

## مکان‌یابی دپوهای چوب و مسیر عبور جاده‌های جنگلی به کمک تئوری گراف (بررسی موردی: سری دو طرح جنگلداری دکتر بهرام‌نیا)

آیدین پارساخو<sup>۱</sup>، مجید لطفعلیان<sup>۲</sup> و ایوب رضایی مطلق<sup>۳\*</sup>

۱- دانشیار، گروه جنگلداری، دانشکده علوم جنگل، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. (aidinparsakhoo@yahoo.com)  
۲- استاد، گروه جنگلداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران. (mlotfalian@yahoo.com)  
۳- دانشجوی دکتری مدیریت جنگل، دانشکده علوم جنگل، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. (aiubrezace@yahoo.com)

تاریخ دریافت: ۹۸/۰۶/۳۱ تاریخ پذیرش: ۹۸/۱۲/۰۳

### چکیده

هدف از انجام این پژوهش انتخاب کم‌هزینه‌ترین گراف از طریق مکان‌یابی کم‌هزینه‌ترین دپوهای چوب (گره‌ها) و مسیر عبور شبکه جاده (پیوندها) برای تکمیل شبکه جاده‌های سری دو طرح جنگلداری دکتر بهرام‌نیا در استان گلستان بود. بدین منظور در سال ۱۳۹۶ ارزش هر گره و پیوند برای ۳۶ گراف پیشنهادی در واحدهای بهره‌برداری محاسبه شد. هزینه کل چوب‌کشی برای هر گره با بهره‌گیری از مدلی با متغیرهای زمان کل صرف‌شده برای یک نوبت چوب‌کشی، نرخ اجاره اسکیدر، تعداد کل نوبت‌های چوب‌کشی، فاصله چوب‌کشی، تعداد گرده‌بینه‌ها (بر اساس سیاهه لیست نشانه‌گذاری)، متوسط فاصله وینچینگ و طول گرده‌بینه (۲/۸ متر برای گرده‌بینه‌های صنعتی) به دست آمد. بعد از شناسایی کم‌هزینه‌ترین گره‌ها، اتصالات بین آن‌ها از طریق پیوندها برقرار شد. هزینه ساخت هر پیوند با بهره‌گیری از مدلی با متغیرهای طول پیوند، شیب طولی پیوند، شیب عرضی دامنه و هزینه واحد جاده‌سازی برآورد شد. هزینه کل بهره‌برداری از مجموع هزینه گره‌ها و پیوندها به دست آمد. یافته‌های پژوهش نشان داد که به کمک تئوری گراف و کمینه‌سازی هزینه‌ها، بهترین گره‌ها در فاصله‌ای نزدیک به درختان نشانه‌گذاری شده و بهترین پیوندها در شیب‌های ملایم واقع شدند. گراف پیشنهادی ۲ به‌عنوان بهترین گزینه انتخاب شد. هزینه کل چوب‌کشی برای گره‌ها و هزینه ساخت پیوندهای این گراف به ترتیب ۹۶۹۷۷۰۰ و ۳۴۹۰۹۵۰۰۰ ریال بود. طول کل و هزینه کل بهره‌برداری گراف برگزیده به ترتیب ۵۳۲ متر و ۳۵۸۷۹۲۷۰۰ ریال بود.

واژه‌های کلیدی: جاده جنگلی، دپو چوب، پیوند، کم‌هزینه‌ترین گراف، گره.

## مقدمه

کشی برای دپوهای مختلف چوب به صورت مجزا صرف نظر می شود (Bin, 2012).

امروزه با رونق علوم رایانه‌ای، مدل‌های بهینه-سازی در کنار سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی کاربرد چشم‌گیری یافته‌اند. به‌ویژه تئوری گراف که از طریق آن می‌توان مکان‌یابی شبکه حمل و نقل جنگل شامل دپوها و مسیر عبور جاده را در هر مقیاسی به‌طور دقیق و سلول به سلول به اجرا درآورد (Chung et al., 2004). یک گراف نمایش سمبلیک شبکه و اتصالات آن است (Jaafari et al., 2015). نظریه گراف شاخه‌ای از علم ریاضیات در مورد چگونگی کدگذاری شبکه و اندازه‌گیری مشخصات آن است که در دهه‌های اخیر به دلیل روند رو به رشد پژوهش‌های اجتماعی و شبکه‌های پیچیده توسعه داده شده است (Galatioto et al., 2015). مجموعه گراف به صورت توپولوژیک و هندسی نمایش داده می‌شود و دارای ویژگی‌های ساختاری متفاوت است. اصطلاح شبکه به چهارچوب موقعیت پیوندها و گره‌های درون یک سیستم اشاره می‌کند. محققان بسیاری از تئوری گراف برای تحلیل شبکه حمل و نقل بهره گرفتند. Ali Shah and Shehzad (2009) با استفاده از تئوری گراف شبکه جاده‌های منطقه سینده را در پاکستان مورد بررسی قرار داده‌اند. Olawale and Adesina (2011) رابطه بین اتصال شبکه جاده و آمار توریست‌های منطقه لاکوجا در نیجریه را با استفاده از تئوری گراف مورد بررسی قرار داده‌اند.

مدل‌های رستری پدیده‌ها را به صورت سلول یا پیکسل نمایش می‌دهند. برخی پژوهشگران از بسته نرم‌افزاری GIS برای تفکیک سلول‌های شبکه رستری به سلول‌هایی که چوب باید از آنجا از طریق عملیات وینچینگ به مسیرهای چوب‌کشی و از آنجا به سلول-های هدف یعنی دپو و سپس جاده‌ها منتقل شوند بهره

شبکه حمل و نقل جنگل نقش مهمی در ایجاد دسترسی به عرصه و همچنین حمل و نقل نیروی انسانی و محصولات جنگلی ایفا می‌کند. در عملیات چوب‌کشی زمینی با اسکیدر، شبکه حمل و نقل جنگل متشکل از مسیرهای وینچینگ، مسیرهای چوب‌کشی، دپوها و جاده است (Contreras and Chung, 2007). تنه‌های قطع و تبدیل شده درختان از طریق مسیرهای وینچینگ به سمت اسکیدر کشیده شده و سپس از روی مسیر چوب‌کشی به طرف دپو منتقل خواهند شد (Albert and Barabási, 2002). پس از بارگیری در دپو، چوب‌ها توسط کامیون‌ها و از طریق جاده به مراکز توزیع و یا کارخانجات حمل می‌شوند. دپو طبق تعریف محوطه‌ای روباز برای نگهداری موقت چوب-آلات است و در محل تلاقی جاده و مسیر چوب‌کشی قرار دارد. تاکنون پژوهش‌های اندکی راجع به الگوریتم‌های مکان‌یابی شبکه حمل و نقل براساس آنالیز هزینه‌ها انجام شده است. در روش‌های بهینه-سازی سنتی نیز سیستم‌های ارزیابی توانایی پاسخ‌گویی به نیازهای منطقه‌ای را نداشتند و صرفاً به تعیین تراکم بهینه شبکه جاده در مقیاس وسیع و بر اساس حداقل مجموع هزینه‌های چوب‌کشی و جاده‌سازی می‌پرداختند و نقشی در تعیین مسیر عبور جاده نداشتند (Lu and Eriksson, 2000, Lockwood and Moore, 2003, Yu et al., 1992). به عنوان مثال Naghdi and Mohammadi Limaiei (2009) از مدل برنامه‌ریزی خطی برای کمینه‌سازی هزینه‌های چوب‌کشی و جاده-سازی برای تعیین تراکم بهینه شبکه جاده‌های جنگلی استفاده کردند. یکی دیگر از مشکلاتی که این مدل‌ها دارند آن است که هزینه جاده‌سازی برای سرتاسر پروژه یکسان فرض می‌شود و از برآورد هزینه چوب-

برابر با ۱۹۹۲ هکتار و ارتفاع آن از سطح دریا بین ۲۵۰ تا ۲۰۰۰ متر است. توده‌های پهن‌برگ آمیخته خزان‌کننده سری دو اغلب روی خاک قهوه‌ای جنگلی با بافت رسی، لومی و سیلتی واقع شده‌اند. اقلیم منطقه معتدل تا مرطوب بوده و میانگین بارندگی سالانه آن بین ۵۲۸ تا ۸۱۷ میلی‌متر است. ۲۸ کیلومتر جاده پیشنهادی در ادامه جاده‌های شماره یک، دو و سه سری یک طرح جنگلداری دکتر بهرام‌نیا داخل سری دو این طرح طراحی شده‌اند که ۲۱ کیلومتر آن در محدوده قابل بهره‌برداری به مساحت ۹۹۵ هکتار واقع شده‌اند (کتابچه طرح جنگلداری سری دو دکتر بهرام‌نیا، ۱۳۸۴). تراکم طولی این جاده‌ها حدود ۲۱ متر در هکتار، متوسط فاصله بین جاده‌ها حدود ۴۷۴ متر و درصد شبکه‌بندی آن‌ها حدود ۷۶ درصد است (شکل ۱). در این پژوهش، پارسل ۱۸ به‌منظور تکمیل شبکه جاده‌های پیشنهادی و اتصال آن به جاده‌های موجود در سری یک، به‌عنوان واحد بهره‌برداری مدنظر قرار گرفت. واحد بهره‌برداری سطحی است که در آن تمامی گرده‌بینه‌های حاصل از قطع درختان از طریق سیستم چوب‌کشی زمینی و توسط اسکیدرها به دپو منتقل می‌شود.

#### ایجاد یک گراف شامل گره‌ها و پیوندها

ابتدا مدل رقومی ارتفاع منطقه مورد بررسی از نقشه توپوگرافی با فاصله خطوط منحنی میزان یک متر و مقیاس ۱/۱۰۰۰ که در اکتبر سال ۲۰۱۱ از داده‌های لیدار استخراج شد، تهیه شد. سپس لایه شیب به‌کمک ابزار آنالیز سطح به فرمت رستری تهیه شد. ابعاد هر یک از سلول‌های رستری با توجه به حداکثر فاصله مجاز مسیرهای چوب‌کشی از هم ۱۴۰×۱۴۰ متر بوده و هر سه سلول عمودی به‌عنوان یک واحد بهره‌برداری فرض شد. مرکز هر سلول گره یا دپوی بالقوه را تشکیل می‌دهد. پیوندها با طول ۱۴۰ متر به‌عنوان

گرفتند (Epstein et al., 1994). Contreras and Chung (2007) با بهره‌گیری از یک مدل رایانه‌ای مبتنی بر گراف توانستند مکان‌های بهینه دپو چوب را از طریق کمینه‌سازی هزینه کل بهره‌برداری مشخص کنند. در این مدل با وزندهی به سلول‌های رستری شیب و گره‌ها و پیوندهای مستخرج از آن نسبت به محاسبه هزینه چوب‌کشی و جاده‌سازی برای دپوهای پیشنهادی اقدام شد. در آخر دپو با کمترین مجموع هزینه جاده‌سازی و چوب‌کشی به‌عنوان گزینه برتر انتخاب شد. در این پژوهش تلاش شده است تا فرآیند مکان‌یابی دپوهای چوب و مسیر عبور شبکه جاده از طریق برآورد هزینه ایجاد گراف‌های پیشنهادی و در نهایت انتخاب کم‌هزینه‌ترین گراف بهبود داده شود. بدین‌ترتیب مسئله مکان‌یابی به شکل یک گراف و با هدف کمینه‌سازی مجموع هزینه‌های جاده‌سازی و چوب‌کشی طرح‌ریزی شد. یک گراف شامل مجموعه‌ای از پیوندها (جاده) و گره‌ها (دپو) است. پیوندها اتصالات بین هر دو گره را فراهم می‌سازند. وزن هر پیوند ارائه‌دهنده هزینه ساخت آن و وزن هر گره ارائه‌دهنده هزینه کل چوب‌کشی است (Sole and Valverde, 2004, Yongtaek and Hyunmyung, 2005). هدف اصلی این پژوهش تکمیل شبکه جاده‌های سری دو طرح جنگلداری دکتر بهرام‌نیا و اتصال آن به جاده‌های سری یک است.

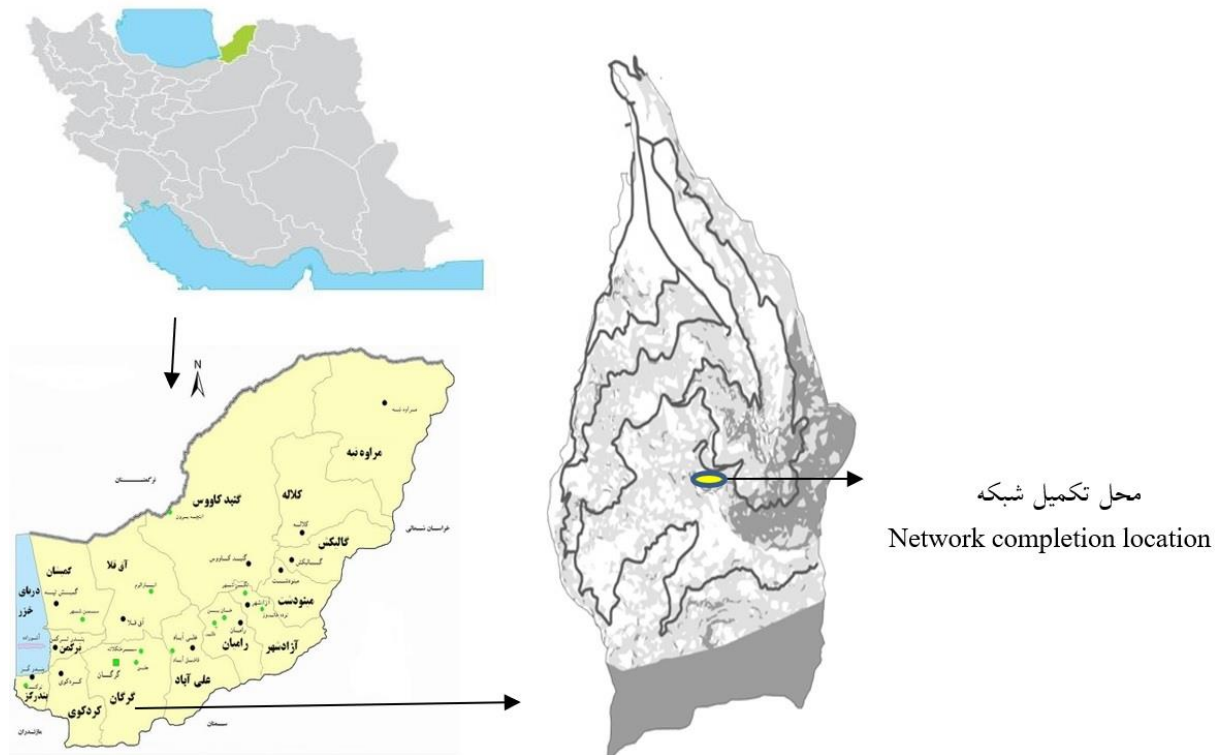
#### مواد و روش‌ها

##### مشخصات منطقه مورد بررسی

سری دو طرح جنگلداری دکتر بهرام‌نیا بین طول جغرافیایی ۵۴ درجه و ۲۳ دقیقه و ۳۰ ثانیه الی ۵۴ درجه و ۳ دقیقه و ۶ ثانیه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۶ درجه و ۴۲ دقیقه و ۳۰ ثانیه الی ۳۶ درجه و ۴۳ دقیقه و ۳۰ ثانیه شمالی قرار دارد. وسعت این سری

(۵۰ متر) از دو طرف و متوسط طول تنه درختان (۲۰ متر) اشاره دارد.

جاده‌های بالقوه از یک گره به هشت گره همسایه متصل می‌شوند. این فاصله به مجموع طول کابل وینچ



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد بررسی در ایران، استان گلستان و سری دو طرح دکتر بهرامنیا و محل تکمیل شبکه  
Figure 1. The location of the study area in Iran, Golestan province and second districts of Dr. Bahramnia's project and the completion network place

(۵۰ متر) از دو طرف و متوسط طول تنه درختان (۲۰ متر) اشاره دارد.

مکان‌یابی دیوهای پیشنهادی و برآورد هزینه کل چوب-کشی برای هر دیو

دیوهای پیشنهادی در مراکز سلول‌های با شیب عرضی کمتر از ۱۰ درصد (Lotfalian, 2011) و بر روی یک خط فرضی به منظور بارگیری با جراثیل پیش‌بینی شدند (شکل ۲). هزینه کل چوب‌کشی برای هر دیو پیشنهادی  $k$  با محاسبه هزینه‌های چوب‌کشی از هر سلول تا آن دیو به دست آمد (رابطه ۱):

$$TSC_k = \sum_{i=1}^m SC_i \quad \text{رابطه (۱)}$$

ایجاد یک گراف شامل گره‌ها و پیوندها

ابتدا مدل رقمی ارتفاع منطقه مورد بررسی از نقشه توپوگرافی با فاصله خطوط منحنی میزان یک متر و مقیاس ۱/۱۰۰۰ که در اکتبر سال ۲۰۱۱ از داده‌های لیدار استخراج شد، تهیه شد. سپس لایه شیب به کمک ابزار آنالیز سطح به فرمت رستری تهیه شد. ابعاد هر یک از سلول‌های رستری با توجه به حداکثر فاصله مجاز مسیرهای چوب‌کشی از هم  $140 \times 140$  متر بوده و هر سه سلول عمودی به عنوان یک واحد بهره‌برداری فرض شد. مرکز هر سلول گره یا دیوی بالقوه را تشکیل می‌دهد. پیوندها با طول ۱۴۰ متر به عنوان جاده‌های بالقوه از یک گره به هشت گره همسایه متصل می‌شوند. این فاصله به مجموع طول کابل وینچ

مجموعه‌ای از پیوندها برای ایجاد جاده از یک دپو تا دپو بعدی طراحی شدند. وقتی یک جاده جدید برقرار شد، آن جاده به شبکه راه اضافه شده و سپس دپوی بعدی برای برقراری اتصال جاده انتخاب شد (Olsson, 2007, Patarasuk, 2013). پیوندها به شکل زیگزاگ برای دست‌یابی به دپوها بدون در نظر گرفتن قوس‌های افقی طراحی شدند. در حقیقت همه پیوندها به صورت یک خط مستقیم فرض شدند. هزینه کل جاده‌سازی برای جاده پیشنهادی  $k$  با استفاده از رابطه ۴ برآورد شد.

$$TRC_k = \sum_{i=1}^e RC_i \quad \text{رابطه (۴)}$$

در این رابطه  $TRC_k$  هزینه کل جاده‌سازی برای جاده پیشنهادی  $k$  (ریال)،  $e$  تعداد کل پیوندها برای جاده  $k$ ،  $RC_i$  هزینه ساخت پیوند  $i$ ام است که از رابطه ۵ به دست آمد.

$$RC_i = LD_i \times RC \times LS_i \times SS_i \quad \text{رابطه (۵)}$$

در این رابطه  $LD_i$  طول پیوند (متر)،  $RC$  هزینه ساخت جاده (ریال بر متر) که در این پژوهش ۵۶۷۷۰۰ ریال بر متر فرض شد.  $LS_i$  عامل شیب طولی جاده و  $SS_i$  عامل شیب دامنه است. شیب جاده باید کمتر از ۱۲ درصد باشد (جدول ۱).

در این معادله  $TSC_k$  هزینه کل چوب‌کشی برای دپو پیشنهادی  $k$  (ریال)،  $m$  تعداد کل سلول‌ها در واحد بهره‌برداری و  $SC_i$  هزینه چوب‌کشی از سلول  $i$ ام تا دپو چوب  $k$ . هزینه چوب‌کشی از هر سلول به کمک رابطه ۲ محاسبه شد (Contreras and Chung, 2007).

$$SC_i = \left[ \left( \frac{CT_i}{60} \right) \times R \right] \times N_i \quad \text{رابطه (۲)}$$

که در آن  $CT_i$  زمان کل صرف‌شده برای یک نوبت کامل چوب‌کشی از سلول  $i$ ام تا دپو چوب  $k$  (دقیقه) (رابطه ۳)،  $R$  نرخ اجاره اسکیدر (۶۶۵۰۰۰ ریال در ساعت)،  $N_i$  تعداد کل نوبت‌های چوب‌کشی برای خارج کردن تمام گرده‌بینه‌ها از سلول  $i$ ام تا دپو چوب  $k$  (Rees, 2004; Anderson and Nelson, 2004).

رابطه (۳)

$$CT_i = -2.598 + 0.023X + 2.187X_n + 0.122X_w + 0.279X_L + 0.105X_{Ls} \\ [x > 1, X_n > 1 \text{ m}, X_w > 1 \text{ m}, X_L > 1 \text{ m}, X_{Ls} > 1 \text{ \%}]$$

در این رابطه  $X$  فاصله چوب‌کشی (متر)،  $X_n$  تعداد گرده‌بینه‌ها،  $X_w$  متوسط فاصله وینچینگ (متر)،  $X_L$  طول گرده‌بینه (متر) و  $X_{Ls}$  شیب طولی مسیر (متر) است (Mousavi, 2012). متوسط طول گرده‌بینه‌های صنعتی راش، افرا و توسکا ۲/۸ متر است.

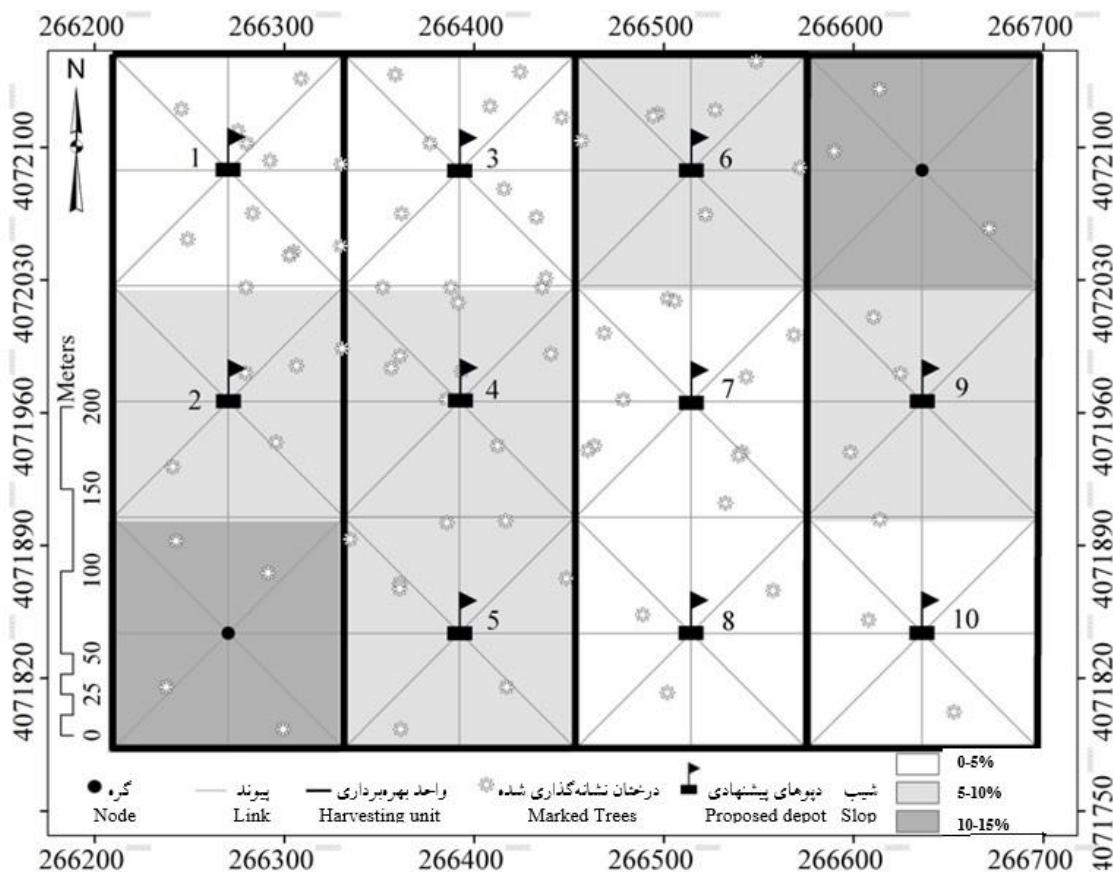
مکان‌یابی مسیر عبور جاده‌های جنگلی و محاسبه هزینه

کل جاده‌سازی

جدول ۱- عامل شیب جاده و شیب دامنه (Contreras and Chung, 2007)

Table 1. Road gradient and side slope factors (Contreras and Chung, 2007)

شیب جاده (درصد)	عامل شیب جاده	شیب دامنه (درصد)	عامل شیب دامنه
Road gradient (%)	Road gradient factor	Side slope (%)	Side slope factor
0-5	1.0	0-15	1.0
5-10	1.5	15-30	1.5
10-15	2.5	30-45	2.5
15-20	3.5	45-60	3.5



شکل ۲- طرح شماتیک لینک‌ها و گره‌ها برای واحدهای بهره‌برداری  
Fig 2. A schematic diagram of links and nodes for harvesting area

چوب‌کشی ۲۶۸۹۹۰۰، ۳۴۲۶۲۰۰، ۲۴۳۰۹۰۰ و ۱۰۸۰۴۰۰ ریال مربوط به گره‌های ۱، ۵، ۷ و ۱۰ بود. هزینه کل چوب‌کشی برای گره‌ای که به درختان نشانه‌گذاری شده بیشتری دسترسی داشته و متوسط فاصله این درختان از گره کمتر باشد، پایین‌تر است (جدول ۲).

#### مکان‌یابی کم‌هزینه‌ترین جاده‌های پیشنهادی

۳۶ گراف متشکل از پیوندها برای برقراری ارتباط بین دپوها مشخص شد. هزینه ساخت پیوند متأثر از طول پیوند، شیب طولی پیوند، شیب عرضی دامنه و هزینه واحد جاده‌سازی است. نتایج نشان داد که هزینه ساخت هر پیوند با افزایش طول پیوند، شیب طولی پیوند و شیب عرضی دامنه افزایش پیدا کرد. بر این

کمینه‌سازی هزینه کل بهره‌برداری از طریق تئوری گراف هزینه کل بهره‌برداری (THC) برای دپو و جاده پیشنهادی  $k$  با استفاده از رابطه ۶ محاسبه شده و سپس کم‌هزینه‌ترین گزینه به‌عنوان بهترین گراف در واحد بهره‌برداری انتخاب شد (Anderson and Nelson, 2004, Rees, 2004).

$$THC_k = TSC_k + TRC_k \quad \text{رابطه (۶)}$$

#### نتایج

##### مکان‌یابی کم‌هزینه‌ترین دپوهای پیشنهادی

مشخص شده است که هزینه چوب‌کشی در شیب‌های ملایم کمتر از شیب‌های تند است. در نتیجه در این پژوهش مکان‌یابی دپوها در شیب‌های ملایم انجام شد. کم‌هزینه‌ترین یا بهترین دپوها به‌ترتیب با هزینه کل

مکان‌یابی دپوهای چوب و مسیر عبور جاده‌های جنگلی به کمک تئوری گراف (بررسی موردی: سری دو طرح جنگلداری دکتر بهرام‌نیا)

اساس، هزینه ساخت جاده‌های پیشنهادی ۶، ۱۲، ۳۱ و ۳۶۶۱۵۲۰۰۰ ریال، کمتر از دیگر کاندیداها بود (جدول ۳). هزینه جاده‌سازی با افزایش طول پیوند، شیب طولی پیوند، شیب عرضی دامنه و همچنین هزینه واحد جاده‌سازی افزایش یافت. ۳۴۹۰۹۵۰۰۰، ۳۵۰۸۷۱۰۰۰، ۳۶۴۳۷۶۰۰۰ و

جدول ۲- هزینه کل چوب‌کشی برای گره‌ها یا دپوهای پیشنهادی بر حسب ریال

Table 2. The total skidding cost for nodes and proposed depots based on Rials ( $TSC_k$ )

متغیر Variable	دپوهای پیشنهادی Proposed depots									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$CT_1 (min)$	9.35	12.15	13.51	10.36	12.18	14.92	11.32	13.16	10.54	12.40
$CT_2 (min)$	11.58	8.86	10.22	8.92	7.10	9.84	9.02	10.86	8.32	8.38
$CT_3 (min)$	15.26	12.54	11.20	14.09	12.25	9.52	10.11	8.27	12.07	10.20
$N_1$	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	7.00	7.00	3.00	3.00
$N_2$	5.00	5.00	5.00	7.00	7.00	7.00	11.00	11.00	3.00	3.00
$N_3$	4.00	4.00	4.00	8.00	8.00	8.00	3.00	3.00	3.00	3.00
$SC_1 (\$)$	35.34	45.92	51.09	39.18	46.05	56.40	24.95	29.02	9.96	11.72
$SC_2 (\$)$	18.24	13.95	16.10	19.67	15.66	21.70	31.24	37.64	7.86	7.92
$SC_3 (\$)$	19.22	15.79	14.11	35.51	30.88	23.99	9.56	7.81	11.40	9.64
$TSC_k (\$)$	72.80	75.67	81.30	94.36	92.60	102.09	65.75	74.48	29.23	29.27

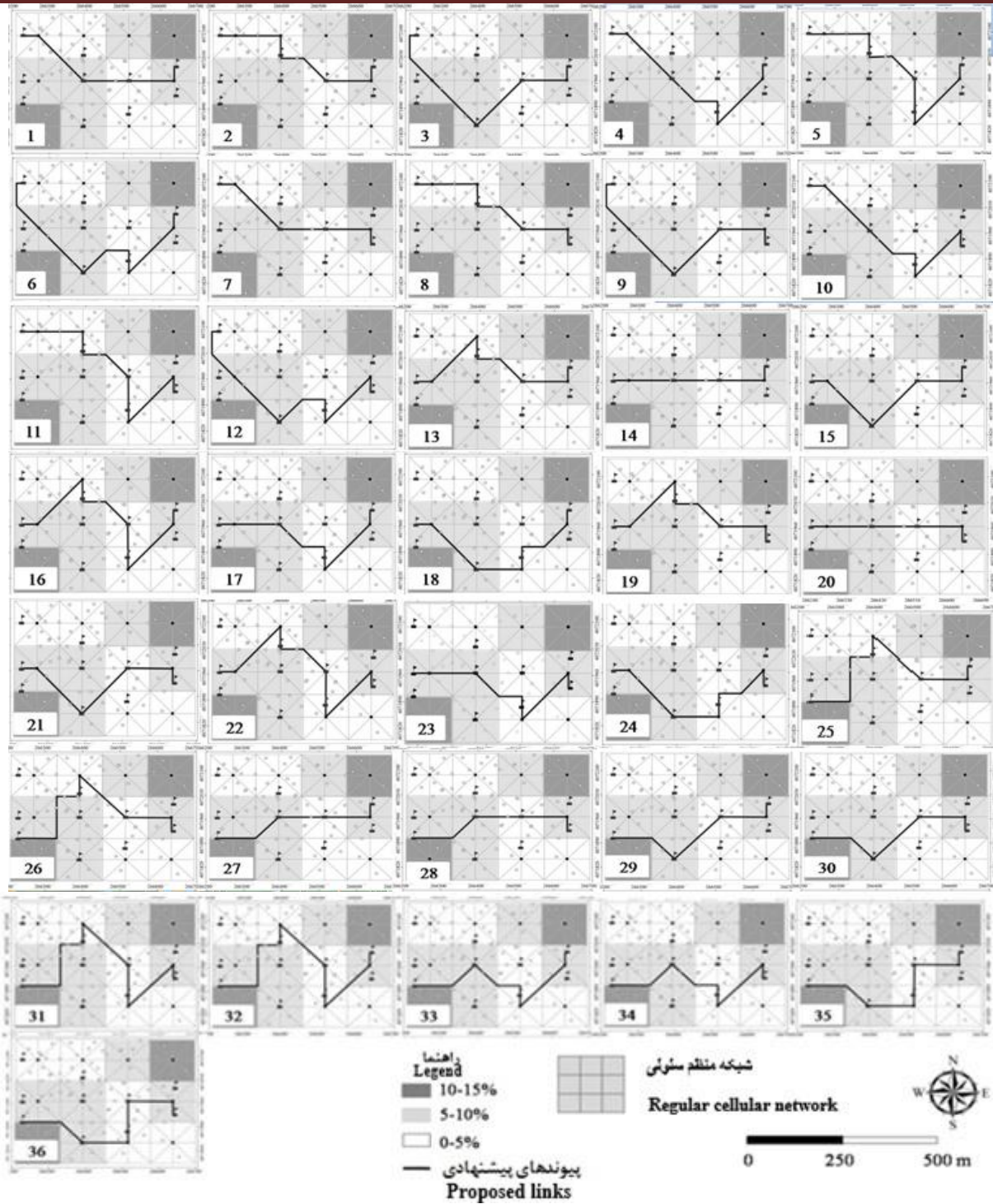
زمان چوب‌کشی بر حسب دقیقه ( $CT_i$ )، تعداد نوبت چوب‌کشی ( $N_i$ )، هزینه چوب‌کشی از هر یک از سلول‌ها به دپو پیشنهادی ( $SC_i$ ) و هزینه کل چوب‌کشی برای دپوهای پیشنهادی بر حسب ریال ( $TSC_k$ ).

Skidding time in minute ( $CT_i$ ), Number of skidding ( $N_i$ ), skidding cost from each cell to recommended depot ( $SC_i$ ), total cost of skidding for recommended depot in Rial ( $TSC_k$ )

۴-۵ درصد کمتر از حد مجاز است. هزینه کل بهره‌برداری با افزودن هزینه کل چوب‌کشی به هزینه جاده‌سازی مورد محاسبه قرار گرفت. بهترین گراف گزینه‌ای است که هزینه کل بهره‌برداری مربوط به آن حداقل باشد. بدین ترتیب گراف پیشنهادی ۲ به‌عنوان گزینه برتر انتخاب شد (جدول ۴).

هزینه کل بهره‌برداری برای دپوها و جاده‌های پیشنهادی در این بررسی مساحت کل واحدهای بهره‌برداری منتخب ۱۸ هکتار با متوسط موجودی حجمی ۳۵۰ مترمکعب بود. برخی مناطقی که در این واحدهای بهره‌برداری بیش از ۱۰ درصد شیب داشتند برای مکان‌یابی محل دپو صرف‌نظر شدند. علاوه بر این شیب طولی مجاز برای جاده‌های جنگلی درجه دو کمتر از ۹ درصد است. متوسط شیب طولی جاده بهینه





شکل ۳- گراف‌های پیشنهادی متشکل از پیوندهای بین گره‌های پیشنهادی از دپوی شماره ۱ تا انتهای مسیر  
 Figure 3. proposed graphs consisting of links between the proposed nodes from the first depot to the end of the path



جدول ۳- هزینه ساخت پیوندها و هزینه کل ساخت جاده برای ۳۶ گراف پیشنهادی

Table 3. Construction cost of links and the total cost for the 36 proposed graphs.

پیوند	ریال	پیوند	ریال	پیوند	ریال	پیوند	ریال	پیوند	ریال	پیوند	ریال
Link	Rial	Link	Rial	Link	Rial	Link	Rial	Link	Rial	Link	Rial
RC <sub>1-5</sub>	4157	RC <sub>1-4</sub>	3339	RC <sub>1-6</sub>	7605	RC <sub>1-5</sub>	4157	RC <sub>1-4</sub>	3339	RC <sub>1-6</sub>	7605
RC <sub>5-7</sub>	2475	RC <sub>4-7</sub>	2671	RC <sub>6-7</sub>	3500	RC <sub>5-8</sub>	3403	RC <sub>4-8</sub>	3975	RC <sub>6-8</sub>	3406
RC <sub>7-9</sub>	3425	RC <sub>7-9</sub>	3425	RC <sub>7-9</sub>	3425	RC <sub>8-9</sub>	5128	RC <sub>8-9</sub>	5128	RC <sub>8-9</sub>	5128
TRC <sub>1</sub>	10057	TRC <sub>2</sub>	9435	TRC <sub>3</sub>	14530	TRC <sub>4</sub>	12688	TRC <sub>5</sub>	12442	TRC <sub>6</sub>	16139
RC <sub>1-5</sub>	4157	RC <sub>1-4</sub>	3339	RC <sub>1-6</sub>	7605	RC <sub>1-5</sub>	4157	RC <sub>1-4</sub>	3339	RC <sub>1-6</sub>	7605
RC <sub>5-7</sub>	2475	RC <sub>4-7</sub>	2671	RC <sub>6-7</sub>	3500	RC <sub>5-8</sub>	3403	RC <sub>4-8</sub>	3975	RC <sub>6-8</sub>	3406
RC <sub>7-10</sub>	3473	RC <sub>7-10</sub>	3473	RC <sub>7-10</sub>	3473	RC <sub>8-10</sub>	5176	RC <sub>8-10</sub>	5176	RC <sub>8-10</sub>	5176
TRC <sub>7</sub>	10105	TRC <sub>8</sub>	9483	TRC <sub>9</sub>	14578	TRC <sub>10</sub>	12736	TRC <sub>11</sub>	12490	TRC <sub>12</sub>	16187
RC <sub>2-4</sub>	5184	RC <sub>2-5</sub>	3948	RC <sub>2-6</sub>	5178	RC <sub>2-4</sub>	5184	RC <sub>2-5</sub>	3948	RC <sub>2-6</sub>	5178
RC <sub>4-7</sub>	2671	RC <sub>5-7</sub>	2475	RC <sub>6-7</sub>	3500	RC <sub>4-8</sub>	3975	RC <sub>5-8</sub>	3403	RC <sub>6-8</sub>	3154
RC <sub>7-9</sub>	3425	RC <sub>7-9</sub>	3425	RC <sub>7-9</sub>	3425	RC <sub>8-9</sub>	5128	RC <sub>8-9</sub>	5128	RC <sub>8-9</sub>	4357
TRC <sub>13</sub>	11280	TRC <sub>14</sub>	9848	TRC <sub>15</sub>	12103	TRC <sub>16</sub>	14287	TRC <sub>17</sub>	12479	TRC <sub>18</sub>	12689
RC <sub>2-4</sub>	5184	RC <sub>2-5</sub>	3948	RC <sub>2-6</sub>	5178	RC <sub>2-4</sub>	5184	RC <sub>2-5</sub>	3948	RC <sub>2-6</sub>	5178
RC <sub>4-7</sub>	2671	RC <sub>5-7</sub>	2475	RC <sub>6-7</sub>	3500	RC <sub>4-8</sub>	3975	RC <sub>5-8</sub>	3403	RC <sub>6-8</sub>	3154
RC <sub>7-10</sub>	3473	RC <sub>7-10</sub>	3473	RC <sub>7-10</sub>	3473	RC <sub>8-10</sub>	5176	RC <sub>8-10</sub>	5176	RC <sub>8-10</sub>	4405
TRC <sub>19</sub>	11328	TRC <sub>20</sub>	9896	TRC <sub>21</sub>	12151	TRC <sub>22</sub>	14335	TRC <sub>23</sub>	12527	TRC <sub>24</sub>	12737
RC <sub>3-4</sub>	6707	RC <sub>3-4</sub>	6707	RC <sub>3-5</sub>	4564	RC <sub>3-5</sub>	4564	RC <sub>3-6</sub>	4567	RC <sub>3-6</sub>	4567
RC <sub>4-7</sub>	3498	RC <sub>4-7</sub>	3498	RC <sub>5-7</sub>	2475	RC <sub>5-7</sub>	2475	RC <sub>6-7</sub>	3500	RC <sub>6-7</sub>	3500
RC <sub>7-9</sub>	3425	RC <sub>7-10</sub>	3473	RC <sub>7-9</sub>	3425	RC <sub>7-10</sub>	3473	RC <sub>7-9</sub>	3425	RC <sub>7-10</sub>	3473
TRC <sub>25</sub>	13630	TRC <sub>26</sub>	13678	TRC <sub>27</sub>	10464	TRC <sub>28</sub>	10512	TRC <sub>29</sub>	11492	TRC <sub>30</sub>	11540
RC <sub>3-4</sub>	6707	RC <sub>3-4</sub>	6707	RC <sub>3-5</sub>	4564	RC <sub>3-5</sub>	4564	RC <sub>3-6</sub>	4567	RC <sub>3-6</sub>	4567
RC <sub>4-8</sub>	4802	RC <sub>4-8</sub>	4802	RC <sub>5-8</sub>	3403	RC <sub>5-8</sub>	3403	RC <sub>6-7</sub>	4458	RC <sub>6-7</sub>	4458
RC <sub>8-10</sub>	5176	RC <sub>8-9</sub>	5128	RC <sub>8-9</sub>	5128	RC <sub>8-10</sub>	5176	RC <sub>7-9</sub>	3425	RC <sub>7-10</sub>	3473
TRC <sub>31</sub>	16686	TRC <sub>32</sub>	16637	TRC <sub>33</sub>	13095	TRC <sub>34</sub>	13143	TRC <sub>35</sub>	12450	TRC <sub>36</sub>	12498

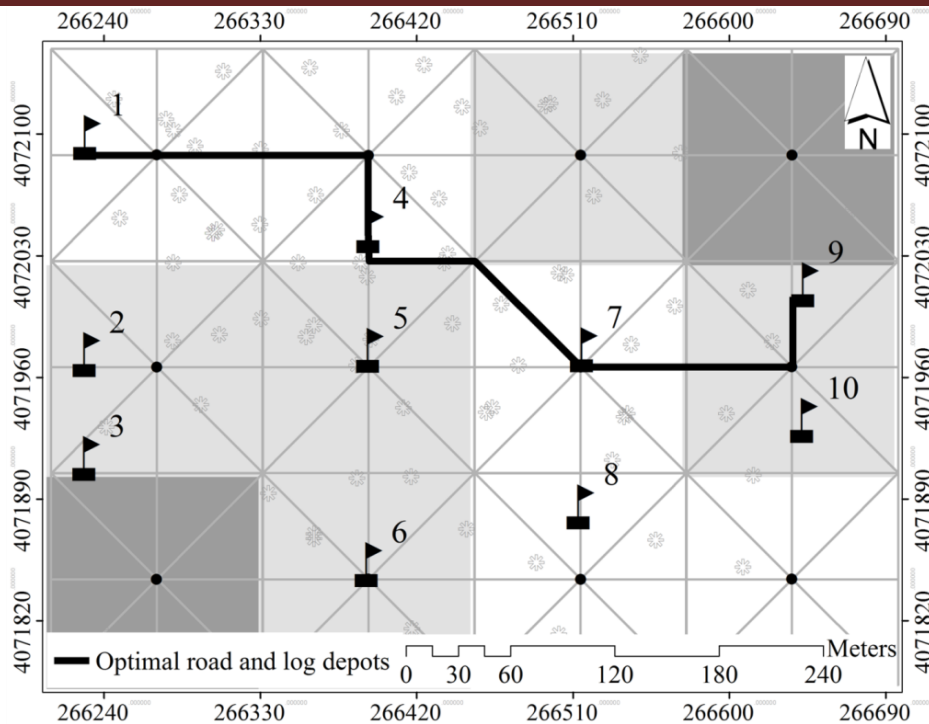
جدول ۴- هزینه کل برداشت برای تحلیل ۳۶ جاده کاندیدا

Table 4. Total harvesting cost ( $THC_k$ ) used for analysis of 36 proposed roads.

$THC_k$	ریال	$THC_k$	ریال	$THC_k$	ریال
$THC_k$	Rial	$THC_k$	Rial	$THC_k$	Rial
$THC_1$	10317.38	$THC_{13}$	11545.01	$THC_{25}$	13900.64
$THC_2$	9697.14	$THC_{14}$	10111.25	$THC_{26}$	13948.68
$THC_3$	14799.87	$THC_{15}$	12375.74	$THC_{27}$	10732.88
$THC_4$	12957.11	$THC_{16}$	14560.74	$THC_{28}$	10780.92
$THC_5$	12712.87	$THC_{17}$	12750.98	$THC_{29}$	11770.37
$THC_6$	16417.60	$THC_{18}$	12970.47	$THC_{30}$	11818.41
$THC_7$	10365.42	$THC_{19}$	11593.05	$THC_{31}$	16964.37
$THC_8$	9745.18	$THC_{20}$	10159.29	$THC_{32}$	16916.41
$THC_9$	14847.91	$THC_{21}$	12423.78	$THC_{33}$	13372.61
$THC_{10}$	13005.15	$THC_{22}$	14608.78	$THC_{34}$	13420.65
$THC_{11}$	12760.91	$THC_{23}$	12799.02	$THC_{35}$	12728.37
$THC_{12}$	16465.64	$THC_{24}$	13018.51	$THC_{36}$	12776.41

کشی برای دپوها و هزینه ساخت جاده به ترتیب ۹۶۹۷۷۰۰ و ۳۴۹۰۹۵۰۰۰ ریال بود. طول کل و هزینه کل بهره‌برداری گراف به ترتیب ۵۳۲ متر و ۳۵۸۷۹۲۷۰۰ ریال بود.

مکان‌یابی دپوهای چوب و مسیر عبور جاده‌های جنگلی در این پژوهش ۱۲ گره و ۹۶ پیوند برای تولید گراف ایجاد شد و هزینه کل چوب‌کشی و هزینه کل جاده-سازی به‌عنوان مهم‌ترین عامل‌ها مدنظر قرار گرفتند. شکل ۴ کم‌هزینه‌ترین گراف یعنی گراف پیشنهادی ۲ را نشان می‌دهد. نتایج نشان داد که هزینه کل چوب-



شکل ۴- انتخاب کم هزینه ترین جاده به عنوان بهترین گراف در الگوریتم وزنی

Fig 4. Least-cost road selected as an optimal variant graph in weighted- algorithm

پیدا کرد. هزینه ساخت پیوند متأثر از طول پیوند، شیب طولی پیوند، شیب عرضی دامنه و هزینه واحد جاده سازی است (Salmalian et al., 2016). نتایج نشان داد که هزینه ساخت هر پیوند با افزایش طول پیوند، شیب طولی پیوند و شیب عرضی دامنه افزایش پیدا کرد. بر این اساس، هزینه ساخت جاده های پیشنهادی ۶، ۱۲، ۳۱ و ۳۲ بیشتر از دیگر گزینه ها برآورد شد.

هزینه جاده سازی با افزایش طول پیوند، شیب طولی پیوند، شیب عرضی دامنه و همچنین هزینه واحد جاده سازی افزایش یافت. Ghaffarian et al. (2010) هزینه یکسانی را برای قطعات جاده و تمام پیوندها در نظر گرفتند. Rees (2004) کم هزینه ترین مسیر را با به کارگیری الگوریتم دجیکاسترا روی مدل رقومی ارتفاع به دست آورد. در این بررسی مساحت کل واحدهای بهره برداری منتخب ۱۸ هکتار با متوسط موجودی حجمی ۳۵۰ مترمکعب بود. برخی مناطقی

#### بحث

کم هزینه ترین یا بهترین دپوها به ترتیب با هزینه کل چوب کشی ۲۶۸۹۹۰۰، ۳۴۲۶۲۰۰، ۲۴۳۰۹۰۰ و ۱۰۸۰۴۰۰ ریال مربوط به گره های ۱، ۵، ۷ و ۱۰ بود. هزینه کل چوب کشی برای گره ای که به درختان نشانه گذاری شده بیشتری دسترسی داشته و متوسط فاصله این درختان از گره کمتر باشد، پایین تر است. (Ghaffarian and Sobhani (2008) با استفاده از رگرسیون گام به گام مدل چوب کشی توسعه دادند که قادر بود هزینه چوب کشی هر مترمکعب چوب را برای ۳۹ گره یا دپو برآورد کند. هزینه جاده سازی و چوب کشی برای هر گره با استفاده از برنامه NETWORK 2000 و الگوریتم کوتاه ترین مسیر به دست آمد. هزینه کل چوب کشی برای هر گره با کاهش زمان کل سپری شده برای هر سیکل چوب کشی و تعداد سفر برای چوب کشی کل مقطوعات کاهش

Dahlin and Sallnas (1992) دریافتند که مکان بهینه جاده با کمینه‌سازی هزینه حمل و نقل جاده‌ای و جاده‌سازی مشخص می‌شود. آن‌ها از یک الگوریتم شبیه‌سازی (Simulated Annealing) برای بهینه‌سازی مکان عبور جاده استفاده کردند. مکان‌یابی جاده‌ها در عوارض پرشیب تنها در حضور تعداد گره‌های زیاد (۳۰ گره در هکتار) می‌تواند کارآمد باشد. در عوارض ملایم تعداد گره‌ها می‌تواند کاهش داده شود.

از مزیت‌های اصلی استفاده از تئوری گراف در حل مسائل مسیریابی امکان به‌کارگیری شمار زیادی متغیر مانند فاصله چوب‌کشی، فاصله وینچینگ، تعداد گرده‌بینه، تعداد نوبت چوب‌کشی، هزینه اسکیدر، طول گرده بینه، شیب دامنه، شیب طولی جاده، طول جاده و دیگر هزینه‌های مربوطه است. این روش و تحلیل اقتصادی به‌وضوح کفایت لازم برای مسیریابی و گشایش جنگل را دارا است. البته متغیرهای دیگری نیز مانند شرایط پوشش گیاهی و فیزیوگرافی می‌تواند برای تکمیل محاسبات به گراف افزوده شود. البته لازم به ذکر است که نتایج آنالیزهای انجام‌شده بر مبنای تئوری گراف روی سلول‌های رستری تا حدودی درک شرایط حقیقی طبیعت را دشوار می‌سازد.

## References

- Albert, R.; Barabási, L., Statistical mechanics of complex networks. *Reviews of modern Physics* **2002**, 74 (1), 47-97.
- Ali Shah, M. A.; Shehzad, F., Evaluation of Shortest Paths in Road Network. *Pakistan Journal of Commerce and Social Sciences* **2009**, 3, 67-79.
- Anderson, A. E.; Nelson, J., Projecting vector-based road networks with shortest path algorithm. *Canadian Journal of Forest Research* **2004**, 34 (7), 1444-1457.
- Bin, W., Forest road network sustainable development indicator system evaluate optimization support vector machine ant colony algorithm. PhD. Dissertation, Central South University of

که در این واحدهای بهره‌برداری بیش از ۱۰ درصد شیب داشتند برای مکان‌یابی محل دپو صرف‌نظر شدند. علاوه بر این شیب طولی مجاز برای جاده‌های جنگلی درجه ۲ کمتر از ۹ درصد است. متوسط شیب طولی جاده بهینه ۴-۵ درصد کمتر از حد مجاز است. هزینه کل بهره‌برداری با افزودن هزینه کل چوب‌کشی به هزینه جاده‌سازی مورد محاسبه قرار گرفت. بهترین گراف گزینه‌ای است که هزینه کل بهره‌برداری مربوط به آن حداقل باشد. بدین ترتیب گراف پیشنهادی ۲ به-عنوان گزینه برتر انتخاب شد (جدول ۴). Stükelberger et al. (2007) دریافتند که با در نظر گرفتن الگوهای مختلفی از پیوندها و گره‌ها می‌توان مقرون به‌صرفه‌ترین و کارآمدترین گراف را در اراضی پرشیب برگزید. نتایج نشان داد که هزینه کل چوب-کشی برای دپوها و هزینه ساخت جاده بهینه به ترتیب ۹۶۹۷۷۰۰ و ۳۴۹۰۹۵۰۰۰ ریال بود. طول کل و هزینه کل بهره‌برداری گراف بهینه به ترتیب ۵۳۲ متر و ۳۵۸۷۹۲۷۰۰ ریال بود. Liu and Sessions (1993) از یک الگوریتم مشخص بر مبنای هزینه‌های ساخت، نگهداری و حمل و نقل در شرایط مختلف توپوگرافی برای یافتن کم‌هزینه‌ترین پیوند جاده بهره جستند.

- Forestry Science and Technology. Forest Engineering Course. Hunan, China, **2012**.
- Chung, W.; Sessions J.; Heinimann, H., An application of heuristic network algorithm to cable logging layout design. *International Journal Forest Engineering* **2004**, 15 (1), 11-24.
- Contreras, M.; Chung, W., A computer approach to finding an optimal log landing location and analyzing influencing factors for ground-based timber harvesting. *Canadian Journal of Research* **2007**, 37 (2), 276-292.
- Dahlin, B.; Sallnas, O., Designing a forest road network using the simulated annealing algorithm. *Canadian Journal of Forest Research* **1992**, 38 (3), 439-448.

- Epstein, R.; Weintraub, A.; Sapunar, P.; Sessions J.; Sessions, J. B., PLANEX software for operational planning. International Seminar on Forest Operations under Mountainous Conditions, Harbin, P.R. of China, July, **1994**.
- Galatioto, F.; Huang, Y.; Parry, T.; Bird, R.; Bell, M., Traffic modeling in system boundary expansion of road pavement life cycle assessment. *Journal Transportation Research Part D: Transport and Environment* **2015**, 36, 65-75.
- Ghaffarian, M. R.; Sobhani, H., Optimum road spacing of ground based skidding operations in Nowshahr, Iran. *Caspian Journal of Environmental Science* **2008**, 6 (2), 105-112.
- Ghaffarian, M. R.; Stampfer, K.; Sessions, J.; Durston, T.; Kuehmaier, M.; Kanzian, C. H., Road network optimization using heuristic and linear programming. *Journal of Forest Science* **2010**, 56 (3), 137-145.
- Jaafari, A.; Najafi, A.; Rezaeian, J.; Sattarian, A.; Ghajar, I., Planning road networks in landslide-prone areas: A case study from the northern forests of Iran. *Journal Land Use Policy* **2015**, 47, 198-208.
- Liu, K.; Sessions, J., Preliminary planning of road systems using digital terrain models. *International Journal Forest Engineering* **1993**, 4 (2), 27-32.
- Lockwood, C.; Moore, T., Harvest scheduling with spatial constraints: a simulated annealing approach. *Canadian Journal of Forest Research* **1992**, 23 (3), 468-478.
- Lotfalian, M., Wood transportation, first edition.; Aeeizh press, Iran, **2011**; 301p.
- Lu, F.; Eriksson, L. O., Formation of harvest units with genetic algorithms. *Journal Forest Ecology and Management* **2000**, 130 (1-3), 57-67.
- Mousavi, R., Time consumption, productivity, and cost analysis of skidding in the Hyrcanian forest in Iran. *Journal of Forestry Research* **2012**, 23 (4), 691-697.
- Naghdi, R.; Mohammadi Limaiei, S., Optimal forest road density based on skidding and road construction costs in Iranian Caspian forests. *Caspian Journal of Environmental Science* **2009**, 7 (2), 79-86.
- Olawale, T. N.; Adesina, K. I., An Assessment of the Relationship between Road Network Connectivity and Tourists' Patronage in Lokoja Metropolis, Kogi State. *Journal of Natural Sciences Research* **2011**, 3 (9), 1-11.
- Olsson, L., Optimal upgrading of forest road networks: Scenario analysis stochastic modeling. *Journal Forest Policy & Economics* **2007**, 9 (8), 1071-1078.
- Patarasuk, P., Road network connectivity and land-cover dynamics in Lop Buri province, Thailand. *Journal of Transport Geography* **2013**, 28, 111-123.
- Rees, W.G., Least-cost paths in mountainous terrain. *Computers & Geosciences* **2004**, 30 (3), 203-209.
- Stükelberger, J.; Heinemann, H.; Chung, W., Improved road network design models with the consideration of various link patterns and road design elements. *Canadian Journal of Forest Research* **2007**, 37 (11), 2281-2298.
- Yongtaek, L.; Hyunmyung, K., A shortest path algorithm for real road network based on path overlap. *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, **2005**, 6, 1426-1438.
- Yu, C.; Lee, J.; Munro-Stasiuk, M. J., Extensions to least-cost path algorithms for roadway planning. *International Journal of Geographical Science* **2003**, 17 (4), 361-376.
- Salmalian, M.; Mousavi Mirkala, S. R.; Erfanian, M.; Hosseinzadeh, O., Prioritization of the influencing factors in the designing forest roads(Case study: Lakobon forest, Abbas-abad, North of Iran). *Journal of Forest Research and Development* **2016**, 4 (4), 337-349. (In Persian)
- Sole, R.V.; Valverde, S., Information theory of complex networks: On Evolution and Architectural Constraints. Lecture Notes Physics, Pompeo Fabra University Barcelona, Catalonia, Spain, **2004**, PP, 189-207.

## Locating log depots and routes of forest roads using graph theory (Case study: Designed roads in district two of Bahramnia forestry plan)

A. Parsakhoo<sup>1</sup>, M. Lotfalian<sup>2</sup> and A. Rezaei Motlagh<sup>\*3</sup>

1- Associate Professor, Department of Forestry, Faculty of Forest Resources, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, I. R. Iran. (aidinparsakhoo@yahoo.com)

2- Professor, Department of Forestry, Faculty of Natural Resources, University of Agricultural Sciences and Natural Resources of Sari, Sari, I. R. Iran. (mloftalian@yahoo.com)

3- Ph.D. student of forest management, Faculty of Natural Resources, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, I. R. Iran. (aiubrezaee@yahoo.com)

Received: 22.09.2019      Accepted: 22.02.2020

### Abstract

This study aimed to select the lowest cost graph through locating cost-benefit depots (nodes) and road segments (links) to complete the road network of district No. 2 in the Bahramnia forestry plan, Golestan province. In 2017, the value of each link and node was calculated for 36 candidate roads in cutting areas. The total cost of skidding for each node was estimated using a model with variables of consumed time for each skidding cycle, rate of skidder rent, number of skidding cycle, number of logs (trees marking list), skidding and winching distances as well as the length of logs (2.8 meters for industrial logs). After determining the cost-benefit nodes, their connections were provided by links. The cost of construction for each link was calculated using a model with various variables includes the length and longitudinal gradient of links, the side slope of terrain and unit cost of link construction. However, the total harvesting cost was obtained based on the total cost of links and nodes. Our findings indicated that by using the graph theory and the cost minimization approach, the most appropriate nodes and links were located close to marked trees and low slopes. Therefore, the proposed second graph was chosen as the optimal variant. The total skidding cost of depots and construction cost of optimal graph were 9697700 Rial and 349095000 Rial m<sup>-1</sup>, respectively. The total length and harvesting cost of the optimal graph were estimated at 532 m and 358792700 Rial, respectively.

**Keywords:** Forest road, Log depot, Lowest-cost graph, Link, Node.

---

\* Corresponding author

Tel: +989399208987