

О ДАЉИНСКОЈ ДЕТЕКЦИЈИ У САВРЕМЕНОЈ ИНВЕНТУРИ ШУМА*

МИЛОШ КОПРИВИЦА¹
ЂОРЂЕ ЈОВИЋ¹

Извод: У овом раду су информативно описани најзначајнији методи даљинске детекције који се користе у савременој инвентури шума. С обзиром на то да су до сада најзначајнији резултати у примени даљинске детекције постигнути у картирању, класификацији и мониторингу шума и шумских земљишта, овде је тежиште било на упознавању могућности и ефикасности техника утврђивања величине таксационих елемената стабла и састојине. Реч је о мерењу и обради дендрометријских величина на дигитализованим аероснимцима и сателитским снимцима високе резолуције, као и о примени ласерског скенирања из ваздуха. Свакако, кључно питање је везано за тачност процене запремине, биомасе и запреминског прираста. На основу проучавања релевантне литературе и познавања стања шума, закључено је да се модерни методи даљинске детекције (ласерско скенирање из ваздуха са двофазним узорком) у нашим шумама могу применити само селективно.

Кључне речи: инвентура шума, даљинска детекција, аероснимак, сателитски снимак, ласерско скенирање, дигитализација, двофазни узорак.

ON REMOTE SENSING IN MODERN FOREST INVENTORY

Abstract: As an information, this paper describes the most significant methods of remote sensing used in modern forest inventories. As the most significant results in the application of remote sensing methods to date have been achieved in mapping, classification, and monitoring of forests and forest lands, the focus is on the study of the potentials and efficiency of the techniques in the assessment of the sizes of taxation elements of trees and stands. It deals with the measurement and processing of dendrometric values on the digitalised aerial photographs and satellite images of high resolution, as well as with the application of airborne laser scanning. By all means, the key question is related to the accurate estimation of volume, biomass, and volume increment. Based on the study of relevant literature and the study of forest state, it is concluded that modern methods of remote sensing (airborne laser scanning with two-phase sampling) in our forests can be applied only selectively.

Key words: forest inventory, remote sensing, aerial photograph, satellite image, laser scanning, digitalisation, two-phase sampling.

1. УВОД

Савремену инвентуру шума карактеришу: модеран статистички репрезентативни метод, типолошка класификација шума и шумских земљишта, географски информациони систем, даљинска детекција и модерни инструменти. У свим сег-

¹ др Милош Копривица; мр Ђорђе Јовић; Институт за шумарство, Београд

* Истраживање је финансирано Министарство науке Републике Србије у оквиру пројекта ТР 20056: „Сателитски снимци високе резолуције у прикупљању и обради просторних података о шумама и шумским екосистемима”.

ментима остварен је велики напредак. Размотрићемо могућности примене даљинске детекције у савременој инвентури шума, првенствено у прикупљању дендрометријских података, њиховој обради и поузданости за планирање газдовања шумама.

О стварним донетима примене даљинске детекције у савременој инвентури шума и уопште у шумарству, код нас се још увек мало зна. Најчешће, реч је о изради тематских карата у дигиталном облику (Ј а н и ћ , М., 1994) и о примени географског информационог система (Н е в е н и ћ , Р., 2001). Такође, за инвентуру приватних шума у Србији недавно је дат један концепт заснован на примени даљинске детекције (Р а т к н и ћ , М. *et al.*, 2008). Као последица тога, јављају се и дијаметрално различита мишљења о могућности примене даљинске детекције у нашим шумама.

Одмах после Другог светског рата аерофотографије су коришћене у многим областима, а нарочито у истраживању природних ресурса. У шумарству се тада ове фотографије све више примењују за оријентацију на терену, просторну поделу шума и уопште за рационализацију процеса картирања. Касније, напредак технологије у фотографији проширио је подручје њене примене. У последње време, развој нефотографских сензора, примена дигиталне фотограметрије и широко коришћење географских информационих система, проширило је поље даљинске детекције и њено масовно коришћење за картирање и класификацију шума. Последњих година сателитски снимци су успешно интегрисани са инвентуром великих површина шума, најчешће у комбинацији са дуплим узорцима (*double sampling*). Међутим, технички напредак у прикупљању дендрометријских података, ради утврђивања параметара шума, био је мање успешан.

Ипак, снимци из ваздуха коришћени су рутински за инвентуру великих површина шума у Северној Америци и Скандинавији. У многим другим земљама прикупљање података коришћењем аероснимака у инвентури шума било је предмет контраверзних мишљења. Наиме, утврђено је и општеприхваћено да подаци аероснимака у природним шумама централне Европе имају одређена ограничења. Међутим, најновија истраживања у овом погледу на подручју Немачке су охрабрујућа (Н е у р и с и ч , М., Т х о м а , Е., 2008).

У шумама са умереним интензитетом газдовања аероснимци, у комбинацији са мерењима на терену, корисни су првенствено за процену бонитета станишта, склопа, обраста и запремине састојине. Поред тога, могу се добити и многе друге корисне информације, као нпр. о интензитету сушења и стресу шума.

Сателитски снимци се све више користе за картирање, класификацију и мониторинг шума, а незамењиви су за такве операције у великим шумским комплексима удаљених и неприступачних региона. Истовремено, развијени су рачунари и софтвери који омогућавају сређивање и анализу великог броја дигиталних информација из сателитских снимака стално растуће резолуције (Л а а р , V.A., А к с а , А., 2007).

За потпуније информисање о садашњим донетима даљинске детекције у савременој инвентури шума препоручујемо посебна поглавља посвећена овом проблему у најновијим уџбеницима из Инвентуре шума и Дендрометрије: К а н г а с , А., М а л т а м о , М. (2006): „Forest Inventory - Methodology and Applications” (Погла-

вље 21 - „Модерно добијање података у инвентури шума”), и L a r , V.A., A k s a , A. (2007): „Forest Mensuration” (Поглавље 11 - „Даљинска детекција у премоу шума”).

После проучавања наведених поглавља и више радова објављених у последње време о методима и резултатима примене даљинске детекције у различитим типовима шума, закључили смо да би било корисно пружити потпунију информацију нашим шумарским стручњацима о овоме. Тим пре, што разумевање ове материје није једноставно и што ће убрзо и у нашој земљи бити примењени модернији и ефикаснији методи прикупљања, обраде и организовања података о шумским ресурсима.

У прилог наведеној тврдњи наводимо следеће: „Детаљно, благовремено информисање о шумама, потребно је у класичном газдовању шумама, шумској сертификацији и оцени шумског биодиверзитета и повећана потреба за информацијама комбинована са жељом за смањењем трошкова, створила је потребу за повећањем ефикасности у добијању података. Технологије за добијање просторних података о шумским ресурсима убрзано су се развијале последњих година. Рад на терену унапређен је системима за глобално сателитско позиционирање, уређајима за аутоматско мерење, преносним рачунарима, бежичним слањем података и модерном даљинском детекцијом, што омогућава јевтине просторне податке тачније него икада раније“ (K a n g a s , A., M a l t a m o , M., 2006; слободан превод, стр.343).

Задатак и циљ овог рада није само описивање технике различитих метода даљинске детекције у савременој инвентури шума, већ првенствено пружање потпунијих стручних информација о њиховим дометима, с аспекта могућности примене, економичности и поузданости података, односно, изведених процена најзначајнијих таксационих елемената стабла и састојине. Свакако, крајњи циљ је оцена могућности примене даљинске детекције за инвентуру шума у Србији.

2. ТЕХНИКЕ ДАЉИНСКЕ ДЕТЕКЦИЈЕ

Према K a n g a s , A., M a l t a m o , M. (2006), за најзначајније технике даљинске детекције карактеристично је следеће:

Дигитални аероснимци - Традиционално, (авио)аероснимци били су најчешћи извор даљински детектованих слика које су коришћене у инвентури шума. Као резултат технолошког напретка тумачење аероснимака еволуирало је до дигиталних апликација. Аероснимак се може дигитализовати скенирањем или се фотографије могу директно узети дигиталним фотоапаратима. Резултат таквог побољшања је ортофото снимак који је просторно тачан скоро као обична мапа. Дигиталне ортофотографије тренутно се највише користе као подлоге за картирање у шумарству и за апликације географског информационог система.

Спектрометарски снимци - Спектрометар је уређај који омогућава снимање екстремно уских пруга у оквиру широког опсега таласних дужина. Таласне дужине могу бити снимљене са највише триста појасева, а мерења могу бити спроведена са земље или из ваздуха. Предност спектралног снимања над осталим техникама даљинске де-

текције је у богатству опсега таласних дужина и могућности бирања уског опсега таласних дужина.

Сателитски снимци високе резолуције - Од 1975. године, када је први пут тестирана употреба сателитских снимака у инвентури шума, до данас, технологија је значајно унапређена. Најзначајнији напредак у модерној сателитској детекцији је унапређење просторне резолуције. Први комерцијални сателит IKONOS који је имао резолуцију мању од 1 m лансиран је 1999. године. Појединачни снимак овог сателита покривао је површину земље 11 са 11 km. Амерички сателит QuickBird 2 који је лансиран 2001. године имао је још већу резолуцију (0,61 m). Модерни сателитски снимци високе резолуције су добра алтернатива аероснимцима и могу се користити за картирање подручја која су до сада картирана на основу аероснимака. Сателитски снимци високе резолуције могу се успешно користити у инвентури шума и планирању газдовања шумама, али високе цене оваквих снимака до сада су то спречавале.

Микроталасни радар - Снимање радаром је технологија даљинске детекције којом се мери радијација самог уређаја. Радар емитује периодичне микроталасне импулсе одређене фреквенције а пријемник мери повратну радијацију која се рефлектује са различитих објеката на земљи. Главна предност радарских снимака је у томе што снимци могу бити прикупљени у сваком тренутку и у свим временским условима. Тачност радарских снимака је довољна при картирању у шумарству до нивоа састојине или одељења.

Снимање профила - Снимање профила усмерено је на стварање висинских профила објеката снимањем одређеног подручја у паралелним путањама лета. Пошто је висина лета само 100 - 200 m, појединачна путања лета покрива релативно узак појас терена. Профил терена (3D) може се постићи комбиновањем више снимака путања лета. Главни проблем је настао због мале ширине снимка при земљи, па је то резултирало високом густином путања лета, што је довело до врло високе цене снимања.

Ласерско скенирање - Ласерско скенирање обезбеђује материјал за даљинску детекцију који је бољи од снимања профила објеката на земљи. Ова техника обезбеђује снимање до нивоа појединачних стабала у шуми. Ласерски скенер емитује инфрацрвени ласерски импулс и сваки низ ликова састоји се од тродимензионалног скупа тачака који представља суседне елементе на земљи. Главна предност ове технологије, у односу на оптичку даљинску детекцију, је у томе што се физичке димензије објекта који се снима могу директно мерити. Ова технологија даљинске детекције је показала најбоље резултате при утврђивању таксационих елемената за стабло, пробну површину, састојину и сл. Најпознатија је LIDAR технологија, која обезбеђује детаљне информације о структури вегетације, терену и о објектима на површини земље. О овој технологији, с аспекта могућности примене у шумарству и геологији, сажето излажу L a e s, D. *et al.* (2006).

3. ПРИМЕНА ДАЉИНСКЕ ДЕТЕКЦИЈЕ У ИНВЕНТУРИ ШУМА

3.1. Избор метода даљинске детекције

У савременој инвентури шума користе се различите технике даљинске детекције. Увек се поставља питање тачности утврђених података и потребних трошкова. Циљ је да се смање теренски трошкови класичног метода инвентуре шума, а да

се обезбеде подаци довољне тачности за планирање газдовања шумама. Трошкови даљинске детекције везани су за снимање, обраду и интерпретацију детектованих снимака. При извођењу инвентуре шума треба оценити да ли је примена даљинске детекције корисна или није. Ако се утврди да јесте, треба изабрати технику даљинске детекције. Кључно је питање тада да ли треба користити аероснимке или сателитске снимке, односно технику ласерског скенирања из ваздуха.

При одлучивању о примени метода даљинске детекције, главни фактори су: величина инвентарисаног подручја (држава, регион, шумко подручје и сл.), сврха инвентуре (картирање, класификација, мониторинг, премер и сл.), жељени ниво тачности података за различите инвентурне јединице (шумско подручје, газдинска јединица, газдинска класа, категорија шуме, одељење, састојина и сл.) и трошкови (снимци, обрада, интерпретација и сл.).

3.2. Утврђивање дендрометријских података

На аероснимцима већина дендрометријских карактеристика не може се одредити директно (L a r , V.A., A k c a , A., 2007). Оне се одређују индиректно, а тачност зависи од поузданости процене фотограметријских карактеристика и квантитативних информација добијених фотоинтерпретацијом, као и од корелације између дендрометријских величина са аероснимама и стварних величина добије их мерењем на терену.

Висина стабла - Висина стабла је једна од најзначајнијих дендрометријских величина која се може мерити директно са аероснимка. Користи се више поступака: радијално померање лика на појединачној фотографији, дужина сенке појединачних стабала мерених на једној фотографији, разлика паралакси мерених на пару стерео фотографија са специјално опремљеним стереоскопом, стереоскопско мерење аероснимака аналогним или дигиталним плотером и сл.

Одређивање висине стабала мерењем радијалног померања, дужине сенке или разлике паралакси има озбиљних ограничења па се најчешће мора користити узорак стабала на ивици састојине који није репрезентативан. Стереоскопско мерења са аналитичким или електронским плотерима дају најбоље резултате у односу на тачност и трошкове (L a r , V.A., A k c a , A 2007).

Најважнији извор грешке висине је нетачна идентификација положаја стабла у састојини, а најчешће подножја стабла у склопљеним састојинама. Међутим, за процену запремине састојине, моделе раста и прогнозе приноса, средња висина састојине је важнија од висине појединачних стабала, а ту су укључени многи извори грешака. Збирни ефекат грешака доводи до негативне процене висине стабала. Стандардна грешка фотограметријски мерене средње или горње висине младих једнодобних састојина варира између 0,7 и 0,8 m, коришћењем аероснимака средње размере (A k c a , A., 1983). У старим састојинама четинара где се терминални избојак не може препознати, као и код лишћара, најчешће није могуће идентификовати врх стабла. Главни проблем је одређивање подножја стабла, најчешће због велике склопљености састојине и великог нагиба терена.

Број крошњи стабала - Број крошњи по јединици површине избројан на аероснимку разликује се од стварног броја стабала на терену, због преклапања, засењавања и груписања крошњи. Неподударање између броја крошњи на снимку и

стварног броја стабала по јединици површине зависи од размере снимка, резолуције филма и папира, старости састојине, структуре и густине састојине. Ове разлике су веће код лишћара него код четинара. Грешка може бити делимично коригована употребом одговарајућег регресионог модела у комбинацији са подзорком (S p e l l m a n n , Н., 1984; према L a r , V.A., A k c a , А., 2007).

Склопљеност крошњи - На аероснимцима склопљеност крошњи стабала у састојини дефинисана је као однос површине покривене крошњама стабала и укупне површине састојине. Склопљеност крошњи (склоп) и обраслост (густина) састојине су различите дендрометријске величине, али су у извесној корелацији. Склопљеност се мери директно на бази хоризонталне пројекције крошњи стабала а обраслост састојине изражава се бројем стабала по јединици површине састојине. На везу између степена склопа и обраслости састојине утичу станишни, састојински и узгојни фактори. Склопљеност крошњи представља најчешће коришћени састојински параметар одређен из ваздуха за процену запремине и биомасе састојине. Поред тога, користи се и као критеријум за издвајање стратума при инвентури великих шумских површина и за процену неопходности извођења прореда. У поређењу са теренским мерењима процена склопљености крошњи на бази аероснимка је лакша, објективнија и тачнија. У свим случајевима постоји више извора грешака, које су последица структурне изграђености састојина. Грешка процене склопљености крошњи састојине је 10-20%.

Димензије крошњи - На аероснимцима технички је могуће измерити ширину крошње, површину хоризонталне пројекције крошње и дужину крошње стабла. Површина попречног пресека крошње и њене запремине базирани су на одређеним геометријским моделима који осликавају форму и облик крошње стабла.

Према истраживањима бројних аутора, које наводе L a r , V.A., A k c a , А., (2007), између пречника крошње и прсног пречника стабла постоји јака корелација. Коефицијент корелације је од 0,7 до 0,9. Као резултат проучавања ове везе конструисане су аеротаблице запремине стабла са пречником крошње као улазом, као и регресиони модели за процену прсног пречника стабла на бази пречника крошње.

Ширина крошње стабала у састојини може се релативно лако измерити са аероснимка, а величина грешке најчешће не прелази 10% од стварне величине. Површина хоризонталне пројекције крошњи састојине може се проценити помоћу прекривања аероснимка правилном мрежом тачака, при чему се преброји број тачака које падају на крошње стабала и помножи са површином коју представља свака тачка. Може се урадити и мапа крошњи састојине, а затим плотером утврдити површина прекривена крошњама стабала. Грешка је око 5%. Дужина крошњи може се мерити на стереоскопском моделу, аналогним или дигиталним плотером.

Површина и запремина крошње стабла зависи од ширине и дужине крошње, а корисне су променљиве у моделима проучавања раста и премера шума. Као пример такве везе, наводи се веза између прираста темељнице стабала и површине њихових крошњи у проређиваним и непроређиваним састојинама (L a r , V.A., A k c a , А., 2007)

Старост састојине - Уместо процене стварне старости састојине обично се процењује њена припадност одређеном добном разреду, по 20 или више година. За процену старости користи се регресиони модел са фотограметријски одређеном средњом висином састојине и величином крошње. Међутим, и овде постоји могућност велике грешке, тако да се састојина сврстава у суседни добни разред уместо у онај коме припада. На пример, у раду S e l e t k o v i ć , A. *et al.* (2008) истраживан је најбољи начин интерпретације IKONOS сателитског снимка високе резолуције који се може једноставно применити у шумарству. Проведена је визуелна и дигитална интерпретација сателитског снимка и оцењена је тачност изведене класификације шума. Утврђена је тачност класификације шума храста лужњака и пољског јасена (13.200 ha). Шума је класификована на два уређајна разреда (газдинске класе), а унутар њих на осам добних разреда по 20 година. Најбољи резултати класификације добијени су методом визуелне интерпретације. Исправно је класификовано око 75% површине истраживане шуме, али су утврђена и значајна одступања за поједине добне разреде унутар уређајних разреда.

Профил развоја састојине - Вертикални профил развоја састојине користан је за процену запремине састојине. Мерења профила састојине уведена су тридесетих година двадесетог века, али је метод убрзо напуштен због одређених тешкоћа. Касније, развој модерних дигиталних аналитичких плотера олакшао је конструисање профила састојине. Међутим, и овде постоје извори грешака, као нпр. да средња висина профила не даје непристрасну процену средње висине састојине, јер средња висина профила мери претежно доминантна стабла.

Процена запремине састојине - Циљ утврђивања дендрометријских података помоћу метода даљинске детекције је уствари процена најзначајнијих таксационих елемената састојине: запремине, биомасе и запреминског прираста. Процена је заснована на фотоинтерпретацији и фотограметријским мерењима дендрометријских величина на снимцима који се касније користе као независно променљиве у одговарајућим регресионим моделима.

Свакако, највећи значај има одређивање запремине састојине, а методи инвентуре састојина из ваздуха могу се класификовати с обзиром на коришћене независно променљиве у регресионим моделима. Према L a a r , V.A., A k c a , A. (2007) највише се користе стереограмски метод и метод аеротаблица запремине стабла и састојине (aerial tree and stand volume tables).

Стереограмски метод је базиран на визуелном прегледу и поређењу снимка посматране састојине и састојине са познатом запремином по хектару, која је утврђена мерењем на терену. Серије стереограма су спојене и представљају различите класе запремине састојине. Фотограметријске и фотографске информације о слици састојине се процењују да би је распоредили у једну од класа запремине састојина стереограма.

Аеротаблице запремине стабла и састојине се раде на бази једног, два или више улаза и уобичајене су у Северној Америци и Скандинавији. Свакако, највећу тачност имају таблице израђене за чисте једнодобне састојине, а као улази у таблице користе се: средња висина састојине, склопљеност крошњи, и пречник крошњи. Добро је ако постоји могућност постављања контролних парцела на терену ради корекције запремине проценене помоћу ових таблица. Када се ради о аеро-

таблицама за процену запремине стабла користе се најчешће, као улази у таблице, висина стабла и пречник крошње, одређени фотограметријским методом. Метод даје задовољавајуће резултате у разређеним, односно „отвореним“ састојинама. Запремина састојине добија се после процене броја стабала по хектару. Међутим, у склопљеним, односно „затвореним“ састојинама великог обраста и вертикалне слојевитости, бољи резултати се добијају помоћу аеро-састојинских запреминских таблица. Класичне прирасно - приносне таблице могу се користити за процену запремине састојине на основу познате старости и фотограметријски измерене средње или горње висине састојине.

Посебан значај за процену запремине састојине помоћу аеротаблица има примена двофазног узорка. У првој фази на аероснимцима се поставља и мери велики број пробних површина, да би се добила брза и приближна процена запремине састојине по хектару, на бази средње висине састојине, склопљености крошњи и броја стабала по хектару. У другој фази изабере се подузорок пробних површина мерених у првој фази на аероснимку и премери класичним методом на терену. Добијени подаци мерења повезују се методом регресије. Више аутора објавило је задовољавајуће резултате добијене помоћу овог типа узорка (S h a d e , J., 1980; Z i n d e l , U., 1983; S p e l l m a n n , H., 1984; A k c a , A. *et al.*, 1993; према L a a r , V.A., A k c a , A., 2007).

Процена запреминског прираста састојине - У инвентури шума, позната је чињеница да се на основу дендрометријских мерења таксационих величина запремински прираст састојине процењује са мањом тачношћу од запремине састојине. Исти случај је и када је реч о процени запреминског прираста састојине методом даљинске детекције. У крајњем случају, као и код процене запремине, тачност процене запреминског прираста зависи од примењеног метода даљинске детекције и од типа шуме. Због тога, јављају се различити резултати и мишљења о стварним могућностима процене запреминског прираста састојине неким од метода даљинске детекције.

Наводимо део резултата добијених у Немачкој (A k c a , A., 1984; A k c a , A. *et al.*, 1991). Утврђена је сигнификантна веза између прираста темељнице и површине пројекције крошње или површине крошње појединачних стабала. Резултати су засновани на проучавању сталних пробних површина. Коефицијент детерминације за везу прираста темељнице и површине пројекције крошње појединачних стабала износио је од 64% до 72%. За запремински прираст састојине најбоље резултате дао је двофазни узорак.

A k c a , A. *et al.* (1991) одредили су запремински прираст састојине на бази горње висине и склопљености састојине фотограметријски одређених. Резултати су упоређени са резултатима добијеним на бази сталних пробних површина где је извршено класично мерење. У оба случаја стандардна грешка је износила $0,98 \text{ m}^3/\text{ha}$. У првом случају текући запремински прираст састојине је $12,62 \text{ m}^3/\text{ha}$, а у другом $13,96 \text{ m}^3/\text{ha}$. Закључено је да у овом случају примена двофазног узорка редукује трошкове класичног премера сталних пробних површина за 62%.

3.3. Поузданост метода даљинске детекције

У циљу побољшања квалитета теренских мерења у класичној инвентури шума, као и у анализи тачности метода даљинске детекције, присутан је стални напредак. Стандардна грешка таксационих елемената састојине утврђених помоћу узорка на терену је у распону од 26% до 36% (P o s o , S., 1983) или од 15% до 24% (L a s s e n a h o , J., P a i v i n e n , R., 1986), према K a n g a s , A., M a l t a m o , M. (2006).

Истраживања тачности процене запремине високих састојина букве на подручју Србије показала су да је стандардна грешка, при вероватноћи 95%, у интервалу од 12% до 23% (K o п р и в и ц а , M., 2006).

Иако се зна да су састојински параметри оптерећени великом грешком процене они се у пракси често користе као стварни подаци. Такође, треба напоменути да грешка састојинских параметара може бити и већа од утврђене. Због тога, унапређење тачности података инвентуре шума од највећег је значаја за успешно планирање газдовања шумама.

Бројна истраживања тачности метода даљинске детекције у инвентури шума показала су да методи даљинске детекције најчешће дају резултате довољне тачности, ако се ради о картирању и класификацији шума. Ако је реч о утврђивању таксационих елемената инвентурне јединице или појединачних стабала, тачност зависи првенствено од типа шуме и од врсте таксационог елемента који се процењује. Приликом разматрања тачности метода даљинске детекције у инвентури шума, увек се упоређују подаци добијени даљинском детекцијом са подацима добијеним класичним мерењем на терену. Освртом на трошкове добијања података, износимо нека искуства о тачности метода даљинске детекције при утврђивању дендрометријских података.

Према K a n g a s , A., M a l t a m o , M. (2006) и L a a r , V.A., A k c a , A. (2007), уколико се разматра само тачност метода даљинске детекције, најперспективнији методи су они који користе директно мерење карактеристика објекта. Ласерско скенирање из ваздуха и индивидуално мерење стабала коришћењем дигиталних аероснимака примери су ових технологија. Примена аероласерског скенирања у шумарству укључује: одређивање нагиба терена, средње висине, броја стабала, склопа, темељнице и запремине састојине, затим процену висине и запремине појединачних стабала, одређивање врсте дрвећа, евиденцију посечених стабала, изведених прореда и сл.

„Тачност ласерског скенирања процењена на нивоу стабла, пробне површине и састојине, веома је слична или чак и боља од тачности добијене класичним теренским мерењем. Прва истраживања која су поредила процену ласерски спроведене инвентуре шума са проценама коришћења других метода даљинске детекције, спроведена 1999. године, открила су да су ласерски подаци тачнији од података добијених другим методима даљинске детекције. Резултати су, такође, показали да је ласерско скенирање једини метод даљинске детекције који задовољава захтев за тачношћу у оперативној инвентури шума базираној на састојини“ (K a n g a s , A., M a l t a m o , M., 2006; слободан превод, стр. 347).

У датом наводу аутори не говоре о било каквим ограничењима при утврђивању таксационих елемената стабла, пробне површине и састојине. Међутим, уви-

дом у бројне радове који разматрају тачност метода даљинске детекције, може се констатовати да се претходни закључак односи искључиво на једнодобне састојине са малим бројем главних врста дрвећа (смрча, бели бор и бреза) у шумама Финске, Шведске и Норвешке. Иначе, највише истраживања изведено је управо у једнодобним а знатно мање у разнодобним и пребирним састојинама.

Према резултатима истраживања Нуурра, Н., Нуурра, Ј. (1999); Коррела, И. (2004) висине појединачних стабала могу се мерити са максималном тачношћу 0,5 m, коришћењем ласерског скенирања или дигиталне фотограмметрије, а темљиница и запремина састојине са грешком око 10,0%. Коришћење функције дистрибуције стабала по дебљини може помоћи у процени количине дубеће залихе дрвета у другом и трећем спрату (Малтамо, М. *et al.*, 2004).

Нессет, Е., Окланд, Т. (2002) испитивали су тачност процене висине стабла и карактеристика крошње коришћењем аероласерског скенирања у боралном природном резервату. Поређењем стварних величина мерених на терену и ласерски изведених величина добијени су следећи коефицијенти детерминације: 75% за висину стабла, 53% за дужину крошње и 51% за релативну дужину крошње. Стандардне грешке регресије, истим редом, износиле су 3,15 m, 2,19 m и 10,48%. Тачнији резултати добијени су за процену средње величине таксационих елемената састојине, него појединачних стабала.

Нолмгрен, Ј. *et al.* (2003) испитивали су тачност процене висине и запремине стабала на парцелама полупречника 10 m и закључили да постоји јака корелација између ласерског мерења и мерења на терену ових таксационих елемената. За средњу висину коефицијент детерминације је око 90%, а стандардна грешка регресије је око 1,5 m, што одговара око 10% од средње висине. За процену запремине коришћена су два регресиона модела: први модел са ласерски изведеном средњом висином и ласерски изведеном застртом површином крошњи, где је коефицијент детерминације 90%, а релативна стандардна грешка регресије 22%; други модел са ласерски изведеном средњом висином и ласерски изведеним бројем стабала, где је коефицијент детерминације 82%, а релативна стандардна грешка регресије 26%. Закључено је да се ласерским скенирањем из ваздуха у комбинацији са мерењем на терену могу добити резултати задовољавајуће тачности.

Нессет, Е., Вјеркнес, К. (2001) испитивали су тачност процене просечне висине и броја стабала у младим састојинама четинара коришћењем ласерског скенирања из ваздуха. Регресијом је објашњено 83% варирања стварне средње висине и 42% варирања стварног броја стабала. Релативна стандардна грешка регресије износила је за средњу висину 15%, а за број стабала 28,8%. Закључено је да се бољи резултати добијају применом двофазног узорка.

Нирата, У. *et al.* (2009) испитивали су могућност ласерског скенирања из ваздуха да идентификује појединачна стабла у склопу састојине чемпреса, и везу између продирања ласерских зрака и карактеристика састојине са различитом склопљеношћу која је изазвана различитом јачином прореда. Посматрани су делови састојине (блокови) са јаком проредом (38,0% темљинице), са средњом проредом (30,4%) и без прореде. Истим редом, проценат идентификације крошњи појединачних стабала износио је: 95,3%, 89,2% и 60,0%. Висине стабала процењиване су са стандардном грешком регресије: 0,95 m, 0,65 m и 0,68 m. Ласерски мере-

не висине стабала упоређиване су са висинама стабала мереним на терену, при чему су утврђени коефицијенти детерминације: 71%, 87% и 85%, односно укупно 86%. Продирање ласерских зрака кроз склоп износило је: 50,6%, 43,1% и 9,2%.

Nelson, R. *et al.* (1997) истраживали су примену технике ласерског скенирања из ваздуха (LIDAR) у циљу процене темељнице, запремине и биомасе у природним тропским шумама. Процедура је унапређена и тестирана коришћењем података мањег обима добијених мерењем на терену. Коефицијенти детерминације су износили 40 - 60%. С обзиром на то да су се појавила велика неслагања између стварних и процењених величина темељнице, запремине и биомасе, на бази ових истраживања закључено је да коришћена процедура може бити препоручена само за извиђање стања шума у великим удаљеним и неприступачним регионима. Ипак, констатује се и следеће: „Ова технологија можда је најкориснија за детекцију промена на површини земље у резервама угљеника и северним бореалним шумама, где су најрапидније и најзначајније климатске и вегетацијске промене које се очекују у наредних двеста година“ (Nelson, R. *et al.*, 1997; слободан превод, стр.325).

С аспекта структурне изграђености наших шума, посебно значајно истраживање у природним средњеевропским шумама извели су Heinrich, M., Thomas, F. (2008). Истраживање је спроведено у Баварском националном парку (Немачка). Циљ истраживања био је процена параметара састојине на основу података ласерског скенирања у структурно богатим мешовитим шумама букве и смрче. За прикупљање података коришћен је ТороSys II авиолазерски систем. У анализу ласерског мерења било је укључено 108 огледних парцела, а на терену су мерење 33 пробне површине. Ефекат изведене стратификације био је значајан.

Презентованим методом у овом раду и са изведеном стратификацијом (стратуми: шуме лишћара, шуме четинара и мешовите шуме лишћара и четинара) добијени су задовољавајући резултати процене састојинских параметара на нивоу пробне парцеле. Најбоље процене биле су за висину, са релативном стандардном грешком регресије од 5%, затим за пречник на прсној висини 10%, и за остале састојинске параметре, као што су: запремина, темељница и остали индикатори обраслости 10 - 20%. Насупрот овако добрим резултатима, за број стабала по хектару добијена је јако лоша процена јер је релативна стандардна грешка регресије 60%. Доказано је да је на резултат процене значајно утицала структурна различитост шума, као што је мешовитост врста дрвећа и присуство мртвог дрвета. Изведен је следећи закључак: „Резултати ове студије показују да значајни параметри шума у тестираним површинама Баварског националног парка могу бити процењени са релативно високим нивоом тачности. Чак и мешовите шуме са богатом структуром у монтоној шумској зони могу дати задовољавајући резултат“ (Heinrich, M., Thomas, F. 2008; слободан превод, стр. 659).

4. ЗАКЉУЧАК

Дигитални аероснимци, сателитски снимци високе резолуције, и ласерско скенирање шума из ваздуха технике су даљинске детекције које се сада највише користе у савременој инвентури шума и за које се очекује значајан напредак у бу-

дућности. Примена ових метода даје боље резултате при картирању, класификацији и мониторингу шума и шумских земљишта него при утврђивању дендрометријских величина потребних за процену запремине, биомасе и запреминског прираста шума.

С аспекта примене аеротаблица у нашим шумама за процену запремине стабла, групе стабала или састојине, могу се очекивати резултати прихватљиве тачности само у комбинацији са мерењем на терену, односно применом двофазног узорка. Величина узорка у другој фази зависила би директно од структурне изграђености састојина или њихових мањих делова. Прихватљиви резултати процене могу се очекивати првенствено за чисте средњедобне састојине четинара или лишћара, затим за састојине разређеног склопа свих врста дрвећа, као и за деградирани, изданачке и заштитне шуме у лошим станишним условима. У високим склопљеним разнодобним и мешовитим састојинама наших главних врста дрвећа са природном обновом, старим једнодобним састојинама доспелим за обнову и добрим изданачким шумама, не могу се очекивати резултати потребне тачности за оперативно планирање газдовања. У њима треба и убудуће задржати проверене класичне методе премера, засноване на статистичком узорку довољне тачности и економски оправдане величине.

Највећа корист од примене метода даљинске детекције за утврђивање дендрометријских величина може се очекивати при премеру површински разуђених шума и шума мање економске вредности, за које се и не тражи већа тачност процене таксационих елемената. Такве су у првом реду приватне шуме и шуме које имају приоритетну заштитну функцију.

Наш генерални став је да се ефикасни методи даљинске детекције могу применити само селективно у инвентури шума Србије. У непосредној будућности, највећу корист од примене метода даљинске детекције треба очекивати у просторном разграничењу и класификацији шума и шумских земљишта, затим мониторингу здравственог стања шума и предвиђању могућих промена, као и у прикупљању дендрометријских података за све шуме мањег економског значаја. Добријене резултате треба увек контролисати провереним методом класичног мерења на терену.

Чињеница је да код нас још увек нема обимнијих истраживања могућности примене и оцене ефикасности метода даљинске детекције у прикупљању дендрометријских података потребних за процену запремине и запреминског прираста састојина у различитим типовима шума. Међутим, за сада је сигурно да примена било ког метода даљинске детекције у инвентури наших економски вредних шума не може у потпуности заменити проверене класичне методе премера на терену. Наиме, поред потребе за што тачнијом проценом запремине, биомасе и запреминског прираста састојина и шума уопште, постоји и велика потреба за прикупљањем бројних квалитативних података у циљу потпунијег дефинисања стања и коришћења шумских екосистема у целини (природна регенерација, здравствено стање, квалитативна структура, сортиментна структура и сл.).

На крају, напомињемо да је последњих година у инвентури шума Србије постигнут значајан напредак у примени неких метода даљинске детекције за израду дигитализованих тематских карата и у примени нових инструмената за оријента-

цију и дендрометријска мерења на терену. Међутим, проблем ефикасне примене даљинске детекције у савременој инвентури различитих типова шума је јако сложен и у свету се на његовом решавању константно ради.

ЛИТЕРАТУРА

- A k c a , A. (1983): Rationalisierung der Bestandeshöhenermittlung in der Forsteinrichtung und bei Grossrauminventuren. Forstarchiv. 103-106.
- A k c a , A. (1984): Zur Zuwachsschätzung mit Hilfe von Kronen messungen im Luftbild. Allg. Forst u. Jagdzeitung, 136-141.
- A k c a , A., D o n g , P.H., B o c k m a n n , T. (1991): Der Stellenwert von Luftbildern und anderen Fern - Erkundungsmethoden im Rahmen von Grossrauminventuren. Abschlussbericht DFG AK 9/1-2.
- A s c h o f f , T., S p i e c k e r , H. (2004): Algorithms for the automatic detection of trees in laser scanner data. In Proceedings of the ISPRS working group VIII/2. Laser – Scanners for Forest and Landscape Assessment. Freiburg, Germany, October, 3-6.
- H i r a t a , Y., F u r u y a , N., S u z u k i , M., Y a m a m o t o , H. (2009): Airborne laser scanning in forest management: Individual tree identification and laser pulse penetration in a stand with different levels of thinning. Forest Ecology and Management, pp 752-760.
- H y u p p ä , H., H y u p p ä , J. (1999): Comparing the accuracy of laser scanner with other optical remote sensing data sources for stand attribute retrieval. The Photogrammetric Journal of Finland 16: 5-15.
- H e u r i c h , M., T h o m a , 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, Vol. 81, No 5, pp 645-661.
- H o l m g r e n , J., N i l s s o n , M., O l s s o n , H. (2003): Estimation of Tree Height and Stem Volume on Plots Using Airborne Laser Scanning. Forest Science; 49,3; pp 419-428.
- J а н и ћ , М. (1994): Шумске тематске карте у дигиталном облику. Шумарство, бр. 5-6, Београд, стр. 41-47.
- K a n g a s , A., M a l t a m o , M. (2006): Forest Inventory – Methodology and Applications, Springer.
- K o p r i v i c a , M. (2006): Reliability of results of beech high stand inventory by sample metod. Proceedings, International Scientific Conference: Sustainable use of forest ecosystems – The challenge of the 21st Century, 8-10th november, Donji Milanovac, pp 393-409.
- K o r p e l a , I. (2004): Individual tree measurements by means of digital aerial photogrammetry. PhD-thesis. Silva fennica. Monographs 3. 93 p.
- L a e s , D., W a r n i c k , R., G o e t z , W., M a u s , P.(2006): Lidar Applications for forestry and Geosciences. Forest Service Remote Sensing Tips. [http:// fsweb.rsac.fs.fed.us](http://fsweb.rsac.fs.fed.us)
- L a a r , V. A., A k ç a , A., (2007): Forest Mensuration, Springer.
- M a l t a m o , M., E e r i k ä i n e n , K., P i t k ä n e n , J., H y u p p ä , J. and V e h m a s , M. (2004): Estimation of timber volume and stem density based on scanning laser altimetry and expected tree size distribution functions. Remote Sensing of Environment 90, pp 319-330.
- N æ s s e t , E., O k l a n d , T. (2002): Estimating tree height and tree crown properties using airborne scanning laser in a boreal nature reserve. Remote Sensing of Environment 79, pp105-115.

- Nelson, R., O derwald, R., Gregoire, T. (1997): Separating the Ground and Airborne Laser Sampling Phases To Estimate Tropical Forest Basal Area, Volume, and Biomass. *Remote Sensing of Environment* 60, pp 311-326.
- Н е в е н и ћ , Р. (2001): GIS у домену шумарства. Шумарство, 5-6, Београд, стр. 47-55.
- Ratkníć, M. *et al.* (2008): Satelitski snimci visoke rezolucije u prikupljanju i obradi prostornih podataka o šumama i šumskim ekosistemima, Poglavlje 7: Metodologija izrade plana gazdovanja šumama, Monografija: Razvoj kapaciteta privatnog sektora za održivo gazdovanje šumama u Srbiji, Beograd – Zvolen.
- Seletković, A., Pernar, R., Jazbec, A., Ančić, M. (2008): Točnost klasifikacije satelitske snimke visoke prostorne rezolucije IKONOS za potrebe šumarstva. *Šumarski list* br. 9-10, str. 393-404.
- Tomppo, E. (1988): Standwise forest variate estimation by means of satellite images. IUFRO S4.02.05 Meeting, Aug.29 – Sept. 2, 1988, Finland.
- Tomppo, E. (1990): Satellite image based National Forest Inventory of Finland. *Photogrammetric Journal of Finland* 12, pp 115-120.

ON REMOTE SENSING IN MODERN FOREST INVENTORY

Miloš Koprivica
Đorđe Jović

S u m m a r y

The most significant techniques of remote sensing used in modern forest inventories in the world are described in the form of information. As the most significant results in the application of remote sensing methods to date have been achieved in mapping, classification, and monitoring of forests and forest lands, the focus is on the study of the potentials and efficiency of the techniques in the assessment of the sizes of taxation elements of trees, groups of trees, and stands. It deals with the mensuration and processing of dendrometric values on digitalised aerial photographs and satellite images of high resolution, as well as with the application of airborne laser scanning. By all means, the key question is related to the accuracy of estimation of volume, biomass, and volume increment. It is concluded that modern methods of remote sensing in our forests can be applied only selectively for the time being, first of all, in all private forests and in state forests of lower economic value. In state forests of higher economic value, where more complete and accurate information is needed for the elaboration of management plans, the verified classical methods of collecting and processing the taxation data should continue to be used in future. As the remote sensing methods are being intensively developed all over the world, they should be tested in various types of our forests. The application of the adequate methods of remote sensing should solve the inventory problems in the management of private forests and economically less valuable and less significant state-owned forests. At the same time, in this way total costs of actual forest inventory would be reduced and a more efficient inventory of economically valuable forests would be made possible by field measurements. In Serbia, a progress has been made in this respect, however it is still insufficient.