

Analysis of the dynamics of canopy gap using UltraCam and UAV imagery in plantation coniferous stands Arab-Dagh region in Golestan Province

Zeynab Khalili^{*1}, Asghar Fallah², Shaban Shataee³

1. Corresponding Author, Ph.D. Student in Forestry, Faculty of Natural Resources, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran. E-mail: z.khalili923@gmail.com
2. Professor, Dept. of Forestry, Faculty of Natural Resources, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran. E-mail: fallaha2007@yahoo.com
3. Professor Dept. of Forestry, Faculty of Forest Science, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: shataee@gau.ac.ir

Article Info

Article type:

Full Length Research Paper

Article history:

Received: 06.29.2023

Revised: 08.01.2023

Accepted: 08.01.2023

Keywords:

Coniferous forestry,
Gap Size,
Long-Term Study,
Object-based classification,
Remote sensing

ABSTRACT

Background and Objectives: Natural disturbances caused by canopy gaps play a crucial role in forest dynamic processes and help preserve biodiversity, influence nutrient cycles, and maintain the complex structure of the forests. Analyzing the characteristics of canopy gaps is necessary to improve our understanding of temporal and spatial changes in the forest canopy and plays an important role in the future management of forest ecosystems. This study was conducted to analyze the canopy gap dynamics in plantation coniferous forests in Golestan province over a period of nine years using remote sensing data.

Materials and Methods: UAV images were taken and processed in a part of plantation conifer masses of Arab Dagh in 2019. In addition, aerial digital camera images taken in 2013 from the Army's Geographical Organization were received and processed. In the first step, the identification and preparation of the canopy gaps map was done using the object-based classification method. To evaluate the correctness and accuracy of the maps, the centers and boundaries of several canopy gaps were taken using a differential global positioning device, and some were prepared on the orthomosaic image and CHM. In the second step, 1345 lights were extracted from the classified map of aerial digital camera images, and 1058 canopy gaps were extracted from the classified map of the UAV, which had the highest accuracy, and the characteristics of the canopy gaps were obtained at each time point. In the third step, by crossing the classified maps of aerial digital camera and drone images, which had the highest accuracy. The dynamics of the gaps were analyzed by calculating the characteristics of gap formation rate, gap closure rate, gap expansion rate, gap reduction rate, and gap number increase rate. Finally, to statistically analyze the data, first, their normality was checked using the Kolmogorov-Smirnov test in SAS 9.4 statistical software and then the paired t-test was used to compare the averages.

Results: The results of the canopy gap dynamics during the 9 years showed that the number and density of the canopy gap decreased. However, the average area canopy gap and the share of the area of the canopy gap in the total area increased significantly. In both periods, 65% of the canopy gap had an area of less than 150 m², and a large canopy gap

(larger than 300 m²) covered the lowest frequency and share of the total area of the canopy gap. The highest rate of changes in the canopy gap source was related to the gap expansion rate (1.09% per year). The gap closure rate is almost equal to the gap reduction rate. The lowest rate of changes in the light is the gap formation rate (0.77% per year). The logarithmic gap number increase rate (GNIR) was negative (-2.6) and in all canopy gap classes, the number of closed canopy gaps per year is more than it is the number of new canopy gaps that are created.

Conclusion: With the passage of 9 years, the density of gaps and the number of gaps have decreased and the total surface of gaps has increased significantly. This increase in the total level of the gap can be attributed to the increase in the gap expansion during the period. Because the gap expansion rate is higher than the gap formation rate, the gap closures rate, and the gap reduction rate. In both periods, the most abundant size was related to small holes, which indicates the predominance of small lights in the studied area, which shows the predominance of small gaps in the studied area; small gaps make up most of the dynamics of gaps and close faster than big gaps.

Cite this article: Khalili, Zeynab, Fallah, Asghar, Shataee, Shaban. 2023. Analysis of the dynamics of canopy gap using UltraCam and UAV imagery in plantation coniferous stands Arab-Dagh region in Golestan Province. *Journal of Wood and Forest Science and Technology*, 30 (3), 1-26.



© The Author(s).

DOI: 10.22069/JWFST.2023.21512.2022

Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

تحلیل پویایی روشن‌های تاجی با استفاده از تصاویر هوایی رقومی التراکم و پهپاد در توده‌های سوزنی‌برگ دست‌کاشت عرب‌داغ استان گلستان

زینب خلیلی^{۱*}، اصغر فلاح^۲، شعبان شتایی^۳

۱. نویسنده مسئول، دانشجوی دکتری گروه جنگلداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران. رایانامه: z.khalili923@gmail.com
۲. استاد گروه جنگلداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران. رایانامه: fallaha2007@yahoo.com
۳. استاد گروه جنگلداری، دانشکده علوم جنگل، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: shataee@gau.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله کامل علمی- پژوهشی	مقدمه و هدف: آشفتگی‌های طبیعی ناشی از روشن‌های نقش مهمی در پویایی جنگل دارد و به حفظ تنوع زیستی، تأثیرگذاری بر چرخه مواد مغذی و حفظ ساختار پیچیده جنگل کمک می‌کند. تجزیه و تحلیل خصوصیات روشن‌ها برای بهبود فهم و درک ما از تغییرات زمانی و مکانی در تاج پوشش جنگل ضروری است و نقش مهمی در آینده مدیریتی بوم‌سازگان جنگل دارد. این مطالعه با هدف تحلیل پویایی روشن‌ها در یک جنگل دست‌کاشت سوزنی‌برگ در استان گلستان در بازه زمانی نه ساله با استفاده از داده‌های سنجنده‌های دور انجام شد.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۴/۰۸ تاریخ ویرایش: ۱۴۰۲/۰۵/۱۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۵/۱۰	
واژه‌های کلیدی: اندازه روشن‌ها، سنجنده‌های دور، طبقه‌بندی شی‌پایه، مطالعه طولانی مدت	مواد و روش‌ها: تصاویر پهپاد در بخشی از توده‌های دست‌کاشت سوزنی‌برگ عرب‌داغ در سال ۱۳۹۹ برداشت و مورد پردازش قرار گرفتند. هم‌چنین تصاویر دوربین هوایی رقومی اخذشده در سال ۱۳۹۰ از سازمان جغرافیایی ارتش دریافت و مورد پردازش قرار گرفتند. در گام اول شناسایی و تهیه نقشه روشن‌ها با استفاده از روش طبقه‌بندی شی‌پایه انجام شد. به‌منظور ارزیابی صحت و دقت نقشه‌ها، مراکز و محدوده تعدادی از روشن‌ها با استفاده از دستگاه موقعیت‌یاب جهانی تفاضلی برداشت شد و تعدادی هم بر روی تصویر ارتوفتوموزائیک و مدل رقومی تاج تهیه گردید. در گام دوم ۱۳۴۵ روشن‌ها از نقشه طبقه‌بندی‌شده تصاویر دوربین هوایی رقومی و ۱۰۵۸ روشن‌ها از نقشه طبقه‌بندی‌شده پهپاد که دارای بالاترین صحت بودند استخراج گردید و خصوصیات روشن‌ها در هر مقطع زمانی به‌دست آمد. در گام سوم باتلاقی نقشه‌های طبقه‌بندی‌شده تصاویر دوربین هوایی رقومی و پهپاد که دارای بالاترین صحت بودند. پویایی روشن‌ها از طریق محاسبه مشخصه‌های نرخ شکل‌گیری روشن‌ها، نرخ بسته شدن روشن‌ها، نرخ

گسترش روشنه، نرخ کاهش روشنه و نرخ افزایش لگاریتمی تعداد روشنه تحلیل گردید. در نهایت به منظور تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها، ابتدا نرمال بودن آن‌ها با استفاده از آزمون کولموگروف-اسمیرنوف در نرم‌افزار آماری SAS 9.4 بررسی شد. در صورت نرمال بودن داده‌ها به منظور آزمون مقایسه میانگین‌ها از آزمون t جفتی استفاده شد.

یافته‌ها: نتایج در بازه زمانی نه ساله نشان داد که تعداد و تراکم روشنه‌ها کاهش یافته است؛ اما میانگین مساحت روشنه‌ها و سهم مساحت روشنه‌ها از مساحت کل به طور معنی‌داری افزایش داشته است. در هر دو مقطع زمانی ۶۵ درصد روشنه‌ها مساحت کم‌تر از ۱۵۰ مترمربع دارند و روشنه‌های بزرگ (بزرگ‌تر از ۳۰۰ مترمربع) کم‌ترین فراوانی و سهم از مساحت کل روشنه‌ها را پوشش دادند. بیش‌ترین نرخ تغییرات روشنه‌ها مربوط به نرخ گسترش روشنه‌های اولیه بوده است (۱/۰۹ درصد در سال). نرخ بسته شدن با نرخ کاهش روشنه‌های اولیه تقریباً برابر است. کم‌ترین نرخ تغییرات روشنه‌ها را نرخ شکل‌گیری روشنه (۰/۷۷ درصد در سال) تشکیل داده است. نرخ افزایش لگاریتمی تعداد روشنه‌ها منفی بوده است (۲/۶-) و نشان می‌دهد در منطقه مورد مطالعه، تعداد روشنه‌های بسته‌شده در سال بیش‌تر از تعداد روشنه‌های جدیدی است که تشکیل می‌شود.

نتیجه‌گیری: با گذشت ۹ سال تراکم روشنه‌ها و تعداد روشنه‌ها کاهش یافته و سطح کل روشنه‌ها به طور معنی‌داری افزایش یافته است. این افزایش سطح کل روشنه را می‌توان به افزایش گسترش روشنه‌های اولیه در طول دوره نسبت داد؛ زیرا نرخ گسترش روشنه‌های اولیه بیش‌تر از نرخ تشکیل روشنه، نرخ بسته شدن و کاهش روشنه‌های اولیه است. در هر دو مقطع زمانی فراوان‌ترین اندازه مربوط به روشنه‌های کوچک بوده است؛ که نشان‌دهنده غلبه روشنه‌های کوچک در منطقه مورد مطالعه می‌باشد. روشنه‌های کوچک بیش‌تر پویایی روشنه‌ها را تشکیل می‌دهند و سریع‌تر از روشنه‌های بزرگ بسته می‌شوند.

استناد: خلیلی، زینب، فلاح، اصغر، شتابی، شعبان (۱۴۰۲). تحلیل پویایی روشنه‌های تاجی با استفاده از تصاویر هوایی رقومی التراکم و پهباد در توده‌های سوزنی‌برگ دست‌کاشت عرب‌داغ استان گلستان. نشریه پژوهش‌های علوم و فناوری چوب و جنگل، ۳۰ (۳)، ۲۶-۱.

DOI: 10.22069/JWFST.2023.21512.2022



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

مقدمه

آشفته‌گی‌های طبیعی یک ویژگی دائمی بوم‌سازگان جنگلی هستند که نقش مهمی در کنترل پویایی جنگل از جمله ترکیب، ساختار و تجدید حیات گونه‌های درختی ایفاء می‌کنند (۱). این آشفته‌گی‌ها نقش محوری در تغییر اکوسیستم جنگلی دارند (۲، ۳). آشفته‌گی در دامنه‌ای از حوادث کوچک‌مقیاس از افتادن تک‌درخت یا شکستن تاج درختان تا حوادث بزرگ‌مقیاس به‌وجود آمده مثل باد، آتش‌سوزی، طغیان حشرات و طوفان‌های ناگهانی اتفاق می‌افتد (۲)، یکی از حوادث و آشفته‌گی‌های طبیعی که تأثیر مهمی بر ساختار و پویایی زمانی و مکانی توده‌های جنگلی دارد، ایجاد روشن‌ه^۱ در توده می‌باشد (۴). روشن‌ه‌ها بازشدگی توده هستند که در اثر افتادن طبیعی و غیرطبیعی درختان آشکوب بالا ایجاد شده و سبب ایجاد فضای باز در تاج پوشش جنگل می‌شوند. این فضای باز در طول زمان به‌صورت ثابت باقی نمی‌ماند بلکه توسط رشد جانبی تاج پوشش درختان اطراف یا توسعه زادآوری پر می‌شوند، این فرآیند را به‌اصطلاح پویایی روشن‌ه^۲ می‌گویند (۵). پویایی روشن‌ه که با تشکیل و بسته شدن روشن‌ه مشخص می‌شود بر پویایی جنگل تأثیر می‌گذارد، بسیاری از دانشمندان علوم جنگل و بوم‌شناسان گیاهی را به سمت مطالعه روشن‌ه‌ها جذب کرده است. تجزیه و تحلیل خصوصیات روشن‌ه‌ها برای بهبود فهم و درک ما از تغییرات زمانی و مکانی در تاج پوشش جنگل ضروری است و دید کلی از فرآیندهای تکاملی در سطح زمین را فراهم می‌کند (۶). پس از شکل‌گیری روشن‌ه برخی از شرایط محیطی مثل میزان نور دریافتی، درجه حرارت، دمای خاک و رطوبت خاک تغییر می‌یابند. از بین همه این عوامل محیطی تغییرات میزان نور ورودی، نقش مهمی

در رویش گیاهان و فرآیند بسته شدن روشن‌ه ایفاء می‌کند بدین خاطر که شرایط نوری، عامل تعیین‌کننده استقرار نهال‌ها و رویش جنگل و در نتیجه عامل محرک پویایی جنگل درازمدت محسوب می‌شود (۷)؛ بنابراین روشن‌ه‌ها، نقش مهمی در استقرار، بقاء و توسعه گونه‌های درختی ایفاء می‌کند (۸). هم‌چنین روشن‌ه‌های تاج پوشش جنگل، جزء کلیدی از رژیم بی‌نظمی و به‌هم‌خوردگی در بوم سامانه‌های جنگلی محسوب می‌شوند. در مطالعات پویایی روشن‌ه‌ها، ثبت کامل همه روشن‌ه‌های موجود در سراسر سطح جنگل موردنیاز است. برای اندازه‌گیری روشن‌ه دو روش اندازه‌گیری میدانی و استفاده از داده‌های دورسنجی مثل عکس‌های هوایی، داده‌های ماهواره‌ای و داده‌های لیزر اسکنر هوایی وجود دارد (۹).

ثبت کامل همه روشن‌ه‌های موجود در سطح جنگل، در روش پیمایش میدانی بسیار زمان‌بر و طاقت‌فرسا است. به همین دلیل معمولاً پیمایش‌های میدانی روشن‌ه‌ها در سطوح کوچک‌تری انجام می‌شوند. همین امر باعث می‌شود این نوع داده‌ها برای مطالعات پویایی روشن‌ه‌ها مناسب نباشد (۱۰)؛ بنابراین متخصصان و پژوهش‌گران با رویکرد صرفه‌جویی در هزینه و زمان و از طرفی به دست آوردن اطلاعات موردنیاز و قابل‌قبول، به منابع و تکنیک‌های سنجش‌ازدور روی آورده‌اند. در واقع داده‌های سنجش‌ازدور به‌دلیل برخورداری از مزایایی چون سطح پوشش وسیع، قابلیت تکرار، سهولت پردازش، توأم با داده‌های میدانی و استفاده از روش‌های جدید و پیشرفته برای افزایش دقت، می‌توانند وسیله‌ای برای نقشه‌برداری دقیق و صریح روشن‌ه‌ها و توصیف پویایی شکاف تاج پوشش جنگلی را فراهم کنند (۱۱، ۱۲). تصاویر ماهواره‌ای با وجود قابلیت‌های فراوان، دارای محدودیت‌هایی نیز هست که کاربرد آن را برای برخی زمینه‌های منابع طبیعی مشکل می‌کند، از جمله قیمت

1- Canopy gap
2- Gap dynamics

زیاد برخی از انواع آن، محدود بودن تعداد برداشت‌های برخی از ماهواره‌ها در فصل رویش، مشکل هم‌زمانی برداشت تصویر با نمونه‌برداری زمینی است (۱۳). داده‌های سنجنش‌ازدور هوابرد با توان تفکیک مکانی زیاد، منبع اطلاعاتی دقیق و غنی را برای کاربردهای جنگلداری فراهم نموده است (۱۴). سنجنش‌ازدور هوایی تا مدت‌ها تنها با استفاده از هواپیماهای سرنشین‌دار انجام می‌شده است که به‌علت هزینه زیاد و پیچیدگی سیستم برداشت تنها به‌صورت محدود در مطالعات منابع طبیعی مورد استفاده قرار گرفته است (۱۵). پهپادها (هواپیماهای بدون سرنشین)^۱ در کنار ماهواره‌ها و هواپیماها در سال‌های اخیر به‌منظور جمع‌آوری اطلاعات از بوم سامانه‌های جنگلی استفاده می‌شوند. پهپادها ویژگی‌هایی دارند که استفاده از آن‌ها را در عرصه‌های جنگلی توجیه می‌کند که از آن جمله می‌توان هزینه عملیاتی پایین، قدرت تفکیک زمانی- مکانی بالا، جمع‌آوری داده باکیفیت بالا (۱۶)، امکان استفاده از الگوریتم‌های خودکار در پردازش‌ها (۱۷) و دقت تفکیک مکانی خیلی بالا، اندازه پیکسل کم‌تر از پنج سانتی‌متر (۱۸) اشاره کرد. این ابزار به سبب برداشت زوج تصاویر با همپوشانی زیاد، امکان تهیه مدل‌های رقومی سطحی (DSM)^۲ و مدل رقومی ارتفاعی (DTM)^۳ و مدل رقومی ارتفاعی تاج (CHM)^۴ را فراهم می‌کند که در استخراج نقشه روشن‌ها می‌توان از آن‌ها استفاده کرد. یکی دیگر از خروجی‌های پردازش تصاویر پهپاد، اورتوموزاییک با اندازه مکانی در حد چند سانتی‌متر است که در استخراج نقشه روشن‌ها به کار می‌رود؛ بنابراین با اعمال تکنیک‌ها و روش‌های مناسب سنجنش‌ازدور مانند طبقه‌بندی مناسب می‌توان اطلاعات ارزشمندی

را در راستای مدیریت جنگل کسب نمود. در این راستا Amini و همکاران (۲۰۲۱) با استفاده از پهپاد و آستانه‌گذاری مدل ارتفاعی تاج (ارتفاع و شیب ثابت و ارتفاع نسبی) و طبقه‌بندی شی‌پایه مدل ارتفاعی تاج و اورتوموزاییک پهپاد روشن‌ها را استخراج کردند. ایشان بیان داشتند روش آستانه شیب ۶۰ درصد، با صحت کلی ۹۱/۷ درصد و ضریب کاپای ۰/۱۷ دارای بهترین نتیجه بوده است (۱۹). در چند دهه اخیر مطالعات زیادی ویژگی‌های روشن‌ها (توزیع اندازه، تعداد در هکتار، درصد و مساحت کل روشن‌ها، سهم کل روشن‌ها از مساحت کل و میانگین روشن‌ها) را در اکوسیستم‌های جنگلی بررسی کرده‌اند (۱، ۸، ۲۰، ۲۱، ۲۲، ۲۳، ۲۴، ۲۵، ۲۶، ۲۷).

پویایی روشن‌ها معمولاً با اندازه‌گیری نرخ تشکیل و بسته شدن روشن‌ها اندازه‌گیری می‌شود (۲۸). با این حال، پویایی روشن‌ها توسط تغییرات محیطی مداوم از جمله: افزایش میانگین دما (افزایش میانگین دما منجر به مستعد شدن درختان به آفات و عفونت پاتوژن می‌شود. این اثرات غیرمستقیم آب و هوایی به رژیم کلی آشفستگی کمک می‌کند به‌خصوص در جنگل‌های سوزنی‌برگ با افزایش دمای تابستان باعث افزایش سوسک‌های پوست می‌شود)، افزایش CO₂، رسوب نیتروژن و باد (عامل اصلی آشفستگی در جنگل‌ها باد است، طوفان اثرات مستقیمی را توسط بادشکن ایجاد می‌کند و در نتیجه سرعت تشکیل روشن‌ها و گسترش روشن‌ها را افزایش می‌دهد. تعداد روشن‌ها با افزایش فراوانی طوفان افزایش می‌یابد). ویژگی‌های جنگل، مانند مرحله توالی، مقاومت در برابر آشفستگی، ارتفاع تاج پوشش (هرچه ارتفاع تاج پوشش بالاتر باشد مدت‌زمان بسته‌شدن روشن‌ها طولانی‌تر است)، نرخ رشد درخت (سن جنگل بر نرخ رشد درختان تأثیر می‌گذارد. فرآیند بسته‌شدن روشن‌ها تا حد زیادی توسط رشد جانبی کنترل می‌شود

- 1- Unmanned aerial vehicle
- 2- Digital surface model
- 3- Digital terrain model
- 4- Canopy height model

سریع‌تر از جنگل‌های شمالی است (۳۷)، اما نتایج متناقضی توسط Vepakomma و همکاران (۲۰۱۲) و Rugani و همکاران (۲۰۱۳) منتشر شده است (۲۸، ۳۸) که نشان می‌دهد پویایی روشنه باید در اکوسیستم‌های مختلف جنگلی مورد مطالعه قرار گیرد (۳۶).

بر اساس مرور منابع، هر یک از مطالعات از روش‌ها و داده‌های متفاوتی در شرایط جنگلی متفاوت اعم از جنگل‌های پهن‌برگ و سوزنی‌برگ پویایی روشنه را با اندازه‌گیری نرخ تشکیل و بسته شدن روشنه اندازه‌گیری کردند. بررسی پویایی روشنه‌ها با استفاده از داده‌های چند زمانه نشان داد نرخ تشکیل و بسته شدن روشنه‌ها حاوی اطلاعات ارزشمندی از وضعیت توده و ساختار آن می‌باشد. مرور منابع نشان داد مطالعات اندکی در این زمینه در جنگل‌های دست‌کاشت انجام شده است؛ بنابراین موضوع تحلیل پویایی روشنه‌ها در چنین توده‌ای با استفاده از تصاویر دوربین هوایی رقومی و پهپاد، ارزشمند خواهد بود و می‌تواند برای تحلیل وضعیت توده در آینده مورد بررسی و استفاده قرار گیرد.

مواد و روش‌ها

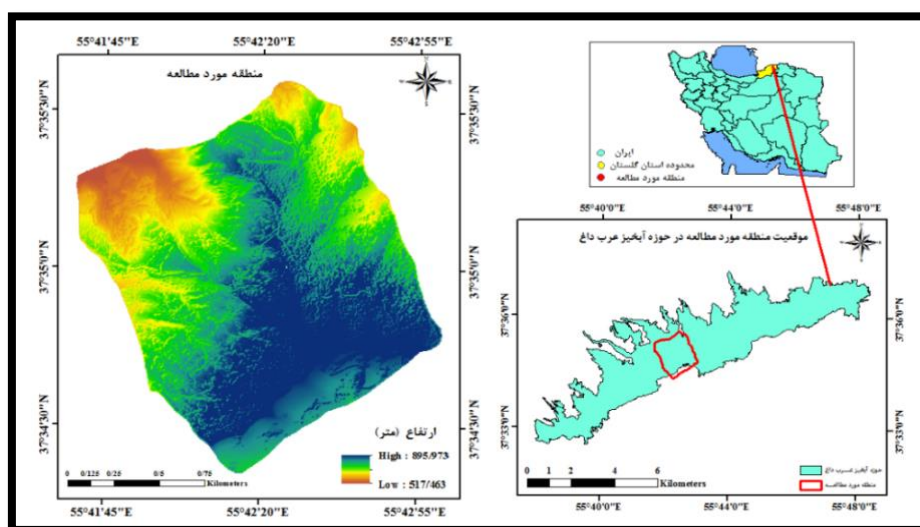
منطقه مورد مطالعه: این تحقیق در ۲۷۶/۵۹۳ هکتار از جنگل کاری عرب‌داغ در ۴۰ کیلومتری شمال شرق شهر کلاله و در حوزه مدیریتی اداره منابع طبیعی شهرستان کلاله استان گلستان و در محدوده " ۵۵°۳۵'۵" تا " ۵۵°۵۱'۵" طول شرقی و " ۳۷°۳۰'۴۶" تا " ۳۷°۳۸'۲۰" عرض شمالی انجام شد (شکل ۱)؛ که از سال ۱۳۶۵ تا ۱۳۶۹ با گونه‌های سرو زربین (*Cupressus sempervirens*)، کاج بروسیا (*Pinus brutia*) و سرو نقره‌ای (*Cupressus arizonica*) با فاصله کاشت ۳×۳ متر، جنگل کاری شده است. حداقل و حداکثر ارتفاع منطقه به ترتیب ۵۱۷/۴۶ و ۸۹۵/۹۷

و نرخ رشد درختان در جنگل‌های مسن‌تر معمولاً کمتر از توده‌های جوان‌تر است) و نوع جنگل (درختان در جنگل‌های معتدل معمولاً سریع‌تر از جنگل‌های شمالی رشد می‌کنند؛ زیرا در جنگل‌های معتدل دما و سطوح نور بالاتر است و فصل رشد نسبتاً طولانی در این جنگل‌ها ممکن است دلیل دیگری برای نرخ رشد متوسط سالانه بالا باشد) تغییر می‌کند (۵، ۲۳، ۲۸، ۲۹، ۳۰، ۳۱، ۳۲).

در این راستا، نرخ تشکیل روشنه گزارش شده توسط Henbo و همکاران (۲۰۰۴) برای یک جنگل راش کهن‌سال در جنوب غربی ژاپن ۱/۳-۰/۵ درصد مساحت جنگلی در سال بود (۳۳) که چهار برابر بیش‌تر از نرخ جنگل سوزنی‌برگ در شمال شرقی کوه بروکن آلمان گزارش شده توسط Kathke و همکاران (۲۰۱۰) بود (۲۳). Kenderes و همکاران (۲۰۰۹) در مطالعه خود در جنگل‌های راش در اروپای مرکزی به این نتیجه رسیدند که نرخ تشکیل روشنه (۰/۰۹-۰/۰۵ درصد در سال) و نرخ بسته‌شدن روشنه (۰/۰۳-۰/۰۱ درصد در سال) می‌باشد (۳۴). Kathke و همکاران (۲۰۱۰) نرخ ایجاد روشنه را در جنگل سوزنی‌برگ در شمال شرقی کوه بروکن آلمان ۰/۱ درصد در سال و نرخ بسته شدن روشنه را ۰/۳ درصد در سال گزارش کردند (۲۳). Blackburn و همکاران (۲۰۱۴) در جنگل‌های پهن‌برگ، در جنوب انگلستان نرخ بسته‌شدن روشنه را ۰/۹ درصد در سال و نرخ باز شدن را ۰/۶ درصد در سال گزارش کردند (۳۵). Zhu و همکاران (۲۰۱۹) در بررسی خود با استفاده از تصویر ماهواره‌ای بافاصله زمانی ده‌ساله نرخ تشکیل روشنه (۰/۱ درصد در سال) و نرخ بسته‌شدن را (۰/۴-۰/۱ درصد در سال) در جنگل‌های پهن‌برگ در شمال شرقی چین گزارش کردند (۳۶). هم‌چنین Bartemucci و همکاران (۲۰۰۲) نشان دادند که نرخ بسته‌شدن روشنه در جنگل‌های معتدل معمولاً

بروسیا (*Pinus brutia*) - زربین (*Cupressus sempervirens*)،
 آزاد (*Pinus carpinifolia*) - ممرز (*Carpinus betulus*) می‌باشد.
 اگرچه در این منطقه توده‌های طبیعی پهن‌برگ نیز
 موجود می‌باشد ولی این توده‌ها به دلایل رقابت‌های
 نوری، آفت و بیماری، بادافتادگی و دیگر عوامل
 دارای روشنه‌های متعدد می‌باشند (۳۹).

متر است و شیب متوسط آن ۱۵ درصد و جهت غالب
 آن شمالی است. گونه‌های کاشته شده منطقه عمدتاً با
 گونه‌های سوزنی‌برگ زربین و بروسیا و به صورت
 لکه‌های کوچکی با گونه‌های افرا (*Acer*) و آزاد
 (*Zelcova carpinifolia*) است که به شکل خالص
 و یا مخلوط آزاد (*Zelcova carpinifolia*) - زربین
 (*Cupressus sempervirens*)، بروسیا (*Pinus*)



شکل ۱- موقعیت و گستره منطقه مورد مطالعه در شهرستان کلاله در استان گلستان و ایران.

Figure 1. Location and scope of the study area in Kalaleh City in Golestan Province and Iran.

- تصاویر و داده‌های پهپاد: تصاویر پهپاد در شرایط
 جوی مناسب با ارتفاع پروازی ۱۱۵ متر از سطح
 زمین، با همپوشانی طولی و عرضی ۷۰ درصد و زاویه
 دوربین ۹۰ درجه با شبکه برداشت خطی، توسط پهپاد
 کوادکوپتر Phantom 4 pro در تاریخ ۱۰ اکتبر سال
 ۲۰۲۰ برابر با ۱۹ مهرماه ۱۳۹۹ در بخشی از محدوده
 جنگل کاری عرب داغ اخذ گردید.

- واقعیت زمینی: در این پژوهش نقشه واقعیت زمینی
 به روش نمونه‌ای و به صورت تصادفی در تعدادی از
 روشنه‌ها از طریق بازدید میدانی و ثبت مرکز و
 محدوده روشنه‌ها با دستگاه موقعیت‌یاب جهانی
 تفاضلی با دقت بالا (کم‌تر از ۱۰ سانتی‌متر) و تعدادی

داده‌های مورد استفاده

- تصاویر دوربین هوایی رقومی التراکم: تصاویر
 دوربین هوایی رقومی التراکم مربوط به ۱۹ جولای
 سال ۲۰۱۱ برابر با ۲۸ تیرماه ۱۳۹۰ از سازمان
 جغرافیایی ارتش دریافت و استفاده گردید. تصاویر
 دوربین هوایی رقومی شامل ۱۲ فریم با پوشش
 مشترک طولی ۷۰ درصد و عرضی ۶۰ درصد می‌باشد.
 تصاویر در چهار باند طیفی (آبی، سبز، قرمز و
 مادون‌قرمز نزدیک) در ابعاد ۵۷۷۰×۳۷۷۰ پیکسل و
 اندازه زمینی پیکسل در ارتفاع پرواز ۳۰۰ متری ۵/۴
 سانتی‌متر به صورت ۱۶ بیتی (تفکیک رادیومتری
 واقعی ۱۲ بیت) در فرمت Tiff دریافت شدند.

قطعه‌بندی^۱: در این پژوهش از روش قطعه‌بندی چندمقیاسه که توسط Baatz و همکاران (۱۹۹۹) توسعه داده شده است (۴۰) استفاده شد. قطعه‌بندی تصاویر هوایی رقومی و پهپاد با ترکیبی از اطلاعات طیفی و ویژگی‌های ارتفاعی در قالب داده‌های ورودی با وزن‌های متفاوت انجام شد (جدول ۱). در این پژوهش سعی گردید با روش آزمون خطا و افزونه EPS، با بررسی قطعات حاصل از اعمال قطعه‌بندی با میزان مشخصی از درجات شاخص‌های قطعه‌بندی به صورت بصری بهترین قطعات انتخاب شود (۴۱). بعد از آزمون و خطا و بررسی‌های بصری و نتایج افزونه EPS مقادیر مناسب شاخص‌های قطعه‌بندی تصاویر پهپاد (۰/۷ متغیر شکل^۲، ۰/۳ فشردگی^۳ و مقیاس^۴ ۵۰) و مقادیر مناسب شاخص‌های قطعه‌بندی تصاویر دوربین هوایی رقومی (۰/۷ متغیر شکل، ۰/۳ فشردگی و مقیاس ۱۰) انتخاب گردید (شکل ۲).

هم بر روی تصویر اورتوموزاییک و مدل رقومی تاج تهیه گردید. در مجموع ۳۰۲ نقطه نمونه تصادفی (۱۵۱ نمونه روشن و ۱۵۱ نمونه تاج پوشش) انتخاب گردید. سپس موقعیت هر یک از نقاط بر روی تصاویر اورتوموزاییک عکس‌های هوایی التراکم و تصاویر پهپاد و مدل رقومی تاج عکس‌های هوایی التراکم و پهپاد به عنوان واقعیت زمینی ثبت گردید. در نهایت ۷۰ درصد از نمونه‌ها به عنوان نمونه آموزش و ۳۰ درصد باقی‌مانده به عنوان نمونه آزمون در نظر گرفته شد.

روش تحقیق

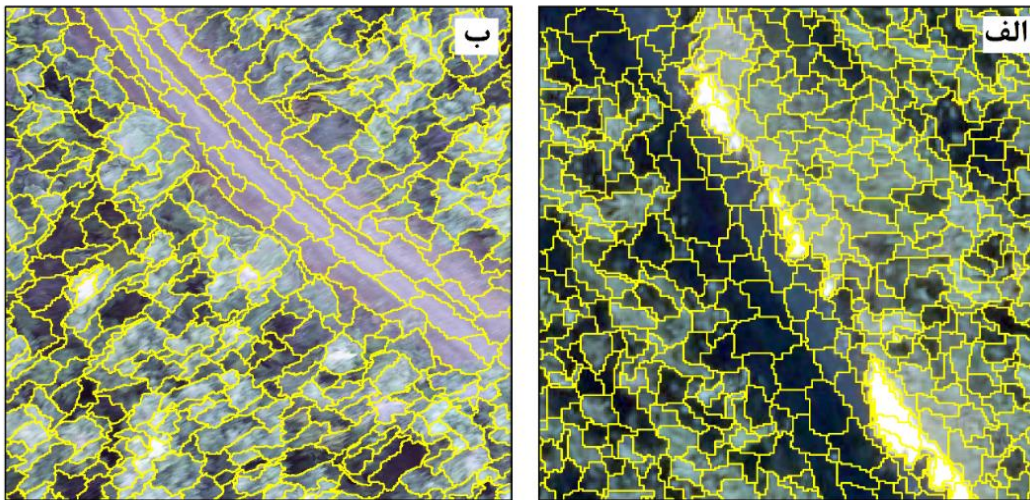
- روش شناسایی و تهیه نقشه روشن‌ها: طبقه‌بندی شی‌پایه در مقیاس اشیاء تصویر در سه مرحله کلی قابل انجام است که شامل قطعه‌بندی، طبقه‌بندی و ارزیابی صحت طبقه‌بندی می‌باشد.

جدول ۱- ویژگی‌های ارتفاعی و طیفی در تصاویر دوربین هوایی رقومی التراکم و پهپاد.

Table 1. Altitude and spectral characteristics in UltraCam-XP aerial digital camera and UAV images.

وزن Weight	تصاویر پهپاد UAV	وزن Weight	تصاویر دوربین هوایی رقومی UltraCam-XP	
4	لایه مدل ارتفاعی تاج CHM	4	لایه مدل ارتفاعی تاج CHM	ویژگی‌های ارتفاعی Altitude features
3	لایه شیب Slope-CHM	3	لایه شیب Slope-CHM	
1	باند قرمز Band Red	1	باند قرمز Band Red	ویژگی‌های طیفی Spectral features
2	باند سبز Band Green	2	باند سبز Band Green	
1	باند آبی Band Blue	1	باند آبی Band Blue	
-	-	3	باند مادون قرمز نزدیک NIR	

- 1- Segmentation
- 2- Shape
- 3- Compactness
- 4- Scale



شکل ۲- قطعه‌بندی چند مقیاس: الف- تصاویر دوربین هوایی رقومی ب- تصاویر پهپاد.

Figure 2. Multi-scale segmentation: a- Digital aerial camera images b- UAV.

طبقه‌بندی از الگوریتم‌های مختلف (نزدیک‌ترین همسایه، ماشین بردار پشتیبان، جنگل تصادفی، درخت تصمیم‌گیر و بیز) استفاده شد. ارزیابی صحت: نقشه‌های طبقه‌بندی شده با استفاده از ۳۰ درصد نمونه‌های آزمون، با استفاده از صحت کلی (رابطه ۱) و ضریب کاپا (رابطه ۲) ارزیابی و بررسی شدند (۴۲).

طبقه‌بندی^۱: در طبقه‌بندی قطعات حاصل از قطعه‌بندی، دو طبقه روشن و تاج پوشش تعریف شد. طبقه‌بندی تصاویر پهپاد با ویژگی‌های هر طبقه (از دو ویژگی مهم یعنی میانگین و انحراف معیار تمامی باندها و شاخص‌های طیفی GRVI) و طبقه‌بندی تصاویر دوربین رقومی هوایی (از دو ویژگی مهم یعنی میانگین و انحراف معیار تمامی باندها و شاخص‌های طیفی GRVI، NDVI و GNDVI) انجام شد. در

$$Overall\ accuracy = \frac{\sum \text{corrected numbers of the pixels}}{\text{Total number of known pixels}} \quad (1)$$

$$Kappa\ coefficient = \frac{(\text{Overall accuracy observed}) - (\text{Chance agreement})}{1 - (\text{Chance agreement})} \quad (2)$$

گرفت (۴۳). درحالی‌که Brokaw (۱۹۸۲) معتقد بود ارتفاع زادآوری دو متر برای بسته‌شدن روشن کفایت می‌کند (۴۴). این اختلاف نظرها همچنان ادامه یافت (۱۰). به طوری که برخی مطالعات حد آستانه ارتفاع زادآوری دو متر (۲۲)، سه متر (۴۵)، چهار متر (۴۶) تا ۱۰ متر (۴۷) را برای روشن بسته‌شدن در نظر گرفتند و برخی دیگر نصف ارتفاع توده (۸، ۴۸) دوسوم ارتفاع توده (۲۵، ۴۷، ۴۹) را به عنوان حد آستانه بسته‌شدن روشن تعریف نمودند. به نظر می‌رسد تعریف

روش استخراج روشن‌ها: روشن‌ها به شکل باز شدن تاج پوشش با حداقل مساحت ۹ مترمربع که در اثر خشک شدن درختان اتفاق می‌افتند، تعریف شدند. از ابتدای بررسی روشن‌ها، در مورد تعریف بسته شدن روشن یا به عبارت دیگر "مرگ" روشن، اختلاف نظر وجود داشت. Runkle (۱۹۸۱) معتقد بود هنگامی که زادآوری درون روشن به ارتفاعی بین ۱۰ تا ۲۰ متر برسند آن روشن را می‌توان به عنوان بسته‌شده در نظر

1- Classification

فرآیندی است که در آن ارتفاع بخشی از پیکسل‌ها در مدل رقومی ارتفاعی تاج پوشش ۱۳۹۰ کم‌تر از حد آستانه تمایز روشن‌ها بوده است اما در مدل رقومی ارتفاعی تاج پوشش ۱۳۹۹ بخشی از ارتفاع پیکسل‌ها بیش‌تر از حد آستانه تمایز روشن‌ها بوده است. در واقع این نوع از روشن‌ها فقط در سال ۱۳۹۰ مشاهده می‌شوند. "ایجاد روشن‌ها جدید" که در نواحی مشاهده می‌شود که پیکسل‌ها در سال ۱۳۹۰ ارتفاعی بیش‌تر از حد آستانه تمایز روشن‌ها داشته‌اند اما ارتفاع آن‌ها بر مدل رقومی ارتفاعی تاج پوشش سال ۱۳۹۹ به کم‌تر از حد آستانه تمایز کاهش یافته است. این دسته از روشن‌ها هیچ نوع ارتباط و همسایگی و مرز مشترک با روشن‌های دیگری در سال ۱۳۹۰ ندارند. "گسترش روشن‌ها اولیه" هنگامی است که پیکسل‌ها در سال ۱۳۹۰ ارتفاعی بیش‌تر از حد آستانه تمایز روشن‌ها داشته‌اند اما ارتفاع آن‌ها در مدل رقومی ارتفاعی تاج پوشش سال ۱۳۹۹ به کم‌تر از حد آستانه تمایز کاهش یافته است. این دسته از روشن‌ها نواحی گسترشی هستند که در همسایگی روشن‌های اولیه تشکیل شدند. "باقی ماندن روشن‌ها" فرآیندی است که در آن ارتفاع پیکسل‌ها هم در مدل رقومی ارتفاعی تاج پوشش ۱۳۹۰ و هم مدل رقومی ارتفاعی تاج پوشش ۱۳۹۹ کم‌تر از حد آستانه تمایز روشن‌ها بوده است. در واقع این نوع از روشن‌ها در نقشه روشن‌های سال ۱۳۹۰ و ۱۳۹۹ مشاهده می‌شوند (۵۰، ۵۱). در این بررسی، شاخص‌های سطحی شامل نرخ شکل‌گیری (GFR)^۲ و نرخ بسته‌شدن (GCR)^۳، نرخ گسترش (GER)^۴ و نرخ کاهش (GRR)^۵ و شاخص‌های بر مبنای تعداد روشن‌ها شامل نرخ افزایش لگاریتمی تعداد روشن‌ها (GNIR)^۶ (۲۳) برای برآورد پویایی روشن‌ها بین دو مقطع زمانی سال‌های ۱۳۹۰ و ۱۳۹۹ محاسبه گردید (جدول ۲).

آخر قانع‌کننده باشد چراکه گفته می‌شود که زادآوری می‌بایست به لایه اصلی تاج‌پوشش برسد تا یک روشن‌ها را بتوان بسته‌شده نامید. در این پژوهش دو مدل ارتفاعی تاج مربوط به دو مقطع زمانی ۱۳۹۰ و ۱۳۹۹ مطابق روش‌های ذکرشده استخراج شد. تغییرات ارتفاع بین دو مقطع زمانی مبنای آشکارسازی تغییرات در محدوده روشن‌ها می‌باشد. برای کسب اطمینان از نبود خطای سیستماتیک و صحت تغییرات، تطابق هندسی دو مدل رقومی تاج سال‌های ۱۳۹۰ و ۱۳۹۹ بررسی شد. برای این منظور با استفاده از الگوریتم حداکثر محلی^۱ با پنجره ۵×۵ رأس تاج درخت بر لایه CHM زمان اول (Ultracam₁₃₉₀) و زمان دوم (UAV₁₃₉₉) تعیین شد. تعداد ۱۵۰ درخت که تاج نسبتاً متمایزی نسبت به سایر درختان داشتند شناسایی شده و سپس مختصات و ارتفاع این درختان نمونه بر روی CHM هر دو زمان استخراج شد. سپس با ترسیم چندضلعی در نرم‌افزار ArcGIS، روشن‌های موجود در هر دو مقطع زمانی در منطقه مورد مطالعه از بهترین نقشه روشن‌ها استخراج شدند. پس از تعیین مساحت روشن‌ها، با توجه به کوچک‌ترین و بزرگ‌ترین مساحت روشن‌ها و هم‌چنین فراوانی آن‌ها، روشن‌ها به ۴ طبقه بسیار کوچک (۵۰-۶ مترمربع)، کوچک (۱۵۰-۵۰ مترمربع)، متوسط (۳۰۰-۱۵۰ مترمربع) و بزرگ (بیش‌تر از ۳۰۰ مترمربع) طبقه‌بندی شدند.

- پویایی روشن‌ها: در این بررسی شش حالت تغییر روشن‌ها شناسایی شد. "بسته‌شدن روشن‌ها" در مناطقی اتفاق می‌افتد که ارتفاع در مدل رقومی ارتفاعی تاج پوشش اولیه ۱۳۹۰ کم‌تر از آستانه تمایز روشن‌ها بوده؛ اما در سال ۱۳۹۹ مقدار آن به بیش‌تر از حد آستانه ارتفاعی افزایش یافته است؛ به عبارت دیگر روشن‌های بسته‌شده روشن‌هایی هستند که در نقشه روشن‌های سال ۱۳۹۰ مشاهده شده، اما در نقشه روشن‌های سال ۱۳۹۹ وجود ندارد. "کاهش روشن‌های اولیه"

- 2- Gap formation rate
- 3- Gap closure rate
- 4- Gap expansion rate
- 5- Gape reduction rate
- 6- Gap number increase rate

- 1- Local maxima

جدول ۲- فرمول و تعریف شاخص‌های پویایی روشنه بین دو مقطع زمانی.

Table 2. Formula and definition of gap dynamic indicators between two periods.

فرمول Formula	توضیحات Description	شاخص‌ها Indicators
$GFR = (IA / (A \times t)) \times 100\%$	GFR: مساحت منطقه‌ای که وضعیت آن از تاج پوشش بسته به روشنه تبدیل شده نسبت به مساحت کل منطقه مورد مطالعه GFR = area with a status change from closed forest matrix to gap related to the whole study area	نرخ شکل‌گیری روشنه (درصد در سال) Gap formation rate [% yr ⁻¹]
$GCR = (CA / (A \times t)) \times 100\%$	GCR: مساحت منطقه‌ای که وضعیت آن از روشنه به تاج پوشش بسته تبدیل شده نسبت به مساحت کل منطقه مورد مطالعه GCR = area with a status change from gap to closed forest matrix related to the whole study area.	نرخ بسته شدن روشنه (درصد در سال) Gap closure rate [% yr ⁻¹]
$GER = (EA / (A \times t)) \times 100\%$	GER: مساحت منطقه‌ای که وضعیت آن از روشنه به روشنه گسترشی تبدیل شده نسبت به مساحت کل منطقه مورد مطالعه GER = area with a status change from gap to expanded gap related to the whole study area.	نرخ گسترش روشنه (درصد در سال) Gap expansion rate [% yr ⁻¹]
$GRR = (RE / (A \times t)) \times 100\%$	GRR: مساحت منطقه‌ای که وضعیت آن روشنه تبدیل شده به روشنه کاهش یافته نسبت به مساحت کل منطقه مورد مطالعه GRR = area with a status change from gap to reduction gap related to the whole study area.	نرخ کاهش روشنه (درصد در سال) Gap reduction rate [% yr ⁻¹]
$GNIR = (\ln N_2 - \ln N_1) / (t_2 - t_1) \times 100\%$	GNIR: نسبت روشنه‌هایی که وضعیت آن‌ها بین روشنه و تاج بسته تغییر یافته. مقادیر مثبت نشان‌دهنده درصد سالانه ایجاد روشنه در این زمان و مقادیر منفی نشان‌دهنده از بین رفتن روشنه GNIR = proportion of gaps that change their status between the gap and closed forest matrix. Positive values show the annual percentage of net gap creation at this time, while negative values indicate a net loss of gaps.	نرخ افزایش لگاریتمی تعداد روشنه‌ها (درصد در سال) Gap number increase rate [% yr ⁻¹]

IA: مجموع مساحت روشنه‌های جدید (مترمربع) در زمان دوم (t₂) به عبارت دیگر مربوط به سال ۱۳۹۹. C_A: مجموع مساحت روشنه‌های بسته شده در زمان دوم (t₂); روشنه‌هایی که در زمان اول (۱۳۹۰) ثبت شده ولی در زمان دوم (۱۳۹۹) بسته شدند. E_A: مجموع مساحت روشنه‌های گسترشی در زمان دوم (t₂); به عبارت دیگر این دسته روشنه‌ها نواحی گسترشی هستند که در همسایگی روشنه‌های اولیه ایجاد شده‌اند. RE: مجموع مساحت روشنه‌های کاهش یافته در زمان اول ثبت (۱۳۹۰) ثبت شده ولی در زمان دوم (۱۳۹۹) پر شده‌اند. t: بازه زمانی بین دو مدل (t₂-t₁), A: اندازه کل منطقه مورد مطالعه (مترمربع), N₁: تعداد روشنه‌ها در زمان اول t₁ و N₂: تعداد روشنه‌ها در زمان دوم t₂ می‌باشد.

IA: the total area of new gaps (m²) in the second period (t₂), in other words, related to the year 2020. C_A: the total area of closed gaps in the second time (t₂); The gaps that were registered in the first time (2011) but were closed in the second time (2020). E_A: total area of expansion gaps in the second time (t₂); RE: The total area of reduction gaps was recorded in the first time of registration (2011) but they were filled in the second time (2020). t is the time interval between two aerial photographs (t₂-t₁) [yrs]. A is the total size of the study area [m²]; N₁ is the number of gaps at t₁, whereas N₂ is the total number of gaps at t₂.

هوایی رقومی سال ۱۳۹۰ نشان داد، الگوریتم K نزدیک‌ترین همسایه^۱ با روش شی‌پایه با صحت کلی ۹۶/۰۳ درصد و ضریب کاپا ۰/۹۲ دارای بیش‌ترین دقت نسبت به سایر روش‌های استخراج روشنه بود. با در نظر گرفتن روش‌های استخراج روشنه تصاویر پهپاد سال ۱۳۹۹، الگوریتم ماشین بردار پشتیبان^۲ و کرنل RBF^۳ بیش‌ترین صحت کلی و ضریب کاپا را به ترتیب با مقادیر ۹۹ درصد و ۰/۹۸ درصد را دارا بود (جدول ۳).

به منظور تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها، ابتدا نرمال بودن آن‌ها با استفاده از آزمون کولموگروف-اسمیرنوف در نرم‌افزار آماری SAS 9.4 بررسی شد. در صورت نرمال بودن داده‌ها به منظور آزمون مقایسه میانگین‌ها از آزمون t جفتی استفاده شد.

نتایج

- ارزیابی صحت روش‌های تهیه نقشه روشنه حاصل از تصاویر دوربین هوایی رقومی التراکم و پهپاد: ارزیابی صحت روش استخراج روشنه در تصاویر

- 1- K-nearest neighbor
- 2- Support vector machine
- 3- Radial basis function

جدول ۳- ارزیابی صحت روش‌های تهیه نقشه روشنه حاصل از تصاویر دوربین هوایی رقومی UltraCam-XP و پهپاد.

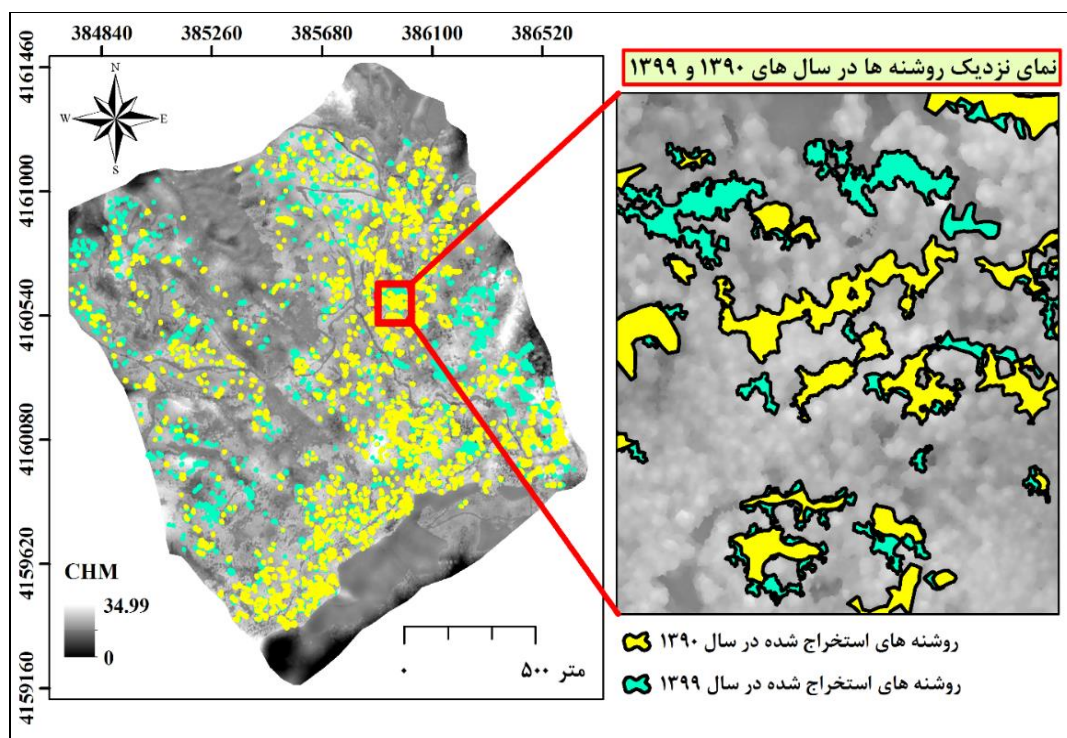
Table 3. Evaluation of the accuracy of gap map preparation methods obtained from UltraCam-XP digital aerial camera and UAV.

تصاویر پهپاد سال ۱۳۹۹		عکس‌های هوایی رقومی سال ۱۳۹۰		روش تهیه نقشه روشنه
UAV 2020		UltraCam-XP 2011		
ضریب کاپا Kappa Coefficient	صحت کلی (درصد) Overall accuracy (%)	ضریب کاپا Kappa Coefficient	صحت کلی (درصد) Overall accuracy (%)	Gap map preparation method
0.84	92.38	0.9	95.03	نزدیک‌ترین همسایه Nearest Neighbor
0.94	97.01	0.85	92.71	جنگل تصادفی Random Forest
0.98	99	0.89	94.70	ماشین بردار پشتیبان Support Vector Machine
0.96	98.34	0.88	94.37	درخت تصمیم‌گیری Decision Tree
0.94	97.35	0.9	95.03	بیز Bayes
0.92	96.35	0.92	96.03	K نزدیک‌ترین همسایه K- Nearest Neighbor

طبقه‌بندی شی‌پایه
Object-based

است. هم‌چنین تراکم روشنه‌ها در واحد سطح در سال ۱۳۹۰ برابر ۴/۸۶ هکتار بوده است که این مقدار در سال ۱۳۹۹ به ۳/۸۲ هکتار کاهش یافته است. هم‌چنین نتایج نشان داد میانگین محیط روشنه‌ها در سال ۱۳۹۰، ۴۵/۸۲ مترمربع و در سال ۱۳۹۹، ۴۳/۱۷ مترمربع کاهش یافته است که اختلاف آن‌ها از نظر آماری معنی‌دار بود (آزمون t جفتی، $P < 0/001$) نسبت میانگین محیط به مساحت روشنه‌ها در بازه زمانی ۹ سال کاهش یافته است که این اختلاف از نظر آماری معنی‌دار بود (آزمون t جفتی، $P < 0/001$).

- ویژگی روشنه‌ها در منطقه مورد مطالعه: در بررسی حاضر در سطح ۲۷۶/۵۹۳ هکتار توده جنگل کاری شده، تعداد ۱۳۴۵ روشنه در سال ۱۳۹۰ از نقشه روشنه حاصل از الگوریتم K نزدیک‌ترین همسایه استخراج شد که این تعداد در سال ۱۳۹۹ به ۱۰۵۸ روشنه کاهش یافت (شکل ۳). میانگین مساحت روشنه‌های تحلیل شده در سال ۱۳۹۰، ۴۶/۷۴ مترمربع در حالی که در سال ۱۳۹۹، ۶۱/۸۶ مترمربع افزایش یافته است؛ که اختلاف آن‌ها از نظر آماری معنی‌دار بود. (آزمون t جفتی، $P < 0/001$) سهم مساحت روشنه‌ها از مساحت کل منطقه از ۲/۲۷ درصد در سال ۱۳۹۰ به ۲/۳۶ درصد در سال ۱۳۹۹ افزایش یافته



شکل ۳- پویایی روشنه در منطقه مورد مطالعه در بازه زمانی ۹ ساله (۱۳۹۷-۱۳۹۰).

Figure 3. Gap dynamics in the studied area in a period of 9 years (2011-2019).

جدول ۴ نشان می‌دهد در منطقه مورد مطالعه در هر دو مقطع زمانی روشنه‌های بسیار کوچک (۳۳/۴۸ درصد در سال ۱۳۹۰ و ۳۰/۷۸ درصد در سال ۱۳۹۹) بیش‌ترین سهم مساحت روشنه‌ها را تشکیل داده‌اند. با گذشت ۹ سال درصد سهم روشنه‌های بسیار کوچک کاهش یافته است. درصد سهم روشنه‌های متوسط در هر دو مقطع زمانی تقریباً یکسان باقی‌مانده است (۳۱/۵۴ درصد در سال ۱۳۹۰ و ۳۱/۶۴ درصد در سال ۱۳۹۹). در مقابل درصد سهم روشنه‌های متوسط و بزرگ در این بازه زمانی افزایش یافته است. میانگین مساحت روشنه‌ها در بازه زمانی ۹ ساله در همه طبقات روشنه افزایش یافته است. هر چند از نظر آماری تنها اختلاف مساحت روشنه‌های بسیار کوچک (کم‌تر از ۵۰ مترمربع) و روشنه‌های متوسط (۳۰۰-۱۵۰ مترمربع) معنی‌دار است (آزمون t جفتی، $P < 0.001$).

- پویایی تعداد و فراوانی طبقات مساحتی روشنه‌ها: نتایج نشان داد با گذشت ۹ سال تعداد روشنه‌های بسیار کوچک (کم‌تر از ۵۰ مترمربع) از ۱۰۰۰ روشنه به ۷۲۰ روشنه، تعداد روشنه‌های کوچک (۱۵۰-۵۰ مترمربع) از ۲۵۱ روشنه به ۲۴۷ و تعداد روشنه‌های متوسط (۳۰۰-۱۵۰ مترمربع) از ۷۰ روشنه به ۶۷ روشنه کاهش یافت. تعداد روشنه‌های بزرگ (بیش‌تر از ۳۰۰ مترمربع) در هر دو مقطع زمانی یکسان باقی‌مانده است (۲۴ روشنه). همچنین نتایج نشان داد در بازه زمانی ۹ ساله فراوانی نسبی روشنه‌های بسیار کوچک از ۷۴/۳۴ درصد به ۶۸/۰۵ درصد کاهش یافت. فراوانی نسبی روشنه‌های کوچک (از ۱۸/۶۶ درصد به ۲۳/۳۴ درصد)، روشنه‌های متوسط (از ۵/۲ درصد به ۶/۳۳ درصد) و روشنه‌های بزرگ (از ۱/۸ درصد به ۲/۲۶ درصد) افزایش یافت (جدول ۴).

جدول ۴- آماره توصیفی روشنه‌ها در ۵ طبقه در سال‌های ۱۳۹۰ و ۱۳۹۹.

Table 4. Descriptive statistics of gap in 5 class in 2011 and 2019.

طبقات روشنه‌ها در سال ۱۳۹۹ Gap size class in 2020				طبقات روشنه‌ها در سال ۱۳۹۰ Gap size class in 2011				ویژگی‌ها Characteristic
>300	150-300	50-150	<50	>300	150-300	50-150	<50	
11485.54	13103.93	20711.37	20149.03	9424.10	12558.75	19832.99	21048.86	مساحت (مترمربع) Total gap area (m ²)
478.56	195.58	83.85	27.98	392.67	179.41	79.01	21.05	میانگین مساحت (مترمربع) Mean gap size (m ²)
193.77	128.06	53.54	26.7	246.98	142.19	70.28	28.11	میانگین محیط (مترمربع) Mean perimeter (m)
24	67	247	720	24	70	251	1000	تعداد روشنه Number of gaps
2.27	6.33	23.34	68.05	1.78	5.2	18.66	74.34	فراوانی نسبی (درصد) Relative Frequency
17.54	20.02	31.64	30.78	14.99	19.97	31.54	33.48	سهم نسبی مساحت (درصد) The relative share of area (percentage)

است که ایجاد می‌شود. بیش‌ترین نرخ کاهش تعداد روشنه، مربوط به طبقه بسیار کوچک (کم‌تر از ۵۰ مترمربع)، با نرخ ۳/۶- درصد در سال بوده است. این نرخ بدین معنی است که تعداد روشنه‌های بسته در سال در این قطعه بیش‌تر از روشنه‌های ایجادشده می‌باشد. روشنه‌های متوسط با نرخ کاهش تعداد روشنه ۰/۴۹- درصد در سال در رده بعدی قرار دارند و سپس روشنه‌های کوچک با نرخ کاهش ۰/۱۸- درصد در سال مشاهده شد. نرخ افزایش لگاریتمی تعداد روشنه‌ها در روشنه‌های بزرگ (صفر) را نشان می‌دهد به این معنی نرخ بسته شدن روشنه‌های بزرگ با نرخ ایجاد روشنه جدید برابر است.

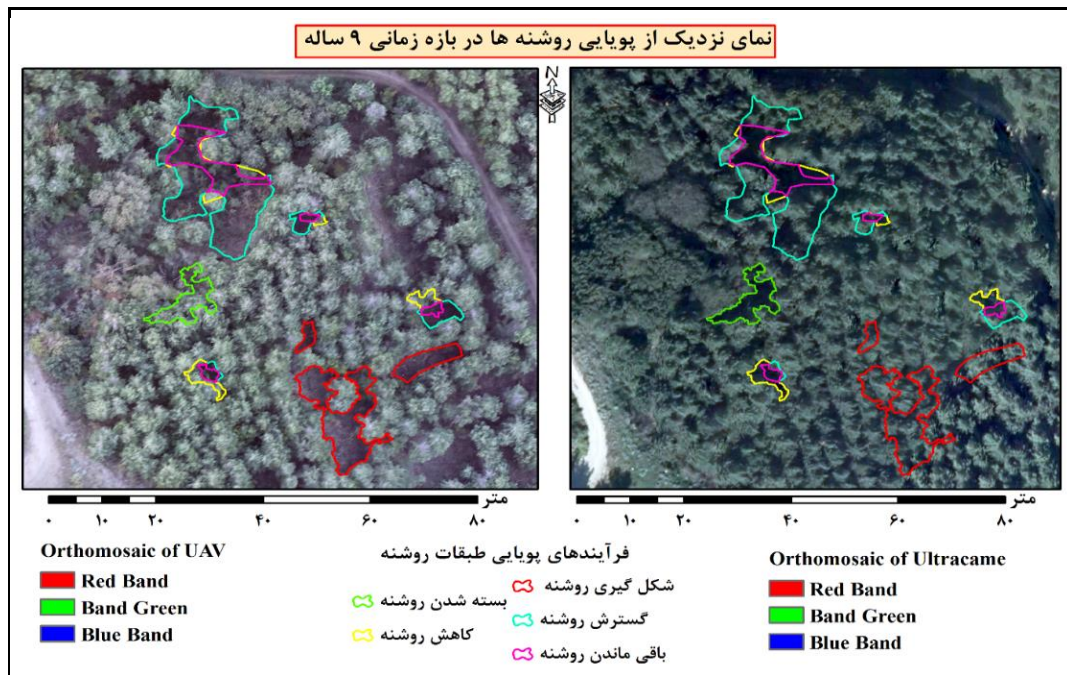
- **فراوندهای پویایی روشنه‌ها:** نتایج مساحت و تعداد روشنه‌های دخیل در انواع مختلف تغییرات روشنه در طول دوره در منطقه مورد مطالعه نشان داد: ۴۷۱ پلی گون روشنه با میانگین ۴۸/۰۳۲ مترمربع در سال ۱۳۹۰ وجود داشتند که در سال ۱۳۹۹ بسته شده‌اند که در مجموع ۲۰/۷۳ درصد مساحت روشنه‌ها را شامل می‌شود. هم‌چنین ۸۶۵ پلی گون روشنه در

- **شاخص‌های پویایی روشنه در منطقه مورد مطالعه:** نتایج نشان داد در بازه زمانی نه ساله بیش‌ترین نرخ تغییرات روشنه‌ها مربوط به نرخ گسترش روشنه‌های اولیه بوده است (۰/۱ درصد در سال). نرخ بسته شدن (۰/۰۹ درصد در سال) با نرخ کاهش روشنه‌های اولیه (۰/۰۸ درصد در سال) تقریباً برابر است. کم‌ترین نرخ تغییرات روشنه‌ها را نرخ شکل‌گیری روشنه (۰/۰۷ درصد در سال) تشکیل داده است. نرخ افزایش لگاریتمی تعداد روشنه‌ها منفی بوده است (۲/۶-) و نشان می‌دهد در منطقه مورد مطالعه، تعداد روشنه‌های بسته‌شده در سال بیش‌تر از تعداد روشنه‌های جدیدی است که تشکیل می‌شود.

- **نرخ افزایش لگاریتمی تعداد روشنه‌ها (GNIR) در طبقات روشنه‌ها:** نرخ افزایش لگاریتمی تعداد روشنه‌ها (GNIR) در همه طبقات روشنه به‌جز طبقه بزرگ (بزرگ‌تر از ۳۰۰ مترمربع) منفی بوده است و نشان می‌دهد در همه طبقات روشنه، تعداد روشنه‌های بسته‌شده در سال بیش‌تر از تعداد روشنه‌های جدیدی

پلی‌گون روشنه جدید به وجود آمد که در سال ۱۳۹۰ وجود نداشتند (روشنه‌ای که در مجاورت روشنه اولیه قرار نداشتند). میانگین مساحت این روشنه‌ها ۱۰۹/۱۴ مترمربع بوده است که ۱۷/۵ درصد مساحت روشنه‌ها را تشکیل می‌دهند. با گذشت ۹ سال ۱۷/۵۸ درصد مساحت اولیه این روشنه‌ها هم‌چنان باقی‌مانده است (شکل ۴).

سال ۱۳۹۰ وجود داشت که در سال ۱۳۹۹ مساحت آن‌ها کاهش یافته است. این روشنه‌ها ۱۹/۲۹ درصد از مساحت روشنه‌ها را تشکیل می‌دهد. در مقابل ۸۷۱ پلی‌گون روشنه با میانگین مساحت ۳۱/۱۹ مترمربع در بازه زمانی ۹ ساله در اثر گسترش روشنه‌های اولیه به‌وجود آمدند که در مجموع سهم ۲۴/۹۰ درصدی از مساحت روشنه‌ها را دارند. در این مدت‌زمان ۱۸۷



شکل ۴- توزیع مکانی فرآیندهای پویایی روشنه در منطقه مورد مطالعه در بازه زمانی ۹ ساله (۱۳۹۹-۱۳۹۰).

Figure 4. Spatial distribution of gap dynamic processes in the studied area in a period of 9 years (2011-2019).

مساحت طبقه کوچک (۱۵۰-۵۰ مترمربع) گسترش روشنه اولیه پدیده غالب است. درحالی‌که در ۲۸/۳۳ درصد مساحت طبقه متوسط (۱۵۰-۳۰۰ مترمربع) پدیده غالب بسته شدن روشنه بوده است و در طبقه بزرگ (بیش‌تر از ۳۰۰ مترمربع) شکل‌گیری روشنه پدیده غالب است (جدول ۵).

نتایج فرآیندهای پویایی طبقات روشنه‌ها به مجموع مساحت اولیه در هر طبقه نشان داد: در طبقه بسیار کوچک (کم‌تر از ۵۰ مترمربع)، بیش‌ترین سهم تغییرات روشنه‌ها مربوط به گسترش روشنه‌های اولیه با ۶۴۳ پلی‌گون روشنه که در مجموع ۳۲/۶۵ درصد مساحت این طبقه را شامل می‌شود. در ۲۲/۴۴ درصد

جدول ۵- فرآیندهای پویایی طبقات روشنه در منطقه مورد مطالعه.

Table 5. Dynamic processes of gap class in the studied area.

نسبت مساحت تغییرات روشنه به مجموع مساحت هر طبقه (درصد) The ratio of the area of gap changes to the total area of each class (percentage)	مجموع مساحت (مترمربع) Total area (m ²)	میانگین سطح (مترمربع) Mean area (m ²)	فراوانی Abundance	فرآیندهای پویایی Dynamic processes	طبقات Class
18.14	6242.72	17.53	356	بسته شدن روشنه Gap closure	>50
23.29	8013.23	12.62	635	کاهش روشنه اولیه Gap reduction	
6.18	2128.30	27.64	77	شکل‌گیری روشنه Gap formation	
32.65	11234.49	17.47	643	گسترش روشنه اولیه Gap expansion	
19.74	6792.41	10.54	644	باقی ماندن روشنه اولیه Gap remained	
17.41	5881.20	73.51	80	بسته شدن روشنه Gap closure	50-150
21.27	7185.54	42.02	171	کاهش روشنه اولیه Gap reduction	
18.85	6366.99	83.77	76	شکل‌گیری روشنه Gap formation	
22.44	7578.12	44.31	171	گسترش روشنه اولیه Gap expansion	
20.03	6766.25	39.57	171	باقی ماندن روشنه اولیه Gap remained	
28.33	6516.08	203.62	32	بسته شدن روشنه Gap closure	150-300
14.68	3375.36	88.82	38	کاهش روشنه اولیه Gap reduction	
24.44	5620.44	193.81	29	شکل‌گیری روشنه Gap formation	
20.94	4816.19	126.74	38	گسترش روشنه اولیه Gap expansion	
11.6	2667.30	70.19	38	باقی ماندن روشنه اولیه Gap remained	
25.57	4617.47	419.77	11	بسته شدن روشنه Gap closure	>300
10.81	1953.72	150.29	13	کاهش روشنه اولیه Gap reduction	
31.33	5656.89	514.26	11	شکل‌گیری روشنه Gap formation	
16.48	2975.72	228.90	13	گسترش روشنه اولیه Gap expansion	
15.8	2852.91	219.45	13	باقی ماندن روشنه اولیه Gap remained	

بحث

شناسایی و تهیه نقشه روشن‌ها: نتایج ارزیابی صحت تصاویر نشان داد در تصاویر دوربین رقومی هوایی، الگوریتم K نزدیک‌ترین همسایه (با صحت کلی ۹۶/۰۳ درصد و ضریب کاپا ۰/۹۲) و الگوریتم ماشین بردار پشتیبان در تصاویر پهپاد (صحت کلی ۹۹ درصد و ضریب کاپا ۰/۹۸) نسبت به سایر الگوریتم‌ها در روش شیء پایه بیش‌ترین دقت در استخراج روشن‌ها داشتند. Xuegang و همکاران (۲۰۲۰) در پژوهش خود در یک جنگل ثانویه طبیعی حداکثر صحت کلی ۹۰ درصد را با استفاده از الگوریتم‌های ماشین بردار پشتیبان، درخت تصمیم‌گیر و بیز در استخراج و شناسایی روشن‌ها به دست آوردند. هم‌چنین به این نتیجه رسیدند که صحت تفکیک روشن‌ها تحت تأثیر مقیاس قطعه‌بندی کننده قرار می‌گیرد؛ که با نتایج به‌دست‌آمده در پژوهش حاضر مطابقت دارد (۵۲).

پویایی روشن‌ها: آشفته‌گی‌های طبیعی ناشی از روشن‌ها نقش مهمی در پویایی جنگل دارند (۵۳). روشن‌های تاج پوشش بر ساختار توده‌های جنگلی و وضعیت زادآوری تأثیر می‌گذارد (۴۳). نقش مهمی در حفظ تنوع گونه‌های درختی دارد (۵۴)؛ بنابراین بررسی وضعیت واقعی روشن‌های تاج پوشش در جنگل برای ارزیابی ساختار پویایی جامعه جنگل بسیار مهم است. به‌منظور بررسی وضعیت واقعی روشن‌های تاج پوشش، معمولاً پارامترهای روشن‌ها مانند مساحت، اندازه و تراکم روشن‌ها و ویژگی‌های روشن‌ها مربوطه در نظر گرفته می‌شود (۵۳). آسیب‌پذیری یک توده جنگلی نسبت به بروز آشفته‌گی‌ها تحت تأثیر مجموعه‌ای از شرایط خاص موجود در هر رویشگاه مانند توپوگرافی، نوع خاک و رژیم‌های رطوبتی قرار دارد. اندازه‌گیری مساحت روشن‌ها ایجاد شده و سهم آن‌ها از مساحت کل جنگل، شاخص مناسبی برای تعیین میزان آسیب‌پذیری توده می‌باشد (۲۲). از طرفی اندازه و

شکل روشن‌ها در طول زمان تغییر می‌کند و پدیده‌های ثابتی نیستند. به‌طوری‌که ممکن است روشن‌ها در اثر رویش عمودی درختان جوان موجود در زیراشکوب و یا رویش افقی تاج درختان مجاور به‌کلی بسته شوند. پویایی روشن‌های تاجی نقش مهمی در تحول جنگل ایفا می‌کند؛ چراکه شدت نور ورودی به کف جنگل با مساحت روشن‌ها ایجاد شده ارتباط مستقیمی دارد (۵۵).

ویژگی روشن‌ها در منطقه مورد مطالعه: نتایج نشان داد در منطقه مورد مطالعه در بازه زمانی نه سال میانگین و مساحت کل روشن‌ها به‌طور معنی‌داری افزایش یافت اگرچه سهم مجموع مساحت روشن‌ها از مساحت کل منطقه مورد مطالعه در این بازه زمانی تغییر چندانی نداشته است (به‌ترتیب سال ۱۳۹۰: ۲/۲۷ و سال ۱۳۹۹: ۲/۳۶)؛ که با نتایج مطالعات Henbo و همکاران (۲۰۰۹)، Kenderes (۲۰۰۴) و همکاران (۲۰۱۴) Blackburn و همکاران (۲۰۱۳) و Rugani که بیان نمودند با گذشت زمان میانگین و مساحت روشن‌ها افزایش می‌یابد مطابقت دارد (۳۳، ۳۴، ۳۵، ۳۸). هم‌چنین نتایج نشان داد در این مدت‌زمان تعداد و تراکم روشن‌ها در هکتار کاهش یافته است؛ که با مطالعه Henbo و همکاران (۲۰۰۴) مطابقت دارد (۳۳). در حالی که Feldmann و همکاران (۲۰۱۸) در بررسی خود فراوانی اندازه و سهم روشن‌ها در یک جنگل دست‌نخورده راش در بازه زمانی ده‌ساله بررسی کردند (۲۵). نتایج نشان داد تراکم روشن‌ها در سال ۲۰۱۳ (۸ روشن‌ها در هکتار) بیش‌تر از تراکم روشن‌ها در سال ۲۰۰۳ (۵/۲ روشن‌ها در هکتار) است. هم‌چنین کاهش معنی‌داری در میانگین سهم روشن‌ها از ۱۳/۶ درصد در سال ۲۰۰۳ به ۸/۲ درصد در سال ۲۰۱۳ مشاهده کردند و آن را نشانه پویایی زمانی بالای سهم روشن‌ها در جنگل دست‌خورده راش دانستند؛ که با نتایج این بررسی مغایرت دارد.

داشتند (۲۵). این نتایج با نتیجه مورد بررسی مطابقت دارد Dobrowolska و همکاران (۲۰۲۲) در مطالعه خود به این نتیجه رسیدند تعداد روشن‌ها با مساحت کم‌تر از ۵۰ مترمربع، کم‌ترین و برابر با ۳۴ بود، تعداد روشن‌ها در طبقه (۱۰۰-۵۰ مترمربع) و طبقه (۳۰۰-۱۰۰ مترمربع) تقریباً برابر بودند (۶۹ و ۶۷ روشن‌ها، به ترتیب) و روشن‌ها با مساحت بیش‌تر از ۱۰۰۰ مترمربع بیش‌ترین تعداد را به خود اختصاص دادند (۸۷ روشن‌ها) (۶۰)؛ که با نتایج این بررسی مغایرت دارد. هم‌چنین نتایج نشان داد در هر دو مقطع زمانی فراوان‌ترین اندازه مربوط به روشن‌های کوچک‌تر از ۵۰ مترمربع بوده است. درحالی‌که روشن‌های بزرگ‌تر از ۳۰۰ مترمربع کم‌ترین فراوانی نسبی را در هر دو مقطع زمانی را شامل می‌شوند؛ که نشان‌دهنده غلبه روشن‌های کوچک در منطقه مورد مطالعه می‌باشد. روشن‌های کوچک بیش‌تر پویایی روشن‌ها را تشکیل می‌دهند و سریع‌تر از روشن‌های بزرگ بسته می‌شوند. Petritan و همکاران (۲۰۱۳) در پژوهش خود ۳۲ هکتار از جنگل‌های کهن‌سال بلوط جنگلی (*Quercus petraea* L.) - راش اروپایی (*Fagus sylvatica*) در جنگل‌های کوهستانی رومانی آماربرداری صد در صد انجام داد. به این نتیجه رسیدند فراوان‌ترین اندازه مربوط به روشن‌های کوچک‌تر از ۱۰۰ مترمربع بوده است که ۶۰ درصد کل روشن‌ها را تشکیل دادند. سپس روشن‌های بین ۱۰۰ تا ۳۰۰ مترمربع ۳۴ درصد و روشن‌های بزرگ‌تر از ۵۰۰ مترمربع تنها ۲ درصد تعداد کل روشن‌ها را شامل شدند. روشن‌های با سطح کم‌تر از ۳۰۰ مترمربع ۷۱ درصد سطح کل روشن‌ها را به خود اختصاص دادند (۸) که با نتایج پژوهش حاضر مطابقت دارد.

- شاخص‌های پویایی روشن‌ها: ساختار تاج جنگل‌ها، ساختاری پویاست که تحت تأثیر فرآیندهای تشکیل

- پویایی تعداد و فراوانی طبقات مساحت روشن‌ها: نتایج نشان داد با گذشت نه سال تعداد و فراوانی نسبی روشن‌ها در طبقه بسیار کوچک (کم‌تر از ۵۰ مترمربع) کاهش یافته است. این روشن‌ها در سال ۱۳۹۰ بیش‌تر در سطح تک‌درخت بوده است که از طریق رویش ثانویه شاخه‌های درختان همسایه یا رویش ارتفاعی نوک تاج درختان در سال ۱۳۹۹ بسته شده‌اند. تعداد و فراوانی روشن‌های کوچک (۵۰-۱۵۰ مترمربع) در هر دو مقطع زمانی تقریباً یکسان باقی‌مانده است. هم‌چنین فراوانی نسبی روشن‌های کوچک‌تر از ۱۵۰ مترمربع در بازه زمانی نه ساله کاهش یافته است. هم‌چنین نتایج نشان داد در هر دو مقطع زمانی ۶۵ درصد روشن‌ها مساحت کم‌تر از ۱۵۰ مترمربع دارند؛ که با نتایج مطالعات مشابه (۱، ۵۶، ۵۷، ۵۸، ۵۹) مطابقت دارد. نتایج مطالعات مختلف بیانگر این مطلب است که درصد سهم روشن‌ها کوچک در جنگل‌ها بیش‌تر از درصد سهم سایر روشن‌ها است. نتایج نشان داد تعداد و فراوانی نسبی روشن‌ها متوسط (۳۰۰-۱۵۰ مترمربع) در بازه زمانی نه سال تقریباً یکسان باقی‌مانده است. درحالی‌که درصد سهم نسبی مساحت روشن‌های متوسط در مدت ۹ سال افزایش یافته است. تعداد روشن‌های بزرگ (بیش‌تر از ۳۰۰ مترمربع) با گذشت نه سال یکسان باقی‌مانده است اما فراوانی نسبی و درصد سهم نسبی مساحت آن‌ها افزایش یافته است. Kathke و همکاران (۲۰۱۰) در بررسی خود در جنگل‌های سوزنی‌برگ به این نتیجه رسید که فراوانی نسبی شکاف‌های بزرگ (کوچک‌تر از ۱۰۰۰ مترمربع) در بازه زمانی ۵۸ ساله به‌طور مداوم کاهش یافت (۲۶)؛ که با نتایج این بررسی مغایرت دارد. Feldmann و همکاران (۲۰۱۸) در پژوهش خود به این نتیجه رسید که روشن‌ها با مساحت کم‌تر از ۱۰۰ مترمربع بیش‌ترین فراوانی را داشتند و تعداد معدودی از روشن‌ها مساحتی بیش‌تر از ۵۰۰ مترمربع

همکاران (۲۰۰۸) در ذخیره‌گاه جنگلی راش در مجارستان در مدت ۳۰ سال به این نتیجه رسید که نرخ تشکیل روشنه (۰/۱۵-۰/۳۴) درصد در سال) و نرخ بسته‌شدن روشنه (۰/۱ تا ۰/۰۷ درصد در سال) است (۲۲). Kenderes و همکاران (۲۰۰۹) در جنگل‌های راش در اروپای مرکزی به این نتیجه رسیدند که نرخ تشکیل روشنه (۰/۰۹-۰/۰۵ درصد در سال) و نرخ بسته‌شدن روشنه (۰/۰۳-۰/۰۱ درصد در سال) می‌باشد (۳۴). Kathke و همکاران (۲۰۱۰) نرخ ایجاد روشنه را در جنگل سوزنی‌برگ در آلمان ۰/۱ درصد در سال و نرخ بسته‌شدن روشنه ۰/۳ درصد در سال گزارش کردند (۲۳). Torimaru و همکاران (۲۰۱۲) در بررسی خود در جنگل‌های معتدل گرم در بازه زمانی ۳۲ ساله نرخ تشکیل روشنه (۰/۹-۰/۳ درصد در سال) و نرخ بسته‌شدن روشنه (۰/۷-۰/۳ درصد در سال)، در جنگل‌های معتدل سرد در بازه زمانی ۴۳ سال نرخ تشکیل روشنه (۰/۴-۳/۱) درصد در سال) و نرخ بسته‌شدن روشنه (۰/۲۸-۰/۵۴) درصد در سال) و در جنگل‌های سوزنی‌برگ در مدت ۴۳ سال نرخ تشکیل روشنه (۰/۶۶-۰/۰۷) درصد در سال) و نرخ بسته‌شدن (۰/۶۴-۲/۴) درصد در سال) گزارش کردند (۶۲). Rugani و همکاران (۲۰۱۳) در ذخیره‌گاه جنگلی راش در جنوب اسلوونی در بازه زمانی (۲۰-۱۱ سال) نرخ تشکیل روشنه‌ها (۰/۲۵-۰/۱۵) درصد در سال) و نرخ بسته شدن را (۰/۱۶-۰/۰۸) درصد در سال) گزارش کردند (۳۸). Blackburn (۲۰۱۴) در جنگل‌های پهن‌برگ نرخ بسته‌شدن روشنه را ۰/۹ درصد در سال و نرخ باز شدن روشنه را ۰/۶ درصد در سال گزارش کرده است (۳۵). Zhu و همکاران (۲۰۱۹) در بررسی خود با استفاده از تصویر ماهواره‌ای با فاصله زمانی ده‌ساله نرخ تشکیل روشنه (۰/۱) درصد در سال) و نرخ بسته‌شدن روشنه (۰/۴-۰/۱) درصد در سال) گزارش

روشنه و بسته‌شدن روشنه قرار دارد و فراوانی فرآیند ایجاد روشنه اثرات چشم‌گیری بر ترکیب گونه‌ای و ساختار آینده جنگل دارد. پویایی روشنه معمولاً در غالب اندازه‌گیری نرخ ایجاد، بسته‌شدن روشنه (۶۱)، افزایش کلی مساحت روشنه در طول دوره ۹ ساله مشاهده شد زیرا پدیده غالب در منطقه گسترش روشنه‌های اولیه با نرخ ۰/۱ درصد در سال بود (در منطقه مورد مطالعه برخی آشفستگی‌ها همانند بادافتادگی‌ها، آفات، بیماری‌ها و ... بر شکل‌گیری و گسترش روشنه‌ها تأثیر دارند) اگرچه نرخ بسته شدن روشنه (۰/۰۹ درصد در سال)، نرخ پر شدن روشنه (۰/۰۸ درصد در سال) تقریباً برابر است. کم‌ترین نرخ تغییرات روشنه‌ها را نرخ شکل‌گیری روشنه (۰/۰۷) درصد در سال) تشکیل داده است؛ که شاخص‌های پویایی روشنه منطقه مورد مطالعه با شاخص‌های گزارش شده برای سایر جنگل‌ها مقایسه شد. به‌طور کلی در اکثر مطالعات انجام شده فقط به بررسی نرخ بسته شدن روشنه و نرخ تشکیل روشنه‌ها پرداخته‌اند. نرخ تشکیل روشنه در مطالعه مورد بررسی در محدوده مطالعات Kenderes و همکاران (۲۰۰۹) و Torimaru و همکاران (۲۰۱۲) و نرخ بسته شدن روشنه تقریباً در محدوده مطالعات Kenderes و همکاران (۲۰۰۸) و Rugani و همکاران (۲۰۱۳) قرار دارد (۲۲، ۳۴، ۳۸، ۶۲). بررسی نتایج مطالعات دیگران نرخ پویایی بالاتری را گزارش می‌کنند. به‌عنوان مثال Henbo و همکاران (۲۰۰۴) در جنگل‌های راش کهن‌سال در بازه زمانی ۴۳ سال نرخ تشکیل روشنه (۰/۳-۱/۳) درصد در سال) و نرخ بسته شدن (۰/۵-۰/۳) درصد در سال) گزارش کردند (۳۳). Henbo و همکاران (۲۰۰۶) در یک قطعه دو هکتاری در جنگل‌های سوزنی‌برگ در بازه زمانی ۴۳ ساله نرخ تشکیل روشنه ۰/۱ درصد و نرخ بسته شدن روشنه را ۰/۴ درصد گزارش کردند (۲۱). Kenderes و

جنگل‌های سوزنی‌برگ که توسط Vepakomma و همکاران (۲۰۱۲) مورد مطالعه قرار گرفت بود (۳۶).
 - **نرخ افزایش لگاریتمی تعداد روشنه‌ها (GNIR)**
 در طبقات روشنه‌ها: بر اساس نتایج به دست آمده نرخ افزایش لگاریتمی تعداد روشنه (GNIR) در بازه زمانی نه ساله برای منطقه مورد مطالعه منفی بوده است (۲/۶-). نشان‌دهنده این است با گذشت نه سال تعداد روشنه‌های بسته شده در هر سال بیش‌تر از روشنه‌های ایجاد شده می‌باشد. هم‌چنین در همه طبقات روشنه به جز طبقه بزرگ (بزرگ‌تر از ۳۰۰ مترمربع) نرخ تعداد کاهش تعداد روشنه مشاهده شد. Kathke و همکاران (۲۰۱۰) در مطالعه خود نرخ افزایش لگاریتمی تعداد روشنه را برای روشنه‌های کوچک‌تر از ۴۰ مترمربع و روشنه‌های بزرگ‌تر از ۴۰ مترمربع در سه بازه زمانی ۱۹۹۱-۱۹۴۵، ۲۰۰۰-۱۹۹۱، ۲۰۰۳-۲۰۰۰ و ۲۰۰۳-۱۹۴۵ محاسبه کرد. نتایج نشان داد در فاصله زمانی ۱۹۹۱-۲۰۰۰ نرخ افزایش لگاریتمی منفی پنج درصد در سال برای روشنه‌های کوچک‌تر از ۴۰ مترمربع و منفی شش درصد در سال برای روشنه‌های بزرگ‌تر از ۴۰ مترمربع محاسبه کرد. بالاترین نرخ افزایش لگاریتمی تعداد روشنه‌ها بین سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۳ مشاهده کرد. این نرخ ۳۰/۱ درصد در سال برای روشنه‌های کوچک‌تر از ۴۰ مربع و ۱۹/۸ درصد در سال برای روشنه‌های بزرگ‌تر از ۴۰ مترمربع مشاهده کرد. در کل دوره مطالعه (۱۹۴۵-۲۰۰۳) نرخ افزایش تعداد روشنه‌ها برای روشنه‌های کوچک‌تر از ۴۰ مترمربع ۳/۹ درصد در سال و برای روشنه‌های بزرگ‌تر از ۴۰ مترمربع یک درصد در سال به دست آوردند. به این نتیجه رسیدند که نرخ افزایش تعداد روشنه‌ها برای روشنه‌های کوچک بیش‌تر از روشنه‌های بزرگ بوده است (۲۳).

کرد (۳۶). بررسی نتایج مطالعات مختلف در جنگل‌های متعدد نشان داد پویایی روشنه در اکوسیستم‌های مختلف متفاوت است. Henbo و همکاران (۲۰۰۴) نرخ تشکیل روشنه را در جنگل راش ۴ برابر نرخ تشکیل روشنه در جنگل نوئل که توسط Kathke و همکاران (۲۰۱۰) بود. Bartemucci و همکاران (۲۰۰۲) نشان داد که نرخ بسته شدن روشنه در جنگل‌های معتدل معمولاً سریع‌تر از جنگل‌های شمالی بود (۳۷)؛ اما نتایج متناقضی توسط Kenderes و همکاران (۲۰۰۹) ارائه شد (۳۴). نرخ تشکیل روشنه و بسته شدن روشنه تحت تأثیر عوامل متعددی است از جمله سن جنگل بر نرخ رشد درختان تأثیر می‌گذارد، نرخ رشد درختان در جنگل‌های مسن‌تر معمولاً کم‌تر از جنگل‌های جوان‌تر است. نوع جنگل، در جنگل‌های پهن‌برگ فرآیند بسته شدن روشنه تا حد زیادی توسط رشد افقی و رشد عمودی درختان کنترل می‌شود در حالی که در جنگل سوزنی‌برگ بسته شدن روشنه اکثراً توسط رشد عمودی کنترل می‌شود (۳۸). تعداد روشنه با افزایش فراوانی طوفان افزایش می‌یابد (۳۱). نرخ‌های مختلف تشکیل و بسته شدن روشنه تابعی از تفاوت در مدت‌زمان دوره‌های مشاهده می‌باشد. Fujita و همکاران (۲۰۰۳) نرخ‌های تشکیل روشنه توسط تجزیه و تحلیل عکس‌های هوایی در بازه زمانی ۵ ساله و ۱۷ ساله مقایسه کردند (۶۳). نرخ تشکیل روشنه در بازه زمانی ۱۷ ساله ۳ برابر بیش‌تر از بازه زمانی ۵ ساله برآورد شد (۳۳). مدت‌زمان بسته شدن روشنه‌های متوسط و بزرگ در جنگل‌های معتدل ثانویه ۴۰-۳۰ سال بود. برای جنگل‌های معتدل کهن‌سال که در آن روشنه‌ها (۲۰۰-۳۰۰ مترمربع) بودند، به ۶۰-۳۰ سال زمان برای بسته شدن نیاز داشتند؛ اما این زمان به‌طور قابل‌توجهی کوتاه‌تر از بازه زمانی ۱۰۰-۵۰ سال برای بسته شدن روشنه‌ها در

در جنگل‌های پهن‌برگ در بازه زمانی ۱۰ ساله به این نتیجه رسیدند ۸۶ درصد مساحت روشنه‌ها، روشنه‌های گسترش‌یافته است که بیش‌ترین سهم تغییرات روشنه را شامل می‌شوند (۳۵)؛ که این نتیجه با نتیجه پژوهش حاضر مطابقت دارد.

نتیجه‌گیری

در منطقه مورد مطالعه با گذشت نه سال تراکم روشنه‌ها از ۴/۸ به ۳/۸۲ روشنه در هکتار کاهش یافته است. هم‌چنین سهم روشنه‌ها از مساحت کل ثابت بوده است. در این بازه زمانی نه ساله، تعداد روشنه‌ها ۲۱/۳ درصد کاهش و سطح کل روشنه ۴/۱۱ درصد افزایش یافته است. این افزایش سطح کل روشنه را می‌توان به افزایش گسترش روشنه‌های اولیه در طول دوره نسبت داد؛ زیرا نرخ گسترش روشنه‌های اولیه بیش‌تر از نرخ تشکیل روشنه، نرخ بسته شدن و کاهش روشنه‌های اولیه است. روشنه‌های بزرگ و پیچیده را می‌توان لکه‌های مزمن در نظر گرفت که به‌موجب آن هنگامی‌که روشنه ایجاد می‌شود، از طریق چرا تداوم می‌یابد و احیاء درخت را محدود می‌کند. باین‌حال نتایج نشان داد که لبه‌های روشنه‌ها نیز مستعد آشفستگی هستند؛ که منجر به از بین رفتن شاخه‌های اصلی یا کل تاج درخت می‌شود. از آن‌جایی‌که هم احیاء (بازسازی) و هم از دست دادن شاخه یا تاج در لبه‌های روشنه اتفاق می‌افتد. شکل روشنه‌ها تغییر می‌کند و هرگونه تغییر در مساحت کل هر روشنه با بزرگی نسبی احیاء درخت و کاهش تاج تعیین می‌شود. چنین تغییراتی می‌تواند به این معنا باشد که به‌طور مؤثر مکان یک روشنه ممکن است در طول زمان حرکت کند و روشنه‌های مجاور ممکن است به هم بپیوندند. نتایج این مطالعه مربوط به حفاظت و مدیریت جنگل‌کاری است؛ زیرا هم بقای طولانی‌مدت گونه‌ها و هم زادآوری درختان در منطقه تحت تأثیر آشفستگی طبیعی شکل می‌گیرد.

- فرآیندهای پویایی روشنه‌ها: نتایج مساحت و تعداد روشنه‌های دخیل در انواع مختلف تغییرات روشنه در طول دوره در منطقه مورد مطالعه نشان داد. ۱۸۷ پلی‌گون روشنه جدید با مساحت ۱۹۰۹۹/۳۲ مترمربع به وجود آمده است که در سرتاسر منطقه توزیع شده‌اند. این روشنه‌ها در مناطقی که با از بین رفتن درختان منفرد و چندتایی مطابقت داشتند، قرار گرفتند. در مقابل تعداد بیش‌تری از روشنه‌ها (۴۷۱) پلی‌گون روشنه با مساحت ۲۲۶۲۳/۳۴ مترمربع) در بازه زمانی نه ساله کاملاً بسته شده‌اند؛ که مساحت روشنه‌های جدید را پوشش می‌دهد. Kenderes و همکاران (۲۰۰۹) و Blackburn (۲۰۱۴) و Vaughn و همکاران (۲۰۱۵) در پژوهش‌های خود به این نتیجه رسیدند که تعداد و مساحت روشنه‌های جدید بیش‌تر از روشنه‌های بسته‌شده بود (۳۴، ۳۵، ۶۴)؛ که با نتایج این مطالعه مغایرت دارد. هم‌چنین نتایج نشان داد ۸۷۱ پلی‌گون روشنه با مساحت ۲۷۱۶۸/۵۹ مترمربع در بازه زمانی ۹ ساله در اثر گسترش روشنه‌های اولیه به‌وجود آمده است و در همین مدت ۸۶۵ پلی‌گون روشنه با مساحت ۲۱۰۵۳/۷۳ مترمربع کاهش یافته است. ۲۴/۹۰ درصد مساحت روشنه‌ها، گسترش یافته است که بیش‌ترین سهم تغییرات روشنه را شامل می‌شود که ناشی از ریشه‌کن شدن درختان و یا از دست دادن شاخه‌های درختان در حاشیه روشنه‌ها می‌باشد. کاهش روشنه‌های اولیه نسبت کم‌تری از مساحت روشنه‌ها را تشکیل می‌دهد. Rugani و همکاران (۲۰۱۳) در مطالعه خود به این نتیجه رسیدند ۱۵ روشنه با مساحت ۱۴۹۸ مترمربع در بازه زمانی ۱۱ ساله در اثر گسترش روشنه‌های اولیه به وجود آمده است و در همین مدت ۱۱ روشنه با مساحت ۵۷۹ مترمربع کاهش یافته است. چنین نتیجه‌گیری کردند که کاهش روشنه‌های اولیه نسبت کم‌تری از مساحت روشنه‌ها را تشکیل می‌دهد (۳۸)؛ که با نتایج این مطالعه مطابقت دارد. Blackburn (۲۰۱۴) در پژوهش مطالعه خود

منابع

- Amiri, M., Rahmani, R., & Sagheb-Talebi, Kh. (2015). Canopy gaps characteristics and structural dynamics in a natural unmanaged oriental beech (*Fagus orientalis* Lipsky) stand in the north of Iran. *Caspian J. of Environmental Sciences*. 13(3), 259-264. [In Persian]
- Khodaverdi, S., Amiri, M., Kartoolinejad, D., & Mohammadi, J. (2018). Characteristics of canopy gap in a broad-leaved mixed forest (Case study: District No. 2, Shast-Kalateh Forest, Golestan province). *Iranian J. of Forest and Poplar Research*. 26(1), 24-35. [In Persian]
- Orman, O., Dobrowolska, D., & Szwagrzyk, J. (2018). Gap regeneration patterns in Carpathian old-growth mixed beech forests – Interactive effects of the spruce bark beetle canopy disturbance and deer herbivory. *Forest Ecology and Management*. 430, 451-459.
- Sefidi, K., & Marvi-Mohajer, M.R. (2010). Characteristics of coarse woody debris in successional stages of natural beech (*Fagus orientalis* Lipsky) forests of Northern Iran. *J. of Forest Science*. 56(1), 7-17. [In Persian]
- Musco, A., Bagnato, S., Sidari, M., & Mercurio, R. (2014). A review of the roles of forest canopy gaps. *J. of Forestry Research*. 25, 725-736. <https://doi.org/10.1007/s11676-014-0521-7>.
- Goodbody, T. R. H. H., Tompalski, P., Coops, N. C., White, J. C., Wulder, M. A., & Sanelli, M. (2020). Uncovering spatial and ecological variability in gap size frequency distributions in the Canadian boreal forest. *Scientific Reports*. 10(1), 1-12. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-62878-z>.
- Yao, A. W., Chiang, J. M., Mcewan, R., & Lin, T. C. (2015). The effect of typhoon-related defoliation on the ecology of gap dynamics in a subtropical rain forest of Taiwan. *J. of Vegetation Science*, 26(1), 145-154. <https://doi.org/10.1111/jvs.12217>.
- Petritan, A. M., Nuske, R. S., Petritan, I. C., & Tudose, N. C. (2013). Gap disturbance patterns in an old-growth sessile oak (*Quercus petraea* L.) European beech (*Fagus sylvatica* L.) forest remnant in the Carpathian Mountains, Romania. *Forest Ecology and Management*. 308, 67-75.
- Abdollahnejad, A., Panagiotidis, D., & Surový, P. (2017). Forest canopy density assessment using different approaches - Review. *J. of Forest Science*. 63(3), 107-116. <https://doi.org/10.17221/110/2016-JFS>.
- Nuske, R. S. (2019). *Acquisition and Characterization of Canopy Gap Patterns of Beech Forests*. (Doctoral dissertation, Georg-August-Universität Göttingen).
- Hopkinson, C., Chasmer, L., Barr, A. G., Kljun, N., Black, T. A., & McCaughey, J. H. M. (2016). Monitoring boreal forest biomass and carbon storage change by integrating airborne laser scanning, biometry and eddy covariance data. *Remote Sensing of Environment*, 181, 82-95. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.04.010>.
- Valbuena, R., Maltamo, M., Mehtälö, L., & Packalen, P. (2017). Key structural features of boreal forests may be detected directly using L-moments from airborne lidar data. *Remote Sensing of Environment*, 194, 437-446. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.10.024>.
- Perroy, L. Y., Sullivan, T., & Stephenson, N. (2017). Assessing the impact of canopy openness and flight parameters on detecting a sub-canopy tropical invasive plant using a small unmanned aerial system. *ISPRS J. of Photogrammetry and Remote Sensing*. 125, 174-183.
- Tang, L., & Shao, G. (2015). Drone remote sensing for forestry research and practices. *J. of Forestry Research*, 26, 791-797.
- Zhang, Ch., & Kovacs, J. M. (2012). The application of small unmanned aerial systems for precision agriculture: a review. *Precision Agriculture*. 13, 693-712. DOI: 10.1007/s11119-012-9274-5.
- Torresan, C., Berton, A., Carotenuto, F., Di Gennaro, S. F., Gioli, B., Matese, A.,

- Miglietta, F., Vagnoli, C., Zaldei, A. & Wallace, L. (2017). Forestry applications of UAVs in Europe: a review. *International J. of Remote Sensing*. 38(8-10), 2427-2447.
17. Mlambo, R., Woodhouse, H. I., Gerard, F., & Anderson, K. (2017). Structure from Motion (SfM) photogrammetry with drone data: A low-cost method for monitoring greenhouse gas emissions from forests in developing countries. *Forests*. 8(68), 1-20.
 18. Hunt, E. R., Hively, W. D., Daughtry, C. S., McCarty, G. W., Fujikawa, S. J., Ng, T. L., Tranchitella, M., Linden, D. S., & Yoel, D. W. (2008). Remote sensing of crop leaf area index using unmanned airborne vehicles. *In Proceedings of the Pecora*. 17, (18-20).
 19. Amini, Sh., Shataee Jouibary, Sh., Moayeri, M. H., & Rahmani, R. (2021). Canopy gap delineation using UAV data in a Hyrcanian forest (Case study: Shastklateh Forest). *Iranian J. of Forest*. 14(2), 135-154. [In Persian]
 20. Tanaka, H., & Nakashizuka, T. (1997). Fifteen years of canopy gap dynamics analyzed by aerial photographs in a temperate deciduous forest, Japan. *Ecology*. 78(2), 612-620.
 21. Henbo, Y., Itaya, A., Nishimura, N., & Yamamoto, S. I. (2006). Long-term canopy dynamics analyzed by aerial photographs and digital elevation data in a subalpine old-growth coniferous forest. *Ecoscience*, 13(4), 451-458.
 22. Kenderes, K., Mihok, B., & Standovar, T. 2008. Thirty years of gap dynamics in a central European beech forest reserve. *Forestry*. 81(1), 111-123. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpn001>.
 23. Kathke, S., & Bruelheide, H. (2010). Gap dynamics in a near-natural spruce forest at Mt. Brocken, Germany. *Forest Ecology and Management*. 259(3), 624-632. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(00\)00284-X](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(00)00284-X)
 24. Sefidi, K., Mohadjer, M. R., & Mosandl, R. (2011). Canopy gaps and regeneration in old-growth oriental beech (*Fagus orientalis*, Lipsky) stands, northern Iran. *Forest Ecology and Management*, 262(6), 1094-1099, <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2011.06.008>.
 25. Feldmann, E., Dröbber, L., Hauck, M., Kucbel, S., Pichler, V., & Leuschner, C. (2018). Canopy gap dynamics and tree understory release in a virgin beech forest, Slovakian Carpathians. *Forest Ecology and Management*. 415, 38-46.
 26. Khodaverdi, S., Amiri, M., Kartoolinejad, D., & Mohammadi, J. (2019). Canopy gaps characteristics of pure and mixed stands in the Hyrcanian forests of northern Iran. *Annals of Silvicultural Research*. 43(2), 62-70. <https://doi.org/10.12899/asr-1882>.
 27. Akbari Mazdi, R., Mataji, A., & Fallah, A. (2021). Canopy gap dynamics, disturbances, and natural regeneration patterns in a Beech-dominated Hyrcanian old-growth forest. *Baltic Forestry*. 27(1), 535. <https://doi.org/10.46490/bf535>.
 28. Vepakomma, U., Kneeshaw, D., & Fortin, M. J. (2012). Spatial contiguity and continuity of canopy gaps in mixed wood boreal forests: persistence, expansion, shrinkage, and displacement. *Journal of Ecology*. 100(5), 1257-1268. <https://doi.org/10.2307/23257547>.
 29. Littell, J. S., Peterson, D. L., & Tjoelker, M. (2008). Douglas-fir growth in mountain ecosystems: water limits tree growth from stand to region. *Ecological Monographs*. 78(3), 349-368. <https://doi.org/10.1890/07-0712.1>.
 30. Gray, A. N., Spies, T. A., & Pabst, R. J. (2012). Canopy gaps affect long-term patterns of tree growth and mortality in mature and old-growth forests in the Pacific Northwest. *Forest Ecology and Management*. 281, 111-120. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.06.035>.
 31. Diaci, J., Adamic, T., & Rozman, A. (2012). Gap recruitment and partitioning in an old-growth beech forest of the Dinaric Mountains: influences of the light regime, herb competition, and browsing. *Forest Ecology and Management*. 285, 20-28. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.08.010>.

32. Zhu, C., Zhu, J., Zheng, X., Lu, D., & Li, X. (2017). Comparison of gap formation and distribution pattern induced by wind/snowstorm and flood in a temperate secondary forest ecosystem, Northeast China. *Silva Fennica*. 51(5). <https://doi.org/10.14214/sf.7693>.
33. Henbo, Y., Itaya, A., & Nishimura, N. (2004). Long-term canopy dynamics in a large area of temperate old-growth beech (*Fagus crenata*) forest: analysis by aerial photographs and digital elevation models. *Journal of Ecology*. 92(6), 945-953. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2745.2004.00932.x>.
34. Kenderes, K., Král, K., Vrška, T., & Standovár, T. (2009). Natural gap dynamics in a Central European mixed beech-spruce-fir old-growth forest. *Ecoscience*. 16 (1), 39-47.
35. Blackburn, G. A. (2014). Forest disturbance and regeneration: a mosaic of discrete gap dynamics and open matrix regimes? *Journal of Vegetation Science*. 25(6), 1341-1354. <https://doi.org/10.1111/jvs.12201>.
36. Zhu, C., Zhu, J., Wang, G., Zheng, X., Lu, D., & Gao, T. (2019). Dynamics of gaps and large openings in a secondary forest of Northeast China over 50 years. *Annals of Forest Science*. 76(72), <https://doi.org/10.1007/s13595-019-0844-9>.
37. Bartemucci, P., Coates, K. D., Harper, K. A., & Wright, E. F. (2002). Gap disturbances in northern old-growth forests of British Columbia, Canada. *J. of Vegetation Science*. 13(5), 685-696. <https://doi.org/10.1111/j.1654-1103.2002.tb02096>.
38. Rugani, T., Diaci, J., & Hladnik, D. (2013). Gap dynamics and structure of two old-growth beech forest remnants in Slovenia. *PLoS ONE*. 8(1), e52641. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0052641>.
39. Sadeghzadeh, H., & Rostaghi, A. (2011). A Study of Vegetative Yield of Borussia Pine (Case Study: Arab-Dagh Forestry Project). *Iranian J. of Forest*. 3, 201-212. [In Persian]
40. Baatz, M., & Schape, A. (1999). Object-oriented and multi-scale image analysis in the semantic network. in *Proc. of 2nd Int. symposium on operationalization of remote sensing. Enschede, ITC*. 148-157.
41. Naseri, M. H., Shataee Jouibary, Sh., & Habashi, H. (2023). Analysis of forest tree dieback using UltraCam and UAV imagery. *Scandinavian J. of Forest Research*.
42. Naseri, M. H., Shataee Jouibary, Sh., & Habashi, H. (2023). Zoning of tree crown leaf burn using UAV and Sentinel 2 images in Deland Forest Park, Golestan province. *J. of Wood and Forest Science and Technology*. 29 (4), 75-92.
43. Runkle, J. R. (1981). Patterns of disturbance in some old-growth mesic forests of Eastern North America. *Ecology*. 63(5), 1533-1546.
44. Brokaw, N. V., & Scheiner, S. M. (1982). Species composition in gaps and structure of a tropical forest. *Ecology*, 538-541.
45. Bonnet, S., Gaulton, R., Lehaire, F., & Lejeune, P. (2015). Canopy gap mapping from airborne laser scanning: An assessment of the positional and geometrical accuracy. *Remote Sensing*. 7(9), 11267-11294. <https://doi.org/10.3390/rs70911267>.
46. Koukoulas, S., & Blackburn, G.A. (2004). Quantifying the spatial properties of forest canopy gaps using LiDAR imagery and GIS. *International J. Remote Sensing*. 25(15), 3049-3072. <https://doi.org/10.1080/014311603100016>.
47. Gaulton, R., & Malthus, T.J. (2010). LiDAR mapping of canopy gaps in continuous cover forests: A comparison of canopy height model and point cloud-based techniques. *International J of Remote Sensing*. 31(5), 1193-1211. <https://doi.org/10.1080/01431160903380565>.
48. Kuchel, S., Jaloviar, P., Saniga, M., Vencurik, J., & Klimaš, V. (2010). Canopy gaps in an old-growth fir-beech forest remnant of Western Carpathians. *European J. of Forest Research*. 129(3), 249-259. <https://doi.org/10.1007/s10342-009-0322-2>.

49. White, J. C., Tompalski, P., Coops, N. C., & Wulder, M. A. (2018). Comparison of airborne laser scanning and digital stereo imagery for characterizing forest canopy gaps in coastal temperate rainforests. *Remote Sensing of Environment*. 208, 1-14.
50. Vaughn, N. R., Asner, G. P., & Giardina, C. P. (2015). Long-term fragmentation effects on the distribution and dynamics of canopy gaps in a tropical montane forest. *Ecosphere*. 6(12), 1-15.
51. Senécal, J. F., Doyon, F., & Messier, C. (2018). Tree death not resulting in gap creation: an investigation of canopy dynamics of northern temperate deciduous forests. *Remote Sensing*. 10(1), 121.
52. Xuegang, M., Liang, Z., & Fan, W. (2020). Object-oriented automatic identification of forest gaps using digital orthophoto maps and LiDAR data. *Canadian J. of Remote Sensing*, 46(2), 177-192. [https://doi.org/ 10.1080/07038992.2020.1768515](https://doi.org/10.1080/07038992.2020.1768515).
53. Schliemann, S. A., & Bockheim, J. G. (2011). Methods of studying treefall gaps: a review. *Forest Ecology and Management*. 261(7), 1143-1151.
54. Manabe, T., Shimatani, K., Kawarasaki, S., Aikawa, S. I., & Yamamoto, S. I. (2009). The patch mosaic of an old-growth warm-temperate forest: patch level descriptions of 40-year gap-forming processes and community structures. *Ecological research*. 24(3), 575-586. [https://doi.org/ 10.1007/s11284-008-0528-7](https://doi.org/10.1007/s11284-008-0528-7).
55. Stiers, M., Willim, K., Seidel, D., Ammer, C., Kabal, M., Stillhard, J., & Annighöfer, P. (2019). Analyzing spatial distribution patterns of European beech (*Fagus sylvatica* L.) regeneration in dependence of canopy openings. *Forests*. 10(8). [https://doi.org/ 10.3390/f10080637](https://doi.org/10.3390/f10080637).
56. Liu, QH., & Hytteborn, H. (1991). Gap structure, disturbance, and regeneration in a primeval *Picea-abies* forest. *J. of Vegetation Science*. 2(3), 391-402. <https://doi.org/10.2307/3235932>.
57. Caron, M. N., Kneeshaw, D. D., De Grandpré, L., Kauhanen, H., & Kuuluvainen, T. (2009). Canopy gap characteristics and disturbance dynamics in old-growth *Picea abies* stands in northern Fennoscandia: Is the forest in quasi-equilibrium? In *Annales Botanici Fennici*. 46(4), 251-262.
58. Kian, S., Kouchaksaraei, M. T., Esmailzadeh, O., & Alavi, S. J. (2017). Gap characteristics and disturbance regime in an intact Hyrcanian oriental beech forest, Iran. *Austrian Journal of Forest Science*. 2017(4), 323-345.
59. Bi, S., Tan, Y., Wang, Y., Liu, M., & Mao, X. (2020). Quantification of spatial structure characteristics of typical natural secondary forest gaps in Northeastern China. *Research Square*. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-38728/v1>.
60. Dobrowolska, D., Piasecka, Z., Kuberski, L., & Stereńczak, K. (2022). Canopy gap characteristics and regeneration patterns in the Białowieża forest based on remote sensing data and field measurements. *Forest Ecology and Management*. 511, 120123.
61. Vepakomma, U., St-Onge, B., & Kneeshaw, D. (2011). Response of a boreal forest to canopy opening: assessing vertical and lateral tree growth with multi-temporal lidar data. *Ecological Applications*. 21(1), 99-121.
62. Torimaru, T., Itaya, A., & Yamamoto, S. I. (2012). Quantification of repeated gap formation events and their spatial patterns in three types of old-growth forests: Analysis of long-term canopy dynamics using aerial photographs and digital surface models. *Forest Ecology and Management*. 284, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.07.044>.
63. Fujita, T., Itaya, A., Miura, M., Manabe, T., & Yamamoto, S.I. (2003). Long-term canopy dynamics analyzed by aerial photographs in a temperate old-growth evergreen broad-leaved forest. *J. of Ecology*. 91(4), 686-693. [https://doi.org/ 10.1046/j.1365-2745.2003.00796.x](https://doi.org/10.1046/j.1365-2745.2003.00796.x).
64. Vaughn, N. R., Asner, G. P., & Giardina, C. P. (2015). Long-term fragmentation effects on the distribution and dynamics of canopy gaps in a tropical montane forest. *Ecosphere*. 6(12), 1-15. <https://doi.org/10.1890/ES15-00235.1>.