilmesi değerlendirilmektedir. Her iki verisetinden elde edilen eş yükseklik eğrileri özellikle dere ve yol geçişlerinde farklılaşmışlardır. Bu nedenle, bazı durumlar için 2 nokta/m² yoğunluklu veri kullanımında, kırıklık hattı detaylarının üretime katılması ihtiyacının doğabileceği değerlendirilmektedir. Öte

yandan eş yükseklik eğrisi aralığı arttıkça LiDAR nokta yoğunluğunun da azaltılabileceği açıktır.

Gerek tamlik gerekse doğruluk açısından, enerji nakil hattı telleri ve kentsel alan (bina) çalışmalarında, 2600 m irtifadan elde edilen minimum 2 nokta/m² yoğunluklu LiDAR verisinin yeterli olmadığı, öte yandan bu çalışmalar için 1200 m irtifadan toplanan minimum 8 nokta/m² yoğunluklu verinin ise yeterli olduğu tespit edilmiştir. Çok hassas şekilde bina çatı kenarlarının ihtiyaç olmadığı kent modellerinde ve 1:5.000 ölçekli harita yapımında minimum 8 nokta/m² yoğunluklu veriden elde edilen binaların kullanılabilmesi değerlendirilmektedir.

Ağaç sayısının tespiti gibi tek ağaç bazında yapılacak uygulamalarda, bu çalışmada kullanılan 2 nokta/m² yoğunluklu verinin yeterli olmadığı, 8 nokta/m² yoğunluklu verinin ise yeterli olduğu görülmüştür.

Veri işleme süresi açısından, 0.16 km² büyüklüğe sahip kentsel alan için yüksek yoğunluklu verinin işlenmesi diğer veriye göre yaklaşık 1.5 kat fazla sürmüştür. Karar alma sürecinde bu sürenin de dikkate alınması gerekmektedir.

Bir sonraki çalışma olarak; farklı tarama desenlerinin sonuç ürünlerine etkisini değerlendirmek için, aynı irtifadan ancak farklı lazer cihazları ile toplanmış nokta bulutlarından üretilmiş verilerin karşılaştırılması planlanmaktadır.

TEŞEKKÜR

Terrasolid yazılımı ile ham nokta bulutunu gerekli işlemlerden geçirek sonuç çıktı ürünleri üreten, BGS Bilgi Sistemleri firmasından Müh. İbrahim ALKAN'a ve bu olanağı sağlayan BGS Bilgi Sistemleri firmasına katkılarından dolayı teşekkürlerimizi sunarız.

KAYNAKLAR

Aguilar F.J., Mills J.P., Delgado J, Aguilar M.A., Negreiros J.G., Pérez J.L., 2010. Modelling vertical error in LiDAR-derived digital elevation models. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 65: 103-110.

Ahokas E., Kaartinen H., Hyypää J., 2008. On the quality checking of the airborne laser scanning-based nation wide elevation model in Finland. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXVII. Part B1, pp. 267-270.

American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS), 2014. ASPRS Positional Accuracy Standards for Digital Geospatial Data—Edition 1, Version 1.0.0. American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 54 p.

Anderson, E.S., Thompson J.A., Crouse D.A., Austin R.E., 2006. Horizontal resolution and data density effects on remotely sensed LIDAR-based DEM. Geoderma, 132 (3-4):406-415.

Balsa-Barreiro J., Avariento J.P., Lerma J.L., 2012. Airborne light detection and ranging (LiDAR) point density analysis. Scientific Research and Essays Vol. 7(33), pp. 3010-3019, DOI: 10.5897/SRE12.278.

Chu H., Wang C., Huang M., Lee C., Liu C., Lin C., 2014. Effect of point density and interpolation of LiDAR-derived high-resolution DEMs on landscape scarp identification.

- GIScience & Remote Sensing, 51:6, 731-747, DOI: 10.1080/15481603.2014.980086.
- Duldulao R.L., 2009. Point Density Effects on Digital Elevation Models Generated From LiDAR Data. Master of Science Thesis from the Naval Postgraduate School.
- García-Quijano M.J., Jensen J.R., Hodgson M.E., Hadley B.C., Gladden J.B., Lapine L.A., 2008. Significance of Altitude and Posting Density on Lidar-derived Elevation Accuracy on Hazardous Waste Sites. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing Vol. 74, No. 9, pp. 1137–1146.
- Guo Q., Li W., Yu H., Alvarez O., 2010. Effects of Topographic Variability and Lidar Sampling Density on Several DEM Interpolation Methods. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing 76 (6): 701–712, DOI:10.14358/PERS.76.6.701
- Jakubowski M.K., Guo Q., Kelly M., 2013. Tradeoffs between lidar pulse density and forest measurement accuracy. Remote Sensing of Environment 130, 245–253. DOI:10.1016/j.rse.2012.11.024.
- Kayı A., Erdoğan M., Eker O., 2015. Optech HA-500 ve Riegl LMS-Q1560 ile gerçekleştirilen LiDAR test sonuçları. Harita Dergisi Sayı 153, sayfa 42-46.
- Lim K., Hopkinson C., Treitz P., 2008. Examining the effects of sampling point densities on laser canopy height and density metrics. The Forestry Chronicle Vol. 84, No 6, pp.876-885
- Lim K., Treitz P., Woods M., Nesbitt D., Etheridge D., 2010. Operationalizing the use of LiDAR in Forest Resource Inventories: What is the optimal point density? ASPRS 2010 Annual Conference, San Diego, California.
- Liu X., 2008. Airborne LiDAR for DEM Generation: Some Critical Issues. Progress in Physical Geography 32 (1): 31–49, DOI:10.1177/0309133308089496.
- Magnusson M., Fransson JES., Holmgren J., 2010. Effects of estimation accuracy of forest variables using different pulse density of laser data. Forest Science, 53, 619–626.
- Petersen Y.M., Rost H.B., 2011. Swedish Lidar Project: New Nationwide Elevation Model. GIM International Volume 25 Number 2.
- Pirotti F., Tarolli P., 2010. Suitability of LiDAR point density and derived landform curvature maps for channel network extraction. Hydrological Processes 24, 1187–1197, DOI: 10.1002/hyp.7582.
- Raber G.T., Jensen J.R., Hodgson M.E., Tullis J.A., Davis B.A., Berglund J., 2007. Impact of Lidar Nominal Post-spacing on DEM Accuracy and Flood Zone Delineation. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol. 73, No. 7, pp. 793–804.
- Sande C., Soudarissanane S., Khoshelham K., 2010. Assessment of Relative Accuracy of AHN-2 Laser Scanning Data Using Planar Features. Sensors 2010, 10, 8198-8214. DOI:10.3390/s100908198.
- Sanii S., 2008. Assessing the effect of point density and terrain complexity on the quality of LiDAR-derived DEMs in multiple resolutions. University of Calgary Department of Geography, Masters of Geographic Information Systems.
- Şehsuvaroğlu M.S., Eker O., Erdoğan M., Yıldız F., 2014. Sayısal Yüzey Modeli Üretiminde Fotogrametri mi, LiDAR mı? Harita Dergisi Sayı 151, sayfa 1-10.
- Treitz P., Lim K., Woods M., Pitt D., Nesbitt D., Etheridge D., 2012. LiDAR sampling density for forest resource inventories in Ontario, Canada. Remote Sensing, 4, 830–848. DOI: 10.3390/Rs4040830.
- Triglav-Čekada M., Crosilla F., Kosmatin-Fras M., 2010. Theoretical lidar point density for topographic mapping in the largest scales. Geodetski vestnik 54/3,403-416.
- U.S. Geological Survey (USGS), 2014. National Geospatial Program Lidar Base Specification, Version 1.2, Chapter 4 of Section B. U.S. Geological Survey Standards, Book 11, Collection and Delineation of Spatial Data.
- Watershed Sciences, Inc., 2010. Minimum LiDAR data density considerations for the Pacific Northwest. www.oregongeology.org/sub/projects/olc.
- Watt M.S., Adams T., Aracil S.G., Marshall H., Watt P., 2013. The influence of LiDAR pulse density and plot size on the accuracy of New Zealand plantation stand volume equations. New Zealand Journal of Forestry Science 2013, 43:15
- Wehr, A., 2009. LiDAR Systems and Calibration. In J. Shan & C. Toth (Eds.), Topographic Laser Ranging and Scanning Principles and Processing (pp. 129-172). Florida: Taylor & Francis Group.