



Havasal LIDAR verileri kullanılarak meşcere parametrelerinin tahmin edilmesi

İbrahim Özdemir

Süleyman Demirel Üniversitesi, Orman Fakültesi, Yaban Hayatı Ekolojisi ve Yönetimi Bölümü, Isparta

İletişim yazarı/Corresponding author: ibrahimozdemir@sdu.edu.tr, Geliş tarihi/Received: 02.08.2012, Kabul tarihi/Accepted: 28.11.2012

Özet: Bu çalışma, bazı meşcere parametrelerinin tahmin edilmesinde LIDAR (Light Detection and Ranging) verilerinin potansiyeli araştırmak amacıyla yapılmıştır. Farklı özellikteki meşcerelerden alınan 30 örnek alanda, yersel ölçmelerle *Göğüs Yüzeyi (GY)*, *Ağaç Sayısı (N)*, *Reineke'nin Sıklık İndeksi (RSİ)* ve *Orta Çap (OÇ)* belirlenmiştir. Örnek alanlara karşılık gelen LIDAR noktaları tespit edilerek, bunlardan yüzdelikler (P50, P90, P95 ve P99) ve zemine ulaşamayan noktaların oranı (ZNO) olmak üzere 5 özellik hesaplanmıştır. LIDAR verilerinden çıkarılan bu özellikler ile meşcere parametreleri arasındaki ilişkiler korelasyon analiziyle ortaya koyulmuştur. Analiz sonucunda, *GY* ve *RSİ* ile LIDAR değişkenleri arasında bir ilişki olmadığı görülmüştür. *N* ve *OÇ* ile LIDAR değişkenleri arasında ise istatistiksel olarak anlamlı ($p < 0,01$) ilişkiler tespit edilmiştir (en yüksek korelasyon katsayıları (r) sırasıyla 0,70 ve 0,72). Sonra aynı değerlendirmeler sadece iğne yapraklı ağaç türlerinin saf ya da baskın olduğu örnek alanlar (19 örnek alan) kullanılarak tekrarlanmıştır. Bu işlem sonucunda, LIDAR değişkenleri ile meşcere parametreleri arasındaki ilişkilerin korelasyon katsayılarında belirgin bir artış gözlemlenmiştir. En yüksek korelasyon katsayıları *N* ve *OÇ* için sırasıyla 0,82 ve 0,84 olarak hesaplanmıştır. Ayrıca, iğne yapraklı meşcereler için yapılan değerlendirmede *GY* ve *RSİ* ile ZNO arasında da istatistiksel olarak önemli fakat zayıf ilişkiler bulunmuştur (sırasıyla, $r = 0,46$ ve $0,58$). Buradan, karmaşık orman ekosistemlerinde LIDAR verileriyle meşcere parametreleri kestirilmek istenirse, öncelikle orman alanının belirli kriterlere göre gruplandırılarak değerlendirme yapılması gerektiği söylenebilir. Adımsal regresyon analizi sonucunda, iğne yapraklı ağaç türlerine ait meşcerelerde, *N* ve *OÇ* için geliştirilen modellerin açıklama payı (R^2) sırasıyla 0,82 ve 0,70 olarak hesaplanmıştır. Sonuç olarak, havadan lazer tarama ile elde edilen uzaktan algılama verilerine kullanılarak, iğne yapraklı ağaç türlerinden oluşan meşcerelerde örnek alan düzeyinde ağaç sayısı ve orta çap kestirilebilir.

Anahtar kelimeler: Havadan lazer tarama, Meşcere parametreleri, Meşcere yapısı, Orman envanteri

Estimation of forest stand parameters using airborne LIDAR data

Abstract: This study was carried out to examine the potential of LIDAR (Light Detection and Ranging) data in estimating some forest stand parameters. The stand parameters including Basal Area (BA), Number of Trees (N), Reineke's Density Index (RDI), and Mean Diameter at Breast Height (MDBH) were determined by field measurement at 30 sampling plots from the stands with different characteristics. The LIDAR metrics including the height percentiles (50th, 90th, 95th, and 99th) and the ratio of non-ground points (NGP) were calculated based on the LIDAR points that correspond to the sampling plots. Correlation analysis was conducted to investigate the relationships between the LIDAR metrics and stand parameters. There were no associations between the LIDAR metrics and the stand parameters, BA and RDI. On the other hand, statistically significant ($p < 0.01$) correlations were determined between the LIDAR metrics and the stand parameters, N and MDBH (highest correlation coefficients (r) are 0.70 and 0.72, respectively). The same analyses were also carried out for the sampling plots (19 plots) taken from the pure conifer or conifer-dominated stands. A clear increase was observed in the correlation coefficients of the relations between the LIDAR metrics and the stand parameters. The highest correlation coefficients calculated for the N and MDBH were 0.82 and 0.84, respectively. In addition, statistically significant but weak relationships were found between the NGP and the stand parameters, BA and RDI when the 19 conifer plots were used (r is 0.46 and 0.58, respectively). Therefore, it may be concluded that if stands parameters are estimated with LIDAR data in complex forest ecosystems, the forest stands should be pre-stratified by definite criteria. The regression models developed by means of stepwise procedure explained 0.82% and 0.70% of the variation in N and MDBH, respectively. As a result, the N and MDBH can be predicted at plot level in conifer-dominated forest stands using airborne laser scanning data.

Keywords: Airborne laser scanning, Forest stand parameters, Forest stand structure, Forest inventory

1. Giriş

LIDAR, lazer ışınlarını kullanarak, yeryüzündeki bir nesne ile taşıyıcı platform arasındaki mesafeyi ölçmeye ve buna göre cisimlerin yüksekliklerini hesaplamaya imkan veren aktif bir uzaktan algılama teknolojisidir. Ormancılık çalışmalarında kullanılan LIDAR sistemleri temel olarak, kesintili dönüşlü ve tam dalga biçimli olarak iki kategoriye ayrılmaktadır. Kesintili dönüşlü sistemde ilk ve son ya da 3-5 dönüş kaydedilirken, tam dalga biçimli sistemde, dönen

sinyalin belirli zaman aralıkları ile bütün bir profili çıkarılmaktadır. Kesintili dönüşlü veriler meşcere özelliklerinin kestirilmesinde yaygın olarak kullanılmakla birlikte, veri işleme bakımından daha karmaşık olan tam dalga biçimli sistemin meşcere yapısını değerlendirmede daha kullanışlı olduğu belirtilmektedir (Lefsky vd., 2002).

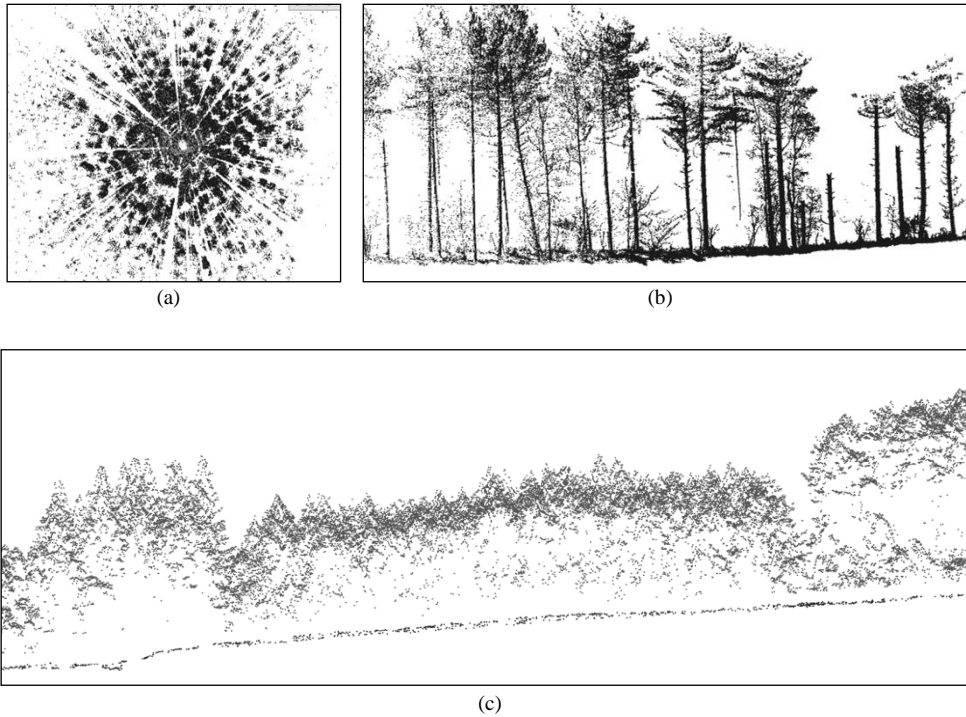
Lazer tarama sonucunda x, y koordinatlarına ve z yüksekliğine sahip çok sayıda noktadan oluşan bir veri seti elde edilmektedir. Bu verilerden zeminden yansıyanlar tespit edilerek "sayısal yükselti modeli (SYM)" ve en üst

değere sahip olanlar kullanılarak da “sayısal yüzey modeli (SSM)” üretilmektedir (Akay vd., 2009; Popescu, 2011). Bu iki verinin yükseklik değerleri arasındaki farktan da Meşcere Çatısı Yükseklik Modeli (MÇYM) elde edilmektedir. MÇYM’nin hassasiyeti nokta yoğunluğuna bağlı olarak değişmektedir. Eğer nokta yoğunluğu ağaç tepelerinin uç tomurcuğuna isabet edebilecek kadar yoğun değilse, bu durumda en yüksekteki lazer darbeleri bazen yan dallara ait olabilmektedir (Zimble vd., 2003). Bu durumda, MÇYM gerçek durumu yansıtmamakta ve ortalama meşcere boyunun yanlış olarak ölçülmesine yol açmaktadır.

Lazer tarama kullanılan platformun konumuna göre, Yerden Lazer Tarama, Havadan Lazer Tarama ve Uydudan Lazer Tarama olarak üç değişik şekilde sınıflandırılabilir. Yerden lazer tarama ile örnek alan düzeyinde, istenilen bir yükseklikten ağacın çapını ve ağaç boyunu ölçmek mümkün olabilmektedir (Şekil 1a,b) (Mathieu vd., 2011). Fakat ağaçların birbirini gölgelemesi, yani lazer platformu ile ölçülecek ağaç arasına başka bir ağacın girmesi durumunda bu ölçme mümkün olamamaktadır. Bunun yanında, ağaç tepeleri çoğu zaman alt dallar ve diğer ağaçlar tarafından gölgelenmekte ve ağacın tepesine lazer ışınlarının ulaşması engellenmektedir. Söz edilen bu sorunlar birden çok noktadan tarama yapmak suretiyle nispeten azaltılabilmektedir (Watt ve Donoghue, 2005). Yerden lazer tarama teknolojisi ardışık envanterle meşcere yapısındaki değişimlerin belirlenmesinde kullanışlı olabilir. Örneğin, ardışık bir envantere, artım sadece göğüs hizasından ölçülerek belirlenebilirken, lazer verileri kullanılarak gövdenin dalsız kısımlarının tamamı için belirlenebilir. Ayrıca, geleneksel yöntemlerle ölçümü zaman alıcı olan, tepelerin tabakalanma durumunu gösteren dikey

meşcere yapısı da yeterli doğrulukta ortaya koyulabilir (Parker vd., 2004).

Havadan lazer tarama ile elde edilen LIDAR verileri ise (Şekil 1c); meşcere boyunun ölçülmesi, hacim veya biokütle tahmin edilmesi, yaprak yüzey indeksi ve kapalılık derecesinin belirlenmesi, meşcerenin yapısal çeşitliliğinin kestirilmesi, meşcerenin çap veya boy dağılımlarının modellenmesi konularında küçük coğrafi alanlar için başarıyla kullanılabilir (Kwak vd., 2010; Jaskierniak vd., 2011; Akay vd., 2012; Özdemir ve Donoghue, 2013). Öte yandan, ormancılık çalışmalarında küçük aydınlanma (iz) alanına sahip LIDAR verilerinin kullanımı henüz bilimsel araştırma düzeyinde olup, uygulamada çok fazla yer bulamamaktadır. Bilimsel çalışmalarda en çok kullanılan havadan LIDAR teknolojisi (iz alanı 0,2 – 10 m arasında), meşcere boyunun ölçülmesinde tartışmasız çok iyi bir bilgi kaynağı olmasına rağmen, geniş orman alanlarını kapsayan pratik uygulamalar için halen aşırı pahalı ve veri işleme bakımından çok zaman alıcıdır (Carson vd., 2004; Zhao, 2009). LIDAR kullanılarak hesaplanan meşcere boyu özellikle tam kapalı iğne yapraklı ormanlarda, hacim ve biokütle ile yüksek korelasyon gösterdiğinden, bu meşcere özelliklerinin modellenmesinde başarıyla kullanılabilir (González-Ferreiro vd., 2012). Ancak tepe kapalılığının kırıldığı ve farklı ağaç türlerinden oluşan meşcerelerin bir arada bulunduğu daha karmaşık orman ekosistemlerinde meşcere boyu ile hacim ya da biokütle arasındaki ilişkiler zayıflamaktadır (Garcia vd., 2010). Bu yüzden LIDAR verilerinin değişik nitelikteki orman ekosistemlerinde de test edilmesine ihtiyaç bulunmaktadır.



Şekil 1. Çalışılan ormana ait bazı lazer tarama görüntüleri a) Yerden Lazer Tarama ile (Yatay 360°ve Dikey yönde 60°) elde edilen nokta bulutu, b) Yerden lazer tarama ile elde edilen nokta bulutunun enine kesitinden bir örnek, c) Havasal lazer tarama ile elde edilen nokta bulutunun enine kesitinden bir örnek ve farklı meşcerelerin görünümü

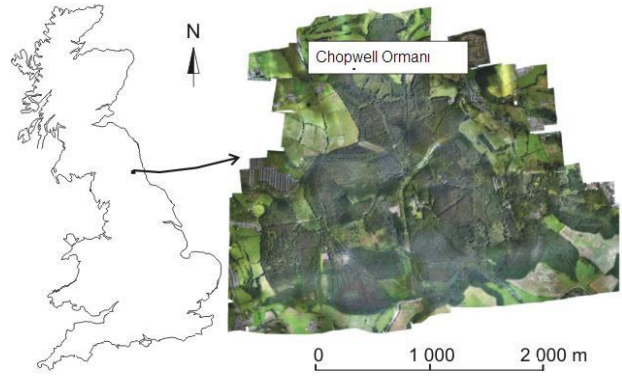
Diğer seçenek olan, uydudan LIDAR teknolojisi meşcere özelliklerinin belirlenmesinde, araziye kesintisiz biçimde kapsamadığından ve geniş iz alanından dolayı, günümüz itibariyle yetersiz kalmaktadır. Örneğin ICESat GLAS uydu laser algılayıcısının elips biçimindeki iz büyüklüğü dönemsel olarak yaklaşık 47 x 61 m veya 52 x 95 m olup, ayrıca profiller boyunca 172 m aralıklarla algılanmaktadır. Bu iz büyüklüklerinin, karmaşık orman ekosistemleri düşünüldüğünde, orman amenajman planlarının düzenlenmesinde yetersiz kalacağı anlaşılmaktadır. Diğer taraftan, orman ekosistemi ile ilgili yeterli bilginin olmadığı geniş coğrafi bölgeler için yapılacak envanterlerde, uydudan LIDAR teknolojisi kullanılarak kaba tahminler yapılabilir.

Yukarıda belirtildiği gibi, LIDAR verilerinin, farklı ağaç türlerinin saf ya da karışık bulunduğu, değişik yaş ve kapallılık derecelerine sahip meşcerelerin bir arada olduğu ormanlarda, meşcere özelliklerinin belirlenmesi amacıyla araştırılmasına gereksinim bulunmaktadır. Örneğin Garcia vd. (2010) yaptığı çalışmada üç baskın ağaç türü önce bir arada değerlendirilmiş ve LIDAR verileri ile biokütle arasındaki ilişkinin belirtme katsayısını (R^2) 0,58 olarak hesaplanmıştır. Ancak örnek alanlar üç baskın ağaç türüne (karaçam, ardıç ve meşe) göre gruplandırıldığında, R^2 değerleri ağaç türleri itibariyle 0,90 civarında bulunmuştur. Bu artış, bize orman yapısı karmaşıklaştıkça LIDAR verilerinden çıkarılan değişkenlerle meşcere özellikleri arasındaki ilişkilerin zayıfladığına işaret etmektedir. Dolayısıyla, LIDAR verilerinin daha karmaşık meşcerelerin bulunduğu bir orman alanında bu amaçla test edilmesine ihtiyaç bulunduğu düşünülmektedir. Sonuç olarak bu çalışma, İngiltere’de bulunan ve oldukça yüksek meşcere çeşitliliğine sahip bir ormanda, yüksek-yoğunluklu LIDAR verilerinden çıkarılan özellikleri kullanarak, Ağaç Sayısı, Reineke’nin Sıklık İndeksi, Orta Çap ve Göğüs Yüzeyini tahmin etmek amacıyla yapılmıştır.

2. Materyal ve yöntem

2.1. Çalışma alanı

LIDAR verileriyle meşcere özelliklerinin belirlenmesinde, ağaç türü, bunların karışım biçimleri, kapallılık, katlılık gibi özellikler yönünden yüksek çeşitliliğe sahip meşcerelerden oluşan ülkemiz orman ekosistemlerinin çok uygun test alanları olduğu açıktır. Ancak, yeni girişimler başlamış olmakla birlikte, henüz ormanlarımızla ilgili havadan LIDAR teknolojisiyle elde edilmiş veri bulunmamaktadır. Diğer taraftan, LIDAR teknolojisinin yoğun olarak kullanıldığı kuzey ülkelerinde de böyle karmaşık meşcereleri bir arada bulmak çoğu zaman imkânsızdır. İngiltere’de Newcastle şehrinin yakınında bulunan bir kent ormanında (Şekil 2), oldukça küçük bir alanda çok sayıda meşcere tipinin bulunması ve bu alana ait helikopterden algılanmış yüksek yoğunlukta (m^2 de ortalama 30 nokta) LIDAR verisinin hazır olması sebebiyle, bu orman çalışma alanı olarak seçilmiştir. Bu ormanda, 1940’lı yıllardan bu yana yapılan ağaçlandırmalar neticesinde çok farklı yaşta meşcereler oluşmuştur. Ayrıca, ağaçlandırmalarda farklı işne yapıları türlerini kullanılması sonucu, türlerin ışık isteklerine bağlı olarak farklı kapallılık derecesine sahip meşcereler ortaya çıkmıştır.



Şekil 2. Çalışma alanı

Bunun yanında yörenin kayın ve meşe gibi doğal türlerinin oluşturduğu yaşlı meşcereler de mevcuttur. Bunlara ilaveten uygulanan silvikültürel faaliyetler, meşcerelerin çeşitlenmesine katkı yapmıştır. Neticede çok küçük sayılabilecek bir alanda, çok farklı nitelikte meşcereler bir arada bulunmaktadır. Bu orman, LIDAR verilerinin meşcere özelliklerinin tahmin edilmesi amacıyla son derece uygun olduğundan, çalışma alanı olarak seçilmiştir.

2.2. LIDAR verileri

Lazer verileri bir helikoptere monte edilmiş Optech ALTM 3100EA lazer tarama sistemi ile elde edilmiştir. Bu veri Network Mapping Ltd şirketi tarafından 18-19 Temmuz 2009 tarihlerinde algılanmıştır. Verilerin ön işlemleri ilgili firma tarafından gerçekleştirilmiştir. Tarama esnasında uçuş yüksekliği yaklaşık 3,5 km olup, kullanılan dalga uzunluğu 1064 nm dir. Aydınlanma (iz) alanı tarama açısına bağlı olarak 30 ile 80 cm arasındadır. Bu sistem kesintili (ilk ve son dönüşlü) veri üreten bir sistemdir. Elde edilen veri setinin nokta yoğunluğu ilk ve son dönüşler dahil metrekarede ortalama 30 dur. Bu ormancılık çalışmaları açısından oldukça yüksek yoğunlukta bir LIDAR verisi olarak düşünülebilir. Gerçekte bu lazer verileri, adı geçen şirket tarafından enerji nakil hatları ve çevresinin planlanması amacıyla üretilmiştir. Dolayısıyla enerji nakil hattı kablolarının algılanabilmesi için böyle bir nokta yoğunluğu tercih edilmiştir. Çalışılan orman içindeki enerji hattı taranırken, uçuş genişletilerek tüm orman alanı algılanmıştır. Sonuç olarak, meşcere özelliklerini değerlendirilmesi açısından çok özel bir veri seti ortaya çıkmıştır.

2.3. Yersel ölçmeler

Çalışma sahasındaki değişik yapıdaki meşcereleri temsil edecek şekilde 30 örnek alan tespit edilmiştir. Bu amaçla çalışma sahasının 1/5000 ölçekli orto-fotoğrafi üzerinde farklı özellikteki meşcereler seçilmiş ve daha sonra bu aday meşcereler ziyaret edilerek örnek alanların merkezleri işaretlenmiştir. Örnek alanlarda, el GPS’i kullanılarak öncelikle koordinatlar kaydedilmiş ve yersel ölçmelerle hektardaki Ağaç Sayısı ($N ha^{-1}$) ve tüm ağaçların çapı ölçülerek de Göğüs Yüzeyi ($GY m^2 ha^{-1}$) belirlenmiştir. Örnek alanların büyüklüğü meşcere yapısına göre kararlaştırılmıştır. Düzenli müdahale görmüş, kapallığın

yüksek olduğu iğne yapraklı ağaç türlerinden oluşan meşcerelerden küçük, kapalılığın düşük olduğu ve yapısı karmaşık olan çok katlı meşcerelerden ise daha büyük örnek alan alınmıştır. Buna göre; 200, 400, 1250 m² büyüklüğünde örnek alanlarda ölçümler gerçekleştirilmiştir. Göğüs yüzeyi ve ağaç sayısı yanında, *Quadratik Orta Çap* (OÇ cm) ve *Reineke'nin Sıklık İndeksi* (RSI) de diğer bir meşcere parametreleri olarak değerlendirilmiştir. RSI quadratik orta çapa göre ağaç sayısını normalleştirmektedir. Hesaplama kullanılan formüller aşağıda verilmiştir.

$$D_q = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n dbh_i^2}{n}}$$

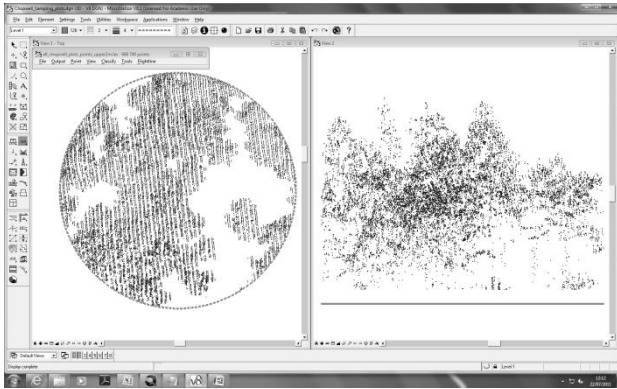
$$RSI = N * (D_q / 25)^{1,6}$$

Formülde N hektardaki ağaç sayısını, D_q quadratik orta çapı (cm), dbh 1,30'daki çapı göstermektedir.

2.4. LIDAR verilerinden özellik çıkarımı

Çalışılan alanın yüzölçümünün nispeten küçük (yaklaşık 360 ha) olmasına rağmen, veri setinin tamamını bilgisayarda aynı anda işlemek mümkün olmamıştır. Çünkü kullanılan LIDAR verisi, bilgisayarın kapasitesinin yetmeyeceği kadar çok yüksek nokta yoğunluğuna sahiptir. Bu yüzden veri seti parçalara ayrılıp değerlendirilmiştir. Bu işlemde sonra her yersel örnek alana karşılık gelen noktalar tespit edilmiştir (Şekil 3). İsbetli bir eşleştirme amacıyla, arazide referans özellikler tespit edilmiştir. Bunlar örnek alanın çevresindeki, arazide ve LIDAR görüntüsünde kolaylıkla görülebilen yol kesişim noktaları, izole ağaçlar, meşcerenin keskin köşeleridir. Bu referans noktalar ile örnek alan merkezi arasındaki açı ve mesafe ölçülmüştür. Böylece yersel örnek alan buna karşılık gelen lazer noktaları mümkün olduğu kadar yüksek bir hassasiyetle belirlenmiştir.

Giriş bölümünde değinildiği gibi, tam kapalı iğne yapraklı ormanlarda meşcere ortalama boyu ile hacim ya da biokütle arasında güçlü bir korelasyon bulunmaktadır. Ancak meşcere kapalılığı kırıldıkça bu ilişki zayıflamaktadır.



Şekil 3. Yersel örnek alanlara karşılık gelen LIDAR noktaları (beyaz kısımlar LIDAR noktalarının 6 m'nin altında kaldığı kısımlardır) ve bunların enine kesitinden bir görüntü

Bu durumda kapalılık ikinci bir etken olarak devreye girmektedir. Eğer kapalılıkla ilişkili bir LIDAR değişkeni belirlenebilir ve boyla birlikte kullanılırsa, yine göğüs yüzeyini az bir hatayla tahmin etmenin mümkün olabileceği öngörülmektedir. Bu amaçla çalışmada, LIDAR noktalarının ağaç topluluklarına ait organlardan dönen yani, zeminden dönmeyen kısımlarının oranı belirlenmiştir.

Lazer noktalarının sahip olduğu yükseklik değeri deniz seviyesinden yüksekliği temsil ettiğinden bunların zeminden yükseklik değerine dönüştürülmesi gerekmektedir. Bu amaçla her noktanın zeminden yüksekliği hesaplanmıştır. İlk olarak nokta bulutundaki çok düşük ve çok yüksek (örn; havadaki kuşlardan dönen) değere sahip hatalı noktalar çıkarılmıştır. Sonra zeminden dönen noktalar tespit edilmiştir. Zemine ait en düşük yükselti değerine sahip noktaların sınıflandırılması belirli kriterlere (İterasyon açısı 6 derece ve iterasyon mesafesi 1,4 m olarak alınmış ve en büyük bina boyutu 12 m) göre yapılmıştır. Zemine ait noktalar belirlendikten sonra üçgenleme yöntemi kullanılarak sayısal yüksekli modeli (SYM) elde edilmiştir. Daha sonra her lazer noktasının yükseklik değeri SYM'den çıkarılmak suretiyle noktaların zeminden yüksekliği hesaplanmıştır. Dolayısıyla noktalara ait yüksekli değeri (z) artık deniz seviyesinden yüksekliği değil, zeminden yüksekliği göstermektedir. Böylece elde edilen veri setinden Meşcere Çatısı Yükseklik Modeli (MÇYM) gibi farklı amaçlı raster görüntüler de üretilebilmektedir. Yapılan işlemler şekil 4'de gösterilmiştir.

Zemine uyarlanmış nokta bulutu üzerinden, zeminden yansımayan noktaların oranı ve noktaların yükseklik değerlerine dayanarak; dört yüzdeler dilim (P50, P90, P95 ve P99) hesaplanmıştır. Zemine ve alt tabakaya ait olmayan noktaların oranı belirlenirken arazide eğrelti, böğürtlen ve sarmaşık gibi diri örtü göz önünde bulundurulmuş ve 6 m'nin üstündeki noktalar esas alınmıştır. Yani 6 m'den daha yüksek değere sahip noktaların sayısı tespit edilmiş ve bunun toplam nokta sayısına oranlanmasıyla, zeminden ve diri örtüden yansımayan noktaların oranı (ZNO) bulunmuştur. Sonuç olarak çalışmada 5 LIDAR değişkeni incelenmiştir. LIDAR verilerinin işlenmesinde, çizim programı olan MicroStation altında çalışan TerraScan yazılımı kullanılmıştır.

2.5. İstatistiksel analiz

LIDAR verisinden çıkarılan özellikler ile dört meşcere parametresi arasındaki ilişkiler basit korelasyon analizi ile ortaya koyulmuştur. Bu amaçla öncelikle ilgili değişkenler arasında ilişkiler incelenmiş ve çoğunlukla doğrusal ya da buna yakın ilişkiler gözlemlendiğinden, Pearson'un korelasyon katsayısının uygun olduğuna karar verilmiştir. Sonra adımsal regresyon analizi kullanılarak, meşcere parametreleri için çoklu doğrusal modeller elde edilmiştir. Modeller için değişken seçiminde, varyans şişme faktörü sürekli denetlenmiş (VIF<5 olarak kabul edilmiştir) ve modellerin çoklu-bağılantıdan ileri gelen aşırı uyumu en aza indirilmeye çalışılmıştır. Elde edilen modellerin doğruluğu, çapraz doğrulama kullanılarak test edilmiştir. Gözlem sayısı düşük olduğundan, bir gözlemin dışarıda bırakıldığı çapraz doğrulama yöntemi uygulanmıştır. Bir gözlem dışarıda tutularak, kalan gözlemlerle model geliştirilmiş ve bu model kullanılarak dışarıda bırakılan gözlemin tahmin değeri hesaplanmıştır. Tüm gözlemler en az bir kere dışarıda tutulacak şekilde işleme devam edilmiş ve tüm gözlemlerin

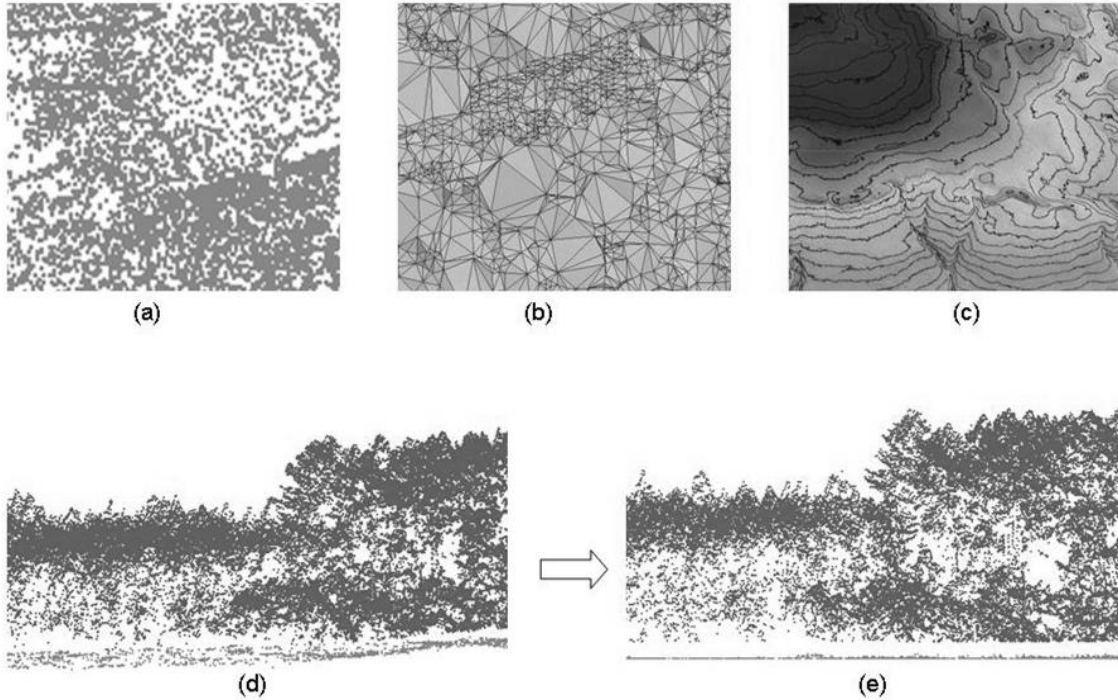
tahmin değerleri hesaplanmıştır. Sonra tahmin değerleri gerçek gözlem değerleri ile karşılaştırılarak çapraz doğrulanmış belirtme katsayısı (R^2_{cd}) ve ortalama hata karelerinin karekökü ($RMSE_{cd}$) hesaplanmıştır. Çapraz doğrulanmış değerler, tüm gözlemlerin kullanıldığı modele ait değerlerle karşılaştırılarak, modelin tutarlılığı ortaya koyulmuştur.

3. Bulgular

3.1. Tüm örnek alanlar için LIDAR değişkenleri ile meşcere parametreleri arasındaki ilişkiler

LIDAR verisinden çıkarılan özellikler ile meşcere parametreleri arasındaki ilişkilere ait korelasyon katsayıları Çizelge 1'de verilmiştir. İncelenen meşcere özelliklerinden *GY* ve *RSİ* ile LIDAR değişkenleri arasında istatistiksel

olarak anlamlı bir ilişki bulunmamıştır ($p < 0,05$). *N* ve *OÇ* ile Zemin dışındaki cisimlerden dönen noktaların oranı (*ZNO*) dışında incelenen LIDAR değişkenleri arasında güçlü ilişkilerin varlığı gözlemlenmiştir ($p < 0,01$). Hektardaki ağaç sayısı arttıkça LIDAR noktalarının boy değerlerinde (*P50*, *P90*, *P95*, *P99*) bir azalma söz konusudur. Bu tespit, çoğunlukla bir meşcerenin yaşı büyüdükçe ağaç sayısında bir azalma ve meşcere boyunda bir artış olmasıyla izah edilebilir. En yüksek korelasyon *N* ile 90'nci yüzdelerdeki boy değeri arasında bulunmaktadır. *OÇ* ile değişik yöntemlerle elde edilen boy değerleri arasında ise pozitif doğrusal ilişkiler bulunmaktadır. Bu durum meşcerenin orta çapı büyüdükçe meşcere boyunda da bir artış olmasıyla açıklanabilir. Yine ağaç sayısında olduğu gibi, 90'nci yüzdelerdeki boy değeri *OÇ* ile en yüksek ilişki gösteren LIDAR değişkeni olmuştur.



Şekil 4. a) Zemine ait noktaların belirlenmesi, b) üçgenleme tekniğinin uygulanması, c) sayısal yükselti modelinin elde edilmesi, d) Orijinal nokta bulutuna ait bir en kesit, e) sayısal yükselti modeline göre uyarlandıktan sonra elde edilen nokta bulutuna ait bir en kesit

Çizelge 1. LIDAR değişkenleri ile meşcere parametreleri arasındaki ilişkilere ait korelasyon katsayıları (n=30)

Meşcere Parametreleri	LIDAR Değişkenleri				
	50P	90P	95P	99P	ZNO (%)
Göğüs Yüzeyi (m ² /ha)	NS	NS	NS	NS	NS
Ağaç Sayısı (n/ha)	-0,641**	-0,707**	-0,671**	-0,642**	NS
Orta Çap (cm)	0,716**	0,720**	0,675**	0,643**	NS
Sıklık İndeksi	NS	NS	NS	NS	NS

** $p < 0,01$ ve * $p < 0,05$ 'i göstermektedir.

3.2. Tüm meşcereler için ağaç sayısı ve orta çapın tahmin edilmesi

Adımsal doğrusal regresyon analizi sonucunda N 'yi kestirmek için Çizelge 2'deki denklem elde edilmiştir. Bu modelin açıklama payı %50 ve standart hatası 376 adet/ha olarak hesaplanmıştır. $OÇ$ 'yi tahmin etmek için yapılan analiz sonucunda, regresyon modelinin açıklama payı %52 ve tahminin standart hatası 5,41 cm olarak hesaplanmıştır.

Hektardaki N ve $OÇ$ için elde edilen modeller, bu iki meşcere parametresindeki varyansın en azından %50'sinin LIDAR verisiyle açıklanabildiğini göstermektedir. Fakat bu modellerin güvenilirliğinin test edilmesi gerekmektedir. Yapılan doğrulama testi sonucunda N için çapraz doğrulanmış belirtme katsayısı (R^2_{cd}) 0,39 ve ortalama hata karelerinin karekökü ($RMSE_{cd}$) 401 olarak hesaplanmıştır. Görüldüğü gibi tüm gözlemlerin (30) kullanıldığı modelin R^2 ve $RMSE$ (sırasıyla 0,50 ve 363) değerleri ile çapraz doğrulanmış değerler arasında ciddi tutarsızlıklar bulunmuştur. Bu durum N için geliştirilen tahmin modelinin güvenilirliğinin düşük olduğuna işaret etmektedir. $OÇ$ için geliştirilmiş regresyon modelinin çapraz doğrulama testi sonucunda ise, R^2_{cd} 0,44 ve $RMSE_{cd}$ 5,63 cm olarak hesaplanmıştır. Önceki değerlerle (R^2 0,52 ve $RMSE$ 5,23 cm) çapraz doğrulanmış değerler karşılaştırıldığında, N 'ye kıyasla daha düşük bir tutarsızlık gözlemlenmiştir. Bu sonuçlara göre, geliştirilen modeller odun üretimine yönelik amenajman planı düzenlemek amacıyla yapılan envanterler için istenilen doğruluk düzeyini karşılamaktan uzaktır. Ancak bu hatalar, geniş alanlarda gerçekleştirilecek bölgesel ya da havza düzeyindeki stratejik planlar için ya da odun dışı hizmetlere tahsis edilen alanlarda yapılacak değerlendirmeler açısından, eğer elde başka bilgi kaynağı yoksa kabul edilebilir.

3.3. İğne yapraklı ağaç türlerinden oluşan meşcereler için LIDAR değişkenleri ile meşcere parametreleri arasındaki ilişkiler

Çalışma bulguları daha önce yapılan çalışma sonuçlarına kıyasla düşük bulunmuştur. Bu sebeple, grafikler üzerinde aykırı gözlemler incelenmiş ve bu örnek alanların büyük çoğunluğunun geniş yapraklı ağaç türlerine ait meşcerelerden alındığı anlaşılmıştır. Bu yüzden, geniş yapraklı ağaç türlerinin baskın olduğu tam kapalı

meşcerelerin karmaşık yapısının, LIDAR değişkenleri ile meşcere parametreleri arasındaki ilişkileri zayıflattığı düşünülmektedir, yukarıda yapılan analizlerin sadece iğne yapraklı ağaç türlerinin baskın olduğu örnek alanlar için tekrarlanmasına karar verilmiştir. Yapraklı ağaç türlerinin (genellikle kayın ve meşe) baskın olduğu meşcerelerden alınan örnek alanlar çıkarıldığında, geriye kalan 19 örnek alanda korelasyon ve regresyon analizleri yapılmıştır. Hesaplanan korelasyon katsayıları Çizelge 3'de verilmiştir.

Sadece iğne yapraklı ağaç türlerinin saf ya da baskın olduğu karışık meşcerelerinden alınan örnek alanlar kullanıldığında, beklendiği gibi LIDAR değişkenleri ile meşcere parametreleri arasındaki ilişkilerin kuvvetlendiği açık biçimde görülmektedir. Ayrıca, 30 örnek alan kullanıldığında aralarında istatistiksel olarak anlamlı bir ilişki bulunmazken, 19 örnek alan kullanıldığında, ZNO ile GY ($r=0,46$ ve $p<0,05$), N ($r=0,53$ ve $p<0,05$) ve RSI ($r=0,58$ ve $p<0,01$) arasında önemli ilişkiler tespit edilmiştir. Bu durum, LIDAR verilerinin iğne yapraklı meşcereler için daha kullanışlı bir bilgi kaynağı olduğunu göstermektedir.

3.4. İğne yapraklı ağaç türlerinden oluşan meşcereler için ağaç sayısı ve orta çapın tahmin edilmesi

Adımsal regresyon analizi sonucunda meşcere parametreleri için geliştirilen doğrusal regresyon modelleri Çizelge 4'de verilmiştir. Sadece ağaç sayısını tahmin etmek amacıyla geliştirilen modelde iki LIDAR değişkeni; diğerlerinde tek LIDAR değişkeni kullanılmıştır. GY ve RSI 'yi kestirmek için elde edilen modeller, ilgili bu parametrelerdeki varyansın küçük bir kısmını açıklayabilmiştir (%21 ve %34). Dolayısıyla, bunların pratik orman envanterinde kullanımı hatalı tahminlere yol açabilir. Bu yüzden bu iki modelin çapraz doğrulama testi yapılmamıştır. Öte yandan $OÇ$ ve N için elde edilen regresyon modellerinin, bu meşcere parametrelerindeki varyansın önemli miktarını açıklayabildikleri görülmektedir. Bu modellerin orman amenajman planlarının yapımında ihtiyaç duyulan bazı bilgileri karşılayabileceği düşünülmektedir. Örneğin, iğne yapraklı ağaç türlerinin baskın olduğu toprak koruma ve su koruma işletme sınıflarında, yapılacak silvikültürel müdahalelerinin kararlaştırılmasında ve müdahalelerin etkilerinin izlenmesinde LIDAR verilerinin önemli potansiyeli bulunmaktadır.

Çizelge 2. Ağaç sayısı ve orta çap için geliştirilen regresyon modelleri (n=30)

Meşcere Parametresi	Denklem	Değişkenler	R^2	RMSE	F	p
Ağaç Sayısı	$N = 2624,87 - (94,75.X)$	X: P90	0,50	363 adet/ha	28,02	<0,01
Orta Çap	$OÇ = 0,811 - (1,413.X)$	X: P90	0,52	5,23 cm	30,11	<0,01

Çizelge 3. İğne yapraklı ağaç türlerinden oluşan meşcerelerde LIDAR değişkenleri ile meşcere parametreleri arasındaki ilişkilere ait korelasyon katsayıları (n=19)

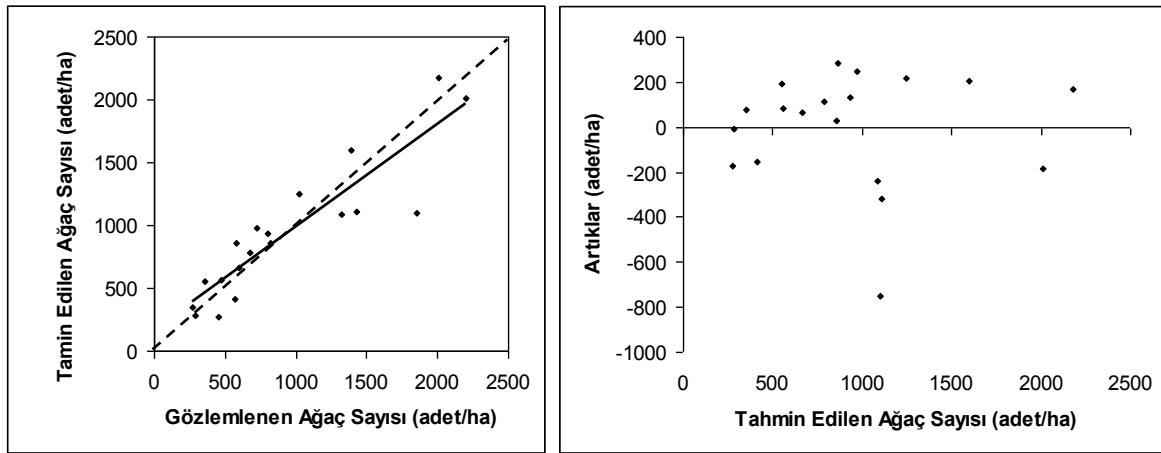
Meşcere Parametreleri	LIDAR Değişkenleri				
	50P	90P	95P	99P	ZNO (%)
Göğüs Yüzeyi (m^2/ha)	NS	NS	NS	NS	0,458*
Ağaç Sayısı (n/ha)	-0,727**	-0,815**	-0,813**	-0,799**	0,534*
Orta Çap (cm)	0,817**	0,835**	0,824**	0,801**	NS
Sıklık İndeksi	NS	NS	NS	NS	0,580**

** $p<0,01$ ve * $p<0,05$ 'i göstermektedir.

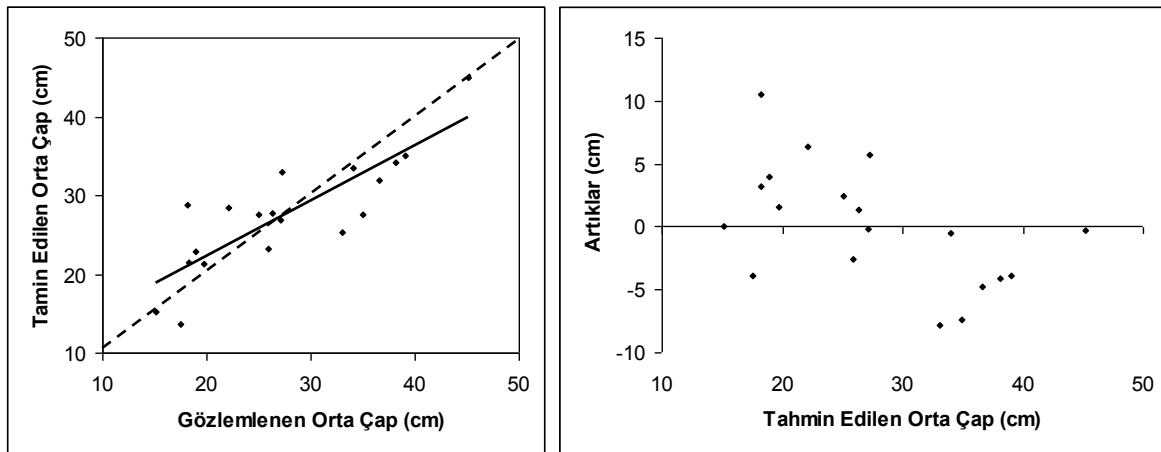
$OÇ$ ve N 'yi kestirmek amacıyla geliştirilen regresyon modellerinin çapraz doğrulama testleri yapılarak R^2_{cd} ve $RMSE_{cd}$ değerleri hesaplanmıştır. N için R^2_{cd} ve $RMSE_{cd}$ sırasıyla, 0,77 ve 279 adet/ha'dır. $OÇ$ için ise R^2_{cd} 0,65 ve $RMSE_{cd}$ ise 5,04 cm olarak hesaplanmıştır. Bu değerler tüm gözlemler kullanılarak elde edilen R^2_{cd} ve $RMSE_{cd}$ değerleriyle karşılaştırıldığında modellerin oldukça tutarlı olduğu söylenebilir. Sonuç olarak iğne yapraklı saf veya iğne yapraklı ağaç türlerinin baskın olduğu meşcerelerde, LIDAR verileri kullanılarak N ve $OÇ$ güvenilir olarak tahmin edilebilir. Bu iki meşcere parametresine ait gözlem ve kestirim değerleri arasındaki ilişkiyi ve artıkları gösteren grafikler şekil 5'de gösterilmiştir.

Çizelge 4. İğne yapraklı ağaç türlerinden oluşan meşcerelerde, Göğüs Yüzeyi, Ağaç Sayısı, Orta Çap ve Sıklık İndeksi için geliştirilen regresyon modelleri

Meşcere Parametresi	Denklemler	LIDAR Değ.	R^2	RMSE	F	p
Göğüs Yüzeyi	$GY = 9,462 + 49413.X$	X: ZNO	0,21	11,21	4,5	<0,05
Ağaç Sayısı	$N = 1528,16 - (104,851.X) + (1978,976.Y)$	X:90P, Y:ZNO	0,82	241 adet/ha	35,9	<0,01
Orta Çap	$OÇ = -4,765 + 1,731.X$	X: 90P	0,70	4,67 cm	39,3	<0,01
Sıklık İndeksi	$RSI = 41,9 + 1199,5.X$	X: ZNO	0,34	196,87	8,61	<0,01



Şekil 5. a) Gözlemlenen ve LIDAR verilerinden tahmin edilen Ağaç Sayısı arasındaki ilişki (kesik çizgi 1:1 çizgisini, kesiksiz çizgi ise en iyi uyum çizgisini göstermektedir), b) Tahmin değerleri boyunca artıkların dağılışı



Şekil 6. a) Gözlemlenen ve LIDAR verilerinden tahmin edilen Orta Çap arasındaki ilişki (kesik çizgi 1:1 çizgisini, kesiksiz çizgi ise en iyi uyum çizgisini göstermektedir), b) Tahmin değerleri boyunca artıkların dağılışı

OÇ'nin kestirim ve gözlem değerleri arasındaki ilişkiye ait grafikte (şekil 6) noktaların 45° çizgisiyle uyumsuz olduğu görülmektedir. Bu durum artıkların kestirim değerleri boyunca dağılımında da kendisini göstermektedir. Model tarafından, küçük *OÇ* değerleri gerçeğinden büyük, tersine büyük *OÇ* değerleri ise olduğundan küçük tahmin edilmektedir. Sonuç olarak yapılacak kestirimlerin ve buna bağlı üretilecek haritaların doğruluk düzeyinin düşük olacağı anlaşılmaktadır.

4. Tartışma ve sonuç

Bu çalışma, havadan lazer tarama teknolojisiyle elde edilen verilerden çıkarılan özellikler kullanılarak, bazı meşcere parametrelerinin kestirilmesi amacıyla gerçekleştirilmiştir. İncelenen meşcere parametrelerinden *N* ve *OÇ* daki varyansın yaklaşık %50'si doğrusal regresyon modelleriyle açıklanabilmektedir. *GY* ve *RSİ* ile LIDAR değişkenleri arasında ise istatistiksel olarak anlamlı bir ilişki belirlenmemiştir. Bu bulgular daha önceki yapılmış çalışmalarda elde edilen sonuçlara göre genellikle daha düşük düzeydedir. Örneğin González-Ferreiro vd. (2012) sahilçanı plantasyonlarında yaptıkları çalışmada, benzer LIDAR değişkenlerini kullanarak *GY*'yi modellemişlerdir ($R^2=0,69$ ve $RMSE 7,9 m^2/ha$). Yine iğne yapraklı ağaç türlerinin baskın olduğu meşcerelerde yapılan diğer bir çalışmada LIDAR verileri ile *GY* arasında yüksek ilişkiler tespit edilmiştir ($R^2=0,79$ ve $RMSE 4,2 m^2/ha$). Çalışılan orman bakımından oldukça benzer sayılabilecek Almanya'da Baviera tabiat parkı ormanında yapılan diğer bir çalışmada (Heurich ve Thoma, 2008), LIDAR indeksleri açıklayıcı değişken ve *GY* bağlı değişken olarak kabul edilerek yapılan çoklu regresyon analizi sonucunda elde edilen model, bu meşcere parametresindeki varyansın %43'ünü açıklayabilmektedir. Aynı çalışmada, göğüs yüzeyi orta ağacının çapı için belirtme katsayısı 0,86; *RSİ* için 0,40; *N* için ise 0,69 olarak hesaplanmıştır. Diğer taraftan, *N* için bulunan sonuç Gonçalves-Seco vd., (2011) tarafından okaliptus meşcerelerinde yapılan çalışmanın bulgularıyla uyum içindedir ($R^2=0,49$ ve $RMSE 667 ha^{-1}$). Çalışma bulgularının yapılmış olan diğer çoğu araştırma sonuçlarından daha başarısız olmasının sebebi, çalışılan orman yapısının diğerlerinden çok daha karmaşık olmasıyla izah edilebilir. Meşcere parametreleri daha sağlıklı olarak modellenmek istenirse mutlaka ön bir gruplandırma yapmanın ihtiyaç olduğunu göstermektedir. LIDAR verilerine dayalı olarak meşcere yapısının belirlenmesine yönelik birçok çalışmada da ön-katmanlama yapıldığı görülmektedir (Gobakken ve Næsset, 2004; Gobakken ve Næsset, 2005; Thomas vd., 2008).

Bu bilgiye dayanarak, çalışmada iğne yapraklı ağaç türlerinin saf ya da baskın olduğu örnek alanlar ayrılarak (19 örnek alan) yapılan değerlendirmelerin sonucunda, modellerin belirtme katsayılarında belirgin artışlar gözlemlenmiştir. Tüm örnek alanlar dikkate alındığında *GY* ve *RSİ* ile LIDAR göstergeleri arasında bir ilişki yokken, sadece iğne yapraklı meşcerelere ait örnek alanlar için zayıf da olsa istatistiksel olarak önemli bir ilişki tespit edilmiştir (sırasıyla, $R^2=0,21$ $p<0,05$ ve $R^2=0,34$ $p<0,01$). Aynı şekilde, hektardaki *N* ve *OÇ* için hesaplanan belirtme katsayılarında, sırasıyla 0,32 ve 0,18'lik bir artış gerçekleşmiştir. Heurich ve Thoma (2008) çalışmasında da ön-katmanlama sonucu ayrılan iğne yapraklı türlere ait

örnek alanlara dayanarak geliştirilen modellerin belirtme katsayılarında benzer artışlar gözlemlenmiştir. Bu artış *GY* için 0,13; *N* için 0,10; *RSİ* için 0,42 olarak hesaplanmıştır. Fakat *OÇ* için 0,09'luk bir azalma tespit edilmiştir. Sonuç olarak, sunulan bu araştırmanın bulguları ve ilgili literatür ışığında, LIDAR verileri ile meşcere özelliklerini kestirmek amacıyla yapılacak çalışmalarda mümkünse ön bir gruplandırma yapılması önerilebilir.

LIDAR henüz ülkemiz orman ekosistemleri için henüz test edilmemiş bir uzaktan algılama teknolojisidir. Ülkemiz ormanlarının meşcere yapısı oldukça karmaşıktır. Bu yüzden LIDAR verileriyle meşcere parametreleri tahmin edilirken, ülkemizin tüm orman alanlarında aynı doğruluk düzeyine ulaşılacağı beklenmemelidir. Özellikle gölgeye dayanıklı ağaç türlerinin saf ve karışık meşcerelerinde, lazer darbeleri ara ve alt tabakaya sızamayacağından genellikle dönüşler üst meşcere çatısından olmaktadır (Harding vd., 2001; Hofton vd., 2002). Bu durum birçok meşcere parametresinin kestirilmesinde hatalara yol açabilir. Bunun yanında, meşcere parametreleri kestirilirken kapalılığı az olan meşcerelerde yine çeşitli sorunlarla karşılaşılabilir. Dolayısıyla sadece, orman yapısı nispeten basit olan Kuzey ülkelerinde elde edilen başarılı sonuçlara bakılarak LIDAR teknolojisi değerlendirilmemelidir. Ülkemizin karmaşık ekosistemlerini temsil edecek kapsamlı çalışmalar tamamlanmaya kadar temkinli davranılmalıdır. Diğer taraftan, ticari değeri yüksek iğne yapraklı ağaç türlerimizin oluşturduğu ormanlarda, havadan lazer tarama verilerinin meşcere parametrelerinin kestirilmesi amacıyla başarıyla kullanılacağı öngörülmektedir. Tabii ki buradaki en büyük sorun maliyettir. Havadan lazer tarama şu an itibarıyla pratik orman envanteri için çok pahalıdır. Öte yandan, hızlı teknolojik gelişmeler gelecek yıllarda LIDAR teknolojinin daha erişebilir ve ucuz olacağı konusunda ümit vericidir. Özellikle uzaydan LIDAR teknolojisi geniş alanlar için kesintisiz ve iz alanı küçük veri sağlarsa, amenajman planı düzenlemek amacıyla yapılan orman envanteri çalışmalarına büyük katkılar sağlayabilir.

Teşekkür

Bu çalışma kısmen TÜBİTAK BİDEB 2219 (Doktora sonrası çalışma) programı ve kısmen de İngiltere'nin Doğa Çevre Araştırma Kurumu (NERC) tarafından desteklenmiştir. LIDAR verilerinin işlenmesi ve arazi çalışmalarında büyük desteğini gördüğün Prof. Dr. Daniel Donoghue'a ve örnek alanların ölçümünde yardımlarını esirgemeyen Sayın Cemil Mahmud, Niko Galiatsatos, Jitendra Thakur ve Abdul Khan'a sonsuz teşekkür ederim.

Kaynaklar

- Akay, A.E., Oguz, H., Karas, I.R., Aruga, K., 2009. Using LIDAR technology in forestry activities. *Environmental Monitoring and Assessment*, 151:1-4, 117-125.
- Akay, A.E., Wing, M.G., Sessions, J., 2012. Estimating structural properties of riparian forests with airborne lidar data, *International Journal of Remote Sensing*, 33:22, 7010-7023.
- Carson, W., Andersen, H.E., Reutebuch, S.E., McGaughey, R.J. 2004. LIDAR applications in forestry: An overview. *Proceedings of the Annual ASPRS Conference*, Denver, May 23-28, 2004. American Society of Photogrammetry and Remote Sensing, Bethesda, MD.
- García, M., Riaño, D., Chuvieco, E., Danson, F.M., 2010. Estimating biomass carbon stocks for a Mediterranean forest in central Spain using LIDAR height and intensity data. *Remote Sensing of Environment*, 114:4, 816-830.

- Gobakken, T., Næsset, E., 2004. Estimation of diameter and basal area distributions in coniferous forest by means of airborne laser scanner data. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 19, 529-542.
- Gobakken, T., Næsset, E., 2005. Weibull and percentile models for LIDAR-based estimation of basal area distribution. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 20:6, 490-502.
- Goncalves-Seco, L., Gonzalez-Ferreiro, E., Dieguez-Aranda, U., Fraga-Bugallo, B., Crecente, R., Miranda, D., 2011. Assessing the attributes of high-density *Eucalyptus globulus* stands using airborne laser scanner data. *International Journal of Remote Sensing*, 32:24, 9821-9841.
- González-Ferreiro, E., Diéguez-Aranda, U., Miranda, D., 2012. Estimation of stand variables in *Pinus radiata* D. Don plantations using different LIDAR pulse densities. *Forestry*, 85:2, 281-292.
- Harding, D.J., Lefsky, M.A., Parker G.G., Blair, J.B., 2001. Laser altimeter canopy height profiles: methods and validation for closed-canopy, broadleaf forest. *Remote Sensing of Environment*, 76, 283-297.
- Heurich M., Thoma, F., 2008. Estimation of forestry stand parameters using laser scanning data in temperate, structurally rich natural European beech (*Fagus sylvatica*) and Norway spruce (*Picea abies*) forests. *Forestry*, 81, 645-661.
- Hofton, M.A., Rocchio, L.E., Blair J.B., Dubayah, R., 2002. Validation of vegetation canopy LIDAR sub-canopy topography measurements for a dense tropical forest. *Journal of Geodynamics*, 34:3-4, 491-502.
- Jaskierniak, D., Lane, P.N.J., Robinson, A., Lucieer, A., 2011. Extracting LIDAR indices to characterise multilayered forest structure using mixture distribution functions, *Remote Sensing of Environment* 115, 573-585.
- Kwak, D.A., Lee, W.K., Cho, H.K., Lee, S.H., Son, Y., Kafatos, M., Kim, S.R., 2010. Estimating stem volume and biomass of *Pinus koraiensis* using LIDAR data. *Journal of Plant Research*, 123:4, 421-432.
- Lefsky, M.A., Cohen, W.B., Parker, G.G., Harding, D.J., 2002. Lidar remote sensing for ecosystem studies, *BioScience*, 52, 19-30.
- Mathieu, D., Thiery, C., Meriem, F., 2011. The use of terrestrial LIDAR technology in forest science: application fields, benefits and challenges, *Annals of Forest Science*, 68, 959-974.
- Özdemir, İ., Donoghue, D.N.M., 2013. Modelling tree size diversity from Airborn Laser Scanning using Canopy Height Models with image texture measures. *Forest Ecology and Management*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2012.12.044>
- Parker, G.G., Harding, D.J., Berger, M.L., 2004. A portable LIDAR system for rapid determination of forest canopy structure, *Journal of Applied Ecology*, 41:4, 755-767.
- Popescu, S.C., 2011. Lidar Remote Sensing, *Advances in Environmental Remote Sensing, Sensors, Algorithms, and Applications*, Ed: Qihao Weng, CEC Pres, Taylor-Francis series in Remote Sensing Applications, UK, 589 s.
- Thomas, V., Oliver, R.D., Lim, K., Woods, M., 2008. LIDAR and Weibull modeling of diameter and basal area, *The Forestry Chronicle*, 84, 866-875.
- Watt, P.J., Donoghue, D.N.M., 2005. Measuring forest structure with terrestrial laser scanning, *International Journal of Remote Sensing*, 26, 1437-1446.
- Zhao, K., Popescu, S., Nelson, R., 2009. Lidar remote sensing of forest biomass: A scale-invariant estimation approach using airborne lasers, *Remote Sensing of Environment*, 113, 182-196.
- Zimble, D.A., Evans, D.L., Carlson, G.C., Parker, R.C., Grado, S.C., Gerard, P.D., 2003. Characterizing vertical forest structure using small-footprint airborne LIDAR, *Remote Sensing of Environment*, 87, 171-182.