فصلنامهٔ علمی پژوهش و توسعه جنگل
جلد ۶، شماره ۱، صفحه ۱۳۴-۱۲۱، (۱۳۹۹)

تهیه نقشه قابلیت جاده‌سازی با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی و GIS (بررسی موردی: منطقه ارسباران)

منیژه طالبی[۱]، باریس مجنونیان[۲]، احسان عبدی *[۳] و محمود امید[٤]

۱- دانشجوی دکتری مهندسی جنگل، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. (m_talebi@ut.ac.ir)
۲- استاد، گروه جنگلداری و اقتصاد جنگل، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. (bmajnoni@ut.ac.ir)
۳- دانشیار، گروه جنگلداری و اقتصاد جنگل، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. (abdie@ut.ac.ir)
٤- استاد، گروه مهندسی مکانیک ماشین‌های کشاورزی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. (omid@ut.ac.ir)

تاریخ دریافت: ۹۷/۰۷/۱۷ تاریخ پذیرش: ۹۸/۱۱/۲۹

چکیده

هدف از این پژوهش ارائه روشی هوشمند مبتنی بر شبکه‌های عصبی مصنوعی برای مدل‌سازی قابلیت منطقه حفاظت‌شده ارسباران برای عبور جاده برای طراحی و اصلاح و توسعه مناسب شبکه جاده و راه‌های ارتباطی موجود در منطقه است. ابتدا با استفاده از فرایند تحلیل سلسله مراتبی (AHP) و روش ترکیب وزن‌دهی خطی (WLC) و به‌کارگیری لایه‌های اطلاعاتی مؤثر بر مسیریابی، نقشه شایستگی جاده‌سازی برای تهیه نمونه‌های آموزشی در محیط ArcGIS تهیه شد. در ادامه از شبکه پرسپترون چندلایه (MLP) برای برآورد مقدار مطلوبیت عبور جاده استفاده شد. برای ارزیابی عملکرد مدل شبکه عصبی نتایج به‌دست‌آمده با نتایج حاصل از رگرسیون خطی چندمتغیره مقایسه شدند. طبق نتایج به‌دست‌آمده، شبکه عصبی مصنوعی و روش آماری رگرسیون به‌ترتیب با ضریب تبیین (R^2)، ۰/۹۰۸ و ۰/۹۰۱ و مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE)، ۰/۰۳۸۵ و ۰/۰٤ قابلیت لازم برای تعیین ارزش مطلوبیت عبور جاده نشان دادند و شبکه عصبی نتایج به‌نسبت بهتری در مقایسه با رگرسیون نشان داد. همچنین با توجه به نتایج آنالیز حساسیت متغیرهای ورودی، چهار معیار شیب، سنگ‌بستر، حساسیت به فرسایش و بافت خاک به‌ترتیب بیشترین تأثیر را در برآورد مدل نشان دادند.

واژه‌های کلیدی: شبکه جاده، شبکه عصبی پرسپترون چندلایه، فرایند تحلیل سلسله مراتبی، نقشه شایستگی.

* نویسنده مسئول شمارهٔ تماس: ۰۲٦۳۲۲۲۳۰٤٤

مقدمه

مدیریت صحیح منابع طبیعی راه‌حل بی‌نظیری برای دستیابی به توسعه پایدار است. در این راستا یک شبکه جاده خوب سازمان‌یافته برای مدیریت پایدار منابع جنگلی بسیار مهم است؛ بنابراین بسیار مهم است که تمام مراحل طراحی و ساخت شبکه‌های جاده جنگلی به روشی انجام شوند که سازگار با ارزش‌های محیط‌زیستی و مدیریت پایدار جنگل و همچنین با توجه به مزایای مهم شبکه‌های جاده جنگلی چندمنظوره باشد (Enache *et al.*, 2011). ساخت و نگهداری این زیرساختارهای دسترسی از عملیات پرهزینه و مخرب در عرصه‌های جنگلی و منابع طبیعی شناخته می‌شوند (Mohammadi Samani *et al.*, 2010، Caliskan, 2013)، به‌ویژه اگر مرحله طراحی و مسیریابی اولیه این نوع دخالت‌ها به‌صورت اصولی و منطقی انجام نگیرد، دارای تأثیرات منفی هنگفت خواهند بود؛ بنابراین به‌منظور دسترسی و استفاده بهینه از عرصه‌های منابع طبیعی به‌ویژه مناطق تحت حفاظت جنگلی، طراحی و توسعه راه‌های ارتباطی بایستی به‌صورت اصولی و با توجه به پتانسیل منطقه برای توسعه زیرساخت شبکه جاده صورت گیرد. بااین‌وجود، تصمیم‌گیری برای انتخاب محل‌های مناسب برای عبور جاده با کمترین خسارت محیط‌زیستی و هزینه از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است (Azizi and Najafi, 2011). در این راستا اغلب در پژوهش‌های مختلف استفاده از روش تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDM) و فرایند تحلیل سلسله مراتبی (AHP) برای مسئله مکان‌یابی شبکه جاده موردتوجه قرار گرفته است (Mostafa *et al.*, 2010، Sibi and Raafatnia, 2012، Caliskan, 2013، Hayati *et al.*, 2013، Tampekis *et al.*, 2015، Stefanovic *et al.*, 2016، Javanmard *et al.*, 2018). تلفیق فن‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره و سامانهٔ اطلاعات جغرافیایی (GIS) برای حل مسائل مکان‌یابی مختلف بسیار کاربردی است و با توجه به توانایی‌های سامانهٔ اطلاعات جغرافیایی در تجزیه‌وتحلیل داده‌های مکانی، فضای بسیار کارآمدی برای انجام مراحل مختلف مکان‌یابی ایجاد شده است (Khezri *et al.*, 2017). در سال‌های اخیر روش‌های نوین مبتنی بر هوش مصنوعی و استفاده از رایانه کاربرد بیشتری در بیشتر مطالعات منابع طبیعی و جنگل پیدا کرده است. شبکه عصبی مصنوعی (ANN) شکلی از هوش مصنوعی هست که می‌تواند در رابطه با مسئله طراحی شبکه جاده جنگلی به‌کار گرفته شود. شبکه‌های عصبی مصنوعی از عناصر عملیاتی ساده‌ای به نام نرون ساخته می‌شوند که به‌صورت موازی در کنار هم عمل می‌کنند. این عناصر از سیستم‌های عصبی زیستی الهام گرفته شده‌اند (Kia, 2015). درواقع شبکه‌های عصبی الگوریتم‌های رایانه‌ای هستند که می‌توانند روابط مهم مابین تعداد زیادی عامل خطی و غیرخطی را از یک بانک داده استخراج کرده و همچنین قادر هستند این دانش را به‌منظور پیشگویی یا طبقه‌بندی یک مورد جدید همانند یک سیستم خبره بکار ببندند (Rakei *et al.*, 2008). در میان انواع شبکه‌های عصبی مصنوعی، شبکه پیشرو موسوم به پرسپترون چندلایه (MLP) به‌عنوان رایج‌ترین شبکه در مدیریت منابع طبیعی استفاده می‌شود (Peng and Wen, 1999). در شبکه‌های عصبی پیشرو از الگوریتم پس انتشار خطا (BP) برای آموزش شبکه استفاده می‌شود. الگوریتم پس انتشار خطا شامل یک روش بهینه‌سازی است که هدف این روش حداقل کردن خطای کلی مشاهده‌شده در لایه خروجی است (Safi and Bouroumi, 2013). فن‌های ANN به‌عنوان یک ابزار مفید برای پیش‌بینی، طبقه‌بندی و تخمین توابع در زمینه‌های مختلف ثابت شده‌اند و طیف گسترده‌ای از کاربردها را در مدیریت منابع جنگل پیدا کرده‌اند

(Peng and Wen, 1999). در سال‌های اخیر مدل‌سازی‌های موفقی به کمک شبکه‌های عصبی مصنوعی در مباحث مختلف منابع طبیعی و علوم جنگل از قبیل مدل‌سازی عرض عملیات خاکی جاده‌های جنگلی (Peyrov *et al.*, 2014)، برآورد موجودی سرپای توده‌های جنگلی (Bayat *et al.*, 2016)، ارزیابی عامل‌های توده از یک تصویر ماهواره‌ای IKONOS (Klobucar *et al.*, 2008)، پیش‌بینی آتش‌سوزی جنگل (Safi and Bouroumi, 2013) و پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی (Sun *et al.*, 2015) انجام شده است. در زمینه کاربرد شبکه عصبی مصنوعی در برنامه‌ریزی شبکه جاده جنگلی، Aron (2003) در پژوهشی به مدل‌سازی طراحی اولیه جاده جنگلی با استفاده از ترکیب شبکه عصبی مصنوعی پیشرو و GIS پرداخت. در این پژوهش روش شبکه عصبی مصنوعی با روش کلاسیک شیب – ناهمواری که به‌طور سنتی در طراحی اولیه جاده‌های جنگلی با GIS استفاده می‌شود، مقایسه شد. شایان ذکر است که در تمام موارد روش شبکه عصبی مصنوعی نتایج بهتری از نظر طول جاده و ضریب همبستگی مکانی نشان داد. Abbasian و همکاران (2017) به طراحی مسیر جاده جنگلی بر اساس مدل‌سازی خطر زمین‌لغزش با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی و پهنه‌بندی طبقات این خطر پرداختند. Javanmard و همکاران (2018) در پژوهشی در جنگل خیرود برای تهیه نقشه شایستگی برای عبور شبکه جاده ابتدا یک نقشه شایستگی با روش ترکیب وزن‌دهی خطی (WLC) برای بخش پاتم این جنگل تهیه کردند. سپس از معیارهای شیب، زمین‌شناسی و بافت خاک مورد استفاده به‌عنوان ورودی مدل و داده شایستگی عبور جاده بخش پاتم را به‌عنوان خروجی برای آموزش دو شبکه عصبی پرسپترون چندلایه (MLP) و تابع شعاع مبنا (RBF) استفاده کردند و این دو شبکه مقدار مطلوبیت عبور جاده را برای پنج بخش جنگل برآورد کردند. Talebi و همکاران (2018) در طراحی شبکه جاده جنگلی برای توسعه گردشگری در منطقه حفاظت‌شده ارسباران از شبکه عصبی پرسپترون چندلایه برای شناسایی و مدل‌سازی مناطق مستعد تفرجی استفاده کردند.

با توجه به کاربرد شبکه عصبی در زمینه‌های مختلف، این پژوهش با هدف ارائه یک روش هوشمند مبتنی بر شبکه عصبی مصنوعی برای برآورد مقدار مطلوبیت عبور جاده برای طراحی و اصلاح و توسعه مناسب شبکه جاده و راه‌های ارتباطی موجود در منطقه حفاظت‌شده ارسباران انجام گرفت.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد بررسی

جنگل‌های ارسباران در شمال غرب کشور و به‌طور پراکنده در شیب‌های شمالی ارتفاعات رشته‌کوه قره‌داغ استان آذربایجان شرقی در منطقه‌ای به نام ارسباران قرار دارند (Alijanpour *et al.*, 2009) و منطقه حفاظت‌شده ارسباران در محدوده حوزه‌های ایلگنه‌چای و کلیبرچای این جنگل‌ها بین ′٤٠ °٣٨ تا ′٠٩ °٣٩ عرض شمالی و ′٤٢ °٤٦ تا ′٠٣ °٤٧ طول شرقی قرار گرفته است (Sarhangzadeh and Makhdoum, 2002). مساحت این منطقه حدوداً ۸۰ هزار هکتار است که حدود ۷۰ درصد منطقه (٥٦ هزار هکتار) را جنگل پوشانده است. در منطقه حفاظت‌شده ارسباران از نظر شرایط توپوگرافی، تنوع آب‌وهوایی و موقعیت جغرافیایی، تنوع گیاهی و ذخیره‌گاه ژنتیکی فون و فلور بسیار غنی تشکیل یافته است و این منطقه به‌عنوان یکی از ذخایر نه‌گانه بیوسفر ایران در یونسکو به ثبت رسیده است (Mohammad-Dustar-Sharaf *et al.*, 2016). بارندگی سالانه در منطقه ارسباران حدود ۳۰۰ تا ٦۰۰

میلی‌متر است، بااین‌وجود تعداد روزهای مه خیز این منطقه زیاد است و نقش عمده‌ای در بیلان آب جنگل دارد (Zabardast *et al.*, 2011). متوسط درجه حرارت سالیانه ناحیه رویشی ارسباران در ارتفاعات پائین حدود ۱٤ درجه سانتی‌گراد و در ارتفاعات بالا تا پنج درجه سانتی‌گراد کاهش می‌یابد (Anonymous, 2016). عمده گونه‌های چوبی این منطقه شامل ممرز، افرا، بلوط، گیلاس وحشی، ملج، ون، سیب، انجیر، عرعر، گردو، فندق، ارس و بنه است. اردوج، درخت پر و بلوط سفید از دیگر گونه‌های چوبی هستند که به‌طور انحصاری در منطقه ارسباران انتشار دارند. از گونه‌های درختچه‌ای نیز می‌توان بادامچه، داغداغان، زغال‌اخته، انار جنگلی، محلب، قره‌قاط و زرشک را نام برد. آمیختگی پهن‌برگان و سوزنی‌برگان در بعضی از مناطق جنگلی ارسباران موجب به‌وجود آمدن جایگاه منحصربه‌فردی برای این جنگل‌ها شده است (Zabardast *et al.*, 2011).

روش پژوهش

در این پژوهش برای مدل‌سازی و تهیه نقشه قابلیت عبور جاده از شبکه عصبی مصنوعی استفاده شد. پس از شناسایی معیارها با مرور منابع (Mohammadi Azizi and Najafi, 2011 ،Samani *et al.*, 2010 ،Caliskan, 2013 ،Hayati *et al.*, 2013 ،Acar *et al.*, 2017) و تهیه لایه‌های اطلاعاتی موردنیاز، نقشه معیارها از لایه‌های مربوطه استخراج شدند. منابع و لایه‌های اطلاعاتی موردنیاز از مراکز مربوطه تهیه شدند، به‌طوری‌که عامل‌های تشکیل‌دهنده شکل زمین (نقشه شیب، جهت و ارتفاع منطقه) از نقشه‌های توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰ مستخرج از نقشه‌های رقومی DGN 3D سازمان نقشه‌برداری تهیه و طبقه‌بندی شدند. دیگر لایه‌های اطلاعاتی موردنیاز از قبیل سنگ‌بستر، کاربری اراضی، نقشه رده خاک، حساسیت به فرسایش، رودخانه و جاده‌های موجود از سازمان جنگل‌ها تهیه شدند و با توجه به لایه‌های استخراجی از لایه‌های DGN تکمیل شدند. بدین ترتیب نقشه‌های موردنیاز از قبیل نقشه تراکم پوشش گیاهی از نقشه کاربری اراضی استخراج شد. با توجه به عدم وجود نقشه بافت خاک برای منطقه، این نقشه با استفاده از لایه سنگ‌بستر و مطابق با روش مخدوم (Makhdoum, 2010) تهیه و با لایه بافت خاک مربوط به رده خاک موجود برای منطقه ادغام شد و در نهایت نقشه بافت خاک برای منطقه تهیه شد.

نقشه‌های تهیه‌شده قبل از ترکیب برای یکسان‌سازی، به‌صورت فازی استانداردسازی شدند. بدین ترتیب نقشه‌های شیب، جهت، ارتفاع، نقشه حساسیت به فرسایش، تراکم پوشش گیاهی، سنگ‌بستر، بافت خاک، نقشه فاصله از رودخانه و نقشه فاصله از شبکه جاده موجود در محیط ArcGIS تهیه و بر اساس نظر کارشناسی و شرایط منطقه مبنی بر تأثیر در هزینه ساخت و اثرهای محیط‌زیستی این زیرساخت‌ها طبقه‌بندی و به فرمت رستری به محیط IDRISI وارد شدند تا استاندارد شوند. در این رابطه از توابع تعریفی کاربر (User defined) استفاده شد و معیارها در محدوده اعداد صفر و یک و با توجه به طبقه‌بندی معیارهای اکولوژیکی برای مدل‌سازی (Makhdoum *et al.*, 2001) فازی و استانداردسازی شدند. سپس معیارها با روش مقایسه زوجی AHP و با استفاده از نظرات کارشناسان (هفت نفر از متخصصین مهندسی جنگل و جاده‌سازی) در نرم‌افزار Expert choice وزن‌دهی شدند. پس از تهیه و وزن‌دهی لایه‌های اطلاعاتی، لایه‌ها با استفاده از روش WLC در محیط ArcGIS روی-هم‌گذاری شدند و در آخر خروجی نهایی به‌صورت نقشه شایستگی جاده‌سازی برای تهیه نمونه‌های آموزشی برای شبکه عصبی به دست آمد.

مدل‌سازی شبکه عصبی

با توجه به اینکه شبکه عصبی MLP کاربرد بیشتری در منابع طبیعی دارد و به‌عنوان کارآمدترین شبکه برای استفاده در مدل‌سازی و مدیریت منابع طبیعی شناخته شده است (Safi and bouroumi, 2013)، بنابراین در این پژوهش برای مدل‌سازی هوشمند قابلیت منطقه برای عبور جاده از این شبکه عصبی استفاده شد. برای آموزش شبکه عصبی مصنوعی از کل سطح منطقه به روش تصادفی سیستماتیک نمونه‌برداری شد و نمونه‌های دارای اطلاعات تکراری حذف شدند. بدین ترتیب، شبکه‌هایی با اضلاع ۱۰۰، ۲۰۰ و ۵۰۰ متر در محیط GIS ایجاد و برای ایجاد نمونه‌های تکراری و نمایندگی کل منطقه بررسی شدند. بدین ترتیب، شبکه ۲۰۰×۲۰۰ متری با ایجاد تعداد نمونه مناسب برای آموزش شبکه و نمایانگر کل منطقه برای نمونه‌برداری انتخاب شد. ارزش نه متغیر مورد استفاده به‌عنوان داده‌های ورودی و داده شایستگی تهیه‌شده به‌عنوان خروجی برای ۵۹۰۹ نمونه آموزشی تهیه‌شده در ArcGIS استخراج و برای آموزش به شبکه وارد شدند تا پردازش بر روی آنها انجام گیرد. برای اجرای شبکه ساختارهای با یک و دو لایه مخفی و با تعداد متفاوت نرون (۵ تا ۳۰ نرون) با استفاده از روش آزمون‌وخطا برای انتخاب بهترین مدل ایجاد شدند. در آخر ساختار دارای دقت و کارایی بالاتر برای پیش‌بینی مقدار مطلوبیت عبور جاده انتخاب شد. با توجه به ماهیت مدل تخمین تابع در این پژوهش از تابع انتقال غیرخطی تانژانت هیپربولیک (tansig) به دلیل مشتق‌پذیر بودن و سادگی (رابطه ۱) برای نرون‌های لایه مخفی و تابع انتقال خطی (purlin) (رابطه ۲) برای نرون‌های لایه خروجی استفاده شد (Nasr *et al.*, 2012).

رابطهٔ (۱) $f(x) = \tanh(x)=\frac{e^{x}-e^{-x}}{e^{x}+e^{-x}}$ $-1 \leq f(x) \leq 1$

رابطهٔ (۲) $f(x) = x$ $-\infty < f(x) < +\infty$

برای آموزش شبکه الگوریتم‌های آموزشی مختلف بکار گرفته شدند، ولی با توجه به تعداد عامل‌ها و اندازه شبکه، الگوریتم LM عملکرد بهتری در مقایسه با دیگر الگوریتم‌های بکار گرفته شده نشان داد، از این‌رو، از این الگوریتم برای آموزش مدل‌های شبکه استفاده شد. برای آموزش از الگوریتم پس‌انتشار خطا (Back Propagation) استفاده شد که شامل روش بهینه‌سازی است و هدف این روش حداقل کردن خطای کلی مشاهده‌شده در لایه خروجی است. تغییر وزن‌ها در این الگوریتم بر اساس روش گرادیان نزولی انجام می‌گیرد (Safi and Bouroumi, 2013). به‌طوری‌که در این روش وزن‌ها و بایاس‌ها با توجه به مشتقات خطای شبکه تغییر می‌یابند، به‌گونه‌ای که خطای شبکه به حداقل برسد. در کل داده‌های موجود به سه دسته تقسیم شدند، در همه مدل‌ها ۷۰ درصد داده‌ها (٤١٣٧ نمونه) برای آموزش، ۱۵ درصد (٨٨٦ نمونه) برای اعتبارسنجی و ۱۵ درصد (٨٨٦ نمونه) برای آزمون و ارزیابی مدل مورد استفاده قرار گرفت. سپس کل داده‌های منطقه استخراج و به‌منظور برآورد مقدار مطلوبیت کل منطقه برای عبور جاده به مدل انتخابی شبکه عصبی مصنوعی وارد شدند و مقادیر خروجی شبکه به همراه مختصات نقاط برای تهیه نقشه شایستگی به نرم‌افزار ArcGIS وارد شدند. در آخر با توجه به مقدار مطلوبیت قسمت‌های مختلف نقشه، نقشه شایستگی برآورد شده به مناطق با قابلیت‌های مختلف برای عبور جاده تقسیم‌بندی شد. همچنین برای بررسی اندازهٔ تأثیر هر یک از عامل‌های ورودی بر مقدار شایستگی محاسبه شده توسط شبکه عصبی، آنالیز حساسیت انجام شد. در واقع برای تعیین اهمیت متغیرهای ورودی از آنالیز حساسیت نرم‌افزار نروسولوشن (NeuroSolutions) بر مبنای روش ریاضی استفاده شد. تمام مراحل طراحی و

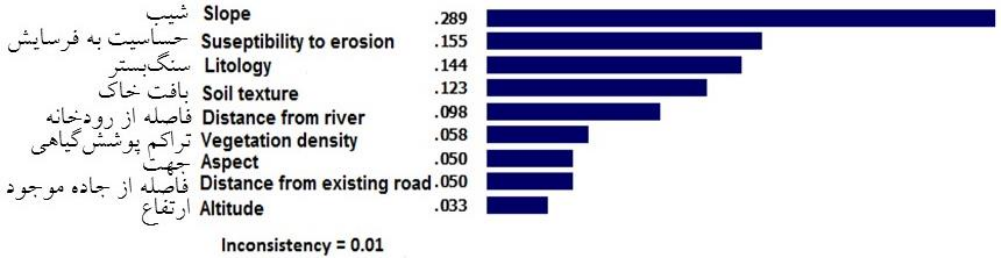
اجرای شبکه‌های عصبی مصنوعی در محیط نرم‌افزار MATLAB2016b انجام شد.

ارزیابی عملکرد شبکه عصبی

برای ارزیابی بهترین برازش شبکه برای یافتن بهترین ساختار شبکه، از شاخصه‌های آماری مختلف مثل مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین قدر مطلق خطا (MAE) و ضریب تبیین (R^2) استفاده شد (Peyrov *et al.*, 2014، Sun *et al.*, 2015، Bayat *et al.*, 2016) که هدف کمینه کردن خطا است. برای ارزیابی عملکرد شبکه عصبی مصنوعی نتایج به‌دست‌آمده با روش آماری رگرسیون خطی چندمتغیره مقایسه شدند، به این منظور داده‌ها در نرم‌افزار SPSS مورد تجزیه‌وتحلیل قرار گرفته و نتایج شبکه عصبی مصنوعی با نتایج حاصل از رگرسیون مقایسه شدند.

نتایج

در این پژوهش معیارهای مورد استفاده برای این‌که به واحدهای قابل‌مقایسه تبدیل شوند، با استفاده از روش منطق فازی استانداردسازی و در محدود صفر (نامطلوب) و یک (مطلوب) قرار گرفتند و اهمیت نسبی معیارها با استفاده از روش مقایسه زوجی AHP تعیین شدند. طبق نتایج به‌دست‌آمده، معیار شیب بیشترین و معیار ارتفاع کمترین وزن را به خود اختصاص دادند (شکل ۱).



شکل ۱- اهمیت نسبی معیارهای مؤثر بر جاده‌سازی به‌دست‌آمده با AHP

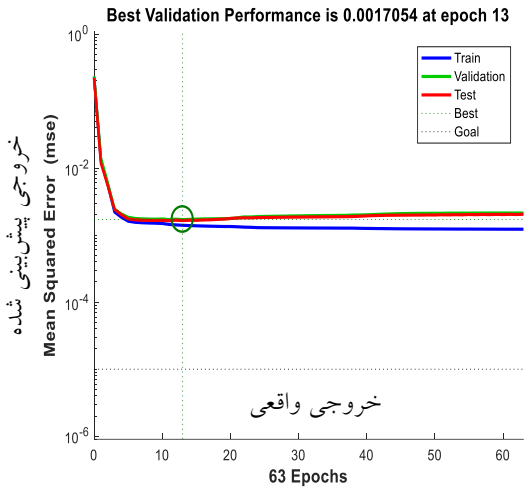
Figure 1. The relative importance of the effective criteria on road construction obtained with AHP

با روی‌هم‌گذاری معیارهای وزن‌دهی شده در ArcGIS نقشه شایستگی عبور جاده برای تهیه نمونه‌های آموزشی برای شبکه عصبی مصنوعی تهیه شد. سپس برای مدل‌سازی، شبکه عصبی MLP با توجه به نقشه به‌دست‌آمده از ارزیابی چندمعیاری آموزش داده شد. در مرحله اول شبکه با یک لایه پنهان با تعداد نرون متغیر آموزش داده شد و در مرحله بعد قدرت تخمین شبکه با دو لایه پنهان و با تعداد نرون‌های متفاوت در لایه‌های مخفی بررسی شدند. در نهایت شبکه با دو لایه پنهان و ۱۵ نرون در هر لایه و یک نرون در لایه خروجی با R^2، ۰/۹۰۷۹ و RMSE، ۰/۰۳۸۵ از بین ساختارهای پیشنهادی به‌عنوان بهترین مدل انتخاب شد و برای برآورد ارزش مطلوبیت عبور جاده هرکدام از پیکسل‌های کل منطقه بکار گرفته شد. نتایج حاصل از بهینه‌سازی شبکه عصبی مصنوعی در جدول ۱ ارائه شده است. در واقع هدف از آموزش شبکه کاهش خطا است، بنابراین در شکل‌های ۲ و ۳ کاهش خطا در نتیجه آموزش شبکه و همبستگی مناسب بین خروجی واقعی و خروجی پیش‌بینی‌شده توسط شبکه عصبی مصنوعی نشان داده شده است.

جدول ۱- مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی برای برآورد ارزش مطلوبیت عبور جاده

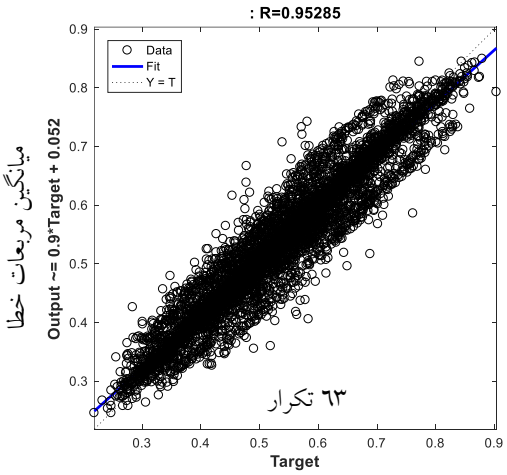
Table 1. The models of artificial neural network for predicting the road suitability value

R2	MAE	RMSE	ساختار Structure	تعداد نرون لایه پنهان Number of neuron in hidden layer	تعداد لایه پنهان Number of hidden layer
0.9024	0.0272	0.0397	9-5-1	5	1
0.9056	0.0273	0.039	9-10-1	10	
0.9041	0.0278	0.0394	9-15-1	15	
0.9046	0.0271	0.0392	9-20-1	20	
0.9051	0.0275	0.0391	9-25-1	25	
0.9043	0.027	0.0393	9-30-1	30	
0.9017	0.0271	0.0398	9-2-3-1	5	2
0.9045	0.0272	0.0392	9-5-5-1	10	
0.9045	0.0273	0.0393	9-5-10-1	15	
0.9025	0.027	0.0397	9-5-15-1	20	
0.9046	0.0269	0.0392	9-5-20-1	25	
0.906	0.027	0.0389	9-5-25-1	30	
0.9031	0.0273	0.0395	9-10-10-1	20	
0.9046	0.0271	0.0392	9-10-15-1	25	
0.9047	0.0272	0.0392	9-10-20-1	30	
0.9079	0.0272	0.0385	9-15-15-1	30	



شکل ۲- کاهش خطای آموزشی و عملکرد اعتبارسنجی در مدل‌سازی شبکه عصبی مصنوعی

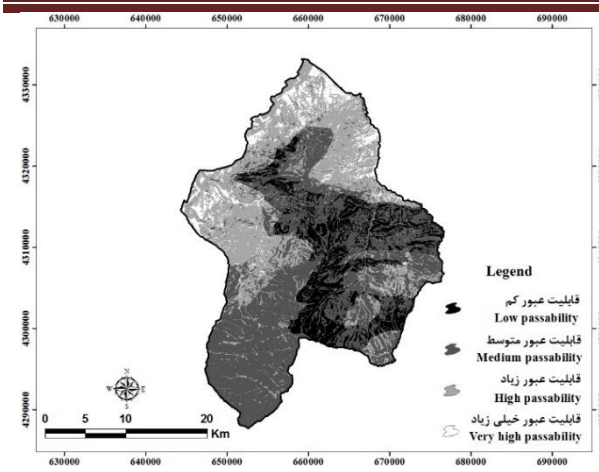
Figure 2. Reducing the training error and validation performance in ANN modeling



شکل ۳- همبستگی بین خروجی‌های واقعی (Target) و پیش‌بینی شده (Output) شبکه عصبی مصنوعی

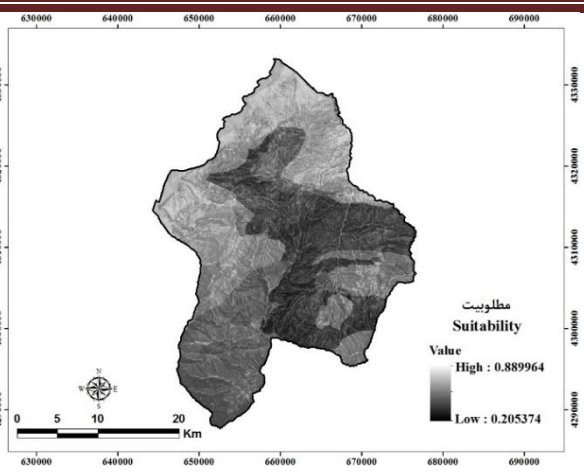
Figure 3. Correlation between Targets and outputs of the ANN

در آخر مقدار مطلوبیت کل منطقه برای ساخت جاده توسط بهترین شبکه برآورد شده و در محیط ArcGIS نقشه مطلوبیت عبور جاده تهیه شد (شکل ٤). در نقشه شایستگی تهیه شده ارزش‌های کمتر (نزدیک به صفر) مطلوبیت کمتر و ارزش‌های بیشتر (نزدیک به یک) مطلوبیت بیشتری را برای ساخت جاده دارند. سپس با توجه به مقدار مطلوبیت قسمت‌های مختلف، نقشه مطلوبیت مدل‌سازی شده برای به‌کارگیری برای طراحی شبکه جاده به چهار طبقه با قابلیت‌های مختلف برای عبور جاده طبقه‌بندی شد (شکل ۵) که با توجه به جدول ۲ سطح بیشتری از منطقه دارای قابلیت متوسط برای عبور جاده است.



شکل ۵- نقشه پتانسیل عبور جاده مدل‌سازی شده با شبکه عصبی مصنوعی

Figure 5. Road potential map modeled by ANN



شکل ٤- نقشه شایستگی جاده برآورد شده با شبکه عصبی

Figure 4. Road suitability map predicted by ANN

جدول ۲- درصد قابلیت‌های منطقه پیش‌بینی‌شده با شبکه عصبی مصنوعی برای عبور جاده

Table 2. Percentage of the area capabilities predicted by artificial neural network for road passing

طبقه Class	سطح Area	
	هکتار ha	درصد %
منطقه با قابلیت عبور کم Area with low pass ability	10666.5	13.3
منطقه با قابلیت عبور متوسط Area with medium pass ability	38237.46	47.67
منطقه با قابلیت عبور زیاد Area with high pass ability	26053.6	32.48
منطقه با قابلیت عبور خیلی زیاد Area with very high pass ability	5257.39	6.55

ارزیابی عملکرد شبکه عصبی

ارزیابی عملکرد مدل طراحی‌شده با شبکه عصبی مصنوعی با توجه به معیارهای ارزیابی در جدول ۳ ارائه شده است. طبق نتایج می‌توان بیان کرد هر دو روش شبکه عصبی مصنوعی و رگرسیون خطی عملکرد خوبی برای برآورد مقدار مطلوبیت عبور جاده نشان دادند ولی شبکه عصبی مصنوعی دارای عملکرد به نسبت بهتری از رگرسیون خطی است.

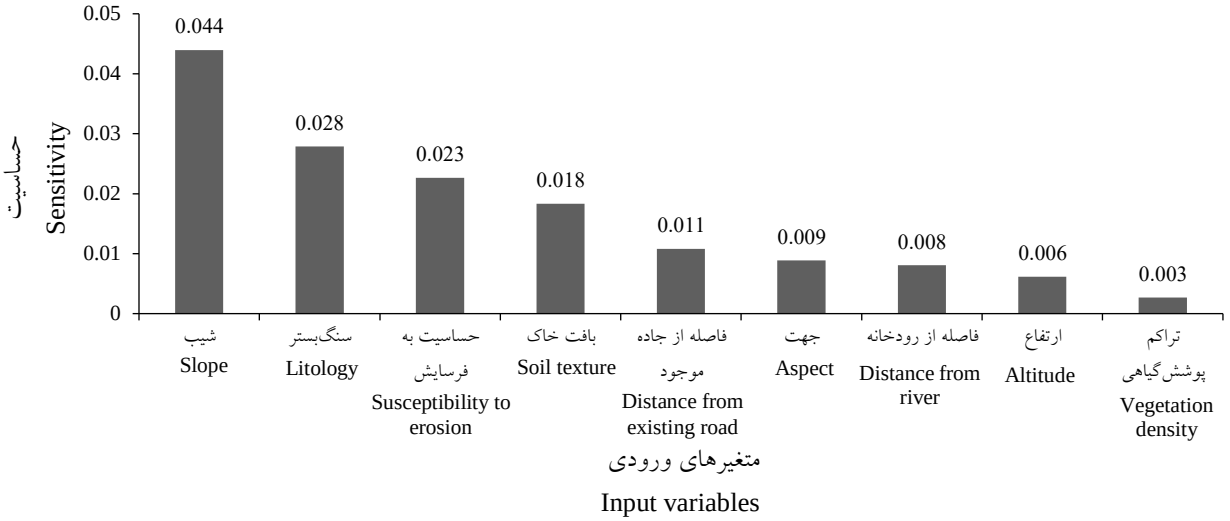
جدول ۳- ارزیابی عملکرد شبکه عصبی مصنوعی و رگرسیون خطی برای برآورد مقدار مطلوبیت عبور جاده

Table 3. Evaluation of the artificial neural network and linear regression performance for predicting the road suitability

R	RMSE	ساختار بهینه Optimal structure	روش Method
0.908	0.0385	9-15-15-1	شبکه عصبی مصنوعی Artificial neural network
0.901	0.04	-	رگرسیون خطی Linear regression

آنالیز حساسیت مدل

نتایج مربوط به آنالیز حساسیت معیارهای بکار گرفته شده برای مدل‌سازی در شکل ٦ نشان داده شده است. در این شکل ضریب تأثیرگذاری هر یک از متغیرها در برآورد ارزش‌ها برای عبور جاده نشان داده شده است. بدین ترتیب مشخص است که شبکه شیب را به‌عنوان مهم‌ترین عامل برای ساخت جاده و تراکم پوشش گیاهی را کم‌اهمیت‌ترین عامل برآورد کرده است.



شکل ٦- ضریب تأثیرگذاری متغیرهای ورودی در مدل‌سازی شبکه عصبی مصنوعی

Figure 6. Impact coefficient of the input variables in artificial neural network modeling

بحث

در این پژوهش در مقایسه با بیشتر پژوهش‌های پیشین انجام گرفته در رابطه با طراحی شبکه جاده و مطابق با پژوهش Javanmard و همکاران (2018) به ارائه یک روش هوشمند مبتنی بر شبکه‌های عصبی مصنوعی با قابلیت تعمیم اطلاعات، برای مدل‌سازی قابلیت منطقه برای طراحی مسیرهای جاده پرداخته شد. در این رابطه برای آموزش شبکه عصبی ساختارهای با تعداد لایه پنهان و تعداد نرون‌های متفاوت بررسی شدند. به‌طوری که اضافه کردن تعداد لایه و تعداد نرون‌های بیشتر از موارد گزارش شده در جدول ۱ تأثیری را در بهبود مجذور میانگین مربعات خطا و ضریب تبیین که مبین دقت شبکه هستند نشان ندادند. در واقع ساختارهای با ۵ تا ۳۰ نرون (با اختلاف ۵) با یک و دو لایه پنهان برای ایجاد تأثیر بر آموزش شبکه ایجاد شدند (جدول ۱)، به‌طوری‌که ساختارهای ایجاد شده تفاوت زیادی را در

مقایسه باهم در دقت شبکه عصبی ایجاد نکردند. تنها ساختار ۱-۱۵-۱۵-۹ با یک مقدار RMSE و R^2 متفاوت و بهتر نسبت به ساختارهای دیگر برای آموزش شبکه عصبی استفاده شد.

الگوریتم‌های آموزشی مختلف از قبیل نزول گرادیان با مومنتوم، سرعت یادگیری متغیر، پس انتشار ارتجاعی، گرادیان توأم، شبه نیوتون و لونبرگ-مارکوارت (LM) برای آموزش شبکه بررسی شدند. استفاده از الگوریتم LM برای آموزش شبکه عصبی با حجم زیادی از داده‌ها نتایج بهتری در عملکرد شبکه مطابق با پژوهش Zhao و همکاران (2009) و Abbasian و همکاران (2017) در مقایسه با دیگر الگوریتم‌های بکار گرفته شده نشان داد. همچنین آموزش شبکه با حجم زیادی از داده‌ها در مقایسه با بیشتر پژوهش‌های انجام گرفته با کاربرد شبکه عصبی مصنوعی (Rakei و همکاران (2008)، Javanmard و همکاران (2018)، Vafakhah and Saidian (2015) و Abbasian و همکاران (2017)) انجام شد که این مسئله می‌تواند نمایانگر عملکرد و قابلیت تعمیم بهتر مدل برای پیش‌بینی داده‌ها باشد. به‌طوری‌که مطابق با یافته‌های Rakei و همکاران (2008) اگر اندازه نمونه‌های آموزشی خیلی زیاد باشد، قابلیت سیستم افزایش می‌یابد و اگر خیلی کم باشد شبکه قادر به تشریح خوب مسئله نخواهد بود و قابلیت تعمیم آن کاهش می‌یابد (Rakei *et al.*, 2008). برخلاف پژوهش Javanmard و همکاران (2018) که از داده‌های آموزشی مربوط به یک بخش از منطقه برای برآورد مقدار مطلوبیت کل منطقه بهره گرفته شده است، در این پژوهش داده‌های آموزشی برای برآورد دقیق‌تر مطلوبیت از کل سطح منطقه برداشت شدند. همچنین عامل‌های بیشتری از قبیل شیب، جهت، ارتفاع، بافت خاک، سنگ‌بستر، حساسیت به فرسایش، تراکم پوشش گیاهی، فاصله از رودخانه و فاصله از جاده موجود برای مدل‌سازی موردتوجه واقع شدند. به‌طوری‌که معیارهای شیب، حساسیت به فرسایش، سنگ‌بستر و بافت خاک با بیشترین اهمیت در نتیجه وزن‌دهی با روش AHP بیشترین تأثیر را در مدل‌سازی شبکه عصبی مصنوعی داشتند. در دیگر پژوهش‌های انجام شده در رابطه با طراحی شبکه جاده جنگلی از قبیل Mohammadi Samani و همکاران (2010)، Caliskan (2013) و Salehi و همکاران (2015) بسته به کاربرد معیارهای فوق‌الذکر در این پژوهش‌ها، در کل این معیارها جزء چهار اولویت اول نسبت به معیارهای دیگر گزارش شدند. معیار شیب به‌عنوان مهم‌ترین عامل تأثیرگذار در مدل‌سازی برای ساخت جاده موردتوجه قرار گرفت.

مطابق با نقشه پتانسیل ساخت جاده مدل‌سازی شده، نزدیک به ۵۰ درصد منطقه (۳۸۲۳۷/٤٦ هکتار) قابلیت متوسطی را برای عبور جاده نشان داد. همچنین با توجه به تجزیه‌وتحلیل داده‌ها با رگرسیون خطی به‌منظور ارزیابی کارایی شبکه عصبی، دو مدل شبکه عصبی مصنوعی و رگرسیون خطی چندمتغیره به‌ترتیب با ضریب تبیین ۰/۹۰۸ و ۰/۹۰۱ و مجذور میانگین مربعات خطا ۰/۰۳۸۵ و ۰/۰٤ عملکرد مناسبی برای پیش‌بینی ارزش مطلوبیت عبور جاده نشان دادند. عملکرد مشابه شبکه عصبی مصنوعی با رگرسیون می‌تواند دلیل بر وجود یک رابطه خطی بین داده‌ها باشد و ضریب تبیین بالا در مدل‌ها می‌تواند به دلیل وجود رابطه منطقی بین داده‌های ورودی و خروجی باشد. در حالت کل شبکه عصبی مصنوعی عملکرد بهتری نسبت به رگرسیون خطی نشان داد که این نتایج با نتایج دیگر محققان سازگار است (Ghanbari و همکاران (2009)، Peyrov و همکاران (2014)، Bayat و همکاران (2016) و Javanmard و همکاران (2018)). از طرفی نتایج به‌دست‌آمده با یافته‌های پژوهش Vafakhah and

Saidian (2015) که در رابطه با پیش‌بینی رواناب و رسوب انجام شده است، مغایرت دارد. به‌طوری‌که در پژوهش آنها در شرایط مختلف، رگرسیون چندمتغیره نتایج مطلوب‌تری در مقایسه با شبکه عصبی مصنوعی نشان داد؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت شبکه عصبی مصنوعی بسته به نوع داده‌ها متفاوت عمل می‌کند و این الگوریتم برای داده‌های همگن نتایج بهتری می‌تواند ارائه دهد. از طرفی مدل ارائه شده توسط شبکه عصبی مصنوعی می‌تواند در مناطقی که مدل کالیبره شده استفاده شود (برای درون‌یابی) یا برای دیگر مناطقی که بازه نسبی عامل‌های ورودی شبیه به منطقه‌ای که مدل کالیبره شده باشد، ارائه شود (Zhao *et al.*, 2009). در کل می‌توان گفت کاربرد شبکه عصبی مصنوعی در این پژوهش مطابق با پژوهش‌های Aron (2003)، Abbasian و همکاران (2017) و Javanmard و همکاران (2018) انجام شده در زمینه طراحی شبکه جاده و نتایج دیگر پژوهش‌های انجام شده در مسائل مختلف جنگل (Klobucar و همکاران (2008)، Safi and Bouroumi (2013)، Peyrov و همکاران (2014) و Bayat و همکاران (2016)) دارای دقت و کارایی بهتری است.

در این پژوهش ترکیبی از روش ارزیابی چندمعیاره مبتنی بر AHP و روش شبکه عصبی مصنوعی برای تهیه نقشه پتانسیل ساخت جاده در منطقه حفاظت‌شده ارسباران ارائه شد. به‌طوری‌که مدل ارائه شده می‌تواند برای این منطقه یا برای مناطق با بازه اطلاعات ورودی مشابه قابلیت کاربرد داشته باشد. شبکه عصبی مصنوعی توانست با خطای قابل قبولی مقدار مطلوبیت منطقه را برای عبور شبکه جاده پیش‌بینی کند و در نهایت نقشه شایستگی برای کمک به مسیریابی اصولی در منطقه با در نظر گرفتن مسائل اقتصادی و اثرهای محیط‌زیستی مؤثر در مکان‌یابی شبکه جاده ارائه شد. به‌طوری‌که نتایج مطلوب و رضایت‌بخش این پژوهش قابلیت روش هوشمند شبکه عصبی مصنوعی را برای مدل‌سازی نقشه پتانسیل ساخت جاده به اثبات رساند؛ بنابراین استفاده از روش‌های نوین دارای دقت و سرعت عمل بالا می‌تواند جایگزین روش‌های قبلی برای مسئله مکان‌یابی مسیرهای جاده باشد. بدین ترتیب استفاده گسترده از روش‌های مبتنی بر هوش مصنوعی برای پیش‌بینی مسائل مرتبط به جاده جنگلی و مسیریابی و همچنین به‌کارگیری این روش‌ها در دیگر زمینه‌های علوم جنگل پیشنهاد می‌شود.

تشکر و قدردانی

این پژوهش در قالب طرح پژوهشی به شماره ۷۲۰۲۰۱۲/۱/٦ و با حمایت معاونت پژوهشی دانشگاه تهران انجام شد. بدین‌وسیله نگارندگان مراتب قدردانی و سپاس خود را از موسسه حمایت‌کننده و متخصصان محترم برای پر کردن پرسشنامه‌ها اعلام می‌دارند.

References

- Abbasian, A., R. Naghdi & I. Ghajar, 2017. Planning a single low risk forest road based on artificial neural network model of landslide susceptibility (case study: Kojour watershed). *Forest and Wood Products*, 70(3): 499-508. (In Persian)
- Acar, H.H., E. Dursun, S. Gulci & S. Gumus, 2017. Assessment of road network planning by using GIS-based multi-criteria evaluation for conversion of coppice forest to high forest. *Fresenius Environmental Bulletin*, 26(3): 2380-2388.
- Alijanpour, A., J. Eshaghi Rad & A. Banej Shafiei, 2009. Comparison of woody plants diversity in protected and non-protected areas of Arasbaran forests. *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*, 17(1): 125-133. (In Persian)
- Anonymous, 2016. National forest plan. Forest, Range and Watershed Organization, Tehran, 47 p. (In Persian)

- Aron, I. A., 2003. Optimal path/Neural network approaches to modeling of forest road design for use in automated GIS systems. M.Sc Thesis. University of British Colombia, Faculty of Forestry, 89 p.
- Azizi, Z. & A. Najafi, 2011. Fuzzy classification in forest area for road design (case study: Lirehsar forest, Tonekabon). *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*, 19(1): 42-54. (In Persian)
- Bayat, M., M. Namiranian, M. Omid, A. Rashidi, & S. Babaei, 2016. Applicability of artificial neural network for estimating the forest growing stock. *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*, 24(2): 214-226. (In Persian)
- Caliskan, E., 2013. Planning of forest road network and analysis in mountainous area. *Life science journal*, 10(2): 2456-2465.
- Enache, A., K. Stampfer, V. Ciobanu, O. Branzea & C. Duta, 2011. Forest road network planning with state of the art tools in a private forest district from Lower Austria. *Bulletin of the Transilvania University of Brasov. Forestry, Wood Industry, Agricultural Food Engineering. Series II*, *4*(2): 33-40.
- Ghanbari, F., Sh. Shataee, A.A. Dehghani & Sh. Ayoubi, 2009. Tree density estimation of forests by terrain analysis and artificial neural network. *Journal of Wood and Forest Science and Technology*, 16(4): 25-42. (In Persian)
- Hayati, E., B. Majnounian, E. Abdi, J. Sessions & M. Makhdoum, 2013. An expert-based approach to forest road network planning by combining Delphi and spatial multi-criteria evaluation. *Environmental Monitoring and Assessment*, 185:1767–1776.
- Javanmard, M., E. Abdi, M. Ghatee & B. Majnounian, 2018. Forest road planning using artificial neural network and GIS. *Iranian Journal of Forest*, 10(2): 139-152. (In Persian)
- Khezri, S.S., A. Alijanpour, O. Hosseinzadeh & M. Erfanian, 2017. Site selection for forest park using multi-criteria decision approach in the Darreh Shohada region, Urmia. *Journal of forest Research and Development*, 3(2): 133-146. (In Persian)
- Kia, S.M., 2015. Neural Networks in MATLAB. Kian University Press, 408 p. (In Persian)
- Klobucar, D., R. Pernar, S. Loncaric & M. Subasic, 2008. Artificial neural networks in the assessment of stand parameter from an IKONOS satellite image. *Croatian Journal of forest Engineering*, 29(2): 201-211.
- Makhdoum, M., 2010. Fundamental of land use planning. Tehran University press, 289 p. (In Persian)
- Makhdoum, M., A.A. Darvishsefat, H. Jafarzadeh & A. Makhdoum, 2001. Environmental evaluation and planning by geographic information system. Tehran University press, 304 p. (In Persian)
- Mohammad-Dustar-Sharaf, M., Sh. Mirfakhraie, M.R. Zargaran & N. Azimi, 2016. Species diversity of edaphic Mesostigmatid mites (Acari: Mesostigmata) of Arasbaran Forest. *Forest Research and Development*, 2(1): 85-96. (In Persian)
- Mohammadi Samani, K., S.A. Hosseiny, M. Lotfalian & A. Najafi, 2010. Planning road network in mountain forests using GIS and Analytic Hierarchical Process (AHP). *Caspian Journal of Environmental Science*, 8(2): 151-162.
- Mostafa, M., N. Raafatnia, Sh. Shatabe & H. Ghazanfar, 2010. Forest road networks design in a multiple used forestry plan using GIS, Armardah forests of Baneh. *Journal of Wood & Forest Science and Technology*, 17(1):129-133. (In Persian)
- Nasr, M.S., M.A.E. Moustafa, H.A.E. Seif & G.El. Kobrosy, 2012. Application of artificial neural network (ANN) for the prediction of EL-AGAMY wastewater treatment plant performance-EGYPT. *Alexandria Engineering Journal*, 51: 37-43.
- Peng, C. & X. Wen, 1999. Recent applications of artificial neural networks in forest resource management: an overview. From: AAAI Technical Report WS-99-07, 8 p.
- Peyrov, S., A. Najafi & S.J. Alavi, 2014. Prediction of forest roadway using artificial neural network and multiple linear regressions. *Journal of Forest Sustainable Development*, 1(3): 285-296. (In Persian)
- Rakei, B., M. Khameh Chian, P. Abdolmaleki & P. Gyahchy, 2008. Application of artificial neural network system in landslide hazard zonation, case study: Sefidar Galle Zone in Semnan province. *Journal of Tehran University Science*, 33(1): 64-57. (In Persian)
- Safi, Y. & A. Bouroumi, 2013. Prediction of forest fires using artificial neural networks. *Applied Mathematical Sciences*, 7(6): 271 – 286.

- Salehi, A., S. Rahbari Sisakht & S. Jahangirian, 2015. Assessment of planning status of roads in Yasouj Forest Park from the natural landscapes aspects. *Iranian Journal of Forest*, 7(3): 377-388. (In Persian)
- Sarhangzadeh, J. & M. Makhdoum, 2002. Land use planning of Arasbaran protected region. *Journal of Environmental Studies*, 28(30): 31-42. (In Persian)
- Sibi, A. & N.A. Raafatnia, 2012. Consideration of effective factors in design of forest roads using Geographic Information System (GIS). *Journal of Renewable Natural Resources Research*, 3(1):1-12. (In Persian)
- Stefanović, B., D. Stojnić & M. Danilović, 2016. Multi-criteria forest road network planning in fire-prone environment: a case study in Serbia. *Journal of Environmental Planning and Management*, *59*(5): 911-926.
- Sun, Y., D. Wendi, D.E. Kim & S.Y. Liong, 2015. Technical note: application of artificial neural networks in groundwater table forecasting – a case study in Singapore swamp forest. *Hydrology and Earth System Sciences Discussion*, 12: 9317–9336.
- Talebi, M., B. Majnounian, M. Makhdoum, E. Abdi & M. Omid, 2018. Forest road network designing for tourism development in Arasbaran protected area using GIS. *RS & GIS for Natural Resources*, 9(1): 93-112. (In Persian)
- Tampekis, S., S. Sakellariou, F. Samara, A. Sfougaris, D. Jaeger & O. Christopoulou, 2015. Mapping the optimal forest road network based on the multi criteria evaluation technique: the case study of Mediterranean Island of Thassos in Greece. *Environmental monitoring and assessment*, 187(11): 687.
- Vafakhah, M. & H. Saidian, 2015. Forecasting of runoff and sediment using neural network and multi regression in Aghajari Marls. *Journal of Range and Watershed Management*, 67(3): 487-499. (In Persian)
- Zabardast, L., H.R. Jafari, Z. Badehyan & M. Asheghmoala, 2011. Assessment of the trend of changes in land cover of Arasbaran protected area using satellite images of 2002, 2006 and 2008. *Environmental Researches*, 1(1): 23-33. (In Persian)
- Zhao, Z., T.L. Chow, H.W. Rees, Q. Yang, Z. Xing & F.R. Meng, 2009. Predict soil texture distributions using an artificial neural network model. *Computers and Electronics in Agriculture*, 65: 36–48.

Preparing of capability map for road construction using artificial neural network and GIS (case study: Arasbaran area)

M. Talebi1, B. Majnounian2, E. Abdi[*3] and M. Omid[4]

1- PhD student of Forest Engineering, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, I. R. Iran. (m_talebi@ut.ac.ir)
2- Professor, Department of Forestry and forest Economics, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, I. R. Iran. (bmajnoni@ut.ac.ir)
3- Associate Prof., Department of Forestry and forest Economics, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, I. R. Iran. (abdie@ut.ac.ir)
4- Professor, Department of Mechanical Engineering Agricultural Machinery, Faculty of Agricultural Engineering and Technology, University of Tehran, Karaj, I. R. Iran. (omid@ut.ac.ir)

Received: 09.10.2018 Accepted: 18.02.2019

Abstract

The aim of the study was to provide an intelligent artificial neural networks-based method for modeling the capability of Arasbaran protected area for road crossing, in order to design, modify, and appropriate development of existing road network and communication routs in the region. First, using Analytical Hierarchy Process (AHP) and Weighted Linear Combination (WLC) method, and utilization the effective informative layers on routing, the suitability map of road construction was prepared to provide training samples in ArcGIS. In the following, Multilayer Perceptron (MLP) network was used to estimate the suitability value of road crossing. In order to evaluate the neural network's model performance, the results were compared with the results of multivariate linear regression. According to the results, artificial neural network and statistical method of regression were shown to be useful in determining the suitability value of road crossing with coefficient of determination (R^2) 0.908 and 0.901, root mean squared error (RMSE) 0.0385 and 0.04, respectively. Neural network results were relatively better than regression. Also, according to the results of sensitivity analysis of input variables, four criteria of slope, bedrock, erosion susceptibility, and soil texture showed the highest influence in estimating the model, respectively.

Keywords: Analytical hierarchy process, Multilayer perceptron neural network, Road network, Suitability map.

[*] Corresponding author Tel: +982632223044