مجلهٔ جنگل ایران، انجمن جنگلبانی ایران
سال هجدهم، شمارهٔ ۱، بهار ۱۴۰۵
ص ۵۳-۳۳
مقاله پژوهشی

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22034/ijf.2025.487916.2015
CC BY 4.0

آیا تنش خشکی تأثیری بر پراکنش گونهٔ توسکا ییلاقی (*Alnus subcordata* C.A.Mey.) در جنگل‌های هیرکانی دارد؟

خدیجه اصغری[۱]، حامد اسدی [۲*]، حمید جلیلوند[۳]، سیدمحمد حجتی[۳] و محیا تفضلی [۲]

[۱]دانشجوی دکتری جنگل‌شناسی و اکولوژی جنگل، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری
[۲]استادیار گروه علوم و مهندسی جنگل، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری
[۳]استاد گروه علوم و مهندسی جنگل، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۸/۱۹؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۲/۱۵)

چکیده

مقدمه: با توجه به تغییرات اقلیمی و افزایش خشکی، جنگل هیرکانی با تهدیدهایی جدی روبه‌رو است که رشد و پویایی گونه‌های بومی این بوم‌سازگان منحصربه‌فرد را با چالش مواجه می‌سازد. گونهٔ توسکا ییلاقی (*Alnus subcordata* C.A.Mey.)، یکی از گونه‌های مهم در جنگلکاری و احیای اراضی مخروبه است که به‌دلیل ویژگی‌های زیست‌محیطی و نیاز شدید به منابع آبی، به‌طور ویژه تحت تأثیر تغییرات اقلیمی قرار دارد. به‌دلیل اهمیت این گونهٔ پیشاهنگ رطوبت‌پسند در تثبیت نیتروژن و حفظ پایداری جنگل‌های هیرکانی، بررسی تأثیر تنش خشکی بر حضور و پراکنش آن، از نظر حفاظت تنوع زیستی و مدیریت جنگلکاری ضرورت دارد. بر اساس بررسی منابع موجود، تا کنون پژوهشی در این زمینه انجام نگرفته است. بنابراین هدف پژوهش حاضر، بررسی اثر تنش خشکی بر پراکنش گونهٔ توسکا ییلاقی در کل سطح جنگل هیرکانی است.

مواد و روش‌ها: این پژوهش در کل سطح زیر پوشش جنگل‌های هیرکانی انجام گرفت. برای این منظور از پایگاه داده‌های آماربرداری جنگل‌های شمال کشور شامل اطلاعات ارتفاع از سطح دریا، شیب و جهت، قطر و نوع گونه و ارتفاع درختان موجود برای ۲۷۰۰ قطعه نمونه استفاده شد. داده‌های هواشناسی شامل مقدار بارش و دما از پروژهٔ POWER مربوط به سازمان ملی هوانوردی و فضایی ایالات متحدهٔ آمریکا (NASA Power) تهیه شد. به‌منظور محاسبهٔ ضریب خشکی از بستهٔ نرم‌افزاری Medfate در نرم‌افزار R استفاده شد. در این پژوهش، افزون‌بر اطلاعات داده‌های آماربرداری، بقیهٔ متغیرهای محیطی شامل میانگین بارندگی سالانه، میانگین دمای سالانه، فاصله از دره، شاخص موقعیت توپوگرافی، انحنای توپوگرافی، شاخص رطوبت توپوگرافی و تنش خشکی برای هر قطعه نمونه تهیه شده و برای مدل‌سازی رویشگاه مناسب توسکا ییلاقی استفاده شد. پراکنش توسکا ییلاقی در جنگل هیرکانی با استفاده از سه مدل جنگل تصادفی، ماشین بردار پشتیبان و مدل خطی تعمیم‌یافته پیش‌بینی شد. الگوریتم‌های مدل‌سازی و اهمیت نسبی متغیرها در بستهٔ caret در نرم‌افزار R پیاده‌سازی و محاسبه شدند. برای ارزیابی عملکرد مدل‌ها از روش اعتبارسنجی متقابل استفاده شد. سپس از آمارهٔ سطح زیر منحنی برای ارزیابی عملکرد هر مدل استفاده شد.

یافته‌ها: مقدار سطح زیر منحنی برای مدل جنگل تصادفی (۰/۷۳) بیشتر از مدل‌های ماشین بردار پشتیبان (۰/۶۷) و مدل خطی تعمیم‌یافته (۰/۶۵) بود. ارتفاع از سطح دریا و تنش خشکی به‌ترتیب مهم‌ترین عوامل برای پیش‌بینی حضور گونهٔ توسکا ییلاقی با استفاده از مدل جنگل تصادفی بودند. همچنین بر اساس نتایج مدل‌های ماشین بردار پشتیبان و مدل خطی تعمیم‌یافته، متغیر بارش مهم‌ترین عامل در پیش‌بینی حضور گونهٔ توسکا ییلاقی شناسایی شد. نتایج بررسی واکنش گونهٔ توسکا ییلاقی نسبت به متغیر ارتفاع از سطح دریا و شاخص تابش خورشیدی با استفاده از مدل جنگل تصادفی نشان داد که با افزایش هر دو متغیر احتمال حضور توسکا ییلاقی افزایش می‌یابد، درحالی که با افزایش مقدار تنش خشکی، احتمال حضور گونهٔ توسکا ییلاقی کاهش می‌یابد. نقشه‌های پهنه‌بندی احتمال حضور توسکا ییلاقی نشان داد که این گونه حضور بیشتری در مناطق غربی و مرکزی جنگل هیرکانی دارد، درحالی که در بخش‌های شرقی جنگل هیرکانی احتمال حضور بسیار کمتر بود.

نتیجه‌گیری: نتایج پژوهش نشان داد که تنش خشکی از مهم‌ترین عوامل محدودکنندهٔ پراکنش گونهٔ توسکا ییلاقی در جنگل‌های هیرکانی است؛ زیرا این گونه از جمله گونه‌های رطوبت‌پسند جنگل هیرکانی است. کاهش بارندگی و افزایش دما به‌دلیل تغییر اقلیم، تنش خشکی را در منطقه افزایش خواهد داد و به‌طور مستقیم سبب محدود شدن رشد و تکثیر توسکا ییلاقی خواهد شد. به‌طور کلی، پیشنهاد می‌شود که از جنگلکاری با گونهٔ توسکا ییلاقی در مناطقی که به‌واسطهٔ تنش خشکی آسیب‌پذیرند خودداری شود و به‌جای آن گونه‌های مقاوم‌تر به شرایط کم‌آبی استفاده شوند تا ساختار و عملکرد بوم‌سامانه‌های جنگل بهتر حفظ شود.

واژه‌های کلیدی: بستهٔ نرم‌افزاری Medfate، جنگل تصادفی، رویشگاه مناسب، مدل یادگیری ماشین.

*نویسندهٔ مسئول
شمارهٔ تماس: ۰۱۱۳۳۸۸۵۴۱۱
ایمیل: h.asadi@sanru.ac.ir

مقدمه

اقلیم، عامل اصلی شکل‌گیری زیست‌بوم‌های جهانی، در حال تغییر است و این تغییرات تأثیرات چشمگیری بر رشد، تنوع زیستی و احیای درختان در جنگل‌های هیرکانی مانند دیگر نقاط جهان دارند. تغییرات اقلیمی می‌توانند بر الگوهای رشد، رقابت درون و بین‌گونه‌ای، زمان گلدهی و میوه‌دهی، نرخ بقا و طول عمر درختان اثرگذار باشند. این تغییرات همچنین ممکن است سبب حوادث طبیعی مانند مرگ‌ومیر ناشی از برف، سیل، آتش‌سوزی‌های شدید، تنش خشکی و شیوع آفات شود (Yousefpour et al., 2012). پیامدهای این شرایط به‌ویژه با فعالیت‌های انسانی تشدید می‌شود (Linares et al., 2009; Jian et al., 2015). این تغییرات ناخواسته، به‌ویژه در مناطقی مانند جنگل‌های هیرکانی که تنوع زیستی بسیار زیادی دارند، ممکن است سبب اختلالات جدی در روند طبیعی بوم‌سازگان شود. Jafari (2008) در پژوهش خود اذعان داشت که در نیم قرن گذشته، اقلیم جنگل‌های خزری گرم‌تر شده و گرایش رویش در پوشش گیاهی حدود صد متر به‌سمت بالا حرکت کرده است. پیش‌بینی‌ها نشان می‌دهد که تا سال ۲۰۵۰ دمای هوای ایران ۲/۷ درجهٔ سانتی‌گراد افزایش خواهد یافت که افزایش نیاز آبی گیاهان را در پی خواهد داشت (Attarod et al., 2017).

یکی از مهم‌ترین پیامدهای تغییر اقلیم جهانی، نابودی گستردهٔ جنگل‌ها در اثر خشکی است (Adams et al., 2009; Allen et al., 2010). خشکی که کمبود یا نبود آب تعریف می‌شود، حیات و پویایی جنگل‌ها را به مخاطره می‌اندازد (Vose et al., 2016). پیش‌بینی‌های اقلیمی حاکی از افزایش فراوانی، شدت و مدت زمان دوره‌های خشکی در آینده هستند (Adams et al., 2009; Dai, 2013; Granier et al., 2011) و شواهد نشان می‌دهند که فراوانی خشکی رو به افزایش دارد (Alexander, 2016). تنش خشکی، از تهدیدهای غیرزیستی اولیهٔ رشد گیاهان در سراسر جهان است (Seleiman et al., 2021). وقوع تنش خشکی موقت یا دائمی به رشد و نمو گیاهان آسیب شدید وارد خواهد کرد. واکنش جنگل‌ها به تنش خشکی به‌دلیل تفاوت در اقلیم‌ها و ویژگی‌های مکانی و زمانی خشکی، متفاوت است، اما همچنان ابهامات زیادی در این زمینه وجود دارد. از منظر زیست‌محیطی، واکنش بوم‌سازگان جنگلی به خشکی را می‌توان از جنبه‌هایی همچون پایداری زمانی، مقاومت و انعطاف‌پذیری بررسی کرد که جزئی از پایداری کلی بوم‌سازگان هستند (Tilman, 1999). پایداری بوم‌سازگان جنگلی در برابر خشکی بسته به منطقه، نوع بیوم و حتی گونه‌های درختی متفاوت است (Gazol et al., 2018; Vicente et al., 2014).

امروزه با پیشرفت فناوری و روش‌های داده‌کاوی، استفاده از مدل‌های یادگیری ماشین به‌منزلهٔ ابزاری قدرتمند برای پیش‌بینی پراکنش گونه‌ها بیش از پیش مدنظر قرار گرفته است (Asadi et al., 2024). این مدل‌ها با قابلیت تحلیل روابط پیچیده و غیرخطی بین متغیرهای زیست‌محیطی و حضور گونه‌ها، می‌توانند اطلاعات ارزشمندی دربارهٔ تأثیر عوامل محیطی مانند خشکی بر پراکنش گونه‌های درختی، به‌ویژه گونه‌های پیشگام دارای استفاده در احیای جنگل‌های هیرکانی ارائه دهند (Alavi et al., 2020). در مقایسه با روش‌های سنتی، مدل‌های یادگیری ماشین دقت و کارایی بیشتری دارند و می‌توانند عدم قطعیت‌های موجود در پیش‌بینی‌ها را کاهش دهند. همچنین این مدل‌ها به‌دلیل قابلیت به‌کارگیری حجم زیادی از داده‌های مکانی و محیطی، می‌توانند به‌طور مؤثرتری مناطق مستعد برای جنگلکاری را شناسایی کنند (Moghbel Esfahani et al., 2023). بر این اساس، مدل‌های یادگیری ماشین می‌توانند به شناسایی مناطق مناسب برای استقرار گونه‌ها کمک کنند و به تصمیم‌گیری‌های آگاهانه در مدیریت منابع طبیعی یاری رسانند. بنابراین به‌منظور مدیریت و برنامه‌ریزی بهینهٔ جنگلکاری‌ها در آینده، استفاده از این مدل‌ها

برای بررسی تأثیر خشکی بر پراکنش گونه‌های جنگلکاری‌شده ضروری به نظر می‌رسد.

توسکا ییلاقی (*Alnus subcordata* C.A.Mey.) از خانوادهٔ Betulaceae یکی از مهم‌ترین گونه‌های پیشگام است و کارکرد مهمی در بوم‌سازگان جنگل هیرکانی دارد. این گونه با تشکیل ۷/۷۵ درصد از حجم سرپای جنگل‌های این منطقه (Sagheb talebi et al., 2014)، از اهمیت اقتصادی زیادی نیز برخوردار است. سازگاری زیاد توسکا ییلاقی با شرایط محیطی متنوع، از مناطق ساحلی تا ارتفاعات ۲۰۰۰ متری و قابلیت تثبیت نیتروژن خاک، آن را به گزینه‌ای مناسب برای عملیات احیای جنگل تبدیل کرده است (Ravanbakhsh et al., 2022). با این‌حال، به‌دلیل نیاز این گونه به رطوبت زیاد، پراکنش آن اغلب در کنار رودخانه‌ها و جاده‌های جنگلی نسبت به درون توده‌های جنگلی متمرکز است (Sabeti, 2007). در نظر گرفتن این ویژگی‌های اکولوژیکی در برنامه‌های جنگلکاری می‌تواند به افزایش موفقیت این عملیات و بهبود وضعیت بوم‌سازگان جنگل هیرکانی کمک شایانی کند. با این‌حال، تغییرات اقلیمی و فعالیت‌های انسانی، تهدیدهای جدیدی برای موفقیت این جنگلکاری‌ها محسوب می‌شوند. بنابراین بررسی واکنش گونهٔ توسکا ییلاقی در برابر خشکی، به‌ویژه به‌دلیل استفاده گستردهٔ آن در پروژه‌های جنگلکاری، ضروری است.

با توجه به اهمیت موضوع پژوهش‌های مختلفی در خصوص عوامل مؤثر بر حضور گونه‌های مختلف در جنگل‌های شمال کشور انجام گرفته است. برای مثال Alavi et al. (2020) اهمیت متغیرهای اقلیمی، توپوگرافی و خاک در پراکنش سرخدار و اولویت‌بندی رویشگاه‌های مطلوب برای حفاظت و احیا در جنگل‌های خزری را بررسی کردند. در این پژوهش از الگوریتم درخت رگرسیون تقویت‌شده (Boosted regression trees) به‌منظور مدل‌سازی پراکنش گونهٔ سرخدار (*Taxus baccata* L.) در ارتباط با متغیرهای اقلیمی، خاکی و توپوگرافی و شناسایی مهم‌ترین متغیرهای تأثیرگذار بر پراکنش سرخدار استفاده شد. نتایج نشان داد که مدل ساخته‌شده با متغیرهای زیست‌اقلیمی از نظر معیارهای ارزیابی مدل با میانگین آمارهٔ مهارت درست (True skill statistic) و سطح زیرمنحنی (Area under curve: AUC) ۰/۸۳ و ۰/۹۷ نسبت به مدل‌های ساخته‌شده با متغیرهای خاک و توپوگرافی، عملکرد بهتری برای پیش‌بینی پراکنش مکانی گونهٔ سرخدار داشت. Mohammadi et al. (2017) در پژوهش خود مطلوبیت رویشگاه گونهٔ ملج (*Ulmus glabra* Huds.) را در جنگل خیرود نوشهر بررسی کردند. ارزیابی مدل‌های تحت بررسی با استفاده از معیارهای AUC، کاپا و آمارهٔ مهارت درست، نشان داد که GLM با مقدار AUC برابر ۰/۷۸، مقدار کاپا برابر ۰/۴۴ و مقدار آمارهٔ مهارت درست برابر ۰/۴۴ دارای عملکرد بهتری بود. بر اساس ارزیابی اهمیت نسبی متغیرها در GLM، ارتفاع از سطح دریا و عمق دره، مهم‌ترین متغیرها در تعیین رویشگاه گونهٔ ملج بود. Moghbel Esfahani et al. (2023) در پژوهش خود با استفاده از یک دیدگاه تلفیقی، پراکنش گونهٔ بلندمازو (*Quercus castaneifolia* C.A.Mey.) در جنگل هیرکانی را با هدف تعیین مناطق بهینه برای احیای جنگل با استفاده از پنج روش مختلف مدل‌سازی شامل مدل GLM، مدل جمعی تعمیم‌یافته، تحلیل طبقه‌بندی درختی (Classification Tree Analysis) و RF بررسی کردند. نتایج نشان داد که وزن مخصوص ظاهری خاک، اسیدیته، تغییرات بارندگی فصلی و بارندگی در سردترین فصل سال در تعیین و توسعهٔ رویشگاه این گونه از بیشترین اهمیت نسبی برخوردار بوده و منطقهٔ هیرکانی دارای پتانسیل مطلوب ۱۴/۱ درصد برای این گونه بود. Hadinezhad et al. (2025) در پژوهش خود به بررسی مهم‌ترین عوامل مؤثر بر تنش خشکی درختان در جنگل‌های شمال کشور با استفاده مدل از GLM پرداختند. نتایج نشان داد که متغیرهای تراکم جنگل، مقدار بارش و سطح مقطع

درختان در هکتار مهم‌ترین عوامل مؤثر بر ضریب خشکی در جنگل‌های هیرکانی بود.

با توجه به تغییرات گستردهٔ اقلیمی و افزایش فراوانی خشکی‌ها، جنگل‌های هیرکانی با تهدیدهای جدی روبه‌رو هستند که رشد و پویایی گونه‌های بومی این بوم‌سازگان منحصربه‌فرد را با چالش مواجه می‌سازد. توسکا ییلاقی، یکی از گونه‌های مهم در جنگلکاری و احیای اراضی مخروبه است که به‌دلیل ویژگی‌های زیست‌محیطی و نیاز شدید به منابع آبی، به‌طور ویژه‌ای تحت تأثیر این تغییرات قرار خواهد گرفت. ازآنجا که این گونه نقش مهمی در تثبیت نیتروژن و حفظ پایداری جنگل‌های هیرکانی دارد، بررسی تأثیر تنش خشکی بر حضور و پراکنش آن، هم از نظر حفاظت از تنوع زیستی و هم از نظر مدیریت جنگلکاری ضرورت دارد. بر اساس منابع موجود تا کنون پژوهشی دربارهٔ اثر تنش خشکی بر پراکنش گونهٔ توسکا ییلاقی انجام نگرفته است، بنابراین هدف پژوهش حاضر بررسی اثر تنش خشکی بر پراکنش گونهٔ توسکا ییلاقی در کل سطح جنگل‌های هیرکانی بود. نتایج این پژوهش می‌تواند مناطق حساس به تنش خشکی برای گونهٔ توسکا ییلاقی را شناسایی کند و راهکارهای مناسبی به‌منظور اجرای جنگلکاری و احیای مناطق مخروبه با در نظر گرفتن شرایط تنش خشکی ارائه دهد.

مواد و روش‌ها

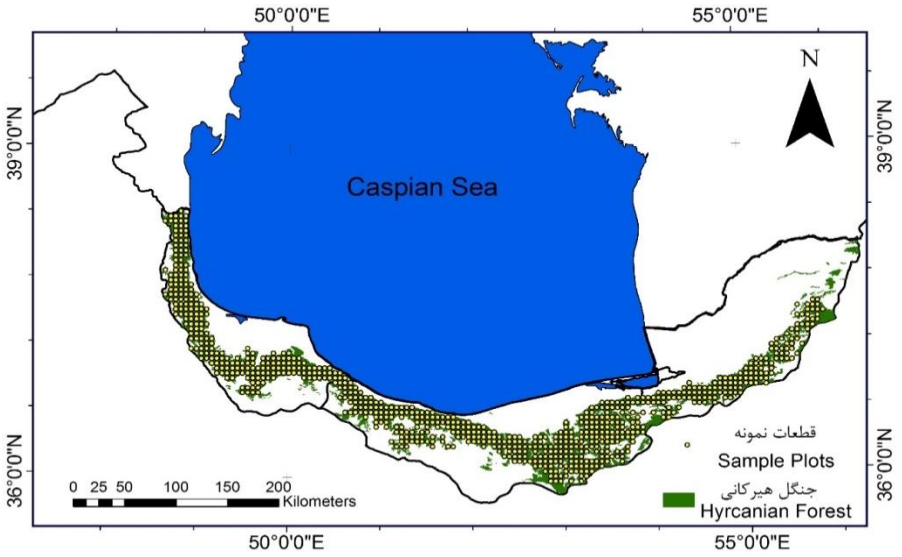
منطقهٔ پژوهش

این پژوهش در سراسر جنگل‌های هیرکانی انجام گرفت. این جنگل‌ها به‌شکل نواری باریک از جنگل‌های معتدل خزان‌کننده، در دامنه‌های شمالی رشته‌کوه البرز و سواحل جنوبی دریای خزر گسترش یافته‌اند و حدود ۸۰۰ کیلومتر طول و ۲۰ تا ۷۰ کیلومتر پهنا دارند (Marvi-Mohadjer, 2006). مقدار بارش سالانه در این منطقه به‌طور میانگین ۱۰۰۰ میلی‌متر است که از غرب (انزلی با ۲۰۰۰ میلی‌متر) به شرق (گرگان با ۶۰۰ میلی‌متر) کاهش می‌یابد. دمای متوسط سالانه در این ناحیه بین ۱۵ تا ۱۸ درجهٔ سانتی‌گراد است. از لحاظ خاک‌شناسی، خاک‌های این ناحیه اغلب از نوع راندزین و قهوه‌ای جنگلی و تحول‌یافته هستند (Marvi-Mohadjer, 2006).

شیوهٔ اجرای پژوهش

برای اجرای این پژوهش از جدیدترین مجموعهٔ داده‌های آماربرداری سراسری جنگل‌های شمال کشور استفاده شد. این داده‌ها شامل ۲۷۰۰ قطعه نمونهٔ دایره‌ای به مساحت ۱۰۰۰ متر مربع است که با ابعاد شبکه‌ای ۱× ۵ کیلومتر در سراسر جنگل‌های شمال کشور طی سال‌های ۱۳۸۴ تا ۱۳۸۶ برداشت شده‌اند (شکل ۱). اطلاعات ثبت‌شده برای هر قطعه نمونه شامل قطر، نوع گونه و ارتفاع درختان است. افزون‌بر این، موقعیت جغرافیایی، ارتفاع از سطح دریا، شیب و جهت نیز در هر قطعه نمونه ثبت شده است (Asadi et al., 2024; Valizadeh et al., 2023).

در این پژوهش، متغیرهای محیطی شامل ارتفاع از سطح دریا، شیب، آزیموت جهت جغرافیایی، میانگین بارندگی سالانه، میانگین دمای سالانه، فاصله از دره، شاخص موقعیت توپوگرافی، انحنای توپوگرافی، شاخص رطوبت توپوگرافی و تنش خشکی برای هر قطعه نمونه تهیه و برای مدل‌سازی رویشگاه مناسب توسکا ییلاقی استفاده شد (جدول ۱). پایگاه دادهٔ NASA Power Project (https://power.larc.nasa.gov) برای تهیهٔ میانگین بارش سالانه و میانگین دمای سالانه در سال نمونه‌برداری استفاده شد (Sparks, 2018).



شکل ۱- موقعیت قطعات نمونه در جنگل‌های هیرکانی

Figure 1. The location of sampling points in the Hyrcanian Forest

شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI)، شاخص موقعیت توپوگرافی (TPI) و انحنای توپوگرافی با استفاده از ابزار تحلیل فضایی در نرم‌افزار ArcGIS 10.8 با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی (تفکیک مکانی ۵۰ متر) محاسبه شد. در نهایت تمام لایه‌های مذکور بر اساس مرز جنگل هیرکانی برش داده شدند. جهت جغرافیایی با استفاده از رابطهٔ ۱ به شاخص تابش تبدیل شد (Aertsen et al., 2010).

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

در رابطه ۱، θ آزیموت جهت برحسب درجه است. مقدار شاخص تابش خورشیدی بین صفر و ۱ است و جهت شمال شرقی دارای مقدار صفر (خنک‌ترین دامنه) و جهت جنوب و جنوب غربی دارای مقدار ۱ (گرم‌ترین دامنه) است (Ertsen et al., 2010). شاخص TWI، اطلاعاتی دربارهٔ احتمال مرطوب شدن یک منطقه ارائه می‌دهد، مقادیر بیشتر احتمال بیشتری از شرایط مرطوب را در مقایسه با مقادیر کمتر نشان می‌دهد (Sörensen et al., 2006). شاخص TPI به شناسایی ویژگی‌های توپوگرافی مختلف مانند بالای تپه‌ها و یا پایین دره‌ها کمک می‌کند. مقادیر منفی شاخص TPI پایین دره را نشان می‌دهد، درحالی که مقادیر نزدیک به صفر ممکن است یک منطقهٔ مسطح یا یک منطقه با شیب متوسط را نشان دهد و همچنین مقادیر مثبت نشان‌دهندهٔ بالای تپه است (Weiss, 2001). مقادیر منفی شاخص انحنای توپوگرافی شیب‌های مقعر و مقادیر مثبت، شیب‌های محدب را نشان می‌دهند. از طرف دیگر مقادیر نزدیک به صفر نشان‌دهندهٔ شیب مستقیم است (Romstad & Etzelmüller, 2012).

برای محاسبهٔ ضریب خشکی از بستهٔ نرم‌افزاری medfate (https://cran.r-project.org/web/packages/medfate/index.html) در نرم‌افزار R استفاده شد (De Cáceres et al., 2022; Torres-Ruiz et al., 2024; Hadinezhad et al., 2025). بستهٔ نرم‌افزاری medfate نوعی شبیه‌ساز است که برای پیش‌بینی عملکرد و پویایی توده‌های جنگلی در مقیاس‌های زمانی از روز تا سال طراحی شده است (Nadal-Sala et al., 2024). به‌طور کلی، ورودی‌های اصلی مدل شامل داده‌های پوشش درختی (قطر برابرسینه، ارتفاع کل و تعداد در هکتار) موجود در تودهٔ جنگلی است. دیگر متغیرهای لازم برای محاسبهٔ ضریب خشکی شامل اطلاعات خاک (درصد اجزای بافت خاک شامل رس، شن، سیلت، چگالی ظاهری) و متغیرهای اقلیمی (دما، بارش) است که

می‌تواند توسط خود بسته فراگیری و تهیه شود. در نهایت متغیرهای توپوگرافی (درصد شیب، جهت و ارتفاع از سطح دریا) و موقعیت جغرافیایی آخرین ورودی‌های مدل هستند (De Cáceres et al., 2022).

جدول ۱- فهرست، آمار توصیفی و علائم اختصاری متغیرهای محیطی به‌کاررفته در پژوهش
Table 1. List, basic descriptive statistics, and abbreviation of environmental variables used in this study

	منبع تهیهٔ داده Source of Data Collection	اختصار Abbreviation	کمترین Minimum	بیشترین Maximum	میانگین Mean	اشتباه معیار Standard Error
ارتفاع از سطح دریا (متر) Elevation (m)	داده‌های آماربرداری Inventory Data	-	-5.00	2780.00	940.31	575.44
شیب (درصد) Slope (%)	داده‌های آماربرداری Inventory Data	-	0.00	110.00	39.93	21.45
تابش خورشیدی Radiation	مدل رقومی ارتفاعی DEM	-	0.00	1.00	0.26	0.27
بارش (میلی‌متر) Precipitation (mm)	پروژهٔ ناساپاور NASAPOWER	Per	204.72	1004.39	576.98	231.34
دما (درجهٔ سانتی‌گراد) Temperature (ºC)	پروژهٔ ناساپاور NASAPOWER	Temp	8.42	18.14	13.50	2.69
فاصله از دره (متر) Distance from Valley (m)	مدل رقومی ارتفاعی DEM	Distance_Vally	0.46	12486.59	2532.40	1691.26
شاخص موقعیت توپوگرافی Topographic position Index	مدل رقومی ارتفاعی DEM	TPI	-361.81	369.43	9.3516	101.304
انحنای زمین Curvature	مدل رقومی ارتفاعی مدل رقومی ارتفاعی DEM	-	-1.60E10	1.94E10	1.4228E8	3.46881E9
شاخص رطوبت توپوگرافی Topographic wetness index	مدل رقومی ارتفاعی DEM	TWI	-7.14	8.00	-4.64	1.804
تنش خشکی Drought Stress	بستهٔ نرم‌افزاری medfate The medfate Package	Drought	0.13148	0.00	0.64	0.1471

روش مدل‌سازی

پیش از اجرای فرایند مدل‌سازی و پیش‌بینی احتمال حضور گونهٔ توسکا ییلاقی در سطح جنگل‌های شمال کشور، به‌منظور افزایش دقت، همبستگی متغیرهای مستقل با استفاده از بستهٔ نرم‌افزاری corrplot در نرم‌افزار R بررسی شد (Wei et al., 2017) و متغیرهای دارای همبستگی زیاد (بیشتر از ۰/۸ یا کمتر از ۰/۸-)، از فرایند مدل‌سازی حذف شدند. در ادامه پس از تهیهٔ داده‌ها، پراکنش توسکا ییلاقی در جنگل هیرکانی با استفاده از سه مدل متداول که به‌طور گسترده در مطالعات مدل‌سازی پراکنش گونه‌ها کاربرد دارند پیش‌بینی

شد. مدل‌ها شامل مدل خطی تعمیم‌یافته (GLM)، ماشین بردار پشتیبانی (SVM) و جنگل تصادفی (RF) بودند. الگوریتم‌های مدل‌سازی در بستهٔ caret در نرم‌افزار R پیاده‌سازی شدند (Hijmans et al., 2017; Kuhn et al., 2008). اهمیت نسبی متغیرها به‌عنوان یک معیار برای نشان دادن میزان کمک یک متغیر خاص به پیش‌بینی‌های دقیق در مدل استفاده می‌شود که با استفاده از بستهٔ caret محاسبه شد (Kuhn, 2008). در ادامه به‌منظور بررسی و تحلیل روابط بین متغیرهای مستقل و وابسته، از منحنی پاسخ (Partial Dependence) با استفاده از بستهٔ نرم‌افزاری pdp در نرم‌افزار R استفاده شد (Greenwell, 2017).

برای ارزیابی عملکرد مدل‌ها در تخمین حضور یا نبود توسکا ییلاقی، از تکنیک اعتبارسنجی متقاطع (10-Fold Cross Validation) استفاده شد. در این روش، داده‌ها به ۱۰ بخش تقسیم می‌شوند. در هر مرحله، یک بخش به‌عنوان مجموعه ارزیابی و بقیه به‌عنوان مجموعه آموزش استفاده می‌شوند و این فرایند ۱۰ بار تکرار می‌شود تا ارزیابی دقیق‌تری از عملکرد مدل ارائه شود. در مدل RF از متغیرهای قابل تنظیم برای بهبود مدل شامل تعداد متغیرهای به‌کاررفته در ساخت هر درخت و تعداد درختان جنگل تصادفی استفاده می‌شود (Estévez et al., 2023). متغیرهای قابل تنظیم برای بهبود مدل SVM، بسته به نوع مجموعه‌ای توابع ریاضی (Kernel) استفاده می‌شوند. این مجموعه توابع ممکن است انواع متفاوتی داشته باشند. در این پژوهش از تابع Radial Basis Function استفاده شد که دو متغیر مهم قابل تنظیم آن شامل جریمه (Cost) و سیگما (Sigma) است (Hamrani et al., 2020).

در ادامه از آمارهٔ سطح زیر منحنی (AUC) برای ارزیابی عملکرد هر مدل استفاده شد. این آماره که به‌طور گسترده در مطالعات پراکنش گونه‌ای پذیرفته شده است، معیاری اساسی برای تعیین دقت پیش‌بینی مدل است. مقادیر AUC بین ۰/۵ و ۱ است که به‌ترتیب نشان‌دهندهٔ پیش‌بینی‌های تصادفی و پیش‌بینی کامل و دقیق است. نقشه‌های احتمال حضور گونهٔ توسکا ییلاقی در نرم‌افزار R و با استفاده از بستهٔ نرم‌افزاری raster تهیه شد (Hijmans et al., 2015). در ادامه به‌منظور تهیهٔ نقشه‌های رویشگاه به‌صورت مناسب و نامناسب از آستانهٔ حداکثر آمارهٔ ویژگی به اضافهٔ حساسیت (maximum sensitivity plus specificity) استفاده شد. این آستانه تعادل بین حساسیت و ویژگی را با داده‌های آموزشی بهینه می‌کند و دقت بیشتری در پیش‌بینی در مقایسه با روش‌های دیگر ارائه می‌دهد (Zhong et al., 2021). در نهایت مقادیر بالای آستانه، رویشگاه مناسب و مقادیر کمتر از آن، رویشگاه نامناسب در نظر گرفته شد.

نتایج

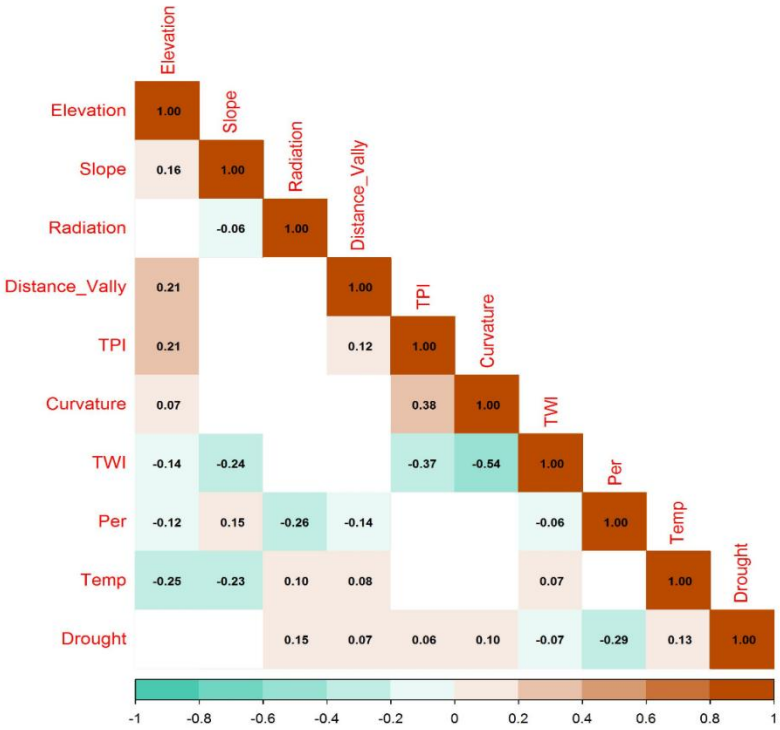
تحلیل همبستگی پیرسون برای ارزیابی روابط بین متغیرهای محیطی انجام گرفت (شکل ۲). بر اساس نتایج هیچ‌کدام از متغیرها همبستگی قوی با یکدیگر نداشتند، بنابراین از همهٔ آنها در روند مدل‌سازی‌ها استفاده شد.

عملکرد مدل‌ها و اهمیت نسبی متغیرها

در شکل ۳ مقادیر سطح زیر منحنی (AUC) برای هر مدل و برای هر بخش (Fold) ارائه شده است. مدل RF از بقیهٔ مدل‌ها عملکرد بهتری داشت. میانگین مقادیر AUC برای پیش‌بینی حضور توسکا ییلاقی با استفاده از مدل‌های مورد مطالعه در جدول ۲ ارائه شده است. مقادیر سطح زیر منحنی برای هر سه مدل بیشتر از ۰/۵ بود که نشان‌دهندهٔ دقت زیاد آنها در پیش‌بینی حضور گونهٔ توسکا ییلاقی است (شکل ۳).

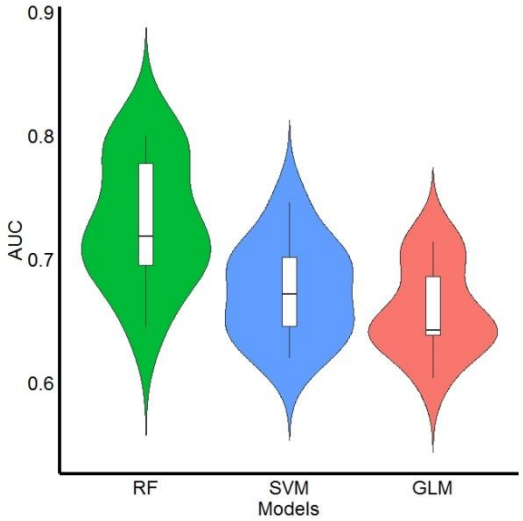
بررسی اهمیت نسبی متغیرها نشان داد که در مدل RF، متغیر ارتفاع از سطح دریا مهم‌ترین متغیر اثرگذار در پراکنش گونهٔ توسکا ییلاقی است، اما در مدل‌های SVM و GLM بارش مهم‌ترین متغیر اثرگذار است (شکل ۴). همچنین در مدل RF متغیر

تنش خشکی دومین عامل اثرگذار در پراکنش گونهٔ توسکا ییلاقی است، اما در مدل‌های SVM و GLM ارتفاع از سطح دریا دومین عامل اثرگذار است. همچنین نتایج بررسی پاسخ سه متغیر مهم شناسایی‌شده با استفاده از مدل RF نشان داد که احتمال حضور گونهٔ توسکا ییلاقی با افزایش مقدار تنش خشکی کاهش می‌یابد، اما با افزایش مقدار ارتفاع از سطح دریا و همچنین شاخص تابش خورشیدی، احتمال حضور گونهٔ توسکا ییلاقی افزایش می‌یابد (شکل ۵).



شکل ۲- همبستگی پیرسون بین متغیرهای مستقل (رنگ قرمز و آبی به‌ترتیب نشان‌دهندهٔ همبستگی معنی‌دار مثبت و منفی و مربع‌های خالی نشان‌دهندهٔ معنی‌دار نبودن همبستگی است)

Figure 2. Pearson correlation of the independent variables (Red and blue colors indicate significant positive and negative correlation, respectively, and blank squares indicate no significant correlation)



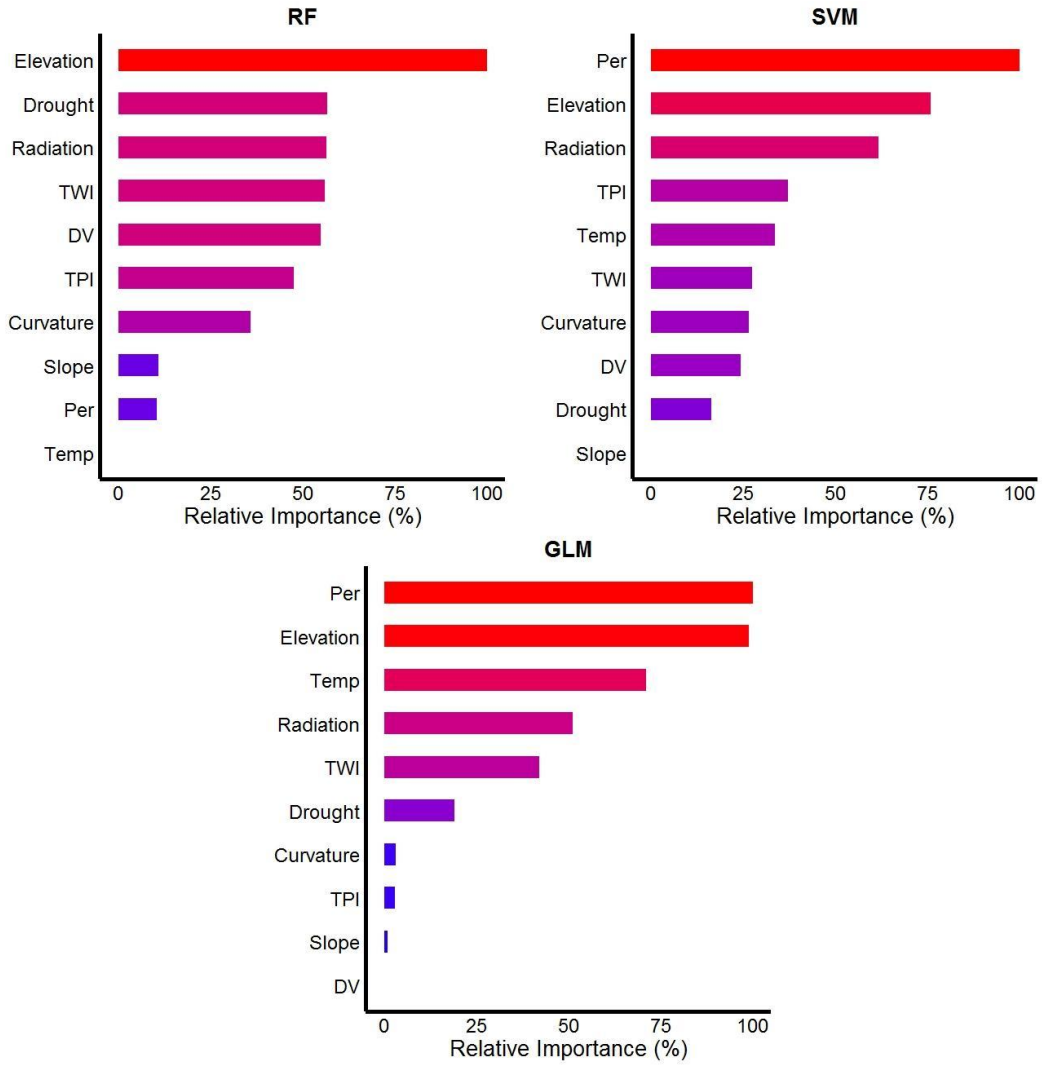
شکل ۳- مقادیر AUC برای مدل‌ها با استفاده از روش اعتبارسنجی متقاطع

Figure 3. The AUC values of the models using the cross-validation method

جدول ۲- میانگین مقادیر AUC مدل‌ها برای پیش‌بینی حضور/ غیاب توسکا ییلاقی

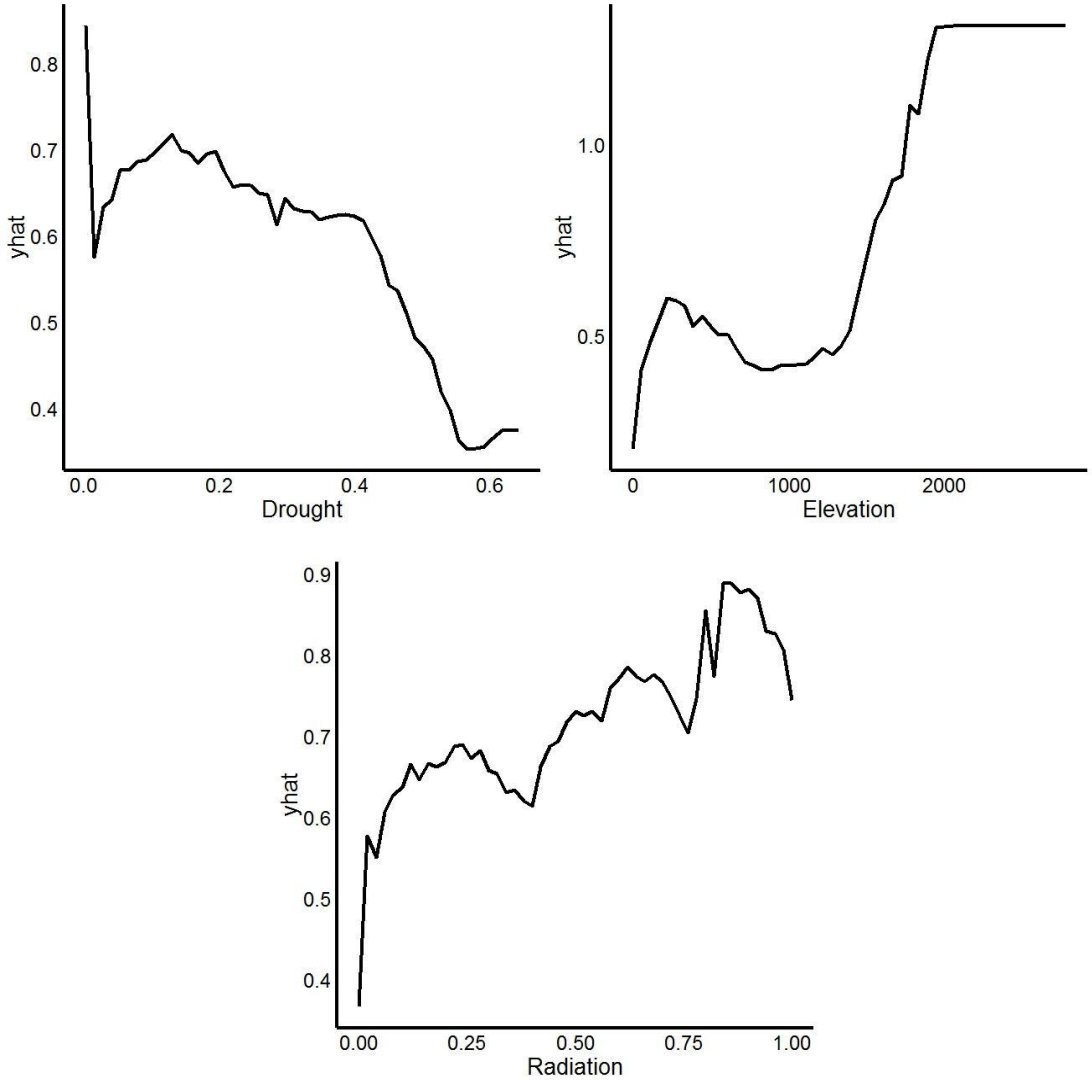
Table 2. The mean AUC values for studied models for predicting the presence/absence of *Parrotia persica*

مدل Model	سطح زیر منحنی Area Under Curve
RF	0.73
SVM	0.67
GLM	0.65



شکل ۴- نتایج اهمیت نسبی متغیرها برای مدل‌های مختلف به‌منظور پیش‌بینی حضور/ غیاب توسکا ییلاقی

Figure 4. Results of the importance of variables for different models to predict the presence/absence of *A. subcordata*

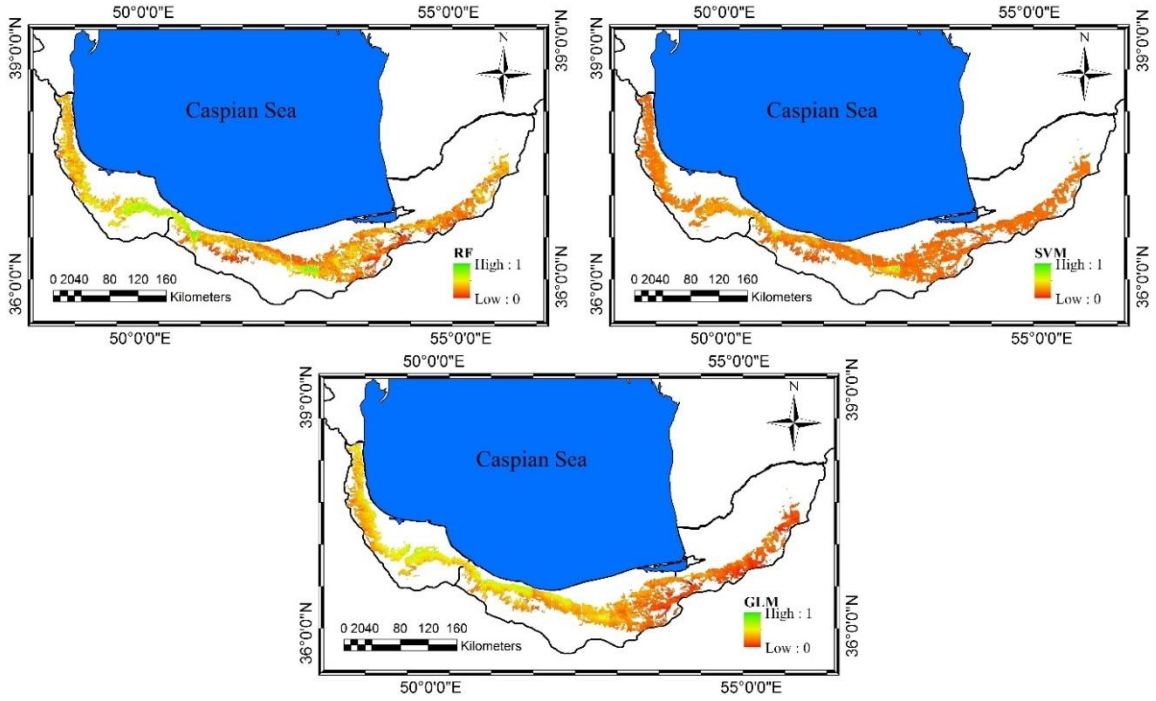


شکل ۵- منحنی‌های پاسخ حضور گونه (yhat) به مهم‌ترین متغیرهای محیطی بر اساس مدل RF

Figure 5. Species presence response curves (yhat) to the most important environmental variables used based on the RF model

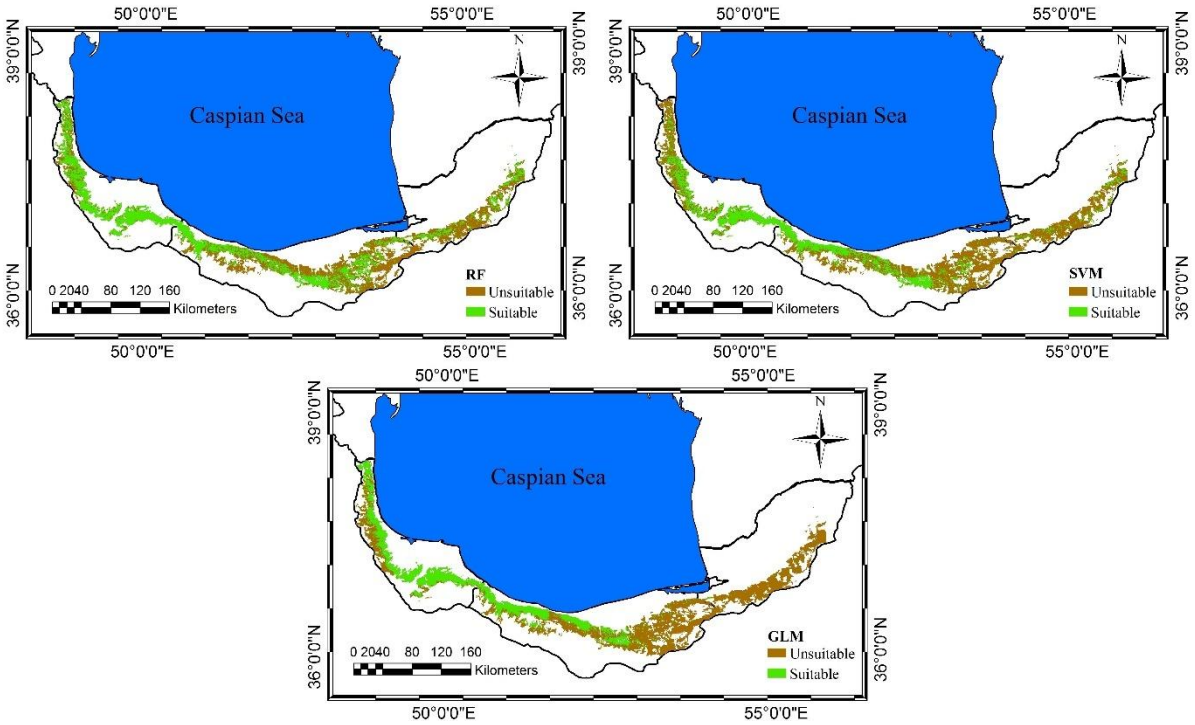
پراکنش گونهٔ توسکا ییلاقی در سطح جنگل‌های هیرکانی

نقشه‌های پیش‌بینی احتمال حضور و رویشگاه مناسب گونهٔ توسکا ییلاقی در کل سطح جنگل‌های هیرکانی با استفاده از مدل‌های یادشده به‌ترتیب در شکل‌های ۶ و ۷ نشان داده شده است. به‌طور کلی بر اساس نتایج به‌دست‌آمده گونهٔ توسکا ییلاقی احتمال حضور بیشتری (بیشتر از ۷۰ درصد) در قسمت غربی و مرکزی جنگل هیرکانی دارد، اما احتمال حضور آن در بخش‌های شرقی جنگل هیرکانی بسیار کم است. با این‌حال بر اساس نتایج مدل RF، احتمال حضور این گونه (حدود ۵۰ درصد) در ارتفاعات پایین مناطق شرقی جنگل‌های هیرکانی نیز پیش‌بینی شده است. به‌طور کلی بر اساس نتایج مدل RF، ۵۱ درصد از کل سطح جنگل، برای حضور گونهٔ توسکا ییلاقی مناسب برآورد شد (جدول ۳).



شکل ۶- نقشه‌های احتمال حضور گونهٔ توسکا ییلاقی در جنگل‌های هیرکانی پیش‌بینی‌شده با استفاده از مدل‌های بررسی‌شده

Figure 6. The presence probability maps of *A. subcordata* across Hyrcanian Forest predicted using studied models



شکل ۷- نقشه‌های رویشگاه‌های مناسب حضور گونهٔ توسکا ییلاقی در جنگل‌های هیرکانی پیش‌بینی‌شده با استفاده از مدل‌های بررسی‌شده

Figure 7. The suitable habitat maps of *A. subcordata* across Hyrcanian Forest predicted using studied models

جدول ۳- مساحت کل رویشگاه‌های مناسب حضور گونهٔ توسکا ییلاقی در جنگل‌های هیرکانی پیش‌بینی‌شده با استفاده از مدل‌های بررسی‌شده

Table 3. The total area of suitable habitats for the presence of *A. subcordata* across Hyrcanian Forest predicted using studied models

مدل Model	سطح مناسب (هکتار) Suitable Area (Ha)	درصد از کل سطح Percent of total Area
RF	825733.4939	51
SVM	591221.6472	37
GLM	578040.4391	36

بحث

در پژوهش حاضر، رویشگاه مناسب گونهٔ توسکا ییلاقی با تأکید بر تأثیر تنش خشکی با استفاده از مدل‌های یادگیری ماشین شامل GLM، SVM و RF در سراسر جنگل‌های هیرکانی پیش‌بینی شد. در ادامه، اهمیت نسبی هر یک از متغیرها نیز برای تمام مدل‌ها محاسبه شد. عملکرد مدل‌های بررسی‌شده با استفاده از معیار AUC ارزیابی شد و نتایج نشان داد که همهٔ مدل‌ها عملکرد مناسبی در پیش‌بینی پراکنش گونهٔ توسکا ییلاقی تحت تأثیر تنش خشکی دارند. بر اساس نتایج این پژوهش، مدل RF بیشترین مقدار AUC (۰/۷۳) را داشت. نتایج مشابهی در پژوهش‌های Fathollahzadeh (2018) در گونه‌های انجیلی، توسکا ییلاقی، راش، نمدار و پلت؛ و همچنین در پژوهش Moghbel Esfahani et al. (2023) در گونهٔ بلندمازو و Moridpour et al. (2023) در گونهٔ ون نیز گزارش شده است. این نتایج نشان‌دهندهٔ توانایی مدل RF در شناسایی و بررسی روابط پیچیده بین متغیرهای محیطی است که بر پراکنش گونهٔ توسکا ییلاقی تأثیر می‌گذارد. به‌عبارت دیگر، مدل RF توانایی زیادی برای تحلیل روابط غیرخطی میان متغیرها دارد (Pecchi et al., 2019). بنابراین ویژگی‌های خاص مدل و فرایند مدل‌سازی RF، قدرت مناسبی را برای ایجاد مدل پراکنش گونه با توجه به متغیرهای محیطی فراهم می‌آورد. از سوی دیگر، مدل GLM دارای مقدار AUC کمتری (۰/۶۵) بود. با اینکه GLM مدل ساده‌تری به شمار می‌رود، عملکرد ضعیف آن نشان‌دهندهٔ پیچیدگی احتمالی روابط میان متغیرهای انتخاب‌شده و پراکنش توسکا ییلاقی است. به‌طور کلی، تفاوت‌های مشاهده‌شده در کارایی مدل‌های بررسی‌شده ممکن است ناشی از ویژگی‌های خود مدل‌ها و توانایی آنها در شناسایی روابط بین گونه و توزیع عوامل محیطی مختلف باشد. داده‌های اکولوژیکی ابعاد متعددی دارند و شامل روابط غیرخطی و پیچیده‌ای هستند که این موضوع به‌طور کلی موجب می‌شود روش‌های آماری خطی مانند GLM نتوانند به‌خوبی این روابط و الگوها را شناسایی کنند و این موضوع به کاهش دقت پیش‌بینی در مدل‌های خطی منجر می‌شود (Steen et al., 2024).

در پژوهش‌های مدل‌سازی پراکنش گونه‌ها، درک چگونگی تأثیر عوامل محیطی بر پراکنش گونه‌ها از اهمیت زیادی برخوردار است (Von Humboldt & Bonpland, 2010). نتایج بررسی اهمیت نسبی متغیرهای بررسی‌شده در پژوهش پیش رو نشان داد که بر اساس مدل RF متغیر ارتفاع از سطح دریا مهم‌ترین عامل اثرگذار بر پراکنش گونهٔ توسکا ییلاقی است. عامل ارتفاع از سطح دریا یکی از مهم‌ترین عوامل محیطی در پراکنش گونه‌های گیاهی در نواحی مختلف رویشی ایران معرفی شده است (Goodarzi et al., 2013; Mirdeylami et al., 2014; Zakeri et al., 2014; Pourbabaei et al., 2015; Asadi et al., 2021). Fathollahzadeh (2018) نیز در پژوهش خود بیان کرد که ارتفاع از سطح دریا مهم‌ترین عامل اثرگذار در پراکنش گونهٔ انجیلی (*Parrotia persica* (DC.) C.A.Mey.)، توسکا ییلاقی و راش (*Fagus orientalis* Lipsky) است. Mohammadi et al. (2017) نیز در پژوهش خود دربارهٔ گونهٔ ملج،

مهم‌ترین عامل را ارتفاع از سطح دریا بیان کرد. در پژوهش‌های Hosseini et al. (2024;2025) و Asadi et al. (2024) نیز ارتفاع از سطح دریا، مهم‌ترین عامل اثرگذار بر حضور گونهٔ راش و انجیلی بیان شد. Fathollahzadeh (2018) نیز در پژوهش خود دربارهٔ گونهٔ پلت (*Acer velutinum* Boiss.) مهم‌ترین عامل را عمق دره و دومین عامل را ارتفاع از سطح دریا بیان کرد. او در خصوص گونهٔ نمدار مهم‌ترین عامل واکنش خاک عامل گزارش کرد.

به‌طور کلی نتایج واکنش گونهٔ توسکا ییلاقی به ارتفاع از سطح دریا در پژوهش حاضر نشان داد که با افزایش ارتفاع احتمال حضور این گونه نیز افزایش می‌یابد. توسکا ییلاقی گونه‌ای مقاوم به سرماست و از کوهپایه‌ها تا ارتفاعات ۲۰۰۰ متری از سطح دریا انتشار دارد. توسکا ییلاقی گونه‌ای رطوبت‌پسند بوده و به‌راحتی می‌تواند در خاک پررطوبت استقرار پیدا کند. رویشگاه این گونه بیشتر کنار رودخانه‌ها و آبراهه‌ها و زمین‌های آبرفتی قرار دارد. Navroodi (2006) در پژوهش خود نشان داد که ارتفاع از سطح دریا به‌همراه عواملی دیگری مانند شیب زمین، موقعیت رویشگاهی، رطوبت و pH خاک در کاهش کیفیت رویشگاه‌های توسکا ییلاقی مؤثر است. Eslami et al. (2016) نیز در پژوهش خود بهترین کیفیت بذر گونهٔ توسکا ییلاقی را از نظر شاخص‌های تحت بررسی (طول و عرض میوه، بذر، وزن هزاردانه، رطوبت و ظرفیت جوانه‌زنی) در ارتفاع حدود ۱۴۰۰ متری از سطح دریا بیان کردند. Rezaei et al. (2014) نیز بهترین کیفیت بذر گونهٔ توسکا ییلاقی را در ارتفاع حدود ۱۵۰۰ متر دانستند و همچنین بیان کردند که بذرهای تهیه‌شده در ارتفاع ۲۰۰ متری کیفیت مناسبی نداشتند. بنابراین می‌توان بیان کرد که کیفیت بهتر بذرهای توسکا ییلاقی در ارتفاعات زیاد، یکی از عوامل مؤثر بر افزایش احتمال حضور این گونه در این قسمت است.

نتایج پژوهش حاضر نشان داد که تنش خشکی دومین عامل اثرگذار بر پراکنش گونهٔ توسکا ییلاقی است و با افزایش تنش خشکی، احتمال حضور آن کاهش می‌یابد. این یافته‌ها مطابق با نتایج پژوهش‌های پیشین است که نشان می‌دهد گونه‌های وابسته به منابع آب، مانند توسکا ییلاقی، به‌طور ویژه تحت تأثیر کمبود آب و تنش خشکی قرار دارند. تنش خشکی تأثیرات زیادی بر فرایندهای ریخت‌شناختی در درختان دارد. اولین پاسخ به تنش خشکی، کاهش رشد رویشی است که با کاهش اندازهٔ اندام‌های هوایی مانند برگ‌ها و ساقه‌ها و کاهش زی‌توده کل همراه است. کاهش رشد اندام‌های هوایی نوعی سازوکار اجتنابی است که به کاهش تبخیر و تعرق و نگهداری بیشتر آب کمک می‌کند (Guo et al., 2019). پژوهش‌ها نشان داده‌اند که تحت شرایط خشکی، گونهٔ توسکا ییلاقی به‌سرعت توانایی خود را برای جذب آب از دست می‌دهد که سبب افت پتانسیل آب در برگ‌ها و کاهش تورژسانس سلولی می‌شود (Alachew et al., 2016). این وضعیت سبب کاهش فرایندهای طویل‌شدگی سلولی می‌شود که محدودیت رشد اندام‌های گیاهی را در پی دارد. در شرایط خشکی، گیاهان به‌منظور حفظ بقای خود تغییرات بیوشیمیایی مختلفی را تجربه می‌کنند. یکی از اثرهای اصلی خشکی بر توسکا ییلاقی کاهش فتوسنتز است. تنش خشکی سبب کاهش پتانسیل آب برگ و بسته شدن روزنه‌ها می‌شود که کاهش تبادل گاز و کاهش فتوسنتز را در پی دارد (Lei et al., 2006). بسته شدن روزنه‌ها، سازوکاری حفاظتی برای کاهش اتلاف آب است؛ اما در عین‌حال، محدودیت دسترسی به دی‌اکسید کربن برای فتوسنتز موجب کاهش تولید انرژی و رشد گیاه می‌شود. این فرایند در نهایت به کاهش زنده‌مانی گیاه و افت تولید زیست‌توده منجر می‌شود.

در پژوهش Ravanbakhsh et al. (2022) تأثیر تنش خشکی بر پارامترهای ریخت‌شناسی و فیزیولوژی نهال‌های یکسالهٔ دو گونهٔ جنگلی افرا پلت و توسکا ییلاقی بررسی شد. نتایج نشان داد که تنش

خشکی موجب کاهش ارتفاع، قطر یقه، زیست‌تودهٔ برگ و ریشهٔ نهال‌های دو گونه می‌شود. در گونهٔ توسکا ییلاقی، افت بیشتری در زیست‌تودهٔ ساقه دیده شد. همچنین نسبت ریشه به اندام هوایی در گونهٔ توسکا ییلاقی افزایش محسوس داشت، ولی در گونهٔ افرا افزایش جزئی بود. در پژوهش Kartoolinejad et al. (2017) اثر نانوپرایمینگ با استفاده از نانولوله‌های کربنی چندجداره بر تحمل به تنش خشکی بر گونهٔ توسکا ییلاقی بررسی شد. محلول پلی‌اتیلن گلایکول ۶۰۰۰ در سطوح ۰، ۲-، ۴-، ۶- و ۸- بار تنش خشکی در آزمایشگاه روی بذرهای پرایم‌شده با غلظت‌های ۰، ۱۰، ۳۰، ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر نانولوله‌های کربنی اعمال شد. نتایج نشان داد که اثر نانوپرایمینگ و تنش خشکی بر شاخص‌های درصد جوانه‌زنی، سرعت جوانه‌زنی، وزن ترِ ریشه، وزن ترِ ساقه و نسبت وزن ترِ ریشه به ساقه در سطح احتمال ۹۹ درصد معنی‌دار است. در تمام سطوح تنش خشکی، بیشترین درصد و سرعت جوانه‌زنی در تیمار ۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر نانوکربن مشاهده شد. همچنین بیشترین وزن ترِ ریشه و ساقه در تمام سطوح خشکی متعلق به تیمار ۳۰ میلی‌گرم بر لیتر نانوکربن بود. از یافته‌های این تحقیق می‌توان نتیجه گرفت که نانوپرایمینگ با نانولوله‌های کربنی چندجداره موجب بهبود صفات جوانه‌زنی بذر درخت توسکا ییلاقی در شرایط تنش خشکی خواهد شد. Ravanbakhsh et al. (2023) تأثیر تنش خشکی بر پارامترهای ریخت‌شناسی، فیزیولوژی و بیوشیمیایی گونهٔ جنگلی ون (*Fraxinus excelsior*) را در قالب طرح کاملاً تصادفی روی نهال‌های یکساله و چهار سطح تنش خشکی ۲۵ درصد (تنش شدید)، ۵۰ درصد (تنش متوسط)، ۷۵ درصد (تنش خفیف) و ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی (بدون تنش) بررسی کردند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که نهال‌های ون به کمک راهبرد اجتناب و تحمل خشکی مانند کاهش رشد و زی‌توده، افزایش نسبت ریشه به اندام هوایی، حفظ رنگیزه‌های فتوسنتزی و افزایش فعالیت‌های آنزیمی تا سطح تیمار ۵۰ درصد ظرفیت زراعی توانایی سازش با شرایط کمبود آب را دارند. Asgharpour et al. (2017) تأثیر تیمارهای تنش خشکی بر ویژگی‌های رویشی، مورفولوژیکی برگ و فیزیولوژیکی نهال‌های یکسالهٔ افرا شیردار (*Acer cappadocicum*) را در قالب طرح کاملاً تصادفی با چهار سطح ظرفیت زراعی شامل ظرفیت زراعی ۱۰۰ درصد (شاهد)، ۷۵ درصد (تنش ملایم)، ۵۰ درصد (تنش متوسط) و ۲۵ درصد (تنش شدید) در شرایط اتاقک رشد بررسی کردند. نتایج نشان داد که از میان ویژگی‌های تحت بررسی، تنش خشکی بیشترین اثر را بر ویژگی‌های فیزیولوژیکی دارد. تشدید تنش خشکی موجب تغییر مقدار کلروفیل b، فعالیت آنزیم پراکسیداز و نشت الکترولیت و کاهش محتوای نسبی آب برگ شد، اما بر ویژگی‌های مورفولوژیکی برگ تأثیری نداشت.

بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، با افزایش مقدار شاخص تابش خورشیدی، احتمال حضور گونهٔ توسکا ییلاقی افزایش می‌یابد. توسکا ییلاقی گونه‌ای پیشگام و نیازمند نور است که در شرایطی با نور فراوان خورشید رشد می‌کند (Sagheb talebi et al., 2014). دامنه‌های جنوبی در مقایسه با دامنه‌های شمالی، به‌ویژه در نیمکرهٔ شمالی، نور مستقیم بیشتری در طول روز دریافت می‌کنند (Singh, 2018). این افزایش پرتو خورشیدی، می‌تواند سبب گرم‌تر شدن خاک و افزایش فعالیت فتوسنتزی شود که هر دو عامل برای رشد و استقرار گونه‌های نیازمند نور مانند توسکا ییلاقی مناسب‌اند. رژیم حرارتی جهت‌های جنوبی همچنین می‌تواند فصل رشد را طولانی‌تر کند و امکان استقرار موفق‌تر نهال‌های گونه‌های نورپسند را فراهم آورد (Grime, 2006). همچنین نتایج بررسی اهمیت نسبی متغیرها با استفاده از مدل‌های SVM و GLM نشان داد که مقدار بارش دومین عامل اثرگذار بر حضور گونهٔ توسکا ییلاقی است. توسکا ییلاقی گونه‌ای رطوبت‌پسند است و وجود رطوبت کافی برای

جوانه‌زنی بذر و رشد ریشهٔ گیاه ضروری است (Sagheb-Talebi et al., 2014; Anadon-Rosellet et al., 2022). بنابراین افزایش بارندگی، رطوبت خاک را افزایش می‌دهد و محیط مساعدتری برای استقرار و رشد این گونه ایجاد می‌کند.

بیشترین احتمال حضور و همچنین رویشگاه مطلوب گونهٔ توسکا ییلاقی، در مناطق مرکزی و غربی جنگل‌های هیرکانی به دست آمد (شکل ۶). نواحی غربی، بارندگی سالانهٔ بیشتر از ۱۳۵۰ میلی‌متر تا گاهی ۲۰۰۰ میلی‌متر دریافت می‌کنند، درحالی که در بخش‌های شرقی بارندگی سالانه، به‌طور متوسط فقط ۵۳۰ میلی‌متر است (Asadi et al., 2024). رطوبت برای توسکا ییلاقی که گونه‌ای حساس به خشکی محسوب می‌شود بسیار مهم است؛ زیرا برای رشد بهینه، به‌ویژه در طول دورهٔ استقرار نهال، به رطوبت ثابت خاک نیاز دارد. افزون‌بر این، میانگین دمای سالانهٔ کمتر در مناطق غربی (حدود ۱۵ درجهٔ سانتی‌گراد) در مقایسه با مناطق گرم‌تر شرقی (۱۷/۵ درجهٔ سانتی‌گراد) برای فرایندهای فیزیولوژیکی گونه مساعدتر است (Sagheb-Talebi et al., 2014). ترکیبی از افزایش بارندگی و دمای مطلوب رشد بهتر گونهٔ توسکا ییلاقی را به همراه دارد. بنابراین در بخش‌های مرکزی و غربی جنگل هیرکانی، شرایط بهتری (افزایش کیفیت خاک و تنوع زیستی) برای استقرار این گونهٔ پیشگام فراهم است. با این‌حال، برخلاف مدل‌های دیگر، مدل RF حضور گونهٔ توسکا ییلاقی را در ارتفاعات پایین مناطق شرقی جنگل‌های هیرکانی نیز با احتمال حدود ۵۰ درصد پیش‌بینی کرده است. این نتیجه می‌تواند به‌دلیل قابلیت مناسب مدل RF یعنی در نظر گرفتن روابط پیچیده و غیرخطی بین متغیرهای زیست‌محیطی باشد. مدل RF به‌طور بالقوه می‌تواند اثرهای متقابل عوامل محیطی موجود در مناطق شرقی را به‌خوبی شناسایی کند. از سوی دیگر، دقت زیاد مدل RF در مقایسه با بقیهٔ مدل‌ها ممکن است به‌دلیل استفاده از مجموعه‌ای بزرگ از داده‌ها و توانایی آن در مدیریت عدم قطعیت‌های موجود در داده‌های مکانی باشد. بنابراین، این مدل توانسته است مناطقی را که به‌طور بالقوه برای استقرار توسکا ییلاقی مناسب‌اند، حتی در بخش‌های شرقی جنگل‌های هیرکانی شناسایی کند. این یافته اهمیت توجه به شرایط محلی و نقش میکروکلیما را در پیش‌بینی پراکنش گونه‌ها نشان می‌دهد.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش رویشگاه مناسب توسکا ییلاقی در جنگل‌های هیرکانی با استفاده از متغیرهای فیزیوگرافیک، اقلیمی و تنش خشکی با کمک مدل‌های RF، SVM و GLM پیش‌بینی شد. بر اساس نتایج، مدل RF با مقدار سطح زیر منحنی ۰/۷۳، بهترین عملکرد را در مدل‌سازی رویشگاه مناسب توسکا ییلاقی دارد. ارتفاع از سطح دریا، خشکی و جهت به‌ترتیب مهم‌ترین متغیرها در پیش‌بینی رویشگاه مناسب توسکا با استفاده از مدل RF است. احتمال حضور گونهٔ توسکا ییلاقی با افزایش تنش خشکی کاهش می‌یابد، اما با افزایش ارتفاع از سطح دریا و همچنین جهت، احتمال حضور گونهٔ توسکا افزایش می‌یابد. بر اساس نتایج مدل RF در حدود ۵۱ درصد از کل سطح جنگل‌های هیرکانی برای حضور گونهٔ توسکا ییلاقی مناسب است. تنش خشکی از مهم‌ترین عوامل محدودکنندهٔ پراکنش گونهٔ توسکا ییلاقی در جنگل‌های هیرکانی است. کاهش بارندگی و افزایش دما به‌واسطهٔ تغییرات اقلیمی، تنش خشکی را در منطقه افزایش می‌دهد و به‌طور مستقیم سبب محدود شدن رشد و تکثیر توسکا ییلاقی می‌شود. این تغییرات هم بقای این گونه را تحت تأثیر قرار می‌دهد و هم می‌تواند موجب کاهش شدید تنوع زیستی و تغییر ساختار جنگل‌های هیرکانی شود که در نتیجه بوم‌سازگان حیاتی و خدمات آنها دچار اختلال خواهند شد. به‌دلیل اهمیت گونهٔ پیشاهنگ

توسکا ییلاقی در تثبیت نیتروژن خاک و حفظ تعادل اکولوژیکی جنگل‌های هیرکانی، حفظ و مدیریت صحیح این گونه در برنامه‌های احیای جنگل و حفاظت از تنوع زیستی ضروری است. اجرای راهبردهایی مانند انتخاب گونه‌های مقاوم‌تر به خشکی برای جنگلکاری در مناطق حساس به خشکی و استفاده از روش‌های مدیریت پایدار منابع آبی می‌تواند به کاهش پیامدهای منفی این تغییرات کمک کند. پژوهش‌های بیشتری در زمینهٔ واکنش‌های فیزیولوژیکی و بوم‌شناختی توسکا ییلاقی به تنش خشکی و دیگر تنش‌های اقلیمی باید صورت گیرد تا بتوان به برنامه‌های مدیریتی دقیق‌تر و مؤثرتری دست یافت. به‌طور کلی، پیشنهاد می‌شود که از جنگلکاری با گونهٔ توسکا ییلاقی در مناطق آسیب‌پذیر به‌واسطهٔ تنش خشکی خودداری و به‌جای آن از گونه‌های مقاوم‌تر در برابر شرایط کم‌آبی (با توجه به منطقه، گونه‌هایی مانند اوجا، داغداغان، ملج، شیردار و پلت) استفاده شود تا ساختار و عملکرد بوم‌سازگان جنگلی به بهترین شکل حفظ شود.

سپاسگزاری

نگارندگان از حمایت مالی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری و همچنین همکاری‌های سازمان منابع طبیعی و آبخیزداری کشور در اجرای پژوهش حاضر کمال تشکر و قدردانی را دارند.

References

Adams, H.D., Guardiola-Claramonte, M., Barron-Gafford, G.A., Villegas, J.C., Breshears, D.D., Zou, C.B., Troch, P.A., & Huxman, T.E. (2009). Temperature sensitivity of drought-induced tree mortality portends increased regional die-off under global-change-type drought. *Proceedings of the national academy of sciences, 106*(17), 7063-7066. https://doi.org/10.1073/pnas.0901438106.

Aertsen, W., Kint, V., van Orshoven, J., Özkan, K., & Muys, B. (2010). Comparison and ranking of different modelling techniques for prediction of site index in Mediterranean mountain forests. *Ecological Modelling*, *221*(8), 1119-1130. https://doi.org/10.1016/J.ECOLMODEL.2010.01.007

Alachew Embiale, A.E., Muhammad Hussein, M.H., Azamal Husen, A.H., Samuel Sahile, S.S., & Kasim Mohammed, K.M. (2016). Differential sensitivity of Pisum sativum L. cultivars to water-deficit stress: changes in growth, water status, chlorophyll fluorescence and gas exchange attributes. *Journal of Agronomy*, *15*(2), 45-57. https://scialert.net/abstract/?doi=ja.2016.45.57

Alavi, J., Ahmadi, K., Hosseini, S.M., Masoud, T., & Nouri, Z. (2020). The importance of climatic, topographic and edaphic variables in the distribution of yew species (*Taxus baccata* L.) and prioritization of areas for conservation and restoration in the north of Iran. *Iranian Journal of Forest*, *11*(4), 477-492. (In Persian)

Alexander, J.M., Diez, J.M., Hart, S.P., & Levine, J.M. (2016). When climate reshuffles competitors: a call for experimental macroecology. *Trends in Ecology & Evolution*, *31*(11), 831-841. https://doi.org/10.1016/j.tree.2016.08.003

Allen, C.D., Macalady, A.K., Chenchouni, H., Bachelet, D., McDowell, N., Vennetier, M., Kitzberger, T., Rigling, A., Breshears, D.D., Hogg, E.T., & Gonzalez, P. (2010). A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. *Forest Ecology and Management*, *259*(4), 660-684. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.09.001

Anadon-Rosell, A., Scharnweber, T., von Arx, G., Peters, R.L., Smiljanić, M., Weddell, S., & Wilmking, M. (2022). Growth and wood trait relationships of *Alnus glutinosa* in peatland forest stands with contrasting water regimes. *Frontiers in Plant Science*, *12*, 788106. https://doi.org/10.3389/fpls.2021.788106

Asadi, H., Jalilvand, H., & Moslemi, S.M. (2021). Vegetation classification of darabkola forest and their relation to physiographic factors. *Iranian Journal of Applied Ecology, 10*(3), 17-33. (In Persian) https://doi.org/10.47176/ijae.10.3.13521

Asadi, H., Jalilvand, H., Tafazoli, M., & Hosseini, S.F. (2024). Modeling Suitable Habitats of *Parrotia persica* (DC.) CA Mey. in the Hyrcanian Forests Using Environmental Factors. *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*. https://doi.org/10.22092/ijfpr.2024.366708.2173. (In Persian)

Asgharpour, E., Azadfar, D., & Saeedi, Z. (2017). Evaluation of *Acer cappadocicum* Gled seedlings to drought stress. *Journal of Plant Research*, *30*(1), 1-11. (In Persian) https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23832592.1396.30.1.1.0

Attarod, P., Kheirkhah, F., Khalighi Sigaroodi, S., Sadeghi, M., & Bayramzadeh, V. (2017). Trend analysis of meteorological parameters and reference evapotranspiration in the Caspian region. *Iranian journal of Forest*, *9*(2), 171-185. (In Persian)

Dai, A. (2013). Increasing drought under global warming in observations and models. *Nature Climate Change*, *3*(1), 52-58. https://doi.org/10.1038/nclimate1633

De Cáceres, M., Molowny-Horas, R., Cabon, A., Martínez-Vilalta, J., Mencuccini, M., García-Valdés, R., Nadal-Sala, D., Sabaté, S., Martin-StPaul, N., Morin, X., & Batllori, E. (2022). MEDFATE 2.8. 1: A trait-enabled model to simulate Mediterranean forest function and dynamics at regional scales. *Geoscientific Model Development Discussions*, *2022*, 1-52. https://hdl.handle.net/10459.1/464253

Eslami, A., Naseri, B., & Khazaei kohpar, J. (2016). A survey on physical and physiological characteristics of Caucasian Alder (*Alnus subcordata* C. A. May.) in different ecological conditions (case study: Golband forest management plan, Nowshahr). *Journal of Plant Research, 29*(3), 475 – 483. (In Persian).

Estévez, V., Mattbäck, S., Boman, A., Beucher, A., Björk, K.M., & Österholm, P. (2023). Improving prediction accuracy for acid sulfate soil mapping by means of variable selection. *Frontiers in Environmental Science*, *11*, 1213069. https://doi.org/10.3389/fenvs.2023.1213069

Fathollahzadeh, A. (2018). Response curve and species distribution model of beech, basswood, ironwood, maple and alder in Educational and Research Forest of Tarbiat Modares University. M.Sc. thesis, Faculty of Natural Resources and Marine Sciences, Tarbiat Modares University, Noor, Iran, 85p. (In Persian)

Gazol, A., Camarero, J.J., Vicente-Serrano, S.M., Sánchez-Salguero, R., Gutiérrez, E., de Luis, M., Sangüesa-Barreda, G., Novak, K., Rozas, V., Tíscar, P.A., & Linares, J.C. (2018). Forest resilience to drought varies across biomes. *Global Change Biology*, *24*(5), 2143-2158. https://doi.org/10.1111/gcb.14082

Goodarzi, Gh.R., Ahmadloo, F., & Sagheb-Talebi, Kh. (2013). Effects of Physiographic factors and Some Physical and Chemical Soil Properties on Distribution *Amygdalus scoparia* Spach. in 4 Areas of Markazi Province. *Journal of Wood and Forest Science and Technology, 19*(3), 59-76. (In Persian) https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23222077.1391.19.3.4.9

Granier, C., Bessagnet, B., Bond, T., D'Angiola, A., Denier van der Gon, H., Frost, G.J., Heil, A., Kaiser, J.W., Kinne, S., Klimont, Z., & Kloster, S. (2011). Evolution of anthropogenic and biomass burning emissions of air pollutants at global and regional scales during the 1980–2010 period. *Climatic change*, *109*, 163-190.

Greenwell, B.M. (2017). pdp: An R package for constructing partial dependence plots. *The R Journal*, *9*(1), 421

Grime, J.P. (2006). *Plant strategies, vegetation processes, and ecosystem properties*. John Wiley & Sons. 464p.

Guo, M., Li, J., Wang, Y., Long, Q., & Bai, P. (2019). Spatiotemporal variations of meteorological droughts and the assessments of agricultural drought risk in a typical agricultural province of China. *Atmosphere*, *10*(9), 542. https://doi.org/10.3390/atmos10090542

Hadinezhad, P., Asadi, H., Hojjati, S.M., Tafazoli, M., & yousefpour, Y. (2025). Factors affecting tree drought stress in Hyrcanian forests. *Forest Research and Development*, *10*(4), 431-451. (In Persian). https://doi.org/10.30466/jfrd.2024.55216.1718

Hamrani, A., Akbarzadeh, A., & Madramootoo, C.A. (2020). Machine learning for predicting greenhouse gas emissions from agricultural soils. *Science of The Total Environment*, *741*, 140338. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140338

Hijmans, R.J., Phillips, S., Leathwick, J., Elith, J., & Hijmans, M.R.J. (2017). Package 'dismo'. *Circles*, *9*(1), 1-68. https://doi.org/10.32614/CRAN.package.dismo

Hijmans, R.J., Van Etten, J., Cheng, J., Mattiuzzi, M., Sumner, M., Greenberg, J.A., Lamigueiro, O.P., Bevan, A., Racine, E.B., Shortridge, A., & Hijmans, M.R.J. (2015). Package 'raster'. *R package*, *734*, 473. https://doi.org/10.32614/CRAN.package.raster

Hosseini, S.F., Jalilvand, H., Fallah, A., Asadi, H., & Tafazoli, M. (2024). Does the frequency of fog affect the structural properties of *Fagus orientalis* in the Hyrcanian Forest. *Ecology of Iranian Forest*, *12*(2), 15-25. (In Persian). https://doi.org/10.61186/ifej.12.2.15

Hosseini, S.F., Jalilvand, H., Fallah, A., Asadi, H., & Tafazoli, M. (2025). Machine learning methods for basal area prediction of *Fagus orientalis* Lipsky stands based on national forest inventory. *Trees, 39*(2), 1-18. https://doi.org/10.1007/s00468-025-02616

Jafari, M. (2008). Investigation and analysis of climate change factors in Caspian Zone forests for last fifty years. *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*, *16*(2), 326-314. (In Persian)

Jian, L.K., MacNeice, P.J., Taktakishvili, A., Odstrcil, D., Jackson, B., Yu, H.S., Riley, P., Sokolov, I.V., & Evans, R.M. (2015). Validation for solar wind prediction at Earth: Comparison of coronal and heliospheric models installed at the CCMC. *Space Weather*, *13*(5), 316-338. https://doi.org/10.1002/2015SW001174

Kartoolinejad, D., Rahimi, D., Nourmohammadi, K., & Naghdi, R. (2017). The Effect of carbon nanotubes on drought resistance of Caucasian alder (*Alnus subcordata* CA Mey) in germination stage. *Iranian Journal of Seed Science and Technology*, *6*(2), 17-28. (In Persian). https://doi.org/10.22034/ijsst.2018.108709.1033

Kuhn, M. (2008). Building predictive models in R using the caret package. J*ournal of statistical software*, *28*, 1-26. https://doi.org/10.18637/jss.v028.i05

Lei, Y., Yin, C., & Li, C. (2006). Differences in some morphological, physiological, and biochemical responses to drought stress in two contrasting populations of *Populus przewalskii*. *Physiologia Plantarum*, *127*(2), 182-191. https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.2006.00638.x

Linares, J.C., Camarero, J.J., & Carreira, J.A. (2009). Interacting effects of changes in climate and forest cover on mortality and growth of the southernmost European fir forests. *Global Ecology and Biogeography*, *18*(4), 485-497. https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2009.00465.x

Marvi Mohadjer, M.R. (2006). Silviculture. Tehran University Press, 387 p. (In Persian).

Mirdeylami, S.Z., & Heshmati, Gh.A. (2014). Study of the forest vegetation on the basis of elevation gradient in Touskestan-Charbagh habitat, Golestan province. *Journal of Wood and Forest Science and Technology, 20*(4), 41-60. (In Persian). https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23222077.1392.20.4.3.7

Moghbel Esfahani, F., Alavi, S.J., Hosseini, S.M., & Tabari Kochaksarai, M. (2023). Determining the habitat suitability of *Quercus castaneifolia* CA Mey In order to plan restoration using species distribution modeling. *Forest Research and Development*, *9*(3), 419-436. (In Persian). https://doi.org/10.30466/jfrd.2023.54577.1654

Mohammadi, A., Alavi, S.J., & Hosseini, S.M. (2017). Predicting the habitat suitability of Wych elm (*Ulmus glabra* Huds.) in Kheyroud Forest. *Journal of Wood and Forest Science and Technology*, *24*(3), 67-80. (In Persian). https://doi.org/10.22069/jwfst.2017.13119.1672

Moridpour, A., Namiranian, M., Alavi, S.J., & Etemad, V. (2023). Identifying the most important factors affecting the distribution of Ash (*Fraxinus excelsior* L.) and detect potential habitats areas in Kherudkanar Nowshahr forest. *Iranian Journal of Forest*, *15*(1), 69-85. (In Persian) https://doi.org/10.22034/ijf.2022.337489.1863

Nadal-Sala, D., Grote, R., Kraus, D., Hochberg, U., Klein, T., Wagner, Y., Tatarinov, F., Yakir, D., & Ruehr, N.K. (2024). Integration of tree hydraulic processes and functional impairment to capture the drought resilience of a semiarid pine forest. *Biogeosciences*, *21*(12), 2973-2994. https://doi.org/10.5194/bg-21-2973-2024

Navroodi, I.H. (2006). An investigation of the quantitative and qualitative characteristics of *Alnus subcordata* in three areas of different altitudes in Asalem (Guilan province). *Iranian Journal of Natural Resources, 59*(1), 115-129. (In Persian)

Pecchi, M., Marchi, M., Burton, V., Giannetti, F., Moriondo, M., Bernetti, I., Bindi, M., & Chirici, G. (2019). Species distribution modelling to support forest management. A literature review. *Ecological Modelling*, *411*, 108817. https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2019.108817

Pourbabaei, H., Heidari, M., Naghilou M., & Begim Faghir, M. (2015). Relationship between vegetation and environmental factors in the Anatolian oak (*Quercus petraea* L. subsp. iberica (Stev.) Krassiln) habitat: a case study of Asalem forests, Guilan. *Journal of Plant Research*, *28*(1), 53-62. (In Persian)

Ravanbakhsh, M., Babakhani, B., & Ghasemnezhad, M. (2023). Growth performance and defense response of *Fraxinus excelsior* L. seedlings to drought stress. *Iranian Journal of Forest*, *15*(2), 243-258. (In Persian). https://doi.org/10.22034/ijf.2023.345523.1874

Ravanbakhsh, M., Babakhani, B., Ghasemnezhad, M., & Serpooshan, F. (2022). Morpho-physiological responses in *Alnus subcordata* and *Acer velutinum* seedlings to drought stress. *Journal of Plant Process and Function*, *11*(51), 241-260. (In Persian). https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23222727.1401.11.51.15.2

Rezaei, G., Yezdian, F., Shafizadeh, F., & Hedayati, M.A. (2014). Effects of altitiudinal variation on physical and physiological characteristics of Alder seeds (*Alnus Subcordata* CAM) (Case study Vaz Forest management plan-District 1). *Natural Ecosystems of Iran*, *5*(1), 15-21. (In Persian).

Romstad, B., & Etzelmüller, B. (2012). Mean-curvature watersheds: A simple method for segmentation of a digital elevation model into terrain units. *Geomorphology*, *139*, 293-302. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.10.031

Sabeti, H. (2007). Forests,Trees and shrubs of Iran, Yazd university press, Iran. (In Persian)

Sagheb-Talebi, K., Pourhashemi, M., & Sajedi, T. (2014) Forests of Iran: a treasure from the past, a hope for the future. Springer, Netherlands

Seleiman, M.F., Al-Suhaibani, N., Ali, N., Akmal, M., Alotaibi, M., Refay, Y., Dindaroglu, T., Abdul-Wajid, H.H., & Battaglia, M.L. (2021). Drought stress impacts on plants and different approaches to alleviate its adverse effects. *Plants*, *10*(2), 259. https://doi.org/10.3390/plants10020259

Singh, S.H.I.P.R.A. (2018). Understanding the role of slope aspect in shaping the vegetation attributes and soil properties in Montane ecosystems. *Tropical Ecology*, *59*(3), 417-430.

Sörensen, R., Zinko, U., & Seibert, J. (2006). On the calculation of the topographic wetness index: evaluation of different methods based on field observations. *Hydrology and Earth System Sciences*, *10*(1), 101-112. https://doi.org/10.5194/hess-10-101-2006

Sparks, A.H. (2018). nasapower: a NASA POWER global meteorology, surface solar energy and climatology data client for R. *Journal of Open Source Software*, *3*(30), p.1035. https://doi.org/10.21105/joss.01035

Steen, B., Broennimann, O., Maiorano, L., & Guisan, A. (2024). How sensitive are species distribution models to different background point selection strategies? A test with species at various equilibrium levels. *Ecological Modelling, 493*, 110754. https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2024.110754

Tilman, D. (1999). The ecological consequences of changes in biodiversity: a search for general principles. *Ecology*, *80*(5), 1455-1474. https://doi.org/10.1890/0012-9658(1999)080[1455:TECOCI]2.0.CO;2

Torres-Ruiz, J.M., Cochard, H., Delzon, S., Boivin, T., Burlett, R., Cailleret, M., Corso, D., Delmas, C.E., De Caceres, M., Diaz-Espejo, A., & Fernández-Conradi, P. (2024). Plant hydraulics at the heart of plant, crops and ecosystem functions in the face of climate change. *New Phytologist*, *241*(3), pp.984-999. https://doi.org/10.1111/nph.19463

Valizadeh, E., Asadi, H., Jaafari, A., & Tafazoli, M. (2023). Machine learning prediction of tree species diversity using forest structure and environmental factors: a case study from the Hyrcanian forest, Iran. *Environmental Monitoring and Assessment, 195*(11), 1334. https://doi.org/10.1007/s10661-023-11969-1

Vicente-Serrano, S.M., Lopez-Moreno, J.I., Beguería, S., Lorenzo-Lacruz, J., Sanchez-Lorenzo, A., García-Ruiz, J.M., Azorin-Molina, C., Morán-Tejeda, E., Revuelto, J., Trigo, R., & Coelho, F. (2014). Evidence of increasing drought severity caused by temperature rise in southern Europe. *Environmental Research Letters*, *9*(4), 044001. https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/4/044001

Von Humboldt, A., & Bonpland, A. (2010). *Essay on the Geography of Plants*. University of Chicago Press, 296p.

Vose, J.M., Clark, J.S., Luce, C.H., Patel- Weynand, T. (2016). Effects of drought on forests and rangelands in the United States: A comprehensive science synthesis. Gen. Tech. Rep. WO-93b. Washington, DC: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Washington Office, 289p.

Wei, T., Simko, V., Levy, M., Xie, Y., Jin, Y., & Zemla, J. (2017). Package 'corrplot'. *Statistician*, *56*(316), 24.

Weiss, A. (2001) Topographic position and landforms analysis. in Poster presentation, ESRI user conference, San Diego, CA.

Yousefpour, R., Jacobsen, J.B., Thorsen, B.J., Meilby, H., Hanewinkel, M., & Oehler, K. (2012). A review of decision-making approaches to handle uncertainty and risk in adaptive forest management under climate change. *Annals of Forest Science*, *69*, 1-15. https://doi.org/10.1007/s13595-011-0153-4

Zakeri Pashakolaei, M., Alvaninejad, S., & Esmailzade, O. (2014). Relationship Between Plant Biodiversity and Topographical Factors in Forests of West Mazandaran (Case study: Research forest of Tarbiat Modares University). *Iranian Journal of Applied Ecology, 3*(8), 1-16. (In Persian).

Zhong, Y., Xue, Z., Jiang, M., Liu, B., & Wang, G. (2021). The application of species distribution modeling in wetland restoration: A case study in the Songnen Plain, Northeast China. *Ecological Indicators, 121*, 107137. https://doi.org/10.1016/J.ECOLIND.2020.107137

Iranian Journal of Forest
Vol. 18, No. 1, Spring 2026
pp. 33-53
Research Article

DOI: 10.22034/ijf.2025.487916.2015
CC BY 4.0

Does drought stress have an effect on the distribution of Caucasian alder (*Alnus subcordata* C.A.Mey.) in Hyrcanian forests?

Kh. Asghari[1], H. Asadi[2*], H. Jalilvand[3], S.M. Hojjati[3], and M. Tafazoli [2]

[1]Ph.D. Student of Silviculture and Forest Ecology, Faculty of Natural Resources, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, I. R. Iran
[2]Assistant Prof., Dept. of Forest Science and Engineering, Faculty of Natural Resources, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, I. R. Iran
[3]Prof., Dept. of Forest Science and Engineering, Faculty of Natural Resources, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, I. R. Iran

(Received: 9 November 2024; Accepted: 5 May 2025)

Abstract

Introduction: Due to the extensive climate changes and the increase in the frequency of drought stress, the Hyrcanian forests are facing serious threats that challenge the growth and dynamics of native species of these unique ecosystems. Caucasian alder (*Alnus subcordata* C.A.Mey.), as one of the key species in afforestation and rehabilitation of degraded lands, is particularly affected by these climate changes due to its environmental characteristics and strong need for water resources. Since this species plays an important role in nitrogen fixation and maintaining the stability of Hyrcanian forests, it is necessary to study the effect of drought stress on its presence and distribution, both in terms of biodiversity protection and forestry management. Based the literature review, no research has examined this topic. Therefore, this study aimed to investigate the impact of drought stress on the distribution of alder species in the entire area of Hyrcanian forests.

Material and Methods: This research was carried out in the entire area covered by Hyrcanian forests. For this purpose, the inventory database of Hyrcanian forests including elevation, slope and aspect, diameter and species type and height of 2700 sample plots were used. Meteorological data, including annual precipitation and mean annual temperature, were obtained from the POWER project. To calculate the drought stress, the medfate software package was used in R software. In this research, environmental variables including annual rainfall, mean annual temperature, distance from the valley, topographic location index, topographic curvature, topographic humidity index and drought stress were used. Caucasian alder distribution in Hyrcanian forests was predicted using three models including random forest (RF), support vector machine (SVM) and generalized linear model (GLM). Modeling algorithms and relative importance of variables were implemented and calculated in the caret package in R software. The cross-validation technique was used to evaluate the performance of the models. Then, the area under the curve (AUC) statistic was used to evaluate the performance of each model.

Results: The value of the area AUC for the RF model (0.73) was higher than SVM (0.67) and GLM (0.65) models. Elevation and drought stress were respectively the most important factors for predicting the presence of Caucasian alder using the RF model. Based on the results of SVM and GLM, annual rainfall was the most important factors in predicting the presence of Caucasian alder. Further, the results of investigating the response of Caucasian alder to the elevation and radiation using the RF model showed that the probability of Caucasian alder presence increases with the increase of both variables. While the probability of the presence of alder decreases with the increase of drought stress. The presence probability maps showed that Caucasian alder has a higher probability of presence in the western and central parts of the Hyrcanian forests, while the probability of its presence in the eastern parts of the Hyrcanian forests is very low.

Conclusion: The results of the present study showed that drought stress is one of the most important factors limiting the distribution of Caucasian alder in Hyrcanian forests as this species is one of the hygrophile species in the Hyrcanian forests. The decrease in rainfall and increase in temperature due to climate change will increase the drought stress in the region and will directly limit the growth and regeneration of alder. In general, it is suggested to avoid afforestation with Caucasian alder in areas that are vulnerable to drought stress, and instead use species more resistant to low water conditions to preserve the structure and function of forest ecosystems in the best way.

Keywords: Machine learning models, Random forest, Suitable habitat, Medfate package.

[*]Corresponding author Tel: +98 1133885411 Email: h.asadi@sanru.ac.ir