



Uniwersytet Rolniczy im. H. Kołłątaja w Krakowie
Wydział Leśny

Damian Kwiatkowski

Nr albumu: 1081

**Analiza wybranych parametrów aktywnej oraz pasywnej
metody okrzesywania jodły pospolitej (*Abies alba* Mill.)
i buka zwyczajnego (*Fagus sylvatica* L.)**

Rozprawa doktorska wykonana w Katedrze Użytkowania Lasu,
Inżynierii i Techniki Leśnej na Wydziale Leśnym
Uniwersytetu Rolniczego im. Hugona Kołłątaja w Krakowie
pod kierunkiem naukowym dr hab. inż. Krzysztofa Słowińskiego, prof. URK

Kraków, kwiecień 2023r.

*Niniejszym składam podziękowanie
Panu dr hab. inż. Krzysztofowi Słowińskiemu, prof. URK,
za opiekę naukową i niezwykle cenne uwagi,
przekazane mi podczas realizacji niniejszej pracy.
Dziękuję także Panu Stanisławowi Pajączek
za pomoc w realizacji prac warsztatowych
i terenowych, Nadleśniczemu Nadleśnictwa Bircza
oraz leśniczemu leśnictw Jasienica i Malawa
za umożliwienie realizacji badań na terenie ich jednostek,
mojej żonie Natalii za wsparcie psychiczne i motywację
do dalszej pracy, a także wszystkim innym,
którzy w jakimkolwiek stopniu przyczynili się
do powstania niniejszej rozprawy.*

Spis treści

Streszczenie pracy doktorskiej.....	5
Abstract of the doctoral thesis.....	6
1. Wstęp.....	7
2. Przegląd literatury.....	8
2.1. Rys historyczny - technologie pozyskania surowca drzewnego	8
2.2. Udział pozyskania maszynowego w rynku drzewnym	12
2.3. Maszyny wielooperacyjne w Polsce.....	14
2.4. Wydajność oraz koszty jednostkowe pracy.....	17
2.5. Wady i zalety maszynowego pozyskania surowca drzewnego	24
2.6. Sieć szlaków zrywkowych	31
2.7. Pozyskanie surowca drzewnego w warunkach podgórskich i górskich.....	31
2.8. Budowa i sposób działania głowicy harwesterowej.....	34
2.9. Dokładność automatycznego pomiaru długości surowca	36
2.10. Maszynowe pozyskanie surowca drzewnego liściastego	37
3. Cel i zakres pracy	48
4. Metodyka badań	48
4.1. Materiały użyte do realizacji badań.....	48
4.1.1. Głowica okrzesująca aktywnie GO-01	48
4.1.2. Głowica okrzesująca pasywnie GO-02	58
4.1.3. Wciągarka linowa o zmiennej prędkości posuwu liny	61
4.1.4. Pozostałe materiały	61
4.2. Miejsce, termin oraz przebieg badań.....	61
4.2.1. Badania wstępne.....	63
4.2.2. Badania zasadnicze	66
4.2.3. Morfologia kłód	67
4.2.4. Statystyczna analiza danych.....	68
5. Wyniki badań oraz ich analiza.....	70
5.1. Badania wstępne.....	70

5.2. Badania zasadnicze	72
5.3. Morfologia kłód	74
5.4. Analiza statystyczna danych	82
6. Wnioski i dyskusja	107
7. Wady i zalety prototypu oraz propozycje ulepszeń	111
8. Literatura	114
Tab. nr 28 - Szczegółowe zestawienie danych, dotyczących zmierzonych na gruncie sęków.....	129

Streszczenie pracy doktorskiej

Pomimo ponad 50-letniej obecności na rynku maszyn wielooperacyjnych typu harwester, zastosowanie ich do obróbki surowca drzewnego liściastego wciąż nie przynosi zadowalających efektów. Silniej rozbudowane korony drzew liściastych oraz odmienne cechy morfologiczne ich pni sprawiają, iż rozwiązania stosowane do obróbki drzew iglastych nie wykazują zakładanej skuteczności przy obróbce drzew liściastych. Ponadto, od kilkunastu lat odnotowuje się stale postępującą redukcję wolumenu siły roboczej, realizującej zadania z zakresu gospodarki leśnej, z uwagi na bardzo duże ryzyko utraty zdrowia i życia ludzkiego oraz niezadowalające warunki płacowe. Wobec powyższego, istnieje realna potrzeba opracowania rozwiązania, umożliwiającego osiągnięcie maksymalnej efektywności obróbki surowca liściastego, przy jednoczesnej minimalizacji zaangażowania potencjału osobowego.

Obecnie na całym świecie prowadzone są intensywne badania nad ulepszeniem istniejących rozwiązań i zaadaptowaniem ich do nowego rodzaju surowca, jednak wciąż opierają się one na metodzie okrzesywania, w której układ tnący pracuje w sposób pasywny. Z kolei autor niniejszej pracy sugeruje zwrócenie większej uwagi na potencjalną możliwość realizacji procesu okrzesywania surowca drzewnego liściastego z wykorzystaniem układów tnących pracujących w sposób aktywny, tj. z użyciem ruchomych elementów tnących. W tym celu opracował prototyp głowicy okrzesującej GO-01, realizującej okrzesywanie w oparciu o zestaw łańcuchów tnących. Podczas realizacji badań autor zbadał optymalne tempo pracy urządzenia, a następnie porównał tempo okrzesywania gatunku liściastego oraz iglastego, z użyciem metody aktywnej oraz pasywnej. W wyniku przeprowadzonych badań autor wykazał, iż, w ściśle określonych warunkach, wydajność procesu okrzesywania surowca liściastego z użyciem stworzonego prototypu jest o zaledwie 2% niższa, niż przy obróbce surowca iglastego, podczas gdy w metodzie pasywnej różnica w wydajności pracy na korzyść surowca iglastego wynosi aż 45%. Ponadto, zmiana metody okrzesywania z pasywnej na aktywną spowodowała wzrost wydajności procesu, zarówno w przypadku surowca liściastego, jak i iglastego.

Słowa kluczowe: harwester, okrzesywanie, drewno liściaste, drewno iglaste.

Abstract of the doctoral thesis

Despite more than 50 years of presence on the market of multi-operational harvester-type machines, their use in the processing of hardwood raw material still does not bring satisfactory results. More developed crowns of deciduous trees and different morphological features of their trunks make the solutions applicable for the treatment of coniferous trees do not show the expected effectiveness in the treatment of deciduous trees. In addition, for several years there has been a steadily progressing reduction in the volume of workforce performing tasks in the field of forest management, due to the very high risk of loss of human health and life and unsatisfactory wage conditions. In view of the above, there is a real need to develop a solution that would allow achieving maximum efficiency of hardwood processing, while minimizing the involvement of human potential.

Currently, intensive research is being carried out around the world to improve existing solutions and adapt them to a new type of raw material, but they are still based on the method of limbing, in which the cutting system works in a passive way. In turn, the author of this paper suggests paying more attention on the potential possibility of carrying out the process of limbing hardwood raw material with the use of active cutting systems, i.e. with the use of movable cutting elements. For this purpose, he developed a prototype of the GO-01 delimiting head, performing delimiting based on a set of cutting chains. During the research, the author examined the optimal rate of operation of the device, and then compared the delimiting rate of deciduous and coniferous species, using the active and passive method. As a result of the conducted research, the author showed that, under strictly defined conditions, the efficiency of the delimiting process with the use of the created prototype is only 2% lower than when processing coniferous raw material, while in the passive method the difference in work efficiency in favor of coniferous raw material is up to 45%. In addition, the change of the method of limbing from passive to active resulted in an increase in the efficiency of the process, both in the case of deciduous and coniferous raw material.

Key words: harvester, delimiting, hardwood, softwood.

1. Wstęp

Pozyskanie surowca drzewnego, jako jeden z elementów użytkowania lasu, towarzyszy ludzkości od zarania dziejów. Wraz z rosnącym zapotrzebowaniem rynkowym na surowiec drzewny, wzrastała także potrzeba zwiększenia efektywności i wydajności pracy w lesie. W odpowiedzi na konieczność minimalizacji ryzyka utraty zdrowia i życia ludzkiego podczas prowadzenia prac w ramach szeroko pojętej gospodarki leśnej, a także wobec rosnącej świadomości społeczeństwa na temat konieczności realizacji prac w sposób zrównoważony i efektywny, minimalizując przy tym negatywny wpływ prowadzonych prac na środowisko, ludzkość opracowała szereg środków technicznych, urządzeń oraz wyspecjalizowanych maszyn, ułatwiających prowadzenie prac z zakresu gospodarki leśnej. Pozyskanie surowca drzewnego przez stulecia ewoluowało od prymitywnych metod z wykorzystaniem toporów, siekier i prostych pił, poprzez ręczne pilarki łańcuchowe w XX wieku, aż do specjalistycznych maszyn wielooperacyjnych, zwanych kombajnami ścińkowymi lub harwesterami, użytkowanych wspólnie. Pomimo wysokiego zaawansowania technologicznego urządzeń oraz maszyn do pozyskania drewna, w dalszym ciągu w obrębie gospodarki leśnej istnieją prace, których po dziś dzień nie udało się skutecznie zmechanizować. Jedną z takich nisz jest pozyskiwanie, a właściwie okrzesywanie surowca drzewnego z drzew gatunków liściastych, których mocno rozbudowane korony stanowią istotny problem dla stosowanych obecnie układów tnących maszyn wielooperacyjnych. Z tego też powodu, maszyny wielooperacyjne są użytkowane w znakomitej większości w drzewostanach iglastych i tylko w marginalnym stopniu w drzewostanach liściastych. Rozwiązaniem tego problemu, a jednocześnie alternatywą dla kontynuacji prac przy pozyskiwaniu drewna liściastego w sposób tradycyjny, z użyciem pilarek ręcznych, jest całkowita zmiana kierunku rozwoju technologii maszynowej, co też autor niniejszej rozprawy sugeruje.

2. Przegląd literatury

2.1. Rys historyczny - technologie pozyskania surowca drzewnego

Już w 1916r. w krajach skandynawskich zaczęto eksperymenty z wykorzystaniem w lesie pilarek łańcuchowych firm Gerber, Sektor czy Arbor. W tym samym czasie w Niemczech rozwijały się na tym polu firmy Dolmar oraz, znany po dziś dzień, Stihl.

W Polsce aż do lat 60. ubiegłego stulecia pozyskanie surowca drzewnego odbywało się niemal wyłącznie z wykorzystaniem siekier oraz pił ręcznych. Pomimo wprowadzenia pierwszych pilarek firmy Sektor do Polski w 1921 r., wykorzystanie tego typu urządzeń na szerszą skalę odnotowano dopiero po zakończeniu II wojny światowej, a dokładnie w drugiej połowie lat 50. XX w. Przy użyciu pilarek spalinowych, pierwotnie dwuosobowych, a następnie jednoosobowych, wykonywano ścinkę, okrzesywanie oraz przerzynkę surowca drzewnego. Surowiec był w ten sposób przygotowywany do procesu zrywki, prowadzonego ówczesnie z wykorzystaniem koni, następnie ciągników rolniczych oraz specjalistycznych ciągników zrywkowych typu skider (Moskalik 2002; Więsik 2008).

W późniejszych latach na rynku pojawiły się ścinarki oraz maszyny ścinkowo-układające. Ich zadaniem było ścinanie drzew oraz układanie ich na ziemi lub zrywka na składnicę, gdzie okrzesywanie oraz przerzynka były dokonywane przez pilarza z użyciem pilarki ręcznej. Pierwsza taka maszyna powstała w 1965r. w Kanadzie (Moskalik, 2002). Podobne urządzenia powstawały w latach 70. także w Polsce: profesor Jerzy Więsik z ówczesnej Katedry Mechanizacji leśnictwa SGGW skonstruował około 90 maszyn tego typu poprzez zamontowanie głowicy nożowej ND-600 do ładowarek czołowych Ł-34, stworzonych we współpracy z Ośrodkiem Badawczo-Rozwojowym Kombinat Huta Stalowa Wola (30 szt.) oraz trzebieżowej głowicy N-5 do ciągników rolniczych (ok. 60 szt.) (Moskalik 2002; Więsik 2008).

Jednocześnie trwały prace nad stworzeniem urządzeń zdolnych do realizacji w sposób zautomatyzowany pozostałych etapów prac pozyskaniowych: czasochłonnego procesu okrzesywania kłód oraz przerzynki (sortymentacji) surowca drzewnego. Jak dowiedli Ciubotaru, Câmpu (2018), w procesie obróbki kłód iglastych (świerkowych i jodłowych), pozyskiwanych na terenie Karpat Rumuńskich, aż 96,18% czasu całkowitego pracy przeznaczają się na okrzesywanie surowca z gałęzi i tylko 3,82% na jego sortymentację.

Na początku lat 70. w Stanach Zjednoczonych oraz w Szwecji opracowano pierwsze maszyny okrzesyjąco-przerzynkowe zwane „procesorami”. Ówczesnie zmechanizowany proces pozyskania surowca drzewnego w Skandynawii opierał się na łańcuchu zbudowanym

z trzech maszyn: ścinkowo-układającej, procesora oraz forwardera zrywkowego. Ostatecznie jednak, prace nad rozwojem procesorów dość szybko porzucono w związku z faktem, iż stanowiły one jedynie ogniwo pośrednie pomiędzy maszynami użytkowymi dotychczas, a tym, co dopiero miało nadejść.

Kluczowym dla efektywności oraz bezpieczeństwa procesu mechanizacji prac pozyskaniowych było opracowanie maszyny zdolnej do wykonywania ścinki, okrzesywania oraz przerzynki surowca w sposób całkowicie zmechanizowany, z wykorzystaniem jednej maszyny oraz przy zaangażowaniu wyłącznie jednego operatora.

Rozwiązaniem w/w problemu było wprowadzenie na rynek maszyny wielooperacyjnej typu „harwester”, zwanej także kombajnem zrębowym. Chociaż pierwszy prototyp tego typu urządzenia powstał w roku 1966 w Stanach Zjednoczonych (Hahn Harvester), to jednak technika harwesterowa najsilniej rozwinęła się w Szwecji oraz w Finlandii po roku 1980, w oparciu o pierwszy prototyp o nazwie Pika 72 z 1972r. W Niemczech natomiast, pierwszy egzemplarz harwestera rozpoczął pracę w 1987r. (Moskalik, 2002).

W przypadku Australii gwałtowny rozwój rynku maszyn do prac w lesie stwierdzono w połowie lat 80. XX wieku, podczas gdy w pobliskiej Nowej Zelandii zauważalny wzrost sprzedaży tego typu maszyn odnotowano dopiero w 1995r.

W Polsce pierwsze harwestery przeznaczone do pracy w lesie zakupiono w 1987r. z inicjatywy Lasów Państwowych. Były to 3 maszyny Lokomo Makeri 34T (harwester czołowy - ryc. 1), które pracowały przy pozyskaniu surowca w drzewostanach trzebieżowych w nadleśnictwach: Pniewy, Międzychód oraz Dretyń. Maszyny jednak dość szybko wycofano z użycia ze względu na ich skłonność do wyrządzania szkód w środowisku oraz wysoką awaryjność.



Ryc. 1. Harvester Lokomo Makeri 34T przy pracy (źródło: <https://www.youtube.com/watch?v=M13srD2lq-s>)

Z czasem na terenie naszego kraju zaczęły stopniowo pojawiać się kolejne maszyny wielooperacyjne znanych i cenionych producentów, m.in. firmy Valmet, nieistniejącej już firmy Timberjack, a także Rottne, Caterpillar, EcoLog, Ponsse czy John Deere. Maszyny te, początkowo wyposażone w głowicę operacyjną zawieszoną sztywno na ramie pojazdu (harwestery czołowe), z czasem wyewoluowały w nowoczesne, skomputeryzowane i zoptymalizowane pod kątem zrównoważonego rozwoju maszyny z głowicą operacyjną zawieszoną na hydraulicznym wysięgniku (harwestery wysięgnikowe), co pozwoliło zwiększyć zasięg ich działania do kilkunastu metrów od miejsca postoju maszyny (Moskalik, 2002).

Rynek maszyn wielooperacyjnych jest już obecnie tak rozwinięty, iż producenci oferują maszyny o parametrach przystosowanych do konkretnych potrzeb drzewostanowych: harwestery o największych mocach dedykowane są drzewostanom rębny, zrębom pełnym oraz uprzątnięciom terenów pokłaskowych. Zwykle są to największe i najcięższe głowice, osadzone na nośnikach 8-kołowych lub gąsienicowych, rzadziej 6-kołowych. Jak zauważają Stańczykiewicz i in. (2011, 2015) oraz Mederski i in. (2018), w ostatnich latach obserwuje się jednak znaczący postęp w zmechanizowanym pozyskaniu surowca drzewnego w młodszych klasach wieku, zarówno z użyciem procesorów, jak i harwesterów.

Maszyny trzebieżowe charakteryzują się zwykle mniejszymi gabarytami, niższą mocą silnika i zazwyczaj 4-kołowym układem jezdny. Dla realizacji najmniej wymagających prac

ścinkowych przy trzebieżach wczesnych, rzadziej późnych, oraz przy pielęgnacji młodników, rynek maszyn wielooperacyjnych wykreował nawet specjalistyczny segment tzw. mini harwesterów. Maszyny te, pomimo niewielkich gabarytów i obniżonych parametrów zastosowanych w nich układów technologicznych, zdolne są do osiągnięcia wydajności pozyskania na poziomie ponad 9,5 m³/godz. (Kormanek, Baj, 2018).

Niektórzy z producentów oferują nawet głowice przeznaczone typowo do pozyskiwania małogabarytowego drewna energetycznego oraz do wykonywania pierwszych cięć pielęgnacyjnych w młodnikach, jak np. głowica Naarva-Grip 1600-40, opracowana przez firmę Pentin Paja Oy. Cechą charakterystyczną takich głowic jest to, iż dolna piła łańcuchowa do ścinki drzew została zastąpiona pojedynczym nożem lub nożycami hydraulicznymi. Erber i in. (2016), badając wydajność podobnej głowicy przy pozyskaniu surowca w młodniku grabowym (maksymalna średnica drzewa - 23 cm) na terenie Gminy Moschendorf we wschodniej Austrii, określili jej produktywność jako „rozsądną”. Co ciekawe, głowica ta umożliwia pozyskiwanie wielu sztuk surowca w tym samym czasie, co w badanym terenie przełożyło się na wzrost wydajności o 5%, w stosunku do pozyskania surowca pojedynczo.

Szczytem osiągnięć technologicznych w zakresie budowy maszyn do prac w lesie było zbudowanie jednostki, która poza pozyskaniem, okrzesaniem oraz przerzynką surowca drzewnego jest także zdolna do jego zrywki na składnice, łącząc tym samym cechy harwestera oraz forwardera. Maszyny takie nazwano harwarderami (ryc. 2):



Ryc. 2. Harwarder Komatsu 801 Combi (źródło: <https://www.youtube.com/watch?v=xnvV-yeyV0g>)

Wykazują one zbliżoną wydajność pracy do zestawów złożonych z harwestera i forwardera (Glazar, Maciejewska 2008). Obecnie, w skali naszego kraju, maszyny te są spotykane sporadycznie, ze względu na znaczne koszty zakupu oraz ograniczoną zwrotność i operacyjność w warunkach terenowych.

2.2. Udział pozyskania maszynowego w rynku drzewnym

Obecnie, w krajach wysokorozwiniętych, udział pozyskania surowca drzewnego z wykorzystaniem harwesterów nierzadko wynosi ponad 90% całkowitego krajowego pozyskania drewna. Z danych zaprezentowanych przez Karjalainena i in. (2001) wynika, iż zmechanizowane pozyskanie surowca drzewnego w Szwecji w 2001r. obejmowało aż 98% całkowitego wolumenu drewna, w Irlandii - 95%, a w Finlandii - 91%).

Z kolei Lundbäck i in. (2021) informują, iż w 2021r. krajami o najwyższym udziale w pełni zmechanizowanych prac przy pozyskaniu oraz zrywce surowca drzewnego są: Irlandia (98%), Norwegia (96%), Finlandia (96%), Szwecja (96%) oraz Wielka Brytania (90%). Co ciekawe, pomimo faktu, iż wymienione wyżej kraje pozyskują surowiec drzewny w sposób niemal całkowicie zmechanizowany, to jednak niskie zaawansowanie

w mechanizacji prac leśnych w pozostałych krajach europejskich sprawia, że uśredniona wartość tego wskaźnika dla Europy wynosi 64%. Dla porównania, w Stanach Zjednoczonych Ameryki Północnej wskaźnik mechanizacji prac leśnych wynosi 85% (przy czym znaczną większość drewna pozyskuje się w systemie dłużycowym - FT/TL), we wschodniej części Kanady - 95%, w zachodniej części Kanady - 85% (podobnie jak w USA - w większości system FT/TL), a w uśrednieniu dla całego kontynentu - 86%. Pozostałymi krajami, mogącymi się pochwalić imponującą wartością w/w wskaźnika, jest Australia (95%) oraz Republika Południowej Afryki - 90%. Co ciekawe, w pozostałych krajach o znacznym wolumenie pozyskiwanego surowca drzewnego, przekraczającym nawet 100mln m³ drewna rocznie, stosunkowo niski odsetek mechanizacji prac odnotowuje się w Rosji (45%) oraz Brazylii (65%). Uśrednioną wartość powyższego wskaźnika dla całego świata (średnia ważona udziałem drewna pozyskiwanego w sposób zmechanizowany) autorzy opracowania określają na imponujące 70%, z czego większość masy pozyskuje się w systemie drewna krótkiego (CTL) (Lundbäck i in. 2021).

Jest to wartość zauważalnie wyższa od tej, którą w 2009 opublikowali Asikainen i in. (2009). Ówczesnie wykazali oni, iż w 2008r. globalny udział pozyskania maszynowego w całkowitym pozyskaniu surowca drzewnego wyniósł 50%, z czego 65% masy pozyskano metodą całego drzewa (FT/TL), a pozostałe 35% metodą drewna krótkiego (CTL). Analiza w/w danych wyraźnie wskazuje na fakt, iż to drewno krótkie staje się wiodącym produktem procesu pozyskania i zrywki surowca drzewnego w skali globalnej.

Autorzy zauważyli także, iż udział maszynowego pozyskania surowca w całkowitym pozyskaniu na terenie Europy stale wzrasta.

Niestety, Polska na tle powyższych wartości, z własnym wskaźnikiem mechanizacji prac leśnych na poziomie zaledwie 30%, plasuje się w ogonie zestawienia, zaraz za Czechami (40%) i Austrią (36%), a przed Białorusią (20%), Rumunią (10%), Bułgarią (>10%) oraz Słowacją (>10%).

Co ciekawe, należy także zauważyć, iż w 2009r. w Austrii, zaledwie 16% z 16,9 mln m³ pozyskanego surowca drzewnego pochodziło z powierzchni użytkowanych maszynowo. Przyczyną takiego stanu rzeczy były m.in. trudności w prowadzeniu gospodarki leśnej na terenach o charakterystyce górskiej (Holzleitner i in. 2011).

W 2021r., pomimo spadku wolumenu pozyskanego w Austrii surowca do 12,2 mln m³, udział drewna pozyskanego maszynowo wzrósł do wspomnianych już 36% (Lundbäck i in. 2021).

2.3. Maszyny wielooperacyjne w Polsce

Według danych Moskalika (2002) na przełomie wieków w Polsce do pozyskania surowca drzewnego wykorzystywano 10 sztuk maszyn wielooperacyjnych typu harwester, które łącznie pozyskiwały zaledwie 1% rocznego etatu cięć w całym kraju (Moskalik, 2002).

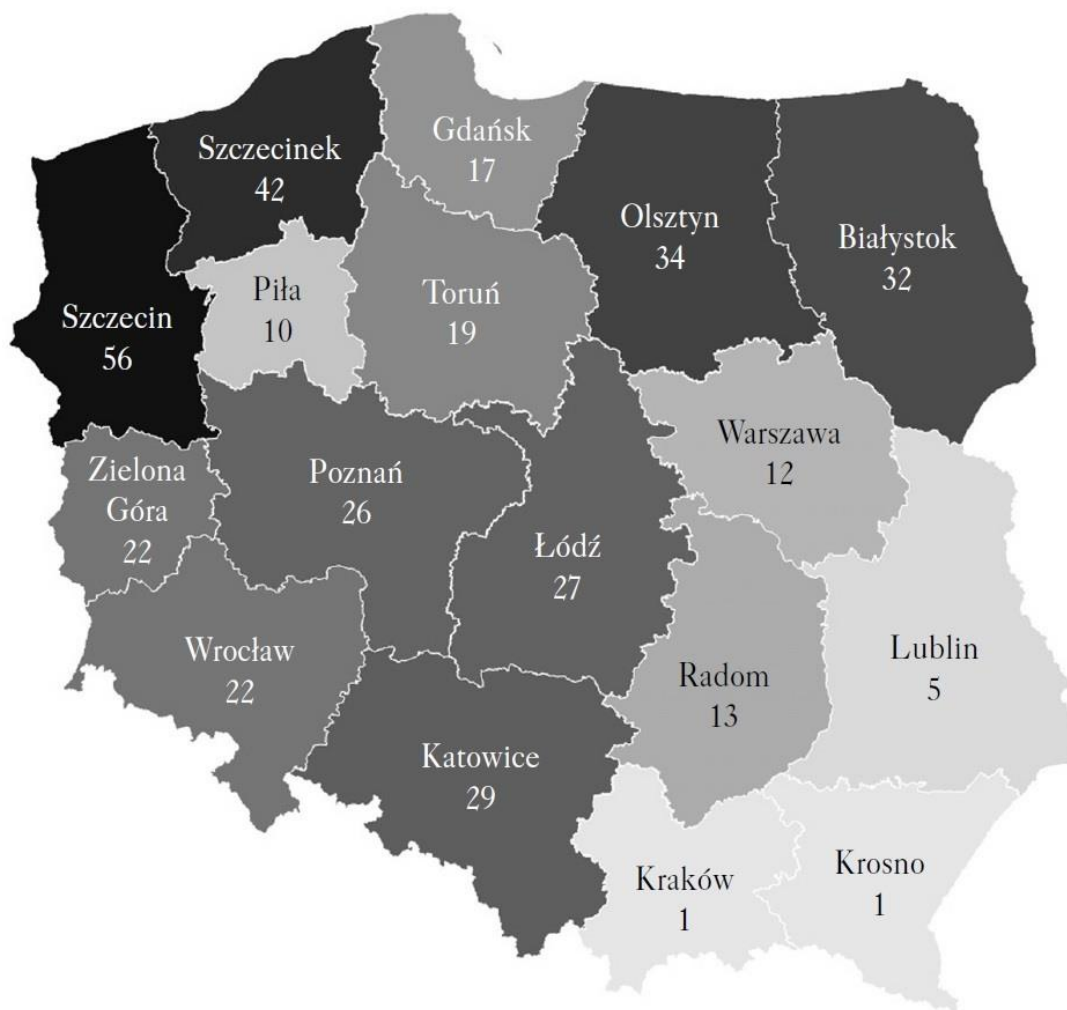
W 2009r. łączną liczbę harwesterów w kraju określono na 163 szt. Poniższa tabela 1 przedstawia ilość maszyn operujących na terenie poszczególnych Regionalnych Dyrekcji Lasów Państwowych (Skarżyński, Brzózko, 2010):

Tabela 1. Liczba harwesterów w Polsce, z podziałem na poszczególne RDLP (źródło: Skarżyński, Brzózko, 2010)

Regionalna Dyrekcja Lasów Państwowych <i>Regional Directorate of State Forests</i>	Liczba maszyn / <i>Number of machines</i>			
	W posiadaniu prywatnych firm <i>Owned by private companies</i>		W posiadaniu nadleśnictw <i>Owned by forest inspectorates</i>	Ogółem (kol. 3+4) <i>Total (column 3+4)</i>
	Stan na 2006.03.31 <i>Data for 2006.03.31</i>	Stan na 2008.03.31 <i>Data for 2008.03.31</i>	Stan na 2009.06.30 <i>Data for 2009.06.30</i>	
Białystok	5	27	4	31
Gdańsk	4	13	-	13
Katowice	2	7	3	10
Kraków	1	4	-	4
Krosno	-	1	-	1
Lublin	-	-	-	-
Łódź	-	2	-	2
Olsztyn	2	16	-	16
Piła	-	2	-	2
Poznań	1	13	1	14
Radom	-	-	-	-
Szczecin	-	23	1	24
Szczecinek	1	6	-	6
Toruń	2	8	2	10
Warszawa	-	2	-	2
Wrocław	-	8	1	9
Zielona Góra	3	17	2	19
Ogółem	21	149	14	163

W ciągu dwóch kolejnych lat wartość ta uległa podwojeniu. Na przełomie roku 2011/12 prywatne zakłady usług leśnych w kraju dysponowały łącznie 335 sztukami harwesterów. Ponadto, samo Państwowe Gospodarstwo Leśne Lasy Państwowe dokonywało zabiegów gospodarczych w zarządzanych przez siebie drzewostanach z wykorzystaniem 16 maszyn tego typu, będących w posiadaniu w/w podmiotu (Żabierek, Wojtkowiak 2012).

Z kolei Mederski i inni (2016) podają, iż z danych empirycznych uzyskanych od właścicieli wszystkich zakładów usług leśnych, świadczących usługi dla Państwowego Gospodarstwa Leśnego Lasy Państwowe, wynika, iż w 2014r. w/w prywatne podmioty dysponowały łącznie 368 sztukami tego typu maszyn, zgodnie z poniższym rozkładem geograficznym (ryc. 3):



Ryc. 3. Rozmieszczenie harwesterów w poszczególnych RDLP w 2016r. (źródło: Mederski i inni 2016)

Co ciekawe, dane te nie pokrywały się z informacjami uzyskanymi równoległe od dystrybutorów maszyn, którzy zadeklarowali, iż na terenie kraju pracuje aż o 92 sztuki więcej, a zatem łączna liczba harwesterów w Polsce w 2014 r. wynosiła ok. 460 szt. Z końcem roku 2015 liczba ta osiągnęła pułap 530 szt. Wartość ta, w odniesieniu do innych krajów europejskich, plasuje Polskę w środku stawki, w porównaniu do 494 szt. w Czechach (dane z 2015 r.), 1400 szt. w Niemczech (2008), 2000 w Finlandii (2016), 750 we Francji (2015), 129 na Litwie (2012), 2201 w Szwecji (2013) oraz 110 we Włoszech (2016). Warto jednak zauważyć, iż rynki w Niemczech oraz Finlandii uważa się za nasycone, a rynek szwedzki może nawet wykazywać tendencję spadkową w liczbie maszyn, ze względu na rosnącą wydajność urządzeń oraz zwiększający się współczynnik ich rocznego wykorzystania.

Należy tu nadmienić, iż zaledwie 17 sztuk harwesterów w 2014r. była w posiadaniu PGL LP. Pozostałe maszyny stanowiły własność osób prywatnych, świadczących dla PGL LP usługi leśne w drodze umów.

Największa dynamika wzrostu liczby kombajnów zrębowych w Polsce wystąpiła w latach 2008-2014 - wówczas w kraju przybywało przeciętnie ok. 61 maszyn rocznie. Liczba dostępnych ówczas na rynku maszyn aktywnie pozyskiwała w PGL LP około 30% grubizny, co przy założeniu, iż etat rębny wynosił około 36 mln m³ drewna, pozwala nam określić średnią wartość pozyskania przypadającą na jedną maszynę na nieco ponad 20 tys. m³ drewna rocznie.

Głównym czynnikiem, warunkującym rozmieszczenie maszyn na terenie kraju, stanowią uwarunkowania przyrodniczo-leśne. Centralna Polska, ze względu na niską lesistość, nie jest atrakcyjnym terenem dla wykonawców usług z wykorzystaniem tego typu maszyn. Natomiast Regionalne Dyrekcje Lasów Państwowych w Krakowie oraz w Krośnie położone są w dużej mierze na terenach podgórskich i górskich, a w dodatku składy gatunkowe drzewostanów w ich obrębie charakteryzują się stosunkowo dużym udziałem gatunków liściastych (głównie buka). Czynniki te, choć nie uniemożliwiają wykorzystywania maszyn do pozyskania surowca drzewnego, znacząco zmniejszają wydajność zmianową oraz opłacalność tego procesu. Ponadto, ze względu na trudne warunki pracy, właściciele maszyn ponoszą większe ryzyko awarii kosztownego sprzętu (Mederski et. al., 2016).

Należy jednak pamiętać, iż wprowadzenie maszyn wielooperacyjnych do powszechnego użytku nie jest równoznaczne z rezygnacją z wykonywania ścinki, okrzesywania oraz przerzynki surowca z wykorzystaniem pilarek ręcznych. Jak podają Moskalik i in. (2017), procentowy udział prac z użyciem pilarek ręcznych w stosunku do całkowitego pozyskania surowca drzewnego w krajach Europy Wschodniej kształtuje się następująco: 59% na Białorusi, prawie 100% w Bułgarii, 71% w Czechach, 5% w Estonii, 30% na Łotwie, 80% w Polsce, 98% w Rumunii, 95% na Słowacji oraz niemal 100% na Ukrainie.

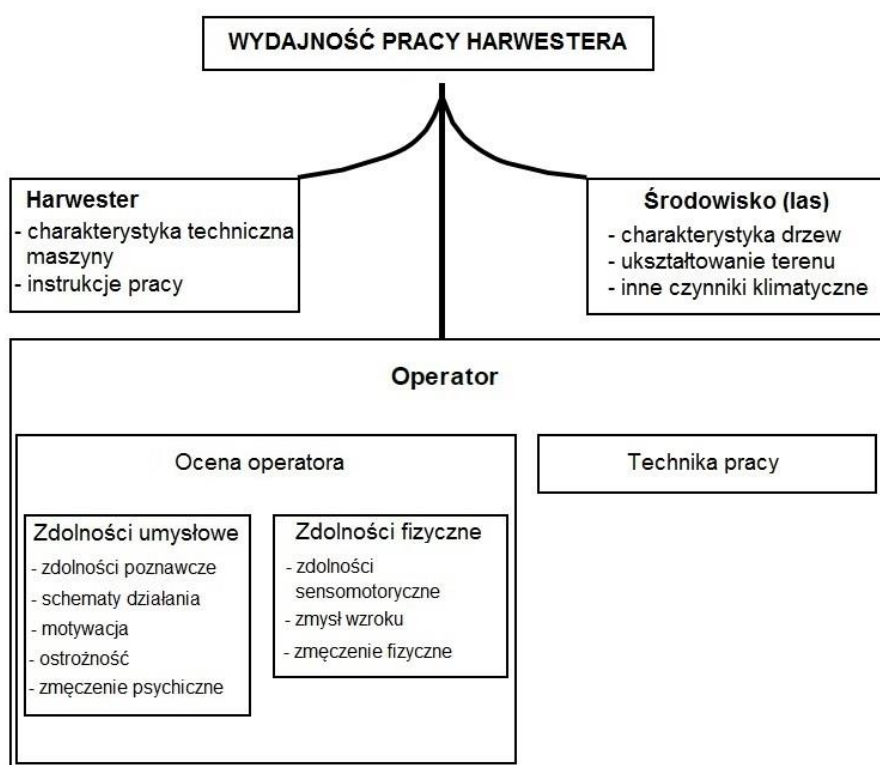
Z kolei Kusiak i in. (2012) podają, iż w Polsce, pomimo stale rosnącego udziału maszynowego pozyskania surowca drzewnego w całkowitym użytkowaniu, ok. 90% drewna jest pozyskiwane z wykorzystaniem pił łańcuchowych.

W dalszym ciągu także pilarki ręczne są wykorzystywane na terenie krajów skandynawskich przy pozyskaniu biomasy oraz cennego drewna okleinowego.

2.4. Wydajność oraz koszty jednostkowe pracy

Aby zrównoważyć wysokie koszty zaprojektowania, wytworzenia oraz późniejszego utrzymania tak skomplikowanych, specjalistycznych urządzeń technologicznych, jakimi są maszyny wielooperacyjne typu harwester lub forwarder, muszą się one charakteryzować wysokim wskaźnikiem wydajności pracy i jak najniższym kosztem jednostkowym, w przeliczeniu na 1m³ przetworzonego surowca. Jeśli z jakiegoś powodu wskaźniki te nie są osiągalne w sposób konsekwentny, inwestycja w zakup lub wymianę posiadanej maszyny na nową nie znajduje uzasadnienia ekonomicznego (Melander, Ritala 2020).

Jak podaje Ovaskainen [2009], produktywność pracy harwestera zależy od trzech głównych, ściśle ze sobą powiązanych czynników - maszyny, operatora oraz środowiska pracy - zgodnie z poniższym schematem (ryc. 4):



Ryc. 4. Czynniki warunkujące wydajność pracy harwestera (źródło: Ovaskainen 2009)

Podobne wnioski wysnuli Jiroušek i in. (2007), którzy ocenili, iż produktywność zmechanizowanego zbioru zależy głównie od nachylenia terenu, wielkości drzewa, kształtu drzewa, ale także od liczby drzew na jednostkę powierzchni oraz motywacji i umiejętności operatora.

Gabaryty drzew są zmienną cechą środowiska (lasu), determinującą wydajność pracy harwestera w stopniu największym: wraz ze wzrostem wielkości drzew wzrasta wydajność pracy maszyny, co zostało udowodnione w wielu badaniach u schyłku XXw., zarówno

w krajach skandynawskich (Brunberg i in. [1989], Brunberg [1991], Kuitto i in. [1994], Lageson [1997], Brunberg [1997], Sirén [1998], Eliasson [1998], , Glöde 1999, Hånell i in. [2000], Ryyänen i Rönkkö [2001], Kärhä i in. [2004], Nurminen i in. [2006]), jak i w Ameryce Północnej (Tufts i Brinker [1993], Kellog i Bettinger [1994], McNeel i Rutherford [1994], Landford i Stokes [1995], Landford i Stokes [1996], Tufts [1997]).

Należy jednak zauważyć, iż opłacalność stosowania maszyn wielooperacyjnych w drzewostanach wynika bezpośrednio z odpowiedniego doboru maszyny do gabarytów pozyskiwanych drzew. Próba zastosowania małego harwestera trzebieżowego, o ograniczonej mocy i wytrzymałości, do pozyskiwania drzew o znacznych gabarytach, zaprojektowanych do usunięcia podczas realizacji cięć rębnych, będzie skutkowało spadkiem wydajności prac lub nawet całkowitym brakiem możliwości wykonania zabiegu. Podobne wnioski nasuwają się przy rozpatrywaniu sytuacji odwrotnej: co prawda maszynami o znacznych gabarytach i wysokiej mocy możliwa jest praca także w drzewostanach młodszych klas wieku, przeznaczonych do trzebieży, niemniej jednak koszt zakupu, serwisowania, utrzymania oraz samej pracy takich urządzeń oraz ograniczona przez ich gabaryty mobilność w drzewostanie sprawia, iż opłacalność ich stosowania nie zawsze jest najwyższa. Jak podają Kotze i du Toit (2012), graniczna wartość średnicy pnia, dla której koszty netto pozyskania z użyciem małego oraz dużego harwestera się równoważą, zawiera się w przedziale 26-31cm. Poniżej tej wartości korzystniejsze ekonomicznie jest wykorzystywanie do prac harwestera trzebieżowego, podczas gdy harwestery duże, przeznaczone do prac rębnych, wykazują znaczny spadek opłacalności prac. Te maszyny charakteryzują się jednak wyższą opłacalnością podczas prac w drzewostanach o średnicy pnia powyżej 31cm. Należy jednak pamiętać, iż określona wyżej średnica ma postać uśrednioną dla całego drzewostanu i nie odzwierciedla zmienności gabarytów drzew w warunkach rzeczywistych, przez co największe zastosowanie znajduje w przypadku drzewostanów jednogeneracyjnych, jednowiekowych, głównie plantacji drzewnych (Ackerman et. al., 2022).

Z kolei Enez i Aricak (2012), którzy prowadzili badania nad wydajnością pracy harwestera przy pozyskaniu drzew różnych gatunków i o zmiennych rozmiarach w regionie Kastamonu w Turcji, stwierdzili, iż wydajność pracy harwestera w dużym stopniu zależy także od gatunku pozyskiwanego surowca. Wykazali oni, iż wydajność pracy kombajnu była największa przy pozyskaniu jodły (27,36 m³/h), następnie sosny żółtej (20,82 m³/h), a najniższa w przypadku sosny czarnej (11,82 m³/h). W odniesieniu do gabarytów poszczególnych egzemplarzy drzew wykazano, iż maksymalna wydajność została osiągnięta przy pierśnicy 36-52 cm (25,68 m³/h), a następnie w klasie pierśnicy 20-36 cm (23,1 m³/h).

Wydajność pracy harwestera zbliżoną do powyższych odnotowali także Bilici i in. (2017), którzy badali produktywność harwestera w Turcji, w prowincji Osmangazi, mieście Bursa. Średnia wydajność pracy maszyny została oszacowana na 23,91 m³/h, wahając się od 6,02 m³/h do 57,26 m³/h, podczas gdy średnią miąższość pozyskanego drewna określono na 0,49 m³. Określona przez nich produktywność okazała się bardzo zbliżona do wartości podanych przez Anderssona (1994), który zmierzył wydajność tego typu maszyny na poziomie 22,2 m³/h, przy średniej miąższości drzewa 0,34 m³, oraz Lanforda i Stokesa (1996), którzy informowali o średniej wydajności harwestera na poziomie 21,0 m³/h.

Nowoczesne maszyny wielooperacyjne są obecnie tak skuteczne w działaniu, że obróbka drzewa o dużych gabarytach zajmuje niewiele więcej czasu, niż drzewa o małych rozmiarach, co bezpośrednio prowadzi do wzrostu wydajności pracy maszyny, wraz ze wzrostem wielkości pnia. Jednak zależność ta nie jest liniowa z uwagi na fakt, iż po przekroczeniu przez pień pewnego rozmiaru, optymalnego dla omawianego rodzaju maszyny, wydajność procesu pozyskania zaczyna spadać (McNeel i Rutherford 1994, Ryynänen i Rönkkö 2001, Kärhä i in. 2004).

Innymi czynnikami, wpływającymi na produktywność maszyn wielooperacyjnych, są cechy ukształtowania terenu: spadki podłużne i poprzeczne (Stampfer i Steinmüller [2001]), struktura powierzchni i wytrzymałość podłoża glebowego oraz warunki klimatyczne, m.in. intensywność opadów (woda, śnieg), uderzenia piorunów, temperatura powietrza, grubość pokrywy śnieżnej (Uusitalo [2004]).

Poza w/w zależnością zauważono także, iż wzrost produktywności maszyn wielooperacyjnych następuje wraz ze wzrostem intensywności użytkowania rębego lub wzrostem liczby drzew usuwanych na terenie zrębu zupełnego (Kuitto et al. [1994], Brunberg [1997], Sirén [1998], Eliasson [1998]), ale także w użytkowaniu przedrębnym - trzebieżach (Sirén 1998) oraz przy cięciu drewna małowymiarowego (Hånell i in. 2000).

Eliasson i in (2000) porównali koszty pozyskania surowca drzewnego z użyciem harwestera w drzewostanie użytkowanym zrębem zupełnym, z drzewostanem użytkowanym rębnią częściową i dowiedli, iż pozyskanie maszynowe w przypadku rębni częściowej jest droższe o 11-13%, w stosunku do zrębu zupełnego.

Jak informują Kärhä i in. [2005], wydajność pracy maszyny wielooperacyjnej wyposażonej w głowicę Naarva-Grip 1600-40, przeznaczoną do pozyskania cienkiego drewna energetycznego w zabiegach czyszczeń w młodnikach oraz trzebieży w drzewostanach dojrzewających, waha się w granicach **3,0-7,2 m³/rbh**, w zależności od rodzaju podwozia, na którym jest ona zamontowana.

Według Ohrnera (1999), wydajność maszyn wielooperacyjnych przy pozyskaniu drzew o średniej miąższości pnia na poziomie $0,2 \text{ m}^3$ wynosi około **8-10 m^3/h** , czyli jest od 8 do 10 razy wyższa, niż przy ścinie z użyciem pilarek łańcuchowych. Z kolei polskie źródła naukowe podają, iż średnia wydajność pracy harwestera na powierzchniach trzebieżowych wynosi około **9 m^3/h** (Więsik 2000), a w przypadku forwardera wynik ten sięga wartości $11 \text{ m}^3/\text{h}$ (Zychowicz 2000). Moskalik natomiast informuje, iż wg badań prowadzonych w Szwecji i Niemczech w drzewostanach trzebieżowych osiągnięto wydajność pozyskania surowca na poziomie **6 m^3/h** (Moskalik 2003a, 2003b).

Więsik (2008) zauważa, iż na wydajność zmianową pracy harwestera w znacznym stopniu wpływa liczba rzazów wykonywanych na ściętym drzewie.

Z kolei Sadowski i in. (2014) zbadali, iż wydajność pracy harwestera PONSSE Ergo podczas 8-godzinnej zmiany roboczej przy pozyskaniu surowca drzewnego w drzewostanach sosnowych Nadleśnictwa Radziwiłłów wyniosła 144 m^3 na zrębie zupełnym (**18 m^3/h**) oraz $68\text{-}90\text{m}^3$ w drzewostanach trzebieżowych (**8,5-11,25 m^3/h**). Jako przyczynę tak dużej rozbieżności w wydajności prac na obu typach powierzchni autorzy podali konieczność dokonywania przejazdów technologicznych pomiędzy drzewami przy realizacji zabiegu trzebieżowego, podczas gdy ścinka drzew na powierzchni zrębu zupełnego następuje w sposób ciągły, bez selekcji osobniczej i konieczności manewrowania pomiędzy drzewami.

Kormanek i Kępa (2016) wykazali na terenie Nadleśnictwa Międzylesie, iż wydajność pracy harwestera w 47-letnim drzewostanie z dominującym udziałem świerka, buka oraz jesionu, przy wskaźniku zagęszczenia 0,9 wynosi **12,71 m^3/h** .

Wcześniej, bo już na przełomie wieków, Suwała (1999) dokonał analizy wydajności pracy oraz kosztów pozyskiwania drewna w późnych trzebieżach sosnowych. Badania przeprowadził na terenie Nadleśnictwa Dąbrowa oraz ówczesnego Nadleśnictwa Solec Kujawski (obecnie Nadleśnictwo Cierpiszewo), zgrupowanych w ramach RDLP Toruń. Na powierzchnie badawcze wybrano 6 drzewostanów na siedlisku boru świeżego w wieku od 59 do 92 lat, ze średnią pierśnicą 20,3 cm oraz średnią liczbą drzew na hektar w wysokości 867 szt. Zbadano m.in. wydajność zmianową kilku kombinacji sposobów pozyskiwania oraz zrywki drewna.

Przy ścinie, okrzesywaniu i wyróbce drewna z wykorzystaniem pilarki ręcznej, w połączeniu ze zrywką z użyciem skidera LKT 81, osiągnięto wydajność pracy na poziomie $10,43 \text{ m}^3/8 \text{ godz.}$ (co odpowiada wartości **1,30 m^3/h**), przy odstępach między szlakami operacyjnymi na poziomie 60m.

W tym samym czasie, w analogicznych warunkach drzewostanowych, operatorzy harwestera jednochwytakowego FMG 990/756 oraz forwardera FMG 1010, dokonali pozyskania oraz zrywki surowca w ilości 72,79m³ (**9,10 m³/h**).

Spośród wszystkich przeanalizowanych przez autora kombinacji, najniższym kosztem jednostkowym pozyskania oraz zrywki drewna okazał się wariant z wykorzystaniem pilarek ręcznych oraz forwarderów (ok. 25 zł/m³ przy odległości szlaków 40 m), w drugiej kolejności pilarek ręcznych oraz koni (ok. 28-29 zł/m³), a w trzeciej właśnie harwestera z forwarderem (ok. 35 zł/m³). Zdecydowanie najwyższym kosztem jednostkowym charakteryzowały się warianty, w których zrywka surowca odbywała się z wykorzystaniem skidera LKT 81, bez względu na sposób pozyskania surowca (40-50 zł m³).

Pomimo, iż użycie harwestera w połączeniu z forwarderem nie jest opcją charakteryzującą się najniższym kosztem jednostkowym, to niewątpliwą zaletą takiego rozwiązania jest w tym przypadku 7-krotnie wyższa wydajność pracy w jednostce czasu, w stosunku do rozwiązań najtańszych.

Autor opracowania udowodnił także, iż skrócenie odległości między szlakami z 60 do 40 m powoduje zwiększenie wydajności pracy zestawu maszyn o 13%, jednocześnie redukując koszt pozyskania oraz zrywki surowca o 10%.

Autor pokusił się także o zestawienie jednostkowych cen pozyskania drewna z wykorzystaniem harwestera z kilku krajów europejskich, stosunkowo zaawansowanych w wykorzystaniu tej technologii (tabela 2):

Tabela 2. Koszty pozyskania oraz zrywki drewna w Europie

Kraj	Łączny jednostkowy koszt pozyskania oraz zrywki drewna w systemie "harwester + forwarder" (zł/m³)	Stosunek wielkości kosztów do wartości z Polski
Dania	73,80	2,11
Finlandia	34,40-55,00	0,98-1,57
Francja	65,60-102,50	1,87-2,93
Niemcy	123,00-159,90	3,51-4,57
Norwegia	87,80-113,30	2,51-3,24
Szwecja	54,10-62,70	1,55-1,79
Polska	35,00	1,00

Pomimo faktu, iż przedstawione w tabeli stawki jednostkowe nie są już z różnych względów aktualne, to wartym do odnotowania jest fakt na jakim poziomie kształtują się te wartości w odniesieniu do kosztów jednostkowych ponoszonych w naszym kraju: zdecydowanie najdrożej drewno pozyskuje się w Niemczech (nawet ponad 4,5x drożej niż w

Polsce), Norwegii (ponad 3-krotnie drożej) oraz Francji (niemal 3-krotnie). Autor wnioskuje, iż na taki stan rzeczy wpływ mają nie tylko aspekty przyrodnicze, ale także ekonomiczne.

Co ciekawe, źródła naukowe nie są zgodne w sprawie relacji kosztów maszynowego pozyskania surowca drzewnego, w stosunku do pozyskania tradycyjnego. Teutenberg (1995) wykazywał niższe koszty pozyskania surowca drzewnego w Niemczech z użyciem harwestera wobec kosztów pozyskania ręcznego, nawet przy małych wymiarach drzew. Lillenberg (1995) określił analogiczne koszty w Finlandii na równym poziomie, a Długosiewicz i Grzebieniowski (2009) zbadali, iż koszt jednostkowy pozyskania i zrywki surowca drzewnego

na terenie Nadleśnictwa Dębica z wykorzystaniem harwestera Silvatec model 884TH i forwardera Valmet 860 z klembankiem wynosił 26,75 zł/m³, podczas gdy koszt jednostkowy obu prac na terenie Nadleśnictwa Nowa Dęba, prowadzonych sposobem tradycyjnym (pilarka ręczna + ciągnik rolniczy z wciągarką) wyniósł 22,97 zł/m³ (koszt pozyskaniemaszynowego był o 16,5% wyższy). Co istotne, ze względu na wysokie koszty stałe pracy maszyn wielooperacyjnych, głównie amortyzację, pozyskanie sposobem zmechanizowanym było aż o 81% droższe od pracy pilarką, podczas gdy zrywka z użyciem forwardera była tańsza od zrywki z użyciem ciągnika rolniczego o 16%. Podczas badań wykazano także 3-krotnie wyższą roczną wydajność pozyskania i zrywki drewna przy zastosowaniu wariantu technologicznego z użyciem maszyn wielooperacyjnych, przy czym maszyny te były wykorzystane jedynie w 55% czasu jednej zmiany roboczej. Autorzy, podobnie jak Suwała (1999), wysnuli m.in. wniosek, iż najniższym kosztem jednostkowym charakteryzuje się wariant technologiczny z wykorzystaniem pilarek ręcznych do pozyskiwania surowca drzewnego oraz forwardera do jego zrywki.

Z kolei Jiroušek i in. (2007) określili wydajność pracy harwestera na zrębach zupełnych w Irlandii na 13,5-60,5 m³/rbh, szacując całkowity jednostkowy koszt jego pracy na wartość 99,69-116,83 euro/rbh pracy. Jednostkowy koszt zrywki forwarderem określono na 63,82-80,40 euro/rbh.

Bacher-Winterhalter (2004) określa, iż koszt zmechanizowanego pozyskania surowca w drzewostanach o niskiej średniej miąższości pojedynczych drzew jest o 20-30% niższy, niż w przypadku śinki tradycyjnej, opartej na pozyskaniu z użyciem pilarki łańcuchowej.

Spinelli i in. (2014), prowadzący badania nad wydajnością oraz kosztami prac przy pozyskaniu drewna sosny pini (Pinus pinea L.) w okolicy Pizy, Włochy, zauważają także, iż pozyskanie surowca na terenie nizinnym w systemie drewna całego (Whole-Tree System) jest o 40-50% bardziej korzystne ekonomicznie, niż w przypadku drewna sortymentowego (CTL). Ponadto, zmechanizowanie prowadzonych prac pozwoliło

na zwiększenie produktywności pozyskania 6-20 krotnie (!) oraz redukcję zużycia paliwa o 10-40%.

Jak podają Gerasimov i in. (2012), ponad 20-letnie doświadczenie w eksploatacji maszyn pozyskaniowych w Rosji potwierdza ich efektywność, przy jednoczesnym zapewnieniu lepszych warunków pracy pod względem ergonomii oraz bezpieczeństwa. Jednocześnie maszyny te gwarantują mniejsze szkody w środowisku i niezawodność, w połączeniu z wygodną obsługą i utrzymaniem. Wydajność pracy i jakość przetworzonego surowca uznaje się przy tym za zadowalającą.

Visser i Stampfer (2003) natomiast zauważają, iż badania nad wydajnością prac leśnych należy skupiać na ocenie łańcucha prac w warunkach leśnych jako całości, a nie na poszczególnych maszynach. Poziom interakcji pomiędzy poszczególnymi maszynami w systemie prac może skutkować znacznymi różnicami w wydajności całego łańcucha produkcyjnego.

Pomimo wielokrotnie już wykazanej znacznie wyższej wydajności pracy harwestera w stosunku do pozyskania ręcznego z użyciem pilarek, wydajność pracy nie jest jedynym czynnikiem popychającym ludzi do rozwoju rynku maszyn wielooperacyjnych. Jednym z kluczowych powodów, dla których maszyny wielooperacyjne dostosowuje się do pracy w trudnych warunkach jest postępujący niedobór wykwalifikowanej siły roboczej, zdolnej do prowadzenia prac pozyskaniowych w sposób nie tylko skuteczny i minimalizujący negatywny wpływ prac na środowisko naturalne, ale przede wszystkim w sposób bezpieczny dla operatora pilarki oraz osób towarzyszących na powierzchni roboczej (Stampfer, 2016). Jak podaje Długosiewicz i Grzebieniowski [2009], brak chęci do podjęcia pracy w zawodzie drwala jest spowodowany faktem, iż jest to profesja wyjątkowo niebezpieczna, a przy tym zdecydowanie źle opłacana.

W kwestii opłacalności maszynowego pozyskania surowca drzewnego już w 1994r. Terava (1994) podawał, iż w Finlandii użycie harwestera jest opłacalne w stosunku do pozyskania z użyciem pilarki ręcznej w przypadku, gdy miąższość pojedynczego drzewa jest większa niż 0,05 m³.

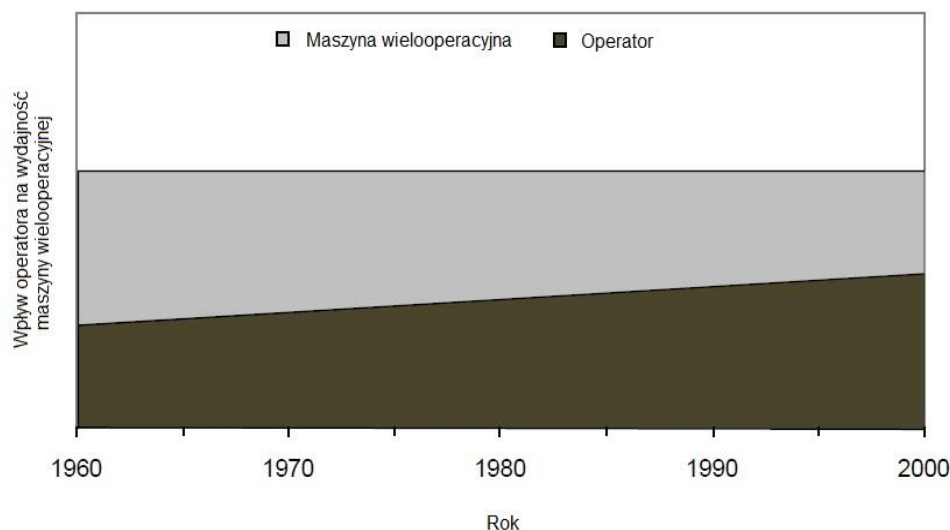
Z kolei Asikainen i in. (2011) twierdzą, iż koszty pracy w krajach członkowskich UE osiągnęły poziom, na którym pełna mechanizacja systemu zbioru i transportu surowca drzewnego stała się konkurencyjna wobec pracy ręcznej praktycznie we wszystkich krajach, szczególnie w zakresie pozyskania surowca iglastego.

Pod koniec lat 70-tych oraz w latach 80-tych, w okresie szybkiego rozwoju rynku maszyn wielooperacyjnych, uważano, iż wydajność pracy maszyn zależy wyłącznie od zastosowanych w nich rozwiązań technicznych. Wszelkie udoskonalenia techniczne,

stosowane w konstrukcji maszyn, znacznie zwiększały ich wydajność. Jednakże, w czasach obecnych, zwiększanie wydajności pracy maszyn poprzez opracowywanie nowych rozwiązań technicznych jest sposobem niezwykle kosztownym, dlatego też skupiono się na poprawie umiejętności i szkoleniach wykwalifikowanych operatorów. Wiele źródeł naukowych podaje, iż obecnie to właśnie umiejętności i doświadczenie operatora w decydujący sposób wpływają na wydajność maszyn wielooperacyjnych (Sirén [1998], Sirén i Tanttu [2001], Kariniemi [2006], Purfürst i Erler [2006]).

Ryynänen i Rönkkö (2001) zaobserwowali, iż wśród operatorów maszyn pracujących na powierzchniach leśnych o podobnych warunkach terenowych, różnica w wydajności ich pracy może wynieść nawet ponad 40% (Ryynänen i Rönkkö [2001]).

Poniższy wykres (ryc. 5) prezentuje zmienność wpływu zdolności operatora na wydajność pracy maszyny, w latach 1960-2000 (Ovaskainen, [2009]):



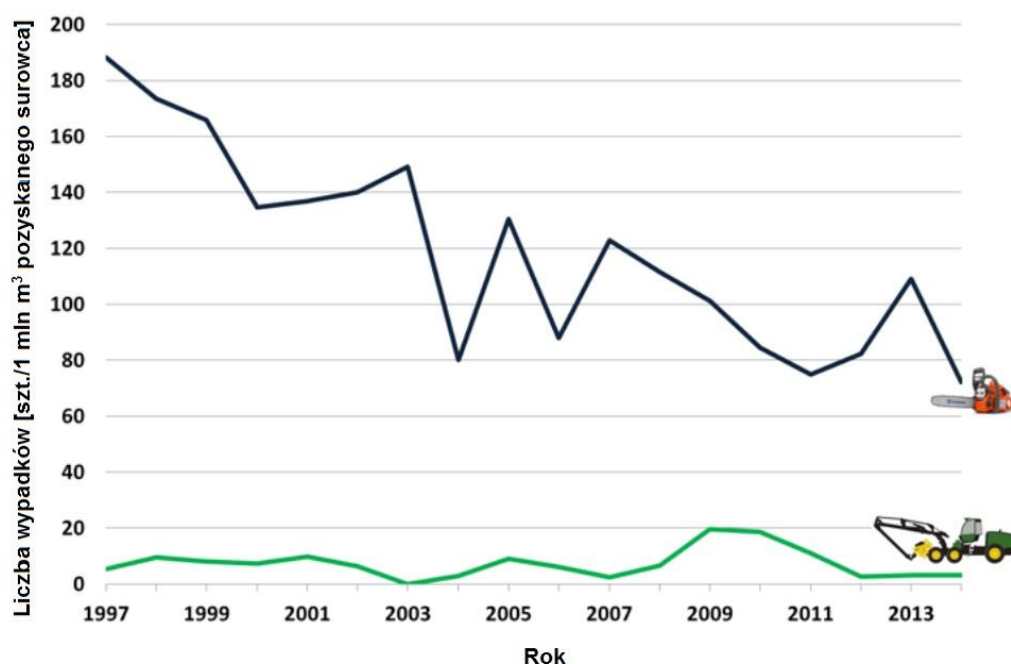
Ryc. 5. Wpływ zdolności operatora na wydajność pracy maszyny (źródło: Ovaskainen 2009)

2.5. Wady i zalety maszynowego pozyskania surowca drzewnego

Najistotniejszą zaletą w wykorzystaniu maszyn wielooperacyjnych przy pozyskaniu i zrywce drewna, jest ochrona wartości najcenniejszej, a zatem zdrowia i życia pracujących przy nich ludzi. Z danych Głównego Urzędu Statystycznego wynika, iż w 2017r. wypadkom przy pracy w leśnictwie uległo łącznie 439 osób, z czego 11 poniosło śmierć, a u 5 osób poziom obrażeń określono jako ciężki. Znaczna część tych wypadków wydarzyła się przy procesie pozyskania oraz zrywki drewna, a ich najczęstszą przyczyną było nieprawidłowe zachowanie ludzkie (GUS, 2018).

Praca na działce roboczej jednego operatora, odpowiednio chronionego przez wzmocnioną kabinę kierowanej przez niego maszyny, pozwala na minimalizację ryzyka utraty jego zdrowia, a potencjalnie także życia. W związku z faktem, iż przy pozyskaniu maszynowym surowca drzewnego wykonywane są inne czynności niż przy pozyskaniu ręcznym, nie ma aż tylu możliwości popełnienia błędu przez człowieka. W przypadku operatora maszyny, ograniczają się one w zasadzie tylko do nadania drzewu nieodpowiedniego kierunku obalania (w stronę kabiny) lub obalenia drzewa na osobę postronną na działce roboczej.

Jak podaje Stampfer (2016), liczba wypadków przy pozyskaniu drewna w Lasach Dolnej Saksonii w latach 1997-2013 kształtowała się zgodnie z ryc. 6:



Ryc. 6. Liczba wypadków przy pozyskaniu surowca drzewnego w Lasach Dolnej Saksonii (źródło: Stampfer 2016)

Pomimo stale postępującej, niemal 3-krotnej redukcji ilości wypadków przy pozyskaniu ręcznym na przestrzeni 16 lat, liczba ta w roku 2016 (do ponad 70 wypadków na 1 milion m³ pozyskanego surowca) jest aż ponad 6-krotnie wyższa, niż w przypadku prac wykonywanych z wykorzystaniem harwesterów (poniżej 10 wypadków na 1 milion m³ pozyskanego surowca). Co prawda w latach 2009-2010 liczba wypadków z udziałem maszyn wielooperacyjnych wzrosła do poziomu ok. 20 wypadków na 1 milion m³ pozyskanego surowca, niemniej jednak wciąż jest to wartość znacznie niższa, niż w przypadku drewna pozyskiwanego ręcznie.

Poza znaczną minimalizacją ryzyka poniesienia śmierci lub uszczerbku na zdrowiu w stosunku do pracy w systemie ręczno-maszynowym, praca w trybie zmechanizowanym pozwala także na polepszenie szeroko pojętej ergonomii pracy, polegające m.in.

na zmniejszeniu wydatku energetycznego, ponoszonego przez pracowników leśnych przy wykonywaniu poszczególnych czynności.

Piszcz i Gołębiowski (2006) zbadali liczbę uderzeń serca oraz wydatek energetyczny u 22 operatorów, podczas wykonywania prac przy pozyskaniu oraz zrywce drewna, z podziałem na prace ręczne, ręczno-maszynowe oraz maszynowe. Tętno u operatora harwestera podczas ścinki określono na 80 uderzeń serca na minutę, podczas gdy u pilarza parametr ten osiągnął wartość 125 uderzeń serca na minutę, a zatem o ponad 50% wyższy. W przypadku wydatku energetycznego różnica ta jest jeszcze większa i wynosi ponad 400% (2,15 kcal/min u operatora harwestera wobec 8,73 kcal/min u pilarza). Wobec powyższego faktu, autorzy opracowania zalecają upowszechnić stosowanie maszyn wielooperacyjnych oraz zrywkowych, jednak z zachowaniem odpowiedniej organizacji czasu pracy, co powinno ograniczyć zjawisko monotonii oraz monotypii pracy.

Do najważniejszych wad maszyn wielooperacyjnych typu harwester oraz pojazdów zrywkowych typu forwarder należy zaliczyć fakt, iż powodują znaczną ingerencję w stan równowagi środowiska leśnego (Bernadzki, 2005). W wyniku ich użytkowania do środowiska naturalnego trafiają szkodliwe produkty uboczne spalania wewnętrznego silników spalinowych, zwane powszechnie spalinami. Jak powszechnie wiadomo, związki chemiczne zawarte w spalinach, takie jak CO, HC, NO_x oraz PM, są szkodliwe dla zdrowia organizmów żywych. Międzynarodowa Agencja Badań nad Rakiem (IARC), jedna z agend Światowej Organizacji Zdrowia (WHO), w raporcie opublikowanym w 2012r., oceniła, iż spaliny generowane podczas pracy silników diesla przyczyniają się do powstawania komórek nowotworowych. Wcześniej wpływ ten był oceniany jako prawdopodobny. Po analizie najnowszych badań środowiskowych naukowcy WHO jednoznacznie określili, że spaliny z silników diesla są przyczyną powstawania nowotworów (Kheifets 2012; Attfield et al. 2012; Silverman et al. 2012; Metz 2003; Vermeulen et al. 2014).

Badania nad emisją szkodliwych związków chemicznych, powstałych podczas pracy maszyn leśnych, prowadzili m.in. Lijewski i in. (2017). Badacze udowodnili, iż w procesie produkcyjnym złożonym z harwestera John Deere 1270E, forwardera John Deere 1210E oraz ciężarówki MAN TGA, przewożącej surowiec ze składnicy przejściowej w drzewostanie do składnicy głównej, to właśnie harwester okazał się maszyną, która ze względu na najwyższe jednostkowe zużycie paliwa generuje najwyższy wskaźnik emisji dwutlenku węgla (CO₂), w przeliczeniu na każdy przetworzony m³ surowca. W całym procesie produkcyjnym aż 38% udziału w zużytej paliwie miał harwester, 27% forwarder, a 35% samochód ciężarowy.

Silnik harwestera John Deere 1270E, podczas obróbki 1m³ surowca drzewnego, zużywa średnio 0,80 l paliwa, generując przy tym 2 112 g CO₂. W tym samym czasie forwarder JD 1210E, transportujący drewno z powierzchni zrębowej na składnicę przejściową, zużywa 0,57 l/m³ oraz generuje 1 505 g CO₂ na każdy m³ surowca. Z kolei dla samochodu ciężarowego MAN TGA wskaźniki te wynoszą odpowiednio 0,73 l/m³ oraz 1 936 g/m³.

Co ciekawe, relacja ta nie znajduje odzwierciedlenia w przypadku emisji szkodliwych związków chemicznych, innych niż CO₂. Poniższa tabela 3 prezentuje zestawienie jednostkowych wartości emisji tlenku węgla (CO), węglowodorów (HC), związków azotu (NO_x) oraz cząstek stałych (PM):

Tabela 3. Emisja szkodliwych związków chemicznych przez silniki maszyn do prac leśnych

	CO (g/m ³)	HC (g/m ³)	NO _x (g/m ³)	PM (g/m ³)
Harvester	2.11	0.23	23.31	2.12
Forwarder (łącznie)	3.38	0.29	15.22	1.02
Zaladunek	1.98	0.14	8.43	0.47
Przejazd	0.87	0.07	3.62	0.27
Rozładunek	0.53	0.08	3.17	0.28
Samochód ciężarowy	3.42	0.67	6.79	0.94
SUMA:	8.91	1.19	45.32	4.08

Najwyższą emisją tlenku węgla oraz węglowodorów na 1m³ przetworzonego surowca charakteryzuje się samochód transportowy, natomiast w kwestii emisji związków azotu oraz cząstek stałych, prym wiodzie silnik harwestera. W każdym z powyższych przypadków silnik forwardera plasuje się w środku zestawienia.

Jak zauważa Brzózko (2009), maszyny leśne, podczas pracy, emitują do środowiska naturalnego nie tylko spaliny, ale także oleje oraz smary, choć w znacznie mniejszym stopniu.

Pomimo faktu, iż na rynku pojawiają się już rozwiązania techniczne, mające na celu m.in. zabezpieczenie przewodów hydraulicznych przed pęknięciami oraz wyciekami oleju, to jednak skuteczność tych rozwiązań nie jest w stanie zapewnić pełnej ochrony dla środowiska (Dvorak i in., 2008).

Co istotne, harwestery oraz forwardery charakteryzują się znacznie większymi gabarytami oraz wyższą masą własną, niż ciągniki rolnicze używane do zrywki drewna, lub ciągniki zrywkowe typu skider (zwiększona masa oraz rozstaw osi i kół ma na celu zapewnienie maszynie wymaganej stabilności). Przemieszczanie się takich maszyn w drzewostanie może powodować istotne zmiany parametrów fizycznych podłoża (zwiększenie związłości oraz gęstości gleby), co stwarza niekorzystne warunki wzrostu dla młodych sadzonek drzew [Słowiński, 2007].

Powyższą teorię potwierdziły badania Aksakala [2010, 2011], który wraz ze współpracownikami wykazał, iż zagęszczenie gleby spowodowane naciskiem opon ciężkiego sprzętu do prac leśnych powoduje istotne zagęszczenie podłoża glebowego, zwiększoną odporność na penetrację oraz wytrzymałość gleby, zmniejszając tym samym zdolność infiltracji podłoża przez wodę, rozwój systemu korzeniowego roślin oraz szeroko pojętą wydajność plonu (Aksakal i Öztaş 2010; Aksakal et al. 2011).

Należy jednak zauważyć, iż zdolność do zagęszczania podłoża gleby przez poruszający się po niej pojazd zależy nie od samej masy maszyny, a od nacisku jednostkowego, generowanego na podłoże. Jak podają Dudáková i in. (2020), największe różnice w zwężłości gleby w obrębie szlaku zrywkowego, po którym poruszają się środki zrywkowe, wobec powierzchni dla nich niedostępnej, odnotowuje się w przypadku prowadzenia prac zrywkowych z wykorzystaniem koni, tradycyjnych ciągników rolniczych zaadaptowanych do prac w lesie oraz skidderów. Najniższe zagęszczenie podłoża glebowego w obrębie szlaków zrywkowych powodują maszyny wielooperacyjne typu harwester oraz forwarder, co ma bezpośredni związek z zastosowaniem w ich układach jezdnych szerokich opon, półgąsienic oraz gąsienic.

Nie sposób pominąć faktu, iż gleba leśna posiada pewną zdolność regeneracji, w dodatku stosunkowo szybkiej wobec całego cyklu produkcyjnego drzewostanu. Celem dokonania analizy wpływu silnego zagęszczenia gleby na wzrost i rozwój młodych sadzonek sosny zwyczajnej, Hys (2007) zbadał niemal 30-letnie drzewostany sosnowe, nasadzone na zrębach zupełnych dokonanych wspomnianą już ścinarką Ł-34 z głowicą ND-600, opracowaną przez doktora J. Więsika w połowie lat 70-tych ubiegłego wieku. Autor przeanalizował jakość drzewostanów pod kątem m.in. średniej wysokości drzew, ich pierśnicy oraz miąższości, a także kilku innych parametrów. Pomimo zwiększenia zwężłości gleby o 50% i gęstości o ponad 60% w stosunku do powierzchni kontrolnej, analiza statystyczna uzyskanych danych nie wykazała istotnego pogorszenia jakości drzewostanów sosnowych wobec grupy kontrolnej.

Kolejną istotną wadą stosowania w drzewostanie maszyn wielooperacyjnych o znacznych gabarytach może powodować zwiększone uszkodzenia drzew na pniu (Suwała 2005).

Najprostszym, a jednocześnie wystarczająco skutecznym wskaźnikiem oceny uszkodzenia całego drzewostanu, jest liczba pojedynczych drzew uszkodzonych mechanicznie podczas realizacji prac z zakresu pozyskania oraz zrywki surowca.

Cântar i in. (2022), prowadzący w południowo-zachodniej Rumunii badania nad uszkodzeniami drzew pozostających na gruncie po procesie zmechanizowanego

pozyskania surowca, wykazali, iż spośród wszystkich 1237 zaobserwowanych szkód na drzewach stojących aż 78.9% stanowiły głębokie zniszczenia kory, podczas gdy pozostałe urazy to odłupywanie fragmentu pnia (11%), otarcia (7,7%), złamania pni (1,8%) oraz odsłonięcie szyi korzeniowej (0,6%). Co istotne, ilość uszkodzeń drzew powstających przy realizacji zabiegu trzebieży była ponad dwukrotnie większa, niż w drzewostanach użytkowanych cięciami rębny. Obserwacja drzewostanów po zakończeniu zabiegów wykazała, iż zaledwie 8,8% zarejestrowanych szkód uległa naturalnej regeneracji (zabliźnieniu), przy czym odsetek ran zregenerowanych na powierzchni drzew iglastych wyniósł 28% (17 przypadków wyleczonych uszkodzeń na 60 znalezionych) i tylko 8,2% w przypadku gatunków liściastych. Autorzy powyższych badań wykazali także, iż największy wpływ na intensywność procesu gojenia się uszkodzeń ma szerokość uszkodzenia w stosunku do całego obwodu uszkodzonego drzewa.

Z kolei badacze słowaccy podają, iż zaobserwowany przez nich odsetek uszkodzonych drzew, pozostających na gruncie, spowodowanych działalnością harwestera na dwóch powierzchniach próbnych (odpowiednio 20,47% oraz 23,36% wszystkich drzew na pniu) był wyższy niż w przypadku zastosowania tradycyjnych ciągników zrywkowych/skidderów (19,44%). Najniższy odsetek drzew uszkodzonych (14,47%) odnotowano na powierzchni, na której do zrywki surowca używano siły mięśni koni pociągowych (Dudáková et. al., 2020).

W Chorwacji uczeni wskazują na najwyższą częstotliwość występowania uszkodzeń przy zmechanizowanych pracach w drzewostanach trzebieżowych, w postaci odłupanej kory. Na wszystkich analizowanych powierzchniach próbnych średnio 83% wyżej wymienionych urazów znajdowało się na wysokości do 1,3 m nad powierzchnią podłoża. 67% stwierdzonych uszkodzeń stanowiły urazy o powierzchni do 100 cm², które, zdaniem wielu autorów publikacji w tym zakresie, drzewo jest w stanie zregenerować samodzielnie.

W Polsce badania nad powstawaniem uszkodzeń drzew pozostających na gruncie prowadzili m.in. Lewaszkiewicz i in. (2013). Metodą obserwacji bezpośredniej dokonali oni analizy ilości oraz wielkości szkód powstających w drzewostanie sosnowym w fazie trzebieży wczesnej i późnej, podczas pracy harwestera John Deere H1070D oraz forwardera TimberJack F1010B, kierowanych przez tego samego, doświadczanego operatora. W wyniku pracy harwestera w drzewostanie odnotowano występowanie uszkodzeń w postaci odsłoniętej bieli w ilości 55 szt/ha oraz ran na średniej wysokości pnia drzewa (uszkodzenia kory na wysokości 0,1-4,0 m od płaszczyzny gruntu) w liczbie 45 szt/ha. Z kolei szkody wyrządzone przez forwarder polegały głównie na odsłonięciu bieli (w ilości 2 szt/ha) oraz na zranieniu powierzchniowym dużym (całkowite zniszczenie warstwy kory na powierzchni >100 cm²) - 3 szt/ha. Najniższa liczba szkód dotyczyła złamanych gałęzi

oraz ran obwodowych. Dla porównania, prace zrywkowe z użyciem skidera LKT 81 powodowały odsłonięcie bieli w ilości 12 szt/ha oraz rany powierzchniowe duże w ilości 4 szt/ha.

Zdaniem Laurowa (1990), tak negatywny wpływ maszyn na środowisko leśne można jednak znacznie zminimalizować poprzez ograniczenie możliwości poruszania się maszyn wyłącznie do specjalnie wyznaczonych w tym celu szlaków technologicznych. W takich przypadkach negatywnym zmianom podlegać będzie jedynie 6-10% drzew na powierzchni zrębu (Laurow 1990).

Do istotnych wad maszynowego pozyskania surowca drzewnego należy również zaliczyć powstawanie wad na pobocznicach pozyskiwanego surowca, spowodowanych przesuwaniem pnia przez rolki prowadzące w głowicy harwestera. Ponadto, szkody na pobocznicach powstają także w wyniku działania noży okrzyszujących, co przy stosowaniu pilarek ręcznych nie ma miejsca. W przypadku okrzyszowywania maszynowego często odnotowuje się też powstawanie uszkodzeń technologicznych w postaci pęknięć oraz odłupów w surowcu. Okrzyszowywanie surowca z użyciem pilarki pozwala także na uzyskanie większej dokładności pracy, przejawiających się głównie w postaci sęków o niższej wysokości (Karaszewski et. al., 2016a; Karaszewski et. al., 2016b; Mederski et. al., 2019, Kusiak, Śliwiński 2014).

Jak podaje Hiesl (2013), systemu ścinkowego CTL (cut-to-length), stosowanego przez maszyny wielooperacyjne, nie powinno się stosować w przypadku drewna o dużej średnicy i wysokiej jakości, ze względu na zwiększone ryzyko uszkodzenia surowca oraz utratę jego wartości. Z tego samego powodu autor odradza maszynowe pozyskanie surowca cennego w drzewostanach zlokalizowanych na terenach o pochyleniu przekraczającym 30%.

Należy przy tym nadmienić, iż równoległe z rozwojem rynku maszyn wielooperacyjnych należy zadbać o rozwój regulacji prawnych, a także ukształtowanie odpowiednich sposobów zarządzania, wytycznych oraz praktyk, gwarantujących prowadzenie gospodarki leśnej w sposób zrównoważony i gwarantujący trwałość środowiska leśnego. Ma to związek z rosnącym zaniepokojeniem opinii publicznej oraz koniecznością złagodzenia sposobu postrzegania rzeczywistego wpływu zabiegów gospodarczych (głównie pozyskania oraz zrywki drewna) na środowisko leśne.

Kilgore i Blinn (2004) już w 2004r. ocenili, iż rozwój i stosowanie najlepszych praktyk zarządzania (tj. wytycznych) opartych na wiedzy naukowej, które mają na celu ochronę i poprawę ekologicznych, środowiskowych i estetycznych cech zasobów leśnych, jaki się dokonał na przestrzeni kilkudziesięciu lat, jest znaczący.

Z kolei Arthur i in. (1998) oraz Goychuk i in. (2011) wysnuli wnioski, iż właściwie stosowane sposoby zarządzania gospodarką leśną mogą nieść korzyści w zakresie ochrony

środowiska w miejscu prowadzenia prac i terenach przyległych oraz poprawić stan zdrowotny i produktywność lasu (Artur et. al. 1998; Goychuk et. al. 2011).

2.6. Sieć szlaków zrywkowych

Lindroos i in. (1993) już w latach 90. dwudziestego wieku zasugerowali, iż odległość pomiędzy szlakami operacyjnymi powinna wynosić nie więcej niż 20 m, co stanowi podwójną długość wysięgnika harwestera. W praktyce jednak, w Szwecji, Finlandii oraz Niemczech od lat 90. stosuje się odstępy między szlakami w zakresie 20-25 m (Froding 1992; Siren 1991, Forbrig 1994; Guglhor 1993).

Bort i in. (1993), badając zabieg trzebieży w drzewostanach świerkowych w wieku 20-45 lat, udowodnili, iż możliwe jest pozyskiwanie surowca drzewnego w terenie, gdzie odległość między szlakami zrywkowymi sięga 30, a nawet 40 m. W pierwszym przypadku, podczas realizacji badań, drzewa ścinano ręcznie w kierunku maszyny, która następnie dokonywała okrzesywania oraz obróbki surowca. W drugim przypadku koniecznym było dodatkowe dociąganie obalonych drzew w kierunku maszyny z użyciem wciągarek linowych. Na podstawie swoich badań autorzy określili, iż przy odstępach między szlakami kolejno 20, 30 i 40 m, relacja kosztów pozyskania oraz zrywki surowca wyniosła: 1:1,25 :1,70.

2.7. Pozyskanie surowca drzewnego w warunkach podgórskich i górskich

Jak zauważa Frutig i in. (2007), ze względu na zwiększone zapotrzebowanie rynku na drewno nie tylko okrągłe, ale także przemysłowe i bioenergię, rynek drewna z lasów położonych na terenach o dużych spadkach stale się rozwija. Choć obecnie są już dostępne nowoczesne techniki wydajnego pozyskania surowca, to jednak ich potencjał nie został do tej pory w pełni wykorzystany.

Mechanizacja prac leśnych na terenach podgórskich oraz górskich, ze względu na specyficzne warunki wzrostu drzew, zdaje się postępować wolniej, niż w przypadku terenów nizinnych. Poza oczywistym problemem, jaki napotykają użytkownicy maszyn pozyskaniowych na terenach podgórskich i górskich, w postaci dużych spadków terenu (Olund 2001, Alam et al. 2013, Strandgard et al. 2014), nierzadko dodatkowym problemem jest rodzaj podłoża glebowego - gleby ciężkie, gliniaste lub podłoża skalne (Amishev et al. 2009, Visser 2013), powierzchnia styku na linii gleba-maszyna (Horn i in. 2007), przeszkody terenowe w postaci gładów, pniaków oraz obalonych pni (Visser i Berkett (2015), budowa pionowa oraz pozioma drzewostanów (odległości pomiędzy drzewami, obecność drugiego

piętra drzewostanu), a także skład gatunkowy drzewostanów - obecność mocno ugałęzionych gatunków liściastych.

Jak podają Binder i Maier (2014), dodatkowym problemem ograniczającym rozwój mechanizacji prac leśnych w terenach wyżynnych jest trudność w zapewnieniu odpowiednich norm bezpieczeństwa dla pracowników, wykonujących pracę w tak specyficznych warunkach.

Doświadczenia z niektórych krajów o charakterystyce częściowo górskiej, takich jak Włochy, Austria oraz Szwajcaria, pokazują, iż pozyskanie surowca w warunkach górskich z użyciem harwesterów możliwe jest przy nachyleniu stoku do wartości 35% (ok. 20°) (Picchio et. al., 2012).

Stampfer (2016) wykazuje, iż wydajnym sposobem pozyskania surowca w warunkach o dużych spadkach jest praca harwestera w asyście liny stalowej, stabilizującej pracę maszyny. Także Naillon & Rappin (2018), realizujący badania terenowe w Stanie Waszyngton, USA, stwierdzili, iż maszynowe pozyskanie drewna jest możliwe na dużych spadkach terenu, o ile maszyna operacyjna wykonuje swoje zadania w asyście stalowej liny, zakotwiczonej wokół drzewa pomocniczego, wokół stacjonarnej maszyny bazowej z wciągarką lub na stałe w gruncie. Praca w takim systemie pozwala na zastąpienie pracy rąk aż sześciorga pracowników manualnych.

Maszyny do prac leśnych ze wspomaganie linowym są dostępne na europejskim rynku od lat 90. (Sebulke 2011), a wielu producentów oferuje wciągarki linowe, które są zintegrowane z maszyną lub stanowią oddzielny osprzęt (Sutherland 2012). Początkowo rozwiązanie to było stosowane głównie w forwaderach (Bombosch et al. 2003, Wratschko 2006), ale rozwój technologiczny stworzył także możliwości rozszerzenia tej technologii na harwestery (Sebulke 2011).

Binder i Maier (2014) podają, iż harwestery kołowe, wyposażone we wciągarki linowe wspomagające trakcję, są zdolne do pracy na gruntach o pochyleniu sięgającym 50%, a w przypadku maszyn o napędzie gąsienicowym - aż 65%.

Identyczną wartość maksymalnego spadku zbocza dla efektywnej pracy maszyny podają Visser & Stampfer (2015), przy czym zaznaczają oni, iż jest to wartość możliwa do osiągnięcia przez jednostki wyposażone w samopoziomującą kabinę.

Torgersen [2001] także zauważył, iż połączenie samopoziomującej kabiny ze specjalnie zaprojektowanym podwoziem gąsienicowym znacząco zwiększa możliwości operacyjne maszyn na stromych stokach.

Cavalli (2015) z kolei uważał, iż maszyny kołowe, wyposażone w łańcuchy trakcyjne, mogą pracować na spadkach terenu o wartości granicznej 45%, maszyny gąsienicowe do 60%, a harwestery w asyście linowej - od 75 aż do 85%.

Co ciekawe, Evanson i in. (2013) oceniają, iż powszechnie panujące przekonanie o tym, iż to liny zapewniają maszynie stabilność na zboczach i ich brak powodowałby niemożliwość pracy w takich warunkach, jest błędna. Zdaniem badaczy, zadaniem lin asystujących jest tylko i wyłącznie polepszenie trakcji maszyny.

Opinię tę zdają się potwierdzać wyniki badań opisane przez Visser'a i Stampfer'a (2015), zrealizowane na terenie Australii i Nowej Zelandii, którzy wykazali, iż napięcie liny asystującej podczas poruszania się maszyny na dużych spadkach jest zdecydowanie większe, niż podczas jej pracy w pozycji stacjonarnej. Autorzy sugerują także, iż większość wypadków związanych z przewróceniem się maszyn na stokach o dużym nachyleniu nie jest spowodowana samym wychyleniem maszyny, a nagłą utratą przyczepności przez jej układ napędowy i niekontrolowany wzrost pędu.

Badania nad skutecznością pracy maszyn na stromych stokach prowadzono także na Półwyspie Malezyjskim, przy czym skupiono się tu na skuteczności samej zrywki surowca. Oceniono, iż tradycyjna zrywka maszynami kołowymi oraz gąsienicowymi pozwala na osiągnięcie wydajności na poziomie 45,98 m³/h. Badacze zasugerowali jednak, iż bardziej wydajne oraz korzystniejsze dla środowiska będzie jednak oparcie systemu zrywki na stacjonarnym ciągniku gąsienicowym, wyposażonym we wciągarkę linową. Udowodniono, iż maszyna RIMBAKA R2020-A Timber Harvester jest w stanie osiągać nie tylko wyższą wydajność pracy (46,39 m³/h), ale także czynić mniejsze szkody w podłożu glebowym, z uwagi na jej stacjonarny charakter pracy podczas podciągania surowca.

Należy jednak pamiętać, iż wraz ze wzrostem nachylenia stoku wydajność pracy maszyn może się zmniejszać. Stampfer (1999) już w 1999r. w swoich badaniach wykazał, iż zwiększenie spadku stoku, na którym pracował harwester Königstiger, z wartości 25% do 50%, poskutkowało spadkiem wydajności pracy maszyny z 25m³/h do 18m³/h.

2.8. Budowa i sposób działania głowicy harwesterowej

Poniższa fotografia (ryc. 7) przedstawia budowę typowej głowicy harwesterowej, stosunkowo prostej w konstrukcji i bez nowoczesnych elementów wyposażenia:



Ryc. 7. Opis budowy typowej głowicy do maszynowego pozyskiwania surowca drzewnego:

1 – stały lub pływający nóż okrzesujący, 2 – ruchome noże okrzesujące, 3 – rolki do posuwu surowca, 4 – piła łańcuchowa, 5 – kółko pomiarowe (źródło: archiwum prywatne autora)

Podstawę budowy głowicy stanowi rama stalowa lub żeliwna, do której zamontowano wszystkie elementy układu operacyjnego. Na w/w układ składa się jeden stały lub pływający nóż okrzesujący (1), zlokalizowany na jej wewnętrznej stronie, oraz dwa lub cztery

półkuliście ukształtowane, ruchome noże okrzesujące (2). Ich położenie jest regulowane za pomocą układu hydraulicznego maszyny, celem jak najlepszego dostosowania ich kształtu do zmiennej średnicy surowca. Noże ruchome pełnią także funkcję chwytaka. Odcinanie gałęzi od pnia drzewa następuje wskutek przesuwania surowca wewnątrz głowicy z wykorzystaniem dwóch lub czterech hydraulicznie wychylanych rolek, zwanych także taśmami (3), wyposażonych w kolce, zapewniające ich przyczepność do pobocznic pnia.

Gałęzie drzewa, napotykać na ostrza noży tnących z odpowiednią siłą, zostają odcięte. Po okrzesaniu surowca operator dokonuje sortymentacji pnia z użyciem sterowanej hydraulicznie piły łańcuchowej, zlokalizowanej poniżej dolnych noży okrzesujących (4). W trakcie realizacji procesu obróbki każdej z kłód, system komputerowy dokonuje automatycznego pomiaru miąższości surowca. Do pomiaru średnicy pnia system wykorzystuje dane o kącie wychylenia noży okrzesujących, natomiast długość sortymentu jest mierzona za pomocą zębatego kółka pomiarowego, zlokalizowanego po wewnętrznej stronie głowicy (5).

Cała głowica jest zawieszona za pomocą ruchomego uchwytu na rotatorze, zdolnym do obracania głowicą w zakresie do 360 stopni. Rotator z kolei zamocowany jest do żurawia hydraulicznego, osadzonego przed kabiną operatora na podwoziu kołowym lub gąsienicowym. Co prawda istnieją na rynku inne rodzaje podwozi dla maszyn operacyjnych (np. kroczące lub z łapami pomocniczymi), niemniej jednak ich udział w rynku stanowi wartość marginalną lub są to maszyny w fazie prototypowej.

Dziś, poza ścinką, okrzesywaniem oraz przerzynką surowca drzewnego, nowoczesne głowice harwesterowe zdolne są także do jego korowania, znakowania sortymentów farbą, a nawet opryskiwania pniaków środkami chemicznymi. Niemniej jednak, zasada funkcjonowania głowic nie zmieniła się od początków powstania w/w urządzenia i jej rozwój stanowi raczej stale postępującą ewolucję, niż gwałtowną rewolucję.

Obecnie działania producentów głowic skupiają się głównie na ulepszaniu istniejących rozwiązań, niż poszukiwaniu nowych. Jak zauważają Sowa i in. [2013], na przestrzeni ostatnich lat producenci powielają trend modyfikacji głowic w kierunku zdecydowanej redukcji ich masy, przy jednoczesnym zachowaniu niezmiennych parametrów maksymalnej średnicy okrzesywanego surowca czy prędkości posuwu drewna w głowicy.

2.9. Dokładność automatycznego pomiaru długości surowca

W obecnie stosowanych głowicach maszyn wielooperacyjnych pomiar długości produkowanych sortymentów odbywa się poprzez obrót kółka pomiarowego zamontowanego w głowicy, występujący w momencie posuwu surowca przez noże okrzesujące podczas jego obróbki. Oprogramowanie w komputerze sterującym głowicą, analizując ilość obrotów kółka pomiarowego oraz jego średnicę, oblicza długość surowca przesuniętego pomiędzy nożami okrzesującymi. Rozwiązanie to sprawdza się w sposób zadowalający w przypadku słabo ugałęzionych drzew iglastych, gdzie proces okrzesywania kłód nie wiąże się z występowaniem poślizgu pomiędzy powierzchnią surowca, a kółkiem pomiarowym.

Mederski i in. (2018) zauważają, iż okrzesywanie maszynowe surowca drzewnego liściastego wymagać będzie dokonania kalibracji oraz przeprogramowania układu automatycznego pomiaru długości kłód w głowicach harwesterowych, ze względu na niedokładność pomiaru w/w parametru, wynikającą z falistości pnia oraz znacznie wyższej masy surowca. Autorzy, z użyciem taśmy mierniczej, dokonali pomiaru długości kłód dębu szypułkowego (*Quercus robur* L.), pozyskanych w ramach trzebieży w 61-letnim drzewostanie dębowym na terenie Nadleśnictwa Lidzbark, z wykorzystaniem harwestera Ponsse Ergo, wyposażonego w głowicę H7. Z uzyskanych przez nich danych wynika, iż, w zależności od gabarytów oraz masy okrzesywanego surowca oraz od poszczególnych sekcji pnia, wyniki pomiaru taśmą w różnym stopniu odbiegają od wartości zaplanowanej w komputerze sterującym pracą głowicy. Wykazano, iż wraz ze wzrostem gabarytów oraz masy manipulowanego surowca, zwiększa się tendencja układu do produkcji kłód o zawyżonej długości, zwłaszcza w dolnej, odziomkowej (najcięższej) części kłód. Zadowalającą dokładność pomiaru długości surowca uzyskiwano tylko w środkowej części pnia. W części szczytowej zaś, wraz ze wzrostem gabarytów drzew, wzrastał udział części całkowicie niepoddanej okrzesywaniu, z uwagi na zwiększającą się grubość gałęzi oraz występowanie pierwszych gałęzi już na stosunkowo niskiej wysokości.

W/w obserwacje znajdują potwierdzenie w badaniach Bembenka i in. (2015), którzy wykazali największą rozbieżność pomiędzy pomiarem ręcznym oraz automatycznym, także w przypadku odziomkowej części kłód drewna brzozy brodawkowatej (*Betula pendula* Roth) oraz topoli osiki (*Populus tremula* L.).

Z kolei Nieuwenhuis i Dooley (2006) dokonali podobnych analiz, obierając za cel badań dokładność automatycznego pomiaru długości kłód świerka sitkajskiego (*Picea sitchensis* (Bong.) Carrière). Pomiaru dokonano zarówno w części odziomkowej pnia, jak i środkowej oraz szczytowej. We wszystkich przypadkach wartości uzyskane po pomiarze

taśmą były niższe od wartości wprowadzonych do komputera maszyny. Co istotne, w przypadku tego gatunku rozbieżności częściej odnotowywano w środkowej i szczytowej części pnia, gdzie sięgały one wartości nawet 7%. Jak zasugerowali autorzy, miało to związek ze zwiększonym poślizgiem kółka pomiarowego w głowicy w obrębie nierówności pnia po odciętych gałęziach.

2.10. Maszynowe pozyskanie surowca drzewnego liściastego

Zdecydowana większość dostępnych na rynku głowic harwesterowych, ze względu na ograniczenia technologiczno-materiałowe, wykazuje skuteczność niemal wyłącznie w przypadku obróbki drewna iglastego. Jednak w przypadku drzew liściastych, charakteryzujących się obecnością grubych i twardych gałęzi w koronie, wyrastających pod bardziej ostrym kątem, takie głowice wykazują nie tylko wyraźnie mniejszą skuteczność (Cacot, 2009), ale także spadek wytrzymałości i trwałości noży tnących (Dargnat et al., 2014).

Jak zauważają Mederski i in. (2022), poza mocniej rozbudowanymi koronami, drzewa liściaste charakteryzują się także większą gęstością, a tym samym twardością drewna, niż gatunki iglaste. W przypadku buka zwyczajnego (*Fagus sylvatica* L.), najpowszechniej występującego gatunku liściastego w Niemczech, gęstość drewna wynosi $\sim 753 \text{ kg/m}^3$ przy wilgotności 12%. (Gryc i in., 2008), podczas gdy dla świerka pospolitego (*Picea abies* (L.) Karst.) - najbardziej istotnego komercyjnie gatunku drewna iglastego w Europie - gęstość wysuszonego drewna kształtuje się na poziomie 438 kg/m^3 (Bergqvist, 2008).

Sporym wyzwaniem dla obecnych badaczy jest opracowanie takiej głowicy harwesterowej, która będzie zdolna do obróbki zarówno drewna iglastego, jak i liściastego, bez utraty jakości surowca, wydajności zmianowej pracy oraz trwałości maszyny i poszczególnych komponentów układów tnących. Ma to szczególne znaczenie w krajach Europy Środkowej oraz krajach nadbałtyckich, gdzie znaczny udział procentowy w powierzchni leśnej stanowią lasy mieszane z gatunkami liściastymi w składzie. W takich warunkach drzewostanowych relokacja maszyn pomiędzy powierzchniami iglastymi generuje straty finansowe, spadek efektywności wykorzystania czasu pracy oraz negatywny wpływ na środowisko naturalne (Mederski i in., 2009).

Pierwsze wzmianki o wykorzystaniu harwesterów do pracy z gatunkami liściastymi sięgają połowy lat 90. XXw., kiedy to we Francji pozyskiwano m.in. buka, graba, dęba oraz brzozę z wykorzystaniem harwestera Sifor 614 (Martin et. al. 1996; Sionneau, Cuchet 2001). W podobnym okresie eksperymentowano z maszynowym pozyskaniem brzozy w Finlandii oraz eukaliptusa w Hiszpanii (Kuitto et. al. 1994; Spinelli et. al. 2002; Nurminen et. al. 2006). Niemniej jednak, tematyka ta była poruszana raczej w sposób sporadyczny. U schyłku 1999r.

nastąpił swoisty przełom w tej tematyce, choć niestety w tragicznych okolicznościach: w dniach 26-28 grudnia 1999 roku przez Francję, Belgię, Luksemburg oraz Niemcy przetoczył się cyklon Lothar, powodując śmierć 110 osób oraz potężne szkody nie tylko materialne, ale także przyrodnicze. Konieczność zapewnienia maksymalnego bezpieczeństwa ochrony zdrowia i życia pracujących na powierzchniach ludzi oraz szybkiego i skutecznego uprzątnięcia powierzchni zniszczonych przez huragan sprawiła, iż do prac zaangażowano maszyny wielooperacyjne z odpowiednio zmodyfikowanymi głowicami, (Bigot, 2001).

W 2003 r. Bigot i Cuchet opublikowali wyniki badań, w których zbadali przydatność 40 harwesterów z głowicami pierwotnie zaprojektowanymi dla drzew iglastych do obróbki surowca liściastego. Część z nich była zaadaptowana do pracy z drzewami liściastymi. W wyniku przeprowadzonych badań wykazano, iż w przypadku obróbki drzew liściastych głowice osiągały wyraźnie niższą produktywność prac, jednocześnie wymagając częstszego serwisowania, niż przy pracy na surowcu iglastym.

Na przestrzeni ostatnich 15 lat zrealizowano wiele projektów badawczych, mających na celu zaprojektowanie głowicy zdolnej do pracy w drzewostanach liściastych. Badania takie realizowali pracownicy naukowcy z uczelni niemieckich, francuskich oraz polskich. Obecnie ilość inicjatyw związanych z tym zagadnieniem wyraźnie spadła, niemniej jednak Mederski i in. (2022) zdecydowanie rekomendują tworzenie nowych, z uwagi na rosnący udział drzew liściastych w składach gatunkowych drzewostanów oraz znaczny udział systemu CTL w sposobie przetwarzania surowca.

Jak sugerują Buras i Menzel (2018), typowe także dla Polski gatunki iglaste, takie jak sosna zwyczajna (*Pinus sylvestris* L.) oraz świerk pospolity (*Picea abies* (L.) to drzewa uznawane za wrażliwe na zmieniające się warunki klimatyczne, przez co wraz ze zmianami globalnymi ich zasięg występowania w lasach środkowoeuropejskich ma się znacznie zmniejszyć. Jednocześnie, dotychczas zajmowane przez nie tereny mogą charakteryzować się warunkami nieco bardziej odpowiednimi dla wzrostu gatunków drzew liściastych: zdaniem autorów buk zwyczajny (*Fagus sylvatica* L.) i dąb szypułkowy (*Quercus robur* L.) mogą w coraz większym stopniu wykazywać cechy dominantów w dużej części Europy Środkowej.

Analizując techniki pozyskania surowca drzewnego we Francji zauważono, iż w latach 2008-2015 nastąpił wzrost wydajności maszyn przeznaczonych do pozyskiwania drewna liściastego w stosunku do lat 2000-2007 o 22,7%. Niemniej jednak, wskaźnik mechanizacji prac przy pozyskaniu drewna liściastego, podobnie jak dynamika jego zmian, wciąż pozostaje

na niskim poziomie - stanowi ono zaledwie 15% całego pozyskania w latach 2008-2015, wobec 13% w latach 2000-2007.

Wobec braku na rynku maszyn wyspecjalizowanych w pozyskaniu surowca drzewnego liściastego, we Francji zbadano możliwość stosowania do tego celu odpowiednio zmodyfikowanych koparek, wyposażonych w głowice ścinkowe. Wykazano jednak, iż stosowanie głowic zaprojektowanych do pozyskiwania drewna iglastego do pracy z surowcem liściastym charakteryzuje się znacznie niższą wydajnością pracy: w trakcie badań udowodniono, iż maksymalna roczna wydajność pracy takiego urządzenia wyniesie około 14 000 m³, podczas gdy dla drewna iglastego wartość ta wyniesie około 23 500 m³ (Maire i in. 2016; Bonnemazou i in. 2018).

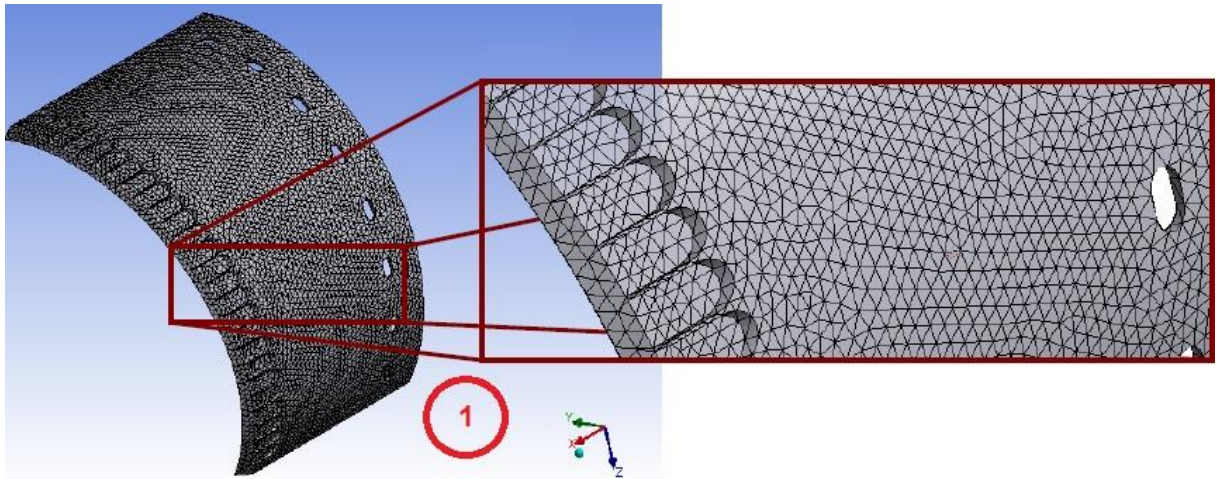
W 2014r. Slużeń i in. (2014), badając możliwość zastosowania harwestera John Deere 1070D do pracy przy pozyskaniu surowca w ramach realizacji cięć trzebieżowych w drzewostanach liściastych z udziałem buka oraz dębu bezszypułkowego w wieku ok. 50 lat, odnotowali wydajność maszyny na poziomie 9,97 m³/rbh przy pozyskaniu dębu oraz 6,36 m³/rbh w przypadku buka. Autorzy badań ocenili, iż niższa produktywność przy pozyskaniu buka spowodowana była obecnością licznych i grubymi konarów oraz częstą obecnością drzew o silnie rozbudowanych koronach. Przy ocenie organizacji pracy na powierzchniach roboczych za istotną wadę uznano brak pracownika z piłą łańcuchową, który często jest niezbędny przy pracy maszyn wielooperacyjnych w drzewostanach liściastych.

Według Rosińskiej i in. (2022), z powodzeniem możliwa jest realizacja procesu pozyskania surowca brzozy brodawkowatej (*Betula pendula* Roth) w sposób zmechanizowany. Badania przeprowadzono na stanowiskach w północnej i północno-zachodniej części Polski, na terenie Regionalnych Dyrekcji Lasów Państwowych w Szczecinie, Poznaniu, Toruniu, Gdańsku oraz Olsztynie. Na 16 powierzchniach roboczych przeprowadzono łącznie 21 pomiarów, do których wykorzystano 9 maszyn wielooperacyjnych typu harwester. Wydajność prac określono na wartość średnią 21,98 m³/rbh, przy średniej średnicy ściętych drzew na poziomie 23,7 cm oraz wysokości średniej 21,7 m.

Z kolei Labelle i in. (2018) zbadali możliwość wykorzystania ciężkich harwesterów, stosowanych dotychczas przy pracy w dojrzałych drzewostanach iglastych, obfitujących w drzewa o średnicach 75-110 cm, do realizacji cięć prześwietlających w bawarskich drzewostanach liściastych i mieszanych. Gatunkami docelowymi były buk zwyczajny oraz dąb szypułkowy (*Quercus robur* L.) i bezszypułkowy (*Q. petraea* (Matt.) Liebl.), które na badanych powierzchniach osiągały średnice na poziomie 39-51 cm.

Do realizacji zabiegu wybrano cztery maszyny wielooperacyjne, z czego dwie posiadały tradycyjne systemy trakcyjne (układy 6- oraz 8-kołowe), a pozostałe dwie były wyposażone w systemy gąsienicowe. Na wszystkich czterech powierzchniach próbnych wykonano zabieg hodowlany polegający na cięciu regeneracyjnym, którego celem było usunięcie około 25% miąższności drzew stojących. Podczas realizacji badań autorom udało się zmierzyć średnią wydajność pracy maszyn na stosunkowo wysokim poziomie: od 29,1 m³/rbh aż do 43,4 m³/rbh.

Zdaniem Dargnat G. i in. (2014), najskuteczniejszym sposobem na osiągnięcie sukcesu w kwestii maszynowego pozyskania surowca liściastego jest optymalizacja kształtu i grubości noży pasywnych, obecnie powszechnie używanych na rynku tego typu maszyn. Autorzy zasugerowali stosowanie noży o jak najniższej grubości, celem minimalizacji sił skrawania, niezbędnych do odcięcia gałęzi. Miałoby to pozwolić na zmniejszenie sił tarcia występujących podczas cięcia, a także zwiększenie nacisku noża na włókna drewna, które są skrawane przez jego krawędź tnącą. Jednakże, zmniejszenie grubości noży wiąże się bezpośrednio z utratą ich sztywności i występującymi deformacjami materiałowymi. Badacze przetestowali kilka rodzajów noży okrzesujących, różniących się grubością oraz kątem ich natarcia na odcinane gałęzie. Badania laboratoryjne oraz późniejsze testy terenowe z głowicą harwesterową Kesla 25RH wykazały, iż zastosowanie noży o zmniejszonej grubości, dodatkowo wzmocnionych specjalnym uźebrowaniem w górnej sekcji (ryc. 8), powoduje spadek energii skrawania oraz wzrost wydajności pracy głowicy nawet do 40%.



Ryc. 8. Zmodernizowany kształt noży okrzesujących, mający na celu poprawę skuteczności pracy głowicy w drzewostanach liściastych:

1 – etap projektowania z użyciem oprogramowania 3D, 2 – testowanie uźebrowanych noży okrzesujących

w warunkach terenowych (źródło: Dargnat G. i in. 2014)

Z kolei Cacot i in. (2016) wykazali w swych badaniach, iż użycie noży żebranych może doprowadzić do wzrostu wydajności samego procesu okrzyszania o 21%, chociaż wzrostu ogólnej wydajności całokształtu prac maszyny na powierzchniach próbnych nie zdołali statystycznie udowodnić.

Rukomojnikov i in. (2019) zaproponowali nieco bardziej złożone rozwiązanie: otóż dla zwiększenia skuteczności procesu okrzyszania surowca oraz jednoczesnej redukcji zużywanego w tym procesie energii, zaproponowali zastosowanie w głowicy mechanizmów znanych m.in. z młotów pneumatycznych. Zasada działania układu polega na wytworzeniu

przez obracające się koło pomiarowe w głowicy, poprzez koła zębate, ruchu posuwistozwrotnego popychacza w cylindrze, który sprężając powietrze powoduje ruch pracującego w nim tłoka. W krańcowym położeniu tłok uderza w stalowy pręt, połączony bezpośrednio z nożem okrzesującym poza cylindrem. W momencie uderzenia, wytworzona w układzie energia jest przenoszona na nóż okrzesujący, ułatwiając mu odcinanie gałęzi. Co ciekawe, badacze zapewniają możliwość dostosowania energii noża do odcinania gałęzi do różnych grubościach poprzez zmianę kół zębatach pomiędzy kołem pomiarowym, a popychaczem. Zaproponowane przez w/w badaczy rozwiązanie znajduje jednak zastosowanie wyłącznie w przypadku stałego noża okrzesującego w górnej części głowicy.

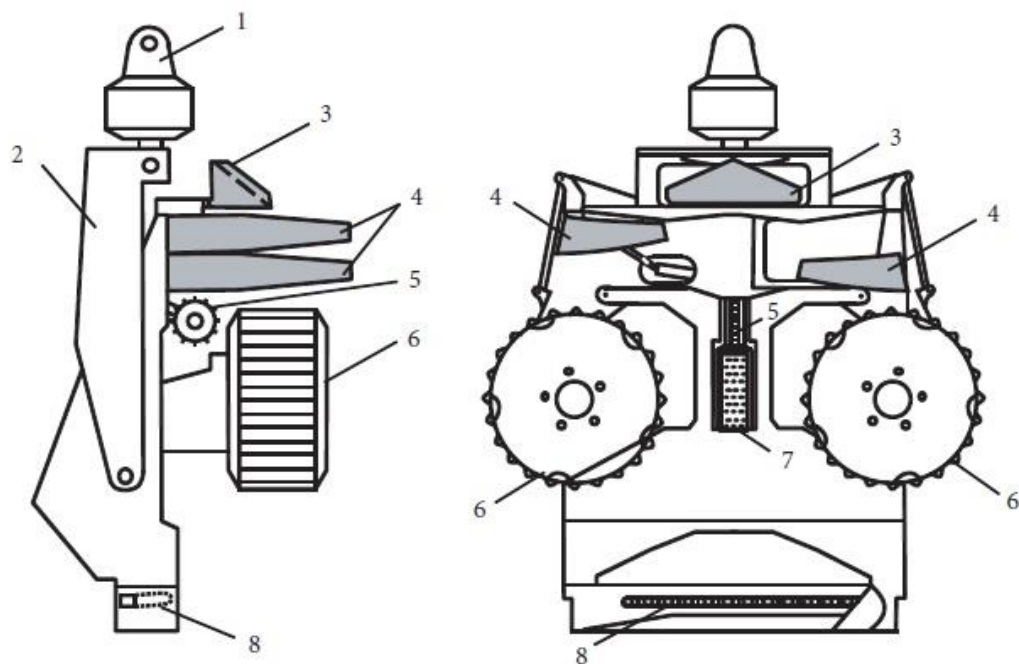
Inne z rozwiązań, mające na celu zmniejszenie energii skrawania noża, przebadali Astathev i Krupenin (2005). Autorzy zaproponowali wspomaganie procesu okrzesywania wibracjami, wytworzonymi z wykorzystaniem technologii ultradźwiękowej. Technologia ta charakteryzuje się wysoką wydajnością oraz produktywnością przy niewielkim wydatku energetycznym. Badania nad cięciami wspomaganymi ultradźwiękami wykonał także Sinn i inn. (2005) na różnych gatunkach drewna, zarówno w stanie suchym jak i mokrym. Wykazano redukcję sił skrawania aż o 50% w stosunku do cięcia konwencjonalnego. Wynik ten osiągnięto przy 8 μm amplitudzie wibracji (Sinn et. al., 2005). Jednakże złożoność budowy ultradźwiękowych systemów oscylacyjnych, koszt ich budowy oraz wysoka awaryjność sprawiają, iż systemy te nie znalazły szerszego zastosowania w maszynach leśnych (Adikov, 2007) i należy je rozpatrywać w kategorii ciekawostek.

Goubet i in. (2013) zauważają, iż skuteczność okrzesywania surowca przy użyciu głowic z mechanizmem chwytającym pnie w sposób koncentryczny maleje wraz ze zmniejszającą się średnicą pnia, co ma związek z wyraźnym spadkiem siły nacisku noży na okrzesywany pień. Autorzy prowadzą badania nad rozwiązaniami dostosowującymi kinematykę mechanizmów chwytających do średnicy okrzesywanych pni.

Z kolei Hatton B. i in. (2017), prowadzący szereg badań w ramach programu ECOMEF, zauważają, iż w procesie okrzesywania surowca liściastego problem stanowi nie tylko mocno ugałęziona korona, ale także falistość powierzchni pnia oraz jego krzywizny wielostronne. Z tego właśnie powodu posuw surowca w głowicy nie może być tak szybki i gwałtowny jak w przypadku surowca iglastego, toteż siła uderzenia noży w okrzesywane gałęzie może się okazać niewystarczająca. Autorzy, z wykorzystaniem modeli matematycznych i symulacji komputerowych, prowadzą badania nad zaprojektowaniem elementów głowicy, m. in. kolców na powierzchni rolek prowadzących oraz przekładni, dostosowanych do pracy z falistymi pniami drzew.

Bolding i Lanford (2002) przeprowadzili analizę wydajności harwestera Ponsse Ergo, wyposażonego w głowicę H73, w mieszanych drzewostanach sosnowo-liściastych na terenie Północnej Georgii, w Stanach Zjednoczonych. Badania przeprowadzono na pięciu poletkach badawczych o całkowicie odmiennych warunkach drzewostanowo-terenowych. Spadki terenu wahały się w zakresie od 0 do 46%, określonego przez autorów jako ekstremalny. Autorzy zbadali czas realizacji poszczególnych etapów obróbki surowca (ścinka, okrzesywanie, przerzynka) i wykazali, iż nachylenie stoku miało bezpośredni wpływ na wydajność pracy maszyny. Co ciekawe, analiza statystyczna danych wykazała, iż zmienność gatunkowa drzew była nieistotna w odniesieniu do czasu obróbki surowca, co oznacza, iż w/w maszyna, przy pozyskaniu surowca liściastego, wykazywała się podobną skutecznością, jak podczas obróbki surowca sosnowego. Autorzy zaznaczyli jednak, iż zarządca terenu, na którym prowadzono badania, podjął decyzję o rezygnacji z okrzesywania mocno ugałęzionych koron i pozostawieniu ich na podłożu glebowym, celem ochrony gleby przed erozją.

Próby opracowania głowic harwesterowych do pracy z gatunkami liściastymi podejmują także znani i cenieni producenci maszyn do prac leśnych. Dużym zainteresowaniem podmiotów, realizujących prace z zakresu usług leśnych, cieszy się głowica CTL 40 HW, zaprojektowana celowo do pracy z surowcem liściastym (ryc. 9):



Ryc. 9. Schemat budowy głowicy CTL 40 HW, przeznaczonej do pracy w drzewostanach liściastych: 1 – rotator; 2 – rama głowicy; 3 – elastyczny górny nóż okrzesywający; 4 – jedna para ruchomych noży okrzesywających; 5 – kółko do pomiaru długości kłód; 6 – rolki prowadzące surowiec; 7 – koło do posuwu surowca, 8 – ruchoma prowadnica z piłą łańcuchową (źródło: Zinkevičius et. al. 2012)

Jej rzekoma zdolność do pracy z mocno ugałęzionymi drzewami wynika z zachowania relatywnie krótkiej formy, osiągniętej przez zastosowanie w jej konstrukcji wyłącznie jednej pary noży okzesujących, wspieranych przez elastyczny górny nóż okzesujący. Poza tym, jak sugeruje producent, głowica została wyposażona w układ hydrauliczny zoptymalizowany pod kątem cięcia grubych i stromo wznoszących się gałęzi drzew liściastych. Co ciekawe, podczas badania skuteczności w/w rozwiązań w mieszanych drzewostanach liściastych w Litwie, autorom badań udało się wykazać skrócenie czasu pracy względem pracy ręcznej z użyciem pilarki aż o 70%. Należy jednak zaznaczyć, iż dokładność pomiaru długości kłód przy pracy maszynowej była wyraźnie niższa, niż przy pracy ręcznej (Zinkevičius et. al. 2012, Mederski et. al., 2011).

We wcześniejszych badaniach przeprowadzonych przez Mederskiego i in. (2011) udowodniono, iż podczas realizacji trzebieży w drzewostanach liściastych mieszanych (głównie brzożowych) w Polsce, wykonywanych z użyciem w/w głowicy, osiągnięto ogólną wydajność pracy maszyny na poziomie 13,40 m³/rbh.

Z danych producenta wynika jednak, iż maksymalna średnica surowca drzewnego, przetwarzanego przez głowicę, wynosi 45 cm, co oznacza, iż w/w maszyna znajduje zastosowanie niemal wyłącznie w drzewostanach młodszych klas wieku, podczas zabiegów trzebieży wczesnych oraz późnych.

Znacznie wyższą produktywność Mederski uzyskał przy pozyskaniu 46- i 61-letniej brzozy, przy użyciu harwestera Sampo Rosenlew 1066, wyposażonego w głowicę Keto 150LD. Wydajność pracy maszyny użytej podczas badań wyniosła odpowiednio 26,95 m³/rbh oraz 40,46 m³/rbh.

Całkowicie odmienne podejście do projektowania rozwiązań technicznych, umożliwiających pracę maszyn w drzewostanach liściastych, zaprezentowała firma John Deere, o czym autor niniejszej rozprawy miał okazję przekonać się osobiście. Podczas realizacji cięć trzebieżowych w drzewostanach mieszanych ze znacznym udziałem buka zwyczajnego oraz jodły pospolitej w okolicy Lyonu we wrześniu 2019r., przedstawiciel w/w firmy na Francję zaprezentował delegacji z Polski głowicę H290, zagregowaną z harvesterem JD 1470E, wyspecjalizowaną w pozyskaniu surowca liściastego (ryc. 10):



Ryc. 10. Głowica John Deere H290, przystosowana do pracy z surowcem liściastym: 1 - dodatkowa piła łańcuchowa w górnej sekcji ramy; 2 - noże okrzesujące o zwiększonej wysokości; 3 - rolki prowadzące o wydłużonych kołcach chwytynych (źródło: archiwum prywatne autora)

Zupełnie odwrotnie niż w przypadku głowicy CTL 40 HW, maszyna firmy John Deere uległa wyraźnemu wydłużeniu w kierunku pionowym. Przyczyną takiego stanu rzeczy było zastosowanie drugiej piły łańcuchowej do manipulacji surowca (oznaczonej na rycinie numerem 1), tym razem zlokalizowanej w górnej sekcji ramy głowicy. Jej zadaniem jest odcinanie surowca w miejscu zlokalizowanym jak najbliżej mocno ugałęzionej korony, której maszyna nie była już w stanie okrzesać. Ponadto, przystosowanie głowicy do pracy z surowcem liściastym przejawiało się także w zastosowaniu górnych ruchomych noży okrzyszujących o zwiększonej wysokości w stosunku do noży dolnych (numer 2 na rycinie), w celu skutecznego wcinania ostrza w strukturę grubych gałęzi w sekcji koronnej pnia. Dodatkowo producent zastosował rolki prowadzące pień o zwiększonej długości kolców chwytnych dla polepszenia przyczepności rolek do surowca. Co ciekawe, przedstawiciel firmy John Deere zapewniał, iż takie rozwiązanie, z uwagi na znacznie mniejszy nacisk jednostkowy rolek na pobocznice pnia, generuje znacznie mniej uszkodzeń surowca, niż w przypadku tradycyjnego rozwiązania.

Prezentacja powyższych rozwiązań miała jednak charakter kilkogodzinnego pokazu pracy maszyn w warunkach rzeczywistych, gdzie możliwym było dokonanie jedynie organoleptycznej oceny skuteczności zastosowanych w głowicy rozwiązań. Producent nie przedstawił słuchaczom żadnych wyników badań lub analiz, potwierdzających słuszność wprowadzonych założeń lub chociażby ocenę produktywności urządzenia. Niemniej jednak, wzrokowa ocena zarówno trwających prac jak i produktu końcowego procesu ścinki i okrzyszowania pozwalała stwierdzić zadowalającą skuteczność pracy w/w głowicy. Należy jednak zauważyć, iż wprowadzenie górnej piły łańcuchowej do głowicy stanowi niejako doraźny sposób na uniknięcie problemu okrzyszowania gałęzi z sekcji koronnej. Sama piła ma za zadanie odciąć surowiec w miejscu jak najwyższym, poniżej linii najgrubszych gałęzi w koronie, przez co produkt końcowy jest dłuższy o samą wysokość ramy urządzenia. Nie ma ona jednak wpływu na skuteczność okrzyszowania pnia w części koronnej. Pozostałe rozwiązania adaptujące głowicę do drzewostanów liściastych zdawały się wykazywać zadowalającą wydajność pracy z osobnikami buka pospolitego o średnicy maksymalnej na poziomie 21-23cm.

Należy jednak pamiętać, iż powyższa ocena ma charakter subiektywnego odczucia autora jako jednego z odbiorców prezentacji.

Celem dokonania wyboru jak najskuteczniejszego rozwiązania technicznego przy pracach w drzewostanach liściastych i mieszanych, w latach 2013-2016 zrealizowano w Polsce obszerny projekt badawczy na zlecenie Państwowego Gospodarstwa Leśnego Lasy Państwowe. Szczegółowym celem w/w badań było dokonanie przeglądu oferowanego na rynku asortymentu oraz wyłonienie maszyn wielooperacyjnych, zdolnych do wyrębu i obróbki drewna czterech najpospolitszych i najważniejszych gospodarczo gatunków liściastych w kraju: dębu, buka, brzozy oraz olszy. Badania przeprowadzono w drzewostanach w wieku 40-80 lat. Podczas realizacji projektu dokonano zestawienia maszyn 11 producentów, zagregowanych w różnych kombinacjach z 11 głowicami. Na 60 powierzchniach próbnych, zlokalizowanych w północnej części Polski, zrealizowano badania, podczas których przeanalizowano m.in. wydajność pracy maszyn, koszty ich użytkowania, maksymalny stopień wykorzystania pni do przetworzenia, dokładność pomiaru długości surowca, jakość okrzesywania kłód oraz stopień ich uszkodzenia. Najlepszymi wynikami charakteryzowały się zestawy wykorzystujące głowice marki Waratah, Ponsse oraz Valmet. Średnia produktywność odnotowana na wszystkich analizowanych powierzchniach wyniosła 15,77 m³/rbh, a w przypadku drzewostanów dębowych o średniej pierśnicy 28 cm, udało się osiągnąć wydajność maksymalną pracy na poziomie 36,16 m³/rbh. Wykazano także, iż, w wyniku trudności w okrzesywaniu koron drzew, dla drzew liściastych pozostawia się niewykorzystane wierzchołki drzew o większych średnicach, w porównaniu z gatunkami iglastymi. Wynikiem realizacji w/w projektu było m.in. spopularyzowanie wykorzystania maszyn wielooperacyjnych do pozyskania drzew liściastych w Polsce i przekonanie właścicieli lasów oraz przedsiębiorców realizujących usługi leśne do rozważenia szerszego wykorzystania tego typu maszyn w drzewostanach liściastych lub mieszanych (Mederski i in. 2022).

Wszystkie rozwiązania, przedstawione w powyższych rozważaniach, mają jedną cechę wspólną: opierają się na zastosowaniu rozwiązań statycznych, mających na celu obróbkę surowca w sposób analogiczny do drzew iglastych, a zatem w sposób pasywny. Autor niniejszego opracowania, w odróżnieniu do cytowanych wyżej badaczy, do okrzesywania surowca drzewnego liściastego zaproponował wykorzystanie głowicy pracującej w sposób aktywny, tj. z wykorzystaniem ruchomych elementów dokonujących aktywnego skrawania gałęzi.

3. Cel i zakres pracy

Pośrednim celem niniejszej rozprawy jest publiczne zaprezentowanie oraz próba wykazania skuteczności działania zbudowanego autorskiego prototypu głowicy okrzesującej GO-01, dokonującej procesu okrzesywania surowca drzewnego w sposób aktywny. Rozwiązania zastosowane w prototypie głowicy, po ewentualnym wykazaniu skuteczności ich działania, mogłyby potencjalnie, po dopracowaniu, rozwinięciu i zmaksymalizowaniu ich efektywności, znaleźć zastosowanie w konstrukcji głowic wielooperacyjnych do pozyskiwania surowca liściastego.

Bezpośrednim celem rozprawy jest porównanie tempa okrzesywania surowca drzewnego w sposób aktywny (z wykorzystaniem w/w prototypu głowicy) z okrzesywaniem realizowanym w sposób pasywny (przy użyciu noży okrzesujących, stosowanych powszechnie w głowicach maszyn wielooperacyjnych), w przeliczeniu na jednostkę czasu (1s). W drodze do realizacji powyższego celu, zbadano także:

- różnice pomiędzy czasem okrzesywania kłód gatunku iglastego oraz liściastego,
- porównano cechy morfologiczne drzew w oparciu o ilość oraz powierzchnię sęków na okrzesanych kłodach.

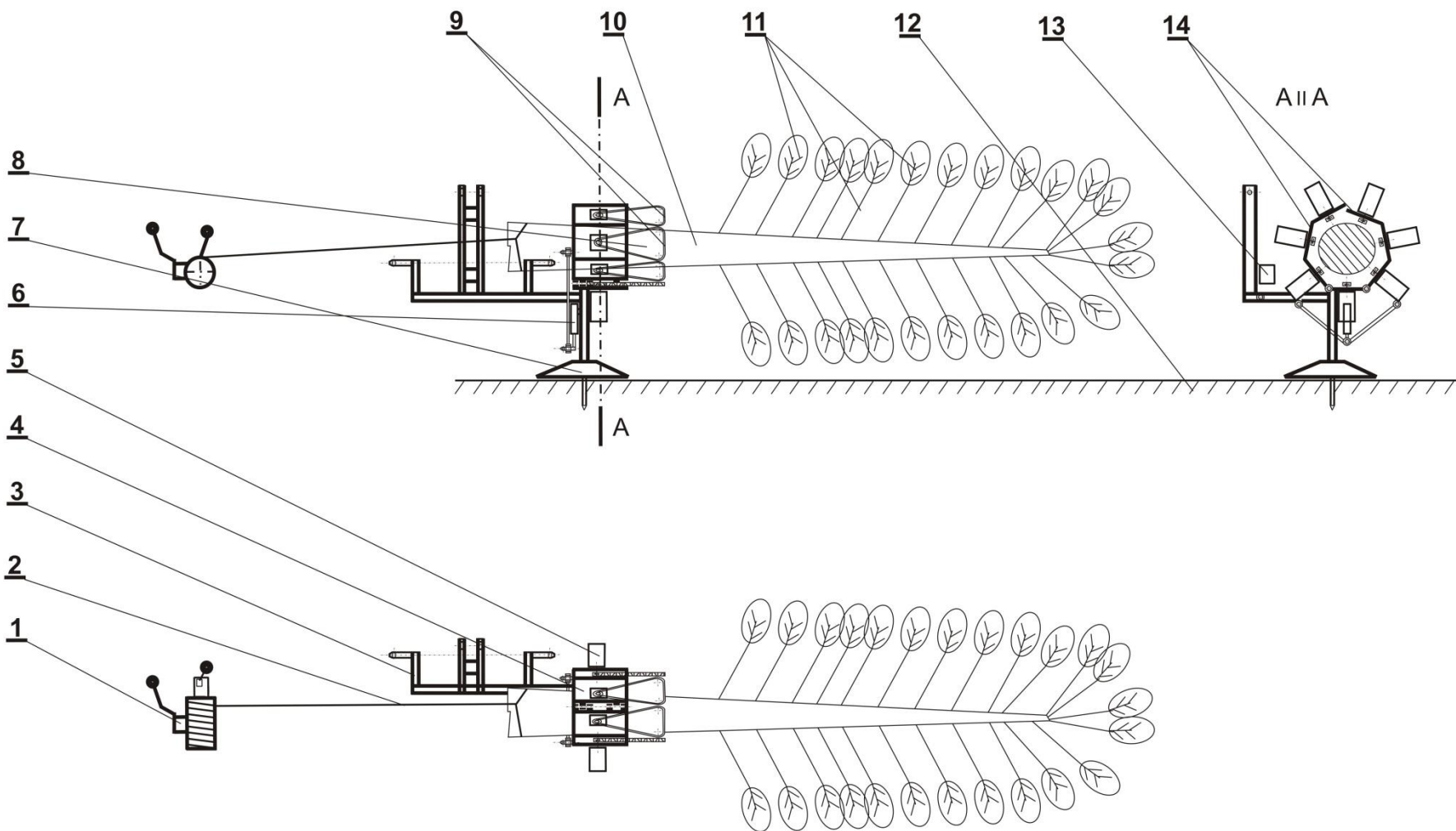
4. Metodyka badań

4.1. Materiały użyte do realizacji badań

4.1.1. Głowica okrzesująca aktywnie GO-01

Głowica okrzesująca GO-01 jest urządzeniem autorskim, zaprojektowanym i wykonanym w całości według pomysłu i staraniem autora niniejszego opracowania. Model powstał w warunkach warsztatowych, toteż niektóre zastosowane w nim rozwiązania stworzono w drodze kompromisu pomiędzy gabarytami maszyny, jej trwałością oraz łatwością obsługi, a kosztami budowy, utrzymania i ewentualnych napraw urządzenia. Niemniej jednak, w przypadku zamiaru powszechnego użycia tej technologii w konstrukcji głowic maszyn wielooperacyjnych, zastosowane w modelu rozwiązania bez trudu można będzie zmodernizować i przystosować np. do różnych gabarytów surowca drzewnego, na co autorzy projektu nie mogli sobie pozwolić. Podczas budowy urządzenia podjęto decyzję o dostosowaniu jego gabarytów do pracy z surowcem o średnicy w zakresie 18-26cm.

Schemat budowy prototypu głowicy okrzesującej GO-01 oraz sposobu jego działania obrazuje poniższa ryc. 11:



Ryc. 11. Schemat budowy oraz sposobu działania głowicy okruszującej GO-01: 1 - wciągarka linowa, 2 - lina stalowa, 3 - rama, 4 - głowica, 5 - silniki napędzające piły łańcuchowe, 6 - liniowy silownik elektryczny, 7 - płyta oporowa, 8 - prowadnica, 9 - piła łańcuchowa, 10 - surowiec drzewny, 11 - gałęzie drzewa, 12 - podłoże, 13 - regulatory napięcia w panelu sterującym, 14 - podstawy, na których zamontowano silniki oraz prowadnice (źródło: opracowanie własne autora)

Zasada działania prototypu opiera się na wykorzystaniu siedmiu rozmieszczonych promieniowo pił łańcuchowych (9), napędzanych niezależnymi silnikami elektrycznymi (5), do okrzesywania surowca drzewnego (10) z gałęzi (11) szczytową częścią prowadnicy w sposób symultaniczny na całym jego obwodzie. Głowica okrzyszująca (4) jest nieruchoma, osadzona na stałe na ramie (3) i zawieszona na trójpunktowym układzie zawieszenia ciągnika rolniczego. Okrzesywanie surowca drzewnego (10) jest realizowane poprzez przesuwanie go wewnątrz pracującej głowicy (4).

Źródło napędu w/w prototypu głowicy stanowi siedem szeregowych silników elektrycznych zasilanych prądem przemiennym o napięciu 230V oraz mocy maksymalnej 2kW każdy (5) - łączna moc całego układu wynosi maksymalnie 14 kW. Silniki (5) zostały osadzone na stalowych podstawach (14) rozmieszczonych w sposób promieniowy wokół osi wzdłużnej głowicy (4). Jeden z silników (5), zlokalizowany jest centralnie, posadowiony równolegle do podłoża (12) na dolnej stronie głowicy (4), na stałej płaszczyźnie (14) przykręconej do ramy (3), a pozostałe silniki (5) tworzą dwa 3-silnikowe „skrzydła” na zawiasach, otwierane za pomocą liniowego siłownika elektrycznego o udźwigu maksymalnym 225kg (6). Celem zastosowania takiego rozwiązania było stworzenie ograniczonej możliwości dostosowania średnicy roboczej głowicy do zmiennej średnicy okrzyszwanego surowca drzewnego (10). Każda płaszczyzna cięcia została wyposażona w prowadnicę o szerokości ok. 12,5 cm (8), mającą na celu przemieszczanie piły łańcuchowej (9) po zadanym torze, w rowku o szerokości 1,3mm. Zmodyfikowane prowadnice pił łańcuchowych (9) powstały w wyniku pocięcia standardowych prowadnic i umiejętne ich pospawanie, w celu uzyskania założonego kształtu i krzywizny pił. Wszystkie prowadnice charakteryzują się długością 35 cm i są wyposażone w łańcuchy 3/8” marki HECHT o długości 52 ogniw.

Podobnie jak w klasycznych pilarkach do drewna, moc każdego z silników przekazywana jest do piły łańcuchowej osadzonej na prowadnicy za pomocą koła zębatego zdawczego. Każde koło zębate zostało osłonięte stalowym mostkiem ochronnym, zabezpieczającym ten element przed uszkodzeniem spowodowanym naciskiem okrzyszwanego surowca drzewnego (10). Ponadto, każda z prowadnic (8) została wyposażona w układ napinania pił, znany z klasycznych pilarek łańcuchowych.

Gabaryty zastosowanych w prototypie silników napędowych dla pił (5) umożliwiły zbudowanie układu zdolnego do okrzesywania surowca drzewnego o średnicy od ok. 18 cm do maksymalnie 26 cm.

W kwestii zasilenia całego układu prądem elektrycznym, silniki napędzające (5) poszczególne piły łańcuchowe (8 i 9) podzielono na 3 sekcje - dwie sekcje górnoskrzydłowe,

po 2 silniki (5) każda, oraz sekcja centralna, czyli dolna, 3-silnikowa. Każda z tych sekcji została wyposażona w regulator napięcia (13) o mocy maksymalnej 10 kW każdy, celem umożliwienia operatorowi regulacji prędkości łańcucha na prowadnicy oraz zapewnienie powolnego zwiększania prędkości przy włączaniu napędu łańcuchów - tzw. „miękki start” silników. Każdy z regulatorów napięcia (13) został połączony z jedną fazą prądu przemiennego oraz biegunem neutralnym w źródle zasilania. W ten sposób umożliwiono zasilanie siedmiu silników jednofazowych (5), o napięciu 230V, jedną wspólną wtyczką trójfazową 5-pinową z gniazda o napięciu 400V.

Jako źródło zasilania głowicy w warunkach terenowych zastosowano generator prądotwórczy o mocy wyższej niż 14kW, zdolny do przekazania pełnej mocy za pomocą jednego gniazda, dostarczany na powierzchnię badawczą na przyczepie.

Liniowy siłownik elektryczny (6), użyty do otwierania i zamykania bocznych „skrzydeł” prototypu, zasilany jest niezależnie prądem stałym o napięciu 36V oraz sterowany przełącznikiem dwubiegunowym.

Cały układ został zamontowany na dedykowanej dla tego urządzenia stalowej ramie (3), spawanej z profilu zamkniętego o wymiarach 50x30mm, zawieszanej na trójpunktowym układzie zawieszenia ciągnika rolniczego Ursus C-360. Ramę w dolnej części wyposażono w demontowalną płytę oporową (7) z kolcem, ograniczającą zapadanie się urządzenia na podłożu o niskiej nośności, pod naciskiem okrzesywanego surowca. Zastosowany pod płytą kolec pełni także funkcję stabilizującą ramę w kierunku poziomym, podczas przeciągania surowca z użyciem wciągarki linowej.

Posuw surowca (10) przez głowicę (4) jest realizowany za pośrednictwem liny (2), połączonej z wciągarką linową (1) o zmiennej prędkości posuwu, zamontowaną na drugim traktorze.

Zarządzanie pracą prototypu odbywa się za pomocą panelu sterowniczego, w którym zamontowano regulatory napięcia do kontroli pracy silników oraz przełącznik dwubiegunowy do otwierania i zamykania głowicy z użyciem siłownika liniowego. Zamontowanie panelu sterowniczego na długich przewodach elektrycznych umożliwia bezpieczną dla operatora pracę, z zachowaniem 5-metrowej strefy bezpieczeństwa wokół urządzenia.

Przygotowywane do pracy urządzenie, zamontowane na TUZ ciągnika rolniczego, przedstawiono na rycinach 12-17:



Ryc. 12. Prototyp głowicy okrzęsującej GO-01 (1), zamontowany na TUZ ciągnika rolniczego (2) za pośrednictwem dedykowanej ramy (3).
Na rycinie widoczna także płyta oporowa (4) z kolcem zagłębionym w podłożu, zapobiegająca zapadaniu układu w gruncie o niskiej nośności (źródło: archiwum prywatne autora)



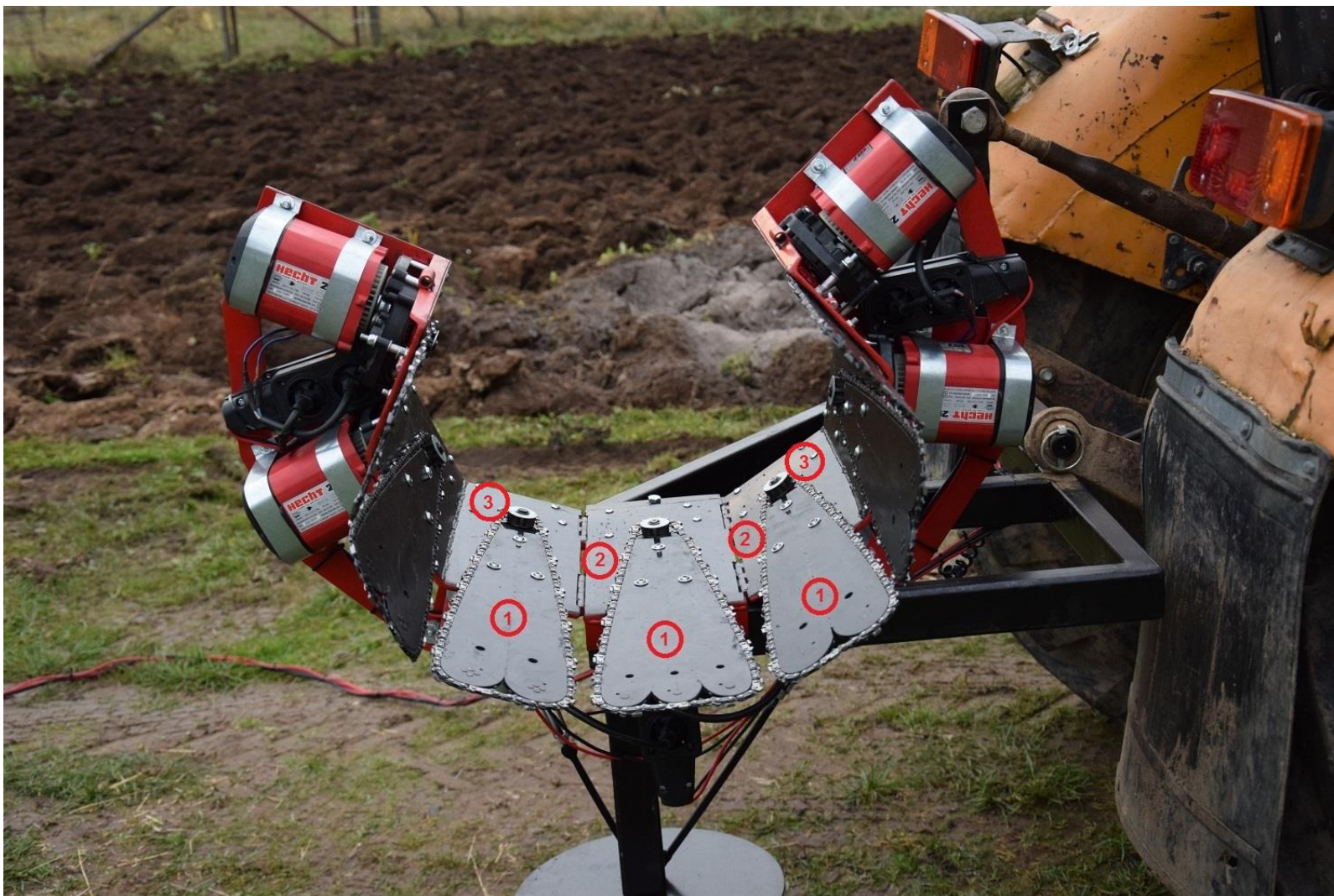
Ryc. 13. Głowica okrzesująca aktywnie GO-01 z oznaczonymi kluczowymi elementami układu: 1 – rama stalowa; 2 – zmodyfikowane prowadnice o szerokości około 12cm, z zamontowanymi na nich z łańcuchami tnącymi; 3 – silniki napędzające łańcuchy tnące; 4 – siłownik elektryczny, służący otwieraniu i zamykaniu sekcji bocznych głowicy (źródło: archiwum prywatne autora)



Ryc. 14. Widok zamkniętej głowicy okrzesującej aktywnie GO-01 od strony „wlotu” surowca drzewnego. Na rycinie widoczne silniki napędzające łańcuchy tnące (1) oraz prowadnice do łańcuchów tnących (2) (źródło: archiwum prywatne autora)

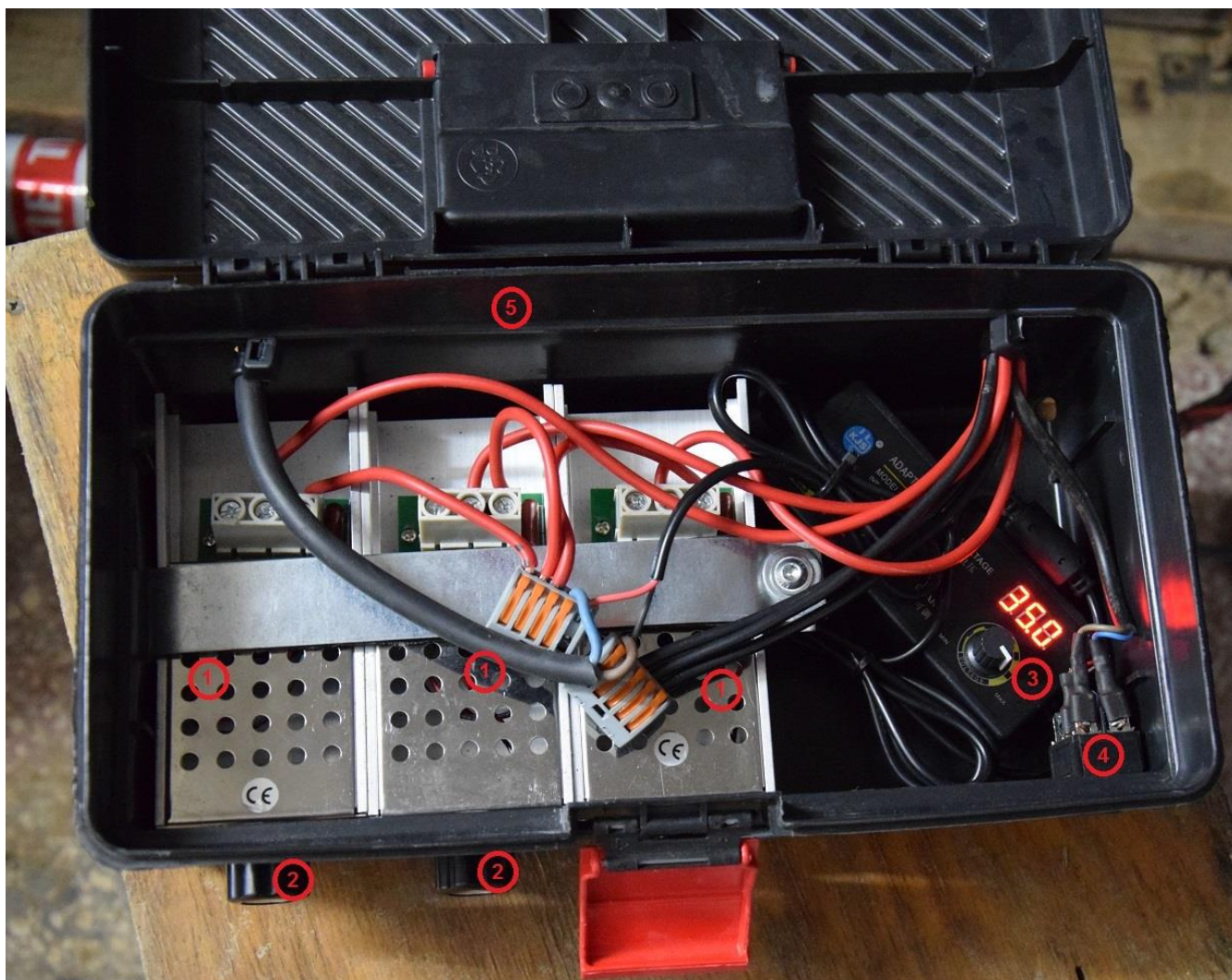


Ryc. 15. Widok zamkniętej głowicy okrzesującej aktywnie GO-01 od strony „wylotu” surowca drzewnego: 1 – podstawy silników napędzających łańcuchy tnące; 2 – cięgła trójpunktowego układu zawieszenia w ciągniku rolniczym; 3 – płyta oporowa zapobiegająca zapadaniu się układu w gruncie o niskiej nośności; 4 – silownik elektryczny, służący otwieraniu i zamykaniu sekcji bocznych głowicy
(źródło: archiwum prywatne autora)



Ryc. 16. Widok głowicy okruszującej aktywnie GO-01 w pozycji częściowo otwartej, przygotowanej do ułożenia w niej surowca drzewnego: 1 - zmodyfikowane prowadnice o szerokości około 12cm, z zamontowanymi na nich z łańcuchami tnącymi; odstępy między prowadnicami po zamknięciu głowicy oscylują w granicy 4-5mm; 2 – zawiasy umożliwiające poruszanie sekcjami bocznymi głowicy.

Na fotografii widoczne urządzenie z początkowej fazy testów, jeszcze bez mostków ochronnych na zębatkach napędzających piły łańcuchowe (3) (źródło: archiwum prywatne autora)



Ryc. 17. Widok panelu sterującego pracą głowicy, z zaznaczonymi kluczowymi elementami układu: 1 – regulatory napięcia, służące do zmian prędkości pracy silników; 2 – pokrętła regulacyjne; 3 – zasilacz prądu stałego 36V, zaopatrujący w energię elektryczną siłownik do sterowania skrzydłami głowicy; 4 – przełącznik dwubiegunowy, służący do sterowania siłownikiem elektrycznym (źródło: archiwum prywatne autora)

4.1.2. Głowica okrzyszująca pasywnie GO-02

Głowica okrzyszująca pasywnie GO-02 także jest urządzeniem zaprojektowanym i wykonanym w całości przez autora niniejszego opracowania. Została ona skonstruowana w oparciu o zasadę działania głowic powszechnie używanych w maszynach wielooperacyjnych: odcinanie gałęzi od pnia jest realizowane poprzez przesuwanie surowca wewnątrz zamkniętej głowicy, wyposażonej w trzy stalowe noże tnące, przy czym poziomy nóż na dolnej płaszczyźnie głowicy, po którym przesuwany jest surowiec drzewny, ma charakter stały, a dwa pozostałe noże, wygięte półkolistie, zamontowano na zawiasach, co umożliwia im ruch obrotowy względem osi pnia, celem jak najlepszego dopasowania ich położenia do gabarytów surowca. Gałęzie surowca, po wystąpieniu odpowiednio dużego nacisku na nie przez ostrze noża, są w sposób pasywny odcinane od pnia.

Długość i kąt wygięcia noży głowicy pasywnej dobrano w taki sposób, aby, podobnie jak w przypadku prototypu głowicy aktywnie okrzyszującej GO-01, optymalną wydajność i jakość pracy osiągała podczas obróbki surowca o średnicy 18-26 cm. Celem jak najdokładniejszego odwzorowania realnych warunków technicznych, charakteryzujących pracę głowicy harwestera, wszystkie noże użyte w głowicy pasywnej zaokrąglono pod kątem ok. 40°, identycznie jak ma to miejsce w głowicy John Deere H290 (pomiar dokonany własnoręcznie przez autora opracowania podczas konferencji dla zakładów usług leśnych Forest SHOW w Grodzisku Mazowieckim w dniu 07 marca 2020r.).

Podstawę głowicy pasywnej zaprojektowano w taki sposób, aby bez konieczności jakichkolwiek modyfikacji pasowała do ramy stalowej zawieszanej na TUZ ciągnika rolniczego, na której uprzednio posadowiony był prototyp głowicy GO-01. Dzięki takiemu rozwiązaniu, podczas pracy na powierzchni terenowej, zamiana głowic oraz pełne przygotowanie ich do pracy zajmowały zaledwie kilka minut. Przygotowywane do pracy urządzenie, zamontowane na ramie ciągnika rolniczego, przedstawiono na ryc. 18-19:



Ryc. 18. Głowica okrzyszująca surowiec drzewny w sposób pasywny GO-02, z widocznymi kluczowymi elementami jej konstrukcji: 1 – stały nóżokrzyszujący na dolnej stronie głowicy; 2 – półkolisty, ruchome noże okrzyszujące; 3 – ramiona służące do poruszania nożami z użyciem siłownika elektrycznego; 4 – dodatkowy pas stabilizujący cały układ (zapobiega przemieszczaniu całego traktora) (źródło: archiwum prywatne autora)



Ryc. 19. Głowica okrzesująca surowiec drzewny w sposób pasywny GO-02 podczas pracy. Na rycinie widoczne zarówno gałęzie będące w trakcie odcinania (1), jak i sęki po już odciętych konarach (2) (źródło: archiwum prywatne autora)

4.1.3. Wciągarka linowa o zmiennej prędkości posuwu liny

Do realizacji posuwu surowca przez pracującą głowicę wykorzystano drugi ciągnik rolniczy, wyposażony we wciągarkę linową, zasilaną mocą z wałka odbioru mocy (WOM). Pełne wykorzystanie potencjału 4-biegowej skrzyni biegów w trakcie badań pozwoliło na realizację posuwu surowca z czterema odmiennymi prędkościami.

4.1.4. Pozostałe materiały

Poza w/w urządzeniami, do realizacji prac badawczych wykorzystano spalinowy agregat prądotwórczy o mocy maksymalnej 20 kW, stalową taśmę mierniczą Spencer o długości 25m, użytkowaną powszechnie w leśnictwie, stoper do pomiaru czasu Casio HS-3V 1RET oraz kamerę do rejestracji obrazu GoPro Hero 6 Black.

4.2. Miejsce, termin oraz przebieg badań

Badania zrealizowano w latach 2019-2022 i podzielono je na dwa odrębne etapy:

- etap I, realizowany od września 2019r. do zakończenia badań terenowych - polegał na zaprojektowaniu, budowie oraz laboratoryjnym testowaniu prototypu głowicy GO-01;
- etap II - realizowany w kwietniu 2021r. oraz we wrześniu 2022r. - polegał na badaniu skuteczności urządzenia w warunkach terenowych, a także na modernizacji urządzenia i usuwaniu jego mankamentów bezpośrednio po ich stwierdzeniu. Etap ten podzielono na badania wstępne, które umożliwiły konstruktorowi prototypu określenie optymalnych parametrów pracy maszyny, przy których urządzenie osiąga maksymalną wydajność pracy, oraz badania zasadnicze - główna część procesu badawczego, polegająca na porównaniu tempa okrzesywania surowca drzewnego w sposób aktywny, z wykorzystaniem zbudowanego prototypu, z metodą pasywną, powszechnie stosowaną we współczesnych głowicach maszyn wielooperacyjnych. Ponadto, zbadano także różnice pomiędzy czasem okrzesywania kłód gatunku iglastego oraz liściastego, ilości sęków na okrzesywanych kłodach, a także ich powierzchnię i czas okrzesywania. Zgromadzone w ten sposób dane poddano przetworzeniu i ich standaryzacji, czego wynikiem było uzyskanie informacji o jednostkowej wydajności pracy obu urządzeń w jednostce czasu.

Wszystkie badania terenowe, objęte niniejszą rozprawą, zrealizowano na terenie Nadleśnictwa Bircza. Nadleśnictwo to jest jednostką organizacyjną Państwowego Gospodarstwa Leśnego Lasy Państwowe, podległą administracyjnie Regionalnej Dyrekcji Lasów Państwowych w Krośnie. Położone jest ono w południowo-wschodniej części kraju,

na terenie województwa podkarpackiego, w powiatach bieszczadzkim i przemyskim, w zakresie wysokości od 260 do 685 m n.p.m. Od wschodniej strony graniczy bezpośrednio z Ukrainą (ryc. 20):



Ryc. 20. Położenie Nadleśnictwa Bircza na mapie RDLP w Krośnie (źródło: materiały własne Nadleśnictwa Bircza)

Jednostka ta, w obecnym kształcie, została utworzona w 1975 r., w związku z reorganizacją podziału administracyjnego w lasach państwowych. Powstała ona z połączenia trzech dawnych odrębnych jednostek organizacyjnych LP, stanowiących obecnie obręby leśne: Bircza, Nowe Sady oraz Wojtkowa.

Zgodnie z regionalizacją przyrodniczo-leśną Polski z 2010r. Nadleśnictwo Bircza leży w znakomitej większości na terenie Krainy Karpackiej, w Mezuregionie Pogórza Przemyskiego oraz, w niewielkiej części, na terenie Krainy Małopolskiej, w Mezuregionie Pogórza Rzeszowskiego.

Powierzchnia całkowita nadleśnictwa wynosi 29 810,85 ha, z czego 27 634,00 ha stanowią lasy. Wielkość pozyskania surowca drzewnego w obowiązującym PUL dla jednostki określono na 1 227 007 m³/10 lat.

W skład Nadleśnictwa Bircza wchodzi 20 leśnictw produkcyjnych oraz leśnictwo szkółkarskie, zgrupowanych we wspomniane wcześniej trzy obręby.

Aż 97,6% powierzchni gleb na gruntach w zarządzie jednostki stanowią gleby brunatne (wyługowane, właściwe, kwaśne oraz bielcowe). Typy siedliskowe lasu to głównie las górski świeży (LGśw - 49,25%) oraz las wyżynny świeży (LWYŻśw - 47,42%). Główne typy drzewostanów w jednostce to drzewostany jodłowo-bukowe (40,02%), bukowo-jodłowe (35,46%), bukowe (11,36%) oraz jodłowe (4,35%). Zrealizowane w ramach niniejszej rozprawy badania oparto w całości na surowcu drzewnym pozyskanym w Nadleśnictwie Bircza, w ramach realizacji zabiegów gospodarczych w drzewostanach w/w typów.

4.2.1. Badania wstępne

Celem badań wstępnych było określenie zakresu prędkości posuwu surowca drzewnego, przeciąganego z użyciem 4-biegowej wciągarki linowej przez pracujący z pełną mocą prototyp głowicy okrzesującej GO-01, oraz wskazanie prędkości optymalnej dla powyższego procesu, przy której wydajność procesu okrzesywania z wykorzystaniem w/w urządzenia jest najwyższa. Określona w ten sposób optymalna prędkość posuwu została później wykorzystana na etapie realizacji badań zasadniczych.

Badania terenowe wstępne przeprowadzono w dniach 10-17 kwietnia 2021r. na terenie Nadleśnictwa Bircza, Leśnictwa Malawa, w wydzieleniu leśnym 108c. Przed rozpoczęciem prac z głowicą dokonano pomiaru prędkości posuwu liny wciągarki bez obciążenia, na każdym z 4 przełożeń skrzyni biegów, z użyciem taśmy mierniczej, stopera do pomiaru czasu oraz kamery do rejestracji obrazu. Badanie polegało na pomiarze czasu niezbędnego do pokonania odległości 1m przez zamontowany na końcu stalowej liny nieobciążony hak, a następnie przeliczeniu tychże wartości na odległość posuwu liny w czasie 1s. Dla każdego z czterech przełożeń skrzyni biegów pomiar powtórzono 5-krotnie, po czym uzyskane wyniki uśredniono. Wyniki powyższego badania zestawiono w tabeli nr 4.

Następnie, w celu dokonania wyboru optymalnego dla przeprowadzenia badań zasadniczych przełożenia skrzyni biegów ciągnika, napędzającego wciągarkę linową, przygotowano 24 kłody drewna w formie 10-metrowych odcinków pni jodły pospolitej (*Abies alba* Mill.) w wieku ok. 50 lat, bonitacji I (12szt.) oraz buka zwyczajnego (*Fagus sylvatica* L.) w wieku ok. 40 lat, bonitacji I (także 12 szt.), pozyskanych w ramach trzebieży późnej pozytywnej i pozostawionych na gruncie. Surowiec umieszczano w głowicy okrzesującej GO-01, zamontowanej na stalowej ramie zawieszanej na TUZ ciągnika rolniczego, w taki sposób, by gałęzie wyrastające z pierwszego, najniższego okółka, dotykały

bezpośrednio pił łańcuchowych w szczytowej części prowadnic, przed rozpoczęciem cięcia
(ryc. 21):



Ryc. 21. Przygotowanie prototypu głowicy okrzesującej GO-01 do pracy (jeszcze przed zetknięciem pił z pierwszym okółkiem gałęzi) (źródło: archiwum prywatne autora)

Następnie uruchamiano głowicę GO-01 i z pomocą wciągarki linowej, zamontowanej na drugim ciągniku, dokonywano przesuwu surowca przez pracującą z pełną mocą głowicę. Jednocześnie, z chwilą uruchomienia wciągarki linowej, uruchamiano stoper do pomiaru czasu. Pomiar zakańczano w chwili minięcia górnej płaszczyzny prowadnic przez cieńszy koniec kłody.

Powyższemu badaniu poddano łącznie 24 kłody drewna, po 6 szt. (3 jodły i 3 buki) dla każdej z 4 prędkości posuwu. Wyniki przeprowadzonego badania ukazano na rycinie 23 oraz w tabeli nr 5.

4.2.2. Badania zasadnicze

Badania zasadnicze zrealizowano w dniach 18-24 kwietnia 2021r. na terenie Nadleśnictwa Bircza, Leśnictwa Maława, w wydzieleniu leśnym 108c, oraz w dniach 5-11 września 2022r., w wydzieleniu leśnym 102a Leśnictwa Jasienica.

Podczas tej fazy prac okrzesywaniu poddano 30 sztuk pni jodły pospolitej (*Abies alba* Mill.) w wieku ok. 50 lat, bonitacji I, przyciętych na długość 10 m, z prędkością posuwu optymalną dla pracy głowicy GO-01, określoną podczas realizacji badań wstępnych.

W celu zbadania skuteczności działania głowicy GO-01 przy okrzesywaniu surowca liściastego, na powierzchni terenowej przygotowano w identyczny sposób także 30 sztuk pni buka zwyczajnego (*Fagus sylvatica* L.) w wieku ok. 40 lat, bonitacji I. W przypadku tego gatunku badaniu poddano również 10 metrowe odcinki pnia z tą różnicą, iż kłody pochodziły z części szczytowej pnia, przy czym ich długość początkową mierzono od miejsca wystąpienia najniższej gałęzi w koronie, wzwyż. Nadmiary szczytowe korony były odcinane i usuwane poza powierzchnię roboczą. Zarówno w przypadku jodły pospolitej, jak i buka zwyczajnego, z przygotowanych 30 szt. surowca połowę poddano okrzesywaniu z użyciem prototypu głowicy okrzesywającej GO-01 w sposób aktywny, a drugą połowę w sposób pasywny (z użyciem głowicy okrzesywającej GO-02).

Tak przygotowany surowiec drzewny pozwolił wyodrębnić 4 grupy badawcze, dla których porównano wyniki badań:

- 15 szt. jodły pospolitej okrzesywanej w sposób pasywny - grupa ta stanowi próbę kontrolną badań z uwagi na fakt, iż obecnie stosowane głowice maszyn wielooperacyjnych pracują w układzie noży pasywnych, głównie na surowcu iglastym;
- 15 szt. jodły pospolitej okrzesywanej w sposób aktywny;
- 15 szt. buka pospolitego okrzesywanego w sposób pasywny;
- 15 szt. buka pospolitego okrzesywanego w sposób aktywny.

Podobnie jak w przypadku badań wstępnych, dokonano pomiaru czasu okrzesywania surowca na całej jego długości.

Należy tu nadmienić, iż celem wyeliminowania wpływu zużycia układu tnącego głowicy na wyniki pomiarów, po dokonaniu okrzesywania każdej ze sztuk surowca, piły łańcuchowe były ponownie smarowane, ostrzone pilnikami okrągłymi i poddawane oględzinom, pod kątem wystąpienia ewentualnych uszkodzeń.

Wyniki pomiarów, dokonanych w ramach realizacji badań zasadniczych, zestawiono na rycinie 24 oraz w tabeli nr 6.

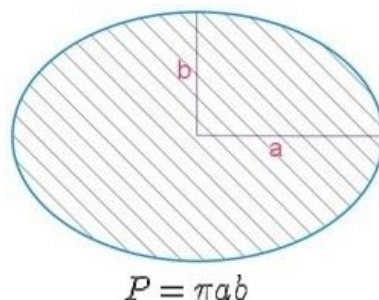
4.2.3. Morfologia kłód

Formułowanie daleko idących wniosków, dotyczących skuteczności działania urządzenia, wyłącznie na podstawie zmierzonego czasu okrzesywania kłód, byłoby dużym błędem. Należy domniemywać, iż okrzesywany surowiec będzie wykazywał różnice w czasie okrzesywania nie tylko pomiędzy poszczególnymi gatunkami (jodła vs. buk), ale także pomiędzy poszczególnymi osobnikami drzew. Oczywistym jest, iż czas okrzesywania kłód o bardziej rozbudowanych koronach, zarówno pod względem ilości jak i grubości gałęzi, będzie dłuższy niż w przypadku drzew ugałęzionych w mniejszym stopniu. Wobec powyższego faktu, celem wyeliminowania wpływu różnic w morfologii poszczególnych kłód na czas ich okrzesywania, postanowiono odnieść czas okrzesywania pnia nie do jednakowej długości kłody równej 10 m dla wszystkich grup, ale do sumy powierzchni wszystkich blizn na pniu, powstałych po odcięciu gałęzi przez głowicę (zwaną dalej „sękami”). Sumaryczna powierzchnia sęków na kłodzie odzwierciedla rzeczywistą powierzchnię pracy układu tnącego obu głowic.

Takie podejście do badań pozwoliło autorowi względnie dokładnie określić czas rzeczywistej pracy głowic pod pełnym obciążeniem. W toku badań przyjęto jednak założenie, iż czas pracy głowic bez obciążenia (w trakcie przesuwu pomiędzy poszczególnymi gałęziami) ma charakter losowy i nie ma możliwości wyeliminowania go z procesu badawczego. Jednakże, w/w zależność występuje także w trakcie pracy maszyny wielooperacyjnej w warunkach rzeczywistych w drzewostanie, wobec czego uznano, iż może zostać pominięta przy realizacji pomiarów.

W celu przeprowadzenia dokładnej analizy danych, umożliwiającej bezpośrednio porównanie tempa pracy maszyn na obu gatunkach surowca, dokonano obliczenia pola powierzchni każdego z sęków po odcięciu gałęzi w procesie okrzesywania pnia, a następnie zsumowano powierzchnie wszystkich sęków dla każdej z kłód. Przy dokonywaniu pomiaru powierzchni sęków przyjęto uproszczenie, iż mają one kształt elipsy, toteż do analizy

wyników terenowych dokonano pomiaru długości oraz szerokości każdego z sęków (z dokładnością do 0,1 cm) i obliczono pole powierzchni elips, zgodnie z poniższym wzorem matematycznym (ryc. 22):



Ryc. 22. Wzór na pole powierzchni elipsy, wykorzystany do obliczenia pola powierzchni sęków

W celu dokonania standaryzacji zgromadzonych w ten sposób danych, umożliwiającej ich bezpośrednie porównywanie ze sobą, przeliczono zmierzone powierzchnie na standardową jednostkę czasu w układzie SI, dzieląc sumaryczne powierzchnie sęków przez czas okrzesywania surowca. Otrzymane wyniki stanowią wartości jednostkowe średniej powierzchni sęków możliwej do okrzesań przez układy tnące obu głowic, w czasie 1s.

Szczegółowe zestawienie danych pomiarowych, zgromadzonych w drodze w/w pomiarów, stanowi tabela nr 28, będąca załącznikiem nr 1 do niniejszej rozprawy. Z kolei zestawienie danych poddanych analizom zawarto w tabeli nr 6.

4.2.4. Statystyczna analiza danych

Zgodność empirycznego rozkładu reszt obserwowanej cechy (powierzchni sęków okrzesywanej w jednostce czasu) z teoretycznym rozkładem normalnym, sprawdzono i testowano stosując test normalności Shapiro-Wilka (Shapiro i Wilk, 1965). Rozkład normalny reszt obserwowanej cechy jest jednym z założeń, których spełnienie jest wymagane, aby móc zastosować analizę wariancji. Drugim, równie ważnym założeniem koniecznym do możliwości zastosowania analizy wariancji, jest homogeniczność (jednorodność) wariancji. Homogeniczność wariancji testowano za pomocą testu Bartletta (Bartlett, 1937), weryfikując hipotezę zerową o jednakowych wariancjach we wszystkich czterech grupach (kombinacje gatunków i metod okrzesywania), czyli:

$$H_0: \sigma_1^2 = \sigma_2^2 = \sigma_3^2 = \sigma_4^2,$$

wobec hipotezy alternatywnej

$$H_1: \text{nie wszystkie } \sigma_i^2 \text{ są jednakowe.}$$

Dwuczynnikowa (gatunek i metoda okrzesywania) analiza wariancji (ANOVA) została zastosowana w celu weryfikacji hipotez zerowych o braku wpływu gatunków oraz metody okrzesywania, jak również hipotezy zerowej o braku interakcji gatunek \times metoda okrzesywania, na zmienność powierzchni sęków okrzesywanych w jednostce czasu. Obliczono podstawowe charakterystyki statystyczne, określające parametry położenia (sumy, średnie arytmetyczne, wartości minimalne i maksymalne, medianę) oraz rozproszenia (wariancje, odchylenia standardowe, standardowe błędy średniej, skośności oraz kurtozę). Parametry te estymowano dla interakcji gatunek \times metoda okrzesywania oraz dla czynników głównych: gatunku i metody okrzesywania, niezależnie. Ponadto, oszacowano najmniejsze istotne różnice (NIR) Fishera przy poziomie istotności $\alpha = 0,05$ dla poszczególnych czynników głównych oraz interakcji gatunek \times metoda okrzesywania. Na podstawie estymowanych wartości NIR przeprowadzono testowania szczegółowe istotności różnic pomiędzy badanymi gatunkami (jodłą pospolitą a bukiem zwyczajnym), zastosowanymi metodami okrzesywania (pasywną a aktywną) oraz pomiędzy kombinacjami poziomów obu czynników (dla interakcji). Wyznaczono grupy jednorodne, niezależnie dla gatunków, metod okrzesywania oraz interakcji gatunek \times metoda okrzesywania. Rozkład powierzchni sęków okrzesywanych w jednostce czasu dla poszczególnych gatunków i metod okrzesywania, jak również ich interakcji, przedstawiono na wykresach pudełkowych (boxploty) i wykresach gęstości. Wpływ średnicy pnia, liczby sęków, powierzchni wszystkich sęków oraz czasu okrzesywania surowca na powierzchnię sęków okrzesywaną w jednostce czasu oceniano na podstawie regresji liniowej prostej i wielokrotnej, osobno dla poszczególnych gatunków oraz osobno dla kombinacji gatunków i metod okrzesywania. Określono odpowiednie modele, przetestowano parametry modeli oraz określono współczynniki determinacji, jako najlepszą miarę oceny dopasowania funkcji regresji do danych empirycznych. Współzależności między powierzchniami sęków okrzesywanymi w jednostce czasu dla poszczególnych kombinacji gatunków i metod okrzesywania, oceniono na podstawie analizy autokorelacji. Współczynniki korelacji liniowej Pearsona dla wszystkich par kombinacji gatunków i metod okrzesywania obliczono jako determinanty poszczególnych cech objaśniających: średnicy pnia, liczby sęków, powierzchni wszystkich sęków oraz czasu okrzesywania surowca, niezależnie. Istotność obliczonych współczynników korelacji testowano za pomocą testu t -Studenta. Do analiz wykorzystano pakiet oprogramowania statystycznego GenStat v. 22 (VSN International).

5. Wyniki badań oraz ich analiza

5.1. Badania wstępne

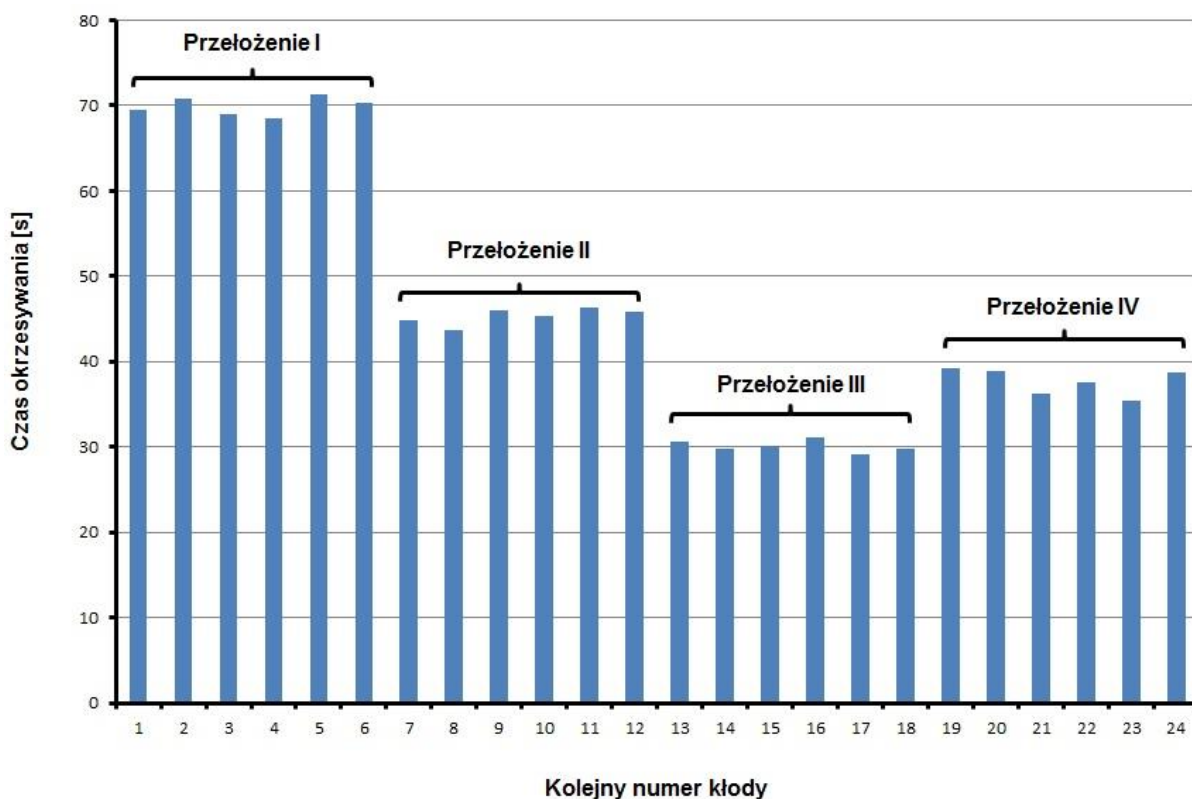
Zestawienie danych, dotyczących prędkości posuwu liny nieobciążonej, prezentuje poniższa tabela 4:

Tabela 4. Zestawienie informacji o prędkości pracy wciągarki linowej na poszczególnych przełożeniach (źródło: opracowanie własne autora)

Przełożenie skrzyni biegów:	Średni czas niezbędny do posuwu liny nieobciążonej na odległość 1m [s]	Odległość posuwu liny w czasie 1s [m]
1	2	3
I	6,61	0,15
II	4,14	0,24
III	2,53	0,40
IV	1,67	0,60

Wartości zestawione w kolumnie 3 w/w tabeli stanowią próbę kontrolną, do której odnoszone były czasy okrzesywania surowca z poszczególnymi prędkościami.

Wyniki przeprowadzonych badań wstępnych, mających na celu dokonanie wyboru optymalnego przełożenia skrzyni biegów ciągnika napędzającego wciągarkę linową, polegających na pomiarze czasu okrzesywania 24 kłód, przedstawiono na poniższym wykresie (ryc. 23):



Ryc. 23. Czas okrzesywania poszczególnych sztuk surowca w zależności od zastosowanego przełożenia skrzyni biegów ciągnika napędzającego wciągarkę linową (źródło: opracowanie własne autora)

Następnie, ze zgromadzonych dla poszczególnych prędkości posuwu surowca (przełożeń skrzyni biegów) danych obliczono wartości średnie, które z kolei zostały odniesione do wartości próby kontrolnej (tabela 5):

Tabela 5. Uśrednione wartości zgromadzonych danych (źródło: opracowanie własne autora)

Przełożenie skrzyni biegów	Średni czas okrzesywania kłody [s]	Czas posuwu liny bez obciążenia [s]	Różnica pomiędzy średnim czasem okrzesywania kłody a czasem posuwu liny bez obciążenia [%]
1	2	3	4
I	69,94	66,10	5,49
II	45,36	41,40	8,73
III	30,12	25,30	16,00
IV	37,69	16,70	55,69

Z powyższych danych wynika, iż czas okrzesywania surowca drzewnego, niezależnie od zastosowanej prędkości okrzesywania, był dłuższy niż czas posuwu liny bez obciążenia, a różnica ta wzrastała wraz ze wzrostem numeru przełożenia, (a co za tym idzie - ze wzrostem prędkości posuwu liny). W przypadku pierwszego biegu ($0,15 \text{ m/s}$), posuw liny

z zamontowanym na niej surowcem trwał o ok. 5,49% dłużej, niż w przypadku liny nieobciążonej. W odniesieniu do II biegu (0,24 m/s), w/w wartość oscylowała w granicach 8,73%, w przypadku III biegu (0,40 m/s) wynosiła już 16%, aż do wartości ponad 55% dla biegu IV (0,60 m/s).

Czas okrzesywania surowca z wykorzystaniem IV przełożenia wciągarki okazał się być dłuższy, niż w przypadku przełożenia III. Podczas pracy wciągarki na IV biegu wielokrotnie odnotowywano spadki prędkości obrotowej wciągarki. Jednocześnie, zauważalnie spadała wydajność pracy generatora prądowórczego zasilającego układ oraz samych silników elektrycznych, napędzających piły, przez co wzrastało ryzyko ich uszkodzenia. W celu uniknięcia poważnej awarii któregoś z urządzeń, operator musiał dokonywać chwilowego wstrzymania pracy wciągarki. Sytuacja ta przełożyła się bezpośrednio na wydłużenie czasu okrzesywania surowca, co jest równoznaczne ze spadkiem wydajności zmianowej urządzenia. Ponadto, podczas prowadzenia badań, odnotowano pojedynczy przypadek spadnięcia jednego łańcucha tnącego z prowadnicy i konieczność powtórzenia testu.

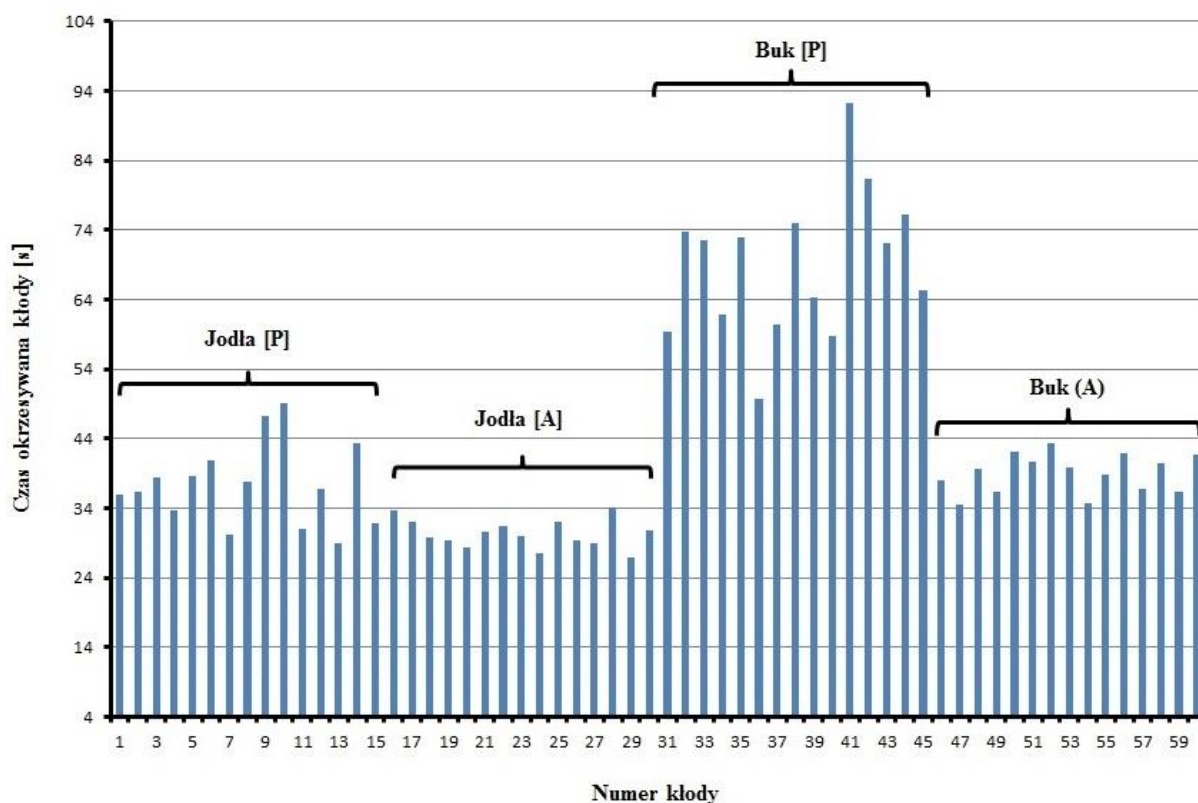
W/w sytuacja była spowodowana wzrostem obciążeń ściskających w układzie, wynikających z kolei z niewystarczającej prędkości skrawania pił, zastosowanych w prototypie głowicy GO-01. Zgodnie z deklaracją producenta pilarek elektrycznych użytych do budowy głowicy, przełożenie zębate dla wałka zdawczego napędzającego piły łańcuchowe przekładają się na maksymalną prędkość obrotową pił na poziomie ok. 13,5 m/s. Wykonane w ramach niniejszego opracowania badania wykazały, iż wartość ta umożliwia płynne skrawanie drewna jodłowego i bukowego, przesuwanego przez głowicę okrzesyjącą GO-01, z prędkością maksymalną do wartości 0,40 m/s.

Z przyczyn przedstawionych powyżej podjęto decyzję o przeprowadzeniu późniejszych badań zasadniczych z wykorzystaniem **III biegu** ciągnika, napędzającego wciągarkę linową.

Natężenie hałasu generowanego przez urządzenie podczas pracy z pełną mocą, zmierzone na granicy założonej strefy bezpieczeństwa (5m), wyniosło 89 dB przy jednym pracującym silniku oraz 94 dB podczas pracy systemowej, z wykorzystaniem wszystkich 7 jednostek. W/w wartości zmierzono za pomocą miernika elektrycznego YT-73087.

5.2. Badania zasadnicze

Na poniższym wykresie (ryc. 24) przedstawiono wyniki przeprowadzonych w ramach badań zasadniczych pomiarów czasu okrzesywania kłód w ramach wszystkich 4 grup badawczych (praca ciągnika obsługującego wciągarkę na III biegu, czyli z prędkością około 0,40 m/s):



Ryc. 24. Wykres przedstawiający rzeczywisty czas okrzywywania poszczególnych kłód z podziałem na cztery grupy: jodłę okrzywywaną pasywnie (jodła [P]), jodłę okrzywywaną aktywnie (jodła [A]), buka okrzywywanego pasywnie (buk [P]) oraz buka okrzywywanego pasywnie (buk [A]) (źródło: opracowanie własne autora)

Średni czas okrzywywania kłód jodły z użyciem metody pasywnej (próba kontrolna) wyniósł 37,37 s, podczas gdy okrzywywanie metodą aktywną, z użyciem prototypu głowicy GO-01, pozwoliło skrócić ten czas do 30,32 s (o 19% mniej). Jeszcze wyraźniejszą zależność w tej kwestii odnotowano przy okrzywywaniu buka pospolitego: w tym przypadku obróbka pni metodą aktywną zaowocowała skróceniem czasu operacji w stosunku do metody pasywnej aż o ponad 43% (39,04 s metodą aktywną wobec 69,08 s metodą pasywną).

Co ciekawe, bardzo długi czas okrzywywania buka metodą pasywną był o niemal 85% dłuższy, niż dla jodły pospolitej okrzywywanej pasywnie. Zastosowanie metody aktywnej dla obu tych gatunków zaowocowało zmniejszeniem różnic w czasie obróbki do 29% (pomiędzy bukiem a jodłą).

Skrócenie czasu okrzywywania surowca, zarówno w przypadku drewna iglastego jak i liściastego, pozwala wstępnie potwierdzić założoną skuteczność stosowania metody aktywnej do usuwania gałęzi z pni drzew.

5.3. Morfologia kłód

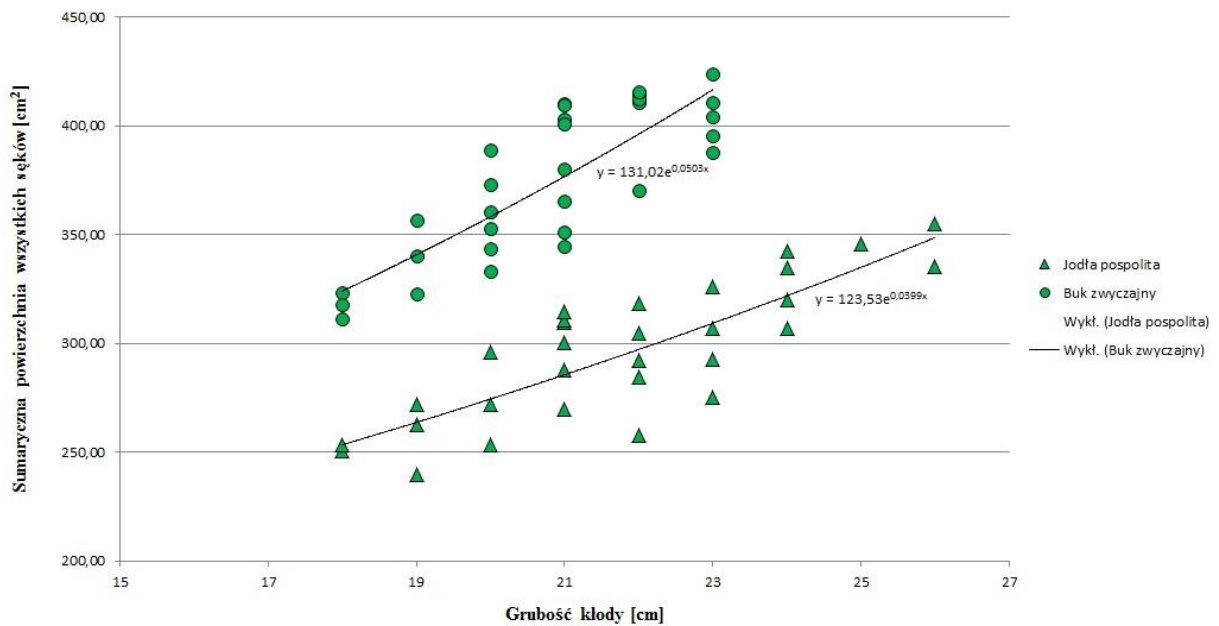
Szczegółowe zestawienie danych, dotyczących zmierzonych na gruncie sęków, przedstawia tabela nr 28, stanowiąca załącznik nr 1 do niniejszej rozprawy. Z kolei poniższa tabela 6 zawiera syntetyczne zestawienie zgromadzonych w toku badań informacji:

Tabela 6. Syntetyczne zestawienie danych dotyczących sęków (źródło: opracowanie własne autora)

Nr kłody	Gatunek	Metoda okrzesywania	Średnica pnia [cm]	Ilość sęków	Powierzchnia wszystkich sęków [cm ²]	Czas okrzesywania surowca [s]	Powierzchnia sęków okrzesywana w jednostce czasu [cm ² /s]
1	2	3	4	5	6	7	8
1	Jodła pospolita	Pasywna	22	24	304,51	36,02	8,45
2	Jodła pospolita	Pasywna	21	20	300,63	36,44	8,25
3	Jodła pospolita	Pasywna	24	21	320,03	38,41	8,33
4	Jodła pospolita	Pasywna	22	19	284,70	33,61	8,47
5	Jodła pospolita	Pasywna	21	22	309,66	38,67	8,01
6	Jodła pospolita	Pasywna	23	23	325,96	40,82	7,99
7	Jodła pospolita	Pasywna	19	17	262,47	30,18	8,70
8	Jodła pospolita	Pasywna	21	23	310,93	37,71	8,25
9	Jodła pospolita	Pasywna	24	24	334,87	47,32	7,08
10	Jodła pospolita	Pasywna	26	26	355,08	49,16	7,22
11	Jodła pospolita	Pasywna	19	19	271,97	31,11	8,74
12	Jodła pospolita	Pasywna	20	23	296,05	36,83	8,04
13	Jodła pospolita	Pasywna	18	20	250,49	28,94	8,66
14	Jodła pospolita	Pasywna	24	24	342,46	43,39	7,89
15	Jodła pospolita	Pasywna	20	21	272,09	31,95	8,52
16	Jodła pospolita	Aktywna	25	27	345,86	33,67	10,27
17	Jodła pospolita	Aktywna	22	23	318,40	32,06	9,93
18	Jodła pospolita	Aktywna	22	19	257,45	29,71	8,67
19	Jodła pospolita	Aktywna	18	23	253,08	29,31	8,63
20	Jodła pospolita	Aktywna	21	25	269,71	28,36	9,51
21	Jodła pospolita	Aktywna	23	20	292,86	30,54	9,59
22	Jodła pospolita	Aktywna	21	25	287,64	31,35	9,18
23	Jodła pospolita	Aktywna	24	22	306,77	30,01	10,22
24	Jodła pospolita	Aktywna	19	19	239,90	27,47	8,73
25	Jodła pospolita	Aktywna	21	26	314,66	31,99	9,84
26	Jodła pospolita	Aktywna	22	23	292,34	29,44	9,93
27	Jodła pospolita	Aktywna	23	21	275,15	28,96	9,50
28	Jodła pospolita	Aktywna	26	25	335,58	34,11	9,84
29	Jodła pospolita	Aktywna	20	20	253,25	27,02	9,37
30	Jodła pospolita	Aktywna	23	23	307,06	30,87	9,95
31	Buk zwyczajny	Pasywna	19	11	356,95	59,42	6,01
32	Buk zwyczajny	Pasywna	22	13	410,82	73,72	5,57
33	Buk zwyczajny	Pasywna	21	14	403,24	72,64	5,55
34	Buk zwyczajny	Pasywna	20	12	373,06	61,89	6,03
35	Buk zwyczajny	Pasywna	21	13	410,11	72,99	5,62

36	Buk zwyczajny	Pasywna	18	10	311,05	49,81	6,24
37	Buk zwyczajny	Pasywna	20	11	352,89	60,41	5,84
38	Buk zwyczajny	Pasywna	22	14	414,58	74,92	5,53
39	Buk zwyczajny	Pasywna	23	12	387,68	64,37	6,02
40	Buk zwyczajny	Pasywna	21	10	344,88	58,73	5,87
41	Buk zwyczajny	Pasywna	23	13	423,77	92,31	4,59
42	Buk zwyczajny	Pasywna	22	12	412,26	81,29	5,07
43	Buk zwyczajny	Pasywna	20	13	388,93	72,09	5,40
44	Buk zwyczajny	Pasywna	23	15	404,14	76,21	5,30
45	Buk zwyczajny	Pasywna	21	11	365,27	65,42	5,58
46	Buk zwyczajny	Aktywna	20	12	360,55	37,97	9,50
47	Buk zwyczajny	Aktywna	18	10	323,11	34,51	9,36
48	Buk zwyczajny	Aktywna	21	13	380,13	39,71	9,57
49	Buk zwyczajny	Aktywna	19	10	340,39	36,42	9,35
50	Buk zwyczajny	Aktywna	23	12	395,46	42,16	9,38
51	Buk zwyczajny	Aktywna	21	14	409,74	40,62	10,09
52	Buk zwyczajny	Aktywna	22	13	415,53	43,44	9,57
53	Buk zwyczajny	Aktywna	20	11	343,70	39,95	8,60
54	Buk zwyczajny	Aktywna	18	10	318,02	34,67	9,17
55	Buk zwyczajny	Aktywna	21	12	351,05	38,89	9,03
56	Buk zwyczajny	Aktywna	23	13	410,80	41,97	9,79
57	Buk zwyczajny	Aktywna	20	12	333,26	36,72	9,08
58	Buk zwyczajny	Aktywna	22	12	370,39	40,48	9,15
59	Buk zwyczajny	Aktywna	19	11	322,97	36,34	8,89
60	Buk zwyczajny	Aktywna	21	14	401,15	41,73	9,61
SUMA:			1 030	20 127,49	2 637,23	-	-

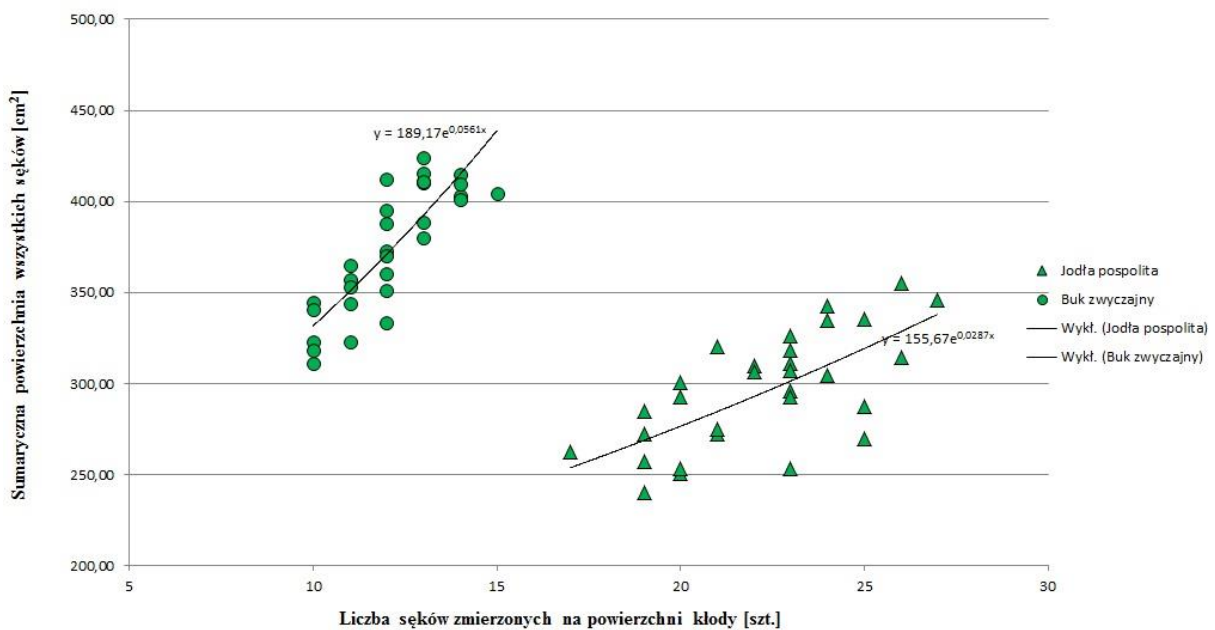
Z analizy zgromadzonych powyżej danych wynika, iż średnia sumaryczna powierzchnia wszystkich sęków, zmierzona na powierzchni kłód jodły pospolitej jest wyraźnie niższa, niż w przypadku buka zwyczajnego, nawet pomimo większej uśrednionej średnicy pnia. W przypadku jodły pospolitej dla wszystkich 30 okrzęsanych sztuk średnia powierzchnia wszystkich sęków wyniosła 296,39 cm², przy uśrednionej średnicy pnia wynoszącej 21,8 cm, podczas gdy średnia powierzchnia wszystkich sęków na 30 pniach buka pospolitego wyniosła 374,53 cm², przy uśrednionej średnicy pnia na poziomie 20,8 cm, co doskonale obrazuje poniższy wykres (ryc. 25):



Ryc. 25. Powierzchnia wszystkich sęków na kłodach w odniesieniu do grubości kłody (źródło: opracowanie własne autora)

Co istotne, wyświetlone na wykresie linie trendu dla obu gatunków jasno wskazują, iż poza oczywistą rozbieżnością w wartościach poszczególnych danych, wyraźnie odmienna jest także dynamika wzrostu średniej sumarycznej powierzchni sęków w odniesieniu do grubości kłody, która w przypadku buka zwyczajnego jest zdecydowanie wyższa, niż dla jodły pospolitej.

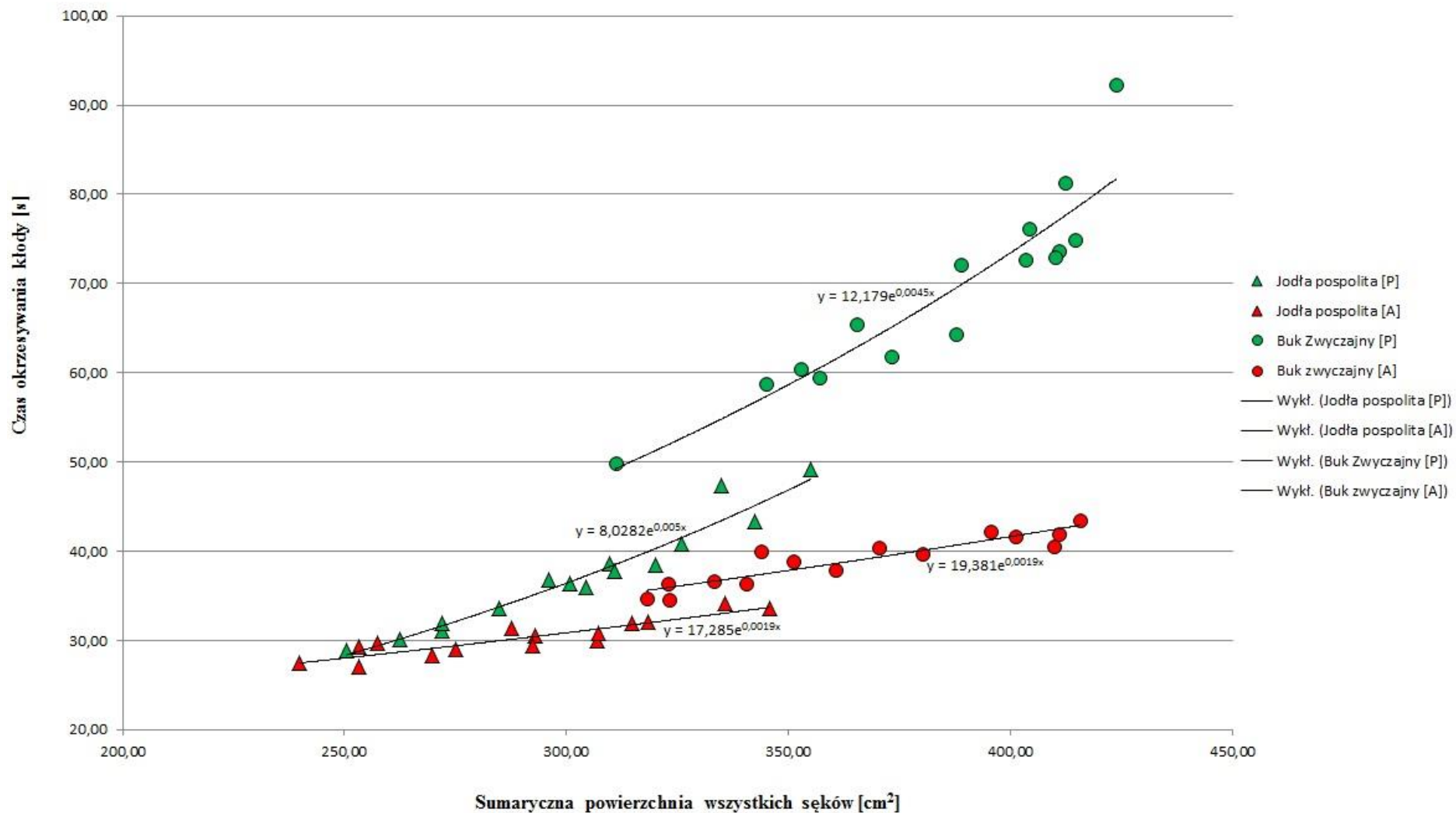
Jeszcze wyraźniej zarysowaną rozbieżność pomiędzy zbadanymi gatunkami drzew odnotowuje się w przypadku porównania średniej sumarycznej powierzchni sęków odniesionej do ilości zmierzonych sęków, a co za tym idzie - ilości gałęzi odciętych od pnia. Uśredniona sumaryczna powierzchnia sęków jodły pospolitej ($296,39 \text{ cm}^2$) wynikła z odcięcia średnio 22 gałęzi, podczas gdy znacznie wyższa powierzchnia sęków buka zwyczajnego ($374,53 \text{ cm}^2$) - z zaledwie średnio 12 gałęzi (ryc. 26):



Ryc. 26. Powierzchnia wszystkich sęków na kłodach w odniesieniu do ilości sęków (źródło: opracowanie własne autora)

Podobnie jak na poprzednim wykresie (ryc. 25), także i w tym przypadku (ryc. 26) zdecydowanie zauważalna jest odmienna dynamika wzrostu uśrednionej powierzchni sęków wraz ze wzrostem ich liczby, przy czym różnica w przebiegu linii trendu jest w tym przypadku zdecydowanie bardziej wyraźna.

Oba w/w wykresy (ryc. 25 oraz ryc. 26) dowodzą, iż morfologia przedstawiciela gatunków liściastych drzew - buka zwyczajnego - charakteryzuje się znacznie bardziej rozbudowaną koroną, niż gatunku iglastego - jodły pospolitej. Pomimo nieco niższego wieku drzew (40 lat buka wobec 50 lat jodły) i uśrednionej średnicy pnia niższej o ok. 4,5%, kłody buka zwyczajnego charakteryzowały się uśrednioną powierzchnią sęków wyższą o ponad 26%, w stosunku do jodły pospolitej. To właśnie ta cecha charakterystyczna dla morfologii gatunków liściastych sprawia, iż dotychczasowy proces pozyskania surowca drzewnego z użyciem maszyn wielooperacyjnych ograniczał się niemal wyłącznie do gatunków iglastych oraz, w przypadku gatunków liściastych, głównie do surowca trzebieżowego, o niewielkich gabarytach kłód i gałęzi. Duża dynamika wzrostu średniej sumarycznej powierzchni sęków w odniesieniu do grubości kłody w przypadku gatunków liściastych sprawia, iż osiągnęte przez drzewostany rębne liściaste gabaryty dyskwalifikują je z możliwości realizacji maszynowego pozyskania surowca w sposób pasywny.

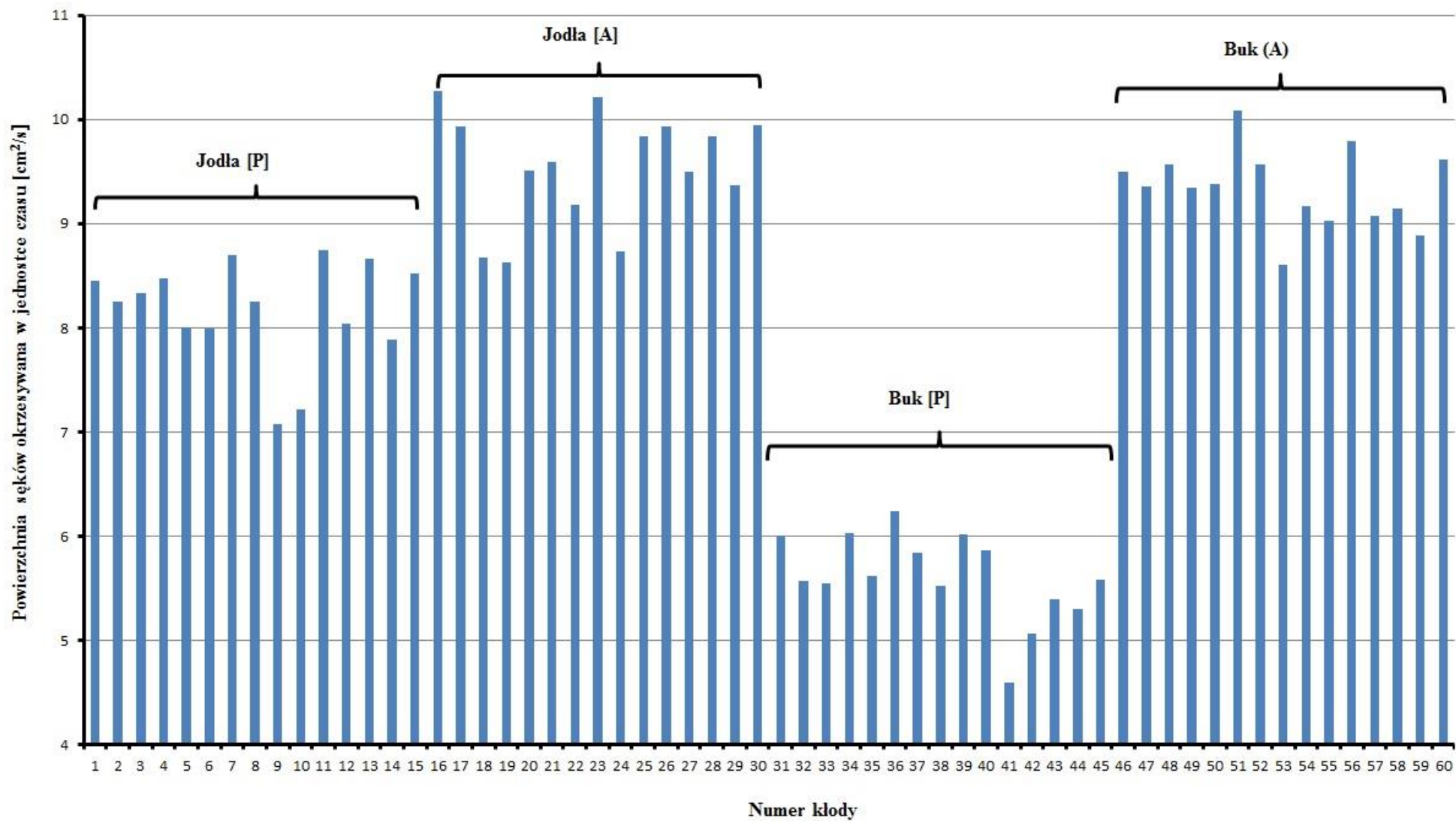


Ryc. 27. Czas okrzesywania kłody w odniesieniu do powierzchni wszystkich zmierzonych na niej sęków (źródło: opracowanie własne autora)

Na rycinie 27 zaprezentowano zależność pomiędzy czasem okrzesywania kłody, a sumaryczną powierzchnią wszystkich sęków, zmierzonych dla 4 poszczególnych grup drzew. Jak wynika z analizy powyższego wykresu, wyraźnie dłuższym czasem okrzesywania charakteryzowały się kłody bukowe w stosunku do kłód jodłowych, zwłaszcza sposobem pasywnym. Okrzesywanie kłód bukowych tą metodą trwało średnio ok. 69 s, co jest wynikiem niemal 85% gorszym od próby kontrolnej.

Przy wykorzystaniu metody aktywnej czas okrzesywania kłód bukowych o wartości średniej ok. 39 s był o 29% dłuższy od surowca jodłowego okrzesywanego aktywnie (nieco ponad 30 s) i tylko o 4,5% dłuższy od czasu okrzesywania kłód jodłowych metodą pasywną, stanowiącą próbę kontrolną (ok. 37 s).

Przedstawione powyżej dane nie stanowią jednak podstawy do wysnucia prawidłowych wniosków naukowych, ze względu na rozbieżności, zarówno w czasie okrzesywania surowca, jak i w średniej sumarycznej powierzchni sęków. Po dokonaniu standaryzacji danych, sprowadzając wyniki pomiarów do wartości jednostkowych, otrzymano średnią powierzchnię sęków możliwą do okrzesańia przez układy tnące głowic, w czasie 1s. Przeliczone w ten sposób dane zestawiono w kolumnie nr 8 tabeli 6. Wyniki powyższej standaryzacji danych prezentuje także poniższa rycina 28:



Ryc. 28. Powierzchnia sęków okrzesywana w czasie 1s (źródło: opracowanie własne autora)

Zgodnie z powyższym wykresem oraz tabelą danych, zastosowane w badaniach środki techniczne pozwoliły na osiągnięcie zdolności okrzesywania surowca drzewnego jodłowego przez głowicę pasywną ze średnią wydajnością na poziomie $8,17 \text{ cm}^2/\text{s}$. Zastosowanie głowicy aktywnej pozwoliło na zwiększenie wydajności układu do $9,54 \text{ cm}^2/\text{s}$, co stanowi wartość wyższą o 16,8% (tabela 7):

Tabela 7. Analiza różnic pomiędzy średnią powierzchnią sęków okrzesywaną w jednostce czasu [cm^2/s] dla poszczególnych grup badawczych [%] (źródło: opracowanie własne autora)

Grupa badawcza	Jodła aktywnie	Jodła pasywnie (K)	Buk aktywnie	Buk pasywnie
Jodła aktywnie	x	-0,144	-0,021	-0,412
Jodła pasywnie (K)	0,168	x	0,143	-0,313
Buk aktywnie	0,021	-0,125	x	-0,399
Buk pasywnie	0,701	0,456	0,665	x

Zdecydowanie niższą wydajność odnotowano podczas okrzesywania surowca drzewnego bukowego w sposób pasywny. W tym przypadku udało się osiągnąć wydajność na poziomie zaledwie $5,61 \text{ cm}^2/\text{s}$. Zamiana głowicy pasywnej na aktywną, w przypadku surowca liściastego, umożliwiła osiągnięcie wydajności okrzesywania na poziomie $9,34 \text{ cm}^2/\text{s}$, co jest wynikiem lepszym o 66,5%, niż przy metodzie pasywnej. Ponadto, zastosowanie głowicy aktywnej przy okrzesywaniu kłód buka zwyczajnego umożliwiło osiągnięcie wydajności okrzesywania zbliżonej do wydajności osiągniętej przy aktywnym okrzesywaniu jodły - w tym przypadku różnica wyniosła zaledwie ok. 2% na korzyść jodły.

Co ciekawe, wydajność okrzesywania buka metodą aktywną okazała się być wyższa od tempa okrzesywania jodły metodą pasywną (próba kontrolna) o ponad 14%. Jest to o tyle ciekawe, iż buk wykazuje się nie tylko silniejszym ugałżeniem niż jodła, ale także większą gęstością surowca, co przekłada się bezpośrednio na jego twardość.

5.4. Analiza statystyczna danych

Wyniki uzyskane po zastosowaniu testu normalności Shapiro-Wilka pozwoliły stwierdzić, że reszty obserwowanej cechy - powierzchni sęków okrzesywanej w jednostce czasu - są zgodne z rozkładem normalnym. Na podstawie wyników przeprowadzonego testu Bartletta stwierdzono homogeniczność (jednorodność) czterech wariancji dla kombinacji poziomów dwóch zastosowanych czynników potencjalnie różnicujących ($p=0,730$). Powyższe wyniki upoważniają nas do zastosowania analizy wariancji powierzchni sęków okrzesywanej w jednostce czasu, przy testowaniu hipotez ogólnych o równości średnich arytmetycznych.

Wyniki analizy wariancji wskazują na istotne statystycznie ($p<0,001$) zróżnicowanie powierzchni sęków okrzesywanych w jednostce czasu, ze względu na oba czynniki różnicujące: gatunek oraz metoda okrzesywania (tabela 8). Zaobserwowano również istotny statystycznie (na poziomie istotności 0,001) wpływ interakcji gatunek \times metoda okrzesywania na wartości powierzchni sęków okrzesywanych w jednostce czasu (tabela 8):

Tabela 8. Wyniki dwuczynnikowej (gatunek i metoda okrzesywania) analizy wariancji (ANOVA) powierzchni sęków okrzesywanych w jednostce czasu (źródło: opracowanie własne autora)

Źródło zmienności	Liczba stopni swobody	Suma kwadratów	Średni kwadrat	Statystyka testowa F
Gatunek	1	28,566	28,566	134,12***
Metoda okrzesywania	1	97,487	97,487	457,71***
Gatunek \times metoda okrzesywania	1	20,839	20,839	97,84***
Reszta (błąd)	56	11,927	0,213	
Całość	59	158,819		

*** $P<0,001$

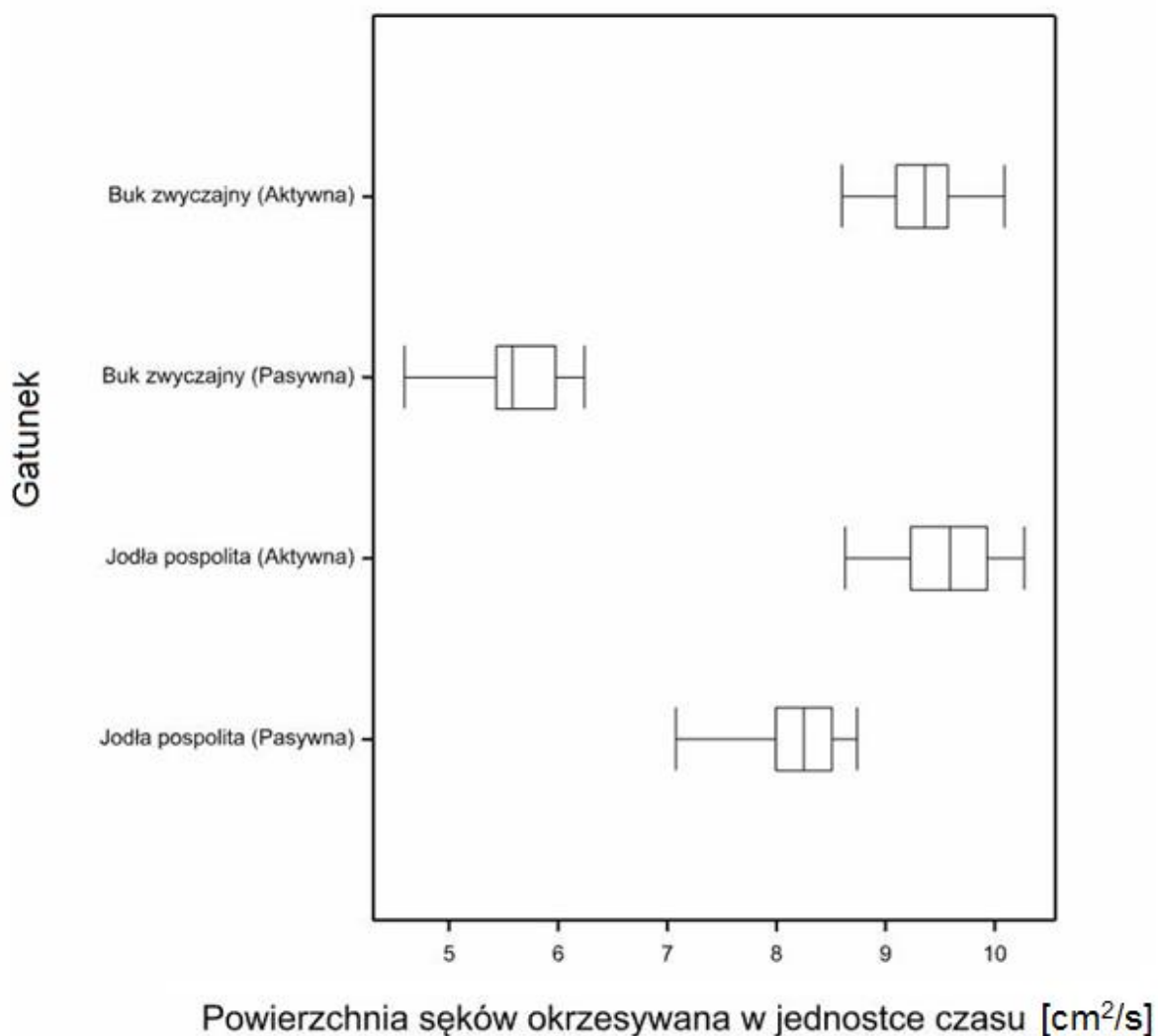
Podstawowe charakterystyki statystyczne, określające parametry położenia oraz rozproszenia dla interakcji gatunek \times metoda okrzesywania powierzchni sęków okrzesywanych w jednostce czasu, przedstawiono w tabeli 9. Zdecydowanie najmniejszą sumę powierzchni sęków okrzesywanych w jednostce czasu otrzymano dla buka zwyczajnego, przy zastosowaniu metody pasywnej ($84,2 \text{ cm}^2/\text{s}$). Wszystkie obliczone parametry położenia były determinowane interakcją gatunek \times metoda okrzesywania (tabela

9). Także współczynniki skośności i kurtozy były zależne od interakcji badanych w doświadczeniu czynników różnicujących:

Tabela 9. Podstawowe charakterystyki statystyczne określające parametry położenia oraz rozproszenia powierzchni sęków okrzesywanych w jednostce czasu dla interakcji gatunek × metoda okrzesywania (źródło: opracowanie własne autora)

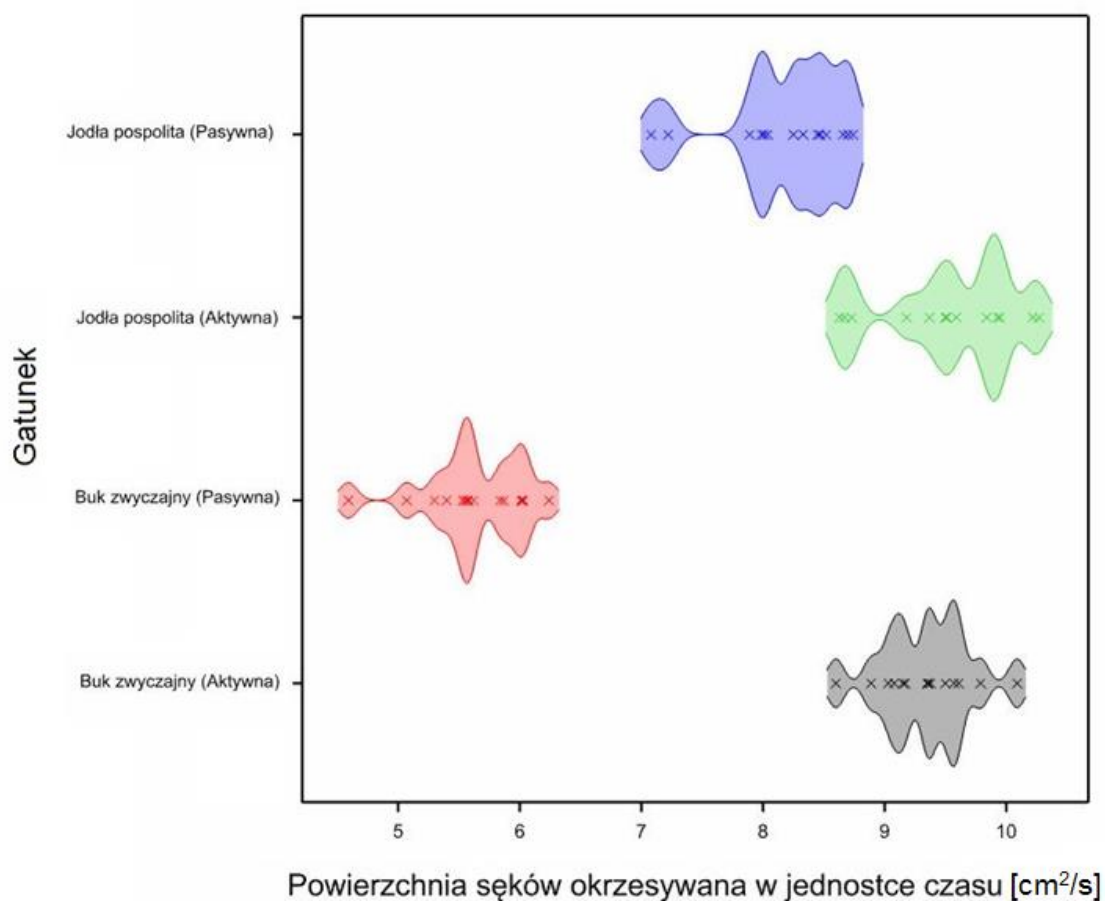
Podstawowe charakterystyki statystyczne	Gatunek		
	Metoda okrzesywania	Buk zwyczajny	Jodła pospolita
Suma		140,1	143,2
Średnia arytmetyczna		9,343 a	9,544 a
Wartość minimalna		8,6	8,63
Wartość maksymalna		10,09	10,27
Wariancja	Aktywna	0,1393	0,2894
Mediana		9,36	9,59
Skośność		-0,0141	-0,5217
Kurtoza		-0,1371	-0,8873
Odchylenie standardowe		0,3732	0,538
Standardowy błąd średniej		0,0964	0,1389
Suma		84,2	122,6
Średnia arytmetyczna		5,615 c	8,173 b
Wartość minimalna		4,59	7,08
Wartość maksymalna		6,24	8,74
Wariancja	Pasywna	0,179	0,2442
Mediana		5,58	8,25
Skośność		-0,7875	-1,0243
Kurtoza		0,4463	0,2446
Odchylenie standardowe		0,4231	0,4942
Standardowy błąd średniej		0,1092	0,1276
Najmniejsza istotna różnica dla interakcji gatunek × metoda okrzesywania: NIR _{0,05} =0,338			
Wartości średnie oznaczone tą samą literą nie różnią się istotnie statystycznie.			

Wszystkie cztery kombinacje gatunków i metod okrzyszowania charakteryzowały się podobnym rozstępem wartości powierzchni sęków okrzyszowanej w jednostce czasu (ryc. 29, 30):



Ryc. 29. Wykres pudełkowy (boxplot) powierzchni sęków okrzyszowanej w jednostce czasu [cm²/s], dla interakcji gatunek × metoda okrzyszowania (źródło: opracowanie własne autora)

Zdecydowanie najmniejszymi wartościami powierzchni sęków, okrzyszowanej w jednostce czasu, charakteryzował się buk zwyczajny po zastosowaniu pasywnej metody okrzyszowania (ryc. 29 i 30).



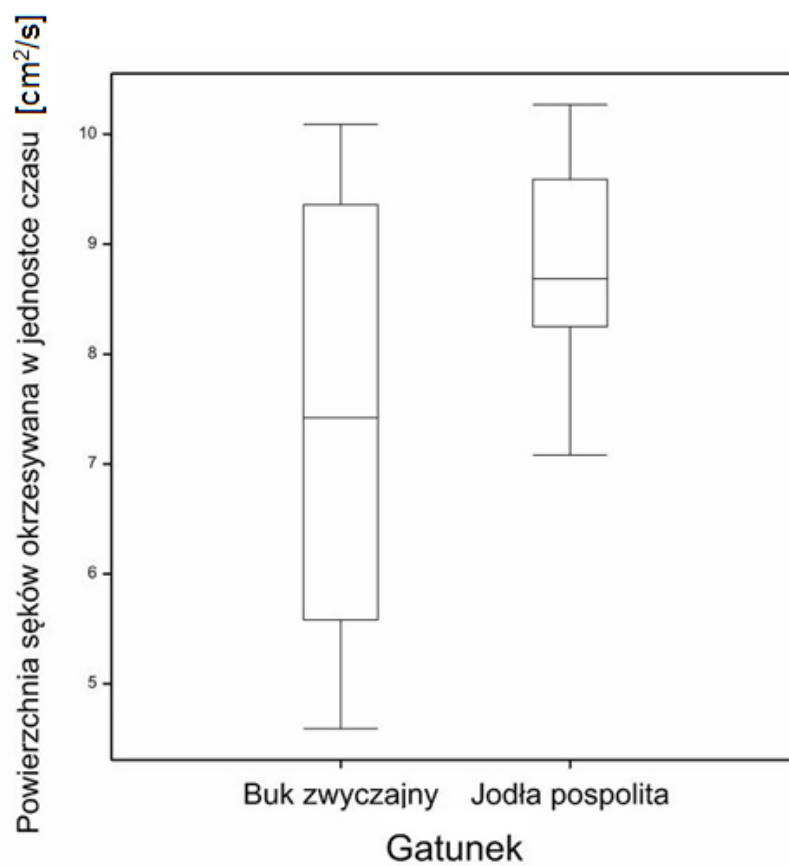
Ryc. 30. Wykres gęstości powierzchni sęków okrzesywanej w jednostce czasu [cm²/s], dla interakcji gatunek × metoda okrzesywania (źródło: opracowanie własne autora)

Podstawowe charakterystyki statystyczne, określające parametry położenia oraz rozproszenia dla poszczególnych czynników głównych: gatunku i metody okrzesywania, przedstawiono w tabelach 10 i 11, odpowiednio. Jodła pospolita charakteryzowała się większymi wartościami parametrów położenia: sumą, wartością średnią, wartościami minimalną i maksymalną i medianą (tabela 10). Mniejszą wartością skośności zaobserwowano dla jodły pospolitej (-0,08037) niż dla buka zwyczajnego (-0,01898). Z kolei buk zwyczajny charakteryzował się mniejszą kurtozą (-1,824) (tabela 10).

Tabela 10. Podstawowe charakterystyki statystyczne określające parametry położenia oraz rozproszenia powierzchni sęków okrzesywanych w jednostce czasu dla poszczególnych gatunków (źródło: opracowanie własne autora)

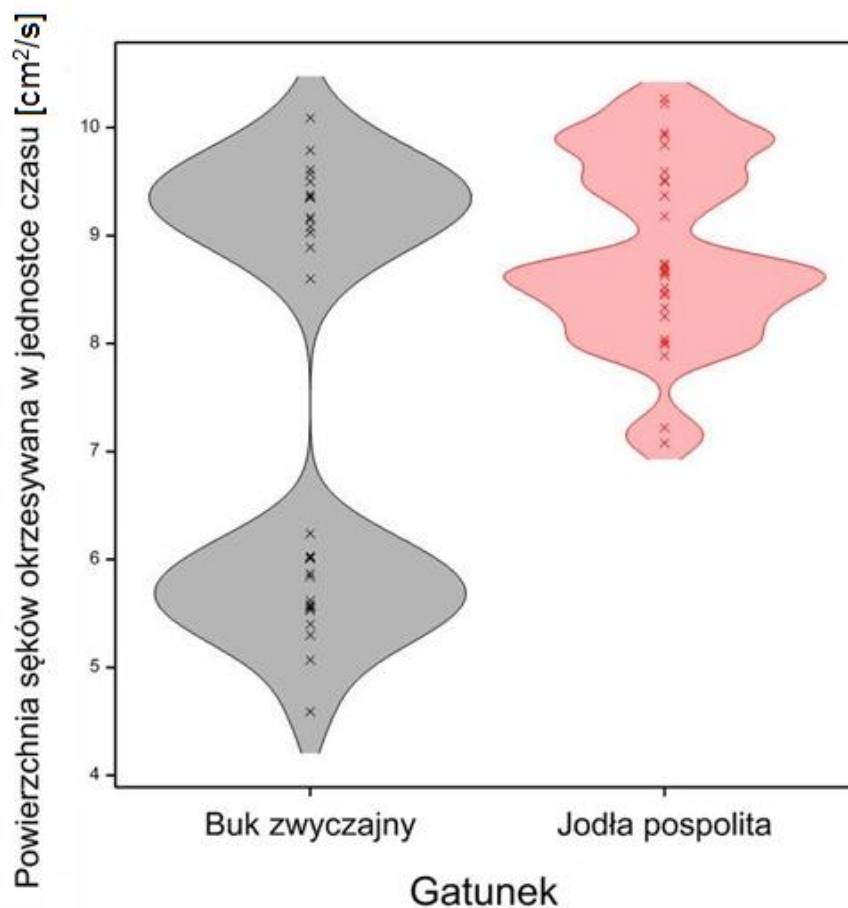
Podstawowe charakterystyki statystyczne	Gatunek	
	Buk zwyczajny	Jodła pospolita
Suma	224,4	265,8
Średnia arytmetyczna	7,479 b	8,859 a
Wartość minimalna	4,59	7,08
Wartość maksymalna	10,09	10,27
Wariancja	3,748	0,743
Mediana	7,42	8,685
Skośność	-0,01898	-0,08037
Kurtoza	-1,824	-0,801
Odchylenie standardowe	1,936	0,862
Standardowy błąd średniej	0,3535	0,1574
Najmniejsza istotna różnica dla interakcji gatunek × metoda okrzesywania: $NIR_{0,05}=0,239$		
Wartości średnie oznaczone tą samą literą nie różnią się istotnie statystycznie.		

Zdecydowanie większą medianę zaobserwowano u jodły pospolitej (8,685 cm²/s), niż u buka zwyczajnego (7,42 cm²/s) (ryc. 31 i 32).



Ryc. 31. Wykres pudełkowy (boxplot) powierzchni sęków okrzesywanej w jednostce czasu [cm^2/s], determinowany poziomami czynnika gatunek (źródło: opracowanie własne autora)

Buk zwyczajny charakteryzował się większym zakresem wartości powierzchni sęków okrzesywanej w jednostce czasu, niż jodła pospolita (ryc. 31 i 32).



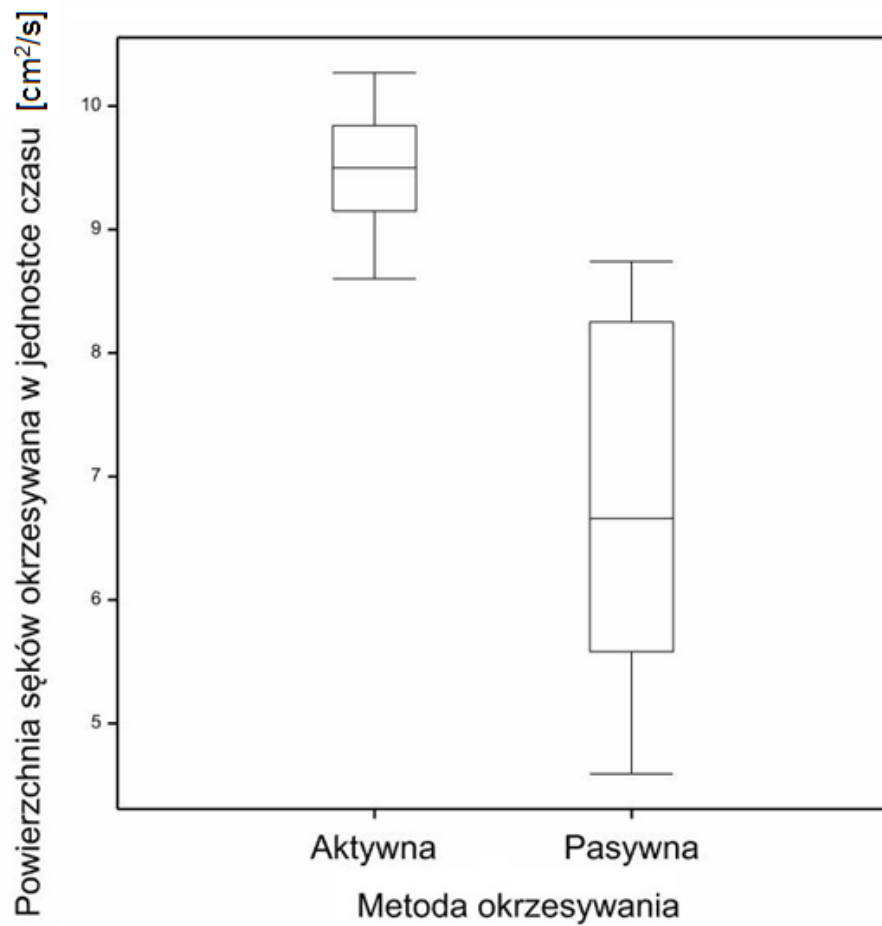
Ryc. 32. Wykres gęstości powierzchni sęków okrzyszowanej w jednostce czasu [cm²/s], determinowany poziomami czynnika gatunek (źródło: opracowanie własne autora)

Aktywna metoda okrzyszowania surowca charakteryzowała się większymi wartościami parametrów położenia: sumą, wartością średnią, wartościami minimalną i maksymalną oraz medianą (tabela 11), niż pasywna metoda okrzyszowania. Mniejszą wartość skośności zaobserwowano dla pasywnej metody okrzyszowania (0,01373), wobec aktywnej metody okrzyszowania (-0,16388). Uwagę należy zwrócić na fakt przeciwnych skośności, przy zastosowaniu wspomnianych wyżej metod okrzyszowania. Mniejszą kurtozą charakteryzowała się pasywna metoda okrzyszowania (-1,632), w stosunku do metody aktywnej (-0,761) (tabela 11):

Tabela 11. Podstawowe charakterystyki statystyczne określające parametry położenia oraz rozproszenia powierzchni sęków okrzesywanych w jednostce czasu dla poszczególnych metod okrzesywania (źródło: opracowanie własne autora)

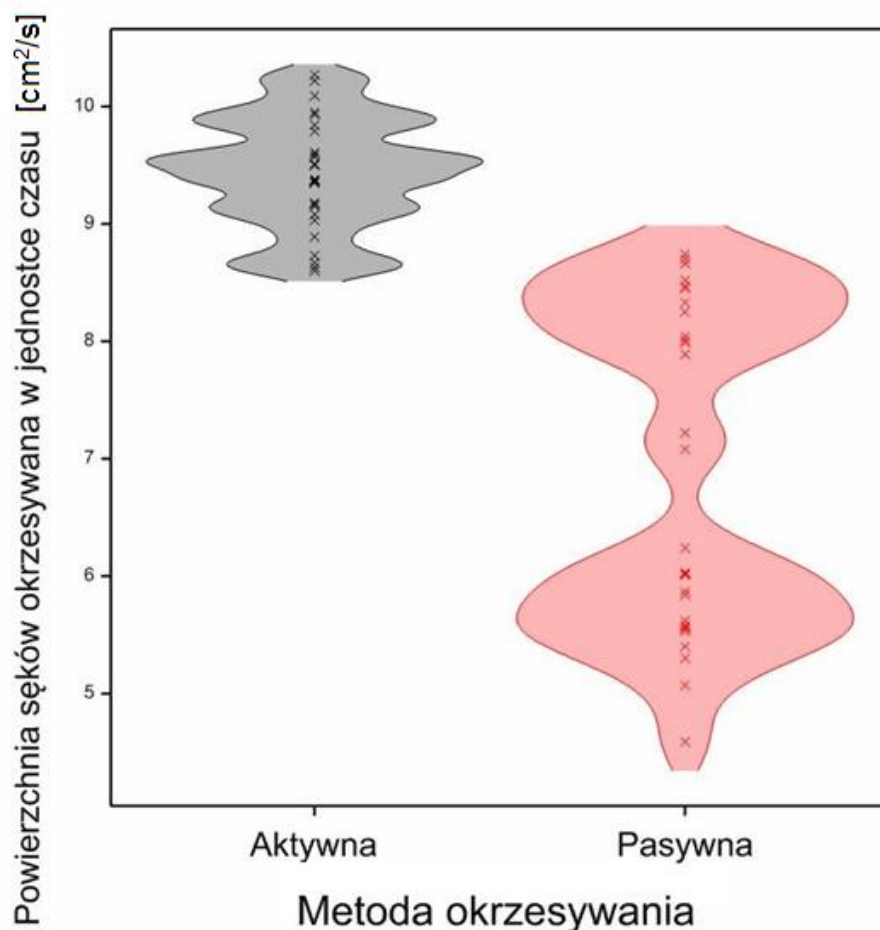
Podstawowe charakterystyki statystyczne	Metoda okrzesywania	
	Aktywna	Pasywna
Suma	283,3	206,8
Średnia arytmetyczna	9,443 a	6,894 b
Wartość minimalna	8,6	4,59
Wartość maksymalna	10,27	8,74
Wariancja	0,217	1,897
Mediana	9,5	6,66
Skośność	-0,16388	0,01373
Kurtoza	-0,761	-1,632
Odchylenie standardowe	0,4663	1,3775
Standardowy błąd średniej	0,0851	0,2515
Najmniejsza istotna różnica dla interakcji gatunek × metoda okrzesywania: $NIR_{0,05}=0,239$		
Wartości średnie oznaczone tą samą literą nie różnią się istotnie statystycznie.		

Zdecydowanie większą medianę zaobserwowano przy zastosowaniu aktywnej metody okrzesywania ($9,5 \text{ cm}^2/\text{s}$), niż przy zastosowaniu metody pasywnej ($6,66 \text{ cm}^2/\text{s}$) (ryc. 33 i 34).



Ryc. 33. Wykres pudełkowy (boxplot) powierzchni sęków okrzesywanej w jednostce czasu [cm^2/s], determinowany poziomami czynnika metoda okrzesywania (źródło: opracowanie własne autora)

Pasywna metoda okrzesywania charakteryzowała się większym zakresem wartości powierzchni sęków okrzesywanej w jednostce czasu, niż aktywna metoda okrzesywania (ryc. 33 i 34).



Ryc. 34. Wykres gęstości powierzchni sęków okrzyszowana w jednostce czasu [cm²/s], determinowany poziomami czynnika metoda okrzyszowania (źródło: opracowanie własne autora)

Analiza regresji liniowej pozwoliła na wybór najlepszego modelu dopasowującego obserwacje empiryczne. Dla buka zwyczajnego, rozważanego bez względu na zastosowaną metodę okrzyszowania, zaobserwowane istotny statystycznie (na poziomie istotności 0,001) wpływ czasu okrzyszowania surowca na powierzchnię sęków okrzyszowanych w jednostce czasu (tabela 12). Współczynnik determinacji dla tego modelu wynosi 86,5%, co świadczy o bardzo dobrym dopasowaniu danych empirycznych do teoretycznego modelu matematycznego. W przypadku pozostałych cech objaśniających nie zaobserwowano istotności statystycznych, a współczynniki determinacji nie były większe od 4,5% (tabela 12):

Tabela 12. Wyniki analizy regresji poszczególnych cech objaśniających na powierzchnię sęków okrzesywanych w jednostce czasu dla buka zwyczajnego, bez względu na zastosowaną metodę okrzesywania (źródło: opracowanie własne autora)

Cecha objaśniająca (niezależna), x	Model	Procent wyjaśnianej	
		zmienności (współczynnik determinacji)	Błąd standardowy obserwacji
Średnica pnia	$y=12,72*-0,252x$	0,6	1,93
Liczba sęków	$y=9,56**-0,172x$	<0,1	1,95
Powierzchnia wszystkich sęków	$y=13,36**-0,0157x$	4,5	1,89
Czas okrzesywania surowca	$y=13,198***-0,106x***$	86,5	0,711

Zastosowanie wielozmiennej analizy regresji do oceny wpływu czterech cech rozważanych równocześnie na powierzchnię sęków okrzesywanych w jednostce czasu pozwoliło na stwierdzenie, że powierzchnia wszystkich sęków i czas okrzesywania surowca determinowały powierzchnię sęków okrzesywanych w jednostce czasu (tabela 13). Powierzchnia wszystkich sęków wpływała wprost proporcjonalnie (0,02277), a czas okrzesywania surowca odwrotnie proporcjonalnie (-0,13192) na powierzchnię sęków okrzesywanych w jednostce czasu (tabela 13). Współczynnik determinacji zaproponowanego modelu wielokrotnego był bardzo wysoki i wynosił 97%.

Tabela 13. Wyniki wielozmiennej analizy regresji cech objaśniających na powierzchnię sęków okrzesywanych w jednostce czasu dla buka zwyczajnego bez względu na zastosowaną metodę okrzesywania (źródło: opracowanie własne autora)

Parametr	Estymator (ocena parametru)	Błąd standardowy
Stała regresyjna	6,399***	0,875
Średnica pnia	-0,0189	0,0718
Liczba sęków	0,0063	0,084
Powierzchnia wszystkich sęków	0,02277***	0,00487
Czas okrzesywania surowca	-0,13192***	0,00462

Procent wyjaśnianej	
zmienności	97,0
(współczynnik	
determinacji)	
Błąd standardowy	0,337
obserwacji	

Wpływ poszczególnych cech niezależnych na powierzchnię sęków okrzesywanych w jednostce czasu rozważano również niezależnie dla pasywnej (tabele 14 i 15) i aktywnej (tabele 16 i 17) metody okrzesywania. Rozważając jedynie pasywną metodę okrzesywania buka zwyczajnego zaobserwowano, że wszystkie cechy niezależne, analizowane niezależnie, wpływały istotnie statystycznie na powierzchnię sęków okrzesywanych w jednostce czasu w sposób odwrotnie proporcjonalny (tabela 14). Procent zmienności powierzchni sęków okrzesywanych w jednostce czasu wyjaśnianej zmiennością poszczególnych cech niezależnych wynosił od 25,2% (dla liczby sęków) do 89,4% (czasu okrzesywania surowca) (tabela 14).

Tabela 14. Wyniki analizy regresji poszczególnych cech objaśniających na powierzchnię sęków okrzesywanych w jednostce czasu dla buka zwyczajnego, przy zastosowaniu pasywnej metody okrzesywania (źródło: opracowanie własne autora)

Cecha objaśniająca (niezależna), x	Model	Procent wyjaśnianej	
		zmienności (współczynnik determinacji)	Błąd standardowy obserwacji
Średnica pnia	$y=9,45^{***}-0,1822x^{**}$	36,4	0,337
Liczba sęków	$y=7,545^{***}-0,157x^*$	25,2	0,366
Powierzchnia wszystkich sęków	$y=9,418^{***}-$ $0,0099x^{***}$	53,7	0,288
Czas okrzesywania surowca	$y=8,238^{***}-$ $0,038x^{***}$	89,4	0,138

Zastosowanie wielozmiennej analizy regresji do oceny wpływu czterech cech rozważanych równocześnie na powierzchnię sęków okrzesywanych w jednostce czasu przy zastosowaniu pasywnej metody okrzesywania buka zwyczajnego pozwoliło na stwierdzenie, że powierzchnia wszystkich sęków i czas okrzesywania surowca determinowały badaną cechę (tabela 15). Powierzchnia wszystkich sęków wpływała wprost proporcjonalnie (0,0099),

a czas okrzyszowania surowca odwrotnie proporcjonalnie (-0,06442) na powierzchnię sęków okrzyszowanych w jednostce czasu (tabela 15). Współczynnik determinacji zaproponowanego modelu wielokrotnego był bardzo wysoki i wynosił 97,7%.

Tabela 15. Wyniki wielozmiennej analizy regresji cech objaśniających na powierzchnię sęków okrzyszowanych w jednostce czasu dla buka zwyczajnego, przy zastosowaniu pasywnej metody okrzyszowania (źródło: opracowanie własne autora)

Parametr	Estymator (ocena parametru)	Błąd standardowy
Stała regresyjna	6,428***	0,333
Średnica pnia	-0,0022	0,0188
Liczba sęków	-0,0095	0,0217
Powierzchnia wszystkich sęków	0,0099***	0,00186
Czas okrzyszowania surowca	-0,06442***	0,00421
<hr/>		
Procent wyjaśnianej zmienności (współczynnik determinacji)	97,7	
Błąd standardowy obserwacji	0,0647	

Rozważając jedynie **aktywną** metodę okrzyszowania buka zwyczajnego zaobserwowano, że średnica pnia oraz czas okrzyszowania surowca nie determinowały powierzchni sęków okrzyszowanych w jednostce czasu (tabela 15). Pozostałe dwie cechy: liczba sęków oraz powierzchnia wszystkich sęków wpływały wprost proporcjonalnie na analizowaną cechę zależną. Procent zmienności powierzchni sęków okrzyszowanych w jednostce czasu, wyjaśnianej zmiennością liczby sęków, wynosił 35,6%, natomiast powierzchnią wszystkich sęków 49,0% (tabela 16).

Tabela 16. Wyniki analizy regresji poszczególnych cech objaśniających na powierzchnię sęków okrzesywanych w jednostce czasu dla buka zwyczajnego, przy zastosowaniu **aktywnej** metody okrzesywania (źródło: opracowanie własne autora)

Cecha objaśniająca (niezależna), x	Model	Procent wyjaśnianej zmienności (współczynnik determinacji)	Błąd standardowy obserwacji
Średnica pnia	$y=7,5^{***}+0,0898x$	8,2	0,358
Liczba sęków	$y=7,226^{***}+0,177x^*$	35,6	0,299
Powierzchnia wszystkich sęków	$y=6,519^{***}+0,0077x^{**}$	49,0	0,267
Czas okrzesywania surowca	$y=7,27^{***}+0,053x$	9,6	0,355

Zastosowanie wielozmiennej analizy regresji do oceny wpływu czterech cech rozważanych równocześnie na powierzchnię sęków okrzesywanych w jednostce czasu przy zastosowaniu **aktywnej** metody okrzesywania buka zwyczajnego pozwoliło na stwierdzenie, że powierzchnia wszystkich sęków i czas okrzesywania surowca determinowały badaną cechę (tabela 17). Powierzchnia wszystkich sęków wpływała wprost proporcjonalnie (0,02524), a czas okrzesywania surowca odwrotnie proporcjonalnie (-0,23494) na powierzchnię sęków okrzesywanych w jednostce czasu (tabela 17). Współczynnik determinacji zaproponowanego modelu wielokrotnego był bardzo wysoki i wynosił 99,8%. Na uwagę i większą dyskusję zasługuje odwrócenie proporcjonalności wpływu czasu okrzesywania surowca na powierzchnię sęków okrzesywanych w jednostce czasu (tabela 16 i 17).

Tabela 17. Wyniki wielozmiennej analizy regresji cech objaśniających na powierzchnię sęków okrzesywanych w jednostce czasu dla buka zwyczajnego, przy zastosowaniu aktywnej metody okrzesywania (źródło: opracowanie własne autora)

Parametr	Estymator (Ocena parametru)	Błąd standardowy
Stała regresyjna	9,3225***	0,0601
Średnica pnia	0,00169	0,00622
Liczba sęków	-0,00482	0,00587
Powierzchnia wszystkich sęków	0,02524***	0,000355
Czas okrzesywania surowca	-0,23494***	0,00475
<hr/>		
Procent wyjaśnianej zmienności (współczynnik determinacji)	99,8	
Błąd standardowy obserwacji	0,0148	

Analiza regresji liniowej pozwoliła na wybór najlepszego modelu dopasowującego obserwacje empiryczne. Dla **jodły pospolitej**, rozważanej bez względu na zastosowaną metodę okrzesywania, zaobserwowano istotny statystycznie (na poziomie istotności 0,001) odwrotnie proporcjonalny wpływ czasu okrzesywania surowca na powierzchnię sęków okrzesywanych w jednostce czasu (tabela 18). Współczynnik determinacji dla tego modelu wynosi 51,5%, co świadczy o bardzo dobrym dopasowaniu danych empirycznych do teoretycznego modelu matematycznego. W przypadku pozostałych cech objaśniających nie zaobserwowano istotności statystycznych, a współczynniki determinacji były mniejsze od 0,1% (tabela 18).

Tabela 18. Wyniki analizy regresji poszczególnych cech objaśniających na powierzchni sęków okrzesywanych w jednostce czasu dla jodły pospolitej bez względu na zastosowaną metodę okrzesywania (źródło: opracowanie własne autora)

Cecha objaśniająca (niezależna), x	Model	Procent wyjaśnianej	
		zmienności (współczynnik determinacji)	Błąd standardowy obserwacji
Średnica pnia	$y=8,27^{***}+0,0271x$	<0,1	0,875
Liczba sęków	$y=7,96^{***}+0,0403x$	<0,1	0,872
Powierzchnia wszystkich sęków	$y=9,97^{***}-0,004x$	<0,1	0,869
Czas okrzesywania surowca	$y=12,617^{***}-$ $0,111x^{***}$	51,5	0,601

Zastosowanie wielozmiennej analizy regresji pozwoliło zaobserwować równoczesny istotny statystycznie wpływ średnicy pnia, powierzchni wszystkich sęków oraz czasu okrzesywania surowca na powierzchnię sęków okrzesywanych w jednostce czasu (tabela 19). Średnica pnia oraz powierzchnia wszystkich sęków wpływały wprost proporcjonalnie (odpowiednio, 0,0444 oraz 0,02449), a czas okrzesywania surowca odwrotnie proporcjonalnie (-0,228) na powierzchnię sęków okrzesywanych w jednostce czasu (tabela 19). Współczynnik determinacji zaproponowanego modelu wielokrotnego był bardzo wysoki i wynosił 98,4%.

Tabela 19. Wyniki wielozmiennej analizy regresji cech objaśniających na powierzchnię sęków okrzesywanych w jednostce czasu dla jodły pospolitej bez względu na zastosowaną metodę okrzesywania (źródło: opracowanie własne autora)

Parametr	Estymator (Ocena parametru)	Błąd standardowy
Stała regresyjna	7,887***	0,22
Średnica pnia	0,0444*	0,0171
Liczba sęków	0,0209	0,0116
Powierzchnia wszystkich sęków	0,02449***	0,00188
Czas okrzesywania surowca	-0,228***	0,00607
Procent wyjaśnianej		
zmienności (współczynnik determinacji)	98,4	

Błąd standardowy obserwacji	0,108
-----------------------------	-------

Wpływ poszczególnych czterech cech niezależnych na powierzchnię sęków okrzesywanych w jednostce czasu jodły pospolitej rozważano również niezależnie dla pasywnej (tabele 20 i 21) i aktywnej (tabele 22 i 23) metody okrzesywania. Rozważając jedynie **pasywną** metodę okrzesywania jodły pospolitej zaobserwowano, że wszystkie cechy niezależne analizowane osobno wpływały istotnie statystycznie na powierzchnię sęków okrzesywanych w jednostce czasu (tabela 20) w sposób odwrotnie proporcjonalny. Procent zmienności powierzchni sęków okrzesywanych w jednostce czasu, wyjaśnianej zmiennością poszczególnych cech niezależnych, wynosił od 56,5% (dla średnicy pnia) do 90,0% (dla czasu okrzesywania surowca) (tabela 20).

Tabela 20. Wyniki analizy regresji poszczególnych cech objaśniających na powierzchnię sęków okrzesywanych w jednostce czasu dla jodły pospolitej, przy zastosowaniu pasywnej metody okrzesywania (źródło: opracowanie własne autora)

Cecha objaśniająca (niezależna), x	Model	Procent wyjaśnianej	
		zmienności (współczynnik determinacji)	Błąd standardowy obserwacji
Średnica pnia	$y=11,818^{***}-$ $0,169x^{***}$	56,5	0,326
Liczba sęków	$y=11,608^{***}-$ $0,158x^{***}$	57,6	0,322
Powierzchnia wszystkich sęków	$y=12,326^{***}-$ $0,014x^{***}$	68,8	0,276
Czas okrzesywania surowca	$y=11,124^{***}-$ $0,079x^{***}$	90,0	0,156

Interesujące wyniki uzyskano stosując wielozmienną analizę regresji czterech niezależnych cech równocześnie na powierzchnię sęków okrzesywanych w jednostce czasu jodły pospolitej, przy zastosowaniu **pasywnej** metody okrzesywania (tabela 21). Zaobserwowano istotny statystycznie wpływ powierzchni wszystkich sęków oraz czasu okrzesywania surowca na powierzchnię sęków okrzesywanych w jednostce czasu (tabela 20), przy czym druga z wymienionych cech wpływała odwrotnie proporcjonalnie (-0,1665)

na powierzchnię sęków okrzesywanych w jednostce czasu (tabela 21). Współczynnik determinacji zaproponowanego modelu wielokrotnego był bardzo wysoki i wynosił 99,0%:

Tabela 21. Wyniki wielozmiennej analizy regresji cech objaśniających na powierzchnię sęków okrzesywanych w jednostce czasu dla jodły pospolitej przy zastosowaniu pasywnej metody okrzesywania (źródło: opracowanie własne autora)

Parametr	Estymator (Ocena parametru)	Błąd standardowy
Stała regresyjna	8,989***	0,228
Średnica pnia	0,0279	0,0169
Liczba sęków	-0,0015	0,0105
Powierzchnia wszystkich sęków	0,01597***	0,00207
Czas okrzesywania surowca	-0,1665***	0,00884
<hr/>		
Procent wyjaśnianej zmienności (współczynnik determinacji)	99,0	
Błąd standardowy obserwacji	0,05	

Wpływ wszystkich czterech cech niezależnych, rozważanych indywidualnie, na powierzchnię sęków okrzesywanych w jednostce czasu **jodły pospolitej**, przy zastosowaniu **aktywnej** metody okrzesywania, został potwierdzony statystycznie (tabela 22). Wszystkie cztery cechy wpływały wprost proporcjonalnie na powierzchnię sęków okrzesywanych w jednostce czasu. Procent zmienności powierzchni sęków okrzesywanych w jednostce czasu, wyjaśnianej zmiennością poszczególnych cech niezależnych, wynosił od 22,3% (dla liczby sęków) do 70,0% (dla powierzchni wszystkich sęków) (tabela 22).

Tabela 22. Wyniki analizy regresji poszczególnych cech objaśniających na powierzchnię sęków okrzesywanych w jednostce czasu dla jodły pospolitej przy zastosowaniu aktywnej metody okrzesywania (źródło: opracowanie własne autora)

Cecha objaśniająca (niezależna), x	Model	Procent wyjaśnianej zmienności (współczynnik determinacji)	Błąd standardowy obserwacji
Średnica pnia	$y=5,53^{***}+0,182x^{**}$	48,9	0,385
Liczba sęków	$y=7,01^{***}+0,112x^*$	22,3	0,474
Powierzchnia wszystkich sęków	$y=5,371^{***}+0,014x^{***}$	70,0	0,295
Czas okrzesywania surowca	$y=5,23^*+0,1423x^*$	24,5	0,468

Ponownie interesujące wyniki uzyskano stosując wielozmienną analizę regresji czterech niezależnych cech równocześnie na powierzchnię sęków okrzesywanych w jednostce czasu jodły pospolitej, przy zastosowaniu aktywnej metody okrzesywania (tabela 23). Zaobserwowano istotny statystycznie wpływ powierzchni wszystkich sęków (0,033086) oraz czasu okrzesywania surowca (-0,3221) na powierzchnię sęków okrzesywanych w jednostce czasu (tabela 23), przy czym druga z wymienionych cech odwróciła znak proporcjonalności (w stosunku do wpływu indywidualnego, testowanego w modelu pojedynczej regresji) na powierzchnię sęków okrzesywanych w jednostce czasu (tabela 23). Współczynnik determinacji zaproponowanego modelu wielokrotnego był bardzo wysoki i wynosił 99,6%.

Tabela 23. Wyniki wielozmiennej analizy regresji cech objaśniających na powierzchnię sęków okrzesywanych w jednostce czasu dla jodły pospolitej przy zastosowaniu aktywnej metody okrzesywania (źródło: opracowanie własne autora)

Parametr	Estymator (ocena parametru)	Błąd standardowy
Stała regresyjna	9,601***	0,18
Średnica pnia	0,00347	0,00841
Liczba sęków	0,00169	0,00596
Powierzchnia wszystkich sęków	0,033086***	0,000961
Czas okrzesywania surowca	-0,3221***	0,0105

Procent wyjaśnianej zmienności (współczynnik determinacji)	99,6
Błąd standardowy obserwacji	0,0338

Współzależności między powierzchniami sęków okrzesywanymi w jednostce czasu dla poszczególnych kombinacji gatunków i metod okrzesywania oceniono na podstawie analizy autokorelacji. Współczynniki korelacji liniowej Pearsona dla wszystkich par kombinacji gatunków i metod okrzesywania obliczono jako determinanty poszczególnych cech objaśniających: średnicy pnia (tabela 24, ryc. 29), liczby sęków (tabela 25, ryc. 30), powierzchni wszystkich sęków (tabela 26, ryc. 31) oraz czasu okrzesywania surowca (tabela 27, ryc. 32).

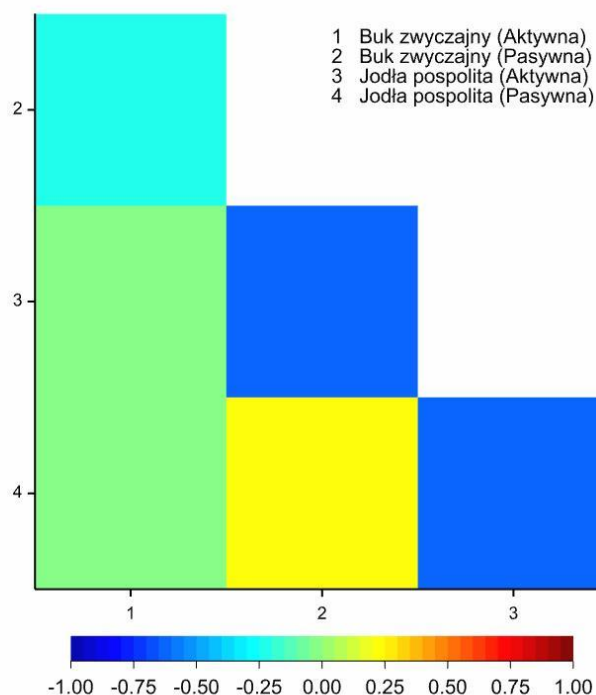
Autokorelacja powierzchni sęków okrzesywanych w jednostce czasu, analizowana jako determinanta rosnących wartości średnicy pnia, wykazała ujemną współzależność obserwowanej cechy u buka zwyczajnego okrzesywanego metodą pasywną, a jodły pospolitej okrzesywanej metodą aktywną ($r=-0,606$) (tabela 24, ryc. 29).

Tabela 24. Współczynniki autokorelacji liniowej Pearsona między powierzchniami sęków okrzesywanymi w jednostce czasu dla poszczególnych kombinacji gatunków (buk zwyczajny i jodła pospolita) jodła i metod okrzesywania (aktywna i pasywna) ze względu na rosnące wartości średnicy pnia (źródło: opracowanie własne autora)

	Buk zwyczajny (Aktywna)	Buk zwyczajny (Pasywna)	Jodła pospolita (Aktywna)	Jodła pospolita (Pasywna)
Buk zwyczajny (Aktywna)	1			
Buk zwyczajny (Pasywna)	-0,227	1		
Jodła pospolita (Aktywna)	-0,019	-0,606*	1	
Jodła pospolita (Pasywna)	-0,033	0,243	-0,601*	1

* $P < 0,05$

Podobnie, ujemną, ale statystycznie istotną, autokorelację analizowaną jako determinanta rosnących wartości średnicy pnia, zaobserwowano pomiędzy powierzchniami sęków okrzesywanymi w jednostce czasu dla jodły pospolitej okrzesywanej metodą aktywną i jodły pospolitej okrzesywanej metodą pasywną ($r=-0,601$) (tabela 24, ryc. 35).

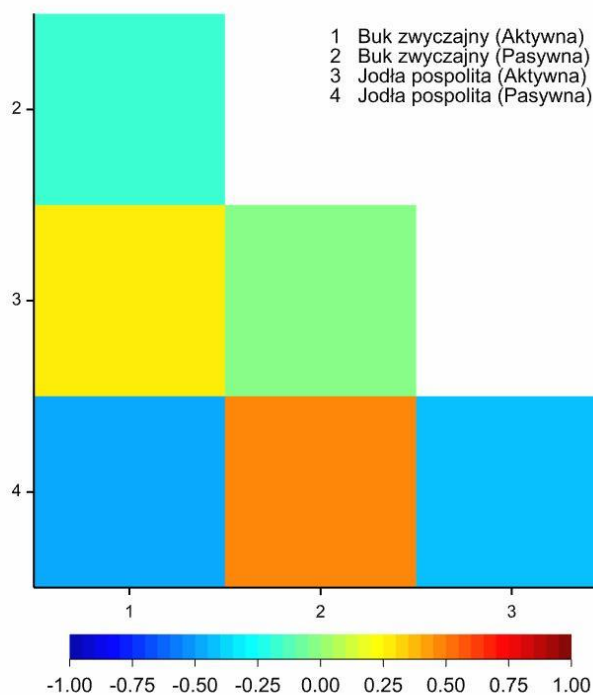


Ryc. 35. Współczynniki autokorelacji liniowej Pearsona między powierzchniami sęków okrzesywanymi w jednostce czasu dla poszczególnych kombinacji gatunków (buk zwyczajny i jodła pospolita) jodła i metod okrzesywania (aktywna i pasywna) ze względu na rosnące wartości średnicy pnia (źródło: opracowanie własne autora)

Autokorelacja powierzchni sęków okrzesywanych w jednostce czasu, analizowana jako determinanta rosnących wartości liczby sęków, wykazała brak istotnych statystycznie współzależności obserwowanej cechy pomiędzy wszystkimi sześcioma analizowanymi i testowanymi parami (tabela 25, ryc. 36).

Tabela 25. Współczynniki autokorelacji liniowej Pearsona między powierzchniami sęków okrzesywanymi w jednostce czasu dla poszczególnych kombinacji gatunków (buk zwyczajny i jodła pospolita) jodła i metod okrzesywania (aktywna i pasywna) ze względu na rosnące wartości liczby sęków (źródło: opracowanie własne autora)

	Buk zwyczajny (Aktywna)	Buk zwyczajny (Pasywna)	Jodła pospolita (Aktywna)	Jodła pospolita (Pasywna)
Buk zwyczajny (Aktywna)	1			
Buk zwyczajny (Pasywna)	-0,183	1		
Jodła pospolita (Aktywna)	0,286	-0,004	1	
Jodła pospolita (Pasywna)	-0,451	0,480	-0,418	1



Ryc. 36. Współczynniki autokorelacji liniowej Pearsona między powierzchniami sęków okrzesywanymi w jednostce czasu dla poszczególnych kombinacji gatunków (buk zwyczajny i jodła pospolita) jodła i metod okrzesywania (aktywna i pasywna) ze względu na rosnące wartości liczby sęków (źródło: opracowanie własne autora)

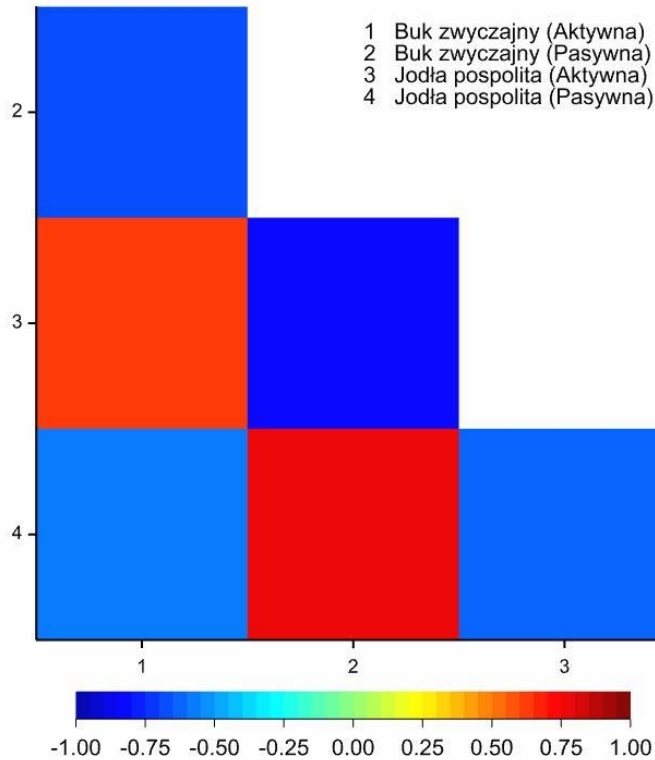
Autokorelacja powierzchni sęków okrzesywanymi w jednostce czasu analizowana jako determinanta rosnących wartości powierzchni wszystkich sęków wykazała statystycznie istotne współzależności dla wszystkich sześciu rozważanych par (tabela 26, ryc. 31).

Tabela 26. Współczynniki autokorelacji liniowej Pearsona między powierzchniami sęków okrzesywanymi w jednostce czasu dla poszczególnych kombinacji gatunków (buk zwyczajny i jodła pospolita) oraz metod okrzesywania (aktywna i pasywna), ze względu na rosnące wartości powierzchni wszystkich sęków

	Buk zwyczajny (Aktywna)	Buk zwyczajny (Pasywna)	Jodła pospolita (Aktywna)	Jodła pospolita (Pasywna)
Buk zwyczajny (Aktywna)	1			
Buk zwyczajny (Pasywna)	-0,697**	1		
Jodła pospolita (Aktywna)	0,645**	-0,810***	1	
Jodła pospolita (Pasywna)	-0,557*	0,752**	-0,631*	1

* P<0,05; ** P<0,01; *** P<0,001

Współzależności ujemne zaobserwowano dla powierzchniami sęków okrzesywanymi w jednostce czasu: buka zwyczajnego okrzesywanego metodą aktywną, a buka zwyczajnego okrzesywanego metodą pasywną ($r=-0,697$), buka zwyczajnego okrzesywanego metodą aktywną a jodły pospolitej okrzesywanej metodą pasywną ($r=-0,557$), buka zwyczajnego okrzesywanego metodą pasywną a jodły pospolitej okrzesywanej metodą aktywną ($r=-0,810$) oraz jodły pospolitej okrzesywanej metodą aktywną, a jodły pospolitej okrzesywanej metodą pasywną ($r=-0,631$) (tabela 26, ryc. 31). Dodatnie współczynniki korelacji odnotowano pomiędzy powierzchniami sęków okrzesywanymi w jednostce czasu dla buka zwyczajnego okrzesywanego metodą aktywną a jodły pospolitej okrzesywanej metodą aktywną ($r=0,645$) oraz buka zwyczajnego okrzesywanego metodą pasywną a jodły pospolitej okrzesywanej metodą pasywną ($r=0,752$) (tabela 26, ryc. 37).



Ryc. 37. Współczynniki autokorelacji liniowej Pearsona między powierzchniami sęków okrzesywanymi w jednostce czasu dla poszczególnych kombinacji gatunków (buk zwyczajny i jodła pospolita) jodły i metod okrzesywania (aktywna i pasywna) ze względu na rosnące wartości powierzchni wszystkich sęków (źródło: opracowanie własne autora)

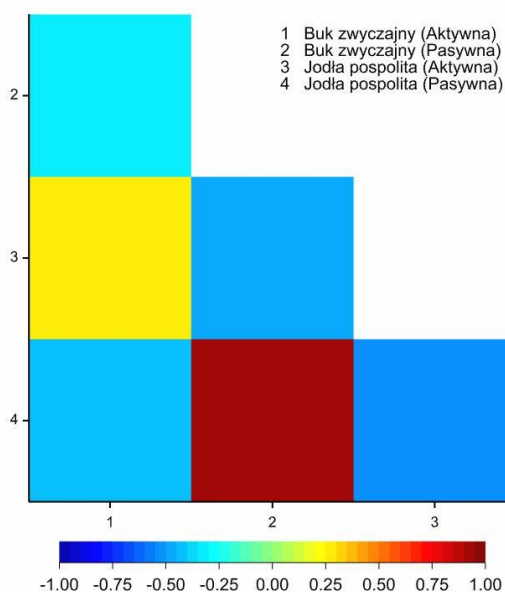
Autokorelacja powierzchni sęków okrzesywanych w jednostce czasu, analizowana jako determinanta rosnących wartości czasu okrzesywania surowca, wykazała statystycznie istotne współzależności dla dwóch z sześciu rozważanych par (tabela 27, ryc. 32). Współzależność ujemną zaobserwowano dla powierzchniami sęków okrzesywanych w jednostce czasu jodły pospolitej okrzesywanej metodą aktywną, a jodły pospolitej okrzesywanej metodą pasywną ($r=-0,533$) (tabela 27, ryc. 32).

Tabela 27. Współczynniki autokorelacji liniowej Pearsona między powierzchniami sęków okrzesywanymi w jednostce czasu dla poszczególnych kombinacji gatunków (buk zwyczajny i jodła pospolita) jodła i metod okrzesywania (aktywna i pasywna) ze względu na rosnące wartości czasu okrzesywania surowca (źródło: opracowanie własne autora)

	Buk zwyczajny (Aktywna)	Buk zwyczajny (Pasywna)	Jodła pospolita (Aktywna)	Jodła pospolita (Pasywna)
Buk zwyczajny (Aktywna)	1			
Buk zwyczajny (Pasywna)	-0,315	1		
Jodła pospolita (Aktywna)	0,300	-0,473	1	
Jodła pospolita (Pasywna)	-0,413	0,916***	-0,533*	1

* P<0,05; *** P<0,001

Natomiast dodatnią istotną statystycznie współzależność zaobserwowano pomiędzy powierzchnią sęków okrzesywaną w jednostce czasu buka zwyczajnego okrzesywanego metodą pasywną a powierzchnią sęków okrzesywaną w jednostce czasu jodły pospolitej okrzesywanej metodą pasywną. Współczynniki autokorelacji wynosi $r=0,916$ i jest istotny na poziomie 0,001 (tabela 27, ryc. 38).



Ryc. 38. Współczynniki autokorelacji liniowej Pearsona między powierzchniami sęków okrzesywanymi w jednostce czasu dla poszczególnych kombinacji gatunków (buk zwyczajny i jodła pospolita) i metod okrzesywania (aktywna i pasywna), ze względu na rosnące wartości czasu okrzesywania surowca (źródło: opracowanie własne autora)

6. Wnioski i dyskusja

1. Parametry techniczne użytych do budowy prototypu silników elektrycznych, (2kW mocy każdego z silników oraz prędkość poruszania piły łańcuchowej na poziomie 13.5 m/s) umożliwiają płynne okrzesywanie kłód przesuwanych przez niego z prędkością do wartości $0,40 \text{ m/s}$. Powyżej tej wartości odnotowuje się wyraźne spadki wydajności urządzenia, zakłócenia w jego płynnej pracy oraz problemy techniczne. W odniesieniu do prowadzonych przez autora niniejszego opracowania badań oraz użytych w tym celu materiałów należy uznać, iż maksymalną wydajność oraz optymalne warunki pracy prototyp głowicy GO-01 osiąga podczas pracy z surowcem przesuwany z prędkością do $0,40 \text{ m/s}$.
2. Wraz ze wzrostem prędkości posuwu okrzesywanego surowca wewnątrz głowicy wzrasta różnica pomiędzy czasem okrzesywania kłody, a czasem posuwu liny nieobciążonej.
3. Średnia powierzchnia wszystkich sęków na 30 kłodach jodłowych wyniosła $296,39 \text{ cm}^2$, przy uśrednionej średnicy pnia wynoszącej $21,8 \text{ cm}$, wobec średniej powierzchni wszystkich sęków na 30 pniach buka pospolitego na poziomie $374,53 \text{ cm}^2$, przy uśrednionej średnicy pnia $20,8 \text{ cm}$ - pierwszy wskaźnik odmiennej budowy morfologicznej gatunku liściastego, wobec iglastego.
4. Uśredniona sumaryczna powierzchnia sęków jodły pospolitej ($296,39 \text{ cm}^2$) wynika z odcięcia średnio 22 gałęzi, wobec powierzchni sęków buka zwyczajnego ($374,53 \text{ cm}^2$) - średnio z 12 gałęzi - drugi wskaźnik odmiennej budowy morfologicznej gatunku liściastego, wobec iglastego.
5. W procesie aktywnego okrzesywania surowca drzewnego z wykorzystaniem prototypu głowicy okrzesywającej w sposób aktywny GO-01, zarówno w przypadku okrzesywania surowca iglastego, jak i liściastego, udało się osiągnąć wydajność okrzesywania wyższą, niż przy okrzesywaniu sposobem pasywnym. W przypadku surowca iglastego wydajność wzrosła o $16,8\%$, podczas gdy wskaźnik ten, dla surowca liściastego, osiągnął aż $66,5\%$. Zaprezentowany przez autora prototyp głowicy okrzesywającej GO-01 wykazuje zatem zakładaną skuteczność w okrzesywaniu surowca drzewnego. Należy jednak pamiętać, iż wynik ten osiągnięto w określonych warunkach, tj. przy niskiej prędkości posuwu surowca, odmiennej od tej stosowanej powszechnie w maszynach wielooperacyjnych.

Zgromadzone w toku badań wyniki wskazują, iż w przypadku okrzesywania kłód metoda pasywną, bardzo duże znaczenie dla wydajności procesu ma gatunek okrzesywanego surowca, a właściwie cechy jego budowy morfologicznej: grubość gałęzi, ich ilość oraz gęstość drewna (twardość surowca). Ta metoda okrzesywania charakteryzowała się znacznie niższą wydajnością odcinania gałęzi z pni bukowych w jednostce czasu ($5,61\text{m}^2/\text{s}$), niż miało to miejsce w przypadku kłód jodłowych ($8,17\text{m}^2/\text{s}$), co jest wynikiem gorszym o ponad 45%. Przy zastosowaniu pasywnej metody okrzesywania surowca, gdzie gałęzie są odcinane po napotkaniu odpowiednio dużego, wzajemnego ich oporu wobec pasywnego noża tnącego, opór stawiany nożom przez gałęzie buka jest zdecydowanie większy, niż w przypadku jodły, z uwagi na wyższą gęstość drewna bukowego, większe średnice gałęzi oraz ostry kąt wyrastania konarów z pnia, zbliżony do 60° (w przypadku jodły konary wyrastają z pnia pod kątem niemal 90°). Wynikiem takiego stanu rzeczy jest konieczność dłuższego napinania liny wciągarki po napotkaniu noży tnących na gałąź buka, celem nadania nożom odpowiednio wysokiej energii, niezbędnej do odcięcia gałęzi. Dłuższy okres napinania liny skutkuje wolniejszym tempem okrzesywania surowca, a zatem niższą wydajnością procesu w jednostce czasu.

Zastosowanie aktywnej metody okrzesywania spowodowało wzrost wydajności procesu okrzesywania, zarówno w przypadku surowca iglastego (o 16,8%), jak i liściastego (o 66,5%).

Co istotne, odnotowana w przypadku metody pasywnej zależność, dotycząca różnic w budowie morfologicznej drzew, przy metodzie aktywnej zdaje się mieć zaledwie marginalne znaczenie - morfologia drewna liściastego w odniesieniu do drewna iglastego, wpływa na spowolnienie procesu okrzesywania o zaledwie 2%. Jest to zapewne spowodowane faktem, iż przy zastosowaniu aktywnej metody okrzesywania odcinanie gałęzi następuje wskutek skrawania wióra drzewnego przez piły łańcuchowe, stanowiące układ tnący głowicy. Podczas realizacji cięcia nie ma kumulacji energii statycznej, jak podczas napinania liny przy metodzie pasywnej, a jedynym oporem jaki napotyka układ tnący jest opór zębów pił na obrabianym surowcu. Kluczowym dla skutecznej pracy układu jest dobranie takiej prędkości pracy, aby w układzie nie pojawiały się zbędne naprężenia, jak przy metodzie pasywnej (nie za wysokiej), ale także aby nie generować strat energii (przy prędkości zbyt niskiej). Zaproponowana w badaniach wstępnych optymalna prędkość posuwu surowca przez głowicę ($0,40\text{m}/\text{s}$) zdaje się być odpowiednia zarówno dla surowca iglastego, jak i liściastego, przez co proces okrzesywania jest realizowany w sposób niemal identyczny pod względem prędkości i wydajności dla obu gatunków.

Z powyższych rozważań wynika, iż zaproponowany przez autora model głowicy aktywnej wykazuje zakładaną skuteczność w okrzesywaniu zarówno surowca iglastego, jak i liściastego. Niestety, największą wadą urządzenia jest zdecydowanie niższa wydajność pracy, niż w przypadku stosowanych powszechnie rozwiązań pasywnych. Zastosowane do budowy prototypu głowicy środki techniczne (maksymalna prędkość obrotowa pił w układzie tnącym na poziomie ok. $13,5 \text{ m/s}$) pozwalają na osiągnięcie maksymalnych wydajności przy prędkości posuwu surowca przez głowicę na poziomie zaledwie $0,40 \text{ m/s}$, podczas gdy produkowane obecnie głowice maszyn wielooperacyjnych dokonują skutecznego okrzesywania surowca przy posuwie z prędkością $3-7 \text{ m/s}$ (Dargnat et. al., 2014). Należy zauważyć, iż przy tej prędkości posuwu ilość zgromadzonej energii statycznej w nożach okrzesywujących jest nieporównywalnie większa, niż przy okrzesywaniu z prędkością przyjętą do badań w ramach tego opracowania. Nie ma także podstaw by sądzić, iż okrzesywanie surowca metodą aktywną z taką prędkością byłoby równie skuteczne, co metodą pasywną, o ile w ogóle byłoby możliwe.

Żeby dokładnie zobrazować skalę rozbieżności pomiędzy tempem pracy obu urządzeń, należy oszacować czas pracy urządzenia przy okrzesywaniu całej strzały. Zgodnie z danymi opublikowanymi przez Karwackiego (2021), średni czas okrzesywania i sortymentacji strzał sosnowych o wysokości ok. 25m, zbadany na próbie 44 sztuk na terenie Nadleśnictwa Krasieczyn, o podobnych warunkach terenowych do Nadleśnictwa Bircza, wyniósł ok. 29 sekund.

Przyjmując pewne uproszczenie, iż okrzesywanie surowca z wykorzystaniem modelu głowicy GO-01 będzie się odbywać jednostajnie na całej długości strzały, okrzesanie pnia na długości 25m zajmie urządzeniu około 75 sekund ($30,12 \text{ s}/_{10\text{m}} \times 2,5$), i jest to czas obejmujący wyłącznie proces okrzesywania, bez sortymentacji. Wobec powyższego, wydajność pracy urządzenia jest przynajmniej 2,5-krotnie niższa, niż rozwiązania stosowane obecnie w harwesterach. Fakt ten poddaje w wątpliwość ewentualną opłacalność zaprojektowania, wyprodukowania i użytkowania głowicy przy tak niskiej wydajności zmianowej. Należy jednak pamiętać, iż są to rozważania wyłącznie teoretyczne, a szacunki nie uwzględniają różnic w gęstości obu gatunków drzew i pozostałych czynników, mogących mieć wpływ na czas okrzesywania surowca.

Jedynym sposobem na zwiększenie wydajności pracy głowicy aktywnej jest zastosowanie w jej konstrukcji rozwiązań technicznych, umożliwiających pracę pił tnących z wyższą prędkością obrotową. Zgodnie ze specyfikacją techniczną głowicy wielooperacyjnej John Deere H290, piła łańcuchowa zamontowana na jej spodniej stronie, służąca do manipulacji

i sortymentacji surowca, porusza się z prędkością ok. 40 m/s , (w prototypie głowicy GO-01 max. $13,5 \text{ m/s}$), a zatem na rynku maszyn wielooperacyjnych funkcjonują już rozwiązania techniczne potencjalnie przydatne do opracowania takiej głowicy. Teoretyczne zwiększenie prędkości pił okrzesujących w prototypie do wartości deklarowanych przez producenta w/w harwestera potencjalnie pozwoliłoby na osiągnięcie 3-krotnie wyższej wydajności okrzesywania, czyniąc ten proces jeszcze bardziej skutecznym i uzasadnionym ekonomicznie.

W odniesieniu do drewna iglastego, opracowanie nowego rodzaju głowicy, a następnie prowadzenie procesu okrzesywania tego typu surowca w sposób aktywny, zdaje się nie znajdować logicznego uzasadnienia z uwagi na fakt, iż obecnie stosowane głowice pasywne dokonują obróbki surowca iglastego w sposób skuteczny, a przy tym szybki i z zachowaniem zadowalającej jakości surowca drzewnego.

Jednakże, w odniesieniu do surowca liściastego, okrzesywanego na całym świecie niemal wyłącznie z użyciem pilarek ręcznych, zaproponowane przez autora rozwiązanie potencjalnie może znaleźć zastosowanie przy projektowaniu następnej generacji głowic maszyn wielooperacyjnych. Pomimo faktu, iż proces okrzesywania surowca z użyciem prototypu odbywał się z niewielką prędkością, to jednak dzięki zastosowaniu pewnego stopnia automatyzacji proces ten zdaje się być szybszy i, co najważniejsze, bezpieczniejszy dla operatora, niż wykonywanie tego procesu w sposób ręczny, z użyciem pilarek. W kwestii bezpieczeństwa zdrowia i życia ludzkiego zaproponowane rozwiązanie może się okazać skutecznym sposobem na uniknięcie choćby części wypadków, jakie w dalszym ciągu odnotowuje się w tym trudnym sektorze gospodarki.

Należy tu także nadmienić, że jednym z kluczowych powodów dążenia do automatyzacji procesów technologicznych jest stale postępujący spadek siły roboczej na rynku, co ostatnimi czasy stwierdza się także w branży leśnej. Zaprojektowanie głowicy automatycznej, nawet nie tak wydajnej i opłacalnej jak w systemie pasywnym, pozwoli kontynuować prace w ramach gospodarki leśnej, zamiast rezygnować z jej prowadzenia z powodu braku wykwalifikowanej siły roboczej.

Co istotne, prototyp głowicy okrzesującej GO-01 zbudowano w warunkach warsztatowych, bez dostępu do procesów technologicznych wykorzystywanych przy produkcji przemysłowej. Wyprodukowanie go w warunkach fabrycznych, przy dostępie do nowoczesnych rozwiązań technicznych (jak chociażby wspomniane wyżej piły w głowicy, pracujące z prędkością obrotową na poziomie 40 m/s zamiast $13,5 \text{ m/s}$ w pilarence ręcznej) oraz przy znacznie wyższym budżecie, teoretycznie mogłoby umożliwić osiągnięcie zadowalającej wydajności całego procesu okrzesywania, zarówno pod kątem ekonomii procesu, jak i jakości wyprodukowanego surowca drzewnego.

7. Wady i zalety prototypu oraz propozycje ulepszeń

Podczas realizacji II etapu badań, realizowanego w warunkach terenowych, oraz bezpośrednio po jego zakończeniu, autor niniejszej rozprawy zgromadził informacje o wadach oraz zaletach zbudowanego urządzenia:

Wady:

- niska wydajność pracy urządzenia (w obecnej formie); w celu rozwiązania tego problemu należałoby zbudować głowicę z wykorzystaniem technologii przemysłowej;
- potencjalnie wysokie koszty wyprodukowania i użytkowania urządzenia w wymiarach rzeczywistych (konieczność kosztownego serwisowania i wymiany pił łańcuchowych, stanowiących układ tnący głowicy (7szt.);
- konieczność zachowania wysokiego stopnia precyzji przy budowie urządzenia,
- autor rozprawy szacuje, iż urządzenie w wymiarach rzeczywistych zapewne będzie wykazywać się dużo wyższą masą od głowic pasywnych, z uwagi na jej wysoki stopień złożoności.

Zalety:

- urządzenie wykazuje zakładaną skuteczność w okrzesywaniu drzew, a przy tym zdaje się być niewrażliwe na rodzaj okrzesywanego przez nie surowca (niemal tak samo skuteczne w przypadku drzew iglastych i liściastych);
- może stanowić potencjalny sposób na zwiększenie stopnia ochrony zdrowia i życia pracowników leśnych (rezygnacja lub redukcja wolumenu pracy ręcznej);
- urządzenie stanowi potencjalne rozwiązanie problemu kurczącej się siły roboczej przy pracy leśnej.

Autor rozprawy pokusił się także o opracowanie wniosków, dotyczących możliwości usprawnienia prototypu, nie tylko w celu polepszenia parametrów jego pracy, ale także w celu zwiększenia jego trwałości, bezawaryjności i bezpieczeństwa pracy. Ponadto, niektóre wnioski autor wysnuł już podczas realizacji procesu budowy prototypu, jednak ze względu na ograniczenia techniczne i finansowe, konieczne było zastosowanie w prototypie rozwiązań kompromisowych:

- a) zastosowanie silników hydraulicznych w miejscu elektrycznych - podobnie jak ma to miejsce w obecnie stosowanych układach, silniki napędzające poszczególne piły łańcuchowe byłyby zintegrowane z układem hydraulicznym harwestera; takie rozwiązanie jest nie tylko bardziej trwałe i bezawaryjne, ale także odporne na działanie

czynników atmosferycznych w trudnych warunkach terenowych; poza tym, rozwiązanie to jest stosunkowo tanie w produkcji, kompaktowe i nie wymaga dodatkowego zasilania z układu elektrycznego maszyny (obciążenie instalacji elektrycznej);

b) zamontowanie bocznych „skrzydeł” okrzesujących w głowicy w sposób naprzemianległy - rozwiązanie to także jest znane z obecnie stosowanych głowic pasywnych, w których noże okrzesujące, podczas chwytania surowca o mniejszej średnicy, układają się krzyżowo wobec siebie nawzajem i tym samym dopasowują do średnicy pnia. W prototypie GO-01 zamontowano oba skrzydła w jednej płaszczyźnie, przez co proces dopasowania płaszczyzny tnącej do gabarytów kłody jest możliwy w bardzo niewielkim stopniu. Zamknięcie skrzydeł głowicy jest możliwe tylko do położenia minimalnego, przez co surowiec o mniejszej średnicy nie jest okrzesywany z wystarczającą dokładnością. Autor prototypu nie zdecydował się krzyżowe ułożenie skrzydeł świadomie, już na etapie projektowania urządzenia, z uwagi na fakt, iż naprzemianległe ułożenie skrzydeł wymagałoby wydłużenia głowicy o 100%, co wpłynęłoby negatywnie na gabaryty oraz sztywność urządzenia. Koniecznym byłoby wzmocnienie całej konstrukcji, a co za tym idzie - znaczne zwiększenie jego masy własnej, ponad możliwości udźwigu rąk ludzkich. Zamiarem autora było jednak wykonanie badań terenowych wyłącznie z wykorzystaniem siły ludzkich mięśni, bez angażowania dodatkowych środków transportowych. Na potrzeby realizacji zaplanowanych badań, gdzie przed budową prototypu dokonano oględzin drzewostanu i pomiaru średnic drzew wyznaczonych do pozyskania (drzewa o zbliżonych gabarytach), zdolność adaptacji głowicy do parametrów drzew nie była wymagana, wobec czego zdecydowano się na rozwiązanie kompromisowe;

c) zastosowanie sąsiadujących ze sobą silników o przeciwnym kierunku obrotów - rozwiązanie to pozwoli uniknąć sytuacji, w których odkształcenie prowadnic pod ciężarem surowca prowadzi do kolizji sąsiadujących ze sobą pił łańcuchowych. Jest to sytuacja nie tylko niebezpieczna dla operatora, ale także generująca dodatkowe koszty: wymiana uszkodzonych pił oraz przestoje w pracy, spowodowane koniecznością dokonania napraw, stanowią stratę finansową dla zarządcy maszyny. Wystąpienie ewentualnych kolizji sąsiadujących ze sobą pił łańcuchowych o przeciwnym kierunku obrotu nie wiązałoby się z uszkodzeniem układu;

d) pochylenie boczne wszystkich prowadnic pił względem osi wzdłużnej głowicy w tym samym kierunku o niewielki kąt (max 1,5-2,5%) lub umieszczanie sąsiadujących ze sobą pił naprzemiennie wysuniętej do przodu i cofniętej do tyłu - obecnie zastosowane w urządzeniu równoległe położenie prowadnic, w celu okrzesywania surowca w sposób skuteczny i z zachowaniem zadowalającej jakości procesu, wymaga zamontowania prowadnic i pił w bliskim sąsiedztwie wobec siebie. Rozwiązanie to wymaga dużej precyzji wykonania, w przeciwnym wypadku może dochodzić do kolizji sąsiadujących ze sobą pił. Niewielkie odchylenie prowadnic od osi wzdłużnej głowicy lub wycofanie co drugiej piły względem sąsiedniej umożliwiłoby zwiększenie odległości pomiędzy sąsiadującymi piłami i równie skutecznie odcinanie gałęzi od pnia bez ryzyka kolizji. Pośrednim rozwiązaniem tego problemu jest zaproponowana w podpunkcie c zmiana kierunku obrotów położonych obok siebie silników lub usztywnienie konstrukcji prowadnic, celem uniknięcia ich odkształcania pod naciskiem surowca drzewnego, co jednak wiąże się ze wzrostem masy własnej głowicy.

Prototyp głowicy okrzyszującej GO-01 stanowi przedmiot zgłoszenia do ochrony w Urzędzie Patentowym RP, złożonego w dniu 27 maja 2021r. w Centrum Transferu Technologii Uniwersytetu Rolniczego im. Hugona Kołłątaja w Krakowie, którego kserokopia stanowi załącznik nr 2 do niniejszej pracy. Do dnia wydruku niniejszej rozprawy wniosek nie został rozpatrzony.

8. Literatura

1. **Ackerman S.A., Talbot B. & Astrup R., 2022**, The effect of tree and harvester size on productivity and harvester investment decisions, *International Journal of Forest Engineering*, 33:1, 22-32, DOI: 10.1080/14942119.2021.1981046
2. **ADIKOV S.G., 2007**, Study of the effect of tangential ultrasonic oscillations of the instrument on the efficiency of the process of machining wood (*in Russian*). PhD thesis, Nizhny Novgorod, Russian Federation, 188 p
3. **Aksakal E.L., Oztaş T., 2010**, Changes in distribution patterns of soil penetration resistance within a silage-corn field following the use of heavy harvesting equipments. *Turk J Agric For* 34: 173-179.
4. **Aksakal E.L., Oztaş T., Ozgul M., 2011**, Time-dependent changes in distribution patterns of soil bulk density and penetration resistance in a rangeland under overgrazing. *Turk J Agric For* 35: 195-204.
5. **Alam, M., Acuna, M., Brown, M., 2013**, Self-Levelling Feller-Buncher Productivity Based on Lidar-Derived Slope. *Croat. j. for. eng.* 34(2): 273–281.
6. **Amishev, D., Evanson, T., Raymond, K., 2009**, Felling and Bunching on Steep Terrain – A Review of the Literature. Harvesting Technical Note HTN01-07, Future Forests Research Limited, Rotorua, New Zealand, 10 p.
7. **Andersson B., 1994**, Cut-to-length and tree-length harvesting systems in Central Alberta: A comparison. FERIC, Technical Report TR-108.
8. **Aniszewska M., Brzózko J., Skarżyński J., 2011**, *Harwestery do pozyskiwania drewna stosowane w polskich lasach. Cz. 2 – Głowice harwesterowe*, Technika Rolnicza Ogrodnicza Leśna 2, 2011;
9. **ARTHUR M.A., COLTHARP G.B., BROWN D.L., 1998**, Effects of best management practices on forest streamwater quality in Eastern Kentucky. *J. Am. Water Resour. Assoc.* 34:481– 495.
10. **Asikainen A., Leskinen L.A., Pasanen K., Väätäinen K., Anttila P. Tahvanainen T., 2009**, *Metsäkonesektorin nykytila ja tulevaisuus. Metlan työraportteja 125. PDF-document.* <http://www.metla.fi/julkaisut/workingpapers/2005/mwp008.htm>; updated: 29.5.2009. Read: 1.12.2010.
11. **Asikainen A., Anttila P., Verkerk H., Diaz O., Röser D., 2011**, *Development of forest machinery and labour in the EU in 2010-2030*, FORMEC Austria 2011, October 9-13, 2011, Graz;

12. **ASTASHEV V.K., KRUPENIN V.L., 2016**, Ultrasonic cutting as a nonlinear (vibro-impact) process. Engineering for rural development. Jelgava, 25-27 May 2016. Jelgava, pp 218-223.
13. **Attfield M., Schleiff P., Lubin J. et. al., 2012**, The diesel exhaust in miners study: a cohort mortality study with emphasis on lung cancer. J Natl Cancer Inst 104(11):869–883
14. **Bacher-Winterhalter M., 2004**, *Optimierungsmöglichkeiten und Restriktionen eines Mechanisierten Holzerntesystems bei der Umsetzung Moderner Waldbaukonzepte am Beispiel des Sudschwarzwaldes*. Doctor Theses. Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Fakultät für Forst- und Umweltwissenschaften, p. 228.
15. **Bartlett M. S., 1937**, Właściwości wystarczalności i testy statystyczne. Proceedings of the Royal Statistical Society, Series A 160, 268–282
16. **Bembenek M., Mederski P.S., Karaszewski Z., Łacka A., Grzywiński W., Węgiel A., Giefing D.F., Erler J., 2015**, Length accuracy of logs from birch and aspen harvested in thinning operations, Turkish Journal of Agriculture and Forestry, (2015) 39: 845-850, doi:10.3906/tar-1406-39.
17. **Bernadzki, E., 2005**, *Naturalne odnowienie lasu*. Warszawa, PWRiL, 41-45.
18. **Bergqvist G., 1998**, Wood density traits in Norway spruce understorey: Effects of growth rate and birch shelterwood density. Ann. Sci. For. **1998**, 55, 809–821.
19. **Bigot M., 2001**, Using machines to harvest hardwoods in France. In: 24th Council on Forest Engineering (COFE) “Appalachian Hardwoods: Managing Change”, Snowshoe, WV, USA, 15–18 July 2001; pp. 3.
20. **Bigot M, Cuchet E., 2003**, Mechanized harvesting system for hardwoods. In: M. Iwarsson Wide & B. Baryd, editors. Arbetsrapport 537, SkogForsk. 2nd Forest Engineering Conference, Vaxjo, Sweden. 12-15 May 2003; pp. 57–66.
21. **Bilici E., Akay A. E., Abbas D., 2017**, An evaluation of a fully mechanized forest harvesting operation in Bursa, Turkey. International Symposium on New Horizons in Forestry, 18-20 October 2017. Oral presentation.
22. **Binder F., Maier B., 2014**, *Harvesting technologies used in the Alpine Space according to topographic and forest network situation and data available*. Interreg Alpine Space project - NEWFOR, Project number 2- 3- 2- FR
23. **Biuro Urządzania Lasu i Geodezji Leśnej, Oddział w Przemysłu, 2017**, Plan urządzenia lasu. Ogólny opis lasów Nadleśnictwa Bircza na lata 2017-2026. Przemysł 2017 r.

24. **Bolding M.C., Lanford B.L., 2002**, Productivity of a Ponsse ergo harvester working on steep terrain. In: Proc. 25th Annual Council on Forest Engineering Meeting; Auburn, AL.
25. **Boldrini C., Bonnemazou M., Peuch D., Perinot C., Cacot E., 2018**, Machines de bucheronnage pour les feuillus et état des lieux du parc et méthodes de travail (Inventory of logging machines for hardwoods and working methods). FCBA; 2018. pp. 5. https://www.fcba.fr/wp-content/uploads/2020/09/Fcbainfo_2018_42_parc_machines_bucheronnage_feuillus.pdf (accessed 19.04.2021).
26. **Bombosch, F., Sohns, D., Nollau, R., Kanzler, H., 2003**, Are forest operations on steep terrain with wheel mounted forwarders without slippage possible? Austro 2003: High Tech Forest Operations for Mountainous Terrain. October 5–9, 2003, Schlägl-Austria, 5 p.
27. **Bonnemazou M., Cacot E., Ruch P., 2018**, Parc national d'engins forestiers et taux de mécanisation de la récolte forestière en 2018 (Forest machinery and forest mechanisation rate in 2018). FCBA; 2019. pp. 3. <https://www.fcba.fr/wp-content/uploads/2020/11/fcbainfo-2019-12-parc-national-engins-forestiers-taux-mechanisation-recolte-forestiere-2018-bonnemazoucacot-ruch.pdf> (accessed 19.04.2021).
28. **Bort U., Mahler G., Pfeil Chr., 1993**, *Mechanisierte Holzernte. Wechselwirkungen von Erchliebungsdichte, Pfleglichkeit und Betriebserfolg*. Forsttechnische Informationen, 11, 121- 124;
29. **Brunberg, T., Thelin, A., Westerling S., 1989**, Underlag för produktionsnormer för engreppsskördare i gallring. Summary: Basic data for productivity standards for single-grip harvesters in thinning. The Forestry Research Institute of Sweden, Uppsala. Redogörelse 3. 25 p.
30. **Brunberg T., 1991**, Underlag för produktionsnormer för beståndsgående engreppsskördare i gallring - en litteraturstudie. Summary: Productivity norms for stand-operating single-grip harvesters in thinning - a study of the literature. The Forestry Research Institute of Sweden, Uppsala. Redogörelse 3. 23 p.
31. **Brunberg T., 1997**, Underlag för produktionsnorm för engreppsskördare i gallring. Summary: Basic productivity norms for single-grip harvesters in thinning. The Forestry Research Institute of Sweden, Uppsala. Redogörelse 8. 18 p.
32. **Brzózko, J.; Skarżyński J., 2009**, Wysokowydajne maszyny do pozyskiwania drewna. *Drwal*, 1(44)T, 32-33.

33. **Buras A., Menzel A., 2018**, Projecting tree species composition changes of European Forests for 2061–2090 under RCP 4.5 and RCP 8.5 scenarios. *Front Plant Sci.* 2019;9:1986. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01986>.
34. **Buras A., Menzel A., 2019**, Projecting tree species composition changes of European Forests for 2061–2090 under RCP 4.5 and RCP 8.5 scenarios. *Front Plant Sci.* 2019;9:1986. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01986>.
35. **Cacot E., 2009**, Mechanization of the hardwood exploitation: evolutions and questions, *Foret Wallonne* 102 (2009), 34-44;
36. **Cavalli R., 2015**, Forest Operations in Steep Terrain. Presented at Conference CROJFE 2015 »Forest Engineering – Current Situation and Future Challenges«, March 18–20, 2015, Zagreb, Croatia (retrieved from www.crojfe2015.com/home)
37. **Cacot E., Fauroux J.C., Peuch D., Bouvet A., Chakroun M., 2016**, New delimiting tool for hardwood trees: feedback on new ribbed knives after one year experience. In: A. Gendek, T. Moskalik, editors. 49th Symposium on Forest Mechanization (FORMEC): From Theory to Practice: Challenges for Forest Engineering. Warsaw, Poland, 4-7 September 2016; pp. 37–43.
38. **Ciubotaru A., Câmpu R. V., 2018**, *Delimiting and Cross-cutting of Coniferous Trees—Time Consumption, Work Productivity and Performance*, *Forests* 2018, 9(4), 206; <https://doi.org/10.3390/f9040206>
39. **Cântar I.-C.; Ciontu C.-I.; Dincă L.; Borlea G.F.; Crișan V.E., 2022**, Damage and Tolerability Thresholds for Remaining Trees after Timber Harvesting: A Case Study from Southwest Romania. *Diversity* 2022, 14, 193. <https://doi.org/10.3390/d14030193>
40. **DARGNAT G., DEVEMY C., FAUROUX J.C., PELLET H.P., HATTON B., PERRIGUEY N., GOUBET D., CHEBAB Z., BOUZGARROU B.C., GAGNOL V., GOGU G., 2014**, Determination and optimization of delimiting forces on hardwood harvesting heads; 7th International Symposium on Forestry Mechanisation: “Forest engineering: propelling the forest value chain”, September 23-26, 2014 in Gerardmer, France.
41. **Długosiewicz L., Grzebieniowski W., 2009**, Porównanie wybranych technologii pozyskania drewna pod względem wydajności i kosztów, *Inżynieria Rolnicza* 8(117)/2009;
42. **Dudáková (Allmanová) Z., Allman M., Merganič J., Merganičová K., 2020**, Machinery-Induced Damage to Soil and Remaining Forest Stands—Case Study from Slovakia. *Forests* 2020, 11, 1289; [doi:10.3390/f11121289](https://doi.org/10.3390/f11121289)

43. **Dvořák J., Malkowský Z., Macků J., 2008**, Influence of human factor on the time of work stages of harvesters and crane-equipped forwarders. Těšnov, *Journal of Forest Science*, ISSN 1212-4834.
44. **Enez K., Arıçak B., 2012**, “Ağaç Hasat Makinesine Ait Teknik ve Çalışma Koşullarının Değerlendirilmesi”, *Journal of Science and Engineering*, Kahramanmaraş Sutcu Imam University, Special Issue 2012, 108-114.
45. **Erber G., Holzleitner F., Kastner M., Stampfer K., 2016**, *Effect of multi-tree handling and tree-size on harvester performance in small-diameter hardwood thinnings*, *Silva Fennica* vol. 50 no. 1 article id 1428. 17p.
46. **Eliasson L., 1998**, Analyses of single-grip harvester productivity. Doctoral thesis. Swedish University of Agricultural Sciences. Department of Operational Efficiency. Umeå. 24 p. + 4 separate articles.
47. **ELIASSON L., HANELL B., NORDFJELL T., 2000**, Productivity and costs in shelterwood harvesting. *Scand. J. For. Res.*, 15: 561-569.
48. **Evanson, T., Amishev, D., Parker, R., Harrill, H., 2013**, *An evaluation of a ClimbMAX Steep Slope Harvester in Maungataniwha Forest, Hawkes Bay* (Report No. H013). Rotorua, New Zealand: Future Forests Research.
49. **Forbrig A., 1994**, *RuckegassenabsHinde ein heiBes Eisen*. *Forsttechnische Informationen*, 6: 57- 59;
50. **Froding A., 1992**, *Bestandsskador vid gall ring (Thinning damage to coniferous stand in Sweden)*. Sveriges Lantbruksuniversitet. Garpenberg;
51. **Frutig, F.; Fahrni, F.; Stettler, A.; Egger, A., 2007**, Mechanisierte Holzernte in Hanglagen. *Wald Holz* 88, 4: 47-52.
52. **Gerasimov Y., Seliverstov A., Syunev V., 2012**, *Industrial Round-Wood Damage and Operational Efficiency Losses Associated with the Maintenance of a Single-Grip Harvester Head Model: A Case Study in Russia*; *Forests* 2012, 3, 864-880; doi:10.3390/f3040864
53. **Glazar K., Maciejewska H., 2008**, *Struktura czasu i wydajność pozyskiwania i zrywki drewna w drzewostanach sosnowych przy użyciu harwardera Buffalo Dual*, *Inżynieria Rolnicza* 1(99)/2008, 111-118;
54. **Glöde D., 1999**, Single- and double-grip harvesters - Productive measurements in final cutting of shelterwood. *Journal of Forest Engineering* 10(2): 63–74.
55. **Główny Urząd Statystyczny, 2018**, *Rocznik Statystyczny Leśnictwa*, Warszawa 2018, s. 201

56. **Goubet D., Fauroux J.-C., Gogu G., 2013**, Gripping mechanisms in current wood har-vesting machines, *Frontiers Mech. Eng.* 8 (2013) 42–61
57. **Goychuk D., Kilgore M. A., Blinn C. R., Coggins J., Kolka R. K., 2011**, The Effect of Timber Harvesting Guidelines on Felling and Skidding Productivity in Northern Minnesota, *Forest Science* · October 2011
58. **Gryc V.; Vavrčák H.; Gomola Š., 2008**, Selected properties of European beech (*Fagus sylvatica* L.). *J. For. Sci.* 2008, 54, 418–428.
59. **Guglhor W., 1993**, *Akzeptanzprobleme beim Einsatz von Kranvollerntern in der Durchforstung*. *Allgemeine Forst Zeitschrift*, 17: 892- 895;
60. **Hånell B., Nordfjell T., Eliasson L., 2000**, Productivity and costs in shelterwood harvesting. *Scandinavian Journal of Forest Research* 15: 561–569.
61. **Hatton B., Gagnol V. Bouzgarrou B.C., Fauroux J.C., Gogu G., 2017**, Modelling and simulation of an harvester head mechanism, *Mechanics & Industry* 18, 309 AFM, EDP Sciences 2017, DOI: 10.1051/meca/2016055
62. **Hiesl P., 2013**, *Productivity Standards for Whole-Tree and CutTo-Length Harvesting Systems in Maine*. Master's Thesis, University of Maine, Orono, ME, USA, p. 150.
63. **Holzleitner F., Stampfer K., Visser R., 2011**, *Utilization Rates and Cost Factors in Timber Harvesting Based on Long-term Machine Data*, *Croat. j. for. eng.* 32(2011)2, (501-508);
64. **Horn R., Vossbrink J., Peth, S., Becker, S., 2007**, Impact of modern forest vehicles on soil physical properties. *Forest Ecology and Management* 248: 56–63.
65. **Hys E., 2007**, *Wpływ zmian właściwości fizycznych gleby wywołanych przejazdami maszyn po powierzchni zrębu zupełnego na cechy drzewostanów sosnowych*, Praca doktorska. SGGW - Wydział Leśny, Warszawa;
66. **Jiroušek R., Klvač R., Skoupý A., 2007**, *Productivity and costs of the mechanised cut-to-length wood harvesting system in clear-felling operations*, *JOURNAL OF FOREST SCIENCE*, 53, 2007 (10): 476–482
67. **Karaszewski Z., Łacka A., Bembenek M., Mederski P.S., 2016a**, Rozmiar uszkodzeń i strat olszowego drewna łuszczarskiego pozyskanego harwesterem Valmet 911.4 z głowicą 360.2. *Sylwan* 160(12): 1002–1009. DOI 10.26202/sylwan.2016060.
68. **Karaszewski Z., Mederski P.S., Noskowiak A., Rosińska M., Łacka A., Bembenek M., 2016b**. Delimiting quality and bucking accuracy of alder, pine and spruce logs harvested by Valmet 911.4. *Annals of Warsaw University of Life Sciences – SGGW Forestry and Wood Technology* 95: 56–61.

69. **Kariniemi A., 2006**, Kuljettäjakeskeisen hakkuukonetyön malli - työn suorituksen kognitiivinen tarkastelu. Abstract: Operator-specific model for mechanical harvesting – cognitive approach to work performance. Helsingin yliopiston metsävarojen käytön laitoksen julkaisuja 38. Yliopistopaino, Helsinki. 126 p.
70. **Karjalainen T., Zimmer B., Berg S., Welling J., Schwaiger H., Fin ér L., Cortijo P., 2001**, *Energy, carbon and other material flows in the Life Cycle Assessment of forestry and forest products. Achievements of the Working Group 1 of the COST Action E9.* European Forest Institute, Finland: 68.
71. **Karwacki R., 2021**, Analiza ilości i powierzchni cięć gałęzi przy okrzesywaniu głowicą harwesterową w wybranym drzewostanie sosnowym, Praca magisterska na kierunku Leśnictwo.
72. **Kellog L.D., Bettinger P., 1994**, Thinning productivity and cost for mechanized cut-to-length system in the Northwest Pacific coast region of the USA. *Journal of Forest Engineering* 5(2): 43–52.
73. **Kheifets L., 2012**, Epidemiologic studies of ELF and their contribution to risk assessment. 24th Annual Meeting of the Bioelectromagnetics Society, Quebec 23–27 June 2002
74. **KILGORE M.A., BLINN C.R., 2004**, Policy tools to encourage the application of timber harvesting guidelines in the United States and Canada. *For. Policy Econ.* 6(2):111–127.
75. **Kormanek M., Kępa M., 2016**, *Analysis of performance of timber harvesting with the use of HIGHLANDER harvester*, *Agricultural Engineering*, 2016, Vol. 20, No. 3 , pp.73-82, ISSN 2083-1587; e - ISSN 2449-5999, DOI: 10.1515/agriceng-2016-0045
76. **Kormanek M., Baj D., 2018**, *Analysis of operation performance in the proces of machine wood harvesting with FAO FAR 6840 mini-harvester*, *Agricultural Engineering* 2018, Vol . 22, No. 1, pp. 73-82, ISSN 2083-1587; e-ISSN 2449-5999, DOI: 10.1515/agriceng-2018-0007;
77. **Kuitto P.J., Keskinen S., Lindroos J., Oijala T., Rajamäki J., Räsänen T., Terävä J., 1994**, Puutavaran koneellinen hakkuu ja metsäkuljetus. Summary: Mechanized cutting and forest haulage. *Metsätehon tiedotus* 410. 38 p.

78. **Kusiak W., Moliński K., Walkowiak R., 2012**, *Model zużycia paliwa przy pozyskiwaniu drewna sosnowego [Model of fuel consumption during harvesting of pine wood]*. Sylwan, 156 (3): 218-224.
79. **Kusiak W., Śliwiński K., 2014**, Ocena jakości wyrabianych sortymentów drzewnych w technologii ręczno-maszynowej i maszynowej. *Studia i materiały CEPL w Rogowie* 39: 67–76. Leśnictwo 2014. Główny Urząd Statystyczny, Warszawa.
80. **Kärhä K., Rönkkö E., Gumse S.-I., 2004**, Productivity and cutting costs of thinning harvesters. *International Journal of Forest Engineering* 15(2): 43–56.
81. **Kärhä K., Jouhiaho A., Mutikainen A., Mattila S., 2005**, Mechanized Energy Wood Harvesting from Early Thinnings. *Journal of Forest Engineering*. 16. 15-26. 10.1080/14942119.2005.10702504.
82. **Labelle E. R., Breinig L., Sycheva E., 2018**, *Exploring the Use of Harvesters in Large-Diameter Hardwood-Dominated Stands*. *Forests* 2018, 9, 424; doi:10.3390/f9070424
83. **Lageson H., 1997**, Effects of thinning type on the harvester productivity and on the residual stand. *Journal of Forest Engineering* 8(2): 7–14.
84. **Laitila J.; Asikainen A.; Nuutinen Y., 2007**, *Forwarding of whole trees after manual and mechanized felling bunching in pre-commercial thinnings*. *J. For. Eng.*, 18, 29–39.
85. **Landford B.J., Stokes B.J., 1995**, Comparison of two thinning systems. Part I. Stand and site impacts. *Forest Products Journal* 45(5): 74–79.
86. **Landford B.J., Stokes B.J., 1996**. Comparison of two thinning systems. Part II. Productivity and costs. *Forest Products Journal* 46(11/12): 47–53.
87. **Laurov Z., 1990**, Optymalne środowiskowo metody pozyskiwania drewna na zrębach zupełnych w drzewostanach sosnowych. *Podstawy leśnej inżynierii ekologicznej - bezpieczne technologie leśne*, Program CPBP 04.10.07 Synteza Nr III. Wyd. SGGW-AR, Warszawa;
88. **Lewaszkiwicz Ł., Grieger A., Żukowska K., 2013**, *Kategorie i ilość uszkodzeń drzew przy pracach pozyskaniowych*. *Inżynieria Rolnicza* 2013: Z. 3(146) T.2, S. 225-234.
89. **Lijewski P., Merkisz J., Fuć P., Ziółkowski A., Rymaniak Ł., Kusiak W., 2017**, *Fuel consumption and exhaust emissions in the proces of mechanized timber extraction and transport*, *Eur J Forest Res* (2017) 136:153–160 DOI 10.1007/s10342-016-1015-2
90. **Lillenberg R., 1995**, *National status report for Finland. Harvesting Early Thinnings Cost Effectively: the Present and the Future*, A report from the Concerted Action. Danish Forest and Landscape Institute: 297-302;

91. **Lindroos I., Rajamaki I., Orn J., 1993**, *The costs of different harvesting systems in Finland*, Metsäteho, Helsinki (maszynopis);
92. **Lundbäck M., Häggström C., Nordfjell T., 2021**, Worldwide trends in methods for harvesting and extracting industrial roundwood, *International Journal of Forest Engineering*, 32:3, 202-215, DOI: 10.1080/14942119.2021.1906617
93. **Maire L., Bonnemazou M., Cacot E., Chakroun M., Peuch D., Montagny X., 2016**, Le bucheronnage mécanisé dans les peuplements feuillus: un secteur toujours en attente d'amélioration des performances (Mechanised logging in hardwood stands: a sector still awaiting improved performance). FCBA; 2016. pp. 7. <https://www.fcba.fr/ressources/fcba-info-le-bucheronnage-mecanise-dans-les-peuplements-feuillus-un-secteur-en-attente-damelioration-des-performances/> (accessed on 19.04.2021).
94. **Martin P., Lapeyre D., Douchet O., Restoy G., Guegan G., 1996**, Recolte mécanisée des taillis en bois ronds (Mechanised harvesting of roundwood from coppice forests). AFOCEL Fiche Information- Forêt. 1996;4(540):1–6.
95. **McNeel, J.F. & Rutherford, D., 1994**, Modelling harvester-forwarder system performance in a selection harvest. *Journal of Forest Engineering* 6(1): 7–14.
96. **Mederski P.S., Jakubowski M., Karaszewski Z., 2009**, The Polish landscape changing due to forest policy and forest management. *iForest* 2(4): 140–142.
97. **Mederski P.S., Bembenek M., Erler J., Giefing D.F., 2011**, Effects of innovative thinning operation in a birch stand. *Acta Sci Pol, Silv Colendar Rat Ind Lignar.* 2011;10(4):29–38.
98. **Mederski P.S., Bembenek M., Mendow N., Giefing D.F., Jakubowski M.; 2011**; Pozyskiwanie buka harvesterem z głowicą do drzew liściastych CTL 40HW. W: Różański H., Jabłoński K. (Red): *Tendencje i problemy techniki leśnej w warunkach leśnictwa wielofunkcyjnego*. KTL, Poznań, 2011, 56-62.
99. **Mederski P. S., 2013**, The potential of harvester use for thinning operations in mixed birch-pine stands. University Press of Poznań University of Life Sciences. 2013; pp. 109.
100. **Mederski P., Karaszewski Z., Rosińska M., Bembenek M., 2016**, *Dynamika zmian liczby harwesterów w Polsce oraz czynniki determinujące ich występowanie*, *Sylwan* 160 (10): 795-804;
101. **Mederski P.S., Bembenek M., Karaszewski Z., Pilarek Z., Łacka A., 2018a**, Investigation of Log Length Accuracy and Harvester Efficiency in Processing of Oak Trees, *Croatian Journal of Forest Engineering*, volume: 39, issue: 2, pp: 9, 173-181.
102. **Mederski P.S., Venanzi R., Bembenek M., Karaszewski Z., Rosińska M., Pilarek Z., Luchenti I., Surus M., 2018b**. Designing Thinning Operations in 2nd Age Class Pine

- Stands - Economic and Environmental Implications. *Forests* 9(6): 335. DOI 10.3390/f9060335.
103. **Mederski P. S., Werk K., Bembenek M., Karaszewski Z., Brunka M., Naparty K., 2019**, Harvester efficiency in trunk utilisation and log quality of early thinning pine trees, *Leśne Prace Badawcze / Forest Research Papers* Marzec / March 2019, Vol. 80 (1): 45–53 DOI: 10.2478/frp-2019-0004, e-ISSN 2082-8926
 104. **Mederski P. S., Schweier J., Āuka A., Tsioras P., Bont L. G., Bembenek M., 2022**, Mechanised Harvesting of Broadleaved Tree Species in Europe, *Current Forestry Reports*, <https://doi.org/10.1007/s40725-021-00154-7>
 105. **Melander L., Ritala R., 2020**, Separating the impact of work environment and machine operation on harvester performance. *Eur J For Res.* 139 (6):1029–1043
 106. **Metz N., 2003**, Diesel particulate matter criteria for evaluation of health effects. 24th Internationales Wiener Motorensymposium, 15–15 Mai 2003 Wien
 107. **Moskalik T., 2002**, *Rozwój technik i technologii maszynowego pozyskiwania drewna*, Sylwan 10: 31-38;
 108. **Moskalik T., 2003a**, *Harwardery w leśnictwie*, Las Polski 3. Wyd. spec. s. 26-27;
 109. **Moskalik T., 2003b**, *Rozwój oraz możliwości zastosowania harwarderów w leśnictwie*, PTRiL 2. s. 13-17;
 110. **Moskalik T.; Borz S.A.; Dvořák J.; Ferencik M.; Glushkov S.; Muiste P.; Lazdin š, A.; Styranivsky O., 2017**, *Timber Harvesting Methods in Eastern European Countries: A Review*. *Croat. J. For. Eng.*, 38, 231–241.
 111. **Naillon T., Rappin C., 2018**, Best Management and Operating Practices for Steep Slope Machine Logging, Technical Report Number 98-01-2018 March 2018
 112. **Neruda J. i inni, 2013**, Technika a technologie w leśnictwie – skrypt. Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně.
 113. **Nieuwenhuis M., Dooley T., 2006**, The Effect of Calibration on the Accuracy of Harvester Measurements, *International Journal of Forest Engineering*, Volume 17, Number 2 (2006), 25-33.
 114. **NORIZAH K., MOHD HASMADI I., KAMARUZAMAN J., ALIAS MS., 2012**, **Operational efficiency of RIMBAKA timber harvester in hilly tropical forest.** *Journal of Tropical Forest Science* 24(3): 368–378 (2012).
 115. **Nurminen T., Korpunen H. & Uusitalo J., 2006**, Time consumption and analysis of the mechanized cut-to-length system. *Silva Fennica* 40(2): 335–363.
 116. **Ohrner G., 1999**, *Wie wirtschaftlich arbeiten Harvester*. *Forst und Holz* 23: 727-732.

117. **Olund D., 2001**, The future of cable logging. In The International Mountain Logging and 11th Pacific Northwest Skyline Symposium, Schiess, P., and F. Krogstad (eds.), College of Forest Resources, University of Washington, Seattle, Washington, 263–267.
118. **Ovaskainen H., 2009**, Timber harvester operators' working technique in first thinning and the importance of cognitive abilities on work productivity. *Dissertationes Forestales* 79. 62 p. Available at <http://www.metla.fi/dissertationes/df79.htm>
119. **Picchio R., Neri F., Petrini E., Verani S., Marchi E., Certini G., 2012**, *Machinery-induced soil compaction in thinning two pine stands in central Italy*, *Forest Ecology and Management* 285: 38–43;
120. **Piszcz B., Gołębiowski M., 2006**, *Aspekt ergonomiczny pozyskiwania drewna. Możliwości zmniejszenia uciążliwości prac*. *Notatnik Naukowy Instytutu Badawczego Leśnictwa*, 1(69)/2006(XIV), ISSN 1509-7447;
121. **Poršinsky T.; Ožura M., 2006**, Oštećivanje dubećih stabala pri izvoženju drva forvarderom. *Nova Meh. Šumarstva* 2006, 27, 41–49.
122. **Purfürst T., Erler J., 2006**, The precision of productivity models for the harvester – do we forget the human factor? In: Precision forestry plantations, Semi-natural and natural forests. Proceedings of the international precision forestry symposium. Stellenbosch university, South Afric, 5-10 March 2006: 465–475.
123. **Riddle A., 1995**, *Mechanisation of logging operations in New Zealand*, N.Z. FORESTRY NOVEMBER 1995
124. **Rosińska M., Bembenek M., Picchio R., Karaszewski Z., Đuka A., Mederski P. S., 2022**, Determining Harvester Productivity Curves of Thinning Operations in Birch Stands of Central Europe. *Croatian Journal of Forest Engineering*; volume: 43, issue: pp: 13 doi: 10.5552/crojfe.2022.1691
125. **RUKOMOJNIKOV K.P., VEDERNIKOV S.V., KUPTCOVA V.O., 2019**, Modernization of Harvesting and Processing Head. *Southeast Eur for* 10 (2): 181-185. DOI: <https://doi.org/10.15177/seefor.19-10>;
126. **Ryynänen S., Rönkkö E., 2001**, Harvennusharvestereiden tuottavuus ja kustannukset. Summary: Productivity and expences associated with thinning harvesters. Helsinki. Työtehoseuran julkaisuja 381. 67 p.
127. **Sadowski J., Moskalik T., Zastocki D., 2014**, *Efektywność pozyskiwania drewna harwesterem PONSSE Ergo w wybranych drzewostanach*, *SiM CEPL* 2014; 16 (39B) : 126-132
128. **Sebulke J., 2011**,: Holzernte mit Traktionswinden. *Forst & Technik* (3): 20–26.

129. **Shapiro S. S., Wilk A. M. B., 1965**, An analysis of variance test for normality (complete samples). *Biometrika* 52, 591–611.
130. **Silverman D.T., Samanic C.M., Lubin J.H. et. al., 2012**, The diesel exhaust in miners study: a nested case-control study of lung cancer and diesel exhaust. *J Natl Cancer Inst* 104(11):855–868
131. **SINN G., ZETTL B., MAYER H., STANZL-TSCHEGG S., 2005**, Ultrasonic-assisted cutting of wood. *J Mater Process Tech* 170 (1-2): 42-49. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.04.076>
132. **Sionneau J., Cuchet E., 2001**, Mechanisation of thinnings in hardwood, the French experience. In: *Thinnings: A valuable forest management tool*, IUFRO Unit 3.09.00 and FERIC, Natural Resources Canada and Canadian Forest Service, Quebec, Canada. 2001; pp. 8.
133. **Sirén M., 1991**, *An example of calculation the cost harvesting damage to the stand*. The Finnish Forest Research Institute. Helsinki (maszynopis);
134. **Sirén M., 1998**, Hakkuukonetyö, sen korjuujälki ja puustovaurioiden ennustaminen. Summary: One-grip harvester operation, it's silvicultural result and possibilities to predict tree damage. Doctoral thesis. Finnish Forest Research Insitute. Research papers 694. 179 p.
135. **Sirén M., Tanttu V., 2001**, Pienet hakkuukoneet ja korjuri rämemänniköiden talvikorjuussa. *Metsätieteiden aikakauskirja* 4/2001: 599–614.
136. **Skarżyński J., Brzózko J., 2010**, *Harwestery do pozyskiwania drewna stosowane w polskich lasach. Cz. I. Charakterystyka ogólna - nośniki*. Technika Rolnicza Ogrodnicza Leśna 6, 2010;
137. **SLUGENĚ J., PENIAŠKO P., MESSINGEROVA V., JANKOVSKY M., 2014**, Productivity of a John Deere Harvester Unit in Deciduous Stands. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*, 62(1): 231–238.
138. **Słowiński K., 2007**, Badania zwięzłości gleby elektrycznie napędzanym penetrometrem glebowym w otwartej szkółce leśnej. Rozdział w monografii „Użytkowanie maszyn rolniczych i leśnych”. *Prace Komisji Nauk Rolniczych, leśnych i Weterynaryjnych*, PAU. Kraków, ISSN 1733-5183, 149-156.
139. **Sowa J. M., Gielarowiec K., Gaj-Gielarowiec D., 2013**, Charakterystyka i rozwój konstrukcji głowic harwesterowych do pozyskiwania drewna. *Poznańskie Towarzystwo Przyjaciół Nauk Wydział Nauk Rolniczych i Leśnych. Forestry Letters Tom* 105 – 2013.

140. **Spinelli R., Owende P.M.O., Ward S.M., 2002**, Productivity and cost of CTL harvesting of *Eucalyptus globulus* stands using excavatorbased harvesters. *Forest Prod J.* 2002;52(1): 67–77.
141. **Spinelli R., Lombardini C., Magagnotti N., 2014**, The effect of mechanization level and harvesting system on the thinning cost of Mediterranean softwood plantations. *Silva Fennica* vol. 48 no. 1 article id 1003. 15 p.
142. **Stampfer K., 1999**, Influence of terrain conditions and thinning regimes on productivity of a track-based steep slope harvester. In: Sessions, J. & W. Chung (Eds.), *Proceedings of the International Mountain Logging and 10th Pacific Northwest Skyline Symposium*, 78-87. Corvallis, OR, March 28-April 1,1999.
143. **Stampfer K., Steinmüller T., 2001**, A new approach to derive a productivity model for the harvester “Valmet 911 Snake”. *The International Mountain Logging and 11th Pacific Northwest Skyline Symposium 2001*. pp. 254–262.
144. **Stampfer K., 2016**, Harvester and Forwarder on Steep Slopes - The European Perspective. *Demo International 2016 & Conference*.
145. **Stańczykiewicz A., Sowa J.M., Szewczyk G., 2011**, Uszkodzenia drzew i odnowienia w wyniku ręczno–maszynowego pozyskania drewna z wykorzystaniem urządzeń agregowanych z ciągnikami rolniczymi. *Sylwan* 155(2): 129–137. DOI 10.26202/sylwan.2009233.
146. **Stańczykiewicz A., Sowa J.M., Leszczyński K., Kulak D., Szewczyk G., 2015**, Uszkodzenia drzew i odnowienia w wyniku pozyskania drewna z użyciem urządzeń agregowanych z ciągnikami rolniczymi w trzebieżowych drzewostanach świerkowych. *Sylwan* 159(3):201–210, 2015. DOI 10.26202/sylwan.2014070.
147. **Strandgard M., Alam M., Mitchell R., 2014**, Impact of Slope on Productivity of a Self-levelling Processor. *Croat. j. for. eng.* 35(2): 193–200.
148. **Sutherland B., 2012**, Review of tethered equipment for steep-slope operations. Internal Report IR-2012-08-20, FPInnovations, Vancouver, Canada, 11 p.
149. **Suwała M., 1999**, *Wydajność pracy i koszt pozyskiwania drewna w późnych trzebieżach w drzewostanach sosnowych*, *Prace Instytutu Badawczego Leśnictwa, Seria A*, 870, Warszawa 1999, 75-94;
150. **Suwała M., 2005**, *Pozyskiwanie drewna w drzewostanach zagospodarowanych rębnią częściową*, *Technika Rolnicza Ogrodnicza Leśna. Nr 7.* s. 20-23.
151. **Terava J., 1994**, *Development of wood harvesting in Scandinavia*, *Symposium "Technologia i technika prac leśnych"*. Tleń (maszynopis);

152. **Teutenberg-Raupach A., 1995**, *National status report for Germany. "Harvesting Early Thinnings Cost Effectively: the Present and Future"*, A report from the Concerted Action: 309- 318;
153. **Torgersen H., 2001**, The potential of excavator based harvesters for mechanisation in steep terrain. Swedish University of Agricultural Sciences, Department of Forest Management and Products, Uppsala, Research Note No. 11, 35-38.
154. **Tufts R.A., Brinker R.W., 1993**, Productivity of a Scandinavian cut-to-length system while second thinning pine plantations. *Forest Products Journal* 43(11-12): 24–32.
155. **Tufts R.A., 1997**, Productivity and cost of the Ponsse 15-series, cut-to-length harvesting system in southern pine plantations. *Forest Products Journal* 47(10): 39–46.
156. **Ursi'c B.; Vusi'c D.; Papa I.; Poršinsky T.; Ze'ci'c Ž.; Đuka A., 2022**, Damage to Residual Trees in Thinning of Broadleaf Stand by Mechanised Harvesting System. *Forests* 2022, 13, 51. <https://doi.org/10.3390/f13010051>
157. **Uusitalo J., 2004**, Metsäteknologian perusteet. Metsälehti kustannus. 230 p.
158. **Vermeulen R., Silverman D.T., Garshick E. et. al., 2014**, Exposure response estimates for diesel engine exhaust and lung cancer mortality based on data from three.
159. **Visser R., Stampfer K., 2003**, *Tree-Length System Evaluation of Second Thinning in a Loblolly Pine Plantation*. *SJAF* 27(2) 2003;
160. **Visser R., 2013**, Tension Monitoring of a Cable Assisted Machine. *Harvesting Technical Note HTN05-11*, Future Forests Research Limited, Rotorua, New Zealand, 5 p.
161. **Visser R., Berkett H., 2015**, Effect of terrain steepness on machine slope when harvesting. *International Journal of Forest Engineering* 26(1): 1–9. DOI: 10.1080/14942119.2015.1033211
162. **Visser Rien, Stampfer K., 2015**, Expanding Ground-based Harvesting onto Steep Terrain: A Review. *Croatian Journal of Forest Engineering*, 36(2), 321-331.
163. **Więsik J., 2000**, *Czy w Polsce będą użytkowane harwestery? Stan i perspektywy badań z zakresu użytkowania lasu*, IBL. s. 225-232;
164. **Więsik J., 2008**, *Badania wysokowydajnych maszyn do pozyskiwania drewna prowadzone w Zakładzie Mechanizacji Leśnictwa SGGW*, *Inżynieria Rolnicza* 1(99)/2008;
165. **Wratschko B., 2006**, Einsatzmöglichkeiten von Seilforwardern. Masterarbeit, Institut für Forsttechnik, University of Natural Resources and Life Sciences, Vienna, 66 p.
166. **Zinkevičius R., Steponavičius D., Vitunskas D., Činga G., 2012**, Comparison of harvester and motor-manual logging in intermediate cuttings of deciduous stands, *Turk J Agric For* 36 (2012) 591-600, TUBİTAK, doi:10.3906/tar-1103-46

167. **Zychowicz W., 2000**, *Ocena wykorzystania forwarderów użytkowanych w Polsce. Stan i perspektywy badań z zakresu użytkowania lasu*, IBL. s. 233-239;
168. **Żabierek R., Wojtkowiak R., 2012**, *The structure and distribution of harvesters and forwarders in individual Regional Directorates of the State Forests in Poland in the early 2010's*, Acta Sci.Pol. Silv. 11 (4);

Tabela nr 28 - Szczegółowe zestawienie danych, dotyczących zmierzonych na gruncie sęków

Nr kłody	Gatunek	Metoda okrzyszowania	Średnica [cm]	Nr sęka	Długość sęka [cm]	Szerokość sęka [cm]	Powierzchnia sęka [cm ²]	Powierzchnia wszystkich sęków [cm ²]	Czas okrzyszowania surowca [s]
1	Jodła pospolita	Pasywna	22	1	3,7	2,6	7,56	304,51	36,02
1	Jodła pospolita	Pasywna		2	5,1	4,1	16,42		
1	Jodła pospolita	Pasywna		3	4,6	4,2	15,17		
1	Jodła pospolita	Pasywna		4	4,2	3,9	12,86		
1	Jodła pospolita	Pasywna		5	5,1	4,8	19,23		
1	Jodła pospolita	Pasywna		6	3,7	2,9	8,43		
1	Jodła pospolita	Pasywna		7	4,8	2,2	8,29		
1	Jodła pospolita	Pasywna		8	5,2	4,4	17,97		
1	Jodła pospolita	Pasywna		9	4,1	3,2	10,30		
1	Jodła pospolita	Pasywna		10	5,2	5,1	20,83		
1	Jodła pospolita	Pasywna		11	3,6	2,4	6,79		
1	Jodła pospolita	Pasywna		12	5,0	4,6	18,06		
1	Jodła pospolita	Pasywna		13	4,4	3,4	11,75		
1	Jodła pospolita	Pasywna		14	4,8	4,1	15,46		
1	Jodła pospolita	Pasywna		15	3,6	3,1	8,77		
1	Jodła pospolita	Pasywna		16	4,6	3,1	11,20		

1	Jodła pospolita	Pasywna		17	2,9	2,4	5,47		
1	Jodła pospolita	Pasywna		18	3,6	3,1	8,77		
1	Jodła pospolita	Pasywna		19	5,0	4,4	17,28		
1	Jodła pospolita	Pasywna		20	4,6	4,2	15,17		
1	Jodła pospolita	Pasywna		21	3,6	3,1	8,77		
1	Jodła pospolita	Pasywna		22	4,2	3,6	11,88		
1	Jodła pospolita	Pasywna		23	5,4	5,2	22,05		
1	Jodła pospolita	Pasywna		24	3,2	2,4	6,03		
2	Jodła pospolita	Pasywna	21	1	5,6	5,4	23,75	300,63	36,44
2	Jodła pospolita	Pasywna		2	4,8	4,6	17,34		
2	Jodła pospolita	Pasywna		3	4,2	3,8	12,53		
2	Jodła pospolita	Pasywna		4	6,6	4,1	21,25		
2	Jodła pospolita	Pasywna		5	4,8	3,4	12,82		
2	Jodła pospolita	Pasywna		6	3,6	2,6	7,35		
2	Jodła pospolita	Pasywna		7	5,8	4,2	19,13		
2	Jodła pospolita	Pasywna		8	2,9	2,4	5,47		
2	Jodła pospolita	Pasywna		9	4,1	3,6	11,59		
2	Jodła pospolita	Pasywna		10	3,7	3,1	9,01		
2	Jodła pospolita	Pasywna		11	5,9	4,9	22,71		
2	Jodła pospolita	Pasywna		12	4,8	3,8	14,33		
2	Jodła pospolita	Pasywna		13	3,1	2,4	5,84		
2	Jodła pospolita	Pasywna		14	5,6	3,9	17,15		
2	Jodła pospolita	Pasywna		15	6,4	4,8	24,13		

2	Jodła pospolita	Pasywna		16	8,8	6,8	47,00		
2	Jodła pospolita	Pasywna		17	3,3	2,5	6,48		
2	Jodła pospolita	Pasywna		18	4,0	3,2	10,05		
2	Jodła pospolita	Pasywna		19	2,9	2,1	4,78		
2	Jodła pospolita	Pasywna		20	3,6	2,8	7,92		
3	Jodła pospolita	Pasywna	24	1	5,2	4,8	19,60	320,03	38,41
3	Jodła pospolita	Pasywna		2	4,6	4,0	14,45		
3	Jodła pospolita	Pasywna		3	3,8	3,4	10,15		
3	Jodła pospolita	Pasywna		4	5,1	4,8	19,23		
3	Jodła pospolita	Pasywna		5	5,4	5,0	21,21		
3	Jodła pospolita	Pasywna		6	5,8	5,0	22,78		
3	Jodła pospolita	Pasywna		7	5,2	4,9	20,01		
3	Jodła pospolita	Pasywna		8	4,1	3,6	11,59		
3	Jodła pospolita	Pasywna		9	5,7	5,6	25,07		
3	Jodła pospolita	Pasywna		10	3,8	3,2	9,55		
3	Jodła pospolita	Pasywna		11	4,7	4,4	16,24		
3	Jodła pospolita	Pasywna		12	5,4	4,8	20,36		
3	Jodła pospolita	Pasywna		13	3,9	3,2	9,80		
3	Jodła pospolita	Pasywna		14	4,5	4,1	14,49		
3	Jodła pospolita	Pasywna		15	3,9	3,0	9,19		
3	Jodła pospolita	Pasywna		16	5,4	4,8	20,36		
3	Jodła pospolita	Pasywna		17	4,2	3,8	12,53		
3	Jodła pospolita	Pasywna		18	4,4	4,1	14,17		

3	Jodła pospolita	Pasywna		19	2,8	2,5	5,50		
3	Jodła pospolita	Pasywna		20	4,7	4,2	15,50		
3	Jodła pospolita	Pasywna		21	3,5	3,0	8,25		
4	Jodła pospolita	Pasywna	22	1	4,8	4,2	15,83	284,70	33,61
4	Jodła pospolita	Pasywna		2	5,1	4,6	18,43		
4	Jodła pospolita	Pasywna		3	5,4	4,6	19,51		
4	Jodła pospolita	Pasywna		4	4,2	3,9	12,86		
4	Jodła pospolita	Pasywna		5	4,7	4,0	14,77		
4	Jodła pospolita	Pasywna		6	4,0	3,4	10,68		
4	Jodła pospolita	Pasywna		7	5,0	4,1	16,10		
4	Jodła pospolita	Pasywna		8	4,6	3,8	13,73		
4	Jodła pospolita	Pasywna		9	3,8	3,5	10,45		
4	Jodła pospolita	Pasywna		10	4,1	3,6	11,59		
4	Jodła pospolita	Pasywna		11	4,9	4,4	16,93		
4	Jodła pospolita	Pasywna		12	5,4	5,3	22,48		
4	Jodła pospolita	Pasywna		13	4,5	4,1	14,49		
4	Jodła pospolita	Pasywna		14	5,1	4,5	18,02		
4	Jodła pospolita	Pasywna		15	4,6	4,2	15,17		
4	Jodła pospolita	Pasywna		16	4,1	3,7	11,91		
4	Jodła pospolita	Pasywna		17	3,7	3,6	10,46		
4	Jodła pospolita	Pasywna		18	5,0	4,7	18,46		
4	Jodła pospolita	Pasywna		19	4,3	3,8	12,83		
5	Jodła pospolita	Pasywna	21	1	5,8	5,2	23,69	309,66	38,67

5	Jodła pospolita	Pasywna		2	4,6	4,1	14,81		
5	Jodła pospolita	Pasywna		3	5,1	4,2	16,82		
5	Jodła pospolita	Pasywna		4	2,9	2,4	5,47		
5	Jodła pospolita	Pasywna		5	4,7	4,6	16,98		
5	Jodła pospolita	Pasywna		6	5,2	4,9	20,01		
5	Jodła pospolita	Pasywna		7	4,6	4,0	14,45		
5	Jodła pospolita	Pasywna		8	4,1	2,8	9,02		
5	Jodła pospolita	Pasywna		9	3,7	3,3	9,59		
5	Jodła pospolita	Pasywna		10	5,0	4,3	16,89		
5	Jodła pospolita	Pasywna		11	4,6	4,2	15,17		
5	Jodła pospolita	Pasywna		12	4,3	3,7	12,50		
5	Jodła pospolita	Pasywna		13	3,8	3,5	10,45		
5	Jodła pospolita	Pasywna		14	3,2	2,9	7,29		
5	Jodła pospolita	Pasywna		15	4,1	3,4	10,95		
5	Jodła pospolita	Pasywna		16	4,8	4,2	15,83		
5	Jodła pospolita	Pasywna		17	3,3	2,8	7,26		
5	Jodła pospolita	Pasywna		18	5,2	4,8	19,60		
5	Jodła pospolita	Pasywna		19	4,8	4,3	16,21		
5	Jodła pospolita	Pasywna		20	4,6	4,1	14,81		
5	Jodła pospolita	Pasywna		21	5,3	4,8	19,98		
5	Jodła pospolita	Pasywna		22	4,2	3,6	11,88		
6	Jodła pospolita	Pasywna	23	1	4,2	3,9	12,86	325,96	40,82
6	Jodła pospolita	Pasywna		2	3,8	3,6	10,74		

6	Jodła pospolita	Pasywna		3	3,5	3,1	8,52		
6	Jodła pospolita	Pasywna		4	2,9	2,5	5,69		
6	Jodła pospolita	Pasywna		5	3,7	3,3	9,59		
6	Jodła pospolita	Pasywna		6	6,2	6,0	29,22		
6	Jodła pospolita	Pasywna		7	3,4	3,3	8,81		
6	Jodła pospolita	Pasywna		8	3,3	3,0	7,78		
6	Jodła pospolita	Pasywna		9	4,1	3,4	10,95		
6	Jodła pospolita	Pasywna		10	5,4	5,2	22,05		
6	Jodła pospolita	Pasywna		11	4,8	4,3	16,21		
6	Jodła pospolita	Pasywna		12	3,9	3,5	10,72		
6	Jodła pospolita	Pasywna		13	5,2	4,9	20,01		
6	Jodła pospolita	Pasywna		14	5,4	5,1	21,63		
6	Jodła pospolita	Pasywna		15	3,9	3,4	10,41		
6	Jodła pospolita	Pasywna		16	3,8	3,2	9,55		
6	Jodła pospolita	Pasywna		17	4,2	4,0	13,19		
6	Jodła pospolita	Pasywna		18	5,5	5,1	22,03		
6	Jodła pospolita	Pasywna		19	4,0	3,3	10,37		
6	Jodła pospolita	Pasywna		20	4,7	4,4	16,24		
6	Jodła pospolita	Pasywna		21	5,4	5,0	21,21		
6	Jodła pospolita	Pasywna		22	5,1	4,7	18,83		
6	Jodła pospolita	Pasywna		23	3,5	3,4	9,35		
7	Jodła pospolita	Pasywna	19	1	3,9	3,6	11,03	262,47	30,18
7	Jodła pospolita	Pasywna		2	3,6	3,2	9,05		

7	Jodła pospolita	Pasywna		3	4,7	4,1	15,13		
7	Jodła pospolita	Pasywna		4	4,2	3,4	11,22		
7	Jodła pospolita	Pasywna		5	6,1	5,2	24,91		
7	Jodła pospolita	Pasywna		6	7,0	5,6	30,79		
7	Jodła pospolita	Pasywna		7	3,6	3,2	9,05		
7	Jodła pospolita	Pasywna		8	3,8	3,2	9,55		
7	Jodła pospolita	Pasywna		9	4,6	4,1	14,81		
7	Jodła pospolita	Pasywna		10	3,4	3,0	8,01		
7	Jodła pospolita	Pasywna		11	5,9	5,6	25,95		
7	Jodła pospolita	Pasywna		12	5,7	5,2	23,28		
7	Jodła pospolita	Pasywna		13	4,8	4,1	15,46		
7	Jodła pospolita	Pasywna		14	4,2	3,6	11,88		
7	Jodła pospolita	Pasywna		15	3,8	3,4	10,15		
7	Jodła pospolita	Pasywna		16	3,4	3,0	8,01		
7	Jodła pospolita	Pasywna		17	5,6	5,5	24,19		
8	Jodła pospolita	Pasywna	21	1	4,2	3,8	12,53	310,93	37,71
8	Jodła pospolita	Pasywna		2	4,8	4,2	15,83		
8	Jodła pospolita	Pasywna		3	5,3	4,8	19,98		
8	Jodła pospolita	Pasywna		4	3,9	3,6	11,03		
8	Jodła pospolita	Pasywna		5	3,4	3,1	8,28		
8	Jodła pospolita	Pasywna		6	4,0	3,4	10,68		
8	Jodła pospolita	Pasywna		7	5,8	5,3	24,14		
8	Jodła pospolita	Pasywna		8	4,6	4,5	16,26		

8	Jodła pospolita	Pasywna		9	5,1	4,9	19,63		
8	Jodła pospolita	Pasywna		10	4,5	4,2	14,84		
8	Jodła pospolita	Pasywna		11	3,4	3,1	8,28		
8	Jodła pospolita	Pasywna		12	3,8	3,3	9,85		
8	Jodła pospolita	Pasywna		13	2,8	2,8	6,16		
8	Jodła pospolita	Pasywna		14	3,5	3,2	8,80		
8	Jodła pospolita	Pasywna		15	3,7	3,1	9,01		
8	Jodła pospolita	Pasywna		16	2,9	2,8	6,38		
8	Jodła pospolita	Pasywna		17	4,2	4,0	13,19		
8	Jodła pospolita	Pasywna		18	5,6	5,4	23,75		
8	Jodła pospolita	Pasywna		19	4,9	4,5	17,32		
8	Jodła pospolita	Pasywna		20	3,4	3,3	8,81		
8	Jodła pospolita	Pasywna		21	3,5	3,2	8,80		
8	Jodła pospolita	Pasywna		22	6,0	5,2	24,50		
8	Jodła pospolita	Pasywna		23	4,1	4,0	12,88		
9	Jodła pospolita	Pasywna	24	1	4,8	4,6	17,34	334,87	47,32
9	Jodła pospolita	Pasywna		2	4,2	3,9	12,86		
9	Jodła pospolita	Pasywna		3	3,6	3,2	9,05		
9	Jodła pospolita	Pasywna		4	3,4	3,3	8,81		
9	Jodła pospolita	Pasywna		5	3,7	3,5	10,17		
9	Jodła pospolita	Pasywna		6	5,2	4,9	20,01		
9	Jodła pospolita	Pasywna		7	4,7	4,4	16,24		
9	Jodła pospolita	Pasywna		8	3,9	3,5	10,72		

9	Jodła pospolita	Pasywna		9	4,6	4,2	15,17		
9	Jodła pospolita	Pasywna		10	4,3	3,9	13,17		
9	Jodła pospolita	Pasywna		11	3,8	3,2	9,55		
9	Jodła pospolita	Pasywna		12	5,2	4,7	19,20		
9	Jodła pospolita	Pasywna		13	4,9	4,3	16,55		
9	Jodła pospolita	Pasywna		14	4,2	3,9	12,86		
9	Jodła pospolita	Pasywna		15	3,7	3,3	9,59		
9	Jodła pospolita	Pasywna		16	4,3	2,9	9,79		
9	Jodła pospolita	Pasywna		17	4,1	3,6	11,59		
9	Jodła pospolita	Pasywna		18	3,8	3,2	9,55		
9	Jodła pospolita	Pasywna		19	5,2	5,0	20,42		
9	Jodła pospolita	Pasywna		20	5,5	5,1	22,03		
9	Jodła pospolita	Pasywna		21	5,8	5,4	24,60		
9	Jodła pospolita	Pasywna		22	4,5	4,3	15,20		
9	Jodła pospolita	Pasywna		23	3,5	3,3	9,07		
9	Jodła pospolita	Pasywna		24	3,9	3,7	11,33		
10	Jodła pospolita	Pasywna		1	5,6	5,3	23,31		
10	Jodła pospolita	Pasywna		2	3,7	3,3	9,59		
10	Jodła pospolita	Pasywna		3	3,2	2,9	7,29		
10	Jodła pospolita	Pasywna	26	4	4,6	4,2	15,17	355,08	49,16
10	Jodła pospolita	Pasywna		5	4,1	3,6	11,59		
10	Jodła pospolita	Pasywna		6	3,8	3,3	9,85		
10	Jodła pospolita	Pasywna		7	4,8	4,7	17,72		

10	Jodła pospolita	Pasywna		8	3,3	3,0	7,78		
10	Jodła pospolita	Pasywna		9	4,5	3,9	13,78		
10	Jodła pospolita	Pasywna		10	4,1	3,4	10,95		
10	Jodła pospolita	Pasywna		11	5,8	5,2	23,69		
10	Jodła pospolita	Pasywna		12	5,1	4,6	18,43		
10	Jodła pospolita	Pasywna		13	3,6	3,5	9,90		
10	Jodła pospolita	Pasywna		14	4,2	4,1	13,52		
10	Jodła pospolita	Pasywna		15	4,6	3,7	13,37		
10	Jodła pospolita	Pasywna		16	3,8	3,5	10,45		
10	Jodła pospolita	Pasywna		17	5,2	4,8	19,60		
10	Jodła pospolita	Pasywna		18	3,3	3,1	8,03		
10	Jodła pospolita	Pasywna		19	4,7	4,4	16,24		
10	Jodła pospolita	Pasywna		20	2,9	2,8	6,38		
10	Jodła pospolita	Pasywna		21	3,4	3,2	8,55		
10	Jodła pospolita	Pasywna		22	4,6	4,3	15,54		
10	Jodła pospolita	Pasywna		23	5,2	4,8	19,60		
10	Jodła pospolita	Pasywna		24	3,1	2,5	6,09		
10	Jodła pospolita	Pasywna		25	4,8	4,2	15,83		
10	Jodła pospolita	Pasywna		26	5,7	5,1	22,83		
11	Jodła pospolita	Pasywna	19	1	4,6	4,4	15,90	271,97	31,11
11	Jodła pospolita	Pasywna		2	3,7	3,5	10,17		
11	Jodła pospolita	Pasywna		3	3,9	3,2	9,80		
11	Jodła pospolita	Pasywna		4	5,2	4,7	19,20		

11	Jodła pospolita	Pasywna		5	4,7	4,6	16,98		
11	Jodła pospolita	Pasywna		6	3,6	3,2	9,05		
11	Jodła pospolita	Pasywna		7	5,6	5,0	21,99		
11	Jodła pospolita	Pasywna		8	4,0	3,8	11,94		
11	Jodła pospolita	Pasywna		9	6,1	5,6	26,83		
11	Jodła pospolita	Pasywna		10	4,6	4,1	14,81		
11	Jodła pospolita	Pasywna		11	3,8	3,6	10,74		
11	Jodła pospolita	Pasywna		12	5,0	4,4	17,28		
11	Jodła pospolita	Pasywna		13	4,2	4,0	13,19		
11	Jodła pospolita	Pasywna		14	3,2	2,9	7,29		
11	Jodła pospolita	Pasywna		15	3,7	3,3	9,59		
11	Jodła pospolita	Pasywna		16	5,3	4,9	20,40		
11	Jodła pospolita	Pasywna		17	4,2	3,7	12,21		
11	Jodła pospolita	Pasywna		18	4,8	4,2	15,83		
11	Jodła pospolita	Pasywna		19	3,6	3,1	8,77		
12	Jodła pospolita	Pasywna	20	1	4,6	4,5	16,26	296,05	36,83
12	Jodła pospolita	Pasywna		2	3,9	3,7	11,33		
12	Jodła pospolita	Pasywna		3	3,7	3,3	9,59		
12	Jodła pospolita	Pasywna		4	4,2	3,9	12,86		
12	Jodła pospolita	Pasywna		5	3,8	3,4	10,15		
12	Jodła pospolita	Pasywna		6	3,0	2,8	6,60		
12	Jodła pospolita	Pasywna		7	4,6	4,5	16,26		
12	Jodła pospolita	Pasywna		8	5,1	4,9	19,63		

12	Jodła pospolita	Pasywna		9	3,8	3,4	10,15		
12	Jodła pospolita	Pasywna		10	4,4	4,1	14,17		
12	Jodła pospolita	Pasywna		11	3,9	3,1	9,50		
12	Jodła pospolita	Pasywna		12	4,2	3,5	11,55		
12	Jodła pospolita	Pasywna		13	4,9	4,4	16,93		
12	Jodła pospolita	Pasywna		14	3,7	3,2	9,30		
12	Jodła pospolita	Pasywna		15	3,1	2,9	7,06		
12	Jodła pospolita	Pasywna		16	4,4	3,9	13,48		
12	Jodła pospolita	Pasywna		17	4,9	4,3	16,55		
12	Jodła pospolita	Pasywna		18	3,8	3,6	10,74		
12	Jodła pospolita	Pasywna		19	5,3	5,0	20,81		
12	Jodła pospolita	Pasywna		20	4,9	4,3	16,55		
12	Jodła pospolita	Pasywna		21	4,2	3,7	12,21		
12	Jodła pospolita	Pasywna		22	4,8	4,4	16,59		
12	Jodła pospolita	Pasywna		23	3,3	3,0	7,78		
13	Jodła pospolita	Pasywna	18	1	4,1	3,8	12,24	250,49	28,94
13	Jodła pospolita	Pasywna		2	4,8	4,2	15,83		
13	Jodła pospolita	Pasywna		3	3,9	3,4	10,41		
13	Jodła pospolita	Pasywna		4	3,1	2,8	6,82		
13	Jodła pospolita	Pasywna		5	5,4	5,0	21,21		
13	Jodła pospolita	Pasywna		6	2,5	2,4	4,71		
13	Jodła pospolita	Pasywna		7	4,3	4,1	13,85		
13	Jodła pospolita	Pasywna		8	4,1	3,9	12,56		

13	Jodła pospolita	Pasywna		9	3,4	3,1	8,28		
13	Jodła pospolita	Pasywna		10	3,9	3,4	10,41		
13	Jodła pospolita	Pasywna		11	4,2	4,0	13,19		
13	Jodła pospolita	Pasywna		12	5,1	4,7	18,83		
13	Jodła pospolita	Pasywna		13	3,6	3,3	9,33		
13	Jodła pospolita	Pasywna		14	2,9	2,6	5,92		
13	Jodła pospolita	Pasywna		15	3,7	3,4	9,88		
13	Jodła pospolita	Pasywna		16	3,3	3,1	8,03		
13	Jodła pospolita	Pasywna		17	4,6	4,3	15,54		
13	Jodła pospolita	Pasywna		18	4,7	4,2	15,50		
13	Jodła pospolita	Pasywna		19	3,5	3,2	8,80		
13	Jodła pospolita	Pasywna		20	6,4	5,8	29,15		
14	Jodła pospolita	Pasywna	24	1	3,9	3,7	11,33	342,46	43,39
14	Jodła pospolita	Pasywna		2	3,1	2,8	6,82		
14	Jodła pospolita	Pasywna		3	4,6	4,1	14,81		
14	Jodła pospolita	Pasywna		4	6,0	5,2	24,50		
14	Jodła pospolita	Pasywna		5	5,8	5,4	24,60		
14	Jodła pospolita	Pasywna		6	5,2	4,9	20,01		
14	Jodła pospolita	Pasywna		7	4,8	4,3	16,21		
14	Jodła pospolita	Pasywna		8	3,7	3,1	9,01		
14	Jodła pospolita	Pasywna		9	3,3	2,8	7,26		
14	Jodła pospolita	Pasywna		10	4,3	4,0	13,51		
14	Jodła pospolita	Pasywna		11	4,9	4,5	17,32		

14	Jodła pospolita	Pasywna		12	4,1	3,7	11,91		
14	Jodła pospolita	Pasywna		13	2,8	2,4	5,28		
14	Jodła pospolita	Pasywna		14	7,0	5,2	28,59		
14	Jodła pospolita	Pasywna		15	4,1	3,7	11,91		
14	Jodła pospolita	Pasywna		16	3,5	3,2	8,80		
14	Jodła pospolita	Pasywna		17	4,6	4,2	15,17		
14	Jodła pospolita	Pasywna		18	4,1	3,7	11,91		
14	Jodła pospolita	Pasywna		19	5,1	4,8	19,23		
14	Jodła pospolita	Pasywna		20	4,6	4,2	15,17		
14	Jodła pospolita	Pasywna		21	4,1	3,9	12,56		
14	Jodła pospolita	Pasywna		22	3,7	3,4	9,88		
14	Jodła pospolita	Pasywna		23	3,9	3,4	10,41		
14	Jodła pospolita	Pasywna		24	4,6	4,5	16,26		
15	Jodła pospolita	Pasywna	20	1	3,7	3,5	10,17	272,09	31,95
15	Jodła pospolita	Pasywna		2	4,2	3,8	12,53		
15	Jodła pospolita	Pasywna		3	4,6	4,2	15,17		
15	Jodła pospolita	Pasywna		4	4,0	3,5	11,00		
15	Jodła pospolita	Pasywna		5	3,4	3,2	8,55		
15	Jodła pospolita	Pasywna		6	5,2	5,0	20,42		
15	Jodła pospolita	Pasywna		7	3,9	3,3	10,11		
15	Jodła pospolita	Pasywna		8	3,1	2,6	6,33		
15	Jodła pospolita	Pasywna		9	4,2	3,6	11,88		
15	Jodła pospolita	Pasywna		10	4,6	4,0	14,45		

15	Jodła pospolita	Pasywna		11	3,8	3,2	9,55		
15	Jodła pospolita	Pasywna		12	2,9	2,3	5,24		
15	Jodła pospolita	Pasywna		13	3,0	2,4	5,65		
15	Jodła pospolita	Pasywna		14	4,7	4,1	15,13		
15	Jodła pospolita	Pasywna		15	5,6	5,2	22,87		
15	Jodła pospolita	Pasywna		16	5,7	5,2	23,28		
15	Jodła pospolita	Pasywna		17	4,9	4,6	17,70		
15	Jodła pospolita	Pasywna		18	3,4	3,1	8,28		
15	Jodła pospolita	Pasywna		19	3,8	3,4	10,15		
15	Jodła pospolita	Pasywna		20	4,9	4,7	18,09		
15	Jodła pospolita	Pasywna		21	4,6	4,3	15,54		
16	Jodła pospolita	Aktywna	25	1	6,2	5,7	27,76	345,86	33,67
16	Jodła pospolita	Aktywna		2	3,9	3,3	10,11		
16	Jodła pospolita	Aktywna		3	3,1	2,8	6,82		
16	Jodła pospolita	Aktywna		4	4,6	4,4	15,90		
16	Jodła pospolita	Aktywna		5	5,7	5,3	23,73		
16	Jodła pospolita	Aktywna		6	5,2	4,7	19,20		
16	Jodła pospolita	Aktywna		7	3,7	3,2	9,30		
16	Jodła pospolita	Aktywna		8	5,8	5,3	24,14		
16	Jodła pospolita	Aktywna		9	4,1	4,0	12,88		
16	Jodła pospolita	Aktywna		10	3,4	3,1	8,28		
16	Jodła pospolita	Aktywna		11	4,0	3,4	10,68		
16	Jodła pospolita	Aktywna		12	2,7	2,2	4,67		

16	Jodła pospolita	Aktywna		13	3,9	3,6	11,03		
16	Jodła pospolita	Aktywna		14	5,4	5,0	21,21		
16	Jodła pospolita	Aktywna		15	4,2	3,6	11,88		
16	Jodła pospolita	Aktywna		16	5,0	4,4	17,28		
16	Jodła pospolita	Aktywna		17	4,1	3,7	11,91		
16	Jodła pospolita	Aktywna		18	3,5	3,1	8,52		
16	Jodła pospolita	Aktywna		19	3,7	3,2	9,30		
16	Jodła pospolita	Aktywna		20	4,1	3,7	11,91		
16	Jodła pospolita	Aktywna		21	4,4	4,1	14,17		
16	Jodła pospolita	Aktywna		22	2,7	2,5	5,30		
16	Jodła pospolita	Aktywna		23	2,5	2,2	4,32		
16	Jodła pospolita	Aktywna		24	3,2	2,9	7,29		
16	Jodła pospolita	Aktywna		25	3,7	3,3	9,59		
16	Jodła pospolita	Aktywna		26	4,3	4,0	13,51		
16	Jodła pospolita	Aktywna		27	4,6	4,2	15,17		
17	Jodła pospolita	Aktywna	22	1	3,7	3,5	10,17	318,40	32,06
17	Jodła pospolita	Aktywna		2	5,4	5,1	21,63		
17	Jodła pospolita	Aktywna		3	4,6	4,0	14,45		
17	Jodła pospolita	Aktywna		4	4,1	3,7	11,91		
17	Jodła pospolita	Aktywna		5	4,7	4,6	16,98		
17	Jodła pospolita	Aktywna		6	3,9	3,4	10,41		
17	Jodła pospolita	Aktywna		7	3,7	3,5	10,17		
17	Jodła pospolita	Aktywna		8	5,6	5,2	22,87		

17	Jodła pospolita	Aktywna		9	4,7	4,3	15,87		
17	Jodła pospolita	Aktywna		10	3,7	3,4	9,88		
17	Jodła pospolita	Aktywna		11	4,5	4,2	14,84		
17	Jodła pospolita	Aktywna		12	4,2	4,0	13,19		
17	Jodła pospolita	Aktywna		13	4,9	4,6	17,70		
17	Jodła pospolita	Aktywna		14	5,1	4,9	19,63		
17	Jodła pospolita	Aktywna		15	3,7	3,4	9,88		
17	Jodła pospolita	Aktywna		16	3,3	3,0	7,78		
17	Jodła pospolita	Aktywna		17	4,3	4,1	13,85		
17	Jodła pospolita	Aktywna		18	5,1	5,0	20,03		
17	Jodła pospolita	Aktywna		19	3,9	3,5	10,72		
17	Jodła pospolita	Aktywna		20	4,5	4,2	14,84		
17	Jodła pospolita	Aktywna		21	4,9	4,3	16,55		
17	Jodła pospolita	Aktywna		22	3,8	3,4	10,15		
17	Jodła pospolita	Aktywna		23	2,6	2,4	4,90		
18	Jodła pospolita	Aktywna	22	1	2,8	2,6	5,72	257,45	29,71
18	Jodła pospolita	Aktywna		2	4,1	3,7	11,91		
18	Jodła pospolita	Aktywna		3	5,8	5,4	24,60		
18	Jodła pospolita	Aktywna		4	4,7	4,4	16,24		
18	Jodła pospolita	Aktywna		5	3,8	3,6	10,74		
18	Jodła pospolita	Aktywna		6	3,2	2,9	7,29		
18	Jodła pospolita	Aktywna		7	4,6	4,3	15,54		
18	Jodła pospolita	Aktywna		8	4,2	3,8	12,53		

18	Jodła pospolita	Aktywna		9	3,5	3,1	8,52		
18	Jodła pospolita	Aktywna		10	3,9	3,4	10,41		
18	Jodła pospolita	Aktywna		11	3,8	3,3	9,85		
18	Jodła pospolita	Aktywna		12	4,5	3,9	13,78		
18	Jodła pospolita	Aktywna		13	2,7	24,0	50,89		
18	Jodła pospolita	Aktywna		14	3,6	3,1	8,77		
18	Jodła pospolita	Aktywna		15	3,0	2,5	5,89		
18	Jodła pospolita	Aktywna		16	4,2	4,0	13,19		
18	Jodła pospolita	Aktywna		17	4,5	4,1	14,49		
18	Jodła pospolita	Aktywna		18	3,7	3,2	9,30		
18	Jodła pospolita	Aktywna		19	3,2	3,1	7,79		
19	Jodła pospolita	Aktywna	18	1	3,3	3,1	8,03	253,08	29,31
19	Jodła pospolita	Aktywna		2	4,0	3,6	11,31		
19	Jodła pospolita	Aktywna		3	3,9	3,2	9,80		
19	Jodła pospolita	Aktywna		4	4,8	4,4	16,59		
19	Jodła pospolita	Aktywna		5	3,3	3,0	7,78		
19	Jodła pospolita	Aktywna		6	3,9	3,5	10,72		
19	Jodła pospolita	Aktywna		7	4,1	3,9	12,56		
19	Jodła pospolita	Aktywna		8	4,6	4,2	15,17		
19	Jodła pospolita	Aktywna		9	4,0	3,6	11,31		
19	Jodła pospolita	Aktywna		10	3,2	2,8	7,04		
19	Jodła pospolita	Aktywna		11	3,7	3,1	9,01		
19	Jodła pospolita	Aktywna		12	3,9	3,7	11,33		

19	Jodła pospolita	Aktywna		13	3,6	3,2	9,05		
19	Jodła pospolita	Aktywna		14	2,8	2,6	5,72		
19	Jodła pospolita	Aktywna		15	4,0	3,7	11,62		
19	Jodła pospolita	Aktywna		16	3,4	2,9	7,74		
19	Jodła pospolita	Aktywna		17	3,8	3,1	9,25		
19	Jodła pospolita	Aktywna		18	5,2	4,8	19,60		
19	Jodła pospolita	Aktywna		19	4,7	4,2	15,50		
19	Jodła pospolita	Aktywna		20	4,3	4,0	13,51		
19	Jodła pospolita	Aktywna		21	3,6	3,1	8,77		
19	Jodła pospolita	Aktywna		22	4,1	3,4	10,95		
19	Jodła pospolita	Aktywna		23	3,9	3,5	10,72		
20	Jodła pospolita	Aktywna	21	1	4,4	4,1	14,17	269,71	28,36
20	Jodła pospolita	Aktywna		2	3,5	3,4	9,35		
20	Jodła pospolita	Aktywna		3	3,4	3,0	8,01		
20	Jodła pospolita	Aktywna		4	2,9	2,6	5,92		
20	Jodła pospolita	Aktywna		5	3,3	2,8	7,26		
20	Jodła pospolita	Aktywna		6	5,2	4,5	18,38		
20	Jodła pospolita	Aktywna		7	3,6	3,2	9,05		
20	Jodła pospolita	Aktywna		8	4,1	3,9	12,56		
20	Jodła pospolita	Aktywna		9	3,7	3,2	9,30		
20	Jodła pospolita	Aktywna		10	3,9	3,5	10,72		
20	Jodła pospolita	Aktywna		11	3,6	3,1	8,77		
20	Jodła pospolita	Aktywna		12	3,4	3,0	8,01		

20	Jodła pospolita	Aktywna		13	5,1	4,6	18,43		
20	Jodła pospolita	Aktywna		14	2,8	2,5	5,50		
20	Jodła pospolita	Aktywna		15	4,6	4,3	15,54		
20	Jodła pospolita	Aktywna		16	4,6	4,2	15,17		
20	Jodła pospolita	Aktywna		17	4,1	3,6	11,59		
20	Jodła pospolita	Aktywna		18	3,7	3,4	9,88		
20	Jodła pospolita	Aktywna		19	3,5	3,1	8,52		
20	Jodła pospolita	Aktywna		20	4,1	3,8	12,24		
20	Jodła pospolita	Aktywna		21	3,7	3,4	9,88		
20	Jodła pospolita	Aktywna		22	3,5	3,1	8,52		
20	Jodła pospolita	Aktywna		23	3,9	3,6	11,03		
20	Jodła pospolita	Aktywna		24	3,6	3,2	9,05		
20	Jodła pospolita	Aktywna		25	4,2	3,9	12,86		
21	Jodła pospolita	Aktywna	23	1	2,6	2,5	5,11	292,86	30,54
21	Jodła pospolita	Aktywna		2	3,3	3,1	8,03		
21	Jodła pospolita	Aktywna		3	2,9	2,7	6,15		
21	Jodła pospolita	Aktywna		4	4,7	4,2	15,50		
21	Jodła pospolita	Aktywna		5	5,1	4,8	19,23		
21	Jodła pospolita	Aktywna		6	3,7	3,3	9,59		
21	Jodła pospolita	Aktywna		7	3,5	3,0	8,25		
21	Jodła pospolita	Aktywna		8	3,8	2,8	8,36		
21	Jodła pospolita	Aktywna		9	4,6	4,2	15,17		
21	Jodła pospolita	Aktywna		10	4,1	3,6	11,59		

21	Jodła pospolita	Aktywna		11	4,9	4,1	15,78		
21	Jodła pospolita	Aktywna		12	3,7	3,4	9,88		
21	Jodła pospolita	Aktywna		13	4,1	4,0	12,88		
21	Jodła pospolita	Aktywna		14	3,6	33,0	93,31		
21	Jodła pospolita	Aktywna		15	2,7	2,4	5,09		
21	Jodła pospolita	Aktywna		16	4,5	4,1	14,49		
21	Jodła pospolita	Aktywna		17	4,0	3,6	11,31		
21	Jodła pospolita	Aktywna		18	3,8	3,4	10,15		
21	Jodła pospolita	Aktywna		19	3,4	3,1	8,28		
21	Jodła pospolita	Aktywna		20	2,5	2,4	4,71		
22	Jodła pospolita	Aktywna	21	1	4,2	4,0	13,19	287,64	31,35
22	Jodła pospolita	Aktywna		2	4,5	4,1	14,49		
22	Jodła pospolita	Aktywna		3	3,8	3,5	10,45		
22	Jodła pospolita	Aktywna		4	4,1	4,4	14,17		
22	Jodła pospolita	Aktywna		5	5,4	4,9	20,78		
22	Jodła pospolita	Aktywna		6	3,9	3,3	10,11		
22	Jodła pospolita	Aktywna		7	4,1	3,8	12,24		
22	Jodła pospolita	Aktywna		8	3,1	2,7	6,57		
22	Jodła pospolita	Aktywna		9	3,8	3,4	10,15		
22	Jodła pospolita	Aktywna		10	4,1	3,7	11,91		
22	Jodła pospolita	Aktywna		11	2,8	2,5	5,50		
22	Jodła pospolita	Aktywna		12	4,2	3,6	11,88		
22	Jodła pospolita	Aktywna		13	3,6	3,1	8,77		

22	Jodła pospolita	Aktywna		14	4,6	4,1	14,81		
22	Jodła pospolita	Aktywna		15	5,7	5,2	23,28		
22	Jodła pospolita	Aktywna		16	3,4	3,0	8,01		
22	Jodła pospolita	Aktywna		17	3,0	2,7	6,36		
22	Jodła pospolita	Aktywna		18	3,8	3,4	10,15		
22	Jodła pospolita	Aktywna		19	4,3	3,9	13,17		
22	Jodła pospolita	Aktywna		20	3,7	3,2	9,30		
22	Jodła pospolita	Aktywna		21	3,5	3,0	8,25		
22	Jodła pospolita	Aktywna		22	4,0	4,0	12,57		
22	Jodła pospolita	Aktywna		23	4,3	3,9	13,17		
22	Jodła pospolita	Aktywna		24	3,6	3,1	8,77		
22	Jodła pospolita	Aktywna		25	3,7	3,3	9,59		
23	Jodła pospolita	Aktywna	24	1	4,5	4,2	14,84	306,77	30,01
23	Jodła pospolita	Aktywna		2	3,5	3,3	9,07		
23	Jodła pospolita	Aktywna		3	3,9	3,4	10,41		
23	Jodła pospolita	Aktywna		4	3,1	2,8	6,82		
23	Jodła pospolita	Aktywna		5	3,7	3,1	9,01		
23	Jodła pospolita	Aktywna		6	3,9	3,4	10,41		
23	Jodła pospolita	Aktywna		7	4,2	4,0	13,19		
23	Jodła pospolita	Aktywna		8	5,7	5,5	24,62		
23	Jodła pospolita	Aktywna		9	4,6	4,3	15,54		
23	Jodła pospolita	Aktywna		10	3,8	3,4	10,15		
23	Jodła pospolita	Aktywna		11	5,4	5,1	21,63		

23	Jodła pospolita	Aktywna		12	4,3	4,1	13,85		
23	Jodła pospolita	Aktywna		13	4,2	3,7	12,21		
23	Jodła pospolita	Aktywna		14	4,9	4,4	16,93		
23	Jodła pospolita	Aktywna		15	3,8	3,6	10,74		
23	Jodła pospolita	Aktywna		16	4,7	4,4	16,24		
23	Jodła pospolita	Aktywna		17	3,6	3,2	9,05		
23	Jodła pospolita	Aktywna		18	5,6	5,2	22,87		
23	Jodła pospolita	Aktywna		19	4,8	4,3	16,21		
23	Jodła pospolita	Aktywna		20	3,4	3,1	8,28		
23	Jodła pospolita	Aktywna		21	5,1	4,7	18,83		
23	Jodła pospolita	Aktywna		22	4,7	4,3	15,87		
24	Jodła pospolita	Aktywna	19	1	3,6	3,3	9,33	239,90	27,47
24	Jodła pospolita	Aktywna		2	3,7	3,5	10,17		
24	Jodła pospolita	Aktywna		3	5,2	4,9	20,01		
24	Jodła pospolita	Aktywna		4	4,9	4,5	17,32		
24	Jodła pospolita	Aktywna		5	4,3	4,0	13,51		
24	Jodła pospolita	Aktywna		6	4,8	4,5	16,96		
24	Jodła pospolita	Aktywna		7	3,7	3,1	9,01		
24	Jodła pospolita	Aktywna		8	5,0	4,5	17,67		
24	Jodła pospolita	Aktywna		9	4,7	4,3	15,87		
24	Jodła pospolita	Aktywna		10	4,2	3,7	12,21		
24	Jodła pospolita	Aktywna		11	4,0	3,3	10,37		
24	Jodła pospolita	Aktywna		12	3,8	3,4	10,15		

24	Jodła pospolita	Aktywna		13	4,7	4,4	16,24		
24	Jodła pospolita	Aktywna		14	2,9	2,5	5,69		
24	Jodła pospolita	Aktywna		15	3,5	3,2	8,80		
24	Jodła pospolita	Aktywna		16	4,5	4,1	14,49		
24	Jodła pospolita	Aktywna		17	4,1	4,0	12,88		
24	Jodła pospolita	Aktywna		18	3,8	3,6	10,74		
24	Jodła pospolita	Aktywna		19	3,6	3,0	8,48		
25	Jodła pospolita	Aktywna	21	1	2,8	2,6	5,72	314,66	31,99
25	Jodła pospolita	Aktywna		2	4,2	3,6	11,88		
25	Jodła pospolita	Aktywna		3	4,4	4,0	13,82		
25	Jodła pospolita	Aktywna		4	3,4	3,2	8,55		
25	Jodła pospolita	Aktywna		5	5,0	4,2	16,49		
25	Jodła pospolita	Aktywna		6	3,6	3,3	9,33		
25	Jodła pospolita	Aktywna		7	4,9	4,5	17,32		
25	Jodła pospolita	Aktywna		8	3,8	3,7	11,04		
25	Jodła pospolita	Aktywna		9	4,8	4,2	15,83		
25	Jodła pospolita	Aktywna		10	2,7	2,4	5,09		
25	Jodła pospolita	Aktywna		11	3,4	3,0	8,01		
25	Jodła pospolita	Aktywna		12	3,8	3,4	10,15		
25	Jodła pospolita	Aktywna		13	4,5	4,1	14,49		
25	Jodła pospolita	Aktywna		14	3,9	3,6	11,03		
25	Jodła pospolita	Aktywna		15	4,6	4,2	15,17		
25	Jodła pospolita	Aktywna		16	3,7	3,3	9,59		

25	Jodła pospolita	Aktywna		17	4,2	3,9	12,86		
25	Jodła pospolita	Aktywna		18	3,8	3,4	10,15		
25	Jodła pospolita	Aktywna		19	4,6	4,1	14,81		
25	Jodła pospolita	Aktywna		20	5,1	4,7	18,83		
25	Jodła pospolita	Aktywna		21	4,9	4,4	16,93		
25	Jodła pospolita	Aktywna		22	3,8	3,6	10,74		
25	Jodła pospolita	Aktywna		23	4,6	4,2	15,17		
25	Jodła pospolita	Aktywna		24	3,4	3,1	8,28		
25	Jodła pospolita	Aktywna		25	3,2	2,7	6,79		
25	Jodła pospolita	Aktywna		26	4,8	4,4	16,59		
26	Jodła pospolita	Aktywna	22	1	5,2	4,7	19,20	292,34	29,44
26	Jodła pospolita	Aktywna		2	4,5	4,1	14,49		
26	Jodła pospolita	Aktywna		3	4,2	4,0	13,19		
26	Jodła pospolita	Aktywna		4	3,9	3,4	10,41		
26	Jodła pospolita	Aktywna		5	3,1	3,0	7,30		
26	Jodła pospolita	Aktywna		6	2,9	2,7	6,15		
26	Jodła pospolita	Aktywna		7	4,6	4,1	14,81		
26	Jodła pospolita	Aktywna		8	3,8	3,5	10,45		
26	Jodła pospolita	Aktywna		9	4,3	4,3	14,52		
26	Jodła pospolita	Aktywna		10	3,8	3,2	9,55		
26	Jodła pospolita	Aktywna		11	4,0	3,4	10,68		
26	Jodła pospolita	Aktywna		12	3,7	2,9	8,43		
26	Jodła pospolita	Aktywna		13	4,4	4,0	13,82		

26	Jodła pospolita	Aktywna		14	4,9	4,3	16,55		
26	Jodła pospolita	Aktywna		15	5,1	3,9	15,62		
26	Jodła pospolita	Aktywna		16	4,8	4,6	17,34		
26	Jodła pospolita	Aktywna		17	3,4	3,1	8,28		
26	Jodła pospolita	Aktywna		18	4,6	4,2	15,17		
26	Jodła pospolita	Aktywna		19	4,2	3,9	12,86		
26	Jodła pospolita	Aktywna		20	4,3	4,2	14,18		
26	Jodła pospolita	Aktywna		21	3,9	3,8	11,64		
26	Jodła pospolita	Aktywna		22	4,8	4,5	16,96		
26	Jodła pospolita	Aktywna		23	3,8	3,6	10,74		
27	Jodła pospolita	Aktywna	23	1	4,6	4,5	16,26	275,15	28,96
27	Jodła pospolita	Aktywna		2	4,2	4,0	13,19		
27	Jodła pospolita	Aktywna		3	3,8	3,5	10,45		
27	Jodła pospolita	Aktywna		4	3,7	3,3	9,59		
27	Jodła pospolita	Aktywna		5	5,1	4,9	19,63		
27	Jodła pospolita	Aktywna		6	3,9	3,6	11,03		
27	Jodła pospolita	Aktywna		7	3,4	3,1	8,28		
27	Jodła pospolita	Aktywna		8	4,3	4,0	13,51		
27	Jodła pospolita	Aktywna		9	4,6	4,1	14,81		
27	Jodła pospolita	Aktywna		10	4,7	4,4	16,24		
27	Jodła pospolita	Aktywna		11	3,8	3,6	10,74		
27	Jodła pospolita	Aktywna		12	3,2	2,9	7,29		
27	Jodła pospolita	Aktywna		13	3,6	3,1	8,77		

27	Jodła pospolita	Aktywna		14	4,8	4,4	16,59		
27	Jodła pospolita	Aktywna		15	4,2	4,1	13,52		
27	Jodła pospolita	Aktywna		16	5,1	4,9	19,63		
27	Jodła pospolita	Aktywna		17	4,5	4,1	14,49		
27	Jodła pospolita	Aktywna		18	3,9	3,6	11,03		
27	Jodła pospolita	Aktywna		19	3,8	3,7	11,04		
27	Jodła pospolita	Aktywna		20	4,2	4,0	13,19		
27	Jodła pospolita	Aktywna		21	4,7	4,3	15,87		
28	Jodła pospolita	Aktywna	26	1	3,5	3,3	9,07	335,58	34,11
28	Jodła pospolita	Aktywna		2	4,6	4,2	15,17		
28	Jodła pospolita	Aktywna		3	5,4	5,1	21,63		
28	Jodła pospolita	Aktywna		4	5,1	4,8	19,23		
28	Jodła pospolita	Aktywna		5	4,8	4,4	16,59		
28	Jodła pospolita	Aktywna		6	3,8	3,3	9,85		
28	Jodła pospolita	Aktywna		7	3,9	3,5	10,72		
28	Jodła pospolita	Aktywna		8	4,2	3,8	12,53		
28	Jodła pospolita	Aktywna		9	4,4	4,0	13,82		
28	Jodła pospolita	Aktywna		10	5,7	5,2	23,28		
28	Jodła pospolita	Aktywna		11	3,6	3,4	9,61		
28	Jodła pospolita	Aktywna		12	4,5	4,1	14,49		
28	Jodła pospolita	Aktywna		13	4,3	4,2	14,18		
28	Jodła pospolita	Aktywna		14	3,7	3,2	9,30		
28	Jodła pospolita	Aktywna		15	5,3	4,8	19,98		

28	Jodła pospolita	Aktywna		16	4,6	4,1	14,81		
28	Jodła pospolita	Aktywna		17	4,1	3,8	12,24		
28	Jodła pospolita	Aktywna		18	3,7	3,4	9,88		
28	Jodła pospolita	Aktywna		19	3,6	3,1	8,77		
28	Jodła pospolita	Aktywna		20	4,2	3,7	12,21		
28	Jodła pospolita	Aktywna		21	4,8	4,1	15,46		
28	Jodła pospolita	Aktywna		22	3,5	3,0	8,25		
28	Jodła pospolita	Aktywna		23	4,2	3,8	12,53		
28	Jodła pospolita	Aktywna		24	3,9	3,6	11,03		
28	Jodła pospolita	Aktywna		25	4,1	3,4	10,95		
29	Jodła pospolita	Aktywna	20	1	4,2	3,6	11,88	253,25	27,02
29	Jodła pospolita	Aktywna		2	3,7	3,2	9,30		
29	Jodła pospolita	Aktywna		3	3,9	3,6	11,03		
29	Jodła pospolita	Aktywna		4	3,4	3,0	8,01		
29	Jodła pospolita	Aktywna		5	3,1	2,8	6,82		
29	Jodła pospolita	Aktywna		6	5,1	4,8	19,23		
29	Jodła pospolita	Aktywna		7	3,6	3,2	9,05		
29	Jodła pospolita	Aktywna		8	3,8	3,7	11,04		
29	Jodła pospolita	Aktywna		9	4,5	4,4	15,55		
29	Jodła pospolita	Aktywna		10	5,3	5,1	21,23		
29	Jodła pospolita	Aktywna		11	4,1	3,9	12,56		
29	Jodła pospolita	Aktywna		12	3,7	3,3	9,59		
29	Jodła pospolita	Aktywna		13	4,1	4,0	12,88		

29	Jodła pospolita	Aktywna		14	4,6	4,1	14,81		
29	Jodła pospolita	Aktywna		15	4,4	4,4	15,21		
29	Jodła pospolita	Aktywna		16	3,8	3,6	10,74		
29	Jodła pospolita	Aktywna		17	4,7	4,1	15,13		
29	Jodła pospolita	Aktywna		18	3,6	3,2	9,05		
29	Jodła pospolita	Aktywna		19	4,2	3,9	12,86		
29	Jodła pospolita	Aktywna		20	5,0	4,4	17,28		
30	Jodła pospolita	Aktywna	23	1	6,2	5,8	28,24	307,06	30,87
30	Jodła pospolita	Aktywna		2	3,7	3,3	9,59		
30	Jodła pospolita	Aktywna		3	4,5	4,1	14,49		
30	Jodła pospolita	Aktywna		4	4,1	3,6	11,59		
30	Jodła pospolita	Aktywna		5	3,8	3,4	10,15		
30	Jodła pospolita	Aktywna		6	3,4	3,0	8,01		
30	Jodła pospolita	Aktywna		7	2,8	2,6	5,72		
30	Jodła pospolita	Aktywna		8	4,0	3,6	11,31		
30	Jodła pospolita	Aktywna		9	4,6	4,4	15,90		
30	Jodła pospolita	Aktywna		10	4,3	4,1	13,85		
30	Jodła pospolita	Aktywna		11	3,7	3,3	9,59		
30	Jodła pospolita	Aktywna		12	5,0	4,8	18,85		
30	Jodła pospolita	Aktywna		13	4,2	3,9	12,86		
30	Jodła pospolita	Aktywna		14	3,9	3,5	10,72		
30	Jodła pospolita	Aktywna		15	4,7	4,4	16,24		
30	Jodła pospolita	Aktywna		16	4,4	4,0	13,82		

30	Jodła pospolita	Aktywna		17	3,5	3,3	9,07		
30	Jodła pospolita	Aktywna		18	4,6	4,2	15,17		
30	Jodła pospolita	Aktywna		19	4,1	3,8	12,24		
30	Jodła pospolita	Aktywna		20	4,3	4,0	13,51		
30	Jodła pospolita	Aktywna		21	5,1	4,7	18,83		
30	Jodła pospolita	Aktywna		22	4,8	4,2	15,83		
30	Jodła pospolita	Aktywna		23	4,3	3,4	11,48		
31	Buk zwyczajny	Pasywna	19	1	8,4	6,8	44,86	356,95	59,42
31	Buk zwyczajny	Pasywna		2	6,7	5,5	28,94		
31	Buk zwyczajny	Pasywna		3	7,2	5,9	33,36		
31	Buk zwyczajny	Pasywna		4	5,8	5,2	23,69		
31	Buk zwyczajny	Pasywna		5	6,2	5,3	25,81		
31	Buk zwyczajny	Pasywna		6	7,9	7,4	45,91		
31	Buk zwyczajny	Pasywna		7	6,6	5,9	30,58		
31	Buk zwyczajny	Pasywna		8	7,3	5,7	32,68		
31	Buk zwyczajny	Pasywna		9	6,5	6,0	30,63		
31	Buk zwyczajny	Pasywna		10	7,1	6,6	36,80		
31	Buk zwyczajny	Pasywna		11	5,8	5,2	23,69		
32	Buk zwyczajny	Pasywna	22	1	6,8	6,2	33,11	410,82	73,72
32	Buk zwyczajny	Pasywna		2	7,6	6,8	40,59		
32	Buk zwyczajny	Pasywna		3	7,1	6,4	35,69		
32	Buk zwyczajny	Pasywna		4	5,7	5,0	22,38		
32	Buk zwyczajny	Pasywna		5	6,6	5,8	30,07		

32	Buk zwyczajny	Pasywna		6	5,8	5,1	23,23		
32	Buk zwyczajny	Pasywna		7	6,2	5,3	25,81		
32	Buk zwyczajny	Pasywna		8	7,0	6,1	33,54		
32	Buk zwyczajny	Pasywna		9	6,4	5,7	28,65		
32	Buk zwyczajny	Pasywna		10	6,9	6,0	32,52		
32	Buk zwyczajny	Pasywna		11	6,3	5,4	26,72		
32	Buk zwyczajny	Pasywna		12	7,2	6,6	37,32		
32	Buk zwyczajny	Pasywna		13	7,6	6,9	41,19		
33	Buk zwyczajny	Pasywna	21	1	6,7	6,2	32,63	403,24	72,64
33	Buk zwyczajny	Pasywna		2	6,2	5,4	26,30		
33	Buk zwyczajny	Pasywna		3	7,4	6,6	38,36		
33	Buk zwyczajny	Pasywna		4	7,8	7,1	43,50		
33	Buk zwyczajny	Pasywna		5	6,3	5,5	27,21		
33	Buk zwyczajny	Pasywna		6	4,8	4,1	15,46		
33	Buk zwyczajny	Pasywna		7	5,1	4,4	17,62		
33	Buk zwyczajny	Pasywna		8	7,2	6,3	35,63		
33	Buk zwyczajny	Pasywna		9	6,9	6,2	33,60		
33	Buk zwyczajny	Pasywna		10	5,8	4,9	22,32		
33	Buk zwyczajny	Pasywna		11	6,5	5,7	29,10		
33	Buk zwyczajny	Pasywna		12	7,7	6,6	39,91		
33	Buk zwyczajny	Pasywna		13	5,2	4,4	17,97		
33	Buk zwyczajny	Pasywna		14	5,9	5,1	23,63		
34	Buk zwyczajny	Pasywna	20	1	6,4	5,9	29,66	373,06	61,89

34	Buk zwyczajny	Pasywna		2	6,9	5,2	28,18		
34	Buk zwyczajny	Pasywna		3	6,7	5,9	31,05		
34	Buk zwyczajny	Pasywna		4	8,6	7,4	49,98		
34	Buk zwyczajny	Pasywna		5	5,8	4,6	20,95		
34	Buk zwyczajny	Pasywna		6	7,6	6,8	40,59		
34	Buk zwyczajny	Pasywna		7	6,8	5,3	28,31		
34	Buk zwyczajny	Pasywna		8	7,0	5,1	28,04		
34	Buk zwyczajny	Pasywna		9	7,3	6,1	34,97		
34	Buk zwyczajny	Pasywna		10	6,2	5,4	26,30		
34	Buk zwyczajny	Pasywna		11	5,8	5,3	24,14		
34	Buk zwyczajny	Pasywna		12	6,9	5,7	30,89		
35	Buk zwyczajny	Pasywna	21	1	7,2	6,3	35,63	410,11	72,99
35	Buk zwyczajny	Pasywna		2	7,3	6,3	36,12		
35	Buk zwyczajny	Pasywna		3	6,9	6,0	32,52		
35	Buk zwyczajny	Pasywna		4	6,4	5,2	26,14		
35	Buk zwyczajny	Pasywna		5	7,1	6,0	33,46		
35	Buk zwyczajny	Pasywna		6	6,6	5,1	26,44		
35	Buk zwyczajny	Pasywna		7	6,0	5,2	24,50		
35	Buk zwyczajny	Pasywna		8	6,7	5,9	31,05		
35	Buk zwyczajny	Pasywna		9	6,3	5,5	27,21		
35	Buk zwyczajny	Pasywna		10	7,4	6,6	38,36		
35	Buk zwyczajny	Pasywna		11	7,0	5,9	32,44		
35	Buk zwyczajny	Pasywna		12	6,9	6,3	34,14		

35	Buk zwyczajny	Pasywna		13	6,7	6,1	32,10		
36	Buk zwyczajny	Pasywna	18	1	6,3	5,4	26,72	311,05	49,81
36	Buk zwyczajny	Pasywna		2	6,6	5,7	29,55		
36	Buk zwyczajny	Pasywna		3	7,2	6,1	34,49		
36	Buk zwyczajny	Pasywna		4	6,8	5,9	31,51		
36	Buk zwyczajny	Pasywna		5	7,4	6,4	37,20		
36	Buk zwyczajny	Pasywna		6	5,7	4,9	21,94		
36	Buk zwyczajny	Pasywna		7	6,7	5,9	31,05		
36	Buk zwyczajny	Pasywna		8	7,0	6,1	33,54		
36	Buk zwyczajny	Pasywna		9	7,3	6,6	37,84		
36	Buk zwyczajny	Pasywna		10	6,3	5,5	27,21		
37	Buk zwyczajny	Pasywna	20	1	7,1	6,3	35,13	352,89	60,41
37	Buk zwyczajny	Pasywna		2	6,5	5,8	29,61		
37	Buk zwyczajny	Pasywna		3	6,1	5,5	26,35		
37	Buk zwyczajny	Pasywna		4	7,2	6,7	37,89		
37	Buk zwyczajny	Pasywna		5	6,9	6,1	33,06		
37	Buk zwyczajny	Pasywna		6	6,4	5,4	27,14		
37	Buk zwyczajny	Pasywna		7	6,8	6,0	32,04		
37	Buk zwyczajny	Pasywna		8	7,5	6,7	39,47		
37	Buk zwyczajny	Pasywna		9	6,9	6,3	34,14		
37	Buk zwyczajny	Pasywna		10	6,5	5,6	28,59		
37	Buk zwyczajny	Pasywna	11	6,7	5,6	29,47			
38	Buk zwyczajny	Pasywna	22	1	6,2	5,1	24,83	414,58	74,92

38	Buk zwyczajny	Pasywna		2	6,5	5,3	27,06		
38	Buk zwyczajny	Pasywna		3	7,7	6,5	39,31		
38	Buk zwyczajny	Pasywna		4	6,8	6,0	32,04		
38	Buk zwyczajny	Pasywna		5	6,3	5,4	26,72		
38	Buk zwyczajny	Pasywna		6	5,6	5,0	21,99		
38	Buk zwyczajny	Pasywna		7	6,0	5,2	24,50		
38	Buk zwyczajny	Pasywna		8	6,8	6,1	32,58		
38	Buk zwyczajny	Pasywna		9	7,3	6,6	37,84		
38	Buk zwyczajny	Pasywna		10	8,4	6,6	43,54		
38	Buk zwyczajny	Pasywna		11	6,4	5,2	26,14		
38	Buk zwyczajny	Pasywna		12	6,2	5,3	25,81		
38	Buk zwyczajny	Pasywna		13	6,9	6,0	32,52		
38	Buk zwyczajny	Pasywna		14	5,7	4,4	19,70		
39	Buk zwyczajny	Pasywna	23	1	8,2	6,8	43,79	387,68	64,37
39	Buk zwyczajny	Pasywna		2	6,8	5,9	31,51		
39	Buk zwyczajny	Pasywna		3	7,5	6,3	37,11		
39	Buk zwyczajny	Pasywna		4	7,1	5,6	31,23		
39	Buk zwyczajny	Pasywna		5	6,6	5,7	29,55		
39	Buk zwyczajny	Pasywna		6	7,4	6,6	38,36		
39	Buk zwyczajny	Pasywna		7	6,3	5,4	26,72		
39	Buk zwyczajny	Pasywna		8	6,8	5,8	30,98		
39	Buk zwyczajny	Pasywna		9	6,1	5,0	23,95		
39	Buk zwyczajny	Pasywna		10	7,0	5,8	31,89		

39	Buk zwyczajny	Pasywna		11	6,6	5,8	30,07		
39	Buk zwyczajny	Pasywna		12	6,9	6,0	32,52		
40	Buk zwyczajny	Pasywna	21	1	6,4	5,6	28,15	344,88	58,73
40	Buk zwyczajny	Pasywna		2	7,1	5,9	32,90		
40	Buk zwyczajny	Pasywna		3	7,9	6,6	40,95		
40	Buk zwyczajny	Pasywna		4	6,6	5,3	27,47		
40	Buk zwyczajny	Pasywna		5	7,5	6,2	36,52		
40	Buk zwyczajny	Pasywna		6	7,3	6,3	36,12		
40	Buk zwyczajny	Pasywna		7	8,4	5,8	38,26		
40	Buk zwyczajny	Pasywna		8	6,9	5,6	30,35		
40	Buk zwyczajny	Pasywna		9	8,3	6,4	41,72		
40	Buk zwyczajny	Pasywna		10	7,0	5,9	32,44		
41	Buk zwyczajny	Pasywna		23	1	8,6	7,0		
41	Buk zwyczajny	Pasywna	2		7,8	6,5	39,82		
41	Buk zwyczajny	Pasywna	3		6,4	4,8	24,13		
41	Buk zwyczajny	Pasywna	4		6,9	5,4	29,26		
41	Buk zwyczajny	Pasywna	5		6,2	4,8	23,37		
41	Buk zwyczajny	Pasywna	6		7,6	6,3	37,60		
41	Buk zwyczajny	Pasywna	7		7,1	6,3	35,13		
41	Buk zwyczajny	Pasywna	8		7,3	6,6	37,84		
41	Buk zwyczajny	Pasywna	9		6,8	6,0	32,04		
41	Buk zwyczajny	Pasywna	10		6,4	5,3	26,64		
41	Buk zwyczajny	Pasywna	11		7,1	5,9	32,90		

41	Buk zwyczajny	Pasywna		12	7,9	5,3	32,88		
41	Buk zwyczajny	Pasywna		13	6,6	4,8	24,88		
42	Buk zwyczajny	Pasywna	22	1	6,6	5,8	30,07	412,26	81,29
42	Buk zwyczajny	Pasywna		2	8,1	7,2	45,80		
42	Buk zwyczajny	Pasywna		3	7,2	6,6	37,32		
42	Buk zwyczajny	Pasywna		4	6,4	5,9	29,66		
42	Buk zwyczajny	Pasywna		5	6,6	5,3	27,47		
42	Buk zwyczajny	Pasywna		6	7,3	6,3	36,12		
42	Buk zwyczajny	Pasywna		7	6,8	5,1	27,24		
42	Buk zwyczajny	Pasywna		8	7,4	6,5	37,78		
42	Buk zwyczajny	Pasywna		9	6,1	5,7	27,31		
42	Buk zwyczajny	Pasywna		10	6,7	6,1	32,10		
42	Buk zwyczajny	Pasywna		11	7,2	6,8	38,45		
42	Buk zwyczajny	Pasywna		12	7,7	7,1	42,94		
43	Buk zwyczajny	Pasywna	20	1	6,6	5,8	30,07	388,93	72,09
43	Buk zwyczajny	Pasywna		2	7,5	6,3	37,11		
43	Buk zwyczajny	Pasywna		3	6,6	5,1	26,44		
43	Buk zwyczajny	Pasywna		4	7,2	6,4	36,19		
43	Buk zwyczajny	Pasywna		5	6,7	4,9	25,78		
43	Buk zwyczajny	Pasywna		6	7,4	6,1	35,45		
43	Buk zwyczajny	Pasywna		7	6,8	5,8	30,98		
43	Buk zwyczajny	Pasywna		8	6,4	4,8	24,13		
43	Buk zwyczajny	Pasywna		9	5,9	5,8	26,88		

43	Buk zwyczajny	Pasywna		10	7,1	6,0	33,46		
43	Buk zwyczajny	Pasywna		11	6,2	4,0	19,48		
43	Buk zwyczajny	Pasywna		12	6,6	5,4	27,99		
43	Buk zwyczajny	Pasywna		13	7,3	6,1	34,97		
44	Buk zwyczajny	Pasywna	23	1	5,4	5,1	21,63	404,14	76,21
44	Buk zwyczajny	Pasywna		2	7,2	6,4	36,19		
44	Buk zwyczajny	Pasywna		3	4,9	3,8	14,62		
44	Buk zwyczajny	Pasywna		4	6,8	6,0	32,04		
44	Buk zwyczajny	Pasywna		5	8,1	6,9	43,90		
44	Buk zwyczajny	Pasywna		6	3,9	3,5	10,72		
44	Buk zwyczajny	Pasywna		7	5,7	4,5	20,15		
44	Buk zwyczajny	Pasywna		8	6,9	5,8	31,43		
44	Buk zwyczajny	Pasywna		9	7,4	5,7	33,13		
44	Buk zwyczajny	Pasywna		10	6,7	5,4	28,42		
44	Buk zwyczajny	Pasywna		11	3,6	3,2	9,05		
44	Buk zwyczajny	Pasywna		12	7,6	6,6	39,40		
44	Buk zwyczajny	Pasywna		13	5,9	5,1	23,63		
44	Buk zwyczajny	Pasywna		14	6,3	5,4	26,72		
44	Buk zwyczajny	Pasywna		15	6,8	6,2	33,11		
45	Buk zwyczajny	Pasywna	21	1	8,2	6,8	43,79	365,27	65,42
45	Buk zwyczajny	Pasywna		2	5,9	4,8	22,24		
45	Buk zwyczajny	Pasywna		3	6,5	5,1	26,04		
45	Buk zwyczajny	Pasywna		4	7,4	6,2	36,03		

45	Buk zwyczajny	Pasywna		5	6,8	6,0	32,04		
45	Buk zwyczajny	Pasywna		6	7,1	5,8	32,34		
45	Buk zwyczajny	Pasywna		7	6,8	6,2	33,11		
45	Buk zwyczajny	Pasywna		8	7,6	6,7	39,99		
45	Buk zwyczajny	Pasywna		9	7,2	6,5	36,76		
45	Buk zwyczajny	Pasywna		10	7,5	6,8	40,06		
45	Buk zwyczajny	Pasywna		11	5,6	5,2	22,87		
46	Buk zwyczajny	Aktywna	20	1	6,7	6,3	33,15	360,55	37,97
46	Buk zwyczajny	Aktywna		2	6,9	5,8	31,43		
46	Buk zwyczajny	Aktywna		3	4,8	4,4	16,59		
46	Buk zwyczajny	Aktywna		4	7,6	6,2	37,01		
46	Buk zwyczajny	Aktywna		5	7,1	6,4	35,69		
46	Buk zwyczajny	Aktywna		6	5,4	4,8	20,36		
46	Buk zwyczajny	Aktywna		7	5,8	4,8	21,87		
46	Buk zwyczajny	Aktywna		8	6,6	6,3	32,66		
46	Buk zwyczajny	Aktywna		9	7,3	6,2	35,55		
46	Buk zwyczajny	Aktywna		10	6,9	6,2	33,60		
46	Buk zwyczajny	Aktywna		11	7,0	6,1	33,54		
46	Buk zwyczajny	Aktywna		12	6,5	5,7	29,10		
47	Buk zwyczajny	Aktywna	18	1	7,1	5,8	32,34	323,11	34,51
47	Buk zwyczajny	Aktywna		2	6,5	5,6	28,59		
47	Buk zwyczajny	Aktywna		3	6,9	6,2	33,60		
47	Buk zwyczajny	Aktywna		4	7,7	6,9	41,73		

47	Buk zwyczajny	Aktywna		5	5,7	4,8	21,49		
47	Buk zwyczajny	Aktywna		6	7,6	6,2	37,01		
47	Buk zwyczajny	Aktywna		7	7,4	6,5	37,78		
47	Buk zwyczajny	Aktywna		8	6,7	5,9	31,05		
47	Buk zwyczajny	Aktywna		9	6,3	5,4	26,72		
47	Buk zwyczajny	Aktywna		10	7,2	5,8	32,80		
48	Buk zwyczajny	Aktywna	21	1	6,6	6,1	31,62	380,13	39,71
48	Buk zwyczajny	Aktywna		2	7,3	4,9	28,09		
48	Buk zwyczajny	Aktywna		3	5,5	5,2	22,46		
48	Buk zwyczajny	Aktywna		4	6,9	6,3	34,14		
48	Buk zwyczajny	Aktywna		5	6,5	6,0	30,63		
48	Buk zwyczajny	Aktywna		6	6,1	5,4	25,87		
48	Buk zwyczajny	Aktywna		7	7,0	6,6	36,29		
48	Buk zwyczajny	Aktywna		8	7,5	7,1	41,82		
48	Buk zwyczajny	Aktywna		9	6,7	5,9	31,05		
48	Buk zwyczajny	Aktywna		10	6,5	5,7	29,10		
48	Buk zwyczajny	Aktywna		11	4,8	4,6	17,34		
48	Buk zwyczajny	Aktywna		12	5,5	5,1	22,03		
48	Buk zwyczajny	Aktywna		13	6,3	6,0	29,69		
49	Buk zwyczajny	Aktywna	19	1	4,8	4,2	15,83	340,39	36,42
49	Buk zwyczajny	Aktywna		2	8,6	6,8	45,93		
49	Buk zwyczajny	Aktywna		3	7,2	6,5	36,76		
49	Buk zwyczajny	Aktywna		4	6,8	6,1	32,58		

49	Buk zwyczajny	Aktywna		5	7,3	6,5	37,27		
49	Buk zwyczajny	Aktywna		6	6,5	5,5	28,08		
49	Buk zwyczajny	Aktywna		7	8,1	6,9	43,90		
49	Buk zwyczajny	Aktywna		8	7,6	6,8	40,59		
49	Buk zwyczajny	Aktywna		9	6,6	6,2	32,14		
49	Buk zwyczajny	Aktywna		10	6,1	5,7	27,31		
50	Buk zwyczajny	Aktywna	23	1	6,3	5,7	28,20	395,46	42,16
50	Buk zwyczajny	Aktywna		2	6,9	6,0	32,52		
50	Buk zwyczajny	Aktywna		3	7,2	5,6	31,67		
50	Buk zwyczajny	Aktywna		4	5,8	5,2	23,69		
50	Buk zwyczajny	Aktywna		5	7,9	7,2	44,67		
50	Buk zwyczajny	Aktywna		6	7,1	6,4	35,69		
50	Buk zwyczajny	Aktywna		7	5,8	5,2	23,69		
50	Buk zwyczajny	Aktywna		8	6,8	6,0	32,04		
50	Buk zwyczajny	Aktywna		9	7,5	6,9	40,64		
50	Buk zwyczajny	Aktywna		10	7,3	6,7	38,41		
50	Buk zwyczajny	Aktywna		11	6,6	6,2	32,14		
50	Buk zwyczajny	Aktywna		12	6,7	6,1	32,10		
51	Buk zwyczajny	Aktywna	21	1	8,2	7,4	47,66	409,74	40,62
51	Buk zwyczajny	Aktywna		2	6,8	6,3	33,65		
51	Buk zwyczajny	Aktywna		3	6,2	6,0	29,22		
51	Buk zwyczajny	Aktywna		4	6,4	5,8	29,15		
51	Buk zwyczajny	Aktywna		5	5,9	5,3	24,56		

51	Buk zwyczajny	Aktywna		6	7,2	6,8	38,45		
51	Buk zwyczajny	Aktywna		7	6,9	6,4	34,68		
51	Buk zwyczajny	Aktywna		8	7,3	6,0	34,40		
51	Buk zwyczajny	Aktywna		9	6,5	5,6	28,59		
51	Buk zwyczajny	Aktywna		10	2,8	2,4	5,28		
51	Buk zwyczajny	Aktywna		11	6,1	5,8	27,79		
51	Buk zwyczajny	Aktywna		12	6,3	5,6	27,71		
51	Buk zwyczajny	Aktywna		13	5,6	3,8	16,71		
51	Buk zwyczajny	Aktywna		14	7,0	5,8	31,89		
52	Buk zwyczajny	Aktywna	22	1	6,6	6,4	33,18	415,53	43,44
52	Buk zwyczajny	Aktywna		2	6,1	5,4	25,87		
52	Buk zwyczajny	Aktywna		3	7,2	6,3	35,63		
52	Buk zwyczajny	Aktywna		4	8,3	5,2	33,90		
52	Buk zwyczajny	Aktywna		5	7,3	5,6	32,11		
52	Buk zwyczajny	Aktywna		6	6,8	6,1	32,58		
52	Buk zwyczajny	Aktywna		7	6,4	5,8	29,15		
52	Buk zwyczajny	Aktywna		8	6,5	6,1	31,14		
52	Buk zwyczajny	Aktywna		9	7,4	6,8	39,52		
52	Buk zwyczajny	Aktywna		10	6,4	4,7	23,62		
52	Buk zwyczajny	Aktywna		11	7,2	6,9	39,02		
52	Buk zwyczajny	Aktywna		12	6,5	5,9	30,12		
52	Buk zwyczajny	Aktywna		13	6,3	6,0	29,69		
53	Buk zwyczajny	Aktywna	20	1	6,0	5,8	27,33	343,70	39,95

53	Buk zwyczajny	Aktywna		2	7,8	6,4	39,21		
53	Buk zwyczajny	Aktywna		3	7,2	6,2	35,06		
53	Buk zwyczajny	Aktywna		4	6,6	6,4	33,18		
53	Buk zwyczajny	Aktywna		5	7,0	6,3	34,64		
53	Buk zwyczajny	Aktywna		6	6,7	6,0	31,57		
53	Buk zwyczajny	Aktywna		7	6,2	5,5	26,78		
53	Buk zwyczajny	Aktywna		8	5,9	5,2	24,10		
53	Buk zwyczajny	Aktywna		9	6,4	5,5	27,65		
53	Buk zwyczajny	Aktywna		10	6,6	6,2	32,14		
53	Buk zwyczajny	Aktywna		11	6,8	6,0	32,04		
54	Buk zwyczajny	Aktywna	18	1	7,0	6,5	35,74	318,02	34,67
54	Buk zwyczajny	Aktywna		2	6,8	6,3	33,65		
54	Buk zwyczajny	Aktywna		3	6,5	5,8	29,61		
54	Buk zwyczajny	Aktywna		4	7,2	5,9	33,36		
54	Buk zwyczajny	Aktywna		5	6,4	6,1	30,66		
54	Buk zwyczajny	Aktywna		6	6,3	5,8	28,70		
54	Buk zwyczajny	Aktywna		7	6,9	6,6	35,77		
54	Buk zwyczajny	Aktywna		8	5,8	5,4	24,60		
54	Buk zwyczajny	Aktywna		9	7,4	6,4	37,20		
54	Buk zwyczajny	Aktywna		10	6,2	5,9	28,73		
55	Buk zwyczajny	Aktywna	21	1	6,1	5,6	26,83	351,05	38,89
55	Buk zwyczajny	Aktywna		2	7,3	6,8	38,99		
55	Buk zwyczajny	Aktywna		3	6,9	6,5	35,23		

55	Buk zwyczajny	Aktywna		4	6,1	5,4	25,87		
55	Buk zwyczajny	Aktywna		5	5,8	5,2	23,69		
55	Buk zwyczajny	Aktywna		6	7,1	6,1	34,02		
55	Buk zwyczajny	Aktywna		7	6,6	5,3	27,47		
55	Buk zwyczajny	Aktywna		8	6,5	5,7	29,10		
55	Buk zwyczajny	Aktywna		9	5,7	5,5	24,62		
55	Buk zwyczajny	Aktywna		10	6,3	5,6	27,71		
55	Buk zwyczajny	Aktywna		11	6,1	5,4	25,87		
55	Buk zwyczajny	Aktywna		12	6,5	6,2	31,65		
56	Buk zwyczajny	Aktywna	23	1	6,1	5,6	26,83	410,80	41,97
56	Buk zwyczajny	Aktywna		2	6,8	6,2	33,11		
56	Buk zwyczajny	Aktywna		3	7,4	5,8	33,71		
56	Buk zwyczajny	Aktywna		4	7,7	6,4	38,70		
56	Buk zwyczajny	Aktywna		5	6,9	6,1	33,06		
56	Buk zwyczajny	Aktywna		6	6,2	5,5	26,78		
56	Buk zwyczajny	Aktywna		7	5,8	5,1	23,23		
56	Buk zwyczajny	Aktywna		8	6,3	5,4	26,72		
56	Buk zwyczajny	Aktywna		9	6,5	5,4	27,57		
56	Buk zwyczajny	Aktywna		10	7,0	5,9	32,44		
56	Buk zwyczajny	Aktywna		11	6,9	6,2	33,60		
56	Buk zwyczajny	Aktywna		12	7,5	6,5	38,29		
56	Buk zwyczajny	Aktywna		13	7,2	6,5	36,76		
57	Buk zwyczajny	Aktywna	20	1	6,5	6,1	31,14	333,26	36,72

57	Buk zwyczajny	Aktywna		2	5,6	5,0	21,99		
57	Buk zwyczajny	Aktywna		3	4,8	4,2	15,83		
57	Buk zwyczajny	Aktywna		4	7,3	6,9	39,56		
57	Buk zwyczajny	Aktywna		5	6,4	5,6	28,15		
57	Buk zwyczajny	Aktywna		6	8,0	6,8	42,73		
57	Buk zwyczajny	Aktywna		7	6,2	5,8	28,24		
57	Buk zwyczajny	Aktywna		8	6,7	6,1	32,10		
57	Buk zwyczajny	Aktywna		9	4,6	4,3	15,54		
57	Buk zwyczajny	Aktywna		10	6,0	5,5	25,92		
57	Buk zwyczajny	Aktywna		11	5,6	5,2	22,87		
57	Buk zwyczajny	Aktywna		12	6,3	5,9	29,19		
58	Buk zwyczajny	Aktywna	22	1	7,7	6,5	39,31	370,39	40,48
58	Buk zwyczajny	Aktywna		2	6,4	6,1	30,66		
58	Buk zwyczajny	Aktywna		3	6,8	6,4	34,18		
58	Buk zwyczajny	Aktywna		4	6,2	5,6	27,27		
58	Buk zwyczajny	Aktywna		5	5,6	5,1	22,43		
58	Buk zwyczajny	Aktywna		6	7,9	6,4	39,71		
58	Buk zwyczajny	Aktywna		7	6,7	6,3	33,15		
58	Buk zwyczajny	Aktywna		8	6,0	5,5	25,92		
58	Buk zwyczajny	Aktywna		9	5,1	4,5	18,02		
58	Buk zwyczajny	Aktywna		10	5,4	5,2	22,05		
58	Buk zwyczajny	Aktywna		11	7,6	7,2	42,98		
58	Buk zwyczajny	Aktywna		12	6,8	6,5	34,71		

59	Buk zwyczajny	Aktywna	19	1	6,1	5,8	27,79	322,97	36,34
59	Buk zwyczajny	Aktywna		2	5,8	5,4	24,60		
59	Buk zwyczajny	Aktywna		3	7,1	5,7	31,79		
59	Buk zwyczajny	Aktywna		4	6,3	5,9	29,19		
59	Buk zwyczajny	Aktywna		5	6,9	6,3	34,14		
59	Buk zwyczajny	Aktywna		6	5,6	5,1	22,43		
59	Buk zwyczajny	Aktywna		7	7,4	6,5	37,78		
59	Buk zwyczajny	Aktywna		8	6,2	5,2	25,32		
59	Buk zwyczajny	Aktywna		9	6,5	6,0	30,63		
59	Buk zwyczajny	Aktywna		10	6,8	6,1	32,58		
59	Buk zwyczajny	Aktywna		11	6,3	5,4	26,72		
60	Buk zwyczajny	Aktywna	21	1	5,7	5,0	22,38	401,15	41,73
60	Buk zwyczajny	Aktywna		2	7,2	6,4	36,19		
60	Buk zwyczajny	Aktywna		3	6,5	6,1	31,14		
60	Buk zwyczajny	Aktywna		4	6,1	5,5	26,35		
60	Buk zwyczajny	Aktywna		5	5,9	5,6	25,95		
60	Buk zwyczajny	Aktywna		6	4,7	4,3	15,87		
60	Buk zwyczajny	Aktywna		7	6,3	5,3	26,22		
60	Buk zwyczajny	Aktywna		8	5,9	5,1	23,63		
60	Buk zwyczajny	Aktywna		9	8,4	5,3	34,97		
60	Buk zwyczajny	Aktywna		10	6,8	6,3	33,65		
60	Buk zwyczajny	Aktywna		11	5,2	4,5	18,38		
60	Buk zwyczajny	Aktywna		12	6,5	5,6	28,59		

60	Buk zwyczajny	Aktywna		13	7,3	6,6	37,84		
60	Buk zwyczajny	Aktywna		14	7,6	6,7	39,99		