تعیین مؤثرترین عوامل محیطی بر توان تولید رویشگاه راش شرقی با استفاده از تکنیک جنگل تصادفی در جنگل خیرود نوشهر

سید جلیل علوی[۱*]، زهرا نوری[۲] و قوام‌الدین زاهدی امیری[۳]

[۱] استادیار گروه جنگلداری، دانشکدهٔ منابع طبیعی و علوم دریایی نور، دانشگاه تربیت مدرس، نور
[۲] دکتری جنگلداری، دانشکدهٔ منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج
[۳] استاد گروه جنگلداری، دانشکدهٔ منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۲/۸؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۶/۱۵)

چکیده

بررسی رابطهٔ بین توان تولید رویشگاه و متغیرهای محیطی به‌عنوان یک مؤلفهٔ مهم در مدیریت جنگل و کی از مسائل مهم در جنگلداری است. در گذشته بررسی این رابطه با استفاده از روش‌های پایه مانند رگرسیون خطی انجام می‌گرفت و امروزه از روش‌های ترکیبی همانند جنگل تصادفی استفاده می‌شود. به این منظور، در جنگل خیرود نوشهر در تیپ‌هایی که در آنها گونهٔ راش غالب بود، به روش نمونه‌برداری طبقه‌بندی‌شده براساس شکل زمین، ۱۱۴ قطعه نمونهٔ دایره‌ای به مساحت ۱۰ آر در هر یک از کلاسه‌های شکل زمین پیاده شد. سپس در هر قطعه نمونه، ارتفاع پنج اصله از قطورترین درختان به‌عنوان ارتفاع غالب علاوه بر ارتفاع از سطح دریا و درصد شیب و آزیموت اندازه‌گیری و ثبت شد. همچنین در مرکز هر قطعه نمونه، از عمق ۱۰-۰ سانتی‌متری، نمونه‌برداری خاک صورت گرفت و متغیرهای فیزیکی و شیمیایی متعددی اندازه‌گیری شد. ارزیابی توان تولید رویشگاه راش با استفاده از مدل جنگل تصادفی و بهره‌گیری از معیار اهمیت نسبی نشان داد که از بین متغیرهای خاکی، متغیرهای فسفر، درصد نیتروژن، منیزیم و درصد سیلت؛ و از بین عوامل فیزیوگرافی، درصد شیب و ارتفاع از سطح دریا اهمیت بیشتری دارند و حدود ۹۰ درصد تغییرات توان تولیدی را می‌توان با استفاده از این متغیرها تبیین کرد. استفاده از معیارهای ضریب تبیین و ضریب تبیین تعدیل‌یافته، نشان می‌دهد که مدل جنگل تصادفی کارایی بسیار خوبی در ارزیابی توان تولید دارد. مطالعهٔ حاضر، بر اهمیت تکنیک ترکیبی در مطالعات بوم‌شناسی جنگل تأکید کرده و چارچوبی را برای مدلسازی توان تولید رویشگاه راش نسبت به متغیرهای محیطی فراهم می‌کند.

واژه‌های کلیدی: ارتفاع غالب، تکنیک جنگل تصادفی، توان تولید رویشگاه، روش‌های ترکیبی، گونهٔ راش شرقی.

* نویسندهٔ مسئول شمارهٔ تماس: ۰۹۱۱۱۵۸۰۰۹۷ ایمیل: j.alavi@modares.ac.ir

مقدمه و هدف

برآورد دقیق توان تولید جنگل، از مؤلفه‌های بسیار مهم در مدیریت صحیح منابع جنگلی است. ازاین رو یکی از وظایف خطیر مدیران جنگل کمّی‌سازی و سنجش اختلافات و تفاوت‌ها در رویشگاه‌هاست (Vanclay, 1992). ازآنجا که رویشگاه در تعیین میزان رشد (که یک مؤلفهٔ بسیار مهم در برنامه‌های مدیریت جنگل است) تأثیر بسیار زیادی دارد، کیفیت آن نیز میزان رشد و توان تولید را تحت تأثیر قرار می‌دهد (McClintock and Bickford, 1957). کیفیت رویشگاه که متوسط توان تولید یک جنگل را برای رشد درختان جنگلی بیان می‌کند به دو روش کلی Phytocentric و Geocentric می‌تواند ارزیابی شود که در رویکرد Phytocentric بعضی از مشخصات درخت یا پوشش گیاهی که بیانگر کیفیت رویشگاه‌اند، مانند کمیت چوب تولیدشده، مشخصه‌های اندازه‌ای درخت و گونه‌های گیاهی که به‌طور طبیعی در آن ناحیه رخ می‌دهند اندازه‌گیری می‌شوند و در رویکرد Geocentric کیفیت رویشگاه برحسب عوامل محیطی ارزیابی می‌شود (Vanclay, 1992). یکی از معیارهای مهم تأثیرپذیر از کیفیت رویشگاه، ارتفاع غالب است که به‌صورت ارتفاع ۱۰۰ اصله از قطورترین درختان در هکتار بیان می‌شود (Alder, 1980). این معیار برخلاف قطر برابرسینه، کمتر تحت تأثیر عملیات پرورشی در جنگل قرار می‌گیرد و رابطهٔ نزدیکی با حجم درختان دارد، به همین دلیل معیار مناسبی برای بررسی کیفیت رویشگاه است (Hoog and Nester, 1991).

گاهی جنگلبانان به برآوردی از کیفیت رویشگاه در مناطقی که در حال حاضر تودهٔ جنگلی وجود ندارد یا جایی که درختان رویشگاهی مناسب در توده‌های باقی‌مانده وجود ندارد، نیاز دارند، در چنین مواردی شاخص توان رویشگاه را می‌توان به‌طور غیرمستقیم و با تعیین روابط بین معیار توان رویشگاه و متغیرهای محیطی، ویژگی‌های منطقه و ویژگی‌های پوشش‌های گیاهی زیراشکوب به‌دست آورد (Bergès *et al.*, 2005)، زیرا توان تولید رویشگاه برایند ویژگی‌های محیطی رویشگاه (ساختمان، بافت، اسیدیته، عمق)، جهت جغرافیایی، شیب، میکروکلیما، ارتفاع از سطح دریا و غیره است و تغییر در این ویژگی‌ها پتانسیل رویشگاه را تحت تأثیر قرار می‌دهد (حسینی و همکاران، ۱۳۷۹).

در سال‌های اخیر روش‌های گوناگون مدلسازی با استفاده از متغیرهای محیطی، برای پیش‌بینی شاخص توان تولید توسعه یافته و با موفقیت‌های مختلفی روبه‌رو شده است که از آن جمله می‌توان به رگرسیون چندگانهٔ خطی[1] (MLR)، درخت طبقه‌بندی و رگرسیون[2] (CART)، مدل جمعی تعمیم‌یافته[3] (GAM)، همچنین تکنیک‌های یادگیری ماشین[4] مانند شبکه‌های عصبی[5] (ANN) و درخت رگرسیون تقویت‌شده[6] (BRT) اشاره داشت (Bergès *et al.*, 2005). تجزیه‌وتحلیل داده‌های پیچیدهٔ اکولوژیکی نیازمند روش‌های تحلیلی قوی و انعطاف‌پذیری است که روابط غیرخطی، اثرهای متقابل و داده‌های ازدست‌رفته را کنترل کند. علاوه‌بر این، درک و ارائهٔ نتایج توسط این روش‌ها باید ساده و به‌راحتی تفسیرشدنی باشد. درخت تصمیم ابزاری قدرتمند و در عین‌حال رایج در داده‌کاوی است که هم برای طبقه‌بندی و هم برای پیش‌بینی استفاده می‌شود. جذابیت روش‌های درخت‌مبنا[7] بیش از هر چیز به این دلیل است که به‌راحتی برای همگان قابل فهم است. ازآنجا که درخت تصمیم، بررسی داده و مدلسازی را با هم ترکیب می‌کند، گام اولیهٔ قدرتمندی در فرایند مدلسازی به‌شمار می‌رود (Crawford, 1989).

درخت تصمیم، ساختاری است که از آن برای

[1] Multiple Linear Regression
[2] Classification and Regression Tree
[3] Generalized Additive Model
[4] Machine Learning
[5] Artificial Neural Network
[6] Boosted Regression Tree
[7] Tree-based methods

تقسیم مجموعهٔ بزرگی از داده‌های جمع‌آوری‌شده به مجموعه‌های کوچک‌تر زنجیروار داده‌ها، براساس یک رشته قوانین سادهٔ تصمیم استفاده می‌شود. در هر دسته‌بندی متوالی، اعضای مجموعه‌های حاصل بیش از پیش به یکدیگر شباهت پیدا می‌کنند (Birks, 2012). الگوریتم‌های متعدد برای ساخت درخت تصمیم وجود دارند که از آن جمله می‌توان به الگوریتم ID3، الگوریتم C4.5، الگوریتم CART و الگوریتم CHAID[1] اشاره کرد. درخت طبقه‌بندی و رگرسیون از روش‌های رگرسیون ناپارامتری است که درخت تصمیم را براساس الگوریتم دسته‌بندی دودویی بازگشتی توسعه می‌دهد.

هرچند ساخت درختان رگرسیون و طبقه‌بندی آسان و تفسیرشان نیز به‌راحتی امکان‌پذیر است، یک ضعف اساسی آن این است که مدل برازش‌یافته واریانس زیادی دارد. تغییری اندک در داده‌ها (با جمع‌آوری یک نمونهٔ متفاوت از داده‌ها و برازش مدل) اغلب سبب تغییرات زیاد در شکل درخت برازش‌یافته می‌شود. این امر تفسیر درخت رگرسیون و طبقه‌بندی را با مشکل مواجه می‌کند. برای غلبه بر این مشکل، راه‌حل‌های متعددی ارائه شده است که تمامی آنها، مستلزم برازش درختان متفاوت زیاد به داده‌ها و میانگین‌گیری پیش‌بینی‌ها از درختان است. این رویکردها به روش ترکیبی[2] معروف‌اند؛ جنگل تصادفی[3] و درخت رگرسیون تقویت‌شده دو روش بسیار متداول این رویکرد هستند (Birks, 2012).

در خصوص استفاده از تکنیک جنگل تصادفی در علوم منابع طبیعی، Garzon *et al.* (2006) با استفاده از سه تکنیک یادگیری ماشین (طبقه‌بندی درخت‌مبنا، شبکهٔ عصبی و جنگل تصادفی) رویشگاه بالقوه *Pinus sylvestris* را در شبه‌جزیرهٔ ایبری[4] (اسپانیا و پرتغال) و جزایر بالریک[5] با استفاده از متغیرهای اقلیمی و توپوگرافی مدلسازی کردند. نتایج نشان داد که الگوریتم جنگل تصادفی بهترین عملکرد را داشته است. Grossmann *et al.* (2010) با استفاده از روش جنگل تصادفی (RF) و تصاویر ماهواره‌ای به تهیهٔ نقشهٔ پوشش جنگل پرداختند. Vincenzi *et al.* (2011) برای پیش‌بینی مکانی تولید گونهٔ *Ruditapes philippinarum* نسبت به متغیرهای محیطی از تکنیک جنگل تصادفی استفاده کردند و به این نتیجه رسیدند که تکنیک جنگل تصادفی روش مناسبی را برای شناسایی رویشگاه‌های مناسب سنجش تولید برای بهره‌برداری ارائه می‌کند. Latifi and Koch (2012) با استفاده از برخی ویژگی‌های توده‌های جنگل و با مدل جنگل تصادفی، ویژگی‌های جنگل را برای جنگل‌های معتدله جنوب غربی آلمان به‌دست آوردند. Oliveira *et al.* (2012) وقوع آتش‌سوزی را در جنگل‌های مدیترانه‌ای اروپا با استفاده از دو تکنیک رگرسیون خطی و جنگل تصادفی بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که در این مورد جنگل تصادفی بهتر است.

از جمله مطالعات داخلی صورت‌گرفته در خصوص استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی می‌توان به فکور (۱۳۹۳) و فلاح و همکاران (۱۳۹۳) اشاره داشت. فکور (۱۳۹۳) از مدل جنگل تصادفی که یکی از مدل‌های نوین یادگیری ماشین است، به‌منظور ارزیابی توان تولید رویشگاه راش شرقی استفاده کرد. نتایج مطالعهٔ او نشان داد که مدل جنگل تصادفی توانسته است بیش از ۸۰ درصد تغییرات توان تولیدی را به‌کمک متغیرهای محیطی توجیه کند و از بین متغیرهای تبیینی مورد بررسی، ارتفاع از سطح دریا، نسبت کربن به ازت و درصد شیب مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر توان تولیدی رویشگاه گونهٔ راش بود. فلاح و همکاران (۱۳۹۳) از روش‌های درخت طبقه‌بندی و رگرسیونی و جنگل تصادفی در تهیهٔ نقشهٔ تیپ جنگل با استفاده از داده‌های سنجنده ASTER استفاده کردند. نتایج نشان داد که

[1] Chi-squared Automatic Interaction Detection
[2] Ensemble
[3] Random Forest
[4] Iberian
[5] Balearic

الگوریتم‌های درخت طبقه‌بندی و رگرسیونی و جنگل تصادفی نتایج قابل قبولی را در تهیهٔ نقشهٔ تیپ در جنگل دارابکلای ساری ارائه می‌دهند.

گونهٔ راش در راشستان‌ها که جز مهم‌ترین، غنی‌ترین و اقتصادی‌ترین جنگل‌های ایران به‌شمار می‌رود، حدود ۳۰ درصد از کل حجم سرپا و حدود ۲۳ درصد از کل تعداد درختان این جنگل‌ها را به خود اختصاص می‌دهد (ثاقب طالبی و همکاران، ۱۳۸۳). با اینکه توان تولید، مؤلفه‌ای مهم از خدمات اکوسیستم جنگل و معیاری مهم برای برنامه‌ریزی و مدیریت پایدار جنگل‌هاست، در ایران کمتر به ارزیابی آن پرداخته شده است؛ ازاین رو تحقیق حاضر قصد دارد توان تولیدی رویشگاه راش شرقی را با استفاده از معیار ارتفاع غالب در رابطه با مشخصه‌های فیزیکی و شیمیایی خاکی و فیزیوگرافی با استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی در جنگل آموزشی و پژوهشی دانشگاه تهران بررسی کند.

مواد و روش‌ها

منطقهٔ تحقیق

جنگل آموزشی و پژوهشی خیرود در ۷ کیلومتری شرق نوشهر بین ′۲۷ °۳۶ تا ′۴۰ °۳۶ عرض شمالی و ′۳۲ °۵۱ تا ′۴۳ °۵۱ طول شرقی واقع شده است. مساحت کل منطقه حدود ۱۰۰۰۰ هکتار است. این جنگل شامل ۷ بخش است. مطالعه حاضر تنها در بخش‌های پاتم، نمخانه، گرازبن، چلیر و بهاربن صورت گرفته است. مقدار بارندگی سالیانه در منطقهٔ خیرودکنار ۱۳۰۰ میلی‌متر است که حداقل آن در تیر و حداکثر آن در مهر است. گرم‌ترین ماه سال تیر و مرداد با میانگین دمای ۲۹/۲ و سردترین ماه سال، بهمن با میانگین دمای۲/۶ درجهٔ سانتی‌گراد است. همچنین میانگین دمای سالانه برابر با ۱۵/۹ درجهٔ سانتی‌گراد ثبت شده است (سرمدیان و جعفری، ۱۳۸۰).

روش تحقیق

در مطالعهٔ حاضر از روش نمونه‌برداری طبقه‌بندی‌شده بر مبنای شکل زمین استفاده شده است. بدین منظور پس از تهیهٔ نقشهٔ شکل زمین براساس ارتفاع از سطح دریا، شیب و جهت جغرافیایی با توجه به تعداد زیاد واحدهای شکل زمین با یک کُد یا مشخصه در تیپ‌های راش، واحدی که بیشترین سطح را در تودهٔ راش داشت، انتخاب و مختصات مرکز آن تعیین شد. در این تحقیق سعی شد قطعات نمونه در منطقهٔ تحقیق به‌خوبی پراکنش داشته باشند. در مرحلهٔ بعد محل این نقطه در طبیعت با مختصات مربوط با استفاده از سیستم مکان‌یاب جهانی (GPS Garmin 76CSX) مشخص شد. بعد از پیاده کردن ۱۱۴ قطعه نمونهٔ دایره‌شکل به مساحت ۱۰ آر، ارتفاع ۵ اصله از قطورترین درختان در هر قطعه نمونه اندازه‌گیری و میانگین آنها به‌عنوان ارتفاع غالب در نظر گرفته شد. پس از پیاده کردن قطعه نمونه، ارتفاع از سطح دریا، آزیموت و درصد شیب قطعات نمونه، اندازه‌گیری و ثبت شد. جهت جغرافیایی با استفاده از رابطهٔ ۱ به شاخص تابش خورشیدی[1] تبدیل شد که در آن θ مقدار آزیموت جهت برحسب درجه است. مقدار شاخص تابش خورشیدی بین صفر و یک و جهت شمال-شمال شرقی دارای مقدار صفر (خنک‌ترین دامنه) و جهت جنوب-جنوب غربی دارای مقدار یک (گرم‌ترین دامنه) است (Aertsen *et al.*, 2010).

$$TRASP= [1-\cos((\pi /180)(\theta-30))] /2 \qquad \text{رابطهٔ ۱}$$

همچنین در مرکز هر قطعه نمونه، از عمق ۰ تا ۱۰ سانتی‌متری نمونه‌برداری خاک صورت گرفت. نمونه‌های خاک بعد از انتقال به آزمایشگاه در هوای آزاد خشک شده و از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شد و پارامترهای بافت خاک به روش هیدرومتری، وزن مخصوص ظاهری

[1] Radiation Index

به روش کلوخه و پارافین، pH خاک با دستگاه pH متر الکتریکی، درصد رطوبت اشباع با استفاده از گل اشباع، نیتروژن به روش کجلدال، کربن آلی به روش اکسیداسیون دی‌کرومات، پتاسیم به‌وسیلهٔ دستگاه طیف‌سنج اتمی و فسفر قابل‌جذب به روش اولسن در آزمایشگاه آنالیز شد (جعفری حقیقی، ۱۳۸۲).

تجزیه‌وتحلیل داده‌ها

یکی از اساسی‌ترین مشکلات محققان، وجود هم‌خطی بین متغیرهای مستقل است. به‌منظور بررسی هم‌خطی متغیرهای محیطی از روش تحلیل خوشه‌ای سلسله‌مراتبی با استفاده از مربع همبستگی اسپیرمن در بستهٔ Hmisc در نرم‌افزار آماری R (Harrell, 2016) استفاده شد.

در پژوهش حاضر، برای ارزیابی توان تولیدی رویشگاه راش شرقی به کمک معیار ارتفاع غالب نسبت به متغیرهای محیطی از تکنیک جنگل تصادفی استفاده شد. جنگل تصادفی روشی قدرتمند است که پیشرفت‌های چشمگیری را در فناوری داده‌کاوی ارائه داده است، با این‌حال، این روش در مطالعات اکولوژیک به‌نسبت ناشناخته است. رویکرد جنگل تصادفی مبتنی بر روش‌های جدید ترکیب اطلاعات است که در آن تعداد زیادی درخت تصمیم ایجاد شده و سپس تمام درختان با هم برای پیش‌بینی ترکیب می‌شوند (Cutler *et al.*, 2007). زمانی که متغیرهای مستقل و وابسته مشخص شدند، جنگل‌های تصادفی با رویاندن یک درخت تصمیم شبیه CART شروع می‌شود. این درخت از چندین لحاظ با درخت CART استاندارد متفاوت است: نخست، از تمام داده‌های موجود و در دسترس برای رویاندن درخت استفاده نمی‌شود؛ در عوض از نمونهٔ bootstrap استفاده می‌کند که تنها ۶۶ درصد از داده‌های اولیه را شامل می‌شود. سپس یک متغیر پیشگو به‌طور تصادفی در خلال فرایند رویاندن، معرفی می‌شود. انتخاب متغیر مورد استفاده برای شکافتن یک گره در ساخت درخت به‌صورت تصادفی انجام می‌گیرد. پارامترهای کلیدی برای مدل جنگل تصادفی، تعداد درختان و تعداد متغیرهای پیشگو هستند. براساس این دو پارامتر، درخت تصمیم به بزرگ‌ترین اندازهٔ ممکن رویانده و بدون هرس رها می‌شود (Breiman, 2001). تعداد متغیرهای پیشگوی تصادفی را کاربر انتخاب می‌کند. کاهش تعداد متغیرهای پیشگو موجب ضعیف‌تر شدن هر درخت انفرادی می‌شود، با این‌حال، این کاهش متغیرها، همبستگی بین درختان را کاهش می‌دهد، که افزایش دقت و کاهش واریانس مدل را در پی دارد؛ به همین دلیل باید مقدار بهینهٔ این پارامتر را مشخص نمود، که برای محاسبه آن می‌توان از نمودار میزان خطا برحسب تعداد متغیر و همچنین فرمول p/3 استفاده کرد که در آن، p تعداد متغیرهای پیشگو است، (Hastie *et al.*, 2011). دیگر پارامتر تنظیمی، تعداد درختان در جنگل است. تعداد زیاد درختان سبب همگرا شدن خطا می‌شود. و برای محاسبهٔ آن می‌توان از نمودار میزان خطا برحسب تعداد درخت استفاده کرد (Hastie *et al.*, 2011). در مطالعهٔ حاضر برای تنظیم پارامترهای جنگل تصادفی از بستهٔ Caret (Kuhn, 2015) استفاده شد. نکتهٔ حائز اهمیت در خصوص تکنیک جنگل تصادفی این است که این مدل‌های بسیار قوی، ناپارامتری هستند، ازاین‌رو همانند مدل‌های رگرسیون خطی معادله ارائه نمی‌شود. چراکه این مدل‌ها خود، ترکیبی از درختان زیاد است، به همین دلیل تفسیر جنگل‌های تصادفی با مشکل تفسیر مواجه است. ولی برای حل این مشکل، خروجی‌های تکنیک جنگل تصادفی برحسب نمودار جزئی[1] و اهمیت نسبی متغیرها تفسیر می‌شوند (Birks, 2012). در روش نمودار جزئی، با ثابت نگه داشتن بقیهٔ متغیرها در مقدار میانگین، تنها تغییرات متغیر وابسته با تغییرات متغیر مورد نظر سنجیده می‌شود (Cutler *et al.*, 2007).

[1] Partial plot

از مدل رگرسیون خطی چندگانه و با استفاده از معیارهای جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، ضریب تبیین و ضریب تبیین تعدیل‌یافته (R^2_{adj}) برای قضاوت عملکرد تکنیک جنگل تصادفی استفاده شد. به‌منظور اعتبارسنجی جنگل تصادفی و مدل رگرسیون خطی چندگانه، از روش اعتبارسنجی متقابل 10-fold در نرم‌افزار آماری R استفاده شد. در این روش داده‌ها به ۱۰ قسمت تقسیم می‌شود؛ ۹ قسمت از داده‌ها برای مدلسازی و یک قسمت باقی‌مانده برای اعتبارسنجی مدل به‌دست‌آمده استفاده می‌شود. به این ترتیب، ۱۰ مرتبه این روش تکرار می‌شود (احمدی و همکاران، ۱۳۹۴). به‌منظور اجرای تکنیک جنگل تصادفی از نرم‌افزار آماری R 3.1.2 و بستهٔ randomForest (Liaw and Wiener, 2002) و به‌منظور اعتبارسنجی متقابل 10-fold از بسته caret استفاده شد. همچنین به‌منظور تعیین سهم هر یک از متغیرهای معنی‌دار در مدل رگرسیون از بستهٔ relaimpo (Grömping, 2006) در نرم‌افزار R استفاده شد.

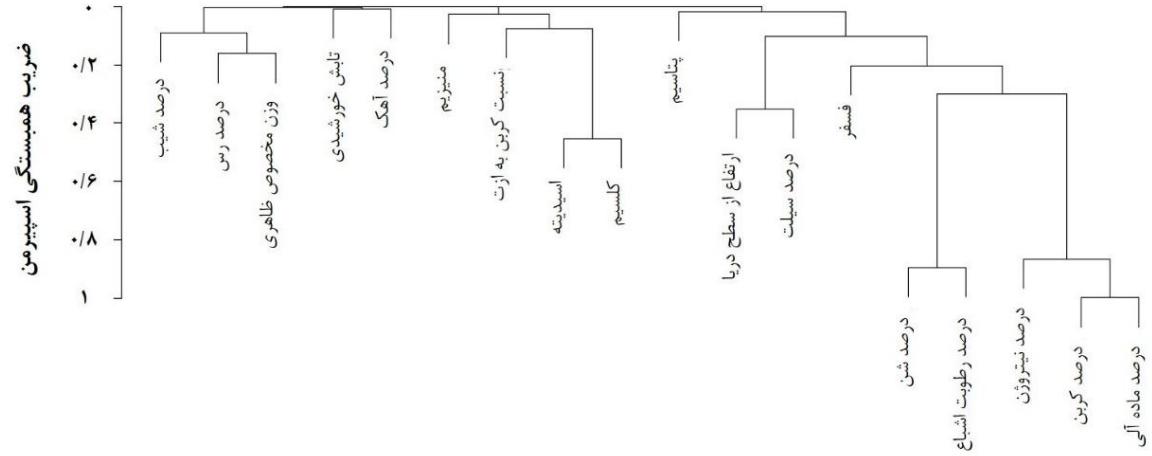
نتایج

در جدول ۱ آماره‌های حداقل، حداکثر، میانگین و انحراف معیار برای ارتفاع غالب گونهٔ راش و عوامل خاکی و فیزیوگرافی که برای پیش‌بینی ارتفاع غالب گونهٔ راش استفاده شد ارائه شده است.

جدول ۱- مقادیر حداقل، حداکثر، میانگین، انحراف معیار برای متغیرهای پاسخ و تبیینی

متغیرهای پاسخ و تبیینی	حداقل	حداکثر	میانگین	انحراف معیار
ارتفاع غالب (متر)	۳۶/۲۷	۴۷/۶۰	۴۲/۷۱	۲/۸۲
ارتفاع از سطح دریا (متر)	۴۷۰	۱۹۹۲	۱۲۲۳	۲۹۹
شیب (درصد)	۲	۸۰	۳۲	۱۴
شاخص تابش خورشیدی	۰	۱	۰/۵۱	۰/۳۶
شن (درصد)	۶/۵۰	۴۵/۴۲	۲۲/۷۵	۸/۰۲
رس (درصد)	۲۵/۵۱	۶۵/۵۱	۳۹/۷۱	۶/۵۹
سیلت (درصد)	۱۸/۴۲	۵۱/۱۴	۳۷/۵۰	۷/۷۲
وزن مخصوص ظاهری (گرم بر سانتی‌متر مکعب)	۱/۳۰	۲/۱۰	۱/۶۲	۰/۱۵
اسیدیته	۴/۰۳	۶/۸۶	۵/۱۵	۰/۶۰
رطوبت اشباع (درصد)	۴۳/۹۳	۵۵/۵۸	۴۹/۴۴	۱/۹۱
نیتروژن (درصد)	۰/۱۲	۰/۶۲	۰/۳۰	۰/۰۹
کربن (درصد)	۱/۵۷	۹/۳۶	۳/۸۶	۱/۴۵
مادهٔ آلی (درصد)	۲/۷۰	۱۶/۱۰	۶/۶۵	۲/۴۹
نسبت کربن به ازت	۹/۷۷	۲۰/۰۷	۱۲/۸۳	۱/۸۲
آهک (درصد)	۰/۶۳	۲/۲۹	۱/۱۵	۰/۲۴
پتاسیم (پی پی‌ام)	۱۷۶	۷۵۳	۳۳۲/۹۴	۱۱۴/۱۰
فسفر (پی پی‌ام)	۰/۰۱	۲۳/۸۱	۵/۱۳	۴/۲۵
منیزیم (پی پی‌ام)	۹۶	۷۰۰۸	۲۷۳۲/۸۴	۱۴۶۲/۷۹
کلسیم (پی پی‌ام)	۴۸۰	۱۲۱۶۰	۳۳۲۳/۵۱	۲۴۸۹/۷۹

بررسی هم‌خطی متغیرهای محیطی با استفاده از تحلیل خوشه‌ای و همبستگی اسپیرمن نشان می‌دهد که همبستگی قوی بین درصد شن و درصد رطوبت اشباع و درصد کربن، مادهٔ آلی و ازت وجود دارد (شکل ۱). براساس تحلیل خوشه‌ای و فاکتور تورم واریانس (VIF بزرگ‌تر از ۱۰)، متغیرهای درصد رطوبت اشباع، درصد شن، درصد کربن، درصد مادهٔ آلی حذف و بقیهٔ متغیرها حفظ شد.



شکل ۱- تحلیل خوشه‌ای متغیرهای تبیینی با استفاده از مربع همبستگی اسپیرمن

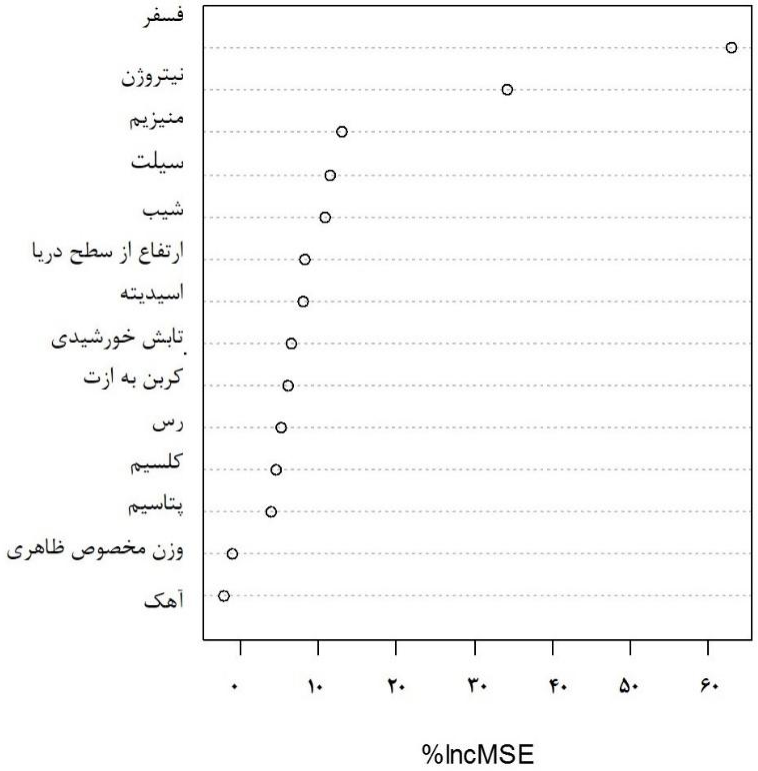
گزینش متغیرها با استفاده از روش گام‌به‌گام و معیار اطلاعاتی بیزین در مدل رگرسیون خطی چندگانه نشان داد که متغیرهای درصد نیتروژن، فسفر، درصد شیب، تابش خورشیدی و منیزیم، متغیرهای مهم و تأثیرگذار بر ارتفاع غالب گونهٔ راش تشخیص داده شدند. با مراجعه به جدول ۲ ملاحظه می‌شود که درصد نیتروژن و فسفر مهم‌ترین متغیر در تغییرات ارتفاع غالب گونهٔ راش هستند و متغیرهای تابش خورشیدی و منیزیم کمترین سهم را در توجیه تغییرات ارتفاع غالب دارند. معیارهای ارزیابی عملکرد مدل رگرسیون خطی چندگانه در جدول ۳ ارائه شده است. نتایج مطالعهٔ حاضر نشان می‌دهد که با استفاده از مدل رگرسیون خطی چندگانه ۴۰/۵۴ درصد از تغییرات در ارتفاع غالب گونهٔ راش با استفاده از متغیرهای اثرگذار توجیه می‌شود.

جدول ۲- اهمیت نسبی متغیرهای پیشگوی مهم در مدل رگرسیون خطی چندگانه

متغیرهای پیشگو	درصد نیتروژن	فسفر	درصد شیب	تابش خورشیدی	منیزیم
اهمیت نسبی (درصد)	۲۹/۹۷	۲۶/۵۹	۲۲/۵۸	۱۳/۳۶	۶/۵۰

در خصوص تکنیک جنگل تصادفی اشاره شد که پارامترهای کلیدی برای الگوریتم جنگل تصادفی، تعداد درختان و تعداد متغیرهای پیشگو برای گره هستند. بدین منظور ۲ تا ۱۴ متغیر پیشگو و ۵۰۰ تا ۲۵۰۰ درخت تهیه شد. بهترین ترکیب این دو پارامتر با استفاده از جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) تعیین شد. نتایج نشان داد که تعداد بهینهٔ متغیر تصادفی و تعداد بهینهٔ درخت که کمترین مقدار RMSE را داشته‌اند به‌ترتیب ۶ و ۱۷۵۰ است و براساس این دو پارامتر، تکنیک جنگل تصادفی اجرا

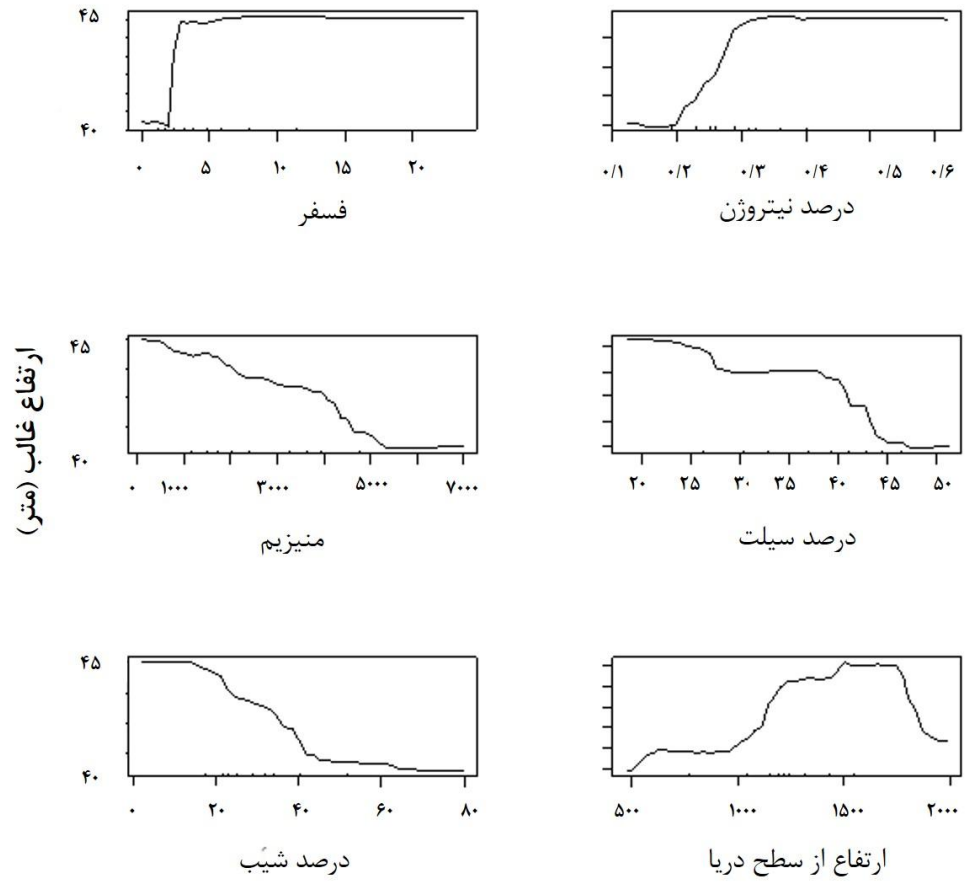
شد. نتایج عملکرد الگوریتم تکنیک جنگل تصادفی در جدول ۳ ارائه شده است. با توجه به مقدار ضریب تبیین حدود ۹۰ درصد می‌توان ارتفاع غالب گونهٔ راش را نسبت به متغیرهای محیطی به‌خوبی مدلسازی کرد. در شکل ۲ رتبه‌بندی متغیرهای لحاظ‌شده در تکنیک جنگل تصادفی با به‌کارگیری معیار اهمیت نسبی ارائه شده است که در آن فسفر و درصد نیتروژن مهم‌ترین متغیر در توجیه تغییرات ارتفاع غالب گونهٔ راش هستند. از طرف دیگر، وزن مخصوص ظاهری و درصد آهک کمترین تأثیرگذاری را بر ارتفاع غالب گونهٔ راش دارند. با توجه به اینکه تعداد بهینه متغیر تصادفی برای جنگل تصادفی ۶ به‌دست آمده است، وابستگی جزئی که تأثیر هر یک از این متغیرهای مهم را در مدل جنگل تصادفی نشان می‌دهد در شکل ۳ ارائه شده است. ازآنجا که مدل جنگل تصادفی کارایی بهتری نسبت به مدل رگرسیون خطی دارد، تغییرات ارتفاع غالب گونهٔ راش نسبت به هر یک از شش متغیر اثرگذار براساس اهمیت این متغیرها بررسی شد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، با افزایش مقادیر فسفر و همچنین درصد نیتروژن، ارتفاع غالب گونهٔ راش در ابتدا سیر صعودی دارد و سپس ثابت می‌شود. برای متغیرهای منیزیم و درصد سیلت و درصد شیب روند تغییرات نزولی است، به‌طوری که با افزایش این متغیرها، ارتفاع غالب گونهٔ راش کاهش می‌یابد. برای متغیر ارتفاع از سطح دریا منحنی پاسخ گونهٔ راش به‌صورت تک‌نمایی است، بدین معنا که با افزایش ارتفاع از سطح دریا، ارتفاع غالب گونهٔ راش تا ارتفاع ۱۵۰۰-۱۸۰۰ متر از سطح دریا به بیشترین مقدار خود می‌رسد و پس از آن روند نزولی دارد.



شکل ۲- نمودار اهمیت نسبی متغیرها در تکنیک جنگل تصادفی

جدول ۳- معیارهای ارزیابی مدل برای تکنیک جنگل تصادفی و مدل رگرسیون خطی چندگانه

مدل	مدلسازی				اعتبارسنجی			
	R^2 (%)	R^2adj (%)	RMSE	RMSE (%)	R^2 (%)	R^2adj (%)	RMSE	RMSE (%)
مدل رگرسیون خطی چندگانه	۴۰/۵۴	۳۷/۷۹	۲/۱۶	۵/۰۶	۳۳/۸۲	۳۰/۷۵	۲/۲۹	۵/۳۶
تکنیک جنگل تصادفی	۸۹/۵۲	۸۸/۹۳	۰/۸۹	۲/۰۸	۵۴/۲۳	۵۱/۶۷	۱/۹۲	۴/۴۹



شکل ۳- نمودار وابستگی جزیی متغیرهای مهم در تکنیک جنگل تصادفی

بحث

هدف مطالعهٔ حاضر، ارزیابی عملکرد ارتفاع غالب گونهٔ راش شرقی نسبت به متغیرهای خاکی و فیزیوگرافی با بهره‌گیری از مدل جنگل تصادفی بوده است. مقایسهٔ مدل‌ها با استفاده از رایج‌ترین معیارهای ارزیابی مدل همانند معیارهای ضریب تبیین، ضریب تبیین تعدیل‌یافته و جذر میانگین مربعات خطا و درصد آن و همچنین اعتبارسنجی مدل‌های رگرسیون خطی و تکنیک جنگل تصادفی با استفاده از تکنیک 10-fold نشان داد که اختلاف چشمگیری بین این دو مدل وجود دارد؛ ازاین رو می‌توان گفت تکنیک جنگل تصادفی با توجه به جمیع معیارهای ارزیابی، کارایی بهتری نسبت به مدل رگرسیون خطی دارد (جدول ۳). نتایج این تحقیق با نتایج پژوهش‌های دیگر (فکور،

۱۳۹۳؛ فلاح و همکاران، ۱۳۹۳؛ Garzon *et al.*, 2006؛ Vincenzi *et al.*, 2011؛ Vorpahl *et al.*, 2012؛ Oliveira *et al.*, 2012) مبنی بر کارایی بهتر روش جنگل تصادفی مطابقت دارد.

نتایج این مطالعه نشان داد که تکنیک جنگل تصادفی توانست در حدود ۹۰ درصد تغییرات در ارتفاع غالب گونهٔ راش را توجیه کند که حاکی از کارایی مناسب آن در بررسی پاسخ این گونه به متغیرهای محیطی است. به‌طور معمول، فرضیه‌های مرتبط با پراکنش، وفور و عملکرد گونه‌های گیاهی نسبت به متغیرهای محیطی با بهره‌گیری از مدل رگرسیون حداقل مربعات ارزیابی می‌شود. تجزیه‌وتحلیل داده‌های پیچیدهٔ اکولوژیکی نیازمند روش‌های تحلیلی قوی و انعطاف‌پذیر است. تحقیق حاضر نشان می‌دهد که به‌کارگیری روش جنگل تصادفی برای شناسایی متغیرهای مهم و تأثیرگذار بر ارتفاع غالب گونهٔ راش مؤثر است. از الگوریتم جنگل تصادفی در مطالعات متعدد برای پیش‌بینی مناسب بودن زیستگاه برای گونه‌های گیاهی و جانوری استفاده شده است (Iverson *et al.*, 2005؛ Lawler *et al.*, 2006؛ Benito Garzón *et al.*, 2008). توان تولیدی رویشگاه حاصل عوامل زنده و غیرزنده و برهمکنش این عوامل در رویشگاه است که فقط برخی از این عوامل قابل شناسایی و اندازه‌گیری است (Herrera *et al.*, 1999). عوامل اقلیمی، خاکی و فیزیوگرافی از جمله متغیرهای اکولوژیک مورد استفاده در بسیاری از مطالعات شاخص توان تولید رویشگاه‌اند (Bravo *et al.*, 2011). در مطالعهٔ حاضر با توجه به در دسترس نبودن متغیرهای اقلیمی، تنها تأثیر عوامل خاکی و فیزیوگرافی بر توان تولیدی رویشگاه بررسی شده است که در آن تعدادی از عوامل خاکی و فیزیوگرافی تأثیر معنی‌داری بر توان تولید رویشگاه راش داشتند. این نتایج با بررسی‌های Aertsen *et al.* (2011)، Hererra *et al.* (1999) و Herrera-Fernández *et al.* (2004) که در آن عوامل خاکی و فیزیوگرافی بر عملکرد گونه‌های گیاهی تأثیر داشته است، همخوانی دارد.

همان‌طور که اشاره شد تعداد بهینهٔ متغیر تصادفی برای جنگل تصادفی شش متغیر محاسبه شده است، بر این اساس شش متغیر فسفر، درصد نیتروژن، منیزیم، درصد سیلت، درصد شیب و ارتفاع از سطح دریا نسبت به سایر متغیرها از اهمیت بیشتری برخوردارند. محققان بسیاری به تأثیر ارتفاع از سطح دریا بر عملکرد گونه‌های گیاهی اشاره کرده‌اند (Fontes *et al.*, 2003; Monserud *et al.*, 1990). نمودار وابستگی جزئی برای ارتفاع از سطح دریا یافته‌های مروی مهاجر (۱۳۵۵)، Gulisashvili *et al.* (1975) و علوی و همکاران (۱۳۹۰) را در خصوص مقدار بهینه ارتفاع از سطح دریا برای رشد و بقای راش در جنگل‌های هیرکانی تأیید می‌کند. پراکنش گونه‌ها در طول گرادیان ارتفاعی، تحت تأثیر فاکتورهای متعددی از جمله عوامل اقلیمی قرار می‌گیرد. به‌علاوه ارتفاع یک گرادیان کمپلکس را نشان می‌دهد که در طول آن متغیرهای محیطی زیادی همزمان تغییر می‌کند. همان‌طور که اشاره شد گونهٔ راش در منطقهٔ تحقیق در ارتفاعات میان‌بند دارای بهترین عملکرد است که نشان‌دهندهٔ شرایط اپتیمال در این ارتفاعات است. فرضیه‌های متعددی در این خصوص پیشنهاد شده است؛ برای مثال شرایط رطوبتی اپتیمال و همچنین توان تولید زیاد در منطقهٔ میان‌بند در نتیجهٔ دسترسی اپتیمال به منابع. اکثر گونه‌ها دامنهٔ ارتفاعات میان‌بند را به‌دلیل ترکیب بهینه از منابع محیطی می‌پسندند (Rosenzwieg, 1995; Rahbek, 1995, 1997; Lomolino, 2001; Brown, 2001). راش گونه‌ای است که به رطوبت زیاد هوا و محیط خنک نیازمند است (گرجی بحری و ثاقب طالبی، ۱۳۷۱؛ Sagheb Talebi, 1995) که در ارتفاعات پایین به‌دلیل گرم‌تر بودن و رطوبت کمتر شرایط مناسب برای حضور گونهٔ راش وجود ندارد. در این مطالعه مشاهده شده است که راش‌هایی که در ارتفاعات

پایین بر گونه‌های دیگر غلبه یافته‌اند، در شیب‌های شمالی و رو به دریای خزر پراکنش یافته‌اند که نشان‌دهندهٔ بهره‌گیری از رطوبت دریا و گریز از محیط‌های گرم‌تر است. کاهش تعداد پایه‌های راش در ارتفاعات بیش از ۱۷۰۰ متر می‌تواند تا حدودی به دلیل محدودیت‌های اکوفیزیولوژیکی نظیر کاهش فصل رشد، درجه حرارت کم و توان تولید کم اکوسیستم در ارتفاعات بالا باشد (احمدی و همکاران، ۱۳۹۴).

متغیر دیگر تأثیرگذار بر توان تولید راش بافت خاک است. بافت خاک کنترل حرکت آب در خاک را تحت تأثیر قرار می‌دهد و عامل مهمی در دسترس بودن مواد مغذی و یک عامل در پتانسیل فرسایش خاک است؛ ازاین رو می‌تواند تأثیر زیادی در حاصلخیزی رویشگاه داشته باشد. درصد سیلت از مؤثرترین متغیرهای اثرگذار بر ارتفاع غالب گونهٔ راش است. در مطالعهٔ حاضر رفتار گونهٔ راش نسبت به درصد سیلت، کاهشی است. نتایج مطالعهٔ حاضر با پژوهش متاجی (۱۳۸۲) که در آن درصد سیلت یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر در گسترش جامعهٔ راش بیان شد، مطابقت دارد. گونهٔ راش نسبت به متغیرهای درصد سیلت و درصد رس (هرچند تأثیر بسیار کمی بر عملکرد گونهٔ راش داشته است) رفتاری کاهنده دارد. حبیبی کاسب (۱۳۵۳) بیان می‌دارد مقدار سیلت خاک می‌تواند در میزان رویش و ارتفاع درختان راش مؤثر باشد. نتایج این پژوهش با مطالعهٔ حبیبی کاسب (۱۳۵۳) و علوی و همکاران (۱۳۹۲) که بیان کردند گونهٔ راش ایران از خاک‌های خیلی رسی گریزان است مطابقت دارد. با مکان‌یابی مقدار بهینهٔ درصد سیلت و درصد رس در نمودار وابستگی جزئی و قرار دادن آن در مثلث بافت خاک ملاحظه می‌شود که گونهٔ راش بهترین عملکرد را در بافت رسی لومی دارد. در خاک‌های خیلی شنی به‌طور معمول نفوذ آب سریع‌تر و نگهداری آب کم است. در مقایسه، خاک‌های با اندازهٔ ذرات کوچک‌تر (رسی لومی) خلل و فرج کوچک‌تر و جذب آب کندتری داشته و نسبت به خاک‌های شنی ظرفیت نگهداری رطوبت بیشتری دارند.

در زمینهٔ شیب مشاهده می‌شود که گونهٔ راش در شیب‌های کم دارای بهترین عملکرد است. شیب یک فاکتور مهم توپوگرافی در رابطه با رواناب و فرسایش خاک است. انتظار می‌رود با افزایش شیب دامنه، اتلاف خاک نیز در نتیجهٔ افزایش حجم و سرعت رواناب سطحی افزایش یابد و سبب شود در درازمدت پدیدهٔ خاک‌سازی کمتر اتفاق افتد. Zingg (1940) نشان داد که میزان فرسایش در واحد سطح با دوبرابر شدن درجه شیب، ۲/۸ برابر افزایش می‌یابد. در اراضی پرشیب، فرصت نفوذ آب کم است و نزولات جوی به‌صورت هرزاب حرکت می‌کند و در درازمدت، پدیدهٔ خاک‌سازی کمتر اتفاق می‌افتد. با توجه به اینکه گونهٔ راش به خاک عمیق با زهکشی مناسب احتیاج دارد (گرجی بحری و ثاقب طالبی، ۱۳۷۱؛ Sagheb Talebi, 1995) در اراضی پرشیب که عمق خاک کم است، شرایط مطلوب برای استقرار گونهٔ راش وجود ندارد.

براساس نتایج این پژوهش با افزایش مقدار درصد نیتروژن تا ۰/۳ درصد ارتفاع غالب گونهٔ راش افزایش می‌یابد، اما پس از آن روند ثابت دارد. از طرفی دیگر، رفتار گونهٔ راش نسبت به متغیر C/N (هرچند سهم کمی در توجیه تغییرات دارد) کاهشی است. افزایش نیتروژن در خاک سبب کاهش نسبت C/N می‌شود. نسبت کربن به نیتروژن یکی از شاخص‌های مهم معدنی شدن و حاصلخیزی خاک است که می‌تواند در مورد غنی بودن نیتروژن هوموس و فعالیت خاک‌ها اطلاعاتی ارائه دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش نیتروژن و طبیعتاً کاهش نسبت کربن به نیتروژن فعالیت میکروارگانیسم‌های خاک بیشتر می‌شود و عملیات تجزیهٔ لاشبرگ سریع‌تر صورت می‌گیرد (حبیبی کاسب، ۱۳۷۱، شعبانی و همکاران، ۱۳۹۰)؛ در نتیجه رشد ارتفاعی گونهٔ راش افزایش

می‌یابد. مروی مهاجر (۱۳۸۴) بیان می‌کند که گونهٔ راش در خاک‌های با کربن کم و طبیعتاً نسبت کربن/نیتروژن کم، استقرار و رشد بهتری نسبت به مناطق دارای کربن بیشتر دارد.

در خصوص منیزیم باید اشاره داشت که این ماده تنها عنصر فلزی موجود در کلروفیل است و به‌طور غیرمستقیم در متابولیسم و فتوسنتز درختان تأثیر دارد. منیزیم در فعالیت آنزیم‌ها در گیاهان نیز تأثیر دارد و حامل‌های فسفری را که در جذب سایر عناصر مؤثرند فعال می‌کند. وقتی مقدار منیزیم تبادلی از حدی تجاوز کند pH خاک ممکن است خیلی افزایش یابد و قلیایی شود. در اینجا سمیت منیزیم و خطرهای ناشی از pH در این خاک‌ها مشاهده می‌شود. از طرف دیگر، عوارض ناشی از کمبود کلسیم می‌تواند با زیادی منیزیم تشدید شود که سبب تشدید عوارضی در درختان می‌شود. حبیبی کاسب (۱۳۵۴) اشاره می‌کند که نهال‌های جوان گونهٔ راش به ازت و کلسیم بسیار حساس‌اند و در مقابل این عناصر به‌آسانی واکنش نشان می‌دهند.

در مطالعهٔ حاضر فسفر و نیتروژن مهم‌ترین متغیر تأثیرگذار بر عملکرد گونهٔ راش بوده است. علوی و همکاران (۱۳۹۲) در بررسی اوت اکولوژی گونهٔ راش به این نتیجه رسیدند که فسفر و نیتروژن از متغیرهای مهم برای گونهٔ راش بوده‌اند. نتایج مطالعهٔ حاضر نشان می‌دهد که در منطقهٔ تحقیق برای گونهٔ راش تا مقدار معینی فسفر (در حضور متغیرهای دیگر) افزایش رشد ارتفاعی گونهٔ راش اتفاق می‌افتد و از آن به بعد تأثیر آن بسیار کم و ناچیز است (البته هر گونه تفسیر باید تنها در محدودهٔ حداقل و حداکثر متغیرهای محیطی اندازه‌گیری‌شده صورت گیرد). حداکثر رشد ارتفاعی گونهٔ راش در بیشتر از ۱۰ پی‌پی‌ام فسفر مشاهده شده است. فسفر ماده‌ای است که اهمیت ویژه‌ای در جوانه زدن بذر، تسریع رشد ریشه و فرایندهای رسیدن دانه و میوه دارد. فسفر برای تقسیم سلول و رشد بافت‌های مریستمی ضروری است. کمبود فسفر سبب کاهش شدید در رشد درخت می‌شود. در صورت کمبود فسفر هم رشد بخش هوایی و هم ریشه کند یا متوقف می‌شود. علاوه‌بر این، فسفر در جذب عناصر کم‌مصرف فلزی توسط ریشه گیاه نیز تأثیر افزاینده دارد. در خاک‌هایی که فسفر قابل جذب آنها کم است، مقاومت گیاه در برابر سرما نیز کاهش می‌یابد.

تکنیک جنگل تصادفی به‌دلیل دقت بسیار زیاد طبقه‌بندی، داشتن روش جدید در تعیین اهمیت متغیر، توانایی مدلسازی اثرهای متقابل پیچیده میان متغیرهای پیش‌بینی‌کننده، انعطاف‌پذیری برای اجرای انواع مختلف تجزیه وتحلیل داده های آماری از جمله رگرسیون، طبقه‌بندی و یک الگوریتم برای محاسبهٔ داده‌های ازدست‌رفته، روش قدرتمندی در داده‌کاوی است که آن را از سایر روش‌ها متمایز می‌کند (Cutler *et al.*, 2007). همچنین زمانی که اثرهای متقابل پیچیده بین متغیرهای پیشگو و متغیر پاسخ وجود دارد و همچنین زمانی که متغیرهای پیشگو هم‌خطی زیادی با هم دارند به‌کارگیری مدل جنگل تصادفی برای پیش‌بینی پراکنش (وقوع و وفور) یک گونهٔ بسیار مفید است. مزیت دیگر مدل جنگل تصادفی این است که نیازمند فرض نرمالیته نیست و می‌تواند به روابط غیرخطی نیز بپردازد.

در پایان باید اشاره کرد که تجزیه‌وتحلیل داده‌های پیچیدهٔ اکولوژیکی نیازمند روش‌های تحلیلی انعطاف‌پذیر و قوی است. علاوه‌بر این، درک و ارائهٔ نتایج توسط این روش‌ها باید ساده و به‌راحتی تفسیرپذیر باشد. در سال‌های اخیر انواع روش‌های مدلسازی که به روش‌های یادگیری ماشین معروف‌اند، با استفاده از متغیرهای محیطی، برای پیش‌بینی توان تولیدی رویشگاه، توسعه یافته است. در خاتمه باید خاطرنشان کرد که بیان ریاضی روابط بین متغیرهای محیطی و مشخصه‌های بیولوژیکی و بیوفیزیکی تنها کمکی برای تفسیر مشاهدات میدانی است، زیرا در اکوسیستم‌های جنگلی به‌دلیل پویایی عوامل زیستی، حتی قوی‌ترین

روابط همبستگی نیز چه در مطالعات استاتیک و چه در مطالعات دینامیک نمی‌توانند قطعی فرض شوند.

منابع

احمدی، کوروش، سید جلیل علوی و مسعود طبری کوچکسرایی، ۱۳۹۴. ارزیابی توان تولید رویشگاه راش شرقی (*Fagus orientalis L.*) با استفاده از مدل جمعی تعمیم‌یافته (مطالعه موردی: جنگل آموزشی و پژوهشی دانشگاه تربیت مدرس)، مجلهٔ جنگل ایران، ۷ (۱): ۱۷-۳۲.

ثاقب‌طالبی، خسرو، تکتم ساجدی و فرشاد یزدیان، ۱۳۸۳. نگاهی به جنگل‌های ایران، انتشارات موسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع، ۲۸ ص.

جعفری حقیقی، مجتبی، ۱۳۸۲. روش‌های تجزیهٔ خاک، انتشارات ندای ضحی، ۲۳۶ ص.

حبیبی‌کاسب، حسین، ۱۳۵۳. بررسی تأثیر بافت خاک در میزان رویش راش ایران، نشریهٔ دانشکدهٔ منابع طبیعی دانشگاه تهران، ۳۱: ۶۰-۷۰.

حبیبی‌کاسب، حسین، ۱۳۵۴. بررسی وضعیت ازت، فسفر، پتاسیم و کلسیم خاک راشستان های شمال ایران و نقش آن‌ها در میزان رویش راش، نشریهٔ دانشکدهٔ منابع طبیعی دانشگاه تهران، ۳۲: ۴۷-۶۲.

حبیبی‌کاسب، حسین، ۱۳۷۱. مبانی خاک‌شناسی جنگل، انتشارات دانشگاه تهران، ۴۲۴ ص.

حسینی، سید محسن، خسرو ثاقب‌طالبی، مسلم اکبری‌نیا، و مجید مخدوم، ۱۳۷۹. بررسی روش‌های ارزیابی توان اکولوژیک جنگل، مجلهٔ محیط‌شناسی، ۲۵: ۵۹-۶۶.

سرمدیان، فریدون و محمد جعفری، ۱۳۸۰. بررسی خاک‌های جنگلی ایستگاه تحقیقاتی آموزشی دانشکدهٔ منابع طبیعی دانشگاه تهران، مجلهٔ منابع طبیعی، ویژه نامهٔ سال ۱۳۸۰، ۱۱۱ ص.

شعبانی، سعید، مسلم اکبری نیا، سیدغلامعلی جلالی و علیرضا علی عرب، ۱۳۹۰. تأثیر اندازه روشنه‌های تاج پوشش بر تنوع گونه‌های چوبی در جنگل‌های کوهستانی شمال کشور مطالعه موردی: راشستان‌های لالیس چالوس، فصلنامه تحقیقات جنگل و صنوبر ایران، ۴۳ (۱): ۷۳-۸۲.

علوی، سید جلیل، قوام‌الدین زاهدی امیری، رامین رحمانی، محمدرضا مروی مهاجر، بارت مویس و جعفر فتحی، ۱۳۹۰. تعیین مقدار بهینه و دامنهٔ بوم شناختی درخت راش (*Fagus orientalis*) با استفاده از تابع گوسی در جنگل آموزشی و پژوهشی خیرود نوشهر، مجلهٔ محیط زیست طبیعی (منابع طبیعی ایران)، ۶۴ (۴): ۳۹۹-۴۱۵.

علوی، سید جلیل، قوام‌الدین زاهدی امیری، رامین رحمانی، محمدرضا مروی مهاجر، بارت مویس و زهرا نوری، ۱۳۹۲. بررسی واکنش گونهٔ راش به برخی متغیرهای محیطی با استفاده از تابع بتا و مقایسهٔ آن با تابع گوسی (مطالعهٔ موردی: جنگل آموزشی و پژوهشی خیرود)، مجلهٔ جنگل ایران، ۵ (۲): ۱۶۱-۱۷۱.

فکور، احسان، ۱۳۹۳. ارزیابی توان تولید رویشگاه راش شرقی با استفاده از تکنیک‌های داده‌کاوی (درخت تصمیم). پایان‌نامهٔ کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس، ۷۹ ص.

فلاح، اصغر، سیاوش کلبی، شعبان شتایی و امید کرمی، ۱۳۹۳. تعیین قابلیت داده‌های سنجندهٔ ASTER و روش‌های درخت طبقه‌بندی و رگرسیونی و جنگل تصادفی در تهیهٔ نقشهٔ تیپ جنگل، مجلهٔ جنگل و فراورده‌های چوب، ۶۷ (۴): ۵۷۳-۵۸۴.

گرجی بحری، یوسف و خسرو ثاقب طالبی، ۱۳۷۱. تأثیر یخبندان دیررس بهاره بر جنگل‌های راش گلبند، مجله پژوهش و سازندگی، ۱۵: ۱۸-۲۱

متاجی، اسدالله، ۱۳۸۲. طبقه بندی رویشگاه براساس جوامع گیاهی، ساختار توده و وضعیت فیزیکی و شیمیایی خاک در جنگل‌های طبیعی. پایان‌نامهٔ دکتری، دانشگاه آزاد اسلامی، ۱۶۴ ص.

مروی مهاجر، محمد رضا، ۱۳۵۵. بررسی خواص کیفی راشستان‌های شمال کشور، نشریهٔ دانشکدهٔ منابع طبیعی دانشگاه تهران، ۳۴: ۷۷-۹۶.

مروی مهاجر، محمد رضا، ۱۳۸۴. جنگل شناسی و پرورش جنگل، انتشارات دانشگاه تهران، ۳۸۷ ص

Aertsen, W., V. Kint, B. De Vos, J. Deckers, J. Van Orshoven, and B. Muys, 2010. Comparison and ranking of different modelling techniques for prediction of site index in Mediterranean mountain forests, *Ecological Modeling*, 221(8): 1119-1130.

Aertsen, W., V. Kint, J. Van Orshoven, and B. Muys, 2011. Evaluation of modelling techniques for forest site productivity prediction in contrasting ecoregions using stochastic multicriteria acceptability analysis (SMAA), *Environmental Modelling and Software*, 26(7): 929-937.

Alder, D., 1980. Forest Volume Estimation and Yield Prediction, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 194 pp.

Benito Garzón, M., R. Sánchez De Dios, and H. Sainz Ollero, 2008. Effects of climate change on the distribution of Iberian tree species, *Applied Vegetation Science*, 11: 169–178.

Bergès, L., R. Chevalier, Y. Dumas, A. Franc, and J.M, Gilbert, 2005. Sessile oak (*Quercus petraea* Liebl.) site index variations in relation to climate, topography and soil in even-aged high-forest stands in northern France, *Annals of forest science*, 62(5): 391-402.

Birks, H. J.B., 2012. Overview of numerical methods in palaeolimnology. In: Tracking environmental change using lake sediments, Springer Netherlands, 19-92.

Bravo, F., M. Lucà, R. Mercurio, M. Sidari, and A. Muscolo, 2011. Soil and forest productivity: a case study from Stone pine (*Pinus pinea* L.) stands in Calabria (southern Italy), *iForest*, 4: 25-30.

Breiman, L., 2001. Random forests, *Machine learning*, *45*(1): 5-32.

Brown, J., 2001. Mammals on mountainsides: elevational patterns of diversity. *Global Ecology and Biogeography*, 10:101-109.

Crawford, S., 1989. Extensions to the CART algorithm, *International Journal of Man-Machine Studies*, 31(2): 197-217.

Cutler, D.R., TC. Edwards, K.H. Beard, A. Cutler,and K.T. Hess, 2007. Random Forests for Classification in Ecology, *Ecology*, 88 (11): 2783-2792.

Fontes, L., M. Tome, F. Thompson, A. Yeomans, J.S. Luis, and P. Savill, 2003. Modelling the Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco) site index from site factors in Portugal, *Forestry*, 76(5): 491-507.

Garzon, M.B., R. Blazek, M. Neteler, R.S. De Dios, H.S. Ollero, and C. Furlanello, 2006. Predicting habitat suitability with machine learning models: the potential area of *Pinus sylvestris* L. in the Iberian Peninsula, *Ecological Modelling*, 197(3): 383-393.

Grömping, U., 2006. Relative Importance for Linear Regression in R: The Package relaimpo, *Journal of Statistical Software*, 17(1):1-27.

Grossmann, E., J. Ohmann, J. Kagan, H. May, and M. Gregory, 2010. Mapping ecological systems with a random foret model: tradeoffs between errors and bias, *Gap Analysis Bulletin*, 17: 16-22.

Gulisashvili, V.Z., L.B. Makhatadze, and L.I. Prilipko, 1975. Vegetation of the Caucasus. *Moscow*, 73-86.

Harrell Jr, F. E., 2016. Hmisc: Harrell Miscellaneous. R package version 3.17-2. https://CRAN.R-project.org/package=Hmisc

Hastie, T.J., R.J. Tibshirani, and J.H. Friedman, 2011. The elements of statistical learning: data mining, inference, and prediction, Springer, 745 pp.

Herrera, B.J., J. Campos, B. Finegan, and A. Alvarado, 1999. Factors affecting site productivity of a Costa Rican secondary rain forest in relation to *Vochysia ferruginea* a commercially valuable canopy tree species, *Forest Ecology and Management*, 118(1): 73-81.

Herrera-Fernández, B., J.J. Campos, and C. Kleinn, 2004. Site productivity estimation using height-diameter relationships in Costa Rican secondary forests, *Investigación Agraria, Sistemasy Recursos Forestales*, 13 (2): 295-303.

Hoog, B.W., and M.R. Nester, 1991. Effect of stocking rate on predominant height of young Caribbean pine plantations in coastal Queensland, *Australian Forestry*, 54(3): 134-138.

Iverson, L.R., M.W. Schwartz, and A.M. Prasad, 2005. Potential colonization of newly available tree-species habitat under climate change: an analysis for five eastern US species, *Landscape Ecology*. 19: 787–799.

Kuhn, M., 2015. Caret: classification and regression training, *Astrophysics Source Code Library*, 1: 05003.

Latifi, H., and B. Koch, 2012. Evaluation of most similar neighbor and random forest methods for imputing forest inventory variables using data from target and auxiliary stands, *International Journal of Remote Sensing*, 33(21): 6668-6694.

Lawler, J.J., D. White, R.P. Neilson, and A.R. Blaustein, 2006. Predicting climate-induced range shifts: model differences and model reliability, *Global Change Biology*, 12: 1568–1584.

Liaw, A., M. Wiener, 2002. Classification and Regression by randomForest, *R News* 2(3): 18-22.

Lomolino, M.V. 2001. Elevation gradients of species-density: historical and prospective views, *Global Ecology and Biogeography*, 10:3-13.

McCLintock, M.J., and C.A. Bickford, 1957. A proposed site index for red spruce in the northeast, Northeastern forest experiment station publication, 30 pp.

Monserud, R.A., U. Moody, and D.W. Breuer, 1990. A soil-site study for inland Douglas-fir, *Canadian Journal of Forest Research*, 20(6): 686-695.

Oliveira, S., F. Oehler, J. San-Miguel-Ayanz, A. Camia, and J.M. Pereira, 2012. Modeling spatial patterns of fire occurrence in Mediterranean Europe using Multiple Regression and Random Forest, *Forest Ecology and Management*, 275: 117-129.

Rahbek, C., 1995. The elevation al gradient of species richness: a uniform pattern?, *Ecography* 18: 200-205.

Rahbek, C., 1997. The relationship among area, elevation and regional species richness in neotropical birds, *American Naturalist*, 149:875-902.

Rosenzweig, M.L., 1995. Species Diversity in Space and Time, Cambridge University Press, 460 pp.

Sagheb-Talebi, K., 1995. Quantitative und qualitative Merkmale von Buchenjungwüchsen (*Fagus sylvatica* L.) unter dem Einfluss des Lichtes und anderer Standortsfaktoren (Doctoral dissertation, Diss. Naturwiss. ETH Zürich, Nr. 11257, 1995. Ref.: J.-Ph. Schütz; Korref.: G. Aas; Korref.: A. Roloff), 219pp.

Vanclay, J.K., 1992. Assessing site productivity in tropical moist forests: a review, *Forest Ecology and Management*, 54(1): 257-287.

Vincenzi, S., M. Zucchetta, P. Franzoi, M. Pellizzato, F. Pranovi, G.A. De Leo, and P. Torricelli. 2011. Application of a Random Forest algorithm to predict spatial distribution of the potential yield of *Ruditapes philippinarum* in the Venice lagoon, Italy, *Ecological Modelling*, 222(8): 1471-1478.

Vorpahl, P., H. Elsenbeer, M. Märker, and B. Schröder, 2012. How Can Statistical Models Help to Determine Driving Factors of Landslides?, *Ecological Modelling*, 239 (1): 27-39.

Zingg, A.W., 1940. Degree and length of land slope as its affects soil loss in runoff, *Journal of Agricultural Engineering*, 21: 56-64.

Determining the most important environmental variables affecting on oriental beech (*Fagus orientalis* Lipsky.) site productivity using random forest technique in Khayroud forest, Nowshar

S.J. Alavi[1]*, Z. Nouri[2], and Gh. Zahedi Amiri[3]

[1]Assistant Prof. of Forestry, Faculty of Natural Resources and Marine Sciences, Tarbiat Modares University, I. R. Iran
[2] PhD. of Forestry, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, I. R. Iran
[3] Prof. of Forestry, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, I. R. Iran

(Received: 27 April 2016; Accepted: 5 September 2016)

Abstract

Studying the relationship between site productivity, as a key indicator in forest management, and environmental variables is an important issue in forestry. In the past, studying such a relationship was done using linear regression model, but nowadays ensemble techniques like random forest are used. A stratified random sampling method based on landform was used to locate 114 0.1 ha circular sample plots in beech dominated forests. The height of five largest diameter beech trees within each plot was recorded as dominant height along with elevation, azimuth, and slope of the ground. In addition, at the center of plot, soil samples from first layer (0-10 cm) were taken for analyzing several soil variables. Evaluation of site productivity by using random forest technique showed that about 90% of variability in oriental beech productivity could be justified using environmental variables. Phosphorous and percentage of nitrogen, as edaphic variables, and slope and altitude, as physiographic variables, are among the most important variables affecting the beech forest productivity. Using criteria including R squared and adjusted R squared showed random forest technique had very good performance in assessing beech forest site productivity. These analyses underscore the importance of ensemble techniques in forest ecology studies and furnish framework for future modeling of beech forest productivity in relation to environmental predictors.

Keywords: Dominant Height, Ensemble Techniques, Oriental Beech, Random Forest Technique, Site Productivity

* Corresponding author Tel: 09111580097 Email: j.alavi@modares.ac.ir