



GPS YER KONTROL NOKTALARI KULLANILARAK LiDAR VERİSİNİN DOĞRULUK ANALİZİ

¹Nuray BAŞ, ²Hakan ÇELİK, ³H.Gonca COŞKUN

^{1,2,3}İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Geomatik Mühendisliği Bölümü, İSTANBUL

¹basn@itu.edu.tr, ²hakancelik@itu.edu.tr, ³gonca@itu.edu.tr

(Geliş/Received: 31.07.2015 ; Kabul/Accepted in Revised Form: 02.11.2015)

ÖZ: Günümüzde, harita üretiminde kullanılan çalışmalarda, geleneksel ölçüm tekniklerinden farklı olarak hem daha hızlı, hem de doğruluğu daha yüksek yeryüzü verisi elde etme çabaları gün geçtikçe artmaktadır. Bu çalışmada, elektromanyetik spektrumun 1.064nm yakın infrared bölgesinde algılama yapan bir Uzaktan Algılama Tekniği olan Hava LiDAR teknolojisinin, yatay ve düşey doğruluğunun RTK/GPS verileri ile (Real Time Kinematik- Global Positioning System) test edilmesi amaçlanmıştır. Bu kapsamda, Türkiye'nin Doğu Karadeniz bölgesinde yer alan Artvin İli Borçka ilçesinde 2x2 km² büyüklüğünde bir ormanlık bölge, çalışma alanı olarak seçilmiştir. Çalışmada, RTK/GPS ile elde edilmiş Yer Kontrol Noktaları (YKN) ile bu noktaların karşılık geldiği LiDAR noktalarının belirlenmesi için arama çapı yöntemi geliştirilmiş ve ayrıca, değişik arazi kategorileri için karşılaştırmalı test sonuçları ortaya konulmuştur. Çalışmanın sonucunda, düşey hata miktarı (KOH_z) normal dağılımda 0.20 m olarak ve %95 güven aralığında düşey doğruluk (doğruluk_z) ise 0.39m olarak bulunmuştur. Yatay hata (KOH_r) normal dağılımda minimum 0.36m, maksimum 1.01m; yatay doğruluk (doğruluk_r) ise %95 güven aralığında minimum 0.62m, maksimum 1.75m düzeyinde gerçekleşmiştir. Bu çalışmada kullanılan Hava LiDAR verisi için düşey doğruluk, yatay doğruluğa göre yaklaşık iki kat daha prezyonlu olarak gerçekleşmiştir.

Anahtar Kelimeler: LiDAR, GPS/RTK, arama çapı yöntemi, yatay ve düşey doğruluk

Accuracy Management of LiDAR Data Using GPS Ground Control Points

ABSTRACT: Nowadays, both faster and more accurate data acquisition studies are gradually gaining speed, different of traditional land surveying technics in order to obtain land data having high accuration and geometric resolution on mapping. In this study, it is aimed that, to test with RTK/GPS (Real Time Kinematic-Global Positioning System) data of LiDAR (Light Detection and Ranging) Technology, as Remote Sensing Technic, making detection at 1.064nm near infrared region of electromagnetic spectrum in terms of planimetric and vertical accuracy. İn this context, 2x2 km² forested land, located in Borçka province of Artvin City in the Eastern Black Sea Region of Turkey was selected as study area. In this study, position and elevation differences were estimated between Ground Control Points (GCP) acquired by RTK- and the corresponding LiDAR points, and then, the relationship between the accuracies of these values was tested with search radius method as compared with. Vertical error (RMSE_z) was found as 0.20m in normal distribution while it was 0.39 m, vertical accuracy (accuracy_z) in 95% confidence interval, Planimetric error (RMSE_r) was found as minimum 0.36m, maximum 1.01m, while it was minimum 0.62m, maximum 1.75m planimetric accuracy (accuracy_r) in 95% confidence interval. As a result, it was seen that the horizontal error was as twice as the vertical error.

Key Words: LiDAR, GPS (RTK), search radius technic, horizontal and vertical accuracy

DOI: 10.15317/Scitech.2016116094

GİRİŞ (INTRODUCTION)

Üzerinde yaşadığımız yer yüzeyine ait doğal ve yapay objelerin gerçek fiziki konumuna uygun olarak, en doğru ve hızlı bir şekilde modellenmesi amacıyla kullanılan haritacılık çalışmaları yüzlerce yıl öncesinden günümüze kadar süregelmektedir. Doğruluk derecesi ve çözünürlüğü daha yüksek bir modele ulaşmak için daima yeni teknikler araştırılmaktadır. Lazer ışığının 1960 yılında bulunarak Hava LiDAR (Light Detection and Ranging) sistemlerinde kullanılmasıyla birlikte, bu yeni tekniğin dünyada kullanımına başlanılmış fakat Ülkemizde bu konuda ancak son 5 yılda birkaç yeni uygulama yapılabilmektedir. Bu teknolojinin düşey yükseklik doğruluğunun yatay doğruluğa göre daha yüksek olduğu çeşitli yayınlar ile ortaya konulmuş olması, Sayısal Yükseklik Modeli (SYM) gibi düşey yükseklik doğruluğuna ihtiyaç duyulan modellerde bir alternatif olarak kullanılabilirliği sorgulanmaya başlanmıştır. Bu kapsamda Hava LiDAR tekniği ile elde edilen verilerin günümüzde hassas konum belirleme çalışmalarında hızlı ve etkin bir yöntem olan RTK – GPS (Real Time Kinematic Global Positioning System) tekniği esas alınarak, doğruluk analizinin yapılması bu yeni teknolojinin harita üretiminde kullanılabilirliği konusunda önemli bir kaynak oluşturacaktır.

Hava LiDAR doğruluğu, şüphesiz veri elde etme aşamasındaki sistem parametrelerinden, SYM üretimine kadar, yapılan tüm veri işleme çalışmalarının birlikte değerlendirilmesine bağlıdır. Doğruluk için yatay doğruluk ve düşey doğruluk kavramlarından söz edilmektedir. Hava LiDAR verisi için doğruluk büyük oranda uçuş yüksekliğine, konuma (GPS) ve IMU (Inertial Measurement Unit) hatalarına, yer istasyonları arasındaki mesafeye ve LiDAR veri işleminin doğruluğuna bağlıdır (Hodgson ve Bresnahan, 2004).

Hava LiDAR yöntemi ile oluşturulmuş yüksekliklerin düşey doğruluğunu tanımlamak için yaygın olan metot, LiDAR ile oluşturulmuş SYM'nin Yer Kontrol Noktaları (YKN) ile karşılaştırılmasıdır. YKN'ni seçerken dikkat edilmesi gereken husus; yeterli sıklıkta ve homojen dağılmasını sağlamaktır. Bu kıyaslanmanın sonucunda oluşturulan doğruluk analizi sonuçları arazi tiplerine göre farklılık göstermektedir. LiDAR veri doğruluğu düz arazilerde, eğimli ve orman kaplı alanlara göre iki kat daha fazladır (Hodgson ve Bresnahan, 2004). Karşılaştırma için bir diğer yaygın yöntem, LiDAR nokta bulutu verisini enterpolasyon yöntemi ile SYM'ne dönüştürmek, ardından modele karşılık gelen hücre değerlerindeki YKN ile karşılaştırmaktır. Bu karşılaştırmada bir arama penceresi tanımlayıp bu pencere içerisindeki LiDAR noktalarından türetilmiş SYM ile YKN'ni karşılaştırmak da ayrı bir yöntem olarak değerlendirilebilir. Ancak LiDAR verisinden SYM oluşturma esnasında enterpolasyon tekniklerinde kullanılan parametrelere bağlı olarak enterpolasyon hatası meydana gelmektedir. Bu nedenle alternatif bir yaklaşım olarak, GPS noktaları ile LiDAR noktaları arasında birebir karşılaştırma da yapılabilmektedir. Böylece gridlemeden kaynaklanan hatalar elimine edilir (Hodgson ve diğ., 2003). Üçüncü yöntem ise LiDAR noktalarının çevresindeki noktalarla GPS noktalarının karşılaştırıldığı yaklaşık nokta algoritmasıdır (Webster ve Dias, 2006).

Literatürde LiDAR modeli ile GPS-YKN'nin karşılaştırılması konusunda pek çok araştırma bulunmaktadır. Fakat düşey hata belirleme konusundaki araştırma sayısı, yatay hata belirleme çalışmalarına göre daha fazladır.

Örneğin; Veneziano (2002) tarafından yapılan bir doğruluk araştırmasında KOH değerleri düz yüzey için 0.34m, hendek için 0.66m, eğimli yüzey için 0.47m, engebeli arazi için 0.33m, hasat edilmiş arazi için 0.17m, hasat edilmemiş arazi için 0.44m olarak belirlenmiştir.

Reutebuch ve diğ. (2003) ormanlık alanda 1,5m nokta mesafeli LiDAR-SYM ile 347 kontrol noktasının karşılaştırılması için yaptığı bir çalışmada ise ortalama hatayı 0.22m olarak tespit etmişlerdir. Kesilmiş orman için 0.16m, seyrek orman için ise 0.18m, sık orman için ise 0.31m olarak tespit etmiştir. Montane ve Torres (2006) Amerika Birleşik Devletleri'nin (ABD) bir eyaleti olan Güney Carolina'da 32 km² alanda yaptığı bir çalışmada RTK/GPS ile elde edilmiş kontrol noktaları ile LiDAR noktaları arasındaki farkı ortalama 0.07m olarak tespit etmiştir. Webster (2005) ABD Annapolis vadisinde tarımsal ve şehir alanını içeren iki ayrı bölgede yaptığı çalışmada, 5m arama çapı içinde (yol için 3m) enterpolasyon işlemi uygulanmış LiDAR-SYM noktaları ile RTK/GPS ile elde edilmiş kontrol noktalarını

karşılaştırmış ve sonuç olarak GPS ile LiDAR noktalarının yükseklikleri arasındaki farkı 0.03m olarak, ormanlık alanda ise 5m arama çapı için bu farkı 0.12m olarak bulmuştur. Stal ve diğ. (2011) Belçika'da bulunan Kemmel dağında 697 nokta ile yapılan bir çalışmada 50m çözünürlüklü SYM ile RTK-GPS yöntemi ile elde edilmiş noktaları karşılaştırarak maksimum düşey hatayı 0.2m olarak tespit etmiş ve ayrıca topoğrafyanın lokal eğimi ile LiDAR noktalarının yatay ve düşey yer değiştirmesinin korelasyonlu olduğunu fakat düşey hata ile eğim arasında belirgin bir ilişki olmadığını iddia etmiştir. Edson ve Wing (2015), ABD'nin Oregon eyaletinde, McDonald Dunn Ormanı ve çevresinde yaptığı bir çalışmada, farklı ormanlık alanlarda RTK/GPS ortometrik yükseklikleri ile LiDAR nokta yükseklikleri ve aynı zamanda LiDAR-SYM yüksekliklerini karşılaştırmıştır. Ortalama GPS-LiDAR nokta farklılıklarını 0.24m ile 2.82m arasında; LiDAR- SYM karşılaştırması için 0.27m ile 2.69m arasında bulmuştur. Aguilar ve diğ. (2010) açık alanlarda GPS yükseklikleri ile LiDAR yükseklikleri arasında yaptığı karşılaştırmada ise düşey doğruluğu 0.15m olarak belirlemiş, fakat bu sonucun nadir olduğunu açık alanlar ve ideal koşullar için elde edilebileceğini çalışmada açık olarak belirtmiştir. Pourali ve diğ. (2014) Avustralya Melbourne'da 130 km'lik kıyı şeridinde ait LiDAR verisinde GPS noktaları ile minimum mesafe yaklaşımı kullanarak yaptığı karşılaştırmada düşey doğruluk için %68 güven aralığında $\pm 0.10m$, yatay doğruluk için ise $\pm 0.35m$ olarak tespit etmiştir.

Liu (2011) Avustralya'nın Victoria eyaletinde kırsal alanda farklı arazi sınıflarında düzensiz üçgen ağı, en yakın nokta ve çapraz geçerlilik yöntemleri kullanılarak oluşturulan LiDAR veri setleri ile GPS noktalarını farklı arazi kategorileri için arama çapı yöntemi de kullanarak karşılaştırmıştır. Maximum hatanın ot/ekin arazi sınıfında ve minimum-maksimum hata aralığını bütün nokta tipleri için -0.6m ile +0.6m arasında bulmuştur.

Bu çalışmada; GPS/RTK ile elde edilmiş YKN ile bu noktaların karşılık geldiği LiDAR noktaları arasındaki konum ve yükseklik farklılıklarına ilişkin hatalarının arama yarıçapı yöntemi ile tespit edilmesi amaçlanmıştır. Karşılaştırma Karesel Ortalama Hataların (KOH) hesaplanması yoluyla değişik arazi kategorilerinde karşılaştırmalı olarak yapılacaktır.

STANDARTLAR (STANDARTS)

Amerika Birleşik Devletlerinde kullanılan doğruluk standartlarına ilişkin, Uluslararası farklı komiteler LiDAR, Harita ve CBS kullanıcıları için uygulamada belirli standartları yakalamak amacıyla rehber niteliği taşıyan çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmalardan biri de LiDAR kullanıcıları için son derece önemli bir kaynak teşkil eden yatay ve düşey doğruluk yönetimi ve standartlarıdır. Bu kuruluşlardan bazıları NSSDA (National Standard for Spatial Data Accuracy), NDEP (National Digital Elevation Program) ve ASPRS (The American Society for Photogrammetry and Remote Sensing)'dir. NSSDA Standartları komitesi LiDAR verisinin kaydedilmesi, ölçüm metotları ve doğruluk raporları konusunda tavsiye niteliğinde metotlar geliştirmiş ve hangi düzeyde bir doğruluk üretilebileceğini tanımlamıştır. ASPRS LiDAR komitesi 17 Kasım 2014'te NDEP tarafından yayınlanmış olan Sayısal Yükseklik Verileri Rehberinin ilgili bölümleri ile uyumlu olan yeni bir rehber yayınlamıştır. Bu standartlar ASPRS "Accuracy Standards for Large Scale Maps" (1990) ve ASPRS "Vertical Accuracy Reporting for LiDAR Data" (2004) standartlarını da içermektedir. Bu ASPRS kuralları içinde, NSSDA ile zıt olduğu tespit edilen vakalar meydana gelirse, NSSDA'nın kontrol belge olduğu ve emsal alınacağı da belirtilmiştir.

LİDAR DOĞRULUĞU (LiDAR ACCURACY)

Doğruluk için öncelikle mutlak doğruluk ve relatif doğruluk kavramlarından söz etmemiz gerekmektedir. LiDAR verileri için mutlak doğruluk kavramı, lazer hatalı noktalarının ve relatif doğruluğun bir fonksiyonu olarak verideki bütün rastgele ve sistematik hataların ölçümüdür. Mutlak doğruluğu değerlendirmek için önce gürültü filtreleme ve kalibrasyon işlemi yapmak gereklidir. Relatif doğruluk ise verinin iç tutarlılığı demektir. Örneğin farklı uçuş hatlarında bindirmeli alanlar içinde

kalan noktaların sapmaları ölçülmelidir. LiDAR sistemi iyi kalibre edilmişse hatlar arası sapma 10cm'den daha küçük olabilmektedir. Yatay ve düşey doğruluk kavramları ise LiDAR ışınının uzun çim, çalılık gibi yüzeyin bitki örtüsü özelliklerinden dolayı zemine tamamiyle ulaşamaması sonucu, farklı arazi kategorilerinde ve farklı bitki örtüsü yapısına bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Ayrıca eğim etkisi de yatay yönde yer değiştirmeye neden olmaktadır. Bununla birlikte, literatürde ideal koşullarda yatay doğruluk için 5-50cm, düşey doğruluk için 15cm gibi büyüklükler ifade edilmektedir. (Pereira ve Janssen, 1999).

Düşey Doğruluk (Vertical Accuracy)

LiDAR verilerinde mutlak düşey doğruluğu tanımlamak için, GPS yöntemiyle elde edilen kontrol noktalarının koordinatları ile LiDAR nokta koordinatları arasındaki farklar bulunarak KOH değerleri hesaplanmaktadır.

ASPRS (2004), NSSDA (1998) ve NDEP (2004) doğruluk standartları kuruluşları doğruluk için bağımsız bir kaynaktan üç kez daha doğru bir veri ile karşılaştırma yapmayı önermiş, düşey doğruluk testi için ise, eğer hata o veri seti için normal dağılımı izliyorsa, bu kuralların geçerli olduğunu belirtmiştir. ASPRS (2004) ayrıca, düşey hatanın açık arazide normal dağılımda olmasına karşın, yoğun bitki alanı gibi yerlerde aktif sensörün zemine ulaşamamasından dolayı normal dağılım izlemediğinden, araziye kategorilere ayırmış ve bu kategorilere göre ek rehber vermiştir. Örneğin, ormanlık, bodur ağaç, buğday yada mısır kaplı alan, uzun otlar, insan yapımı koru, biçilmiş çim, veya şehir alanları vb. Bu yüzden açık arazi ile diğer arazilerdeki testi ayrı tutmuş ve FVA (Fundamental Vertical Accuracy), SVA (Supplemental Vertical Accuracy) ve CVA (Consolidated Vertical Accuracy) doğruluk kavramlarını tanımlamıştır. FVA sensör performansına dikkat çekerken, SVA ve CVA, LiDAR ışın dönüşünün bitki alanlarında geçirimi, SYM'deki düzensiz dağılmış noktalar ve arazi ayırım çizgileri ile ilgilidir. FVA mutlaka hesaplanması gerekirken SVA ve CVA tercihe göre hesaplanmalıdır.

Temel Düşey Doğruluk (Fundamental Vertical Accuracy)

Bitki örtüsü içermeyen anlamına gelmektedir. Non Vegetated Accuracy (NVA) olarak da ifade edilmektedir. Veri işleme ve toplamının kalite kontrolünü sağlamakta olup, NDEP rehberinde yalnızca yeryüzünün yüksek oranlı tanımlandığı açık araziler için %95 güven aralığında hesaplanması gerektiği belirtilmiştir. Bitki kaplı alanlarda kullanılmamalıdır (Eşitlik 1).

$$FVA = \text{Doğruluk}_z = \text{KOH}_z * 1.9600 \quad (1)$$

Tamamlayıcı Düşey Doğruluk (Supplemental Vertical Accuracy)

Diğer arazi sınıflarının sınıflandırma algoritmalarının etkinliğini ölçmektedir. SVA değerleri her arazi kategorisi için ayrı ayrı olmak üzere 95th persentil aralığında hesaplanır. Bu alanlarda normal dağılım izlenmesine gerek olmadığı farz edilir.

Birleştirilmiş Düşey Doğruluk (Consolidated Vertical Accuracy)

Bitki örtüsü düşey doğruluğu anlamına gelen Vegetated Vertical Accuracy (VVA) de denilmektedir. Birleştirilen tüm arazi örtüsü kategorilerinin düşey doğruluğunu göstermektedir. 95th persentil aralığında hesaplanır. CVA yani VVA doğruluğu, FVA'dan 1.5 kat daha fazladır ASPRS (2004).

Yatay Doğruluk (Horizontal Accuracy)

LiDAR verilerinde yatay hata belirlemek, düşey hata belirlemeye nazaran daha güçtür. Çünkü arazi yüzeyinin topoğrafik özellikleri, eğim etkisi gibi nedenlerden dolayı doğruluk kavramı değişiklik gösterir. Bu sebeple LiDAR verilerindeki yatay hata, yükseklik hatasından birkaç kat daha fazladır (Vosselman, 2008). Aynı zamanda yatay doğruluk, düşey doğrulukta olduğu gibi arazi örtüsüne değil arazi ölçüm yeteneğine bağlıdır. Örneğin veri elde etme aşamasındaki lazer sensörü, navigasyon sistemi ve INS (Inertial Navigation System) arasındaki açılacak kayıklık sebebiyle oluşan yönlendirme hatası meydana gelmektedir.

LiDAR verilerinde yatay hata kaynakları şunlardır.

- Taşıma platformunun pozisyonu,
- Dönüklük tanımlama,
- Lazer sensör, INS/POS (Position Orientation System) ekipmanı ve uçağın platformu arasındaki kaçıklık,
- Lazer sensörünün elektro-optik kısmının arızası,
- Yanlış lazer ve INS/POS veri işleme,
- Veri ön işleme,
- GPS baz istasyonlarından gelen hatalı veri,
- Yanlış veri-koordinat dönüşümü.

LiDAR hatalarını her bloktaki hata, her şeritteki hata, her GPS gözlemindeki hata, her noktadaki hata şeklinde tarif edebiliriz.

ASPRS (2004), minimum yatay doğruluk için araziye sınıflara ayırmış, hata miktarı KOH içinde kalanlar için 1.sınıf, sınırın iki katı olanlar için 2.sınıf, 3 katı olanlar için de 3.sınıf arazi tanımlaması yapmıştır. Bu standartlara göre örneğin 1:2000 ölçekli harita için minimum yatay doğruluk 0.50m, 1:4000 ölçek için 1m olarak gösterilmiştir.

Kontrol Noktalarının Seçimi (Selection of The Control Points)

Uluslararası standart kuruluşlarından ASPRS (2004) ve FGDC (1998), LiDAR verilerinde düşey doğruluğu test etmek için 5 temel arazi kategorisi ve her bir arazi kategorisi için en az 20 nokta (tercihen 30 nokta) olmak üzere toplam 100 nokta ile testlerin yapılmasını önermiştir.

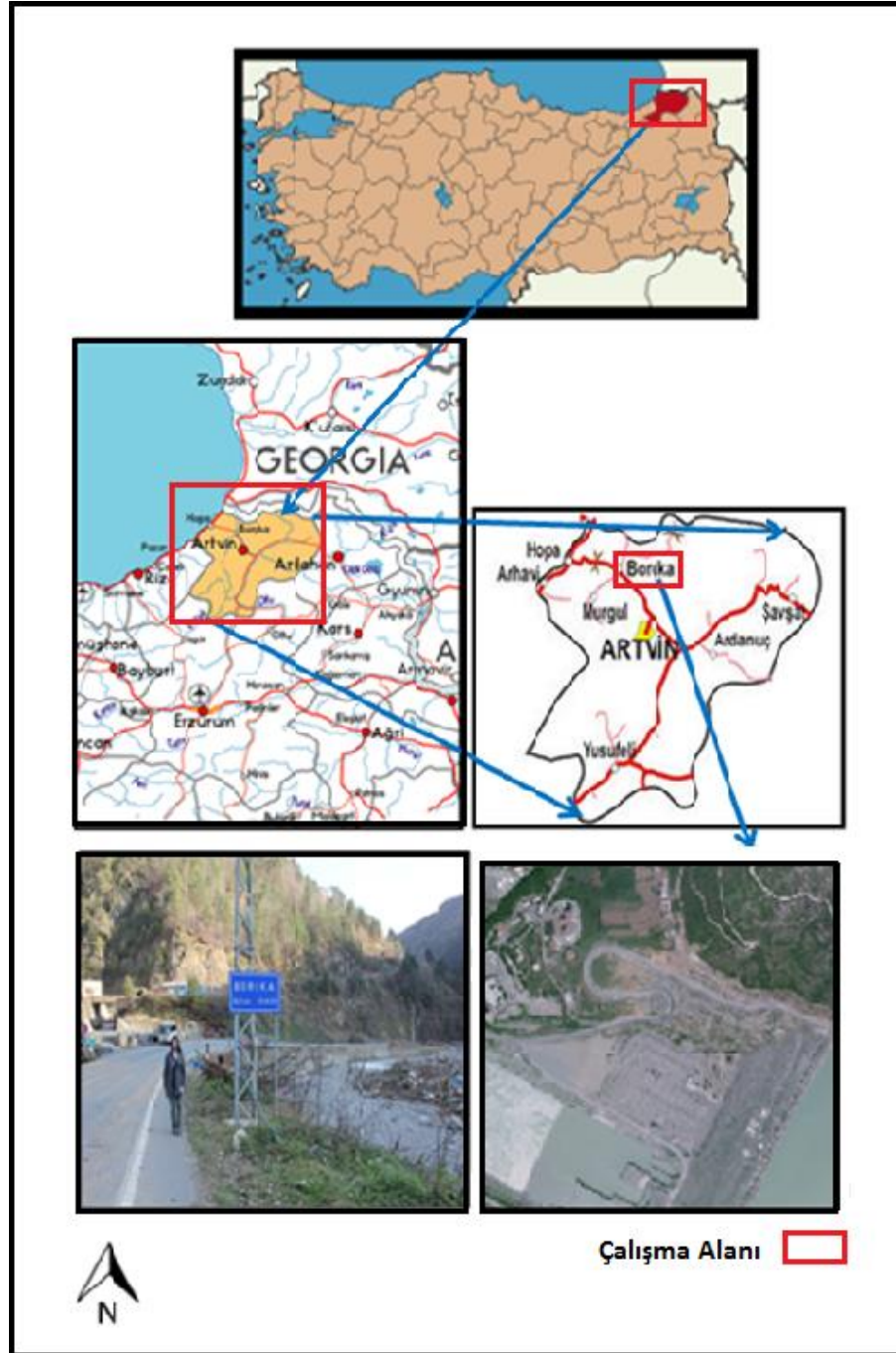
5 temel arazi kategorisi şunlardır:

- Açık arazi (kum, kaya, sürülmüş tarla, çim, golf sahası),
- Uzun boylu ot ve ürün,
- Çalılık arazi,
- Tamamiyle ağaç kaplı orman,
- Şehir alanı, insan yapımı obje vb. arazi sınıfları.

NSSDA (1998) ve ASPRS (2014) rehberlerinde, kontrol noktalarının geleneksel açık arazide konumlanması gerektiği, mısır tarlası kuru v.b. güvenilirliği düşük bölgelerde seçilmemesi gerektiği de ayrıca belirtilmiştir. Hata dağılımı rasgele olmadığı zaman kontrol noktalarının konumu daha önemli olmakla birlikte, önemli detayların olduğu bölgelerde daha yoğun ve az ilgilenilen bölgelerde daha seyrek dağılımda seçilmesi önerilmektedir. Eğer standart pozisyon doğruluğu gerektirecek dikdörtgen bir veri seti alanımız var ise, karşılıklı diagonal mesafenin en az %10'u aralıkta ve veri setinin her çeyreğinde noktaların en az %20'si kadar dağılım gerçekleştirilmelidir.

NDEP (2004), kontrol noktalarının yerleşimi için yatay hata etkisini ve enterpole hatasını azaltmak bakımından, arazi eğiminin %20'den fazla olduğu yerlerde, eğimin sıkça değiştiği yerlerde, köprü mesnetlerinde veya yol kenarlarında, arazi ayırım çizgilerinin yanlış yönlerinde seçilmemesi gerektiğini belirtmiştir.

ÇALIŞMA ALANI ve KULLANILAN VERİLER (STUDY AREA and DATA USED)



Şekil 1. Çalışma Alanı

Çalışma alanı olarak Ülkemizin Doğu Anadolu Bölgesi'nde bulunan Artvin İli, Borçka ilçesinde yer alan 2x2 km² büyüklüğünde bir ormanlık alan seçilmiştir (Şekil 1). Kullanılan hava LiDAR verisi, Borçka Gürcistan Enerji Nakil Hattının güzergah etüt çalışmaları sebebiyle oluşturulmuş olup, Körfez Haritacılık ve Planlama Ltd. Şti'den temin edilmiştir.

Çizelge 1. Kullanılan hava LiDAR Verisinin Sistem Parametreleri (System Parameters of Airborne LiDAR Data Used)

Sistem Parametreleri	
Uçuş Hızı	110 knot (203,720 km/h)
Uçuş Yüksekliği	1000m (3281 feet)
Şerit Genişliği (swath with)	1.154m
Tarama Açısı	60°
Pulse Tekrarlama Hızı	100.000 (1/sn)
Işın Sapması	0.5 mrad
Ham Veri Yoğunluğu	2.4 nokta/m ²
Yöneltme Sayısı	4 (ilk pulse-son pulse)
Şerit Bindirme	2.41°
Enine Bindirme	%60
Ayak izi çapı (footprint)	1m
Pulse spacing	0.87m
Yer çözünürlüğü(GRD)	2m

Ham veriler, Çizelge 1'de belirtildiği üzere, Riegl LMS-Q560 LiDAR tarayıcısı kullanılmak suretiyle, 08.06.2011 tarihinde 8:32 ile 11:52 saatleri ve 09.06.2011 tarihinde 6:56 ve 11:37 saatleri arasında Artvin-Borçka-Gürcistan güzergahında yerden ortalama 1000 m uçuş yüksekliğinde, 110 knot (203,720 km/h) uçuş hızıyla, 60° tarama açısı kullanılarak, saniyede 100.000 pulse tekraralama hızı ile m² ye ortalama 2,4 nokta düşecek şekilde elde edilmiştir. Koordinatlar, ED-50 Datumunda, UTM koordinat sisteminde ilk ve son pulse olarak XYZ koordinatlarını içeren las veri formatında elde edilmiştir. Çalışma alanı 950x800m boyutlarında, minimum yükseklik 97.92m ve maksimum yükseklik 600 m'dir. Az yoğun bitki örtüsü, bir bölümü ağaçlık alan, binalar ve baraj alanını içermektedir. Kullanılan LiDAR verisi m²'ye ortalama 1.4 nokta düşecek şekilde ve ortalama nokta mesafesi 0.86m'dir (Çizelge 2).

Çizelge 2. Test Bölgesi Verisinin Özellikleri (Characteristics of the Test Data)

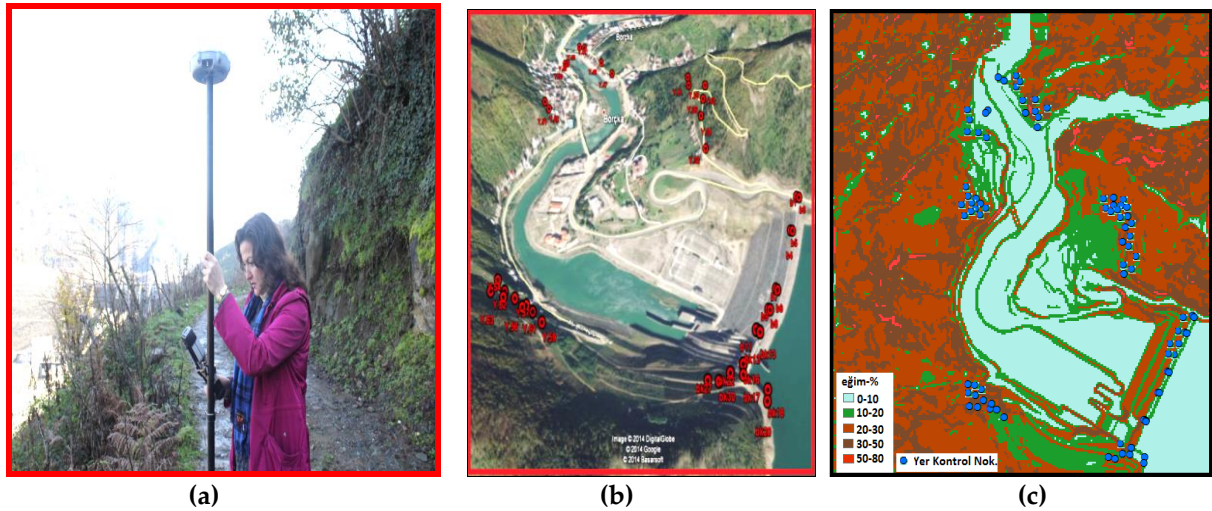
Test bölgesi	Test-1
Boyut (m)	950x800
Min-max yükseklik (m)	97.92-600
Nokta Adedi	570426
Nokta Yoğunluğu (nokta/m ²)	1.4
Ortalama nokta mesafesi (m)	0.86
Arazi Özelliği	Ani değişken, eğimli arazi
Yeryüzü harici objeler	Bina, ağaçlık alan, baraj, yol

METODOLOJİ ve UYGULAMA (METHODS and APPLICATION)

Çalışma alanında yapılan arazi çalışması sonucunda, RTK/GPS yöntemi kullanılarak ve Bölüm 2'deki Standartlara uyularak 100 adet konumu ve yüksekliği bilinen yer kontrol noktası elde edilmiştir (Şekil 2a). Bu kontrol noktalarının yerleri yine bu komitelerin doğruluk standartlarının tanımladığı 5 temel arazi kategorilerine göre belirlenmiştir. Bu arazi kategorileri;

- Açık arazi (düz beton çakıl yol- eğim % < 10),
- Kısa çim (eğim %20-30 arası),
- Çalılık (eğim %30-35 arası),
- Tamimiyle ağaç kaplı orman,
- Yerleşim alanı, bina.

olmak üzere beş farklı arazi özelliğinde yer almaktadır.



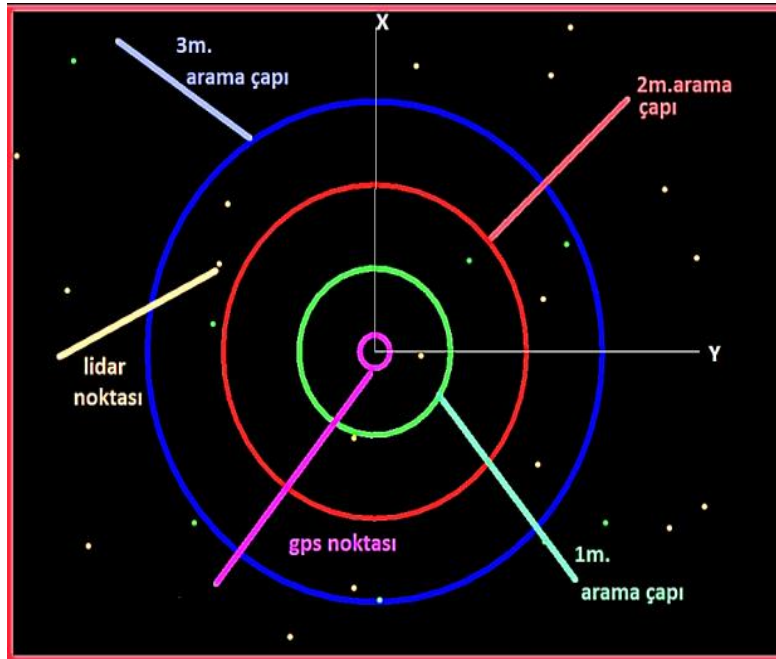
Şekil 1. (a) Arazide GPS Okumaları (b) YKN'larının Goggle Earth üzerinde gösterimi (c) Eğim haritası

Seçilen çalışma alanı yerleşim alanına ilişkin binalar, köprü, baraj alanı v.b yapay objeler ile homojen olmayan, eğimli ve dik bir arazi yapısına sahiptir. Kontrol noktalarının yerlerinin seçimi konusunda bu sıradışı ve zorlu arazi yapısı içerisinde, 2. Bölümdeki standartlarda belirtilen kriterlere uymak suretiyle seçim yapılmıştır. Fakat, Şekil 2b'de görüldüğü gibi uygulama alanı içerisinde bu standartlara tamamiyle uyan yüzey örtüsü bulunmadığından öncelikle Uluslararası düzeyde kabul görmüş olan Toprak Tanımlama Kılavuzu FOA (Guidelines for Soil Description Food and Agriculture Organization of the United Nations) standartlarına uygun olarak arazi gruplandırılmıştır (Çizelge 3). Daha sonra, çalışma alanının eğim haritası oluşturulmuştur (Şekil 2c). Bu çizelgede listelenen verilere göre dik arazi kategorisine geçiş değeri olan eğimin %35 den fazla olduğu yerlerde kontrol noktası seçilmemiştir. Arazi kategorileri için ise yüzeyin bitki örtüsü özellikleri ve eğim değeri baz alınarak; açık arazi, kısa çim, çalılık, tamamiyle ağaç kaplı alan ve yerleşim alanları şeklinde gruplandırma yapılmıştır.

Çizelge 3. (FAO,1990) Sistemine Göre Arazi Eğim Sınıfları (Land Slope Classes According FAO, 1990 System)

1.düzye	2.düzye	Eğim(%)
düz arazi	ova	<10
	plato	<10
	çöküntü	<10
Eğimli arazi	Orta eğimli kayalık bölge	10-20
	Orta eğimli tepe	10-20
	Orta eğimli dağ	10-20
	Bölünmüş ova	15-20
Dik arazi	Yüksek eğimli kayalık	>30
	Yüksek eğimli tepe	>30
	Yüksek eğimli vadi	>30

Daha sonra, arazi çalışması sonucunda elde edilen YKN'ları ile LiDAR nokta bulutu verisi üstüste çakıştırılarak; GPS noktaları ile LiDAR noktalarının yükseklik ve konum değerleri arasındaki farklar sırasıyla 1m, 2m ve 3m arama çapı içerisinde hesaplanmıştır (Şekil 3). Bu işlem sonucu elde edilen değerler birbirleriyle karşılaştırılarak, en az farkın meydana geldiği arama çapı içerisindeki nokta, optimum değer olarak kabul edilmiştir.



Şekil 3: Arama Çapı Yöntemiyle Verilerin Karşılaştırılması

Çizelge 4. Arama Çapı İçerisindeki Konum ve Yükseklik Farkları (Location and Height Differences in Search Radius)

GPS - LiDAR (ort)			Arama çapı (m)
(m)			
dy	dx	dz	
0.39	0.26	0.21	1
0.44	0.51	0.18	2
0.87	0.72	0.24	3

Optimum değer belirlenmesi için arama çapı içerisinde, x-y yönündeki ortalama dx ve dy farkları incelendiğinde, minimum fark 1 m'lik çap içerisinde meydana gelmiştir. Z yönündeki ortalama farklara bakıldığında ise, 2m'lik çap içerisinde seçilen noktalar minimum değer olmuş olmakla birlikte 1m, 2m, ve 3m, çap içerisinde belirgin bir fark oluşmamıştır (Çizelge 4).

Arama çapı arttırıldığında x-y yönündeki dx ve dy farkları noktanın konumuna bağlı olarak artmıştır. Bu nedenle farklılığın en yüksek olduğu 3m'lik arama çapı değeri uygun bulunmamıştır.

Diğer yandan, veri elde etmede kullanılan sistem parametrelerine bağlı olarak, örneğin LiDAR nokta yoğunluğunun ortalama 2nokta/m² olduğu durumlarda 1m'lik arama çapı içerisinde karşılaştıracak nokta bulunmayacaktır. Ya da; arama çapı içerisinde değerlendirme yapılırken, çalışma alanı içerisinde LiDAR nokta bulutunun yanlış filtrelenmesi sonucu, 1m'lik çap içinde gerçekte yeryüzüne ait olmayan noktalar yer alabilecektir. Bu yanlış noktalar yükseklik doğruluğunu etkileyeceğinden nokta seçimi esnasında, bu husus göz önüne alınmalıdır. Bu nedenle 1m ve 2m'lik arama çapı içerisinde en uygun nokta karşılaştırması yapılmadan önce filtreleme doğruluğu test edilmelidir. Bu durumda çalışma alanımıza karşılık gelen sayısal ortofoto harita kullanımı uygun bir seçimdir.

Sonuç olarak; veri yapısı ve Çizelge 4'deki sonuçların değerlendirilmesi sonucu, 1m ve 2m'lik arama çaplarının her ikisinde değerlendirmeye alınarak optimum farklar bulunmuştur. Bu durumda, 1 m ve 2m'lik arama çapı içerisinde yer alan YKN arasında yapılan analiz sonucu, en uygun LiDAR karşılaştırma noktaları belirlenerek, 100 adet nokta için hem konum hem de yükseklik farkları hesaplanmıştır. Karşılaştırmada ölçülen GPS noktaları doğru nokta olarak kabul edilmiştir. Farkın pozitif değer alması, LiDAR verisinin doğru yüzeyin üzerinde, negatif değer alması ise altında olduğunu göstermektedir. 5 arazi kategorisi için de (LiDAR_z - GPS_z) farkları kullanılarak düşey hata (KOH_z) hesaplanmıştır (Denklemler 2). Daha sonra, normal dağılımda kabul edilen çıplak arazi kategorisi için %95 güven aralığında düşey doğruluk (Doğruluk_z) bulunmuştur (Denklemler 3). Sonuçlar Çizelge 5'de gösterilmiştir.

$$KOH_z = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (LiDAR_z - GPS_z)^2}{n}} \quad (2)$$

$$Doğruluk_z = 1,9600 * KOH_z \quad (3)$$

Çizelge 5. Temel Arazi Kategorileri İçin Düşey Hata ve Doğruluk Değerleri (Vertical Error and Vertical Accuracy Value for Basic Land Categories)

Arazi türü	metot	Doğruluk _z (m)	DZ _{min} (m)	dz _{max} (m)	KOH _z (m)
Açık alan	1.96XRMSE	0.39	-0.27	0.04	0.20
	95th Percentil	0.28			
Kısa Çim(%20-30)	1.96XRMSE	0.45			
	95th Percentil	0.27	-0.28	0.18	0.23
Çalı (%30-35)	1.96XRMSE	0.82			
	95th Percentil	0.82	-0.96	0.20	0.42
Tamamen ağaç	1.96XRMSE	0.41			
	95th Percentil	0.66	-0.67	0.03	0.21
Yerleşim	1.96XRMSE	0.55			
	95th Percentil	0.42	-0.43	0.04	0.28
Birleştirilmiş	1.96XRMSE	0.74			
	95th Percentil	0.66	0.03	0.96	0.38

Elde edilen sonuçlar incelendiğinde, maksimum düşey hata 0.42m ile çalı tipi yüzey örtüsünde, minimum düşey hata ise, tahmin edildiği gibi 0.20m olarak açık ve düz alanda meydana gelmiştir. Fakat çalı tipi yüzey örtüsü dışındaki arazi kategorileri arasında düşey hata bakımından sonuçlar birbirine oldukça yakındır.

Diğer yandan düşey doğruluk (Doğruluk_z) değerlerinin hesaplanmasında ASPRS (2014) standartlarının dikkat çektiği FVA, SVA ve CVA doğruluk hesaplamaları yapılarak Çizelge 6'da gösterilmiştir. FVA değeri normal dağılım kuralı ile, SVA ve CVA ise normal dağılımda olmayan 95th persentil aralığında hesaplanmıştır.

Ulaşılan sonuçlara göre açık alan sınıfı için bulunan temel düşey doğruluk (FVA) 0.39m ve diğer arazi sınıfları için elde edilen birleştirilmiş düşey doğruluk (CVA) 0.66m'dir. Yani açık alandaki temel düşey doğruluk, orta ve yoğun bitki örtüsü kaplı arazi sınıfları için elde edilen birleştirilmiş düşey doğruluktan daha prezisyonludur.

Açık alan dışındaki arazi kategorilerinde her bir arazi sınıfı için 95th persentil aralığında ayrı ayrı hesaplanan SVA değerleri için ise, kısa çim arazi özelliğinde 0.27m, çalı tipi arazi özelliğinde 0.82m, tamamiyle ağaç kaplı alan için 0.66m, ve yerleşim alanı için 0.42m, olarak hesaplanmıştır. En yüksek SVA doğruluğu, yüzey örtüsünün ve eğimin düşük olduğu kısa çim arazide gerçekleşmiştir. Bunu yerleşim alanı ve ağaçlık alan izlemektedir. En düşük SVA doğruluğu ise, çalı tipi arazi örtüsündedir. Bu tür yapraklı çalı tipi bitki örtüsü için LiDAR ışınlarının yeryüzüne ulaşması güç olmaktadır. Açık alanlarda ise LiDAR ışın geçirimi yüksektir. Bu sebeple açık alanlarda LiDAR doğruluğu yüksektir.

Çizelge 6. Temel Arazi Kategorileri için FVA, SVA ve CVA değerleri(FVA,SVA,CVA Values for Basic Land Categories)

Arazi türü	FVA (m)	SVA (m)	CVA (m)
Açık alan	0.39		
Kısa çim (%20-30)		0.27	
Çalı (%30-35)		0.82	
Tamamiyle ağaç		0.66	
Yerleşim		0.42	
Birleştirilmiş			0.66

Yatay konum doğruluğu bakımından ise NSSDA standartlarına bağlı olarak, sistematik hataların mümkün olan en iyi derecede elimine edilebilmesi amacıyla x ve y bileşenlerinin her birinin ve hatalarının bağımsız ve normal dağıldığı kabul edildiğinde, %95 güven aralığında hesaplamalar yapılmakta ve bunun için 2.4477 katsayısı kullanılmaktadır. Yatay hata için ise, (4) ve (5) Denklemleri yardımıyla hesaplanan (6) Denklemi kullanılmaktadır. Yatay doğruluk hesaplamaları için ise Denklem (7) ve Denklem (8) kullanılmaktadır. Çizelge 7'de konum ve yükseklik farklarına ilişkin KOH_x , KOH_y , KOH_r yatay hata miktarları ile %95 güven aralığında yatay doğruluk ($Doğruluk_r$) değerleri verilmiştir.

$$KOH_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Lidar_x - GPS_x)^2}{n}} \quad (4)$$

$$KOH_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Lidar_y - GPS_y)^2}{n}} \quad (5)$$

$$KOH_r = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Lidar_x - GPS_x)^2 + (Lidar_y - GPS_y)^2}{n}} \quad (6)$$

$$Doğruluk_r = 2,4477 * KOH_x = 2.4477 * KOH_y \quad (7)$$

$$Doğruluk_r = 2.4477 * \frac{KOH_r}{1.4142} = 1.7308 * (KOH_r) \quad (8)$$

Çizelge 7. %95 Güven Aralığında 5 Temel Arazi Kategorisi için Konum Doğruluğu (Location Accuracy for The Five Basic Land Category, 95% Confidence Interval)

Arazi türü	dy		dx		KOH _x (m)	KOH _y (m)	KOH _r (m)	Doğruluk r (m)
	Min (m)	Max (m)	Min (m)	Max (m)				
Açık alan	--0.88	-0.01	0.02	-0.73	0.47	0.39	0.61	1.06
kısa çim (%20-30)	0.07	0.24	-0.12	0.53	0.17	0.32	0.36	0.62
Çalılık (%30-35)	-0.91	0.19	0.19	2.31	0.48	0.65	0.91	1.58
Tamamen ağaç	-0.95	0.09	-0.08	1.03	0.53	0.44	0.99	1.71
Yerleşim	-0.62	0.27	0.04	1.63	0.50	0.87	1.01	1.75

Elde edilen sonuçlara göre en düşük yatay hata, 0.36m ile bitki örtüsünün az olduğu kısa çim arazi yapısında, en yüksek yatay hata ise yerleşim alanındadır. Açık alanda 0.61m, çalı tipi eğimli arazi yapısında 0.91m, tamamen ağaç kaplı alanda 0.99m, yatay hata elde edilmiştir. Çalı tipi, tamamiyle ağaç, ve yerleşim alanı için elde edilen sonuçlar birbirine oldukça yakındır.

Yatay doğruluk (Doğruluk_r) için ise açık alanda 1.06m, kısa çim arazi yapısında 0.62m, çalı tipi arazi yapısında 1.58m, tamamiyle ağaçlık alanda 1.71m, ve yerleşim alanında ise 1.75m doğruluk değerleri elde edilmiştir.

SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışma, Ülkemizin Doğu Karadeniz Bölgesi'nde, heterojen ve eğimli arazi yapısında, mevcut ölçüm teknikleri ile ulaşılması zor alanlar için, son yıllarda yapılan birkaç uygulama ile gündeme gelmiş bulunan Hava LiDAR teknolojisinin kullanılabilirliğini ve doğruluk derecesini test etmek amacı ile gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, günümüzde uygulanan hassas konum belirleme çalışmalarında cm'ler düzeyinde doğruluğa ulaşılabilen RTK-GPS (Real Time Kinematic Global Positioning System) teknolojisi ile elde edilen YKN (Yer Kontrol Noktaları) esas alınarak, bu noktalar ile LiDAR ile elde edilen x,y,z noktaları arasındaki konum ve yükseklik doğrulukları geliştirilen arama çapı yöntemi ile test edilmiştir. Bunun sonucunda, arama çapı mesafesinin belirlenmesi için, koordinat ve yükseklik farklılıklarının test edilmesinin yanında, LiDAR nokta bulutu verisinin m²'ye düşen nokta yoğunluğu ve sınıflandırma doğruluğuna bakılarak karar verilmesinin gerekliliği ortaya konmuş olup, bu çalışmada kullanılan veriler için 1m veya 2m' lik arama çapının uygun olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Çalışmada ayrıca çıplak arazi yapısındaki düşey doğruluk ile seçilen farklı arazi kategorilerinde elde edilen düşey doğruluklar karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak; çıplak arazide elde edilen temel doğruluk (FVA(Fundamental Vertical Accuracy)) için, diğer arazi kategorilerinin birleşimi için elde edilen birleştirilmiş düşey doğruluğa (CVA(Consolidated Vertical Accuracy)) nazaran daha yüksek doğruluk elde edilmiştir. Diğer önemli bir sonuç ise LiDAR ışın geçiriminin en yüksek olduğu açık alandaki temel düşey doğruluğun orta ve yoğun bitki örtüsü kaplı arazi sınıfları için elde edilen birleştirilmiş düşey doğruluktan daha presizyonlu olarak gerçekleşmiş olmasıdır. Ayrıca, kısa çim gibi yüzey örtüsünün düşük olduğu yerlerde, yapraklı çalılık gibi LiDAR ışınlarının geçiriminin güç olduğu yerlere göre daha yüksek doğruluk elde edilmiştir.

Uluslararası Standart Kuruluşlarından NDEP (National Digital Elevation Program) doğruluk kriterlerine göre eğri aralığı 4m olan bir haritada normal dağılımda düşey hata (KOH_z)'nın 0.37m' den ve FVA değerinin ise 0.73m'den büyük olmaması gerektiğini belirtilmiştir. Bu çalışmada normal

dağılımda %95 güven aralığında düşey hata 0.20m, ve FVA değeri ise, 0.39m bulunarak bu değerlerin içerisinde sonuç elde edilmiştir.

Konum doğruluğu için ise sonuçlar birbirine oldukça yakın gerçekleşmesine rağmen rakam olarak, en yüksek doğruluk kısa çim alanında en düşük doğruluk ise yerleşim alanında bulunmuştur. Ayrıca, ASPRS (1990), 1/4000 ölçeğinde bir harita için I.sınıf arazide yatay hatayı (KOH_r) 1.41m ve %95 güven aralığında yatay doğruluğu (doğruluk_r) 2.45m olarak tanımlamıştır. NSSDA ise 1/4000 ölçekli haritada yatay hatayı (KOH_r) 1.34m ve %95 güven aralığında konum doğruluğunu (doğruluk_r) 2.32m olarak tanımlamıştır. Bu çalışmadaki sonuçlara göre ise, yatay hata (KOH_r) minimum 0.36m, maksimum 1.01m olarak bulunmuştur. Yatay doğruluk (Doğruluk_r) ise minimum 0.62m, maksimum 1.7m düzeyinde gerçekleşmiştir.

Bu çalışmada olduğu gibi, güncel ölçüm teknikleri ile hava LiDAR teknolojisi arasında yapılacak doğruluk araştırmasında, doğru bir değerlendirme yapılabilmesi için çalışmanın amacına da bağlı olarak, Hava LiDAR verisinin elde edilmesi sırasında belirlenecek olan uçuş yüksekliği ve m²'ye düşen nokta yoğunluğu gibi sistem özelliklerinden, veri işlemedeki sınıflandırma doğruluğuna kadar pek çok unsurun ayrı ayrı değerlendirilmesi gerekmektedir. Topoğrafik özellikler ile arazi örtüsünün çeşitliliği de doğruluğa etki etmektedir. Ancak, yüzeydeki bitki örtüsü yapısı yatay doğruluktan çok düşey doğruluğu etkilemiştir. Yatay doğruluk için farklı yüzey özelliklerinde benzer ve yakın sonuçlar elde edilmiştir. Çünkü, yatay doğruluk daha çok topoğrafik özellikler ve ölçüm metotları ile ilgilidir. Karşılaştırma noktaları için kullanılan noktaların sınıflandırma doğruluğu da elde edilen sonuçları etkilemektedir.

Çalışmanın genel sonucu olarak; elde edilen veriler ve hesaplamalar ışığında, hava LiDAR verisinin düşey doğruluğunun yatay doğruluğa göre daha presizyonlu olduğu, yoğun yüzey örtüsünün bulunduğu alanlarda düz ve açık alanlara göre, LiDAR ışınının çıplak yer yüzeyine tamamiyle ulaşması engellendiğinden, daha fazla düşey hataya neden olduğu tespit edilmiştir. Yatay doğruluk ise sistem özelliklerinden (GPS/IMU), veri kalibrasyonuna, sınıflandırma doğruluğuna ve pek çok unsura bağlı olmaktadır. Fakat bunun yanında hava LiDAR verileri için farklı arazi kategorilerinde farklı doğruluk standartlarının belirlenmesi gerekmektedir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Aguilar, F. J., Mills, J. P., Delgado, J., Aguilar, M. A., Negreiros, J. G., and Perez, J. L. , 2010, " Modelling Vertical Error in LiDAR Derived Digital Elevation Models", ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 65(1), ss.103–110.
- ASPRS, 1990, "ASPRS Accuracy Standards for Large-Scale Maps, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing", 56(7): 1068-1070, American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS), Bethesda, MD.
- ASPRS, 2004, "ASPRS Guidelines, Vertical Accuracy Reporting for Lidar Data", May 24, 2004, American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS), Bethesda, MD ASPRS Guideline Vertical Accuracy Reporting for Lidar Data
- Edson, C., and Wing, M. G. , 2015, " LiDAR Elevation and DEM Errors in Forested Settings " Modern Applied Science, 9(2), ss.139–157.
- Erdoğan, H.E, 2003, "Toprak Tanımlama Kılavuzu", Tarım Reformu Genel Müdürlüğü, Ankara FGDC. (1998). Geospatial positioning accuracy standards, part 3—National Standard for spatial data accuracy: Federal Geographic Data Committee, Subcommittee for Base Cartographic Data, FGDC-STD-007.3–1998, 20 p.
- Hodgson, M. E., and Bresnahan, P. ,2004, " Accuracy of Airborne Lidar-Derived Elevation Empirical Assessment and Error Budget", Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 70(3), ss.331– 339.

- Hodgson, M. E., Jensen, J. R., Schmidt, L., Schill, S., and Davis, B., 2003, "An evaluation of LIDAR and IFSAR Derived Digital Elevation Models in Leaf on Conditions with USGS Level 1 and Level 2 DEMs." *Remote Sensing of Environment*, 84(2), ss.295–308.
- Liu, X. , 2011, " Accuracy Assessment of Lidar Elevation Data Using Survey Marks Survey Review", 43(319), ss.80–93.
- Montane, J. M., and Torres, R., 2006, "Accuracy Assessment of Lidar Saltmarsh Topographic Data Using RTK GPS " *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 29208(August), ss.961–967.
- NDEP, 2004, "Guidelines for Digital Elevation Data", Version 1.0, National Digital Elevation Program, May 10, 2004, c/o U.S. Geological Survey (USGS), Reston, VA.
- NSSDA., 1998, " Geospatial Positioning Accuracy Standards, Part 3: National Standard for Spatial Data Accuracy" Federal Geographic Data Committee (FGDC), c/o U.S. Geological Survey (USGS), Reston, VA.
- Pereira, L., and Janssen, L., 1999, " Suitability of laser data for DTM generation: a case study in the context of road planning and design", *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 54, pp. 244–253.
- Pourali, S., Arrowsmith, C., and Chrisman, N., 2014, "Vertical Accuracy Assessment of LiDAR Ground Points Using Minimum Distance Approach", (April), ss.7–9.
- Reutebuch, S. E., McGaughey, R. J., Andersen, H. E., and Carson, W. W. , 2003, " Accuracy of a High Resolution Lidar Terrain Model Under a Conifer Forest Canopy", *Canadian Journal of Remote Sensing*, 29(5), ss.527–535.
- Stal, C., Nuttens, T., Bourgeois, J., Carlier, L., Maeyer, P. De, and De, A., 2011, " Accuracy assessment of a LiDAR Digital Terrain Model by Using RTK GPS and Total Station", 10(1), ss. 1–8.
- Veneziano, D., 2002, "Accuracy evaluation of LIDAR-derived terrain data for highway location",
- Vosselman, G., 2008, "Analysis of Planimetric Accuracy of Airborne Laser Scanning Surveys" International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation, (ITC), Netherland, Vol. XXXVII, part B3a., ss.99–104.
- Webster, T. L. , 2005, " LIDAR Validation Using GIS: A Case Study Comparison Between Two LIDAR Collection Methods", *Geocarto International*, 20(4), ss.11–19.
- Webster, T. L., and Dias, G., 2006, An automated GIS Procedure for Comparing GPS and Proximal LIDAR elevation, *Computers and Geosciences*, 32(6), ss. 713–726.