

## Efektywność pozyskiwania drewna harvesterem w młodszych trzebieżowych drzewostanach sosnowych w zależności od technologii pracy

Efficiency of timber harvesting using harvester in thinned young pine stands as a function of working technique

Arkadiusz Stańczykiewicz\* , Grzegorz Szewczyk , Bartosz Brzoza

Uniwersytet Rolniczy im. H. Kołłątaja w Krakowie, Wydział Leśny, Katedra Użytkowania Lasu, Inżynierii i Techniki Leśnej  
Al. 29 Listopada 46, 31-425 Kraków  
Adres korespondencyjny: Al. Mickiewicza 21, 31-120 Kraków

\*Tel. +48 12 662 50 90; e-mail: arkadiusz.stanczykiewicz@urk.edu.pl

**Abstract.** In Poland, more and more timber is harvested with the use of harvesters of different types. These machines can also be used in cooperation with chainsaw operators, e.g. in stands damaged by violent winds, in the removal of windthrows, or in stands of younger age classes in the technological variant with the so-called „midfield”.

The aim of the study was to characterise the working time structure and to estimate the efficiency of timber harvesting with a harvester in two technological variants. In the first variant, the felling of trees was carried out by a chainsaw operator and the processing was performed by a harvester operator. In the second variant all operations were carried out by a harvester operator. In both variants, the machine worked on the skid trails, but in the second variant, the operator descended from the skid trails a short distance into the stand. Harvesting was conducted in two pine stands that were approximately the same age and differed in site conditions.

The structure of the harvester operator’s work time was clearly dominated by the moving of felled trees to the skid trails in both variants. Of all the activities studied, the observed differences between their durations in both variants were insignificant only in the case of delimiting and bucking (processing). In the case of cooperation between harvester operator and chainsaw operator, a higher work efficiency was achieved than in the case of timber harvesting with a harvester alone. At the same time, significantly lower work time consumption was observed. However, when considering the efficiency of the entire technologies, thinning with two workers was 30–60% more time consuming. Significant relationships were found between the amount of merchantable timber of harvested trees and the efficiency of the harvester operator.

**Keywords:** CTL method with midfield, early thinning, motor-manual logging, semi-automated logging, work efficiency, worktime consumption

**Słowa kluczowe:** metoda drewna krótkiego z międzypolem, trzebieże wczesne, pozyskanie ręczno-maszynowe, pozyskanie maszynowe częściowo zautomatyzowane, wydajność pracy, czasochłonność pracy


### 1. Wprowadzenie

Pozyskiwanie drewna w drzewostanach trzebieżowych ma swoje uzasadnienie ekonomiczne ze względu na rosnące zapotrzebowanie w przemyśle drzewnym i energetycznym (Holzleitner et al. 2019). W młodych drzewostanach Eliasson (1999) oraz Bergström i in. (2007) wykorzystali modele symulacyjne do określenia wpływu intensywności cięć na efektywność procesu pozyskiwania drewna. Autorzy ci udokumentowali korzyści z trzebieży wielkopowierzchniowych,

szczególnie w młodszych klasach wieku i w przypadku zapotrzebowania na biomasę.

W Polsce powierzchnia drzewostanów, w których wykonywane są trzebieże, wzrosła w ostatnich 10 latach o ok. 10%, osiągając w 2020 roku 354 tys. ha. W drzewostanach młodszych klas wieku pozyskuje się prawie 14 mln m<sup>3</sup> drewna użytkowego, w tym większość sortymentów średniowymiarowych ważnych dla sektora drzewnego (GUS 2020). Model maszynowego, częściowo zautomatyzowanego pozyskania drewna, oparty o maszyny wielooperacyjne i zrywkę

Wpłynęło: 11.04.2023 r., zrecenzowano: 26.06.2023 r., zaakceptowano: 28.06.2023 r.

 © 2023 A. Stańczykiewicz et al.

nasiebierną, ma swoje szczególne uzasadnienie w drzewostanach trzebieżowych, przede wszystkim ze względu na zalety: ekonomiczne redukujące koszty jednostkowe pozyskania drewna (Dvořák et al. 2011; Mederski et al. 2018; Sowa et al. 2007), ergonomiczne ograniczające obciążenia organizmu operatorów maszyn (Leszczyński et al. 2012; Szewczyk et al. 2020) i ekologiczne pozwalające na zmniejszanie wpływu technologii na glebę i pozostałe składniki drzewostanów (Kulak et al. 2016; Stańczykiewicz, Kulak 2014).

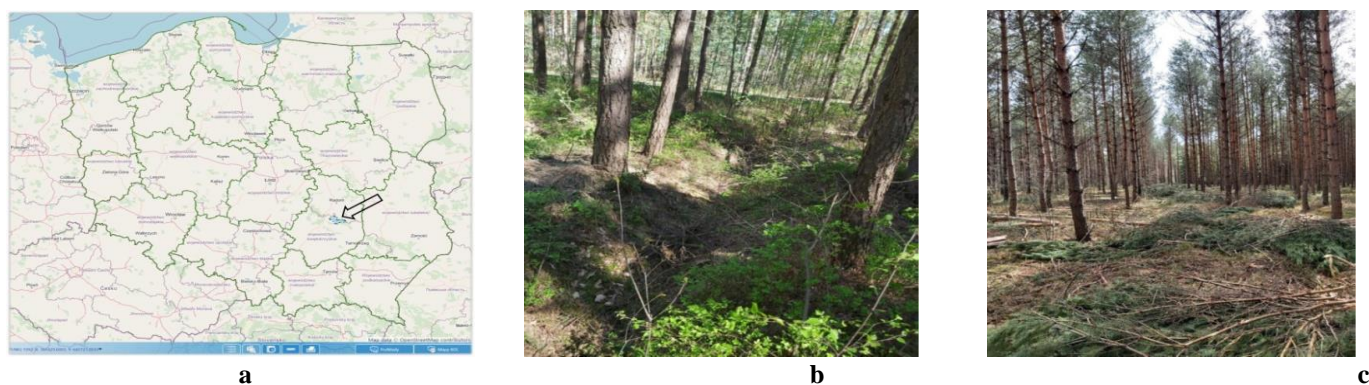
W Polsce około 46–47% drewna pozyskuje się za pomocą harwesterów (Bodył 2022). Mimo, że liczba harwesterów w Polsce od 2000 roku wzrosła kilkakrotnie i przekracza znacznie 500 maszyn (Mederski et al. 2016), ich wykorzystanie w młodszych drzewostanach jest ograniczone. Wprowadzenie w 2019 roku zaleceń zobowiązujących jednostki administracyjne Lasów Państwowych do udostępniania drzewostanów poprzez sieć szlaków operacyjnych sprzyja stosowaniu maszyn i w pewnym stopniu ułatwia wyznaczanie trzebieży (Zarządzenie ... 2019). Na terenach dotychczas nieudostępnionych szlakami operacyjnymi, szczególnie w przypadku, gdy zasięg żurawia harwestera jest mniejszy niż 10 m, zaleca się stosowanie wariantów mieszanych z cięciami drzew pilarkami na tzw. międzypolach. W niektórych źródłach wskazuje się możliwość zastosowania wariantów, w których w zależności od sytuacji w drzewostanie ogranicza się prostoliniowy przebieg szlaków operacyjnych (Uusitalo 2010).

Duże zagęszczenie drzew w drzewostanach trzebieżowych i mała jednostkowa miąższość ściętych drzew, a także konieczność obniżenia kosztów zakupu maszyn, spowodowały wprowadzenie wielu rozwiązań konstrukcyjnych w harwesterach (Więsik 2015), które ze względu na dużą mobilność, uzyskaną dzięki zastosowaniu zwykle kołowego układu jezdnego oraz zaawansowanych systemów kontroli trakcji, są szeroko stosowane, także w trzebieżach wczesnych (Dvořák et al. 2011; Lazdiņš et al. 2016; Zimelis 2017). Na rynku pojawiło się również wiele tańszych rozwiązań, w tym ciągniki uniwersalne lub maszyny budowlane wykorzystywane jako nośniki dla żurawi hydraulicznych z głowicami wielooperacyjnymi wyposażonymi w systemy komputerowe sterujące operacjami ścinki drzew i wyróbki drewna. W łatwych warunkach pracy, na terenach płaskich i w drzewostanach młodszych klas wieku bywają stosowane ciągniki uniwersalne z głowicami harwesterowymi (Athanasiadis 1997; Belbo 2010; Johansson 1996, 1997; Russell, Mortimer 2005; Wójcik 2010) lub procesorami (Leszczyński, Stańczykiewicz 2015; Sowa et al. 2007). Stopniowo zwiększa się również udział harwesterów, w których nośnikiem są maszyny budowlane (Kormanek, Baj 2018; Leszczyński et al. 2021). Ich przystosowanie do pracy w warunkach leśnych jest podobne jak w przypadku ciągników uniwersalnych (np. rozwiązania ROPS: Roll-Over Protective Structures i FOPS: Falling Object Protective Structures, fotel obrotowy umożliwiający sterowanie ciągnikiem i podzespołami przy

obrocie o 180°). Mimo tego w trzebieżach wczesnych pozyskanie drewna jest szczególnie trudne, co wynika zarówno z dużego zagęszczenia takich drzewostanów, jak i niewielkiej miąższości pozyskiwanych drzew (Grodecki 1988; Kärhä et al. 2004; Mederski et al. 2018). Dodatkowym elementem utrudniającym efektywne pozyskiwanie drewna w drzewostanach II klasy wieku, nawet udostępnionych siecią szlaków operacyjnych zgodnie z Zasadami Użytkowania Lasu (2019) jest ograniczony użyteczny wysięg maksymalny żurawi hydraulicznych (od 4,1 do 6,5 m), w które wyposażone są małe harwestery, skonstruowane do pracy w drzewostanach młodszych klas wieku. Taka sytuacja utrudnia optymalne wykorzystanie tych maszyn ze względu na odległości między szlakami operacyjnymi, które powinny wynosić około 20 m. W takim przypadku należy liczyć się z koniecznością zjeżdżania harwesterami ze szlaków operacyjnych na niewielką odległość w głąb drzewostanu (Sowa et al. 2018b) lub zaakceptować wyższą czaso- i kosztochłonność zastosowania technologii z tzw. międzypolem (Mederski 2006).

W związku z powyższym, celem pracy było scharakteryzowanie struktury operacyjnego czasu pracy oraz oszacowanie efektywności pracy podczas pozyskiwania drewna przy pomocy harwesterów w drzewostanach poddanych trzebieżom wczesnym. W badaniach porównano dwa warianty (technologie) wykonywania prac:

- operacje ścinki i obalania drzew rosnących poza zasięgiem żurawia harwesterów, wykonywane przez pilarza wyposażonego w pilarkę spalinową, a pozostałych drzew wykonywane przez operatora harwesterów, który realizował również okrzesywanie i przerzynkę wszystkich pozyskanych drzew (w dalszej części pracy przedstawiany jako wariant P+H) oraz
  - operacje ścinki i obalania, okrzesywania i przerzynki wykonywane przez operatora harwesterów (wariant H). Realizację celu badań oparto na analizie różnic w strukturze operacyjnego czasu pracy operatora harwesterów oraz różnic efektywności pracy wyrażonej czasochłonnością w obu wariantach technologii. Postawiono następujące hipotezy badawcze:
  - operacyjne czasy pracy w obu technologiach oraz składające się na nie czasy poszczególnych czynności są istotnie różne,
  - efektywność pracy operatora harwesterów wyrażona wydajnością i czasochłonnością w operacyjnym czasie pracy różni się istotnie w zależności od zastosowanej technologii pracy,
- Ponadto w oparciu o zgromadzone dane podjęto próbę wskazania zależności między miąższością grubizny pozyskanych i obrobionych drzew a efektywnością pracy operatora harwesterów w obu wariantach technologii.



**Rycina 1. Lokalizacja badań na tle podziału administracyjnego PGL LP (a – oznaczono strzałką) (źródło: [www.bdl.lasy.gov.pl](http://www.bdl.lasy.gov.pl)) oraz wygląd fragmentów drzewostanów, w których przeprowadzono badania w wariantcie P+H (b) i wariantcie H (c) fot. B. Brzoza]**  
**Figure 1. Study area in relation to the administrative division of PGL LP (a – marked with arrow) (source: [www.bdl.lasy.gov.pl](http://www.bdl.lasy.gov.pl)) and the appearance of stand sections where the study was conducted in the P+H variant (b), and the H variant (c) [photo: B. Brzoza]**

## 2. Teren badań, metodyka

Badania przeprowadzono na terenie Nadleśnictwa Starachowice położonego w obrębie Regionalnej Dyrekcji LP w Radomiu (ryc. 1a) w dwóch drzewostanach sosnowych o zbliżonym wieku, w których przeprowadzono trzebieże wczesne. Oba drzewostany zostały wcześniej udostępnione siecią szlaków operacyjnych w odstępach około 20 m, zgodnie z obowiązującymi wytycznymi, opisanymi w Zasadach Użytkowania Lasu (2019).

W tabeli 1 przedstawiono podstawowe cechy taksacyjne drzewostanów poddanych cięciom pielęgnacyjnym oraz uproszczone schematy postępowania w obu wariantach.

Pozyskanie drewna w ramach wariantu P+H zostało przeprowadzone w drzewostanie rosnącym na terenie pokrytym głębokimi (40–60 cm) rowami, powstałymi na etapie przygotowywania gleby do odnowienia za pomocą rabatów. W takich warunkach nie było możliwości zjeżdżania w głąb drzewo-

stanu ze szlaków operacyjnych zlokalizowanych równoległe do rzędów drzew (ryc. 1b). Natomiast w ramach wariantu H drewno pozyskiwano w drzewostanie bez nierówności terenowych.

Ze względu na parametry techniczne zastosowanej maszyny, w tym wariantcie pracy istniała konieczność zjeżdżania ze szlaków operacyjnych w głąb drzewostanu (ryc. 1c).

W wariantcie P+H ścinę drzew rosnących poza zasięgiem żurawia hydraulicznego w harwesterze, w kierunku najbliższego szlaku, wykonywał pilarz przy pomocy pilarki spalinowej Husqvarna 445, przed rozpoczęciem pracy harwestera. Taki sposób postępowania umożliwił jednokrotny przejazd maszyny po szlakach operacyjnych, analogicznie jak w wariantcie H. W obu wariantach technologii zastosowano lekki harwester trzebieżowy John Deere 770D (ryc. 2) z głowicą H412 o maksymalnej średnicy cięcia 47 cm i masie własnej 760 kg, zamontowaną na żurawiu hydraulicznym o nominalnym wysięgu 7,9 m. Ze względu na całkowitą szerokość maszyny zastosowanej w badaniach (2,45 m), użyteczny zasięg żurawia

**Tabela 1. Wybrane cechy drzewostanów, w których przeprowadzono cięcia ze schematami postępowania**

Table 1. Selected characteristics of tree stands where logging has been carried out with treatment patterns

Cecha Characteristic	Jednostka Unit	Wariant Variant	
		P+H (chainsaw+harvester)	H (harvester)
<b>Powierzchnia</b> Area	[ha]	5,41	12,28
<b>Skład gatunkowy</b> Tree species composition		10 So	10 So
<b>Typ siedliskowy lasu - TSL</b> Forest site type		LMw	Bśw
<b>Wiek</b> Age	[lata] [years]	41	37
<b>Zadrzewienie</b> Tree cover index		1,1	0,9
<b>Pierśnica</b> DBH	[cm]	19	16
<b>Wysokość</b> Height	[m]	19	15
<b>Bonitacja</b> Site index		Ia	I
<b>Zasobność</b> GSV - growing stock volume	[m <sup>3</sup> ×ha <sup>-1</sup> ]	324	209
<b>Grubizna drzewa</b> Merchantable timber per tree	[m <sup>3</sup> ]	0,249	0,234



**Rycina 2. Harwester John Deere 770 z głowicą H412 na szlaku operacyjnym w wariantcie H [fot. B. Brzoza]**

Figure 2. Harvester John Deere 770 with H412 head at the skid trail in the H variant [photo: B. Brzoza]

wynosił nieco ponad 6,6 m, a po zamontowaniu głowicy przekraczał nieznacznie 6,0 m. Pozyskane drewno średniowymiarowe w postaci kłód i wałków zerwane zostało na składnicy przy użyciu ciągnika z przyczepą leśną (wariant P+H) i lekkiego forwardera (wariant H).

Operator harwestera posiadał trzyletnie doświadczenie na tym stanowisku pracy, a pilarz współpracujący z operatorem maszyny pracował przy pozyskiwaniu drewna od ponad 15 lat.

Prace terenowe obejmowały pomiar czasu trwania poszczególnych czynności realizowanych zarówno przez operatora harwestera, jak i pilarza. W ramach każdego wariantu pozyskania wykonano pomiary operacyjnego czasu pracy podczas pozyskania 200 drzew (ścinki i operacji obróbczych w wariantcie H oraz dociągania i operacji obróbczych w wariantcie P+H). W wariantcie H czas pracy był mierzony za pomocą stopera zainstalowanego w systemie harwestera z dokładnością 0,01 sekundy. Miąższość manipulowanych kłód i wałków była określana przez zintegrowany system pomiarowy (czujniki zamontowane w głowicy). Informacja o miąższości każdego kawałka drewna pojawiała się na monitorze komputera pokładowego. Miąższość kłód stanowiła sumę miąższości sekcji o długości 1 cm. Średnica mierzona była z dokładnością 1 mm. Miąższość całkowita kłód i wałków obliczana była z dokładnością 0,0001 m<sup>3</sup>. W wariantcie P+H czas czynności realizowanych przez pilarza mierzony był z dokładnością 1 sekundy przy użyciu aplikacji TIMING 1.1 zainstalowanej w rejestratorze PSION Workabout MX (Stańczykiewicz 2020). Uzyskane w ten sposób dane wykorzystano do obliczenia czasochłonności pozyskania w całym wariantcie P+H (z uwzględnieniem pracy obu operatorów). W tym celu każde drzewo ścięte i obalone przez pilarza numerowano farbą na powierzchni rządu w odziomku. W ten sposób możliwe było przyporządkowanie czasu pracy pilarza przy każdym drzewie do miąższości grubizny, którą odczytano z raportów wygenerowanych przez system opera-

cyjny harwestera. Zmierzone czasy każdego cyklu pracy pilarza oraz odczytane miąższości grubizny z pozyskanych pilażek drzew wykorzystano do obliczenia czasochłonności pracy na tym stanowisku, a po uwzględnieniu czasochłonności pracy operatora harwestera, do obliczenia czasochłonności pracy w całym wariantcie P+H.

Wyróżniono następujące czynności składające się na cykl pracy maszyny przy jednym drzewie w czasie operacyjnym, oznaczanym w dalszej części opracowania symbolem  $T_H$ . Był to czas od rozpoczęcia ścinki (wariant z pozyskaniem harwesterem – H) lub od rozpoczęcia dociągania obalonego drzewa (wariant ze ścinką przy pomocy pilarki – P+H) do momentu zakończenia wyrabiania sortymentów i czas przemieszczania maszyny do następnego drzewa:

$T_s$  – ścinka i obalanie drzewa - czas od momentu przyłożenia głowicy ścinkowej do pnia drzewa do momentu jego obalenia (wariant z pozyskaniem wyłącznie harwesterem - H).

W wariantcie P+H czas  $T_s$  mierzono od momentu rozpoczęcia rządu podcinającego przez pilarza do momentu obalenia drzewa na grunt. W ramach  $T_s$  uwzględniano również czas zrzucania niektórych drzew zawieszonych,

$T_d$  – dociąganie drzew do szlaku operacyjnego – czas od momentu obalenia drzewa do momentu rozpoczęcia wyrabiania sortymentów i czas przemieszczania maszyny do następnego drzewa. W wariantcie P+H w ramach tej czynności uwzględniano również przeciąganie drzew obalonych przez pilarza wierzchołkami w stronę szlaków operacyjnych, w celu rozpoczęcia wyrabiania sortymentów od odziomków,

$T_w$  – wyrabianie sortymentów – czas od zakończenia dociągania drzewa do szlaku operacyjnego lub przeciągania za wierzchołek, przez okrzesywanie i przerzynkę sortymentów, do momentu odcięcia wierzchołków obrabianych drzew.

Wszystkie wymagane analizy statystyczne (testowanie normalności rozkładów zmiennych losowych, testowanie istotności różnic czasów pracy oraz miar efektywności pracy operatora harwestera i pilarza) przeprowadzono przy pomocy pakietu Statistica 13.3 PL, na poziomie istotności  $\alpha=0,05$ .

### 3. Wyniki

#### Struktura czasu pracy operatora harwestera

W strukturze operacyjnego czasu pracy dominował czas dociągania ściętych drzew do szlaków operacyjnych – zarówno w wariantcie ze ścinką pilarką (P+H), jak i w wariantcie ze ścinką harwesterem (H) (tab. 2).

W tabeli 3 zamieszczono statystyki opisowe analizowanych zmiennych. Przedstawione wartości minimalne i maksymalne wskazują na 9–10 razy dłuższy czas ścinki i obalenia drzew ( $T_s$ ) przez pilarza w wariantcie P+H. W przypadku czasu dociągania ( $T_d$ ) był on od 1,1 do 2,8 razy dłuższy w wariantcie H. Jedynie w przypadku czasu okrzesywania i przerzynki ( $T_w$ ) zaobserwowano niemal jednakowe warto-

ści w obu wariantach pracy.

Uzyskane na podstawie testów statystycznych wyniki pozwoliły na stwierdzenie, że zaobserwowane różnice całkowitego operacyjnego czasu pracy maszyny ( $T_H$ ) oraz czasów ścińki ( $T_s$ ) i dociągnięcia ściętych drzew ( $T_d$ ) były istotne statystycznie – odpowiednio dla  $T_H$   $Z=-14,851$ ;  $p<0,000$ , dla  $T_s$   $Z=16,363$ ;  $p<0,000$ , a dla  $T_d$   $Z=-13,193$ ;  $p<0,000$ . W przypadku czasów wyrabiania sortymentów ( $T_w$ ) przy szlakach operacyjnych nie stwierdzono istotnych różnic przy

$Z=0,546$ ;  $p<0,585$  (tabela 3).

Zaprezentowany w tabeli 3, w ramach wariantu P+H, czas cyklu pracy  $T_H$  nie obejmuje czasu ścińki i obalania  $T_s$  wykonywanej przez pilarza. Jednak należy pamiętać, że aby scharakteryzować czasochłonność całego procesu w tym wariantcie należy uwzględnić również pracę pilarza.

Analizując wyniki obliczeń zaprezentowane w tabeli 3 należy zaznaczyć, że w wariantcie P+H łączny średni czas cyklu pracy przy jednym drzewie obejmujący czynności wy-

**Tabela 2. Struktura operacyjnego czasu pracy operatora harwestera w obu wariantach [%]**

Table 2. Structure of productive work time for the harvester operator in both variants [%]

Czynności Activity	Skrót Abbreviation	Wariant Variant	
		P+H (chainsaw+harvester)	H (harvester)
Ścinka i obalanie Felling	$T_s$	b.d. (no data)	6
Dociągnięcie Moving to skid trail	$T_d$	62	67
Wyróbka Processing	$T_w$	38	27
Łącznie w cyklu Total for the cycle	$T_H$	100	100

**Tabela 3. Statystyki operacyjnego czasu pracy harwestera  $T_H$  oraz jego składowych  $T_s$ ,  $T_d$ ,  $T_w$  uzupełnione o dane z pomiarów czasu ścińki i obalania wykonywanych przez pilarza [s]**

Table 3. Statistics of the harvester productive work time  $T_H$  and its components  $T_s$ ,  $T_d$ ,  $T_w$  supplemented with data on felling time performed by the chainsaw operator [s]

Czynność Activity	Wariant Variant	Średnia Mean	Mediana Median	Mini- mum Minimum	Maksi- mum Maximum	Wariancja Variance	Odchyl. stand. SD	Wsp. zmienn. [%] Coefficient of variation
Ścinka i obalanie $T_s$ Felling [s]	P+H pilarz (chainsaw operator)	24,9	23,5 <sup>a</sup>	17,0	41,0	36,7	6,1	24,3
Dociągnięcie $T_d$ Moving to skid trail [s]		21,2	19,4 <sup>a</sup>	8,0	39,9	52,2	7,2	34,0
Wyróbka $T_w$ Processing [s]	P+H harvester (harvester)	13,3	13,2 <sup>a</sup>	11,1	15,4	1,6	1,3	9,6
Cykl pracy $T_H$ Working cycle [s]		34,5	32,2 <sup>a</sup>	23,0	53,0	51,7	7,2	20,8
Ścinka i obalanie $T_s$ Felling [s]		3,1	3,1 <sup>b</sup>	1,9	4,2	0,5	0,7	22,1
Dociągnięcie $T_d$ Moving to skid trail [s]	H (harvester)	32,5	32,4 <sup>b</sup>	22,6	42,9	25,2	5,0	15,4
Wyróbka $T_w$ Processing [s]		13,2	13,2 <sup>a</sup>	11,5	14,8	0,9	0,9	7,2
Cykl pracy $T_H$ Work cycle [s]		48,8	48,5 <sup>b</sup>	39,0	58,4	24,0	4,9	10,0

<sup>aa</sup> - różnice nieistotne statystycznie (kolor biały) / statistically insignificant differences (white);

<sup>ab</sup> - różnice istotne statystycznie (kolor szary) / statistically significant differences (grey)

konywane przez pilarza i operatora harwestera ( $T_s+T_H$ ) wyniósł niemal 1 minutę (59,4 sekundy). Przeprowadzony test istotności różnic łącznego czasu pracy obu operatorów wskazał na istotnie czas pracy przy jednym drzewie w wariancie P+H ( $Z=12,337$ ;  $p<0,000$  – przy medianie 60,4 sekundy) w porównaniu do wariantu H.

### Wydajność pracy operatora harwestera

Wyniki przeprowadzonych analiz wydajności pracy operatora harwestera w obu wariantach wskazują na istotnie wyższą operacyjną wydajność pracy  $T_H$  w wariancie P+H ( $Z=10,516$ ;  $p<0,000$ ). Była ona o 52,6% wyższa w porównaniu do wydajności w wariancie H (tab. 4).

### Czasochłonność pracy operatora harwestera

Z kolei wyniki przeprowadzonych analiz czasochłonności pracy operatora harwestera w obu wariantach wskazują na istotnie niższą operacyjną czasochłonność pracy  $T_H$  w wariancie P+H ( $Z=-10,516$ ;  $p<0,000$ ). Była ona o 40,9% niższa w porównaniu do czasochłonności w wariancie H (tab. 5).

### Miąższość grubizny pozyskanych drzew a efektywność pracy operatora harwestera

W obu wariantach technologii pracy operatora harwestera potwierdzono zależność wydajności pracy oraz czasochłon-

ności od miąższości grubizny pozyskanego i wyrobionego surowca. Oszacowane modele potęgowe można uznać za pozytywnie zweryfikowane i są one istotne (ryc. 3a-d). Zakładając przeciętną miąższość grubizny drzew w przedziale od 0,10 do 0,25  $m^3$  pozyskiwanych z drzewostanów sosnowych I bonitacji w wieku 37–41 lat przeznaczonych do trzebieży wczesnych, można oszacować wydajność harwestera w wariancie P+H w przedziale 13,5–26,0  $m^3 \times h^{-1}$ , a w wariancie H w przedziale 8,0–18,0  $m^3 \times h^{-1}$ . Zatem różnica w tym parametrze efektywności może sięgać od 30% do 41% (ryc. 3a, c). Natomiast w przypadku czasochłonności można oczekiwać wartości 4,0–2,3  $min \times m^{-3}$  w wariancie P+H oraz 7,4–3,3  $min \times m^{-3}$  w wariancie H. Tym samym różnica między czasochłonnością pracy operatora harwestera może zawierać się w przedziale od 45 do nawet 85% (ryc. 3b, d).

## 4. Dyskusja i podsumowanie

### Struktura czasu pracy operatora harwestera

Analiza danych zawartych w tabeli 3, pozwoliła zauważyć, że w przypadku całych cykli pracy T w wariancie P+H w ciągu minuty pozyskano i obrobiono przeciętnie 1,7 drzewa, natomiast w wariancie H 1,2 drzewa w tym samym czasie. Jak podaje Mederski (2006), w drzewostanie sosnowym IIIa klasy wieku liczba pozyskanych i obrobionych drzew wyniosła w wariantach pozyskania z tzw. międzypolem (odpowiednik wariantu P+H w niniejszych badaniach) i bez niego (odpowiednik wariantu H) przeciętnie 2,5 drzewa

**Tabela 4. Statystyki wydajności pracy operatora harwestera w czasie operacyjnym [ $m^3 \times h^{-1}$ ]**

Table 4. Statistics of the work efficiency of the harvester operator during productive work time [ $m^3 \times h^{-1}$ ]

Wariant Variant	Średnia Mean	Mediana Median	Minimum Minimum	Maksimum Maximum	Wariancja Variance	Odchyl. stand. SD	Wsp. zmienn. [%] Coefficient of variation
P+H (chainsaw+harvester)	25,69	25,90 <sup>a</sup>	7,32	61,74	60,62	7,79	30,3
H (harvester)	16,83	16,22 <sup>b</sup>	1,54	34,12	45,40	6,74	40,0

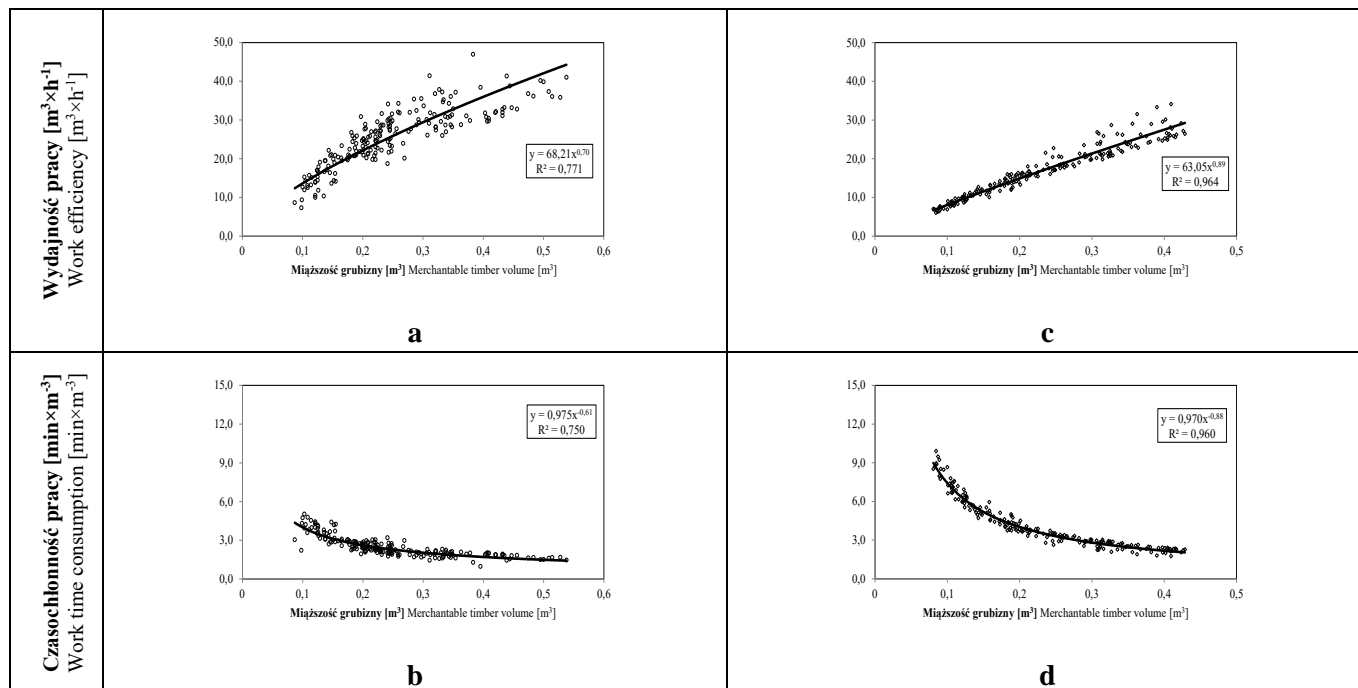
<sup>ab</sup> - różnice istotne statystycznie / statistically significant differences

**Tabela 5. Statystyki czasochłonności pracy operatora harwestera w czasie operacyjnym [ $min \times m^{-3}$ ]**

Table 5. Statistics of the work time consumption of the harvester operator during productive work time [ $min \times m^{-3}$ ]

Wariant Variant	Średnia Mean	Mediana Median	Minimum Minimum	Maksimum Maximum	Wariancja Variance	Odchyl. stand. SD	Wsp. zmienn. [%] Coefficient of variation
P+H (chainsaw+harvester)	2,6	2,3 <sup>a</sup>	1,0	8,2	1,1	1,0	39,9
H (harvester)	4,4	3,7 <sup>b</sup>	1,8	38,9	9,6	3,1	70,4

<sup>ab</sup> - różnice istotne statystycznie / statistically significant differences



a, b – wariant P+H (chainsaw+harvester variant)

c, d – wariant H (harvester variant)

**Ryc. 3. Efektywność pozyskiwania drewna harvesterem w zależności od miąższości grubizny pozyskanych drzew**

Fig. 3. Efficiency of timber harvesting with harvester in relation to the merchantable timber volume of the felled trees

na minutę, zatem od półtora do dwóch razy więcej, niż w opisanych tutaj badaniach. Bardziej zbliżone wyniki otrzymali Mederski i in. (2018) po badaniach w drzewostanie z przewagą sosny IIa klasy wieku. W przypadku wariantu pracy ze ścinką pilarką i wyróbką harvesterem, operator maszyny w ciągu minuty obrabiał przeciętnie 1,1 drzewa, podczas gdy w wariantcie pracy wyłącznie harvesterem 1,25 drzewa na minutę. Tym samym czasy trwania całych cykli pracy w przytoczonych badaniach w wariantcie z pilarką (odpowiednik wariantu P+H w niniejszych badaniach) były około 10% dłuższe niż w wariantcie pracy wyłącznie harvesterem. Z kolei w niniejszych badaniach czasy trwania całych cykli pracy T w wariantcie P+H były niemal 30% krótsze niż w wariantcie ze ścinką harvesterem. Analogiczna sytuacja dotyczyła czasu dociągania ściętych drzew Td na szlaki operacyjne. W wariantcie ze ścinką pilarką był on około 35% krótszy niż czas tej czynności w przypadku konieczności zjeżdżania harvesterem ze szlaków i powrotu na szlaki ze ściętymi drzewami. Część tej różnicy mogła wynikać również z konieczności przemieszczania niektórych drzew (obalonych wierzchołkami w kierunku szlaków), na przeciwną stronę szlaków, celem rozpoczęcia okrzesywania i przerzynki od odziomka. Gdyby wszystkie drzewa obalone przez pilarkę skierowane były odziomkami w stronę pracującej maszyny, różnica mogłaby być jeszcze większa. Dłuższy czas dociągania ściętych drzew do szlaków w wariantcie H wynikał prawdopodobnie z konieczności zdecydowanie ostrożniejszego postępowania operatora i wolnego wycofywania maszyny na szlak z uchwyconymi drzewami w głowi-

cy harvesterowej. Z kolei czas ścinki i obalania drzew w wariantcie P+H wykonywanej pilarką spalinową był ośmiokrotnie dłuższy od tego czasu w wariantcie pracy wyłącznie harvesterem. Jest to oczywiście sytuacja zupełnie normalna, a czasy ścinki zmierzone w niniejszych badaniach nie odbiegały od czasów pomierzonych przez Lazdiņa i in. (2016). Jedynie w przypadku czasu wyróbki drewna Tw na szlakach operacyjnych w obu wariantach technologii był on niemal jednakowy, a udział tego czasu pracy w wariantcie H był porównywalny do opisanego w badaniach Kärhä i in. (2004), w których stanowił 29–37% łącznego czasu pracy.

### Efektywność pracy

W technologii ze ścinką pilarką i obalaniem drzew przez pilarkę (bez konieczności zjeżdżania harwestera ze szlaku operacyjnego) osiągnięta została istotnie wyższa (o ponad 52%) wydajność pracy harwestera w porównaniu do technologii ze ścinką i obalaniem wyłącznie harvesterem (konieczność zjeżdżania maszyny w głąb drzewostanu).

Podobną tendencję zaobserwowano przy pozyskaniu drewna w nieco starszym drzewostanie sosnowym III klasy wieku, w którym zastosowano ten sam model harwestera (Mederski 2006). Różnica wyniosła 28%, jednak przy zdecydowanie mniejszej efektywności. Operator harwestera osiągnął przeciętną wydajność w wariantcie z tzw. międzypolem (ścinka i obalanie przez pilarkę) na poziomie  $5,87 \text{ m}^3 \times \text{h}^{-1}$ , podczas gdy w wariantcie pracy wyłącznie harvesterem  $4,57 \text{ m}^3 \times \text{h}^{-1}$ . Z kolei w innych badaniach przeprowadzonych w 31-

letnim drzewostanie z przewagą sosny (Mederski et al. 2018) wydajność pracy operatora małego harwestera trzebieżowego wyniosła  $4,42 \text{ m}^3 \times \text{h}^{-1}$  w wariantcie z tzw. międzypolem i ścinką pilarką przy 20 metrowych odstępach między szlakami operacyjnymi, a w wariantcie bez współpracy z pilarzem, przy 10 metrowych odstępach  $4,67 \text{ m}^3 \times \text{h}^{-1}$ , czyli o niemal 5,5% mniej przy pracy wyłącznie harwesterem.

Różnica wydajności operatora harwestera w obu wariantach technologii opisanych w niniejszym opracowaniu, byłaby prawdopodobnie jeszcze większa, gdyby więcej drzew obalonych przez pilarza (wariant P+H) skierowane było odziomkami w stronę szlaku operacyjnego, na którym pracował harwester. Jednak w praktyce sytuacja taka jest trudna do osiągnięcia i dlatego operator harwestera jest zmuszony przemieszczać uchwycone za wierzchołek drzewa na przeciwną stronę szlaków operacyjnych, aby rozpocząć okrzesywanie i wyróbkę drewna od odziomków. Należy ponadto pamiętać, że na obliczoną różnicę miała zapewne wpływ większa przeciętna miąższość grubizny pozyskanych drzew (około 6,5%) w drzewostanie, w którym operator harwestera współpracował z pilarzem (tab. 1). Ponadto rozpoczęcie wyróbki obalonych przez pilarza drzew (w wariantcie P+H), po ich dociągnięciu na szlak operacyjny, nie wymagało od operatora harwestera tak czasochłonnego manewrowania nimi jak w przypadku wariantu H, w którym operator musiał uważnie wycofywać maszynę na szlak operacyjny, aby rozpocząć okrzesywanie i przerzynkę drewna. Ten fakt również mógł mieć wpływ na osiągniętą niższą efektywność pracy przez operatora harwestera w wariantcie H.

Z kolei czasochłonność pracy operatora maszyny w bardziej wydajnym wariantcie P+H była istotnie niższa o prawie 41%. Należy jednak pamiętać, że aby oszacować czasochłonność całej technologii w tym wariantcie, trzeba uwzględnić dodatkowo czasochłonność ścinki i obalania drzew przez pilarza. Wyniki dotychczas przeprowadzonych szerszych badań czasochłonności pracy pilarzy tylko przy ścinie i obalaniu drzew w bardzo podobnych drzewostanach sosnowych II klasy wieku (Sowa et al. 2018a) wskazują, że może ona osiągać wartości od  $3,2$  do  $4,4 \text{ min} \times \text{m}^{-3}$ . Zatem rzeczywista czasochłonność pracy obu operatorów w wariantcie P+H może oscylować w granicach od  $5,8$  do  $7,0 \text{ min} \times \text{m}^{-3}$ . Tym samym może być wyższa o odpowiednio 32 do 59% od czasochłonności w wariantcie H, jednocześnie wpływając na koszty jednostkowe pozyskania drewna. Jak podają Mederski i in. (2018), w przypadku technologii z tzw. międzypolem koszty jednostkowe mogą być wyższe o około 12% od kosztów pozyskania w technologii pracy wyłącznie harwesterem, bez międzypola.

Przeprowadzone badania i obserwacje terenowe umożliwiły sformułowanie kilku wniosków, które z praktycznego punktu widzenia mogą być przydatne w przypadku stosowania harwesterów w drzewostanach przede wszystkim II klasy wieku:

- w trzebieżowych drzewostanach młodszych klas wieku

należy wykorzystywać maszyny optymalnie dostosowane gabarytami oraz masą do ich fazy rozwojowej. Z uwagi na duże zagęszczenie drzew w drzewostanach przeznaczonych do pierwszej trzebieży, optymalnym rozwiązaniem jest stosowanie środków technicznych o jak najmniejszej szerokości. Wiąże się to ze stosowaniem harwesterów zaliczanych do grupy małych oraz forwaderów maksymalnie z klasy średnich. Do zrywki drewna należy również zalecać wykorzystanie przyczep leśnych o podobnej ładowności,

- zastosowanie małych harwesterów wiąże się często z wykorzystaniem do pracy żurawi hydraulicznych o krótkim użytecznym wysięgu. Taka sytuacja utrudnia optymalne wykorzystanie tych maszyn ze względu na odległości między szlakami operacyjnymi, które powinny wynosić około 20 m. W takim przypadku należy liczyć się z koniecznością zjeżdżania harwesterami ze szlaków operacyjnych w głąb drzewostanu. Jeżeli do pozyskiwania zostaną wykorzystane harwestery z krótszymi żurawiami, odległość, na którą operatorzy tych maszyn będą zmuszeni zjeżdżać ze szlaków, nie powinna przekroczyć 4 m,
- z punktu widzenia ograniczania uszkodzeń gleby i pozostających w drzewostanie drzew, wycofanie maszyny z powrotem po tym samym śladzie, pozwala skutecznie ograniczać prawdopodobieństwo wystąpienia uszkodzeń na drzewach oraz powierzchnię uszkodzeń wierzchnich warstw gleby,
- w przypadku konieczności wykorzystania małych harwesterów z żurawiami o krótkim użytecznym wysięgu, współpracujących z pilarzami, przy pozyskaniu drzew pilarką z fragmentów drzewostanu poza zasięgiem żurawi hydraulicznych, należy dążyć, w miarę możliwości, do obalania drzew w takim kierunku, aby ograniczać konieczność przeciągania obalonych drzew celem rozpoczęcia wyróbki od odziomka. Taki sposób postępowania jest szczególnie ważny podczas pierwszej trzebieży wczesnej, kiedy w drzewostanie występuje jeszcze duże zwarcie i obalenie ściętych drzew często wymaga ręcznego odciągania odziomków od pniaków. Niebagatelną rolę odgrywa w takim przypadku doświadczenie i orientacja przestrzenna pilarza, który powinien mieć zdolność takiego prowadzenia pracy, aby do minimum ograniczać obciążenia fizyczne związane z ręcznym obalaniem drzew, bardzo często zawieszonych w gęstych drzewostanach II klasy wieku,
- zastosowanie wariantu technologii z tzw. międzypolem, na którym drzewa są pozyskiwane pilarką przed rozpoczęciem pracy przez harwester, związane jest z jednokrotnym przejazdem maszyny po szlakach operacyjnych. Taka kolejność pracy na pewno skraca czas pozyskania na powierzchni cięć i eliminuje konieczność dwukrotnego przejazdu harwestera. W przypadku, gdyby pilarz zaczął pracę na międzypolu dopiero po wycięciu szlaków operacyjnych i pozyskaniu drzew rosnących w zasięgu żurawia



maszyny, należy liczyć się z większą czasochłonnością pracy, większymi kosztami jednostkowymi pozyskania drewna oraz dodatkowymi zaburzeniami w wierzchnich warstwach gleby na szlakach operacyjnych i dotkliwymi uszkodzeniami systemów korzeniowych drzew rosnących w bezpośrednim sąsiedztwie szlaków.

## Literatura

- Athanassiadis D. 1997. Residual stand damage following cut-to-length harvesting operations with a farm tractor in two conifer stands. *Silva Fennica* 31: 461–467.
- Belbo H. 2010. Comparison of two working methods for small tree harvesting with a multi tree felling head mounted on farm tractor. *Silva Fennica* 44(3): 453–464.
- Bergström D., Bergsten U., Nordfjell T., Lundmark T. 2007. Simulation of geometric thinning systems and their time requirements for young forests. *Silva Fennica* 41(1): 137–147.
- Bodył M. 2022. Rozmiar pozyskania maszynowego w Polsce. *Drwal* 4(203): 24–28.
- Dvořák J., Bystrický R., Hošková P., Hrib M., Jarkovská M., Kováč J., Krílek J., Natov P., Natová L. 2011. The use of harvester technology in production forests. *Folia Forestalia Bohemica, Kostelec nad Černými Lesy*, s. 156. ISBN 978-80-7458-018-5.
- Eliasson L. 1999. Simulation of thinning with a single-grip harvester. *Forest Science* 45(1): 26–34.
- Grodecki J. 1988. Analiza pracochłonności pozyskiwania drewna z wczesnych trzebieży drzewostanów sosnowych. *Prace Komisji Nauk Rolniczych i Komisji Nauk Leśnych, Poznańskie Towarzystwo Przyjaciół Nauk* 66: 23–29.
- GUS 2020. Leśnictwo - Rocznik statystyczny. Warszawa.
- Holzleitner F., Langmaier M., Hochbichler E., Obermayer B., Stampfer K., Kanzian Ch. 2019. Effect of prior tree marking, thinning method and topping diameter on harvester performance in a first thinning operation – a field experiment. *Silva Fennica* (53)3: 1–22. DOI 10.14214/sf.10178.
- Johansson J. 1996. Case studies on farm tractors as base machines for single-grip thinning harvester heads. *Forestry: An International Journal of Forest Research* 69(3): 229–244.
- Johansson J. 1997. Small tree harvesting with a farm tractor and crane attached to the front. *Journal of Forest Engineering* 8(1): 21–33.
- Kärhå K., Rönkkö E., Gumse S. 2004. Productivity and cutting costs of thinning harvesters. *International Journal of Forest Engineering* 2: 43–56.
- Kormanek M., Baj D. 2018. Analysis of operation performance in the process of machine wood harvesting with Fao-Far 6840 mini-harvester. *Agricultural Engineering* 22(1): 73–82.
- Kulak D., Leszczyński K., Stańczykiewicz A., Szewczyk G. 2016. An impact of opening a forest stand with skidding trails on the disturbance to outer soil layers caused by mechanized timber harvesting. *Forestry Letters* 109: 39–46.
- Lazdiņš A., Prindulis U., Kalēja S., Daugaviete M., Zimelis A. 2016. Productivity of Vimek 404 T5 harvester and Vimek 610 forwarder in early thinning. *Agronomy Research* 14(2): 475–484.
- Leszczyński K., Stańczykiewicz A., Sowa J.M. 2012. Poziom obciążenie pracą robotników przy pozyskaniu drewna z wykorzystaniem procesorów agregowanych z ciągnikami rolniczymi w trzebieżach drzewostanów sosnowych. *Nauka Przyroda Technologie* 6, 3, #50.
- Leszczyński K., Stańczykiewicz A. 2015. Workload analysis in logging technology employing a processor aggregated with a farm tractor. *Forest Systems* 24(2): e024. DOI: 10.5424/fs/2015242-06607.
- Leszczyński K., Stańczykiewicz A., Kulak D., Szewczyk G., Tylek P. 2021. Estimation of productivity and costs of using a track mini-harvester with a stroke head for the first commercial thinning of a Scots pine stand. *Forests* 12(7), 870. DOI: 10.3390/f12070870.
- Mederski P.S. 2006. A comparison of harvesting productivity and costs in thinning operations with and without midfield. *Forest Ecology and Management* 224: 286–296. DOI: 10.1016/j.foreco.2005.12.042.
- Mederski P.S., Karaszewski Z., Rosińska M., Bembek M. 2016. Dynamika zmian liczby harwesterów w Polsce oraz czynniki determinujące ich występowanie. *Sylvan* 160(10): 795–804. DOI: 10.26202/sylvan.2016030.
- Mederski P.S., Venanzi R., Bembek M., Karaszewski Z., Rosińska M., Pilarek Z., Luchenti I., Surus M. 2018. Designing thinning operations in 2<sup>nd</sup> age class pine stands — economic and environmental implications. *Forests* 9, 335. DOI: 10.3390/f9060335.
- Russell F., Mortimer D. 2005. A review of small-scale harvesting systems in use worldwide and their potential application in Irish forestry. COFORD, Dublin, 56 s. ISBN 1 902696 45 X.
- Sowa J.M., Kulak D., Szewczyk G. 2007. Costs and efficiency of timber harvesting by NIAB 5–15 processor mounted on a farm tractor. *Croatian Journal of Forest Engineering* 28(2): 177–184.
- Sowa J.M., Szewczyk G., Kulak D., Stańczykiewicz A. 2018a. Cybernetyczne zasady prowadzenia cięć trzebieżowych w drzewostanach sosnowych wprowadzonych na tereny popożarowe. Sprawozdanie końcowe tematu badawczego OR.271.3.6.2016. Kraków, 352 s.
- Sowa J.M., Szewczyk G., Kulak D., Stańczykiewicz A. 2018b. Cybernetyczne zasady prowadzenia cięć trzebieżowych w drzewostanach sosnowych wprowadzonych na tereny popożarowe. Zalecenia wdrożeniowe po realizacji tematu badawczego OR.271.3.6.2016. Kraków, 11 s.
- Stańczykiewicz A. 2020. Zastosowanie rejestratorów w badaniach efektywności technologii pozyskiwania drewna i ich wpływu na środowisko leśne, w: Klamerus-Iwan A. (red.) Nowoczesne technologie i inżynieria w zrównoważonym użytkowaniu lasu. Wydawnictwo Uniwersytetu Rolniczego im. Hugona Kołłątaja w Krakowie: 81–94, ISBN 978-83-66602-04-5.
- Stańczykiewicz A., Kulak D. 2014. Uszkodzenia drzew i odnowienia w wyniku trzebieży wczesnych w wybranych drzewostanach jodlowych. *Studia i Materiały CEPL w Rogowie* 16 (39/2B): 133–142.
- Szewczyk G., Spinelli R., Maganotti N., Tylek P., Sowa J.M., Rudy P., Gaj-Gielarowicz D. 2020. The mental workload of harvester operators working in steep terrain conditions. *Silva Fennica* 54 (3): 1–18. DOI: 10.14214/sf.10355.
- Uusitalo J. 2010. Introduction to forest operations and technology. JVP Forest Systems Oy, Hämeenlinna, 287 s. ISBN 978-95-2925-269-5.
- Więsik J. 2015. Urządzenia techniczne w produkcji leśnej. Tom 2. Maszyny i urządzenia do pozyskiwania i transportu drewna. Wydawnictwo SGGW, Warszawa, 591 s. ISBN 978-83-7583-574-8.
- Wójcik K. 2010. Nowoczesne maszyny i technologie dla leśnictwa. *Technika Rolnicza Ogrodnicza Leśna* 2: 21–25.
- Zarządzenie nr 66 Dyrektora Generalnego Lasów Państwowych z dnia 7 listopada 2019 roku w sprawie wprowadzenia wytycznych pod nazwą „Zasady Użytkowania Lasu” w jednostkach administracyjnych Lasów Państwowych
- Zimelis A., Lazdiņš A., Spalva G. 2017. Comparison of productivity of Vimek harvester in birch plantation and young coniferous stands. *Research for Rural Development* 1: 107–112. DOI: 10.22616/rfd.23.2017.016.

## Konflikt interesów

Autorzy deklarują brak potencjalnych konfliktów.

## Wkład autorów

A.S. – koncepcja badań i struktura artykułu naukowego; A.S., B.B. – gromadzenie danych terenowych, analiza statystyczna; B.B., A.S., G.S. – przegląd literatury; A.S., G.S. – zredagowanie pierwotnej wersji artykułu, A.S., G.S. – weryfikacja wyników i korekta.