تحقیقات سامانه‌ها و مکانیزاسیون کشاورزی/جلد ۲۰/ شماره ۷۳/ پاییز و زمستان ۱۳۹۸/ص ۳۴-۱۹

بهینه‌سازی مکانیزاسیون حمل ونقل اولیهٔ چوب در جنگل‌های هیرکانی بر اساس اهداف چندگانه (زیست‌محیطی، اقتصادی، عملکرد، ارگونومیک)

محمد حجازیان[1*]، مجید لطفعلیان[2] و سلیمان محمدی لیمایی[3]

۱ و ۲- به‌ترتیب: دانش آموخته دکتری مهندس جنگل؛ و استاد دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران

۳- استاد گروه جنگلداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه گیلان، صومعه‌سرا، ایران

تاریخ دریافت: ۹۶/۱۲/۱۲، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۹/۲۸

چکیده

در این مطالعه، به‌منظور تعیین مکانیزاسیون بهینهٔ حمل و نقل اولیهٔ چوب در جنگل‌های هیرکانی ایران، ماشین‌های فعلی شامل Timberjack 450C، HSM 904، تراکتور کشاورزی و برخی ماشین‌های جدید شامل LKT 81، TAF 690، Vimek 610 و Mowi 650 مورد بررسی قرار گرفتند. از روش برنامه‌ریزی آرمانی که روشی برای بهینه‌سازی چند هدف، شامل: زیست‌محیطی، اقتصادی، عملکرد، ارگونومیک است، استفاده شد. نتایج بررسی‌های اقتصادی نشان می‌دهد که در حال حاضر برای حمل گرده‌بینه، اسکیدرهای Timberjack 450C و HSM 904 نسبت به ماشین‌های دیگر هزینهٔ حمل‌ونقل کمتری دارند و به لحاظ اقتصادی همچنان ماشین‌های مقرون به‌صرفه‌ای هستند. استفاده از تراکتور کشاورزی برای حمل هیزم و کاتین مقرون به‌صرفه نیست و گزینهٔ اقتصادی جایگزین، تریلر Mowi 650 است. با این جایگزینی، هزینهٔ حمل هیزم و کاتین ۴۴ درصد کاهش می یابد. نتایج بهینه سازی با استفاده از برنامه ریزی آرمانی و لحاظ کردن همهٔ هدف‌ها نشان می‌دهد که برای حمل گرده‌بینه و هیزم، اسکیدر LKT 81 و فوروارد Vimek 610 باید جایگزین ماشین‌های فعلی شود. با این جایگزینی، هزینه حمل برای گرده‌بینه ۱۵ درصد افزایش و برای هیزم و کاتین ۱۰ درصد کاهش می‌یابد. در حال حاضر مکانیزاسیون حمل‌ونقل اولیه چوب در جنگل‌های هیرکانی از لحاظ هدف‌های چهارگانهٔ این مطالعه، بهینه نیست و نیاز به تغییر دارد. در مدیریت ماشین‌آلات جنگل، جنبه‌های زیست‌محیطی و ارگونومیک باید مورد توجه قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی

برنامه‌ریزی آرمانی، جایگزینی، مدیریت ماشین‌آلات جنگل، ماشین‌های فعلی، هزینه بهره‌برداری

مقدمه

مکانیزاسیون در بهره‌برداری از جنگل به‌رغم وابستگی به محل رویش درخت و محدودیت‌های موجود، رو به گسترش است (Magagnotti & Spinelli, 2011; Vusić *et al.*, 2013; Spinelli *et al.*, 2013). با ورود ماشین به مدیریت جنگل، مفهوم مکانیزاسیون و مدیریت ماشین‌آلات نیز وارد علوم جنگل شد. به‌دلیل این‌که خرید و به کارگیری ماشین‌آلات حجم زیادی از سرمایه‌گذاری را در جنگل‌داری به‌خود اختصاص می‌دهد (Häggström, *et al.*, 2013; Sahu *et al.*, 2016) تصمیم‌گیری برای سرمایه‌گذاری، به‌دلیل بازه طولانی آن، سخت

* نگارنده مسئول: Email: m.hejazian@stu.sanru.ac.ir

http://doi: 10.22092/erams.2018.120981.1244

و حساس است. سرمایه‌گذار لازم است عواقب هر تصمیم‌گیری را بداند و با اخذ تصمیمات درست و به موقع هزینه‌های بهره‌برداری را کنترل و به حداقل برساند. از جمله تصمیمات مهمی که هر مدیر جنگل در این زمینه باید اتخاذ کند، انتخاب ماشین مناسب با فعالیت (تطابق با عرصه، حجم برداشت، امکان خریداری، بودجهٔ موجود و ...) و تعیین زمان مناسب جایگزینی ماشین قدیمی و مستهلک با ماشین‌های جدید است. لازمهٔ چنین تصمیم‌گیری‌هایی، بررسی لازم روی ماشین‌آلات مختلف است (Zavrl, 2008).

عمده پیشرفت فناوری ماشین‌های جنگل در زمینهٔ حمل‌ونقل اولیه است که دومین مؤلفهٔ بهره‌برداری جنگل به‌شمار می‌آید (Lotfalian, 2011). چوب‌کشی زمینی معمول‌ترین روش در حمل‌ونقل اولیه است (Mousavi *et al*, 2013). این مرحله، هزینه‌های زیادی را در پی دارد که بخش اعظم آن مربوط به خرید ماشین‌آلات است. همواره مدیریت کلاسیک جنگل به‌دنبال روش‌ها و تصمیماتی است که باعث کاهش هزینهٔ بهره‌برداری شود. ماشین‌ها در شرایط متفاوت جنگل، هزینه‌های متفاوتی دارند (Conrad *et al*., 2017) و داشتن اطلاعات کافی در مورد هزینهٔ ماشین یکی از مفیدترین ابزارها برای بررسی و پیش‌بینی هزینه‌های بهره‌برداری است (Holzleitner *et al*., 2011). از طرفی دیگر، امروزه با توجه به اهمیت مسائل زیست‌محیطی و ایمنی کار و تأکید سازمان خواربار و کشاورزی ملل متحد (فائو) بر کاهش تأثیرات بهره‌برداری، استفاده از ماشین در جنگل علاوه بر اقتصادی بودن باید با کمترین خسارت‌های زیست‌محیطی همراه باشد (Naghdi & Mohammadi-Limaei, 2009). از مهم ترین خسارات زیست‌محیطی، کوبیدگی یا تراکم خاک است که در کشاورزی و نیز در بهره‌برداری از جنگل شایع است (Hosseini *et al*., 2014; Allman *et al*., 2015; Frey *et al*., 2009). مهم‌ترین شاخص اندازه‌گیری میزان کوبیدگی خاک، میزان تغییر در وزن مخصوص خاک است که باعث تغییر در ساختار خاک و کاهش تخلخل آن می‌شود (Naghdi & Mousavi, 2016; Epron *et al*., 2016). از دیگر شاخص‌ها نیز آلاینده‌های خروجی اگزوز وسایل نقلیه هستند که یکی از مهم ترین منابع مصنوعی آلودگی هوا به‌شمار می‌آیند (Sidhu *et al*., 2001). آلاینده‌های مهم شامل: مونواکسید کربن (CO)، دی‌اکسید نیتروژن (NO_2)، دی‌اکسید گوگرد (SO_2) و هیدروکربن (HC) است (Siddharth, 2006; Schenewerk, 2006). به‌دلیل اهمیت حفظ سلامت کارگران در برابر آسیب‌های شغلی، رعایت اصول ارگونومی نیز اهمیت زیادی دارد و باعث کاهش آسیب‌ها می‌شود. ارگونومی به چگونگی ساخت و طراحی ماشین‌آلات و نحوهٔ کار کردن با آنها، با محوریت افزایش راندمان کار، می‌پردازد (Lotfalian, 2015). به‌منظور نیل به وضعیت بهینه مبتنی بر اهداف مختلف، کاربرد روش‌هایی که چند هدف را در برمی‌گیرند ضروری است. یکی از این روش‌ها، برنامه‌ریزی آرمانی است که می‌تواند هدف‌های چندمنظوره را محقق سازد (Mohammadi-Limaei *et al*., 2014).

در زمینهٔ جایگزینی ماشین‌های جنگل و به‌کارگیری برنامه‌ریزی آرمانی در برنامه‌ریزی جنگل تحقیقات بسیاری شده است. اسپینلی و همکاران (Spinelli *et al*., 2004) در مطالعه‌ای در اسپانیا توانستند به این نتیجه برسند که محاسبهٔ زمان جایگزینی بدون در نظر گرفتن ریسک سرمایه گذاری و مقرون‌به‌صرفه بودن، ممکن است به انتخاب‌های

نادرست منجر شود.

بئوک و همکاران (Beuk *et al.*, 2007) در تحقیقات خود روی وضعیت مکانیزاسیون بهره‌برداری از جنگل در جنگل‌های دولتی کرواسی، به این نتیجه رسیدند که چهار معیار مناسب برای به‌کارگیری تکنولوژی در جنگل عبارت‌اند از تناسب با محیط‌زیست، کارایی، ایمنی و وضعیت ارگونومیک.

نتایج مطالعات کانتو و لبل (Cantú & Lebel, 2010) در جنگل های شرق کانادا نشان می‌دهد مدیر باید در زمان مناسب و بر اساس آنالیزهای اقتصادی و هزینه‌های تعمیر و نگهداری، دربارهٔ تعویض ماشین آلات فرسوده تصمیم بگیرد و عمل کند. اتخاذ چنین تصمیمی می‌تواند باعث بهبود عملکرد اقتصادی پیمانکاران شود.

محمدی لیمایی و همکاران (Mohammadi-Limaei *et al.*, 2014) در تحقیقات خود در جنگل‌های هیرکانی ایران به این نتیجه رسیدند که با توجه به هدف‌های اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی، برنامه‌ریزی آرمانی روشی مناسب برای برنامه‌ریزی چندهدفه در جنگل است.

دو اسکیدر چرخ لاستیکی تیمبرجک *Timberjack 450C* و HSM 904 از آخرین ماشین‌هایی بودند که برای حمل گرده‌بینه از داخل جنگل به کنار جاده، خریداری و وارد ایران شدند (Mousavi *et al.*, 2013). در سالیان گذشته مطالعات متعددی روی کارکرد و هزینه‌های این دو ماشین صورت گرفته است. برای حمل هیزم و کاتین نیز به‌دلیل نبودن گزینه‌ای مناسب، پیمانکاران از سال‌ها پیش مجبور به استفاده از تراکتورهای کشاورزی بوده‌اند. این تراکتورها اگرچه ماشین‌های سبک و سریعی هستند ولی برای به‌کارگیری در جنگل طراحی نشده‌اند و معایب زیادی از نظر ارگونومی و پایداری دارند (Spinelli *et al.*, 2015). هدف اصلی این تحقیق ارائهٔ یک الگوی بهینهٔ مکانیزاسیون حمل‌ونقل اولیهٔ چوب در جنگل‌های هیرکانی بر پایهٔ برنامه‌ریزی فعالیت با هدف‌های چندگانه شامل: زیست‌محیطی، اقتصادی، عملکرد و ارگونومیک است. ماشین‌های فعلی به‌عنوان گزینه‌های مدافع و چند مدل ماشین مناسب با شرایط این جنگل‌ها به‌عنوان گزینه‌های رقیب در برنامه‌ریزی حمل چوب ارزیابی شده‌اند.

مواد و روش‌ها

به‌منظور شبیه‌سازی حمل چوب از جنگل، بررسی کارایی و برآورد هزینهٔ به کارگیری هر یک از ماشین‌ها، و تهیهٔ اطلاعات لازم برای مدل‌سازی، قطعات ۳۷ و ۳۸ سری ۱ بخش ۶ طرح جنگلداری شرکت نکاچوب واقع در شهرستان میاندرود انتخاب گردید. از نظر ارتفاعی این سری در ارتفاع ۳۵۰ تا ۹۳۰ متر از سطح دریا و در دامنه‌ای با جهت عمومی جنوبی واقع شده است. تراکم مسیر چوبکشی در منطقهٔ مورد مطالعه ۳۰ متر در هکتار و میانگین شیب ۱۵ درصد است. جنس خاک از نوع قهوه‌ای جنگلی و موجودی در هکتار ۲۷۰ مترمکعب است. میزان برداشت در پارسل‌های ۳۷-۳۸ به‌میزان ۱۲۰۰ مترمکعب و میزان گرده‌بینه تولیدی پیش‌بینی شده ۶۰۰ مترمکعب، کاتین و هیزم ۳۵۰ مترمکعب است (Anon, 2007).

به‌منظور تعیین ترکیب مناسب مکانیزاسیون و ماشین‌های مناسب با فعالیت، چهار معیار هدف‌گذاری شد: کارکرد ماشین، اقتصادی، زیست‌محیطی و ارگونومیک. با بررسی ماشین‌های فعلی موجود در بازار و بر اساس فاکتورهای: سبک و ارزان بودن، امکان دسترسی و خرید، و امکان بررسی

و جمع‌آوری اطلاعات موردنیاز، چند نمونه ماشین انتخاب و روی آنها مطالعه شد. بررسی ماشین‌های جدید و جمع‌آوری اطلاعات دربارهٔ آنها در بهار ۲۰۱۷ در دانشگاه علوم کشاورزی سوئد (SLU)، جنگل Sundsvall در استان Västernorrland و نمایشگاه ماشین‌آلات Elmia Wood درجنوب کشور سوئد به انجام رسید. جدول ۱، مشخصات ماشین‌ها و شکل ۱، تصویر ماشین‌ها را نشان می‌دهد.

جدول ۱- مشخصات ماشین‌های مورد مطالعه

Table 1- Specifications of the studied machines

تعداد چرخ Number of wheel	نوع تایر Type of tire	وزن (تن) Whight (ton)	ارتفاع (متر) Height (m)	عرض (متر) Width (m)	طول (متر) Length (m)	تعداد سیلندر Number of cylinders	قدرت موتور (اسب بخار) Engine power (hp)	مشخصات Specification / نام ماشین Machine
4	Rubber	10.2	3	2.84	6.10	6	177	Timberjack 450C
4	Rubber	9	2.93	2.40	6	6	170	HSM 904
4	Rubber	7.3	3.05	2.45	5.80	4	116	LKT 81
4	Rubber	7.5	2.93	2.50	6	4	95	TAF 690
6	Rubber	2.96	2.90	1.80	6.20	4	67	Vimek 610
6	Rubber	4.4	2.84	2.10	6.80	4	80	Mowi 650
6	Rubber	3.95	2.52	2.10	4.10	4	80	Farm tractor

شکل ۱- تصویر ماشین‌های مورد بررسی در این پژوهش

Fig. 1- Studied Machines

شاخص‌های مورد نظر شامل: تولید ساعتی، هزینهٔ چوبکشی، آلاینده‌های خروجی اگزوز، سطح صدا، دسترسی به کابین، وضعیت صندلی راننده و تهویهٔ کابین است. تولید ساعتی ماشین‌ها به کمک مدل‌های پیش‌بینی زمان چوب‌کشی معرفی شده در تحقیقات مختلف تعیین شد (جدول ۲).

ماشین‌های Vimek و Mowi در کشور سوئد زمان‌سنجی شد. از تقسیم حجم چوب موجود بر تعداد روزهای مناسب کار و بر ۷ (تعداد ساعات شیفت کاری)، مقدار آرمان تولید ساعتی ۱۴/۸ برای حمل گرده‌بینه و ۷/۴۱ مترمکعب بر ساعت برای حمل هیزم و کاتین محاسبه شد.

جدول ۲- مدل‌های پیش‌بینی زمان‌سنجی ماشین‌های مورد مطالعه

Table 2- Timing prediction models of the studied machines

Machine	مدل پیش‌بینی زمان سنجی Timing prediction model
Timberjack 450C	(Naghdi et al., 2010) $Y = 0.0273D + 0.485SW + 0.601N + 1.24V + 2.52$
HSM 904	(Naghdi et al., 2010) $Y = 0.0346D + 1.47V + 3.85$
LKT 81	(Marčeta et al., 2014) $Y = 0.0187D + 0.61V + 4.39$
TAF 690	(Eghtesadi, 2008) $Y = 0.035D + 0.097N + 0.82V + 3.321$
تراکتور مزرعه Farm tractor	(Jourgholami & Majnonian, 2014) $Y = 0.05754D + 20.33759$

برای هزینه‌یابی از روش سازمان خواربار و کشاورزی ملل متحد (فائو) استفاده شد که شامل: هزینه‌های ثابت، هزینه‌های متغیر یا عملیاتی و هزینه‌های پرسنلی است (Anon, 1992). حداکثر هزینهٔ چوب‌کشی قابل تحمل بر اساس قیمت فروش در کنار جاده جنگلی و کسر هزینه‌های قطع و تبدیل و عوارض و سایر هزینه‌ها در زمان جمع‌آوری داده‌ها (سال ۱۳۹۴) برای گرده‌بینه ۴۵۰۰ و برای هیزم و کاتین ۲۵۰۰۰ تومان بر مترمکعب محاسبه شد. برای محاسبهٔ تغییرات وزن مخصوص خاک در اثر حرکت ماشین‌ها از رابطهٔ ۱ استفاده شد (Raghavan, 1977). آرمان مورد نظر حداکثر ۲۰ درصد افزایش وزن مخصوص به‌عنوان سطح خسارت آور در نظر گرفته شد (Anon, 1998).

$$\gamma_d = \gamma_0 + A\log\{N\frac{P}{p_0}(1 + S\%)\} + B\log(W\%) \quad (۱)$$

که در آن،

A و B= ثابت‌های خاک؛ P= متوسط فشار وارده از زیر تایر بر خاک (کیلو پاسکال)؛ S= بکسوات (۵ درصد)؛ W= رطوبت خاک (۱۵درصد)؛ و N= دفعات بارگذاری یا عبور اسکیدر (۱۰ بار). گاز خروجی اگزوز MDS 418 تجزیه و تحلیل شد (شکل ۲). از دستورالعمل استاندارد شمارهٔ ISIRI 6764 سازمان استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران برای آنالیز اطلاعات به‌دست آمده استفاده شد (Anon, 2011). برخی اطلاعات موردنیاز دربارهٔ ماشین‌های خارج از کشور از طریق شرکت‌های سازنده و برخی نیز از طریق مراجعهٔ حضوری و مطالعهٔ میدانی تهیه شد.

شکل ۲- دستگاه اندازه‌گیری آلاینده‌های خروجی اگزوز (MDS 418)

Fig. 2- Exhaust emissions measuring device (MDS 418)

شکل ۳- صداسنج (Extech)

Fig. 3- Extech dosimeter (MDS 418)

برای بررسی وضعیت ارگونومی ماشین‌ها، از برخی شاخص‌های ارائه شده در دستورالعمل ارگونومی و ایمنی اروپایی برای ماشین‌آلات جنگل استفاده شد. این شاخص‌ها شامل: سطح صدا، دسترسی به کابین، وضعیت صندلی راننده و تهویهٔ کابین هستند (Anon, 2006).

برای اندازه‌گیری سطح صدا، از صداسنج Extech 407355 استفاده شد (شکل ۳). اندازه‌گیری‌ها در دو وضعیت حرکت ماشین با بار و بدون بار در سطح صاف دنبال شد. با استفاده از رابطهٔ ۲، حداکثر مدت‌زمان مواجهه با هر سطح صدا محاسبه شد.

$$D = 8/(2^{\left(\frac{L-85}{3}\right)}) \quad (۲)$$

که در آن،

D= مدت‌زمان استاندارد (ساعت)؛ و L= سطح صدای اندازه‌گیری شده (دسی‌بل). میزان آرمان موردنظر ۷۹ دسی‌بل در نظر گرفته شد. در بررسی وضعیت دسترسی به کابین، شاخص‌های: ارتفاع پلهٔ اول، زاویهٔ پلهٔ اول، عرض پله، عمق پله و قطر نرده یا دستگیره ارزیابی شد؛

در وضعیت صندلی راننده، شاخص های: جای پا، فنر صندلی، زاویهٔ پشتی، چرخش، عمق نشیمن، عرض پشتی، ارتفاع پشتی، فاصلهٔ دسته صندلی و برای وضعیت تهویهٔ کابین این شاخص‌ها ارزیابی شد: سیستم فیلتر هوای ورودی، نحوهٔ تعویض فیلتر، و هشدار تعویض فیلتر. نحوهٔ محاسبهٔ امتیازات منفی برای هریک، در جدول‌های ۳، ۴ و ۵ درج شده است. به‌دلیل یکسان نبودن اهمیت همهٔ هدف‌ها، به هریک از آنها وزن داده شد، متغیرها در وزن‌های مربوط ضرب و سرانجام تابع هدف نوشته شد. وزن هدف‌ها با تنظیم پرسشنامه و به روش فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (AHP) تعیین شد. این پرسشنامه بر مبنای طیف سنجش‌گر لیکرت و ۹ امتیازی طراحی و در اختیار کارشناسان قرار داده شد. پس از جمع‌آوری داده‌های پرسشنامه، به‌منظور تجزیه‌وتحلیل داده‌ها از نرم‌افزار Expert Choice استفاده شد. این روش در جنگل‌داری به‌طور گسترده استفاده می‌شود و مکمل خوبی برای روش‌های سنتی برنامه‌ریزی در جنگل است (Šporčić *et al*, 2010).

جدول ۳- روش امتیازبندی شاخص‌های مربوط به دسترسی به کابین (Anon, 2006)

Table 3- Cabin access indicators scoring method (Anon, 2006)

سطوح Levels / شناسه Indicator	ضریب وزن Weight coefficient	سطح ۱ (۰ امتیاز) Level 1 (0 pts)	سطح ۲ (۲ امتیاز) Level 2 (2 pts)	سطح ۳ (۳ امتیاز) Level 3 (3pts)	سطح ۴ (۷ امتیاز) Level 4 (7 pts)	سطح ۵ (۱۵ امتیاز) Level 5 (15 pts)
ارتفاع پله اول (میلی‌متر) First step height (mm)	4	<350	351–400	351–400	451–550	> 550
زاویه پله اول (درجه) First step pitch (mm)	4	<45	45–50	51–60	61–80	> 80
عرض پله اول (میلی‌متر) Step width (mm)	2	>390	321–390	251–320	160–250	<160
ارتفاع پله (میلی‌متر) Step depth (mm)	2	≥240	151–239	101–150	51–100	≤50
قطر دستگیره (میلی‌متر) Handrail diameter (mm)	1	22–35		15–22		<, 15 >35

جدول ۴- روش امتیازبندی شاخص‌های مربوط به صندلی (Anon, 2006)

Table 4- Seat indicators scoring method (Anon, 2006)

سطوح Levels / شاخص Indicator	ضریب وزن Weight coefficient	سطح ۱ (۰ امتیاز) Level 1 (0 pts)	سطح ۲ (۱ امتیاز) Level 2 (1 pts)	سطح ۳ (۳ امتیاز) Level 3 (3pts)	سطح ۴ (۷ امتیاز) Level 4 (7 pts)	سطح ۵ (۱۵ امتیاز) Level 5 (15 pts)
جای پا Legroom	4	>240	>180	>140	>100	<100
فنر صندلی Damping	4	مناسب– افقی ، قائم Good vertically Horizontally	مناسب– افقی، قائم، معمولی Good vertically, Horizontally moderate	قائم vertically	ضعیف Poor damping	ندارد Not provided
زاویه پشتی Backrest angle	1	−5 – +30°	۰ – +20°		+5 – +15°	تعمیر شده fixed
چرخش Seat swivel	2	≥270°	−270°	<180°	ندارد Not provided	
عمق نشیمن Backrest width	1	≥430	430–400		<400	
عرض پشتی Seat width	2	≥460	430–460		<430	
ارتفاع پشتی Backrest height	1	>580	280–580		<280	
فاصله دسته صندلی armrests	2	قابل تنظیم Adjustable			تعمیر شده fixed	ندارد Not provided

جدول ۵- نحوهٔ امتیازبندی شاخص‌های مربوط به تهویهٔ کابین (Anon, 2006)

Table 5- Cabin ventilation indicators scoring method (Anon, 2006)

سطوح Levels / شاخص Indicator	سطح ۱ (۰ امتیاز) Level 1 (0 pts)	سطح ۲ (۱ امتیاز) Level 2 (1 pts)	سطح ۳ (۳ امتیاز) Level 3 (3pts)	سطح ۴ (۷ امتیاز) Level 4 (7 pts)	سطح ۵ (۱۵ امتیاز) Level 5 (15 pts)	سطح ۱ (۰ امتیاز) Level 1 (0 pts)
فیلتر هوای ورودی filter system	4	حداقل F7* at least F7		حداقل F5 at least F5		ندارد Not provided
نحوه تعویض فیلتر replacing	4	بدون ابزار ساده است Easily without the tools	بدون ابزار مشکل است Difficult without the tools	بدون ابزار ساده است Easily with the tools		بدون ابزار مشکل است Difficult with the tools
هشدار تعویض فیلتر indication	1	تصویری و صوتی Visual, Acoustic	تصویری Visual		صوتی Acoustic	ندارد Missing

* استاندارد جدید اروپا برای فیلترهای هوا (EN779:2012) که از سال ۲۰۱۲ اجباری شده است. بر اساس این استاندارد فیلترها به سه دسته G، M و F تقسیم می‌شوند (Shi *et al*., 2013)

* The new European standard for air filters (EN779:2012) comes into force in 2012. It divides the filters into three classes G, M and F (Shi *et al*., 2013).

در برنامه‌ریزی آرمانی، مدل نهایی پس از اعمال وزن‌ها به‌صورت کمینه و از مجموع انحراف‌های نامطلوب تشکیل می‌شود که در رابطهٔ ۳ نشان داده‌شده است. برای مدل‌سازی از نرم‌افزار لینگو استفاده شد.

$$MinZ=\sum_{i=1}^{m}\sum_{k=1}^{n} W_k d_i^- + W_k d_i^+ \qquad (۳)$$

که در آن،

Z= هدف؛ W= وزن؛ d_i^-= انحراف منفی از هدف؛ d_i^+= انحراف مثبت از هدف.

نتایج و بحث

در محاسبات هزینه‌یابی، از برخی ضریب‌های ثابت استفاده شد. این ضریب‌ها به‌همراه برخی قیمت ها و نیز هزینه‌های مبتنی بر قیمت‌های سال ۱۳۹۶، در جدول‌های ۶ و ۷ درج شده است.

جدول ۶- اطلاعات هزینه‌یابی ماشین‌های مورد مطالعه (واحد: میلیون تومان)

Table 6- Costing information of the studied machines (Unit: million toman)

شاخص Indicatore	Timberjack 450C	HSM 904	LKT 81	TAF 690	Vimek 610	Mowi 650	تراکتور مزرعه Farm tractor
عمر مفید (سال) Useful life (year)	15	15	15	15	10	10	10
هزینه لاستیک Tire cost	40	40	30	30	12	5	5
قیمت روز Current price	200	220	500	480	340	130	65
ارزش بازیافت Salvage value	20	20	50	48	34	13	6.5
ضریب نگهداری Maintenance coefficient	0.5	0.5	0.5	0.5	0.1	0.1	0.1

جدول ۷- هزینهٔ چوبکشی ماشین‌های مورد مطالعه (هزینه: تومان؛ تولید ساعتی: مترمکعب)

Table 7- Skiddding cost of studied machines (Cost unit: Toman, Hourle production: M^3)

ماشین	Timberjack 450C	HSM 904	LKT 81	TAF 690	Vimek 610	Mowi 650	تراکتور مزرعه Farm tractor
هزینه هر ساعت Hourly cost	94630	97313	136513	131534	106099	53179	46317
بهره وری هر ساعت* Hourly productivity*	10.80	9.90	13.50	11.01	5.91	4.83	2.33
هزینه جابجایی Transportation cost	8762	9829	10112	11946	17592	11010	19878

* مسافت جابجایی ۶۰۰ متر و شیب متوسط ۱۵ درصد بود.

*The transportation distance was 600 m and the average slope was 15%.

بر اساس جدول ۷، اسکیدر Timberjack کمترین هزینهٔ چوبکشی را به‌ازای هر مترمکعب چوب به‌دست داده است؛ بعد از آن، HSM قرار دارد و بنابراین با نگاه صرفاً اقتصادی، استفاده از این ماشین‌ها در منطقهٔ مطالعاتی برای حمل گرده‌بینه برتری دارد.

در بین ماشین‌های حمل هیزم و کاتین، تریلر Mowi کمترین هزینهٔ چوبکشی را به‌دست داده است. علت بالا بودن هزینهٔ تراکتور برای حمل هیزم و کاتین، پرداخت هزینهٔ کارگری برای بارگیری است. بر اساس محاسبات طبق رابطهٔ ۱، تغییرات وزن مخصوص خاک بر اثر عبور ماشین ها، نسبت به چگالی اولیهٔ خاک برای Timberjack و HSM معادل ۳۹ درصد، برای TAF معادل ۳۸ درصد، برایLKT و Mowi معادل ۳۵ درصد، برای Vimek معادل ۲۷ درصد و برای تراکتور معادل ۳۶ درصد به‌دست آمده است. میزان افزایش وزن مخصوص خاک در اثر رفت‌وآمد ماشین‌های مورد مطالعه در مسیرهای چوبکشی بین ۲۷ تا ۳۹ درصد در نوسان است که با نتایج پژوهش توانکار و همکاران (Tavankar *et al.*, 2009) (۳۵/۶۱ درصد) و نقدی و همکاران (Naghdi *et al.*, 2007) (۱۵/۸-۶۲/۸) مطابقت دارد. بیشترین مقدار افزایش وزن مخصوص (۳۹ درصد)، به‌هنگام به‌کارگیری ماشین‌های اسکیدر Timberjack و HSM و کمترین آن (۲۷ درصد) به‌هنگام به‌کارگیری ماشین فوروادر Vimek دیده می‌شود.

جدول ۸- حداکثر مجاز و مقدار آلاینده‌های خروجی از اگزوز ماشین‌ها (Anon, 2011)

Table 8- Maximum permissible and amount of exhaust emissions of machines (Anon, 2011)

نوع آلاینده pollutant / ماشین Machine	Timberjack 450C	HSM 904	TAF 690	LKT 81	Vimek 610	Mowi 650	تراکتور مزرعه Farm tractor	بیشینه حد مجاز Maximum allowed
NO_2 (g/km)	2.8	2.6	1.9	2.1	1.8	2.3	2.3	2
CO (g/km)	1.8	1.9	1.6	1.7	1.4	1.9	1.9	1.5
HC (g/km)	0.68	0.55	0.49	0.50	0.44	0.53	0.53	0.46
جمع کل Total	5.28	5.05	3.99	4.3	3.64	4.73	4.73	3.96

در جدول ۸، حد مجاز اعلام شدهٔ آلاینده‌های خروجی اگزوز ماشین‌ها و میزان اندازه‌گیری شده برای هر ماشین درج شده است، که Timberjack بیشترین (۵/۲۸ گرم به‌ازای هرکیلومتر مسافت) و فوروارد‌ر Vimek کمترین آلودگی (۳/۶۴ گرم به‌ازای هر کیلومتر مسافت) را ایجاد کرده‌اند. آرمان مورد نظر بر بر اساس دستورالعمل استاندارد شمارهٔ ISIRI 6764 سازمان استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران، ۳/۹۶ گرم به‌ازای هرکیلومتر مسافت در نظر گرفته شد (Anon, 2011).

جدول ۹- میانگین سطح صدا برای ماشین‌های مختلف در شرایط مورد مطالعه

Table 9- Average sound level for different machines under study conditions

Farm tractor	Mowi 650	Vimek 610	LKT 81	TAF 690	HSM 904	Timberjack 450C	ماشین Machine
90	79	75	86	85	87	88	سطح صدا sound level (dB)
2.8	8	8	6	8	5	4	شیفت کاری (ساعت) work shift (h)

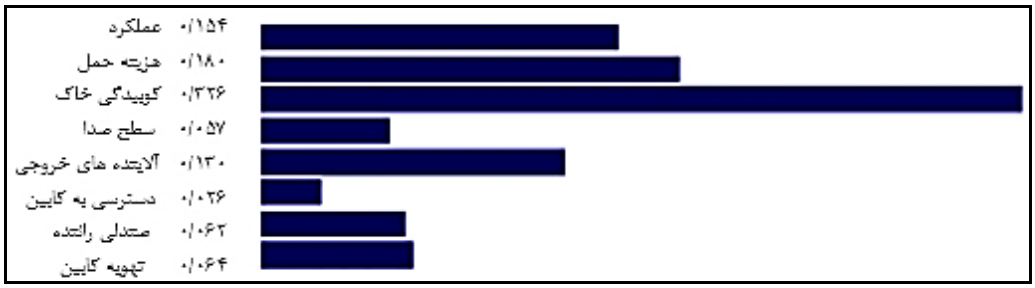
نتایج حاصل از اندازه‌گیری سطح صدا و مدت زمان مواجهه با هر سطح صدا نیز در جدول ۹ درج شده است که تراکتور کشاورزی بیشترین سطح صدا (۹۰ دسی‌بل) و کمترین ساعت کار مجاز (۲/۵ ساعت) را داراست که با نتایج پژوهش بهروزی لار و همکاران (Behroozi-Lar *et al.*, 2012) همخوانی دارد؛ ماشین Vimek با ۷۵ دسی‌بل کمترین سطح صدا را داراست. سطح صدای استاندارد تعیین شده ۷۹ دسی‌بل است که ماشین‌های Vimek و Mowi در شرایط استاندارد قرار دارند. معمولاً در فعالیت‌های مرتبط با جنگل از تراکتور بدون اتاقک استفاده می شود اما با توجه به نتایج به‌دست آمده از این پژوهش، توصیه می‌شود حتماً از تراکتورهای کابین‌دار استفاده شود. از لحاظ دسترسی به کابین، اسکیدر Timberjack با ۱۲۰ امتیاز بدترین شرایط و فوروارد‌ر Vimek با ۷۵ امتیاز منفی بهترین شرایط را دارند. حداکثر امتیاز منفی قابل‌قبول برای دسترسی به کابین به‌عنوان محدوده استاندارد و طبق دستورالعمل اروپایی ۷۶ در نظر گرفته شده است.

از لحاظ وضعیت صندلی راننده، فوروارد‌ر Vimek با ۳۵ امتیاز منفی بهترین و تراکتور و تریلر Mowi با ۲۰۷ امتیاز منفی بدترین شرایط را دارند. حداکثر امتیاز منفی قابل‌قبول برای صندلی راننده به‌عنوان محدوده استاندارد و طبق دستورالعمل اروپایی، ۱۱۹ در نظر گرفته شد. صندلی راننده و به‌خصوص شاخص چرخش صندلی نقش زیادی در کارکرد راننده به‌ویژه در حین بارگیری و تخلیه یا کشیدن و باز کردن کابل دارد. از لحاظ وضعیت تهویهٔ کابین راننده، فوروارد‌ر Vimek و اسکیدرLKT با ۴۳ امتیاز منفی بهترین و تراکتور و تریلر Mowi با ۱۳۵ امتیاز منفی بدترین شرایط را دارا هستند. حداکثر امتیاز منفی قابل‌قبول برای تهویهٔ کابین به‌عنوان محدودهٔ استاندارد و طبق دستورالعمل اروپایی، ۷۱ در نظر گرفته شده است. این شاخص در ماشین‌هایی اهمیت دارد که در محیط‌های پر گردو غبار فعالیت می‌کنند.

در این مطالعه با حذف انحراف‌های مطلوب و حفظ انحراف‌های نامطلوب، مدل نهایی به‌صورت رابطهٔ ۴ نوشته شد.

$$\text{Min } Z= W_1 d_1^- + W_2 d_2^+ + W_3 d_3^+ + W_4 d_4^+ + W_5 d_5^+ + W_6 d_6^+ + W_7 d_7^+ + W_8 d_8^+ \quad (۴)$$

که در آن،
d_1^-= انحراف از مقدار آرمانی کارکرد ساعتی؛ d_2^+ = انحراف از مقدار آرمانی هزینهٔ چوبکشی؛ d_3^+= انحراف از مقدار آرمانی تغیر وزن مخصوص خاک؛ d_4^+= انحراف از مقدار آرمانی آلاینده‌های خروجی اگزوز؛ d_5^+= انحراف از مقدار آرمانی سطح صدا؛ d_6^+= انحراف از مقدار آرمانی امتیاز منفی دسترسی به کابین؛ d_7^+= انحراف از مقدار آرمانی امتیاز منفی وضعیت صندلی؛ d_8^+= انحراف از مقدار آرمانی امتیاز منفی تهویهٔ کابین. خروجی نرم‌افزار Expert Choice به منظور تجزیه تحلیل پرسشنامه‌ها در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل۴- خروجی نرم‌افزارEC به‌منظور تعیین وزن اهداف

Fig. 4. EC software output for weighting

بر اساس نتایج به‌دست آمده از ماتریس مقایسه‌ها، وزن هر یک از شاخص‌ها به‌ترتیب برای عملکرد (تولید ساعتی) ۰/۱۵۴، هزینهٔ حمل (ماشین) ۰/۱۸۰، کوبیدگی خاک ۰/۳۲۶، سطح صدا (آلودگی صوتی) ۰/۰۵۷، آلاینده‌های خروجی (آلودگی هوا) ۰/ ۱۳، دسترسی به کابین ۰/۰۲۶، صندلی راننده ۰/۰۶۲ و تهویهٔ کابین ۰/۰۶۴ در مدل نهایی لحاظ خواهد شد. مدل نهایی پس از وزن‌دهی به شاخص‌ها به‌صورت رابطهٔ ۵ به‌دست آمد.

$$\text{Min } Z=۰/۱۵۴\ d_1^- + ۰/۱۸۰ d_2^+ + ۰/۳۲۶ d_3^+ + ۰/۰۵۷ d_4^+ + ۰/۱۳۰ d_5^+ + ۰/۰۲۶ d_6^+ + ۰/۰۶۲ d_7^+ + ۰/۰۶۴ d_8^+ \quad (۵)$$

محدودیت‌های حمل گرده‌بینه:

$$۱۰/۸ x1_s + ۹/۹ x2_s + ۱۱/۱ x3_s + ۱۳/۵ x4_s + d_1^+ + d_1^- = ۱۴/۸$$

$$۱۷۰ x1_s + ۴۱ x2_s + ۶۵ x3_s + ۶۱ x4_s + d_7^+ + d_7^- = ۱۱۹$$

$$۸۷۶۲ x1_s + ۹۸۲۹ x2_s + ۱۰۱۱۲ x3_s + ۱۱۹۴۶ x4_s + d_2^+ + d_2^- = ۴۵۰۰۰$$

$$۱۲۰ x1_s + ۶۶ x2_s + ۷۶ x3_s + ۹۴ x4_s + d_6^+ + d_6^- = ۷۶$$

$$۳۹ x1_s + ۳۹ x2_s + ۳۸ x3_s + ۳۵ x4_s + d_3^+ + d_3^- = ۲۰$$

$$۱۰۱ x1_s + ۷۱ x2_s + ۷۱ x3_s + ۴۳ x4_s + d_8^+ + d_8^- = ۷۱$$

$$۵/۲۸\ x۱_s + ۵/۰۵\ x۲_s + ۳/۹۹\ x۳_s + ۴/۳\ x۴_s + d_۴^+ + d_۴^- = ۳/۹۶$$

$$۸۸\ x۱_s + ۸۷\ x۲_s + ۸۵\ x۳_s + ۸۶\ x۴_s + d_۵^+ + d_۵^- = ۷۹$$

$$x۱_{si}, x۲_{si}, x۳_{si}, x۴_{si} \geq ۰\ \forall_i$$

$$d_i^+, d_i^- \geq ۰\ \forall_i$$

$$x۱ + x۲ + x۳ + x۴ = ۱$$

محدودیت‌های حمل هیزم و کاتین:

$$۵/۹۱\ x۱_f + ۲/۳۳x۲_f + ۴/۸۳x۳_f + d_۱^+ + d_۱^- = ۷/۱۴$$

$$۷۵x۱_f + ۹۰x۲_f + ۷۹\ x۳_f + d_۵^+ + d_۵^- = ۷۹$$

$$۱۷۹۵۲\ x۱_f + ۱۱۰۱۰x۲_f + ۱۹۸۷۸\ x۳_f + d_۲^+ + d_۲^- = ۲۵۰۰۰$$

$$۴۳\ x۱_f + ۱۳۵\ x۲_f + ۱۳۵\ x۳_f + d_۸^+ + d_۸^- = ۷۱$$

$$۲۷\ x۱_f + ۳۶x۲_f + ۳۵x۳_f + d_۳^+ + d_۳^- = ۲۰$$

$$۳۵\ x۱_f + ۲۰۷\ x۲_f + ۲۰۷\ x۳_f + d_۷^+ + d_۷^- = ۱۱۹$$

$$۳/۶۴\ x۱_f + ۴/۷۳\ x۲_f + ۴/۷۳\ x۳_f + d_۶^+ + d_۶^- = ۳/۹۶$$

$$۷۵\ x۱_f + ۹۹\ x۲_f + ۹۹\ x۳_f + d_۶^+ + d_۶^- = ۷۶$$

$$x۱_{fi}, x۲_{fi}, x۳_{fi} \geq ۰\ \forall_i$$

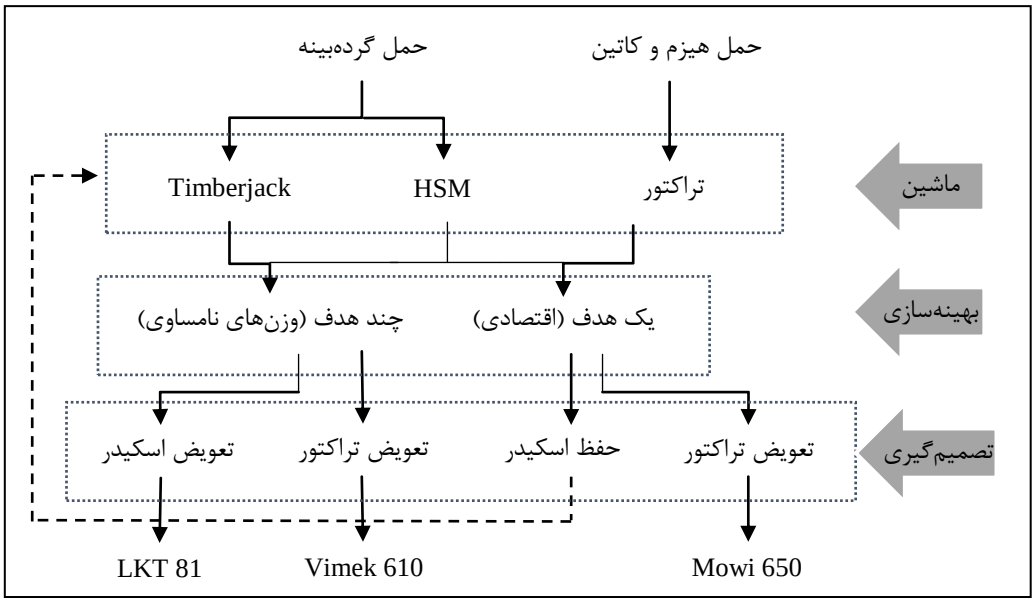
$$d_i^+, d_i^- \geq ۰ \forall_i$$

$$x۱ + x۲ + x۳ = ۱$$

نتایج حل مدل نهایی برای حمل گرده‌بینه در نرم‌افزار لینگو نشان می‌دهد اسکیدر LKT ماشین بهینه است. کمترین انحراف نامطلوب برای رسیدن به هدف‌های موردنظر، ۱/۳ واحد برای تولید ساعتی، ۱۵ واحد برای کوبیدگی خاک، ۰/۳۴ واحد برای آلودگی هوا، ۷ واحد برای دسترسی به کابین و ۱۸ واحد برای وضعیت صندلی راننده و در مجموع ۴۱/۶۴ واحد به‌دست آمد. نتایج حل مدل نهایی وزن داده شده برای حمل هیزم و کاتین نشان می‌دهد فوروارد Vimek ماشین بهینه است. کمترین انحراف نامطلوب برای رسیدن به اهداف موردنظر، ۶/۲۳ واحد برای تولید ساعتی، ۷ واحد برای کوبیدگی خاک و در مجموع ۱۳/۲۳ واحد به‌دست آمد.

نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که بر اساس هدف اقتصادی، سرمایه‌گذاری برای خرید اسکیدر جدید مقرون‌به‌صرفه نیست ولی خرید تریلر مجهز به بازوی بارگیری مانند Mowi به‌جای تراکتور مقرون‌به‌صرفه است و باعث کاهش هزینه‌ها می‌شود. این نتایج همچنین مؤید اهمیت محاسبات اقتصادی در کاهش ریسک سرمایه‌گذاری است که با نتایج تحقیق بئوک و همکاران (Beuk *et al.*, 2007) و کانتو و لبل (Cantú & Lebel, 2010) همخوانی دارد. نتایج به‌دست آمده از بهینه‌سازی چندهدفه نشان می‌دهد که برای حمل گرده‌بینه از منطقهٔ مورد مطالعه اسکیدر LKT و برای حمل هیزم و کاتین فوروارد Vimek ماشین‌های مطلوب‌تری هستند. با خرید ماشین جدید برای حمل گرده‌بینه ۱۵ درصد به

هزینه‌های چوبکشی افزوده می‌شود اما در عوض اهداف زیست‌محیطی و ارگونومیک مدنظر نیز محقق خواهد شد. در مورد حمل کاتین و هیزم، با خرید ماشین جدید هزینه‌ها ۱۰ درصد کاهش خواهد یافت. در شکل ۵، فلوچارت تصمیم‌گیری در دو حالت صرفاً اقتصادی و یا در نظر گرفتن اهداف مختلف نشان داده شده است.



شکل ۵- فرآیند تصمیم‌گیری با در نظر گرفتن یک هدف (اقتصادی) و چند هدف (زیست‌محیطی، اقتصادی، عملکرد، ارگونومیک)

Fig. 5. Decision-making process with one objective (economic) and multiple objective (environmental, economic, performance, ergonomic)

نتیجه‌گیری

تفاوت تصمیم‌گیری در دو نوع برنامه‌ریزی و انتخاب دو ماشین متفاوت برای حمل هیزم و کاتین (Mowi در تک هدفه و Vimek در چندهدفه) نشان‌دهنده اهمیت به‌کارگیری روش‌های چندهدفه در مدیریت جنگل است. می‌توان با استفاده از برنامه‌ریزی آرمانی و با بهینه‌سازی فعالیت از طریق حداقل سازی انحرافات، مکانیزاسیون بهینهٔ حمل و نقل اولیه را مشخص و از این طریق علاوه بر حمل و نقل چوب، سایر اهداف را نیز محقق کرد. همچنین به‌منظور رعایت مسائل زیست‌محیطی و کاهش آسیب‌های شغلی، گاهی لازم است هزینه های بیشتری متحمل شد که برای مثال می‌توان به انتخاب LKT برای حمل گرده بینه، به‌رغم پرداخت هزینه‌های بیشتر، اشاره کرد. پیشنهاد می‌شود در تحقیقات دیگر، ماشین‌های بیشتری که در حال حاضر در دنیا ساخته می‌شوند و شاخص‌های دیگری مانند عرض مسیر چوبکشی یا خسارات وارده به توده و زادآوری جنگل نیز مطالعه شود.

مراجع

Allman, M., Ferenčík, M., Jankovský, M., Stanovský, M., & Messingerová, V. (2015). Damage caused by wheeled skidders on cambisols of central Europe. *Croatian Journal of Forest Engineering, 36*(2): p. 205-215.

Anon (2011). The method of measuring gaseous pollutants and released exhaust particles. *Guideline No 6764*. National Standards and Industrial Research Organization of Iran. Tehran, Iran. (in Persian)

Anon. (1992). Cost Control in Forest Harvesting and Road Construction. *Forestry Paper No. 99*. Rome, Food and Agriculture Organization of the United Nations, 106p.

Anon. (1998). USDA Forest Service Manual, FSM 2520 (Watershed Protection and Management) R-6. *Suplement No. 2500-98-1*.

Anon. (2006). European Ergonomic and Safety Guidelines for Forest Machines. *Europian Commission*.100 p.

Anon. (2007). Forest Management Plan Seri 1 Section 6 Nekachoob. Sari, Iran. (in Persian)

Behroozi-Lar, M., Payandeh, J., & Bagheri-Khodarahmpour, Z. (2012). Comparison of noise level of tractors with cab and without in different gears on driver ear and bystander. *African Journal of Agricultural Research, 7*(7): p. 1150-1155.

Beuk, D., Tomasic, Z., & Horvat, D. (2007). Status and development of forest harvesting mechanization in Croatian state forestry. *Croation Journal of Forest Engineering.28*(1): p.63-82.

Cantú, L., & Lebel, L. (2010). *How adequate are equipment replacement models for logging contractors? Proceedings of the 33rd Annual Meeting of the* Council on Forest Engineering *(*COFE). June 6-9, Auburn AL, USA.

Conrad, J. L., Vokoun, M. M., Prisley, S. P., & Bolding, M. C. (2017). Barriers to logging production and efficiency in Wisconsin [Internet]. *International Journal of Forest Engineering. 28,* p. 57-65.

Eghtesadi. (2008). Evaluation of wood productivity rate in primary and secondary transportation in Nekachub region. *Iranian Journal of Forest and Poplar Research,16*(2): p. 274-291.(in Persian)

Epron, D., Plain, C., Ndiaye, F., Bonnaud, P., Pasquier, C., & Ranger, J. (2016). Effects of compaction by heavy machine traffic on soil fluxes of methane and carbon dioxide in a temperate broadleaved forest. *Forest Ecology and Management, 382*, p. 1-9.

Frey, B., Kremer, J., Rüdt, A., Sciacca, S., Matthies, D., & Lüscher, P. (2009). Compaction of forest soils with heavy logging machinery affects soil bacterial community structure. *European Journal of Soil Biology, 45*(4): p. 312-320.

Häggström, C., Kawasaki, A., & Lidestav, G. (2013). Profiles of forestry contractors and development of the forestry-contracting sector in Sweden. *Scandinavian Journal of Forest Research, 28*(4): p. 395-404.

Holzleitner, F., Stampfer, K., & Visser, R. (2011). Utilization rates and cost factors in timber harvesting based on long-term machine data. *Croat Journal of Forest Engineering, 32*, p. 501-508.

Hosseini, S. A. O., Nasiri, M., & Akbarimehr, M. (2014). Skidders traffic assessment on forest soil properties. *International Journal of Civil Engineering, 3*(3): p. 372-377.

Jourgholami, M., & Majnounian, B. (2014). Productivity of timber extraction using farm tractor equiped with trailer (Case study: in Kheiroud Forest in northern Iran). *Iranian Journal of Forest and Poplar Research. 22*(2):b p. 332-346. (in Persian)

Lotfalian, M. (2011). *Wood Transportation*. Aeeizh Press, Tehran, Iran. (in Persian)

Lotfalian, M. (2015). *Logging*. Aeeizh Press, Tehran, Iran. (in Persian)

Magagnotti, N., & Spinelli, R. (2011). Financial and energy cost of low-impact wood extraction in environmentally sensitive areas. *Ecological Engineering, 37*(4): p. 601-606.

Marčeta, D., Petković, V., & Košir, B. (2014). Comparison of two skidding methods in beech forests in mountainous conditions. *Nova Mehanizacija Sumarstva,* 35(14): p. 51-62.

Mohammadi-Limaei, S., Seddigh-Kouhi, M., & Rostami-Sharaji, T. (2014). Goal programming aproach for sustainable forest management (case study in Iranian Caspian forests). *Journal of Forestry Research, 25*(2): p. 429-435.

Mousavi, R., Nikooy, M., & Naghdi, R. (2013). Comparison of timber skidding using two ground-based skidding systems: graple skidding vs. cable skidding. *International Journal of Forest, Soil and Erosion. 3*(3): p. 79-86.

Naghdi, R., & Mohammadi Limaei, S. (2009). Optimal Forest Road Density Based on Skidding and Road Construction Costs in Iranian Caspian Forests. *Caspian Journal of Enviromental Science, 7*(2): p. 79-86.

Naghdi, R., & Mousavi, S. R. (2016). Impacts of rubber-tired skidder and crawler tractor on forest soil in the mountainous forests of northern Iran. *Baltic Forestry, 22*(2): p. 375-381.

Naghdi, R., Bagheri, I., Akef, M., & Mahdavi, A. (2007). Soil compaction caused by 450C Timber Jack wheeled skidder (Shefarood forest, northern Iran). *Journal of Forest Science, 53*(7): p. 314-319.

Naghdi, R., Firouzan, A. H., Nikooy, M., & Barari, K. (2010). Evaluation of production and cost of hsm-904 skidder and timber jack c-405 in forests of wood and paper industries of Mazandaran. *Journal of Forest and Wood Products (JFWP), Iranian Journal of Natural Resources. 63*(1): p. 91-102. (in Persian)

Raghavan, G., Mackeys, E., & Beaulleu, B. (1977). Prediction of clay soil compaction. *Journal of Terramechanics, 14*(1): p. 31-38.

Schenewerk, W. (2006). Automatic DRAC LMFBR to speed licensing and mitigate co_2. *WSEAS Transactions on Environment and Development, 7*(2): p. 404.1-404.8

Shi, B., Ekberg, L., & Langer, S. (2013). Intermediate air filters for general ventilation applications: An experimental evaluation of various filtration efficiency expressions. *Aerosol Science and Technology, 47,* p. 488-498.

Siddharth, S. (2006). Green energy-anaerobic digestion. converting waste to electricity. *WSEAS Transactions on Environment and Development, 7*(2): p. 276-280.

Sidhu, S., Graham, J., & Striebich, R. (2001). Semi-volatile and particulate emissions from the combustion of alternative diesel fuels. *Chemosphere, 42*(5-7): p. 681-90.

Spinelli, R., Lombardini, C., & Magagnotti, N. (2013). Salvaging windthrown trees with animal and machine systems in protected areas. *Ecological Engineering, 53,* p. 61-67.

Spinelli, R., Magagnotti, N., Pari, L., & De Francesco, F. (2015). A comparison of tractor-trailer units and high-speed forwarders used in Alpine forestry. Scandinavian Journal *of* Forest *Research,* 30, p. 470-477.

Spinelli, R., Owende, P. M. O., Ward, S. M., & Tornero, M. (2004). Comparison of short-wood forwarding systems used in Iberia. *Silva Fennica, 38*(1): p. 85-94.

Šporčić, M., Landekić, M., Lovrić, M., Bogdan, S., & Šegotić, K. (2010). Multiple criteria decision making in forestry. *Methods and Experiences, 134*(5): p. 275-286.

Tavankar, F., Mjnonian, B., & Eslam-Bonyad, A. (2009). Logging damages on forest regeneration and soil compaction using ground-based system (case study: asalem forest aarea, Guilan). *Journal of Water and Soil Science. 13*(48): p. 449-456. (in Persian)

Vusić, D., Šušnjar, M., Marchi, E., Spina, R., Zečić, Z., & Picchio, R. (2013). Skidding operations in thinning and shelterwood cut of mixed stands-Work productivity, energy inputs and emissions. *Ecological Engineering, 61*(A): p. 216-223.

Zavrl, D. (2008). Investment Decision Making. *Ekonomska Istra\Vzivanja, 21*(3): p. 25-42.

Agricultural Mechanization and Systems Research/Vol.20/No.73/ Autumn & Winter 2020/P: 19-34

Optimization of Primary Wood Transportation Mechanization in Hyrcanian Forests Based on Multiple Objectives (Environmental, Economic, Performance, Ergonomic)

M. Hejazian*, M. Lotfalian and S. Mohammadi-Limaei

* Corresponding Author: Ph. D. Student of Forest Engineering, Faculty of Natural Resource, Sari Agricultural and Natural Resources University. Mazandaran, Iran. Email: m.hejazian@stu.sanru.ac.ir
Received: 3 March 2018, Accepted: 19 December 2018

Abstract

In this study, in order to determine the optimal mechanization of the wood primary transportation in the Hyrcanian forests of Iran, current machines including Timberjack 450C, HSM 904 and agricultural tractor and number of new machines including LKT 81, TAF 690, Vimek 610 and Mowi 650 were investigated. The Goal Programming technique, a multi-objective optimization method, including environmental, economic, performance, ergonomics, was used. The results showed that Timberjack 450C and HSM 904 skidders had less log transporting costs compared to other machines, and economically are still cost-effectively machines. For the transporting of firewood, Farm tractor is not cost-effectively and the alternative economic option is Mowi 650 trailer. In the case of replacement, the cost of firewood transporting will decrease by 44%. Optimization results, using goal programming regarding all the goals, have shown that existing machines should be replaced by the LKT 81 skidder and the Vimek 610 forwarder to transport logs and firewoods, respectivlly. With the replacement, the costs of log transporting will increase to 15% and the costs of firewood transporting will decrease to 10%. Currently, the mechanization of wood transportation in Hyrcanian forests is not optimal in terms of quadratic goals and needs to be changed. In the forest machinery management, the environmental and ergonomic aspects should be taken into consideration.

Keywords: Current Machines, Forest Machinery Management, Goal Programming, Logging Cost, Replacement