

Sayısal Yüzey Modeli Üretiminde Fotogrametri mi, LiDAR mı? (Digital Surface Model Production: Photogrammetry versus LiDAR)

M.Sabri ŞEHİSUVAROĞLU¹, Oktay EKER¹, Mustafa ERDOĞAN¹, Ferruh YILDIZ²

¹Harita Genel Komutanlığı 06100 Cebeci, Ankara.

²Selçuk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 42151, Konya.
sabri.sehsuvaroglu@hgk.msb.gov.tr

ÖZET

Sayısal yükseklik modelleri, sayısal verilerin hayatın her alanına girmesi ile birlikte geniş bir kullanım alanı bulmaktadır. Gelişen teknoloji ve yöntemler ile birlikte daha yoğun ve daha doğru yükseklik verileri elde edilebilmektedir. Günümüzde sayısal yükseklik verisi üretimi için, kendilerine özgü avantaj ve dezavantajlara sahip LiDAR ve görüntü eşleme teknikleri öne çıkmaktadır.

Bu çalışmada son yıllarda sayısal yükseklik modelleri üretiminde yoğun olarak kullanılmaya başlanan havadan LiDAR teknolojisi ile sayısal fotogrametrinin hızla gelişen otomatik görüntü eşleme tekniği karşılaştırılmıştır. Yapılan karşılaştırma ile hangi tekniğin daha doğru sonuçlar verdiğini belirlemek değil, LiDAR ve otomatik görüntü eşleme ile elde edilen SYM'lerin uyum dereceleri ve iki veri grubu arasındaki farklılıkların ortaya çıktığı alanları ve özelliklerini belirlemek amaçlanmıştır. Bu amaçla test bölgesine ait LiDAR verisi ve sayısal hava fotoğraflarından elde edilen sayısal yüzey modelleri karşılaştırılmış ve elde edilen sonuçlar sunulmuştur. Hava fotoğraflarından sayısal yüzey modelleri üretiminde farklı görüntü eşleme teknikleri kullanan iki farklı ticari yazılım kullanılmıştır. Çalışma sonuçları göstermiştir ki, düz ve açık alanlar başta olmak üzere, yüksek bindirme oranlarına sahip hava fotoğraflarından görüntü eşleme yöntemi ile elde edilecek sayısal yüzey modelleri, LiDAR ile elde edilecek sayısal yüzey modellerine iyi bir alternatif olmaktadır. Bu nedenle uygulanacak projenin karakteristik özelliklerine (alanın büyüklüğü, arazideki detay özellikleri, eğim, bütçe, zaman vb.) uygun metodun seçilmesi faydalı olacaktır. En ideal çözüm ise iki yöntemin birbirlerinin dezavantajlı taraflarını tamamlayıcı şekilde birlikte kullanılmasıdır.

Anahtar Kelimeler: LiDAR, Görüntü Eşleme, Çok Işınlı Fotogrametri, Sayısal Yüzey Modeli, Sayısal Yükseklik Modeli.

ABSTRACT

Digital elevation models have been widely used by the increase of digital geospatial data usage in daily life. More accurate and dense elevation data could be produced by the help of the developing technologies and new methods. Nowadays, with their own advantages and disadvantages, LiDAR and image matching techniques are popular for digital elevation model production.

In this study, airborne LiDAR technology which is widely used for digital elevation model production in last years and automatic image matching technique of the recently developing field of the digital photogrammetry are compared. The aim of this comparison is to determine the differences and the degree of compliance of the digital surface models of two different sources/methods, not to determine which method is accurate. For this purpose, digital surface models of the selected test area which produced from LiDAR data and aerial images are compared and the results are presented. Two different commercial softwares with different image matching algorithms used in the production of digital surface models from the aerial images. As a conclusion, image matching methods using multiray photogrammetry can be a good alternative to LiDAR for digital surface model production, especially in flat and bare earth areas. For this reason one should decide which method will be used for digital surface model production by considering project characteristics (size of the area, features, slope, budget, time etc.). And the ideal solution is to use both methods at the same time as complementary of each other's disadvantages.

Keywords: LiDAR, Image Matching, Multiray Photogrammetry, Digital Surface Model, Digital Elevation Model.

1. GİRİŞ

Günümüzde çeşitli sayısal coğrafi veri üretimlerinden doğal kaynakların yönetimine, simülasyon uygulamalarından topoğrafyaya ilişkin çeşitli analizler yapılmasına kadar pek çok alanda yükseklik modelleri yoğun ve etkin olarak kullanılmaktadır. Gelişen teknoloji ile birlikte, daha yüksek çözünürlüklü ve daha doğru sayısal yükseklik modellerine olan ihtiyaç ve çalışma isteği artmaktadır. Bu da kullanıcıları daha hassas ve daha doğru sayısal yükseklik modelleri üretimi arayışlarına yönlendirmektedir. Sayısal yükseklik modeli; düzenli veya düzensiz aralıklı noktalardaki yükseklik değerleri ile ifade edilen topoğrafik yüzeyin sayısal ve matematiksel temsili için kullanılan bir genel terimdir ve sayısal yüzey modeli (SYM) ve sayısal arazi modeli (SAM) olmak üzere ikiye ayrılır. SYM, bitki örtüsü ve insan yapımı tüm nesnelerin üst yüzeyinden geçen yüksekliği modellerken, SAM ise sadece açık (çıplak) arazi yüzeyindeki yükseklik

değerlerini modeller (Höhle ve Potuckova, 2011). Artık günümüzde pek çok uygulamada, geleneksel SAM kullanımının yanı sıra SYM kullanımı da oldukça yaygınlaşmış ve SYM üretimine olan ilgi de artmıştır. Son yıllarda sayısal yükseklik modeli üretimi için; LiDAR teknolojisi ile teknolojinin gelişmesine paralel olarak gelişen yoğun görüntü eşleme yönteminin kullanımı öne çıkmaktadır.

LiDAR algılayıcılarının ticari olarak yaygınlaşması ile birlikte dünyada kullanımı özellikle 1990'lı yılların sonundan itibaren artmaya başlamış, ülkemizde ise son yıllarda artan bir şekilde ilgi çekmeye başlamıştır. LiDAR ile yüksek doğruluğa sahip, yoğun, belirli koşullar ve uygulamalar için hızlı ve ekonomik olarak yükseklik verisi elde edilebilmektedir. Bununla birlikte, sayısal hava kameralarındaki donanımsal gelişmeler ve kullanımlarının yaygınlaşması sonucunda; düşük maliyetle, yüksek görüntü kalitesine sahip çok sayıda fotoğraf elde etme olanağı bulunmuştur. Böylece yerdeki bir piksel 15 taneye kadar farklı hava fotoğrafında elde edilebilir hale gelmiştir (Wiechert ve Gruber, 2009). Bunların sonucu olarak; çok ışınlı (multiray/multi image) fotogrametri uygulanma imkânı bulmuş ve beraberinde geliştirilen yoğun görüntü eşleme (dense image matching) yöntemleri ile birlikte, sayısal fotogrametri LiDAR ile rekabet eder hale gelmiştir.

Bu çalışmada; havadan LiDAR teknolojisi ile sayısal fotogrametrinin hızla gelişen otomatik görüntü eşleme tekniklerini karşılaştırmak ve her iki yöntemle elde edilen SYM'lerin birbirleri ile uyum derecesini ve iki veri grubu arasındaki farklılıkların ortaya çıktığı alanları ve özellikleri ortaya koymak hedeflenmiştir.

Bu amaçla, öncelikle LiDAR kısaca anlatılmış, daha sonra çok ışınlı fotogrametri ve yoğun görüntü eşleme yöntemi tanıtılmıştır. Yöntemlerin tanıtımı sonrasında, hem LiDAR verisi ve hem de sayısal hava fotoğrafları olan bir bölgede her iki teknikle elde edilen SYM'ler karşılaştırılarak analiz edilmiştir. Son bölümde ise elde edilen sonuçlar özetlenmiştir.

2. LiDAR

Işığı Algılama ve Mesafe Ölçme (LiDAR, Light Detection and Ranging), aktif sistem prensibine göre çalışan ve belirli bir mesafedeki hedefin uzaklığını ve/veya diğer bilgilerini belirlemek için gönderilen lazer ışın dalgalarının özelliklerini ölçmeye yarayan bir optik uzaktan algılama teknolojisidir. Başka bir tanımla; kısa sürede,

istenilen sıklıkta ve yüksek doğrulukta yeryüzüne ve objelere ait üç boyutlu (3B) koordinat verisi toplamak için kullanılan bir uzaktan algılama sistemidir. LiDAR'da lazer, GPS ve IMU olmak üzere üç farklı teknoloji aynı anda kullanılmaktadır. Günümüzde LiDAR teknolojisi uzaydan, havadan, yersel, mobil, batimetrik ve koridor haritalama gibi farklı kullanım alanları bulmaktadır. LiDAR ölçümleri sonucunda çok farklı ürünler elde edilmekte ve bu ürünler çok değişik uygulama alanlarında kullanılmaktadır (Liu, 2010).

Bir LiDAR projesinde en kritik hususlar; beklenen veri doğruluğu ve istenilen nokta aralığıdır (veri sıklığı). Projede hedeflenen amaca maliyet etkin şekilde ulaşabilmek için; uçuş yüksekliği ve hızı, sinyal tekrarlama frekansı/hızı, tarama açısı, tarama frekansı/hızı ve uçuş hatlarının bindirme oranı parametrelerini en uygun şekilde belirlemek gerekir. Mevcut uygulamalarda genellikle m² de 0.5-20 arası nokta yoğunluğu ile desimetre(ler) seviyesinde mutlak konum doğrulukları elde edilmektedir. Bir LiDAR projesi planlanırken; ölçümü yapılacak arazinin yapısı (topoğrafik özellikler ve bitki örtüsü), toplam proje süresi ve bütçesi ile elde edilmek istenen sonuç ürünler de dikkate alınmalıdır.

LiDAR teknolojisinin kendine özgü avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır. Bunların başlıcaları (Vosselman ve Maas, 2010);

(1) x,y ve z koordinatları oldukça doğru (dm. seviyesinde) olarak bilinen, çok sayıda nokta içeren bir nokta bulutu sağlamaktadır.

(2) Güneş ışığına ve güneşin eğim açısına bağımlı olmadığından, yılın her günü 24 saat veri toplanabilmektedir.

(3) Veri toplama sırasında sistemle entegre kameralar sayesinde eş zamanlı sayısal fotoğraf veya video çekimi de yapılabilmektedir.

(4) Çok sayıda dönüş (multiple returns) ve tam dalgaşekli (full waveform) kayıt yetenekleri sayesinde daha fazla bilgi toplanabilmektedir.

(5) Lazer sinyalleri bitki örtüsü içinden geçip yere ulaşabildiğinden, ağaçlık alanlarda SAM üretimi için iyi sonuçlar vermektedir.

(6) Elde edilen düşey doğruluk, yatay doğruluğa göre daha yüksektir.

(7) Sistem kötü hava koşullarından (bulut, yağmur, sis, duman vb.) etkilenmektedir.

(8) Yüzeylerin yansıtıcılığı, elde edilen nokta bulutunun doğruluğunu ve tamliğini etkilemektedir.

(9) Veri işlenirken zaman zaman yardımcı görüntülere (fotoğraf vb.) ihtiyaç duyulmaktadır.

3. ÇOK IŞINLI FOTOGRAMETRİ VE YOĞUN GÖRÜNTÜ EŞLEME

Yeni bir terim olmayan Çok Işınlı Fotogrametri, çok fazla sayıda stereo çift oluşturabilecek şekilde yüksek bindirme oranlarında (%80-%90 ileri, %50-%60 yan bindirme) hava fotoğraflarının çekilmesini ifade etmektedir. Klasik hava kameraları ile bu şekilde hava fotoğrafı çekmek çok maliyetli bir işlem iken, sayısal hava kameralarının kullanıma başlanması ile birlikte yüksek bindirme oranları ile hava fotoğraflarının çekilmesi uygulanabilir bir duruma gelmiştir. Ayrıca sayısal hava kameralarının radyometrileri klasik kameralara göre daha iyidir. Bu da elde edilen sayısal görüntülerin daha kaliteli olmasını yani başka bir ifade ile daha fazla detay seçilebilmesini sağlamaktadır. Sayısal kamera kullanımının bir diğer getirisi de yüksek yer örneklemeye aralığında (çözünürlüklü, GSD) görüntüler elde edilebilmesi olmuştur.

Yüksek bindirme oranları iç doğrulukları arttırmaktadır (Leberl vd., 2010). İç doğruluklar fotogrametrik nirengi dengelemesinde σ_0 değeri ile gösterilmektedir. Sayısal hava kameraları ile elde edilen kaliteli ve yüksek bindirme oranlarına sahip hava fotoğraflarının fotogrametrik nirengi dengelemesinde σ_0 için $\pm 1 \mu\text{m}$ değeri hesaplanmıştır (Ladstätter ve Gruber, 2008). Klasik kameralar ile elde edilen fotoğraflarla gerçekleştirilen fotogrametrik nirengi dengelemesinde σ_0 'ın $\pm 3 \mu\text{m}$ 'dan daha iyi olması beklenmektedir. Bu durumda sayısal hava kameraları ile elde edilen iç doğruluğun klasik kameralara göre üç kat daha iyi olduğu söylenebilmektedir.

Yoğun görüntü eşleme; aynı alanı gören çok sayıda (yüksek bindirmeli) hava fotoğraflarından faydalanarak, bir piksel kadar küçük aralıklarda eşlemeyi ifade etmektedir. Bir stereo çifti oluşturan iki fotoğrafı baz alan geleneksel fotogrametride, sayısal yükseklik modelleri için gerçekleştirilen görüntü eşlemenin 10-20 piksel aralığında olması beklenir (Balce, 1986). Bir noktaya ait 10-20 görüntü olması durumunda ise geleneksel fotogrametri kuralları geçerli olmamaktadır. Örneğin, 10 adet bindirmeli görüntü olması durumunda, bir stereo çift için gerekli olan nokta aralığı geleneksel yöntemdeki aralığın 1/7'sine düşmektedir (Leberl vd., 2010).

Bu durumda görüntü eşleme aralıkları 1-3 piksele düşmekte ve 10 cm yer örneklemeye aralığına sahip bir görüntüde yoğun görüntü eşleme ile elde edilecek 3B nokta bulutundaki yoğunluk m^2 de yüzlerce nokta olabilmektedir. Yoğun görüntü eşleme neticesinde yüksek yoğunluğun yanı sıra yüksek doğruluklar da elde edilmektedir. Nokta bulutu kullanılarak, GSD'den daha iyi bir düşey doğruluğa ulaşılabilmektedir. Örneğin 10 cm GSD'ye sahip görüntülerden, 10 cm. den daha iyi düşey doğrulukta SYM elde edilebilmektedir (Wiechert vd., 2012).

Görüntülerdeki kalite artışı ve yüksek bindirme oranları, yüksek doğruluk ve yoğunlukta 3B nokta bulutu elde etmeyi sağlayan otomatik görüntü eşleme algoritmalarının geliştirilmesine olanak sağlamıştır (Haala, 2011). Son zamanlarda geliştirilen ve öne çıkan görüntü eşleme algoritmalarından biri de oldukça yüksek performanslı çalışan ve doğru sonuçlar veren Semi-Global Matching (SGM) metodudur. Bu yöntemde her bir piksel için yükseklik değeri hesaplanabilmekte, bu da yüksek yoğunlukta yükseklik modeli üretimine olanak sağlamaktadır (Hirsh Müller, 2008). Bu metodun farklı kameralara ait görüntüler kullanılarak, farklı özellikteki arazilerde ve farklı baz-yükseklik oranlarına sahip fotoğrafları da kapsayan detaylı bir analizi (Rothermel ve Haala, 2011) tarafından yapılmış ve yüksek kalitede SYM üretimi için olumlu sonuçlar elde edilmiştir.

Görüntü eşleme yazılımlarında da son yıllarda önemli gelişmeler kaydedilmiştir. Bu gelişmeler ile birlikte artık daha küçük detaylar da modellenabilmekte, daha hacimli veri setleri daha kısa sürelerde işlenebilmekte; daha homojen, daha doğru ve daha yoğun nokta bulutları elde edilebilmektedir (Heuchel vd., 2011). Günümüzde bazı firmalar yoğun görüntü eşleme tekniğini kullanarak kullanıcılara tamamen otomatik bir şekilde sonuç ürünleri elde edebilmesini sağlamaktadır. Buna örnek olarak UltraCam kameraları ile elde edilen hava fotoğraflarını girdi olarak kabul edilen UltraMap yazılımı verilebilir. Yazılım otomatik olarak nokta bulutunu elde etmekte, daha sonra yine otomatik olarak bu nokta bulutundan SYM, SYM'den SAM ve bu modellerden de gerçek (true) ve standart ortofotolar üretebilmektedir (Wiechert vd., 2012).

Yoğun görüntü eşleme ile 3B nokta bulutu elde etmenin avantaj ve dezavantajları aşağıdaki şekilde özetlenebilir:

(1) Alt piksel doğruluğunda fotogrametrik nirengi ile geniş alanda tutarlı bir kamera görüntü

blok geometrisi elde edilmektedir (Leberl vd., 2010).

(2) GPS/IMU üzerine daha iyi fotogrametrik nirengi ile daha yüksek geometrik doğruluk sağlamaktadır (Leberl vd., 2010).

(3) Daha fazla nokta yoğunluğu elde edilebilmektedir (Leberl vd., 2010).

(4) 3B veri noktalarını zenginleştiren 2B görüntü bilgisi vardır (Leberl vd., 2010).

(5) Çok bantlı görüntü sınıflandırma mümkündür (Leberl vd., 2010).

(6) Kentsel yan yüzeyler görüntü kenarlarından maliyetsiz elde edilebilmektedir (Leberl vd., 2010).

(7) Elde edilen yatay doğruluk, düşey doğruluğa göre daha yüksektir.

(8) Bitki örtüsü içinden geçme olanağı olmadığından, bitki örtüsünün sık olduğu alanlarda yüksek çözünürlüklü SAM elde edilmesi güçtür (Wiechert vd., 2012).

(9) Yüksek doğruluk için fotogrametrik nirengi işlemine gereksinim vardır (Leberl vd., 2010).

2010 yılında gerçekleştirilen bir projede elde edilen, LiDAR ve yoğun görüntü eşleme yöntemi karşılaştırma sonuçları Tablo 1'de verilmiştir (Leberl vd., 2010). Tabloda yoğun görüntü eşleme ile daha geniş alanlarda, daha hızlı ve daha yüksek yoğunlukta yükseklik noktası elde edilebildiği görülmektedir.

Tablo 1: LiDAR ve Sayısal Fotogrametri karşılaştırması (Leberl vd., 2010)

LiDAR	Sayısal Fotogrametri
Saniyede 170 tarama (190kHz), 30° Görüş Açısı (FOV)	25 cm. yer örnekleme aralığı (GSD)
m ² de 8 nokta	m ² de 16 nokta
Uçuş Yüksekliği = 750 m.	Uçuş Yüksekliği = 4188 m
Uçuş Hızı = 60 m./sn.	Uçuş Hızı = 141 m./sn.
Kolon Genişliği = 403 m.	Kolon Genişliği = 4328 m.
Enine Bindirme Oranı = %20	Enine Bindirme Oranı = %60
Etkin Kolon Genişliği = 322 m.	Etkin Kolon Genişliği = 1731 m.

4. UYGULAMA

Test çalışması; Şekil 1'de gösterilen Kırşehir ili, Çiçekdağı ilçesi, Kızılcalı köyü bölgesindeki 1346 m. x 3414 m. lik bir alanda

gerçekleştirilmiştir. Test alanı seçilirken; farklı eğim derecesine sahip arazi yapısı, yansıtıcı yüzeye sahip detaylar, ağaçlık arazi örtüsü ve yüksekliklerin çok ani değiştiği yerleşim alanı ve gölgeli alanlar gibi SYM elde ederken karakteristik özellik sergileyebilecek ve yöntemlerin farklılık gösterebileceği noktaları içermesine dikkat edilmiştir. Seçilen proje alanı içerisinde farklı eğime sahip arazi yapısı; yerleşim alanını temsilen bir köy; yansıtıcı yüzeye sahip geniş yataklı sulu dere ve göl; kırıklık hatlarını ve gölgeli alanı temsilen yollar ile derin dere yatağı ve ağaçlık bölge mevcuttur. Test alanı içerisinde yükseklik değerleri 705 m. ile 800 m. arasında değişmektedir.



Şekil 1: Test alanı

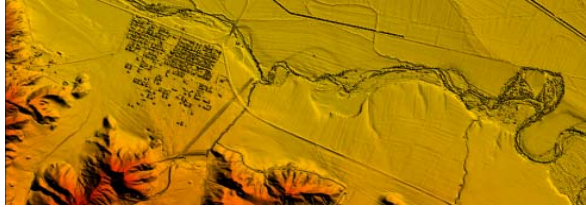
LiDAR verileri Leica ALS60 cihazı ile hava fotoğrafları 6 mikrometre piksel boyutuna sahip DiMAC sayısal hava kamerası ile aynı proje içerisinde elde edilmişlerdir. Hava fotoğraflarının mekânsal çözünürlüğü 20 cm.' dir.

Proje alanı için mevcut hava fotoğraflarının bindirme oranı çok ışıklı fotogrametride kullanılan bindirme oranlarına göre azdır. İleri bindirme oranı %80-90 olması beklenirken %60'da, yan bindirme oranı ise %50-60 olması beklenirken %20'de kalmıştır. Elde daha yüksek bindirme oranlarına sahip sayısal hava fotoğrafları bulunmadığı için bu veriler kullanılmıştır. Ancak bu durumda elde edilecek sonuçlardan çok daha iyi sonuçların yüksek bindirme oranları ile elde edilebileceği açıktır. (Wiechert ve Gruber, 2009) yaptıkları bir çalışmada; %80 ileri, %60 yan bindirmeyle çekilen 10 cm. yer örnekleme aralığına sahip fotoğraflarla, otomatik yoğun görüntü eşleme neticesinde 10 cm. den daha iyi düşey doğrulukta, m²'de ortalama 50'den fazla nokta yoğunluklu SYM elde etmişlerdir.

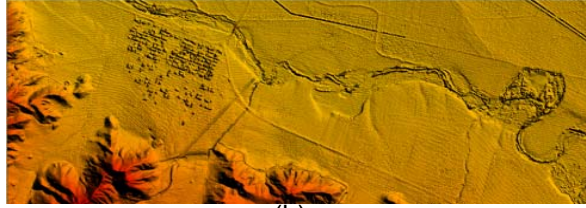
Uygulamada öncelikle, iki farklı yazılım kullanılarak, stereo sayısal hava fotoğraflarından otomatik görüntü eşleme ile SYM'ler üretilmiştir. Bu işlem, farklı eşleme algoritmalarına sahip iki farklı ticari yazılım kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu yazılımlar Leica Photogrammetry Suite (LPS) 9.2 ve Inpho Match-T 5.5 yazılımlarıdır. Bu yazılımlardan Match-T nokta bulutu üretme ve

yoğun görüntü eşleme yapma yeteneğine sahiptir. LPS ise standart görüntü eşleme yapabilmekte ve sonuç ürün olarak nokta bulutu yerine grid formatında SYM üretmektedir. Her iki metodun yeteneklerini karşılaştırabilmek amacıyla; LiDAR, LPS ve Match-T ile elde edilen verilerden, 2 m. çözünürlüklü (grid aralıklı) SYM'ler üretilmiştir. Üretilen SYM'lerin görüntüsü Şekil 2'de verilmiştir.

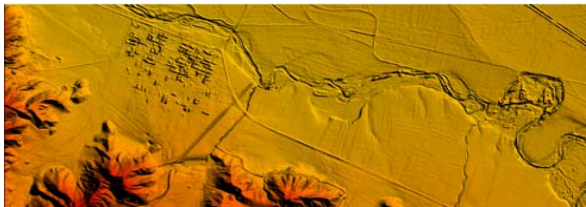
Sonraki işlem adımında, elde edilen SYM'ler, sırasıyla LiDAR verisinden üretilen SYM ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmada kullanılan LiDAR'dan üretilmiş SYM verisi, LiDAR verisini toplayan firmadan hazır alınmıştır. Yani ham LiDAR nokta bulutundan SYM üretim işlem adımları bu çalışma kapsamında gerçekleştirilmemiştir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 2: 2 m. çözünürlüklü SYM'ler (a: LiDAR verisinden, b: LPS ile c: Match-T ile otomatik eşlemeden)

LiDAR ve hava fotoğraflarından otomatik görüntü eşleme ile üretilen SYM'leri karşılaştırmak amacıyla, elde edilen SYM'lerin birbirlerinden farkları alınmıştır. Oluşan fark görüntüleri; doğrulukları değil, bu SYM'lerin birbirleri ile olan farklarını göstermektedir. Bu görüntülerdeki maksimum ve ortalama farklar ile farkların standart sapma değerleri Tablo 2'de verilmiştir. Ortalama fark değerleri bulunurken, maksimum farklılık değerleri de hesaplamalara dâhil edilmiştir. Tablo incelendiğinde ortalama farkların ve farkların standart sapmasının 50 cm.

civarında olduğu görülmektedir. Ancak 40 m. civarındaki farklılıklar oldukça yüksek bulunmuş ve bu farklılıkların olduğu bölgeler ayrıca incelenmiştir.

Tablo 2: Elde edilen SYM'ler arasındaki fark değerleri (metre biriminde)

Farklar	Maksimum Farklar	Ort. Fark	σ_0
LiDAR-LPS	-10.38 41.47	0.39	0.48
LiDAR-Match T	-7.09 40.93	0.49	0.53

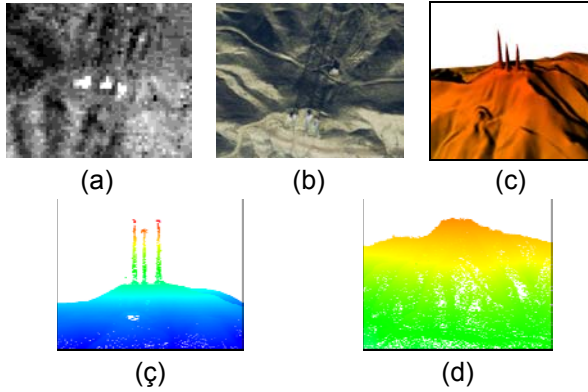
Şekil 3'te LiDAR ve LPS yazılımı ile elde edilen SYM'lerin farkı ile elde edilen fark görüntüsü görülmektedir. Bu görüntüde gri renk değerine sahip pikseller farkların düşük, beyaz ve siyah renkli pikseller ise farkların yüksek olduğu yerleri göstermektedir. Yerleşim yeri, ağaçlık alanlar ve dere yatağında farkların büyük olduğu görülebilmektedir.



Şekil 3: SYM'lerin farklarından (LiDAR-LPS) elde edilen yükseklik fark görüntüsü

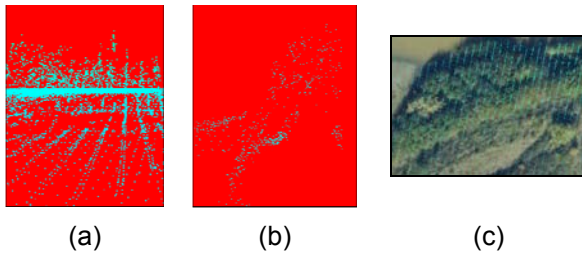
Tablo 2 incelendiğinde, en yüksek farkların 40 m. civarında olduğu görülmektedir. Bu farkların bulunduğu alan (Şekil 4 (a)) incelendiğinde, bölgede 3 adet anten olduğu (Şekil 4(b)), bu antenlerin LiDAR ile elde edilen SYM'de bulunduğu (Şekil 4 (c)), ancak otomatik görüntü eşleme ile SYM üretiminde bu antenlerin tespit edilemediği anlaşılmıştır. Aynı bölge LiDAR'dan ve Match-T ile otomatik eşleştirmeden elde edilen nokta bulutlarında da incelenmiştir. Antenlerin olduğu bölgede, antenlerin fotoğraf üzerinde az yer kaplamasından dolayı, eşleştirme yönteminin başarısız olduğu, LiDAR'ın ise çok sayıda dönüş (multiple returns) ve/veya tam dalgaşekli (full waveform) kayıt özelliğinin avantajı ile antenleri tespit edebildiği belirlenmiştir (Şekil 4 (ç) ve (d)).

Antenler nedeniyle oluşan 30-40 m.'lik farklar çıkarıldığında, maksimum farklar ± 10 m. civarına düşmektedir. Bunların büyük kısmı ise yerleşim yeri, ağaçlık alan ve dere yatağında yoğunlaşmaktadır.



Şekil 4: Maksimum farkların olduğu 3 adet anten direği

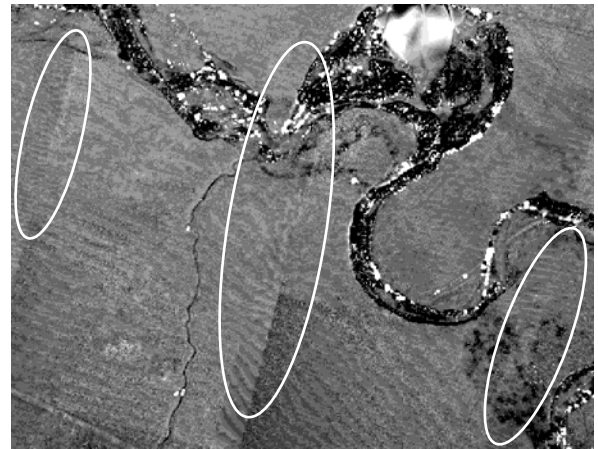
LiDAR'ın çok sayıda dönüş ve tam dalgaşekli kayıt özelliklerinin diğer avantaj sağladığı bölgeler özellikle yoğun ağaçlık (ormanlık) alanlardır (Vosselman ve Maas, 2010). Bunu test edebilmek için, proje alanında yer alan ağaçlık bir bölge incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre LiDAR'ın seyrek ağaç içeren bölgelerde hem yerden hem de ağaç üstlerinden nokta topladığı fakat çok sık ağaçların bulunduğu bölgelerde zeminden çok az veri toplayabildiği tespit edilmiştir (Şekil 5 (a)). Aynı şekilde otomatik eşleme ile de ağaçların üzerinden veri toplanabilmektedir (Şekil 5 (b)). Ancak LiDAR bu bölgede yere az sayıda ulaşsa da, çok sayıda dönüş/tam dalgaşekli kayıt özelliğinden dolayı daha fazla veri toplayabilmektedir. Ağaçlık alanı gösteren ortofoto Şekil 5 (c)'de gösterilmiştir.



Şekil 5: Ağaçlık alanda elde edilen nokta bulutları.

Hava fotoğraflarından üretilen SYM'lerde stereo model kenarlarında yükseklik farkları olduğu görülmüştür. Yapılan incelemede, komşu piksellerdeki yükseklikler ölçülmüş ve aralarında yaklaşık 30 cm.'lik farklar tespit edilmiştir. LiDAR'ın tüm hat boyunca daha homojen bir model oluşturması nedeniyle, fark SYM görüntüsünde stereo model kenarları belirginleşmektedir (Şekil 6). Bu hatanın, fotogrametrik nirengi sırasında ölçülen bağlama noktalarının yetersiz olmasından ve/veya hatalı ölçümlerin tam olarak ayıklanamamasından kaynaklandığı değerlendirilmektedir.

Fark görüntüsünde (Şekil 3), düz ve eğimli alanlar birbirlerinden belirgin şekilde ayırt edilebilmektedir. Bu görüntü, farklı topoğrafik karakteristiklere sahip (örneğin düz ve eğimli alanlar) bölgelerde, yükseklik farklarının aynı olmadığını göstermektedir. Farkların homojen olması durumunda bu ayırımın yapılamaması beklenmektedir. Düz alanlar, yani SYM'nin SAM'a eşit olduğu kabul edilebilecek bölgeler ise açık arazidir. Eğimli alanlar hava fotoğraflarından incelendiğinde, yer yer kısa ağaçlar içerdiği, bazı bölgelerin çok parlak, bazı bölgelerin ise gölgede kaldığı görülmüştür. Bu etkenler, söz konusu bölgelerde LiDAR ve görüntü eşleme yöntemleriyle elde edilen SYM'ler arasındaki farklılıkların artmasına sebep olmaktadır.



Şekil 6: Fark görüntüsünde tespit edilen stereo model geçişlerindeki hatalar.

Tablo 3: Eğimli ve düz alanlarda elde edilen farklar (metre biriminde)

Arazi Tipi	Farklar	Maksimum Farklar	Ort. Fark	σ_0
Eğimli	LiDAR-LPS	-1.66 2.36	0.27	0.48
	LiDAR-MatchT	-3.06 1.99	0.34	0.61
Düz	LiDAR-LPS	-0.21 0.89	0.37	0.11
	LiDAR-MatchT	0.15 0.69	0.44	0.06

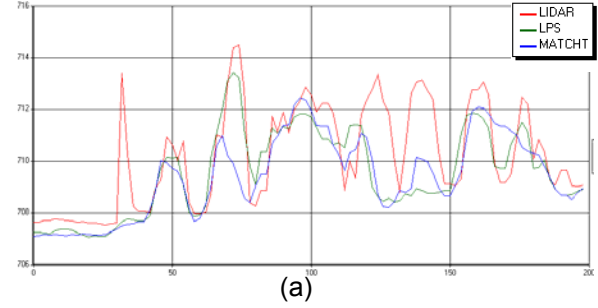
Test alanı içerisinde eğimli ve düz alanlardan oluşan iki farklı bölge seçilerek bu alanlardaki farklar ayrıca irdelenmiş ve elde edilen istatistiksel değerler Tablo 3'de verilmiştir. Seçilen eğimli alanda ortalama eğim 26° , maksimum yükseklik farkı 71 m.; düz alanda ise ortalama eğim 3.5° , maksimum yükseklik farkı 6 m.'dir. Sonuçlar incelendiğinde, görüntü eşleme yöntemi ile LiDAR'dan elde edilen yükseklikler arasındaki farkların düz ve açık alanlarda en az

seviyede olduğu görülmektedir. Bu da özellikle düz ve açık alanlar için, otomatik görüntü eşleme yöntemi ile LiDAR'a oldukça yakın sonuçlar elde edilebileceğini göstermektedir. (Yastıklı ve Esirtgen, 2011) de yaptıkları çalışmada SYM'nin doğruluğunun belirlenmesinde arazi sınıfının göz ardı edilemeyecek bir etken olduğunu vurgulamakta ve farklı veri kaynaklarından elde edilmiş SYM'leri incelediklerinde; açık alanlarda karesel ortalama hata (KOH) değerlerinin düşük, ormanlık, çalılık ve yerleşim alanlarında ise yüksek olduğunu tespit etmişlerdir.

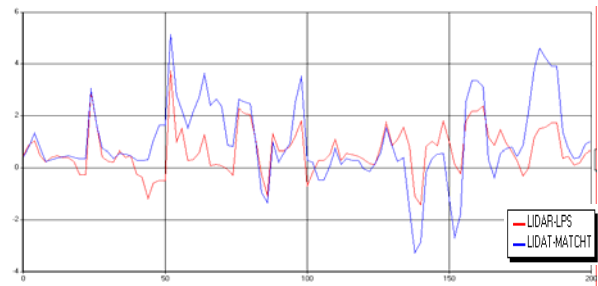
LiDAR teknolojisi yerleşim yerlerinde binaların çıkarımında iyi sonuçlar vermektedir. (Demir vd., 2008) yaptıkları test çalışmasında, LiDAR ile binaların %92 oranında doğru tespit edilebildiği, ancak binaların %17'sinin hiç tespit edilemediği sonucuna varmışlardır. LiDAR, yerleşim yerlerinde zaman içerisinde oluşan, bina sayısı ve bina şekillerindeki değişimleri tespit etmek amaçlarıyla da kullanılmaktadır. Farklı zamanlara ait LiDAR verilerinden üretilmiş SYM'ler karşılaştırılarak %80 doğrulukta bina değişimleri tespit edilebilmiştir (Teo ve Shih, 2011). Öte yandan (Gülch, 2009) yaptığı çalışmada; yoğun görüntü eşleme ile elde edilen nokta bulutu kullanılarak yapılan 3B bina çıkarımının, LiDAR nokta bulutu kullanılarak yapılan 3B bina çıkarımına çok benzer sonuçlar verdiğini ortaya koymuştur. Bina tespiti ile ilgili olarak; test alanı içerisinde bulunan yerleşim yerinde seçilen 200 m. uzunluğundaki bir hat boyunca kesit alınmıştır. Alınan kesit üzerindeki farklı yöntemlerle elde edilen SYM'ler Şekil 7 (a)'da, SYM farkları ise Şekil 7 (b)'de gösterilmiştir. Kesit incelendiğinde binaların çoğunun otomatik görüntü eşleme ile de tespit edilebildiği, fakat yüksekliklerinin daha düşük ve şekillerinin daha yumuşak olduğu yani gerçek şekilden farklılaştığı görülmektedir. Ancak benzer çalışmalar incelendiğinde, yoğun eşleme tekniği ile yerleşim alanlarında LiDAR'a benzer sonuçlar elde edilebildiği görülmektedir. Bu çalışmada kullanılan hava fotoğraflarının %60 ileri, %20 yan bindirmeli olmasının, yoğun eşleme algoritmasının gerçek potansiyelini ortaya koymasına engel olduğu değerlendirilmektedir.

Uygulamanın son bölümünde, LiDAR'dan elde edilen nokta bulutu (Şekil 8 (a)) ile Match-T yazılımı kullanılarak elde edilen nokta bulutu (Şekil 8 (b)) karşılaştırılmıştır. Nokta bulutları incelendiğinde, Şekil 8'de kırmızı renkle görülen alanlarda nokta toplanamadığı görülmüştür. LiDAR nokta bulutunun dere ve göl gibi suyla kaplı alanlarda nokta içermediği, Match-T ile elde edilen nokta bulutunda ise yerleşim yerlerindeki

gölgeli alanlarda ve dere yatağında nokta toplanamadığı ama gölde toplanabildiği tespit edilmiştir. (Gehrke vd., 2010) LiDAR ve SGM metodlarının, su kütle kıyılarında istenmeyen sonuçlar verdiğini belirtmiştir. Her iki yöntemle oluşturulan nokta bulutlarındaki toplam ve metrekareye düşen yaklaşık nokta sayıları Tablo 4'de sunulmuştur.

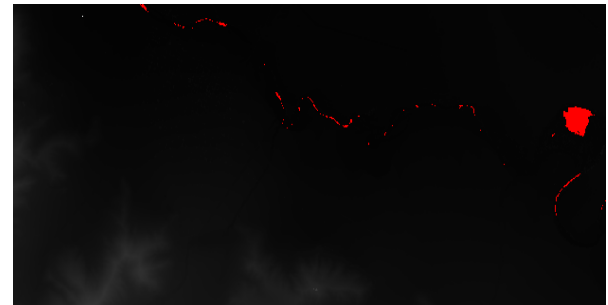


(a)

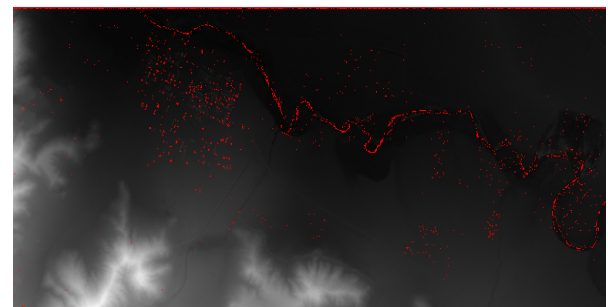


(b)

Şekil 7: (a) 200 m.'lik kesit boyunca farklı yöntemler ile elde edilmiş SYM'ler, (b) Kesit boyunca SYM'ler arasındaki farklar



(a)



(b)

Şekil 8: LiDAR (a) ve Match-T (b) nokta bulutları

Tablo 4: Nokta bulutlarındaki toplam ve metrekareye düşen yaklaşık nokta sayıları

Proje Alanı (m ²)	Toplam Nokta Sayısı		Metrekaredeki Nokta Sayısı	
	LiDAR	Match-T	LiDAR	Match-T
4.595.244	20.639.871	6.500.786	4,5	1,5

Tablo 4'ten de görüleceği üzere; LiDAR projesinde, otomatik görüntü eşlemeyle elde edilen nokta sayısının yaklaşık 3 katı fazla nokta toplanmıştır. Burada hava fotoğraflarının yer örnekleme aralığının 20 cm. olduğu göz önüne alındığında, yaklaşık 3 pikselde 1 nokta toplandığı görülmektedir ki bu da oldukça yüksek bir rakamdır. (Leberl vd., 2009) çalışmasında gerçekleştirilen ve Tablo 1'de verilen sonuçlara göre 25 cm. çözünürlüğe sahip ve %80 ileri, %60 yan bindirme oranlarında çekilmiş hava fotoğraflarından, farklı bir yazılımda yoğun görüntü eşleme yöntemiyle elde edilen nokta bulutunda m²'ye düşen nokta sayısı 16'dır. Buradan, her ne kadar farklı yazılım da kullanılsa, bindirme oranlarının elde edilen yükseklik modelinin çözünürlüğüne ne kadar etkisi olduğu anlaşılmaktadır. Dolayısıyla, bindirme oranlarının artırılması durumunda elde edilecek nokta yoğunluğu ve doğruluğunun da artacağı değerlendirilmektedir.

Test verilerinin elde edildiği projenin planlama safhası dâhil olmak üzere, en başından itibaren proje içerisinde yer alınmadığından, bu çalışma kapsamında maliyet (zaman ve bütçe) analizi ve değerlendirmesi yapılamamıştır. Ancak literatürde projelerin ekonomikliği ile ilgili ortaya konulan değerlendirmelerin bu konuda bir fikir sağlayacağı düşünülmektedir. (Leberl vd., 2010) yaptıkları çalışmada; Tablo 1'deki uçuş hızı ve kolon genişliği dikkate alındığında, benzer yoğunluk ve doğrulukta SYM elde edebilmek için, LiDAR projesinde sayısal fotogrametri projesine göre havada 13 kat daha fazla süre kalmak gerektiğini, yani hava kamerası ile bir uçuş görevinin, LiDAR tarayıcı için harcanacak zamanın yaklaşık %10'nu kadar sürede tamamlanabileceğini ifade etmişlerdir. Bir başka çalışmada ise UltraCam kameraları ile bir LiDAR sistemi karşılaştırıldığında; elde edilen kolon genişliği yaklaşık 3 kat, nokta yoğunluğu ise yaklaşık 30 kat fazladır (Wiechert vd., 2012). (Gehrke vd., 2010) belirli bir çözünürlükte SYM üretiminde, LiDAR uygulaması için harcanan veri toplama zamanı ve masrafın fotogrametrik uygulamaya nazaran daha yüksek olduğunu bildirmektedirler. Proje ekonomikliği açısından dikkate alınması gereken bir diğer husus da

görüntü alımıdır. Eğer projenin sonuç ürünlerinden birisi de ortofoto ise ve/veya ham veri proseslerinde yardımcı kaynak olarak görüntülere de ihtiyaç duyulacak ise, LiDAR projelerinde ilave maliyetle fotoğraf çekimi yapılması ve buna bağlı olarak ilave bir iş akış süreci daha gerekecektir. Sayısal fotogrametri uygulamasında ise böyle ilave iş süreçlerine ihtiyaç olmayacaktır. Bu değerlendirmeler dikkate alındığında, uçuş ve veri toplama maliyetleri açısından, sayısal fotogrametrinin LiDAR'a göre avantaj sağladığı değerlendirilebilir.

Otomatik görüntü eşleme ile LiDAR tekniğini karşılaştıran çalışmalar literatürde araştırılmış ve önemli olduğu değerlendirilen bazı sonuçlar paylaşılmıştır: 3B ağaç modeli oluşturmak için yapılan bir çalışmada, otomatik görüntü eşlemenin havadan LiDAR uygulamalarına iyi bir alternatif oluşturduğu ortaya konulmuştur (Baltsavias vd., 2008). Başka bir çalışmada ise, yoğun görüntü eşlemenin her ne kadar pek çok avantajı olsa da, halen elde edilen SYM kalitesinin manuel üretimlerle karşılaştırılacak seviyede olmadığı, başka bir ifade ile yeterince tatminkâr olmadığı ve halen geliştirilmesi gereken dezavantajları olduğu belirtilmiştir. Ayrıca sonuç ürünün, otomatik olarak kolayca tespit edilemeyen bir takım kaba hatalar içerdiği ve bu hata kaynaklarının neler olduğu ifade edilmiştir (Gruen, 2012). Aynı çalışmada LiDAR ve görüntü eşlemenin farklı hata özellikleri taşıdıkları da belirtilmektedir. Geniş kapsamlı orman envanteri oluşturma çalışmalarında, görüntü eşlemenin halihazırda havadan LiDAR uygulaması yerine kullanılabilir seviyede olmadığı (White vd., 2013) tarafından vurgulanmıştır. Bu çalışmada sayısal fotogrametrinin veri toplama açısından LiDAR'a göre daha ekonomik olduğu, orman envanteri çalışmaları için gerekli olan görüntüyü sağladığını fakat bitki örtüsü altında kalan bölgeler için detaylı SAM oluşturmadığı ve alt kanopi yapısı hakkında bilgi sağlayamadığı belirtilmiştir. (Gülch, 2009) yaptığı araştırmada; otomatik görüntü eşleme ile elde ettiği sayısal yükseklik modellerini, stereo ortamda standart manuel yöntemle elde edilen veri ile mukayese etmiş ve yeterli doğruluğu elde ettiğini ifade etmiştir. (Gehrke vd., 2010) yaptıkları karşılaştırma sonucunda; SGM yaklaşımı ile elde edilen SYM'lerin LiDAR'a iyi bir alternatif olacağını belirtmişler, hatta yüksek çözünürlüklü SYM ve ortofoto üretimi gibi bazı uygulamalarda, uçuş maliyetleri de dikkate alındığında, SGM yaklaşımının tercih edilmesi gerektiği sonucuna varmışlardır. (Leberl vd., 2010) geometrik doğruluk ve nokta yoğunlukları açısından,

LiDAR'ın film tabanlı geleneksel 3B fotogrametriye göre avantajlı olduğunu, ancak bu avantajını GPU-destekli bilgisayarlar üzerinde çalışan, 3B görüş tabanlı tamamen sayısal ve otomotize olmuş sayısal fotogrametriye karşı kaybettiği sonucuna ulaşmışlardır.

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada, aynı bölgeye ait LiDAR verisinden ve %60 ileri, %20 yan bindirme oranına sahip sayısal hava fotoğraflarından otomatik görüntü eşleme yöntemi ile üretilen 2 m. çözünürlüklü SYM'lerin karşılaştırması yapılmıştır. Kullanılan sayısal hava fotoğraflarının bindirme oranı yoğun eşleme için yeterli olmamakla beraber, SYM'lerden birisi yoğun eşleme yeteneğine sahip Match-T yazılımı ile üretilmiştir. Yapılan karşılaştırmanın amacı hangi metodun doğru sonuç verdiğini belirlemek değil, LiDAR ve otomatik görüntü eşleme ile elde edilen SYM'lerin birbirleri ile ne kadar uyumlu olduğunu ve iki veri grubu arasındaki farkların arttığı bölgeleri ve özelliklerini belirlemektir.

Elde edilen sonuçlar her iki yöntem arasındaki farkların yaklaşık ± 50 cm. civarında olduğunu göstermektedir. LiDAR, çalışma prensibinin sonucu olarak, binalar ve anten gibi münferit nokta detayların tespitinde ve de ağaçlık alanlarda daha iyi sonuçlar vermiştir. Öte yandan göl gibi sulu alanlarda da yetersiz nokta sağlamıştır. Bu nedenle bitki örtüsü ile ilgili yapılacak çalışmalar ile münferit detayların tespitinde bir adım öne çıkmaktadır.

Tüm test alanı için, LiDAR verileri daha homojen bir yapı göstermiştir.

Bindirme oranlarının yeterince fazla olmamasından dolayı, yoğun görüntü eşleme tekniği ile standart görüntü eşleme teknikleri birbirlerine çok benzer sonuçlar vermiştir. Bu nedenle yüksek bindirme oranlarına sahip fotoğraflar olmadığı zaman, hangi tekniğin tercih edileceği çok önemli olmamaktadır.

Yapılan kaynak araştırması; uçuş ve veri toplama maliyetleri açısından, sayısal fotogrametrinin LiDAR'a göre avantaj sağladığını ortaya koymuştur. Uçuş yüksekliği, uçuş hızı ve kolon genişliği parametreleri dikkate alındığında; sayısal fotogrametri özellikle geniş alan uygulamalarında LiDAR'a üstünlük sağlamaktadır. LiDAR'ın ise daha çok koridor haritalamada öne çıkacağı değerlendirilmektedir.

Özellikle düz ve açık alanlarda iki yöntem arasındaki farklar ± 10 cm. civarında inmektedir. Bu da, bu tür alanlar için otomatik görüntü eşleme yönteminin LiDAR'la benzer sonuçlar verdiğini göstermektedir.

Daha yüksek bindirme oranlarına sahip hava fotoğraflarının kullanılması ile birlikte, daha tutarlı bir geometri ve daha fazla ölçü sağlanacağından, nokta yoğunluğunun artacağı ve farkların daha da düşeceği beklenmektedir. Bu nedenle yoğun görüntü eşleme tekniğinin her zaman LiDAR'a bir alternatif olabileceği değerlendirilmektedir. Proje bazlı yaklaşım gösterip, her projenin girdi ve çıktıları ile çalışma alanının karakteristik özellikleri dikkate alınarak en uygun tekniğin kullanılması uygun olacaktır. Teorik olarak en uygun çözüm ise iki tekniğin birbirlerinin avantajlarından faydalanacak şekilde birlikte kullanılmasıdır. Ancak bunun pratikte uygulanabilirliği zaman, emek ve maliyet açılarından değerlendirilmelidir. Bu konuda çeşitli çalışmalar bulunmaktadır: (Lingua vd., 2010) havadan LiDAR verisi ile görüntü eşleme verisinin veri işleme adımıyla birlikte kullanımı ile ilgili yeni bir yaklaşım önermektedir. (Schenk ve Csatho, 2002) çalışmalarında; iki tekniğin birbirlerini tamamlar şekilde yüzey bilgisi sağladığını ve her iki teknik ile elde edilen verilerin birleştirilip kullanılmasıyla daha tutarlı ve daha doğru bir yüzey elde edilebileceğini belirtmektedir. Ticari bir uygulama olan ArcGDS LiDAR ile, hava fotoğrafları ve LiDAR nokta bulutu birlikte entegre kullanılarak planimetrik detaylar 3B olarak, oldukça hassas şekilde toplanabilmektedir (URL 1).

İleriki çalışmalarda; yüksek bindirme oranlı fotoğraflardan yoğun görüntü eşleme tekniği ile elde edilecek SYM'nin, LiDAR'dan elde edilecek SYM ile zaman ve maliyet konularını da kapsayacak şekilde karşılaştırılmasının faydalı olacağı değerlendirilmektedir.

TEŞEKKÜR

Çalışmada kullanılan LiDAR verileri ile sayısal hava fotoğraflarını temin eden, İndis Mühendislik Ltd. Şti ve Körfez Haritacılık Planlama Ltd. Şti.'ne teşekkürlerimizi sunarız.

KAYNAKLAR

- Balce A., (1986), **Determination of optimum sampling interval in grid digital elevation models data acquisition**, Proceedings ISPRS Commission III Symposium, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 26(3.1), 40–55
- Baltsavias E., Gruen A., Eisenbeiss H., Zhang L., Waser L.T. (2008), **High-quality image matching and automated generation of 3D tree models**, International Journal of Remote Sensing, Vol. 29, No.5, 10 March 2008, 1243-1259

- Demir N., Poli D., Baltsavias E., (2008), **Extraction of buildings and trees using images and Lidar data**, International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXVII, Part B4, 313-318
- Gehrke S., Morin K., Downey M., Boehrer N., Fuchs T., (2010), **Semi-Global Matching: An alternative to LiDAR for DSM generation?**, In Proceedings of the 2010 Canadian Geomatics Conference and Symposium of Commission I
- Gruen A., (2012), **Development and status of image matching in photogrammetry**, The Photogrammetric Record, Vol. 27, 36-57
- Gülch E., (2009), **Advanced Matching Techniques for High Precision Surface and Terrain Models**, Institute for Photogrammetry, Photogrammetric Week 2009, Dieter Fritsch (Ed.), 303-313
- Haala N., (2011), **Multiray photogrammetry and dense image matching**, Photogrammetric Week, Stuttgart
- Heuchel, T., Köstli, A., Lemaire, C., Wild, D., (2011), **Towards a Next Level of Quality DSM/DTM Extraction with MATCH-T**, Institute for Photogrammetry, Photogrammetry Week 2011, Wichman Verlag, Stuttgart, 197-202
- Hirsh Müller H. (2008), **Stereo processing by semi-global matching and mutual information**, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 30, No. 2, 328-341
- Höhle J., Potuckova M., (2011), **Assessment of the Quality of Digital Terrain Models**, EuroSDR Official Publication No. 60, 12-13
- Ladstätter R., Gruber M., (2008), **Geometric aspects concerning the photogrammetric work flow of the digital aerial camera UltraCamX**, Proceedings of the 21st ISPRS Congress Beijing, International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXVII, ISSN 1682-1750, 521-525
- Leberl F., Irshara A., Pock T., Meixner P., Gruber M., Scholz S., Wiechert A., (2010), **Point Clouds: Lidar versus 3D Vision**, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing Vol. 76, No. 10, October 2010, 1123-1134
- Lingua A., Nex F., Rinaudo F., (2010), **Integration of airborne laser scanner and multi-image techniques for map production**, Earth Resources and Environmental Remote Sensing/GIS Applications, In Proceedings of SPIE, The International Society for Optical Engineering, Vol. 7831, No. 07, 1-14
- Liu H., (2010), **Introduction to LiDAR Remote Sensing**, Ohio URISA LiDAR Workshop, <http://giesn.uc.edu/files/workshops/lidar/lecture.pdf>, [Erişim 27 Aralık 2012]
- Rothermel M., Haala N., (2011), **Potential of dense matching for the generation of high quality digital elevation models**, International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XXXVIII-4/W19, ISPRS Hannover Workshop, 271-276
- Schenk T., Csatho B., (2002), **Fusion of LiDAR data and aerial imagery for a more complete surface description**, International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 34(3/A), 310-317
- Teo T., Shih T., (2013), **Lidar-based change detection and change-type determination in urban areas**, International Journal of Remote Sensing, Vol. 34, Issue 3, 968-981
- Vosselman G., Maas H., (Ed.), (2010), **Airborne and Terrestrial Laser Scanning**, Whittles Publishing, Dunbeath, Scotland, UK, 311ss.
- White J.C., Wulder M.A., Vastaranta M., Coops N.C., Pitt D., Woods M., (2013), **The utility of image-based point clouds for forest inventory: A comparison with airborne laser scanning**, Forests, Vol. 4, 518-536
- Wiechert A., Gruber M., (2009), **Aerial Perspective Photogrammetry versus Lidar**, Professional Surveyor Magazine, August 2009
- Wiechert A., Gruber M., Karner K., Ponticelli M., Schachinger B., (2012), **The power of multi-ray photogrammetry - Ultramap 3.0**, ASPRS 2012 Annual Conference
- Yastıklı N., Esirtgen F., (2011), **Sayısal Yükseklik Modellerinde Kalite Değerlendirme ve Doğruluk Analizi**, TMMOB HKMO 13. Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı, Ankara
- URL 1: http://www.geosoft.it/index.php?option=com_content&view=category&layout=blog&id=24&Itemid=43&lang=en, [Erişim 24 Ekim 2013]