مجلهٔ جنگل ایران، انجمن جنگلبانی ایران
سال پانزدهم، شمارهٔ ۴، زمستان ۱۴۰۲
ص ۴۷۹-۴۶۱
*مقاله پژوهشی*

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22034/ijf.2023.366357.1903

# تجزیه‌وتحلیل عوامل مؤثر بر سلامت جنگل براساس رویکرد یکپارچهٔ DEMATEL-ANP (DANP) در حوضهٔ آبخیز ماسوله، استان گیلان

**رقیه جهدی[1*] و عطیه شهامتی‌نژاد[2]**

[1] دانشیار گروه علوم و مهندسی جنگل، دانشکدهٔ کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل
[2] کارشناسی ارشد علوم زیستی جنگل، دانشکدهٔ کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۸/۱۷؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۲/۲۵)

## چکیده

**مقدمه:** شاخص‌های سلامت جنگل گسترهٔ وسیعی از شاخص‌های فیزیکی محیط زیستی مانند اندازه‌گیری‌های اقلیمی و اکولوژیکی و سوابق مربوط به اقدامات انسانی و شیوه‌های مدیریتی در بوم‌سازگان‌های جنگلی را در بر می‌گیرد. هدف این پژوهش، بررسی روابط مابین شاخص‌های سلامت جنگل در تیپ جنگلی راش آمیخته شامل تنوع گونه‌های درختی، شرایط تاج درخت، شرایط تنهٔ درخت، خشکدار و زادآوری در سیمای سرزمین جنگلی در حوضهٔ آبخیز ماسوله در استان گیلان است.

**مواد و روش‌ها:** در این پژوهش، چگونگی روابط شاخص‌های سلامت جنگل در منطقهٔ پژوهش با استفاده از رویکرد ترکیبی DEMATEL-ANP (DANP) بررسی شده است. جمع‌آوری داده‌ها براساس دو پرسشنامهٔ محقق‌ساخته انجام پذیرفت که روایی و پایایی آنها به‌ترتیب با روایی محتوایی و آزمون مجدد بررسی شده است. در نهایت مطابق نظر خبرگان، مهم‌ترین شاخص‌های ورودی در روش DEMATEL و شاخص‌های خروجی در روش ANP رتبه‌بندی شدند. در این پژوهش از تعداد نمونهٔ دوازده نفر از خبرگان استفاده شد.

**یافته‌ها:** نتایج DEMATEL حاکی از اهمیت نقش شاخص زادآوری در وضعیت سلامت جنگل در منطقهٔ پژوهش است و شاخص مذکور با بیشترین اثرپذیری شناسایی شده است. دو شاخص تنوع درختی و خشکدار نیز دارای اثرپذیری زیاد نسبت به دیگر شاخص‌های بررسی‌شده است. همچنین شاخص‌های تنوع درختی و شرایط تاج نیز با بیشترین اثرگذاری شناسایی شده‌اند. براساس نتایج رتبه‌بندی معیارها در ANP، معیار تنوع درختی در مقایسه با دیگر معیارها تأثیر مهم‌تری بر سلامت جنگل دارد. افزون‌بر این، نهال سالم، خشکیدگی تاج و خشکدار سرپا از مهم‌ترین زیرمعیارها در مقایسه با دیگر زیرمعیارها در منطقهٔ پژوهش هستند.

**نتیجه‌گیری:** این نتایج می‌تواند اثر مهمی در افزایش آگاهی دربارهٔ عوامل مؤثر بر وضعیت سلامت جنگل‌ها و علل جنگل‌های ناسالم داشته باشد و نیز به سیاستگذاران کمک کند تا شناسایی اقدامات مناسب برای حفظ و بهبود سلامت جنگل و در نتیجه افزایش پایداری بوم‌سازگان‌های جنگلی را امکان‌پذیر کنند.

**واژه‌های کلیدی:** بوم‌سازگان، پایداری، پرسشنامه، رویکرد یکپارچه، شاخص سلامت جنگل.

## مقدمه

براساس پژوهش ارزیابی بوم‌سازگان هزاره[1]، امروزه سلامت بوم‌سازگان‌های جهانی به‌طور معنی‌داری کاهش یافته است. به‌طوری که در چهار دههٔ اخیر ۶۲ درصد از خدمات این بوم‌سازگان‌ها کاهش چشمگیری را نشان می‌دهد (MEA, 2005). به‌ویژه در بوم‌سازگان‌های جنگلی، عواملی که بر سلامت و شادابی جنگل آثار مخرب دارند در مقیاس مکانی و

* نویسندهٔ مسئول
شمارهٔ تماس: ۰۹۱۱۲۳۴۰۲۴۹
ایمیل: roghayeh.jahdi@uma.ac.ir

1. Millennium Ecosystem Assessment

زمانی متفاوت‌اند و شناسایی این عوامل و ارزیابی آثار آنها آسان نیست. برخی از مسائل ناشی از این کاهش خدمات بوم‌سازگان‌ها عبارت‌اند از آتش‌سوزی‌ها، آفات و بیماری‌ها، گونه‌های مهاجم، تصرف و تخریب اراضی جنگلی، آلودگی هوا و تغییرات اقلیمی مانند خشکسالی، یخبندان، توفان و سیل. پیچیدگی و ارتباط متقابل این عوامل و آثار آنها بر سلامت و شادابی جنگل‌ها، سبب دشواری شناسایی آنها شده و تأثیرات غیرمستقیم آنها نیز ممکن است بسیار دور از دسترس باشد و ابعاد مختلف اقتصادی، اجتماعی و محیط زیستی را در بر گیرد. به‌منظور درک بهتر آثار مختلف عوامل تنش‌زا و آشفتگی و حمایت از مدیران جنگل، تصمیم‌گیرندگان و سیاستمداران در تصمیم‌گیری‌های خود در مورد مدیریت جنگل، یک رویکرد جامع ضروری است که شامل ثبت داده‌ها، پایش، تجزیه‌وتحلیل و ارزیابی سلامت جنگل در تمام سطوح نظارتی از طریق هماهنگی جهانی مؤثر در مشاهدات، شاخص‌ها و سناریوهای مختلف تنوع زیستی و خدمات بوم‌سازگان است (Lausch et al., 2017). همچنین در دهه‌های اخیر، ایدهٔ «ارزیابی سلامت» به‌منزلهٔ الگویی مناسب برای ارزیابی وضعیت بوم‌سازگان‌ها مطرح شده است (Fengiin et al., 2004). سلامت جنگل، بیانگر شرایط جنگل است که بتواند عملکرد این بوم‌سازگان را به‌درستی مطابق با عملکردهای از پیش تعیین‌شدهٔ آن انجام دهد و بتواند امنیت سرمایه‌گذاری و تولید را تضمین کند، درحالی که آسیب یا آشفتگی‌ها را زیر سطح مقبولی نگه دارد تا اطمینان حاصل شود که دیگر عملکردهای جنگل برای دستیابی به اصل مدیریت پایدار جنگل فراهم شده است. بنابراین حفظ سلامت جنگل برای به حداقل رساندن از دست دادن جنگل و تنوع زیستی و افزایش پایداری حیاتی است.

در دهه‌های گذشته، شیوه‌های ارزیابی سلامت جنگل در پاسخ به مسائل بوم‌شناختی و نیاز برای افزایش اثربخشی حفاظت و حمایت از جنگل‌ها و نیز تعیین بهترین نحوهٔ بهره‌برداری از منابع محدود جنگلی در زمینهٔ مدیریت پایدار جنگل توسعه یافته است. افزون‌بر این، تصمیم‌گیری با استفاده از دانش علمی از طریق تلاش گروهی چندتخصصی در مدیریت جنگل ضروری است که با تغییر فناوری اطلاعات و ارتباطات، فرایندهای تصمیم‌گیری بازتر و پیچیده‌تر شده است. بنابراین نیاز به توسعهٔ راهبردهای مدل‌سازی جدید، الگوریتم‌ها و روش‌های راه‌حلی دارد که نیازمندی‌های مکانی، برنامه‌ریزی چندمنبعی، سیستم‌های سلسله‌مراتبی، اهداف مختلف و عدم قطعیت را در ارتباط با بوم‌سازگان‌های جنگلی در بر می‌گیرند (Ezquerro et al., 2016). جنگل‌ها در مناطق مختلف با برخی از سطوح آشفتگی سازگاری دارند، اما اکنون بیشتر جنگل‌ها با تنش‌هایی در ابعاد مختلف سلامت جنگل روبه‌رو هستند. تشخیص چگونگی تشدید این تنش‌ها و عوامل اثرگذار بر شاخص‌های سلامت جنگل که در روند حفظ و توسعه جنگل‌ها تأثیر خواهد گذاشت، یک چالش بزرگ علمی است که نیازمند پژوهش‌های عملیاتی در زمینهٔ بهینه‌سازی مدیریت جنگل و نیز توسعهٔ روش‌ها برای ارزیابی شاخص‌های سلامت جنگل‌ها و تجزیه‌وتحلیل عوامل مؤثر بر سلامت جنگل است. ارزیابی شاخص‌های سلامت جنگل شامل تنوع گونه‌های درختی، شرایط تاج درخت، شرایط تنهٔ درخت، خشک‌دار و زادآوری در پژوهش‌های قبلی در حوضهٔ آبخیز جنگلی ماسوله در شمال ایران با استفاده از روش پایش سلامت جنگل (FHM[1]؛ USDA Forest Service, 2020) انجام گرفته است (Shahamati Nejad et al., 2022a, 2022b) و در این پژوهش به تجزیه‌وتحلیل روابط بین این شاخص‌های سلامت جنگل در این حوضه پرداخته می‌شود. ارزیابی شاخص‌های سلامت جنگل و تشخیص عوامل مؤثر بر آنها که می‌تواند به شناسایی آستانه‌های کاهش سریع جنگل منجر شود بسیار مهم است، زیرا بازیابی و

1. Forest Health Monitoring

احیای خدمات جنگل ممکن است سال‌ها به طول انجامد (Trumbore et al., 2015).

به‌منظور ارزیابی سلامت، برنامهٔ FHM از بدو تأسیس در سال ۱۹۹۰ در ایالت نیوانگلند گسترش یافته و تمام اراضی جنگلی ایالات متحده را در بر گرفته است. این برنامه از داده‌های زمینی (نمونه‌برداری)، نقشه‌برداری، بررسی‌های هوایی و دیگر منابع داده‌های زیستی و غیرزیستی استفاده می‌کند و رویکردهای تحلیلی را برای رسیدگی به موضوعات سلامت جنگل که پایداری بوم‌سازگان‌های جنگل را تحت تأثیر قرار می‌دهد توسعه می‌دهد. همچنین برنامهٔ پایش سلامت جنگل یک برنامهٔ بلندمدت و ملی است که تلاش می‌کند اطلاعات علمی کاملاً منطقی و مطابق با الزامات قانونی و نیز نیازهای آمایش سرزمین، تحقیقات و سیاست‌ها را ارائه دهد (USDA Forest Service, 2015). این برنامه از رویکردی سه‌جانبه شامل ۱. پایش فرایند شناسایی؛ ۲. پایش فرایند ارزشیابی؛ و ۳. پایش جامع منطقه استفاده می‌کند که به‌کمک آن پژوهش‌های تدریجی دقیق‌تری برای ارزیابی سلامت جنگل‌ها انجام می‌گیرد. این برنامه روشی برای نظارت، ارزیابی و گزارش وضعیت فعلی، تغییرات و روند بلندمدت سلامت بوم‌سازگان جنگل با استفاده از شاخص‌های بوم‌شناختی سنجش‌پذیر است. ارزیابی این شاخص‌ها می‌تواند شرایط جنگل را به روشی جامع توصیف کند. در این روش از دادهٔ حاصل از پیمایش‌ها و پلات‌های زمینی و دیگر منابع دادهٔ زنده و غیرزنده استفاده می‌شود و روش‌های تحلیلی برای پرداختن به موضوعات سلامت جنگل که بر پایداری بوم‌سازگان‌های جنگلی اثر می‌گذارد توسعه می‌یابد (USDA Forest Service, 2020). توسعهٔ این روش پایش سلامت جنگل در ایالات متحدهٔ آمریکا انجام گرفته است، اما استفادهٔ زیادی از این روش به‌منظور ارزیابی و پایش بوم‌سازگان‌های جنگل در مناطق مختلف جهان شده است (Juknys & Augustaitis, 1998; Westfall et al., 2009; Woodall et al., 2011; Potter & Conkling, 2015; Lausch et al., 2017). این روش که برمبنای انتخاب نمونهٔ هدفمند و نمونه‌برداری خوشه‌ای است، از نخستین پژوهش‌ها در جنگل‌های ایران است که توسط Shahamati Nejad et al. (2022a, 2022b) انجام گرفته است. در این پژوهش‌ها پایش سلامت جنگل برای تعیین شرایط فعلی سیمای سرزمین جنگلی در حوضهٔ آبخیز ماسوله در شمال ایران انجام گرفته است. شاخص‌های سلامت جنگل در تیپ جنگلی راش آمیخته شامل تنوع گونه‌های درختی، شرایط تاج درخت، شرایط تنهٔ درخت، خشک‌دار و زادآوری معرفی و اندازه‌گیری شد. شایان ذکر است که این شاخص‌های پایش سلامت جنگل به‌عنوان متغیرهای این پژوهش، در تحقیق قبلی در منطقهٔ پژوهش توسط Shahamati Nejad (2022a) et al. شناسایی و اندازه‌گیری شده‌اند. در ادامهٔ تحقیق قبلی در این منطقه، این پژوهش با هدف شناسایی شاخص‌های بوم‌شناختی مرتبط با سلامت جنگل و روابط بین آنها در بوم‌سازگان جنگلی در حوضهٔ آبخیز ماسوله در استان گیلان انجام گرفته است. شکاف‌های دانش دربارهٔ نقش شاخص‌های سلامت جنگل مانند تنوع زیستی و خشک‌دار در خدمات بوم‌سازگان هنوز به‌طور کامل در راهبردهای حفاظت و بازسازی جنگل ادغام نشده است. نتایج این پژوهش به اولویت‌بندی روش‌ها در حفاظت یا بازسازی برای حفظ سلامت جنگل و خدمات آن کمک می‌کند. در این پژوهش یک مدل ترکیبی تصمیم‌گیری چندمعیاره برای زمانی که تعداد معیارها زیاد و بین آنها روابط یا وابستگی برقرار باشد ارائه شده است. در این مدل از روش DEMATEL[1] به‌منظور تعیین ساختار روابط بین معیارها و از روش ANP[2] برای شناسایی وزن هر یک از معیارها استفاده شده است. مدل ترکیبی پیشنهادی می‌تواند به مدیران و کارشناسان سازمان‌های ذی‌نفع در بهبود انتخاب‌های خود به‌ویژه زمانی که تعداد

1. Decision-Making Trial and Evaluation Laboratory
2. Analytic Network Process

معیارها زیاد است و بین آنها وابستگی وجود دارد، تحت شرایط عدم اطمینان کمک کند. همچنین روش پیشنهادی، تعداد ماتریس‌های مقایسهٔ زوجی و حجم محاسبه‌ها را کاهش و سرعت محاسبه‌ها را افزایش داده و از پیچیدگی مسئله کاسته است. در نهایت این پژوهش با نشان دادن اهمیت نسبی شاخص‌های مختلف سلامت جنگل می‌تواند به سیاستگذاران و تصمیم‌گیران در تعیین اولویت‌های حفاظتی، تعریف و اجرای سیاست‌های مناسب و درخور حفاظت و توسعهٔ این جنگل‌ها کمک کند.

## مواد و روش‌ها

### منطقهٔ پژوهش

منطقهٔ پژوهش حوضهٔ آبخیز ماسوله در استان گیلان است که مشخصات کامل آن در تحقیق قبلی توسط Shahamati Nejad et al. (2022a) ارائه شده است.

### شیوهٔ اجرای پژوهش

پژوهش حاضر به لحاظ هدف از نوع کاربردی است که در سه مرحله انجام گرفت. در مرحلهٔ نخست با مطالعهٔ ادبیات موضوع و پیشینهٔ تحقیق، معیارها و زیرمعیارهای درونی اثرگذار بر شرایط سلامت جنگل شناسایی شد؛ به‌نحوی که معیارهای تنوع درختی (با زیرمعیارهای تنوع شانون- وینر، سیمپسون، یکنواختی پیلو و غنای مارگالف)، شرایط تاج (با زیرمعیارهای قطر تاج و خشکیدگی تاج)، شرایط تنه (با زیرمعیارهای شرایط خوب، متوسط و ضعیف تنه)، خشکدار (با زیرمعیارهای خشکدار سرپا و افتاده) و زادآوری (با زیرمعیارهای نهال سالم و ناسالم) در این پژوهش انتخاب شد. در مرحلهٔ دوم، این شاخص‌های شناسایی‌شده توسط خبرگان بررسی و پالایش شده و نهایی شد. در مرحلهٔ سوم، با استفاده از ابزار میدانی شامل دو پرسشنامه، بررسی روابط بین این شاخص‌های نهایی‌شدهٔ مؤثر بر سلامت جنگل و محاسبهٔ وزن معیارها و زیرمعیارها براساس رویکرد ترکیبی DEMATEL-ANP (DANP) انجام گرفت.

جامعهٔ آماری پاسخگویان به پرسشنامهٔ DANP مدیران و کارشناسان جنگل- متخصصان دانشگاهی در حوزهٔ مدیریت جنگل بودند. با توجه به اینکه این روش مبتنی بر نظر خبرگان است و متکی به تعداد نمونه نیست، تعداد نمونه بیش از ۵ در آن مورد قبول است (Rezapour et al., 2020). بنابراین در این پژوهش از تعداد نمونه ۱۲ نفر از خبرگان استفاده شد.

### روش DEMATEL

برای اجرای این تحقیق، در ابتدا روش DEMATEL (Gabus & Fontela, 1973)، به‌عنوان یک فن تصمیم‌گیری چندمعیاری برای شناسایی مؤلفه‌های زنجیرهٔ علّی- معلولی در سه گام زیر انجام گرفت:

گام ۱- تهیهٔ ماتریس اثر مستقیم (X): برای سنجش روابط میان پنج شاخص انتخاب‌شده به کمک خبرگان (تنوع درختی، شرایط تاج درخت، شرایط تنه درخت، خشکدار و زادآوری)، از یک مقیاس مقایسه‌ای پنج سطحی (۰- بدون تأثیر، ۱- تأثیر خیلی کم، ۲- تأثیر کم، ۳- تأثیر زیاد و ۴- تأثیر خیلی زیاد) استفاده شد. سپس نظر خبرگان در ارتباط با انجام مقایسه‌های زوجی دریافت و ثبت شد. حاصل این مرحله یک ماتریس اثر مستقیم (X) به‌صورت ارائه‌شده در رابطهٔ ۱ است:

$$X = \begin{bmatrix} 0 & \cdots & X_{n1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ X_{1n} & \cdots & 0 \end{bmatrix}$$ رابطهٔ ۱

گام ۲- تهیهٔ ماتریس اثر جامع (اثر مستقیم نرمال‌شده- N): از طریق رابطهٔ N= X×K می‌توان ماتریس اثر مستقیم X را به ماتریس اثر مستقیم نرمال‌شده (N) تبدیل کرد. در این رابطه K به‌صورت زیر محاسبه می‌شود (رابطهٔ ۲):

$$K = \frac{1}{max\sum_{j=1}^{n} a_{ij}}$$ رابطهٔ ۲

گام ۳: تهیهٔ ماتریس اثر کل (T): ماتریس اثر کل (T) با استفاده از رابطهٔ $T=N\times(I-N)^{-1}$ محاسبه می‌شود که در آن I ماتریس همانی یا یکه است.

گام ۴: تهیهٔ نمودار علّی: مجموع عناصر سطرها (D) و ستون‌ها (R) در ماتریس اثر کل (T) که به‌ترتیب معرف میزان تأثیرگذاری آن عامل بر دیگر عامل‌ها و میزان تأثیرپذیری آن عامل از دیگر عامل‌هاست محاسبه می‌شود. سپس مقدار محور افقی نمودار (محور اهمیت) از طریق رابطهٔ (D+R) و محور عمودی نمودار (محور وابستگی) از طریق رابطهٔ (D-R) محاسبه می‌شود. از این طریق معیارها به دو گروه علت و معلول تقسیم می‌شود. به‌نحوی که با مثبت بودن (D-R)، معیار مربوط، به گروه علت و در غیر این‌صورت، به گروه معلول تعلق دارد. بنابراین، نمودار علّی گرافیکی از طریق رسم نقاطی با مختصات (D+R, D-R)به‌دست می‌آید.

**روش تحلیل شبکه‌ای (ANP)**

پس از تعیین مهم‌ترین معیارهای تحت بررسی و تعیین روابط داخلی آنها از طریق روش DEMATEL، به‌منظور اولویت‌بندی هر یک از این معیارها از روش تحلیل شبکه‌ای (ANP) که براساس مقایسه‌های زوجی و نظر خبرگان است، استفاده شد (Saaty, 1980). روش ANP نیز در تحقیق حاضر به‌شرح زیر انجام گرفت:

گام ۱- تشکیل ماتریس‌های مقایسه‌های زوجی و تعیین بردارهای وزنی: ساخت مدل فرایند تحلیل شبکه‌ای مستلزم شناخت روابط و آثار متقابل میان معیارها و زیرمعیارهای مسئله است تا واقعی‌ترین حالت از شبکه ایجاد شود که در مرحلهٔ پیشین از طریق DEMATEL و با نظرهای خبرگان استخراج شد. تعیین اوزان نهایی به کمک روش ANP شامل استخراج بردارهای وزنی و تشکیل ابرماتریس است. در این مرحله ماتریس‌های مقایسه‌ای معیارهای اصلی، وابستگی معیارهای اصلی به یکدیگر و زیرمعیارها تشکیل شده و سازگاری آنها نیز کنترل می‌شود. شایان ذکر است که در هر مرحله از محاسبات و مقایسه‌های زوجی، از برقراری رابطهٔ $IR\leq 0.1$ اطمینان حاصل شده و ماتریس‌های زوجی دارای نرخ سازگاری مناسبی هستند. این مراحل به‌شرح زیر توضیح داده می‌شوند:

مقایسه‌های زوجی معیارهای اصلی: مقایسه‌های زوجی معیارهای اصلی پنج‌گانه بر اساس مقیاس ۱ تا ۹ کمیتی saaty (1980) و به همان ترتیب استفاده‌شده در فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) انجام می‌گیرد.

مقایسه‌های زوجی وابستگی درونی معیارهای اصلی: برای درک وابستگی‌های متقابل بین معیارهای اصلی، مقایسهٔ زوجی بین معیارهای اصلی برای دستیابی به عناصر ماتریس ($W_{22}$) و براساس مقیاس ۱ تا ۹ کمیتی saaty (1980) انجام می‌شود.

مقایسه‌های زوجی زیرمعیارهای هر یک از معیارهای اصلی: ضریب اهمیت هر یک از زیرمعیارهای مربوط به معیارهای اصلی پنج‌گانه از طریق مقایسه‌های زوجی آنها به‌دست آمد. این ضرایب اهمیت، عناصر ستونی ماتریس $W_{32}$ تشکیل خواهند داد.

گام ۲- محاسبه‌های ابرماتریس: در مدل ANP، محاسبه‌های مربوط به ابرماتریس‌ها در سه مرحله انجام می‌گیرد. ابتدا مقادیر وزن محاسبه‌شده برای همهٔ مقایسه‌های زوجی به ماتریسی که در اصطلاح ابرماتریس فاقد وزن نام دارد، وارد می‌شود. سپس ابرماتریس دارای وزن از حاصل‌ضرب مقادیر ابرماتریس فاقد وزن در مقادیر متناظر ماتریس مقایسه‌های معیارها محاسبه می‌شود. مقادیر ماتریس وزن داده‌شده استاندارد می‌شود، به‌طوری که مجموع مقادیر ستون‌های ماتریس برابر عدد ۱ شود. در مرحلهٔ سوم و آخر، ابرماتریس حد که در آن مقادیر ماتریس در ستون‌ها با هم برابر است محاسبه می‌شود.

گام ۳- رتبه‌بندی ANP: با تشکیل ابرماتریس حدی، می‌توان با مراجعه به آن گزینهٔ برتر، گزینه‌ای را انتخاب کرد که بیشترین اولویت کلی را داشته باشد.

**طراحی پرسشنامه‌ها و جمع‌آوری داده‌ها**

در ابتدا طراحی مجموعه‌های انتخاب و جانمایی آنها در پرسشنامه‌های آزمون انتخاب انجام گرفت. برای بررسی روایی[1] پرسشنامه‌ها از نظر کارشناسان و خبرگان در این زمینه (از اعضای هیأت علمی دانشگاه و مراکز تحقیقاتی به‌همراه کارشناسان منابع طبیعی و محیط زیست کشور) استفاده و در خصوص اعتبار سؤال‌ها و سناریوهای مطرح‌شده از آنان سؤال شد. با توجه به نمونهٔ جمع‌آوری‌شده، پایایی[2] دو پرسشنامهٔ تهیه‌شده با ضریب آلفای کرونباخ[3]، ۰/۷۸ محاسبه شد که برداشت پاسخ‌دهندگان از سؤال‌ها را تا حد قابل قبولی یکسان نشان داد.

در این پژوهش، تکمیل پرسشنامه‌ها به‌صورت حضوری و مصاحبهٔ رودررو با افراد در ماه‌های خرداد و تیر ۱۴۰۱ انجام گرفت. پس از پر کردن پرسشنامه‌ها، از نرم‌افزار اکسل برای ایجاد پایگاه داده استفاده شد. سپس روش DEMATEL در نرم‌افزار اکسل پیاده شده و برای اجرای روش ANP داده‌ها وارد نرم‌افزار Super decision شد.

## نتایج

**روش تحلیل DEMATEL**

در مرحلهٔ اول از کارشناسان خواسته شد تا سطح تأثیر مستقیم بین شاخص‌های انتخابی در این پژوهش را با استفاده از دامنه ۰ تا ۴ نشان دهند. برای تجزیه‌وتحلیل روابط متقابل بین پنج شاخص سلامت جنگل، از DEMATEL برای محاسبه تأثیر علّی هر شاخص استفاده شد. ابتدا یک ماتریس اثر مستقیم با استفاده از مقایسهٔ زوجی نظرهای متخصصان از نظر جهت و تأثیر بین عوامل ایجاد شد (جدول ۱). ماتریس اثر مستقیم نرمال‌شده برای ترکیب همهٔ رتبه‌بندی‌های متخصصان توسعه داده شده است (جدول ۲). سپس، ماتریس اثر کل که نشان‌دهندهٔ تأثیر کل بین عوامل است، براساس ماتریس اثر مستقیم نرمال‌شده محاسبه شد (جدول ۳).

در مرحلهٔ آخر، نمودار علّی و نقشهٔ روابط شبکه از جدول‌های ۴ و ۵ به‌دست آمد. برای ساختن یک نقشه روابط شبکهٔ مناسب، تصمیم‌گیرندگان باید یک ارزش آستانه برای سطح اثر تعیین کنند. در این پژوهش ارزش آستانه ۰/۷۹۷ تعیین شد. شایان ذکر است که براساس نظر خبرگان، از ماتریس اثر کل، تنها روابطی که بیشترین تأثیر را دارند انتخاب می‌شوند. تمام مقادیر در ماتریس اثر کل (T) که کوچک‌تر از ۰/۷۹۷ هستند صفر در نظر گرفته می‌شوند، یعنی آن رابطهٔ علّی لحاظ نمی‌شود. مدل روابط معنادار در جدول زیر ارائه شده است.

با توجه به جدول ۵، می‌توان به رتبه‌بندی عامل‌های کلیدی از دو جنبهٔ اهمیت و خالص تأثیرگذاری پرداخت (جدول ۶).

بر اساس داده‌های ستون D در جدول ۵، شاخص‌های تنوع درختی و شرایط تاج دارای بیشترین میزان اثرگذاری بر دیگر شاخص‌های سلامت جنگل هستند (در مجموع معادل ۴۵/۸ درصد). این در حالی است که تنوع درختی با ۲۳/۵ درصد بیشترین درجه تأثیر و زادآوری با ۱۶/۶ درصد کمترین میزان تأثیر را در دیگر شاخص‌های سلامت جنگل دارا هستند. روشن است که دامنهٔ نفوذ شاخص بالا تقریباً دوبرابر دامنهٔ نفوذ شاخص پایین است. به همین ترتیب، طبق داده‌های ستون R در جدول ۵، مشخص شد که شاخص‌های زادآوری، تنوع درختی و نیز خشکدار دارای بیشترین اثرپذیری از دیگر شاخص‌های سلامت جنگل هستند (در مجموع ۶۶/۲ درصد). این درحالی است که زادآوری با ۲۸/۱ درصد بیشترین درجهٔ تأثیرپذیری و شرایط تاج با ۱۶/۸ درصد کمترین تأثیرپذیری را در میان دیگر شاخص‌های سلامت جنگل دارا هستند. روشن است که دامنهٔ نفوذپذیری شاخص بالا چیزی کمتر از دوبرابر دامنهٔ نفوذ شاخص پایین است. افزون‌بر این، جدول ۶ و نمودار اثر علّی در شکل

1. Validity
2. Reliability
3. Cronbach alpha

۱ نشان می‌دهد که در بین پنج شاخص، شاخص زادآوری بیشترین اهمیت (۸/۹۱) را دارد و شاخص‌های تنوع درختی، شرایط تاج، خشکدار و شرایط تنه به‌ترتیب در درجه‌های بعدی اهمیت قرار دارند.

بر اساس جدول ۷، مشخص شد که شاخص زادآوری شاخصی با برایند اثرپذیری از دیگر شاخص‌ها در سامانه روابط علّی-معلولی شاخص‌های سلامت جنگل است. این شاخص دارای کمترین مقدار (Pi) با (۲/۲۷۹-) است که آسیب‌پذیرترین شاخص در برابر نفوذ است. در مقابل دیگر شاخص‌ها برایندی اثرگذار دارند که در صدر آنها شاخص شرایط تاج قرار دارد. به‌طور مشخص آن‌گونه که از شکل ۲ دربارهٔ رابطهٔ علّی- معلولی میان شاخص‌ها برمی‌آید شاخص شرایط تاج، شاخصی است که از هیچ شاخصی تأثیر نمی‌پذیرد، اما بر سه شاخص تنوع درختی، شرایط تنه و زادآوری تأثیر می‌گذارد.

جدول ۱- ماتریس اثر مستقیم (X)

Table 1. Direct relation matrix (X)

| زادآوری Regeneration | خشکدار Deadwood | شرایط تنه Stem Condition | شرایط تاج Crown Condition | تنوع درختی Tree Diversity | |
|---|---|---|---|---|---|
| 3.5 | 2.5 | 2 | 1.5 | 0 | Tree Diversity |
| 3.5 | 1.5 | 3 | 0 | 1 | Crown Condition |
| 1.5 | 1 | 0 | 3 | 1.5 | Stem Condition |
| 3 | 0 | 0.5 | 1 | 2.5 | Deadwood |
| 0 | 1.5 | 1 | 1 | 2.5 | Regeneration |

جدول ۲- ماتریس اثر جامع (اثر مستقیم نرمال‌شده-N)

Table 2. The normalized direct-relation matrix (N)

| زادآوری Regeneration | خشکدار Deadwood | شرایط تنه Stem Condition | شرایط تاج Crown Condition | تنوع درختی Tree Diversity | |
|---|---|---|---|---|---|
| 0.368 | 0.263 | 0.211 | 0.158 | 0 | Tree Diversity |
| 0.368 | 0.158 | 0.316 | 0 | 0.105 | Crown Condition |
| 0.158 | 0.105 | 0 | 0.316 | 0.158 | Stem Condition |
| 0.316 | 0 | 0.053 | 0.105 | 0.263 | Deadwood |
| 0 | 0.158 | 0.105 | 0.105 | 0.263 | Regeneration |

جدول ۳- ماتریس اثر کل (T)

Table 3. The total relation matrix (T)

| زادآوری Regeneration | خشکدار Deadwood | شرایط تنه Stem Condition | شرایط تاج Crown Condition | تنوع درختی Tree Diversity | |
|---|---|---|---|---|---|
| 1.371 | 0.903 | 0.821 | 0.784 | 0.811 | Tree Diversity |
| 1.301 | 0.78 | 0.873 | 0.63 | 0.857 | Crown Condition |
| 1.026 | 0.653 | 0.554 | 0.789 | 0 | Stem Condition |
| 1.114 | 0.554 | 0.567 | 0.595 | 0.854 | Deadwood |
| 0.782 | 0.634 | 0.561 | 0.555 | 0 | Regeneration |

جدول ۴- ماتریس اثر کل با در نظر گرفتن ارزش آستانه

Table 4. The total- relationships matrix by considering the threshold value

| زادآوری Regeneration | خشکدار Deadwood | شرایط تنه Stem Condition | شرایط تاج Crown Condition | تنوع درختی Tree Diversity | |
|---|---|---|---|---|---|
| 1.371 | 0.903 | 0.821 | 0 | 0.811 | Tree Diversity |
| 1.301 | 0 | 0.873 | 0 | 0.857 | Crown Condition |
| 1.026 | 0 | 0 | 0 | 0 | Stem Condition |
| 1.114 | 0 | 0 | 0 | 0.854 | Deadwood |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | Regeneration |

جدول ۵- نتیجهٔ نهایی

Table 5. The final output

| D | R | خالص تأثیرگذاری ($E_i$) D-R | میزان اهمیت ($P_i$) D+R | کد Code | معیار Criteria | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 4.69 | 4.075 | 0.615 | 8.764 | C1 | Tree Diversity | تنوع درختی |
| 4.441 | 3.353 | 1.088 | 7.794 | C2 | Crown Condition | شرایط تاج |
| 3.791 | 3.375 | 0.416 | 7.166 | C3 | Stem Condition | شرایط تنه |
| 3.684 | 3.524 | 0.16 | 7.209 | C4 | Deadwood | خشک‌دار |
| 3.314 | 5.593 | -2.279 | 8.907 | C5 | Regeneration | زادآوری |

جدول ۶- رتبه‌بندی عوامل از نظر میزان اهمیت (Pi)

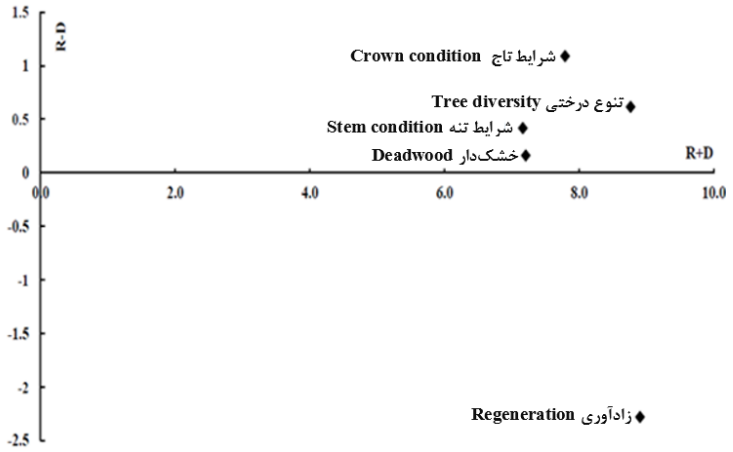
Table 6. Ranking factors by importance ($P_i$)

| رتبه‌بندی Ranking | میزان اهمیت $P_i$ | معیار Criteria | | کد Code |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 8.907 | Regeneration | زادآوری | C5 |
| 2 | 8.764 | Tree Diversity | تنوع درختی | C1 |
| 3 | 7.794 | Crown condition | شرایط تاج | C2 |
| 4 | 7.209 | Deadwood | خشک‌دار | C4 |
| 5 | 7.166 | Stem condition | شرایط تنه | C3 |

جدول ۷- رتبه‌بندی عوامل از نظر خالص تأثیرگذاری (Ei)

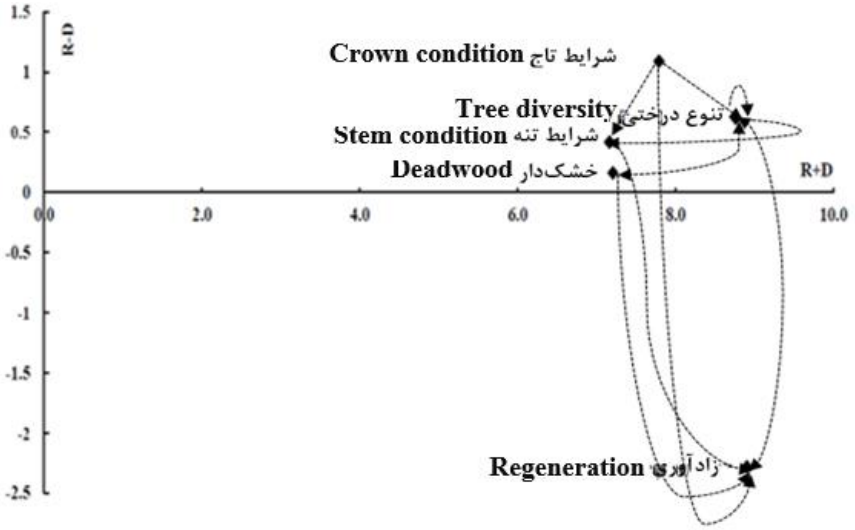
Table 7. Ranking factors by net effectiveness (Ei)

| رتبه‌بندی Ranking | میزان تأثیرگذاری $E_i$ | معیار Criteria | | کد Code |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 1.088 | Crown condition | شرایط تاج | C2 |
| 2 | 0.615 | Tree diversity | تنوع درختی | C1 |
| 3 | 0.416 | Stem condition | شرایط تنه | C3 |
| 4 | 0.16 | Deadwood | خشک‌دار | C4 |
| 5 | -2.279 | Regeneration | زادآوری | C5 |




شکل ۱- نمودار اثر علّی

Figure 1. Cause-effect diagram




شکل ۲- نمودار کلی رابطه علّی- معلولی DEMATEL (نقشهٔ روابط شبکه)
Figure 2. Overall DEMATEL prominence-causal relationship diagram

شکل ۲ مدل روابط معنادار را به‌صورت نموداری نشان داد که در آن مقادیر (D+R) در محور افقی و مقادیر (D-R) در محور عمودی قرار می‌گیرند. موقعیت و اثر متقابل هر عامل با یک نقطه در مختصات ( D + R, D-R) توسط سیستم مختصات تعیین می‌شود. با توجه به نمودار و جدول بالا، هر یک از عوامل را می‌توان براساس جنبه‌های زیر ارزیابی کرد:

- بردار افقی (D + R) نشان‌دهندهٔ درجهٔ اهمیت بین هر عامل در کل سیستم است. به‌عبارت دیگر، ( D + R) هم تأثیر عامل i را بر کل سیستم و هم تأثیر دیگر عوامل سیستم را بر این عامل نشان می‌دهد. از نظر درجهٔ اهمیت، زادآوری در رتبه اول و تنوع درختی، شرایط تاج، خشک‌دار و شرایط تنه در رتبه‌های بعدی قرار دارند.

- بردار عمودی (D-R) میزان تأثیر یک عامل بر سیستم را نشان می‌دهد. به‌طور کلی، مقدار مثبت D-R نشان‌دهندهٔ یک متغیر علّی و مقدار منفی D-R نشان‌دهندهٔ یک اثر است. در این تحقیق تنوع درختی، شرایط تاج، شرایط تنه و خشک‌دار به‌عنوان متغیر علّی، زادآوری به‌عنوان یک اثر در نظر گرفته شده است.

**- تجزیه‌وتحلیل ANP**

در مرحلهٔ نخست تجزیه‌وتحلیل ANP، تشکیل ماتریس‌های مقایسه‌های زوجی و تعیین بردارهای وزنی انجام گرفت. نتیجهٔ مقایسه‌های زوجی معیارهای اصلی و همچنین بردارهای موزون حاصل از آن ($W_{21}$) در جدول ۸ ارائه شده است. ارزش بیشتر در مقایسهٔ زوجی نشان می‌دهد که معیار تأثیر بیشتری بر سلامت جنگل دارد.

در ارتباط با مقایسه‌های زوجی وابستگی درونی معیارهای اصلی، برای نحوهٔ محاسبهٔ ضریب اهمیت هر یک از معیارهای اصلی (با توجه به وابستگی متقابل بین آنها)، مقایسه زوجی معیارهای اصلی چهارگانهٔ دیگر (با کنترل کردن معیار اول یعنی تنوع درختی) در جدول ۹ ارائه شده است.

باید چهار ماتریس مقایسه‌های زوجی دیگر، شبیه ماتریس ارائه‌شده در جدول ۹ تشکیل شده و ضریب سازگاری هر یک از آنها کنترل شود تا بتوان ماتریس مربوط به وابستگی‌های متقابل معیارهای اصلی ($W_{22}$) را محاسبه کرد. پس از تشکیل این سه ماتریس و محاسبات لازم، نتایج حاصل در ماتریس $W_{22}$ ارائه شده است (جدول ۱۰).

جدول ۸- ماتریس مقایسه‌های زوجی و اهمیت نسبی معیارها ($W_{21}$)

Table 8. Matrix of pairwise comparisons and the relative importance of the criteria ($W_{21}$)

| وزن معیار | زادآوری | خشک‌دار | شرایط تنه | شرایط تاج | تنوع درختی | $W_{21}$ | معیار Criteria | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | C5 | C4 | C3 | C2 | C1 | | | | |
| 0.439 | 3 | 2.2 | 3.9 | 4.5 | 1 | 0.439 | Tree diversity | تنوع درختی | C1 |
| 0.193 | 2.4 | 2 | 1.4 | 1 | 0.2 | 0.193 | Crown condition | شرایط تاج | C2 |
| 0.084 | 2.2 | 2.4 | 1 | 0.7 | 0.3 | 0.084 | Stem condition | شرایط تنه | C3 |
| 0.130 | 2 | 1 | 0.4 | 0.5 | 0.4 | 0.130 | Deadwood | خشک‌دار | C4 |
| 0.153 | 1 | 0.5 | 0.4 | 0.4 | 0.3 | 0.153 | Regeneration | زادآوری | C5 |

نسبت ناسازگاری: ۰/۰۴۱۸ (مقدار قابل قبول کمتر از ۰/۱)

Inconsistency Ratio: 0.0418 (acceptable value to be less than 0.1)

جدول ۹- مقایسهٔ زوجی معیارهای اصلی w.r.t. تنوع درختی (C1)

Table 9. Pairwise comparison of the main criteria w.r.t. tree dversity (C1)

| وزن معیار | زادآوری | خشک‌دار | شرایط تنه | شرایط تاج | معیار Criteria | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $W_{criteria}$ | C5 | C4 | C3 | C2 | | | |
| 0.142 | 0.3 | 0.4 | 2.8 | 1 | Crown condition | شرایط تاج | C2 |
| 0.075 | 0.2 | 0.3 | 1 | 0.4 | Stem condition | شرایط تنه | C3 |
| 0.303 | 0.5 | 1 | 4 | 2.8 | Deadwood | خشک‌دار | C4 |
| 0.480 | 1 | 2 | 4.5 | 3.9 | Regeneration | زادآوری | C5 |

نسبت ناسازگاری: ۰/۰۴۱۸ (مقدار قابل قبول کمتر از ۰/۱)

Inconsistency Ratio: 0.0418 (acceptable value to be less than 0.1)

جدول ۱۰- ماتریس وابستگی‌های درونی ($W_{22}$)

Table 10. The inner dependences matrix ($W_{22}$)

| $W_{22}$ | | | | | معیار Criteria | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| زادآوری | خشک‌دار | شرایط تنه | شرایط تاج | تنوع درختی | | | |
| C5 | C4 | C3 | C2 | C1 | | | |
| 0.384 | 0.395 | 0.506 | 0.372 | 0.000 | Tree Diversity | تنوع درختی | C1 |
| 0.172 | 0.122 | 0.098 | 0.000 | 0.142 | Crown Condition | شرایط تاج | C2 |
| 0.172 | 0.110 | 0.000 | 0.116 | 0.075 | Stem Condition | شرایط تنه | C3 |
| 0.271 | 0.000 | 0.165 | 0.154 | 0.303 | Deadwood | خشک‌دار | C4 |
| 0.000 | 0.373 | 0.231 | 0.358 | 0.480 | Regeneration | زادآوری | C5 |

در مقایسه‌های زوجی زیرمعیارهای هر یک از معیارهای اصلی، نتیجهٔ مقایسهٔ زوجی زیرمعیارهای مربوط به تنوع درختی (C1)، یعنی شاخص تنوع شانون- وینر (S11)، شاخص تنوع سیمپسون (S12)، شاخص یکنواختی پیلو (S13) و شاخص غنای مارگالف (S14) و بردار موزون حاصل از آن در جدول ۱۱ و نتیجه در جدول ماتریس $W_{32}$ (جدول ۱۲) ارائه شده است.

به‌منظور محاسبه‌های ابرماتریس در مدل ANP در این پژوهش، در مرحلهٔ اول مقادیر وزن محاسبه‌شده برای تمام مقایسه‌های زوجی به ابرماتریس فاقد وزن وارد شد (جدول ۱۳). در مرحلهٔ دوم ابرماتریس دارای وزن محاسبه و مقادیر ماتریس وزن داده‌شده استاندارد شد (جدول ۱۴). در مرحلهٔ سوم و آخر، ماتریس حد محاسبه شد (جدول ۱۵).

جدول ۱۱- مقایسهٔ زوجی زیرمعیارهای تنوع درختی (C1)

Table 11. Pairwise comparison of tree diversity sub-criteria (C1)

| وزن زیرمعیار W sub-criteria | شاخص مارگالف S14 | شاخص پیلو S13 | شاخص سیمپسون S12 | شاخص شانون‌وینر S11 | زیرمعیار Sub-criteria | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0.169 | 0.4 | 0.5 | 1.7 | 1 | Shannon–Wiener index | شاخص شانون وینر | S11 |
| 0.138 | 0.5 | 0.5 | 1 | 0.6 | Simpson index | شاخص سیمپسون | S12 |
| 0.408 | 2.4 | 1 | 2 | 2 | Pielou index | شاخص پیلو | S13 |
| 0.286 | 1 | 0.4 | 2 | 2.8 | Margalef index | شاخص مارگالف | S14 |

نسبت ناسازگاری: ۰/۰۸۲ (مقدار قابل قبول کمتر از ۰/۱)

Inconsistency Ratio: 0.082 (acceptable value to be less than 0.1)

جدول ۱۲- ماتریس وابستگی‌های بیرونی ($W_{32}$)

Table 12. The outer dependences matrix ($W_{32}$)

| $W_{32}$ | | | | | زیرمعیار Sub-criteria | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| زادآوری C5 | خشک‌دار C4 | شرایط تنه C3 | شرایط تاج C2 | تنوع درختی C1 | | | |
| 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.408 | Shannon–Wiener index | شاخص شانون وینر | S11 |
| 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.286 | Simpson index | شاخص سیمپسون | S12 |
| 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.138 | Pielou | شاخص پیلو | S13 |
| 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.169 | Margalef index | شاخص مارگالف | S14 |
| 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.333 | 0.000 | Crown diameter | قطر تاج | S21 |
| 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.667 | 0.000 | Crown dieback | خشکیدگی تاج | S22 |
| 0.000 | 0.000 | 0.344 | 0.000 | 0.000 | Good stem condition | شرایط تنهٔ خوب | S31 |
| 0.000 | 0.000 | 0.433 | 0.000 | 0.000 | Average stem condition | شرایط تنهٔ متوسط | S32 |
| 0.000 | 0.000 | 0.223 | 0.000 | 0.000 | Poor stem condition | شرایط تنهٔ ضعیف | S33 |
| 0.000 | 0.586 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | SDT | خشک‌دار سرپا | S41 |
| 0.000 | 0.414 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | DDW | خشک‌دار افتاده | S42 |
| 0.795 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | Healthy seedlings | نهال سالم | S51 |
| 0.205 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | Unhealthy seedlings | نهال ناسالم | S52 |

جدول ۱۳- ابرماتریس فاقد وزن

Table 13. Unweighted Super Matrix

| هدف | معیار زادآوری | خشک‌دار | شرایط تنه | شرایط تاج | تنوع درختی | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Goal | C5 | C4 | C3 | C2 | C1 | | | | |
| 0.439 | 0.384 | 0.395 | 0.506 | 0.372 | 0.000 | Tree Diversity | تنوع درختی | C1 | Criteria |
| 0.193 | 0.172 | 0.122 | 0.098 | 0.000 | 0.142 | Crown Condition | شرایط تاج | C2 | |
| 0.084 | 0.172 | 0.110 | 0.000 | 0.116 | 0.075 | Stem Condition | شرایط تنه | C3 | |
| 0.130 | 0.271 | 0.000 | 0.165 | 0.154 | 0.303 | Deadwood | خشک‌دار | C4 | |
| 0.153 | 0.000 | 0.373 | 0.231 | 0.358 | 0.480 | Regeneration | زادآوری | C5 | |
| 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | | | هدف | |
| 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.408 | Shannon–Wiener index | شاخص شانون وینر | S11 | Sub-criteria-1 |
| 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.286 | Simpson index | شاخص سیمپسون | S12 | |
| 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.138 | Pielou | شاخص پیلو | S13 | |
| 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.169 | Margalef index | شاخص مارگالف | S14 | |
| 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.333 | 0.000 | Crown diameter | قطر تاج | S21 | Sub-criteria-2 |
| 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.667 | 0.000 | Crown dieback | خشکیدگی تاج | S22 | |
| 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.344 | 0.000 | 0.000 | Good stem condition | شرایط تنهٔ خوب | S31 | Sub-criteria-3 |
| 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.433 | 0.000 | 0.000 | Average stem condition | شرایط تنهٔ متوسط | S32 | |
| 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.223 | 0.000 | 0.000 | Poor stem condition | شرایط تنهٔ ضعیف | S33 | |
| 0.000 | 0.000 | 0.586 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | SDT | خشک‌دار سرپا | S41 | Sub-criteria-4 |
| 0.000 | 0.000 | 0.414 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | DDW | خشک‌دار افتاده | S42 | |
| 0.000 | 0.795 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | Healthy seedlings | نهال سالم | S51 | Sub-criteria-5 |
| 0.000 | 0.205 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | Unhealthy seedlings | نهال ناسالم | S52 | |

جدول ۱۴- ابرماتریس وزن‌دار

Table 14. Weighted Super Matrix

| هدف | معیار | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | زادآوری | خشک‌دار | شرایط تنه | شرایط تاج | تنوع درختی | | | | |
| Goal | C5 | C4 | C3 | C2 | C1 | | | | |
| 0.439 | 0.192 | 0.197 | 0.253 | 0.186 | 0.000 | Tree Diversity | تنوع درختی | C1 | Criteria |
| 0.193 | 0.086 | 0.061 | 0.049 | 0.000 | 0.071 | Crown Condition | شرایط تاج | C2 | |
| 0.084 | 0.086 | 0.055 | 0.000 | 0.058 | 0.037 | Stem Condition | شرایط تنه | C3 | |
| 0.130 | 0.136 | 0.000 | 0.083 | 0.077 | 0.151 | Deadwood | خشک‌دار | C4 | |
| 0.153 | 0.000 | 0.187 | 0.116 | 0.179 | 0.240 | Regeneration | زادآوری | C5 | |
| 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | | | هدف | |
| 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.204 | Shannon–Wiener index | شاخص شانون وینر | S11 | Sub-criteria-1 |
| 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.143 | Simpson index | شاخص سیمپسون | S12 | |
| 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.069 | Pielou | شاخص پیلو | S13 | |
| 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.084 | Margalef index | شاخص مارگالف | S14 | |
| 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.167 | 0.000 | Crown diameter | قطر تاج | S21 | Sub-criteria-2 |
| 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.333 | 0.000 | Crown dieback | خشکیدگی تاج | S22 | |
| 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.172 | 0.000 | 0.000 | Good stem condition | شرایط تنهٔ خوب | S31 | Sub-criteria-3 |
| 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.217 | 0.000 | 0.000 | Average stem condition | شرایط تنهٔ متوسط | S32 | |
| 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.111 | 0.000 | 0.000 | Poor stem condition | شرایط تنهٔ ضعیف | S33 | |
| 0.000 | 0.000 | 0.293 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | SDT | خشک‌دار سرپا | S41 | Sub-criteria-4 |
| 0.000 | 0.000 | 0.207 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | DDW | خشک‌دار افتاده | S42 | |
| 0.000 | 0.397 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | Healthy seedlings | نهال سالم | S51 | Sub-criteria-5 |
| 0.000 | 0.103 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | Unhealthy seedlings | نهال ناسالم | S52 | |

جدول ۱۵- ماتریس حد

Table 15. Limited Matrix

| هدف | معیار | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | زادآوری | خشک‌دار | شرایط تنه | شرایط تاج | تنوع درختی | | | | |
| Goal | C5 | C4 | C3 | C2 | C1 | | | | |
| 0.144 | 0.144 | 0.144 | 0.144 | 0.144 | 0.144 | Tree Diversity | تنوع درختی | C1 | Criteria |
| 0.062 | 0.062 | 0.062 | 0.062 | 0.062 | 0.062 | Crown Condition | شرایط تاج | C2 | |
| 0.053 | 0.053 | 0.053 | 0.053 | 0.053 | 0.053 | Stem Condition | شرایط تنه | C3 | |
| 0.100 | 0.100 | 0.100 | 0.100 | 0.100 | 0.100 | Deadwood | خشک‌دار | C4 | |
| 0.141 | 0.141 | 0.141 | 0.141 | 0.141 | 0.141 | Regeneration | زادآوری | C5 | |
| 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | | | هدف | |
| 0.059 | 0.059 | 0.059 | 0.059 | 0.059 | 0.059 | Shannon–Wiener index | شاخص شانون وینر | S11 | Sub-criteria-1 |
| 0.041 | 0.041 | 0.041 | 0.041 | 0.041 | 0.041 | Simpson index | شاخص سیمپسون | S12 | |
| 0.020 | 0.020 | 0.020 | 0.020 | 0.020 | 0.020 | Pielou | شاخص پیلو | S13 | |
| 0.024 | 0.024 | 0.024 | 0.024 | 0.024 | 0.024 | Margalef index | شاخص مارگالف | S14 | |
| 0.021 | 0.021 | 0.021 | 0.021 | 0.021 | 0.021 | Crown diameter | قطر تاج | S21 | Sub-criteria-2 |
| 0.041 | 0.041 | 0.041 | 0.041 | 0.041 | 0.041 | Crown dieback | خشکیدگی تاج | S22 | |
| 0.018 | 0.018 | 0.018 | 0.018 | 0.018 | 0.018 | Good stem condition | شرایط تنهٔ خوب | S31 | Sub-criteria-3 |
| 0.023 | 0.023 | 0.023 | 0.023 | 0.023 | 0.023 | Average stem condition | شرایط تنهٔ متوسط | S32 | |
| 0.012 | 0.012 | 0.012 | 0.012 | 0.012 | 0.012 | Poor stem condition | شرایط تنهٔ ضعیف | S33 | |
| 0.059 | 0.059 | 0.059 | 0.059 | 0.059 | 0.059 | SDT | خشک‌دار سرپا | S41 | Sub-criteria-4 |
| 0.041 | 0.041 | 0.041 | 0.041 | 0.041 | 0.041 | DDW | خشک‌دار افتاده | S42 | |
| 0.112 | 0.112 | 0.112 | 0.112 | 0.112 | 0.112 | Healthy seedlings | نهال سالم | S51 | Sub-criteria-5 |
| 0.029 | 0.029 | 0.029 | 0.029 | 0.029 | 0.029 | Unhealthy seedlings | نهال ناسالم | S52 | |

جدول ۱۶- رتبه‌بندی نهایی معیارها و زیرمعیارهای سلامت جنگل

Table 16. The final ranking of forest health criteria and sub-criteria

| معیار | | وزن حد | وزن نرمال | رتبه‌بندی | زیرمعیار | | | وزن حد | وزن نرمال | رتبه‌بندی |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Criteria | | $W_{Limit}$ | $W_{Normal}$ | Ranking | Sub-criteria | | | $W_{Limit}$ | $W_{Normal}$ | Ranking |
| C1 | Tree Diversity | 0.144 | 0.287 | 1 | S11 | Shannon–Wiener index | شاخص شانون وینر | 0.059 | 0.408 | 6 |
| | | | | | S12 | Simpson index | شاخص سیمپسون | 0.041 | 0.286 | 9 |
| | | | | | S13 | Pielou | شاخص پیلو | 0.020 | 0.138 | 13 |
| | | | | | S14 | Margalef index | شاخص مارگالف | 0.024 | 0.169 | 12 |
| C2 | Crown Condition | 0.062 | 0.124 | 4 | S21 | Crown diameter | قطر تاج | 0.021 | 0.333 | 8 |
| | | | | | S22 | Crown dieback | خشکیدگی تاج | 0.041 | 0.667 | 2 |
| C3 | Stem Condition | 0.053 | 0.107 | 5 | S31 | Good stem condition | شرایط تنهٔ خوب | 0.018 | 0.344 | 7 |
| | | | | | S32 | Average stem condition | شرایط تنهٔ متوسط | 0.023 | 0.433 | 4 |
| | | | | | S33 | Poor stem condition | شرایط تنهٔ ضعیف | 0.012 | 0.223 | 10 |
| C4 | Deadwood | 0.100 | 0.200 | 3 | S41 | SDT | خشک‌دار سرپا | 0.059 | 0.586 | 3 |
| | | | | | S42 | DDW | خشک‌دار افتاده | 0.041 | 0.414 | 5 |
| C5 | Regeneration | 0.141 | 0.282 | 2 | S51 | Healthy seedlings | نهال سالم | 0.112 | 0.795 | 1 |
| | | | | | S52 | Unhealthy seedlings | نهال ناسالم | 0.029 | 0.205 | 11 |

در ادامه رتبه‌بندی معیارهای اصلی و زیرمعیارها به‌ترتیب اولویت در جدول ۱۶ نشان داده شده است. معیار تنوع درختی با وزن ۰/۲۸۷ در مقایسه با دیگر معیارها تأثیر مهم‌تری بر سلامت جنگل دارد. شایان ذکر است که زیرمعیارهای نهال سالم (۰/۷۹۵)، خشکیدگی تاج (۰/۶۶۷) و خشک‌دار سرپا (۰/۵۸۶)، از مهم‌ترین زیرمعیارها در مقایسه با دیگر زیرمعیارها هستند. بنابراین، این سه معیار فرعی، عوامل اساسی برای ارزیابی سلامت جنگل هستند.

## بحث

هدف این پژوهش، برآورد ارزش سلامت جنگل ناشی از شاخص‌های بوم‌شناختی جنگل‌های هیرکانی در حوضهٔ آبخیز ماسوله بود که بدین منظور با استفاده از رویکرد ترکیبی DANP، ترجیحات نخبگان از این شاخص‌ها برای حفظ و بهبود وضعیت سلامت این جنگل‌ها استخراج شد. در این کار تلاش شده است که ضمن دسته‌بندی عوامل حیاتی وضعیت سلامت جنگل، با توجه به ادبیات تحقیق، تحلیل و اولویت‌بندی این عوامل با توجه به وجود روابط علّی و معلولی بین آنها معرفی شود. از ترکیب نتایج عددی شدت وجود روابط بین عوامل که به کمک روش DEMATELبه‌دست آمده است، با روش ANP رتبه‌بندی نهایی همهٔ عوامل و زیرعوامل مؤثر در پیاده‌سازی استفاده شده است که برای این منظور پرسشنامهٔ مقایسه‌های زوجی طراحی شد که توسط دوازده تن از نخبگان موضوعی مرتبط تکمیل شدند.

در این پژوهش، در ابتدا ماتریس اثر مستقیم، ماتریس اثر جامع و ماتریس اثر کل (جداول ۱ تا ۳) تهیه شد که با لحاظ ارزش آستانه برای ماتریس اثر کل (جدول ۴) نتیجهٔ نهایی تحلیل DEMATEL (جدول ۵) به‌دست آمد. نتایج نشان داد که در بین شاخص‌های مورد پژوهش، شاخص‌های تنوع درختی (۲۳/۵ درصد) و شرایط تاج (۲۲/۳ درصد) دارای بیشترین میزان اثرگذاری بر دیگر شاخص‌های سلامت جنگل هستند. در مقابل، زادآوری (۱۶/۶ درصد) کمترین اثرگذاری را در دیگر شاخص‌های سلامت جنگل دارد. از طرف دیگر، شاخص زادآوری (۲۸/۱ درصد) دارای بیشترین اثرپذیری از دیگر شاخص‌های سلامت جنگل است. در مقابل، شرایط تاج (۱۶/۸)

کمترین اثرپذیری را در میان دیگر شاخص‌های سلامت جنگل داراست. در ادامه نمودار اثر علّی (شکل ۱) و نقشهٔ روابط شبکه (شکل ۲) تهیه شد و سپس رتبه‌بندی عوامل از نظر میزان اهمیت (جدول ۶) و خالص تأثیرگذاری (جدول ۷) انجام گرفت. این نتایج نشان داد که در بین پنج شاخص، شاخص زادآوری (۸/۹) بیشترین اهمیت را دارد و شاخص‌های تنوع درختی (۸/۷)، شرایط تاج (۷/۸)، خشک‌دار (۷/۲) و شرایط تنه (۷/۱) به‌ترتیب در درجه‌های بعدی اهمیت قرار دارند. مطابق با نتایج این پژوهش در دیگر پژوهش‌ها نیز زادآوری جزء اصلی پویایی بوم‌سازگان جنگلی و شرایط سلامت جنگل مطرح شده است (Tesfaye et al., 2010; Gebeyehu et al., 2019). به‌عبارت دیگر پایداری جنگل تنها در صورتی امکان‌پذیر است که پویایی زادآوری و عوامل مؤثر بر زنده‌مانی و سلامت گونه‌های درختی مهم فراهم باشد. در پژوهش‌های قبلی در جنگل‌های هیرکانی، تغییرات در الگوهای زادآوری از نظر تفاوت در گونه‌های تشکیل‌دهندهٔ آنها و نیز متغیرهای محیطی که در آن رشد می‌کنند، نشان داده شده است (Roodi et al., 2012). تراکم‌های نهال در زیراشکوب‌های جنگل پویاست و نرخ آن ممکن است در بین گونه‌ها و در محیط‌های روشنه و سایه متفاوت باشد (Gorji Bahri et al., 2012). این نرخ‌ها به‌دلیل مرگ‌ومیر نیز متفاوت است که می‌تواند شامل تنش‌های غیرزنده مانند نور، خشکسالی و عوامل زیستی باشد که شامل گیاهخواری، بیماری یا رقابت می‌شود (Bayat et al., 2017). در پژوهش Chazdon & Guariguata (2016) نیز با ارائهٔ اطلاعات دربارهٔ وضعیت زادآوری منطقهٔ پژوهش، گزینه‌هایی برای توسعهٔ جنگل از طریق بهبود در به‌کارگیری، استقرار و رشد گونه‌های مورد نظر پیشنهاد شد. Löf et al. (2019) نیز در پژوهش خود بر اهمیت تنوع درختی و پناه آنها برای بهبود زنده‌مانی نهال‌های دست‌کاشت در منطقهٔ پژوهش در جهت مدیریت، حفاظت و احیای جنگل‌های طبیعی تخریب‌شده و ناسالم تأکید کردند.

از بررسی روابط علّی- معلولی میان شاخص‌های انتخاب‌شده این‌طور استنباط می‌شود که شرایط تاج (با تأثیرگذاری ۱/۱) بنیادی‌ترین شاخص در پایش سلامت جنگل محسوب می‌شود و ایجاد تغییرات سازنده در آن ممکن است به تغییرات جدی‌تر و اثرگذارتری در بهبود وضعیت جنگل منجر شود. درک این روابط علّی- معلولی به برنامه‌ریزان و مدیران جنگل کمک می‌کند تا برای حل مسائل پایش سلامت جنگل و تاب‌آوری آن تصمیم‌گیری کنند. برای مثال، برنامه‌ریزان جنگل ابتدا باید برای توسعهٔ شاخص شرایط تاج و سپس شاخص شرایط تنه، خشک‌دار، تنوع درختی و زادآوری اقدام کنند. در بیشتر پژوهش‌های پایش سلامت جنگل در ایالات متحدهٔ آمریکا نیز شاخص شرایط تاج به‌عنوان یک شاخص کلی خوب از سلامت درختان جنگل ارائه شده که می‌تواند با رشد و بقای جنگل مرتبط باشد (Morin et al., 2015; Ecke et al., 2022). تاج درختان منعکس‌کنندهٔ آثار عوامل استرس‌زای جنگلی مانند حشرات، عوامل بیماری‌زا و خشکسالی است (Cessna et al., 2021). ارزیابی شرایط تاج همچنین می‌تواند برای توصیف مشخصات جنگل مانند خطر آتش‌سوزی تاجی بالقوه و زیستگاه حیات وحش (Morin et al., 2015) و نیز حاصلخیزی رویشگاه و شرایط رقابتی گونه‌ها (Shahamati Nejad et al., 2022a) استفاده شود.

پس از تحلیل DEMATEL، ماتریس‌های مقایسه‌های زوجی و اهمیت نسبی معیارها، مقایسهٔ زوجی معیارها، ماتریس وابستگی‌های درونی، مقایسهٔ زوجی زیرمعیارها، ماتریس وابستگی‌های بیرونی، ابرماتریس فاقد وزن، ابرماتریس وزن‌دار و ماتریس حد (جداول ۸ تا ۱۵) در نتیجه تحلیل ANP تشکیل شد که به‌منظور رتبه‌بندی نهایی معیارها و زیرمعیارهای سلامت جنگل (جدول ۱۶) استفاده شد. براساس نتایج رتبه‌بندی معیارهای اصلی در منطقهٔ پژوهش،

تنوع درختی با وزن ۰/۲۹ در مقایسه با دیگر معیارها تأثیر مهم‌تری بر سلامت جنگل دارد. در پژوهش Ejtehadi et al. (2016) در جنگل‌های کوهستانی هیرکانی در شمال ایران نیز تنوع گونه‌ای درختی از مهم‌ترین ابزارها برای پایش سریع سلامت بوم‌سازگان جنگل و وضعیت اقلیمی منطقهٔ پژوهش اشاره شده است. همچنین در پژوهش Goleij et al. (2016) در جنگل‌های اسالم شمال ایران، معیار حفاظت از تنوع زیستی بیشترین وزن را مدیریت پایدار جنگل داشت. در پژوهش‌های Ratcliffe et al. (2015) و Bussotti et al. (2018) نیز اثبات شد که تنوع درختی اثر مرتبط‌تری در شرایط سلامت جنگل و افزایش رشد در جنگل‌های مدیترانه‌ای دارد. با وجود این، تأثیر تنوع درختان به‌عنوان یکی از عوامل تعیین‌کنندهٔ شرایط کلی سلامت جنگل، ممکن است در رابطه با گونه‌های هدف، نوع آمیختگی و ویژگی‌های بوم‌شناختی در هر مکان و در نتیجه با بافت محیطی متفاوت باشد (Ratcliffe et al., 2015). در این زمینه، فراهم‌سازی مقیاس مشاهده‌ای بزرگ‌تر با گسترش مطالعه از سطح سیمای سرزمین به سطح منطقه‌ای و ملی در بررسی آثار تنوع درختی مفید خواهد بود (Tewari et al., 2016). افزون‌بر این، براساس نتایج رتبه‌بندی زیرمعیارها، نهال سالم، خشکیدگی تاج و خشک‌دار سرپا، به‌ترتیب با زون‌های ۰/۷۹، ۰/۶۷ و ۰/۵۹ از مهم‌ترین زیرمعیارها در مقایسه با دیگر زیرمعیارها در منطقهٔ پژوهش هستند. بنابراین، این سه معیار فرعی، عوامل مهمی برای ارزیابی سلامت جنگل هستند. براساس پژوهش Liang & Wei (2020) نهال‌ها مهم‌ترین مرحله در طول بازسازی پوشش گیاهی طبیعی و حفظ سلامت جنگل هستند و کیفیت نهال‌ها در کنار تراکم آنها از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر زادآوری جنگل است. در ارتباط با زیرمعیار خشکیدگی تاج و اهمیت آن در سلامت جنگل، در پژوهش Randolph (2009) سطوح بالای خشکیدگی تاج نشان‌دهندهٔ کاهش بالقوهٔ جدی در سلامت درختان و شرایط جنگل است. در نهایت خشک‌دار سرپا به‌عنوان زیرمعیار مهم سوم در بین دیگر زیرمعیارهای تحت بررسی معرفی شد. شایان ذکر است که منطقهٔ پژوهش بدون وجود سابقهٔ اجرای طرح‌های جنگلداری که در آن رویشگاه‌ها به توسعهٔ طبیعی سپرده شده است، با توده‌های جنگلی بسیار ساختاریافته و مقادیر زیادی خشک‌دار سرپا در مراحل مختلف پوسیدگی مشخص شده است (Shahamati Nejad et al., 2022b). در پژوهش Sagheb Talebi (2017) نیز خشک‌دار به‌عنوان شاخص تنوع ساختار و تنوع زیستی جنگل، منبع ذخیرهٔ کربن، زیستگاه حیات وحش و دیگر جانوران، عامل مؤثر در تجدید حیات طبیعی و نشانه‌ای از جنگل‌شناسی نزدیک به طبیعت شناخته شده است. بنابراین، اطلاعات دربارهٔ توزیع خشک‌دار سرپا برای برآورد تنوع زیستی جنگل، پایش آشفتگی‌های جنگل و برنامه‌ریزی استراتژی مدیریت جنگل ضروری است (Liu et al., 2021).

## نتیجه‌گیری

این پژوهش با هدف تجزیه‌وتحلیل عوامل مؤثر بر سلامت جنگل به‌عنوان گام دوم در زمینهٔ پایش سلامت جنگل بعد از گام اول یعنی ارزیابی کمی و کیفی شاخص‌های سلامت جنگل که توسط Shahamati Nejad et al. (2022a, 2022b) انجام گرفته است صورت گرفت. به‌عبارت دیگر، نتایج این تحقیق با رویکرد تحلیلی برای بررسی شرایط سلامت جنگل در تکمیل نتایج پژوهش‌های قبلی سلامت جنگل در منطقهٔ پژوهش با رویکرد پایش کمی و کیفی شاخص‌هاست. شرایط سلامت جنگل تحت تأثیر عوامل متعددی از جمله عوامل داخلی و خارجی است. برخی از عواملی که بر فرایندهای بوم‌شناختی در جنگل‌ها تأثیر می‌گذارند، زیستی هستند (مانند گونه‌های غیربومی یا بیماری‌های درخت)، درحالی که برخی دیگر فیزیکی هستند (مانند آتش‌سوزی، شوری

خاک یا رویدادهای آب‌وهوایی حدی). به‌طور کلی، نیاز به تهیهٔ اطلاعات کلی مهم دربارهٔ هر دو دسته از عوامل وجود دارد، همچنین اطلاعات دقیق دربارهٔ سطوح و درصد جنگل‌های تحت تأثیر قرارگرفته مورد نیاز است. نتایج این تحقیق امکان تعیین عوامل اصلی مؤثر بر سلامت جنگل در منطقهٔ پژوهش را فراهم کرده است. این نتایج به‌طور مستقیم به توسعهٔ ارزیابی‌های دقیق سلامت جنگل کمک می‌کند و مدیران جنگل می‌توانند از آنها برای تعیین عواملی که به‌دلیل سلامت بالقوه ضعیف‌تر جنگل باید همواره پایش شوند استفاده کنند. این کار به‌خصوص در حال حاضر، با وجود گستردگی انواع آشفتگی‌های انسانی و طبیعی، به‌ویژه شتاب گرفتن تغییرات اقلیمی، می‌تواند بسیار مهم باشد.

## سپاسگزاری

از حمایت مالی دانشگاه محقق اردبیلی برای تأمین هزینه‌های این پژوهش سپاسگزاری می‌شود.

**References**

Bayat, M., Namiratiyan, M., & Pourshakouri, F. (2017). Presentation of Ingrowth models and determination of biotic and abiotic factors affecting regeneration in the Hyrcanian forests. *Journal of Wood and Forest Science and Technology*, *24*(2), 1-16. https://doi.org/10.22069/jwfst.2017.11364.1598 (In Persian)

Bussotti, F., Feducci, M., Iacopetti, G., Maggino, F., Pollastrini, M., & Selvi, F. (2018). Linking forest diversity and tree health: preliminary insights from a large-scale survey in Italy. *Foresr Ecosystems, 5*, 12. https://doi.org/10.1186/s40663-018-0130-6

Cessna, J., Alonzo, M.G., Foster, A.C., & Cook, B.D. (2021). Mapping Boreal Forest Spruce Beetle Health Status at the Individual Crown Scale Using Fused Spectral and Structural Data. *Forests*, *12*, 1145. https://doi.org/10.3390/f12091145

Chazdon, R.L., & Guariguata, M.R. (2016). Natural regeneration as a tool for large-scale forest restoration in the tropics. *Biotropica*, *48*(6), 716-730. https://doi.org/10.1111/btp.12381

Ecke, S., Dempewolf, J., Frey, J., Schwaller, A., Endres, E., Klemmt, H.J., Tiede, D., & Seifert, T. (2022). UAV-Based Forest Health Monitoring: A Systematic Review. *Remote Sensing*, *14*, 3205. https://doi.org/10.3390/rs14133205

Ejtehadi, H., Zare, H., Amini Eshkevari, T., & Atashgahi, Z. (2016). A study of tree species diversity and flora in different altitudes and slopes of the Shirinrood river valley, Mazandaran, Iran. *Taxonomy and Biosystematics Journal*, *7*(25), 39-52. https://dorl.net/dor/20.1001.1.20088906.1394.7.25.5.5 (In Persian)

Ezquerro, M., Pardos, M., & Diaz-Balteiro, L. (2016). Operational Research Techniques Used for Addressing Biodiversity Objectives into Forest Management: An Overview. *Forests*, *7*, 229. https://doi.org/10.3390/f7100229

Fengiin, X., Hua, O., Qiang, Z.H., Bojie, F., & Zhicheng, Z.H. (2004). Forest ecosystem health assessment and analysis in China. *Journal of Geographical Sciences*, *14*(1), 18-24. https://doi.org/10.1007/BF02873086

Gabus, A., & Fontela, E. (1973). Perceptions of the World Problem Atique: Communication Procedure, Communicating with Those Bearing Collective Responsibility. DEMATEL Report No.1, Battelle Geneva Research Centre, Geneva.

Gebeyehu, G., Soromessa, T., Bekele, T., & Teketay, D. (2019). Species composition, stand structure, and regeneration status of tree species in dry Afromontane forests of Awi Zone, northwestern Ethiopia. *Ecosystem Health and Sustainability*, *5*(1), 199-215. https://doi.org/10.1080/20964129.2019.1664938

Goleij, A., Hasanzad Navroodi, I., Mohammadi Limaei, S., & Jokar, M. (2016). Determination criteria and indicators for sustainable forest management based on the views of experts and local people (Case study: Asalem Forests, north of Iran). *Iranian Journal of Forest, 8*(3), 365-379. (In Persian)

Gorji Bahri, Y., Hematii, A., & Khanjanii Shiraz, B. (2012). Effects of tree density on seedling establishment in loblolly pine stand (Case study: Pylambra, Guilan). *Iranian Journal of Forest, 4*(1), 25-32. (In Persian)

Juknys, R., & Augustaitis, A. (1998). Indicators of crown and their application in forest health monitoring. *Baltic Forestry, 2*, 51-58.

Lausch, A., Erasmi, S., King, D.J., Magdon, P., & Heurich, M. (2017). Understanding Forest Health with Remote Sensing-Part II—A Review of Approaches and Data Models. *Remote Sensing, 9*, 129. https://doi.org/10.3390/rs9020129

Liang, W., & Wei, X. (2020). Factors promoting the natural regeneration of Larix principis-rupprechtii plantation in the Lvliang Mountains of central China. *PeerJ Life & Environment*., *8*, e9339. https://doi.org/10.7717/peerj.9339

Liu, X., Frey, J., Denter, M., Zielewska-Büttner, K., Still, N., & Koch, B. (2021). Mapping Standing Dead Trees in Temperate Montane Forests Using a Pixel- and Object-Based Image Fusion Method and Stereo WorldView-3 Imagery. *Ecological Indicators, 133*, 108438. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.108438

Löf, M., Madsen, P., Metslaid, M. Witzell, J., & Jacobs, D.F. (2019). Restoring forests: regeneration and ecosystem function for the future. *New Forests, 50*, 139–151. http://dx.doi.org/10.1007/s11056-019-09713-0

MEA. (2005). Millennium Ecosystem Assessment, Ecosystems and Human Well-being: Synthesis. Island Press, Washington, DC.

Morin, R.S., Randolph, K.C., & Steinman, J. (2015). Mortality rates associated with crown health for eastern forest tree species. *Environmental Monitoring Assessment, 187*, 87. https://doi.org/10.1007/s10661-015-4332-x

Potter, K.M., & Conkling, B.L. (2015). Forest Health Monitoring: National Status, Trends, and Analysis 2014. Gen. Tech. Rep. SRS-209. Asheville, NC: U.S. Department of Agriculture Forest Service, Southern Research Station. 190 p.

Randolph, K.C. (2009). Crown Condition. In: Forest health monitoring: 2006 national technical report. General Technical Report SRS-117. Asheville, NC: U.S. Department of Agriculture Forest Service, Southern Research Station, 65-110.

Ratcliffe, S., Liebergesell, M., Ruiz-Benito, P., González, J.M., Muñoz Castañeda, J.M., Kändler, G., Lehtonen, A., Dahlgren, J., Kattge, J., Peñuelas, J., Zavala, M.A., & Wirth, C. (2015). Modes of functional biodiversity control on tree productivity across the European continent. *Global Ecological Biogeography, 25*(3), 251-262. https://doi.org/10.1111/geb.12406

Rezapour, M., Safari, S., & Keshavarzi, A.H. (2020). Analysis of the Factors Affecting the Safety Performance in the Iranian Power Distribution Companies - Hybrid Approach of DEMATEL and ISM. *Iran Occupational Health, 18*, 12. http://dx.doi.org/10.52547/ioh.18.1.169. (In Persian)

Roodi, Z., Jalilvand, H., & Esmailzadeh, O. (2012). Edaphic effects on distribution of plant ecological groups (Case study: Sisangan Buxus (*Buxus hyrcana* Pojark.) forest reserve). *Iranian Journal of Plant Biology, 4*(13), 39-56. https://dorl.net/dor/20.1001.1.20088264.1391.4.13.5.0 (In Persian)

Saaty, T.L. (1980). The Analytic Hierarchy Process; McGraw-Hill: New York, NY, USA: 1–287.

Sagheb Talebi, K.H. (2017). Role of dead wood in health of forest ecosystem. *Iran Nature, 2*(2), 20-25. (In Persian)

Shahamati Nejad, A., Jahdi, R., & Keivan Behjou, F. (2022a). Tree Diversity and Tree Crown and Stem Conditions as Indicators of Forest Health Monitoring in Masouleh Forest Watershed. *Iranian Journal of Forest, 13*(4), 451-468. https://doi.org/10.22034/ijf.2021.265008.1755. (In Persian)

Shahamati Nejad, A., Jahdi, R., & Keivan Behjou, F. (2022b). Assessment of Forest Health Status in a Natural Untouched of *Fagus orientalis* Lipsky Mixed Stand Using Regeneration and Deadwood Indicators (Case Study: Masouleh Watershed). *Journal of Forest and Wood Products, 75*(1), 25-37. https://doi.org/10.22059/jfwp.2021.323874.1166 (In Persian)

Tesfaye, G., Teketay, D., Fetene, M., & Beck, E. (2010). Regeneration of Seven Indigenous Tree Species in a Dry Afromontane Forest, Southern Ethiopia. *Flora Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants, 205*, 135–143. https://doi.org/10.1016/j.flora.2008.12.006

Tewari, V.P. (2016). Forest inventory, assessment, and monitoring, and longterm forest observational studies, with special reference to India. *Forest Science and Technology*, *12*(1), 24-32. https://doi.org/10.1080/21580103.2015.1018962

Trumbore, S., Brando, P., & Hartmann, H. (2015). Forest health and global change. *Science*, *349*, 814-818. https://doi.org/10.1126/science.aac6759

U.S. Department of Agriculture (USDA) Forest Service. (2020). Forest ecosystem health indicators. Forest Service, FS-1151, March 2020, 28 p. https://usfs.maps.arcgis.com.

U.S. Department of Agriculture (USDA) Forest Service. (2015). A regeneration indicator for forest inventory and analysis: history, sampling, estimation, analytics, and potential use in the midwest and northeast United States. Gen. Tech. Rep. NRS-148. Newtown Square, PA: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Northern Research Station. 74 p.

Westfall, J.A. (2009). FIA National Assessment of Data Quality for Forest Health Indicators. Gen. Tech. Rep. NRS-53. Newtown Square, PA: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Northeastern Research Service. 80 p. https://doi.org/10.2737/NRS-GTR-53.

Woodall, C.W., Amacher, M.C., Bechtold, W.A., Coulston, J.W., Randolph, K.C., Jovan, S., Schulz, B.K., Smith, G.C., Tkacz, B., & Will-Wolf, S. (2011). Status and future of the forest health indicators program of the USA. *Environmental Monitoring and Assessment, 177*, 419-436. https://doi.org/10.1007/s10661-010-1644-8

Iranian Journal of Forest
Vol. 15, No. 4, Winter 2024
pp. 461-479

DOI: 10.22034/ijf.2023.366357.1903

*Research Article*

# Analysis of factors affecting forest health based on DEMATEL-ANP (DANP) approach in Masouleh watershed, Guilan province

**R. Jahdi[1 *] and A. Shahamati Nejad[2]**

[1]Associate Prof., Dept. of Forest Science and Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.
[2] M.Sc. of Forest Sciences, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.

## Abstract

**Introduction:** Forest health indicators encompass a wide range of physical environmental indicators, including climatic and ecological measurements, as well as records on human actions and management practices in forest ecosystems. This study aims to investigate the relationship among the forest health indices in the mixed-beech forest type, including tree diversity, crown condition, stem condition, deadwood, and regeneration in the forest landscape in the Masouleh watershed, Guilan province.

**Materials and Methods:** In this study, the relationship among indices of forest health in the study area was investigated using an integrated approach of DEMATEL-ANP (DANP). Data collection was conducted through two researcher-made questionnaires, whose validity and reliability were examined through content validity and the retest method, respectively. Finally, the most important input indicators, based on experts' views, were ranked by DEMATEL and output indicators by ANP. A sample of 12 experts was used in this study.

**Findings:** The results of DEMATEL indicate the importance of the regeneration index in the forest health status in the study area. This index (regeneration) was recognized with the highest influence ratio among others. In addition, two indicators, tree diversity and deadwood, had a high influence ratio among other investigated indices. Also, tree diversity and crown condition indices were the most influential ones. Based on the ranking results of criteria in ANP, the tree diversity criterion has a more important effect on forest health compared to other criteria. In addition, healthy seedling, crown dieback, and standing deadwood are among the most important sub-criteria compared to other sub-criteria in the study area.

**Conclusion:** These results can play a significant role in increasing awareness about the factors affecting the health of forests and the causes of unhealthy forests. They can also assist policymakers in identifying appropriate measures to maintain and improve forest health, thereby increasing the sustainability of forest ecosystems.

**Keywords:** Ecosystem, Forest Health Index, Integrated approach, Questionnaire, Sustainability.

[*] Corresponding author: Tell: 0989112340249 E-mail: roghayeh.jahdi@uma.ac.ir