Journal of Wood and Forest Science and Technology

Print ISSN: 2322-2077
Online ISSN: 2322-2786

Ecological response to surface fire: Insights from four plant communities in the eastern foothills of the little Ararat mountains

Saeid Amini[1], Ali Soltani[*2], Mojgan Abbasi[3]

1. Ph.D. Student of Forest Management, Dept. of Forest Sciences, Faculty of Natural Resources and Earth Science, Shahrekord University, Shahrekord, I. R. Iran. E-mail: saeed.amini146@gmail.com
2. Corresponding Author, Associate Prof., Dept. of Forest Sciences, Faculty of Natural Resources and Earth Science, Shahrekord University, Shahrekord, I. R. Iran. E-mail: ali.soltani@sku.ac.ir
3. Associate Prof., Dept. of Forest Sciences, Faculty of Natural Resources and Earth Science, Shahrekord University, Shahrekord, I. R. Iran. E-mail: mozhgan.abbasi@sku.ac.ir

Article Info

Article type:
Full Length Research Paper

Article history:
Received: 06.18.2024
Revised: 08.02.2024
Accepted: 08.03.2024

Keywords:
Ecological resilience,
Ecological resistance,
Grazing,
Semi-arid ecosystems,
Vegetation dynamics

ABSTRACT

Background and Objectives: Surface fires in Iran's natural landscapes are predominantly driven by anthropogenic activities, often deliberately set, and commonly occur either preceding the rainy season or amidst periods of intense heat. These fires are principally conducted to diminish ground-level biomass and modify land utilization practices. The reaction to surface fires diverges among various ecosystems. This study contributes to the ecological resistance and resilience of four distinct plant communities-encompassing shrublands and forests-positioned across an elevation spectrum. Moreover, the study elucidates the impact of grazing-induced stress on the fire response within these communities, offering valuable insights into the intricate interplay between human activities, ecological dynamics, and fire behavior in these environments.

Materials and Methods: This study, conducted from 2009 to 2022 in the eastern foothills of the Little Ararat Mountains, focused on four plant communities - *Calligonum crinitum*, *Rhamnus pallasii*, *Prunus lycioides*, and *Juniperus excelsa* - distributed along an elevation gradient ranging from 800 to 1900 m. Each plant community was divided into grazed and protected areas, within which one or two fire events had occurred. Ecological resistance and resilience were quantified by comparing vegetation cover before and after fire events, as well as the rate of recovery in subsequent years. A general linear model assessed the effects of community type, disturbances (fire and grazing), and fire frequency, while Principal Component Analysis (PCA) examined relationships between vegetation cover, resistance, resilience, and precipitation.

Results: The *Calligonum* community demonstrated the lowest ecological resistance but the highest resilience compared to the other communities. Elevation variations resulted in distinct gradients in both resistance and resilience indices. Notably, the *Juniperus* community exhibited a significant decline in resistance after an initial elevation-related increase. The protective status of the land did not notably impact differences in ecological resistance across communities. However, protection played a pivotal role in resilience, with protected areas generally displaying higher resilience levels than unprotected ones, except in the *Rhamnus* community. Fire frequency effects on resistance and resilience varied among communities: resistance decreased after the second fire in the *Juniperus*

and *Prunus* communities, while other communities showed no significant changes. Regarding resilience, a marked decline was observed in the *Rhamnus* and *Prunus* communities after the second fire, whereas the *Calligonum* and *Juniperus* communities maintained consistent resilience levels. Spatial distribution mapping of fire-affected samples revealed an overall lack of ecological stability in the study area, with most samples-excluding a few from the *Prunus* and, to some extent, *Juniperus* communities-not fully recovering to their initial conditions. PCA results highlighted a strong positive correlation between *Calligonum* samples and the resilience index. Differentiation among the *Juniperus* and *Rhamnus* communities was primarily driven by their associations with resistance and cover vectors, respectively. *Prunus* community samples exhibited characteristics intermediate between the cover and ecological resistance vectors in the ordination space.

Conclusion: In enhancing the resilience of ecological communities, practices like limiting or excluding grazing activities can typically enhance stability. However, developing an effective surface fire management plan necessitates an understanding of the diverse fire response dynamics observed across distinct elevation and vegetation profiles. The *Prunus* (wild almond) community emerged as a standout in terms of overall sustainability, showcasing commendable levels of resistance and resilience. This emphasizes its aptness for environments prone to fires. Nevertheless, recurrent surface fires can markedly compromise both the resistance and resilience of a community over time, underscoring the critical need for meticulous and strategic fire management approaches.

Cite this article: Amini, Saeid, Soltani, Ali, Abbasi, Mojgan. 2024. Ecological response to surface fire: Insights from four plant communities in the eastern foothills of the little Ararat mountains. *Journal of Wood and Forest Science and Technology*, 31 (2), 49-69.

© The Author(s).
DOI: 10.22069/JWFST.2024.22551.2066
Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

نشریه پژوهش‌های علوم و فناوری چوب و جنگل

شاپا چاپی: ۲۳۲۲-۲۰۷۷
شاپا آنلاین: ۲۳۲۲-۲۷۸۶

واکنش اکولوژیک به آتش‌سوزی سطحی در چهار جامعه گیاهی در دامنه‌های شرقی کوه آرارات کوچک

سعید امینی[۱]، علی سلطانی*[۲]، مژگان عباسی[۳]

۱. دانشجوی دکتری مدیریت جنگل، گروه علوم جنگل، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران. رایانامه: saeed.amini146@gmail.com

۲. نویسنده مسئول، دانشیار گروه علوم جنگل، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران. رایانامه: ali.soltani@sku.ac.ir

۳. دانشیار گروه علوم جنگل، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران. رایانامه: mozhgan.abbasi@sku.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
مقاله کامل علمی- پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۳/۲۹
تاریخ ویرایش: ۱۴۰۳/۰۵/۱۲
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۵/۱۳

واژه‌های کلیدی:
بوم‌سازگان‌های نیمه‌خشک،
پویایی پوشش گیاهی،
تاب‌آوری اکولوژیک،
چرای دام،
مقاومت اکولوژیک

چکیده

سابقه و هدف: بیش‌تر آتش‌سوزی‌های سطحی در مناطق طبیعی ایران، در اثر عوامل انسانی و عمدی و اغلب قبل از فصل بارندگی و یا در اوج گرما با هدف کاهش زی‌توده روی زمینی و تغییر کاربری زمین شعله‌ور می‌شوند. بوم‌سازگان‌های مختلف واکنش‌های متفاوتی را به آتش‌سوزی‌های سطحی نشان می‌دهند. پژوهش حاضر به بررسی مقاومت و تاب‌آوری اکولوژیکی در مقابل آتش سطحی در چهار جامعه گیاهی درختچه‌زار و جنگلی که در امتداد یک گرادیان ارتفاعی قرار گرفته‌اند، می‌پردازد. به‌علاوه، این نتایج مطالعه به درک این‌که چگونه تنش چرا بر پاسخ به آتش در این جوامع اثر می‌گذارد، کمک می‌کند.

مواد و روش‌ها: این مطالعه که از سال ۲۰۰۹ تا ۲۰۲۲ در شرق دامنه‌های کوه‌های آرارات کوچک انجام شد، بر روی چهار جامعه گیاهی متمرکز بود: اسکنبیل (*Calligonum crinitum*)، تنگرس (*Rhamnus pallasii*)، بادام کوهی (*Prunus lycioides*) و ارس (*Juniperus excelsa*) که در امتداد شیب ارتفاعی از ۸۰۰ تا ۱۹۰۰ متر قرار داشتند. هر جامعه به مناطق چرا و محافظت‌شده تقسیم شد و یک یا دو رویداد آتش‌سوزی در آن‌ها به وقوع پیوسته بود. مقاومت و تاب‌آوری اکولوژیک با مقایسه پوشش گیاهی قبل و بعد از آتش‌سوزی و میزان بازیابی در سال‌های بعدی کمی‌سازی شد. یک مدل خطی کلی آثار جامعه، اختلالات (آتش و چرا) و فراوانی آتش‌سوزی را ارزیابی کرد، درحالی‌که تجزیه به مؤلفه‌های اصلی (PCA) روابط بین پوشش گیاهی، مقاومت، تاب‌آوری و بارش را تحلیل کرد.

یافته‌ها: جامعه اسکنبیل کم‌ترین میزان مقاومت و بالاترین میزان تاب‌آوری را نسبت به سایر مناطق مورد مطالعه نشان داد. تغییر ارتفاع از سطح دریا منجر به شیب متفاوتی در شاخص‌های مقاومت و تاب‌آوری اکولوژیک شد. با در نظرگیری شاخص مقاومت، جامعه ارس به‌طور معنی‌داری در انتهای یک شیب کاهشی قرار گرفت. وضعیت حفاظتی اراضی تأثیر قابل‌توجهی بر تفاوت‌های مقاومت اکولوژیکی بین جوامع مختلف نداشت. بااین‌حال، به‌جز جامعه تنگرس، حفاظت از اراضی نقش کلیدی در تعیین سطوح تاب‌آوری ایفا کرد. مناطق حفاظت‌شده به‌طورکلی تاب‌آوری بیش‌تری نسبت به مناطق غیرحفاظت‌شده نشان دادند. تکرار آتش تأثیرات متفاوتی بر شاخص‌های مقاومت و تاب‌آوری داشت: تنها در جوامع ارس و بادام کوهی پس از آتش دوم مقاومت کاهش یافت، اما مقاومت اکولوژیکی در تکرار آتش در جوامع دیگر تفاوت چشمگیری نداشت. از نظر تاب‌آوری، کاهش قابل‌توجهی در جوامع تنگرس و بادام کوهی پس از آتش دوم مشاهده شد، درحالی‌که دو جامعه دیگر در این خصوص یکسان عمل کردند. نقشه توزیع فضایی نمونه‌های متأثر از آتش‌سوزی نشان می‌دهد که به‌طورکلی پایداری اکولوژیکی در منطقه مورد مطالعه وجود ندارد. به‌جز چند نمونه از جوامع بادام وحشی و تا حدی ارس، اکثر نقاط از بازگشت کامل به شرایط اولیه فاصله زیادی داشتند. در تحلیل PCA، تمامی نمونه‌های اسکنبیل همگرایی بالایی با شاخص تاب‌آوری نشان دادند. نقاط مربوط به جوامع ارس و تنگرس به ترتیب توسط بردارهای شاخص‌های مقاومت و پوشش از یکدیگر متمایز شدند. نمونه‌های جامعه بادام وحشی نیز در ناحیه قرارگرفته بین بردارهای پوشش و مقاومت اکولوژیک جای گرفتند.

نتیجه‌گیری: اگرچه روش‌های افزایش ظرفیت تاب‌آوری مانند محدود کردن و حذف دام می‌تواند پایداری را در اکثر جوامع افزایش دهد، اما یک استراتژی جامع مدیریت آتش‌سوزی سطحی که الگوهای مختلف پاسخ به آتش را در امتداد این گرادیان ارتفاع/پوشش گیاهی در نظر بگیرد، ضروری است. جامعه بادام کوهی بالاترین پایداری کلی (مجموع مقاومت و تاب‌آوری) را نشان داد، که نشان‌دهنده مناسب بودن این‌گونه برای محیط‌های در معرض آتش است. تکرار آتش‌های سطحی می‌تواند در طولانی‌مدت به مقاومت و تاب‌آوری جوامع به‌شدت آسیب بزند، که تأکید بر نیاز به مدیریت دقیق آتش دارد.

استناد: امینی، سعید، سلطانی، علی، عباسی، مژگان (۱۴۰۳). واکنش اکولوژیک به آتش‌سوزی سطحی در چهار جامعه گیاهی در دامنه‌های شرقی کوه آرارات کوچک. *نشریه پژوهش‌های علوم و فناوری چوب و جنگل*، ۳۱ (۲)، ۶۹-۴۹.
DOI: 10.22069/JWFST.2024.22551.2066

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان
© نویسندگان.

مقدمه

هرچند آتش‌سوزی گاهی به‌عنوان عامل تسریع‌کننده چرخه‌های غذایی در بوم‌سازگان‌های زمینی معرفی می‌شود و حتی برای پویایی برخی از بوم‌سازگان‌ها لازم دانسته شده است، ولی این پدیده در وهله اول یک آشفتگی محیط زیستی عمده، به‌خصوص در مناطق خشک و نیمه‌خشک است که اغلب باعث از دست رفتن پوشش گیاهی و اختلال در ثبات بوم‌سازگان می‌شود (۱). رایج‌ترین آتش‌سوزی‌ها در جنگل‌های ایران از نوع سطحی هستند که ابتدا پوشش گیاهی اغلب یک‌ساله غیرچوبی و بوته‌ها را می‌سوزانند و در مرحله بعد به آتش‌های از انواع دیگر (مثلاً تاجی و تنه‌ای) تبدیل‌شده، به درختچه‌ها و درختان صدمه زده و یا آن‌ها را کاملاً نابود می‌سازند (۲). در جنگل‌های زاگرس معدود گزارش‌ها نشان داده‌اند که آتش‌ها (اغلب سطحی) سبب پویایی بیش‌تر و بهبود شاخص‌های توده‌های جنگلی شده‌اند (۳)، از طرف دیگر آثار منفی گسترده بر توده (٤)، بانک بذر (۵) و خاک سطحی (٦) در این جنگل‌ها در ارتباط با آتش‌سوزی‌ها گزارش شده است. بخش اعظم آتش‌سوزی‌ها در عرصه‌های طبیعی کشور و به‌خصوص در مناطق خارج از شمال با منشأ انسانی و غالب آن‌ها عمدی هستند (۷). بیش‌ترین اثرگذاری آن‌ها قبل از فصل بارش یا در اوج دوره گرما است (۸). آتش‌زنندگان با از بین بردن و یا کاهش قابل‌توجه زی‌توده بالای خاکی، تغییر خصوصیات شیمیایی و فیزیکی خاک و یا از بین بردن لایه آلی خاک و درنهایت افت حاصلخیزی و قابلیت تولید به بوم‌سازگان‌های آسیب‌پذیر از نوع بیابانی، مرتعی (علفزار، بوته‌زار و درختچه‌زار) و جنگلی لطمه می‌زنند (۹). معمولاً بخش‌های وسیعی از این مناطق به‌طور بالقوه در آتش می‌سوزند بدون این‌که به درختچه‌ها و درختان آسیب جدی وارد شود. پیوستگی تاجی درختان و درختچه‌ها در گسترش آتش‌سوزی به نوع تاجی نقش مهمی بازی می‌کند. در مناطقی که این پیوستگی وجود ندارد از اهمیت آتش‌سوزی‌های تاجی و یا تنه‌ای کاسته می‌شود. به‌جز بار ماده سوختی، توپوگرافی و شدت باد نیز در گسترش آتش سرنوشت‌ساز هستند (۳، ٤، ۱۰).

میزان مقاومت (Resistance) بوم‌سازگان‌ها به آتش‌سوزی سطحی را می‌توان به نسبت یا عمق کاهش سطح رستنی‌های مجاور خاک تعبیر کرد. به‌طور مثال اگر در سال رخداد آتش‌سوزی یا سال بلافاصله پس از آتش‌سوزی، سطح پوشش گیاهی تقریباً به همان اندازه سال قبل از آتش‌سوزی باشد و گیاهان نزدیک سطح خاک توانسته باشند پوشش رویشی را به سطح قبلی بازگردانند، در آن صورت می‌توان ادعا کرد که آن بوم‌سازگان، مقاومت بالایی (حداکثر ۱) به آتش‌سوزی سطحی داشته است. درهرحال ردپای حضور آتش در محل به‌نوعی باقی خواهد ماند، بنابراین میزان مقاومت به آتش‌سوزی نه‌تنها نسبی است، بلکه عملکردی نیز هست (۱۱). سؤالاتی مانند آیا تنوع زیستی به حالت اولیه بازگشته و آیا گیاهان مهاجم به‌جای گونه‌های بومی، محل سوخته شده را پرکرده‌اند؟» مفاهیمی هستند که می‌توانند مفهوم مقاومت را چالشی کنند (۱۲).

برخی از مقایسات درباره مقاومت جوامع مختلف گیاهی به آتش‌سوزی سطحی انجام شده است. مثلاً جوامع جنگلی به‌علت رطوبت نسبی بیش‌تر، تراکم درختان و نسبت کم‌تر پوشش علفی خشکِ آماده سوختن، ممکن است مقاومت بیش‌تری به آتش‌سوزی سطحی نسبت به درختچه‌زارها یا بوته‌زارهای مجاور خود داشته باشند (۱۳). از این نظر جنگل‌های بورآل و برخی از جنگل‌های معتدله از جمله بوم‌سازگان‌های بسیار مقاوم به آتش سطحی دسته‌بندی‌شده‌اند (۱). آتش سطحی به‌ویژه در شرایط باد می‌تواند در

علفزارها سریعاً گسترش یابد ولی در لکه‌های با فقدان پوشش گیاهی و یا موانع طبیعی به‌سرعت فروکش کند. بنابراین آتش سطحی در درختچه‌زارهایی مانند درمنه و در مکان‌هایی مانند چاپارل (Chaparral)، با وجود گسترش کم‌تر، بسیار تخریب‌کننده هستند و این بوم‌سازگان‌های مستعد آتش با مقاومت کم، اغلب چرخه‌های آتش‌سوزی منظم را تجربه می‌کنند. آتش‌سوزی در بوم‌سازگان‌های بیابانی با زمستان‌های معتدل معمولاً شدت کم‌تری دارد (۱٤). به‌طور خلاصه بوته‌زارها، علفزارها و به دنبال آن‌ها انواع جنگل‌های نیمه‌خشک به‌خصوص آن‌ها که دارای مواد اشتعال‌زا مانند ترپن‌ها هستند بیش‌تر مستعد آتش‌سوزی هستند (۱۵).

بوم‌سازگان‌هایی که در معرض تنش‌های چرای دام قرار می‌گیرند، واکنش‌های متفاوتی به تنش آتش‌سوزی نشان می‌دهند. به‌طور پیش‌فرض تحمل دو یا چند آشفتگی به‌طور هم‌زمان مقاومت بوم‌سازگان را به هر یک از آن‌ها کاهش می‌دهد ولی ممکن است چرای بیش‌تر در یک رویشگاه سبب شود حجم گیاهان علفی آماده شعله‌ور شدن در انتهای فصل رویش کاهش یابد و مقدار کم‌تری سوخت برای آتش‌سوزی‌های عمدی باقی بگذارد. در این شرایط چرای دام به‌صورت استثنایی مقاومت بوم‌سازگان را افزایش می‌دهد (۱٦). اثر آتش‌سوزی بر تنوع زیستی نیز ممکن است متفاوت باشد، مثلاً پس از آتش‌سوزی سطحی، تنوع گونه‌های گیاهی در مراتع تحت تنش بالای چرای دام در زاگرس مرکزی کاهش ولی تنوع از نوع بتا افزایش می‌یابد (۱۷). با نگاه دیگر ممکن است اثر آتش بر تنش چرا متقابل باشد؛ مثلاً آتش‌سوزی می‌تواند پویایی جوامع گیاهان مرتعی را بسته به فرم رویشی آن‌ها به‌صورت متفاوتی تغییر دهد (۱۸).

پایداری یک بوم‌سازگان در برابر آتش‌سوزی تنها با مقاومت به آن سنجیده نمی‌شود. پس از وقوع آتش‌سوزی و شکسته شدن نسبی مقاومت بوم‌سازگان، پوشش گیاهی به وضعیت اولیه باز می‌گردد. سرعت بازگشت به حال اولیه را تاب‌آوری (Resilience) می‌گویند. با این توصیف بعد از یک آتش‌سوزی گسترده و از بین رفتن تمام یا بخشی از پوشش گیاهی، بوم‌سازگان‌های جنگلی به زمان بیش‌تری برای جایگزین درختان نیاز دارند و تاب‌آوری کم‌تری خواهد داشت (۱). با این توصیف، با در نظر داشتن وقوع یک آتش‌سوزی سطحی می‌توان بوم‌سازگان‌های مختلف را با هم مقایسه کرد. رطوبت بیش‌تر بوم‌سازگان‌های جنگلی می‌تواند استقرار گیاهان سطحی را تسریع کند بنابراین ممکن است یک جنگل تاب‌آوری بالاتری را نشان دهد. در جنگل‌های بالای کوهی مانند جنگل‌های ارس به‌علت کم‌عمق بودن خاک و شرایط سرد اقلیمی شاید پس از آتش‌سوزی، استقرار دوباره گیاهان سطح خاک مشکل باشد ولی به همان علت قدرت تخریبی آتش‌سوزی‌ها ممکن است کاهش یابد و ترکیبی پیچیده از مقاومت و تاب‌آوری در آن‌ها دیده شود (۱۱، ۱۹).

این پژوهش برخلاف پژوهش‌های دیگر (۱۸، ۲۰، ۲۱) اثر درازمدت آتش‌سوزی بر ترکیب و مساحت پوشش گیاهی سطحی را نمی‌سنجد، بلکه قصد دارد دریابد که در درازمدت با تغییر سیمای سرزمین از یک بوم‌سازگان نیمه بیابانی تا رویشگاه‌های درختچه‌ای و تا جنگل‌های بالای کوهی ارس، میزان مقاومت و تاب‌آوری به تنش آتش‌سوزی سطحی چگونه تغییر می‌کند. تفاوت در نوع پوشش و همین‌طور توپوگرافی، خواص فیزیکی و شیمیایی خاک سبب شده تا در این پژوهش تنها آتش‌سوزی‌های سطحی (دربرگیرنده گیاهان غیرچوبی و بوته‌ای) مدنظر قرار گیرد. این پژوهش در منطقه‌ای نیمه‌خشک در کوهپایه‌های شرقی آرارات کوچک انجام شده که یک پروفایل تیپ برای رویش‌های ایران- تورانی محسوب

می‌شود. چهار منطقه پوشش نیمه بیابانی با گونه غالب اسکنبیل (*Calligonum crinitum* Boiss.)، کوهپایه‌ای با گونه غالب تنگرس (*Rhamnus pallasii* Fisch. & C. A. Mey.)، کوهستانی با گونه غالب بادام کوهی (*Prunus lycioides* C.K. Schneid.) و بالای کوهی با گونه غالب ارس (*Juniperus excelsa* M.Bieb.) در طول شیب ارتفاعی قابل‌تشخیص است. این مناطق به‌طور هم‌زمان حفاظت‌شده یا توسط دام‌های کوچک چریده شده‌اند. آتش‌سوزی‌های لکه‌ای فراوانی هرساله به‌صورت عمدی در این مناطق رخ می‌دهد که شرایط ایده‌آلی را برای مقایسه تغییرات سطح پوشش گیاهان سطحی که کمابیش در هر چهار منطقه مشترک است فراهم آورده است. سؤالات اصلی که این پژوهش سعی در پاسخ به آن‌ها دارد عبارت‌اند از: ۱- تحت تنش ناشی از آتش‌سوزی سطحی، با تکرار یا عدم تکرار این پدیده، مقاومت و تاب‌آوری چهار جامعه مورد بررسی، چگونه دستخوش تغییر می‌شوند؟ ۲- عامل تنش چرای دام چگونه بر واکنش این بوم‌سازگان‌ها به آتش‌سوزی سطحی تأثیر می‌گذارد؟ و ۳- آیا می‌توان از مطالعه شاخص‌های مقاومت و تاب‌آوری به الگویی در ارتباط با پایداری در برابر آتش‌سوزی سطحی در این منطقه دست‌یافت؟

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه: این پژوهش در عرصه‌ای به مساحت ۲۱۰۰۰ هکتار (´۲۸ °۳۹ تا ´٤٦ °۳۹ شمالی و ´۲۵ °٤٤ تا ´۳۷ °٤٤ شرقی) در منطقه جغرافیایی جنوب قفقاز و منطقه اکولوژیک دامنه‌های شرقی کوهستان آرارات، در شمال شهرستان ماکو، استان آذربایجان غربی و در امتداد مرز شمال غربی ایران و در مجاورت کشورهای ترکیه، ارمنستان و جمهوری خودمختار نخجوان انجام شد (شکل ۱). شیب ارتفاع از سطح دریا از شمال به جنوب منطقه از متوسط ۸۰۰ متر در شمال دشت بورالان تا متوسط ۱۹۰۰ متر در ارتفاعات یارم‌قیه ماکو است.

نزدیک‌ترین ایستگاه هواشناسی، ایستگاه سینوپتیک بازرگان در جنوب منطقه است. متوسط ۳۸ ساله (۱٤۰۲-۱۳٦٤) این ایستگاه میانگین دمای سالیانه °۱۰/۷ سانتی‌گراد و بارش سالیانه ۳۱۱ میلی‌متر را نشان می‌دهد و دارای نمایه اقلیم نیمه‌خشک سرد در طبقه‌بندی دومارتن است. در ضمن شاخص بارندگی در این ایستگاه، یک پراکنش کمابیش یکنواخت (بیش‌ترین و کم‌ترین به ترتیب در اردیبهشت و شهریور) را در طول سال نشان می‌دهد (۲۲). منطقه در جوار کوه آتش‌فشان آرارات کوچک قرارگرفته است که آخرین فوران آن در سال ۱۸٤۰ میلادی ثبت شده است. نتیجه این فوران‌ها، ایجاد بستری از سنگ بازالت سیاه در کل منطقه، به‌خصوص در شمال آن است.

چهار سیمای سرزمین گیاهی به‌صورت جوامع جداگانه در امتداد شمالی- جنوبی منطقه قرار دارند. نظر به تفاوت چهره رویشی متمایز، در این پژوهش از اصطلاح «جامعه (منفرد) و جوامع» برای اشاره به این نواحی استفاده شد. نام‌گذاری این سه جامعه بر اساس نام جنس گونه گیاهی تیپ (جدول ۱) که چهره اصلی این جوامع را تشکیل می‌دهد انجام شد. بنابراین در ارجاع به این جوامع از نام جنس استفاده شده است.

جدول ۱- مشخصه‌های توپوگرافیک، خاکی، اقلیمی و تیپ اصلی چهار جامعه در منطقه مورد آزمایش.

Table 1. Characteristics of topography, soil, climate, and main types in four communities in the study area.

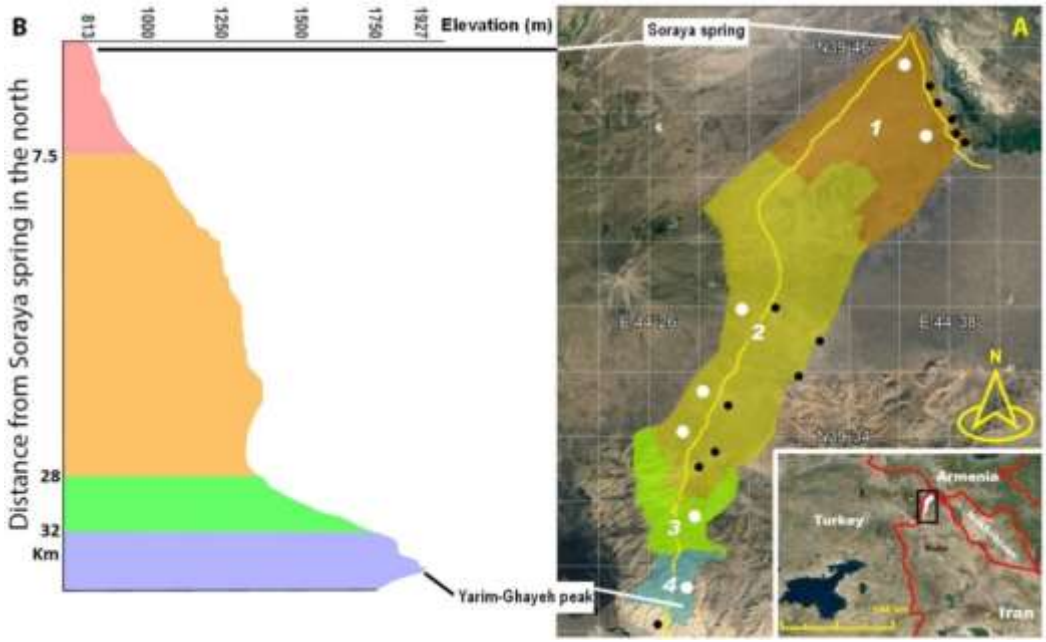
جامعه Community	وسعت (هکتار) Area (ha)	متوسط ارتفاع از سطح دریا Average altitude (m)	زیر اقلیم‡ Sub climate	متوسط بارندگی† Mean precipitation (mm)	خاک Soil	گونه تیپ Type species
اسکنبیل *Calligonum*	6,300	900	نیمه‌خشک معتدل Mild semi-arid	225	شنی و سنگریزه‌ای Gravel sand	*Calligonum crinitum*
تنگرس *Rhamnus*	10,000	1300	نیمه‌خشک معتدل Mild semi-arid	257	شنی- لومی Loamy sand	*Rhamnus pallasii*
بادام کوهی *Prunus*	2,000	1600	نیمه‌خشک سرد Cold semi-arid	292	لومی Loam	*Prunus lycioides*
ارس *Juniperus*	1,000	1800	نیمه‌خشک سرد Cold semi-arid	301	سنگلاخی- لومی Loam - rocky	*Juniperus excelsa*

† مقادیر متوسط بارندگی ثبت‌شده، بر اساس روش نوشته‌شده در بخش روش‌ها آورده شده است

† The average precipitation values are based on the method described in the Methods section

‡ طبقه‌بندی اقلیمی دومارتن

‡ De Martonne climate classification



شکل ۱- A- تصویر ماهواره‌ای منطقه مورد مطالعه در منتهی‌الیه شمال غرب کشور ایران و در شمال شهرستان ماکو و مجاورت کوه آرارات کوچک. جاده اصلی با خط زرد، روستاهای اصلی با نقاط سیاه و مراکز هفت منطقه قرق شده با نقاط سفید نشان داده شده‌اند. چهار جامعه در منطقه مجزا شده است که عبارت‌اند از: ۱- اسکنبیل (در شمال)، ۲- تنگرس، ۳- بادام کوهی و ٤- ارس (در جنوب) (Google Earth). B- پروفیل ارتفاعی منطقه: کم‌ترین ارتفاع چشمه ثریا. بیش‌ترین قله یاریم قیه.

Figure 1. A. Satellite image of northwest Iran near Mako city and the Little Ararat Mount, showing the main road (yellow line), villages (black dots), and centers of seven protected areas (white dots). Four communities were identified: 1- *Calligonum* (North), 2- *Rhamnus*, 3- *Prunus*, and 4- *Juniperus* (South) (Google Earth). B. Altitude variation in the area: the lowest is Soraya spring; the highest is Yarim-Ghayeh peak.

بارش سالیانه: یکی از داده‌های کمی مورد استفاده در تجزیه‌وتحلیل پوشش گیاهی چهار جامعه مورد مطالعه، شرایط آب و هوایی و به‌طور خاص بارندگی سالیانه است. ایستگاه سینوپتیک بازرگان خارج از منطقه مورد مطالعه قرار دارد و با وجود داده زمینی دقیق از سال ۱۹۸۵ میلادی، نمی‌توان از آن برای تخمین بارندگی سالیانه جوامع چهارگانه استفاده کرد. بنابراین در این پژوهش ابتدا اطلاعات بارش در نقاط مرکزی هر جامعه از دو سایت power.larc.nasa.gov و woeldcli.org به‌صورت ماهیانه به دست آمد و سپس مجموع اطلاعات بارش ماهانه به سالانه بسط داده شد.

روش تحقیق

مناطق تحت قرق: چرای مفرط دام در منطقه مورد مطالعه از اوایل دهه ۹۰ میلادی با توجه به افزایش جمعیت بهره‌بردار و تعداد زیاد احشام و تغییر معیشت زندگی مردم محلی به دامداری شدت گرفته است. تقریباً تمام چهار جامعه مورد مطالعه توسط دام‌های کوچک (گوسفند و بز) متعلق به روستاها و گله‌دارهای محلی مورد چرا قرار می‌گیرند. پروانه‌های چرا در طول ۳۰ سال گذشته برای نواحی مشخصی صادر شده است و مناطق ممنوعه چرا نیز شناسایی شده‌اند. بخشی از اطلاعات پوشش از نواحی تحت چرا و بخش دیگر از مناطق قرق اصلی به دست آمد. مهم‌ترین این قرق‌ها عبارت بودند از: در جامعه اسکنبیل، دو قرق ۵۰۰ هکتاری در ولی کندی و ۱۵۰ هکتاری در قوش؛ در جامعه تنگرس دو قرق ۱۰۰ هکتاری در سالبند و ۱۵۰ هکتاری در سوریک؛ در جامعه بادام کوهی، دو قرق ۵۰ هکتاری در شوریک و ۱۰۰ هکتاری در گریک؛ و در جامعه ارس، منطقه حفاظت‌شده به مساحت ۵۰ هکتار در یاریم قیه علیاء.

جمع‌آوری اطلاعات صحرایی: اطلاعات این پژوهش از برداشت‌های سه طرح اجرایی مصوب کمیته‌های فنی استان آذربایجان غربی که عبارت‌اند از طرح‌های استقرار ثبت و نظارت ذخیره‌گاه‌های گریک آیبک و یاریم قیه و طرح تثبیت شن‌های روان منطقه بورالان که هر یک سه طرح تجدیدنظر ده‌ساله را ضمیمه دارند به‌دست‌آمده است. در این طرح‌ها اندازه‌گیری‌های صحرایی به‌طور مستمر در لکه‌های آتش‌گرفته، در نواحی حفاظت‌شده (قرق) و غیرحفاظت‌شده در طول جاده اصلی ماکو- چشمه ثریا انجام شد. در تمام پهنه چهار جامعه و در طول ۱۳ سال (۲۰۰۹ تا ۲۰۲۲ میلادی)، آتش‌سوزی‌های سطحی، اغلب به‌صورت لکه‌های چند آری تا به‌ندرت یک هکتاری، عمدتاً در اواخر فصل تابستان و اوایل فصل پاییز به‌صورت عمدی به وقوع پیوستند. وضعیت محل‌های وقوع تحت فرم‌های گزارش آتش‌سوزی، به‌صورت درصد پوشش گیاهی منطقه سوخته شده و آتش نگرفته مجاور ثبت شدند. همین‌طور درصد پوشش بازیابی شده در مهروموم‌های بعد با انجام بازدیدهای سالیانه از همان محل تکمیل شدند. ازآن‌جاکه در دو سال ۲۰۱۲ و ۲۰۱۷ میلادی بیش‌ترین رخداد آتش‌سوزی سطحی گزارش شد و ضمناً در این مهروموم‌ها شاهد تکرار دوباره آتش‌سوزی در همان لکه از زمان اولین آتش‌سوزی بودیم، تنها اطلاعات آتش‌سوزی سطحی در این دو سال برای این پژوهش انتخاب شدند.

به‌این‌ترتیب که در واحدهای نمونه‌برداری دو مترمربعی در نواحی آتش‌گرفته و آتش نگرفته مجاورشان، درصد پوشش گیاهی به‌صورت بصری بر اساس مکمل درصد خاک قابل‌رؤیت ثبت شد.

در طول ۱۳ سال کنترل جوامع تحت چرا و حفاظت‌شده و اندازه‌گیری درصد پوشش، تعداد قابل‌توجهی آتش‌سوزی سطحی در دو سال ۲۰۱۲ و ۲۰۱۷ رصد شدند. بسته به این‌که در طول مدت

پژوهش، این آتش‌سوزی‌ها دفعه اول یا دوم در همان نقطه رخ داده است، تعداد آن‌ها به تفکیک جامعه و نوع آشفتگی در جدول ۲ آمده است. داده‌ها شامل شمارش واقعی همه آتش‌سوزی‌های سطحی در جوامع تحت چرا نیست بلکه صرفاً آن‌هایی است که در این پژوهش درنظر گرفته شدند.

جدول ۲- تعداد حوادث آتش‌سوزی سطحی بر اساس تعدد آتش‌سوزی (یک‌بار، دو بار)، در مناطق حفاظت‌شده و حفاظت نشده.

Table 2. Surface fire incidents by fire numbers, in protected and unprotected areas.

Juniperus				*Prunus*				*Rhamnus*				*Calligonum*				جامعه Community
NP		P		NP		P		NP		P		NP		P		حفاظت* Protection
two	one	two	one	two	one	two	one	two	one	two	one	two	one	two	one	تعدد آتش‌سوزی Fire Frequency
2	4	2	2	4	8	7	9	4	4	2	5	4	6	5	7	تعداد نقاط آتش‌سوزی Fire Number

* P = Protected (حفاظت‌شده), NP = unprotected (حفاظت نشده)

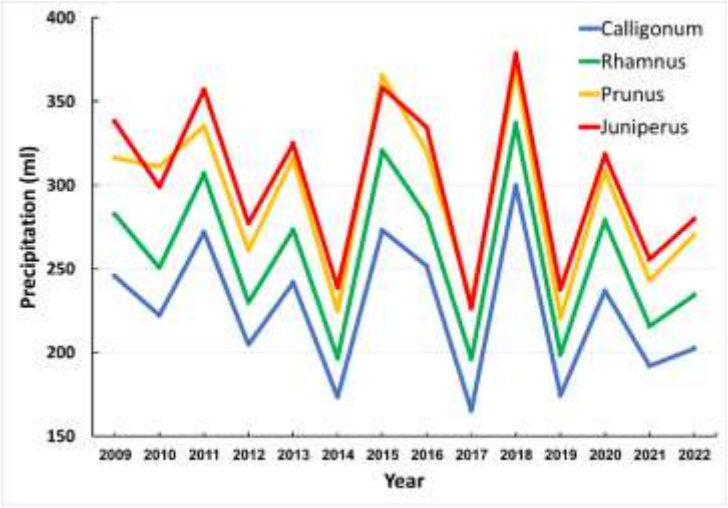
محاسبات: مقاومت بوم‌سازگان به آتش‌سوزی سطحی بر اساس میزان عدم تشابه پوشش گیاهی بین دو بازه زمانی، قبل و درست پس از آتش محاسبه شدند. بر این اساس فرمول مقاومت به‌صورت $R = 1 - \frac{|D_{3b} - D_1|}{D_{3b}}$ تعریف شد که R مقدار مقاومت به آشفتگی آتش سطحی، D_{3b} متوسط پوشش سه سال قبل از سال وقوع آتش‌سوزی و D_1 مقدار پوشش به‌جای مانده در سال رخداد آتش‌سوزی سطحی است. بیش‌ترین مقدار مقاومت (مقدار یک) هنگامی است که عدم تشابه بین بوم‌سازگان قبل و بعد از آشفتگی، صفر باشد. در محاسبه تاب‌آوری اکولوژیک بیش‌ترین عدم تشابه در سیمای یک بوم‌سازگان، بین مهروموم‌های قبل و بعد از وقوع آشفتگی رخ می‌دهد و با گذشت زمان این عدم تشابه کم‌تر می‌شود. مقدار تاب‌آوری اکولوژیک برای این نواحی، از نسبت بین مقادیر عدم تشابه در سال(های) اول پس از آشفتگی و هر یک از مقادیر عدم تشابه در سال(های) بعدی نسبت به سال بلافاصله قبل از آشفتگی محاسبه شد: $Rs_t = 1 - \frac{|D_b - D_t|}{|D_b - D_1|}$. در این رابطه Rs_t، مقدار تاب‌آوری اکولوژیک در سال t پس از وقوع آشفتگی، D_b، D_1 و D_t به ترتیب سطح پوشش اندازه‌گیری شده درست قبل از، در زمان وقوع و در زمان t پس از وقوع آتش‌سوزی سطحی هستند (۲۳، ۲٤). زمان t طوری انتخاب شد که بیش‌ترین بهبود (recovery) پوشش پس از آتش‌سوزی سطحی در کوتاه‌ترین زمان به‌دست‌آمده باشد. فرض بر این است که با فاصله گرفتن از زمان آتش‌سوزی، سطوح پوشش گیاهی به مقدار حداکثری خود یعنی عدد یک می‌رسند. در آتش‌سوزی‌های سطحی سال ۲۰۱۷، در زمان‌هایی که پوشش نتوانست به سطح ابتدایی خود برسد، با انتخاب زمان t یکسان مقادیر تاب‌آوری اکولوژیک مقایسه شدند.

مقادیر مقاومت و تاب‌آوری اکولوژیک محاسبه‌شده به روش انتقال داده Z-score، نرمال شدند. مقایسات میانگین‌ها به روش مدل خطی عمومی (GLM) با استفاده از سه متغیر ثابت: جامعه (چهار سطح)، آشفتگی و تعدد آتش‌سوزی سطحی (دو سطح) انجام شد. عامل آشفتگی در دو سطح «آتش» و «آتش + چرا» انتخاب شد که اولی به معنی آتش‌سوزی در مناطقی است که مورد حفاظت قرارگرفته و یا قرق شده‌اند. تعدد آتش‌سوزی به معنی رخداد یک‌باره و یا دوباره آتش‌سوزی سطحی در یک مکان است. متغیرهای تأثیرپذیر، مقاومت و تاب‌آوری اکولوژیک بودند. اثرپذیری کامل دو عامل آشفتگی و

تعدد آتش‌سوزی از عامل جامعه سبب شد که این دو عامل در داخل عامل جامعه به‌صورت آشیانه‌ای قرار گیرند. در تنظیمات مدل نیز اثر متقابل دو عامل نوع آشفتگی و تعدد آتش‌سوزی سطحی قرار داده شد. از آزمون Fisher LSD برای مقایسه میانگین‌ها استفاده شد. مقادیر پوشش گیاهی، مقاومت و تاب‌آوری اکولوژیک به همراه اطلاعات متوسط بارندگی ماهیانه (تبدیل‌شده به Z-score) به تفکیک سال با استفاده از تمام نقاط قرارگرفته در چهار جامعه، در ماتریس ورودی تجزیه به مؤلفه‌های اصلی (PCA) قرار داده شدند. این روش تجزیه‌وتحلیل طوری تنظیم شد تا از روش همبستگی اطلاعات انحراف از معیار استاندارد شده استفاده شود.

نتایج

شکل ۲ سطوح بارندگی سالانه برای چهار جامعه مورد تحقیق را از سال ۲۰۰۹ تا ۲۰۲۲ نشان می‌دهد. جامعه اسکنبیل با کم‌ترین ارتفاع از سطح دریا، به‌طور مدام کم‌ترین سطوح بارندگی را دریافت کرده است؛ با کمینه‌هایی که در سال‌های خاص مانند ۲۰۱٤، ۲۰۱۷ و ۲۰۱۹ به حدود ۱۷۰ میلی‌متر نیز می‌رسند. جامعه ارس به‌طورکلی بیش‌ترین سطوح بارش را دریافت کرده است که به‌طور میانگین بیش‌تر از ۲۵۰ میلی‌متر در سال است. جامعه‌های تنگرس و بادام کوهی الگوهای بارندگی بینابینی را نشان می‌دهند. بارندگی جامعه بادام کوهی تنها در سال‌های ۲۰۱۰ و ۲۰۱۵ از ارس پیشی می‌گیرد.



شکل ۲- نوسانات بارندگی سالانه در چهار جامعه مورد مطالعه از ۲۰۰۹ تا ۲۰۲۲.

اسکنبیل (*Calligonum*)، تنگرس (*Rhamnus*)، بادام کوهی (*Prunus*)، ارس (*Juniperus*).

Figure 2. Fluctuations in annual rainfall in the four studied communities from 2009 to 2022.

نتایج نشان داد که جوامع مختلف سطوح متمایز مقاومت و تاب‌آوری اکولوژیکی را به نمایش می‌گذارند. درحالی‌که وضعیت حفاظت تأثیر قابل‌توجهی بر مقاومت اکولوژیکی ندارد، اما به‌طور قابل‌توجهی بر تاب‌آوری اکولوژیکی در جوامع مختلف تأثیرگذار است. تعدد حوادث آتش‌سوزی سطحی نقش مؤثری در تعیین سطوح مقاومت و تاب‌آوری اکولوژیکی در جوامع مختلف ایفا می‌کند. اثر متقابل وضعیت حفاظت و تعدد آتش‌سوزی بر مقاومت و تاب‌آوری اکولوژیکی به‌طور معنی‌داری در جوامع مختلف تفاوتی ندارد (جدول ۳).

جدول ۳- مقادیر میانگین مربعات تنظیم‌شده به‌دست‌آمده از تجزیه واریانس مقادیر مقاومت و تاب‌آوری اکولوژیک در سطوح جامعه، نوع حفاظت و تعدد آتش‌سوزی.

Table 3. Adjusted mean squares from variance analysis of resistance and ecological resilience values by community, protection type, and fire frequency.

تاب‌آوری اکولوژیک Resilience	مقاومت اکولوژیک Resistance	DF	منبع تغییرات Source of Variation
0.0299^{**}	0.2681^{**}	3	جامعه Community
0.0505^{**}	0.0039^{NS}	4	حفاظت (جامعه) Protection (Community)
0.0174^{**}	0.0327^{**}	4	تعدد آتش‌سوزی (جامعه) Fire Frequency (Community)
0.0023^{NS}	0.0013^{NS}	4	اثر متقابل بین حفاظت و تعدد آتش (جامعه) Fire Frequency × Protection (Community)

^{NS} = not significant (معنی‌دار نیست), ** 99% significant (۹۹ درصد معنی‌دار است)

پس از وقوع آتش‌سوزی‌های سطحی، چهار جامعه گیاهی سطوح مختلفی از مقاومت اکولوژیکی را نشان دادند. این تفاوت‌ها کاملاً با گرادیان ارتفاع از سطح دریا همخوانی داشت، به‌طوری‌که جامعه ارس بالاترین و جامعه اسکنبیل کم‌ترین میزان مقاومت را داشتند. در مورد تاب‌آوری اکولوژیکی، جامعه اسکنبیل دارای تاب‌آوری قابل‌توجهی بالاتری نسبت به سه جامعه دیگر بود که تفاوت معنی‌داری بین آن‌ها مشاهده نشد (جدول ٤).

جدول ٤- مقایسه میانگین مقادیر مقاومت و تاب‌آوری اکولوژیک چهار جامعه مورد مطالعه با استفاده از آزمون **Fisher LSD**.

Table 4. Comparing average resistance and ecological resilience values in four communities using Fisher LSD test (P<0.05).

گروه‌بندی تاب‌آوری Resilience Grouping	میانگین تاب‌آوری Average Resilience	گروه‌بندی مقاومت Resistance Grouping	میانگین مقاومت Average Resistance	تعداد نقاط آتش‌سوزی Fire Number	جامعه Community
a	0.473	d	0.116	22	اسکنبیل *Calligonum*
b	0.385	c	0.204	15	تنگرس *Rhamnus*
b	0.404	b	0.314	28	بادام کوهی *Prunus*
b	0.389	a	0.431	10	ارس *Juniperus*

حروف لاتین متفاوت در هر ستون نشانه وجود تفاوت معنی‌دار با احتمال حداکثر ۵ درصد خطا است

Different letters indicate significant differences

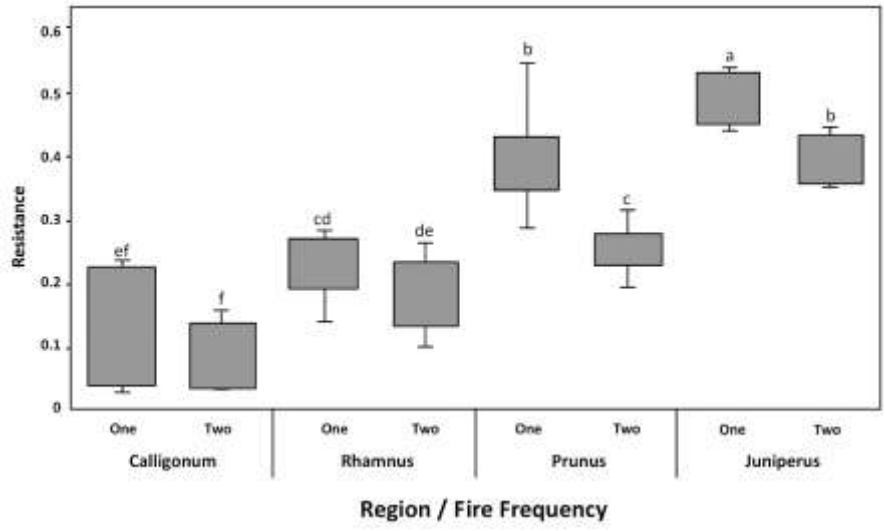
همان‌طور که جدول ۳ نشان داده شده است، تفاوتی در مقاومت اکولوژیک در جوامع با سطوح حفاظت متفاوت دیده نشد. بااین‌حال به‌جز جامعه تنگرس، در سه جامعه دیگر، جوامع حفاظت‌شده (تحت قرق) سطوح بالاتری از تاب‌آوری اکولوژیک را نشان دادند (جدول ۵).

جدول ۵- مقایسه میانگین مقادیر تاب‌آوری اکولوژیک چهار جامعه مورد مطالعه به تفکیک سطح حفاظت آن‌ها (NP= عدم حفاظت، P= حفاظت‌شده). با استفاده از آزمون Fisher LSD. حروف لاتین متفاوت نشانه وجود تفاوت معنی‌دار با احتمال حداکثر ۵ درصد خطا است.

Table 5. Comparison of average ecological resilience in four studied areas, grouped by protection level (NP = not protected, P = protected) using Fisher LSD test. Different letters indicate significant differences at a 5% error.

گروه‌بندی Grouping	میانگین تاب‌آوری Average resilience	تعداد نقاط Fire Number	حفاظت Protection	جامعه Community	گروه‌بندی Grouping	میانگین تاب‌آوری Average resilience	تعداد نقاط Fire Number	حفاظت Protection	جامعه Community
b	0.472	16	P	بادام کوهی *Prunus*	a	0.521	12	P	اسکنبیل *Calligonum*
d	0.336	12	NP		b	0.424	10	NP	
b	0.437	4	P	ارس *Juniperus*	bc	0.419	7	P	تنگرس *Rhamnus*
d	0.340	6	NP		c	0.352	8	NP	

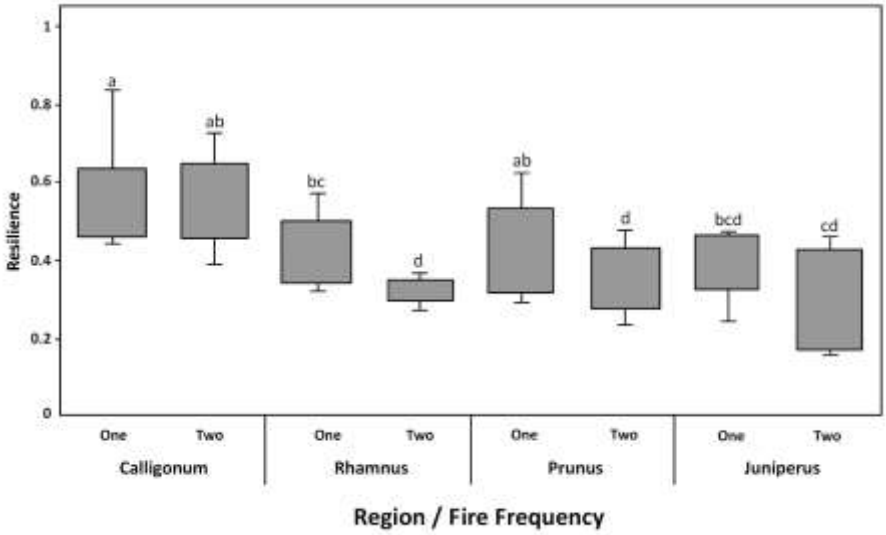
شکل ۳ بازه تغییرات مقادیر مقاومت اکولوژیکی در جوامع مختلف و سطوح تعدد آتش‌سوزی سطحی را نشان می‌دهد. درحالی‌که دو جامعه ارس و بادام کوهی، یعنی دو جامعه قرارگرفته در ارتفاعات بالاتر، در دومین آتش‌سوزی سطحی، مقاومت پایین‌تری را نشان می‌دهند، اما نتایج این مطالعه با ۹۵ درصد قطعیت آماری، تفاوتی در مقاومت به آتش‌سوزی سطحی در دفعات اول و دوم دیگر نشان نداد.



شکل ۳- تغییرات مقادیر مقاومت اکولوژیک به آتش‌سوزی سطحی در چهار جامعه مورد مطالعه، دسته‌بندی‌شده بر اساس یک‌بار (One) یا دو بار (Two) آتش گرفتن. حروف لاتین متفاوت نشانه وجود تفاوت معنی‌دار با سطح اطمینان ۹۵ درصد است (آزمون Fisher LSD). اسکنبیل (*Calligonum*)، تنگرس (*Rhamnus*)، بادام کوهی (*Prunus*)، ارس (*Juniperus*).

Figure 3. Changes in ecological resistance to surface fire in four communities, grouped by single (One) or double (Two) fires. Different letters show significant differences at 95% confidence (Fisher LSD test).

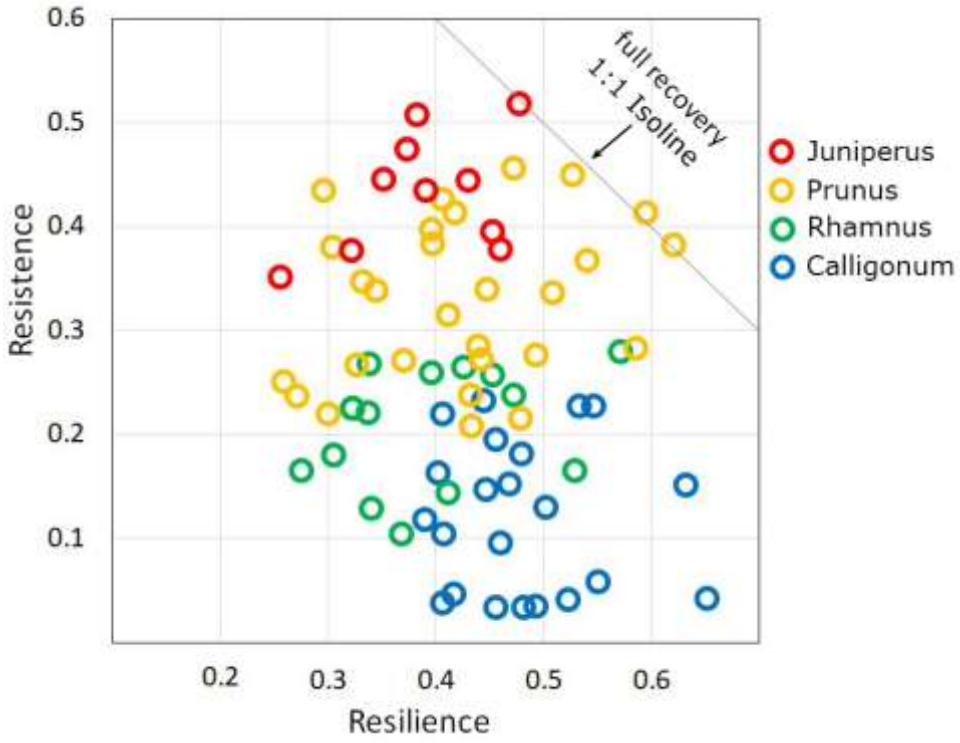
نتایج نشان داد که در دو جامعه تنگرس و بادام کوهی، شاخص تاب‌آوری اکولوژیک در جوامعی که بار دوم دچار آتش‌سوزی سطحی شده بودند به‌طور معنی‌داری کاهش یافت. بااین‌وجود تفاوت آماری بین جوامع با یک و دو بار آتش‌سوزی در دو جامعه دیگر اکولوژیک یافت نشد (شکل ٤).



شکل ٤- تغییرات مقادیر تاب‌آوری اکولوژیک به آتش‌سوزی سطحی در چهار جامعه مورد مطالعه، دسته‌بندی‌شده بر اساس یک‌بار (One) یا دو بار (Two) آتش گرفتن. حروف لاتین متفاوت نشانه وجود تفاوت معنی‌دار با سطح اطمینان ۹۵ درصد است (آزمون Fisher LSD). اسکنبیل (*Calligonum*)، تنگرس (*Rhamnus*)، بادام کوهی (*Prunus*)، ارس (*Juniperus*).

Figure 4. Changes in ecological resilience to surface fire in four communities, grouped by single (One) or double (Two) fires. Different letters show significant differences at 95% confidence (Fisher LSD test).

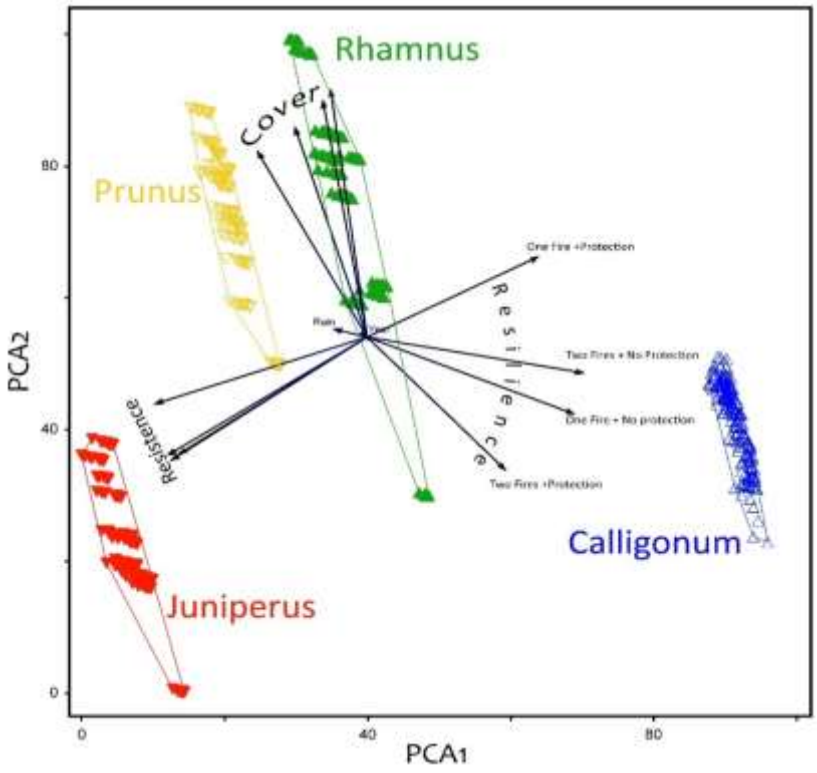
توزیع نقاط آتش‌سوزی در چهار جامعه مورد مطالعه بر اساس مقاومت و تاب‌آوری اکولوژیکی محاسبه‌شده برای هر نقطه در شکل ۵ نشان داده شده است. خط همبار بهبودی کامل که حداکثر مقادیر این دو شاخص (مقدار ۱) را به هم متصل می‌کند، نشان‌دهنده بهبودی کامل بوم‌سازگان پس از آشفتگی آتش‌سوزی سطحی است. نقاط نزدیک به این خط، سطوح بالاتری از پایداری اکولوژیک را نشان می‌دهند که منعکس‌کننده ظرفیت بهتر برای مقاومت و تاب‌آوری از اختلالاتی مانند آتش‌سوزی است (۱۲). نتایج نشان داد که اغلب نقاط مورد بررسی، دورتر از خط همبار بهبودی هستند. تنها نقاطی از جامعه بادام کوهی و یک نقطه از جامعه ارس در نزدیکی خط همبار بهبودی کامل قرار گرفتند (شکل ۵).



شکل ۵- پراکنش نقاط آتش‌سوزی سطحی به تفکیک چهار جامعه مورد مطالعه، بر اساس مقادیر شاخص‌های محاسبه‌شده مقاومت و تاب‌آوری اکولوژیک برای هر نقطه. همبار بهبودی کامل وصل‌کننده مقادیر حداکثری این دو شاخص است. اسکنبیل (*Calligonum*)، تنگرس (*Rhamnus*)، بادام کوهی (*Prunus*)، ارس (*Juniperus*).

Figure 5. Surface fire point distribution across the four studied communities based on calculated ecological resistance and resilience indices. The full recovery isoline connects their maximum values.

جداسازی کامل ٤ جامعه توسط تجزیه به مؤلفه‌های اصلی انجام شد (شکل ٦). دو مؤلفه اول به ترتیب با ٤٣/٤ و ٢٢/١ درصد توانستند ٦٥/٥ درصد تغییرات را توضیح دهند. مشخصات زمانی (سال)، سطح پوشش گیاهی، مقادیر مقاومت و تاب‌آوری اکولوژیک محاسبه‌شده برای نقاط آتش‌گرفته و دو مشخصه تعدد آتش‌سوزی و سطح حفاظت در این آنالیز مدنظر قرا گرفتند. با در نظر گرفتن دو مؤلفه اصلی اول، جامعه اسکنبیل، با متغیرهای وابسته به تاب‌آوری، جامعه ارس، با متغیرهای وابسته به مقاومت و جامعه تنگرس با متغیرهای وابسته به پوشش همگرا بودند. جامعه بادام کوهی با هر دو متغیر پوشش و مقاومت همگرا است. هر یک از شاخص‌های مقاومت، تاب‌آوری و پوشش، به چهار مؤلفه بر اساس سطح حفاظت و تعدد آتش‌سوزی تفکیک می‌شوند که به علت همگرایی بالای بردارهای آن‌ها، از ذکر نامشان برای شاخص‌های مقاومت و پوشش در شکل ٦ اجتناب شد. نتایج نشان داد که با وجود تفاوت بارندگی و رژیم تغییرات زمانی پوشش در چهار جامعه مورد مطالعه، به علت یکی بودن الگوهای تغییرات، این دو عامل اثری بر جداسازی جوامع نداشتند.



شکل ٦- دو نموداره PCA که ترتیب جامعه‌های گیاهی را بر اساس پاسخ آن‌ها به مقاومت و تاب‌آوری اکولوژیک به آتش‌سوزی سطحی، درصد پوشش گیاهی، مقیاس زمان و متوسط بارندگی سالیانه نشان می‌دهد. اسکنبیل (*Calligonum*)، تنگرس (*Rhamnus*)، بادام کوهی (*Prunus*)، ارس (*Juniperus*).

Figure 6. PCA biplot ordination of plant communities based on their response to ecological resistance, resilience to surface fire, vegetation percentage, time scale, and average annual rainfall.

بحث

این پژوهش به ارزیابی مقاومت و تاب‌آوری چهار جامعه گیاهی در ارتفاعات مختلف کوه‌های آرارات کوچک در برابر آتش‌سوزی سطحی و تأثیر چرای دام بر آن‌ها می‌پردازد. هم‌چنین هدف شناسایی الگوهای پایداری و ارائه راهکارهای مدیریتی برای افزایش تاب‌آوری بوم‌سازگان‌ها است.

نتایج این پژوهش نشان داد که جوامع مختلف گیاهی بسته به این‌که آیا بوته‌زار، درختچه‌زار یا درختی هستند و یا در چه ارتفاع از سطح دریا قرار دارند، سطوح متمایز مقاومت به آتش‌سوزی سطحی را نشان می‌دهند. این نتیجه قابل پیش‌بینی به نظر می‌رسد و منطقی است زیرا این جوامع ویژگی‌های ساختاری، بار ماده سوختی، خصوصیات خاکی و ریز اقلیم‌های متفاوتی دارند. در مقایسه با درختان، بوته‌ها و درختچه‌ها معمولاً در پایین‌تر از سطح زمین با سوخت‌های قابل اشتعال قرار دارند که می‌تواند به آتش‌سوزی‌های سطحی بزرگ‌تر سریع‌تر گسترش یابد (۲۵). مثلاً بوته‌زارهای مدیترانه‌ای تحت تسلط بوته‌های جنس *Cistus* و درختچه‌های جنس *Ulex* به ترتیب نسبت به درختزارهای کاج مجاورشان پتانسیل بیش‌تر گسترش آتش سطحی را به دلیل تجمع سوخت‌های قابل اشتعال دارند (۲٦). در نتایج پژوهش حاضر، جامعه ارس بالاترین و جامعه اسکنبیل کم‌ترین مقاومت به آتش‌سوزی سطحی را نشان دادند. این نتایج را نباید با نتایج پژوهش‌هایی که

جوامع ارس مستقر در رویشگاه‌های خشک را در کنار جوامع مرطوب‌تر مجاور آن‌ها قرار می‌دهند (۲۷) مقایسه کرد، زیرا در این پژوهش، بارندگی در جامعه ارس به‌مراتب بیش‌تر از جامعه اسکنبیل است. در ضمن به‌جز مفهوم ذکرشده در بالا که افزایش بار سوختی سطحی را با کاهش درختان و افزایش نور همراه می‌داند، در این پژوهش یک شیب افزایش مقاومت اکولوژیک با افزایش ارتفاع از سطح دریا نیز دیده می‌شود که می‌تواند معلول ریز اقلیم‌های خنک و مرطوب‌تر و همین‌طور سنگلاخی‌تر شدن خاک در رویشگاه‌های بالادست باشد (۲۸).

حساسیت جوامع پایین‌دست به آتش‌سوزی سطحی به‌قدری بالاست که تفاوتی در سطح مقاومت آن‌ها در دفعات اول و دوم آتش‌سوزی دیده نمی‌شود. درحالی‌که دو جامعه ارس و بادام کوهی که در ارتفاعات بالاتر یافت می‌شوند، مقاومت و تاب‌آوری بیش‌تری در رخداد اول نسبت به رخداد دوم آتش‌سوزی سطحی نشان دادند. اثر کاهشی تعدد آتش‌سوزی سطحی بر مقاومت رویشگاه‌های بالای کوهی در مطالعات گذشته در کوه‌های راکی (۲۹) و اسکاندیناوی (۳۰) نشان داده شده است.

جوامع مختلف گیاهی مورد بررسی در این پژوهش، سطوح متفاوتی از تاب‌آوری اکولوژیکی در برابر آتش‌سوزی‌های سطحی را نشان دادند که این تاب‌آوری در جهت مخالف نتایج شاخص مقاومت قرار داشت. بااین‌حال، این تمایز در تاب‌آوری به‌اندازه تمایز در شاخص مقاومت، بارز نبود. تنها جامعه اسکنبیل شاخص تاب‌آوری بالاتری را در مقایسه با سه جامعه دیگر نشان داد. بنابراین به‌نظر نمی‌رسد که در خصوص شاخص تاب‌آوری، عامل ارتفاع از سطح دریا را بتوان در تاب‌آوری به آتش سطحی جوامع گیاهی مجاور کوه‌های آرارات لحاظ کرد. گیاهان علفی، بوته‌ها و درختچه‌های جامعه اسکنبیل ممکن است از طریق توانایی‌های جوانه زدن سریع یا سایر صفات تاب‌آوری، با شرایط پس از آتش‌سوزی‌های سطحی سازگار شده باشند (۲۳). در پژوهش‌های گذشته که واکنش به آتش‌سوزی سطحی را در جامعه‌های با جنس برتر اسکنبیل مطالعه کرده‌اند، گاهی در مقایسه با جوامع با گونه‌های بیگانه، هر دو جامعه، مقاومت و تاب‌آوری بالایی نشان داده‌اند (۳۱) و گاهی در تأیید نتایج این پژوهش، این جوامع تنها به‌عنوان جوامع مستعد آتش‌سوزی معرفی شده‌اند (۳۲). قدرت بازیابی و تاب‌آوری جامعه اسکنبیل به‌قدری بالاست که تعدد آتش‌سوزی تأثیری بر آن نداشته است. پس از آتش‌سوزی سطحی، جامعه اسکنبیل با سرعت بیش‌تری به سطح پوشش گیاهی مشابه قبل از آتش‌سوزی (تاب‌آوری) باز می‌گردد. این یافته‌ها تغییر جامعه در توانایی مقاومت و تاب‌آوری را برجسته می‌کنند که به‌طور بالقوه تحت‌تأثیر عواملی مانند ترکیب پوشش گیاهی، شرایط محیطی و رژیم‌های آشفتگی قرار دارند.

این مطالعه تفاوت معنی‌داری در مقاومت اکولوژیکی در برابر آتش‌سوزی‌های سطحی بین مناطق حفاظت‌شده و حفاظت نشده در چهار جامعه گیاهی مورد مطالعه نشان نداد. این نتیجه نشان می‌دهد که حفاظت در برابر عواملی تنش‌زای جانبی مانند چرا یا سایر فعالیت‌های انسانی، ممکن است مستقیماً بر توانایی این جوامع گیاهی در مقاومت به آتش‌سوزی‌های سطحی تأثیر نداشته باشد. به‌عبارت‌دیگر چرای گیاهان به‌خصوص در بهار ممکن است حتی از بار سوختی در آخر تابستان بکاهد و عاملی در کاهش ریسک آتش‌سوزی باشد (۲۱، ۳۳). برای سه مورد از چهار جامعه گیاهی (اسکنبیل، بادام کوهی و ارس، مناطق حفاظت‌شده سطوح بالاتری از تاب‌آوری اکولوژیکی را در مقایسه با مناطق حفاظت نشده نشان دادند. این بدان معناست اگرچه مقاومت اولیه در برابر آتش

ممکن است مشابه باشد، اما مناطق حفاظت‌شده ظرفیت بهتری برای تاب‌آوری و بازگشت از اختلال ناشی از آتش‌سوزی سطحی دارند. اثر مثبت حفاظت بر بازگشت بوم‌سازگان به شرایط قبل از آتش‌سوزی در بسیاری از پژوهش‌های گذشته نشان داده شده است (۱۹، ۳٤) و نتایج این پژوهش را نیز می‌توان بر این اساس توضیح داد. جامعه تنگرس با داشتن یکی از بالاترین سطوح بارندگی و خاک‌های با سنگلاخ کم، تفاوت اندکی را در تاب‌آوری به آتش سطحی در مناطق حفاظت‌شده و غیرحفاظت‌شده نشان داد. جامعه تنگرس با وجود بارندگی بالا و خاک‌های مناسب، تفاوت اندکی در تاب‌آوری به آتش سطحی در مناطق حفاظت‌شده و غیرحفاظت‌شده نشان داد. قرق تأثیر قابل‌توجهی بر تاب‌آوری این جامعه نداشته و تکرار آتش‌سوزی تاب‌آوری را کاهش داده است. ویژگی‌های گیاهی مانند سیستم ریشه‌ای عمیق و بازسازی سریع نیز به تاب‌آوری بالای آن کمک می‌کند. این عوامل منجر به تفاوت اندک در تاب‌آوری مناطق حفاظت‌شده و غیرحفاظت‌شده شده‌اند.

نتایج نشان داد که در جوامع تنگرس و بادام کوهی، شاخص تاب‌آوری اکولوژیک در جوامعی که بار دوم دچار آتش‌سوزی سطحی شده بودند، به‌طور معنی‌داری کاهش یافت. این کاهش می‌تواند به دلیل کاهش مواد غذایی و ذخایر بذر، اختلال در ساختار خاک، آسیب به پوشش گیاهی، تنش‌های زیستی مضاعف و کاهش تنوع زیستی باشد (۵). آتش‌سوزی‌های مکرر منجر به کاهش توانایی بوم‌سازگان در بازیابی و کاهش تاب‌آوری آن می‌شوند که اهمیت مدیریت مناسب و جلوگیری از آتش‌سوزی‌های مکرر را برای حفظ پایداری و تاب‌آوری بوم‌سازگان‌ها برجسته می‌کند (۳، ٦).

در منطقه‌ای با آتش‌سوزی‌های سطحی فراوان، توزیع نقاط چهار جامعه گیاهی مختلف بر اساس مقاومت و تاب‌آوری اکولوژیکی نشان داد که بیش‌تر منطقه مورد مطالعه از خط همبار بهبودی کامل فاصله دارند و این بوم‌سازگان‌ها ممکن است در برابر تأثیرات آتش‌سوزی‌های سطحی دارای ظرفیت کم پایداری بلندمدت باشند. بر اساس تفسیری که (۱۲) ارائه کرده است اگر اختلالات آتش‌سوزی سطحی شدید یا مکرر باشند، به‌طور بالقوه منجر به تخریب طولانی‌مدت یا حتی فروپاشی بوم‌سازگان می‌شوند. این مطالعه نشان می‌دهد که تنها جامعه بادام کوهی و یک نقطه از جامعه ارس در نزدیکی خط همبار بهبودی کامل قرار داشتند که نشان‌دهنده سطح بالاتری از ثبات محیط زیستی و توانایی بهتر برای مقاومت و تاب‌آوری از اختلالات آتش‌سوزی سطحی در این نقاط است و این‌که این جوامع ممکن است در مواجهه با آتش‌سوزی سطحی پایدارتر باشند. این‌که چه ویژگی‌هایی جامعه بادام کوهی را قادر می‌سازد تا در مقایسه با سایر جوامع مورد مطالعه، در برابر آثار آتش‌سوزی سطحی به‌طور مؤثرتری پایدارتر عمل کند را می‌توان تا حدودی از نتایج این پژوهش مشاهده کرد و مانند پژوهش‌های گذشته همانند (۳۵، ۳٦)، قابل تفسیر است: جامعه بادام کوهی دارای مقاومت بالا به آتش‌سوزی سطحی، واکنش مثبت به عامل حفاظت در بالا بردن تاب‌آوری اکولوژیک و عدم حساسیت به تعدد آتش‌سوزی هستند. ضمن این‌که ارتفاع نسبتاً بالا از سطح دریا و همزمان خاک‌های غیرسنگلاخی در این جامعه، شرایط را برای پایداری بالا در برابر اختلالات اکولوژیک بالا برده است (۳۷). این تفسیر را می‌توان توسط نتایج به‌دست‌آمده از PCA نیز بسط داد. درحالی‌که جامعه اسکنبیل، با متغیرهای وابسته به تاب‌آوری، جامعه ارس با متغیرهای وابسته به مقاومت و جامعه تنگرس با متغیرهای وابسته به پوشش همگرا هستند، نقاط نمونه جامعه بادام کوهی در بخش بینابینی پوشش و مقاومت

قرار دارند. این بدین معنی است که با حفظ درصد پوشش گیاهی در سطح بالا در این جامعه (توسط قرق)، این جامعه درجات بالایی از مقاومت و به‌تبع آن پایداری را نشان می‌دهد. در ضمن چیدمان نقاط جوامع در طول مؤلفه اول طوری است که این مؤلفه را منطبق با گردیانت ارتفاع از سطح دریا می‌سازد.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش الگوهای تغییر مقاومت و تاب‌آوری اکولوژیک متفاوتی یافت شد. خطی‌ترین الگو، افزایش مقاومت اکولوژیک با افزایش ارتفاع از سطح دریا و از تغییر جامعه گیاهی از بوته و درختچه‌زار به درخت‌زار بود. با اعمال قرق، از حساسیت این جوامع گیاهی به آتش‌سوزی سطحی کاسته نشد، ولی قدرت تاب‌آوری اکولوژیک تقریباً تمام آن‌ها افزایش یافت. با تکرار آتش‌سوزی از مقاومت اکولوژیک جوامع بالادستی (ارس و بادام کوهی) و تاب‌آوری جوامع تنگرس و بادام کوهی کاسته شد. جامعه بادام کوهی با بیش‌ترین نقاط در نزدیکی خط همبار بهبودی کامل نشان داد که در این جامعه پوشش گیاهی با بالاترین پایداری نسبت به تنش آتش‌سوزی سطحی، آن‌هایی هستند که مقاومت بالا به این تنش دارند، با قرق و عملیات حفاظتی، تاب‌آوری و نه مقاومت آن‌ها افزایش می‌یابد و به تکرار آتش‌سوزی واکنش منفی نشان می‌دهند. با رویکردهای جامع مدیریت آتش که پاسخ‌های خاص جامعه و استراتژی‌های حفاظت مؤثر را در برمی‌گیرد، به‌نظر می‌رسد چرای کنترل‌شده و نه قرق کامل باعث پایداری بیش‌تر این بوم‌سازگان‌ها در برابر آتش‌سوزی سطحی باشد. برای مدیریت آتش‌سوزی در آینده، بخصوص در جامعه تنگرس، ایجاد و حفظ مناطق حفاظت‌شده، کنترل چرای دام و پایش مستمر وضعیت پوشش گیاهی و شرایط جوی ضروری است.

منابع

1. Bond, W. J., & van Wilgen, B. W. (2012). *Fire and Plants*. Springer Science & Business Media, London.
2. Mirdeilami, T., Shataee, S., & Kavoosi, M. R. (2015). Forest fire risk zone mapping in the Golestan national park using regression logistic method. *J. of Wood and Forest Science and Technology*. 22, 1-16.
3. Karimi, S., & Pourbabaei, H. (2017). The effect of fire on structure and regeneration of woody species in the central Zagros forests ecosystem, case study: Bazazkhaneh strait forest area in Kermanshah province. *Forest and Range Protection Research*. 14, 122-135.
4. Gholamrezaei, A., Khosravi, M., & Pourreza, M. (2023). The Relationship between wildfire areas and physiographic features in the central Zagros vegetation area, Kermanshah province. *Ecology of Iranian Forest*. 10, 183-192.
5. Nazarporfard, K., Babaeipour, H., Salehi, A., & Pilehvar, B. (2020). Effects of fire in different time periods on the composition and diversity of soil seed banks in Lorestan oak forests. *Iranian J. of Forest*. 12, 61-73.
6. Azizi, L., Bazgir, M., Balou, M.M., & Heidari, M.M. (2018). Wildfire impact and forest and pasture land use on soil mesofauna community in Badreh-Ilam. *J. of Soil Biology*. 6, 83-92.
7. Alizadeh Aliabadi, A., & Siahmansour, R. (2023). An analysis of the fires in forests and pastures in Iran. Goals, consequences, and ways of prevention. *Iranian J. of Forest and Range Protection Research*. 20, 283-288.
8. Wang, W., Zhao, F., Wang, Y., Huang, X., & Ye, J. (2023). Seasonal differences in the spatial patterns of wildfire drivers and susceptibility in the southwest mountains of China. *Science of The Total Environment*. 869, 161782.

9. Agbeshie, A. A., Abugre, S., Atta-Darkwa, T., & Awuah, R. (2022). A review of the effects of forest fire on soil properties. *J. of Forestry Research*. 33, 1419-1441.
10. Azizi, M., Khosravi, M., & Pourreza, M. (2020). Frequency of fire incidence in relation to Zagros forests and rangelands physiography (Kermanshah Province) using MODIS Active Fire Data. *Iranian J. of Forest and Range Protection Research*, 18, 42-55.
11. DeRose, R. J., & Long, J. N. (2014). Resistance and resilience: A conceptual framework for silviculture. *Forest Science*. 60, 1205-1212.
12. Nimmo, D. G., Mac Nally, R., Cunningham, S. C., Haslem, A., & Bennett, A. F. (2015). Vive la résistance: reviving resistance for 21st century conservation. *Trends in Ecology & Evolution*. 30, 516-523.
13. Bond, W., & Keeley, J. (2005). Fire as a global 'herbivore': the ecology and evolution of flammable ecosystems. *Trends in Ecology & Evolution*. 20, 387-394.
14. Brooks, M. L., & Matchett, J. R. (2006). Spatial and temporal patterns of wildfires in the Mojave Desert, 1980–2004. *J. of Arid Environments*. 67, 148-164.
15. Bowman, D. M. J. S., Balch, J. K., Artaxo, P., Bond, W. J., Carlson, J. M., Cochrane, M. A., D'Antonio, C. M., DeFries, R. S., Doyle, J. C., Harrison, S. P. *et al.* (2009). Fire in the earth system. *Science*. 324, 481-484.
16. Omidipour, R., Ebrahimi, A., Tahmasebi, P., & Faramarzi, M. (2020). Grazing effects on the relationship between vegetation canopy cover and above-ground phytomass with vegetation indices in Sabzekouh region, Chaharmhal va Bakhtiari. *J. of Range and Watershed Management (Iranian J. of Natural Resources)*. 73, 33-47.
17. Mohammadian, A., Asadi Borujeni, E., Ebrahimi, A., Tahmasebi, P., & Naghipour, A. (2019). The combined effect of fire period and grazing intensity on plant species diversity indices in the semi-steppe rangeland of Chaharmahal and Bakhtiari province. *Iranian J. of Range and Desert Research*. 27, 84-97.
18. Naghipour, A., Nabizadeh, S., & Pourrezaei, J. (2019). Effects of fire on vegetation dynamics in semi-steppe rangelands (Case study: Buin va Miandasht rangelands, Isfahan province). *Iranian J. of Range and Desert Research*. 26, 587-598.
19. Anderies, J. M., Janssen, M. A., & Walker, B. H. (2002). Grazing Management, Resilience, and the Dynamics of a Fire-driven Rangeland System. *Ecosystems*. 5, 23-44.
20. Eftekhari, A., Goudarzi, M., Ashouri, P., & Khalifehzadeh, R. (2019). Changes in vegetation cover of Sirachal mountain rangelands due to fire. *Iranian J. of Range and Desert Research*. 26, 352-366.
21. Banihashemi, E., & Naghipour, A. (2020). Variation of plant functional groups in relation to fire in semi-steppe rangelands of Chaharmahal Va Bakhtiari province. *J. of Environmental Sciences and Technology*. 22, 99-110.
22. Iran Meteorological Organization. W.A.P.M.D., Partly available online at http://www.azmet.ir/. (2024).
23. Orwin, K. H., & Wardle, D. A. (2004). New indices for quantifying the resistance and resilience of soil biota to exogenous disturbances. *Soil Biology and Biochemistry*. 36, 1907-1912.
24. Cantarello, E., Newton, A. C., Martin, P. A., Evans, P. M., Gosal, A., & Lucash, M. S. (2017). Quantifying resilience of multiple ecosystem services and biodiversity in a temperate forest landscape. *Ecology and Evolution*. 7, 9661-9675.
25. Stephan, K., Miller, M., & Dickinson, M. B. (2010). First-order fire effects on herbs and shrubs: Present knowledge and process modeling needs. *Fire Ecology*. 6, 95-114.
26. Vilà, M., Lloret, F., Ogheri, E., & Terradas, J. (2001). Positive fire-grass feedback in Mediterranean Basin Woodlands. *Forest Ecology and Management*. 147, 3-14.

27. Davies, K. W., Rios, R. C., Bates, J. D., Johnson, D. D., Kerby, J., & Boyd, C. S. (2019). To burn or not to burn: Comparing reintroducing fire with cutting an encroaching conifer for conservation of an imperiled shrub-steppe. *Ecology and Evolution*. 9, 9137-9148.
28. Holden, Z., & Jolly, W. (2011). Modeling topographic influences on fuel moisture and fire danger in complex terrain to improve wildland fire management decision support. *Forest Ecology and Management*. 262, 2133-2141.
29. Floyd, M. L., Romme, W. H., & Hanna, D. D. (2000). Fire history and vegetation pattern in Mesa Verde national park, Colorado, USA. *Ecological Applications*. 10, 1666-1680.
30. Zackrisson, O. (1977). Influence of forest fires on the North Swedish boreal forest. *Oikos*. 29, 22-32.
31. Neffati, M., & Louhaichi, M. (2015). *Managing rangelands: promoting sustainable native shrub species "Calligonum comosum: the multipurpose sand dune stabilizer"*.
32. Bahalkeh, K., Abedi, M., Dianati tilaki, G. A., & Michalet, R. (2021). Fire slightly decreases in the short term the competitive effects of a thorny cushion shrub in a semi-arid mountain steppe. *Applied Vegetation Science*. 24p.
33. Rafiee, F., Jankju, M., & Ejtehadi, H. (2015). Investigation on tolerant, adapted, and sensitive plant traits to chronological wildfires in semiarid rangeland. *Iranian J. of Range and Desert Research*. 22, 73-85.
34. Sharifi, J., & Imani, A. A. (2006). An evaluation of the effect of controlled firing on plant cover change and variety composition in semi-steppe rangelands of Ardebil province (case study: Khalkhal preserved research rangeland). *Iranian J. of Natural Resources*. 59, 517-526.
35. Bowd, E. J., McBurney, L., & Lindenmayer, D. B. (2021). Temporal patterns of vegetation recovery after wildfire in two obligate seeder ash forests. *Forest Ecology and Management*. 496, 119409.
36. Easdale, M. H., Fariña, C., Hara, S., Pérez León, N., Umaña, F., Tittonell, P., & Bruzzone, O. (2019). Trend-cycles of vegetation dynamics as a tool for land degradation assessment and monitoring. *Ecological Indicators*. 107, 105545.
37. Qian, C., Qiang, H., Wang, F. & Li, M. (2021). Optimization of rocky desertification classification model based on vegetation type and seasonal characteristics. *Remote Sensing*. 13, 2935.