



## برف به عنوان آشفته گی طبیعی و پیامدهای آن بر ساختار توده‌های جنگلی آمیخته پهن برگ در رویشگاه هیرکانی (منطقه پژوهش: جنگل لیره‌سرا نوشهر)

مجتبی امیری<sup>۱\*</sup>، هومن روانبخش<sup>۲</sup>، محسن مصطفی<sup>۳</sup> و مجید محمدی<sup>۱</sup>

<sup>۱</sup> دانشیار گروه علوم و مهندسی محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

<sup>۲</sup> استادیار بخش تحقیقات جنگل، مؤسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران

<sup>۳</sup> استادیار گروه خاک، گیاه و علوم غذایی، دانشگاه باری، باری، ایتالیا

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۱۸؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۰۴)

### چکیده

**مقدمه:** برف یکی از عوامل مهم در بوم‌شناسی جنگل‌های کوهستانی است و اهمیت زیادی در توزیع، ساختار و پویایی جوامع گیاهی دارد. در جنگل‌های هیرکانی، به‌ویژه در ارتفاعات بالا، بارش برف هم بر رطوبت خاک و ذخیره‌سازی آب تأثیر می‌گذارد و هم از طریق ایجاد آشفته‌گی‌های فیزیکی مانند شکستن تنه و شاخه‌ها، ریشه‌کنی درختان و تغییر در ترکیب گونه‌ها، ساختار توده‌های جنگلی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. پژوهش حاضر با هدف بررسی و تحلیل واکنش گونه‌های درختی به خسارت ناشی از برف انجام گرفته است که تاکنون در جنگل‌های هیرکانی کمتر به آن توجه شده است. در این پژوهش، تغییرات در تراکم، توزیع اندازه‌های قطری، رویه زمینی، حجم و میزان آسیب‌پذیری گونه‌های شاخص در برابر بارش‌های سنگین برف ارزیابی شد. یافته‌های این تحقیق می‌تواند به درک بهتر پاسخ توده‌های جنگلی رویشگاه هیرکانی به خسارت برف با توجه به تغییرات اقلیمی و تدوین راهبردهای مدیریتی سازگار با شرایط آینده کمک کند.

**مواد و روش‌ها:** برای ارزیابی خسارات ناشی از برف، سه قطعه جنگلی با بیشترین آسیب‌دیدگی در سری شش جنگل لیره‌سرای استان مازندران انتخاب شد. در هر یک از پارسل‌ها ۲۵ قطعه نمونه مربع‌شکل به ابعاد ۴۰×۴۰ متر (۱۶۰۰ متر مربع) به روش تصادفی-سیستماتیک برداشت شد. همه درختان با قطر برابر سیئه بیش از ۷/۵ سانتی‌متر اندازه‌گیری و ثبت شدند. داده‌های حاصل با استفاده از آزمون‌های آماری کای‌دو، تی‌استیودنت و مقایسه میانگین دانکن تحلیل شد. به‌منظور مدل‌سازی شدت آسیب‌دیدگی درختان، الگوریتم جنگل تصادفی به کار گرفته شد و عملکرد مدل براساس شاخص‌های دقت کلی، شاخص کاپا، دقت متوازن و سطح زیرمنحنی مشخصه عملیاتی گیرنده (AUC) ارزیابی شد.

**یافته‌ها:** نتایج نشان داد که بیشترین آسیب‌دیدگی نسبت به تعداد کل پایه‌های همان گونه مربوط به توسکای ییلاقی *Alnus subcordata* C.A.Mey. (۲۲ درصد پایه‌ها) بود و پس از آن لیلکی (*Gleditsia caspica* Desf.) و راش (*Fagus orientalis* Lipsky) قرار داشتند. از نظر نوع آسیب، شکستگی تنه (۵۳ درصد) و ریشه‌کن (۳۳/۶ درصد) شایع‌ترین موارد بودند، در حالی که آسیب‌دیدگی خمیدگی درختان (۱۳/۴ درصد) کمترین سهم را داشت. تحلیل داده‌ها حاکی از آن بود که درختان موجود در طبقات قطری ۲۵-۳۵ سانتی‌متر و ارتفاعی ۲۵-۲۰ متر بیشترین آسیب‌پذیری را نشان دادند. این الگو اغلب ناشی از جوان بودن ساختار توده‌ها و تراکم زیاد درختان بود که در پی اجرای شیوه‌های جنگل‌شناسی کلاسیک (قطع یکسره و...) در دهه‌های گذشته شکل گرفته است. مدل جنگل تصادفی با دقت زیادی توانست اهمیت نسبی متغیرها را رتبه‌بندی کند که در آن، ضریب قدکشیدگی درخت و حجم کل درخت به‌عنوان مهم‌ترین متغیرهای تأثیرگذار بر آسیب ناشی از برف شناسایی شدند.

**نتیجه‌گیری:** دستاورد این تحقیق نشان داد که ویژگی‌هایی مورفومتریک درختان مانند ضریب قدکشیدگی و حجم کل درخت نقش تعیین‌کننده‌ای در آسیب‌پذیری گونه‌های جنگلی رویشگاه هیرکانی در برابر بارش‌های سنگین برف دارند. نتایج می‌تواند در مدیریت توده‌های جنگلی و کاهش خسارات برف استفاده شود. نتایج مدل‌سازی خسارت برف با الگوریتم جنگل تصادفی با دقت کلی زیاد تأیید می‌کند که درختان جوان در طبقات کم‌قطر و ارتفاع متوسط به‌دلیل ساختار نامتوازن و تراکم زیاد توده‌های جنگلی ناشی از قطع‌های یکسره گذشته، بیشترین آسیب‌پذیری را دارند. همچنین، توسکای ییلاقی با (۲۲ درصد) پایه‌های آسیب‌دیده، حساس‌ترین گونه شناسایی شد که احتمالاً به‌دلیل ویژگی‌های ریخت‌شناسی مانند شاخه‌های شکننده و سیستم ریشه‌های سطحی آن است. از جنبه مدیریتی، یافته‌های این پژوهش بر لزوم تعدیل تراکم توده‌های جوان از طریق دخالت‌های پرورشی (مانند تنک کردن) برای کاهش ضریب لاغری و افزایش پایداری مکانیکی درختان تأکید دارد. همچنین انتخاب گونه‌های کمتر آسیب‌پذیر در برنامه‌های احیای جنگل‌های تخریب‌شده می‌تواند راهبردی اساسی برای سازگاری با تغییرات اقلیمی و کاهش خسارت ناشی از برف در آینده باشد.

**واژه‌های کلیدی:** آسیب‌دیدگی درختان، خسارت برف، ضریب لاغری درخت، مدل جنگل تصادفی.

## مقدمه

شیوه‌های پرورشی و نوع مدیریت، مبدأ روشی، ترکیب و ساختار توده‌های جنگلی نیز نقش مهمی در حد مقاومت و آسیب‌پذیری آنها در مقابل نزولات جوی و به‌طور ویژه برف دارد (Bebi et al., 2009; Teste & Lieffers, 2011; INRAE, 2024). پژوهش‌های متعددی نشان داده‌اند که جنگل‌های دست‌کاشت در مقایسه با جنگل‌های طبیعی دارای ساختار پیچیده، آسیب‌پذیری بیشتری در برابر بارش‌های سنگین برف نشان می‌دهند (Martin-Alcon et al., 2010). برای مثال، تحقیقات در جنگل‌های جنوب فنلاند و شمال اروپا نشان داده که توده‌های خالص کاج (*Pinus sylvestris* L.) با ضریب قدکشی‌دگی زیاد، بیشترین آسیب را از بارش برف متحمل می‌شوند (Nykänen, 1999; Peltola, 1997). همچنین عملیات پرورشی جنگل‌شناسی مانند تنک کردن می‌تواند در کوتاه‌مدت آسیب‌پذیری توده‌های جنگلی را افزایش دهد (Teste & Lieffers, 2011). در توده‌های جنگلی آمیخته سوزنی‌برگ و پهن‌برگ کشور چک مشخص شد که فراوانی و شدت خسارت برف در گونه‌های مختلف درختی متفاوت است. بیشترین نوع آسیب‌دیدگی مربوط به آسیب خم‌شدگی و کمترین آسیب‌دیدگی مربوط به شکستگی تنه بود (Martíník & Mauer, 2012). پیامدهای ناشی از خسارت برف بسیار گسترده است و می‌تواند شامل کاهش تولید چوب (Li et al., 2004)، اختلال در خدمات اکوسیستمی (Thom & Seidl, 2015) و افزایش هزینه‌های مدیریتی باشد (Gardiner et al., 2008). با توجه به پیش‌بینی افزایش رویدادهای حدی آب‌وهوایی در آینده (Ahmadi et al., 2023)، درک جامع تأثیر برف بر جنگل‌ها و توسعه راهکارهای مدیریتی مناسب از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

در ایران، جنگل‌های هیرکانی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین اکوسیستم‌های طبیعی ایران، همواره در معرض برف به‌منزله یکی از عوامل ایجاد آشفته‌گی قرار

امروزه مدیریت اکوسیستم‌های طبیعی، به‌ویژه جنگل‌ها، در کشورهای در حال توسعه که منابع طبیعی آنها به‌طور فزاینده‌ای تحت فشار قرار دارد، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است (Mitchell, 1995; Fischer et al., 2006). از جمله عوامل تأثیرگذار در ساختار جوامع گیاهی که می‌تواند در مدیریت اکوسیستمی لحاظ شود، تغییرات اقلیمی و آشفته‌گی‌های طبیعی هستند. در میان انواع آشفته‌گی‌های طبیعی، برف به‌ویژه در مناطق معتدله و کوهستانی نقش تعیین‌کننده‌ای در شکل‌دهی به ساختار و پویایی توده‌های جنگلی دارد (Ju, 2006; Bradford et al., 2013; Thom & Seidl, 2015; Vacchiano et al., 2015; Valladares et al., 2015; Tavankar et al., 2015; Rossi et al., 2017; Khodaverdi et al., 2019; Amiri, 2023). به‌طوری که خسارت برف در گستره وسیعی از مقیاس‌ها رخ می‌دهد و می‌تواند به تغییر ترکیب در گونه‌ها و تخریب چشم‌انداز منجر شود. پوشش فصلی برف اثر مهمی در تنظیم چرخه‌های کربن و نیتروژن دارد؛ به‌طوری که حذف آن از مدل‌های محاسباتی می‌تواند مقدار جذب سالانه کربن را تا حدود ۵۰ درصد کاهش دهد. پایداری برف همچنین از یخ‌زدگی خاک جلوگیری کرده و شرایط لازم را برای فعالیت‌های میکروبی در طول زمستان فراهم می‌کند (Brooks et al., 2011). درحالی که بارش متعادل برف می‌تواند به ذخیره رطوبت خاک و تعدیل دمای محیط کمک کند (Pirnia et al., 2015; IPCC, 2013)، بارش‌های سنگین و آبدار اغلب سبب خسارات سنگین به جنگل‌ها می‌شوند (Tavankar et al., 2015). این خسارات شامل شکستگی تاج، تنه و ریشه‌کن شدن درختان است که هم ساختار جنگل را تغییر می‌دهد و هم می‌تواند راه را برای تهاجم گونه‌های غیربومی و شیوع آفات و بیماری‌ها در جنگل باز کند (Schroeder & Eidmann, 1993; Fakhari et al., 2010).

کاهش ضریب لاغری تنه کاهش می‌یابد. گونه‌های کاج جنگلی و نوئل (*Picea abies* (L.) H.Karst.) در مقایسه با توس (*Betula pendula* Roth) آسیب‌پذیری بیشتری دارند، زیرا توس‌ها به دلیل ریزش برگ در فصل زمستان، سطح تاج کمتری برای تجمع برف و بار باد فراهم می‌کنند. این یافته‌ها نشان داد که در عملیات جنگل‌شناسی، توجه به ویژگی‌های ساختاری توده (مانند تراکم و ضریب قدکشیدگی تنه) و موقعیت مکانی درختان اهمیت ویژه‌ای دارد. در پژوهشی دیگر روی توده‌های جوان کاج (*Pinus contorta* var. *latifolia* Engelm) در آلبرتا، کانادا، اثر تنک کردن و کوددهی بر خسارت ناشی از بارش برف سنگین طی سال‌های ۲۰۰۷ تا ۲۰۰۹ بررسی شد. نتایج نشان داد که بیشترین آسیب در توده‌های کوددهی شده و به‌ویژه در ترکیب با تنک کردن رخ داد، به‌طوری که درصد زیادی از درختان دچار شکستگی تنه شدند. عوامل ساختاری مانند وزن سوزن‌ها، وضعیت تاج‌پوشش و حجم تنه درخت از مهم‌ترین شاخص‌های تعیین‌کننده آسیب توسط برف بودند. همچنین درختان دارای تنه باریک با تاج‌های نامتقارن بیشترین آسیب‌پذیری را نشان دادند. یافته‌های پژوهش مشخص کرد که برف می‌تواند به‌عنوان عامل خودتنک‌شدگی در توده‌های بدون تنک کردن عمل کند، اما کوددهی با افزایش حجم شاخ و برگ شدت خسارت را بیشتر می‌کند (Teste & Lieffers, 2011). Schneider et al. (2019) نیز تأثیر ساختار مکانی توده‌های جنگلی بر رژیم برف جنگل آموزشی Lubrecht در غرب مونتانا در ایالات متحده آمریکا را بررسی کردند. نتایج نشان داد که موقعیت مکانی و وضعیت قرارگیری درختان در توده به‌طور معنی‌داری بر انباشت و تداوم برف اثرگذار است، به‌طوری که فضاهای باز بیشترین انباشت برف را داشتند و برف زیر تاج درختان خزان‌کننده نسبت به گونه‌های همیشه‌سبز با تأخیر بیشتری ذوب می‌شود (Schneider et al., 2019). با توجه به پژوهش‌های

داشته‌اند، اما در سال‌های اخیر به دلیل ثبت منظم‌تر داده‌های اقلیمی این موضوع ملموس‌تر بوده است (Eshagh Nimvari et al., 2019). برای مثال، در طوفان برفی سال ۱۳۸۸ در جنگل‌های چمستان نور، گونه سرو نقره‌ای (*Cupressus sempervirens* L.) با ۸۴ درصد آسیب‌دیدگی، بیشترین خسارت را متحمل شد. درحالی که افرای پلت (*Acer velutinum* Boiss.) مقاومت زیادی در برابر بارش برف نشان داد (Fakhari et al., 2010). همچنین در جنگل‌های آمیخته ناو اسالم استان گیلان، گونه‌هایی مانند توسکای ییلاقی (*Alnus subcordata* C.A.Mey.) و بلندمازو (*Quercus castaneifolia* C.A.Mey.) در مقایسه با راش (*Fagus orientalis* L.) و ممرز (*Carpinus betulus* L.) آسیب‌پذیری بیشتری نشان دادند (Bonyad & Tavankar, 2014; Tavankar et al., 2015). در پژوهشی دیگر در توده‌های جنگلی سری لیره‌سرای نوشهر، بر اثر بارش برف مشخص شد که افزون‌بر ویژگی‌های ساختاری، عوامل محیطی مانند ارتفاع از سطح دریا، شیب و جهت دامنه نیز در میزان آسیب‌پذیری توده‌های جنگلی مؤثرند. همچنین پژوهش‌ها در سری لیره‌سرای نوشهر نشان داد که خسارات ناشی از برف در ارتفاعات پایین‌تر (کمتر از ۲۰۰ متر) به‌علت سنگینی و رطوبت بیشتر و ماندگاری طولانی‌تر آن در دامنه‌های شمالی به دلیل تابش کمتر خورشید به‌طور معنی‌داری بیشتر است (Eshagh Nimvari et al., 2019). براساس پژوهش Päätaalo et al. (1999)، برای پیش‌بینی خسارت برف، مدل‌های رگرسیونی مبتنی بر داده‌های شبیه‌سازی‌شده توسعه داده شد که در آنها شاخص‌هایی چون نسبت قطر برابرسینه به ارتفاع، تراکم توده، مقدار بار برف و موقعیت درختان نسبت به حاشیه توده، مهم‌ترین متغیرهای پیش‌بینی‌کننده در نظر گرفته شدند. نتایج نشان داد که خطر شکستگی و ریشه‌کن شدن درختان با افزایش بار برف بیشتر می‌شود و در مقابل با افزایش تراکم توده و

مساحت کل سری ۲۰۳۲/۶۱ هکتار است که ۱۶۳۷/۵ هکتار آن جزء جنگل‌های قابل بهره‌برداری و بقیه به‌عنوان فضاهای باز، مناطق حفاظتی و حمایتی، جنگلکاری و جاده‌های موجود در نظر گرفته شده است. قطعات بررسی‌شده سری لیره‌سرا در محدوده طول جغرافیایی "۵۱° ۳۰' ۰۵" تا "۵۱° ۳۳' ۱۴" و عرض "۳۶° ۳۳' ۱۹" تا "۳۶° ۳۷' ۰۹" و در دامنه ارتفاعی ۷۰ تا ۶۳۲ متر از سطح دریا واقع شده‌اند (Natural Resources & Watershed Organization, 2006). میانگین بارندگی سالانه برای ایستگاه نوشهر (ارتفاع ۲۰ متر از سطح دریا)، ۱۳۲۲ میلی‌متر است. در هنگام بارش برف (روزهای بارش برف سنگین مدنظر)، مجموع بارندگی ۱۵۶/۲ میلی‌متر، کمترین و بیشترین درجه حرارت به‌ترتیب ۱ و ۲- درجه سانتی‌گراد و متوسط سرعت باد ۲۴/۴ کیلومتر بر ساعت بود (IRIMO, 2012). خاک‌های منطقه عمیق تا نیمه‌عمیق و بافت خاک از نوع قهوه‌ای جنگلی تیپیک است که در توده‌های پهن برگ آمیخته به‌طور میانگین، دارای ترکیب بافتی خاک شامل ۲۶/۴ درصد شن، ۵۱/۳ درصد سیلت و ۲۲/۳ درصد رس است (Eshagh Nimvari et al., 2019). روش پرورشی استفاده‌شده در منطقه تا سال ۱۳۷۴ دانه‌زاد همسال با شیوه تدریجی پناهی با نگه داشتن پایه‌های مادری و از سال ۱۳۷۵ روش دانه‌زاد ناهمسال با شیوه تک‌گزینی بوده است (Natural Resources & Watershed Organization, 2006). آخرین بهره‌برداری مربوط به سال ۱۳۹۴ است که درختان شکسته و بادافتاده برداشت شدند و از مهر ۱۳۹۶ تاکنون این جنگل با اجرای طرح تنفس جنگل‌های هیرکانی با هدف حفاظتی مدیریت می‌شود. گونه‌های درختی منطقه شامل راش شرقی (*Fagus orientalis*)، ممرز (*Carpinus betulus* L.)، افرای پلت و شیردار (*Acer velutinum* Boiss.) و *Acer* (Lipsky) و توسکای بیلاقی (*Alnus cappadocicum* Gled.)، انجیلی (*Parrotia subcordata* C.A.Mey.)

انجام‌گرفته، آشفته‌گی‌های طبیعی به‌ویژه بارش‌های سنگین برف، تأثیر زیادی بر ساختار و عملکرد توده‌های جنگلی هیرکانی داشته است. با این حال، به‌دلیل نقصان در ثبت منظم داده‌های مربوط به خسارات وارد به جنگل‌ها ناشی از بارش برف، پژوهش‌های جامعی در خصوص واکنش توده‌های جنگلی به این پدیده اقلیمی انجام نگرفته است (Jafari, 2009). این کمبود اطلاعاتی به‌وضوح در تصمیم‌گیری‌های مدیریتی محسوس بوده و ضرورت تحقیقات کاربردی در این حوزه را بیش از پیش نمایان ساخته است. این پژوهش با هدف تحلیل کمی الگوهای آسیب‌پذیری گونه‌های درختی در برابر آشفته‌گی ناشی از برف در جنگل‌های حوضه آبخیز گل‌بند (طرح جنگلداری لیره‌سرا) رویشگاه هیرکانی انجام گرفته است. برای دستیابی به این هدف، پارامترهای مهم جنگل‌شناسی از جمله تراکم درختان، قطر برابرسینه، ارتفاع و روبه‌زمینی به‌طور دقیق اندازه‌گیری و سپس با به‌کارگیری الگوریتم‌های یادگیری ماشین مدل‌سازی شده‌اند. تحلیل این داده‌ها مشخص می‌کند که چه گونه‌هایی با کدام مشخصات ساختاری، بیشترین آسیب‌پذیری را در برابر خسارت برف دارند. نتایج به‌دست آمده می‌تواند مبنای علمی ارزشمندی برای طراحی راهکارهای مدیریتی همچون عملیات پرورشی هدفمند، برنامه‌ریزی برای کاهش خسارت و اولویت‌بندی مناطق نیازمند حفاظت فراهم آورد. در نهایت، یافته‌های تحقیق می‌تواند پشتوانه‌ای علمی برای ارتقای راهبردهای حفاظتی و تحقق مدیریت پایدار جنگل‌های هیرکانی به‌عنوان اکوسیستم‌های باارزش جهانی باشد.

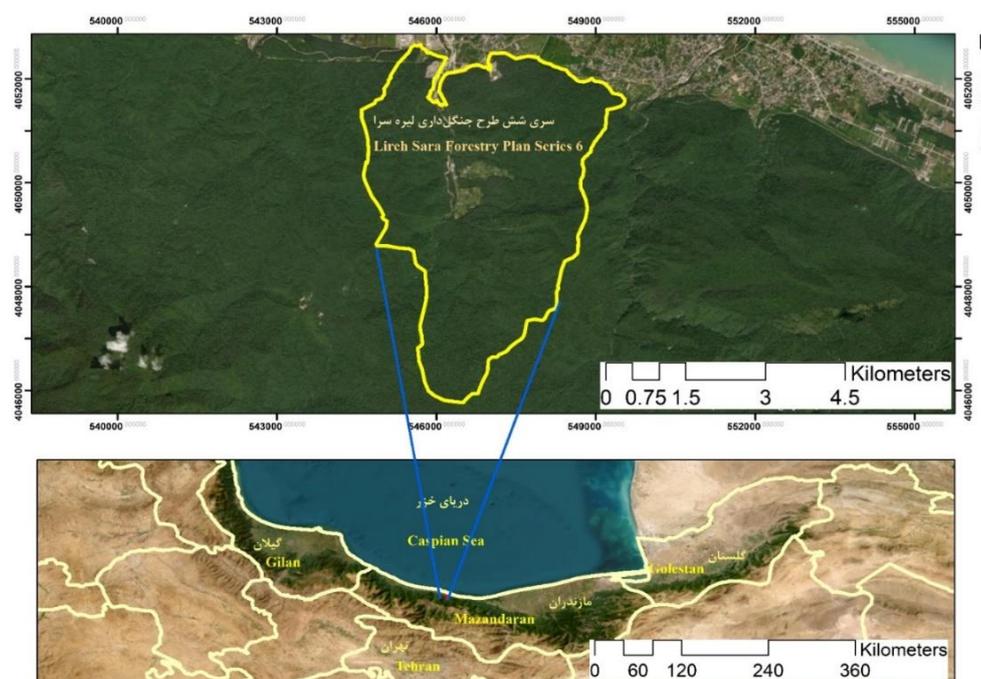
## مواد و روش‌ها

### منطقه پژوهش

پژوهش حاضر در توده‌های جنگلی سری شش طرح جنگلداری لیره‌سرا در حوضه آبخیز ۴۵ (گل‌بند) که توسط بارش برف آسیب دیده بودند، انجام گرفت.

L. لَرگ ( *Pterocarya fraxinifolia* (Poir.) Spach)، نمدار (*Tilia platyphyllos* Scop)، گردو (*Juglans regia* L.)، بید سیاه (*Salix nigra*) Marshall و انجیر (*Ficus carica* L.) است (Eshagh Nimvari et al., 2019).

*Quercus persica* (DC.) C.A.Mey، بلندمازو (*Quercus castaneifolia* C.A. Mey)، خرمندی (*Ulmus glabra* Huds.)، ملج (*Fraxinus excelsior* L.)، لیلکی (*Gleditsia caspica* Desf.)، گیلاس وحشی (*Prunus avium* (L.)



شکل ۱- نقشه منطقه پژوهش  
Figure 1. Map of the study area

حداکثر پوشش خسارت را داشته باشد، انتخاب می‌شد. نمونه‌برداری با استفاده از روش تصادفی-سیستماتیک با شبکه‌ای به ابعاد  $150 \times 200$  متر با نقطه شروع تصادفی انجام گرفت (Zobeiry, 2000; Mohammadi et al., 2014). در هر قطعه (پارسل) تعداد ۲۵ قطعه نمونه مربع شکل ( $40 \times 40$  متر) به مساحت ۱۶۰۰ متر مربع برای برداشت اطلاعات مربوط به درختان آسیب‌دیده و سالم در نظر گرفته شد (Zhu et al., 2006; Tavankar et al., 2019; Eshagh Nimvari et al., 2019). مشخصات گونه، قطر در ارتفاع برابر سینه (سانتی‌متر)، ارتفاع کامل (متر) همه درختان سالم و آسیب‌دیده با قطر برابر سینه بیش از  $7/5$  سانتی‌متر ثبت شد. ارتفاع

### شیوه اجرای پژوهش

پس از مشاهدات زمینی و گزارش کارشناسان مقیم در سری ۶ طرح جنگل‌داری لیره‌سرا مشخص شد که قطعات ۶۱۰، ۶۲۷ و ۶۳۳ بیشترین آسیب را در اثر بارش برف متحمل شده بودند؛ بنابراین این قطعات به عنوان قطعات هدف بررسی شدند. شایان ذکر است که همسان بودن شرایط و حدود رویشگاهی (شیب، جهت و ارتفاع از سطح دریا) نیز در این انتخاب دخیل بود. برای کاهش اثرهای حاشیه‌ای (از جمله جاده و بقیه عوامل) حداقل فاصله ۱۰۰ متری برای برداشت داده‌ها رعایت شد. با توجه به اینکه خسارت برف به درختان توده‌ها در تمام سطح قطعات اتفاق افتاده بود، باید روش مناسب نمونه‌برداری که

جفتی در شرایط نابرابری واریانس‌ها استفاده شد (رابطه ۳).

$$t = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{\sqrt{\frac{S_1^2}{N_1} + \frac{S_2^2}{N_2}}} \quad \text{رابطه ۳}$$

$X_1$ ، میانگین دو گروه (مثلاً آسیب‌دیده و سالم)،  $S_1^2$  و  $S_2^2$ ، واریانس نمونه‌ها در هر گروه؛  $N_1$  و  $N_2$  تعداد نمونه‌ها در هر گروه؛ و  $df$  درجه آزادی تقریبی (برای یافتن مقدار بحرانی  $t$ ) است.

میزان حساسیت‌پذیری ارتفاع درختان به توفان براساس شاخص آماری میانۀ ارتفاع درختان در هر طبقه ارتفاعی بررسی شد. این کار با استفاده از آزمون واریانس یکطرفه در طبقات مختلف ارتفاعی ارزیابی شد (رابطه ۴).

$$F = \frac{\text{Intergroup variance}}{\text{Intragroup variance}} = \frac{\sum_{i=1}^K n_i (\bar{Y}_i - \bar{Y})^2 / (K-1)}{\sum_{i=1}^K n_i (\bar{Y}_{ij} - \bar{Y}_i)^2 / (N-K)} \quad \text{رابطه ۴}$$

$Y_i$ ، میانگین گروه  $i$ ؛  $n_i$  تعداد مشاهدات گروه  $i$ ؛  $\bar{Y}$  میانگین کلی؛  $K$  تعداد گروه‌ها؛  $Y_{ij}$  مقدار مشاهداتی  $ij$ ؛  $N$  و  $n_i$  تعداد کل مقادیر مشاهداتی است.

همچنین مقایسه میانگین با استفاده از روش چنددامنه دانکن انجام گرفت (Zar, 1999). برای مقایسه درصد آسیب‌دیدگی درختان از نسبت درختان آسیب‌دیده به کل درختان در قطعه نمونه استفاده شد (رابطه ۵).

$$t = \frac{a/2, DFW \sqrt{MSE \left( \frac{1}{n_A} + \frac{1}{n_B} \right)}}{\quad} \quad \text{رابطه ۵}$$

$t$  مقدار بحرانی از جدول توزیع  $q$ ،  $MSE$  میانگین مربعات خطای به‌دست‌آمده از نتایج آزمون ANOVA، و  $nA$  و  $nB$  به‌ترتیب تعداد مشاهدات در گروه‌های  $A$  و  $B$  هستند (Venables et al., 2002).

به‌منظور مدل‌سازی و پیش‌بینی شدت آسیب‌دیدگی درختان ناشی از بارش برف، از الگوریتم جنگل تصادفی به‌عنوان یکی از روش‌های یادگیری ماشین مبتنی بر تجمیع مدل‌ها استفاده شد. جنگل تصادفی مجموعه‌ای از درختان تصمیم‌گیری است که هر یک روی زیرمجموعه‌ای تصادفی از داده‌ها و

درختان (سرپا) و طول درختان (افتاده) به‌ترتیب با استفاده از دستگاه شیب‌سنج الکترونیکی (HEC) <sup>۱</sup> و متر لیزری اندازه‌گیری شد. همه درختان با قطر برابر سینه بیشتر از ۷/۵ سانتی‌متر در چهار گروه ریشه‌کن <sup>۲</sup>، تنه‌شکسته و تاج‌شکسته <sup>۳</sup>، خمیده و شاخه‌شکسته <sup>۴</sup> و بدون آسیب یا سالم طبقه‌بندی شدند (Li et al., 2018; Ahamadi et al., 2023).

## روش تحلیل

برای مقایسه میزان آسیب در بین گونه‌های مختلف، نسبت پایه‌های آسیب‌دیده هرگونه به کل پایه‌های موجود از آن‌گونه محاسبه شد. برای آگاهی از تأثیرپذیری مشخصه‌های ساختاری درختان توده از نوع و شدت خسارت برف، ابتدا درختان آشکوب بالا براساس (ریشه‌کن، تنه شکسته و خمیده) مقایسه شدند. میانگین ارتفاع غالب درختان توده با استفاده از رابطه پیشنهادی (Oliver et al., 2005) محاسبه شد (رابطه ۱).

$$H_d = H_i \sum_{i=1}^n \frac{1}{n} \quad \text{رابطه ۱}$$

$H_d$ ، ارتفاع غالب

$H_i$  ارتفاع درخت  $i$  ام از میان  $n$  درخت قطورتر

$n$ ، صد اصله از قطورترین درختان در هکتار با ۲۰

درصد از قطورترین درختان توده

از آزمون کای‌مربع جدول توافقی برای مقایسه تفاوت معنی‌داری فراوانی‌های مختلف تأثیر توفان (درختان سالم در مقابل ریشه‌کن، تنه‌شکسته و خمیده) استفاده شد (رابطه ۲).

$$\chi^2 = \sum \frac{(F_o - F_e)^2}{F_e} \quad \text{رابطه ۲}$$

$\chi^2$ : شاخص کای‌مربع؛  $F_o$ : فراوانی مشاهده‌شده؛ و

$F_e$ : فراوانی مورد انتظار است.

برای مقایسه گروه‌های درختی آسیب‌دیده و ندیده براساس اندازه درختان در طبقات قطری از آزمون تی

1. Haglöf Electronic Clinometer
2. Uprouted
3. Snapped
4. Lost branches and bennded

۳۳۸۳ اصله بود که از بین آنها ۲۹۲ اصله بر اثر بارش برف آسیب دیده است. این میزان آسیب‌دیدگی حدود ۹ درصد کل درختان موجود در منطقه را به خود اختصاص می‌دهد (جدول ۱). همچنین در بین گونه‌های شناسایی شده ممزر با ۱۰۹ پایه و حدود ۳۷/۳ درصد کل درختان آسیب‌دیده، بیشترین خسارت ناشی از برف را متحمل شده است. بعد از آن توسکا با ۷۷ پایه، انجیلی با ۲۲ پایه و افراش شیردار با ۱۹ پایه بیشترین فراوانی را در بین درختان آسیب‌دیده دارند. به گونه‌های ملج، گیلان وحشی، انجیر و آلوچه جنگلی نیز هیچ آسیبی وارد نشده است (جدول ۱).

ممزر (*Carpinus betulus*) با فراوانی ۳۴/۵۸ درصد در آشکوب پایین و ۴۳/۸ درصد در آشکوب بالا، گونه غالب در هر دو آشکوب ارتفاعی (شامل درختان سالم و آسیب‌دیده) است. همچنین انجیلی (*Parrotia persica*) با ۲۱/۶۱ درصد در آشکوب پایین، دومین گونه غالب در این آشکوب به شمار می‌رود، در حالی که در آشکوب بالا، توسکای بیلاقی (*Alnus subcordata*) با ۱۱/۶۵ درصد فراوانی کل درختان در رتبه دوم قرار دارد. از نظر رویه زمینی توده‌های تحت بررسی، آشکوب بالا با ۲۶/۷ متر مربع در هکتار، به‌طور چشمگیری بیشتر از آشکوب پایین با ۱۰/۴ متر مربع در هکتار بود. تراکم نسبی درختان نیز نشان داد که بیش از نیمی از درختان در آشکوب بالا قرار دارند (۵۸/۸۵ درصد تراکم نسبی کل درختان) (جدول ۱).

شکل ۲، الگوی آسیب‌پذیری درختان توده‌های آمیخته بررسی شده تحت تأثیر بارش برف، با تفکیک دوطبقه ارتفاعی (آشکوب بالا و پایین) را نشان می‌دهد. داده‌ها به‌صورت درصد فراوانی براساس نوع آسیب‌دیدگی (سالم، شکسته از تنه، ریشه‌کن و خمیده) ارائه شده‌اند. در هر دو آشکوب غالب بودن درختان سالم مشاهده می‌شود، به‌طوری که بیشترین درصد فراوانی مربوط به درختان سالم است. با این حال، درصد درختان سالم در آشکوب بالا کمی بیشتر از آشکوب پایین است ( $X^2 = 576, p < 0.025$ ;  $90/1$  درصد در مقابل ۸۹

ویژگی‌ها آموزش می‌بینند و در نهایت با ترکیب پیش‌بینی‌های حاصل از درختان منفرد، طبقه‌بندی نهایی انجام می‌گیرد. فرض می‌شود که مجموعه داده آموزشی شامل نمونه‌هایی به فرم  $(x_i, y_i)$  باشد که در آن  $x_i$  نشان‌دهنده ویژگی‌ها (شامل ارتفاع کل درخت، ارتفاع تنه، قطر برابر سینه، حجم کل درخت، حجم تنه، سطح مقطع برابر سینه، ضریب لاغری و نوع گونه) و  $y_i$  نشان‌دهنده (انواع آسیب‌دیدگی درختان) است. پیش از آموزش مدل، داده‌ها به نسبت ۷۰ درصد برای آموزش و ۳۰ درصد برای آزمون تقسیم شدند تا ارزیابی عملکرد مدل به‌طور مستقل صورت گیرد (Eker et al., 2023; Shabani et al., 2024). عملکرد مدل با استفاده از مجموعه‌ای از شاخص‌های ارزیابی شامل دقت کلی (Overall Accuracy (OA)، شاخص کاپا (Kappa Index)، حساسیت (Sensitivity)، ویژگی (Specificity)، دقت متوازن (Balanced Accuracy (BA) و سطح زیر منحنی (Area Under the Curve (AUC) برای هر متغیر (عامل مؤثر در آسیب‌دیدگی) به‌طور جداگانه بررسی شد (Fawcett, 2006).

در این پژوهش، از نرم‌افزار R Studio (نسخه ۲۰۲۴، ۱۲، ۰) و SPSS نسخه ۲۲ برای تجزیه و تحلیل آماری استفاده شد. همچنین پردازش داده‌های مکانی و تصویر فضایی داده‌ها با بهره‌گیری از نرم‌افزارهای QGIS (نسخه ۳، ۴۰ LTR) و ArcGIS Pro (نسخه ۳، ۱) صورت گرفت.

## نتایج

### نتایج تحلیلی توصیفی

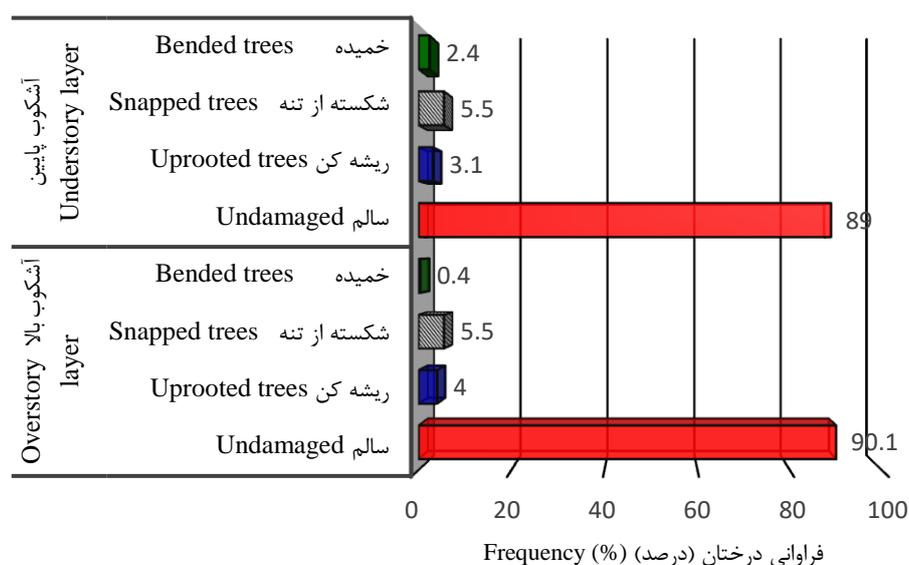
نتایج پژوهش حاضر نشان داد که ۱۹ گونه چوبی (درخت و درختچه) در منطقه شناسایی و ثبت شده‌اند. تراکم کل درختان ۳۱۹ اصله در هکتار شامل (درختان سالم و آسیب‌دیده) به دست آمد که ۱۸۷/۸ اصله در هکتار در آشکوب بالا و ۱۳۱/۲ اصله در هکتار در آشکوب پایین قرار داشتند. مجموع کل درختان آماربرداری شده در ۷۵ قطعه نمونه آماربرداری شده

درصد). در بین انواع آسیب‌دیدگی؛ شکستگی تنه، شایع‌ترین نوع آسیب در هر دو آشکوب است (۵/۵ درصد فراوانی کل درختان آسیب‌دیده). بنابراین تفاوت چندانی در درصد شکستگی تنه بین دو آشکوب مشاهده نمی‌شود. درصد ریشه‌کن شدن در آشکوب بالا (۴ درصد) بیشتر از آشکوب پایین (۳/۱ درصد) است. درختان خمیده کمترین درصد فراوانی را در هر دو آشکوب به خود اختصاص می‌دهند، اما مقدار این نوع آسیب‌دیدگی در آشکوب پایین (۲/۴ درصد) بیشتر از آشکوب بالا (۰/۴ درصد) است ( $p < 0.003$ ؛ شکل ۲).

جدول ۱- تراکم (تعداد در هکتار)، چیرگی (رویه زمینی در هکتار)، شاخص اهمیت نسبی برای پایه‌های با قطر برابر سینه بیشتر از ۷/۵ سانتی‌متر در طرح جنگلداری لیره‌سرا، استان مازندران

Table 1. Density (Number per hectare), dominance (basal area per hectare), and relative importance for stems with dbh more than 7.5 cm in Lire-sara, Mazandaran, Iran

گونه Species	تراکم (تعداد هکتار) n.ha <sup>-1</sup>		تراکم نسبی (درصد) Density (%)		غالبیت براساس رویه زمینی (متر مربع در هکتار) Basal area (m <sup>2</sup> .ha <sup>-1</sup> )		غالبیت (درصد) Basal area (%)	
	آشکوب بالا Overstory	آشکوب پایین Understory	آشکوب بالا Overstory	آشکوب پایین Understory	آشکوب بالا Overstory	آشکوب پایین Understory	آشکوب بالا Overstory	آشکوب پایین Understory
<i>Carpinus betulus</i> L.	75.7	56	40.35	42.7	11.65	3.6	43.8	34.58
<i>Parrotia persica</i> (DC.) C.A.Mey.	10.7	24.7	5.7	18.8	1.25	2.25	4.7	21.61
<i>Alnus subcordata</i> C.A. Mey.	21.1	8	11.2	6.1	3.1	0.78	11.65	7.49
<i>Acer cappadocicum</i> Gled.	18.65	6.7	9.9	5.1	2.13	0.45	8.01	4.32
<i>Quercus castaneifolia</i> C.A. Mey.	18.95	4.2	10	3.2	2.85	0.4	10.71	3.84
<i>Acer velutinum</i> Boiss.	12.9	3.5	6.9	2.7	2	0.5	7.52	4.8
<i>Fagus orientalis</i> L.	11.7	4.5	6.2	3.4	1.32	0.42	4.96	4.03
<i>Buxus hyrcana</i> Pojark.	0.2	13	0.1	9.9	0.02	0.83	0.08	7.97
<i>Tilia platyphyllos</i> Scop	8	1.9	4.3	1.45	1.2	0.18	4.9	1.73
<i>Diospyros lotus</i> L.	4.9	3.9	2.6	3	0.6	0.4	2.26	3.84
<i>Ulmus glabra</i> Huds.	1.3	0.87	0.7	0.65	0.18	0.11	0.68	1.06
<i>Fraxinus excelsior</i> L.	1.5	0.3	0.8	0.3	0.13	0.04	0.49	0.38
<i>Gleditsia capsica</i> Desf	0	1.5	0	1.1	0	0.3	0	2.88
<i>Prunus avium</i> (L) L.	1	0.58	0.6	0.45	0.01	0.03	0.04	0.29
<i>Pterocarya fraxinifolia</i> (Poir.) K.Koch.	0.98	0.01	0.55	0.01	0.11	0.01	0.41	0.1
<i>Ficus carica</i> L.	0	0.9	0	0.7	0	0.05	0.00	0.48
<i>Pyrus boissieriana</i> Buhse	0	0.5	0	0.45	0	0.04	0.00	0.38
<i>Juglans regia</i> L.	0.2	0.01	0.1	0.01	0.03	0.02	0.11	0.19
مجموع هر آشکوب Sum	187.8	131.2	58.85	41.15	26.7	10.40	71.94	28.06
Total جمع کل	319		100		37.1		100	

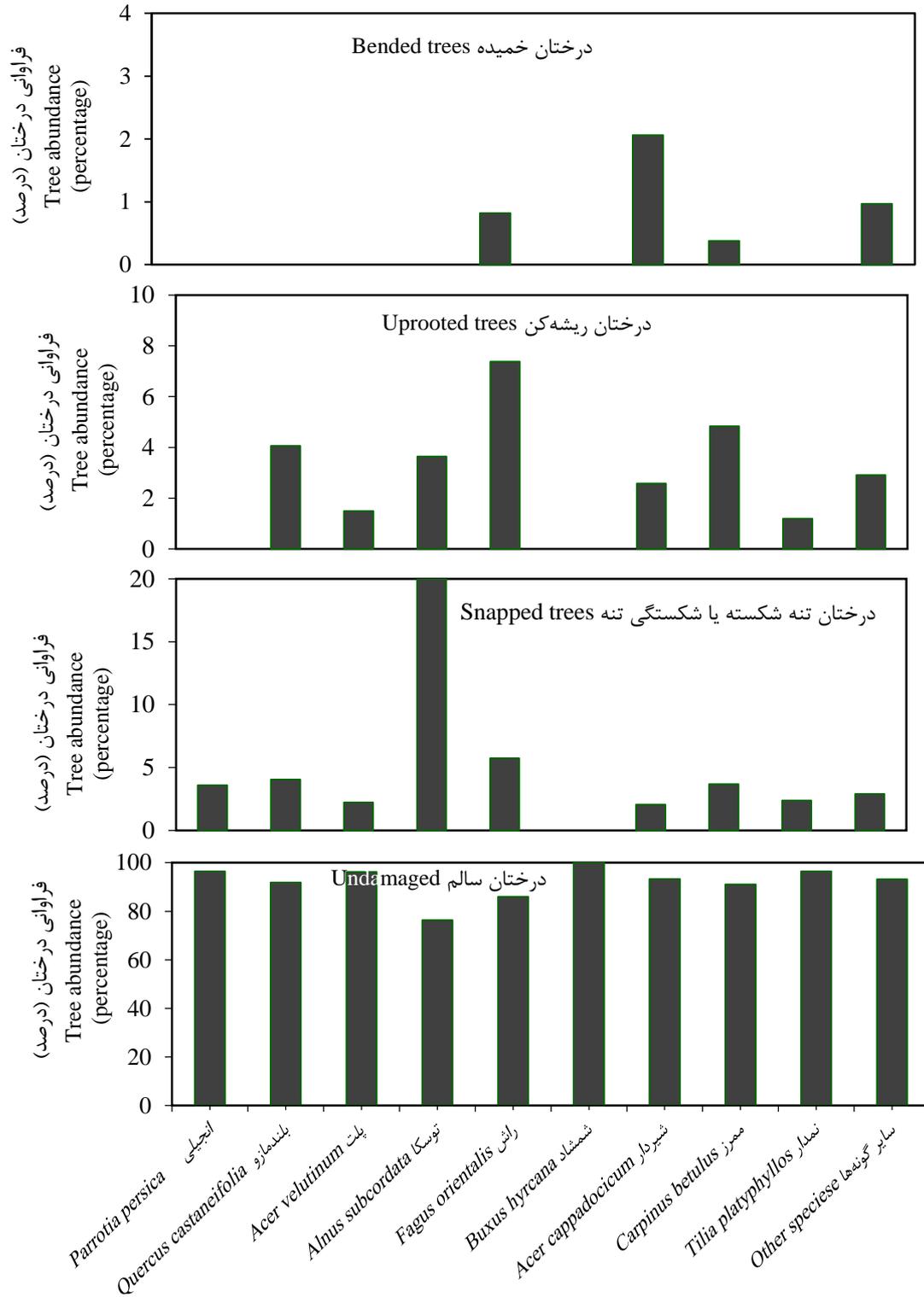


شکل ۲- ترکیب گونه‌ای و سهم درختان سالم و آسیب‌دیده در منطقه پژوهش (نمودارها مقادیر عددی انواع آسیب‌دیدگی (بین ۲/۴ تا ۹۰/۱ درصد) را در محور عمودی (مقیاس ۰ تا ۱۰۰ درصد) نمایش می‌دهد. درختان سالم بیشترین فراوانی (۹۰/۱ درصد) را داشته‌اند، درحالی که درختان با شکستگی تنه (۵/۵ درصد)، ریشه‌کن‌شده (۳/۱ درصد) و خمیده (۲/۴ درصد) به ترتیب دارای سهم خیلی کمتری هستند)

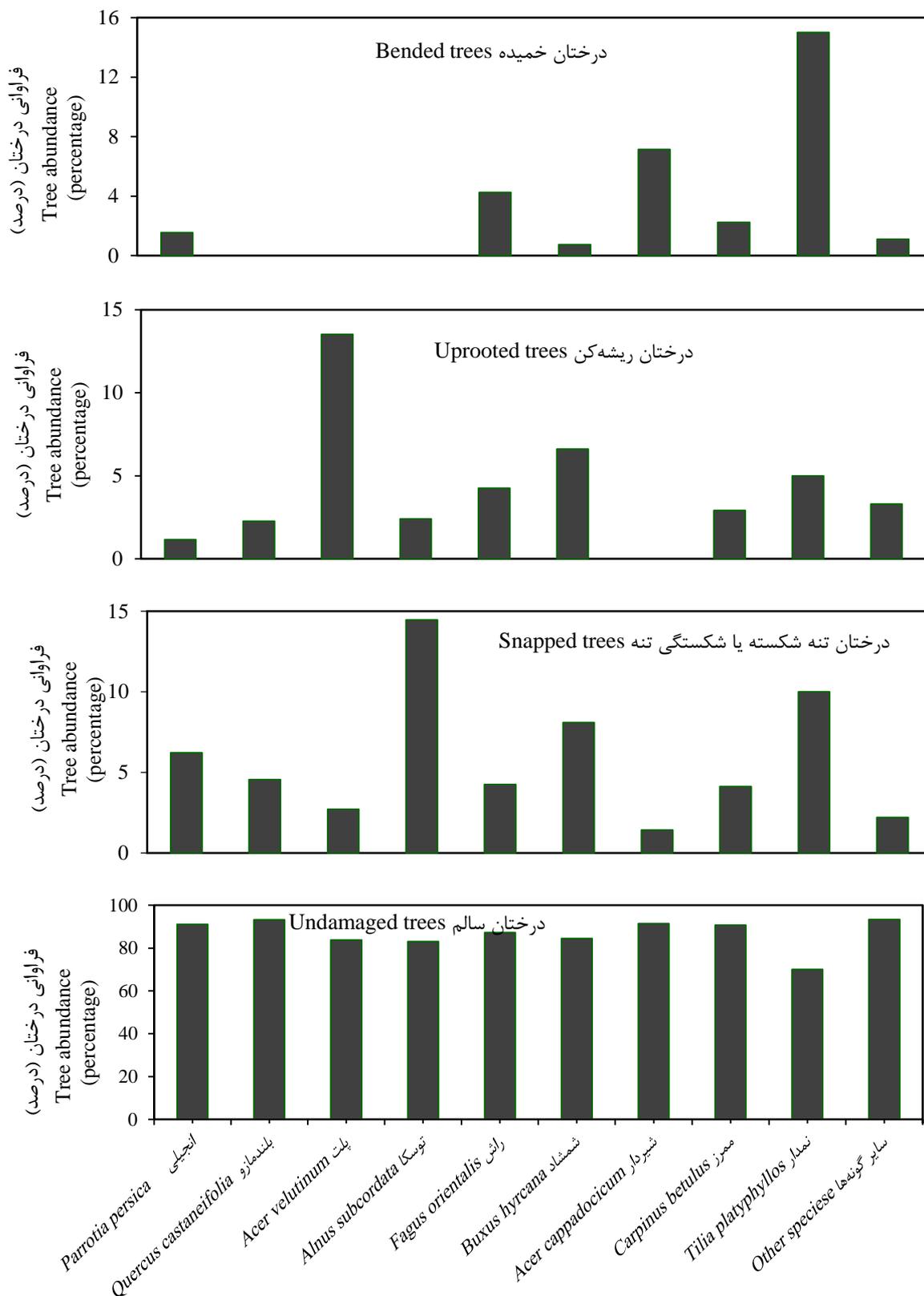
Figure 2. Species composition and the proportion of undamaged to damaged trees in the study area (The charts present the numerical values of the various types of damage (ranging between 2.4% and 90.1%) on the vertical axis, scaled from 0 to 100 percent. Undamaged trees make up the highest frequency (90.1%), whereas trees with snapped (5.5%), uprooted (3.1%), and bent trees (2.4%) have considerably smaller shares, respectively)

می‌گیرند. هر دو گروه درختان آشکوب بالا و پایین از نظر آسیب‌پذیری در برابر شکستگی تنه، تفاوت معنی‌داری داشتند (به ترتیب  $\chi^2 = 36.28$ ,  $p < 0.008$  و  $\chi^2 = 73.55$ ,  $p < 0.002$ ). در آشکوب بالا شکستگی تنه بیشتر در گونه توسکا مشاهده می‌شود، به طوری که حدود ۲۰ درصد درختان این گونه دچار شکستگی تنه شده‌اند و این میزان تا حد چشمگیری بیشتر از گونه‌های دیگر است. در مقابل، درصد زیادی از درختان گونه‌های دیگر این آشکوب بدون آسیب باقی مانده‌اند و این سهم برای گونه‌هایی مانند انجیلی، بلندمازو و پلت بیش از ۹۰ درصد است. گونه‌های انجیر، آلوچه، گلابی وحشی و گردو با فراوانی بسیار کم در منطقه حضور داشتند؛ از این رو تعداد پایه‌های آنها برای تحلیل آماری کافی نبوده و نتایج به دست آمده برای قضاوت درباره شدت خسارت، از اعتبار آماری لازم برخوردار نیست (شکل ۳).

نتایج شکل‌های ۳ و ۴ میزان و نوع خسارت برف در گونه‌های مختلف درختی براساس موقعیت آنها در دو آشکوب بالا و پایین توده‌های بررسی‌شده را نشان می‌دهد. در بین درختان آشکوب بالا، گونه ممرز (*Carpinus betulus* L.) بیشترین حساسیت را نسبت به آسیب خمیده داشت (۲ درصد درختان این گونه دچار آسیب خم‌شدگی شده‌اند)، درحالی که بقیه گونه‌ها درصد بسیار کمتری از این نوع آسیب را نشان دادند. همچنین این نوع آسیب‌دیدگی برای بلندمازو، پلت و توسکا در هر دو آشکوب مشاهده نشد. در مجموع درختان آشکوب بالا نسبت به آشکوب پایین حساسیت کمتری به آسیب خمیدگی درختان داشتند (شکل‌های ۳ و ۴). در مورد درختان ریشه‌کن‌شده در آشکوب بالا، راش با حدود ۷ درصد بیشترین آسیب را در بین گونه‌های موجود دارد و پس از آن ممرز و بلندمازو به ترتیب با فراوانی حدود ۵ و ۴ درصد قرار



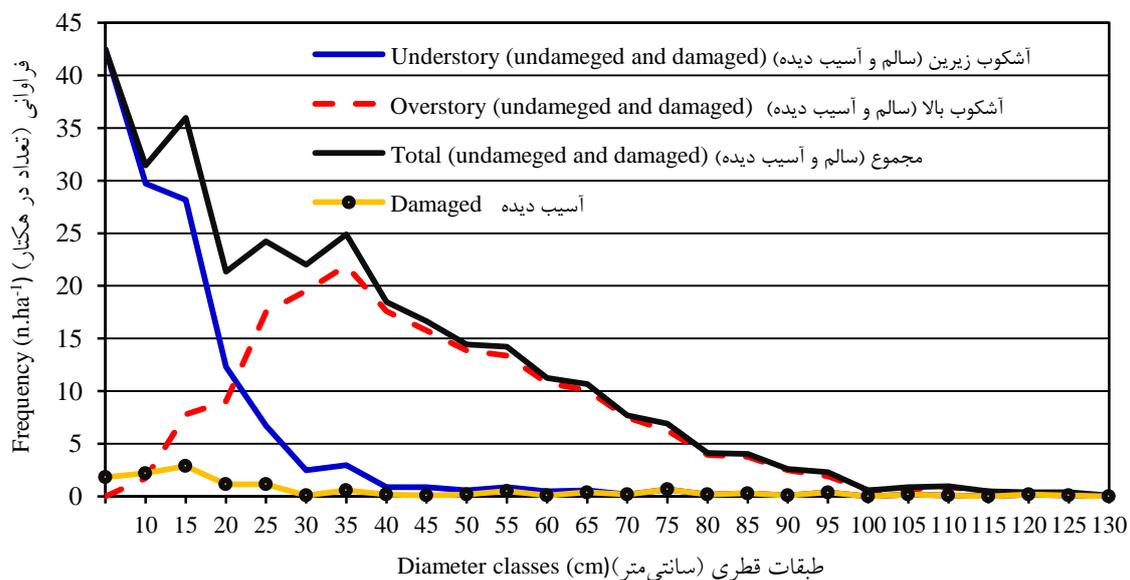
شکل ۳- شدت و نوع خسارت برف به تفکیک گونه در درختان آشکوب بالا  
 Figure 3. Frequency and types of snow damage by species in overstory canopy layer



شکل ۴- میزان و نوع خسارت برف به تفکیک گونه در درختان آشکوب زیرین  
 Figure 4. Frequency and types of snow damage by species in understory canopy layer

نارنجی نشان‌دهنده فراوانی درختان آسیب‌دیده در هر طبقه قطری است و بیانگر آن است که بیشتر آسیب‌ها در طبقات قطری ۱۰ تا ۳۰ سانتی‌متر متمرکز شده‌اند، به‌ویژه در بین درختان آشکوب زیرین. نتایج همچنین نشان می‌دهد که در آشکوب بالا فراوانی درختان آسیب‌دیده در طبقات قطری متوسط (۶۵-۳۵ سانتی‌متر) به‌طور نسبی بیشتر از درختان سالم است (اوج فراوانی در ۵۵ سانتی‌متر). در طبقات قطری خیلی قطور (<۸۰ سانتی‌متر)، تعداد درختان سالم افزایش می‌یابد که احتمالاً نشان‌دهنده مقاومت بیشتر درختان کهنسال یا انتخاب طبیعی است. در آشکوب زیرین درختان سالم در طبقات کم‌قطر (>۳۰ سانتی‌متر) غالب‌اند که می‌تواند ناشی از پویایی طبیعی توده‌های جنگلی باشد. آسیب‌دیدگی در این آشکوب کمتر مشهود است، اما در محدوده ۲۰-۴۰ سانتی‌متر افزایش جزئی دارد (شکل ۵).

شکل ۵ توزیع فراوانی درختان در طبقات قطری را به تفکیک موقعیت آشکوبی (آشکوب بالا Overstory و زیرین Understory)، وضعیت آسیب (سالم و آسیب‌دیده) و مجموع کل درختان نشان می‌دهد. مطابق با منحنی سیاه (مجموع درختان سالم + آسیب‌دیده)، ساختار قطری توده‌های جنگلی از الگوی کاهنده یا جی-معکوس پیروی می‌کند که مشخصه جنگل‌های ناهمسال است. به‌گونه‌ای که در طبقات قطری پایین‌تر (۲۵-۱۰ سانتی‌متر) بیشترین فراوانی مشاهده می‌شود و با افزایش قطر برابرسینه، تعداد درختان کاهش می‌یابد. مقایسه وضعیت دو آشکوب نشان می‌دهد که درختان آشکوب زیرین (منحنی آبی) اغلب در طبقات قطری کوچک‌تر متمرکزند و سهم آنها با افزایش قطر کاهش می‌یابد. درحالی که درختان آشکوب بالا (منحنی قرمز) در طبقات میانی و قطور حضور پررنگ‌تری دارند (شکل ۵). منحنی

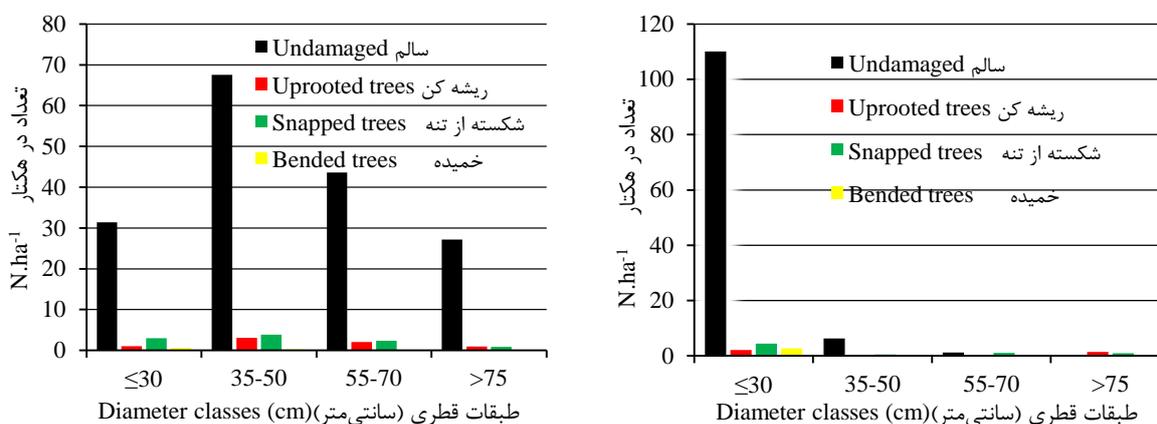


شکل ۵- توزیع فراوانی درختان سالم و آسیب‌دیده در طبقات قطری، به تفکیک قرارگیری در آشکوب‌های بالا و زیرین. (منحنی‌ها نشان‌دهنده تراکم (تعداد در هکتار) برای مجموع درختان، درختان آشکوب بالا، درختان آشکوب زیرین و درختان آسیب‌دیده هستند. بیشترین آسیب‌دیدگی در طبقات قطری میانی و در آشکوب زیرین در طبقات کم‌قطر مشاهده می‌شود)

Figure 5. Frequency distribution of undamaged and damaged trees across diameter classes, by overstory and understory layers (The curves represent the stand density (number of trees per hectare) for total trees, overstory trees, understory trees, and damaged trees. The highest level of damage is observed in the medium diameter classes and within the understory, particularly in the small diameter classes)

از نظر نوع آسیب‌دیدگی و مقاومت در برابر برف، در هر دو آشکوب ارتفاعی، بیشترین خسارت مربوط به درختان شکسته از تنه و ریشه‌کن‌شده در طبقات قطری میانی (۵۰-۳۵ سانتی‌متر) است، درحالی‌که درختان با قطر بیشتر از ۷۵ سانتی‌متر کمتر آسیب دیده‌اند. در آشکوب بالا، درصد زیاد درختان شکسته از تنه (به‌ویژه در طبقه قطری ۷۰-۵۵) احتمالاً ناشی از فشار ناشی از تجمع برف روی شاخه‌ها و تنه‌هاست. همچنین در آشکوب زیرین با وجود کاهش کلی تراکم درختان، نسبت آسیب‌دیدگی در قطرهای کمتر از ۳۰ سانتی‌متر نیز افزایش یافته است، به‌ویژه به در فرم آسیب‌دیدگی شکستگی از تنه و خمیده (شکل ۶).

توزیع فراوانی درختان سالم و آسیب‌دیده در چهار طبقه قطری (کمتر از ۳۰، ۳۵-۵۰، ۵۵-۷۰ و بیشتر از ۷۵ سانتی‌متر) در دو آشکوب بالا (نمودار سمت چپ) و زیرین (نمودار سمت راست) نشان می‌دهد که در آشکوب بالا، بیشترین فراوانی درختان سالم در طبقات میانی (۳۵-۵۰ سانتی‌متر) و قطور (۵۵-۷۰ سانتی‌متر) مشاهده می‌شود، درحالی‌که در طبقه کمتر از ۳۰ سانتی‌متر نیز تعداد زیادی درخت سالم ثبت شده است. در مقابل، در آشکوب زیرین، بیشتر درختان سالم در طبقه قطری کمتر از ۳۰ سانتی‌متر قرار دارند و فراوانی آنها در طبقات قطری بالاتر به‌شدت کاهش می‌یابد (شکل ۶).

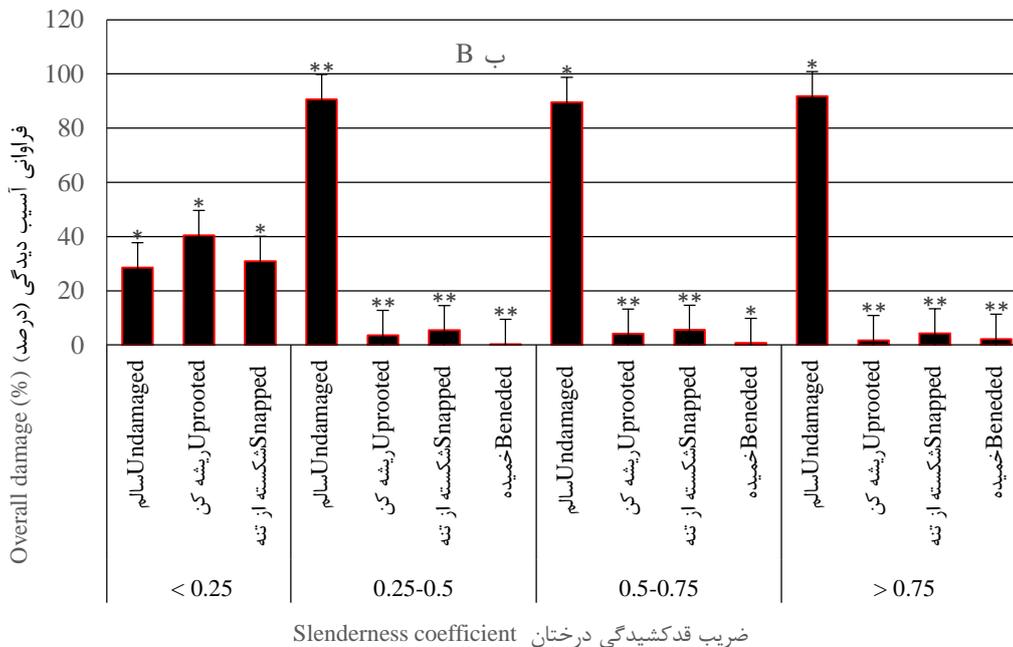
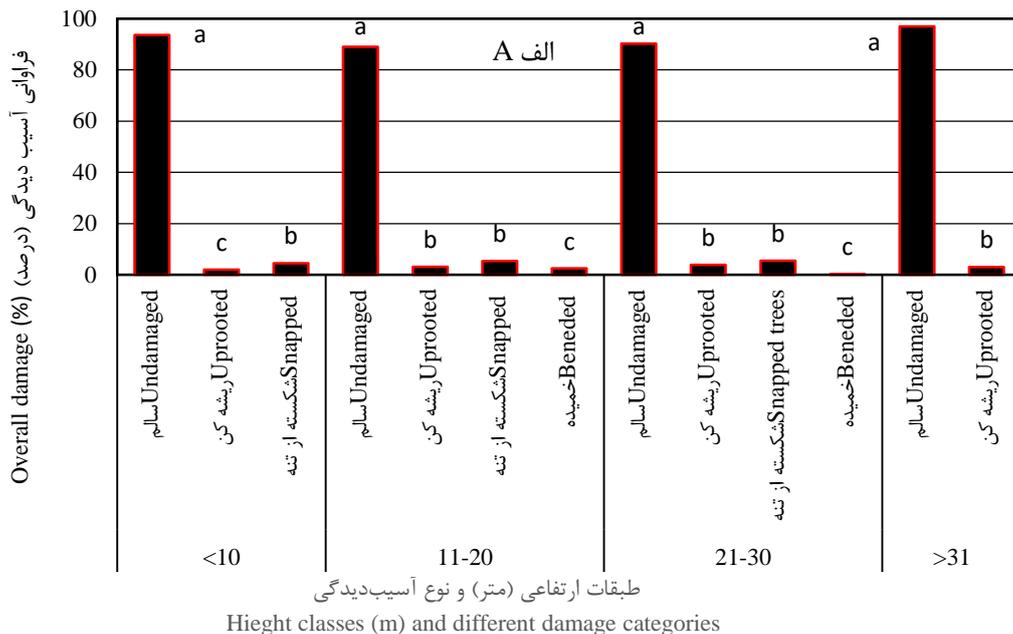


شکل ۶- آسیب برف به درختان براساس طبقات قطری در آشکوب بالا (سمت چپ) و زیرین (سمت راست) توده‌های بررسی‌شده

Figure 6. Snow damage to trees based on diameter classes in the overstory (left chart) and understory (right chart) canopy layers

آسیب‌ها شامل شکستگی از تنه و ریشه‌کن‌بوده‌اند، درحالی‌که در طبقه ارتفاعی بالاتر از ۳۱ متر، سهم درختان ریشه‌کن‌افزایش یافته و سایر آسیب‌دیدگی‌ها مشاهده نشده است (شکل ۷ الف). این الگو حاکی از ارتباط مستقیم بین ارتفاع درخت و نوع آسیب‌پذیری آن در برابر خسارت برف است. به‌طور کلی، در همه طبقات ارتفاعی، درصد درختان سالم بسیار زیاد و در حدود ۹۰ درصد برآورد شده است. این یافته‌ها نشان‌دهنده مقاومت نسبی زیاد توده‌های آمیخته پهن‌برگ در برابر آشفته‌گی ناشی از بارش برف سنگین

شکل ۷ الف توزیع فراوانی انواع آسیب‌دیدگی ناشی از بارش برف را در توده‌های بررسی‌شده و در چهار طبقه ارتفاعی (>۱۰، ۱۱-۲۰، ۲۱-۳۰ و <۳۱ متر) نشان می‌دهد. در تمام طبقات ارتفاعی، درختان سالم بیشترین فراوانی را به خود اختصاص داده‌اند، به‌گونه‌ای که سهم درختان آسیب‌دیده در هیچ یک از طبقات از ۱۰ درصد فراتر نرفته است. نتایج نشان می‌دهد که شکستگی از تنه در همه طبقات ارتفاعی نسبت به بقیه انواع آسیب‌دیدگی، فراوانی بیشتری دارد. در طبقات ارتفاعی کمتر از ۳۰ متر، غالب



شکل ۷- توزیع فراوانی آسیب دیدگی درختان بر اساس طبقات ارتفاعی و انواع مختلف آسیب ها. محور عمودی نشان دهنده درصد فراوانی آسیب دیدگی و محور افقی طبقات ارتفاعی (متر) را نمایش می دهد. منحنی کلی آسیب دیدگی (Overall damage) و طبقات آسیب (Damage categories) شامل نوع آسیب دیدگی و ضریب قدکشیدگی یا لاغری ارائه شده اند. الگو نشان دهنده رابطه مثبت بین ارتفاع درختان و شدت آسیب دیدگی است ( $p < 0.005$ ). بیشترین آسیب در طبقات ارتفاعی ۱۵-۲۵ متر متمرکز شده که احتمالاً ناشی از قرارگیری در معرض بارش سنگین برف است. مقادیر با علامت ستاره معنی دار هستند (آزمون ANOVA،  $*p < 0.01$ ).

Figure 7. Frequency distribution of tree damage based on height classes and different types of damage. The vertical axis represents the percentage frequency of damage occurrence, while the horizontal axis displays the height classes (meters). The overall damage curve and damage categories, including damage type and slenderness coefficient, are presented. The pattern indicates a positive relationship between tree height and the degree of damage ( $p < 0.005$ ). The highest damage is concentrated within the 15–25 m height class, which is likely due to exposure to heavy snowfall. Values marked with an asterisk are statistically significant (ANOVA test,  $*p < 0.01$ ).

شکستگی از تنه و خمیدگی) شده‌اند، درحالی که در طبقه  $<0.75$  بیش از ۹۰ درصد درختان سالم باقی مانده‌اند. در این میان آسیب‌دیدگی‌های شکستگی از تنه و ریشه‌کن‌شده دو نوع غالب آسیب در ضریب لاغری کمتر از  $0.25$  به شمار می‌روند (شکل ۷ ب).

### نتایج الگوریتم جنگل تصادفی

#### نتایج اهمیت نسبی متغیرها در آسیب‌دیدگی درختان

میزان اهمیت هر متغیر در مدل جنگل تصادفی برای پیش‌بینی نوع آسیب در شکل ۸ نشان داده شده است. نسبت ارتفاع به قطر برابرسینه (ضریب قدکشیدگی) نقش مهمی در تعیین نوع آسیب دارد. حجم تنه درخت در درجه دوم این اهمیت قرار دارد. درحالی که قطر برابرسینه و رویه زمینی نسبت به بقیه متغیرها کمترین اهمیت را به خود اختصاص داده‌اند (شکل ۸).

است. درختان با ارتفاع بیش از ۳۱ متر، بیشترین سهم درختان سالم را دارا بودند (۹۵-۹۶ درصد فراوانی کل درختان). همچنین کمترین شدت آسیب در میان تمامی طبقات، مربوط به درختان ریشه‌کن‌شده بوده است (شکل ۷ الف).

ضریب قدکشیدگی درختان، تعیین‌کننده پایداری و مقاومت توده‌های جنگلی در برابر عواملی مثل باد و برف است که از نسبت ارتفاع درخت به قطر برابرسینه آن به دست می‌آید. نتایج شکل ۷ ب نشان می‌دهد که بیشترین آسیب‌دیدگی (ریشه‌کن شدن و شکستگی از تنه) در درختانی با ضریب لاغری یا قدکشیدگی کمتر از  $0.25$  رخ داده است، درحالی که در درختان با ضریب لاغری بیشتر از  $0.25$ ، به‌ویژه در طبقات  $0.75-0.5$  و  $<0.75$ ، فراوانی درختان سالم به‌طور چشمگیری افزایش یافته و آسیب‌دیدگی آنها به حداقل رسیده است. در طبقات  $>0.25$ ، حدود ۷۰ درصد از درختان دچار آسیب (شامل ریشه‌کن،



شکل ۸- اهمیت نسبی عوامل مؤثر در آسیب‌دیدگی درختان

Figure 8. Relative importance of factors affecting tree damage

شاخص کاپا با مقدار  $0.85$  بیانگر میزان توافق زیاد بین پیش‌بینی‌های مدل و داده‌های واقعی است. حساسیت میانگین برای طبقات آسیب‌دیده (ریشه‌کن، تنه‌شکسته و خمیده) برابر با  $0.81$  است که نشان دهنده توانایی خوب مدل در شناسایی صحیح نمونه‌های آسیب‌دیده

### ارزیابی عملکرد مدل جنگل تصادفی

مدل جنگل تصادفی در پیش‌بینی وضعیت سلامت و آسیب‌دیدگی درختان عملکرد قابل قبولی داشته است. دقت کلی مدل برابر با  $86/7$  درصد است که نشان دهنده درصد پیش‌بینی‌های صحیح در کل نمونه‌هاست.

هر طبقه است؛ به طوری که برای درختان سالم ۰/۹۲ و برای طبقات آسیب‌دیده (ریشه‌کن، تنه‌شکسته و خمیده) به ترتیب ۰/۸۱، ۰/۸۴ و ۰/۸۶ است. این شاخص‌ها نشان می‌دهد که مدل توانسته است با دقت قابل قبولی بین وضعیت‌های مختلف درختان تمایز قائل شود (جدول ۲).

است. همچنین ویژگی (Specificity) مدل ۰/۹۶ است که دقت زیادی در شناسایی درختان سالم دارد. دقت متوازن که میانگین حساسیت و ویژگی است و برای مقابله با عدم تعادل داده‌ها اهمیت دارد، مقدار ۰/۸۲ را نشان می‌دهد که عملکرد متعادل مدل را تأیید می‌کند. مقادیر AUC نیز نشان‌دهنده توانایی مدل در تمایز دقیق

جدول ۲- شاخص‌های ارزیابی عملکرد مدل جنگل تصادفی در طبقه‌بندی نوع آسیب‌دیدگی درختان

Table 2. Performance evaluation indicators of the random forest model in predicting the type of tree damage

Metric شاخص ارزیابی	مقدار میانگین و اشتباه معیار Mean Value	توضیح/تفسیر Explanation / Interpretation
دقت کلی (Overall Accuracy)	0.867	درصد پیش‌بینی‌های صحیح در کل نمونه‌ها Percentage of correct predictions across all samples
شاخص کاپا (Kappa Index)	0.856	میزان توافق بین پیش‌بینی و مشاهدات Agreement between predictions and actual labels
حساسیت میانگین (Sensitivity)	0.81	توانایی مدل در شناسایی صحیح موارد آسیب‌دیده Model's ability to correctly identify damaged cases
ویژگی (Specificity)	0.96	توانایی مدل در شناسایی صحیح موارد سالم Model's ability to correctly identify healthy cases
دقت متوازن (Balanced Accuracy)	0.56	میانگین حساسیت و ویژگی برای مقابله با عدم توازن داده‌ها Average of sensitivity and specificity, useful for imbalanced datasets
AUC (سالم) (Healthy)	0.92 (±0.62)	دقت مدل در تمایز طبقه سالم از بقیه طبقات Model's discrimination power for healthy trees
AUC (ریشه‌کن) (Uprooted)	0.81 (±0.62)	عملکرد مدل در شناسایی درختان با آسیب ریشه‌کن Model's performance in detecting uprooted trees
AUC (تنه‌شکسته) (Broken Trunk)	0.84 (±0.45)	عملکرد مدل در شناسایی درختان با آسیب تنه Model's performance in detecting trees with broken trunks
AUC خمیده (Bent Trees)	0.86 (±0.09)	عملکرد مدل در شناسایی درختان خمیده Model's performance in detecting bent trees

درختان ریشه‌کن شده (۳۳/۶ درصد) و خمیده (۱۳/۴ درصد) قرار دارند. این الگو با یافته‌های Bonyad & Tavankar, Fakhari et al. (2010)، Eshagh و Tavankar et al. (2014)، (2015) و Nimvari et al. (2019) همسو است. al. (2015) افزایش فراوانی خسارت برف را در توده‌های مدیریت‌شده نسبت به توده‌های مدیریت‌نشده گزارش کرده‌اند؛ نتایجی که با یافته‌های مربوط به جنگل‌های آمیخته کشور چک نیز همسو است (Peltola, 1997; Nykänen et al., 1997). در میان گونه‌های آسیب‌دیده، ممرز با ۱۰۹ پایه

## بحث

این پژوهش با تمرکز بر خسارت‌های ناشی از بارش برف روی ۱۹ گونه چوبی در جنگل‌های پهن‌برگ آمیخته معتدله رویشگاه هیرکانی، نشان داد که ۹ درصد از کل درختان سرپا (۲۹۲ اصله از ۳۳۸۳ اصله) دچار آسیب شده‌اند. این شدت آسیب‌دیدگی، از منظر مدیریت پایدار منابع طبیعی، اهمیت اقتصادی زیادی دارد و بیانگر تأثیر برف به‌منزله عامل اختلال طبیعی مؤثر بر این اکوسیستم‌هاست. نتایج نشان داد که در میان درختان آسیب‌دیده، شکستگی تنه (۵۳ درصد) بیشترین سهم را دارد و پس از آن، به‌ترتیب

ترکیب گونه‌ای، تأثیر مهمی در تعیین آسیب‌پذیری درختان در برابر برف دارند (Brang et al., 2006; Lu et al., 2020; Seidl et al., 2014). آسیب ندیدن برخی گونه‌ها نیز پتانسیل مدیریتی آنها را برای حضور در ترکیب توده‌های مقاوم‌تر نشان می‌دهد.

آسیب‌پذیری زیاد توسکا در برابر برف (۲۲ درصد از کل پایه‌های این گونه) با یافته‌های Fakhari et al. (2010) همسو است و می‌توان آن را به ویژگی‌هایی مانند تنه استوانه‌ای، تاج باریک و کشیده، ضریب قدکشیدگی بزرگ و ریشه‌های سطحی نسبت داد. از آنجا که این گونه به‌طور معمول در مناطق مرطوب با زهکشی زیاد حضور دارد، آسیب‌پذیری بیشتری در برابر برف نشان می‌دهد. شدت زیاد خسارت در طبقات قطری ۲۵-۷۵ سانتی‌متر نیز با ضریب قدکشیدگی زیاد و باقی ماندن برگ‌ها تا اواخر پاییز در توسکا مرتبط است. این ویژگی‌ها در مجموع پایداری مکانیکی درخت را کاهش و احتمال آسیب‌دیدگی ناشی از وزن برف را افزایش می‌دهند. در مقابل، گونه‌های انجیلی، راش و بلندمازو درصد زیادی از درختان بدون آسیب را به خود اختصاص داده‌اند. این امر ممکن است ناشی از ویژگی‌های فنوتیپی مقاوم‌تر، ساختار چوب مستحکم‌تر و الگوی تاج فشرده‌تر آنها باشد. با این حال، گونه راش در طبقات میان قطر (۵۰-۳۵ سانتی‌متر) بیشترین آسیب را تجربه کرده است. ممرز (از نظر تعداد) بیشترین فراوانی آسیب را در میان گونه‌ها داشته، اما نسبت خسارت آن به کل پایه‌های موجود این گونه، در مقایسه با توسکا و راش، در حد متوسط بوده است. این موضوع شاید به دلیل شکل و حجم زیاد تاج آن باشد که با یافته‌های Bonyad & Tavankar (2014) و Eshagh Nimvari et al. (2019). همسویی دارد. درختان جوان با طبقات قطری ۱۵-۳۵ سانتی‌متر نیز بیشترین آسیب را نشان دادند که با نتایج پژوهش‌های Tavankar et al (2015)، Fakhari et al (2010) و Martinik (2012) & Mauer مطابقت دارد. درختان جوان به دلیل

(۳۷/۳۰ درصد) بیشترین فراوانی را نسبت به کل درختان آسیب دیده متحمل شده است و پس از آن توسکا، انجیلی و افراش شیردار در رتبه‌های بعدی قرار دارند. آسیب‌پذیری شدید ممرز، با وجود فراوانی زیاد آن در ترکیب توده، ممکن است به فرم، حجم و گستردگی زیاد تاج آن نیز مرتبط باشد که بار برف بیشتری را تحمل می‌کند، این نتایج با یافته‌های Bonyad & Tavankar (2014) مطابقت دارد. در مقابل، گونه‌هایی مانند ملج، گیلان وحشی، انجیر و آلوچه جنگلی هیچ آسیبی ندیده‌اند. این مقاومت ممکن است ناشی از ویژگی‌های ریخت‌شناختی (مانند انعطاف‌پذیری چوب یا فرم تاج) یا بوم‌شناختی آنها باشد. با این حال، فراوانی و سهم کم این گونه‌ها در ترکیب ساختار توده نیز ممکن است در آسیب ندیدن آنها مؤثر باشد (Bonyad & Tavankar, 2014).

توده جنگلی تحت بررسی دارای ساختار منظم دوآشکوبه است و آشکوب بالایی شامل درختان بزرگ‌تر و متراکم‌تر (۱۸۷/۸ اصله در هکتار) نسبت به آشکوب زیرین (۱۳۱/۲ اصله در هکتار) است. این تفاوت در تراکم و رقابت نوری بین آشکوب‌ها، می‌تواند بر حساسیت به آشفته‌گی‌هایی مانند بارش سنگین برف تأثیرگذار باشد. ممرز گونه غالب در هر دو آشکوب است (۵۸/۳۴ درصد در آشکوب پایین و ۴۳/۸ درصد در آشکوب بالا) که ترکیب یکنواخت آن، به‌ویژه در آشکوب بالا با درختان بزرگ‌تر، احتمال آسیب گسترده در برابر برف را افزایش می‌دهد. این الگو با یافته‌های Marvie Mohadjer (2007) و et al. (2022) Shahamati Nejad در جنگل‌های هیرکانی که ممرز را گونه فراوان و غالب معرفی کرده‌اند همخوانی دارد. تراکم و قطر بیشتر آشکوب بالا (۲۶/۷ متر مربع در هکتار سطح مقطع درختان در برابر ۱۰/۴ متر مربع در هکتار آشکوب پایین)، می‌تواند در شدت خمیدگی یا شکستگی درختان ناشی از وزن برف مؤثر باشد. نتایج تأکید می‌کند که ویژگی‌های ساختاری توده‌های جنگلی (شامل ارتفاع، قطر برابرسینه و تراکم) و

۷۶/۷، تنه‌شکسته ۶۴/۵ و ریشه‌کن ۶۴ عنوان کرده‌اند. این امر نشان می‌دهد که ضریب قدکشیدگی کوچک‌تر با پایداری بیشتر درختان مرتبط است. پژوهش‌های Wang et al. (1998) نیز همبستگی منفی ضریب قدکشیدگی با فاکتورهای قطر برابر سینه، ارتفاع، طول تاج و سن و همبستگی مثبت آن با سطح تراکم توده و ترکیب گونه‌ها را نشان داده‌اند. Charkazi et al. (2017) ضریب قدکشیدگی زربین در رامیان را ۰/۶۸ به دست آوردند، در حالی که تیری Tiry Mashhadsar et al. (2011) در مناطق مورد مطالعه خود در بابل را با ضریب قدکشیدگی ۱۰۰-۸۰، دارای ناپایداری دانسته‌اند.

الگوی توزیع قطری درختان نشان می‌دهد که درختان زیرآشکوب (اغلب > ۳۰ سانتی‌متر) در طبقات قطری کوچک متمرکزند، در حالی که درختان آشکوب بالا در طبقات قطری متوسط (۶۵-۳۵ سانتی‌متر) غالب‌اند و در حدود ۵۵ سانتی‌متر به اوج می‌رسند. اوج آسیب‌دیدگی در محدوده قطری ۳۰-۱۰ سانتی‌متر، به‌ویژه در زیرآشکوب، نشان‌دهنده آسیب‌پذیری بیشتر درختان جوان در برابر تنش‌های محیطی (مانند برف) به دلیل نسبت بزرگ طول تاج به تنه است. در آشکوب بالا، بیشترین آسیب در طبقات متوسط (۶۵-۳۵ سانتی‌متر) مشاهده شد که با تئوری‌های زیست‌مکانیکی در زمینه آسیب‌پذیری درختان در مرحله گسترش تاج پوشش همخوانی دارد. درختان خیلی قطور (< 80 DBH سانتی‌متر) مقاومت بیشتری نشان داده‌اند و اغلب سالم‌اند که احتمالاً ناشی از سازگاری‌های ساختاری یا انتخاب طبیعی است. این یافته‌ها با پژوهش‌های جهانی درباره آسیب‌پذیری وابسته به اندازه درختان همخوانی دارد (Valinger et al., 1993; Hanewinkel et al., 2011; Vilà-Cabrera et al., 2011). الگوی J معکوس توزیع تعداد در طبقات قطری، ساختار پایدار جنگل را تأیید می‌کند (Ahamadi et al., 2023) اما محدودیت در گذر درختان به طبقات قطری میانی و قطور را نشان

داشتن تنه‌های طویل و استوانه‌ای، ضریب قدکشیدگی زیاد، سیستم ریشه‌ای توسعه‌نیافته و لنگرنبندی ضعیف‌تر، از پایداری مکانیکی کمتری برخوردارند. افزون‌بر این، تاج باریک‌تر آنها احتمال آسیب‌دیدگی در برابر برف و باد را افزایش می‌دهد. در میان گونه‌ها، نمدار بیشترین درصد درختان خمیده و افرای پلت بیشترین درصد درختان با شکستگی تنه را نشان داده‌اند. خمیدگی زیاد نمدار احتمالاً به انعطاف‌پذیری زیاد تنه و تاج آن مربوط است، در حالی که شکستگی زیاد در پلت ممکن است ناشی از ویژگی‌های آناتومیکی چوب از جمله چگالی کم و انعطاف‌پذیری محدود باشد. در سوی دیگر، گونه توسکا بیشترین درصد درختان ریشه‌کن شده را نشان می‌دهد که احتمالاً به سیستم ریشه‌ای سطحی‌تر و رشد سریع‌تر آن نسبت داده می‌شود، زیرا این ویژگی‌ها مقاومت مکانیکی کمتری در برابر وزن برف سنگین فراهم می‌آورند. در مجموع، نتایج شکل‌های ۳ و ۴ بیانگر تفاوت چشمگیر در شدت آسیب‌پذیری گونه‌های مختلف نسبت به برف است و می‌تواند درک بهتری از پاسخ‌های ساختاری گونه‌های جنگلی به این نوع آشفستگی طبیعی فراهم آورد.

اوج آسیب و خسارت به درختان در طبقه ارتفاعی ۲۰-۳۰ متر مشاهده شده است (شکل‌های ۶ و ۷ الف). این در حالی است که درختان بسیار بلند (بالای ۳۰ متر) به‌طور معمول به دلیل سن زیاد و احتمال پوسیدگی‌های داخلی، با کوچک‌ترین بار برف یا باد دچار سقوط می‌شوند. این وضعیت نشان می‌دهد که بارش برف بسیار سنگین است و درختان جوان‌تر با سلامت کیفی مناسب‌تر نیز به دلیل خزان نکردن برگ‌ها و زمان بارش (زودتر از موعد در پاییز) متحمل خسارت شده‌اند.

میانگین ضریب قدکشیدگی (H/D) برای درختان ناسالم ۷۲ و برای درختان سالم ۶۲ بوده است که با پژوهش بنیاد و توانکار (۲۰۱۴) همسو است؛ آنها ضریب قدکشیدگی را در درختان سالم ۵۰/۲، خم شده

انعطاف‌ناپذیری و تاج سنگین آن است. همچنین تراکم ۳۱۹ اصله در هکتار و ساختار دوآشکوبه منظم، با آشکوب بالا که توسط درختان قطورتر و پرتراکم مشخص می‌شود، بر حساسیت به آسیب‌های برفی تأثیرگذار است. شیوه‌های جنگل‌شناسی و مدیریتی گذشته مانند برش تدریجی - پناهی و قطع یکسره (۱۳۷۴-۱۳۶۱) ممکن است سبب اختلال در فرایندهای طبیعی شده و آسیب‌پذیری کنونی درختان جوان را در برابر حوادث طبیعی افزایش داده باشد.

یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که مدل جنگل تصادفی می‌تواند ابزاری مؤثر برای ارزیابی و پیش‌بینی آسیب‌پذیری درختان در برابر توفان‌های برفی در جنگل‌های شمال ایران باشد. دقت کلی زیاد مدل و شاخص کپای قوی بیانگر کارایی مدل در شناسایی صحیح وضعیت سلامت و آسیب‌دیدگی درختان است. همچنین مقادیر زیاد AUC برای همه طبقات، توانمندی مدل را در جداسازی دقیق طبقات مختلف وضعیت درختان نشان می‌دهد.

پژوهش‌های متعدد، کارایی الگوریتم‌های یادگیری ماشین را در مدل‌سازی آسیب‌پذیری توده‌های جنگلی تأیید کرده‌اند. برای نمونه، در پژوهشی در منطقه از میر ترکیه (Eker et al., 2024)، این الگوریتم‌ها دقت زیادی را در پیش‌بینی انواع آشفته‌گی از جمله آتش‌سوزی، آفات و توفان نشان دادند. در پژوهش حاضر نیز متغیرهایی مانند ارتفاع، حجم درخت، قطر برابر سینه و ضریب قدکشیدگی یا لاغری، مهم‌ترین متغیرهای مؤثر شناسایی شدند؛ یافته‌ای که با نتایج Shabani et al. (2022) در جنگل‌های هیرکانی ایران همخوانی دارد. افزون بر آسیب‌های مستقیم ناشی از اختلالات اقلیمی مانند شکستگی تنه و ریشه‌کنی درختان، اثرهای غیرمستقیم این رخدادها بر پویایی اکوسیستم جنگل نیز شایان توجه است. پژوهش‌ها نشان داده‌اند که تخریب تاج پوشش به‌ویژه پس از توفان‌های برفی، با تغییر شرایط خرداقلیمی کف جنگل، بر جوانه‌زنی و استقرار نهال‌ها تأثیر می‌گذارد. برای نمونه، در

می‌دهد. اوج آسیب‌دیدگی در اندازه‌های قطری میانی، اولویت‌های مدیریتی برای تنک کردن برای کاهش استرس ناشی از تراکم را برجسته می‌سازد.

مقایسه آشکوب‌ها نشان می‌دهد که آشفته‌گی برفی سبب تغییر الگوی ساختاری توده جنگلی، به‌ویژه کاهش شدید فراوانی درختان با قطرهای میانی و قطور در قطعه برف‌خورده شده است که تخریب ساختاری ناشی از این آشفته‌گی را نشان می‌دهد (Seidl et al., 2014). این نتایج حاکی از آن است که مدیریت تراکم و ترکیب ارتفاعی و قطری درختان می‌تواند به کاهش آسیب‌پذیری جنگل‌ها در برابر برف کمک کند. حفظ ترکیبی از درختان قطور و انعطاف‌پذیر در کنار گونه‌های مقاوم در طبقات مختلف قطری می‌تواند تاب‌آوری اکوسیستم را در برابر آشفته‌گی‌های اقلیمی افزایش دهد.

الگوهای مشاهده‌شده بیانگر تفاوت حساسیت گونه‌های مختلف به خسارات ناشی از برف است. توسکا به‌طور آشکاری آسیب‌پذیرتر بود و بیشترین آسیب را در شکستگی تنه و ریشه‌کن شدن متحمل شد که می‌تواند به ویژگی‌های چوب به‌نسبت ضعیف، سامانه ریشه‌ای سطحی، رشد سریع، وزن زیاد تاج و ضریب قدکشیدگی زیاد (Nykänen, 1999; Nykänen et al., 1997) مرتبط باشد. در مقابل، گونه‌هایی مانند انجیلی و بلندمازو با چوب متراکم‌تر و ساختار تاج پوشش پایدارتر، مقاومت بیشتری از خود نشان دادند. نمودار بیشترین درصد خمیدگی را نشان داد که به انعطاف‌پذیری متوسط چوب و شکل‌پذیری تاج آن نسبت داده می‌شود (Valinger et al., 1993). پلت بیشترین میزان شکستگی تنه را داشت که به تراکم کم چوب و احتمالاً زاویه اتصال شاخه‌ها به تنه مربوط است (Hanewinkel et al., 2011). راش نیز با ۱۷ درصد شکستگی تنه و ۷ درصد ریشه‌کنی، آسیب‌پذیری زیادی را نشان داد که با یافته‌های Klopčič et al. (2024) و Dittmar (2006) et al. همسو است و دلیل آن، شکنندگی چوب،

کرده است. گونه‌هایی مانند توسکا و ممرز بیشترین خسارت را دیدند، در حالی که گونه‌هایی از جمله بلندمازو، انجیلی و ملج آسیب‌پذیری کمتری نشان دادند. شدت آسیب به ویژگی‌های ساختاری توده، خصوصیات ظاهری و ریخت‌شناسی گونه (مانند شکل تاج، ساختار ریشه، ضریب قدکشیدگی) و سن درخت بستگی دارد. درختان جوان و میان‌قطر بیشتر تحت تأثیر قرار گرفتند. یافته‌ها بر نقش ویژگی‌های ریخت‌شناسی و عوامل محیطی در تعیین الگوی آسیب ناشی از برف تأکید دارد. برای مدیریت پایدار، تنوع‌بخشی به ترکیب گونه‌ای، اجتناب از کاشت گونه‌های آسیب‌پذیر و حفظ ساختار ناهمسال و چندآشکوبه جنگل توصیه می‌شود. این اقدامات هم مقاومت در برابر اختلال‌های طبیعی را افزایش می‌دهد و هم عملکرد بوم‌سازگانی جنگل را پایدارتر می‌سازد. تحقیقات آینده باید بر تحلیل پویایی بلندمدت آسیب‌ها، ارزیابی توان احیای طبیعی و توسعه مدل‌های پیش‌بینی خطر با جزئیات بیشتر در سطح گونه و الگوی مکانی تمرکز کنند تا به ارتقای پایداری جنگل‌ها در برابر آشفتگی‌های طبیعی یاری رسانند.

### تقدیر و تشکر

این طرح تحقیقاتی با استفاده از اعتبار ویژه پژوهشی (پژوهانه) دانشگاه سمنان با شماره طرح ۱۴۰۴۱۱۳۴/ط/۲۲۶/۱۴۰۴ انجام گرفته است.

### References

- Ahamadi, H.R., Amiri, M., Mohammady, M., & Ravanbakhsh, H. (2023). The Impact of Windstorm Disturbance on the Forest Structural Attributes in Oriental Beech-Hornbeam Mixed Stands of Hyrcanian Region. *Ecopersia*, 11(3), 227-240. <http://ecopersia.modares.ac.ir/article-24-68636-en.html>.
- Amiri, M. (2023). Effect of a Windstorm on Gaps Structural Characteristics in the Different Forest Stands in Darabkola Region, Mazandaran Province. *Ecopersia*, 11(4), 291-306. <http://ecopersia.modares.ac.ir/article-24-70323-en.html>
- Bebi, P., Kulakowski, D., & Rixen, C. (2009). Snow avalanche disturbances in forest ecosystems—State of research and implications for management. *Forest Ecology and Management*, 257, 1883–1892. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.01.050>
- Bonyad, A.E., & Tavankar, F. (2014). Resistance of tree species to snow damage in Nav Asalem forests, Guilan province. *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*, 22(3), 496-508. doi: 10.22092/ijfpr.2014.12433. (In persian)

جنگل‌های جنوب غربی چین مشاهده شد که پس از توفان برف و تخریب تاج‌پوشش، افزایش نور در آشکوب زیرین شرایطی مساعد برای استقرار گونه‌های نورپسند و مهاجم فراهم کرد (Song et al., 2018). روشنه‌های ایجادشده در تاج‌پوشش مسیر نفوذ این گونه‌ها را به درون جنگل تسهیل می‌کنند و تهدیدی برای ساختار و پویایی بلندمدت اکوسیستم‌های بومی محسوب می‌شوند. به‌طور کلی، تغییرات اقلیمی و افزایش فراوانی برف‌های سنگین و آبدار هم موجب آسیب‌دیدگی مکانیکی درختان می‌شوند و هم با تغییر شرایط خردزیستگاهی مانند افزایش نور و رطوبت، احتمال استقرار گونه‌های مهاجم را افزایش می‌دهند. از این‌رو، مدیریت پایدار جنگل باید افزون‌بر ارزیابی خطرهای مستقیم، بر پایش تغییرات خردزیستی و شناسایی به‌موقع گونه‌های مهاجم متمرکز شود. در این زمینه، به‌کارگیری الگوریتم‌های پیشرفته یادگیری ماشین مانند جنگل تصادفی می‌تواند ابزاری کارآمد برای پایش، مدیریت خطر و بازسازی اکوسیستم‌های جنگلی در مواجهه با مخاطرات اقلیمی آینده فراهم کند.

### نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر نشان داد که بارش برف یکی از اختلالات طبیعی مؤثر در جنگل‌های پهن‌برگ کوهستانی است که حدود ۹ درصد از درختان را با آسیب‌هایی چون شکستگی تنه و ریشه‌کنی مواجه

- Bradford, J.B., Jensen, N.R., Domke, G.M., & D'Amato, A.W. (2013). Potential increases in natural disturbance rates could offset forest management impacts on ecosystem carbon stocks. *Forest Ecology and Management*, 308, 178–187.
- Brang, P., Schönenberger, W., Frehner, M., Schwitter, R., Thormann, J.J., & Wasse, B. (2006). Management of protection forests in the European Alps. an overview. *Forest, Snow and Landscape Research*, 80(1), 23–44.
- Brooks, P.D., Grogan, P., Templer, P.H., Groffman, P., Öquist, M., & Schimel, J. (2011). Carbon and nitrogen cycling in snow-covered environments. *Geography Compass*, 5(9), 682–699. <https://doi.org/10.1111/j.1749-8198.2011.00420.x>
- Charkazi, A., Amiri, M., Ravanbakhsh, H., & Moghadasi, D. (2017). Examination of quantitative and qualitative characteristics of *Cupressus sempervirens* Var. *Horizontalis* and *Pinus brutia* in plantation forests in the Ramian, Golestan Province. *Journal of Wood and Forest Science and Technology*, 23 (1), 1-20. (In persian)
- Dittmar, C., Zech, W., & Elling, W. (2006). Growth variations of Common beech (*Fagus sylvatica* L.) under different climatic and environmental conditions in Europe—a dendroecological study. *Forest Ecology and Management*, 222(1–3), 163–174. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.10.047>
- Eker, R., Alkiş, K.C., & Aydın, A. (2024). Assessment of large-scale multiple forest disturbance susceptibilities with AutoML framework: an Izmir Regional Forest Directorate case. *Journal of Forestry Research*, 35(1), 65. <https://doi.org/10.1007/s11676-024-01723-9>
- Eshagh Nimvari, A., Ravanbakhsh, H., Amiri, M., & Kianian, M.K. (2019). Snow damage to tree species and its relationship with environmental variables in the Hyrcanian low land Forests, Iran. *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*, 27(4), 485-497. doi: 10.22092/ijfpr.2020.128466.1875. (In persian)
- Fakhari, M.A., Babaei, M., & Saedi Zand, M. (2010). Investigation on snow damage on plantation in sourdar – Vatashan region (Chmestan, Mazandran). *Iranian Journal of Forest and poplar Research*, 18(3), 447- 457. (In Persian)
- Fawcett, T. (2006). An introduction to ROC analysis. *Pattern Recognition Letters*, ROC Analysis in Pattern Recognition, 27, 861–874. <https://doi.org/10.1016/j.patrec.2005.10.010>
- Teste, F.P., Lieffers, V.J. (2011). Snow damage in lodgepole pine stands brought into thinning and fertilization regimes. *Forest Ecology and Management*, 261, (11), 2096- 2104. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2011.03.003>
- Fischer, J., Lindenmayer, D.B., & Manning, A.D. (2006). Biodiversity, ecosystem function, and resilience: ten guiding principles for commodity production landscapes. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 4, 80-86. [https://doi.org/10.1890/1540-9295\(2006\)004\[0080:BEFART\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1540-9295(2006)004[0080:BEFART]2.0.CO;2)
- Gardiner, B., Byrne, K., Hale, S., Kamimura, K., Mitchell, S.J., Peltola, H., & Ruel, J.C. (2008). A review of mechanistic modelling of wind damage risk to forests. *Forestry*, 81, 447–463
- Hanewinkel, M., Hummel, S., & Albrecht, A. (2011). Assessing natural hazards in forestry for risk management: A review. *European Journal of Forest Research*, 130(3), 329–351. <https://doi.org/10.1007/s10342-010-0394-1>
- INRAE (French National Research Institute for Agriculture, Food and Environment). (2024). *Forests: Species composition as a factor in storm resilience?*. *INRAE News*. <https://www.inrae.fr/en/news/forests-species-composition-factor-storm-resilience>
- IPCC. (2013). *Climate Change 2013: the physical science basis*. IPCC, Geneva. [http://www.ipcc.ch/pdf/assessmentreport/ar5/wg1/WG1AR5\\_ALL\\_FINAL.pdf](http://www.ipcc.ch/pdf/assessmentreport/ar5/wg1/WG1AR5_ALL_FINAL.pdf).
- IRIMO (Iran meteorological organization organization). (2012). *Provinces reports*, available at the website of [www.weather.ir](http://www.weather.ir). (In persian)

- Jafari, M. (2009). Thunder and storm fluctuations in the Caspian region over the last half century. *Iranian Journal of Forest and poplar Research*, 16(4), 583- 598. (In Persian)
- Khodaverdi, S., Amiri, M., Kartoolinejad, D., & Mohammadi, J. (2019). Canopy gaps characteristics of pure and mixed stands in the Hyrcanian forests of north Iran. *Annals of Silvicultural Research*, 43(2), 62–70. <https://doi.org/10.12899/asr-1882>
- Klopčič, M., Bončina, A., & Diaci, J. (2024). Structural vulnerability of beech-dominated stands to snow damage in temperate mixed forests of Slovenia. *Forest Ecology and Management*, 548, 121320. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2024.121320>
- Li, X.F., Zhu, J.J., Wang, Q.I., Liu, Z.G., Hou, C.S., & Yang, H.J. (2004). Snow/wind induced damage in natural secondary forests in liaodong mountainous regions, liaoningLiaoning province. *Ying Yong Sheng Tai Xue Bao.Chinese*, 15(6), 941-6. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/15362612/>
- Li, X.F., Jin, L., Zhu, J.J., Liu, L.M., Zhang, J.X., Yi, Wang., Zhu, & C.Y. (2018). Response of species and stand types to snow/wind damage in a temperate secondary forest, Northeast China. *Journal of Forestry Research*, 29(2), 395–404. <https://doi.org/10.1007/s11676-017-0446-z>
- Liu, C. (2004). Snow disturbance and forest ecosystem management. *Journal of Forest Ecology*, 21(2), 245-258.
- Lu, J., Sun, O.J., & Han, X. (2020). Differential responses of tree species to snow and ice storms: Implications for forest dynamics and management. *Forest Ecology and Management*, 457, 117701. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.117701>
- Martin-Alcon, S., Gonzales-olabarria, J.R., & Coll, L. (2010). Wind and snow damage in the Pyrenees pin forests: Effects of stand attributes and location. *Silva Fennica*, 44(3), 399-410. <https://doi.org/10.14214/sf.138>
- Martiník, A., & Mauer, O. (2012). Snow damage to birch stands in Northern Moravia. *Journal of Forest Science*, 58(4), 181-192.
- Marvie Mohadjer, M.R. (2007). Silviculture: Forests of Iran. *Tehran University Press*, 481p. (In persian)
- Mitchell, S.J., (1995). The windthrow triangle: a relative windthrow hazard assessment procedure for forest managers. *The Forestry Chronicle*, 71(4), 446–450. <http://dx.doi.org/10.5558/tfc71446-4>
- Mohammadi, L., Marvie-Mohadjer, M.R., Etemad, V., & Sefidi, K. (2014). Quantitative characteristics of regeneration in natural and tree fall canopy gaps in the mixed beech stands, Northern Iran (Case Study: Namkhaneh district, Kheyroud Forest. *Iranian Journal of Forest*, 6(4), 457-570. (In Persian)
- Natural Resources and Watershed Organization. (2006). Forest Management Plan for Liresara forest, Nowshahr, 465p. (In persian)
- Nykänen, M. (1999). Slenderness ratio and snow damage in boreal forests. *Canadian Journal of Forest Research*, 29(6), 802-810.
- Nykänen, M.L., Peltola, H., Quine, C., Kellomäki, S., & Broadgate, M. (1997). Factors affecting snow damage of trees with particular reference to European conditions. *Silva Fennica*, 31(2), 193–213. <https://doi.org/10.14214/sf.a8519>
- Oliver, C.D., Burkhardt, E.C., & Skojac, D. (2005). The increasing scarcity of red oaks in the Mississippi River floodplain forests: influence of the residual overstory. *Forest Ecology and Management*, 210, 393–414. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2005.02.036>
- Oliver, C.D., & Larson, B.C. (1996). Forest Stand Dynamics. John Wiley & Sons, New York.
- Paatalo, M.L. (2000). Risk of snow damage in unmanaged and managed stands of scots pine, Norway spruce and birch, Scandinavian. *Scandinavian journal of forest research*, 15(5), 530-541.

- Päätaalo, M.L., Peltola, H., & Kellomäki, S. (1999). Modeling the risk of snow damahe to forests under short – term snow loding. *Forest Ecology and Management*, 116, 1-3. 51- 70. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(98\)00446-0](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(98)00446-0)
- Peltola, H., Nykänen, M.L., & Kellomäki, S. (1997). Model computations on the critical combination of snow loading and wind speed for snow damage of Scots pine, Norway spruce and birch sp. at stand edge. *Forest ecology and management*, 95(3), 229–241. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(97\)00037-6](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(97)00037-6)
- Pirnia, A., Habibnejad Roshan., M., & Solaimani, K. (2015) Investigation of Precipitation and Temperature Changes in Caspian Sea Southern Coasts and Its Comparison with Changes in Northern Hemisphere and Global Scales. *Journal of Watershed Management Research*, 6(11), 90-100. (In persian).
- Rossi, E.E., Granzow-de la Cerda, I., Oliver, C.D., & Kulakowski, D. (2017). Wind effects and regeneration in broadleaf and pine stands after hurricane Felix (2007) in Northern Nicaragua. *Forest ecology and management*, 400(1), 199–207
- Sagheb-Talebi, K., Sajedi, T., & Pourhashemi, M. (2014). Forests of Iran: A Treasure from the Past, a Hope for the Future (10). Springer, Dordrecht. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-7371-4>
- Schroeder, L.M., & Eidmann, H.H. (1993). Attacks of bark- and wood-boring coleoptera on snow-broken conifers over a two-year period. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 8(1-4), 257-265. <https://doi.org/10.1080/02827589309382775>
- Schneider, R.E., Affleck, D.L.R., & Larson, A. (2019) Tree spatial patterns modulate peak snow accumulation and snow disappearance, *Forest Ecology and Management*, 441(1), 9-19. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.03.031>
- Seidl, R., Schelhaas, M.J., Rammer, W., & Verkerk, P.J. (2014). Increasing forest disturbances in Europe and their impact on carbon storage. *Nature Climate Change*, 4(9), 806–810. <https://doi.org/10.1038/nclimate2318>
- Seidl, R., Schelhaas, M.J., Rammer, W., & Verkerk, P.J. (2014). Increasing forest disturbances in Europe and their impact on carbon storage. *Nature Climate Change*, 4(9), 806–810. <https://doi.org/10.1038/nclimate2318>
- Shabani, S., Varamesh, S., Moayedi, H., & Le Van, B. (2023). Modeling the susceptibility of an uneven-aged broad-leaved forest to snowstorm damage using spatially explicit machine learning. *Environmental Science and Pollution Research*, 30, 34203–34213. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-24660-8>
- Shahamati Nejad, A., Jahdi, R., & Keivan Behjou, F. (2022). Assessment of Forest Health Status in a Natural Untouched of *Fagus orientalis* Lipsky Mixed Stand Using Regeneration and Deadwood Indicators (Case Study: Masuleh Watershed). *Forest and Wood Products*, 75(1), 25-37. doi: 10.22059/jfwp.2021.323874.1166. (In persian)
- Song, X., Hogan, J.A., Lin, L., Wen, H., Cao, M., & Yang, J., (2018). Canopy openness and topographic habitat drive tree seedling recruitment after snow damage in an old-growth subtropical forest. *Forest Ecology and Management*, 429, 493–502. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.07.038>
- Tavankar, F., Bonyad, A., & Karamdost Marian, B. (2015). Snow damages on trees in natural and managed stands of the Caspian forests, North of Iran. *Iranian Journal of Forest*, 7(3), 419-431.(In persian)
- Tavankar, F., Lo Monaco, A., Nikooy, M., Venanzi, R., Bonyad, AE., & Picchio, R. (2019). Snow damages on trees of an uneven age in mixed broadleaf forests: effects of topographical conditions and tree characteristics. *Journal of Forestry Research*, 30(3), 1383–1394. <https://doi.org/10.1007/s11676-018-0710-x>

Teste, F.P., & Loeffers, V.J. (2011). Snow damage in lodgepole pine stands brought into thinning and fertilization regimes. *Forest ecology and management*, 261(11), 2096-2104.

Thom, D., & Seidl, R., (2015). Natural disturbance impacts on ecosystem services and biodiversity in temperate and boreal forests. *Biological Reviews*, 91(3), 760-791. <http://dx.doi.org/10.1111/brv.12193>.

Tiry Mashhadsar, I., Hosenpoor, A., Kiadaliry, H., Ghazi, S., Taghipoor Golsefidi, A., & Alipoor, B. (2011). Comparing Hand Planted Piless (*Cupressus Sempervirens* L, Var. Horizontalis) Stand Stability According to Burschel and Huss Scale in Babol City. *Journal of Sciences and Techniques in Natural Resources*, 6, 2. 27-47. (In persian)

Vacchiano, G., & Motta, R. (2015). An improved species distribution model for Scots pine and downy oak under future climate change in the NW Italian Alps. *Annals of forest science*, 72, 321-334. <https://doi.org/10.1007/s13595-014-0439-4>

Valinger, E., Fridman, J., & Bergqvist, G. (1993). Snow and wind damage in *Picea abies* stands in Sweden: Influence of stand characteristics. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 8(2), 167-178. <https://doi.org/10.1080/02827589309382767>

Valladares, F., Matesanz, S., Guilhaumon, F., Araújo, M.B., Balaguer, L., Benito-Garzón, M., Cornwell, W., Gianoli, E., van Kleunen, M., Naya, D.E., Nicotra, A.B., Poorter, H., & Zavala, M.A. (2015). The effects of phenotypic plasticity and local adaptation on forecasts of species range shifts under climate change. *Ecology Letters*, 17(11), 1351-1364. <https://doi.org/10.1111/ele.12348>

Venables, W.N., & Ripley, B.D. (2002). *Modern Applied Statistics with S*, Fourth Edition. Springer, New York. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-21706-2>

Vilà-Cabrera, A., Martínez-Vilalta, J., Vayreda, J., & Retana, J. (2011). Structural and climatic determinants of demographic rates of Scots pine forests across the Iberian Peninsula. *Ecological Applications*, 21, 1162-1172. <https://doi.org/10.1890/10-0647.1>

Wang, Y., Titus, S.J., & LeMay, V.M. (1998). Relationships between tree slenderness coefficients and tree or stand characteristics for major species in boreal mixed wood forests. *Canadian Journal Forest Research*, 28(8), 1171-1183. <https://doi.org/10.1139/x98-092>.

Zar, J.H. (1999). *Biostatistical Analysis* (4th ed.). Prentice Hall.

Zhu, J., Li, X., Liu, Z., Cao, W.A., Gonda, Y., & Matsuzaki, T. (2006). Factors affecting the snow and wind induced damage of a mountain secondary forest in northeastern china. *silva fennica*, 40(1), 37-51. <https://doi.org/10.14214/sf.351>

Zobeiry, M. (2000). *Forest Inventory (Measurement of Tree and Stand)*. Second edition. University of Tehran Press, 401p. (In persian)



## Snow as a natural driver and its consequences on the structure of mixed broadleaf forest stands in the Hyrcanian region (Case study: Liresara Forest, Nowshahr)

M. Amiri<sup>1\*</sup>, H. Ravanbakhsh<sup>2</sup>, M. Mostafa<sup>3</sup>, and M. Mohammady<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Associate Prof., Dept. of Environmental Engineering, Faculty of Natural Resources, Semnan University, Semnan, Iran.

<sup>2</sup>Assistant Prof., Forest Research Division, Research Institute of Forests and Rangelands, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran.

<sup>3</sup>Assistant Prof., Dept. of Soil, Plant and Food Sciences (DISSPA), University of Bari, 70199 Bari, Italy

(Received: 9 July 2025; Accepted: 26 October 2025)

### Abstract

**Introduction:** Snow plays a crucial role in shaping the ecology of mountain forests, significantly impacting the distribution, structure, and dynamics of plant communities. In the Hyrcanian forests, especially at higher elevations, snowfall influences not only soil moisture and water storage but also the structural integrity of forest stands. This can lead to notable physical disturbances, such as broken trunks and branches, tree uprooting, and change in species composition. This study aims to explore how various tree species in the Hyrcanian forests respond to disturbances caused by snow, an area that has not been extensively researched until now. We will assess changes in tree density, diameter distribution, basal area, volume, and the vulnerability of key species to heavy snowfall. The outcomes of this research will enhance our understanding of how Hyrcanian forests adapt to climate change, providing valuable insights that can inform the development of adaptive management strategies for future environmental conditions.

**Material and Methods:** To evaluate the damage caused by snow, three forest compartments that had experienced the most severe impacts were selected within Series 6 of the Liresara Forest, Mazandaran Province, Iran. Within each compartment, 25 sample plots measuring 40 × 40 meters were established using a systematic-random sampling method. All trees with a diameter at breast height (DBH) greater than 7.5 cm were quantitatively and qualitatively measured. The resulting data were analyzed using chi-square tests, Student's t-tests, and Duncan's multiple range test. Subsequently, a Random Forest algorithm was employed to model the severity of tree damage, with model performance evaluated based on overall accuracy, Kappa coefficient, balanced accuracy, and the area under the receiver operating characteristic curve (AUC).

**Results:** The results indicated that alder species showed the highest level of damage (22%), followed by gleditsia and beech. In terms of damage types, stem breakage (53%) and uprooting (33.6%) were the most frequent, while bending (13.4%) was the least common. Data analysis revealed that trees with diameters of 25–35 cm and heights of 20–25 m were the most vulnerable. This pattern was primarily attributed to the young age and high stand density, resulting from clear-cutting operations conducted in the 1980s. The random forest model effectively ranked the relative importance of variables, identifying slenderness coefficient and total tree volume as the most influential factors associated with snow damage. Furthermore, high AUC values demonstrated the model's strong capability in accurately predicting various damage severity classes.

**Conclusion:** The findings of this study demonstrated that morphometric characteristics of trees, such as tree slenderness ratio (TSC) and total volume, play a crucial role in the vulnerability of forest species in the Hyrcanian region to heavy snowfall. The results can inform forest stand management and contribute to mitigating. Modeling results using the random forest algorithm confirm with high accuracy that young trees in lower diameter and average height classes are the most vulnerable due to their unbalanced structure and the high density of forest stands resulting from past clear-cutting operations. Additionally, Caucasian alder was identified as the most sensitive, with (22%) of its individuals showing damage, likely due to the morphological characteristics of its brittle branches and shallow root system. From a management perspective, this study emphasizes the need to adjust the density of young stands through silvicultural interventions (such as thinning) to reduce slenderness ratio and increase trees' mechanical stability. Furthermore, the selection of less vulnerable species in reforestation programs for degraded forests could be a key strategy for adapting to climate change and reducing future damages.

**Keywords:** Random Forest Model, Snow damage, Tree Slenderness Coefficient (TSC), Trees Damage.

\*Corresponding author

Tel: +98 2331533051

Email: mojtabaamiri@semnan.ac.ir